

53/02

前 言

本书由兵器工业部机动技安局组织编写，目的在于提高技安管理干部的技术安全知识和技安管理水平。本书可作为技安管理人员、生产技术人员培训教材，也可供从事弹药生产、民用爆破、石油射孔等方面工程技术人员学习使用。

爆炸是一种极其迅速的能量释放过程。在这个过程中，炸药的内在化学能转变成机械功，通过高压爆轰产物、冲击波以及杀伤破片或聚能流等对外界进行破坏。但是爆炸在国民经济中，尤其是在国防建设方面有着重要的应用。为了进行安全生产和管理，必须了解爆炸的基本现象，熟悉爆炸的基本原理，掌握爆炸的客观规律。

本书主要阐述炸药爆炸的基本原理和它对外界的作用，其内容包括：爆炸的三大特征，炸药的各种感度，炸药的爆炸过程及其参数的计算，爆炸空气冲击波的作用和设防安全距离，在岩土中爆炸的现象和地震安全距离，以及杀伤、聚能效应等。读者通过本书的学习，可以掌握爆炸的基本知识，提高分析和处理问题的能力。

本书初稿曾在兵器工业部机动技安局举办的技术安全培训班上两次试用，并广泛征求了意见，这为本书正式出版打下了一定基础。

全书共分十二章。第一、二、四、五、六、七、九、十一和十二章由张守中编写，第三、八章由赵衡阳编写，第十章由孙业斌编写。张守中任主编，王一武同志进行了审校。

本书在试用和编写过程中，得到了原兵器工业部刘化民同志的热情支持和指导，对此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，难免存在一些错误和不足之处，欢迎读者批评指正。

目 录

第一章	炸药的爆炸	1
§ 1-1	爆炸现象	1
§ 1-2	炸药爆炸的三大特征	3
§ 1-3	化学爆炸与其他形式化学反应的区别	7
§ 1-4	炸药的分类	9
§ 1-5	炸药爆炸性能的标志	15
第二章	热力学知识	19
§ 2-1	气体的分子运动	19
§ 2-2	理想气体状态方程	21
§ 2-3	状态参数	24
§ 2-4	热力学第一定律	26
§ 2-5	比热	31
§ 2-6	焓和熵	35
§ 2-7	热力学第二定律	40
§ 2-8	各种状态变化过程	43
第三章	炸药的起爆及感度	50
§ 3-1	炸药的热起爆及热感度	50
§ 3-2	炸药的机械起爆及机械感度	61
§ 3-3	炸药的冲击起爆及冲击波感度	80
§ 3-4	炸药的静电形成原理和静电感度	95
第四章	爆炸反应	106
§ 4-1	炸药的氧平衡	106
§ 4-2	爆炸反应方程式	109

W

§ 4-3	爆容·····	115
§ 4-4	爆热·····	117
§ 4-5	爆温·····	134
第五章	波·····	148
§ 5-1	三大守恒定律·····	148
§ 5-2	弱波·····	154
§ 5-3	冲击波·····	172
§ 5-4	波的相互作用·····	199
第六章	爆轰波理论·····	223
§ 6-1	爆轰波·····	223
§ 6-2	气相爆轰参数的计算·····	238
§ 6-3	凝聚相炸药爆轰参数近似理论计算·····	248
§ 6-4	瞬时爆轰·····	256
§ 6-5	爆速和爆压的工程计算·····	260
§ 6-6	混合炸药爆速和爆压计算经验公式·····	268
§ 6-7	爆速的实验测定·····	277
§ 6-8	爆压的实验测定·····	284
§ 6-9	爆轰反应机理·····	302
§ 6-10	影响爆轰传播的因素·····	305
§ 6-11	燃烧转变为爆轰·····	319
第七章	炸药的威力和猛度·····	334
§ 7-1	炸药的威力·····	334
§ 7-2	炸药的猛度·····	339
第八章	爆轰产物的直接作用·····	347
§ 8-1	爆轰产物的一维流动·····	347
§ 8-2	炸药爆炸对接触介质直接作用的初始值·····	366
第九章	爆炸空气冲击波·····	375
§ 9-1	空气中爆炸的基本现象·····	375
§ 9-2	相似理论·····	388

§ 9-3	爆炸空气冲击波随距离衰减时参数的计算	394
§ 9-4	空气冲击波的测定	414
§ 9-5	空气冲击波在目标上的反射	418
§ 9-6	大药量爆炸时冲击波的环流作用	429
§ 9-7	空气冲击波的破坏作用	439
§ 9-8	冲击波设防安全距离	444
§ 9-9	殉爆	458
§ 9-10	危险建筑物(A级)设防安全距离的确定	472
第十章	杀伤作用	488
§ 10-1	杀伤弹爆炸的基本现象	489
§ 10-2	杀伤破片的计算	492
§ 10-3	杀伤标准及确定原则	514
§ 10-4	影响破片杀伤作用的因素	520
§ 10-5	控制破片的方法	524
第十一章	聚能效应	531
§ 11-1	聚能现象	531
§ 11-2	射流的速度和质量	543
§ 11-3	破甲深度	551
§ 11-4	影响破甲威力的因素	557
第十二章	岩土中爆炸	579
§ 12-1	岩土中爆炸的基本现象	579
§ 12-2	爆破作用区	582
§ 12-3	地下爆炸安全距离	598
§ 12-4	岩土中爆炸的影响因素	614

第一章 炸药的爆炸

§ 1-1 爆炸现象

所谓爆炸，是大量能量在有限体积和极短时间内迅速释放或急剧转化的现象。例如：炸药化学能量的高速释放会产生爆炸；高速碰撞时，弹体动能急剧变化，也能产生爆炸；高速粒子束（如强激光束、相对论电子束、重离子束）作用于物质上，同样能形成爆炸；工业技术上的高压放电，大型铸件在水中刷冷清沙，高压容器受热，乙炔管道回火，都会产生爆炸；煤粉或面粉悬浮于空气中、天然气与空气的混合物，在一定条件下也会产生爆炸；自然界中的雷电、地震、火山爆发，也都是爆炸现象。

爆炸现象就其产生的原因来说，可以分成化学爆炸、物理爆炸和核爆炸。

过热的蒸汽锅炉爆炸是典型的物理爆炸现象。在这种爆炸中，过热的水迅速转变为蒸汽，而大量蒸汽的产生使锅炉内压力不断提高，当蒸汽压力超过锅炉能够承受的程度时，锅炉破裂，形成爆炸。

大自然中的雷电属于物理爆炸现象，其能源为电能。带有不同电荷的两块云彩，当距离比较近时，发生强烈的放电现象，电位差在 μs 数量级时间内拉平，使放电区达到极其巨大的能量密度和数万度的高温，因而导致了放电区空气压力的急剧升高，并在周围空气中形成强烈的扰动。

炸药的爆炸，石油液化气体与一定比例的空气混合物所引起的爆炸属于化学爆炸。化学爆炸是通过化学反应将物质内潜在的化学能，在极短时间内迅速释放出来，转变成热能，使爆轰产物由于达到 10^3K 以上的高温和 10^{10}Pa 以上的压力，而迅速向外膨胀，在空气中形成冲击波，并对外做功。

原子弹、氢弹的爆炸属于核爆炸。原子弹是用铀 235 或钚 239 的裂变来实现的。核裂变时，铀 235 或钚 239 的原子核在中子的作用下分裂成为较轻的原子核，放出大量的核能。氢弹是用氘、氚或锂的聚变来实现的。核聚变时，氘、氚或锂的原子核在极高温度的条件下结合成为较重的原子核，也能放出大量的核能。1g 铀 235 全部进行核裂变放出的能量相当于 $2 \times 10^7\text{kg}$ 梯恩梯的能量，1g 氘元素全部进行核聚变时放出的能量相当于 $1.1 \times 10^8\text{kg}$ 梯恩梯的能量。核爆炸时原子核反应区的温度达到 10^7K ，压力达到 10^{10}Pa 以上，在这样高的温度和压力的作用下，其能量以冲击波、光辐射和贯穿辐射等形式表现出来，对外界产生极其严重的破坏。因此，核爆炸是更加剧烈的爆炸现象。

综上所述，一般地说，爆炸是一种极其迅速的物理或化学的能量释放过程，在此过程中，系统的潜能转变为运动的机械能，然后对外做功。因而爆炸现象表现出两个阶段，在第一个阶段中，物质的能量以一定的方式转变为强烈的压缩能；在第二个阶段中，压缩能急剧地向外膨胀，在膨胀过程中对外做功，引起被作用介质的变形、移动和破坏。

爆炸的主要征象是爆炸点周围介质中压力突然急剧上升，这个突然上升的压力是破坏作用的直接因素。爆炸的对外征象是由于介质振动而产生的声响效应。

§ 1-2 炸药爆炸的三大特征

炸药是这样一种物质，在一定的外界条件作用下，能够进行高速的化学反应，放出热量，并且产生大量的气体产物。

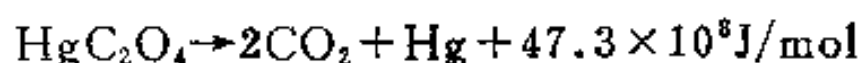
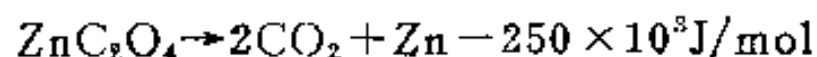
拿常见的鞭炮来说，纸卷的外壳中间装填着黑火药。黑火药就是一种炸药。当点燃引药捻，黑火药迅速燃烧，产生化学反应，并放出热量和气体产物。大量的高压气体胀破纸壳，同时发出声响和闪光，这就完成了爆炸的全过程。

从上述现象看出，炸药爆炸有三个特征，即反应的放热性、过程的高速度和反应过程中生成大量气体产物。这三个特征也是炸药爆炸时所必须具备的要素，缺一不可产生爆炸现象。同样也只有具备这三个要素的物质，才能称之为炸药。

一、反应的放热性

放热是炸药爆炸的能源。爆炸反应只有在炸药自身提供能量的条件下才能自动进行。没有这个条件，爆炸过程就根本不能发生；没有这个条件，反应也就不能自行延续，因而也不可能出现爆炸过程的反应传播。显然，依靠外界供给能量来维持其分解的物质，不可能具有爆炸的性质。

例如，草酸盐的分解反应可以作为典型例子：



第一种反应是吸热反应，只有在外界不断加热的条件下才能进行，因而不具有爆炸性质；第二种反应具有爆炸性，但因放出的热量不大，爆炸性不强；第三种反应具有显著的

爆炸性质。

爆炸反应所放的热量称为爆热。它是爆炸破坏作用的能源，是炸药爆炸做功能力的标志。

二、过程的高速度

过程的高速度是爆炸反应与一般化学反应的重要区别点。炸药爆炸反应大约是在 10^{-8} s 或 10^{-7} s 数量级的时间内进行的。虽然炸药的能量贮藏量并不比一般燃料大，但由于反应过程的高速度，使炸药爆炸时能够达到一般化学反应所无法比拟的高得多的能量密度。

表 1-2-1 提供了石油、煤和几种炸药的放热量和能量密度数据。

表 1-2-1 炸药和一般燃料的放热量和能量密度

物质名称	单位质量物质的放热量 (J/kg $\times 10^6$)	单位体积炸药或燃料 空气混合物的能量密度 (J/L $\times 10^3$)
煤	32.66	3.60
汽油	41.87	3.68
黑火药	2.93	2805
梯恩梯	4.19	6700
黑索金	5.56	10467

例如，1 kg 煤块燃烧可以放出 3.266×10^7 J 的热量，这个热量比 1 kg 梯恩梯炸药爆炸放出的热量要多几倍，可是这块煤燃烧的时间大约需要几分钟到几十分钟才能完成，在这段时间内放出的热量不断以热传导和辐射的形成传递出去，因而虽然煤的放热量很多，但是单位时间的放热量并不多，同时还要注意到煤的燃烧是与空气中的氧进行化学反应而完成的。1 kg 煤的完全反应就需要 2.67kg 的氧，这样多的氧必

须由 9m^3 的空气才能提供，因而作为燃烧原料的煤和空气的混合物，单位体积所放出的热量也只有 3600J/L ，所以能量密度很低。

爆炸反应就完全相反，炸药反应一般都是以 $(5\sim 8)\times 10^8\text{m/s}$ 的速度进行。一块 10cm 见方的炸药爆炸反应完毕也就需要 $10\mu\text{s}$ 的时间。由于反应速度极快，虽然总放热量不是太大，但在这样短暂时间内的放热量却比一般燃料燃烧时在同样时间内放出的热量高出上千万倍。同时，由于爆炸反应无须空气中的氧参加，在反应所进行的短暂时间内反应放出的热量来不及散出，以致可以认为全部热量都集聚在炸药爆炸前所占据的体积内，这样单位体积所具有的热量就达到 10^6J/L 以上，比一般燃料燃烧要高数千倍。

由于过程的高速度，使炸药内所具有的能量在极短时间内放出，达到极高能量密度，所以炸药爆炸具有巨大做功功率和强烈的破坏作用。

三、反应过程生成气体产物

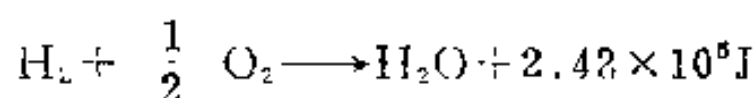
反应过程中有气体产物生成，是炸药爆炸反应的又一重要特点。爆炸瞬间炸药定容地转化为气体产物，其密度要比正常条件下气体的密度大几百倍到几千倍，也就是说正常情况下这样多体积的气体被强烈压缩在炸药爆炸前所占据的体积内，从而造成 $(10^8\sim 10^{10})\text{Pa}$ 以上的高压。同时由于反应的放热性，这样处于高温、高压下的气体产物必然急剧的膨胀，把炸药的位能变成气体运动的动能，对周围介质做功，在这个过程中，气体产物既是造成高压的原因，又是对外界介质做功的工质。表 1-2-2 提供了几种炸药爆炸生成的气体量。

表1-2-2 某些炸药爆炸气体产物在标准条件下的体积(L)

炸 药	1 kg炸药放出的气体产物	1 L炸药放出的气体产物
梯恩梯	740	1180
特屈儿	760	1290
泰安	790	1320
黑索金	908	1630
奥克托金	908	1720

由表 2 看出, 1 kg 猛炸药爆炸生成的气体换算到标准状态($1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$, 273K)下的气体体积为 $7000 \sim 10000 \text{L}$, 这个体积为炸药爆炸前所占体积的 $1200 \sim 1700$ 倍。

当气体爆炸时, 体积一般不会增大, 例如氢、氧混合爆炸就是这样一个例子。



爆炸产物体积在标准状态下比爆炸前减少了三分之一。但是由于反应速度很快, 而且放出大量热量加热反应产物, 使其压力提高到 10^6Pa 以上, 然后再迅速向外膨胀做功。

爆炸过程生成气体产物的重要性, 还可以通过一系列不生成气体产物的反应来看出。例如金属硫化物的形成反应:



或铝热剂反应



尽管反应非常迅速, 且放出很多的热量, 后一个反应放出的热量足以把反应产物加热到 3000K , 但是终究由于没有气体产物生成, 没有把热能转变为机械能的媒介, 无法对外做功, 所以不具有爆炸性。

从上面的讨论可以看出，对于爆炸来说，放热性、高速度、生成气体产物是缺一不可的，只有在三个特征同时具备的条件下，化学反应过程才具有爆炸的特性。

§ 1-3 化学爆炸与其他形式化学反应的区别

炸药在不同的条件下能发生三种基本形式的化学反应过程，即热分解、燃烧和爆炸。

热分解是炸药在通常的环境温度条件下不断缓慢进行着的自身分解反应。这种反应进行的速度取决于炸药所处的环境温度，温度愈高，反应速度愈快。这种化学反应没有什么实用价值。并且，热分解严重的炸药安定性差，不易长期储存。

燃烧是一种激烈的化学反应形式。这种化学反应以波的形式在炸药中进行，此波称为燃烧波。燃烧波的传播速度，就是燃烧速度。燃烧速度一般为几毫米每秒至几百米每秒。

爆炸是最激烈的一种化学反应形式，这种化学反应以爆炸波的形式进行。一般炸药的爆炸速度为 $5000 \sim 8000 \text{ m/s}$ 。

爆炸与热分解的主要区别在于：

1. 热分解是在整个炸药中展开的，没有集中的反应区域；而爆炸是在炸药局部发生的，并以波的形式在炸药中传播。

2. 热分解在不受外界任何特殊条件作用时，一直不断地自动进行；而爆炸在外界特殊条件作用下才能发生。

3. 热分解与环境温度关系很大，其规律符合阿累尼乌斯定律，化学反应速度常数与温度成指数关系，即随着温度的升高，热分解速度将按指数规律迅速增加；而爆炸与环境温度无关。

爆炸与燃烧的主要区别在于：

1. 燃烧与爆炸虽然都是以波的形式传播, 但传播速度绝然不同, 燃烧的速度为几毫米每秒到几米每秒, 最大也只有几百米每秒, 也就是说燃烧的速度大大低于原始炸药中的声速; 而爆轰的速度通常是几千米每秒, 也就是说爆炸的速度一定大于原始炸药中的声速。

2. 从传播连续进行的机理来看, 燃烧时化学反应区放出的能量是通过热传导、辐射和气体产物的扩散传入下一层炸药, 激起未反应的炸药进行化学反应, 使燃烧连续进行; 而在爆轰时, 化学反应区放出的能量以压缩波的形式提供给前沿冲击波, 维持前沿冲击波的强度, 然后借助于前沿冲击波的冲击压缩作用激起下一层炸药进行化学反应, 使爆轰连续进行。

3. 从反应产物的压力来看, 燃烧产物的压力通常很低, 对外界显示不出力的作用; 而爆炸时产物压力可以达到 10^{10} Pa 以上, 爆炸向四周传出冲击波, 有强烈的力效应。

4. 从反应产物质点运动方向来看, 燃烧产物质点运动方向与燃烧传播的方向相反; 而爆炸产物质点运动方向与爆轰传播的方向相同。

5. 从炸药本身条件来看, 随着装药密度的增加, 炸药颗粒间的孔隙度减小, 燃烧速度下降; 而对于爆轰来说, 随着装药密度的增加, 单位体积物质化学反应时放出的能量增加, 使之对于下一层炸药的冲压加强, 因而爆轰速度增加。

6. 从外界条件影响来看, 燃烧易受外界压力和初温的影响, 其中压力的影响更为严重, 当外界压力低时, 燃烧速度很慢, 随着外界压力的提高, 燃烧速度加快, 当外界压力过高时, 燃烧变得不稳定, 以致转变成爆轰; 爆轰基本上不受外界条件的影响。

本书对于炸药爆炸习惯上采用了两个名词: 爆炸和爆轰。

一般来说，具有爆炸三个特征（放热性、高速度、生成气体产物）的化学反应，皆称为爆炸，其爆炸传递的速度可能是变化的；爆轰除了具备爆炸的三个特征之外，还要求传播的速度是恒定的。因而，爆炸一般笼统定义具有三大特征的化学反应，而爆轰专门定义传播稳定的爆炸过程。

§ 1-4 炸药的种类

前面讲了爆炸的三大特征，以及爆炸与其它化学反应的区别。下面大致介绍有关炸药的一些知识。

什么是炸药呢？广义地说，能够进行化学爆炸的物质称之为炸药。然而，这种说法与实际应用中存在有很大的差别。一些物质虽然在一般条件下不作为炸药使用，但是在特定条件下却能进行爆炸反应。炸药的缓慢分解反应、燃烧和爆轰虽然各有不同，但是也有着紧密地内在联系，在一定条件下缓慢的化学反应能够转变为燃烧，燃烧在一定条件下又能转变为爆轰。

炸药的种类，可以按照应用特性划分，也可以按照化学结构划分。由于本书主要内容是爆炸作用原理，而不是炸药性质，因而对炸药只是按照应用的范围进行分类，并且介绍一下常用猛炸药的种类。

一、炸药分类

按照应用范围，炸药可以划分成四大类：起爆药，猛炸药，火药和烟火药。

1. 起爆药

主要用途是作为爆炸过程的引爆剂，用来激发猛炸药进行爆轰。

起爆药主要具有这样的特性，它在不大的外界热作用或机械作用之下就能进行爆轰，并且爆轰转化的过程非常短暂，而且以很小的药量就能达到稳定爆轰。对于某些起爆药（如迭氮化铅）来说，实际上不存在过程的加速期。也就是说，在不大的外界作用之下，起爆药可以与装药大小无关地、不停滞地立即进行爆轰。

起爆药的感度最大，也就是说最危险，使用和处理时必须十分小心。

常用的起爆药有：

雷酸重金属盐，主要代表如雷汞；

迭氮化物，主要代表如迭氮化铅；

斯蒂夫酸重金属盐，主要代表如斯蒂夫酸铅；

乙炔化物，主要代表如乙炔银。

2. 猛炸药

主要用途是作为各种弹药和爆破器材的主要装药。

这类炸药与起爆药不同，它们具有相当大的稳定性，在相当大的外力作用下，通常是在起爆药的激发之下，才能引起爆轰。并且这类炸药的爆轰转化过程，即从激起爆炸至达到稳定爆轰的时间比起爆药长得多。

猛炸药是实际使用中通常所说的炸药。

3. 火药

主要用途是作为发射药，用来发射枪弹和炮弹，以及作为推进火箭的燃料。

火药主要的特性是能够进行稳定地、迅速地燃烧。

常用的火药分两类：

一类是硝化纤维素火药（无烟火药），由硝化棉、硝化甘油为主要成分，外加部分溶剂胶合而成；

另一类是机械混合火药，主要是硝石、硫磺和炭的混合物，如典型配方为 75% 硝酸钾、10% 硫磺和 15% 木炭。

4. 烟火药

主要用途是作为照明弹、烟幕弹、燃烧弹、信号弹的装药，以及指示弹道的泄光剂。

烟火药本质上属于炸药，在一定条件下能够进行爆轰，但是它的主要化学反应形式是燃烧，并且在燃烧的同时产生相应的烟火效应。

常用的烟火药通常是由氧化剂、有机燃料或金属燃料和粘合剂混合而成。

二、常用猛炸药的种类

常用猛炸药包括单质炸药和混合炸药两大类。单质炸药是一种成分的爆炸物质，混合炸药是由两种以上的成分所组成的爆炸物质。

1. 单质炸药

单成分的爆炸物质，它们是含氧的有机化合物，多数都是由碳、氢、氧、氮四种元素组成，它们共同的特点是分子结构中具有某种特殊的基团，这种基团是不稳定的，它使得炸药分子各元素之间不是按照最大键能的形式进行结合，因而在适当的外力（热、冲击等）作用之下，能够迅速打开化学键，也就是说进行剧烈地分解反应，放出热量，重新生成按照较大键能结合的、化学上稳定的产物。

按照化学结构，主要介绍三种。

（1）芳香族硝基化合物

芳香族硝基化合物的分子结构是苯环，通过碳原子与硝基相连接，由于 $-C-NO_2$ 结合得相当牢固，因而这类炸药

具有相当好的化学稳定性和较低的机械感度。典型的炸药有梯恩梯、特屈儿、苦味酸等。

梯恩梯分子式为 $C_7H_5(NO_2)_3$ ，是最广泛应用的一种炸药。具有中等的爆炸威力，安定性好，感度低，装药工艺性好，适用于铸装、压装、螺装成型，并且原材料来源广泛，价格便宜。

特屈儿分子式为 $C_7H_5N(NO_2)_4$ ，也是应用很广泛的一种炸药。爆炸威力高于梯恩梯，而低于黑索金；熔化时易分解，不能用于铸装，而只能用于压装；爆轰感度高，用 0.025g 迭氮化铅就可引爆，广泛地用作传爆药柱。

(2) 硝胺类化合物

硝胺类化合物的分子结构是杂环，通过氮原子与硝基相连接，由于 $-N-NO_2$ 分解时比 $-C-NO_2$ 分解时多生成一倍的氮气，炸药的氧平衡性能好，因而爆炸强度比硝基化合物高； $-N-NO_2$ 结合的牢固性比 $-C-NO_2$ 结合的牢固性低，因而这类炸药的化学稳定性比硝基化合物的化学稳定性差，机械感度比硝基化合物的机械感度高。典型的炸药有黑索金、奥克托金等。

黑索金的分子式是 $C_3H_5O_8N_6$ 。它是应用得最广泛的一种高能炸药。爆炸威力大，化学稳定性好，但由于机械感度大，不能单独使用，可以进行钝感或制成以黑索金为主体的混合炸药；能够压装成型，也能够与梯恩梯混合在一起进行铸装。

奥克托金的分子式是 $C_4H_8O_8N_8$ ，爆炸威力比黑索金的爆炸威力更大，但由于机械感度大，不能单独使用，可以制成混合炸药。

(3) 硝酸酯化合物

硝酸酯化合物的分子结构是直环，通过氧原子与硝基相连接，由于 $-O-NO_2$ 含氧多，这类炸药的氧平衡性能好，

因而爆炸强度比硝胺类化合物的爆炸强度更高， $-\text{O}-\text{NO}_2$ 结合牢固性最低，因而这类炸药的化学稳定性比硝胺类化合物的化学稳定性更差，机械感度比硝胺类化合物的机械感度更高。典型炸药如泰安。

泰安的分子式是 $\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4$ ，也是应用得很广泛的一种炸药。爆炸威力与黑索金的爆炸威力相当，机械感度大，多钝感后使用；泰安的爆轰感度比特屈儿的爆轰感度还高，用 0.01 g 迭氯化铅就能引爆，因而广泛用来装填雷管。

2. 混合炸药

炸药在实际使用中必须同时满足诸如爆炸性能、安全性能、装药工艺性能、长期贮存性以及生产经济性各方面的要求，否则无法直接应用，而对于单质炸药来说很难全面满足这些要求，所以实际应用中多是采用混合炸药。

混合炸药的种类很多，也可以按照不同的方式进行分类，此处我们不作精确地分类，而只是扼要地说一下常用混合炸药。

(1) 梯恩梯黑索金组成的混合炸药

由于黑索金具有较高的爆炸能量，梯恩梯具有较低的机械感度和较好的铸装工艺性能，因而梯恩梯和黑索金的混合物兼有二者的优点，是当前应用最广泛的一类混合炸药。尤其是美、英、法等西方国家，在各种榴弹、破甲弹、航弹、地雷等武器中普遍采用了这类混合炸药。

这类混合炸药中，随着黑索金含量的增加，其爆炸威力也增大，但是铸装工艺性相应地下降。常用的配比有梯恩梯 50/黑索金 50、梯恩梯 40/黑索金 60、梯恩梯 35/黑索金 65，西方国家在梯恩梯、黑索金混合物中加入钝感剂所制成的 B 炸药（梯恩梯 39.5/黑索金 59.5/蜡 1）也属于这一类型。

(2) 高爆压混合炸药

对于一些单质炸药，虽然爆压很高，但是由于某种原因，例如机械感度过高或成型性能不好，不能直接使用，需要在炸药中加入一些添加剂(钝感剂、粘接剂等)，构成高爆压混合炸药，这样既保证了原来单质炸药的爆炸性能，又全面满足了实际使用要求。

以黑索金为主体的高爆压混合炸药，当前已广泛应用，主要使用在破甲武器中。

目前常用的这类混合炸药如：

AⅨ-1(苏)，组成为黑索金95/蜡5；

8321(中)，组成为黑索金94/4*炸药3/聚醋酸乙烯脂2/硬脂酸1；

8701(中)，组成为黑索金95/地恩梯8/聚醋酸乙烯脂2/外加硬脂酸0.5。

(3) 高威力混合炸药

在单质炸药中加入铝粉，能大量地提高炸药的爆热，而构成高威力混合炸药。这类炸药广泛地使用在水下武器和对空武器的弹药中。

目前常用的这类混合炸药如：

HBX(美)，组成为B炸药40/梯恩梯38/钝感剂5/铝粉17；

AⅨ-2(苏)，组成为AⅨ-180/铝粉20；

8702(中)，组成为870180/铝粉20。

(4) 特种混合炸药

按照特种要求所研制的各种混合炸药，如塑性炸药、弹性炸药、泡沫炸药等。

§ 1-5 炸药爆炸性能的标志

由于炸药爆炸能够在极短时间内完成其分解反应，迅速地将本身所具有的化学能转变成热能，把反应产物立即加热到 $(3\sim 5)\times 10^3\text{K}$ 的高温，并在气体产物中造成 $(10\sim 30)\times 10^5\text{Pa}$ 的高压，使爆炸气体产物迅速向周围膨胀而做功。

为了定量地表示炸药爆炸的猛烈程度，以及表示炸药对外做功的能力，知道炸药爆炸放出的热量、爆炸传播速度、生成气体产物的数量以及爆炸产物所达到的温度与压力都是非常必要的。因而，全面评定炸药爆炸性能，经常采用与上述性能相对应的五个标志量，即爆热、爆速、爆容、爆温和爆压这五个爆炸性能标志量，简称为“五爆”。

1. 爆热

单位质量的炸药爆炸时所释放出的热量，称为爆热。通常以 1kg 炸药或 1mol 炸药所放出的热量来表示，其单位为 J/kg 或 J/mol 。

爆热是一个很重要的爆炸性能参数，它是炸药对外做功的能源。炸药爆热愈大，就表示炸药对外做功的能力愈大。

2. 爆温

炸药爆炸瞬间爆炸产物加热所达到的最高温度称为爆温，其单位可以用摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$ 或热力学温度 K 表示。

爆温取决于爆热和爆炸产物的组成。

3. 爆容

单位质量的炸药爆炸时所生成的气体产物在标准状态 ($1.0133\times 10^5\text{Pa}$, 273K) 下所占据的体积称为爆容。通常以 1kg 炸药为单位进行表示，其单位为 L/kg 。

由于气体产物是爆炸所放热量转变为机械功的工质，因

而爆容这个性能参数也是爆炸对外做功能力的一个标志。

4. 爆速

爆轰过程沿着炸药装药直线进行的速度，称为爆速，其单位为 m/s 。

炸药的爆炸过程是爆轰波在炸药中一层层地进行传播的过程。所谓爆速，也就是爆轰波在炸药装药中的传播速度。目前，在五个爆炸性能参数中以爆速的测量最为准确。

5. 爆压

爆轰产物在爆炸反应完成瞬间所具有的压强称为爆压，其单位为 Pa 。

由于在爆炸过程中，爆炸产物中的压力是不断变化的，我们所说的爆压是指爆轰波末端面（或爆炸化学反应区末端面）处所具有的压强。爆压是炸药爆炸瞬间猛烈破坏程度的标志。

除了采用上述“五爆”参数之外，在实际工作中还经常采用威力和猛度这样两个表示爆炸作用性能的参数。

1) 威力

威力是炸药对外做功的能力，主要取决于爆炸时放出的热量和所形成气体产物的多少。

炸药威力的理论示性数可以用炸药的潜能表示，或者用炸药的爆热和热功当量的乘积表示，实际上由于爆炸反应的不完全性以及爆炸放出的热量也不可能完全转变成机械功，因而这种表示只是一般性的。

实际应用中，炸药威力通常用铅块试验来评定，即将一定量的炸药放在规定为标准的铅块孔中进行爆炸，以爆炸后铅块孔扩张的体积大小来表示炸药的威力，或以梯恩梯的铅块扩孔体积为基准，用相对值来表示各种炸药的威力。

2) 猛度

猛度是指炸药进行局部破坏作用的能力。它主要取决于爆炸传播的速度和爆炸瞬间气体产物压力的大小。

炸药猛度的理论示性数可以用炸药爆炸时对其接触物体上的冲量来表示。

实际应用中，炸药猛度通常采用弹道摆来测定，即将一定量的炸药粘接在规定为标准的猛度摆上进行爆炸，以炸药爆轰产物传给摆体的冲量来表示炸药的猛度，或以梯恩梯的试验猛度值为基准，用相对值来表示各种炸药的猛度。

为了查用方便，现将常用炸药的爆炸性能数据列于表1-5-1。

表1-5-1 常用炸药的爆炸性能数据

炸 药	密度 (g/cm^3)	比容 ($l/kg \times 10^3$)	爆容 (l/kg)	爆速 (m/s)	爆压 ($Pa \times 10^8$)	威力 (相对值)	猛度 (相对值)
雷汞	4.42	1788	243	5400		51	
三氯化铝	4.48	1536	308	5600		89	
斯蒂夫酸铵	3.02	1912	388	5200		40	
特屈拉辛	1.05	2755	1190				
二硝基重氮酚	1.63	3433	865	6900		97	
梯恩梯	1.64	4400	750	6950	196	100	100
特屈儿	1.70	4860	760	7560	252	125	116
黑索金	1.80	6200	908	8754	347	150	135
奥克托金	1.90	6200	908	9100	380	145	
泰安	1.67	5800	790	8350	300	145	129
硝基胍	1.70	3020	1070	7650	250	104	95
苦味酸	1.71	4186	700	7350	220	101	107
苦味酸铵	1.55	3350		6850		99	91
地恩梯	1.52			6184	143	71	64

(续)

炸 药	密度 (g/cm^3)	爆热 ($\text{J}/\text{kg} \times 10^3$)	爆容 (L/kg)	爆速 (m/s)	爆压 ($\text{Pa} \times 10^3$)	威力 (相对值)	猛度 (相对值)
硝化甘油	1.59	6700	690	7580	225	140	
硝酸铵	1.73	1425	980			56	
AⅡ-1	1.68			8420	283	127	125
B炸药	1.68	5100		7800	275	130	132
8321炸药	1.707			8340	300	134	131
8701炸药	1.722	5110		8425	394	150	134
黑索金91/蜡9	1.59			8100	240	135	126
黑索金65/梯恩梯35	1.70	5050	845	7975	220	134	
黑索金60/梯恩梯40	1.70	5000	845	7900	276	133	132
黑索金50/梯恩梯50	1.68			7750	255	130	116
特屈儿75/梯恩梯25	1.60			7385	216	122	118
特屈儿70/梯恩梯30	1.60			7340	214	120	117
泰安50/梯恩梯50	1.67	5100	780	7700	241	122	121
硝酸铵50/梯恩梯50	1.62	2945	855	7000	200	124	52
二硝基奈50/梯恩梯50	1.45			5830	130	75	
黑索金30/特屈儿50/ 梯恩梯20	1.64			7655	243	132	127
AⅡ-2	1.769	6445	760	7954	260	150	116
8702炸药	1.815	6820		7989	268	156	125
黑索金65/铝32/添加剂3	1.904	7050		7879	249	142	118
黑索金24/梯恩梯80/铝16	1.77	5170		7119	221	147	

第二章 热力学知识

热力学主要研究能量由一种形式转变成另一种形式所遵循的法则。这些法则中主要是热力学第一定律和热力学第二定律，即能量转变、守恒定律和物体状态自发变化方向的定律。

在研究炸药爆轰过程以及爆炸对外界介质作用的问题上，需要借助于热力学的知识，因此本章先简要介绍一下热力学的基本概念。

§ 2-1 气体的分子运动

气体也象固体和液体一样，是由大量分子组成的。分子的尺寸很小，在标准条件下，1mol 气体内含有 6.025×10^{23} 个分子，这些气体分子一直处于不停的、独立的、杂乱无章的运动之中，物体的热能就是分子不规律运动的动能，因而分子的不规则运动又称为分子的热运动。

分子在作不规则的运动中，经常要发生相互的碰撞，在连续两次碰撞之间，分子所经历的路程平均约为 7×10^{-6} m，分子作不规则运动的平均速度约为 500 m/s，这样平均经过 1.4×10^{-10} s 的时间分子和分子间就会碰撞一次，即在 1s 内一个分子大约将会受到一百万万次碰撞。

由于分子的众多，运动的不规则性以及相互碰撞的频繁，无法辨别个别分子的具体作用，而只能确定大量分子的集群作用。所以在研究问题的过程中，并不关心个别分子的微观

运动，而只研究大量分子所组成一团气体的宏观运动。为了研究方便，通常采用连续性假设，即把气体看成中间没有空隙的可压缩的连续介质。在这种情况下，我们可以通过宏观参数对气体进行具体的数学描述。

气体的状态参数——温度、压力、密度都是分子运动的宏观量。温度是分子热运动动能的标志，压力是大量分子碰撞作用的体现，密度是单位体积内气体分子质量的总和。

温度，它的实质是分子热运动动能的标志，通常来说就是表示冷热的程度。较热的物体，分子热运动动能大，规定物体有较高的温度；较冷的物体，分子热运动动能小，规定物体有较低的温度。

常用温度有摄氏温度和热力学温度两种，摄氏温度以符号 $t(^{\circ}\text{C})$ 表示，它以水的冰点为零点，在水从冰点到沸点间分成一百等份，每份表示 1°C ；热力学温度以符号 $T(\text{K})$ 表示，它取摄氏零下 273.16°C 为其零点，按照气体分子运动的观点，热力学温度的零点是理想气体分子热运动停止时的温度。热力学温度 $T(\text{K})$ 与摄氏温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 之间的换算关系为

$$T(\text{K}) = 273.16 + t(^{\circ}\text{C})$$

工程应用上近似写成

$$T(\text{K}) = 273 + t(^{\circ}\text{C}) \quad (2-1-1)$$

压力是大量分子碰撞的体现，而压强是单位面积上作用的压力，以符号 p 表示，其单位为 Pa 。

密度是指单位体积内气体分子质量的总和。通常来说，密度就是单位体积内所含有的介质质量，以符号 ρ 表示。

假若气体中某个微元体积 ΔV 内，含有气体的质量为 Δm ，则其比值 $\frac{\Delta m}{\Delta V}$ 是气体在这个微元体积内的平均密度，

而气体中某点处的密度用极限来求……

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2-1-2)$$

式中 ΔV 是在研究点附近所取的微元体积， Δm 是此体积内的气体质量。密度的单位是 kg/m^3 。

密度的倒数叫做比容，即单位质量气体所占有的体积，常用符号 v 表示

$$v = \frac{1}{\rho}$$

比容的单位是 m^3/kg 。

§ 2-2 理想气体状态方程

所谓状态方程，就是在气体状态变化时，三个基本状态参数 T 、 p 、 v 之间变化规律的表达式。

气体是由大量分子组成的，分子之间也存在着相互作用力。但是，由于分子本身的尺寸更小，这大量的分子并不是挨得很紧的，而彼此之间的距离比本身的尺寸要大很多。例如在标准状态下，气体的密度大约是液体密度的一千分之一，假如设想液体的分子是紧密的排列在一起的，则气体分子的本身体积也只占周围空间体积的一千分之一，因而气体分子之间的空隙比起分子本身所占的体积要大得多。在这样稀疏的分子排列中，分子与分子之间的作用力（引力和斥力）也极为微小。

为了研究方便，提出了理想气体模型。

理想气体的条件是：

1. 气体分子不占体积；
2. 气体分子彼此之间不存在任何作用力。

在一般温度和压力不太高的情况下，气体可近似作为理想气体处理。

大量实验表明，在一般温度和压力不太高的条件下，对于一定质量的气体，当温度一定时，压力与体积成反比；当压力一定时，温度与体积成正比；当体积一定时，压力与温度成正比。由这三个实验规律，可以导出当一定质量的理想气体从参数值 P_1 、 V_1 、 T_1 状态变化到参数值 P_2 、 V_2 、 T_2 状态时，前后两组参数之间的关系是

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

或

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad (2-2-1)$$

此式称为理想气体状态方程。理想气体状态方程表示，对于一定质量的气体，当状态由状态 1 变化到状态 2 时，其压力、体积乘积与温度的比值，保持不变。

对于 1mol 质量的理想气体，其常量值可以计算出来，并用符号 R 表示。

阿佛加德罗定律指出：在标准状态（压力为 $1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$ ，温度为 273K ）下，1mol 量的任何气体都占有 22.4L 的体积。这样对于 1mol 量任何气体，将 $p_0 = 1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $T_0 = 273\text{K}$ 和 $V_0 = 22.4\text{L}$ 代入 (2-2-1) 式，可计算出

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0} = 8314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

或者表示为

$$R = 8.314 \text{J/mol} \cdot \text{K}$$

由于 R 普遍适用于任何气体，故 R 称为气体常数。

因而，对于 1mol 理想气体的状态方程为

$$pv = RT$$

式中 v 是 1mol 气体的体积。

对于 m 克气体质量，且此气体的分子量为 μ 时，理想气体状态方程为

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad (2-2-3)$$

或写成

$$pV = nRT$$

式中 V 是 m 克气体的体积， $n = \frac{m}{\mu}$ 是气体的 mol 数。

〔例 2-1〕 假若一个气瓶容积为 0.1m^3 ，内装有氧气 0.6kg ，问

(1) 当摄氏 20°C 时，气瓶内的压力多大？

(2) 假若气瓶最大能承受压强为 $5 \times 10^6 \text{Pa}$ 时，求多高温时气瓶会胀破？

解

(1) 将氧气作为理想气体处理

已知 $V = 0.1\text{m}^3$ ， $m = 0.6\text{kg}$ ， $T = 273 + 20 = 293(\text{K})$

且氧的 mol 量 $\mu = 32\text{g}$ 。

按照公式 (2-2-3)

$$\begin{aligned} p &= \frac{m}{\mu} \cdot \frac{RT}{V} \\ &= \frac{0.6\text{kg}}{32\text{g}} \times \frac{8314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 293\text{K}}{0.1\text{m}^3} \\ &= 4.56 \times 10^6 \text{Pa} \end{aligned}$$

(2) 由于气瓶体积一定, 氧气的质量一定, 气体常数是不变的, 因而 (2-2-3) 式中只有 p 、 T 两个是变数。

当状态由状态 1 变化到状态 2 时, 此时 (2-2-3) 式可写成

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

代入

$$p_1 = 4.56 \times 10^5 \text{ Pa}, \quad T_1 = 293 \text{ K}$$

$$p_2 = 5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

则

$$T_2 = T_1 \frac{p_2}{p_1} = 293 \times \frac{5 \times 10^5}{4.56 \times 10^5} = 321 (\text{K})$$

§ 2-3 状态参数

系统的状态, 可以通过一些参数进行描述。系统的不同性质, 将以不同的参数表示。对于均匀系统的平衡状态, 在没有外界因素作用的情况下可以用两个独立参数来确定, 例如对于处于平衡状态的理想气体, 就可以用温度 T 和体积 V 来确定系统的状态, 当然也可以用温度 T 和压力 p 或者压力 p 和体积 V 来确定系统的状态。根据理想气体状态方程, 当已知 T 、 p 、 V 中的两个参数时, 第三个参数自然而然地也就确定了。

状态参数具有下列三点性质:

1. 状态参数是单值的;
2. 状态参数只取决于状态;
3. 状态参数的变化与状态变化的中间过程无关。

以压力 p 来说, 按照理想气体状态方程, 压力 p 是温度

T 和体积 V 的函数，即

$$p = f(T, V)$$

当知道了 T 和 V ，则理想气体的状态就确定了，此时压力 p 也就完全被决定了，并且是一个确定的数值，因而压力 p 是单值的。

当 T 、 V 变化时，理想气体的状态就会发生变化，压力 p 也就随之发生变化。

若温度、体积由 T_1 、 V_1 变化到 T_2 、 V_2 时，理想气体的状态由状态 1 变化到状态 2，此时压力就按照理想气体状态方程的函数关系由 p_1 变化到 p_2 ，如图 2-3-1 所示。由图

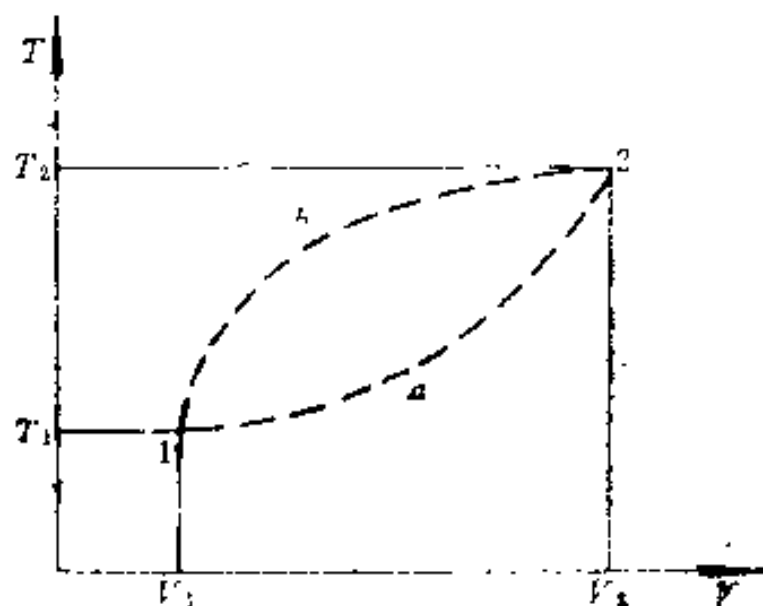


图2-3-1 状态参数

可以看出，压力 p 只取决于状态而与中间变化过程无关。

温度 T 和体积 V 也具有同样的性质。

现在再引入一个状态参数——内能。

内能是气体内部所具有的全部微观能量。我们知道，气体分子处在不停顿的、无规则的运动中，每个分子都具有动能，分子之间还存在着相互的作用力，因而微观能量包括了所有分子的动能与由分子间相互作用所引起的势能，所以

内能 $E = \Sigma \text{分子动能} + \Sigma \text{分子间相互作用所引起势能}$

系统内分子的动能是由温度 T 表示的，而分子间相互作用所引起的势能取决于分子间的距离，当分子间的距离增加时，系统的体积就增大，当分子间的距离减小时，系统的体积就缩小，因而分子间相互作用所引起的势能，取决于系统的体积 V 。

所以内能也必定是温度和体积的函数，即

$$E = f(T, V)$$

对于理想气体来说，由于不计分子间的作用力，因而内能就是气体无规则热运动的动能，所以可认为它只是温度的单值函数，即

$$E = f(T)$$

内能同样只取决于状态，与状态变化的过程无关，而且一定的状态只对应确定的内能值。由于内能也具备状态参数的性质，所以内能也是一个状态参数。

除了上面四个状态参数外，以后还要介绍两个状态参数：熵和焓。但是，应注意到，并不是什么参数都具有状态参数的性质，例如功和热就不是状态参数。

§ 2-4 热力学第一定律

热力学第一定律是能量转换和守恒定律。它表明热能和机械功是等价的，并且可以相互转换。

热力学第一定律是指：当把某一数量的热量加入一个含有气体的封闭系统时，此热量一部分用来增加气体的内能，另一部分热量使该气体膨胀对外作功。

图 2-4-1 表示对一个气缸加热的情况，气缸一端有面积为 A 的可动活塞。

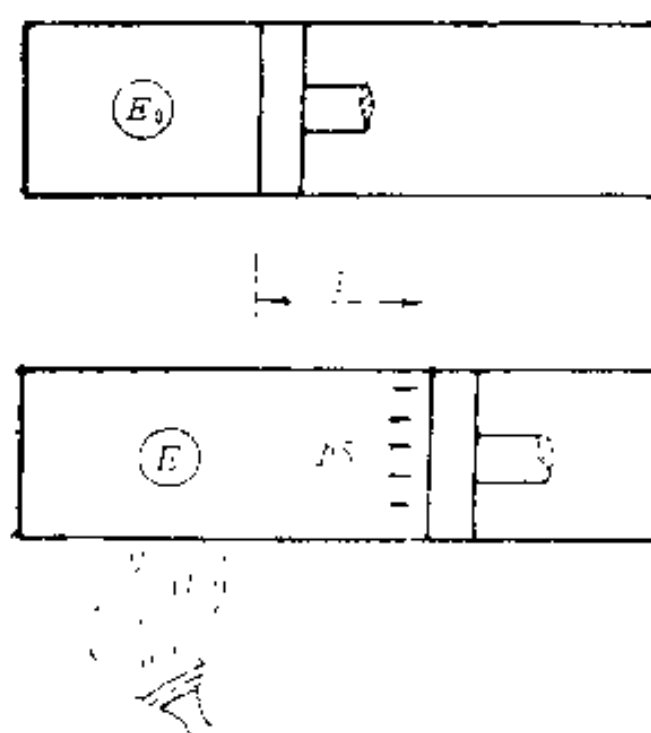


图2-1 1 气缸的加热

加热前：气缸内气体的内能为 E_0 ，活塞处于平衡状态。

加热后：气缸内气体的内能为 E ，活塞在气缸内压力 p 作用下，移动的距离为 l 。

这样，加热前后内能的增加量

$$E - E_0 = \Delta E$$

气体推动活塞所做的功

$$W = pAl = p\Delta V$$

式中 ΔV ——加热前后气缸内容积之差。

假若加入的热量为 Q ，则热力学第一定律可写为

$$Q = \Delta E + p\Delta V \quad (2-4-1)$$

(2-4-1) 式为热力学第一定律的数学表达式。

下面，顺便讨论一下热、功与内能所不同的性质。

按照图 2-4-2 所示，在 $p-V$ 图上从状态 1 变化到状态 2 时，其做功情况与过程有关。

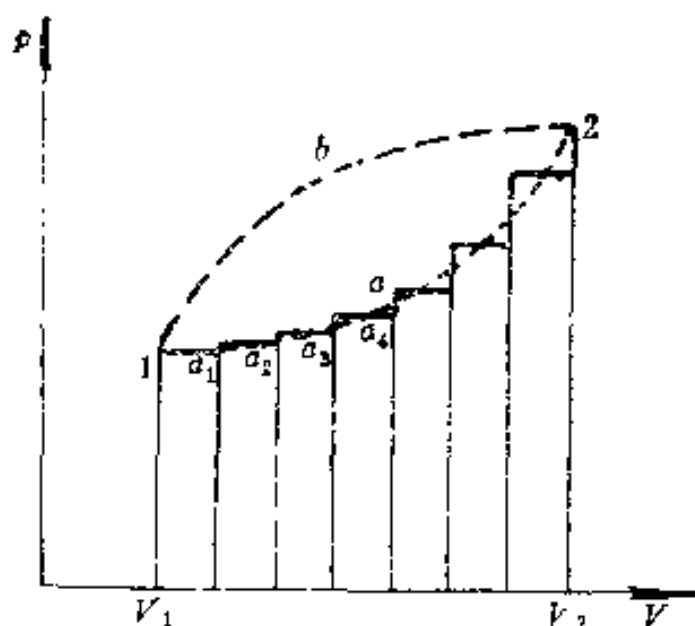


图2-4-2 不同过程的做功

实际上从状态 1 变化到状态 2 的过程中，系统内气体的压力和体积都是在不断变化着，因而气体做功量 $p\Delta V$ 应该是变化过程中各个时刻气体做功量之和，即

$$\begin{aligned} W &= W_1 + W_2 + W_3 + \cdots \\ &= p_1\Delta V_1 + p_2\Delta V_2 + p_3\Delta V_3 + \cdots \end{aligned}$$

例如状态沿着路线 1-a-2 从状态 1 变化到状态 2，此时可以沿着过程 1-a-2 取一系列的中间状态 $a_1, a_2, a_3, \cdots$ 。在从每个中间状态向相邻的下一个中间状态变化时，其压力取此两个状态压力的平均值，体积增加 ΔV 量为两中间状态时气体体积之差，则各段的气体做功量分别为

$$\begin{aligned} &\frac{p_1 + p_{a1}}{2} (V_{a1} - V_1), \frac{p_{a1} + p_{a2}}{2} (V_{a2} - V_{a1}), \\ &\frac{p_{a2} + p_{a3}}{2} (V_{a3} - V_{a2}), \cdots \end{aligned}$$

从状态 1 变化到状态 2，系统气体的总做功量等于

$$\sum_i p_i(\Delta V)_i = \frac{p_1 + p_{a1}}{2} (V_{a1} - V_1) \\ + \frac{p_{a1} + p_{a2}}{2} (V_{a2} - V_{a1}) + \dots$$

此式右端各项恰是图 2-4-2 中曲线 1-a-2 下各个小矩形面积。当一系列中间状态取得非常靠近时，所有各个小矩形面积之和趋于曲线 1-a-2 下所围面积。

同样状态若是沿着路线 1-b-2 从状态 1 变化到状态 2 时，系统气体的总做功量等于

$$\sum_i p_i(\Delta V)_i = \frac{p_1 + p_{b1}}{2} (V_{b1} - V_1) \\ + \frac{p_{b1} + p_{b2}}{2} (V_{b2} - V_{b1}) + \dots$$

此式右端各项恰是图 2-4-2 中曲线 1-b-2 下各个小矩形面积。当一系列中间状态取得非常靠近时，所有各个小矩形面积之和趋近于曲线 1-b-2 下所围的面积。

因而当状态沿着路线 1-a-2 从状态 1 变化到状态 2 时，系统内气体对外所做的功，等于曲线 1-a-2 下的面积；当状态沿着路线 1-b-2 从状态 1 变化到状态 2 时，系统内气体对外所做的功，等于曲线 1-b-2 下的面积。

由于功是与过程有关的量，过程不同时，做功的大小就不同，所以功不是状态参数。

按照图 2-4-3 所示，假若系统从状态 1 开始变化，经过一系列中间状态之后，又回到状态 1，这一过程称为一个循环。

由于内能 E 是状态参数，系统通过一个循环后内能不会

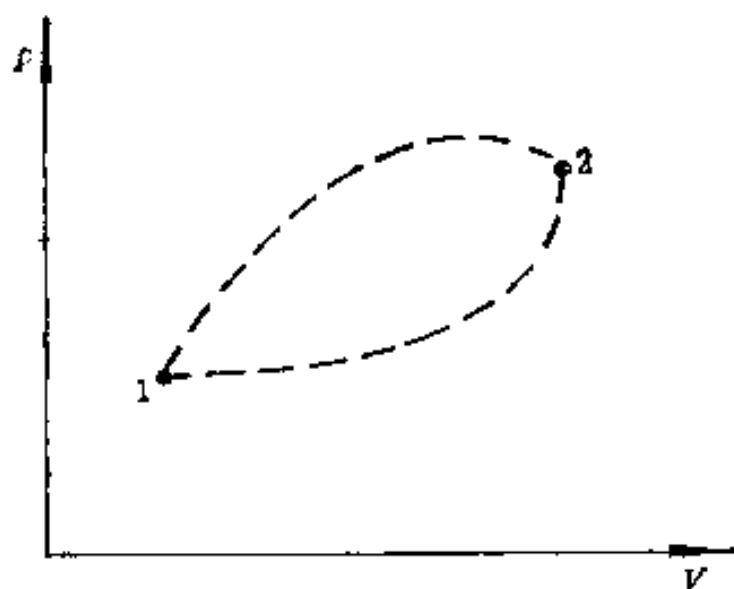


图2-4-3 循环

发生变化，而功 W 不是状态参数系统通过一个循环后功不等于零，此时气体对外做的功应等于此循环封闭曲线所围面积，即

$$\Delta E = 0 \quad W \neq 0$$

按照热力学第一定律

$$Q = W$$

它表示通过一个循环后，系统气体对外所做的功必定等于外界对系统的加热量。因而热量也是与过程有关的量。

从上面讨论，我们可以看出：内能是状态参数，而功和热是与过程有关的量不是状态参数。所以说，“系统处于某一状态时，具有多少功和多少热量”是没有意义的。

由于功和热不是状态参数，所以功和热不是能量，而只是传递能量的两种方式。

〔例2-2〕 一个带有活塞的气缸中，装有 2mol 气体，气体的压力 $p_1 = 3 \times 10^5 \text{Pa}$ ，温度 $t_1 = 15^\circ\text{C}$ ，当气缸内的气体膨胀至与外界大气 ($p_0 = 10^5 \text{Pa}$, $T_0 = 288\text{K}$) 平衡时，计算整个过程中气体内能的变化、对外做功和系统吸收的热量。

解 气缸内的气体膨胀至与外界大气平衡时，其压力和

温度应当皆与周围大气的压力和温度相同，其气缸内气体的开始和终了状态，可表示为

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{气体: } 2 \text{ mol} \\ \hline p_1 = 3 \times 10^6 \text{ Pa} \\ T_1 = 288 \text{ K} \\ \hline \end{array} \xrightarrow{\text{等温}} \begin{array}{|c|} \hline \text{气体: } 2 \text{ mol} \\ \hline p_2 = 10^6 \text{ Pa} \\ T_2 = 288 \text{ K} \\ \hline \end{array}$$

在压力不是太高的条件下，将气体可以作为理想气体进行处理，此时内能仅是温度的函数。由于过程中物质的种类和质量没有发生变化，并且温度也没发生变化，所以内能的变化量

$$\Delta E = 0$$

气缸内气体膨胀对外做的功

$$\begin{aligned} p\Delta V &= p_c(V_2 - V_1) \\ &= p_c \left(\frac{nRT_2}{p_2} - \frac{nRT_1}{p_1} \right) \\ &= nRT_1 \left(\frac{p_0}{p_2} - \frac{p_0}{p_1} \right) \\ &= 2 \text{ mol} \times 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 288 \text{ K} \left(\frac{10^6}{10^6} \right. \\ &\quad \left. - \frac{10^6}{3 \times 10^6} \right) = 3193 \text{ J} \end{aligned}$$

按照热力学第一定律，气缸内气体所吸收的热量

$$\begin{aligned} Q &= \Delta E + p\Delta V \\ &= 0 + 3193 \\ &= 3193 (\text{J}) \end{aligned}$$

§ 2-5 比 热

对一定质量的物体传递热量，当使物体升高相同的温度

时，由于物体的性质不同，所需要的热量也不同。

单位质量的物体，其温度每升高 1K 所需要的热量，称为比热，记为符号 c 。

$$c = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} \quad (2-5-1)$$

式中 Q 是质量为 m 的物体其温度由 T_1 升高到 T_2 所需要的热量。

比热的单位为 $\text{J/g} \cdot \text{K}$ ，本书在计算中经常采用 1mol 气体质量，故其单位为 $\text{J/mol} \cdot \text{K}$ 。

根据比热定义，假若 1mol 气体，加入热量 q 后，其温度升高量为 $T_2 - T_1 = \Delta T$ ，则 1mol 气体的比热

$$c = \frac{q}{\Delta T}$$

按照热力学第一定律，对于 1mol 气体的比热也可以写成

$$c = \frac{\Delta e + p\Delta v}{\Delta T} \quad (2-5-2)$$

式中 Δe 是 1mol 气体的内能， Δv 是 1mol 气体体积的增加量。

对于气体，在不同过程中有不同的比热，最常用的是等容比热和等压比热。在等容过程中，气体吸收的热量全部用来增加内能；在等压过程中，除一部分用来增加气体的内能外，还有一部分转变为气体反抗外力所做的功。因而要气体升高一定的温度，在等压过程所吸收的热量要比等容过程为多，所以有必要区分这两种过程的比热。对于固体或液体，虽然也可以写成这样两种比热，但由于固体或液体的体膨胀系数很小，热膨胀对外所做的功可以忽略，所以对于固体和液体来说，这两种比热相差不多。

在定容过程, 体积保持不变, 即 $\Delta v = 0$ 。对于 1mol 质量的气体, 按照 (2-5-2) 式, 得

$$c_v = \frac{q_v}{\Delta T} = \frac{\Delta e}{\Delta T}$$

或者写成

$$(e - e_0) = c_v(T - T_0)$$

如果取 $T_0 = 0\text{K}$ 时的内能 $e_0 = 0$ 则得到

$$e = c_v T \quad (2-5-3)$$

(2-5-3) 式表明单位质量气体的内能等于定容比热与热力学温度的乘积。

在定压过程中, 压力保持不变, 即 $p = \text{常数}$ 。这时 $p\Delta v$ 可以写成 $\Delta(pv)$, 则对于 1mol 质量的气体, 按照 (2-5-2) 式

$$c_p = \frac{q_p}{\Delta T} = \frac{\Delta e + \Delta(pv)}{\Delta T} = c_v + \frac{\Delta(pv)}{\Delta T}$$

按照 1mol 理想气体状态方程

$$pv = RT$$

有

$$\frac{\Delta(pv)}{\Delta T} = \frac{\Delta(RT)}{\Delta T} = \frac{R\Delta T}{\Delta T} = R$$

故

$$c_p = c_v + R \quad (2-5-4)$$

此式表明 1mol 理想气体的定压比热等于 1mol 理想气体的定容比热加上气体常数。

理想气体的定压比热与定容比热之比, 称为理想气体的绝热指数或等熵指数, 用符号 k 表示。即

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (2-5-5)$$

绝热指数 k 值是恒大于 1 的数。对于单原子理想气体, $k=1.67$; 对于双原子理想气体, $k=1.4$; 对于多原子理想气体, $k=1.33$ 。由于通常所说的理想气体是指一般温度、且不太高压力的空气, 而空气主要是由双原子气体氮和氧组成, 所以, 不加特殊说明时对于理想气体绝热指数皆用 $k=1.4$ 。

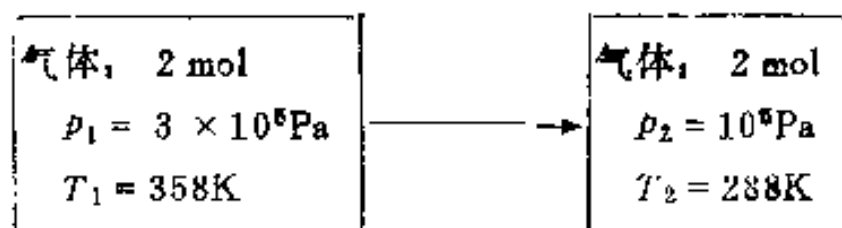
由 (2-5-4) 和 (2-5-5) 二式, 可以得到

$$\left. \begin{aligned} c_v &= \frac{1}{k-1} R \\ c_p &= \frac{k}{k-1} R \end{aligned} \right\} \quad (2-5-6)$$

已知 k 和 R 就可计算出 c_v 和 c_p , 如对于理想气体 $k=1.4$, $R=8.314\text{J/mol}\cdot\text{K}$, 按照 (2-5-6) 式计算得 $c_v=20.785\text{J/mol}\cdot\text{K}$, $c_p=29.099\text{J/mol}\cdot\text{K}$ 。

〔例2-3〕 带有活塞的气缸中, 若装有 2mol 具有 $3\times 10^5\text{Pa}$ 和 85°C 的高温气体, 当气缸内的气体膨胀至与外界大气 ($p_0=10^5\text{Pa}$, $T_0=288\text{K}$) 相平衡时, 计算整个过程中气体内能的变化, 对外界做的功和系统吸收的热量。

解 气缸内气体开始和终了的状态, 可表示为



仍将气体作为理想气体处理, 按照公式 (2-5-3) 可以计算出气缸内气体内能的减少量

$$\begin{aligned} \Delta E &= nc_v \Delta T = 2\text{mol} \times 20.785 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \\ &\quad \times (358\text{K} - 288\text{K}) = 2910\text{J} \end{aligned}$$

气缸内气体膨胀对外做的功

$$\begin{aligned}
 p\Delta V &= p_0(V_2 - V_1) \\
 &= nR p_0 \left(\frac{T_2}{p_2} - \frac{T_1}{p_1} \right) \\
 &= 2 \text{ mol} \times 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 10^5 \text{ Pa} \\
 &\quad \times \left(\frac{288 \text{ K}}{10^5 \text{ Pa}} - \frac{358 \text{ K}}{3 \times 10^5 \text{ Pa}} \right) = 2805 \text{ J}
 \end{aligned}$$

按照热力学第一定律, 气缸内气体所吸收的热量

$$\begin{aligned}
 Q &= \Delta E + p\Delta V \\
 &= 2910 \text{ J} + 2805 \text{ J} \\
 &= 5715 \text{ J}
 \end{aligned}$$

§ 2-6 焓 和 熵

焓和熵是热力学中经常用到的两个状态参数。

一、焓

对于一定质量的气体, 焓的定义是

$$H = E + pV \quad (2-6-1)$$

式中 E 、 p 、 V 分别为该质量气体的内能、压强和体积。

对于 1 mol 气体, 焓的定义可写成

$$h = e + pv \quad (2-6-2)$$

式中 e 、 p 、 v 分别是 1 mol 气体的内能, 压强和体积。

由焓的定义可以看出, 焓是内能 E 和乘积项 pV 之和。乘积项 pV 通常称为压力位能。显然, 气体的压力愈高, 体积愈大, 所含的压力位能就愈大。这种能量释放出来可以做机械功, 因此压力位能愈大, 气体做功的能力就愈大。

当气体处于静止状态时, 内能 E 和压力位能 pV 概括了

气体的全部能量，所以焓代表了气体的总能量。

由热力学第一定律 $q = \Delta e + p\Delta v$ ，在定压过程中，可以写成

$$q_p = \Delta e + \Delta(pv)$$

取 (2-6-2) 式的增量

$$\Delta h = \Delta e + \Delta(pv)$$

故

$$\Delta h = q_p \quad (2-6-3)$$

此式表示在定压过程中，向系统加入的热量等于系统本身焓的增加。

按照

$$q_p = c_p \Delta T$$

有

$$\Delta h = c_p \Delta T$$

或

$$(h - h_0) = c_p (T - T_0)$$

如果取 $T_0 = 0 \text{ K}$ 时的焓 $h_0 = 0$ 则得到

$$h = c_p T \quad (2-6-4)$$

(2-6-4) 式表明单位质量气体的焓等于定压比热与绝对温度的乘积。

二、熵

熵的定义（见38页〔注〕）为

$$\Delta s = \frac{\Delta q}{T} \quad (2-6-5)$$

(2-6-5) 式表明，在状态变化过程中，系统内热量的变化量除以系统温度就定义为系统的熵值增量。

熵的表达式为

$$s = R \ln \frac{T^{\frac{k}{k-1}}}{p} + s_0 \quad (2-6-6)$$

式中 s_0 为量度熵 s 的起始值。

熵与内能和焓一样，也是一个状态函数。它是单值的，只取决于系统的状态，而与变化的中间过程无关。

熵在热力学、气体力学中运用非常广泛，在炸药爆炸中研究气体流动和弱波过程也离不开熵的概念。因而，虽然熵的引入比较抽象，但是对于熵的物理含义和等熵过程还是需要比较熟悉地掌握。

当系统在变化过程中，与外界没有热量交换，这样的过程称为绝热过程。而当系统在变化过程中，除了与外界没有热量交换外，并且在系统内部也没有热交换，这样的过程称为等熵过程，从而看出等熵过程要求的条件更加严格。

等熵过程的条件：

1. 系统与外界没有热交换。

2. 系统内部没有热交换。这就要求：

(1) 气体内摩擦为零。因为摩擦会使一部分机械能转变成热而损失。

(2) 气体中没有涡旋区。因为涡旋区内有气体微团之间的相互冲击和摩擦，会造成一部分机械能的损失。

(3) 气体中没有冲击波。因为冲击波在冲击、压缩的过程中，也会造成一部分机械能转变成热能而损失。

等熵过程中，理想气体状态参数 p 、 v 、 T 也遵循一定的规律，这个规律的数学表达式，称为等熵方程。

等熵方程的形成

$$pv^k = \text{const} \quad (2-6-7)$$

或
$$Tv^{k-1} = \text{const} \quad (2-6-8)$$

或
$$\frac{T}{p^{\frac{k-1}{k}}} = \text{const} \quad (2-6-9)$$

上述分式说明：在等熵过程中，状态参数的代数值 pv^k 、 pv^{k-1} 和 $\frac{T}{p^{\frac{k-1}{k}}}$ 皆保持不变。

〔注〕 熵的确切定义和等熵方程的来源
状态函数的微分在数学上是一个全微分。
函数 z 是 x 、 y 的函数，其微分

$$dz = Mdx + Ndy$$

假若是全微分的话，必定满足条件

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}$$

上述两点完全可以从数学上加以证明，但是为了简单起见，我们不加证明，而直接应用。

按照热力学第一定律的微分形式

$$dq = de + pdv = de + d(pv) - vdp$$

与焓的微分形式

$$dh = de + d(pv) = c_p dT$$

可得

$$dq = c_p dT - vdp$$

将此式两边同除以 T ，有

$$\frac{dq}{T} = \frac{c_p}{T} dT - \frac{v}{T} dp$$

代入气体状态方程的关系后，得到

$$\frac{dq}{T} = \frac{c_p}{T} dT - \frac{R}{p} dp \quad (1)$$

此式的微分项

$$\left[\frac{\partial \left(\frac{c_p}{T} \right)}{\partial p} \right]_T = 0$$

$$\left[\frac{\partial \left(\frac{R}{T} \right)}{\partial T} \right]_p = 0$$

从而说明 $\frac{dq}{T}$ 是一个函数的全微分，这个函数就定义为 熵，以 s 表示。即

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (2)$$

积分 (1) 式

$$s = c_p \ln T - R \ln p + s_0$$

代入

$$R = c_p - c_v = \frac{k-1}{k} c_p \text{ 则得到熵的表达式}$$

$$s = R \ln \frac{T^{\frac{k}{k-1}}}{p} + s_0 \quad (3)$$

式中积分常数 s_0 无关紧要，它只表示度量熵的起始值，而我们 主要对熵的变化感兴趣。

对于等熵过程， s 应等于常数，这样就要求 (3) 式右端项皆为常数，从而

$$\frac{T}{p^{\frac{k-1}{k}}} = \text{const} \quad (4)$$

此式称为等熵方程，表明在等熵过程中，温度 T 除以压强 $p^{\frac{k-1}{k}}$ 次幂的商值，保持不变。

利用理想气体状态方程，代入 $T = \frac{pv}{R}$ 可得

$$pv^k = \text{const} \quad (5)$$

运用 $p = \frac{RT}{v}$ 可得

$$T v^{k-1} = \text{const} \quad (6)$$

上述公式 (4)、(5)、(6) 是等熵公式的三种形式。

〔例2-4〕 假若气缸中具有 $3 \times 10^6 \text{Pa}$ 和 85°C 的气体，当按照等熵关系膨胀到与外界大气压 $p_0 = 10^5 \text{Pa}$ 相平衡时，其气体的温度应当是多少？

解 等熵膨胀到与外界大气压力相平衡时

$$p_2 = p_0 = 10^5 \text{Pa}$$

$$T_2 \neq T_0$$

$$\left[\begin{array}{l} p_1 = 3 \times 10^6 \text{Pa} \\ T_1 = 358 \text{K} \end{array} \right] \xrightarrow{\text{等熵}} \left[\begin{array}{l} p_2 = 10^5 \text{Pa} \\ T_2 = ? \end{array} \right]$$

仍按照理想气体处理，理想气体 $k = 1.4$

按照等熵方程 (2-6-9) 式

$$\frac{T_1}{p_1^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{T_2}{p_2^{\frac{k-1}{k}}}$$

得

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 358 \times \left(\frac{10^5}{3 \times 10^6} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} \\ &= 262 (\text{K}) \end{aligned}$$

即平衡时气体的温度为摄氏零下 11°C 。

§ 2-7 热力学第二定律

热力学第一定律给出热能与机械能相互转换的关系，然而并没有给出转换所进行的方向。说明转换进行方向的定律，是热力学第二定律。

热力学第二定律与热力学第一定律一样，是从大量实践中总结出来的，它的最朴素地描述是：在自然界的一切现象中，热量只能自发地从温度较高的物体传到温度较低的

物体。

我们知道，水总是自动地从高处向低处流动，流动时不但不需要外界对物系做功，而且还可以通过适当的装置对外界做功。就是说，水从高水位自动流向低水位的过程，因有水位差而产生推动力，所以具有对外做功的能力。这种自动对外做功的过程，称为自发过程。当两水位相等时，没有水位差，物系达到平衡状态，不能再对外做功。水决不会自动地从低处流向高处，除非借助于水泵之类的装置，在外力功作用之下才能进行。假若以 h 表示水位的高低，对于水流动的过程可以表示为

$$\begin{array}{c} \text{高水位 } (h_1) \xrightarrow[\text{反自发过程, 需要消耗外功, } \Delta h = h_2 - h_1 < 0]{\text{自发过程, 有做功能力, } \Delta h = h_1 - h_2 > 0} \text{低水位 } (h_2) \\ \text{等水位 } (h_1) \xrightarrow[\Delta h = h_1 - h_2 = 0]{\text{平衡状态, 没有做功能力}} \text{等水位 } (h_2) \end{array}$$

可见，水自发流动过程的方向和限度，用初始和终了状态的水位差可以进行判断。

同样，热量总是自动地从高温物体传递给低温物体，这也是经常遇到的自然现象，热从高温物体传递给低温物体的自发过程，不但不需要外界做功，而且还可以通过适当的装置对外做功，就是说，热从高温物体流向低温物体的自发过程。因为有温度差而能够产生推动力，所以具有对外做功的能力，当两物体温度相等时，没有温度差，物系达到平衡状态，不能再对外做功，热决不会自动地从低温物体传向高温物体，除非借助于冷冻机之类的装置，在外加功作用之下才能进行。对于热量传递的过程也可以表示为

$$\begin{array}{c} \text{高温物体 } (T_1) \xrightarrow[\text{反自发过程, 需要消耗外功, } \Delta T = T_1 - T_2 < 0]{\text{自发过程, 有做功能力, } \Delta T = T_1 - T_2 > 0} \text{低温物体 } (T_2) \end{array}$$

$$\text{物体 } (T_1) \xrightarrow[\text{没有做功能力}]{\text{平衡状态 } \Delta T = T_1 - T_2 = 0} \text{物体 } (T_2)$$

因而，热量自发传递过程的方向和限度，可以用初始和终了状态的温度差进行判断。

现在研究由两个不同温度的物体组成的绝热系统，设此二物体的温度分别为 T_1 和 T_2 ，并且 $T_1 > T_2$ ，虽然这个系统对外没有热交换，但是此二物体在相互接触时仍然可以互相传热。如果温度为 T_1 的物体传给温度为 T_2 的物体的热量是 Q ，对于温度较高的物体来说由于失去了热量，其熵值减少了 $\frac{Q}{T_1}$ ，而对于温度较低的物体来说，由于得到了热量，其熵值增加了 $\frac{Q}{T_2}$ 。这样整个系统熵值的总变化量应该是

$$\Delta s = \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1}$$

因为 $T_1 > T_2$ ，所以

$$\Delta s > 0 \quad (2-7-1)$$

此式说明，在绝热系统中，由于系统内部热交换的原因，造成了系统熵值的增加。

假若研究的绝热系统，其内部物体的温度皆相同，即没有内部热交换时，显然熵的变化量

$$\Delta s = 0 \quad (2-7-2)$$

归纳上述二式，可以写成

$$\Delta s \geq 0 \quad (2-7-3)$$

(2-7-3)式是绝热系统中热力学第二定律的数学表达式。此式表明在绝热系统中，若系统内部没有热交换，则为等熵过程，若内部存在热交换，则熵值总是增加的。

对于一个绝热系统，由于内部的热交换使熵值增加，当

热交换不断进行时，熵值就不断增加；当热交换停止，而达到稳定平衡时，熵值的增加也就停止了。从此看出，稳定平衡状态时的熵具有最大值。

由上面的分析可以进一步理解熵的物体意义，在与外界隔绝的绝热系统中，熵值的大小表示系统靠近稳定平衡的程度，而在稳定平衡时，熵值达到最大。

§ 2-8 各种状态变化过程

在前面叙述问题时，已经提到过等容过程、定压过程和绝热以及等熵过程，下面讨论理想气体状态各种变化过程的特点。

一、定容过程

气体体积保持不变的状态变化过程，称为定容过程。定容过程的特点是：

1. 定容过程中，体积和密度皆保持不变

$$V = \text{const} \quad \rho = \text{const}$$

2. 定容过程中，气体的压力与温度成正比变化

$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

3. 外界对系统所加的热量，等于系统内能的增加

$$Q = \Delta E$$

二、定压过程

气体压力保持不变的状态变化过程，称为定压过程。定压过程的特点是：

1. 定压过程中，压力保持不变

$$p = \text{const}$$

2. 定压过程中, 气体的体积与温度成正比变化

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

3. 外界对系统所加的热量, 等于系统焓的增加

$$Q = \Delta H$$

三、等温过程

气体温度保持不变的状态变化过程, 称为等温过程。等温过程的特点是:

1. 等温过程中, 温度保持不变

$$T = \text{const}$$

2. 等温过程中, 气体的压力和体积成反比变化

$$pV = \text{const}$$

3. 外界对系统所加热量, 等于系统对外所做的膨胀功

$$Q = p\Delta V$$

四、等熵过程

系统不仅与外界没有热交换, 而且在系统内部也没有热交换的状态变化过程, 称为等熵过程。等熵过程的特点是:

1. 等熵过程中, 熵值保持不变

$$S = \text{const}$$

2. 等熵过程中, 气体状态参数的变化遵循等熵方程

$$pV^k = \text{const}$$

或

$$TV^{k-1} = \text{const}$$

或
$$\frac{T}{p^{\frac{k-1}{k}}} = \text{const}$$

3. 系统内能的减少, 全部转化为气体对外所做的膨胀功

$$-\Delta E = p\Delta V$$

五、多方过程

以上各个过程可用一个普遍的表达式概括起来, 此式称为多方方程。

多方方程

$$pV^n = \text{const}$$

式中 n 称为多方指数, 当 n 不同时表示不同的过程。例如,

- $n = 0$ 时, 得到 $p = \text{const}$, 即定压过程;
- $n = 1$ 时, 得到 $pV = \text{const}$, 即等温过程;
- $n = k$ 时, 得到 $pV^k = \text{const}$, 即等熵过程;
- $n \rightarrow \infty$ 时, 得到 $V = \text{const}$, 即定容过程。

除了以上几种特定过程之外, 实际上还经常遇到一些 n 不等于上述几种特定值的过程, 这些过程统称为多方过程。例如凝聚相炸药爆轰时, 爆轰产物初期的飞散过程可以认为是 n 近似等于 3 的多方过程。

〔例2-5〕 一个含有 5mol 可以认为是理想气体的系统, 其压力为 $2 \times 10^5 \text{Pa}$, 温度为 323K, 按照定容、等温和等熵三种不同的过程, 分别确定当压力与周围大气压力 $p_0 = 10^5 \text{Pa}$ 平衡时的状态。

解 首先计算出系统的初始状态, 按照理想气体状态

方程

$$pV = nRT$$

$$\begin{aligned} \text{得} \quad V &= nR \frac{T}{p} \\ &= 5 \text{ mol} \times 8314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times \frac{323 \text{ K}}{2 \times 10^5 \text{ Pa}} \\ &= 67.1 \text{ L} \end{aligned}$$

因而, 理想气体的初始状态

$$p_1 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}, \quad T_1 = 323 \text{ K}, \quad V_1 = 67.1 \text{ L}$$

与周围大气压力平衡条件是

$$p_2 = p_0 = 10^5 \text{ Pa}$$

1. 定容过程

$p_1 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ $T_1 = 323 \text{ K}$ $V_1 = 67.1 \text{ L}$	定容 $\rightarrow$	$p_2 = 10^5 \text{ Pa}$ $T_2 = ?$ $V_2 = 67.1 \text{ L}$

按照定容过程压力与温度的关系

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

$$\text{得} \quad T_2 = T_1 \frac{p_2}{p_1} = 323 \times \frac{10^5}{2 \times 10^5} = 162 (\text{K})$$

2. 等温过程

$p_1 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ $T_1 = 323 \text{ K}$ $V_1 = 67.1 \text{ L}$	等温 $\rightarrow$	$p_2 = 10^5 \text{ Pa}$ $T_2 = 323 \text{ K}$ $V_2 = ?$

按照等温过程压力与体积的关系

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$\text{得 } V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2} = 67.1 \times \frac{2 \times 10^5}{10^5} = 134.2(\text{L})$$

3. 等熵过程

$p_1 = 2 \times 10^5 \text{Pa}$ $T_1 = 323\text{K}$ $V_1 = 67.1\text{L}$	等熵	$p_2 = 10^5 \text{Pa}$ $T_2 = ?$ $V_2 = ?$

按照等熵过程压力与体积的关系

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$$

$$\begin{aligned} \text{得 } V_2 &= V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 67.1 \times \left(\frac{2 \times 10^5}{10^5} \right)^{\frac{1}{1.4}} \\ &= 110(\text{L}) \end{aligned}$$

T_2 可按理想气体状态方程求出

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{p_2 V_2}{nR} \\ &= \frac{10^5 \text{Pa} \times 110\text{L}}{5\text{mol} \times 8314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}} \\ &= 265\text{K} \end{aligned}$$

〔例2-8〕 初始状态与例1相同，按照定容、定压、等熵过程，分别确定当温度与周围大气温度 $T_0 = 288\text{K}$ 相平衡时的状态。

解 系统的初始状态仍然可以按上例的方法确定，系统气体与周围大气温度平衡的条件是

$$T_2 = T_1 = 288\text{K}$$

1. 定容过程

$p_1 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ $T_1 = 323 \text{ K}$ $V_1 = 67.1 \text{ L}$	$\xrightarrow{\text{定容}}$	$p_2 = ?$ $T_2 = 288 \text{ K}$ $V_2 = 67.1 \text{ L}$

按照定容过程中压力与温度关系

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

得 $p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 2 \times 10^5 \times \frac{288}{323} = 1.78 \times 10^5 (\text{Pa})$

2. 定压过程

$p_1 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ $T_1 = 323 \text{ K}$ $V_1 = 67.1 \text{ L}$	$\xrightarrow{\text{定压}}$	$p_2 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ $T_2 = 288 \text{ K}$ $V_2 = ?$

按照定压过程中体积与温度的关系

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

得 $V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 67.1 \times \frac{288}{323} = 59.8 (\text{L})$

3. 等熵过程

$p_1 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ $T_1 = 323 \text{ K}$ $V_1 = 67.1 \text{ L}$	$\xrightarrow{\text{等熵}}$	$p_2 = ?$ $T_2 = 288 \text{ K}$ $V_2 = ?$

按照等熵过程中，温度与体积的关系

$$T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1}$$

得 $V_2 = V_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{k-1}} = 67.1 \times \left(\frac{323}{288} \right)^{\frac{1}{1.4-1}} = 89.4 (\text{L})$

按照理想气体状态方程

$$p_2 = \frac{nRT_2}{V_2}$$

$$= 5 \text{ mol} \times 8.314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times \frac{288 \text{ K}}{89.4 \text{ L}}$$

$$= 1.34 \times 10^5 \text{ Pa}$$

第三章 炸药的起爆及感度

炸药在外界能量作用下引起爆轰的过程称为起爆。起爆炸药所需的外界能量叫做起爆冲能。炸药起爆的难易程度称做炸药的感度。

炸药的起爆方式决定于起爆冲能的形式，起爆炸药可以有各种各样的起爆冲能，如加热、火焰、针刺、撞击、摩擦、振动、冲击波、静电、光（激光）、高能粒子等。为衡量各种起爆冲能下炸药起爆难易程度，制定了相应的表征炸药感度的指标。由于起爆过程的复杂性，这种指标虽不能确切地描述起爆过程的本质，但提供了一个相对比较量，对炸药的的实际使用还是有一定价值的。对起爆理论的深入研究，将使人们更确切的物理量来表征炸药的感度。

研究炸药起爆和感度对火化工安全技术管理具有极其重要的意义。各种火化工爆炸事故，都与起爆和感度有关。如果掌握了起爆过程的本质，就可以有的放矢，采取有针对性的安全措施，防止事故发生。也可以对产生的事故进行中肯的分析，总结已有的经验教训，避免今后再发生类似事故。

§ 3-1 炸药的热起爆及热感度

一、炸药的热爆炸理论

炸药在生产、贮存、运输和使用过程中，经常会遇到不同的热源，例如，炸药在烘箱中的烘干；压药前的预热；注

药包的熔化；某些高温条件下的贮存或使用（如深井中的石油孔装药）等等。在诸如此类的热作用下，炸药性能怎样？能否起爆？起爆机理或物理过程如何？这些就是热爆炸理论所要回答的问题。

热爆炸理论所要解决的关键问题是热爆炸的临界条件以及热爆炸延滞期问题。所谓热爆炸临界条件，是研究炸药在什么环境条件下（如多高温度，多大的装药几何尺寸等）能引起热爆炸，也就是热爆炸的可能性问题；而热爆炸延滞期是表明在满足了热爆炸的临界条件后，要延滞多长时间才能发生爆炸。这也就是热爆炸过程的反应动力学问题。

首先考察热爆炸临界条件问题。炸药在受热作用下产生热分解，热分解放出热量；与此同时，由于热传导作用，使炸药反应放出的热不断地散失到周围介质中去。如果炸药得热（反应放出的热）速率超过散热速率，在炸药中势必形成热积累，使温度不断升高，炸药反应速率不断加快，最后达到炸药的爆炸。得热速率等于散热速率，即为热爆炸的临界条件。根据这个临界条件可以解出一些热爆炸的具体参数。

为了数学处理简单起见，假设炸药中温度均匀分布，即各点的温度都相同，而且在达到临界温度附近时，炸药的温度 T 和周围介质的温度 T_0 很接近，即 $T \approx T_0$ 。

炸药在温度 T (K) 下，单位时间内由于发生化学分解反应而放出的热量 Q_1 ，取决于化学反应速度 w (g/s) 及单位质量炸药反应后所放出的热量 q (J/g)，即

$$Q_1 = wq \quad (3-1-1)$$

根据阿仑尼乌斯化学动力学基本规律可知，化学反应速度随绝对温度 T 成指数关系变化，因为反应速度 w 正比于反应速度常数 k_r ，而 k_r 随 T 指数增加

$$k_r = Ze^{-E/RT} \quad (3-1-2)$$

式中 Z — 指前因子 (活化分子碰撞频率因子); E — 炸药的活化能 (J/mol), R —— 气体常数。

一般猛炸药 $Z = 10^{16} \sim 10^{20} \text{ s}^{-1}$, $E = (126 \sim 209) \times 10^3 \text{ J/mol}$ 。几种炸药的 Z 、 E 值见表 3-1-1。

表 3-1-1 某些炸药分解反应动力学参数

炸药	$\lg Z$	$E (\text{J/mol}) \times 10^3$	$t (^\circ\text{C})$
硝化甘油	20.5	201	125~225
TNT	11.4	144	275~312
特屈儿	15.4	161	211~260
RDX	18.5	199	213~299
PETN	18.8	197	161~233
HMX	19.7	220	271~314
硝酸铵	12.3	160	217~267

对于 $Z = 10^{18} \text{ s}^{-1}$ 、 $E = 146 \times 10^3 \text{ J/mol}$ 的典型炸药, 其在不同温度下的特征寿命见表 3-1-2。

表 3-1-2 典型炸药不同温度下的特征寿命

$t (^\circ\text{C})$	20	110	200	260	325	500	825
k_r^{-1}	0.36Gd	0.36kd	1 h	1 min	1 s	1 ms	1 μs

表 3-1-2 中数字仅仅为了说明问题, 其实在各种温度范围内热分解机理是不同的, 但总的趋势还是如表中所列的那样。

假定炸药热分解按一级反应处理, 则

$$w = Ze^{-\frac{E}{RT}} \cdot m \quad (3-1-3)$$

式中 m 是炸药量，其它符号同前。

于是可以得到单位时间内炸药热分解反应而放出的热 Q_1

$$Q_1 = Zmqe^{-\frac{E}{RT}} \quad (3-1-4)$$

在炸药发生化学反应而放热的同时，单位时间内因热传导而散失于环境的热量 Q_2 为

$$Q_2 = hA(T - T_0) = K(T - T_0) \quad (3-1-5)$$

式中 h —— 传热系数， A —— 传热面积， K —— 热扩散率。

只有当 Q_1 大于 Q_2 时，才有可能使 T 升高，引起炸药反应速度的加快，进而最后导致炸药爆炸。故炸药爆炸的临界条件之一必须满足

$$Q_1 = Q_2 \quad (3-1-6)$$

即
$$Zmqe^{-\frac{E}{RT}} = K(T - T_0) \quad (3-1-7)$$

然而达到热平衡只是爆炸的一个必要条件，要在炸药中产生热积累，还须满足另一个条件，即放热量随温度的变化率超过散热量随温度的变化率，只有这样，才能引起炸药的自加速反应。所以热爆炸的另一个条件是

$$\frac{ZmqE}{RT^2} e^{-\frac{E}{RT}} = K \quad (3-1-8)$$

由 (3-1-7) 和 (3-1-8) 两式，得到热爆炸的临界条件

$$T - T_0 = \frac{RT^2}{E} \approx \frac{RT_0^2}{E} \quad (3-1-9)$$

或
$$(T - T_0) \left(\frac{E}{RT_0^2} \right) \approx 1 \quad (3-1-10)$$

若用 θ 来表示 (3-1-10) 式的左边项，即

$$\theta = (T - T_0) \left(\frac{E}{RT_0^2} \right) \quad (3-1-11)$$

θ 称为无量纲温度。热爆炸临界条件可写为

$$\theta = 1 \quad (3-1-12)$$

(3-1-7) 至 (3-1-12) 式推导中有一个假设, 即认为热爆炸瞬间, 炸药中达到的温度 and 环境的温度相差不多, 即 $T \approx T_0$, 这个假设是接近实际的, 不会带来多大误差。

以上讨论是考虑容器中炸药各点均温分布, 实际情况比较复杂。若考虑炸药各点温度不相同, 有一个确定的分布, 则散热这一项就复杂多了, 必须用定常不均温分布热传导方程。此时热爆炸临界条件不单是个温度因素, 而且还与容器几何尺寸有关。若容器几何因子用 δ 表示

$$\delta = \frac{\rho q}{\lambda} \cdot \frac{E}{RT_0^2} r^2 Z e^{-E/RT_0} \quad (3-1-13)$$

式中 r —— 容器半径, λ —— 传热系数, ρ —— 炸药密度。

仍采用

$$\theta = (T - T_0) \left(-\frac{E}{RT_0^2} \right) \quad (3-1-14)$$

则根据定常不均温热平衡方程解得热爆炸临界条件见表 (3-1-3)。

表3-1-3 热爆炸临界条件

容器形状	δ_k	θ_k
无限大平板容器	0.88	1.19
圆柱形容器	2.0	1.39
球形容器	3.32	1.61

从 (3-1-13) 式可以看出, 装药尺寸愈大, 愈容易发生热爆炸; 而炸药导热性能愈好, 愈不容易发生热爆炸。对于

火、炸药库房来说，这就要求炸药分箱贮存，避免大批量堆积炸药；另一方面，为了改善导热性能，要求库房有良好的通风对流条件，从而提高火、炸药库房的安全性。

二、炸药的热感度

炸药的热感度是指在热作用下引起炸药爆炸的难易程度。

通常用某固定延滞期条件下的爆发点来表示炸药的热感度。

什么叫爆发点呢？从理论上讲，爆发点乃指在一定实验条件下，将炸药加热到爆炸所需加热介质的最低温度。

为了更直观地说明爆发点的物理意义，用一个具体例子进行说明（见图3-1-1所示）。炸药的有关参数如下： $m = 1\text{g}$ ， $q = 2.09 \times 10^3 \text{J/g}$ ， $E = 14.65 \times 10^5 \text{J/mol}$ ， $Z = 10^{18} \text{s}^{-1}$ ， $K = 0.21 \text{J/K} \cdot \text{s}$ ， $c = 0.84 \text{J/K} \cdot \text{g}$ 。

在 $Q - T$ 图中， $Q_1 = Zmqe^{-\frac{E}{RT}}$ 称为得热线， $Q_2 = K(T - T_0)$ 称为散热线。散热线和纵轴的截距为环境温度。

从图3-1-1可看出，当环境温度为 $T_{01} = 473\text{K}$ 时，直线和曲线有交点 A 。在 A 点左边， $Q_1 > Q_2$ ，得热速率大于散热速率，使炸药温度升高，升到 A 点时， $Q_1 = Q_2$ 。而在 A 点右边， $Q_2 > Q_1$ ，散热速率大于得热速率，使炸药温度降低，又回到 A 点。所以在介质温度较低时，炸药温度维持在 T_A ，反应稳定地、缓慢地进行，不会自行加速， A 点叫稳定平衡点。炸药在常温下的热分解属这种类型。

当环境温度为 $T_{02} = 483\text{K}$ 时， Q_1 线位于 Q_2 线上方，炸药在任何温度下，得热速率总是大于散热速率，炸药温度不断

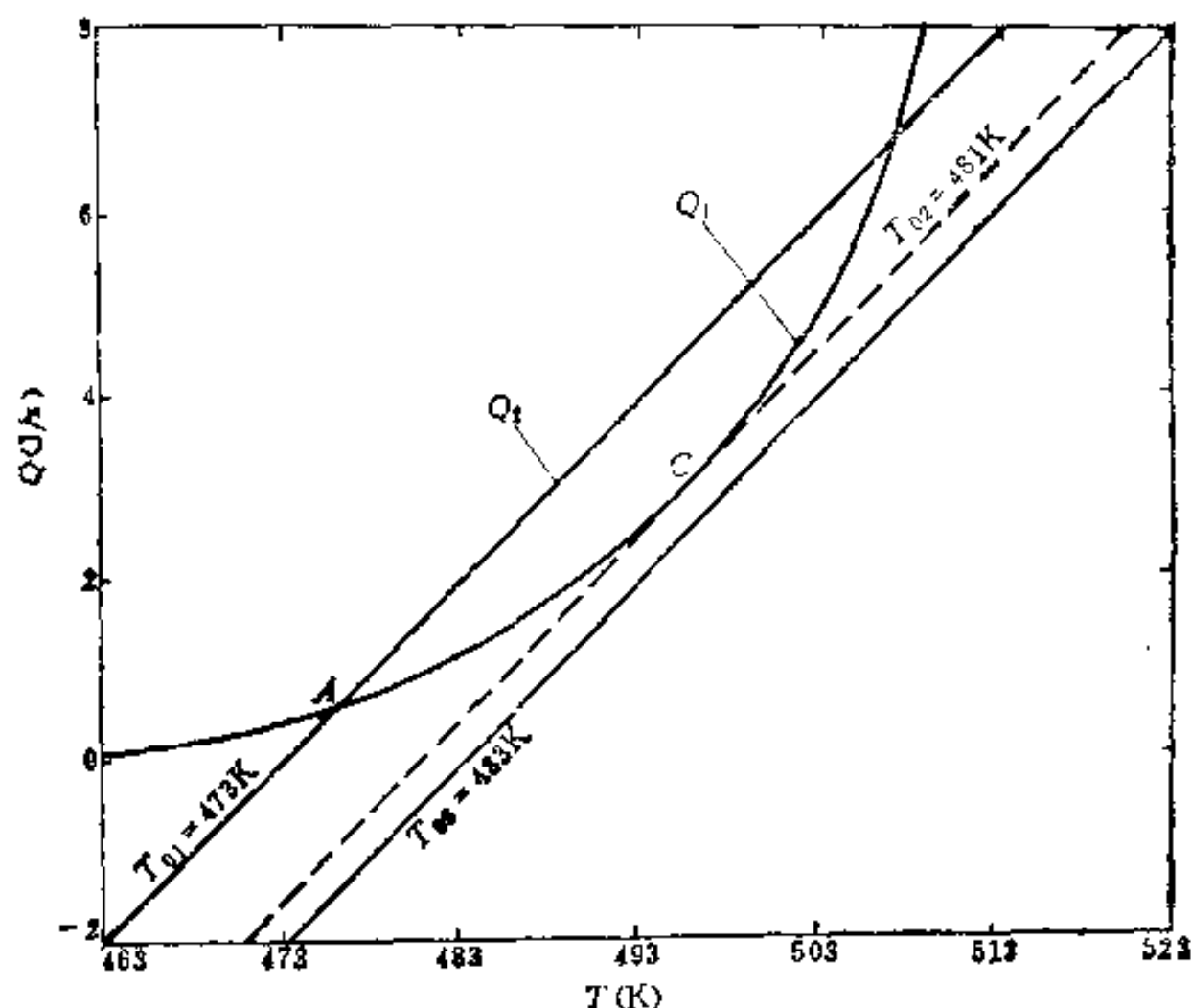


图3-1-1 爆发点物理意义图

上升，最后导致爆炸。

当环境温度为 T_{∞} 时（如 $T_{\infty} = 481\text{K}$ ），曲线和直线恰好相切。在切点C上，有 $Q_1 = Q_2$ ，而在C点以上和以下都有 $Q_1 > Q_2$ 。在C点左边，有 $Q_1 > Q_2$ ，此时炸药温度升高，很快到达 $T_{\infty} = 494\text{K}$ ，在C点处，只要温度稍增高一点，就会导致爆炸。

T_{∞} 是使炸药爆炸的临界环境温度。当环境温度低于这个值时，得热线和散热线相交，炸药将处于交点的温度下，进行稳定的缓慢的反应，不会导致爆炸。而当环境温度大于 T_{∞} 时，得热线高于散热线，反应将自行加速，最后导致爆炸。所以

T_* 是炸药能够导致爆炸的最低环境温度,称 T_* 为炸药的理 论爆 发点。通常采用5s延滞期爆发点来衡量炸药的热感度。

应用非定常热爆炸理论,对上述例子中所述的炸药,可以 计算在不同温度下的爆炸延滞期。计算结果如图3-1-2所示。

从图3-1-2看出,当 $T_0=493\text{K}$ 时,炸药爆炸延滞期为 10s。而 $T_0=483\text{K}$ 时为25s。当 $T_0=T_*=481\text{K}$ 时要经历无限 长时间才能爆炸。而当 $T_0=473\text{K}<T_*$,延滞期再长也不可 能达到爆炸。图中还画出了热分解速率,从图中看出,在热 爆炸前,炸药的分解量一般是不大的。

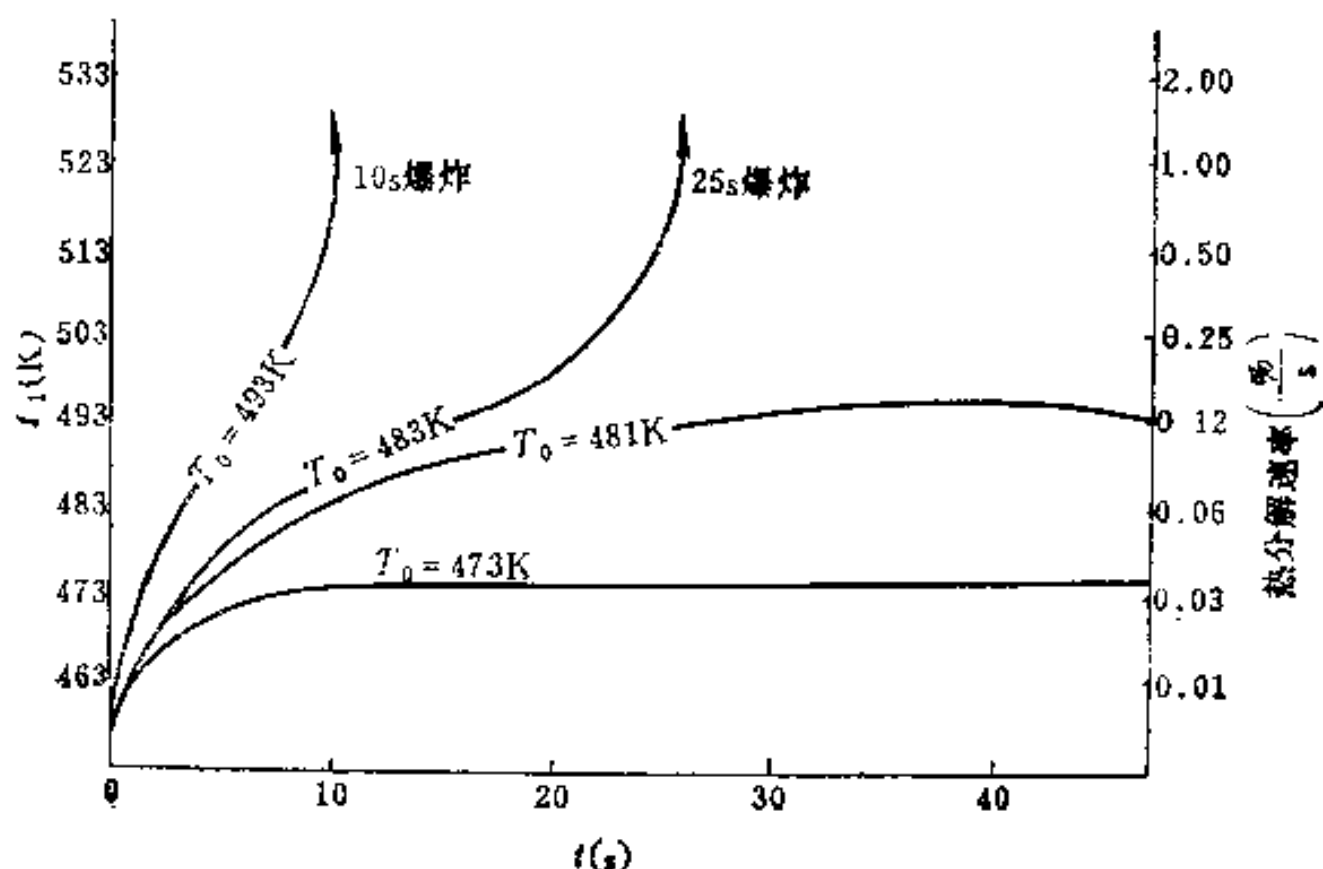


图3-1-2 不同温度下的热爆炸延滞期和热分解速率

三、炸药延滞期爆发点的实验测定

炸药延滞期爆发点的实验测定装置如图3-1-3所示。它 是一个伍德合金浴(成分为Bi 50%, Pb 25%, Sn 12.5%,

Dy 12.5%), 夹层中有电阻丝加热, 炸药试样放在一个 8* 雷管壳中, 雷管壳用软木塞塞住, 套上定位用的螺丝套, 使管壳投入后浸入合金浴的深度在 25mm 以上。合金浴的温度由温度计指示。

测定时首先进行预备试验, 加热合金浴到 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 左右, 放入一支盛有 0.05 g 炸药试样的雷管壳, 并继续升高温度直至爆炸, 记录下爆炸时的温度, 以定出正式试验时的温度范围, 然后开始正式试验。将合金浴加热到较预备试验所得爆炸温度高 $45\sim 50^{\circ}\text{C}$, 停止加热, 当温度开始下降

时, 看准某一温度, 迅速放入一准备好的试样, 同时打开秒表记录到爆炸所经历的时间, 此时间即为爆炸延滞期。投入试样时合金浴的温度即为此延滞期下的爆发点。

为了比较各种炸药热感度的大小, 必须固定一个延滞期, 一般都采用 5 s 延滞期爆发点或 5 min 延滞期爆发点。

测定 5 s 或 5 min 延滞期爆发点的实验方法有以下两种:

方法 1: 将合金浴预先加热到估计温度, 把装有 0.05g 试样的雷管壳放入合金浴, 记下炸药爆炸的时间 τ 。若 $\tau > 5\text{ s}$ (或 5 min), 则说明合金浴温度低, 提高温度重做试验。这样通过一系列试验, 就可测出 5 s (或 5 min) 延滞期爆

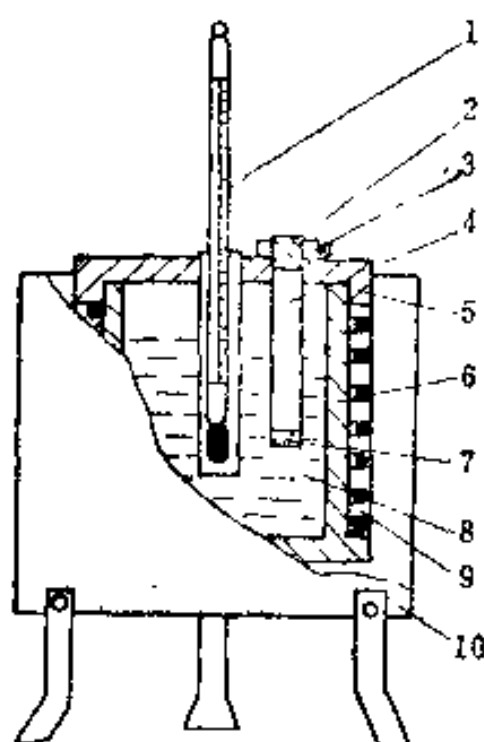


图3-1-3 爆发点测定装置

1—温度计; 2—塞子; 3—螺套; 4—雷管壳; 5—盖; 6—圆桶; 7—炸药试样; 8—合金浴; 9—电阻丝; 10—外壳。

发点。

方法 2：做一系列试验找出合金浴温度和相应爆发延滞期之间的关系曲线，由曲线上查出 5 s（或 5 min）延滞期爆发点。

例如 RDX 5 s 延滞期爆发点的实测结果如下：

浴温 T (K) 549 557 565 576

爆炸延滞期 τ (秒) 5.40 3.84 2.82 1.97

将上述数据画成 $\tau - T$ 图，见图 3-1-4 所示。从图上找

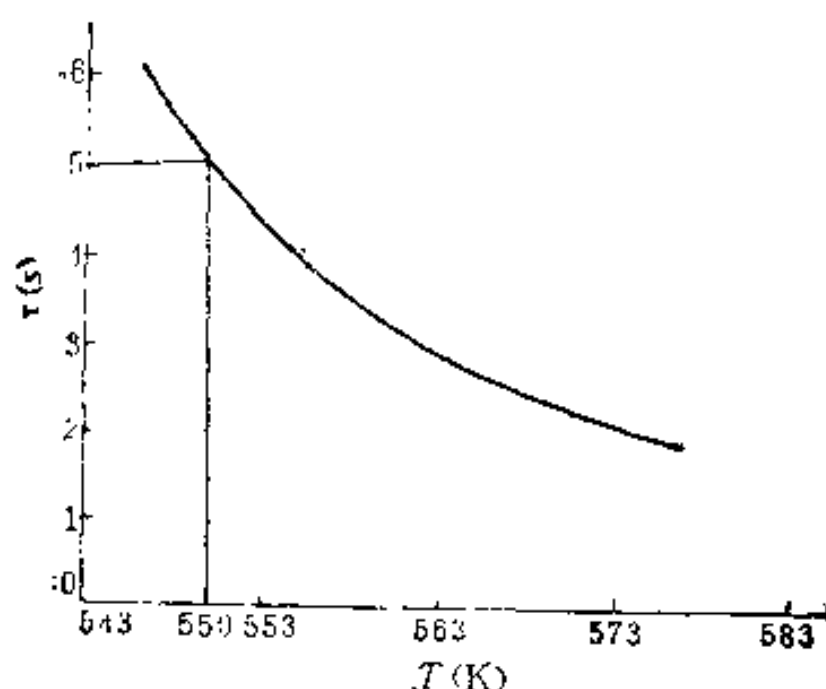


图3-1-4 RDX延滞期和爆发点曲线

出 5 s 延滞期爆发点为 550K。

应当指出，试验设备和试验条件对测定结果有一定影响。影响最大的是管壳插入深度，另外试样量不同爆发点也不相同。因而，为了取得可以相互比较的实验结果，必须严格固定条件进行实验。

用图 3-1-1 实验装置测得的延滞期爆发点见表 3-1-4。

表3-1-4 一些炸药的延滞期爆发点测定值

炸 药	5 s 延滞期爆发点 (°C)	5 min 延滞期爆发点 (°C)
过氧化铅	340	345
TNT	475	290
RDX	260	230
PETN	225	215
特屈儿	257	190~200
硝化棉	—	195
硝化甘油	220	210
50RDX/50TNT	220	—

四、炸药爆发点与延滞期的关系

大量试验结果表明, 炸药爆发点与延滞期为一指数曲线关系。

例如, 雷汞的爆发点和延滞期关系有如下数据:

T (K) 503 498 493 488 483 478 473 468 463

τ (s) 1.5 2.1 2.9 4.0 5.1 8.2 12.2 18.0 23.1

以 T 作横坐标, 以 τ 为纵坐标所画出的曲线是一条指数曲线。

把爆发点和延滞期写成如下关系式

$$\tau = Ae^{\frac{E}{RT}} \quad (3-1-15)$$

式中 A 为与炸药性质有关的常数。

对上式两边取对数后, 得到

$$\ln \tau = \ln A + \frac{E}{RT} \quad (3-1-16)$$

$$\text{或} \quad 2.30311 \lg \tau = 2.30311 \lg A + \frac{E}{RT} \quad (3-1-17)$$

用 $\lg \tau$ 为纵坐标, $\frac{1}{T}$ 为横坐标 (T 为热力学温度), 则可作出一条斜线, 见图 3-1-5, 其斜率为 $\operatorname{tg} \alpha = \frac{E}{2.3031 R}$ 。

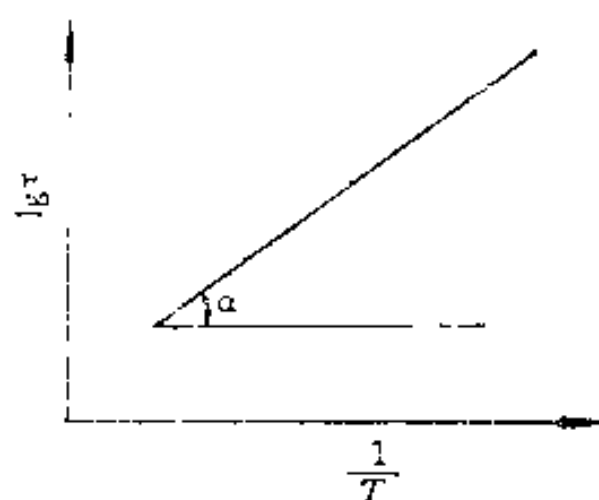


图3-1-5 爆发点与延滞期关系

由此可见, 只要测出炸药爆炸延滞期和温度关系, 就可根据 $\lg \tau - \frac{1}{T}$ 图上斜率求出炸药的活化能。炸药的活化能是炸药化学反应动力学的一个重要常数。

$\lg \tau - \frac{1}{T}$ 直线可用最小二乘法处理实验点而画出。必须注意, 这种处理求得的 E 只在一定的温度范围内才是可靠的。因此, 在使用炸药的 E 、 A 等参数时要注意温度范围。

§ 3-2 炸药的机械起爆及机械感度

一、炸药的机械起爆机理——热点学说

1. 热点学说的基本观点

热点学说认为, 在机械作用下, 产生的热来不及均匀地分布到全部试样上, 而是集中在试样个别的小点上, 例如集

中在个别结品的棱角，特别是多面棱角或小气泡处。在这些小点处温度达到高于爆发点的值时，就会在这些小点处开始爆炸。这种温度很高的局部小点称之为热点（或反应中心）。在机械作用下，爆炸首先从这些热点处开始，而后扩展为整个炸药的爆炸。热点形成和发展过程大致可分成以下几个阶段：

- a. 热点形成阶段；
- b. 以热点为中心向周围扩展成长阶段，在这个阶段，往往以速燃的形式进行；
- c. 低爆轰阶段，即由燃烧转变为低爆轰的过渡阶段；
- d. 稳态爆轰阶段。

2. 热点形成的原因

实验证明，热点可由很多途径产生，主要有：

- a. 压缩气体空隙的绝热加热；
- b. 接触表面或硬颗粒上的摩擦热点；
- c. 炸药自身内部结晶之间的摩擦；
- d. 炸药在高速剪切下流动时粘性加热；
- e. 当炸药变形时尖锐点的加热；
- f. 由于冲击波碰撞、干涉、相互作用引起热点。

此外还可能由于超声振动、高能粒子轰击、静电放电、强光辐射、晶体成长过程中的内应力等原因形成热点。

气泡绝热压缩加热形成热点是一个重要的热点形成原因。像用图 3-2-1 装置对硝化甘油进行撞击试验，当含有一个直径为 5×10^{-2} cm 那么小的气泡时，用 40 g 重锤、10 cm 落高，爆炸概率 100%，而当没有气泡存在时，用 5 kg 落锤、1 m 落高才能使它爆炸。

早期的理论研究中，单纯认为气泡绝热压缩升高温度而

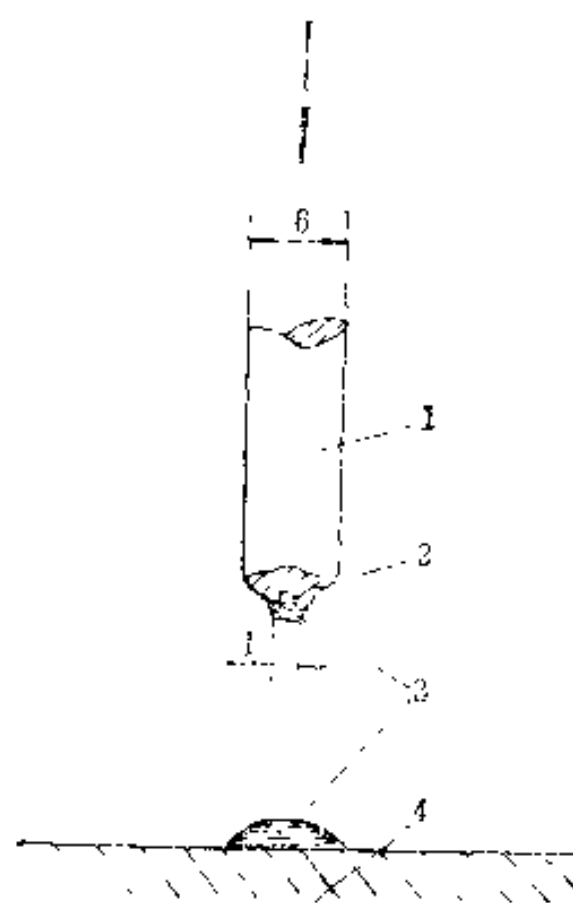


图3-2-1 带孔穴的冲击装置

1—冲头；2—孔穴；3—硝化甘油；4—底座。

形成热点，其计算式如下

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1} \quad (3-2-1)$$

近来人们发现，绝热压缩所产生的热，不能很快地传到周围炸药中去加热它到爆炸所必须的温度。实验证明，当含气泡的液体在受撞击时，气泡被击碎、形成细小的云雾，这种云雾微粒很容易快速被绝热压缩产生的热加热到爆炸的温度，然后这些爆炸产物中的热传到整个体积中去。根据这个机理，压缩气泡所产生的热比单纯惰性气体压缩所产生的热要大得多。

在热点形成的摩擦机理中，炸药的熔点、导热性和粘性流动起重要作用。熔点的影响尤其明显。对低熔点炸药在受

撞击作用下，由于熔化而消耗了很大一部分熔化热，以致防止它达到爆炸的温度。从而可以解释典型的起爆药和猛炸药之间撞击感度不同的原因。典型的起爆药如雷汞、迭氮化铅、斯蒂夫酸铅等，其熔点都高于爆发点，所以它们的熔点实际上都测不出来。与此相反，大多数猛炸药如泰安、黑索金、梯恩梯、特屈儿等熔点都低于爆发点。见表 3-2-1。

表3-2-1 炸药的熔点和爆发点

炸 药	熔点(°C)	爆发点 (5 s 延滞期)(°C)
雷汞	—	170
迭氮化铅	—	340
梯恩梯	80.2	475
泰安	142	225
黑索金	204	260
奥克托金	276	333

猛炸药的感度，不能单纯由熔点决定。例如，泰安熔点 142°C，50% 爆炸的撞击落高为 25cm；黑索金熔点 204°C，50% 爆炸的撞击落高也差不多为 25cm。这种情况下，摩擦或撞击加热的速率主要受熔化后炸药粘性流动的影响。理想化的毛细管中，流体粘性流动而产生的温升可由下式计算

$$\theta = \frac{8l\eta u}{a^2\rho c} \quad (3-2-2)$$

式中 l ——毛细管长度， η ——粘滞系数， u ——流速， a ——毛细管半径， ρ ——流体密度， c ——流体比热。

由此看出，液体的流动速度愈大，粘滞系数愈大，也就愈容易形成热点。

炸药中掺入高熔点的杂质时，在杂质棱角处容易形成热点，也就是容易受机械作用而爆炸，杂质的硬度倒不是影响

热点形成的主要原因，而主要原因是熔点，如果杂质熔点较低，即使它常温下硬度很高，棱角很明显，但在受热后，在形成热点温度之前就熔化或软化，以致硬度、棱角均消失，起不到形成热点的作用。表 3-2-2 列出了迭氮化铅和斯蒂夫酸铅中不同杂质的硬度和熔点对炸药机械感度的影响。

表3-2-2 含杂质迭氮化铅和斯蒂夫酸铅
的摩擦起爆（荷重64kg）

杂质	莫氏硬度	熔点(°C)	爆炸百分数(%)	
			迭氮化铅 (落高60cm)	斯蒂夫酸铅 (落高40cm)
无	—	—	0	0
硝酸银	2~3	212	0	0
溴化银	2~3	434	0	3
氯化银	2~3	591	30	21
碘化银	2~3	550	100	83
翻砂	3~4	560	100	72
碳酸铋	3~2.5	685	100	100
辉钨矿	3~3.5	1100	100	100
辉铅矿	2.5~2.7	1114	100	100
方解石	3	1339	100	93

由此表可看出，迭氮化铅和斯蒂夫酸铅的机械感度，在掺入物熔点高于 500°C 时明显地增加。

如果在机械作用下达到热点分解温度时还没有熔化，那么它的硬度起重要作用，因为对硬而尖锐的颗粒来说，应力集中到个别点上，只需要很小的能量就能使局部温度升到必要的数值。软的颗粒摩擦时发生塑性变形，能量不会集中到个别点上。熔点低的、可塑性大的杂质能降低炸药的感度，如石蜡、糊精、塑料、石墨等。降低炸药机械感度实质上就是

阻止产生热点。

3. 热点的热爆炸

只有当形成的热点满足一定的条件，即具有足够大的尺寸、足够高的温度和放出足够的热量时，才能逐渐发展而使整个炸药爆炸。用 α 粒子轰击炸药，由于形成热点尺寸太小，而不能引起整个炸药爆炸。

用非定常热爆炸理论，可以计算热点的热爆炸条件。

假设热点在时间为零时，当作一个均匀温度大于环境温度的微小炸药球。如果此时它的放热已经完毕，不再产生反应热，则根据古典热传导理论，在爆炸延滞期内，热点因向环境散失热量而温度逐渐下降，在不同时刻热点中温度分布曲线见图 3-2-2。

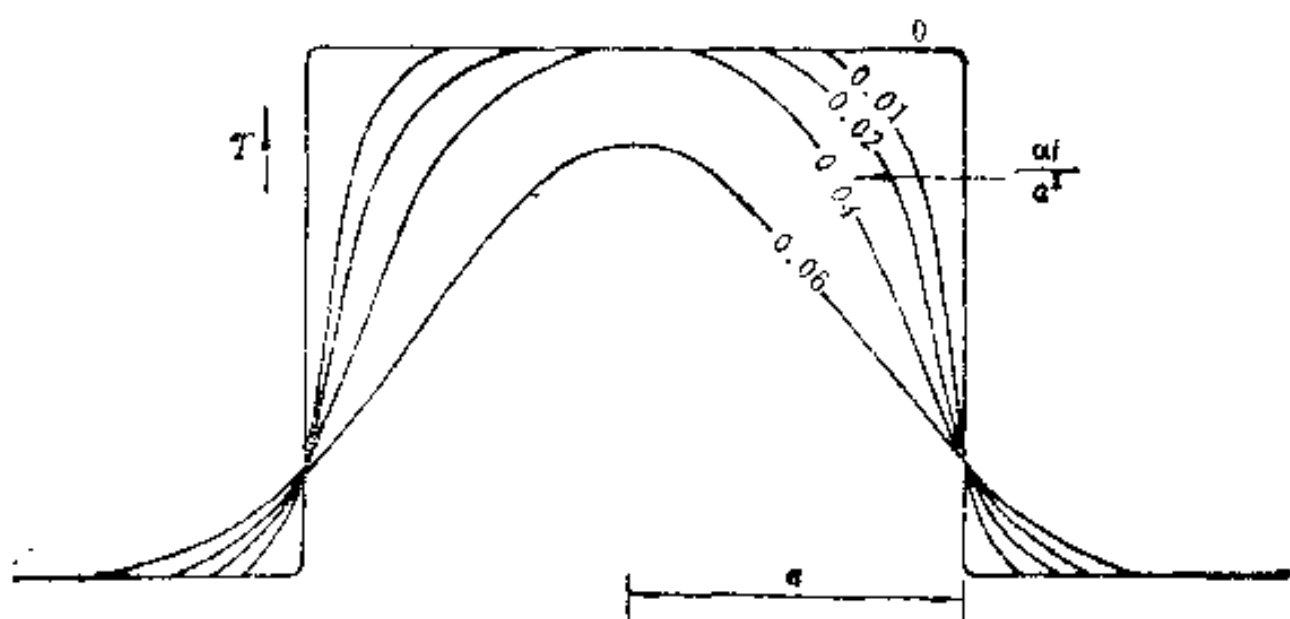


图3-2-2 热点球冷却期间的温度分布

当从热点球面边界向中心运动的“冷峰”侵入达到某一表面时，这一表面就发生猛烈地冷却，而反应速度受温度影响很大，所以“冷峰”通过之处的化学反应近似地可看成停止了。当然这些“冷峰”侵入的区域内是不可能引起热爆炸

的。因为这个区域内不会达到热爆炸的临界条件，反应放热速率已经基本上等于零，温度只可能降低（由于“冷峰”侵入而引起）而不可能升高。在热点中，“冷峰”最后侵入的是球心点处，只有当“冷峰”侵入到球心之前，在球心处满足热爆炸条件，才有可能实现整个热点的起爆，乃至整体炸药的起爆。

从图 3-2-2 中计算曲线可以看出，当 $\frac{\alpha\tau}{a^2} = 0.04$ 时，“冷峰”恰好侵入到热点球心处，在此以后，整个热点都受到冷却峰作用而不可能达到热爆炸条件，而在此以前，则因中心部分还未受“冷峰”侵入而有可能达到热爆炸。这样， $\frac{\alpha\tau}{a^2} = 0.04$ 成为热点热爆炸的判据，只要热点热爆炸的延滞时间不超过冷峰侵入热点球心的时间，热点就能爆炸。热点发生热爆炸的临界条件可以写成

$$\frac{\alpha\tau_{ind}}{a^2} < 0.04$$

或

$$\tau_{ind} < 0.04a^2/\alpha \quad (3-2-3)$$

若热点的爆炸假设为绝热爆炸，则爆炸感应期可由下式计算

$$\tau_{ind} = \frac{cRT_{cr}^2}{qZE} e^{\frac{E}{RT_{cr}}} \quad (3-2-4)$$

式中 c ——炸药比热， R ——气体常数， q ——炸药反应热， Z ——指前因子， E ——活化能， T_{cr} ——热点爆炸的临界温度。

这样，可以得到用炸药性质表达的热爆炸判据

$$\frac{cRT_{cr}^2}{qZE} e^{-\frac{E}{RT_{cr}}} < 0.04 \frac{a_{cr}^2}{a}$$

$$\text{或} \quad \frac{T_{cr}^2}{Z} e^{-\frac{E}{RT_{cr}}} < \frac{0.04qEa_{cr}^2}{acR} \quad (3-2-5)$$

对几种常用炸药在三种热点半径 (10^{-3} 、 10^{-2} 和 10^{-1} cm) 下热爆炸临界温度的计算结果见表 3-2-3。

表 3-2-3 热点爆炸临界温度计算值

炸药	临界温度(K)		
	$a = 10^{-3}$ cm	$a = 10^{-2}$ cm	$a = 10^{-1}$ cm
TNT	500	710	590
RDX	610	550	610
B 炸药	660	580	510

计算采用数据如下。TNT: $t = 220 \sim 260^\circ\text{C}$ (液态), $E = 1.55 \times 10^5 \text{ J/mol}$, $qZ = 2.09 \times 10^{14} \text{ J/s} \cdot \text{g}$; RDX, $t = 170 \sim 200^\circ\text{C}$ (固态), $E = 2.38 \times 10^6 \text{ J/mol}$, $qZ = 8.4 \times 10^{11} \text{ J/s} \cdot \text{g}$; B 炸药, $t = 155 \sim 180^\circ\text{C}$ (液态), $E = 1.84 \times 10^6 \text{ J/mol}$, $qZ = 2.51 \times 10^{10} \text{ J/s} \cdot \text{g}$ 。

从撞击感度或摩擦感度试验中, 可以旁证泰安和黑索金等炸药的临界热点温度约为 400°C 。表 3-2-4 给出了泰安掺有不同熔点附加物的摩擦感度试验结果。

从表 3-2-4 可看出, 在熔点 400°C 以上的杂质棱角处才能产生热点, 才有可能发生爆炸, 所以这也可以旁证, 热点的临界温度在 400°C 左右。

按照热点临界温度 400°C , 可从表 3-2-3 判断, 热点尺寸约为 10^{-3} cm 数量级。

表3-2-4 含杂质泰安的起爆

杂 质	硬度 (莫氏)	熔点 (°C)	摩擦感度 (%)
无 (纯泰安)	2	141	0
AgNO ₃	2 ~ 3	210	0
KNO ₃	2 ~ 3	334	0
K ₂ Cr ₂ O ₇	2 ~ 3	398	0
AgBr	2 ~ 3	434	50
AgI	2 ~ 3	550	100
玻璃	7	800	100
方铅矿	2 ~ 3	1114	100

4. 热点的成长过程

由分幅高速摄影技术可以观察热点的成长过程。此过程大致可分成如下几个阶段,

a. 热点形成阶段

b. 由热点向周围着火阶段。这是一种快速燃烧的过程, 如泰安、黑索金以及泰安和梯恩梯的混合物中测得的爆燃速度为

泰安 $\sim 460 \text{ m/s}$

黑索金 $\sim 300 \text{ m/s}$

泰安加10~20%梯恩梯 $\sim 220 \text{ m/s}$

c. 由快速燃烧 (爆燃) 转为爆轰。这种转变过程是热点成长的关键。下面我们着重分析这种转变过程的规律性。

燃烧转向爆轰在很大程度上决定于约束条件。如不带外壳的裸露装药点火后一般不会转为爆轰, 而在厚壳包围的炸药就很容易转为爆轰。另外, 在同样约束条件下, 炸药燃烧转变为爆轰的难易程度取决于炸药本身的一些物理性质, 包括聚集状态、体积密度、燃烧速度、冲击波感度, 以及装药

尺寸等。

把炸药放置在厚钢管内，进行炸药燃烧转向爆轰的试验装置见图 3-2-3。钢管的一端电点火，点火压力由贴在管壳上的电阻应变片测量，电探针检验是否转为爆轰。

实际测得的燃烧压力增长情况用下式表示

$$p = p_0 e^{kt} \quad (3-2-6)$$

式中 p_0 为初始压力， k 为时间常数。

一般距点火 10~15cm 处燃烧转为爆轰。由电探针测得爆轰波，由应变片记录达到的压力。其压力随时间增长的具体表达式为

$$p = 0.08 e^{0.1t} \quad (3-2-7)$$

式中 p 的单位为 10^5Pa ， t 的单位为 μs 。

在压力 p 作用下壳体要发生膨胀，相应于壳体不同的膨胀百分数时的压力和时间数据如下：

$t (\mu\text{s})$	30	40	50	60	70
$p (\text{Pa} \times 10^5)$	1.6	4.5	12	33	90
膨胀百分数 (%)	4	10	29	86	256

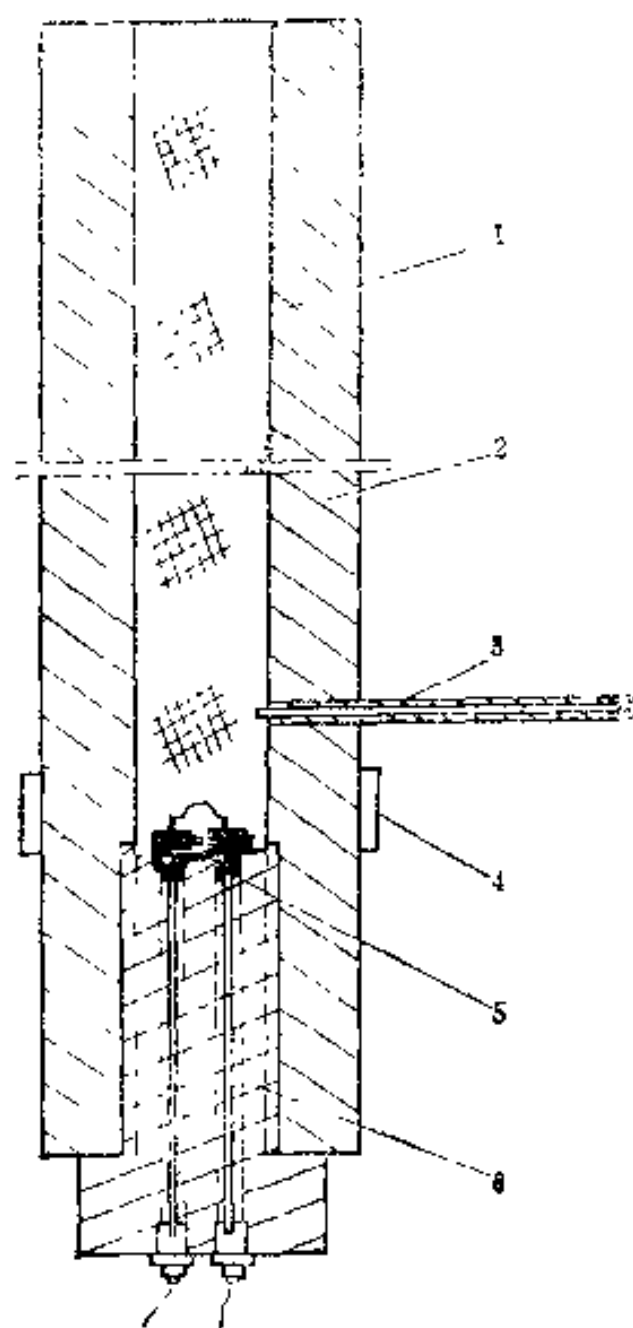


图3-2-3 燃烧转向爆轰

试验装置图

1—铸装炸药；2—外壳；3—电探针；4—应变片；5—压力封住；6—底座。

如果把燃烧面的压力看作一个以燃速推进的活塞，这个活塞在推进过程中产生一道道的压缩波进入活塞前的炸药中，由于压力增长，燃速加快，后续的压缩波行进得比前面的压缩波要快，因此它们总要追赶上前面的压缩波，赶上后迭加而形成冲击波。从燃烧界面所发出的各道波的特征线是收敛的，各道波的会聚处即为冲击波形成区。由上述实验装置所测得的数据，绘制成 $p-t-s$ 特征线图，见图 3-2-4。由图可以直观地看出燃烧转变为爆轰的物理过程。

图 3-2-4 表明，燃烧面行进速度开始很缓慢，在 $t-s$

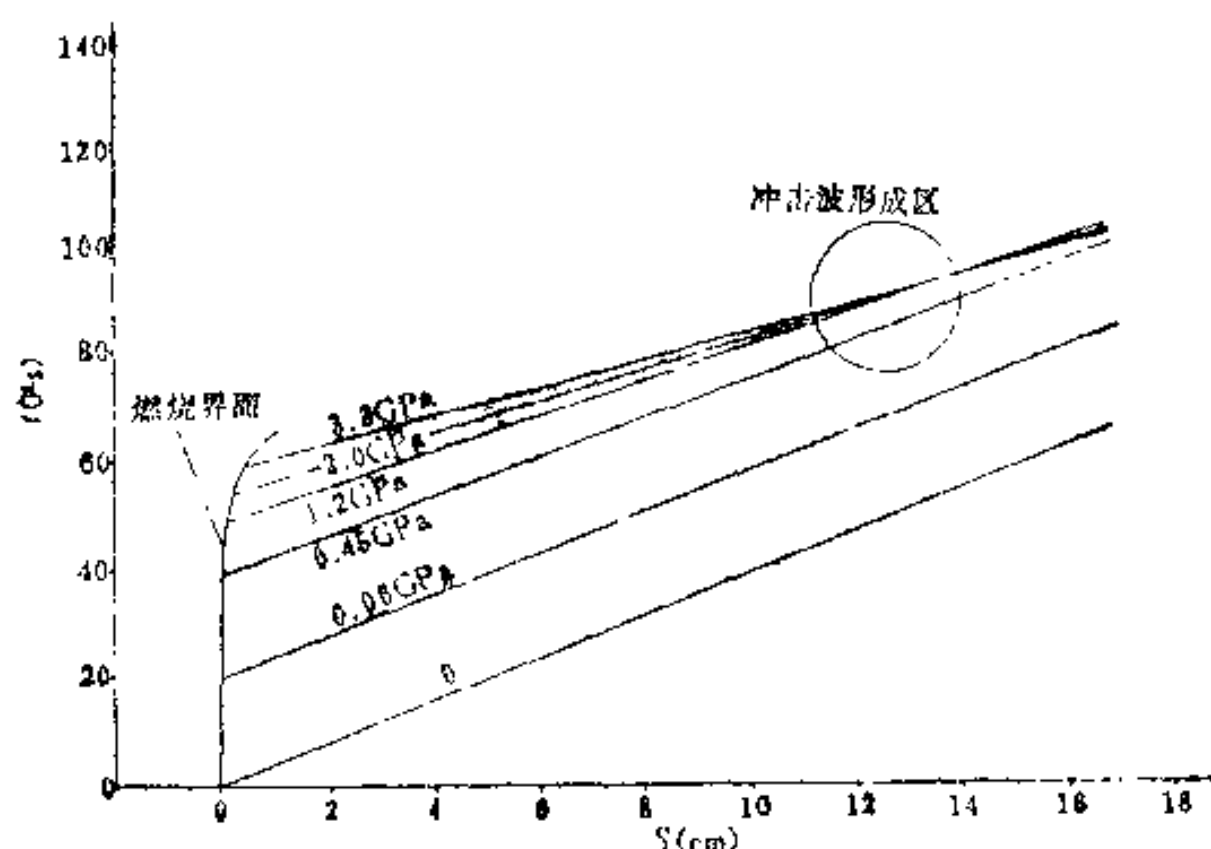


图3-2-4 强约束下炸药从燃烧转为爆轰的特征线图

特征线上接近于一条铅垂线；当 p 逐渐增加时， u 增加； p 超过 1.2 GPa 后， u 明显增大；当 p 达到 3.3 GPa 时，炸药由燃烧转为爆轰。

从上面分析看出，燃烧转向爆轰的过程，就是燃烧阵面由

于压力逐渐升高,燃速加快,压力波迭加而形成冲击波,亦即形成爆轰波的过程。在此过程中最关键的因素是压力,而影响压力的主要因素是装药的约束条件,即有无外壳,外壳强度等的影响。从技安角度来看,尤其要注意带壳装药的技安问题。

5. 热点理论的应用举例

a. 炸药的钝感剂

单质炸药中有很多炸药机械感度比较高(如泰安、黑索金、奥克托金等),实际应用中都必须降低感度。加入炸药后,能降低炸药机械感度的物质,称为钝感剂。选择钝感剂的原则就是热点理论。按照热点理论,炸药在机械作用下的起爆主要是由于形成热点,如果加入炸药中的物质能起到阻止形成热点的作用,也就是起到了钝感作用,换句话说,任何能使炸药在机械作用下难以形成热点的物质,都是钝感剂。

一般混合炸药中所用的钝感剂主要特点是钝感膜的韧性好,硬度低,塑性大以及有较高的热容量和导热性。这些特点都是有利于阻止热点产生,即有利于降低炸药机械感度的。由于炸药颗粒外包覆一层硬度低、塑性大的物质,炸药颗粒的棱角被它覆盖,成为可塑性好的球状颗粒,这样,在撞击和摩擦过程中不容易引起应力集中,即不容易形成热点。钝感剂的热容量和导热性高,使得炸药在机械作用下,即使产生了热点,也难以扩展成长为爆轰,因为热点的热量能较容易地被钝感剂吸收或导走,使热点的能量不足以引起热点周围炸药的爆轰,也就阻止了热点的扩展。

b. 压药模具光洁度

压药事故往往与模具有关。模具光洁度不高,或由于配合间隙不合适,冲头啃了模套,都能使压药时增加炸药和模

壁的摩擦，就在粗糙点或啃模处因摩擦而形成热点，增加了压药事故的可能性。因此，对炸药压药模具的光洁度一般均有严格要求，生产用的模具应经常检查光洁度，以便及时更换，保证安全生产。

c. 膛炸

炮弹膛炸的原因很多，其中原因之一是绝热压缩装药中气隙而形成热点，引起弹丸的膛炸。像铸装炸药时形成的缩孔，以及漏装弹底引信（形成空气隙）等，都是产生膛炸的潜在因素，必须在生产工艺中严格控制，保证装药和装配质量。

二、炸药的机械感度

炸药对机械作用的感度有很多形式，如机械撞击感度，针刺感度，摩擦感度等。下面着重介绍我国实际使用的一些方法，适当介绍一些国外典型测试方法和衡量指标。

1. 炸药的撞击感度

炸药的撞击感度的测试仪器和方法，各国都不同，但基本方法是一致的。常见的测定炸药撞击感度的仪器是立式落锤仪（卡斯特落锤仪），仪器概貌见图 3-2-5。它有两个固定的互相平行的立式导轨，重锤在导轨之间可以自由上下滑动，重锤由钢爪钩住，可以使重锤固定在不同的高度，只要轻轻拉动钢爪上面的绳子，锤即可立即沿导轨自由落下。锤的质量分 10kg、2 kg 两种。仪器的另一重要部分是撞击装置（见图 3-2-6），撞击装置由导向套、击柱和底座组成。炸药放在两个击柱的中间。实验时拉动钢绳使钢爪松开，锤就自由下落，撞击在击柱上，由火花、烟雾或声响判断炸药是否发生爆炸。为了提高测试精度，应严格控制仪器操作和实

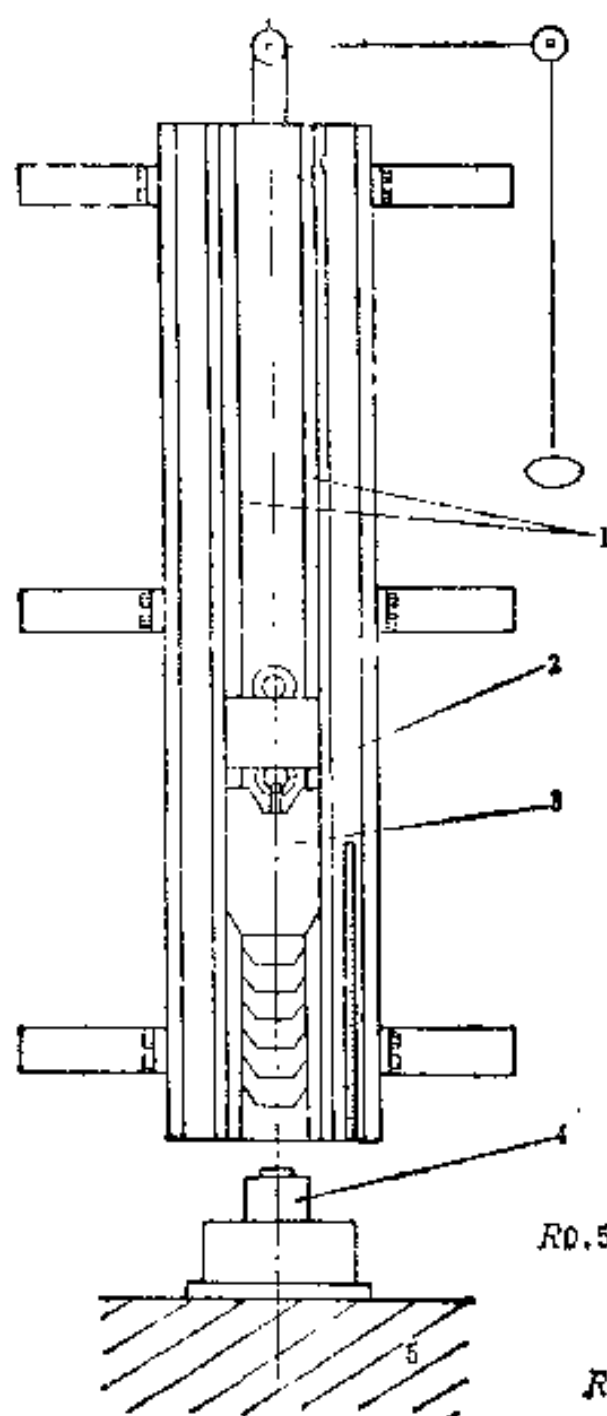
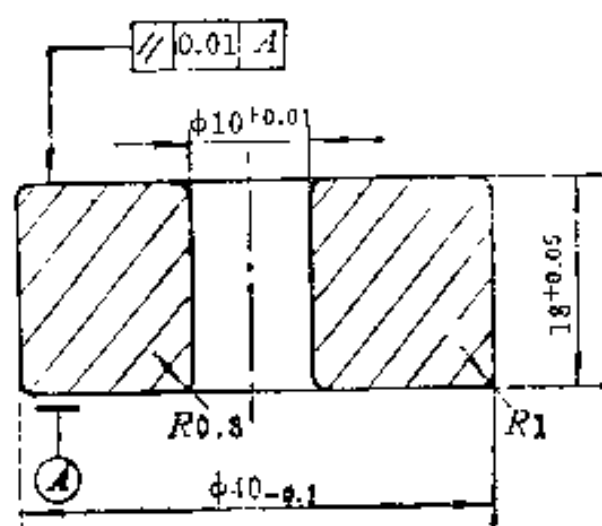
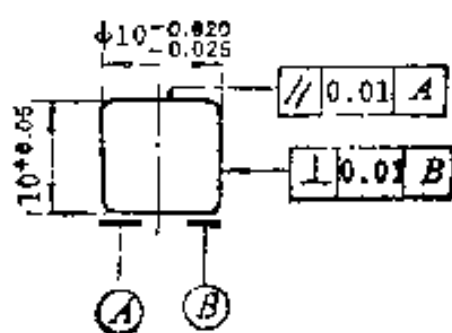


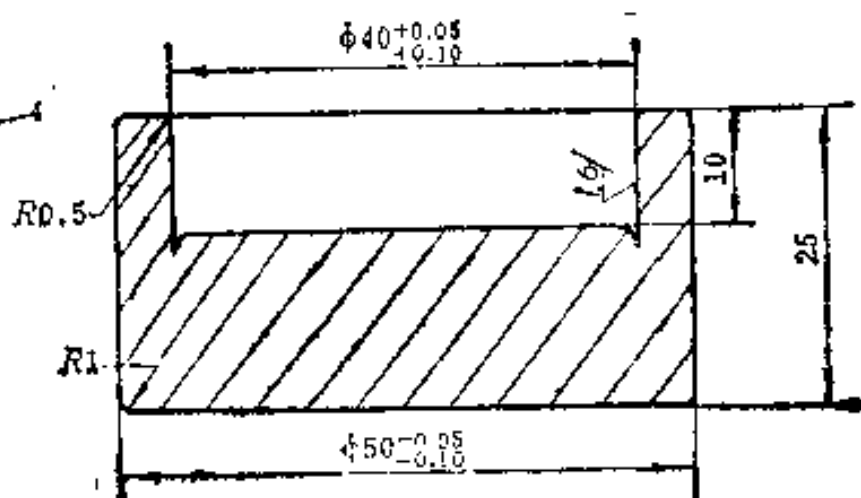
图3-2-5 卡斯特落锤仪
1—导轨；2—钢爪；3—重锤；
4—撞击装置；5—底座。



(a)



(b)



(c)

图3-2-6 撞击装置

验条件，如导轨的垂直度和平行性，撞击装置的材料、光洁度、加工精度、硬度、公差配合、倒角等都应严格控制。

撞击感度的表示方法有很多。在国内，一般对猛炸药都用爆炸百分数法；对起爆药广泛应用上、下限法。

爆炸百分数表示方法是在一定锤重和一定落高条件下，撞击炸药，以其爆炸概率（爆炸百分数）表示。试验中常用的锤重为 10kg，落高 25cm，平行试验 25 次，计算其爆炸百分数。试验用药量为 0.05 ± 0.001 g，对爆炸百分数为 100% 的炸药，改用 2 kg 落锤进行试验。落高可增至 50cm。

试验前应该用经过精制的一定颗粒大小（40~80 目）的特屈儿炸药对仪器进行标定。在锤重 10kg，落高 25cm 的条件下，爆炸百分数应为 $48 \pm 4\%$ 。在锤重 5 kg，落高 25 cm 的条件下，用黑索金标定其爆炸百分数也应为 $48 \pm 4\%$ 。如果标定结果超出这个范围，就应仔细调整仪器，严格控制各种条件，直到标定结果符合上述范围后才能正式测试其它数据。

在标准条件下（锤重 10kg，落高 25cm），一些炸药的爆炸百分数列于表 3-2-5。

表3-2-5 猛炸药的机械撞击感度

炸 药	特屈儿	黑索金	奥克托金	泰安	钝化黑索金	60梯/50黑	
爆炸百分数 (%)	1~8	11~52	72~80	72~80	100	28~32	50

起爆药的机械撞击感度用弧形落锤仪测定。一般是固定锤重（常用锤重 400 g）测定 100% 爆炸的最低落高，即所谓“上限”，或测定 100% 不爆炸的最大落高，即所谓“下

限”，往往是上、下限同时测定。常用的起爆药的撞击感度数据列于表 3-2-6。

表3-2-6 起爆药的机械撞击感度（锤重400g）

炸 药	雷汞	特屈拉辛	迭氮化铅	斯蒂夫酸铅	二硝基重氮酚
上限落高(cm)	9.5	6.0	33	36	—
下限落高(cm)	3.5	3.0	10	11.5	17.5

撞击感度的表示方法，有时也用一定重锤条件下 50% 爆炸的特性落高 H_{50} 表示。 H_{50} 是用“阶梯法”连续进行的，每发试验中落锤试验的落高水平是由上一发试验结果而定。如果上一发试验在 h_i 时“不爆”，则升高落锤一个间隔 B ，如果上一发试验结果是“爆”，则降低一个间隔 B 到较低点 h_{i-1} 。一直做完规定数量的试验次数，试验次数不少于 20 发。特性落高 H_{50} 由数理统计分析得出表达式。

$$\text{按“爆”计算} \quad H_{50} = \left[A + B \left(\frac{\sum ic_i}{D} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (3-2-8)$$

$$\text{或按“不爆”计算} \quad H_{50} = \left[A + B \left(-\frac{\sum ic'_i}{D'} + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (3-2-9)$$

式中 A ——所有试验落高中最低落高(cm)； B ——试验间距(cm)； D ——发生爆炸的次数； D' ——不爆的次数； i ——落高水平序数，从 0，1，2，3，4…数到 i ； c_i ——在每一落高中发生爆炸的次数； c'_i ——在每一落高中不爆的次数。

现举例如下：

落高 (cm)	试验次数																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
30						^								×						
35	×		×		√		×						0		×		^			
40		0		0				×		×		0				0		0		0
45									0	0										

表中“×”表示“不爆”，“0”表示“爆”，某一落高下“爆”和“不爆”数统计在表格最后两项中，以便数据处理。

对上述试验结果进行处理如下：

落高 (cm)	i	c	c'	ic_i	ic'_i
30	6	0	2	0	0
35	1	2	6	2	0
40	2	6	2	12	4
45	8	2	0	6	0

$$A = 30, \quad B = 5, \quad D = 10, \quad D' = 10, \quad \sum ic_i = 20, \quad \sum ic'_i = 10$$

$$H_{50} = \left[30 + 5 \left(\frac{20}{10} - 0.5 \right) \right] = 37.5 \text{ (cm)}$$

$$\text{或} \quad H_{50} = \left[30 + 5 \left(-\frac{10}{10} + 0.5 \right) \right] = 37.5 \text{ (cm)}$$

(3-2-8) 式是按“爆”计数进行计算，而 (3-2-9) 式是按“不爆”计数进行计算。若“爆”与“不爆”次数相等，两个式子可任意选用。若不等，就用值小的次数进行

计算。

这种方法在冲击波感度等试验中用得较广泛，它不但可减少试验次数，而且可增加试验信息。

三、炸药的摩擦感度

炸药在生产、运输和使用过程中，经常会遇到承受摩擦作用的情况，在多大摩擦作用下会发生爆炸危险，需要有一个数量的概念。有些火工品（如手榴弹中的拉火管）就是靠摩擦发火的，这就需要知道此类炸药摩擦发火的可靠性。

我国普遍采用摆式摩擦仪（图 3-2-7）来测定炸药摩擦感度。它的基本原理是，加有静载荷的摩擦击柱之间夹有试样，在摆锤打击下使上下击柱间发生水平移动，以摩擦炸药试样，观察爆炸百分数。

测定装置示意图如图 3-2-8 所示。炸药试样放置在两个直径为

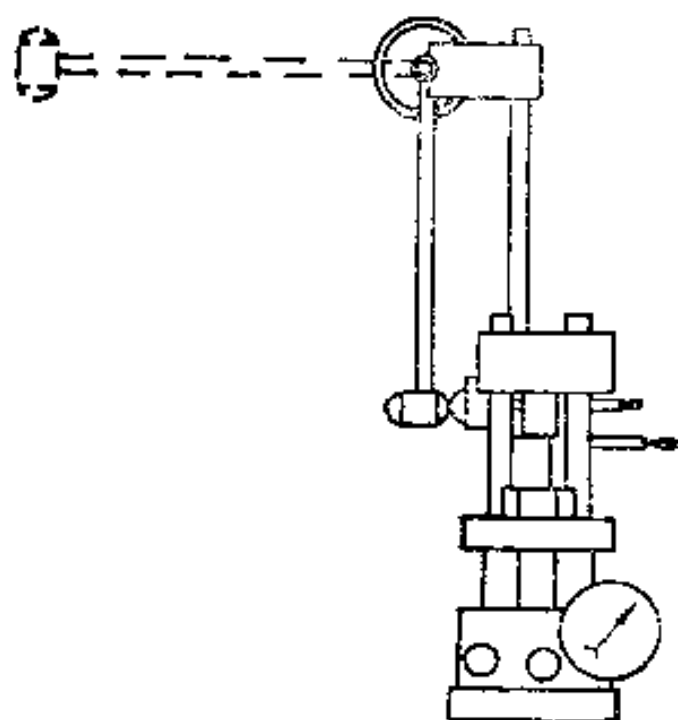


图3-2-7 摆式摩擦仪示意图

10mm的击柱之间，用油压机通过活塞将击柱从导向套推出，使两柱的接触面离开导向套，并紧压在顶板上，以使炸药试样承受一固定的垂直压力，压力大小由压力表读出。仪器带有一个摆锤，试验时把摆锤悬挂成所需要的摆角（一般悬挂成 90° ）打击击杆，使可滑动击柱水平移动一段距离，观察是否爆炸。平行试验 25 次，计算爆炸百分数。爆炸百分

数愈高，摩擦感度愈高。表 3-2-7 列出了几种常用炸药的摩擦感度数据。

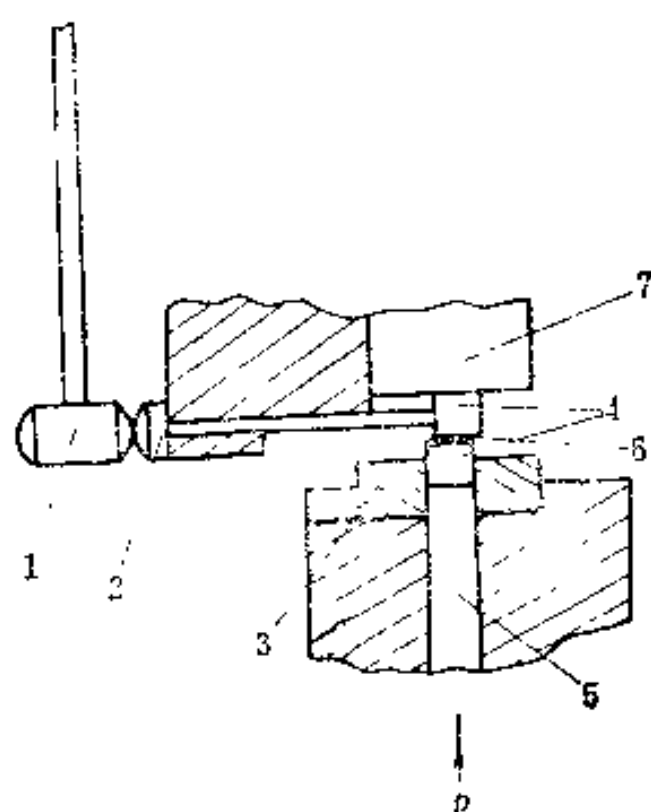


图3-2-8 测定装置示意图

1—摆锤；2—击杆；3—导向套；4—击柱；5—活塞；
6—炸药试样；7—顶板。

表3-2-7 常用炸药的摩擦感度

(试验条件：摆角 90° ， $p = 6.55 \times 10^8 \text{ Pa}$ ， $m = 0.02 \text{ g}$)

炸药	梯恩梯	特屈儿	黑索金	泰安	507NT/ 50RDX	A-Ⅱ-1	Ⅱ 2
%	0	24	48~52	92~96	4~8	8~16	9

一般起爆药的摩擦感度都比较高，因此要降低初始冲能，以便相互比较，实际使用的试验条件为：摆角 80° ， $p = 7.26 \times 10^8 \text{ Pa}$ ， $m = 0.01 \text{ g}$ 。在这样的条件下，测得常用几种起爆药的摩擦感度数据列于表 3-2-8。

表3-2-8 一些起爆药的摩擦感度

炸药	雷汞	叠氮化铅	斯蒂夫酸铅	特屈拉辛	二硝基重氮酚
5	100	56	70	70	25

§ 3-3 炸药的冲击起爆及冲击波感度

炸药的冲击起爆是经常遇到的一种起爆方式。例如飞片撞击炸药，主发装药通过间隙引爆被发装药，主发装药直接引爆被发装药等。

均相和非均相炸药的冲击起爆机理有很大不同，所谓均相炸药是指物理均匀的炸药，不包含间隙、气泡、杂质、裂纹缺陷等不均匀状态。无气泡的液体炸药和单晶体固体炸药属于均相炸药，而低密度散粒体压装炸药则是典型的非均相炸药。均相和非均相炸药在一定条件下是可以转化的，例如散粒体压装炸药在低密度时为非均相炸药，在密度加大到接近晶体密度时，就完全呈现均相炸药的性状。

一、均相炸药的冲击起爆机理

许多研究结果证明，均相炸药受到冲击加载以后，在初始冲击波阵面的后面，被冲击加载作用时间最长的地方实现起爆，而不是在初始冲击波阵面上起爆。此时初始冲击波波阵面已深入炸药内一段距离，而受冲击作用时间最长的一般是加载面或加载面附近的面上，而起爆正是在这个加载作用时间最长的面上实现的。

在初始冲击波通过后，炸药被冲击整体加热，然后出现化学反应。经过极短的延滞以后，在加载面附近产生爆轰。由

于这个爆轰是在初始冲击波通过后，已被冲击压缩过的炸药中发生的，因此这个爆轰波的传播速度比正常的稳定爆速大得多。这种超过正常爆速的爆轰一般称之为超速爆轰（又称过驱动爆轰）。虽然这种超速爆轰在一开始时跟在初始冲击波的后面，但因它超速行进，在经过一段短距离后，此爆轰波面很快就赶上初始冲击波面，爆速突然降低到略高于正常爆速的值，然后慢慢地达到正常爆速。

硝基甲烷在平面冲击波起爆实验中，按照实测结果处理后得到的冲击波速度、质点速度和爆轰波速度的距离-时间关系示于图 3-3-1。

硝基甲烷中初始冲击波参数如下： $p = 8.1 \text{ GPa}$ ， $u_p = 1620 \text{ m/s}$ ， $u_s = 4500 \text{ m/s}$ 。在初始冲击压缩过的硝基甲烷炸药中，其发生的爆轰具有 10000 m/s 的速度，大大高于正常爆轰（ 6290 m/s ）。

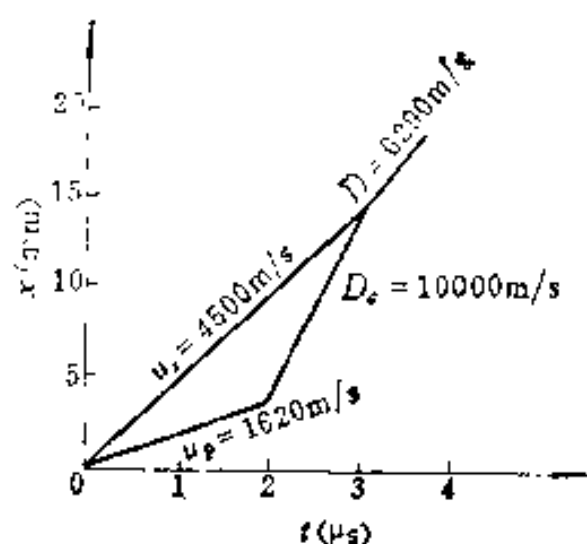


图3-3-1 硝基甲烷的冲击起爆

从冲击波进入炸药的瞬间到爆轰在加载面附近发生，这一段时间叫起爆感应期。感应期大小随初始冲击波压力、初温、炸药纯度和加载表面粗糙度而变化。例如对硝基甲烷，初始冲击波压力由 8.6 GPa 增加到 8.9 GPa 时，感应期由 $2.26 \mu\text{s}$ 减少到 $1.74 \mu\text{s}$ ；初温由 1.6°C 增加到 26.8°C 时，感应期由 $5.0 \mu\text{s}$ 减少到 $1.8 \mu\text{s}$ 。

从加载面到炸药中首先出现爆轰发光点之间的距离叫起爆深度。起爆深度随初始冲击波参数而变。例如主发装药为 $60\text{RDX}/40\text{TNT}$ ，直径 $\phi 75 \text{ mm}$ 、长 140 mm 的药柱经过有机

玻璃隔板加载于内径为 $\phi 53\text{mm}$ 的有机玻璃管中的硝基甲烷, 结果见表3-3-1。

表3-3-1 起爆深度与隔板厚度的关系

有机玻璃隔板 厚度(mm)	有机玻璃表面 $u_r(\text{m/s})$	$p_k(\text{GPa})$		起爆深度 (mm)	u_r (m/s)
		有机玻璃	硝基甲烷		
5	6000	15.6	14.0	0	—
12	5750	13.8	12.3	0	6340
17	5550	12.4	11.0	0	6380
25	5280	10.7	9.5	7	—
29	5130	9.8	8.6	10	—
30	5100	9.6	8.4	19	6390
35	4900	8.4	7.4	未爆	—

均相炸药冲击起爆试验结果表明, 这类炸药冲击起爆的基本特点:

1. 均相炸药冲击起爆发生在初始加载面上或加载面附近, 而不是发生在初始冲击波阵面上。
2. 由于起爆发生在已经被压缩过并且密度增加了的炸药中, 所以出现超速爆轰。
3. 由于超速爆轰速度大于先行初始冲击波速度, 所以超速爆轰能够追赶上先行冲击波。

二、均相炸药冲击起爆判据

由于均相炸药冲击起爆具有热起爆的特征(整体加热), 因此起爆与否决定于冲击温度和加热层厚度。而冲击温度由初始冲击波强度所决定的。加热层厚度决定于初始冲击波的

脉宽（即冲击波作用时间或持续时间），在炸药爆炸后产生的冲击波脉宽大致相同的情况下，冲击波强度主要由冲击波压力来衡量，所以目前对均相炸药冲击起爆判据都用临界起爆压力 p_k 来衡量。

临界起爆压力 p_k 就是能起爆炸药的最小初始冲击波压力。实验证实了均相炸药冲击波感度次序和临界起爆压力是完全一致的。

实验测得的一些均相炸药的临界起爆参数见表3-3-2。

表3-3-2 均相炸药的临界起爆条件

炸 药	$p_k(\text{GPa})$		延滞时间 (μs)	$T(\text{K})$	$T_0(\text{K})$
	实验	计算			
硝基甲烷	9.3	11.5	1.0	1200	20
泰安晶体	11.2	12.2	0.3	700	25
聚索金晶体	17.0	16.2	0.9	770	20
特屈儿晶体	—	15.0	1.0	810	20
梯恩梯晶体	—	18.0	0.7	1000	20
梯恩梯液体	12.5	12.5	0.7	1000	25
四硝基甲烷液体	8.6	8.2	1.0	700	20
硝化甘油液体	—	12.0	0.3	760	20

三、非均相炸药的冲击起爆机理

所谓非均相炸药是指炸药中存在物理不连续性（气泡空穴、杂质、缺陷等）。实际应用的固体炸药一般都是非均相的。例如一般常用的散粒体压装炸药，除了理论密度的以外，都或多或少包含有一定的空气间隙，这就构成非均相体系。这种非均相炸药冲击起爆过程和均相炸药有很大区别。

非均相炸药的冲击起爆是由热点起爆而后扩展的。所以它属于热点起爆机理。非均相炸药在受冲击加载时，由于入

射冲击波在炸药的物理不连续处相互作用，形成射流，空穴崩溃，冲击波分离、碰撞、马赫效应等，使其附近的炸药颗粒出现了化学反应，其释放的能量使入射冲击波得到了加强。当得到加强的冲击波和不连续点继续作用时形成高温热点，就使比较多的炸药得到了分解。于是冲击波幅度值就愈来愈大，以至释放愈来愈多的能量，直至冲击波加强到能使炸药立刻产生爆轰。

上述起爆过程可以通过实验观察得到。在压装梯恩梯药柱中距引爆面分别为 0、3、5、8、10、12、16mm 处安装压力传感器测得压力 p 随时间 t 分布，见图 3-3-2。

从图上可看出，随着入射冲击波的行进，压力峰愈来愈高，直至达到爆轰。

由于非均相炸药反应是从局部热点处扩展开的，而不像均相炸药反应那样，冲击能量均匀分配给整个起爆

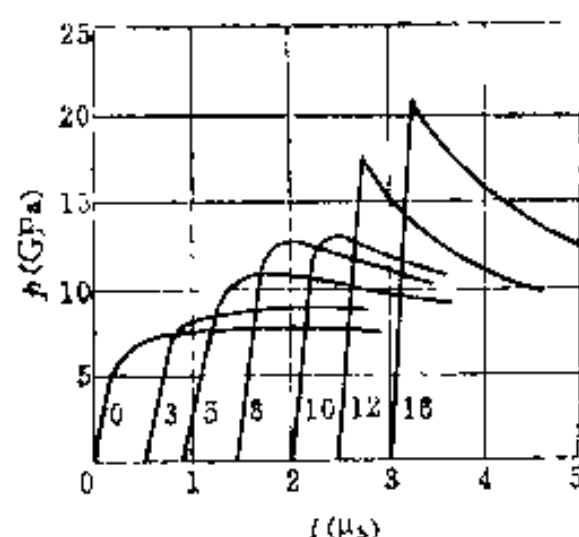


图 3-3-2 在梯恩梯中的压力分布

面上，而是能量集中到物理不均匀点上，形成热点。因此起爆非均相炸药所需的临界起爆能量比均相炸药要小得多。表 3-3-3 列出了泰安、黑索金和特屈儿三种炸药在晶体密度（均相）和低密度（非均相）时所测得的临界起爆压力。从表看出非均相炸药很容易受冲击起爆。

图 3-3-3 表示的是 65RDX/35TNT 和硝基甲烷两种炸药起爆所需初始冲击波压力的比较，图中纵坐标是起爆深度。从图中看出对于同样的起爆深度，非均相的 65RDX/35TNT 所需起爆压力比均相的硝基甲烷所需起爆压力要小。

表3-3-3 几种炸药的均相和非均相临界起爆压力

炸药	泰安		黑索金		特屈儿	
ρ	晶体	1.6 g/cm ³	晶体	1.45 g/cm ³	晶体	1.655 g/cm ³
P_* (GPa)	11.2	0.91	17.0	0.82	15.0	1.85

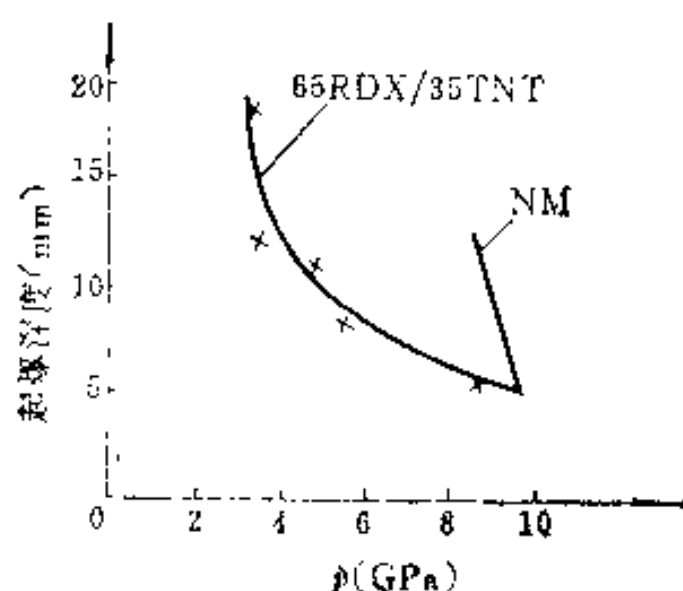


图3-3-3 均相和非均相炸药起爆深度随初始冲击波压力的变化

四、均相和非均相炸药冲击起爆过程比较

根据大量实验研究，均相炸药和非均相炸药冲击起爆过程的不同点可归纳如下：

1. 均相炸药中初始冲击波速度基本上是一个常数，或稍微有些衰减；而非均相炸药中，冲击波在整个行进中不断加速。
2. 均相炸药中，冲击转变为爆轰是很突然的；而在非均相炸药中是逐渐地进行的。
3. 在均相炸药中，爆轰开始阶段是超速爆轰；而对非均

相炸药来说，一般不出现超速爆轰。

4. 对均相炸药，爆轰出现在冲击加载面或加载面附近处；但在非均相炸药中，爆轰出现在冲击波阵面附近，即跟随冲击波向炸药深处行进而逐渐加强。

5. 非均相炸药的冲击感度明显地高于同种单质均相炸药。例如冲击起爆硝基甲烷-金刚砂混合物所需的初始冲击波速度为2470m/s，压力2.3GPa；而起爆纯硝基甲烷所需的值分别为4500m/s和8.5GPa。原因是非均相炸药由于物理不均匀性使冲击波迭加、反射、相互作用，容易形成热点；而均相炸药是整体起爆，所需起爆冲能明显地大。

6. 在均相炸药中，初始冲击波通过后的物质基本上是非导电性的，一直到超速爆轰赶上来时才导电；而在非均相炸药中初始冲击波后的材料是完全导电的。

7. 在均相炸药中，初始温度对起爆过程影响很大；而非均相炸药起爆对温度不敏感，却对冲击波脉冲宽度（冲击作用持续时间）比较敏感。

8. 在非均相炸药引爆过程中，有时会出现“反向爆轰”，即向波传播的反方向上行进爆轰波；而均相炸药中不存在这种现象。“反向爆轰”是由于初始冲击波刚进入炸药时，反应不完全或基本无反应，待爆轰成长起来后又向未完全反应的炸药处传播一个反向爆轰，使反应完全进行。

对于非均相炸药，典型的起爆过程如图3-3-4。从图中可看出，初始冲击波过渡到稳态爆轰不像均相炸药那样突然，而是比较平滑过渡的。实际上初始冲击区也是爆轰区，只是这种爆轰属于反应不完全的低速爆轰罢了。所以爆轰成长基本上是连续的，而不是突变的。同时也不像均相炸药那样出现超速爆轰，而是成长到稳态爆轰。

逐渐提高压装炸药密度时, 冲击感度明显下降, 在接近晶态密度时, 非均相炸药的起爆行为逐渐接近于均相炸药。

图3-3-5表示出两组梯恩梯压装药柱起爆实验结果。这两

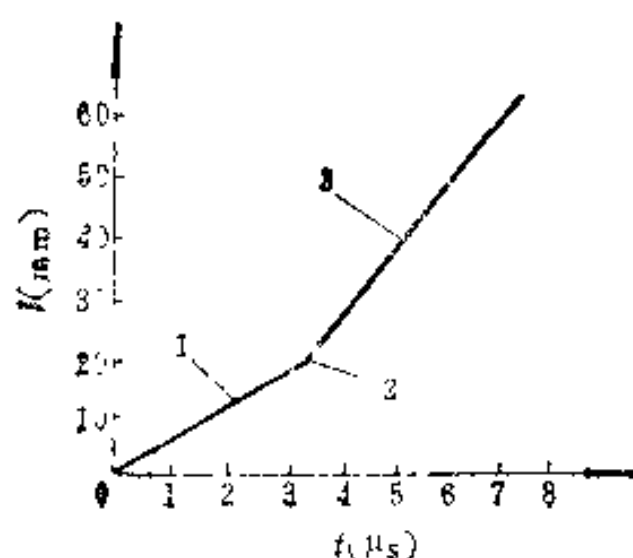


图3-3-4 非均相炸药

65:35 TNT冲击起爆过程

1—初始冲击波; 2—过渡区; 3—稳定爆轰。

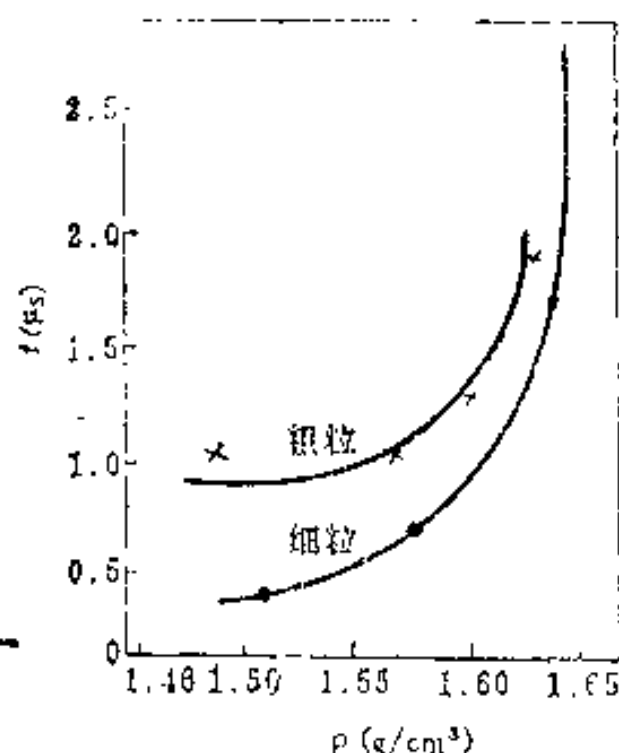


图3-3-5 密度对爆轰延迟时间的影响

组中一组以粗粒为主, 另一组以细粒为主。随着密度逐渐提高, 冲击波感度降低, 当接近理论密度时, 冲击波感度下降更迅速。在中等密度时, 密度变化对冲击波感度的影响不很大, 而粒度的影响显得比较突出。细颗粒炸药较易于被起爆。

非均相炸药和均相炸药起爆过程之所以不同, 是由于起爆机理的不同。非均相炸药靠热点起爆。因为在非均相炸药中存在气泡、孔隙和其它缺陷等, 因此在受外界能量作用时, 起爆能量容易集中在这些气泡、缺陷上而形成热点, 相应所需的起爆冲能就要小得多。相反, 均相炸药不是靠热点起爆,

而主要靠热起爆，它需要整体冲击加热到爆炸，所以相应所需的起爆能量要高得多。

炸药颗粒的影响，可归结为气泡的影响。从几何规律来看，炸药颗粒之间空隙的数量随颗粒数量的增加而增加，所以炸药颗粒愈细，炸药粒之间的空隙愈多，热点愈容易形成，所需起爆能量愈小。必须指出，在同样密度下，大颗粒炸药的总空隙体积可能比小颗粒的大，但空隙数少，即每个空隙所占体积大，这对起爆也是不利的。所以大颗粒炸药不如小颗粒炸药容易起爆。小间隙比同样体积的大间隙更为有效地引起化学反应。固体炸药的起爆反应是表面反应，反应比表面愈大，反应愈快，愈容易起爆。

五、非均相炸药冲击起爆判据

非均相炸药冲击起爆判据表达方式很多，最常用的是50%起爆被发装药时初始冲击波压力。也有的以抛射体临界速度作为引爆炸药的判据。

目前许多研究者倾向于用 $p_0^2 \tau$ 来作为冲击引爆炸药的判据。其中 p_0 ——入射冲击波压力。 τ ——压力脉冲持续时间(脉宽)。

这个判据实际上是从炸药吸收能量角度来考虑的。设有一飞片以一维状态撞击炸药，飞片的动能

$$E_k = \frac{1}{2} m u_D^2 \quad (3-3-1)$$

式中 m 是飞片质量， u_D 是飞片速度。

$$\left. \begin{aligned} m &= A \delta \rho, \quad \tau = \frac{2 \delta}{D_r} \\ u_D &= 2 u, \quad u = \frac{p}{\rho D_r} \end{aligned} \right\} \quad (3-3-2)$$

式中 A 、 δ 、 ρ 分别是飞片撞击面积、厚度和密度, D_s 和 u 分别是冲击波速度和质点速度, p 是冲击波压力。由此可以得到

$$E_k = \frac{A\tau p^2}{\rho D_s} \quad (3-3-3)$$

如果考虑单位面积的飞片时

$$E_k = \frac{p^2\tau}{\mu} \quad (3-3-4)$$

式中 $\mu = \rho D_s$, 称为飞片冲击阻抗。

当飞片撞击速度较低时, 飞片冲击阻抗近似认为是常数。这时就近似用临界起爆乘积 $p^2\tau$ 的概念来表示临界起爆能量。这种 $p^2\tau$ 作为冲击引爆的判据和 PBX-9404 试验结果符合得很好, 不管用飞片撞击、落锤试验、摩擦试验等, 与引爆判据都比较一致。表 3-3-4 列出了一些非均相炸药的临界起爆条件。

表 3-3-4 非均相炸药的临界起爆条件

炸药	ρ (g/cm ³)	p_k (GPa)	$p^2\tau$ (EPa ² ·μs)	E_k (J/cm ²)	u_k (mm/μs)
泰安	1.60	0.91	1.25	16.74	0.3
	1.40	0.25	0.41	—	~0.3
	1.00	—	0.05	8.37	
梯恩梯	1.65	10.4	10.00	142	
黑索金	1.45	0.82	1.00	79.5	
特制儿	1.655	1.95	—	46	0.4
PBX9404	1.84	6.45	4.70	58.6	

六、冲击波感度的测定方法

炸药在冲击波作用下发生爆炸的难易程度，称为炸药对冲击波作用的感度。研究这个问题对炸药和弹药的安全、生产、储存和使用以及弹药、引信、火工技术的发展都具有重要的实际意义。例如，进行火炸药、火工品及弹药装药工厂及储存仓库的安全距离设计时，需要知道炸药在多大冲击波压力作用下100%爆炸，或100%不爆的感度数据。再如在设计聚能装药中调整爆轰波形用的塑料隔板，确定引信中雷管与传爆药柱之间的距离和隔爆装置的尺寸时，也需要掌握炸药对冲击波作用感度的有关数据。

使用蜡间隙试验评定炸药冲击波感度的试验装置见图3-3-6。主发药柱为 $\phi 41.3\text{mm}$ 、 $h 50.8\text{mm}$ 、质量100g的特屈儿药柱，蜡间隙可以调整，被发药柱和主发药柱直径相同。试验采用“上下法”确定50%爆炸的蜡间隙厚度 n_{50} ，用钢块印痕法判别被试药柱爆轰与否。一些炸药的蜡间隙试验结果如表3-3-5所示。

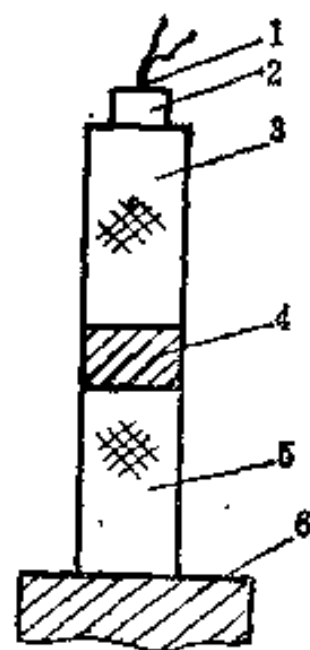


图3-3-6 蜡间隙试验装置

1—雷管；2—传爆药柱；
3—主发药柱；4—隔板；
5—被发药柱；6—钢座。

固体火箭推进剂的冲击波感度在美国已标准化，采用一种间隙试验装置（见图3-3-7）来测定。它用 $\phi 50.8 \times 25.4\text{mm}$ 的两个压装特屈儿（ $\rho_0 = 1.51\text{g/cm}^3$ ）作冲击源，用有机玻璃或醋酸纤维的卡片迭合成所需要的厚度，组成卡片隙插入主发药和被发药之间，被发药用内径 $\phi 36.5\text{mm}$ 、外径 $\phi 47.6\text{mm}$ 、长度为139.7mm

表3-3-5 某些炸药的蜡间隙试验结果

炸 药	装药方法	ρ (g/cm ³)	π_{50} (mm)
阿马托80/20	压装	1.65	21.08
阿马托50/50	铸装	1.55	15.24
A-3 炸药	压装	1.62	17.78
B 炸药	铸装	1.69	35.56
C 炸药	压装	1.56	34.54
C-3 炸药	压装	1.62	34.54
黑索金	压装	1.54	59.18
喷脱里特	压装	1.61	59.94
喷脱里特	铸装	1.65	52.83
特屈儿	压装	1.58	51.05
梯恩梯	压装	1.55	42.67
梯恩梯	铸装	1.60	20.83

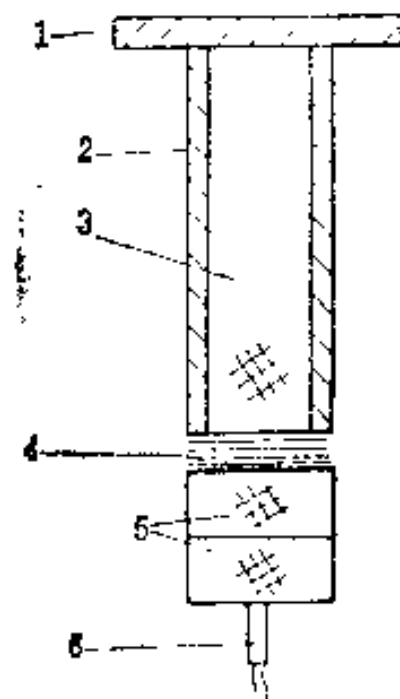


图3-3-7 间隙试验装置

1—印痕板（铸钢）；2—冷轧钢管；3—推进剂装药；4—卡片隙；5—特屈儿药柱；6—雷管。

的中等强度包装壳,被发药柱端部垫一块印痕试验板,即9.52 mm的铸钢板,以板上穿孔作为爆轰的判据,装药感度用50%爆轰时的卡片隙厚度 n_{50} 来度量。或用此时的加载压力,即卡片隙与被测药界面处压力 p_{50} 来衡量。

表3-3-6 一些推进剂的冲击波感度 (p_{50})

推进剂	物理状态	p_{50} (GPa)
各种复合推进剂	无孔隙(铸装)	不爆
双基药	无孔隙(铸装)	8.0~4.7
含17~18%高能炸药的复合推进剂	无孔隙(铸装)	6.9~5.8
复合推进剂	压装, 含16~22%孔隙	1.1~0.7

另一种用来测量炸药对冲击波作用感度的试验是飞片撞击试验。利用不同配方的炸药推动飞片, 飞片以不同的速度撞击炸药, 观察炸药是否起爆。

图3-3-8是飞片撞击试验示意图。试验用飞片直径和长度

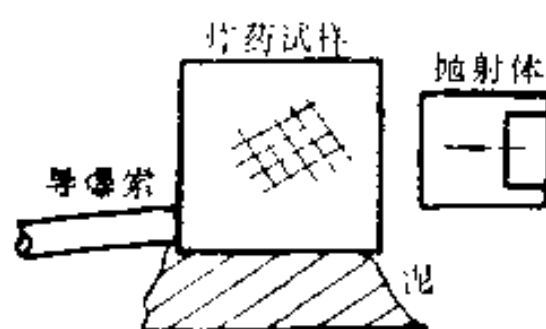


图3-3-8 飞片撞击试验示意图

均为15mm, 固体炸药试样的直径和长度均为20mm。爆轰与否, 是用一根与炸药试样接触的泰安导爆索来显示的。

这种方法能准确地确定起爆所需的初始冲能, 而不是仅仅能相对地比较各种炸药的感度。这对于研究冲击起爆机理

是很有用的。

实验测得一些炸药的飞片撞击试验数据，列于表3-3-7。

表3-3-7 起爆炸药所需的飞片速度

炸 药	装药 形式	ρ_0 (g/cm ³)	u_k 上、下限 (m/s)		
			铜	铝	铅
泰安	压装	1.53	250/280		290/340
硝胺片药	粉状	1.13	320/350		
黑索金	压装	1.65	300/400		460/520
特屈儿	压装	1.65	400/450		485/510
钝化黑索金	压装	1.59	400/450	410/430	520/560
R炸药	压装	1.57	430/470	440/460	510/540
梯恩梯	压装	1.54	530/545	490/510	640/650
梯恩梯	铸装	1.61	900/1150	900/1150	1500/1720

炸药冲击起爆压力实验测量的原理，是根据基本方程

$$p = \rho_0 D_s u \quad (3-3-5)$$

和冲击压缩性关系

$$D_s = a + bu \quad (3-3-6)$$

获得的。

测量冲击波速度可用电离探针法或用高速摄影法。高速摄影法只能测定透明介质，如水、有机玻璃等材料中的冲击波速度。

图3-3-9是一种冲击压力测试装置示意图。在这一装置上可用电离探针-示波仪法和高速摄影法两种方法测定有机玻璃中的冲击压力。所采用的主发药柱是两个特屈儿药柱，尺寸为 $\phi 50.8 \text{ mm} \times h 25.4 \text{ mm}$ 。护板的作用是防止侧向冲击波绕流，以免影响可见光摄影。电离探针为0.84mm的针管，管内穿过细漆包线，组成一对电离探针传感器。这样就可以测出

冲击波速度的衰减情况。采用高速摄影法时，应在有机玻璃棒的两侧加工成平面，以防影象失真。用火花隙作为距离测量的基准。用爆炸金属丝作背景光源。

用这种装置测得的不同厚度的有机玻璃端面输出压力曲线如图3-3-10所示。

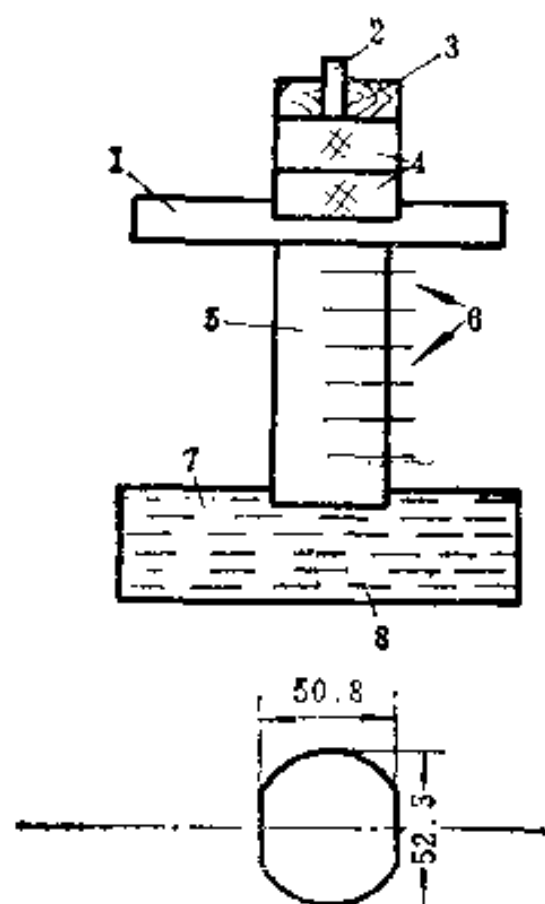


图3-3-9 测定隔板中冲击压力装置

1—护板；2—冒管；3—木块；
4—特恩儿药柱；5—有机玻璃；
6—电离探针；7—水；8—火花隙。

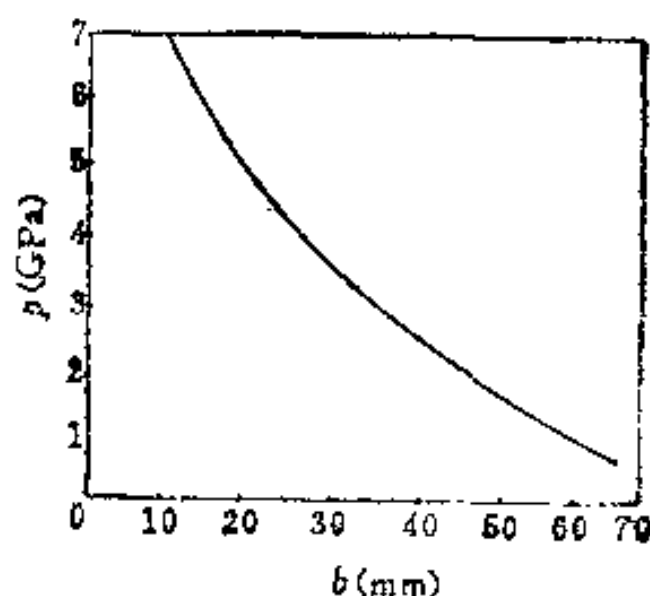


图3-3-10 有机玻璃棒端处冲击压力

临界起爆压力 p_k 也可用飞片撞击法测定。飞片的压力可由下式计算

$$p = \frac{\rho_s D_s u_s}{1 + \rho_s D_s / \rho_m D_m} \quad (3-3-7)$$

式中 ρ_s 、 D_s 和 ρ_m 、 D_m 分别为炸药和飞片的密度和冲击波速度。

u_d 为飞片的速度。

若选用动力阻抗 $\rho_m D_m$ 和炸药的动力阻抗相同的飞片, 则冲击压力具有最简单的形式

$$p = -\frac{1}{2} \rho_e D_e u_d \quad (3-3-8)$$

在这种情况下, 只要测定 D_e 和 u_d 就可以计算出冲击压力。如已知炸药的状态方程为 $D_e = a + b u_p$,

$$\text{则} \quad p = -\frac{1}{2} \rho_e \left(a + \frac{b}{2} u_d \right) u_d \quad (3-3-9)$$

临界起爆压力 p_k 的测定和上面间隙试验类似, 即找出被测炸药 50% 爆炸的飞片速度 $u_{d50\%}$, 再用这个速度的飞片碰撞同样材料的靶, 测得靶中初始冲击波速度 D_i , 这样得到

$$p_k = \rho_0 D_i \cdot \frac{1}{2} u_{d50\%} \quad (3-3-10)$$

式中 ρ_0 为飞片或靶材料的初始密度; D_i 为靶中初始冲击波速度; $u_{d50\%}$ 是使炸药 50% 爆炸的飞片速度。

近来国外广泛采用“电炮”来测量炸药冲击波感度。即利用电爆炸箔撞击炸药。这种方法给理论计算带来很大的方便。

在测定临界起爆压力方面, 目前有许多新的测试技术正在广泛采用。如石英晶体压力计、锰铜压阻传感器、电磁应力传感器, 以及激光干涉、微波技术等等。

§ 3-4 炸药的静电形成原理和静电感度

静电是引起火炸药, 特别是火工品爆炸事故的最危险的因素之一。

由于绝大多数炸药都是绝缘物质(比电阻在 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上), 所以炸药颗粒之间的摩擦很易产生静电, 而且容易形成

高电压。炸药和其它物体摩擦也同样会产生静电。这种高电压的静电，在一定条件下就会产生电火花。当电火花能量足够大时，能够引燃或引爆炸药。假若在电火花附近有可燃气体，如酒精、乙醚等蒸汽，就很易点燃，发生事故。

在炸药生产和加工过程中，不可避免地会产生摩擦，如球磨粉碎、混药、压药、螺旋输送、气流干燥等过程都发生炸药之间的摩擦和炸药与其它物体之间的摩擦。干燥的起爆药从导药槽上滑下时，产生静电达 $10^3 \sim 10^5 \text{V}$ 。有些塑料粘结炸药过筛时，静电竟达 10^4V ，筛下的药粒与金属制品接触时，可以听到放电的噼拍声，在夜间还能看到蓝色放电火花。

为了了解这一现象的基本规律性，必须对炸药静电感度问题加以研究，以便指导实践，防止事故的发生。

炸药的静电感度实际上包括两个方面，一是炸药在摩擦时产生静电的难易程度；一是静电放电火花作用下炸药发生爆炸的难易程度。这是两个不同的概念。有的炸药摩擦时容易产生静电，但对电火花作用不一定敏感。从工厂技安角度来说，总希望产生的静电尽可能小，防止电火花的产生，以确保安全。

一、静电形成

两种不同的固体接触时，在接触面距离近到 $2.5 \times 10^{-6} \text{mm}$ 或更小时，一种物质就会把电子传给另一种物质，失去电子的带正电，得到电子的带负电。至于摩擦的作用仅在于增加两种物质达到 $2.5 \times 10^{-6} \text{mm}$ 以下距离的接触面积。两种固体在接触后分开，就带静电。

两种不同的金属接触，能够产生电势差，并且存在着一

个系列，即（+）铝、锌、锡、镉、铅、铟、铋、黄铜、汞、铁、钢、铜、银、金、铂、钯、 MnO_2 、 PbO_2 （-）。这个系列的前后两种固体接触时，前者带正电，后者带负电。如图3-4-1所示，两种金属A和B接触时，分别产生等量异号电



图3-4-1 两种固体接触形成偶电层

荷，由于吸力作用，电荷分别集中在两种金属的接触面处，形成所谓偶电层。偶电层内部距离很小，故其间电容很大。若把接触面看做平板电容器，那么单位面积的电容C为

$$C = \frac{\epsilon}{d} \text{ F/m}^2 \quad (3-4-1)$$

式中 ϵ 为平行板间隙内的介电常数， $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ， ϵ_r 为介质的相对介电常数， d 是间隙的距离。当 $d = 2.5 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ，且间隙内为真空时，则 $C = 3.54 \times 10^{-5} \text{ F/m}^2$ 。若将 d 增大为 1 mm ，则 $C_1 = 8.85 \times 10^{-9} \text{ F/m}^2$ 。电容减小了四十万倍。因此，若能使接触面全面同时分开，完全避免在分开时电荷的倒流中和，两金属的电势差就会增大40万倍。这就是微小的接触电势差变成为很高的静电电压的原因。

两金属接触为何会发生接触电势差呢？

金属的原子结合在一起形成金属块时，每个原子都释放掉了它们的价电子，成为正离子。而价电子就在整块固体内自由运动，称之为自由电子。自由电子因受正离子的吸引，不能飞出体外。要将自由电子从金属内移到金属外去，就需要

对电子做功。将一个自由电子从金属内移到金属外所需作的功叫该金属的电子逸出功，或叫功函数，用 Φ_m 表示。

功函数的存在说明电子在金属内的势能比在金属外（真空）要低。设真空中电子的势能为零，则在金属内电子的势能等于 $-\Phi_m$ 。不同的金属有不同的功函数。两种不同的金属 A 和 B 相接触，当接触距离 $d < 2.5 \times 10^{-6} \text{mm}$ 时， A 、 B 间就可能交换电子。若 B 内的势能比 A 内的势能高，因而 B 内将有较多的电子流入 A ，致使 A 带负电。这可从势能井图来表示（见图3-4-2）， A 势能低， B 势能高。要使电子逸出体

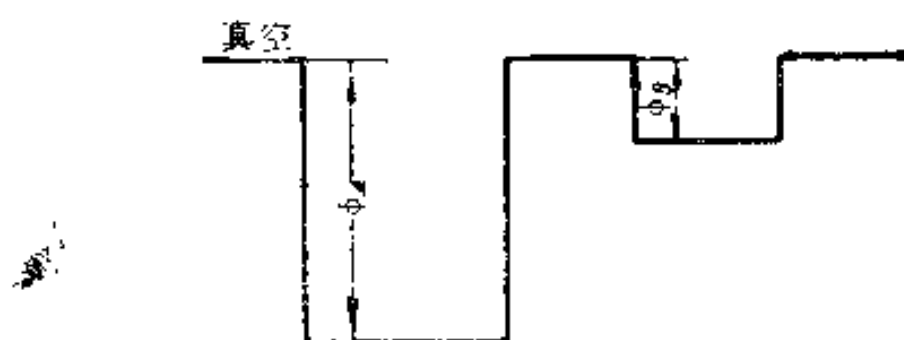


图3-4-2 金属的势能井

外所需逸出功 $\Phi_A > \Phi_B$ 。 Φ 大者，在接触起电过程中带负电， Φ 小者带正电。且单位接触面上的电量与两者功函数之差成正比。

实测一些材料的功函数见表3-4-1和表3-4-2。

表3-4-1 某些半导体和金属氧化物的功函数

材料名称	硅	锗	MgO	BeO	Al ₂ O ₃	NiO	FeO	CuO	TiO ₂	SiO ₂	MoO ₃
Φ	4.8	4.4	3.1~4.4	3.8~4.7	4.7	5.55	3.85	4.35	2.96~3.1	5.0	4.25

表3-4-2 某些固体高分子聚合物的功函数

材料名称	尼龙6-6	聚苯乙烯	聚乙烯	聚碳酸酯	聚四氟乙烯	聚亚胺	聚氯乙烯
Φ	4.08	4.22	4.25	4.26	4.26	4.36	4.85

根据功函数测定值，有人把一些非金属材料的静电系列排列如下：

(+) 玻璃、有机玻璃、尼龙、羊毛、丝绸、硝基赛璐珞、棉织品、纸、金属、聚苯乙烯、聚酯、聚丙烯腈、硫、聚乙烯、聚氯乙烯、聚四氟乙烯 (-)。

序列中位于前面的材料与位于后面的材料摩擦时，前者带正电，后者带负电。

二、静电电荷的流散和积累

由静电学可知，容器中材料所带的电荷依指数规律向容器流散

$$Q = Q_0 e^{-\frac{t}{\varepsilon \rho}} \quad (3-4-2)$$

式中 Q ——容器中材料在 t 时所带静电电荷；

Q_0 ——容器中材料在初始时刻所带静电电荷；

ε ——介质的介电常数；

ρ ——介质的电阻率。

静电流散的快慢决定于时间常数 $\varepsilon \rho$ 。黑火药 $\rho = 1.34 \times 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ ， $\varepsilon = 44.25 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ， $\varepsilon \rho = 5.93 \times 10^{-3} \text{s}$ 。

一般认为静电的产生必须 $\rho > 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 时才有可能。

容器上的电荷通过容器周围的空气向大地流散。设大地与容器之间静电电容 C ，绝缘电阻 R ，则放电过程为

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3-4-3)$$

式中 V_0 为开始放电时的电压， V 为瞬时电压。

考虑到静电电荷的形成和流散后，其电荷积累电压方程为

$$V = KR(1 - e^{-\frac{t}{CR}}) \quad (3-4-4)$$

式中 KR 为饱和时电压。

从上式看出，当容器或装置接地良好，即 $R \rightarrow 0$ 时， $V \rightarrow 0$ 。因而，防止物体带电的最简单而切实可行的方法，是采取接地措施。

三、静电使介质极化和击穿

介质在静电场作用下，发生极化，产生表面束缚电荷。这些束缚电荷是不能流动的。但介质在运动过程中，还可以摩擦起电，这种电荷是自由电荷，在介质内可以流动。

在空气中，由于外界紫外线或宇宙线的作用，不断地产生一些离子对，这种离子对数量很少，但却能起导电作用。如果在平行平板间距离为 1 cm，在适当外电压作用下，每 cm^2 电极板表面上，可接收到 10^{-8} A 的微弱电流。在相当大的电压范围内，这个电流是不变的。逐渐增加平板间的电压，使其中间场强加大，当离子在电场作用下，由于加速而获得足够大的动能，从而把其它中性分子碰撞成为离子对。另外，这种高速运动的离子，打在金属极板上，也能放出电子。这种离子和电子都可以使电流增加，如图 3-4-3 中的 BC 段。随着电流的增加，气体中也产生由弱到强的辉光。

继续升高极间电压，当场强加大到某一数值 E_0 时，电流突然猛增，产生明亮的光迹，如果电源不能连续供应很

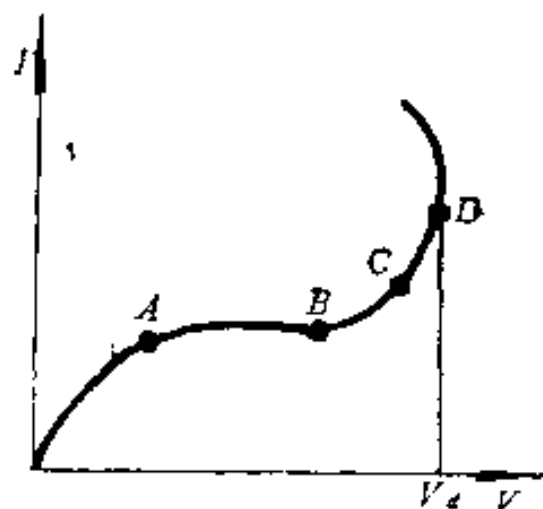


图 3-4-3 平板电场的击穿过程

大电流，则光迹闪亮后即熄灭，放电中止。这是击穿现象。空气的击穿场强为 $E_0 = 30 \text{ kV/cm}$ 左右。

外电场沿固体表面，作用在表面的气体上，使气体击穿，这样测得的沿固体表面气体击穿场强，一般比单纯通过气体要小。例如沿玻璃表面的直流击穿场强只有 16 kV/cm 。几种介质的击穿场强见表3-4-3。

表3-4-3 几种介质的击穿场强

介 质	$\rho (\Omega \cdot \text{cm})$	ϵ_r	$E_0 (\text{kV/cm})$
真空		1	<40 (极隙 $<0.2 \text{ cm}$)
空气 (10^5 Pa , 20°C)	10^{15}	1.00058	30 (极隙 2.5 cm)
变压器油	$10^{10} \sim 10^{12}$	2.1~2.2	120 (干燥)
硅油	$10^{12} \sim 10^{13}$	2.5	200~250
石蜡	$10^{13} \sim 10^{16}$	2.2~2.3	200~300
虫胶	$10^{13} \sim 10^{14}$	3.5	200~300
聚乙烯薄膜	$10^{14} \sim 10^{16}$	2.2	350
聚四氟乙烯	$10^{14} \sim 10^{16}$	1.9~2.2	250~270
有机玻璃	$10^{13} \sim 10^{14}$	3.6~4.5	180~350
	(50%湿度)		
尼龙1010	$>10^{12}$	3.55	>100

四、静电测量

要知道炸药摩擦带电的难易程度，就要测量炸药摩擦后所带的静电量。静电量 Q 的大小取决于系统的电容和电压

$$Q = CV \quad (3-4-5)$$

有一种静电测量装置示意图见图3-4-4。

炸药从金属板滑下，进入金属容器，此时在静电电位计上读得静电电位，而炸药和金属容器间本身就存在电容 C_1 ，所以系统总电容 $C = C_1 + C_2$ 。 C_2 是已知的外加电容， C_1 是需要

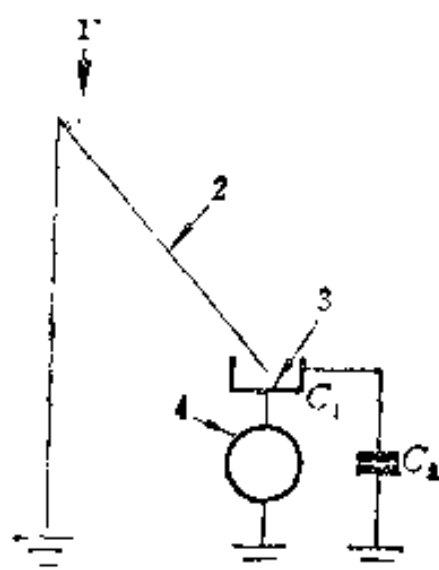


图3-4-4 静电测量装置示意图

1—炸药；2—滑板；3—金属容器；4—静电电位器。

试验测定的。测定方法是：先不加 C_2 ，测得 V_1 ，再加上 C_2 ，测得 V_2 。由于 $Q_1 = C_1 V_1$ ， $Q_2 = (C_1 + C_2) V_2$ ，且 $Q_1 = Q_2$ ，所以

$$C_1 = \frac{C_2 V_2}{V_1 - V_2} \quad (3-4-6)$$

静电的极性可用如下方法来判断：用绸子和玻璃棒摩擦，然后使玻璃棒与容器中的炸药接触。如果玻璃棒电位降低，则说明炸药带负电，因为玻璃棒带的是正电，和带负电的物体接触，它的电位才会降低。

五、炸药对电火花的感度

静电对炸药生产的危害，主要是在一定条件下，静电产生放电火花（类似直流放电），当电火花具有相当能量使电弧产生一定温度时，即可能引起炸药的燃烧爆炸而造成事故。因此试验时可将交流电整流为直流电，给电容器充电，根据不同条件使电容器两极间放电，炸药置于两放电极之间，观察是否因放电而燃烧爆炸，同时计算放电能量。并逐步改变放

电能量的大小，以求出50%引起炸药燃烧爆炸的放电能量，作为衡量炸药对静电火花的感度。或固定一个电火花能量，用爆炸百分数来表示。

典型的炸药对电火花感度测定线路如图3-4-5所示。此装

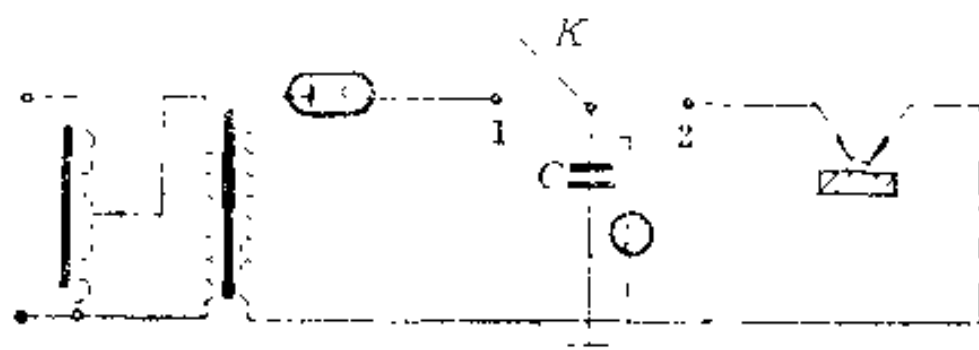


图3-4-5 电火花感度测试线路图

置主要通过电容放电的方式得到电火花。电火花能量大小由下式计算

$$E = -\frac{1}{2} CV^2 \quad (3-4-7)$$

用自耦变压器调压再经变压器升压，再经整流管整流，将交流电变为直流电。把开关K合到1位置时，电容充电，充电电压可达3 kV。然后把开关合到2位置，尖端电极即放电。

炸药粒度、密度、放电极距、电容器型号规格、放电针尖端曲率和转换开关的能量损耗等因素，都会直接或间接影响电火花能量的计算结果与发火率的大小。因此为了比较各种炸药对电火花的相对感度，必须严格控制上述条件的一致性。

六、消除静电危害的措施

防止静电产生事故，主要在于防止静电的产生和静电产生后能及时消除，使静电不致过多地积累。

根本不让产生静电，目前还没有有效的措施。从理论上

可以设想,使两种不同物质的电子逸出功大体相等,从而使接触电势差趋近于零,这样就可从根本上防止静电的产生。这种设想的实现,有待今后研究探讨。

防静电事故一般采用及时地消除静电的办法。从机理上说,清除静电的办法大致可分为以下两类:第一类是泄漏法。这种方法实质上是让静电荷比较容易地从带电体上泄漏散失,避免静电积累,从而消除静电的危害。接地、增湿、加入抗静电添加剂,以及铺设导电橡胶或喷涂导电涂料等措施,都属于这一类。第二类是中和法。这种方法实质上是给带电体外加一定量的反电荷,使其与带电体上的电荷中和,从而避免静电的积累,消除静电的危害。正负相消法、电离空气法和外加直流电场法等,都属于这一类。

下面简单介绍一下消除静电的措施:

1. 接地。接地一方面是为了消除工装上的静电,另一方面是为了消除加工对象上的静电。大多数工装都是金属导体,接地的作用是很明显的。但对炸药这样的绝缘体来说,其静电荷就不易通过简单的接地导走了。在炸药的体积比电阻不是太大的情况下,通过工装接地有可能将其静电荷导走一部分。但当其体积比电阻相当大时,工装接地后,不但不会降低反而可能提高炸药的带电量。主要原因在于工装不接地时,工装与炸药各自所带的符号相反的静电荷,在接触过程中有一定的中和作用。但工装接地后,中和作用不再存在,再加上它的体积比电阻很大,而接地所产生的泄漏量很小,结果炸药静电量反而增大。因而是否接地不能一概而论,需视具体情况对待。

2. 铺设导电橡胶或喷涂导电涂料。这种方法实质上是一种变相的接地措施。某些工装不能采用金属材料而必须使

用橡胶等其它材料。所谓导电橡胶或涂料，实际上并不是良导体，只要比电阻小于 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ，即可满足消除静电的需要。

3. 增湿。用提高空气湿度消除静电危害，目前仍然是工业生产中普遍采用的方法。相对湿度高，则带电体表面就容易吸收或附着一定的水份，从而降低其表面电阻系数，有利于静电泄入大地。相对湿度的范围，需视工业生产的具体情况而定，一般在60~80%较为适宜。

4. 使用添加剂 这种方法，就是在易于带电的介质中或工装上加上或喷涂一种助剂，由于助剂的某种作用，即可防止静电的产生和积累。如TM，SN，MPN等抗静电剂，在工业中较普遍应用，效果良好。

5. 正负相消法。火炸药与金属材料接触或摩擦，大多带负电荷。可以选择一种能使火炸药带正电的材料，将这种材料按一定的面积比例镶嵌于工装与火炸药接触的表面上。这样，在火炸药与这种工装相接触时，火炸药既带正电又带负电，从而达到中和消除静电的目的。

6. 外加直流电场法。对工装外加一定的直流电场，使工装的带电极性与加工对象所带静电的极性相反，就可以消除加工对象上所带的静电。这种方法实质上也是利用中和原理，即外加直流电场可以促进已带静电的加工对象与工装之间的放电过程，使静电尽快中和消失。另外，直流电场可能具有阻止工装和加工对象间电荷互相转移，减少其接触电势差，使之不产生或少产生静电的作用。

7. 用放射线消除静电。放射性同位素的 α 和 β 射线以及 γ 射线，都可以使空气分子电离。产生的离子可使积累在物体上的电荷从空气中泄放掉。 γ 射线电离能力差，穿透物质的能力强，需要笨重的防护设备，故不宜做消除静电之用。

第四章 爆炸反应

炸药的爆炸反应，是一种激烈的化学反应。在化学反应过程中，迅速放出热量，转变成为高温、高压的气体产物。

本章通过对炸药爆炸反应的讨论，主要研究爆热、爆温和爆容的计算，以及改变爆热和爆温的方法。

§ 4-1 炸药的氧平衡

炸药通常是由碳、氢、氧、氮四种元素组成，其通式可以写成 $C_a H_b O_c N_d$ ，驻脚 a 、 b 、 c 、 d 分别表示四种元素的原子数，四种元素的功能是

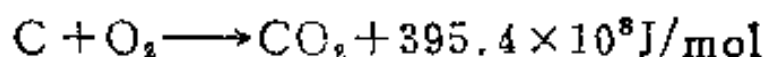
C、H——可燃元素

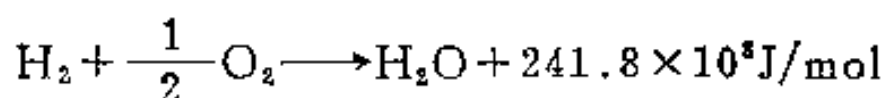
O——助燃元素

N——载氧体

炸药爆炸反应过程，实质上就是炸药中所包含的可燃元素和助燃元素在爆炸瞬间发生高速化学反应的过程，反应的结果重新组合形成新的稳定产物，并且放出大量的热量。形成的产物主要有 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 N_2 以及 O_2 、 H_2 、C、 NO 、 CH_4 等，这些产物的种类、数量以及放热量的多少，与炸药分子中包含可燃元素和助燃元素的数量有着密切的关系。

由于反应





放出的热量最多，因而称炸药中的碳完全氧化成二氧化碳、氢完全氧化成水的反应，为最大放热反应。

按照最大放热反应条件，炸药中的碳、氢、氧必须满足以下的比例关系

C	H	O
1		2
	1	1/2

即一个碳原子与两个氧原子化合生成一个二氧化碳分子，一个氢原子与二分之一一个氧原子化合生成二分之一一个水分子。

对于通式 $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ 来说， a 个碳原子氧化成为二氧化碳，需要 $2a$ 个氧原子， b 个氢氧化成水，需要 $\frac{b}{2}$ 个氧原子。将二者相加，则炸药中的碳、氢完全氧化，共需要 $2a + \frac{b}{2}$ 个氧原子。

由于炸药通式中含有 c 个氧原子，若

$$c = 2a + \frac{b}{2}$$

则符合最大放热反应条件。

对于具体炸药，并不一定满足这个条件，有的炸药含氧较多，除了使碳、氢完全氧化之外还有剩余，如硝化甘油 $\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_9\text{N}_3$

$$c = 9 \quad 2a + \frac{b}{2} = 8.5$$

$$c > 2a + \frac{b}{2}$$

有的炸药含氧较少，不足以使碳、氢完全氧化，如梯恩梯 $\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$

$$c = 6 \quad 2a + \frac{b}{2} = 16.5$$

$$c < 2a + \frac{b}{2}$$

定义：炸药中所含的氧量与炸药中碳、氢完全氧化所需的氧量之差，称为炸药的氧平衡。

若 $c - \left(2a + \frac{b}{2}\right) = 0$ ，此时炸药中的氧正好可以完全氧化炸药中的碳和氢，这种情况称为零氧平衡，这类炸药称为零氧平衡炸药；

若 $c - \left(2a + \frac{b}{2}\right) > 0$ ，此时炸药中的氧完全氧化炸药中的碳、氢后还有剩余，这种情况称为正氧平衡，这类炸药称为正氧平衡炸药；

若 $c - \left(2a + \frac{b}{2}\right) < 0$ ，此时炸药中的氧不足以完全氧化炸药中的碳和氢，这种情况称为负氧平衡，而这类炸药称为负氧平衡炸药。

为了便于比较炸药氧平衡的大小，通常采用每克炸药中的氧与每克炸药中碳、氢完全氧化所需氧量之差的克数，作为氧平衡值

$$\Omega = \frac{\left[c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) \right] \times 16}{M}$$

式中 M 是炸药的 mol 量。

某些单质炸药的氧平衡值，如表 4-1-1 所示。

表4-1-1 几种单质炸药的氧平衡值

炸 药	分 子 式	氧 平 衡 值
梯 恩 梯	$C_7H_5O_8N_3$	-0.74
黑 索 金	$C_8H_9O_8N_3$	-0.216
奥 克 托 金	$C_4H_8O_8N_8$	-0.278
特 屈 儿	$C_7H_6O_8N_6$	-0.174
泰 安	$C_5H_8O_{12}N_4$	-0.104
硝化甘油	$C_3H_6O_9N_3$	+0.035
苦 味 酸	$C_6H_3O_7N_3$	-0.454
二硝基甲苯	$C_7H_5O_4N_2$	-1.114
硝 基 胍	$CH_4O_2N_4$	-0.308
硝 酸 铵	NH_4NO_3	+0.200

§ 4-2 爆炸反应方程式

一、概 述

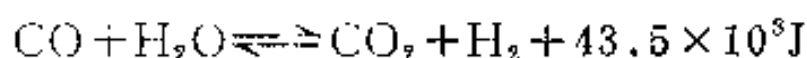
确定炸药爆炸反应方程式非常重要，因为只有确定了爆炸反应方程式，才能够对爆容、爆热和爆温等参数进行具体的计算。

确定炸药的爆炸反应方程式，也就是确定炸药爆炸瞬间产物的组成，是一项非常困难的工作，主要原因在于爆炸反应速度极快，并且爆炸瞬间所产生的压力和温度对爆炸产物的组成又有着密切的关系。

一般说来，爆炸瞬间生成的主要产物有： CO_2 、 H_2O 、 CO 、 O_2 、 N_2 、 C 以及其它少量的产物 NO 、 CH_4 、 NH_3 等，但是在爆炸瞬间的高温高压之下，这些产物之间还会进一步发生二次反应，如对于正氧平衡炸药



对于负氧平衡炸药，主要是水煤气反应



对于负氧平衡严重的炸药，还具有炉煤气反应



并且这些反应都是在不断变化的，处于动平衡状态。当温度、压力、浓度等因素发生改变时，原来达到的平衡就要发生移动，直至达到新的平衡。

按照化学反应进行的准则，

温度升高，反应向吸热方向移动，温度降低，反应向放热方向移动；

压力升高，反应向体积缩小方向移动，压力降低，反应向体积增加方向移动。

分析上述三个反应：

在温度影响方面，由于三个反应向右进行都是放热反应，因而当温度降低时，三个反应都向右进行，当温度升高时，三个反应都向左进行。

在压力影响方面，第一个反应两端体积不等，左端 3mol 气体，右端 2mol 气体，因而当压力升高时，反应向右进行，当压力降低时，反应向左进行；第二个反应两端体积相等，因而压力对反应没有影响；第三个反应两端气体组分体积不等，左端是 2mol 气体，右端是 1mol 气体，因而当压力升高时，反应向右进行，压力降低时，反应向左进行。

例如，对于特屈儿炸药在不同装药密度时，实测的主要爆炸产物数据如表 4-2-1 所示。

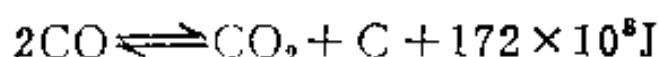
炸药装药密度不同，爆炸瞬间所达到的压力不同，这点以后会详细介绍到。若给出特屈儿炸药装药密度 $0.9\text{g}/\text{cm}^3$

表4-2-1 不同装药密度时, 1kg特
屈儿炸药爆炸产物实测数据

爆炸产物组成	$\rho = 0.9\text{g/cm}^3$ 时产物量(g)	$\rho = 1.56\text{g/cm}^3$ 时产物量(g)
CO ₂	133	216
CO	527	301
H ₂ O	54.5	106.3
H ₂	7.3	3.7
N ₂	217	219
C	3.6	19.3

时, 爆炸瞬间压力为 7.1GPa, 特屈儿炸药装药密度 1.56 g/cm³ 时, 爆炸瞬间压力为 21.3GPa。

下面, 分析不同装药密度条件下, 爆炸产物组成不同的原因。特屈儿是负氧炸药, 爆炸瞬间所产生的二次反应主要有



对于第一个反应, 左端为 2mol 气体, 右端为 1mol 气体。当装药密度由 0.9g/cm³ 增加到 1.56g/cm³ 时, 压力由 7.1GPa 急剧地增加到 21.3GPa, 因而反应大量向右端移动, 结果使 CO₂、C 增加, CO 减少;

对于第二个反应, 虽然压力对平衡没有影响, 但由于第一个反应的结果, 产物间的浓度发生变化, CO₂ 浓度增加, CO 浓度减少, 反应向浓度低的左端进行, 结果又导致了 H₂O 的增加和 H₂ 的减少。

从上面的分析可以看出, 精确地确定炸药的爆炸产物组成是非常复杂的问题, 不仅与炸药的化学成分有关, 也与爆

温、爆压有关，而且爆温、爆压事先又不知道，所以确定爆炸产物的组成是一个复杂的反复计算过程。

二、爆炸反应方程式简易确定方法

爆炸反应方程式简易确定时，只考虑炸药的化学成分，不考虑爆炸瞬间压力、温度的影响，适应于工程上的近似计算。

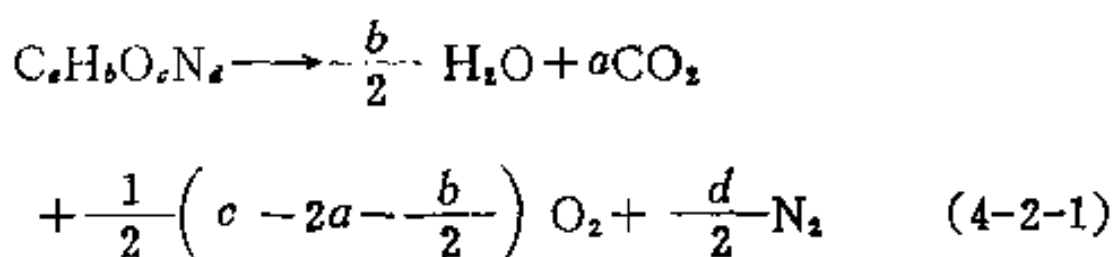
按照氧平衡的程度，将炸药 $C_aH_bO_cN_d$ 分成三类。

第一类炸药 正氧平衡和零氧平衡炸药。

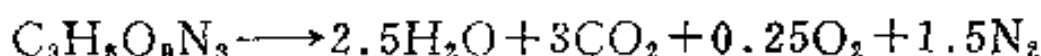
特征
$$c \geq 2a + \frac{b}{2}$$

产物组成确定的方法：按照最大放热原则，氢全部氧化成 H_2O ，碳全部氧化成 CO_2 。

爆炸反应方程式为



典型炸药如硝化甘油 $C_3H_5O_9N_3$

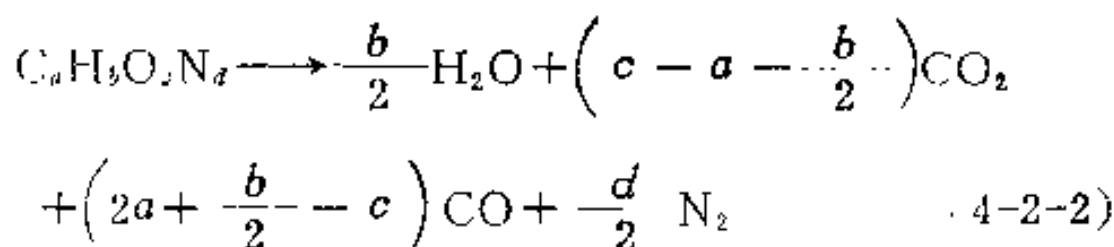


第二类炸药 负氧炸药中含氧量足以使产物完全气化，无固体碳生成的炸药。

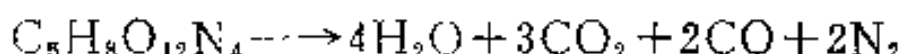
特征
$$2a + \frac{b}{2} > c \geq a + \frac{b}{2}$$

产物组成确定的方法：首先将氢完全氧化成 H_2O ，碳完全氧化成 CO ，剩下的氧再把 CO 氧化成 CO_2 。

爆炸反应方程式为



典型炸药如黑索金、奥克托金、泰安。泰安的反应式

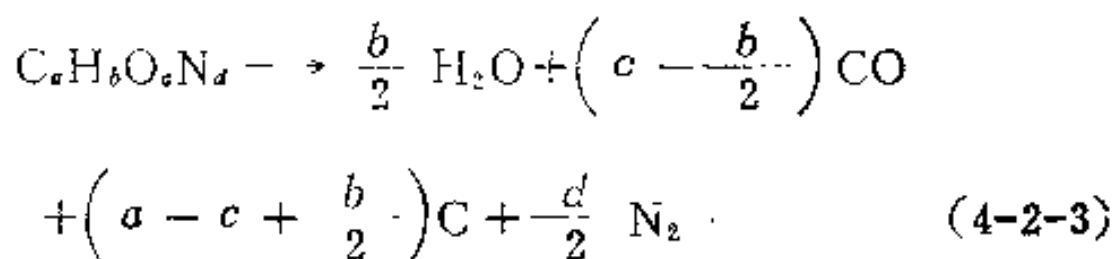


第三类炸药 严重缺氧炸药，即含氧量不足以使产物完全气化，而有固体碳生成的炸药。

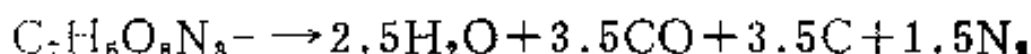
特征
$$c < a + \frac{b}{2}$$

产物组成确定的方法：首先使氢完全氧化成 H_2O ，剩下的氧使部分碳氧化成 CO 。

爆炸反应方程式为



典型炸药如梯恩梯、特屈儿。梯恩梯的反应式



〔例4-1〕 建立黑50/梯50炸药的爆炸反应方程式。

解 黑50/梯50含黑索金、梯恩梯质量各半，即1kg黑50/梯50炸药含黑索金、梯恩梯各占500g。

第一步 首先写出黑50/梯50的通式 $C_aH_bO_cN_d$ 。

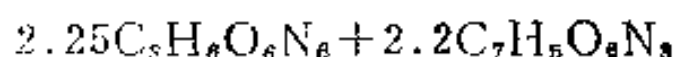
黑索金的 mol 量是 222，500g 黑索金的 mol 数为

$$\frac{500}{222} = 2.25(\text{mol})$$

梯恩梯的 mol 量是 227，500g 梯恩梯的 mol 数为

$$\frac{500}{227} = 2.2(\text{mol})$$

1kg 黑 50/梯 50 炸药为



计算 $a = 2.25 \times 3 + 2.2 \times 7 = 22.15$

$$b = 2.25 \times 6 + 2.2 \times 5 = 24.5$$

$$c = 2.25 \times 6 + 2.2 \times 6 = 26.7$$

$$d = 2.25 \times 6 + 2.2 \times 3 = 20.1$$

通式为 $\text{C}_{22.15}\text{H}_{24.5}\text{O}_{26.7}\text{N}_{20.1}$

第二步 判别属于哪一类

$$c = 26.7$$

$$a + \frac{b}{2} = 22.15 + \frac{24.5}{2} = 34.4$$

由于 $c < a + \frac{b}{2}$ ，故属于第三类。

第三步 写出爆炸反应方程式

按公式 (4-2-3) 计算

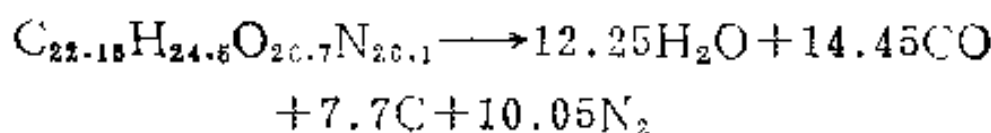
$$-\frac{b}{2} = 24.5 \times \frac{1}{2} = 12.25$$

$$c - \frac{b}{2} = 26.7 - 12.25 = 14.45$$

$$a - c + \frac{b}{2} = 22.15 - 14.45 = 7.7$$

$$-\frac{d}{2} = 20.1 \times -\frac{1}{2} = 10.05$$

所以爆炸反应方程式



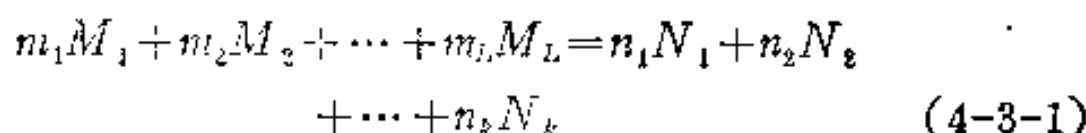
§ 4-3 爆 容

所谓炸药的爆容，乃是 1kg 炸药爆炸后所形成的产物在标准状态 ($1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 273K) 下所占据的体积，单位 L/kg 。

爆炸产物中有气体成分和固体成分，由于固体成分与气体成分相比很小，可以忽略不计，所以爆容只计算其气体成分所占体积。

阿佛加得罗定律：在标准状态 ($1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 273K) 下，1mol 任何物质的气体皆占有 22.4L 的体积。

将爆炸反应方程式写成一般形式



式中 $m_1, m_2, \cdots m_L$ ——炸药各组分的 mol 数；

$M_1, M_2, \cdots M_L$ ——炸药各组分的 mol 量；

$n_1, n_2, \cdots n_k$ ——产物各组分的 mol 数；

$N_1, N_2, \cdots N_k$ ——产物各组分的 mol 量。

假若各产物皆为气态（固态不计），气态产物 mol 数为 $n_1 + n_2 + \cdots + n_k$ ，炸药各组分的总克数为 $m_1 M_1 + m_2 M_2 + \cdots + m_L M_L$ ，则 1kg 炸药的 mol 数为

$$\frac{(n_1 + n_2 + \cdots + n_k) \times 1000}{m_1 M_1 + m_2 M_2 + \cdots + m_L M_L}$$

所以，1kg 炸药爆炸后，爆炸产物在标准状态下的体积，即爆容

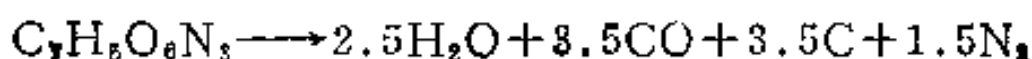
$$V = \frac{(n_1 + n_2 + \cdots + n_k) \times 1000}{m_1 M_1 + m_2 M_2 + \cdots + m_L M_L} \times 22.4 \quad (\text{L/kg})$$

或缩写成

$$v_0 = \frac{\sum_{i=1}^K n_i \times 1000}{\sum_{j=1}^L m_j M_j} \times 22.4 \quad (\text{L/kg}) \quad (4-3-2)$$

〔例4-2〕 计算梯恩梯的爆容。

解 首先确定爆炸反应方程式

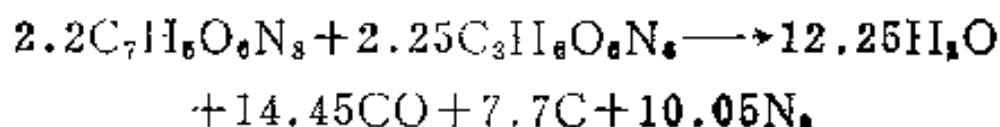


然后按照爆容公式计算

$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{\sum_{i=1}^K n_i \times 1000}{\sum_{j=1}^L m_j M_j} \times 22.4 \\ &= \frac{(2.5 + 3.5 + 1.5) \times 1000}{1 \times 227} \times 22.4 = 740 \quad (\text{L/kg}) \end{aligned}$$

〔例4-3〕 计算黑50/梯50的爆容。

解 首先确定爆炸反应方程式



然后按爆容公式计算爆容

$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{\sum_{i=1}^K n_i \times 1000}{\sum_{j=1}^L m_j M_j} \times 22.4 \\ &= \frac{(12.25 + 14.45 + 10.05) \times 1000}{2.2 \times 227 + 2.25 \times 222} \times 22.4 = 824 \quad (\text{L/kg}) \end{aligned}$$

表 4-3-1 给出了几种炸药的实测爆容和计算爆容的数据, 从数据中看出, 计算值与实测值还是非常一致的。

表4-3-1 几种炸药计算爆容与实测爆容数据的比较

炸 药	实 测 值		v_D 计算值
	ρ (g/cm ³)	v_D (L/kg)	(L/kg)
梯 恩 梯	0.80	870	740
	1.50	750	
黑 索 金	0.95	950	908
	1.50	890	
特 屈 儿	1.00	840	820
	1.53	740	
泰 安	0.85	790	730
	1.65	790	
黑50/梯50	0.90	900	824
	1.68	800	

§ 4-4 爆 热

单位质量炸药爆炸时, 所释放出来的热量, 称为爆热。工程上, 通常以 1kg 炸药爆炸放出的热量来表示, 单位J/kg。

由于爆炸极其迅速, 爆炸瞬间固体炸药变成气体产物, 体积来不及膨胀, 爆炸就完成了, 因而爆炸过程可以视为定容过程。

通常所说的爆热, 都是定容爆热, 记为 q_v 。

一、爆热的计算

1. 盖斯定律

化学反应的热效应与反应进行的途径无关, 而只取决于反应的初态和终态。这个定律是盖斯在 1840 年提出, 并通过

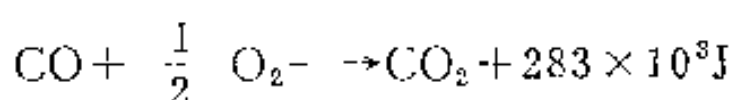
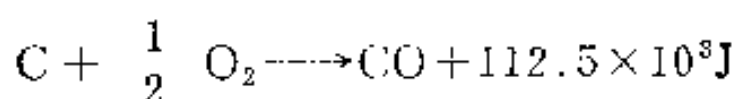
实验证明的。

该定律说明：反应的初态和终态确定后，纵然反应的路线不同，但整个过程放出或吸收的热量都是相同的。

如碳、氧反应直接生成 CO_2



碳、氧反应生成 CO 后，再氧化成 CO_2



这两个反应的途径虽然不同，但是由于初态（ C 和 O_2 ）、终态（ CO_2 ）相同，所以放热的总量都是 $395.5 \times 10^3 \text{J}$ 。

盖斯定律可以用三角形表示（图 4-4-1）。

从初始状态 1 至终了状态 3 的热效应 Q_{1-3} ，等于从初始状态 1 至中间状态 2 的热效应 Q_{1-2} 与中间状态 2 至终了状态 3 的热效应 Q_{2-3} 之和，公式为

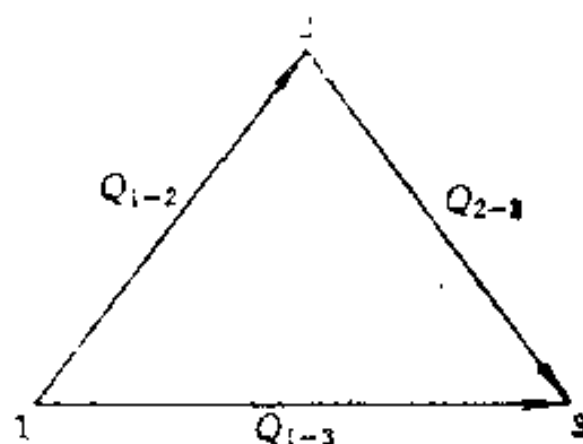


图4-4-1 盖斯三角形

$$Q_{1-3} = Q_{1-2} + Q_{2-3} \quad (4-4-1)$$

运用盖斯定律时，要求反应过程的条件必须相同，例如都是定压过程，或者都是定容过程，否则不成立。

2. 爆热的理论计算

设有三个状态：

状态 1 —— 元素

状态 2 —— 炸药

状态 3 —— 爆炸产物

按照盖斯定律，由元素形成爆炸产物时的热效应，应该等于由元素形成炸药的热效应与炸药形成爆炸产物的热效应之和。

引入生成热的概念：所谓生成热，是在标准状态（常压、298K）下，由自由元素组成 1mol 某种化合物时所产生的热效应。生成热符号规定：放热为正，吸热为负，单元素物质生成热等于零。

炸药爆炸形成爆炸产物的热效应，就是爆热。

所以，当已知炸药和爆炸产物的生成热时，炸药的爆热可以计算出来

$$Q_{2-3} = Q_{1-3} - Q_{1-2} \quad (4-4-2)$$

炸药生成热和爆炸产物生成热，可以由物理化学手册查出，表 4-4-1 给出了 291K 时主要炸药和主要化合物的定压生成热表。

表 4-4-1 291K 时定压生成热表

物 质	分子式	mol 量	$Q_{pK}(\text{J}, \text{mol} \times 10^3)$
碳 (固)	C	12	0
氢 (气)	H ₂	2	0
氧 (气)	O ₂	32	0
氮 (气)	N ₂	28	0
水 (气)	H ₂ O	18	241.8
水 (液)	H ₂ O	18	286.1
一氧化碳 (气)	CO	28	112.5
二氧化碳 (气)	CO ₂	44	395.4
一氧化氮 (气)	NO	30	-90.4
二氧化氮 (气)	NO ₂	46	-50.0
二氧化氮 (液)	NO ₂	46	-13.0

(续)

物 质	分 子 式	mol重	$Q_{pr}(\text{J/mol} \times 10^3)$
氨 (气)	NH_3	17	19.0
甲烷 (气)	CH_4	16	78.6
乙炔 (气)	C_2H_2	26	-220.0
乙烯 (气)	C_2H_4	28	-48.5
迭氮化铅	PbN_8	291	-483.3
汞 汞	$\text{Hg}(\text{CNO})_2$	284	-265.2
三硝基间苯二胺铅	$\text{C}_6\text{H}_3\text{O}_3\text{N}_9\text{Pb}$	463	853.9
转屈拉辛	$\text{C}_2\text{H}_8\text{ON}_{10}$	188	433.5
二硝基重氮酚	$\text{C}_6\text{H}_2\text{O}_5\text{N}_4$	210	-116.3
梯 恩 梯	$\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_8\text{N}_3$	227	73.2
特 屈 儿	$\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_8\text{N}_5$	267	-19.7
黑 索 金	$\text{C}_8\text{H}_5\text{O}_8\text{N}_6$	222	-66.4
奥克托金	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_8\text{N}_8$	296	-74.9
泰 安	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_{12}\text{N}_4$	316	541.3
苦 味 酸	$\text{C}_6\text{H}_3\text{O}_7\text{N}_3$	229	227.6
硝 基 胍	$\text{CH}_4\text{O}_2\text{N}_4$	104	91.5
硝化甘油	$\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_9\text{N}_3$	227	369.7
坦 恩 梯	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_4\text{N}_2$	182	28.9
基 那	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_8\text{N}_4$	240	319.2
二硝基蔡	$\text{C}_{14}\text{H}_6\text{O}_4\text{O}_2$	218	-14.6
硝基甲烷	$\text{CH}_3\text{O}_2\text{N}$	61	91.4
三硝基甲烷	CHO_3N_3	151	79.9
四硝基甲烷	CO_4N_4	196	-35.1
六硝基二苯胺	$\text{C}_{12}\text{H}_5\text{O}_{12}\text{N}_7$	439	-22.3
三硝基苯	$\text{C}_6\text{H}_3\text{O}_6\text{N}_3$	213	47.7
二硝基苯	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_4\text{N}_2$	182	78.2
硝 酸 铵	NH_4NO_3	80	365.5
硝 酸 钾	KNO_3	80	494.1
硝 酸 钠	NaNO_3	65	407.4
硝 酸 银	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	161	991.2
过氯酸铵	NH_4ClO_4	117.5	293.7

(续)

物 质	分 子 式	mol量	$Q_{pR}(\text{J/mol} \times 10^3)$
过氯酸钾	KClO_4	138.5	437.2
高锰酸钾	KMnO_4	157	807.1
环氧乙烷 (气)	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	44	97.5
环氧丙烷 (气)	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	58	136.0
氧化镁	MgO	40.3	602.1
三氧化二铝	Al_2O_3	102	1669.4
三氧化二铁	Fe_2O_3	159.7	830.5
四氧化三铁	Fe_3O_4	215.6	1116.7
氧化铅	PbO	223.2	219.5
氧化锰	MnO_2	86.9	514.6
氧化钡	BaO_2	169.3	623.4

由于表 4-4-1 给出的是定压生成热, 按照盖斯定律, 由自由元素组成炸药和由自由元素组成产物都是定压过程, 因而这样计算出来的炸药爆热是定压爆热。

公式可以写成

$$Q_p = \sum_{i=1}^k n_i Q_{pRi} - \sum_{j=1}^l n_j Q_{pRj} \quad (4-4-3)$$

式中 $j = 1, 2, \dots, L$ 是炸药组分;

$i = 1, 2, \dots, k$ 是爆炸产物组分;

n_j ——炸药 j 组分的 mol 数;

Q_{pRj} ——由表 4-4-1 查出的炸药 j 组分的定压生成热;

n_i ——产物 i 组分的 mol 数;

Q_{pRi} ——由表 4-4-1 查出的产物 i 组分的定压生成热。

由于爆炸过程近似被认为是定容过程, 通常所说的爆热

都是定容爆热，所以公式 (4-4-3) 计算出来的定压爆热 Q_p 还需要换算成定容爆热 Q_v ，下面研究一下 Q_v 和 Q_p 的关系。

按照热力学第一定律

$$Q = \Delta E + p\Delta V$$

在热力学问题中，热量是由外界供给的，规定了吸热为正，放热为负；而在化学反应过程中，热量由反应本身产生，因而规定放热为正，吸热为负。

考虑到这个差别，热力学第一定律可以写成

$$-Q = \Delta E + p\Delta V$$

对于定容过程

$$\Delta V = 0, \quad Q_v = -\Delta E$$

对于定压过程

$$p = \text{常数}, \quad Q_p = -\Delta E - p\Delta V$$

所以

$$Q_v = Q_p + p\Delta V \quad (4-4-4)$$

假若反应前、后都是理想气体，而且反应前、后压力和温度都不变，按照理想气体状态方程，反应前状态

$$pV_1 = n_1RT$$

反应后状态

$$pV_2 = n_2RT$$

二式相减

$$p\Delta V = p(V_2 - V_1) = (n_2 - n_1)RT = \Delta nRT$$

故

$$Q_v = Q_p + \Delta nRT \quad (4-4-5)$$

式中 Δn ——反应后气体组分的 mol 数减去反应前气体组分 mol 数的差值；

R ——气体常数；

T ——反应过程的温度。

由于爆热是按生成热查表进行计算，而生成热表是标准状态下的数据，公式（4-4-5）中的温度就是这个标准状态的温度。按照表 4-4-1 进行计算时， $T=291\text{K}$ ，所以

$$Q_r = Q_p + 2.419 \times 10^3 \Delta n \quad (4-4-6)$$

假若 $T=298\text{K}$

$$Q_r = Q_p + 2.478 \times 10^3 \Delta n \quad (4-4-7)$$

归纳上述过程，计算爆热大致可以分成三步：

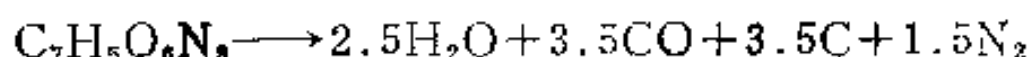
第一步 写出炸药爆炸反应方程式；

第二步 按照公式（4-4-3）查表计算 Q_p ；

第三步 按照公式（4-4-6）换算 Q_r 。

〔例4-4〕 计算梯恩梯的爆热。

解 第一步 写出爆炸反应方程式



第二步 按照公式（4-4-3）查表计算 Q_p ，

查表（4-4-1），得：

梯恩梯	H_2O	CO	C	N_2
73.2×10^3	241.8×10^3	112.5×10^3	0	0

炸药生成热

$$\sum_{j=1}^I n_j Q_{pRj} = 1 \times 73.2 \times 10^3 = 73.2 \times 10^3 (\text{J/mol})$$

爆炸产物生成热

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k n_i Q_{pRi} &= 2.5 \times 241.8 \times 10^3 + 3.5 \times 112.5 \times 10^3 \\ &= 908.3 \times 10^3 (\text{J/mol}) \end{aligned}$$

则

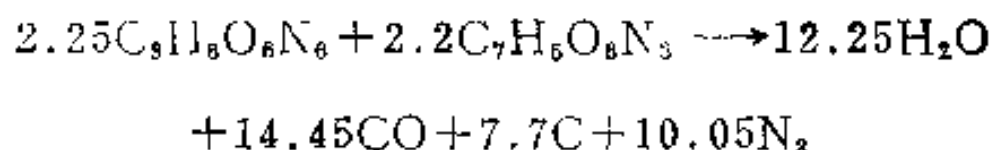
$$\begin{aligned}
 Q_p &= \sum_{i=1}^k n_i Q_{pKi} - \sum_{j=1}^l n_j Q_{pKj} \\
 &= 998.3 \times 10^3 - 73.2 \times 10^3 \\
 &= 925.1 \times 10^3 (\text{J/mol})
 \end{aligned}$$

第三步 按照公式 (4-4-6) 换算成 Q_v

$$\begin{aligned}
 \Delta n &= (2.5 + 3.5 + 1.5) - 0 = 7.5 \\
 Q_v &= Q_p + 2.419 \times 10^3 \Delta n \\
 &= 925.1 \times 10^3 + 2.419 \times 10^3 \times 7.5 \\
 &= 943.24 \times 10^3 (\text{J/mol}) \\
 &= 4155.24 \times 10^3 (\text{J/kg})
 \end{aligned}$$

〔例4-5〕 计算黑50/梯50 的爆热。

解 第一步 确定爆炸反应方程式



第二步 按照公式 (4-4-3) 查表计算 Q_p

查表 (4-4-1), 得,

黑索金	梯恩梯	H ₂ O	CO	C	N ₂
-65.44	73.2	241.8	112.5	0	0

炸药生成热

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^l n_j Q_{pKj} &= 2.25 \times (-65.44 \times 10^3) \\
 &+ 2.2 \times 73.2 \times 10^3 = 13.8 \times 10^3 (\text{J/kg})
 \end{aligned}$$

爆炸产物生成热

$$\sum_{i=1}^k n_i Q_{fRi} = 12.25 \times 241.8 \times 10^3 + 14.45 \\ \times 112.5 \times 10^3 = 4588 \times 10^3 (\text{J/kg})$$

则

$$Q_p = \sum_{i=1}^k n_i Q_{pRi} - \sum_{j=1}^l n_j Q_{pRj} = 4588 \times 10^3 \\ - 13.8 \times 10^3 = 4574.2 \times 10^3 (\text{J/kg})$$

第三步 按照公式 (4-4-6) 换算成 Q_v

$$\Delta n = (12.25 + 14.45 - 10.05) - 0 = 36.75$$

$$Q_v = Q_p + 2.419 \times 10^3 \Delta n \\ = 4574.2 \times 10^3 + 2.419 \times 10^3 \times 36.75 \\ = 4663 \times 10^3 (\text{J/kg})$$

3 爆热的经验计算

上述爆热理论计算的方法, 不仅需要知道爆炸产物的组成, 而且还要知道各个产物的生成热, 为了计算简便起见, 再介绍一种经验的方法。这种经验方法, 从最大放热角度出发将爆热作为氧系数的单值函数, 在已知炸药分子式和炸药定容生成热的条件下, 对爆热进行计算。

所谓氧系数, 定义为炸药中氧元素与可燃元素之比。对于 $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ 炸药, 氧元素

$$A = \frac{c}{2a + b/2} \times 100 \quad (4-4-8)$$

式中乘以 100, 在于计算方便。

按照最大放热原则, 炸药中所含的氧, 应当首先将氢氧化成 H_2O , 然后将碳氧化成 CO_2 。在 298K、定容条件下, H_2O 的生成热为 $241.8 \times 10^3 \text{J/mol}$, CO_2 的生成热为 $395.4 \times$

10^3 J/mol , 所以爆炸产物生成热的总和, 对于正氧和零氧平衡炸药来说

$$\begin{aligned}(Q_{vR})_{\max} &= 241.8 \times 10^3 \times -\frac{b}{2} + 395.4 \times 10^3 \times a \\ &= (395.4a + 120.9b) \times 10^3\end{aligned}$$

对于负氧平衡炸药来说

$$\begin{aligned}(Q_{vR})_{\max} &= 241.8 \times 10^3 \times -\frac{b}{2} + 395.4 \times 10^3 \times \frac{c - \frac{b}{2}}{2} \\ &= (22.05b + 197.7c) \times 10^3\end{aligned}$$

但是, 实际上并达不到最大放热条件, 也就是说实际的产物生成热总和比按最大放热条件计算的产物生成热总和要小, 其比例关系以 K 表示。根据大量实验数据, 整理得到 K 与 A 的关系为

$$K = 0.32A^{0.24}$$

这样, 再按照盖斯定律就可以求出炸药的爆热

$$Q_v = \sum_{i=1}^h n_i Q_{vRi} - \sum_{j=1}^l n_j Q_{vRj}$$

当 $A \geq 100$ 时

$$Q_v = 0.32 \times 10^3 A^{0.24} (395.4a + 120.9b) - \sum_{j=1}^l n_j Q_{vRj} \quad (4-4-9)$$

当 $A < 100$ 时

$$Q_v = 0.32 \times 10^3 A^{0.24} (22.05b + 197.7c) - \sum_{j=1}^l n_j Q_{vRj} \quad (4-4-10)$$

(4-4-9) 和 (4-4-10) 二式的计算单位为 J/mol。几种炸药的定容生成热见表 4-4-2。

表4-4-2 几种炸药的定容生成热 (298K)

药	分子式	ΔH_f	$Q_{Dc}(J/mol \times 10^3)$
梯恩梯	$C_7H_5O_6N_3$	227	-33.5
特屈儿	$C_7H_5O_8N_3$	237	-41.4
黑索金	$C_3H_3O_6N_3$	222	-87.4
泰安	$C_3H_8O_{12}N_4$	316	515.1
硝基胍	$CH_4O_2N_4$	101	79.33
硝化甘油	$C_3H_5O_9N_3$	227	350.24
二硝基苯	$C_6H_4O_4N_2$	218	-29.7
1, 3, 5-三硝基苯	$C_6H_3O_6N_3$	213	9.6
2, 4-二硝基甲苯	$C_7H_6O_4N_2$	182	64.0
六硝基二苯胺	$C_{12}H_5O_{12}N_7$	439	-51.5
四硝基甲烷	CO_8N_4	146	-49.8
苦味酸铵	$C_6H_3O_7N_4$	216	37.7

归纳经验计算爆热的步骤:

第一步 按照分子式由公式 (4-4-8) 计算氧系数 A ;

第二步 由表 (4-4-2) 查出炸药定容生成热, 按照公式 (4-4-9) 或 (4-4-10) 计算炸药爆热。

〔例4-5〕 计算梯恩梯的爆热。

解 第一步 按照梯恩梯的分子式 $C_7H_5O_6N_3$, 计算

$$A = \frac{c}{2a + \frac{b}{2}} \times 100 = \frac{6}{2 \times 7 + \frac{5}{2}} \times 100 = 36.36$$

第二步 计算爆热

由于 $A = 36.36 < 100$, 采用公式 (4-4-10)

$$\begin{aligned}
Q_v &= 0.32 \times 10^3 A^{0.24} (22.05b + 197.7c) - \sum_{j=1}^I n_j Q_{vRj} \\
&= 0.32 \times 10^3 (36.36)^{0.24} (22.05 \times 5 + 197.7 \times 6) \\
&\quad - 56.5 \times 10^3 = 926 \times 10^3 (\text{J/mol}) \\
&= 4080 \times 10^3 (\text{J/mol})
\end{aligned}$$

〔例4-7〕 计算黑 50/梯 50 的爆热。

解 第一步 按照黑 50/梯 50 的分子式 $\text{C}_{22.15}\text{H}_{34.5}\text{O}_{26.7}\text{N}_{20.1}$ 计算

$$A = \frac{c}{2a + \frac{b}{2}} \times 100 = \frac{26.7}{2 \times 22.15 + \frac{24.5}{2}} \times 100 = 47.21$$

第二步 计算爆热

由于 $A = 46.85 < 100$ ，仍采用公式 (4-4-10)。此时炸药生成热，是由 2.25mol 黑索金和 2.2mol 梯恩梯所组成

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^I n_j Q_{vRj} &= 2.25 \times (-87.4) \times 10^3 + 2.2 \\
&\quad \times 56.5 \times 10^3 = -72.35 \times 10^3
\end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned}
Q_v &= 0.32 \times 10^3 A^{0.24} (22.05b + 197.7c) - \sum_{j=1}^I n_j Q_{vRj} \\
&= 0.32 \times 10^3 (47.21)^{0.24} (22.05 \times 24.5 + 197.7 \\
&\quad \times 26.7) - (-72.35 \times 10^3) = 4768 \times 10^3 (\text{J/kg})
\end{aligned}$$

二、爆热的实验测定

1. 爆热的测定

炸药爆热的测定是在一个严密的实验装置内进行的，典

型的实验装置见图 4-4-2。整个实验装置包括爆热弹和量热系统两部分，爆热弹是由优质合金钢做成的钢弹， $\phi 270\text{mm}$ ，

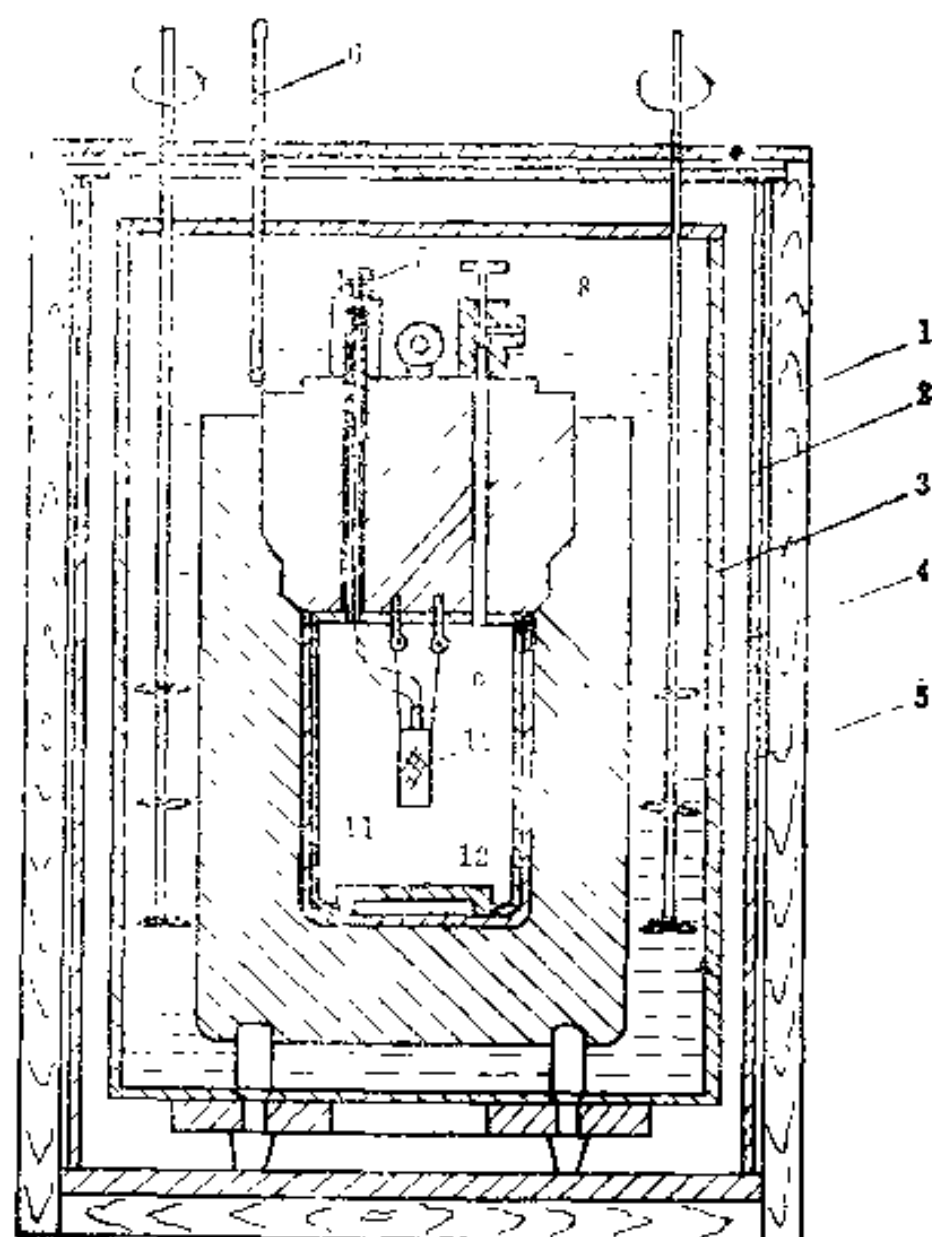


图 4-4-2 爆热测定装置

- 1—木桶；2—保温桶；3—量热桶；4—爆热弹体；
5—搅拌桨；6—温度计；7—电接线柱；8—抽气口；
9—电雷管；10—药柱；11—内衬桶；12—垫块。

$h = 400\text{mm}$ ， $m = 137.5\text{kg}$ ，内腔容积 5.8L ，可供爆炸 100g 炸药试样之用。量热系统分三层，外层为木桶，中层为钢板制成的保温桶，桶的内表面镀铬抛光，内层为不锈钢做成

的量热桶，内、外表面均抛光。在木桶和保温桶之间充填有泡沫塑料，以隔绝与外界环境的热交换，爆热弹放置在这热桶中间，量热桶内盛有一定量的蒸馏水，以供测热之用。

实验时，室内保持恒温，将装有雷管的炸药试样悬挂在爆热弹弹盖上，盖好弹盖，通过弹盖上的抽气孔抽出弹内空气，并用氮气置换一次弹内剩余的空气，再抽真空。然后用吊车将弹体放入量热桶内，加入准确称量的恒热蒸馏水，直至将弹体全部淹没为止。

加入水后，恒温 1 小时，记下此时桶内水温 T_0 ，然后引爆炸药，测量爆炸后水达到的最高温度 T ，则可以计算炸药的爆热

$$Q_{\text{爆}} = cM(T - T_0) = c(M_{\text{水}} + M_{\text{器}})(T - T_0) \quad (4-4-11)$$

式中 c —— 水的比热；

$M_{\text{水}}$ —— 加入的蒸馏水量；

$M_{\text{器}}$ —— 仪器的水当量。

几种常用炸药爆热实测数据，列于表 4-4-3。

表 4-4-3 几种常用炸药爆热实测数据

炸 药	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	$Q_{\text{爆}}(\text{J/kg} \times 10^8)$
梯 恩 梯	1.50	4226
黑 索 金	1.50	5400
黑 50/梯 50	1.68	4770
特 屈 儿	1.55	4560
泰 安	1.65	5690
苦 味 酸	1.50	4100
硝酸铵 80/梯恩梯 20	1.30	4142

2. 影响测定爆热的因素

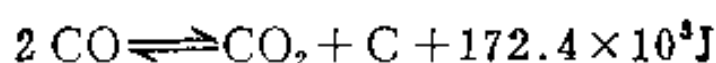
由于装药条件不同，同种炸药测定的爆热也不同。影响测定爆热的较大因素是装药密度和装药有无外壳。

表4-4-4给出了装药密度对爆热测定的影响。实验数据表明，这种影响对负氧平衡严重的炸药，如梯恩梯、特屈儿、苦味酸等，影响比较显著；对正氧和零氧平衡炸药以及负氧平衡不大的炸药，影响不大。

表4-4-4 装药密度对爆热测定的影响

炸 药	$\rho_0(\text{g}/\text{cm}^3)$	$Q_*(\text{J}/\text{mol} \times 10^3)$
梯 恩 梯	0.85	3390
	1.0	3600
	1.5	4225
	1.62	4855
黑 索 金	0.95	5315
	1.1	5355
	1.5	5400
黑50/梯50	0.9	4310
	1.68	4770
特 屈 儿	1.0	3810
	1.55	4100
泰 安	0.85	5440
	1.65	5440
硝酸铵80/梯恩梯20	0.9	4100
	1.3	4142

这种影响的主要原因，可以归结为爆炸瞬间产生的压力对平衡反应的影响。我们知道，负氧平衡严重的炸药在爆炸瞬间产生的二次反应有



当装药密度增加时，爆炸瞬间所达到的压力增高，使上述反应向右移动，以致放出更多的热量，结果爆热增加。

对于负氧平衡不大的炸药，上述二次反应产生得很少，而主要二次反应是



这个反应两边气体体积相等，不受压力的影响，因而爆热变化不大。

表4-4-5给出了装药外壳对爆热测定的影响。实验数据同样表明，这种影响对负氧平衡严重的炸药，影响显著；对正氧、零氧平衡以及负氧平衡不大的炸药，影响不大。

表4-4-5 装药外壳对爆热测定的影响

炸 药	外 壳 条 件	$Q_p (\text{J/kg} \times 10^3)$
梯 恩 梯	2 mm 玻璃	3515
	4 mm 黄铜	4520
黑 索 金	2 mm 玻璃	5314
	4 mm 黄铜	5940
特 屈 儿	无 外 壳	3890
	1.6 mm 软钢	4560
	3.2 mm 软钢	4770
	6.4 mm 软钢	4853
	12.8 mm 软钢	4853

对于负氧平衡的炸药，当无外壳时，爆炸产物的膨胀不受限制，因而压力下降很快，使二次反应向体积增加的左边进行，由于反应吸热的原因，而使得测定的爆热降低；当带有外壳后，外壳的存在阻止了爆炸产物向外膨胀，使爆炸瞬间压力的下降趋于缓慢，减弱了二次反应向左边进行的程度，

所以有外壳时测定的爆热比无壳时测定的爆热要大，并且这种影响随着外壳的加厚而增大，但当外壳足够厚时，外壳的影响趋于极限状态，所以测定的爆热也就不再增加了。

三、提高炸药爆热的途径

提高炸药的爆热，对于提高弹药的威力具有很重要的实际意义。提高爆热主要是通过增加爆炸产物生成热的方法来达到，有如下几种途径。

1. 改善炸药的氧平衡

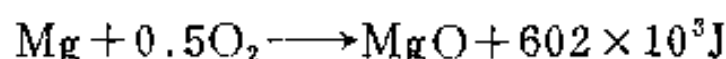
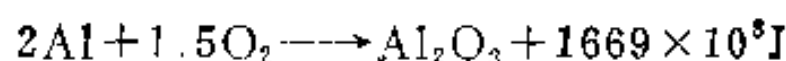
炸药多是负氧平衡的物质，反应时由于氧不足，不可能按照最大放热原则生成放热最多的 H_2O 和 CO_2 ，因而向负氧炸药中加入一些含氧丰富的氧化剂，改善炸药的氧平衡条件，会使炸药的爆热增加。

对于零氧平衡或者含氧较多的炸药，虽然基本上能够生成 H_2O 和 CO_2 ，但是由于生成 H_2O 和生成 CO_2 时的放热量是不同的，1 g 氧元素与氢反应生成 H_2O 可以放出 $15.1 \times 10^3 \text{ J}$ 的热量，1 g 氧元素与碳反应生成 CO_2 仅放出 $12.3 \times 10^3 \text{ J}$ 的热量；并且由于二次反应的存在，在爆炸瞬间并不是所有的碳都能氧化成 CO_2 ，有一部分停留在 CO 状态，同时还会有少量游离的氧存在。因而在同样条件下，含氢较多的炸药爆热较高。由于上述原因，向含氧较多的炸药中适量地加入一些含氢丰富的可燃物质，使氧尽量参加反应，并且多生成放热最多的 H_2O ，这对于提高爆热也是有益的。

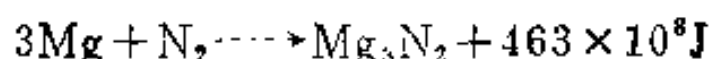
2. 加入一些能形成高生成热产物的细金属粉

向炸药中加入一些能形成高生成热的细金属粉，如铝、镁、铍、钛等对提高爆热极其有效。这些金属粉加入后，它们能够夺取 H_2O 和 CO_2 中的氧，生成放热更多的金属氧化

物，如：



同时，铝、镁等金属粉还能与爆炸产物中原来没有来得及反应的氮气发生剧烈的反应，放出更多的热量



所以，加入这类金属粉后，会使爆热显著提高，成为高爆热类型的炸药。

实用中由于铝粉来源方便，又价格便宜，因而含铝炸药广泛地应用在对空武器和水下武器中。例如在黑索金中加入20%的铝粉之后，能够使炸药的爆热增加24%，表4-4-6给出了在黑索金中加入不同比例铝粉时的爆热测定值。

表4-4-6 黑索金中加入不同比例铝粉时的爆热

RDX(%)	Al(%)	$Q_V (\text{J/g} \times 10^3)$
100	0	5720
90	10	6502
80	20	7088
70	30	7385
60	40	7782
50	50	7280

3. 对于负氧平衡的炸药，注意提高装药密度，这对提高爆热有很重要的作用。

§ 4-5 爆 温

爆温是炸药爆炸瞬间所放出的热量将爆炸产物加热到的最高温度。

一、爆温的计算

1. 爆温理论计算的三点假设

- (1) 炸药的爆炸过程视作为定容过程;
- (2) 炸药的爆炸过程视作为绝热过程, 爆炸反应放出的热量全部用来加热爆炸产物;
- (3) 爆炸产物的热容 c_v 只是温度的函数, 与爆炸时所处的压力和温度无关。

由于爆炸是瞬时发生的, 我们所计算的爆温是爆炸瞬间所达到的温度, 因而前两点假设误差不大, 但是由于在高温高压下, 热容 c_v 还受压力和密度的影响, 第三点假设会有一些误差。

2. 按照爆炸产物的热容计算爆温

基于假设(1)和(2), 炸药爆炸放出的热量使产物由原来炸药的温度 $t_0^{\circ}\text{C}$, 升高到爆炸瞬时温度 $t_H^{\circ}\text{C}$ 。

基于假设(3), 热容仅是温度的函数, 对于某一种爆炸产物来说, 其吸热量为 $n_i \bar{c}_{v,i}(t_H - t_0)$, 式中 n_i 是这种产物组分的mol数, $\bar{c}_{v,i}$ 是这种产物组分在 t_0 至 t_H 间的平均定容比热。

将全部各种产物的吸热量累加起来, 应该等于炸药的爆热, 即

$$Q_v = \sum_{i=1}^k n_i \bar{c}_{v,i} (t_H - t_0)$$

按照此式可以计算出爆温

$$t_H = \frac{Q_v}{\sum_{i=1}^k n_i \bar{c}_{v,i}} + t_0 \quad (4-5-1)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, k$ 是爆炸产物的组分。

产物平均定容比热可以采用不同的方法进行计算, 此处介绍一种较为方便的二项式计算法。二项式平均定容比热公式

$$\bar{c}_{v,i} = a_i + b_i t \quad (4-5-2)$$

公式 (4-5-2) 的单位为 $\text{J/mol} \cdot \text{K}$, a_i 、 b_i 是与物质有关的系数, 见表4-5-1。

表4-5-1 比热二项式系数

物 质	a_i	b_i
水 蒸 气	18.74	9.00×10^{-3}
二氧化碳	41.00	2.43×10^{-3}
双原子气体	20.08	1.88×10^{-3}
四原子气体	41.84	1.88×10^{-3}
五原子气体	50.21	1.88×10^{-3}
固 体 碳	25.10	0

由于按照 (4-5-1) 式计算 t_H 时, 需要知道 $\bar{c}_{v,i}$, 按照 (4-5-2) 式计算 $\bar{c}_{v,i}$ 时, 又必须知道 t_H , 因而 (4-5-1) 和 (4-5-2) 两式的计算是连系在一起的, 我们采用试探法。当已知爆炸反应方程式和爆热时, 计算爆温的具体步骤如下:

第一步 首先假定一个温度 t'_1 , 按照 (4-5-2) 式计算产

物各组分的 $\bar{c}_{v,i}$, 然后按产物组成相加, 得到 $\sum_{i=1}^k n_i \bar{c}_{v,i}$

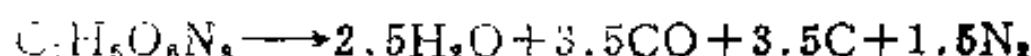
第二步 应用 (4-5-1) 式, 计算爆温得 t_1 ;

第三步 将假定的 t'_1 与计算出的 t_1 相比较, 若相差不大 (30度以内), 则认为 t_1 就为所求的爆温; 若相差过大, 需重新假设温度, 重复上述的计算, 直至计算到满意为止。

一般说来, 按照二项式公式 (4-5-2) 计算出来的热容值偏低, 从而求得的爆温偏高。

例4-8) 计算梯恩梯的爆温。

解 梯恩梯的爆炸反应方程式



并且已知 $Q_v = 4155 \times 10^3 \text{ J/kg}$

第一步 假定 $t'_1 = 3000^\circ\text{C}$, 按照 (4-5-2) 式计算

$$\bar{c}_{v\text{H}_2\text{O}} = 16.74 + 9.00 \times 10^{-5} \times 3000 = 43.74$$

$$\bar{c}_{v\text{N}_2} = 20.08 + 1.88 \times 10^{-5} \times 3000 = 25.72$$

$$\bar{c}_{v\text{C}} = 25.10$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k n_i \bar{c}_{v_i} &= 2.5 \times 43.74 + (3.5 + 1.5) \times 25.72 \\ &\quad + 3.5 \times 25.1 = 325.8 (\text{J/mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

第二步 应用 (4-5-1) 式计算爆温

$$t_1 = - \frac{Q_v}{\sum_{i=1}^k n_i \bar{c}_{v_i}} + t_0 = - \frac{4155 \times 10^3 \times \frac{227}{1000}}{325.8} + 18 = 2913 (^\circ\text{C})$$

第三步 t_1 与 t'_1 比较, 相差 87°C 。重新假设

$$t'_2 = 3000 + (2913 - 3000) \times 0.618 = 2946 (^\circ\text{C})$$

计算

$$\bar{c}_{v\text{H}_2\text{O}} = 16.74 + 9.00 \times 10^{-5} \times 2946 = 43.25$$

$$\bar{c}_{v\text{N}_2} = 20.08 + 1.88 \times 10^{-5} \times 2946 = 25.62$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k n_i \bar{c}_{v_i} &= 2.5 \times 43.25 + (3.5 + 1.5) \times 25.62 \\ &\quad + 3.5 \times 25.1 = 324.08 (\text{J/mol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

$$t_2 = \frac{4155 \times 10^3 \times \frac{227}{1000}}{324.08} + 18 = 2928 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

由于 t_2 与 t'_2 比较, 相差仅 18°C , 符合精度要求。也可以取中值作为梯恩梯的爆温

$$t_H = \frac{2946 + 2928}{2} = 2937 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

3. 按照爆炸产物的内能计算爆温

基于假设 (2), 近似认为爆炸放出的热量全部用来加热了爆炸产物, 根据热力学第一定律

$$Q = \Delta E + p\Delta V$$

基于假设 (1), 爆炸过程为定容过程, $\Delta V = 0$, 因而

$$Q = \Delta E$$

此式说明炸药爆炸放出的热量, 全部转变成为爆炸产物的内能, 可以写成

$$Q_v = \sum_{i=1}^k n_i \Delta E_i \quad (4-5-3)$$

式中 n_i ——某种产物 mol 数;

ΔE_i ——以环境温度为基点, 爆温时某种组分产物的内能增加量。

表 4-5-2 给出了有关气体和碳元素从 291 K 到任意温度 T (K) 时内能的增加量。

当已知爆炸反应方程式和 Q_v 时, 用内能法计算爆温的步骤:

第一步 首先假设温度 T'_1 , 由表 4-5-2 中查得该温度下各个产物的 ΔE_i , 按照公式 (4-5-3) 计算爆热 Q'_v 。

第二步 比较 Q_v 和 Q'_v , 若二者相差不大, 可以认为 T'_1

表4-5-2 有关气体和碳元素从291(K)至 T (K)时的 ΔE (J/mol $\times 10^3$)

T (K)	H ₂ O	CO ₂	CO	H ₂	O ₂	N ₂	C
291	0	0	0	0	0	0	0
300	0.226	0.259	0.188	0.188	0.188	0.182	0.079
400	2.791	3.364	2.280	2.264	2.330	2.276	1.114
500	5.139	6.632	4.402	4.356	4.556	4.381	2.446
600	8.192	10.602	6.581	6.432	6.887	6.535	4.023
700	11.083	14.618	8.832	8.560	9.314	8.745	5.799
800	14.092	18.845	11.155	10.682	11.820	11.025	7.800
900	17.213	23.238	13.552	12.821	14.393	13.372	9.765
1000	20.450	27.773	16.004	15.025	17.025	15.750	11.878
1100	23.682	32.208	18.083	16.447	22.116	20.769	16.292
1200	26.682	37.000	20.330	21.066	27.957	25.937	20.945
1300	29.066	37.002	21.711	28.853	33.614	31.242	25.790
1400	30.020	67.203	37.192	33.111	39.359	33.660	30.769①
1500	38.258	77.697	42.752	38.920	45.200	42.158	35.748
1600	46.730	88.249	48.367	44.162	51.141	47.727	42.171②
1700	55.396	98.839	54.036	49.526	57.170	54.187	48.592
1800	64.216	109.599	59.739	54.999	63.279	60.015	53.028①
1900	73.165	120.441	65.475	60.572	69.488	64.722	57.463①
2000	82.366	131.302	71.249	66.229	75.781	70.454	61.898
2200	111.525	142.248	77.044	71.965	82.140	76.220	67.321①
2400	140.784	153.306	82.860	77.764	88.575	82.019	72.785①
2600	169.181	164.406	88.697	83.626	95.081	87.835	78.241①
2800	198.691	175.506	94.554	89.546	101.650	93.667	83.814①
3000	249.261	186.669	100.429	95.512	108.257	99.508	89.387
3200	159.820	197.880	106.307	101.533	114.934	105.382	
3400	168.377	209.162	112.207	107.587	121.662	111.273	
3600	177.975	220.442	118.131	113.692	128.436	117.181	
3800	187.606	231.706	124.085	119.830	135.219	123.085	
4000	197.409	243.130	129.583	126.014	142.013	129.035	

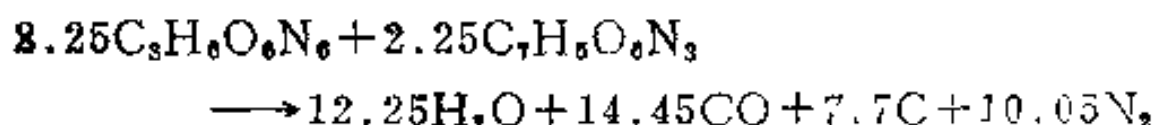
② 按表中数据插值所得结果。

就是所求 T_m 。若二者相差较大,则需要重新假设温度进行计算。

由于表4-5-2的 $\Delta T=200\text{K}$,当 Q_v 在相差200K的产物内能增量之间时,可以用线性插值法确定爆温值。

〔例4-9〕 计算黑50/梯50的爆温。

解 黑50/梯50的爆炸反应式



已知 $Q_v=4665\times 10^3\text{J/kg}$

第一步 假设 $T'_1=3800\text{K}$,查表4-5-2

$\Delta E_{\text{H}_2\text{O}}$	ΔE_{CO}	ΔE_{C}	ΔE_{N_2}
139.691×10^3	94.554×10^3	83.814×10^3	93.667×10^3

$$Q'_v = \sum_{i=1}^k n_i \Delta E_i = (12.25 \times 139.691 + 14.45 \times 94.554 \\ + 7.7 \times 83.814 + 10.05 \times 93.667) \times 10^3 \\ = 4664 \times 10^3 (\text{J/kg})$$

第二步 比较 Q_v 和 Q'_v ,二者极为相近。故

$$T_H = 3800\text{K}$$

〔例4-10〕 写出泰安炸药的爆炸反应方程式,全面计算 v_c 、 Q_v 和 T_H 。

解

1. 建立泰安的爆炸反应方程式

泰安的分子式为 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_{12}\text{N}_4$,判别类别

$$c=12, \quad 2a + \frac{b}{2} = 14, \quad a + \frac{b}{2} = 9$$

$$a - \frac{b}{2} \leq c \leq 2a + \frac{b}{2}$$

属于第二类炸药, 按照公式 (4-2-2) 写出爆炸反应式



2. 计算 v_c

$$v_c = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \times 1000}{\sum_{j=1}^l n_j M_j} \times 22.4$$

$$= \frac{(4 + 3 + 2 + 2) \times 1000}{1 \times 310} \times 22.4 = 780 (\text{K}/\text{kg})$$

3. 计算 Q_p

查表 4-4-1

ν	M	H_2O	CO_2	CO	N_2
0.1	28×10^3	241.8×10^3	395.4×10^3	112.5×10^3	0

$$Q_f = \sum_{i=1}^k r_i Q_{f, Ri} - \sum_{j=1}^l n_j Q_{f, Rj}$$

$$= (4 \times 241.8 + 3 \times 395.4 + 2 \times 112.5) \times 10^3$$

$$- 541.28 \times 10^3 = 1837 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

$$Q_p = Q_f + 2.419 \times 10^5 \Delta n$$

$$= 1837 \times 10^3 + 2.419 \times 10^5 \times (4 + 3$$

$$- 2 + 2 - 0)$$

$$= 1804 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

$$= 5692 \times 10^3 \text{ (J/kg)}$$

4. 计算 T_H 假设 $T'_1 = 4800\text{K}$, 查表 4-5-2

H ₂ O	CO ₂	CO	N ₂
187.606×10^3	231.706×10^3	124.085×10^3	123.085×10^3

$$Q'_{v_1} = \sum_{i=1}^k n_i \Delta E_i = (4 \times 187.606 + 3 \times 231.706 + 2 \times 124.085 + 2 \times 123.085) \times 10^3$$

$$= 1939.882 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

比较 Q_v 和 Q'_{v_1} , 相差较大, 重新假设 $t'_2 = 4600\text{K}$, 查表 4-5-2

H ₂ O	CO ₂	CO	N ₂
177.975×10^3	220.442×10^3	118.131×10^3	117.181×10^3

$$Q'_{v_2} = \sum_{i=1}^k n_i \Delta E_i = (4 \times 177.975 + 3 \times 220.442 + 2 \times 118.131 + 2 \times 117.181) \times 10^3$$

$$= 1843.851 \text{ (J/mol)}$$

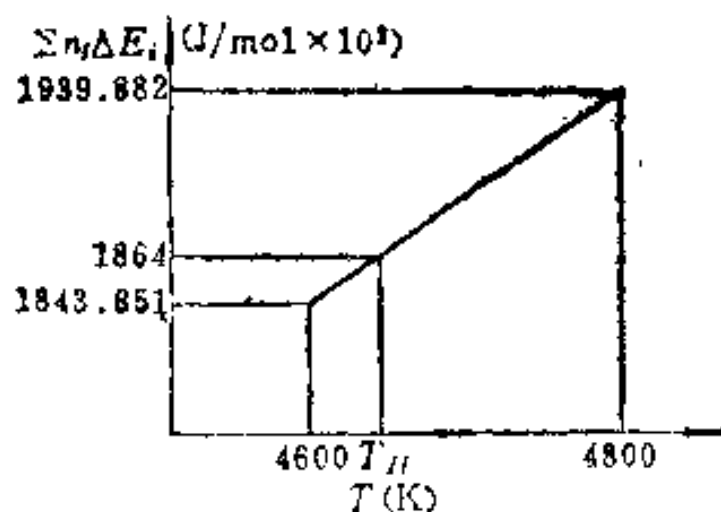


图 4-5-1 温度线性分布图

比较 Q_v 和 Q'_v 。发现 Q_v 在 Q'_{v_1} 和 Q'_{v_2} 之间，可以用线性插值方法确定 T_H (图4-5-1)

$$\frac{T_H - 4600}{4800 - 4600} = \frac{1864 - 1843.851}{1939.882 - 1843.851}$$

$$T_H = 4600 + \frac{20.149}{96.031} \times 200 = 4642 \text{ (K)}$$

二、爆温的测定

爆温是爆炸参数中进行实验测定最困难的一个，一则爆炸瞬间达到的温度很高，二则这个温度保持的时间很短，当温度达到最大值后，随着产物的剧烈膨胀迅速地下降。

由于爆炸具有巨大破坏作用，实际通常采用光学方法测定爆炸瞬间所达到的最高温度。假设爆炸产物是热辐射体，炸药爆炸时辐射出一系列连续光谱，用测温装置一次测定两个波长的光谱亮度，然后根据辐射光谱能量分布的普朗克公式计算爆温。图4-5-2给出了测定爆温装置的原理图。

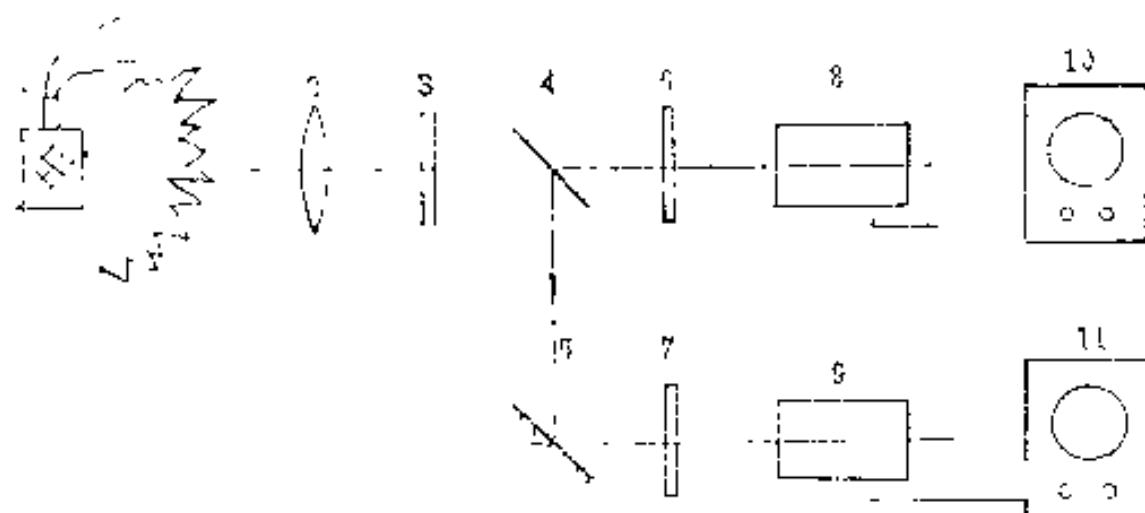


图4-5-2 爆温测定原理图

- 1—被测炸药；2—透镜；3—狭缝；4—半反射镜；
5—全反射镜；6、7—滤光片；8、9—光电转换器；
10、11—示波器。

当炸药爆炸时，爆炸光通过透镜和狭缝进入爆温测定装置，此爆炸光一路通过半反射镜的透射和滤光片6的滤光，得到一定波长 λ_1 的光，进入光电转换器8转变成电的信号，在示波器10上显示，从而确定了波长 λ_1 的光线亮度 b_1 ；爆炸光的另一路通过半反射镜的反射，再通过反射镜5的反射和滤光片7的滤光，得到另一个波长 λ_2 的光，这个光进入光电转换器9转变成电的信号，在示波器11上显示，从而确定了波长 λ_2 的光线亮度 b_2 。

按照灰体辐射光谱能量分布的普朗克公式，波长 λ 温度 T 时的亮度

$$b(\lambda, T) = \frac{ac_1\lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (4-5-4)$$

式中 a ——黑度系数；

c_1, c_2 ——常数。

在可见光部分，当 $T < 6000\text{K}$ 时， $e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \gg 1$ ，故(4-5-4)式为

$$b(\lambda, T) = ac_1\lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (4-5-5)$$

将两个已知波长 λ_1 、 λ_2 时的光谱亮度 b_1 、 b_2 分别代入(4-5-5)式，得到

$$b_1 = ac_1\lambda_1^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_1 T}}$$

$$b_2 = ac_1\lambda_2^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_2 T}}$$

二式相除

$$\frac{b_1}{b_2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_2 T} - \frac{c_2}{\lambda_1 T}}$$

取对数

$$\ln \frac{b_1}{b_2} = 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$$

从而根据实验测定 λ_1 、 λ_2 时的亮度 b_1 、 b_2 ，可以计算出爆温

$$T = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{b_1}{b_2} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (4-5-6)$$

做实验时，一般将被测炸药置于水中以防止爆炸瞬间空气冲击波发光对测量的影响。密度低的装药，由于炸药颗粒间有小气泡，在爆炸瞬间由于气泡的绝热压缩能够发出强烈的光，对爆温的测量会造成影响，因而爆温测定时，应使被测炸药装药的密度尽量密实，以保证测量的准确性。表4-5-3给出了几种炸药的爆温实测数据。

表4-5-3 几种炸药爆温的实测值

炸 药	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	$T_H(\text{K})$	炸 药	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	$T_H(\text{K})$
梯恩梯	—	3010	泰安	1.77	4200
特屈儿	—	3700	泰安	0.90	6600
黑索金	1.79	3700			

三、改变爆温的途径

研究改变爆温的方法具有重要的实际意义。不同场合，对爆温有不同的要求，为了提高弹药的爆炸威力，需要提高爆温；为了避免矿用炸药引起瓦斯、灰尘的爆炸，需要使矿

用炸药的爆温不超过允许值；对于火药，为了减少炮口火焰和火药对炮膛的烧蚀，也需要降低火药燃烧速度。

按照

$$T_{ii} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i Q_{vRi} - \sum_{j=1}^l n_j Q_{vRj}}{\sum_{i=1}^k n_i C_{vi}}$$

提高爆温的办法，无非是三条：1. 提高爆炸产物的生成热，2. 减少或者不增加炸药的生成热，3. 减少或者不增加产物的热容量。这三条必须综合考虑。

提高军用炸药爆温，最有效的办法仍是向炸药中加入一些能形成高生成热产物的金属粉末，如铝粉、镁粉等物质。在讨论提高爆热方法时已经讲到，加入这些物质后，它们不仅能够夺取水和氧化碳中的氧，生成放热更多的金属氧化物，同时还能够与原来未作用的氮发生反应，生成金属氮化物，放出额外的热量，使产物生成热大量增加；并且这些产物的生成热也不过高，例如单位质量 Al_2O_3 的热容量在单位质量 H_2O 和单位质量 CO_2 热容量之间。所以能够使得爆温大量提高。

降低爆温的办法，与提高爆温的办法恰恰相反，降低爆温需要减少产物的生成热，增加炸药的生成热，以及增加产物的热容量。

提高炸药中氢元素相对于碳元素的比例，是降低爆温的有效办法，如表4-5-4所示。

高温下单位质量 H_2O 的热容量比单位质量 CO_2 和单位质量 CO 的热容量要大得多，因而为了消除炮口火焰，可以向火

表4-5-4 几种主要产物的比热容 ($\text{J/g}\cdot\text{K}$)

$T(\text{K})$	H_2O	CO_2	CO
3000	2.426	1.100	0.920
4000	2.929	1.155	0.987
5000	3.431	1.209	1.054

药中加入一些碳氢化合物，如树脂、脂肪酸以及芳香族低硝化程度的硝基衍生物。

矿用炸药加入氯化物、硫酸盐、草酸盐、重碳酸盐等，可以做成低爆温安全炸药。

第五章 波

在炸药爆炸过程中经常会产生一些波，如爆炸在炸药中传播时形成爆轰波，爆轰产物向周围空气中膨胀时形成冲击波，爆轰波和冲击波过后，介质在恢复到原来状态的过程中又会产生一系列膨胀波等，因而在研究炸药爆轰以及爆轰后对外界作用问题时，始终离不开波。这一章主要从气体动力学的角度介绍波的概念和基本关系式。

气体动力学是从宏观角度研究气体运动的，把气体看作中间没有空隙的、可压缩的连续介质，所有的气体状态参数 p 、 ρ 、 T 和质点速度 u 都被视为坐标的连续函数，从而可以对气体运动进行具体的数学描述。

气体动力学问题基于质量、动量、能量三大守恒定律，因而本章首先从简单阐述三大守恒定律开始。

§ 5-1 三大守恒定律

三大守恒定律是指质量守恒、动量守恒、能量守恒定律，这三个守恒定律皆是自然界最基本的规律，通过无数事实得出的重要结论，也是我们解决力学问题最基本的方法。

一、质量守恒定律

最普遍的质量守恒可以这样叙述：不管介质质点运动规律如何复杂，也不管介质在运动中是膨胀、还是压缩，但是其质量是不会改变的。

下面只研究一维、定常条件下的气体运动。设想在一个管道（图5-1-1）中，气体以管道轴线方向为流动方向。一维条件要求管道任意截面上的气流参数都是均匀分布的，而定常条件则要求气体流动参数分布不随时间而变化。

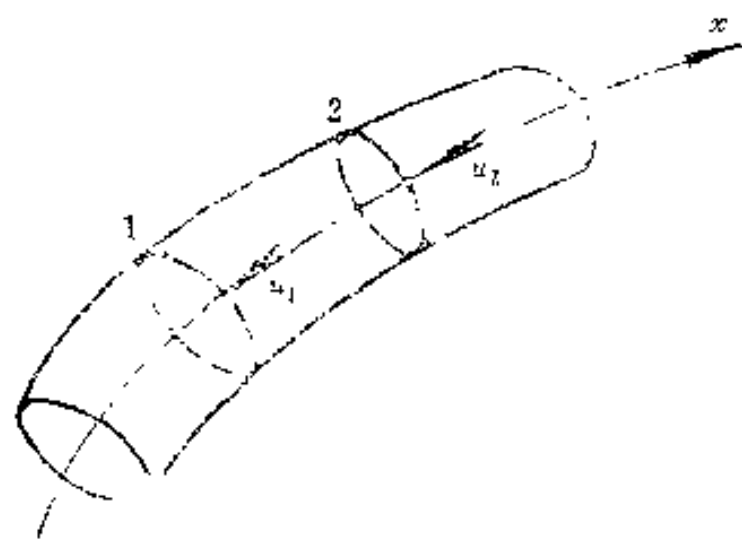


图5-1-1 一维定常流管

在管道内任取两个截面 1 和 2，其截面积分别是 S_1 和 S_2 ，设截面 1 处气体密度为 ρ_1 ，气流速度为 u_1 ，截面 2 处气体密度为 ρ_2 ，气流速度为 u_2 。速度 u 表示气体单位时间流过的距离，速度和截面积的乘积 uS 表示单位时间流过的气体体积，密度、速度和截面积的乘积 ρuS 表示单位时间内流过的气体质量。按照质量守恒定律，单位时间流过任何截面上的气体质量都是一样的，即

$$\rho_1 u_1 S_1 = \rho_2 u_2 S_2 \quad (5-1-1)$$

或 $\rho u S = \text{const}$

公式 (5-1-1) 表达了一维定常流动条件下质量守恒的规律，又称为连续方程。

二、动量守恒定律

牛顿第二定律指出，物体受外力作用时，所获得的运动

加速度大小与合外力大小成正比，而与物体的质量成反比，其方向与合外力的方向相同。数学表达式可以写为

$$F = ma$$

式中 F —— 合外力；
 m —— 物体质量；
 a —— 加速度。

牛顿第二定律反映了力的瞬时效应，现在研究力对物体所造成的累积效应。

冲量表示力在时间过程中的累积效应，冲量等于力乘以所作用的时间，如果在时间 t_1 至 t_2 范围内，物体受有不变的外力 F ，则冲量

$$I = F(t_2 - t_1)$$

设物体的质量为 m ，物体在不变外力作用下，时间由 t_1 增加到 t_2 时，所对应的速度由 u_1 增加到 u_2 ，则在这段时间范围内，物体的加速度应当是

$$a = \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1}$$

按照牛顿第二定律

$$F = m \cdot \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1}$$

可以获得

$$F(t_2 - t_1) = m(u_2 - u_1) \quad (5-1-2)$$

式中物体质量与速度的乘积 mu 称为动量，表示物体运动状态的特征，(5-1-2) 式表明物体受外力的冲量等于这段时间内物体动量的增加量，此式称为动量原理表达式。

下面仍然研究一维定常气体流动。如图 5-1-2 a 所示，对于相邻的两个截面 1 和 2，假若截面 1 处的气体压强为 p_1 ，

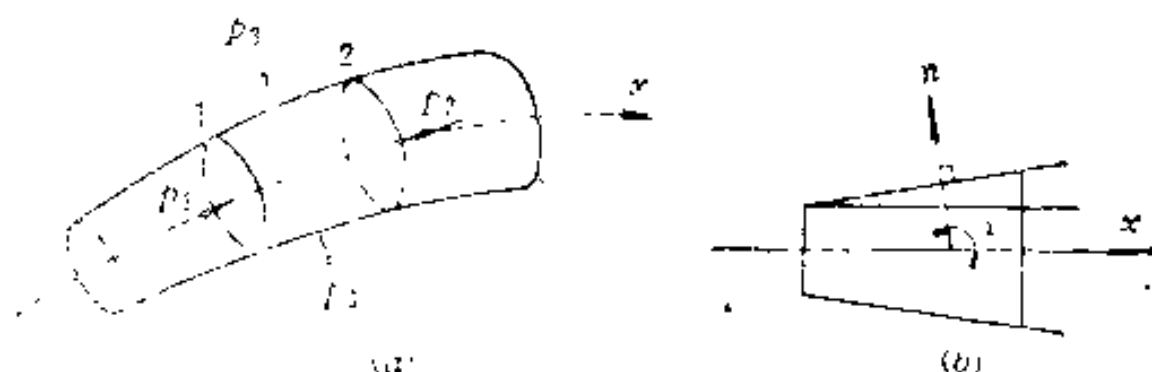


图5-1-2 流管受力示意图

a —流管各截面和表面受力； b —侧表面和截面关系。

截面 2 处的气体压强为 p_2 ，侧面的气体平均压强是 p_3 ，按照介质连续性条件，可以写成

$$p_2 = p_1 + \Delta p$$

$$p_3 = p_1 + \frac{1}{2} \Delta p$$

截面积 S_2 与截面积 S_1 的关系

$$S_2 = S_1 + \Delta S$$

作用在截面 1 和截面 2 之间介质上的力为

$$F = p_1 S_1 - p_2 S_2 + p_3 S_3 \cos \alpha$$

式中 α 是侧面法线与流管轴线的夹角，近似将管壁视作直线变化（图 5-1-2 b ），则

$$S_3 \cos \alpha = \Delta S$$

故

$$\begin{aligned} F &= p_1 S_1 - (p_1 + \Delta p_1)(S_1 + \Delta S) + \left(p_1 + \frac{1}{2} \Delta p_1\right) \Delta S \\ &= -\left(S_1 + \frac{\Delta S}{2}\right) \Delta p \end{aligned}$$

截面 1 和截面 2 之间的介质质量为

$$m = \rho S \Delta x = \rho \left(S_1 + \frac{\Delta S}{2}\right) \Delta x$$

按照动量原理 (5-1-2) 式, 得

$$-\Delta p \left(S_1 + \frac{\Delta S}{2} \right) \Delta t = \rho \left(S_1 + \frac{\Delta S}{2} \right) \Delta x (u_2 - u_1)$$

由于介质在 Δt 时间内流过的距离为 Δx , 其平均速度 $u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, 所以上式可以写成

$$\Delta p = -\rho u (u_2 - u_1) \quad (5-1-3)$$

(5-1-3) 式表明: 作用在流管截面 1 和截面 2 上的压强差等于此二截面上单位时间和单位面积流动的动量差的负值。

三、能量守恒定律

最普遍的能量守恒和转换定律可以这样叙述: 能量可以从一种形式转变成为另一种形式, 但是它既不能凭空产生, 也不能凭空消灭, 能量的总和保持不变。

仍然研究一维定常气体流动, 如图 5-1-2 所示, 截面 1 和截面 2 间气体压力在轴向投影

$$F = -\Delta p \left(S_1 + \frac{\Delta S}{2} \right)$$

截面 1 和截面 2 间气体的质量和加速度分别为

$$m = \rho \left(S_1 + \frac{\Delta S}{2} \right) \Delta x$$

$$a = \frac{\Delta u}{\Delta t}$$

按照牛顿第二定律得

$$-\Delta p = \rho \Delta x \frac{\Delta u}{\Delta t}$$

介质单位时间通过的距离 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, 用截面 1 和截面 2 的速

度平均值代替, 可以得到

$$-p = \rho \frac{u_1 + u_2}{2} (u_2 - u_1) = \rho \left(-\frac{u_2^2}{2} + \frac{u_1^2}{2} \right)$$

或写成

$$v \Delta p + \Delta \left(-\frac{u^2}{2} \right) = 0 \quad (5-1-4)$$

式中 v 是气体的比容。(5-1-4) 式表明了气体运动过程中压力功和气体动能之间的关系。

(5-1-4) 式仅考虑了气体流动时机械能本身的变化, 在一般情况下, 还需要考虑机械能与热能之间的转换, 按照热力学第一定律

$$q = \Delta e + p \Delta v \quad (5-1-5)$$

在热能与机械能之间的转换以及机械能本身的变化都具备的情况下, 能量守恒和转换定律应该包括 (5-1-4) 和 (5-1-5) 两式, 即

$$q = \Delta e + p \Delta v + v \Delta p + \Delta \left(-\frac{u^2}{2} \right)$$

取截面 1 和截面 2 处参数的平均值代替参数本身, 对于压力和比容

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad v = \frac{v_1 + v_2}{2},$$

$$p \Delta v + v \Delta p = -\frac{1}{2} (p_1 + p_2) (v_2 - v_1)$$

$$+ -\frac{1}{2} (v_1 + v_2) (p_2 - p_1) = p_2 v_2 - p_1 v_1$$

所以

$$\Delta \left(e + \frac{u^2}{2} + pv \right) = q \quad (5-1-6)$$

(5-1-6) 式表明, 单位质量气体的内能、位能和压力位能之和的增加量, 等于对该气体所加的热量。

在绝热流动中, 由于没有能量加入, 此时 (5-1-6) 式为

$$e + \frac{u^2}{2} + pv = \text{const} \quad (5-1-7)$$

(5-1-7) 式表明, 在绝热流动中气体的内能、动能和压力位能之和保持不变。

§ 5-2 弱 波

一、什么是波

波可以分为两大类, 一类是机械原因所造成的机械波, 另一类是电磁场变化所造成的电磁波。本章研究属于机械波。

波是扰动的传播过程, 扰动是产生波的根源。在流场中某个地方, 由于某种原因, 例如振动、敲打、冲击、碰撞等方式, 使得气流参数发生局部变化, 例如压力升降、密度大小、温度高低、速度增减等, 破坏了原来的平衡状态, 我们就说流场受到了扰动, 或者说产生了波源。在流场某处介质发生扰动时, 通过流场介质质点间的相互作用, 能够由近及远地使流场介质质点陆续受到扰动, 这种扰动传播的过程就是波, 扰动区与未扰动区之间的分界面称为波阵面。

例如水波, 向静静的水中投入一个石子, 在石子投放处发生扰动, 以石子投放点为中心向外产生一圈一圈的水纹, 这水纹就是水波, 水纹向四周扩展的快慢就是水波速度。通过观察, 我们还可以看到水波虽然一圈圈地向外传播, 但是水面上的浮漂并不随水波前进, 而只是上下荡漾几下, 稍微移动一点之后就静止了, 这个浮漂表示了水的质点, 从而看

出水波的传播与水的质点运动是完全不同的两回事。

本章所研究的波是在空气中形成的。当空气中某处受到扰动后，此处状态发生局部变化，然后影响到邻近的一层空气，邻近一层空气的状态变化又影响到再外一层的空气，这样扰动就一层层地传播出去。空气中传播的波也与水波一样，扰动传播的速度是波速，它与空气质点的运动是完全不同的两种运动。

扰动前后，状态参数发生微小变化的扰动，称为弱扰动，弱扰动的传播过程，如音波是一种弱波；扰动前后，状态参数发生剧烈变化的扰动，称为强扰动，强扰动传播的过程，如冲击波就是一种强波。

二、压缩波和膨胀波

扰动过后，压力、密度、温度等状态参数皆增加的波，称为压缩波。例如在直管中向前推动活塞，紧靠着活塞的气体层首先受压，然后这层受压的气体又压缩下一层相邻的气体，使下一层气体压力升高，这样层层传播下去的波，称为压缩波。

压缩波过后，气体质点跟随波运动，气体质点速度的方向与波传播的方向相同。

扰动过后，压力、密度、温度等状态参数皆降低的波，称为膨胀波。例如在直管中向后拉动的活塞，紧靠着活塞的气体层首先就会降压，然后这层降低压力的气体又会拉动下一层相邻的气体，使下一层气体压力下降，这样层层传播出去的波，称为膨胀波。

膨胀波过后，气体质点背向波运动，气体质点速度的方向与波传播的方向相反。

弱波传播的过程，是微变、渐变的过程。在弱波传播区域中，任意两个相邻截面间的气体参数只相差一个无穷小量。

任何有限的参数变化都是通过大量（或一系列）的弱波的连续变化来达到。

如图 5-2-1 所示，当活塞不断增加速度向左拉动时，我们可以将这个速度增加过程分成若干个小段。设想每个小段速度增量产生一道膨胀波，整个速度增加过程则产生一系列膨胀波，通过一道膨胀波使气体压力降低一个小量，再通过一道膨胀波使气体压力再降低一个小量，这样通过一系列膨胀波后，使气体压力从 p_1 连续降低到 p_2 。

当活塞以不断增加的速度向右推动时，会产生一系列的压缩波，但是一系列压缩波会聚集成为冲击波，这部分内容以后再讲。

由于弱波传播过程是微变、渐变过程，它不会引起内部能量消耗。因而弱波传播的过程是等熵过程，在弱波区域任意两个位置间的参数皆满足等熵关系

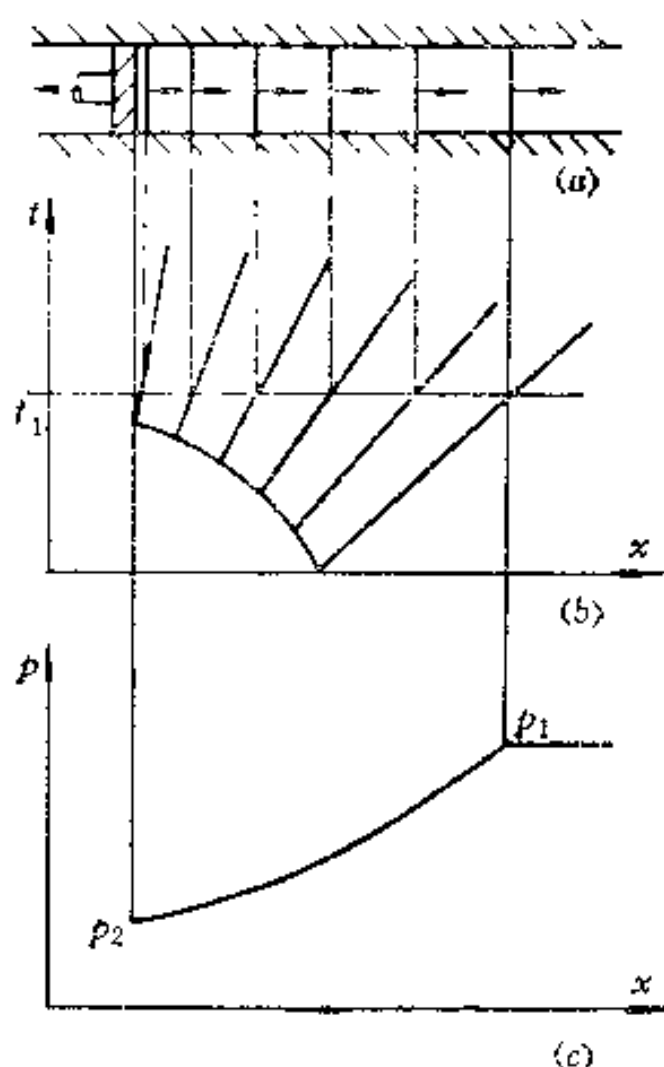


图5-2-1 膨胀波的形成和压力
 a— t_1 时刻直管中的膨胀波；b—膨胀波的时间—位置曲线；c—膨胀区的压力变化。

$$\frac{1}{\rho^k} = \text{const}$$

$$\frac{T}{\rho^{k-1}} = \text{const}$$

$$\frac{T}{p^{\frac{k-1}{k}}} = \text{const}$$

或者写成

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (5-2-1)$$

〔例5-1〕 在直管中拉动活塞的例子中，设原来静止气体的状态参数为 $p_1 = 10^5 \text{Pa}$ ， $\rho_1 = 1.292 \text{kg/m}^3$ ， $T_1 = 288 \text{K}$ ，假若活塞拉动后，靠近活塞处的压力下降到 $p_2 = 0.8 \times 10^5 \text{Pa}$ ，求靠近活塞处气体的密度和温度。

解 拉动活塞后，由于活塞处气体压力的降低，在静止气体中产生一系列的膨胀波，膨胀波传播的过程遵从等熵关系。

$\left. \begin{array}{l} p_1 = 10^5 \text{Pa} \\ \rho_1 = 1.292 \text{kg/m}^3 \\ T_1 = 288 \text{K} \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{等熵}} \left. \begin{array}{l} p_2 = 0.8 \times 10^5 \text{Pa} \\ \rho_2 = ? \\ T_2 = ? \end{array} \right\}$

按照等熵关系(5-2-1)式

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k-1}} = 1.292 \left(\frac{0.8}{1}\right)^{\frac{1}{1.4}} = 1.102 (\text{kg/m}^3)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 288 \left(\frac{0.8 \times 10^5}{10^5}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 270 (\text{K})$$

三、弱波传播的速度——音速

弱波的特例是音波。声音来源于物体的振动，物体振动时对周围空气产生周期性地压缩和膨胀扰动，此扰动一层层地传播开去，形成疏密相间的音波，通常人们听到的声音，是频率在 $20\text{Hz} \sim 20000\text{Hz}$ 间的振动，超出这个范围，人们便听不到了。

声音的传播速度是音速，如通常状态下空气中的音速是 340m/s ，弱波是与声音同一类型的波，只是它不一定在人们听觉器官所感觉的范围之内，弱波的传播速度也是音速。

如图5-4-1a所示，假若有一个弱波以速度 c 向右传播，波到达前气体为静止状态，压力、密度分别为 p 、 ρ ，波过后气体压力和密度皆改变一个微量，成为 $p + \Delta p$ 和 $\rho + \Delta \rho$ ，同时气体质点产生一个速度为 Δu 的跟随波的运动。

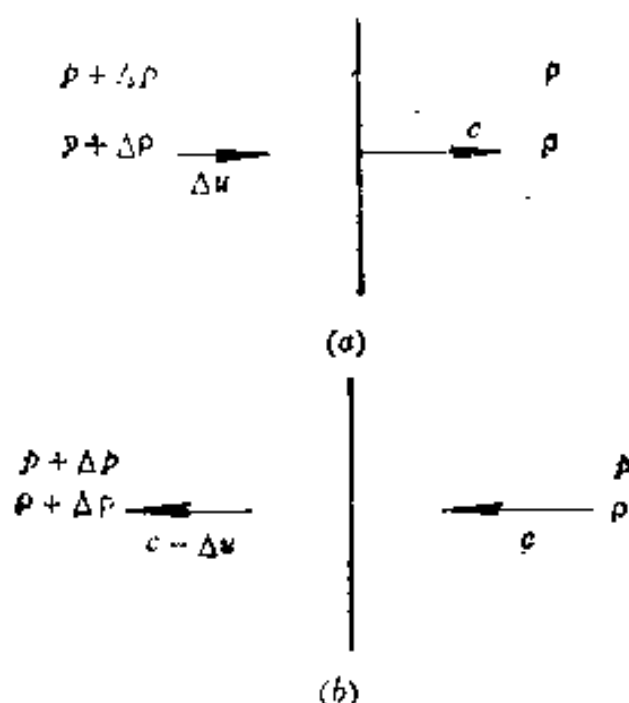


图5-2-2 弱波前、后气体状态的变化

a—真实流场；b—相对坐标的流场。

为了研究问题方便，跟随波来观察运动，这相当于在整

个流场中迭加一个速度为 c 、指向左方的流动，此时如图 5-2-2 b 所示，波面变为静止状态，右边的气流以速度 c 向波流来，左边的气流以速度 $c - \Delta u$ 离波而去，经过这个转换，流场成为定常流动。

质量守恒

对于波来说，单位时间流入的质量等于单位时间流出的质量，即

$$\rho c = (\rho + \Delta \rho)(c - \Delta u)$$

展开且略去二阶小量后，得

$$\Delta u = \frac{c \Delta \rho}{\rho} \quad (5-2-2)$$

动量守恒

作用于波阵面上的压力差，等于单位时间、单位横截面积上流动的动量差的负值，即

$$(\rho + \Delta \rho) - \rho = -\rho c [(c - \Delta u) - c]$$

得

$$\Delta p = \rho c \Delta u \quad (5-2-3)$$

将(5-2-2)式代入(5-2-3)式，整理得

$$c = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}} \quad (5-2-4)$$

(5-2-4)式表明：音速与气体的可压缩性有关，它取决于气体压强增量与密度增量的比值。气体的可压缩性愈大，达到一定的密度变化所需要的压强变化则愈小，即 $\frac{\Delta p}{\Delta \rho}$ 愈小，这时音速就愈小；反之，气体的可压缩性愈小，达到一定密度变化所需要的压强变化则愈大，即 $\frac{\Delta p}{\Delta \rho}$ 愈大，这时音速就愈大。

由于弱波传播过程是等熵过程，应该满足等熵关系：

$$\frac{p}{\rho^k} = \frac{p + \Delta p}{(\rho + \Delta \rho)^k} = A(\text{const})$$

对于波前状态

$$p = A\rho^k \quad (5-2-5)$$

对于波后状态

$$p + \Delta p = A(\rho + \Delta \rho)^k$$

采用二项式公式

$$(\rho + \Delta \rho)^k = \rho^k + k\rho^{k-1}\Delta \rho + \frac{k(k-1)}{2!}\rho^{k-2}(\Delta \rho)^2 + \dots$$

由于 $\Delta \rho$ 是个微量，略去二阶以上的高阶小量后，得

$$p + \Delta p = A(\rho^k + k\rho^{k-1}\Delta \rho) \quad (5-2-6)$$

用(5-2-6)式减去(5-2-5)式得到

$$\Delta p = Ak\rho^{k-1}\Delta \rho$$

或

$$\frac{\Delta p}{\Delta \rho} = Ak\rho^{k-1} = k \frac{A\rho^k}{\rho} = k \frac{p}{\rho}$$

将之代入(5-2-4)式，得到音速的表达式

$$c = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} \quad (5-2-7)$$

再引用理想气体状态方程，又可得到音速方程的另一表达式

$$c = \sqrt{kRT} \quad (5-2-8)$$

式中 k —— 气体的比热比，

R —— 气体常数。

对于不同成分的气体，由于 k 、 R 不同， c 也不同；对

于同种成分的气体, c 只是 T 的函数, 且与 $\sqrt{T}$ 成正比。

对于空气, 取平均 mol 量为 28.95, 则单位质量气体常数

$$R = 0.28718 \text{ J/g} \cdot \text{K}$$

将 R 值和 $k = 1.4$ 代入 (5-2-8) 式, 得到空气音速

$$c = 20.05 \sqrt{T} \quad (5-2-9)$$

表 5-2-1 给出了不同温度下空气音速的计算值。

表 5-2-1 不同温度时空气音速

$^{\circ}\text{C}$	$c \text{ (m/s)}$	$^{\circ}\text{C}$	$c \text{ (m/s)}$
-40	306	10	337
-30	313	15	340
-20	316	20	343
-15	322	25	346
-10	325	30	349
-5	328	35	352
0	331	40	355
5	334	50	360

四、弱波区气流速度和状态参数之间的关系

当弱波通过后, 波后气流速度会发生微弱的变化。

若弱波是压缩波, 波后气流增加一个与波传播方向相同的运动; 若弱波是膨胀波, 波后气流增加一个与波传播方向相反的运动。

当一系列弱波通过后, 波后气流会发生显著的变化。现在研究弱波区域内以及弱波区域前后气流速度与状态参数之间的关系。

1. 弱波传播中气流参数的基本关系式

假若有一系列弱波在直管里传播, 为了简便, 研究这一系列膨胀波中的一道波, 如图 5-2-3 a 所示, 设这道弱波波前

气流状态参数为 p 、 ρ ，气体的速度为 u ，音速为 c ，波后气流状态参数为 $p + \Delta p$ 、 $\rho + \Delta \rho$ ，气体的速度为 $u + \Delta u$ ，音速为 $c + \Delta c$ ，并且假设这道弱波的绝对速度为 u_w 。

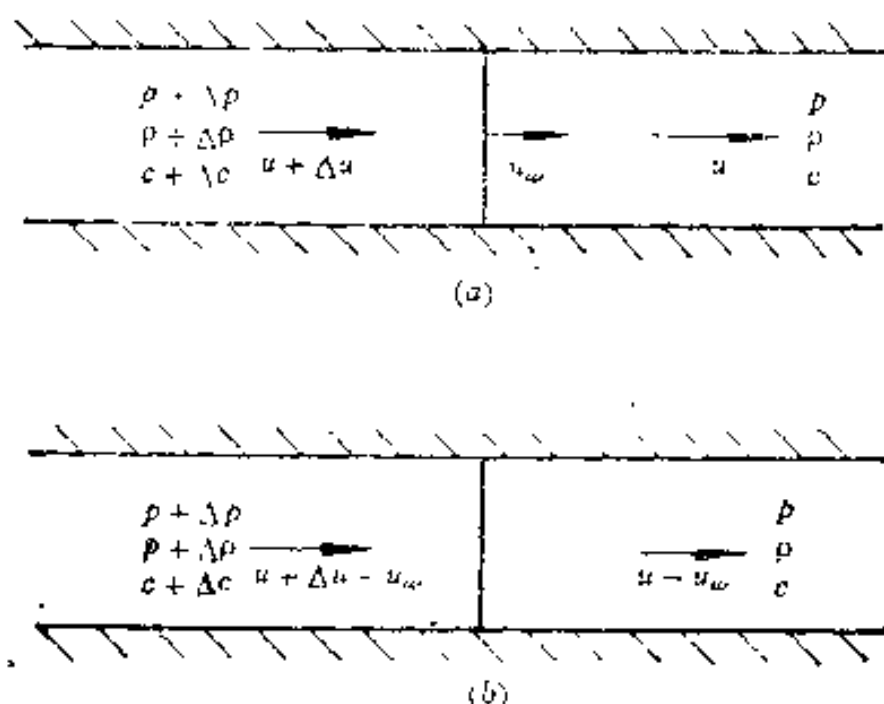


图5-2-3 直管中一道弱波前后的流场变化

a—真实流场；b—相对坐标的流场。

仍然跟随波来观察运动，也就是在整个流场中迭加一个速度为 u_w 、与波传播方向相反的运动，如图5-2-3 b 所示，波成为静止状态，右边的气体以速度 $u - u_w$ 向右流动，左边的气体以速度 $u + \Delta u - u_w$ 向右流动，经过这个变换，流场成为不随时间变化的定常流动。

质量守恒

$$\rho(u - u_w) = (\rho + \Delta\rho)(u + \Delta u - u_w)$$

展开并略去二阶小量后，得

$$\rho \Delta u + (u - u_w) \Delta \rho = 0 \quad (5-2-10)$$

动量守恒

$$(p + \Delta p) - p = -\rho(u - u_w)[(u + \Delta u - u_w) - (u - u_w)]$$

得

$$\Delta p = -\rho(u - u_w)\Delta u \quad (5-2-11)$$

从(5-2-10)和(5-2-11)二式中消去 Δu ，得到

$$(u - u_w)^2 = \frac{\Delta p}{\Delta \rho}$$

开方后得

$$u - u_w = \pm \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}} = \pm c$$

因而弱波传播速度

$$u_w = u \pm c \quad (5-2-12)$$

公式(5-2-12)表明：如果弱波不是在静止气体中传播，弱波传播速度应该是在波前气体质点运动的基础上，再迭加一个音速。为了明确起见，称这个音速为当地音速，即弱波不论运动到何处，波传播速度相对于所处气体质点的速度都是音速。当波相对于气流向右传播时，则弱波速度为 $u + c$ ，称为右传波；当波相对于气流向左传播时，则弱波速度为 $u - c$ ，称为左传波。

图 5-2-4 在时间-路程平面上表明了两个方向传播的弱波。虚线 1 表示气体质点运动的轨迹，实线 2 表示相对于气流向右传播的右传波，实线 3 表示相对于气流向左传播的左传波。从图上可以明显看出，左传波只是相对于气流左传，而它本身的绝对速度并不一定指向

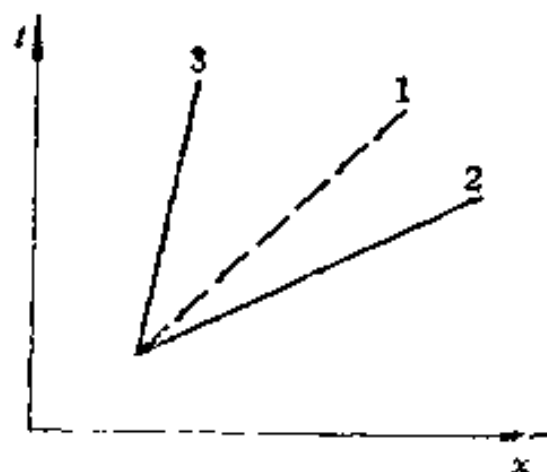


图5-2-4 弱波相对于气流运动的时间-路程图

1—质点运动轨迹；2—右传波，
3—左传波。

左, 当 $c > u$ 时, 波传播方向指向左边, 当 $c < u$ 时, 波传播方向指向右边。

将(5-2-12)代入(5-2-11)式, 得

$$\frac{\Delta p}{\Delta u} = \pm \rho c$$

用 $c^2 = k \frac{p}{\rho}$ 代入上式, 消去 ρ 后得到

$$\frac{\Delta p}{\Delta u} = \pm k \frac{p}{c} \quad (5-2-13)$$

(5-2-13)式表明通过弱波时气流参数变化的规律, 对于右传波取正号, 对于左传波取负号。

按照波前后的等熵条件:

$$\frac{p}{\rho^k} = \frac{p + \Delta p}{(\rho + \Delta \rho)^k}$$

可以得到关系式

$$\frac{\Delta p}{p} = k \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

同样按照波前、后等熵关系

$$\frac{T}{\rho^{k-1}} = \frac{T + \Delta T}{(\rho + \Delta \rho)^{k-1}}$$

可以得到

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{k-1} \frac{\Delta T}{T}$$

按照温度和音速的关系

$$\frac{T}{c^2} = \frac{T + \Delta T}{(c + \Delta c)^2}$$

可以得到

$$\frac{\Delta T}{T} = 2 \frac{\Delta c}{c}$$

将上面三个式子联系起来, 得到

$$\frac{\Delta p}{p} = k \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{k}{k-1} \frac{\Delta T}{T} = \frac{2}{k-1} \frac{\Delta c}{c} \quad (5-2-14)$$

将 (5-2-14) 代入 (5-2-13) 式得到

$$\Delta u = \pm \frac{2}{k-1} \Delta c \quad (5-2-15)$$

公式(5-2-15)表明弱波前后音速增量与气流速度增量之间的关系。对于右传波, 公式中的符号取正号; 对于左传波, 公式中的符号取负号。

(5-2-12)和(5-2-15)二式是研究弱波传播区域气流参数的最基本公式。公式(5-2-12)表明弱波的传播速度, 即沿着弱波波线上音速和气流速度之间的关系; 公式(5-2-15)表明弱波前、后的状态变化, 即跨过弱波波线音速增量和气流速度增量之间的关系。

对于右传波:

$$\left. \begin{array}{l} \text{波的传播速度} \quad u_w = u + c \\ \text{波前、后状态变化} \quad \Delta u = \frac{2}{k-1} \Delta c \end{array} \right\} \quad (5-2-16)$$

对于左传波:

$$\left. \begin{array}{l} \text{波的传播速度} \quad u_w = u - c \\ \text{波前、后状态变化} \quad \Delta u = -\frac{2}{k-1} \Delta c \end{array} \right\} \quad (5-2-17)$$

〔例5-2〕 假若直管中传播着一系列的膨胀波, 波前气体状态为: $p_1 = 10^5 \text{ Pa}$, $\rho_1 = 1.292 \text{ kg/m}^3$, $T_1 = 288 \text{ K}$, 并且气体具有向右流动的速度 $u_1 = 100 \text{ m/s}$, 膨胀波后气体的压力 $p_2 = 0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$, 试计算膨胀波的速度以及气体流动速度。

解 有限状态变化都是通过一系列弱波完成的, 为了采

用公式(5-2-12)和(5-2-15), 我们假定为一道波。

标准状态下的空气符合理想气体, 按照波前气体状态,
 $c_1 = 340 \text{ m/s}$ 。

已知波前气体的压强和音速, 又知波后气体的压强增量
 $\Delta p = -0.2 \times 10^5 \text{ Pa}$, 求波后气体音速增量 Δc , 可以采用
 (5-2-14)式

$$-\frac{\Delta p}{p} = \frac{2}{k-1} \frac{\Delta c}{c}$$

得

$$\begin{aligned} \Delta c &= \left(\frac{k-1}{2k} \frac{\Delta p}{p} \right) c \\ &= \frac{1.4-1}{2 \times 1.4} \left(\frac{-0.2 \times 10^5}{10^5} \right) \times 340 = -10 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

若波相对于气流向右传播, 按照公式(5-2-16)可以计算出膨胀波速度

$$u_w = u + c = 100 + 340 = 440 (\text{m/s})$$

波后气流速度增量

$$\Delta u = -\frac{2}{k-1} \Delta c = -\frac{2}{1.4-1} \times (-10) = -50 (\text{m/s})$$

则波后气流速度

$$u_2 = u_1 + \Delta u = 100 - 50 = 50 (\text{m/s})$$

若波相对于气流向左传播, 按照公式(5-2-17), 可以计算出膨胀波速度

$$u_w = u - c = 100 - 340 = -240 (\text{m/s})$$

波后气流速度增量

$$\Delta u = -\frac{2}{k-1} \Delta c = -\frac{2}{1.4-1} \times (-10) = 50 (\text{m/s})$$

则波后气流速度

$$n = u_1 + \Delta u = 100 + 50 = 150 (\text{m/s})$$

2. 弱波区气流参数的计算

上面在弱波传播中计算气流参数时，采用了“一道波”。实际上，对于一个有限的状态变化，具有无限道波，在这无限道波的波区中，气流参数是连续变化的。为了计算波区中的气流参数，用一道波不合适，当然用无限道波来进行计算也不现实，这就需要采用近似的办法，假定气流参数的变化是通过有限道波完成的。按照精度的要求，所取波的数目可多可少，需要精确计算波区的气流参数变化时，必须多取一些波，当大略了解波区气流参数变化时，可以少取一些波，以简化计算。

如图5-2-5所示，假若在管道中传播着一系列单向传播

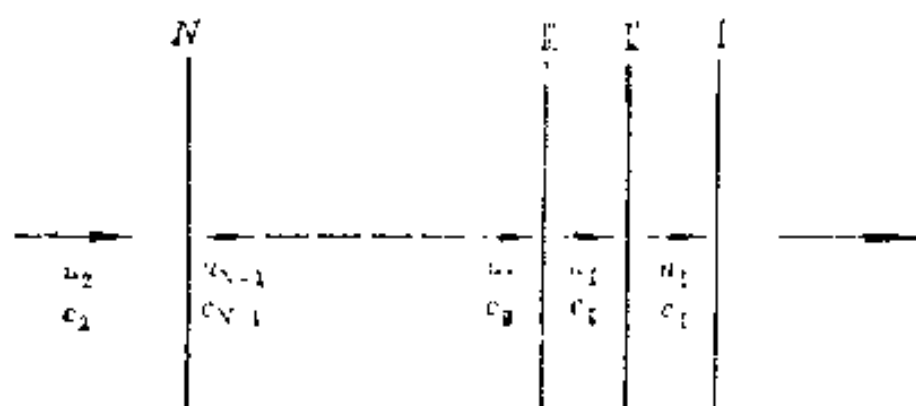


图5-2-5 N 道弱波的流动

的弱波，弱波区前气流参数为 u_1 、 c_1 ，弱波区后气流参数为 u_2 、 c_2 。我们用 N 道波来代替弱波区，设第 I 道波后的气流参数为 u_I 、 c_I ，第 II 道波后的气流参数为 u_I 、 c_I ，…，最后一道波（第 N 道波）前的气流参数为 u_{N-1} 、 c_{N-1} ，最后一道波后的气流参数即是 u_2 、 c_2 。

按照公式(5-2-15)，对于每道波前后，可以依次写出

$$u_1 - u_1 = \pm \frac{2}{k-1} (c_1 - c_1)$$

$$u_1 - u_1 = \pm \frac{2}{k-1} (c_1 - c_1)$$

$$u_1 - u_1 = \pm \frac{2}{k-1} (c_1 - c_1)$$

.....

$$u_{N-1} - u_{N-1} = \pm \frac{2}{k-1} (c_2 - c_{N-1})$$

或者连写成

$$\begin{aligned} u_1 \mp \frac{2}{k-1} c_1 &= u_1 \mp \frac{2}{k-1} c_1 = u_1 \mp \frac{2}{k-1} c_1 \\ &= \dots = u_2 \mp \frac{2}{k-1} c_2 \end{aligned}$$

从而得到

$$u \mp \frac{2}{k-1} c = \text{const} \quad (5-2-18)$$

公式(5-2-18)表明在整个弱波传播区域, 各处状态量的组合 $u \mp \frac{2}{k-1} c$ 保持为常数。对于右传波取负号, 即在整个流动中 $u - \frac{2}{k-1} c$ 保持不变; 对于左传波取正号, 即在整个流动中 $u + \frac{2}{k-1} c$ 保持不变。

公式(5-2-18)仍然适用于通过弱波区前、后的稳定状态。如果弱波区前气流参数为 u_1 、 c_1 , 弱波区后气流参数为 u_2 、 c_2 , 则

对于右传波区

$$u_1 - \frac{2}{k-1} c_1 = u_2 - \frac{2}{k-1} c_2 \quad (5-2-19)$$

对于左传波区

$$u_1 + \frac{2}{k-1} c_1 = u_2 + \frac{2}{k-1} c_2 \quad (5-2-20)$$

〔例5-3〕 仍按照例5-2，计算膨胀波速度和气体流动速度。

解 由于波区前气体压力为 $p_1 = 10^6 \text{ Pa}$ ，波区后气体压力为 $p_2 = 0.8 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，近似假定膨胀波区由四道波组成，通过每道波压力降低 $0.05 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，这样就确定了各道膨胀波后的压力，又知波区前气体的温度 $T_1 = 288 \text{ K}$ ，因而可以用等熵关系和弱波区气流变化关系，将各道波前、后状态参数联系起来。

$$\begin{array}{ccc}
 \left. \begin{array}{l} p_2 = 0.8 \times 10^6 \text{ Pa} \\ T_2 = ? \\ u_2 = ? \end{array} \right\} & \xrightarrow{u_{w1}} & \left. \begin{array}{l} p_1 = 0.85 \times 10^6 \text{ Pa} \\ T_1 = ? \\ u_1 = ? \end{array} \right\} \xrightarrow{u_{w1}} \\
 \\
 \left. \begin{array}{l} p_1 = 0.9 \times 10^6 \text{ Pa} \\ T_1 = ? \\ u_1 = ? \end{array} \right\} & \xrightarrow{u_{w1}} & \left. \begin{array}{l} p_1 = 0.95 \times 10^6 \text{ Pa} \\ T_1 = ? \\ u_1 = ? \end{array} \right\} \xrightarrow{u_{w1}} & \left. \begin{array}{l} p_1 = 10^6 \text{ Pa} \\ T_1 = 288 \text{ K} \\ u_1 = 100 \text{ m/s} \end{array} \right\}
 \end{array}$$

按照公式(5-2-1)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

计算得

$$T_1 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 288 \times \left(\frac{0.95 \times 10^5}{10^5} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 284 (\text{K})$$

$$T_1 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 288 \times \left(\frac{0.9 \times 10^5}{10^5} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 280 (\text{K})$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 288 \times \left(\frac{0.85 \times 10^5}{10^5} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 275 (\text{K})$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 288 \times \left(\frac{0.8 \times 10^5}{10^5} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 270 (\text{K})$$

按照公式(5-2-9)

$$c = 20.05 \sqrt{T}$$

计算得

$$c_1 = 338 \text{ m/s} \quad c_1 = 336 \text{ m/s}$$

$$c_1 = 333 \text{ m/s} \quad c_2 = 330 \text{ m/s}$$

若膨胀波区是右传波区, 按照公式(5-2-18)

$$u - \frac{2}{k-1} c = \text{const}$$

代入波前初始状态

$$\text{const} = u_1 - \frac{2}{k-1} c_1 = 100 - \frac{2}{1.4-1} \times 340 = -1600$$

可以计算出各道膨胀波后气流的参数

$$u_1 = -1600 + \frac{2}{k-1} c_1 = -1600 + \frac{2}{1.4-1} \times 338 = 90 (\text{m/s})$$

$$u_1 = -1600 + \frac{2}{k-1} c_1 = -1600 + \frac{2}{1.4-1} \times 336 = 80 (\text{m/s})$$

$$u_1 = -1600 + \frac{2}{k-1} c_1 = -1600 + \frac{2}{1.4-1} \times 333 = 65 (\text{m/s})$$

$$u_2 = -1600 + \frac{2}{k-1} c_2 = -1600 + \frac{2}{1.4-1} \times 330 = 50 (\text{m/s})$$

按照公式(5-2-12)

$$u_w = u + c$$

可以计算出各道膨胀波的传播速度

$$u_{w1} = u_1 + c_1 = 100 + 340 = 440 (\text{m/s})$$

$$u_{w2} = u_2 + c_2 = 90 + 338 = 428 (\text{m/s})$$

$$u_{w3} = u_3 + c_3 = 80 + 336 = 416 (\text{m/s})$$

$$u_{w4} = u_4 + c_4 = 65 + 333 = 398 (\text{m/s})$$

若膨胀波区是左传波区, 按照公式(5-2-18)

$$u + \frac{2}{k-1} c = \text{const}$$

代入波前初始状态

$$\text{const} = u_1 + \frac{2}{k-1} c = 100 + \frac{2}{1.4-1} \times 340 = 1800$$

可以计算出各道膨胀波后气流的参数

$$u_1 = 1800 - \frac{2}{k-1} c_1 = 1800 - \frac{2}{1.4-1} \times 338 = 110 (\text{m/s})$$

$$u_2 = 1800 - \frac{2}{k-1} c_2 = 1800 - \frac{2}{1.4-1} \times 336 = 120 (\text{m/s})$$

$$u_3 = 1800 - \frac{2}{k-1} c_3 = 1800 - \frac{2}{1.4-1} \times 333 = 135 (\text{m/s})$$

$$u_4 = 1800 - \frac{2}{k-1} c_4 = 1800 - \frac{2}{1.4-1} \times 330 = 150 (\text{m/s})$$

按照公式(5-2-12)

$$u_w = u - c$$

可以计算出各道膨胀波的传播速度

$$u_{w1} = u_1 - c_1 = 100 - 340 = -240 \text{ (m/s)}$$

$$u_{w2} = u_2 - c_2 = 110 - 338 = -228 \text{ (m/s)}$$

$$u_{w3} = u_3 - c_3 = 120 - 336 = -216 \text{ (m/s)}$$

$$u_{w4} = u_4 - c_4 = 135 - 333 = -198 \text{ (m/s)}$$

§ 5-3 冲击波

一、冲击波概念

冲击波是一种强压缩波。波前、后介质的状态参数具有急剧的变化。实质上冲击波是介质状态参数急剧变化的分界面。

仍然从一个带有活塞的直管谈起。设想有一个很长很长的直管，管道左端放置一个活塞，当活塞不动时，管中的气体是静止的，设其状态参数为 p_1 、 ρ_1 、 T_1 ；当推动活塞，使活塞以速度 u 向右移动时，邻近活塞处的气体状态参数达到 p_2 、 ρ_2 、 T_2 。为了研究问题方便，将活塞由静止到速度达到 u 的整个加速过程分成若干个阶段，每一个阶段，活塞增加一个微小的速度量 Δu ，活塞压缩气体产生一道弱压缩波，气体状态参数增加一个微量 Δp 、 $\Delta \rho$ 、 ΔT 。

活塞由静止增加到以速度 Δu 移动时，产生第一道压缩波，波后气体状态参数为 $p_1 + \Delta p$ 、 $\rho_1 + \Delta \rho$ 、 $T_1 + \Delta T$ ，波后气流速度为 Δu ，第一道压缩波的速度为 $c_1 = \sqrt{kRT_1}$ 。

活塞由速度 Δu 增加到 $2\Delta u$ 时，产生第二道压缩波，波后气体状态参数为 $p_1 + 2\Delta p$ 、 $\rho_1 + 2\Delta \rho$ 、 $T_1 + 2\Delta T$ ，波后气流速度为 $2\Delta u$ ，音速为 $c_2 = \sqrt{kR(T_1 + \Delta T)}$ ，由于第二道压缩波是在第一道波后具有速度 Δu 的气流中运动，因而第二道

压缩波的速度为 $\sqrt{kR(T + \Delta T_1)} + \Delta u$ 。

活塞由速度 $2\Delta u$ 增加到 $3\Delta u$ 时，产生第三道压缩波，波后气体状态参数为 $p_1 + 3\Delta p$ 、 $\rho_1 + 3\Delta\rho$ 、 $T_1 + 3\Delta T$ ，波后气流速度为 $3\Delta u$ ，音速 $c_2 = \sqrt{kR(T + 2\Delta T_1)}$ ，由于第三道压缩波是在第二道波后具有速度 $2\Delta u$ 的气流中运动，因而第三道压缩波的速度为 $\sqrt{kR(T_1 + 2\Delta T)} + 2\Delta u$ 。

依次类推，愈往后面的压缩波，波后状态参数增加得愈高，压缩波传播的速度也愈快，后面的压缩波可以追赶上前面的压缩波，并且迭加起来，图5-3-1表示了直管中压缩波

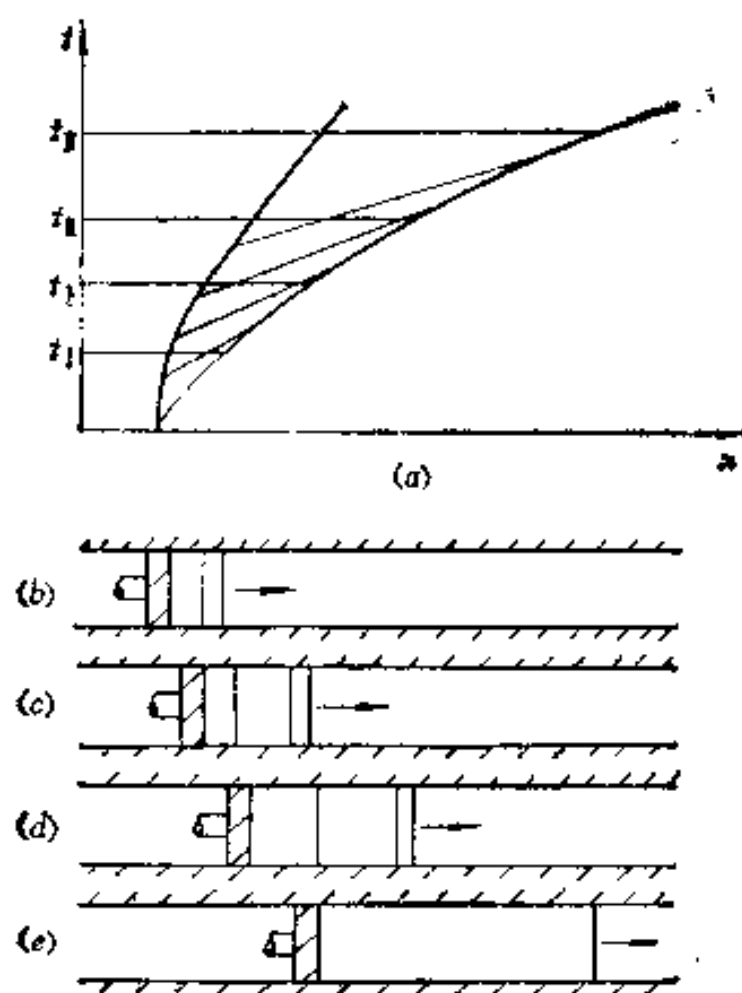


图5-3-1 压缩波的产生和迭加

■—活塞运动和波传播的时间-路程图；b— t_1 时刻的直管流动；c— t_2 时刻的直管流动；d— t_3 时刻的直管流动；e— t_4 时刻的直管流动。

的产生以及迭加过程。

当 $t = t_1$ 时, 在这一段时间内所产生的压缩波分别以当地音速向右传播;

当 $t = t_2$ 时, 前面压缩波间的距离不断缩短, 后面陆续产生新的压缩波;

当 $t = t_3$ 时, 前面的压缩波迭加起来, 后面追赶上来的压缩波间的距离也不断缩短;

当 $t = t_R$ 时, 最后一道压缩波也追赶上了前面的波, 使所有的压缩波皆迭加起来。这样状态参数连续变化的压缩波区, 就由状态参数急剧变化的突跃面所代替, 突跃面之前是静止气体, 气体状态参数为 p_1 、 ρ_1 、 T_1 , 突跃面过后是速度为 u 的气体, 气体状态参数为 p_2 、 ρ_2 、 T_2 , 这个突跃面就是冲击波。

通过上面的分析, 粗略归纳冲击波的性质如下:

1. 冲击波是由一系列的压缩波迭加而成, 波前、后状态参数 (p 、 ρ 、 T) 发生急剧的变化;

2. 冲击波过后, 介质质点获得一个与波传播方向相同的传播速度;

3. 冲击波传播速度相对于波前介质是超音速的, 而相对于波后介质是亚音速的;

4. 冲击波前、后气流是不等熵的, 冲击波过后气体状态的熵值增加。

关于前两点无需再进行说明, 第四点以后再加以说明, 对于第三点简单说明如下。

压缩波相对于波前气体是以当地音速传播的, 第一道压缩波相对于波前气体的传播速度是 $c_1 = \sqrt{kRT_1}$, 以后各道压缩波的速度皆大于 c_1 , 这样所有压缩波的迭加, 相当于后

面的压缩波追赶上前面的压缩波，一次次地使前面的压缩波加速，因而最终迭加而成的冲击波，其速度肯定大于 c_1 ，相对于波前气体的传播速度是超音速的；由于压缩波过后状态参数的增加，并且气体产生一个跟随波的运动，因而每道压缩波传播的速度皆小于该波波后气体的当地音速，最后一道压缩波的传播速度也小于通过最后一道压缩波再次压缩后气流的当地音速，这样所有皆小于 $c_2 + u = \sqrt{kRT_2} + u$ 的压缩波迭加后，其速度当然仍小于 $c_2 + u$ ，所以冲击波相对于波后气体的传播速度是亚音速的。

上面分析了冲击波产生的过程，下面再分析一下冲击波衰减的过程。当原来以速度 u 向右推进的活塞突然停止时，邻近活塞处的气体状态参数会大量降低，其气体也会静止下来，仍然可以把活塞由运动到静止的减速过程分成若干个阶段，每一个阶段活塞减小一个微小的速度量，活塞拉动气体产生一道膨胀波，气体状态参数也相应减小一个微量，每道膨胀波皆是以当地音速传播，虽然一系列同时传播的膨胀波是相互追赶不上的，但是只要管道足够长，它们可以陆续追赶上前面运行的冲击波，图5-3-2表示了直管中膨胀波追赶冲击波的过程。

当 $t = t_1$ 时，管道中传播着早已形成的冲击波和由于活塞减慢而产生的第一道膨胀波，冲击波相对于冲击波后气体的速度是亚音速的，而第一道膨胀波相对于膨胀波前气体的速度是音速，由于冲击波后和第一道膨胀波前的气体流动是稳定流动，因而第一道膨胀波以大于冲击波的速度向前传播，

当 $t = t_2$ 时，第一道膨胀波追赶上了冲击波，使其强度削弱，削弱后的冲击波仍然具有冲击波的性质，相对于此时波后气体的速度仍然是亚音速的。在这一段时间内，由于活

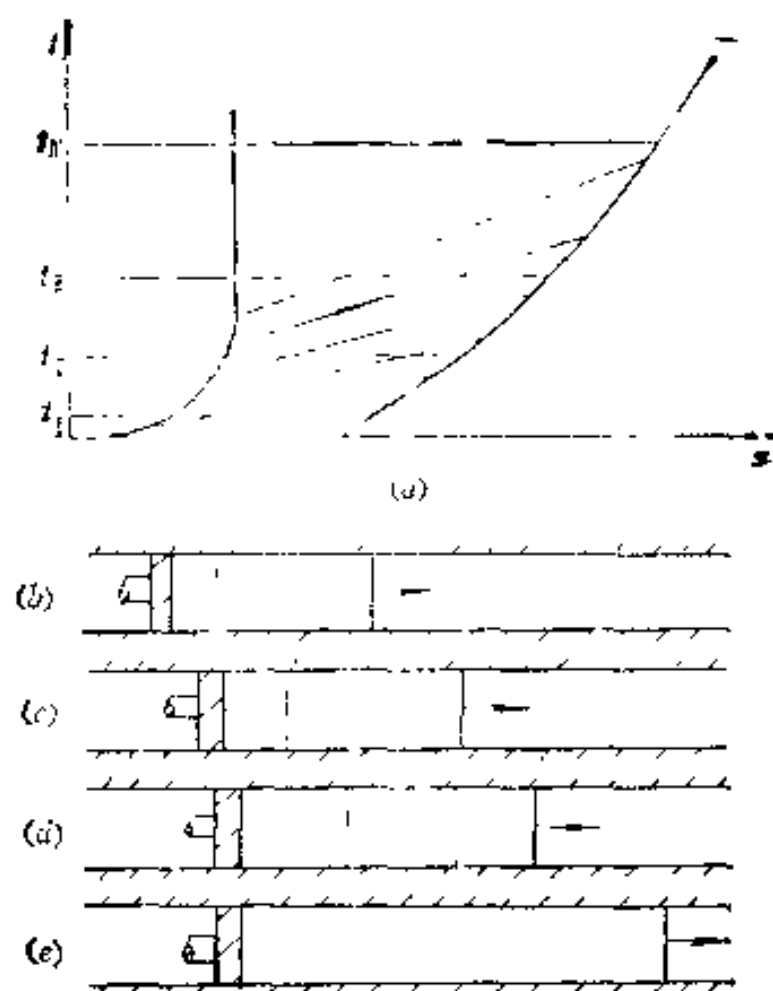


图5-3-2 膨胀波追赶冲击波

a —活塞运动和波传播的时间-路程图； b — t_1 时刻的直管流动； c — t_2 时刻的直管流动； d — t_3 时刻的直管流动； e — t_N 时刻的直管流动。

塞的减速运动产生了一系列的膨胀波；

当 $t = t_1$ 时，活塞减速运动所产生的膨胀波陆续追赶上了冲击波，膨胀波追赶上冲击波一次，冲击波受到一次削弱，冲击波传播速度和波后气体状态参数降低一次。因而尽管后面的膨胀波速度一个比一个变慢，但是冲击波经过一次次地削弱，也愈来愈慢，其速度相对于波后气体总是亚音速的，所以相对于波前气体以音速传播的膨胀波总是能够不断地追赶上前面运行的冲击波；

当 $t = t_N$ 时，活塞从开始减速到静止所产生的一系列膨

胀波全部追赶上了不断削弱的冲击波，最后使冲击波衰减成为音波。

用直管流动描述了冲击波形成和衰减的过程，其它爆炸所形成的冲击波也与之相似。炸药在空气中爆炸时，释放出大量的能量，使爆轰产物具有极高的压力，高压的爆轰产物迅速向四周膨胀，这个迅速膨胀的爆轰产物如同一个巨大的活塞一样压缩着周围的空气，在空气中形成冲击波。当爆炸产物扩散后，其压力不断降低，缓慢了爆轰产物的膨胀速度，此后又象降低速度的活塞一样，产生一系列的膨胀波，使冲击波的压力不断衰减下来。

二、冲击波的基本关系式

如图5-3-3 a 所示，假若一个平面冲击波以速度 D 向右

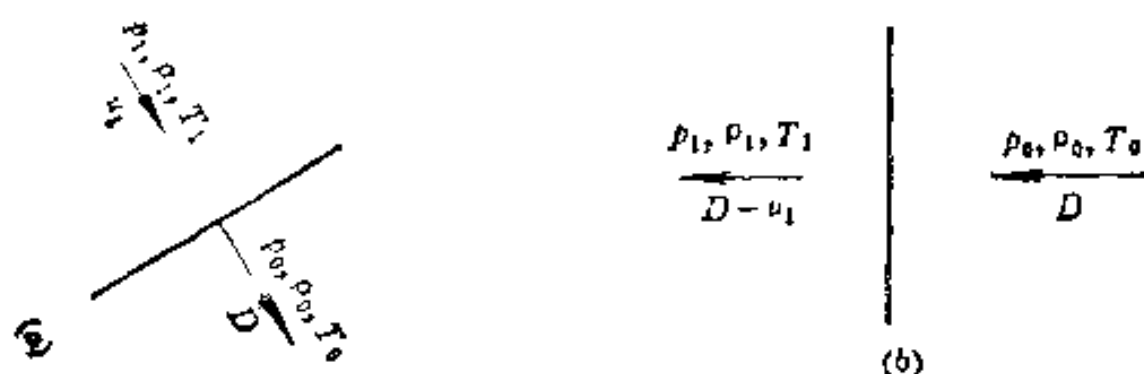


图5-3-3 冲击波在静止气体中的传播

a—真实流场， b—相对坐标的流场。

传播，波前气体处于静止状态，其状态参数为 p_0 、 ρ_0 、 T_0 ，波过后气体具有一个跟随波运动的速度 u_1 ，其状态参数为 p_1 、 ρ_1 、 T_1 。

为了研究方便，现在整个流场上叠加一个速度为 D 、指向左方的流动，如图5-3-3 b 所示。冲击波静止不动，右边的气体以速度 D 向冲击波流来，左边的气体以速度 $D - u_1$ 离

并冲击波流去。

质量守恒方程

单位时间内流入的质量, 等于单位时间内流出的质量, 即

$$\rho_0 D = \rho_1 (D - u_1) \quad (5-3-1)$$

动量守恒方程

作用于波阵面上的压力差, 等于单位时间、单位横截面积上流动的动量差的负值, 即

$$p_1 - p_0 = -\rho_0 D [(D - u_1) - D]$$

得

$$p_1 - p_0 = \rho_0 D u_1 \quad (5-3-2)$$

能量守恒方程

能量只能从一种形式转变成另一种形式, 但是总能量必须保持不变。

在没有热量加入的情况下, 气体的能量不外乎内能、动能和压力位能三种。对于波右边流入的气体, 内能为 $\rho_0 D \cdot e_0$, 其中 e_0 是右边气体单位质量的内能, 动能为 $-\frac{1}{2} \rho_0 D \cdot D^2$, 压力位能为 $p_0 D$; 对于波左边流出的气体, 内能为 $\rho_1 (D - u_1) \cdot e_1$, 其中 e_1 是左边气体单位质量的内能, 动能为 $-\frac{1}{2} \rho_1 (D - u_1) \cdot (D - u_1)^2$, 压力位能为 $p_1 (D - u_1)$ 。

按照能量守恒

$$\begin{aligned} \rho_0 D e_0 + \frac{1}{2} \rho_0 D \cdot D^2 + p_0 D = & \rho_1 (D - u_1) e_1 \\ & + \frac{1}{2} \rho_1 (D - u_1) \cdot (D - u_1)^2 + p_1 (D - u_1) \end{aligned}$$

此式两边同除以 $\rho_0 D$, 并且运用(5-3-1)式的关系, 得到

$$e_0 + \frac{1}{2} D^2 + \frac{p_0 D}{\rho_0} = e_1 + \frac{1}{2} (D - u_1)^2 + \frac{p_1 (D - u_1)}{\rho_0}$$

移项

$$e_1 - e_0 = \frac{1}{2} [D^2 - (D - u_1)^2] + \frac{p_0 D - p_1 (D - u_1)}{\rho_0}$$

展开并代入(5-3-2)式的关系后, 可以得到

$$e_1 - e_0 = \frac{p_1 u_1}{\rho_0} - \frac{1}{2} u_1^2 \quad (5-3-3)$$

气体状态方程

我们将气体作为理想气体进行处理, 理想气体状态方程为

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (5-3-4)$$

方程(5-3-1)~(5-3-4)四式是冲击波问题的基本方程组, 从这个基本方程组中可以推导出参数之间的相互关系。

由方程(5-3-1)式

$$D = \frac{\rho_1 u_1}{\rho_1 - \rho_0}$$

由方程(5-3-2)式

$$D = \frac{p_1 - p_0}{\rho_0 u_1}$$

按照上面二式相等, 可以得到

$$\rho_0 \rho_1 u_1^2 = (p_1 - p_0)(\rho_1 - \rho_0)$$

两端同除以 $\rho_0 \rho_1$, 且采用比容

$$v_0 = \frac{1}{\rho_0}, \quad v_1 = \frac{1}{\rho_1}$$

代替密度, 上式为

$$u_1^2 = (p_1 - p_0)(v_0 - v_1)$$

从而得到冲击波后质点速度

$$u_1 = \sqrt{(p_1 - p_0)(v_0 - v_1)} \quad (5-3-5)$$

(5-3-5)式表明：冲击波后质点速度等于波前、后气体压力差与比容差乘积的开方。

将(5-3-5)式代入动量守恒方程(5-3-2)式，为

$$D = \frac{p_1 - p_0}{\rho_0 \sqrt{(p_1 - p_0)(v_0 - v_1)}} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1}}$$

得到冲击波速度

$$D = v_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1}} \quad (5-3-6)$$

(5-3-6)式表明：冲击波速度等于波前气体初始状态的比容乘以波前、后气体压力差与比容差比值的开方。

假若冲击波前、后气体状态的比热比不变，即

$$k_0 = k_1 = k$$

按照理想气体内能表达式

$$e_0 = c_v T_0 = \frac{R}{k-1} T_0$$

$$e_1 = c_v T_1 = \frac{R}{k-1} T_1$$

利用状态方程(5-3-4)式，将

$$e_0 = \frac{p_0 v_0}{k-1}, \quad e_1 = \frac{p_1 v_1}{k-1}$$

以及(5-3-5)、(5-3-6)一起代入(5-3-3)式，得

$$\begin{aligned} \frac{p_1 v_1}{k-1} - \frac{p_0 v_0}{k-1} &= -\frac{p_1}{\rho_0} \frac{v_0 - v_1}{v_0} - \frac{1}{2} (p_1 - p_0)(v_0 - v_1) \\ &= -\frac{1}{2} (p_1 + p_0)(v_0 - v_1) \end{aligned}$$

两边同乘以 $\frac{k-1}{p_0 v_0}$, 得

$$\frac{p_1 v_1}{p_0 v_0} - 1 = \frac{k-1}{2} \left(\frac{p_1}{p_0} + 1 \right) \left(1 - \frac{v_1}{v_0} \right)$$

以 $\frac{v_1}{v_0}$ 为未知数进行组合

$$\frac{v_1}{v_0} \left(\frac{k+1}{2} \frac{p_1}{p_0} + \frac{k-1}{2} \right) = \frac{k-1}{2} \frac{p_1}{p_0} + \frac{k+1}{2}$$

移项后, 得到

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{(k-1) \frac{p_1}{p_0} + (k+1)}{(k+1) \frac{p_1}{p_0} + (k-1)}$$

波前、后气体压力比和密度比的关系

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{(k+1) \frac{p_1}{p_0} + (k-1)}{(k-1) \frac{p_1}{p_0} + (k+1)} \quad (5-3-7)$$

或者反过来, 用密度比表示压力比

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{(k+1) \frac{p_1}{p_0} - (k-1)}{(k+1) - (k-1) \frac{p_1}{p_0}} \quad (5-3-8)$$

公式(5-3-7)和(5-3-8)是表示冲击波前、后压力比和密度比的关系式, 称为冲击绝热方程。

冲击绝热方程和等熵方程不同, 前者表示在冲击压缩过程中压力和密度的关系, 后者表示在等熵流动中压力和密度的关系, 二者皆画在图5-3-4上。

从图 5-3-4 可以看出, 在密度变化相同的条件下, 冲击:

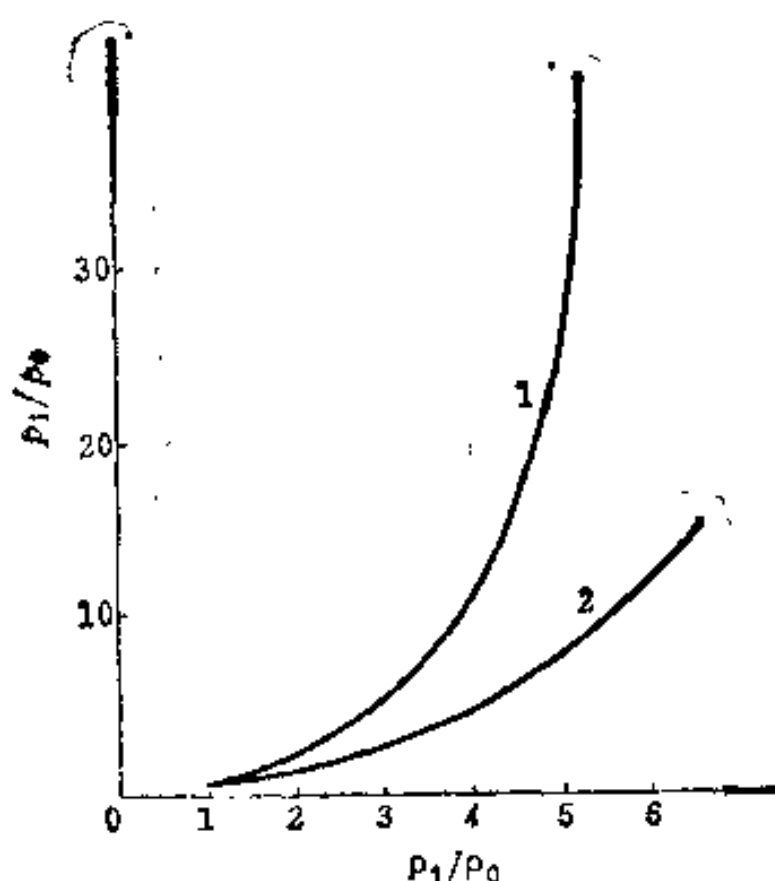


图5-3-4 压力比和密度比的关系曲线

1—冲击绝热线；2—等熵线。

压缩过程压力的增加量比等熵过程压力的增加量要大得多，并且在冲击压缩过程中，密度的增加量有限制，当 $\frac{p_1}{p_0} \rightarrow \infty$

时，对应渐近线 $\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{k+1}{k-1}$ 。

运用状态方程 (5-3-4)，还可以得到温度比与压力比、密度比的关系

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{p_1}{p_0} \frac{\rho_0}{\rho_1} \quad (5-3-9)$$

音速比为

$$\frac{c_1}{c_0} = \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \quad (5-3-10)$$

表 5-3-1 给出了在初始状态 $p_0=10^5 \text{Pa}$ 、 $\rho_0=1.225 \text{kg/m}^3$ 、 $T_0=288 \text{K}$ 的静止空气中，通过不同强度的冲击波后，

表5-3-1 空气冲击波波阵面参数

$\Delta p = p_1 - p_0$ (Pa $\times 10^5$)	ρ_1 (kg/m ³)	T_1 (K)	c_1 (m/s)	u_1 (m/s)	D (m/s)
0	1.225	288	340	0	340
0.05	1.264	293	343	11.5	347
0.10	1.313	296	345	22.6	354
0.20	1.392	303	349	43.6	367
0.30	1.470	310	353	63.2	380
0.40	1.548	316	356	82.0	392
0.50	1.617	323	360	99.2	404
0.60	1.695	329	364	115	416
0.70	1.764	335	367	131	428
0.80	1.842	341	371	146	439
0.90	1.901	347	374	160	449
1.00	1.970	353	377	174	460
1.5	2.283	380	391	235	509
2.0	2.558	405	404	287	555
2.5	2.803	431	417	336	596
3.0	3.028	455	428	378	635
3.5	3.224	480	439	417	672
4.0	3.420	503	450	453	707
4.5	3.587	527	461	486	740
5.0	3.734	552	471	518	772
6.0	3.998	600	491	576	832
7.0	4.234	649	511	630	888
8.0	4.439	697	530	680	940
9.0	4.626	742	546	727	990
10.0	4.792	787	562	772	1040
20	5.733	1250	740	1120	1430
30	6.164	1720	832	1380	1730
40	6.419	2180	930	1610	1990
50	6.586	2650	1030	1800	2220
100	7.899	4160	1293	2580	3110

冲击波速度和波后气体状态参数的变化。

顺便证明一下冲击波过后熵值是增加的。

按照熵值公式，冲击波波前气体状态的熵值为

$$s_0 = R \ln \frac{T_0^{\frac{k}{k-1}}}{p_0} + s_*$$

冲击波波后气体状态的熵值为

$$s_1 = R \ln \frac{T_1^{\frac{k}{k-1}}}{p_1} + s_*$$

式中 s_* 表示量度熵值的起始值。

波后气体状态的熵值减去波前气体状态的熵值

$$s_1 - s_0 = R \ln \left[\left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{k}{k-1}} \frac{p_0}{p_1} \right]$$

代入 (5-3-9) 式，得到

$$s_1 - s_0 = \frac{R}{k-1} \ln \left[\frac{p_1}{p_0} \left(\frac{\rho_0}{\rho_1} \right)^k \right] \quad (5-3-11)$$

对于一定初始状态 (p_0, ρ_0) ，当以不同的过程变化到同样的密度 ρ_1 时，对应于冲击压缩过程的压强为 $p_{1\text{冲}}$ ，对应于等熵过程的压强是 $p_{1\text{等熵}}$ ，按照图 5-3-4，具有

$$p_{1\text{冲}} > p_{1\text{等熵}}$$

在等熵过程中，由于

$$\frac{p_{1\text{等熵}}}{p_0} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^k$$

即

$$\ln \frac{p_{1\text{等熵}}}{p_0} \left(\frac{\rho_0}{\rho_1} \right)^k = \ln 1 = 0$$

所以

$$s_1 = s_0$$

在冲击压缩过程中, 由于

$$p_{1*} > p_{1*等熵}$$

$$\frac{p_{1*}}{p_0} \left(\frac{\rho_0}{\rho_1} \right)^k > 1$$

则

$$\ln \frac{p_{1*}}{p_0} \left(\frac{\rho_0}{\rho_1} \right)^k > 0$$

所以

$$s_1 > s_0$$

从而证明了冲击波过后, 气体状态的熵值是增加的。

〔例5-4〕 在初始状态为常温、常压的空气中, 测得冲击波波后压力 $p_1 = 5 \times 10^5 \text{ Pa}$, 试计算 D 、 ρ_1 、 T_1 、 c_1 和 u_1 。

解 已知常温常压下空气参数

$$p_0 = 10^5 \text{ Pa} \quad \rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

$$T_0 = 288 \text{ K} \quad k = 1.4$$

冲击波前、后的气体状态为

$p_0 = 10^5 \text{ Pa}$	冲击波	$p_1 = 5 \times 10^5 \text{ Pa}$
$\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$	$\longrightarrow$	$\rho_1 = ?$
$T_0 = 288 \text{ K}$	$D = ?$	$T_1 = ?$

按照公式 (5-3-7) 式

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(k+1) \frac{p_1}{p_0} + (k-1)}{(k-1) \frac{\rho_1}{\rho_0} + (k+1)}$$

$$= \frac{(1.4+1) \cdot \frac{5 \times 10^5}{10^5} + (1.4-1)}{(1.4-1) \cdot \frac{5 \times 10^5}{10^5} + (1.4+1)} = 2.82$$

$$\rho_1 = 2.82\rho_0 = 3.455(\text{kg/m}^3)$$

按照公式 (5-3-9) 式

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{p_1}{p_0} \frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{5 \times 10^5}{10^5} \times \frac{1.225}{3.455} = 1.774$$

$$T_1 = 1.775T_0 = 511(\text{K})$$

按照公式 (5-3-10) 式

$$\frac{c_1}{c_0} = \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} = \sqrt{1.774} = 1.332$$

$$c_1 = 1.332c_0 = 453(\text{m/s})$$

按照公式 (5-3-5)

$$\begin{aligned} u_1 &= \sqrt{(p_1 - p_0)(v_0 - v_1)} \\ &= \sqrt{(5 \times 10^5 - 1 \times 10^5) \times \left(\frac{1}{1.225} - \frac{1}{3.455} \right)} \\ &= 459(\text{m/s}) \end{aligned}$$

按照公式 (5-3-6)

$$\begin{aligned} D &= v_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1}} \\ &= \frac{1}{1.225} \sqrt{\frac{5 \times 10^5 - 1 \times 10^5}{\frac{1}{1.225} - \frac{1}{3.455}}} = 711(\text{m/s}) \end{aligned}$$

三、常用的冲击波计算公式

1. 以冲击波速度为参量, 表达波后气体参数

由方程 (5-3-1) 式

$$u_1 = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_1} D = \left(1 - \frac{v_1}{v_0} \right) D$$

由方程 (5-3-2) 式

$$u_1 = \frac{p_1 - p_0}{\rho_0 D}$$

按照上面二式相等, 可得

$$p_1 - p_0 = \rho_0 D^2 \left(1 - \frac{v_1}{v_0} \right) \quad (5-3-12)$$

代入 (5-3-7) 式, 进行化简

$$p_1 - p_0 = \rho_0 D^2 \left[1 - \frac{(k-1) \frac{p_1}{\rho_0} + (k+1) \frac{p_0}{\rho_0}}{(k+1) \frac{p_1}{\rho_0} + (k-1) \frac{p_0}{\rho_0}} \right]$$

$$= \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2 \frac{p_1 - p_0}{p_1 + \frac{k-1}{k+1} p_0}$$

同除以 $p_1 - p_0$ 后, 整理为

$$p_1 - p_0 = \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2 \left(1 - \frac{k p_0}{\rho_0 D^2} \right)$$

代入 $k \frac{p_0}{\rho_0} = c_0^2$, 得到波前、后气体压力差

$$p_1 - p_0 = \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2 \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right) \quad (5-3-13)$$

将 (5-3-13) 代入 (5-3-12) 式, 得到波前、后气体密度差

$$\frac{p_1 - p_0}{\rho_1} = \frac{2}{k+1} \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right) \quad (5-3-14)$$

将 (5-3-13) 代入 (5-3-2) 式, 得到波后气体流动速度

$$u_1 = \frac{2}{k+1} D \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right) \quad (5-3-15)$$

按照公式 (5-3-13)~(5-3-15), 可以通过冲击波传播速度和波前气体状态计算出波后气体压力、密度和气体流动速度。

对于强冲击波, 即当 $p_1 \gg p_0$ 、 $\frac{c_0^2}{D^2} \ll 1$ 时, 上述三式可以简化为

$$p_1 = \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2 \quad (5-3-16)$$

$$\rho_1 = \frac{k+1}{k-1} \rho_0 \quad (5-3-17)$$

$$u_1 = \frac{2}{k+1} D \quad (5-3-18)$$

此外, 对于波后气体的温度和音速, 仍然按照下面二式计算

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{p_1}{p_0} \frac{\rho_0}{\rho_1}$$

$$\frac{c_1}{c_0} = \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}$$

〔例5-5〕 测得常温常压下空气冲击波速度为 680m/s, 试计算冲击波过后空气的参数。

解

$p_0 = 10^5 \text{Pa}$ $\rho_0 = 1.225 \text{kg/m}^3$ $c_0 = 340 \text{m/s}$	冲击波 $D = 680 \text{m/s}$	$p_1 = ?$ $\rho_1 = ?$ $u_1 = ?$

按照公式 (5-3-13)

$$\begin{aligned}
 p_1 &= p_0 + \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2 \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right) \\
 &= 10^5 + \frac{2}{1.4+1} \times 1.225 \times 680^2 \times \left(1 - \frac{340^2}{680^2} \right) \\
 &= 4.54 \times 10^5 (\text{Pa})
 \end{aligned}$$

按照公式 (5-3-14)

$$\begin{aligned}
 1 - \frac{\rho_0}{\rho_1} &= \frac{2}{k+1} \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right) = \frac{2}{1.4+1} \left(1 - \frac{340^2}{680^2} \right) = 0.625 \\
 \rho_1 &= \frac{\rho_0}{1 - 0.625} = 3.267 (\text{kg/m}^3)
 \end{aligned}$$

按照公式 (5-3-15)

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{2}{k+1} D \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right) = \frac{2}{1.4+1} \times 680 \times \left(1 - \frac{340^2}{680^2} \right) \\
 &= 425 (\text{m/s})
 \end{aligned}$$

按照公式 (5-3-9) 和 (5-3-10)

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \frac{\rho_0}{p_0} T_0 = \frac{4.54 \times 10^5}{10^5} \\
 &\quad \times \frac{1.225}{3.267} \times 288 = 490 (\text{K})
 \end{aligned}$$

$$c_1 = c_0 \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} = 340 \times \sqrt{\frac{490}{288}} = 443 (\text{m/s})$$

【例5-6】 某高山地区气温为 -5°C ，气压为 $0.85 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，测得 $D = 1500 \text{ m/s}$ ，试计算波后空气参数。

解 波前空气

$$p_0 = 0.8 \times 10^5 \text{ Pa}, \quad T_0 = 268 \text{ K}$$

按理想气体状态方程

$$\rho_0 = \frac{p_0}{RT_0} = \frac{0.85 \times 10^5}{283.45 \times 268} = 1.119 (\text{kg/m}^3)$$

按照音速公式

$$c_0 = 20.05 \sqrt{T_0} = 328 (\text{m/s})$$

由于 $\frac{c_0^2}{D^2} = \frac{328^2}{1500^2} = 0.048 \ll 1$, 可以按照强冲击波公式计算波后空气参数。

$$p_1 = \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2 = \frac{2}{1.4+1} \times 1.119 \times 1500^2 = 21 \times 10^5 (\text{Pa})$$

$$\rho_1 = \frac{k+1}{k-1} \rho_0 = \frac{1.4+1}{1.4-1} \times 1.119 = 6.714 (\text{kg/m}^3)$$

$$u_1 = \frac{2}{k+1} D = \frac{2}{1.4+1} \times 1500 = 1250 (\text{m/s})$$

$$T_1 = \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \frac{\rho_0}{p_0} \cdot T_0 = \frac{21 \times 10^5}{0.85 \times 10^5} \times \frac{1.119}{6.714} \times 268 = 1104 (\text{K})$$

$$c_1 = c_0 \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} = 328 \times \sqrt{\frac{1104}{268}} = 666 (\text{m/s})$$

2. 以冲击波超压为参量, 表达冲击波传播速度和波后气体参数。

冲击波超压是冲击波波后压强减去波前压强的差值

$$\Delta p = p_1 - p_0$$

由于在工程中对冲击波的测定, 一般是测定冲击波超压值, 因而这一套公式在工程计算上比较方便。

变换公式 (5-3-13)

$$\Delta p = \frac{2}{k+1} \rho_0 (D^2 - c_0^2)$$

$$D^2 = c_0^2 + \frac{k+1}{2\rho_0} \Delta p$$

得到冲击波传播速度

$$D = c_0 \sqrt{1 + \frac{k+1}{2\rho_0 c_0^2} \Delta p} \quad (5-3-19)$$

运用 (5-3-19) 式, 变换公式 (5-3-14)

$$\begin{aligned} 1 - \frac{\rho_0}{\rho_1} &= \frac{2}{k+1} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{k+1}{2\rho_0 c_0^2} \Delta p} \right) \\ &= \frac{2\Delta p}{2\rho_0 c_0^2 + (k+1)\Delta p} \end{aligned}$$

得到波后气体密度

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{2\rho_0 c_0^2 + (k+1)\Delta p}{2\rho_0 c_0^2 + (k-1)\Delta p} \quad (5-3-20)$$

运用 (5-3-19) 式, 变换公式 (5-3-15)

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{2}{k+1} \cdot \frac{D^2 - c_0^2}{D} \\ &= \frac{2}{k+1} \cdot \frac{\frac{k+1}{2\rho_0} \Delta p}{c_0 \sqrt{1 + \frac{k+1}{2\rho_0 c_0^2} \Delta p}} \end{aligned}$$

得到波后气体流动速度

$$u_1 = \frac{\Delta p}{\rho_0 c_0 \sqrt{1 + \frac{k+1}{2\rho_0 c_0^2} \Delta p}} \quad (5-3-21)$$

按照公式 (5-3-9)~(5-3-21), 可以通过冲击波超压和波前气体状态计算冲击波速度、波后气体密度和气体流动速度。

为了工程上应用方便, 假定冲击波波前气体是标准大气状态: $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$, $\rho_0 = 1.225 \text{kg/m}^3$, $T_0 = 288 \text{K}$,

$c_0 = 340 \text{ m/s}$, 取 $k = 1.4$, 将之代入 (5-3-19) ~ (5-3-21) 三式, 得到公式

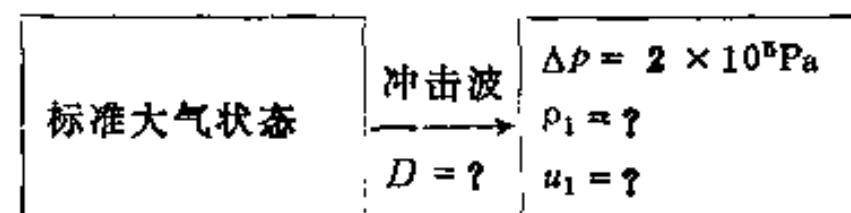
$$D = 340 \sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \Delta p} \quad (5-3-22)$$

$$\rho_1 = 1.225 \frac{7.08 \times 10^5 + 6 \Delta p}{7.08 \times 10^5 + \Delta p} \quad (5-3-23)$$

$$u_1 = \frac{2.4 \times 10^{-3} \Delta p}{\sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \Delta p}} \quad (5-3-24)$$

〔例5-7〕 在标准大气状态下, 测得空气冲击波超压 $\Delta p = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$, 计算波后气体参数。

解 波前后气体状态



按照公式 (5-3-22)

$$\begin{aligned} D &= 340 \sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \Delta p} \\ &= 340 \sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \times 2 \times 10^5} = 558 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

按照公式 (5-3-23)

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 1.225 \frac{7.08 \times 10^5 + 6 \Delta p}{7.08 \times 10^5 + \Delta p} \\ &= 1.225 \frac{7.08 \times 10^5 + 6 \times 2 \times 10^5}{7.08 \times 10^5 + 2 \times 10^5} \\ &= 2.574 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

按照公式 (5-3-24)

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{2.4 \times 10^{-3} \Delta p}{\sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \Delta p}} = \frac{2.4 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^5}{\sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \times 2 \times 10^5}} \\ &= 292 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

按照 (5-3-9) 和 (5-3-10) 式

$$T_1 = \frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_1} T_0 = \frac{2 \times 10^5 + 10^5}{10^5} \times \frac{1.225}{2.574} \times 288 = 411(\text{K})$$

$$c_1 = c_0 \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} = 340 \times \sqrt{\frac{411}{288}} = 406(\text{m/s})$$

四、典 例

为了尽量熟悉波的性质，专门讨论一个冲击波和膨胀波共同存在的例子。

假若在一个长管道中，一边是高压气体，一边是低压气体，中间用膜隔开，当膜突然破裂时，气流就会迅速从高压部分向低压部分流动，与此同时，从原隔膜处向低压方向产生一道冲击波，向高压方向产生一系列膨胀波。如图 5-3-5 所示，在管道传播的波和界面将气体分成四个稳定区域，(0) 区是原来静止的低压区，(1) 区是向右传播的冲击波后的区域，(3) 区是原来静止的高压区，(2) 区是向左传播的膨胀波区后的静止区域，(1) 区和 (2) 区之间的虚线表示冲击波后和膨胀波后二区域间的气流分界面，分界面满足两侧气体压强相等和速度相等的条件

$$p_1 = p_2$$

$$u_1 = u_2$$

假若已知管道中充填气体是空气，低压区气体状态参数 $p_0 = 10^5 \text{Pa}$ ， $\rho_0 = 1.225 \text{kg/m}^3$ ， $T_0 = 288 \text{K}$ ；高压区气体状态参数 $p_3 = 20 \times 10^5 \text{Pa}$ ， $T_3 = 288 \text{K}$ 。试计算隔膜破裂后所形成的各稳定区气流参数，以及冲击波速度、膨胀波区波头和波尾的速度。

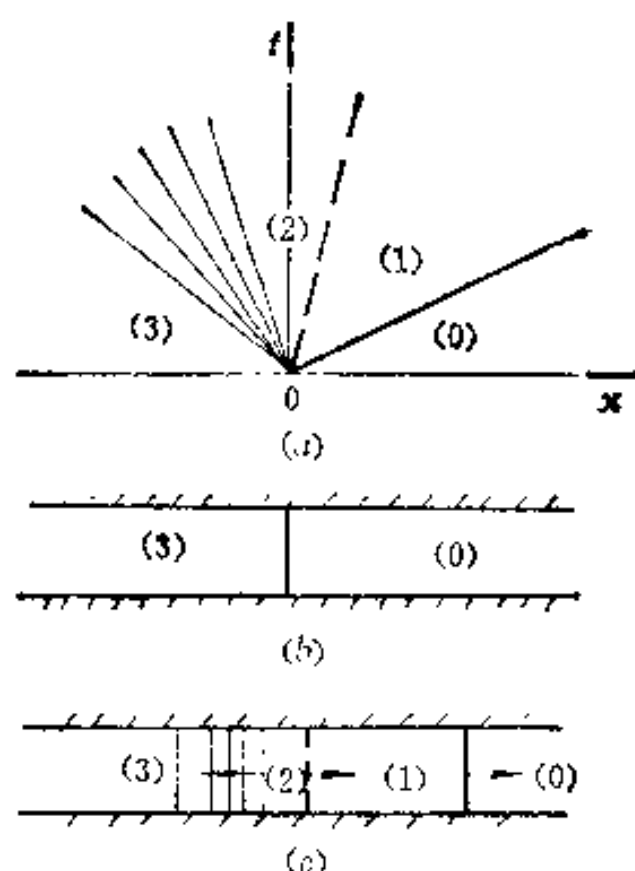


图5-3-5 高、低压段流动中所形成的波

a—波传播的时间-路程曲线和所形成的区域；

b—膜破裂前的管道；c—膜破裂后的管道。

对于冲击波部分，已知（0）区的初始状态，则（1）区气流状态可以用冲击波关系联系起来。即

$\begin{aligned} p_0 &\approx 10^5 \text{ Pa} \\ \rho_0 &= 1.225 \text{ kg/m}^3 \\ c_0 &= 340 \text{ m/s} \end{aligned}$	冲击波 $\longrightarrow$ $D = ?$	$\begin{aligned} p_1 &= ? \\ \rho_1 &= ? \\ u_1 &= ? \end{aligned}$

由于冲击波速度未知，波后参数也都是未知的，因而无法计算。

对于膨胀波部分，已知（3）区初始状态，且按气体状态方程还可以求出 $\rho_s = 24.5 \text{ kg/m}^3$ ，则（2）区气流状态可以用膨胀波关系联系起来。但由于膨胀波区后（2）区参数全部未知，因而也无法计算。

$\begin{aligned} p_3 &= 20 \times 10^5 \text{ Pa} \\ \rho_3 &= 24.5 \text{ kg/m}^3 \\ c_3 &= 340 \text{ m/s} \\ u_3 &= 0 \end{aligned}$	膨胀波区	$\begin{aligned} p_2 &=? \\ \rho_2 &=? \\ c_2 &=? \\ u_2 &=? \end{aligned}$

当注意到 (1) 区和 (2) 区之间由分界面隔开, 两区参数存在压力相等、速度相等的条件, 即

$\begin{aligned} p_1 &=? \\ u_1 &=? \end{aligned}$	分界面 ————→ $p_1 = p_2$ $u_1 = u_2$	$\begin{aligned} p_2 &=? \\ u_2 &=? \end{aligned}$

从而可以将由 (0) 区到 (1) 区的冲击波关系和由 (3) 区到 (2) 区的膨胀波关系联系起来。

按照冲击波公式 (5-3-13) 和 (5-3-15)

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 + \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2 \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right) \\ &= 10^5 + \frac{2}{1.4+1} \times 1.225 D^2 \left(1 - \frac{340^2}{D^2} \right) \\ &= 1.021 D^2 - 0.180 \times 10^5 \\ u_1 &= \frac{2}{k+1} D \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right) = \frac{2}{1.4+1} \left(D - \frac{340^2}{D} \right) \\ &= 0.833 D - \frac{9.63 \times 10^4}{D} \end{aligned}$$

按照左传膨胀波公式 (5-2-20)

$$u_2 + \frac{2}{k-1} c_2 = u_3 + \frac{2}{k-1} c_3 = 0 + \frac{2}{1.4-1} \times 340 = 1700$$

则

$$u_2 = 1700 - \frac{2}{k-1} c_2 = 1700 - 5c_2$$

按照膨胀波前、后气体状态的等熵关系和温度与音速的关系

$$\left(\frac{p_2}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{c_2}{c_3}\right)^2$$

则

$$\begin{aligned} p_2 &= p_3 \left(\frac{c_2}{c_3}\right)^{\frac{2k}{k-1}} = 20 \times 10^5 \left(\frac{c_2}{340}\right)^{\frac{2 \times 1.4}{1.4-1}} \\ &= 3.81 \times 10^{-12} c_2^7 \end{aligned}$$

由分界面条件得到两个方程

$$1.021D^2 - 0.180 \times 10^5 = 3.81 \times 10^{-12} c_2^7$$

$$0.833D - \frac{9.63 \times 10^4}{D} = 1700 - 5c_2$$

整理成

$$D^2 = 3.73 \times 10^{-12} c_2^7 + 1.76 \times 10^4 \quad (5-3-25)$$

$$D^2 - (2041 - 6c_2)D - 11.58 \times 10^4 = 0 \quad (5-3-26)$$

两个方程中含有两个未知数 D 、 c_2 ，因而可以连立解出。

但是由于方程幂次太高，难于求解，因而采用图解法。即假定一系列 c_2 ，按照方程 (5-3-25) 计算出一系列对应的 D ，在坐标纸上绘出一条 c_2-D 曲线；对应假定的 c_2 ，同时按照方程 (5-3-26) 计算出一系列对应的 D ，在坐标纸上再绘出一条 c_2-D 曲线。此二曲线交点所对应的坐标，既满足方程 (5-3-25)，又满足方程 (5-3-26)，故为所求。

设 $c_2 = 260 \text{ m/s}$ ，按照方程 (5-3-25)

$$\begin{aligned} D^2 &= 3.73 \times 10^{-12} \times 260^7 + 1.76 \times 10^4 \\ &= 31.72 \times 10^4 \end{aligned}$$

得 $D = 563 (\text{m/s})$

按照方程 (5-3-26)

$$D^2 - (2401 - 6 \times 260)D - 11.56 \times 10^4 = 0$$

$$D^2 - 841D - 11.56 \times 10^4 = 0$$

$$\text{得} \quad D = 657 (\text{m/s})$$

再设 $c_2 = 270$ 、 280 m/s ，分别进行同样计算。列表如下

假 设 c_2		260	270	280
计算 D	按 (5-3-25)	563	638	721
	按 (5-3-26)	657	610	563

绘出此二条曲线 (见图 5-3-6)，曲线交点

$$c_2 = 268 \text{ m/s}$$

$$D = 620 \text{ m/s}$$

为所求。

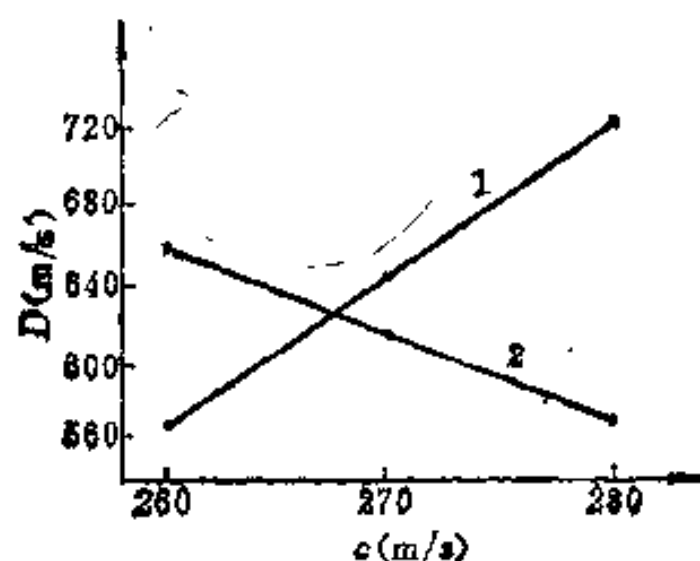


图5-3-6 c_2 - D 曲线

1—按 (5-3-25) 式计算；2—按 (5-3-26) 式计算。

将 D 代入冲击波公式，或将 c_2 代入膨胀波公式，计算

$$\begin{aligned} p_1 = p_2 &= 1.021 \times 620^2 - 0.18 \times 10^6 \\ &= 4.10 \times 10^5 (\text{Pa}) \end{aligned}$$

$$u_1 = u_2 = 0.833 \times 620 - \frac{9.63 \times 10^4}{620} = 361 (\text{m/s})$$

按照冲击波关系,求得(1)区参数

$$\rho_1 = \frac{\frac{k+1}{k-1} \rho_0}{1 + \frac{2}{k-1} \frac{c_0^2}{J^2}} = \frac{\frac{1.4+1}{1.4-1} \times 1.225}{1 + \frac{2}{1.4-1} \times \frac{340^2}{620^2}}$$

$$= 2.936 (\text{kg/m}^3)$$

$$T_1 = \frac{p_1}{p_0} \frac{\rho_0}{\rho_1} T_0 = \frac{4.1 \times 10^5}{10^5} \times \frac{1.225}{2.936} \times 288 = 493 (\text{K})$$

以及

$$c_1 = 20.05 \sqrt{T_1} = 20.05 \times \sqrt{493} = 445 (\text{m/s})$$

按照等熵关系,求得(2)区参数

$$\rho_2 = \rho_3 \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{1}{k}} = 24.5 \times \left(\frac{4.1 \times 10^5}{20 \times 10^5} \right)^{\frac{1}{1.4}}$$

$$= 7.899 (\text{kg/m}^3)$$

$$T_2 = T_3 \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 288 \times \left(\frac{4.1 \times 10^5}{20 \times 10^5} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$= 183 (\text{K})$$

膨胀波区连接(3)区和(2)区,由无数道波组成,第一道波取(3)区气流参数,最后一道波取(2)区气流参数。即

$$u_r = u_3 - c_2 = -340 (\text{m/s})$$

$$u_N = u_2 - c_2 = 93 (\text{m/s})$$

将所计算结果列入表 5-3-2 和表 5-3-3。

表5-3-2 波 系

波 系	左传膨胀波区		右传冲击波
	波头	波尾	
速 度 (m/s)	340	93	620
方 向	向左	向右	向右

表5-3-3 各 区 参 数

参 数	(0)区	(1)区	(2)区	(3)区
$p (Pa \times 10^5)$	1	4.1	4.1	20
$\rho (kg/m^3)$	1.225	2.936	7.899	24.5
$T (K)$	288	493	188	288
$c (m/s)$	340	445	268	340
$u (m/s)$	0	361	361	0

§ 5-4 波的相互作用

冲击波在传播过程中,经常会发生两个冲击波相遇,冲击波在壁面上反射,以及冲击波从容器中向外界扩散的情况。为了熟练掌握冲击波,以及实际运用的需要,讨论几种典型冲击波相互作用情况,并以实例阐述具体计算的方法。

一、两个迎面冲击波相遇

假若在直管中有两个相对运动的冲击波,如图 5-4-1 所示,一个以速度 D_1 向右传播,另一个以速度 D_2 向左传播,当两个冲击波相遇之后,由于 (1) 区气流向右流动, (2) 处气流向左流动,因而两边气流在相遇点处发生堆积,使气体密度升高、压力升高,堆积起的高压气体必定再向两边流动,而形成两道新的冲击波。这两道冲击波之间的气流符合压强

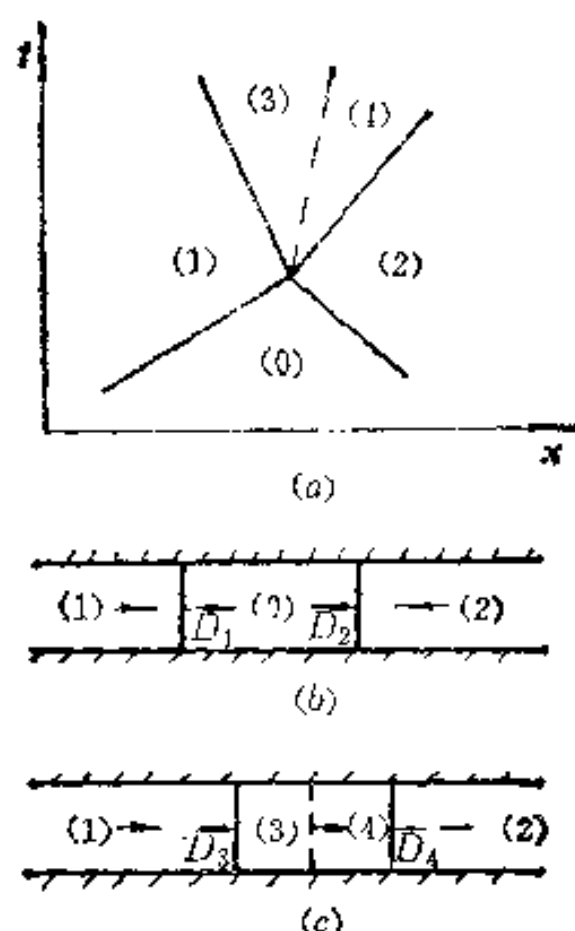


图5-4-1 迎面冲击波相遇

a —冲击波运动的时间-路程线； b —在直管中，迎面冲击波相遇之前的情况； c —在直管中，迎面冲击波相遇之后的情况。

相等、速度相等的条件，由于冲击波前、后气体是不等熵的，虽然新产生的两道冲击波之间的气流压强相等、速度相等，但是气体的温度、密度不等，因而在(3)区和(4)区之间存在着一个分界面。

设已知两边冲击波皆未到达前，(0)区静止气体的初始状态为： $p_0 \approx 10^5 \text{ Pa}$ ， $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ， $T_0 = 288 \text{ K}$ 。对面传播的初始冲击波 $D_1 = 800 \text{ m/s}$ ， $D_2 = 500 \text{ m/s}$ ，试计算各区气流参数。

首先计算初始冲击波后的(1)区和(2)区。对于(1)区和(2)区可以通过冲击波关系与(0)区连系起来

$p_1 = ?$	冲击波	$p_0 = 10^5 \text{ Pa}$	冲击波	$p_2 = ?$
$\rho_1 = ?$		$\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$		$\rho_2 = ?$
$u_1 = ?$	$U_1 = 800 \text{ m/s}$	$c_0 = 340 \text{ m/s}$	$D_2 = 500 \text{ m/s}$	$u_2 = ?$

求冲击波公式

$$\begin{aligned}
 p_1 &= p_0 + \frac{2}{k+1} \rho_0 D_1^2 \left(1 - \frac{c_0^2}{D_1^2} \right) \\
 &= 10^5 + \frac{2}{1.4+1} \times 1.225 \times 800^2 \times \left(1 - \frac{340^2}{800^2} \right) \\
 &= 6.35 \times 10^5 (\text{Pa})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_1 &= \frac{\frac{k+1}{k-1} \rho_0}{1 + \frac{2}{k-1} \frac{c_0^2}{D_1^2}} = \frac{\frac{1.4+1}{1.4-1} \times 1.225}{1 + \frac{2}{1.4-1} \times \frac{340^2}{800^2}} \\
 &= 3.862 (\text{kg/m}^3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{2}{k+1} D_1 \left(1 - \frac{c_0^2}{D_1^2} \right) \\
 &= \frac{2}{1.4+1} \times 800 \times \left(1 - \frac{340^2}{800^2} \right) = 546 (\text{m/s})
 \end{aligned}$$

以及

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{\rho_0}{\rho_1} T_0 = \frac{6.35 \times 10^5}{10^5} \times \frac{1.225}{3.862} \times 288 \\
 &= 580 (\text{K})
 \end{aligned}$$

$$c_1 = 20.05 \sqrt{T_1} = 483 (\text{m/s})$$

同样可以计算出

$$p_2 = 2.37 \times 10^5 (\text{Pa})$$

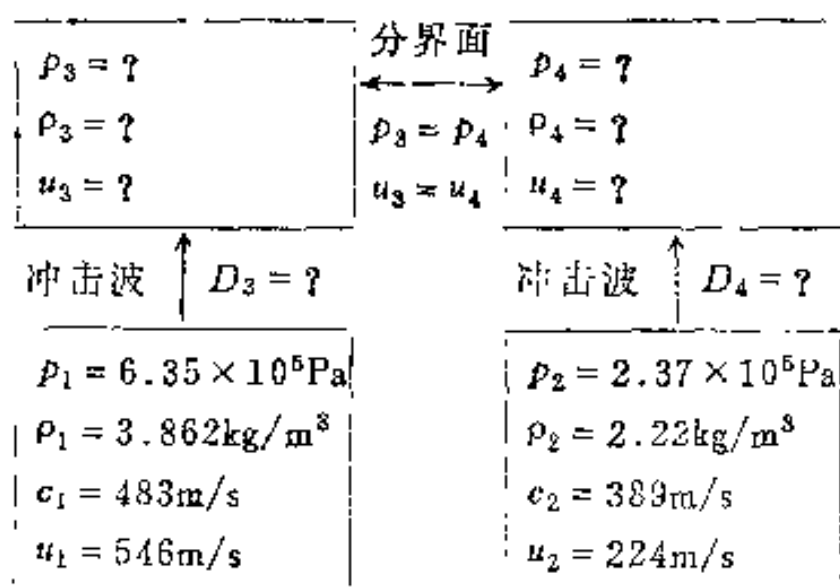
$$\rho_2 = 2.22(\text{kg/m}^3)$$

$$u_2 = 224(\text{m/s})$$

$$T_2 = 377(\text{K})$$

$$c_2 = 389(\text{m/s})$$

再计算新产生冲击波后的(3)区和(4)区。对于(3)区可以通过冲击波关系与(1)区联系起来,对于(4)区可以通过冲击波关系与(2)区联系起来,而(3)区和(4)区之间又可以通过分界面条件联系起来,即



分析冲击波 D_3 前、后的气体状态,如图5-4-2a所示.向左传播的冲击波前面的气体已经具有向右的速度 u_1 ,这与我们原来推导冲击波公式时采用的波前是静止气体的条件不相同,为了采用原来的冲击波公式,必须把冲击波前面的气体

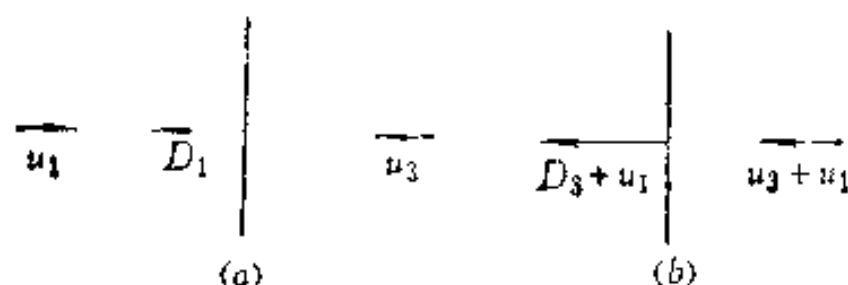


图5-1-2 冲击波 D_3 前、后气体的流动

a—真实流场; b—波前为静止状态的流场。

转换为静止的状态。

如图 5-4-2b 所示, 在整个流场中迭加一个速度为 u_1 的向左流动, 这样冲击波波前气体转换成为了静止状态, 冲击波相对于波前静止气体以速度 $D_3 + u_1$ 进行传播, 波后 (3) 区气体以速度 $u_3 + u_1$ 跟随冲击波流动。

按照冲击波公式 (5-3-13) 和 (5-3-15) 计算 (3) 区的压力和气体流动速度

$$\begin{aligned} p_3 &= p_1 + \frac{2}{k+1} \rho_1 (D_3 + u_1)^2 \left[1 - \frac{c_1^2}{(D_3 + u_1)^2} \right] \\ &= 6.35 \times 10^5 + \frac{2}{1.4+1} \times 3.862 \times [(D_3 + u_1)^2 - 483^2] \\ &= 3.218(D_3 + u_1)^2 - 1.158 \times 10^6 \end{aligned} \quad (5-4-1)$$

$$\begin{aligned} u_3 + u_1 &= \frac{2}{k+1} (D_3 + u_1) \left[1 - \frac{c_1^2}{(D_3 + u_1)^2} \right] \\ &= \frac{2}{1.4+1} (D_3 + u_1) \left[1 - \frac{483^2}{(D_3 + u_1)^2} \right] \\ &= 0.833 (D_3 + u_1) - \frac{1.944 \times 10^5}{D_3 + u_1} \end{aligned}$$

即

$$u_3 = 0.833 (D_3 + u_1) - \frac{1.944 \times 10^5}{D_3 + u_1} - 546 \quad (5-4-2)$$

分析冲击波 D_4 前、后的气体状态, 如图 5-4-3 a 所示。向右传播的冲击波前面的气体已具有向左的速度 u_2 , 为了转

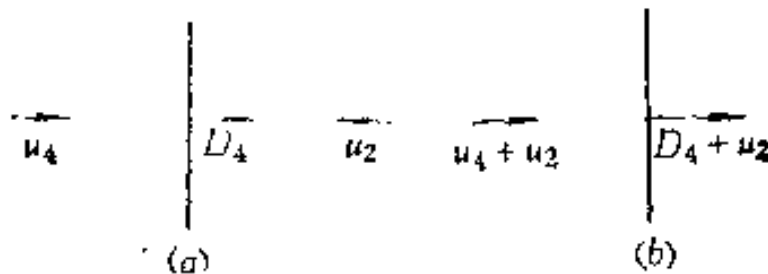


图5-4-3 冲击波 D_4 前、后气体的流动

a—真实流场; b—波前为静止状态的流场。

换波前气体成为静止状态, 如图 5-4-3 *b* 所示。在整个流动中叠加一个速度为 u_2 的向右流动, 从而使冲击波相对于波前气体以速度 $D_4 + u_2$ 进行传播, 波后气体以速度 $u_4 + u_2$ 跟随波运动。

按照冲击波公式 (5-3-13) 和 (5-3-15) 计算 (4) 区的压力和气体流动速度

$$\begin{aligned} p_4 &= p_2 + \frac{2}{k+1} \rho_2 (D_4 + u_2)^2 \left[1 - \frac{c_2^2}{(D_4 + u_2)^2} \right] \\ &= 2.37 \times 10^5 + \frac{2}{1.4+1} \times 2.22 \times [(D_4 + u_2)^2 - 389^2] \\ &= 1.85(D_4 + u_2)^2 - 0.429 \times 10^5 \end{aligned} \quad (5-4-3)$$

$$\begin{aligned} u_4 + u_2 &= \frac{2}{k+1} (D_4 + u_2) \left[1 - \frac{c_2^2}{(D_4 + u_2)^2} \right] \\ &= \frac{2}{1.4+1} (D_4 + u_2) \left[1 - \frac{389^2}{(D_4 + u_2)^2} \right] \\ &= 0.833(D_4 + u_2) - \frac{1.261 \times 10^5}{(D_4 + u_2)} \end{aligned}$$

即

$$u_4 = 0.833(D_4 + u_2) - \frac{1.286 \times 10^5}{D_4 + u_2} - 224 \quad (5-4-4)$$

按照分界面两侧气体压强相等、速度相等的条件, 可以将 (5-4-1) 和 (5-4-3) 式、(5-4-2) 和 (5-4-4) 式联系起来, 但是注意到在图 5-4-2 中规定了 u_3 的方向指向左, 在图 5-4-3 中规定了 u_4 的方向指向右, 由于两图中规定的方向相反, 因而在运用速度相等的条件时应当冠以负号, 得到

$$\begin{aligned} 3.218(D_3 + u_1)^2 - 1.158 \times 10^5 &= 1.85(D_4 + u_2)^2 \\ &\quad - 0.429 \times 10^5 \end{aligned}$$

$$0.833(D_3 + u_1) - \frac{1.944 \times 10^5}{D_3 + u_1} - 546$$

$$= - \left[0.833(D_4 + u_2) - \frac{1.286 \times 10^5}{D_4 + u_2} - 224 \right]$$

整理为

$$(D_3 + u_1)^2 = 0.575(D_4 + u_2)^2 + 0.227 \times 10^5 \quad (5-4-5)$$

$$(D_3 + u_1)^2 + \left[(D_4 + u_2) - \frac{1.544 \times 10^5}{D_4 + u_2} - 924 \right] (D_3 + u_1)$$

$$- 2.334 \times 10^5 = 0 \quad (5-4-6)$$

两个方程、两个未知数，可以连立进行求解，从而确定两道新产生冲击波的传播速度 D_3 和 D_4 。

为了计算方便，现仍采用图解法，即假定一系列 $(D_4 + u_2)$ ，按照(5-4-5)式计算出一系列的 $(D_3 + u_1)$ ，在坐标纸上绘出一条 $(D_4 + u_2) \sim (D_3 + u_1)$ 曲线，对于假定的一系列 $(D_4 + u_2)$ ，同样按照(5-4-6)式计算出一系列的 $(D_3 + u_1)$ ，在坐标纸上再绘出一条 $(D_4 + u_2) \sim (D_3 + u_1)$ 曲线。这两条曲线的交点对应的坐标，既满足于方程(5-4-5)，又满足于方程(5-4-6)，所以即为所求。

假定 $D_4 + u_2 = 800 \text{ m/s}$ ，按照(5-4-5)式

$$(D_3 + u_1)^2 = 0.575 \times 800^2 + 0.227 \times 10^5$$

$$= 39.07 \times 10^4$$

得

$$D_3 + u_1 = 625 (\text{m/s})$$

按照(5-4-6)式

$$(D_3 + u_1)^2 + \left[800 - \frac{1.544 \times 10^5}{800} - 924 \right] (D_3 + u_1)$$

$$- 2.334 \times 10^5 = 0$$

即

$$(D_3 + u_1)^2 - 317(D_3 + u_1) - 2.334 \times 10^5 = 0$$

得

$$D_3 + u_1 = 666 (\text{m/s})$$

同样假设 $D_4 + u_2 = 700, 900 \text{ m/s}$ ，进行计算，其结果列表如下：

假定 $D_4 + u_2 (\text{m/s})$		700	800	900
计算 $D_3 + u_1$ (m/s)	按 (5-4-5) 式	552	625	699
	按 (5-4-6) 式	755	666	590

将表中数据绘成曲线 (图5-4-4)，二曲线交点

$$D_3 + u_1 = 645 \text{ m/s}$$

$$D_4 + u_2 = 827 \text{ m/s}$$

即为所求。

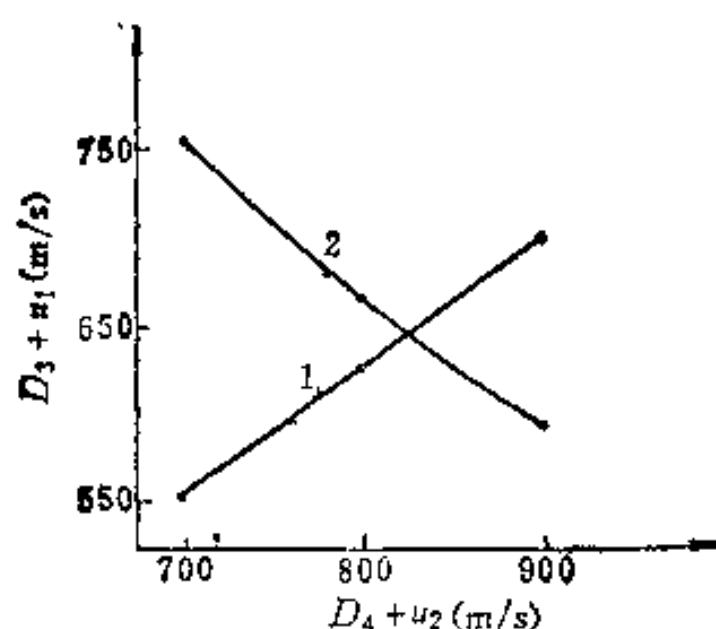


图5-4-4 $(D_4 + u_2) \sim (D_3 + u_1)$ 曲线

1—按 (5-4-5) 式计算；2—按 (5-4-6) 式计算。

代入 u_1, u_2 值，得

$$D_3 = 99 \text{ m/s}$$

$$D_4 = 603 \text{ m/s}$$

由 (5-4-1) 和 (5-4-2) 两式计算得

$$\begin{aligned} p_3 &= 3.218(D_3 + u_1)^2 - 1.158 \times 10^6 \\ &= 12.23 \times 10^5 (\text{Pa}) \end{aligned}$$

$$u_3 = 0.833(D_3 + u_1) - \frac{1.944 \times 10^5}{D_3 + u_1} - 546 = -310 (\text{m/s})$$

由 (5-4-3) 和 (5-4-4) 两式计算得

$$\begin{aligned} p_4 &= 1.85(D_4 + u_2)^2 - 0.429 \times 10^6 \\ &= 12.23 \times 10^5 (\text{Pa}) \end{aligned}$$

$$u_4 = 0.833(D_4 + u_2) - \frac{1.286 \times 10^5}{D_4 + u_2} - 224 = 310 (\text{m/s})$$

采用冲击波公式计算

$$\begin{aligned} \rho_3 &= \frac{\frac{k+1}{k-1} \rho_1}{1 + \frac{2}{k-1} \frac{c_1^2}{(D_3 + u_1)^2}} = \frac{\frac{1.4+1}{1.4-1} \times 3.862}{1 + \frac{2}{1.4-1} \frac{483^2}{645^2}} \\ &= 6.092 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_4 &= \frac{\frac{k+1}{k-1} \rho_2}{1 + \frac{2}{k-1} \frac{c_2^2}{(D_4 + u_2)^2}} = \frac{\frac{1.4+1}{1.4-1} \times 2.22}{1 + \frac{2}{1.4-1} \frac{339^2}{827^2}} \\ &= 6.324 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

采用状态方程和音速公式计算

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{p_3}{\rho_3} = \frac{\rho_1}{\rho_3} T_1 = \frac{12.23 \times 10^5}{6.35 \times 10^5} \times \frac{3.862}{6.092} \times 580 \\ &= 708 (\text{K}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_4 &= \frac{p_4}{\rho_4} = \frac{\rho_2}{\rho_4} T_2 = \frac{12.23 \times 10^5}{2.37 \times 10^5} \times \frac{2.22}{6.324} \times 377 \\ &= 683 (\text{K}) \end{aligned}$$

$$c_1 = 20.05 \sqrt{T_1} = 533 (\text{m/s})$$

$$c_2 = 20.05 \sqrt{T_2} = 524 (\text{m/s})$$

将计算结果列于表 5-4-1 和表 5-4-2。

表 5-4-1 波 系

波 系	D_1	D_2	D_3	D_4
c (m/s)	533	524	533	524
方 向	向右	向右	向左	向右

表 5-4-2 各 区 参 数

参 数	(0)区	(1)区	(2)区	(3)区	(4)区
p (Pa $\times 10^5$)	1	6.35	2.37	12.23	12.23
ρ (kg/m ³)	1.225	3.852	2.22	6.092	6.324
T (K)	288	500	377	708	683
c (m/s)	340	433	389	533	524
" (m/s)	0	546	224	310	310
" 方 向	—	向右	向左	向右	向右

二、两个同向冲击波的追赶

假若在直管中有两个同向运动的冲击波，如图 5-4-5 所示。由于冲击波传播速度相对于波前气体是亚音速的，因而后面的冲击波一定会追赶上在其前面传播的冲击波，而叠加成为一道更强的冲击波。由于原来两道冲击波和新形成的一道更强冲击波的冲击压缩程度不同，原来两道冲击波后（2）区的压强和气流速度与新形成的一道更强冲击波后（4）区的压强和气流速度不会相同，因而在相交点处还要产生一束

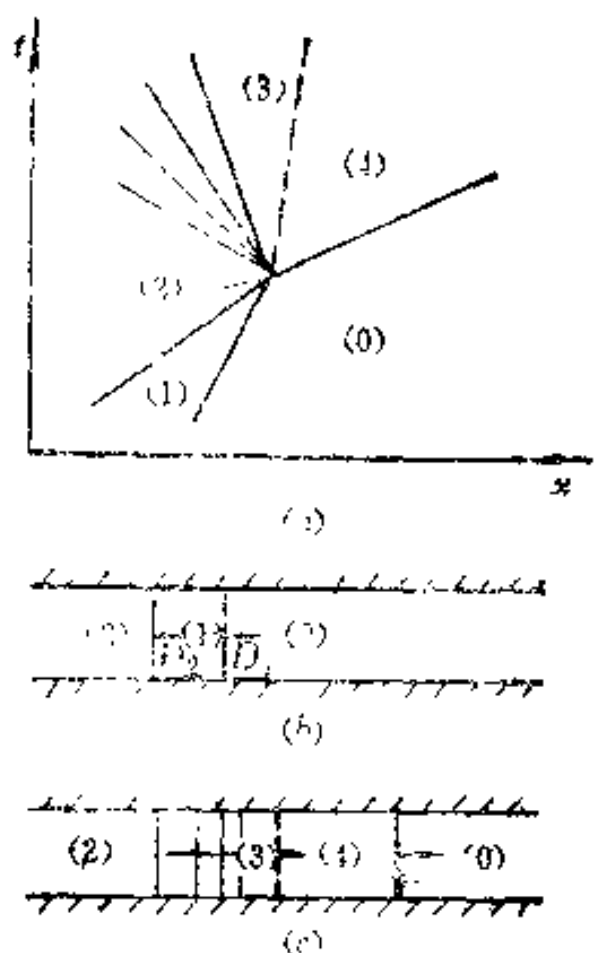


图5-4-5 同向冲击波的追赶

a —冲击波运动的时间—路程线； b —在直管中，同向冲击波相遇之前的情况； c —在直管中，同向冲击波相遇之后的情况。

反射膨胀波，以调节（2）区和（4）区压强和气流速度之间的矛盾，膨胀波后的（3）区和（4）区之间由分界面所隔开。

仍然假设冲击波未到达前，（0）区的初始条件为静止空气状态，在管道中传播的两道冲击波相对于静止气体的速度 $D_1 = 500 \text{ m/s}$ 、 $D_2 = 800 \text{ m/s}$ ，试计算各区的气流参数和所形成的波系。

首先计算初始冲击波后的（1）区和（2）区。对于（1）区和（2）区可以通过冲击波关系与（0）区连系起来

$p_0 = 10^5 \text{ Pa}$	冲击波 → $D_1 = 500$ m/s	$p_1 = ?$	冲击波 → $D_2 = 800$ m/s	$p_2 = ?$
$\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$		$\rho_1 = ?$		$\rho_2 = ?$
$c_0 = 340 \text{ m/s}$		$u_1 = ?$		$u_2 = ?$
		$c_1 = ?$		$c_2 = ?$

按照已知冲击波速度，且波前气体为静止状态的冲击波公式，可以计算（1）区参数

$$\begin{aligned}
 p_1 &= p_0 + \frac{2}{k+1} \rho_0 D_1^2 \left(1 - \frac{c_0^2}{D_1^2} \right) \\
 &= 10^5 + \frac{2}{1.4+1} \times 1.225 \times 500^2 \left(1 - \frac{340^2}{500^2} \right) \\
 &= 2.37 \times 10^5 (\text{Pa})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_1 &= \frac{\frac{k+1}{k-1} \rho_0}{1 + \frac{2}{k-1} \frac{c_0^2}{D_1^2}} = \frac{\frac{1.4+1}{1.4-1} \times 1.225}{1 + \frac{2}{1.4-1} \frac{340^2}{500^2}} \\
 &= 2.130 (\text{kg/m}^3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{2}{k+1} D_1 \left(1 - \frac{c_0^2}{D_1^2} \right) = \frac{2}{1.4+1} \times 500 \times \left(1 - \frac{340^2}{500^2} \right) \\
 &= 224 (\text{m/s})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{\rho_0}{\rho_1} T_0 = \frac{2.37 \times 10^5}{10^5} \times \frac{1.225}{2.130} \times 288 \\
 &= 392 (\text{K})
 \end{aligned}$$

$$c_1 = 20.05 \sqrt{T_1} = 397 (\text{m/s})$$

对于第二道冲击波，如图 5-4-6 所示，由于波前气体已经具有了同向速度 u_1 ，为了转换波前气体成为静止状态，在整个流场中迭加一个速度为 u_1 的向左流动，从而使冲击波相

对于波前静止气体以速度 $D_2 - u_1$ 进行传播, 波后气体以速度 $u_2 - u_1$ 向右运动。

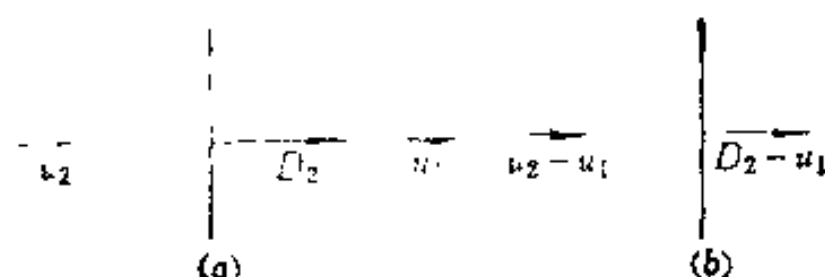


图5-4-8 冲击波 D_2 前、后气体的流动

a—真实流场; b—波前为静止状态的流场。

已知 $D_2 - u_1 = 576 \text{ m/s}$, 因而可以采用冲击波公式计算

(2) 区参数

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \frac{2}{k+1} \rho_1 (D_2 - u_1)^2 \left[1 - \frac{c_1^2}{(D_2 - u_1)^2} \right] \\ &= 2.37 \times 10^5 + \frac{2}{1.4+1} \times 2.13 \times 576^2 \times \left[1 - \frac{397^2}{576^2} \right] \\ &= 5.46 \times 10^5 (\text{Pa}) \end{aligned}$$

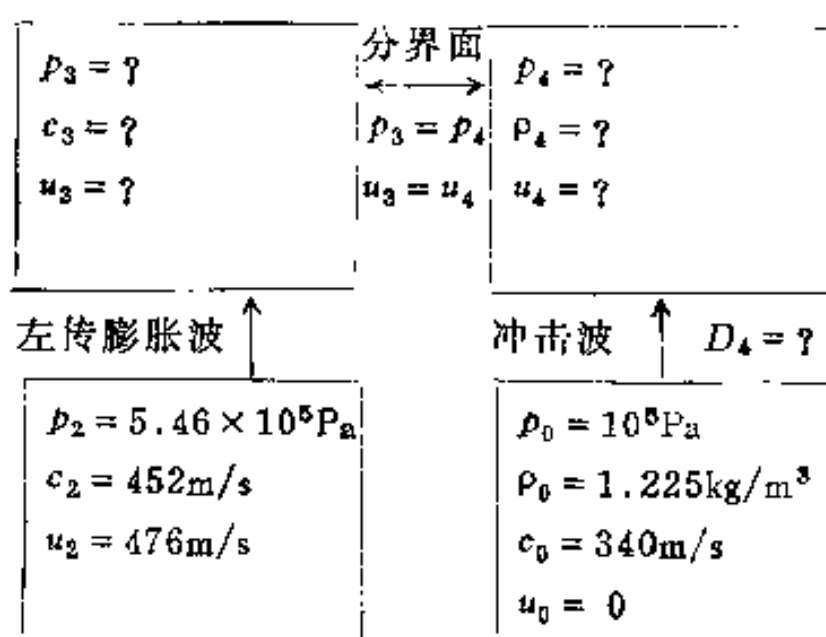
$$\begin{aligned} \rho_2 &= \frac{\frac{k+1}{k-1} \rho_1}{1 + \frac{2}{k-1} \frac{c_1^2}{(D_2 - u_1)^2}} = \frac{\frac{1.4+1}{1.4-1} \times 2.13}{1 + \frac{2}{1.4-1} \frac{397^2}{576^2}} \\ &= 3.786 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_2 &= \frac{2}{k+1} (D_2 - u_1) \left[1 - \frac{c_1^2}{(D_2 - u_1)^2} \right] + u_1 \\ &= \frac{2}{1.4+1} \times 576 \times \left[1 - \frac{397^2}{576^2} \right] + 224 \\ &= 476 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{p_2}{\rho_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} T_1 = \frac{5.46 \times 10^5}{2.37 \times 10^5} \times \frac{2.13}{3.786} \times 392 \\ &= 508 (\text{K}) \end{aligned}$$

$$c_2 = 20.05 \sqrt{T_2} = 452 (\text{m/s})$$

再计算冲击波追赶上后所形成的 (3)、(4) 区, 对于 (4) 区可以通过冲击波关系与 (0) 区联系起来, 对于 (3) 区可以通过左传膨胀波关系与 (2) 区联系起来, 而 (3) 区和 (4) 区之间可以通过分界面关系联系起来, 即



按照冲击波公式, 对待 (4) 区

$$\begin{aligned}
 p_4 &= p_0 + \frac{2}{k+2} \rho_0 D_4^2 \left(1 - \frac{c_0^2}{D_4^2} \right) \\
 &= 10^5 + \frac{2}{1.4+2} \times 1.225 \times (D_4^2 - 340^2) \\
 &= 1.021 D_4^2 - 0.18 \times 10^5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_4 &= \frac{2}{k+1} D_4 \left(1 - \frac{c_0^2}{D_4^2} \right) = \frac{2}{1.4+1} \left(D_4 - \frac{340^2}{D_4} \right) \\
 &= 0.833 D_4 - \frac{9.63 \times 10^4}{D_4}
 \end{aligned}$$

按照左传膨胀波公式, 对待 (3) 区

$$u_3 + \frac{2}{k-1} c_3 = u_2 + \frac{2}{k-1} c_2 = 476 + \frac{2}{1.4-1} \times 452 = 2736$$

得

$$u_3 = 2736 - 5c_3$$

以及

$$\left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{c_3}{c_2} \right)^2$$

得

$$\begin{aligned} p_3 &= p_2 \left(\frac{c_3}{c_2} \right)^{\frac{2k}{k-1}} = 5.46 \times 10^5 \times \left(\frac{c_3}{452} \right)^{\frac{2 \times 1.4}{1.4-1}} \\ &= 14.16 \times 10^{-14} c_3^7 \end{aligned}$$

由分界面条件 $p_3 = p_4$ 、 $u_3 = u_4$ ，得到两个方程

$$1.021 D_4^2 - 0.18 \times 10^6 = 14.16 \times 10^{-14} c_3^7$$

$$0.833 D_4 - \frac{9.63 \times 10^4}{D_4} = 2736 - 5c_3$$

整理为

$$D_4^2 = 13.87 \times 10^{-14} c_3^7 + 1.76 \times 10^4 \quad (5-4-7)$$

$$D_4^2 - (3296 - 6c_3) D_4 - 11.56 \times 10^4 = 0 \quad (5-4-8)$$

采用图解法求解，设 $c_3 = 440 \text{ m/s}$ ，代入 (5-4-7) 式计算得

$$D_4 = 678 (\text{m/s})$$

代入 (5-4-8) 式计算得

$$D_4 = 800 (\text{m/s})$$

再设 $c_3 = 450, 460 \text{ m/s}$ ，同样进行计算。计算结果列表如下

假设 $c_3 (\text{m/s})$		440	450	460
计算 D_4 (m/s)	按 (5-4-7) 式	678	732	788
	按 (5-4-8) 式	800	750	700

将表中数据绘成曲线 (图5-4-7), 二曲线交点

$$c_3 = 452 \text{ m/s}$$

$$D_4 = 742 \text{ m/s}$$

为所求。

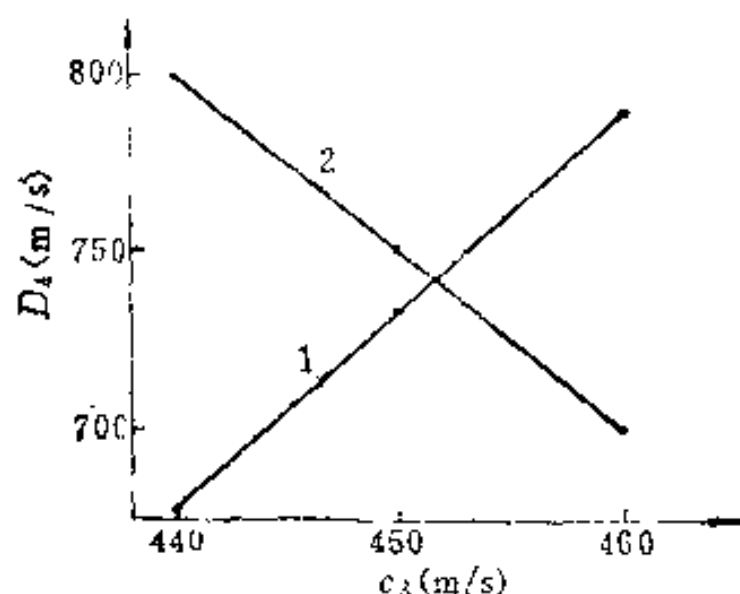


图5-4-7 $c_3 \sim D_4$ 曲线

1—按 (5-4-7) 式计算; 2—按 (5-4-8) 式计算。

将 D_4 代入冲击波关系, 或将 c_3 代入膨胀波关系, 计算

$$p_3 = p_4 = 1.021 D_4^2 - 0.18 \times 10^6$$

$$= 1.021 \times 742^2 - 0.18 \times 10^6$$

$$= 5.44 \times 10^5 (\text{Pa})$$

$$u_3 = u_4 = 0.833 D_4 - \frac{9.63 \times 10^4}{D_4}$$

$$= 0.833 \times 742 - \frac{9.63 \times 10^4}{742} = 488 (\text{m/s})$$

按照冲击波关系, 计算 (4) 区参数

$$\begin{aligned} \rho_4 &= \frac{\frac{k+1}{k-1} \rho_0}{1 + \frac{2}{k-1} \frac{c_0^2}{D_4^2}} = \frac{\frac{1.4+1}{1.4-1} \times 1.225}{1 + \frac{2}{1.4-1} \times \frac{340^2}{742^2}} \\ &= 3.586 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

$$T_4 = \frac{p_4}{p_0} \frac{\rho_0}{\rho_4} T_0 = \frac{5.44 \times 10^5}{10^5} \times \frac{1.225}{3.586} \times 288 = 535(\text{K})$$

$$c_4 = 20.05 \sqrt{T_4} = 464(\text{m/s})$$

按照等熵关系, 计算 (3) 区参数

$$\rho_1 = \rho_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 3.786 \left(\frac{5.44 \times 10^5}{5.46 \times 10^5} \right)^{\frac{1}{1.4}} = 3.776(\text{kg/m}^3)$$

$$T_1 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 508 \left(\frac{5.44 \times 10^5}{5.46 \times 10^5} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 507(\text{K})$$

左传膨胀波的波头和波尾速度

$$u_l = u_2 - c_2 = 476 - 452 = 24(\text{m/s})$$

$$u_R = u_3 - c_3 = 480 - 452 = 28(\text{m/s})$$

将计算结果列表 5-4-3 和表 5-4-4。

表5-4-3 波 系

波 系	D_1	D_2	D_3	左传膨胀波	
				波头	波尾
速度(m/s)	500	800	742	24	28
方 向	向右	向右	向右	向右	向右

表5-4-4 各 区 参 数

参 数		(0)区	(1)区	(2)区	(3)区	(4)区
$p(\text{Pa} \times 10^5)$		1	2.37	5.46	5.44	5.44
$\rho(\text{kg/m}^3)$		1.225	2.130	3.786	3.776	3.586
$T(\text{K})$		288	292	508	507	535
$c(\text{m/s})$		340	397	452	452	464
u	(m/s)	0	224	476	480	480
	方向	—	向右	向右	向右	向右

三、冲击波在刚性壁面上的反射

假若直管右端是封闭的，如图 5-4-8 所示，当冲击波传播到右端面时，波后气流受到壁面的阻挡，不能继续运动，发生气流的堆积，使气体的密度增加、压强增加，堆积起来的高压气体必定向原气体中流动，而产生反射冲击波。确定

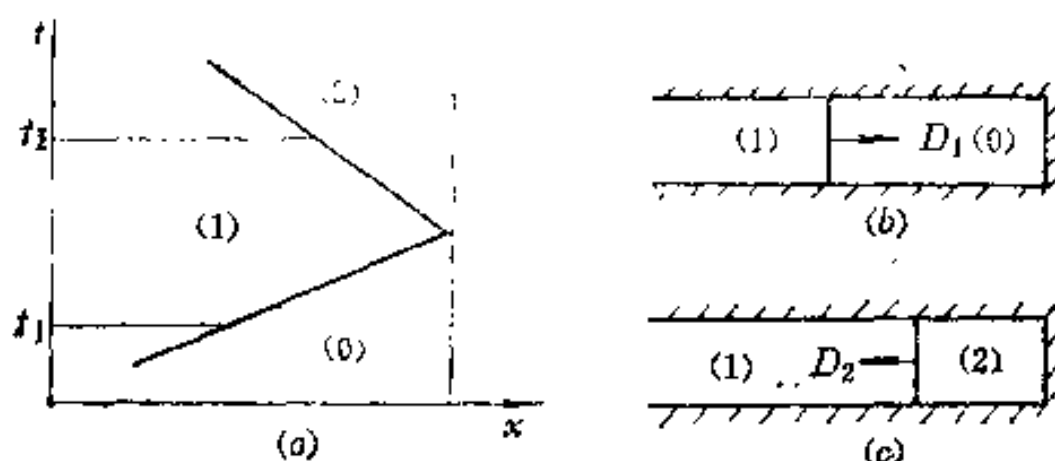


图5-4-8 冲击波在刚壁上的反射

a—冲击波运动的时间-路程线；b—在直管中，冲击波反射前的流动；c—在直管中，冲击波反射后的流动。

反射冲击波的条件是（2）区气流速度等于零。

设已知冲击波未到达前，（0）区的初始条件为静止空气状态，入射冲击波传播速度 $D_1 = 800 \text{ m/s}$ ，试计算反射冲击波传播速度和各区气流参数。

（1）区气流参数可以通过冲击波关系与（0）区连系起来

$\begin{aligned} p_0 &= 10^5 \text{ Pa} \\ \rho_0 &= 1.225 \text{ kg/m}^3 \\ c_0 &= 340 \text{ m/s} \end{aligned}$	冲击波 $\xrightarrow{D_1 = 800 \text{ m/s}}$	$\begin{aligned} p_1 &=? \\ \rho_1 &=? \\ u_1 &=? \end{aligned}$

可以按冲击波关系计算（1）区参数，得

$$p_1 = 6.46 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_1 = 3.861 \text{ kg/m}^3$$

$$u_1 = 546 \text{ m/s}$$

$$T_1 = 590 \text{ K}$$

$$c_1 = 487 \text{ m/s}$$

(2) 区气流参数可以通过冲击波关系与 (1) 区连系起来。虽然反射冲击波未知, 但波后气流满足 $u_2 = 0$ 的壁面条件 即

$p_1 = 6.46 \times 10^5 \text{ Pa}$		$p_2 = ?$
$\rho_1 = 3.861 \text{ kg/m}^3$	冲击波	$\rho_2 = ?$
$c_1 = 487 \text{ m/s}$	$D_2 = ?$	$c_2 = ?$
$u_1 = 546 \text{ m/s}$		$u_2 = 0$

反射冲击波如图 5-4-9 所示, 向左传播的冲击波波前的气体具有向右的速度 u_1 , 而波后气体速度等于零。在整个流



图5-4-9 反射冲击波 D_2 前、后气体的流动

a —真实流场; b —波前为静止状态的流场。

场中迭加一个速度为 u_1 的向左流动, 从而使冲击波前面的气体成为静止状态, 冲击波速度为 $D_2 + u_1$, 波后 (2) 区气流以速度 u_1 跟随冲击波运动。

按照计算波后气体速度的冲击波公式 (5-3-15) 式

$$u_1 = \frac{2}{k+1} (D_2 + u_1) \left[1 - \frac{c_1^2}{(D_2 + u_1)^2} \right]$$

代入已知数值, 得

$$546 = \frac{2}{1.4+1} \left[(D_2 + 546) - \frac{487^2}{(D_2 + 546)} \right]$$

整理为

$$(D_2 + 546)^2 - 655(D_2 + 546) - 23.7 \times 10^4 = 0$$

解得

$$D_2 = 368 \text{ (m/s)}$$

因而, (2) 区参数可以计算出来。

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \frac{2}{k+1} \rho_1 (D_2 + u_1)^2 \left[1 - \frac{c_1^2}{(D_2 + u_1)^2} \right] \\ &= 26.1 \times 10^5 \text{ (Pa)} \end{aligned}$$

$$\rho_2 = \frac{\frac{k+1}{k-1} \rho_1}{1 + \frac{2}{k-1} \frac{c_1^2}{(D_2 + u_1)^2}} = 9.575 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$T_2 = \frac{p_2}{\rho_2} = \frac{p_1}{\rho_1} T_1 = 961 \text{ (K)}$$

$$c_2 = 20.05 \sqrt{T_2} = 622 \text{ (m/s)}$$

计算结果列表 5-4-5 和表 5-4-6 中。

表 5-4-5 波 系

波 系	D_1	D_2
速度 (m/s)	800	368
方 向	向左	向右

表5-4-B 各区参数

参 数	(0)区	(1)区	(2)区
$p (\text{Pa} \times 10^5)$	1	6.46	26.1
$\rho (\text{kg/m}^3)$	1.225	3.861	9.575
$T (\text{K})$	288	590	961
$a (\text{m/s})$	340	487	522
u	(m/s)	0	0
	方向	—	向右

四、冲击波在开口端的反射

假若直管右端是开口的，如图 5-4-10 所示，冲击波传播到开口端之后，由于开口端与外界大气相通，紧靠冲击波

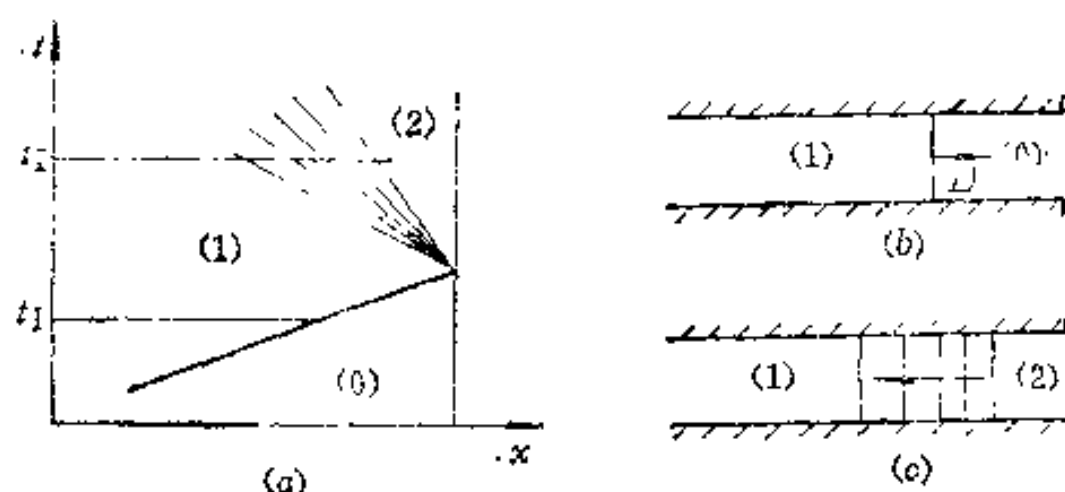


图5-4-10 冲击波在开口端的反射

a—波系运动的时间-路程线；b—在直管中，入射冲击波时的流动；c—在直管中，反射膨胀波时的流动。

的波后气体首先散失，使压力降低，而管道里面的气体来不及散失，这样由于压力的不平衡，从管口向管内传入一束膨胀波。确定反射膨胀波区的条件是膨胀波区后的压强等于外

界大气的压强。

仍然设冲击波未到达前, (0) 区的初始状态为静止空气状态, 向右传播的入射冲击波速度 $D_1 = 500 \text{ m/s}$, 试计算反射膨胀波区波头和波尾的速度以及各区气流参数。

(1) 区气流参数可以通过冲击波关系与 (0) 区联系起来

$p_0 = 10^5 \text{ Pa}$ $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ $c_0 = 340 \text{ m/s}$	冲击波 $D = 500 \text{ m/s}$	$p_1 = ?$ $\rho_1 = ?$ $u_1 = ?$

按冲击波关系计算 (1) 区参数, 得

$$p_1 = 2.4 \times 10^5 (\text{Pa})$$

$$\rho_1 = 2.215 (\text{kg/m}^3)$$

$$u_1 = 224 (\text{m/s})$$

$$T_1 = 382 (\text{K})$$

$$c_1 = 392 (\text{m/s})$$

入射冲击波到达开口端之后, 产生一束反射膨胀波. 反射膨胀波过后气体压强等于外界大气压强

$$p_2 = p_0 = 10^5 \text{ Pa}$$

(2) 区与 (1) 区的气体状态参数可以通过等熵关系联系起来

$p_1 = 2.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ $\rho_1 = 2.215 \text{ kg/m}^3$ $T_1 = 382 \text{ K}$	等熵过程	$p_2 = 10^5 \text{ Pa}$ $\rho_2 = ?$ $T_2 = ?$

按照等熵公式

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = 1.186 (\text{kg/m}^3)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 297 (\text{K})$$

$$c_2 = 20.05 \sqrt{T_2} = 346 (\text{m/s})$$

已知 (1) 区气体的音速和气流速度, 又知 (2) 区气体的音速, 为了求 (2) 区气流速度, 可以用膨胀波关系将 (2) 区与 (1) 区连系起来

$\begin{matrix} c_1 = 391 \text{ m/s} \\ u_1 = 224 \text{ m/s} \end{matrix}$	左传膨胀波 $\longrightarrow$	$\begin{matrix} c_2 = 346 \text{ m/s} \\ u_2 = ? \end{matrix}$

按照左传膨胀波公式

$$u_2 + \frac{2}{k-1} c_2 = u_1 + \frac{2}{k-1} c_1$$

得

$$\begin{aligned} u_2 &= u_1 + \frac{2}{k-1} (c_1 - c_2) \\ &= 224 + \frac{2}{1.4-1} (392 - 346) \\ &= 454 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

膨胀波区波头和波尾的速度分别为

$$u_I = u_1 - c_1 = 224 - 392 = -168 (\text{m/s})$$

$$u_N = u_2 - c_2 = 454 - 346 = 108 (\text{m/s})$$

计算结果列于表 5-4-7 和表 5-4-8。

表5-4-7 波 系

波 系	D	反射膨胀波	
		波头	波尾
速度 (m/s)	500	168	108
方 向	向右	向左	向右

表5-4-8 各 区 参 数

参 数		(0)区	(1)区	(2)区
p (Pa $\times 10^5$)		1	2.4	1
ρ (kg/m ³)		1.215	2.215	1.188
T (K)		288	382	297
c (m/s)		340	392	311
u	(m/s)	0	224	154
	方向	—	向右	向右

第六章 爆轰波理论

通过对炸药爆轰过程的大量研究表明，爆轰是一层层地以波的形式在炸药中传播的，这种波称为爆轰波。各种炸药在一定的装药条件之下，都能以特有的稳定传播速度进行爆轰。

经典爆轰波理论是在气体力学基础上对爆轰进行研究的，这个理论不仅对爆轰过程进行了定性的解释，而且还可以计算出诸如爆速、爆压等爆轰参数。

§ 6-1 爆 轰 波

一、爆轰波模型

从本质上讲，爆轰波就是在炸药中传播的一种强冲击波。但是，它与一般强冲击波不完全相同，这个冲击波在炸药中传播过后，使得炸药受到强烈地冲击压缩，压力、温度皆上升到很高的值，炸药立即发生剧烈的化学反应而放出大量的化学能，所放出的能量又供给冲击波对下一层炸药进行冲击压缩，因而使得爆轰波能够毫不衰减地在炸药中一层层地传播下去。由此可见，爆轰波乃是后面带有化学反应区的强冲击波。

爆轰波模型如图 6-1-1 所示。爆轰波由前沿冲击波和紧跟在其后的化学反应区所组成，它们以相同的速度 D 在炸药中进行传播，在化学反应区末端面处化学反应完成，形成爆

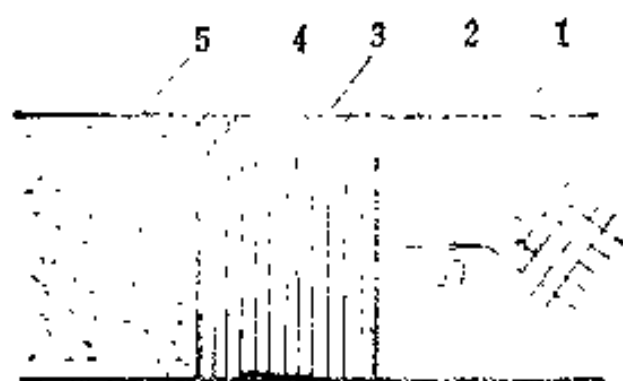


图6-1-1 爆轰波模型

1—原始炸药；2—前沿冲击波；3—化学反应区；

4—反应终止面；5—爆轰产物。

轰产物。

由于爆轰波是一种强冲击波，因而它具有与冲击波相同的性质：

1. 爆轰波过后，状态参数（压力、温度、密度）急剧地增加；
2. 爆轰波传播速度相对于波前介质（炸药）是超音速的；
3. 爆轰波过后，爆轰产物获得一个与爆轰波传播方向相同的运动速度。

由于爆轰波具有化学反应区，因而它又有与冲击波不同的性质：

1. 爆轰波由前沿冲击波和紧跟在其后的化学反应区组成，它们是一个不可分割的整体，而且以同一速度在炸药中传播，此传播速度称为爆速。

2. 由于爆轰波具有化学反应区，所以可以放出能量，使得爆轰波在传播过程中不断得到能量的补充，而不衰减。

冲击波只是一个强间断面，通过这个冲击压缩，压力、密度、温度等量急剧增加，但是不发生化学反应，没有能量

补充, 因而冲击波在传播过程中衰减, 最后成为声波。

3. 冲击波相对于波后气体是亚音速的, 而下面我们看到爆轰波传播速度相对于波后气体为当地音速。

二、爆轰波的基本关系式

按照爆轰波模型, 其流动图形如图 6-1-2 a 所示, 前沿冲击波前是未爆的炸药, 炸药的初始压力和密度为 p_0, ρ_0 , 内能为 e_0 , 通常速度 $u_0 = 0$, 前沿冲击波和化学反应区共同构成爆轰波波阵面, 反应区内状态参数 (压力、密度、温度) 是变化的, 且不断放出热量, 至化学反应末端面时共放出热量 Q_V , 化学反应区末端面之后是爆轰产物, 化学反应区末端面处爆轰产物所达到的压力、密度、内能和质量速度分别为 p_H, ρ_H, e_H 和 u_H 。

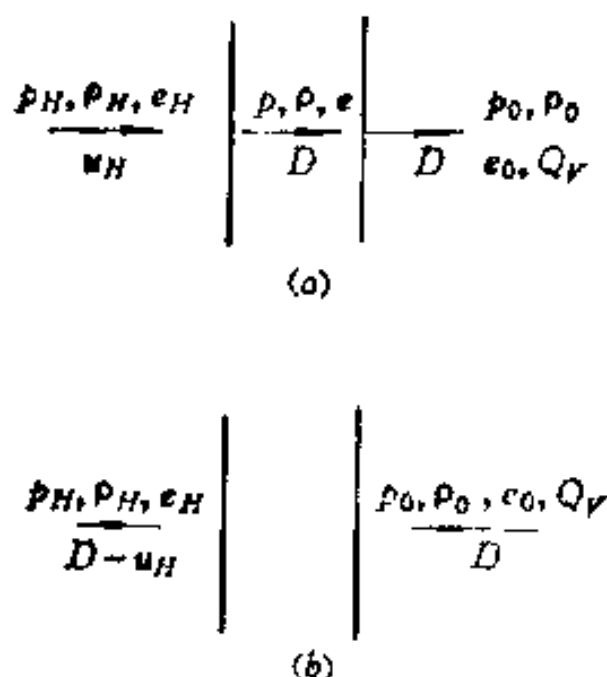


图6-1-2 爆轰波前、后介质流动图形

(a) 静坐标; (b) 相对坐标。

为了研究方便, 我们只分析爆轰波前、后状态的变化, 而不考虑化学反应过程, 这样可以采用爆轰波不动的相对坐标, 其流动图形如图 6-1-2 b 所示, 未爆炸药以速度 D 向爆轰波传来, 爆轰产物以速度 $D - u_H$ 离爆轰波而去。

质量守恒方程

$$\rho_0 D = \rho_H (D - u_H) \quad (6-1-1)$$

动量守恒方程

$$p_H - p_0 = \rho_0 D u_H \quad (6-1-2)$$

能量守恒方程

与冲击波传播不同的地方，在于爆轰波过后炸药放出化学能 Q_v 。在相对坐标内未爆炸药的内能为 $\rho_0 D \cdot e_0$ ，动能为 $\frac{1}{2} \rho_0 D \cdot D^2$ ，压力位能为 $p_0 D$ ，潜在化学能为 Q_v ，爆轰产物的内能为 $\rho_H (D - u_H) \cdot e_H$ ，动能为 $\frac{1}{2} \rho_H (D - u_H) \cdot e_H$ ，压力位能为 $p_H (D - u_H)$ ，化学能放出，所以

$$\begin{aligned} & \rho_0 D e_0 + \frac{1}{2} \rho_0 D \cdot D^2 + p_0 D + Q_v \\ &= \rho_H (D - u_H) e_H + \frac{1}{2} \rho_H (D - u_H) \cdot (D - u_H)^2 \\ & \quad + p_H (D - u_H) \end{aligned}$$

整理为

$$e_H - e_0 = \frac{p_H u_H}{\rho_0 D} - \frac{1}{2} u_H^2 + Q_v \quad (6-1-3)$$

从这三个守恒方程可以看出，爆轰波的质量守恒、动量守恒与冲击波的质量守恒、动量守恒完全相同，爆轰波的能量守恒方程比冲击波能量守恒方程有差别，多的一项为炸药爆炸时释放出的化学能 Q_v 。

由质量守恒 (6-1-1) 和动量守恒 (6-1-2) 两式，可以得出爆轰波传播运动

$$D = v_0 \sqrt{\frac{p_H - p_0}{v_0 - v_H}} \quad (6-1-4)$$

和波后产物质点速度

$$u_H = \sqrt{(p_H - p_0)(v_0 - v_H)} \quad (6-1-5)$$

式中 v_0 , v_H 分别为原始炸药和爆轰波后化学反应区末端面处爆轰产物的比容。

将(6-1-4)、(6-1-5)两式代入(6-1-3)式

$$\begin{aligned} e_H - e_0 &= \frac{p_H}{\rho_0} \frac{V'(\bar{p}_H - \bar{p}_0)(\bar{v}_0 - \bar{v}_H)}{v_0 \sqrt{\frac{p_H - p_0}{v_0 - v_H}}} \\ &= \frac{1}{2}(p_H + p_0)(v_0 - v_H) + Q_v \\ &= p_H(v_0 - v_H) - \frac{1}{2}(p_H - p_0)(v_0 - v_H) + Q_v \end{aligned}$$

从而得到

$$e_H - e_0 = \frac{1}{2}(p_H + p_0)(v_0 - v_H) + Q_v \quad (6-1-6)$$

(6-1-6)式是用压力、比容表示的能量方程,通常称为爆轰波的冲击绝热线。

(6-1-4)~(6-1-6)是从三个守恒方程得出的、用压力和比容表示的三个方程,这三个方程与三个守恒方程具有同等的作用,下面分别研究一下方程(6-1-4)和(6-1-6)两式。

1. 爆轰波波速线

在横坐标为比容、纵坐标为压强的 $p-v$ 平面上研究波速方程,由(6-1-4)得

$$p_H = p_0 + \frac{D^2}{v_0^2}(v_0 - v_H)$$

从图6-1-3看出,在 $p-v$ 平面上这是一条以 (p_0, v_0) 为始点的直线,直线斜率

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{D^2}{v_0^2}$$

或

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{D^2}{v_0^2}$$

由于方程中不包含能量，因而爆轰波的波速线与冲击波的波速线相一致，具有下列的性质：

(1) 波速线是由炸药初始状态 (p_0, v_0) 为始点，向外引出的一条直线。

(2) 当给定炸药初始状态 (p_0, v_0) 和爆速 D 后，波速线就确定了。也就是说

初始压力和比容为 p_0, v_0 的炸药，当爆速 D 确定后，波后反应区末端面上爆轰产物的压力 p_H 和比容 v_H 一定在这一条直线上。

(3) 当给定炸药初始状态 (p_0, v_0) ，而爆速 D 变化时，此直线斜率发生变化，当爆速 $D_2 > D > D_1$ 时，其直线斜率

$$\operatorname{tg} \varphi_2 > \operatorname{tg} \varphi > \operatorname{tg} \varphi_1$$

2. 爆轰波的冲击绝热线

仍然在横坐标为比容、纵坐标为压强的 $p-v$ 平面上研究问题，对于方程 (6-1-6)

$$e_H - e_0 = -\frac{1}{2}(p_H + p_0)(v_0 - v_H) + Q_v$$

在 $p-v$ 平面上，这是位于点 (p_0, v_0) 上方的一条凹向上的双曲线。

为了分析这条曲线，首先从冲击波说起。冲击波能量守恒

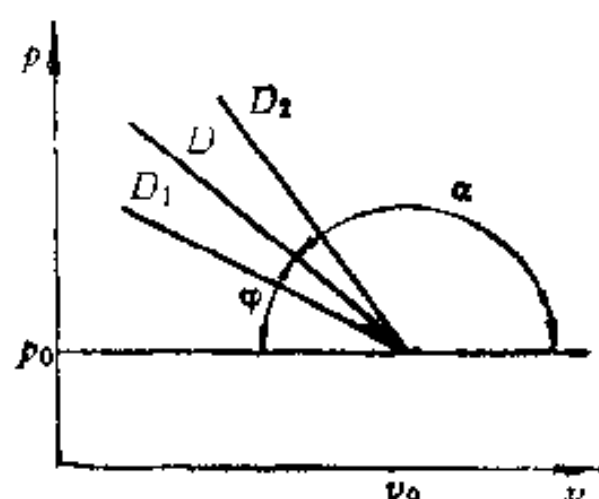


图6-1-3 波速线

方程与爆轰波能量守恒方程只是相差一项 Q_v , (6-1-6)式去掉 Q_v 就是相应冲击波的冲击绝热方程

$$e_H - e_0 = \frac{1}{2}(p_H + p_0)(v_0 - v_H) \quad (6-1-7)$$

按照内能表达式

$$e = c_v T = \frac{RT}{k-1}$$

和理想气体状态方程

$$pv = RT$$

代入内能

$$e_H = \frac{p_H v_H}{k-1}, \quad e_0 = \frac{p_0 v_0}{k-1}$$

(6-1-7)式化为

$$\frac{p_H v_H}{k-1} - \frac{p_0 v_0}{k-1} = -\frac{1}{2}(p_H + p_0)(v_0 - v_H)$$

整理后得到

$$p_H v_H - \frac{k-1}{k+1} p_H v_0 + \frac{k-1}{k+1} p_0 v_H - p_0 v_0 = 0$$

由对一般二次曲线方程的判别得知, 这是一条过炸药初始状态 (p_0, v_0) 的双曲线。图6-1-4绘出了这条曲线, 曲线表明不论冲击波传播速度如何, 冲击波过后气体的压力 p_H 和比容 v_H 的坐标点皆在这条曲线上。

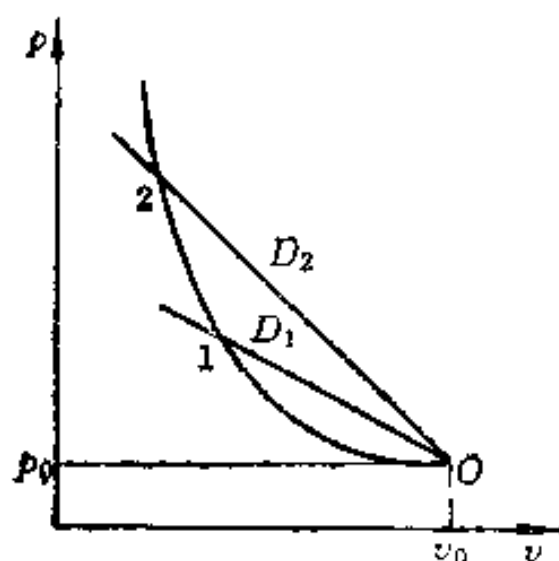


图6-1-4 冲击波的冲击绝热线

冲击波后气体的压力和比容到底在冲击绝热线的哪个点上呢? 必须与冲击波的波速

线联合求出。

以 (p_0, v_0) 为始点、一定波速 D 的波速线和过同一初始点 (p_0, v_0) 的冲击绝热线的交点, 则为冲击波波后气体所达到的压力和比容。如图 6-1-4 所示, 曲线 012 是过 (p_0, v_0) 的冲击绝热线, 01 和 02 分别是在初始状态 (p_0, v_0) 以 D_1 和 D_2 传播的冲击波波速线, 则两线交点 1 就是在这种初始状态下以 D_1 传播的冲击波波后气体所达到的压力和比容, 交点 2 就是在这种初始状态下以 D_2 传播的冲击波波后气体所达到的压力和比容。从而可以看出, 冲击绝热线是不同传播速度的冲击波过后介质终点状态的连线。

再分析爆轰波的冲击绝热线。对于气体爆炸物, 近似假设爆轰前、后的气体皆符合理想状态方程, 这样 (6-1-6) 式可以写成

$$\frac{p_H v_H}{k-1} - \frac{p_0 v_0}{k-1} = \frac{1}{2} (p_H + p_0)(v_0 - v_H) + Q_v$$

整理后得到

$$p_H v_H - \frac{k-1}{k+1} p_H v_0 + \frac{k-1}{k+1} p_0 v_H - p_0 v_0 - \frac{2(k-1)}{k+1} Q_v = 0$$

由对一般二次曲线方程的判别得知, 这同样是一条双曲线, 但是不通过 (p_0, v_0) 点。图 6-1-5 中绘出了这条曲线。

令 $v_H = v_0$, 代入方程

$$p_H v_0 - \frac{k-1}{k+1} p_H v_0 + \frac{k-1}{k+1} p_0 v_0 - p_0 v_0 - \frac{2(k-1)}{k+1} Q_v = 0$$

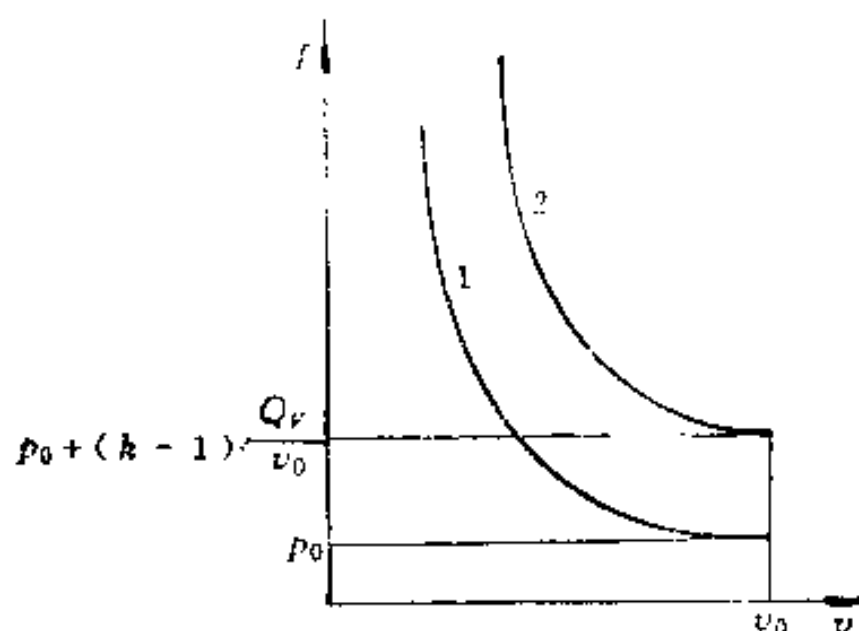


图6-1-5 冲击绝热线

1—冲击波的冲击绝热线；2—爆轰波的冲击绝热线。

整理后得到

$$p_H = p_0 + (k-1) \frac{Q_v}{v_0}$$

计算表示初始状态为 (p_0, v_0) 的爆轰波冲击绝热线，是通过横坐标为 v_0 、纵坐标为 $p_0 + \frac{(k-1)Q_v}{v_0}$ 的一条曲线，它位于冲击波冲击绝热线的上方，在横坐标 v_0 处纵坐标高出 $(k-1) \frac{Q_v}{v_0}$ 。

对于凝聚相炸药在 (6-1-6) 式可以分别代入凝聚相炸药初始状态和爆轰产物的内能表达式，进行确定冲击绝热线，确定的结果也符合上面的形式。

上面分析了冲击波冲击绝热线的性质，并分析了爆轰波冲击绝热线与冲击波冲击绝热线的关系，下面再讨论一下爆轰波冲击绝热线各部分所表示的物理意义。

如图 6-1-6 所示，过初始状态点 (p_0, v_0) 作竖直线和水平线，分别与爆轰波的冲击绝热线相交于 A 点和 B 点，将

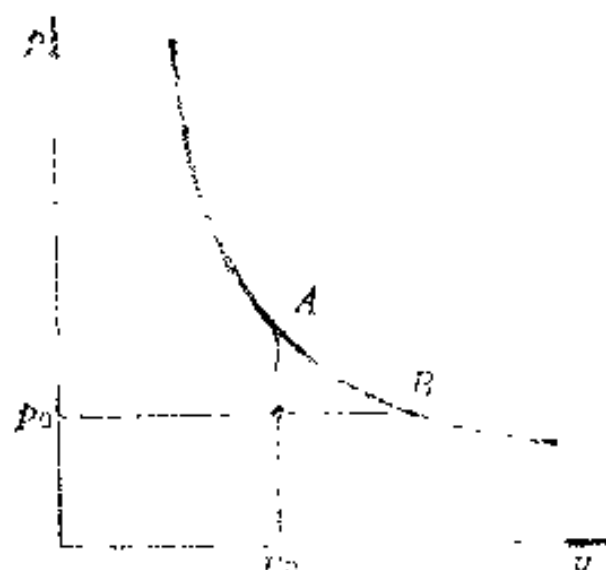


图6-1-6 爆轰波冲击绝热线的物理意义

A 以上一爆轰支，B 以下一燃烧支。

爆轰波冲击绝热线分成三段。

按照爆速和波后质点速度的表达式

$$D = v_0 \sqrt{\frac{p - p_0}{v_0 - v}}$$

$$u = (v_0 - v) \sqrt{\frac{p - p_0}{v_0 - v}}$$

对 A、B 两点和爆轰波冲击绝热线上的三段进行分析。

A 点： $v = v_0$ ， $p > p_0$ ， 按照公式 (6-1-4) 得

$$D \rightarrow \infty$$

表明 A 点对应于定容爆轰。

B 点： $p = p_0$ ， $v > v_0$ ， 按照公式 (6-1-4) 得

$$D = 0$$

表明 B 点对应于定压燃烧。

A 点以上线段： $p > p_0$ ， $v < v_0$ ， 按照公式 (6-1-4) 和 (6-1-5) 两式得

$$D > 0, \quad u > 0$$

说明 A 点以上线段各点满足波速为正值, 且产物质点运动方向与波传播方向一致, 具有爆轰的特征, 因而称为爆轰支。

B 点以下线段: $p < p_c$, $v > v_0$, 按照公式 (6-1-4) 和 (6-1-5) 两式得

$$D > 0, \quad u < 0$$

说明 B 点以下线段各点满足波速为正值, 且产物质点运动方向与波传播方向相反, 具有燃烧的特征, 因而称为燃烧支。

AB 线段: $p > p_c$, $v > v_0$, 其商值

$$\frac{D}{D_0 - v} < 0$$

按照公式 (6-1-4) 和 (6-1-5) 两式, D 和 u 都是虚数, 说明此线段不与任何实际过程相对应。

三、爆轰稳定传播的条件

由对爆轰波波速线和冲击绝热线的讨论得知, 爆轰波化学反应区末端面爆轰产物的状态必定既在波速线上, 而且又在冲击绝热线的爆轰支上,

如图 6-1-7 所示。

对于初始炸药状态为 (p_0, v_0) 的爆轰, 要求化学反应区末端面爆轰产物所达到的状态同时在这两条线上, 就会出现两种情况, 一种是波速线与冲击绝热线相交, 另一种是波速线与冲击绝热线相切, 相交有两个交点 K 和 L , 相切有一个切点

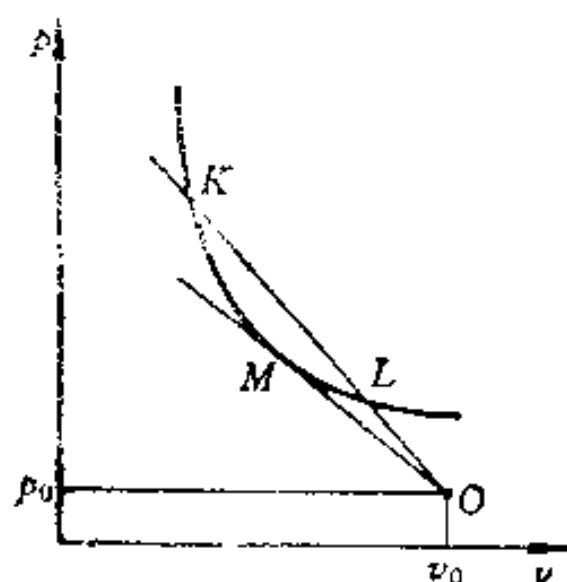


图6-1-7 波速线与冲击绝热线的相切和相交

M ，这三个点到底哪一个是爆轰产物所达到的终点状态呢？

1. 爆轰稳定传播条件表达式

爆轰波若能稳定传播，爆轰波化学反应区末端面产物的状态，是爆轰波波速线和冲击绝热线的切点对应的状态。这是柴普曼和茹盖各自研究的结果，因而切点 M 又称为C-J点。由于切点 M 的状态对应于稳定传播的爆轰波化学反应区末端产物的状态，因而爆轰波化学反应区末端面又称为C-J面，切点 M 所表示的状态又称为C-J状态。

C-J状态具有如下重要特点：弱扰动波在此状态下的传播速度，恰好等于爆轰波的传播速度。此状态是爆轰波化学反应区末端面的状态，从速度上来说，是产物质点具有速度 u_H 的状态，弱扰动波在此状态下的传播速度是此状态下的当地音速，即 $u_H + c_H$ ，所以可以写成

$$u_H + c_H = D \quad (6-1-8)$$

方程(6-1-8)是爆轰稳定传播条件，又称为C-J条件。

2. 爆轰稳定传播条件的物理意义

爆轰波在炸药中能够稳定传播的原因，完全在于化学反应供给能量，这个能量维持爆轰波毫不衰减地传播下去。倘若这个能量受到了损失，则爆轰波就会因缺乏能量而衰减。

爆轰波在炸药中传播过后，产物处于高温高压状态，但是此高温高压状态不能孤立存在，必定迅速发生膨胀。从力学观点来说，也就是从外界向高压产物传播进一系列的膨胀波，其膨胀波速度在化学反应区末端面上等于 $u_H + c_H$ 。

(1) $u_H + c_H = D$ ，意味着爆轰产物膨胀所形成的膨胀波传播至化学反应区末端面时，在此处与爆轰波的传播速度相等，因而无法再传入化学反应区内，化学反应区放出的能

量不会受到损失，全部用来支持爆轰波的运动，使爆轰波稳定传播。

(2) $u_H + c_H > D$ ，意味着从爆轰产物传入的膨胀波在化学反应区末端面上的速度，比爆轰波传播速度快，从而膨胀波可以进入化学反应区，使化学反应区膨胀而损失能量，这样化学反应放出的能量就不能全部用来支持爆轰波的运动，导致爆轰波衰减。

这种情况对应于图 6-1-7 中的 K 点，从图 6-1-7 可以看出 OK 线所对应的爆速比 OM 所对应的爆速大，由于膨胀波进入化学反应区，导致能量损失的结果，使爆速不断降低， OK 线的斜率 $\operatorname{tg} \varphi = \frac{D^2}{u_0^2}$ 不断下降，逐渐趋向 OM 线，以至最终与 OM 线重合，使爆轰达到稳定状态。

(3) $u_H + c_H < D$ ，意味着弱扰动速度小于爆速，这在实际中是不可能实现的。从力学观点来讲，在化学反应区内部，由于不断地层层进行化学反应放出热量，陆续不断地层层产生压缩波，此一系列压缩波向前传播，最终汇聚成为前沿冲击波。在弱扰动速度小于爆速的情况下，化学反应区内向前传播的压缩波无法达到前沿冲击波，因此前沿冲击波会脱离化学反应区而成为无能源的一般冲击波，所以传播过程中必然衰减。

这种情况对应于图 6-1-7 中的 L 点，因而既是由于某种原因达到了 L 点的状态，爆轰波也不能稳定传播。

通过上面的分析可明显看出，只有爆轰波的波速线和冲击绝热线相切点 M 所具有的条件

$$u_H + c_H = D$$

才是爆轰波稳定传播的条件。

3. 爆轰过程的描述

爆轰波是由前沿冲击波和紧跟在其后的化学反应区所组成。按照这种模型,如图 6-1-8 所示,当爆轰波沿炸药传播时,炸药首先受到前沿冲击波的强烈压缩,使炸药从初始状态 O 点立即上升到冲击波的冲击绝热线和波速线的交点状态 Z , 然后炸药在高温高压下迅速进行剧烈的化学反应,随着化学反应的进行,不断放出热量,化学反应区的产物也不断发生膨胀,使压力和密度不断下降,但是由于爆轰稳定传播的

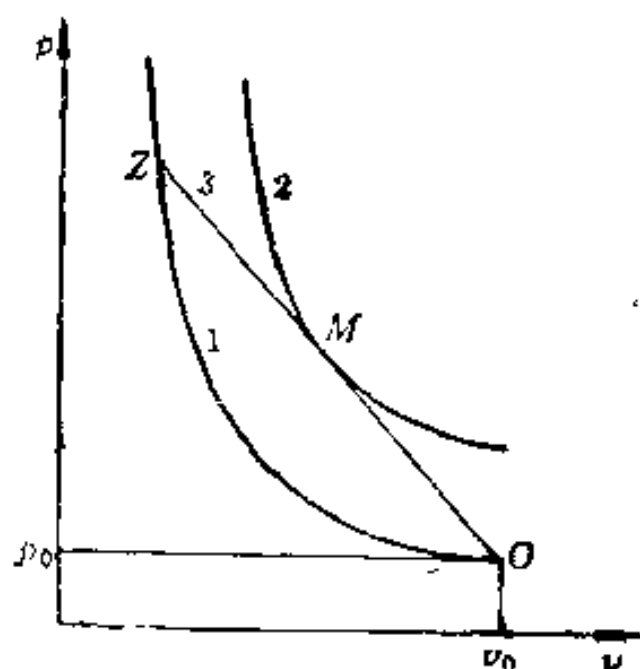


图6-1-8 爆轰过程

1—前沿冲击波冲击绝热线, 2—爆轰波冲击绝热线, 3—波速线。

速度不变,在图 6-1-8 上状态由 Z 点沿过切点 M 的波速线不断下降,当化学反应结束到达化学反应区末端面时,状态对应于爆轰波的冲击绝热线和波速线的切点 M ,按照 M 点的特点,爆轰稳定传播。

化学反应区末端面后,高温高压的爆轰产物不断膨胀,压力、密度、温度皆不断下降,它们在图 6-1-8 上没有对应点。

图 6-1-8 表示了爆轰过程中压力、密度、温度的变化。当炸药受到前沿冲击波的冲击压缩时,压力、密度和温度分别由 p_0 、 ρ_0 、 T_0 立即上升到 p_z 、 ρ_z 、 T_z ,随后由于化学反应生成气体的不断膨胀,在反应区内压力和密度就不断下降

(如图 6-1-9 a、b 所示)，至化学反应区末端面时，压力大约下降到前沿冲击波时压力的二分之一，密度大约下降到前沿冲击波时密度的三分之一，对于温度的变化是另外的规律，在化学反应过程中，由于不断放出热量，使化学反应区

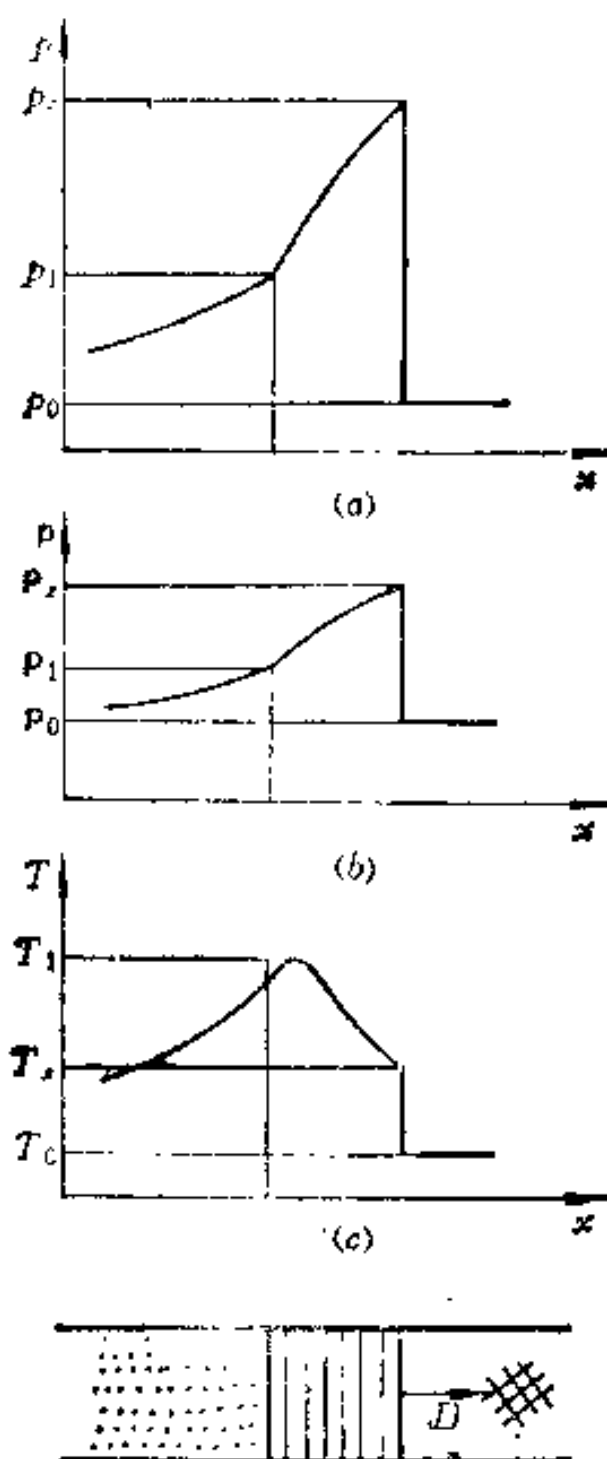


图6-1-9 爆轰过程中状态参数变化的规律
(a) 压强, (b) 密度, (c) 温度。

内的温度不断提高, (如图 6-1-9 c 所示), 当化学反应进行到接近化学反应区末端面时, 由于化学反应已经进行得差不多, 反应速度下降, 反应放出的热量减少, 以至不足以弥补因气体膨胀所造成的热损失, 因而在化学反应区末端面之前温度达到最大值, 而到达化学反应区末端面时温度有所下降。

化学反应区末端区后, 爆轰产物按照等熵膨胀的规律, 使产物气体的压力、密度、温度不断下降。

四、爆轰产物的状态方程

在三个守恒方程和爆轰稳定传播条件的前提下, 虽已有四个方程, 但是包含五个未知数: p_H, v_H, u_H, c_H, D 。因而, 为了确定爆轰产物所达到的状态, 还必须知道爆轰产物状态参数 p 、 ρ 、 T 之间所遵从的关系。

爆轰产物状态方程的研究, 是几十年来爆轰理论研究的一个主要课题, 开展了很多工作, 也有各种不同形式的状态方程, 关于这方面的内容, 不再作过多的阐述。

由于气体爆炸物和凝聚相炸药爆轰后, 爆轰产物有明显的不同, 因而需要采用不同的状态方程。下面对气体爆炸物和凝聚相炸药的爆轰参数计算, 分别进行研究。

§ 6-2 气相爆轰参数的计算

对于气相爆轰, 由于爆轰前、后都是气体, 我们可以近似假设爆轰前、后气体皆遵守理想气体状态方程

$$pv = RT$$

在理想气体条件下, 能量守恒方程

$$e_H - e_0 = \frac{1}{2} (p_H + p_0)(v_0 - v_H) + Q_v$$

可以化成

$$\frac{p_H v_H}{k_H - 1} - \frac{p_0 v_0}{k_0 - 1} = -\frac{1}{2} (p_H + p_0)(v_0 - v_H) + Q_v$$

并且, 由于厚壁压力很低, 即 $p_H \gg p_0$, 可略去 p_0 , 且写 $k_H = k$, 因而能量守恒方程为

$$\frac{1}{k} \frac{p_H v_H}{k_H - 1} = -\frac{1}{2} (p_H)(v_0 - v_H) + Q_v$$

另外, 假设爆轰产物的平均 mol 量为 M_H , 则爆轰产物的状态方程为

$$p_H v_H = \frac{1}{M_H} RT_H$$

这样一来, 气相爆轰的基本方程组为

$$D = v_0 \sqrt{\frac{p_H}{v_0 - v_H}} \quad (6-2-1)$$

$$u_H = (v_0 - v_H) \sqrt{\frac{p_H}{v_0 - v_H}} \quad (6-2-2)$$

$$\frac{p_H v_H}{k - 1} = -\frac{1}{2} p_H (v_0 - v_H) + Q_v \quad (6-2-3)$$

$$u_H + c_H = D \quad (6-2-4)$$

$$p_H v_H = \frac{1}{M_H} RT_H \quad (6-2-5)$$

为了获得各个参数, 必须解这个方程组。

首先将音速方程

$$c_H = \sqrt{k p_H v_H}$$

和 (6-2-1)、(6-2-2) 式皆代入 (6-2-4) 式得

$$\sqrt{k p_H v_H} = v_H \sqrt{\frac{p_H}{v_0 - v_H}}$$

两边平方

$$k p_H v_H = \frac{p_H v_H^2}{v_0 - v_H}$$

$$k(v_0 - v_H) = v_H$$

所以得到爆轰产物的比容

$$v_H = \frac{k}{k+1} v_0$$

或者密度

$$\rho_H = \frac{k+1}{k} \rho_0 \quad (6-2-6)$$

将 (6-2-6) 式代入 (6-2-1) 式, 得爆轰产物压力

$$p_H = \frac{1}{k+1} \rho_0 D^2 \quad (6-2-7)$$

将 (6-2-6)、(6-2-7) 式代入 (6-2-2) 式, 得产物质点速度

$$u_H = \frac{1}{k+1} D \quad (6-2-8)$$

将 (6-2-8) 代入 (6-2-4) 式, 得产物音速

$$c_H = \frac{k}{k+1} D \quad (6-2-9)$$

将 (6-2-6)、(6-2-7) 代入 (6-2-5) 式, 得产物温度

$$T_H = \frac{k M_H D^2}{(k+1)^2 R} \quad (6-2-10)$$

将 (6-2-6)、(6-2-7) 式代入 (6-2-3) 式, 得爆速和爆热的关系

$$D = \sqrt{2(k^2 - 1)Q_v} \quad (6-2-11)$$

(6-2-6)~(6-2-11) 式是计算气相爆轰参数的公式。运用这些公式时，必须明确各个符号的物理意义，并且一定要特别注意到它们的单位，现将注意点以及有关量的计算说明一下。

1. 带驻脚“H”的参数，皆是爆轰波化学反应区末端面的参数；带驻脚“0”的参数，皆是未爆气体的参数。并且注意：

Q_v 是爆热，可以按第四章中计算爆热的方法进行计算；

T_H 不是第四章定义的爆温，而是化学反应区末端面的温度，不能用第四章计算爆温的方法进行计算；

k 是爆轰产物总的比热比；

M_H 是爆轰产物的平均 mol 量。

2. k 值计算

k 是在化学反应区末端面上爆轰产物的比热比，其值与爆轰产物的组成有关，又与化学反应区末端面上的温度有关。

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{\sum n_i \bar{c}_{pi}}{\sum n_i \bar{c}_{vi}} = \frac{\sum n_i \bar{c}_{vi} + (\sum n_i) R}{\sum n_i \bar{c}_{vi}} \\
 &= 1 + \frac{(\sum n_i) R}{\sum n_i \bar{c}_{vi}} \quad (6-2-12)
 \end{aligned}$$

式中 n_i ——产物各组分的 mol 数；

$\bar{c}_{vi}$ ——产物各组分的平均定容比热；

R ——气体常数。

计算 k 的步骤：

第一步 首先假定 t_H' ，用二项式公式

$$\bar{c}_v = a + bt$$

计算各产物组分的平均比热 $\bar{c}_{vi}$ ，相加后得到爆轰产物的总热

容量 $\sum n_i \bar{c}_{vi}$

第二步 应用 (6-2-12) 式计算 k ;

第三步 将求得的 k 代入 (6-2-10), 在已知爆速 D 的条件下, 可以计算出 T_H ; 假若在爆速 D 未知, 而爆热 Q_v 已知的条件下, 可以通过 (6-2-10) 和 (6-2-11) 连立解出的表达式

$$T_H = \frac{2k(k-1)M_H Q_v}{(k+1)R} \quad (6-2-13)$$

计算出 T_H 。

假若计算出的 T_H 和假定的 T'_H 相近, 则 k 为所求, 否则需要重复上述过程, 重新进行计算。

3. M_H 的计算

M_H 是在化学反应区末端面上爆轰产物的平均 mol 量, 其值等于产物的总质量除以产物的总 mol 数。

$$M_H = \frac{\sum_{i=1}^K n_i M_i}{\sum_{i=1}^K n_i} \quad (6-2-14)$$

式中 n_i ——产物各组分的 mol 数;

M_i ——产物各组分的 mol 量;

$\sum_{i=1}^K n_i$ ——产物总的 mol 数。

4. ρ_0 的计算

ρ_0 是爆炸前气体爆炸物的平均密度, 其值等于气体爆炸物的质量除以所占据的体积。

$$\rho_g = \frac{\sum_{j=1}^{L_g} n_j M_j}{22.4 \sum_{j=1}^{L_g} n_j} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (6-2-15)$$

式中 n_j —— 气体爆炸物各组分的 mol 数;

M_j —— 气体爆炸物各组分的 mol 量;

$\sum n_j$ —— 气体爆炸物总的 mol 数;

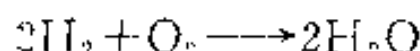
22.4 —— 1 mol 气体的体积 22.4 L/mol。

「例 2-1」 计算氢、氧混合物爆炸的各爆炸参数。

解

1. 确定爆炸反应方程式和爆热

氢、氧爆炸反应方程式



查表 4-4-1, 18°C 时各组分生成热

$$Q_{fR\text{H}_2} = 0, \quad Q_{fR\text{O}_2} = 0, \quad Q_{fR\text{H}_2\text{O}} = 241.8 \times 10^3 \text{ J/mol}$$

计算

$$\begin{aligned} Q_p &= \sum_{i=1}^K n_i Q_{pRi} - \sum_{j=1}^L n_j Q_{pRj} \\ &= 2 \times 241.8 \times 10^3 - 0 \\ &= 483.6 \times 10^3 (\text{J}/2\text{H}_2 + \text{O}_2) \\ Q_v &= Q_p + 2.419 \times 10^3 \Delta n \\ &= 483.6 \times 10^3 + 2.419 \times 10^3 \\ &\quad \times [2 - (2 + 1)] \\ &= 481.181 \\ &\quad \times 10^3 (\text{J}/2\text{H}_2 + \text{O}_2) \\ &= 13.366 \times 10^8 (\text{J/kg}) \end{aligned}$$

2. 计算 k 值假定 $T_H' = 4500^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}\bar{c}_{v\text{H}_2\text{O}} &= 16.74 + 9 \times 10^{-8} \times 4500 \\ &= 57.24\end{aligned}$$

按照 (6-2-12) 式

$$\begin{aligned}k &= 1 + \frac{(\sum n_i)R}{\sum n_i \bar{c}_{vi}} \\ &= 1 + \frac{2 \times 8.314}{2 \times 57.24} \\ &= 1.145\end{aligned}$$

由于已知爆热, 又知产物的平均 mol 量, 按照 (6-2-13) 式

$$\begin{aligned}T_H &= \frac{2k(k-1)M_H Q_V}{(k+1)R} \\ &= \frac{2 \times 1.145 \times (1.145 - 1) \times 18 \times 10^{-8} \times 13.366 \times 10^6}{(1.145 + 1) \times 8.314} \\ &= 4480(\text{K})\end{aligned}$$

与所假定的 T_H' 相差近 300 K, 需要重新假设温度进行计算, 获得

$$T_H = 4600\text{K}$$

$$k = 1.149$$

3. 计算 ρ_0 。按照 (6-2-15) 式

$$\begin{aligned}\rho_0 &= \frac{\sum_{j=1}^L n_j M_j}{22.4 \sum_{j=1}^L n_j} = \frac{2 \times 2 + 1 \times 32}{22.4 \times (2 + 1)} \\ &= 0.536(\text{kg/m}^3)\end{aligned}$$

4. 计算 D 。按照 (6-2-11) 式

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{2} (\bar{k}^2 - 1) \bar{Q}_V \\ &= \sqrt{2} \times (1.149^2 - 1) \times 13.336 \times 10^3 \\ &= 2922 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

5. 计算 ρ_H 。按照 (6-2-6) 式

$$\begin{aligned} \rho_H &= \frac{k+1}{k} \rho_0 \\ &= \frac{1.149+1}{1.149} \times 0.536 \\ &= 1.002 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

6. 计算 p_H 。按照 (6-2-7) 式

$$\begin{aligned} p_H &= \frac{1}{k+1} \rho_0 D^2 \\ &= \frac{1}{1.149+1} \times 0.536 \times 2922^2 \\ &= 21.30 \times 10^5 (\text{Pa}) \end{aligned}$$

7. 计算 u_H 。按照 (6-2-8) 式

$$\begin{aligned} u_H &= \frac{1}{k+1} D \\ &= \frac{1}{1.149+1} \times 2922 \\ &= 1360 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

8. 计算 c_H 。按照 (6-2-9) 式

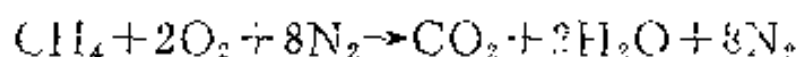
$$\begin{aligned} c_H &= \frac{k}{k+1} D \\ &= \frac{1.149}{1.149+1} \times 2922 \\ &= 1562 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

〔例 6-2〕 甲烷与空气混合爆炸，计算各爆轰参数。

解

1. 确定爆炸反应方程式和爆热

甲烷的分子式 CH_4 ，空气按 20% 的 O_2 和 80% 的 N_2 组成，按照最大放热组成爆炸混合物



按照表 4-4-1，查得各组分的定压生成热 ($\text{J/mol} \times 10^3$)：

O_2	N_2	CH_4	CO_2	H_2O
0	0	76.6	395.4	241.8

$$Q_p = \sum_{i=1}^K n_i Q_{fRi} - \sum_{j=1}^L n_j Q_{fRj}$$

$$= (395.4 + 2 \times 241.8) \times 10^3 - 76.6 \times 10^3$$

$$= 802.4 \times 10^3 (\text{J}/\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{N}_2)$$

$$Q_v = Q_p + 2.419 \times 10^3 \Delta n$$

$$= 802.4 \times 10^3 + 2.419 \times 10^3 \times [(1 + 2 + 8) - (1 + 2 + 8)]$$

$$= 802.4 \times 10^3 (\text{J}/\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{N}_2)$$

$$= 2.639 \times 10^6 (\text{J}/\text{kg})$$

2. 计算 k 值

假设 $T_H = 2500^\circ\text{C}$ ，计算

$$\bar{c}_{v\text{CO}_2} = 41.00 + 2.43 \times 10^{-5} \times 2500 = 47.08$$

$$\bar{c}_{v\text{H}_2\text{O}} = 16.74 + 9 \times 10^{-5} \times 2500 = 39.23$$

$$\bar{c}_{v\text{N}_2} = 20.08 + 1.88 \times 10^{-5} \times 2500 = 24.78$$

$$\begin{aligned}
 k &= 1 + \frac{\sum n_i R}{\sum n_i \bar{c}_{vi}} \\
 &= 1 + \frac{(1 + 2 + 8) \times 8.314}{1 \times 47.08 + 2 \times 39.23 + 8 \times 24.78} \\
 &= 1.282
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_H &= \frac{1 \times 44 + 2 \times 18 + 8 \times 28}{1 + 2 + 8} \\
 &= 27.61
 \end{aligned}$$

按照 (6-2-13) 式

$$\begin{aligned}
 T_H &= \frac{2k(k-1)M_H Q_v}{(k+1)R} \\
 &= \frac{2 \times 1.282 \times (1.282 - 1) \times 27.61 \times 10^{-3} \times 2639 \times 10^3}{(1.282 + 1) \times 8.314} \\
 &= 2780(\text{K})
 \end{aligned}$$

比较 T_H 和 T'_H , 仅相差 7°C , 符合精确程度的要求, 因而取 $T_H = 2780\text{K}$, $k = 1.282$ 。

3. 计算 ρ_0 。按照 (6-2-15) 式

$$\begin{aligned}
 \rho_0 &= \frac{\sum_{j=1}^L n_j M_j}{22.4 \sum_{j=1}^L n_j} = \frac{1 \times 16 + 2 \times 32 + 8 \times 28}{22.4 \times (1 + 2 + 8)} \\
 &= 1.234(\text{kg/m}^3)
 \end{aligned}$$

4. 计算 D 。按照 (6-2-11) 式

$$\begin{aligned}
 D &= \sqrt{2(k^2 - 1)Q_v} \\
 &= \sqrt{2 \times (1.282^2 - 1) \times 2.639 \times 10^6} \\
 &= 1843(\text{m/s})
 \end{aligned}$$

5. 计算 p_H 、 ρ_H 、 u_H 、 c_H 按照 (6-2-6)~(6-2-9) 四式

$$\begin{aligned} p_H &= \frac{1}{k+1} \rho_0 D^2 \\ &= \frac{1}{1.282+1} \times 1.234 \times 1843^2 \\ &= 18.38 \times 10^6 (\text{Pa}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_H &= \frac{k+1}{k} \rho_0 \\ &= \frac{1.282+1}{1.282} \times 1.234 \\ &= 2.197 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_H &= \frac{1}{k+1} D \\ &= \frac{1}{1.282+1} \times 1843 \\ &= 868 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_H &= \frac{k}{k+1} D \\ &= \frac{1.282}{1.282+1} \times 1843 \\ &= 1035 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

上面进行了气体爆炸物爆轰参数计算的全步骤，一般说来只要知道了爆炸物的组成和爆炸反应方程式，就可以将全部爆轰参数都计算出来。

§ 6-3 凝聚相炸药爆轰参数近似理论计算

所谓凝聚相炸药是指固体和液体炸药。这种炸药经常在军、民用爆炸上使用，它与气体爆炸物相比，凝聚炸药密度大，爆速大，爆压大，因而爆炸威力大。

一、爆轰产物的状态方程

凝聚相炸药的爆轰与气相爆轰一样，遵从三大守恒定律和爆轰波稳定传播条件。但是，由于凝聚炸药初始密度大，爆轰反应终了产物的压力高达 10^{10} Pa以上，产物密度达 $2\text{g}/\text{cm}^3$ 以上，温度达 10^4 K以上，显然在这样的条件下，再采用不考虑分子间相互作用力的理想气体状态方程就不合适，因而需要寻求合适地描述爆轰产物参数间关系的状态方程。

由于凝聚炸药爆轰产物密度很大，对于产物压强不仅要考虑由于分子热运动所造成的压强分量，还要考虑由于分子的相互作用所造成的压强分量，因而可以写成

$$p = p_k(v) + p_T(v, T) \quad (6-3-1)$$

式中右端第一项是因分子间相互作用所造成的压强分量，它与比容有关；第二项是因分子热运动所造成的压强分量，它与温度和比容有关。

由物理学的概念得知，对于分子间的相互作用力，有引力和斥力之分。当分子间的距离很大时，分子间的作用力显示不出来，随着分子间距离的缩小，作用力逐渐显示出来，起初引力占优势；随着分子间距离的进一步缩小，斥力不断加大；当分子间距离小到一定程度之后，分子间的斥力成为主要量。对于凝聚炸药爆轰产物来说，由于密度很大，分子间的距离很小，引力部分可以忽略，只考虑斥力部分，这时可写为

$$p_k(v) = Av^{-\gamma}$$

分子热运动所造成的压强与温度成正比，与比容成反比，可以写作

$$p_r(v, T) = B \frac{T}{v}$$

因而，状态方程通常为

$$p = Av^{-\gamma} + \frac{BT}{v} \quad (6-3-2)$$

式中 A 、 B 、 γ 是与炸药性质有关的常数。

(6-3-2)式右端的两项分别是由分子间的相互作用和分子热运动所造成的。

当密度降低时，(6-3-2)式右端第一项迅速减小而趋近于零。对于理想气体，不考虑分子间相互作用力，并且常数 B 就是 R ，符合理想气体状态方程

$$p = \frac{RT}{v}$$

当密度增加时，(6-3-2)式右端第一项很快增大。对于凝聚炸药爆轰产物，可以认为它比第二项大得很多，以至相比之下第二项可以忽略，所以凝聚炸药爆轰产物的状态方程，可以近似写成

$$p = Av^{-\gamma}$$

$$\text{或} \quad pv^{\gamma} = A \quad (6-3-3)$$

(6-3-3)式表明，当爆轰产物由状态 1 变化到状态 2 时，其压强与比容 γ 次方的乘积保持不变，即

$$p_1 v_1^{\gamma} = p_2 v_2^{\gamma}$$

由于表达式中压强 p 与温度 T 没有关系，故(6-3-3)式又称为爆轰产物的等熵方程，指数 γ 称为爆轰产物的多方指数，或称为爆轰产物的等熵指数，俗称为 γ 值。

按照状态方程，对于爆轰产物相邻两个状态的参数，应当满足

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \left(\frac{p + \Delta p}{\rho + \Delta \rho} \right)^\gamma = A$$

对于前一个状态

$$p = A \rho^\gamma$$

对于后一个状态

$$p + \Delta p = A (\rho + \Delta \rho)^\gamma = A [\rho^\gamma + \gamma \rho^{\gamma-1} \Delta \rho + \frac{\gamma(\gamma-1)}{2!} \rho^{\gamma-2} (\Delta \rho)^2 + \dots]$$

略去二阶以上的高阶小量，为

$$p + \Delta p = A \rho^\gamma + A \gamma \rho^{\gamma-1} \Delta \rho$$

两个状态的压强差

$$\Delta p = A \gamma \rho^{\gamma-1} \Delta \rho$$

则
$$\frac{\Delta p}{\Delta \rho} = A \gamma \rho^{\gamma-1} = \gamma \frac{p}{\rho}$$

再按照音速公式 $c = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}}$ ，所以对于凝聚相炸药的爆轰产物，音速公式为

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \quad (6-3-4)$$

二、爆轰参数的近似计算

对于凝聚相炸药的爆轰过程，遵从三大守恒定律，也就是说符合方程(6-1-1)~(6-1-3)。但是由于在高温、高压、高密度下，爆轰产物的内能表达式很繁，不易处理；即使进行大量地简化处理后，与实测值也相差很远。因而，不用能量守恒方程，只是采用质量守恒、动量守恒、爆轰稳定条件和状态方程，在与爆压 p_u 相比忽略初始压力 p_0 的条件下，基本

方程组可以写为

$$D = v_0 \sqrt{\frac{p_H}{v_0 - v_H}} \quad (6-3-5)$$

$$u_H = (v_0 - v_H) \sqrt{\frac{p_H}{v_0 - v_H}} \quad (6-3-6)$$

$$u_H + c_H = D \quad (6-3-7)$$

$$c_H = \sqrt{\gamma p_H v_H} \quad (6-3-8)$$

四个方程、五个未知数，不可能完全解出，而只能通过一个未知数作为参量，来表达其它各量。

将(6-3-5)、(6-3-6)、(6-3-8)代入(6-3-7)式

$$(v_0 - v_H) \sqrt{\frac{p_H}{v_0 - v_H}} + \sqrt{\gamma p_H v_H} = v_0 \sqrt{\frac{p_H}{v_0 - v_H}}$$

移项、化简后得

$$\sqrt{\gamma v_H (v_0 - v_H)} = v_H$$

平方、化简且整理后得到产物比容

$$v_H = \frac{\gamma}{\gamma + 1} v_0$$

或者密度

$$\rho_H = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \rho_0 \quad (6-3-9)$$

由(6-3-9)和方程组中的各式，很容易得到用爆速所表示的产物压强、质点速度和音速

$$p_H = \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 \quad (6-3-10)$$

$$u_H = \frac{1}{\gamma + 1} D \quad (6-3-11)$$

$$c_H = \frac{\gamma}{\gamma + 1} D \quad (6-3-12)$$

公式(6-3-9)~(6-3-12)与气体爆炸物的爆轰参数计算公式(6-2-6)~(6-2-9)完全一致,原因在于凝聚相炸药爆轰产物采用的近似状态方程 $pv^\gamma = A$,与气体爆炸物爆轰产物采用的理想气体等熵关系 $pv^k = A$ 是一致的。但是,要注意到 γ 与 k 不仅数值不同,而且含意也不同, k 是气体爆炸物爆轰中产物的比热比, γ 是凝聚相炸药爆轰中产物简化状态方程的幂指数。

对于凝聚相炸药, γ 值一般可以近似取作 $\gamma = 3$ 。

对于碳、氢、氧、氮组成的炸药,也可以按照下列公式近似地确定 γ 值

$$\gamma = \frac{\sum n_i}{\sum \left(\frac{n_i}{\gamma_i} \right)} \quad (6-3-13)$$

式中 n_i ——爆轰产物中某个组分的 mol 数;

γ_i ——爆轰产物中某个组分的多方指数。表6-3-1给出了几种产物组分的多方指数。

表6-3-1 几种爆轰产物的 γ_i

产物组分	γ_i	产物组分	γ_i
H ₂ O	1.90	O ₂	2.45
CO ₂	4.50	N ₂	3.70
CO	2.85	C	3.55

另外,对于凝聚相炸药爆轰,化学反应区末端面的温度可以采用经验公式计算

$$T_H = 4.8 \frac{p_H}{\rho_H} \left(\frac{1}{\rho_H} - 0.20 \right) M_H \quad (6-3-14)$$

式中 p_H 、 ρ_H 、 T_H 分别是化学反应区末端面的值，其单位分别采用 10^8Pa 、 g/cm^3 和 K ， M_H 是爆轰产物平均 mol 量。

〔例6-3〕黑索金炸药装药密度 $\rho_0 = 1.75 \text{g/cm}^3$ 时，爆速 $D = 8600 \text{m/s}$ ，计算爆轰参数。

解

1. 确定 γ 值

按照黑索金炸药的爆炸反应方程式



由(6-3-13)式计算

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\sum n_i}{\sum \left(\frac{n_i}{\gamma_i} \right)} \\ &= \frac{3 + 3 + 3}{\frac{3}{1.9} + \frac{3}{2.85} + \frac{3}{3.70}} = 2.6 \end{aligned}$$

2. 计算 ρ_H ，按照(6-3-9)式

$$\begin{aligned} \rho_H &= \frac{\gamma + 1}{\gamma} \rho_0 = \frac{2.6 + 1}{2.6} \times 1.75 \\ &= 2.42 (\text{g/cm}^3) \end{aligned}$$

3. 计算 p_H ，按照(6-3-10)式

$$\begin{aligned} p_H &= \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 \\ &= \frac{1}{2.6 + 1} \times 1.75 \times 10^3 \times 8600^2 \\ &= 36.0 \times 10^9 (\text{Pa}) \end{aligned}$$

4. 计算 u_H ，按照(6-3-11)式

$$u_H = \frac{1}{\gamma + 1} D = \frac{1}{2.6 + 1} \times 8600 \\ = 2389(\text{m/s})$$

5. 计算 c_H , 按照(6-3-12)式

$$c_H = \frac{\gamma}{\gamma + 1} D = \frac{2.6}{2.6 + 1} \times 8600 \\ = 6211(\text{m/s})$$

6. 计算 T_H , 按照(6-3-14)式

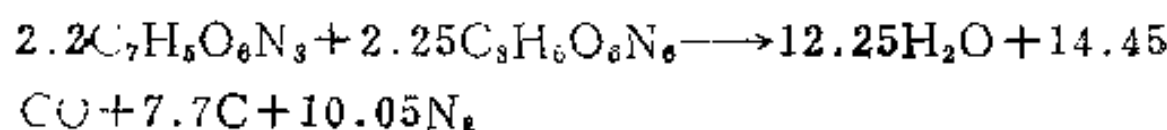
$$T_H = 4.8 \frac{p_H}{\rho_H} \left(\frac{1}{\rho_H} - 0.20 \right) M_H \\ = 4.8 \times \frac{360}{2.42} \times \left(\frac{1}{2.42} - 0.2 \right) \\ \times \frac{3 \times 18 + 3 \times 28 + 3 \times 28}{3 + 3 + 3} = 3756(\text{K})$$

〔例5-4〕 梯恩梯 50/黑索金 50 炸药装药 $\rho_0 = 1.6 \text{g/cm}^3$, $D = 7500 \text{m/s}$, 计算爆轰参数。

解

1. 确定 γ 值

按 1 公斤梯恩梯 50/黑索金 50 炸药的爆炸反应方程式



由(6-3-13)式计算

$$\gamma = \frac{\sum n_i}{\sum \left(\frac{n_i}{\gamma_i} \right)} \\ = \frac{12.25 + 14.45 + 7.7 + 10.05}{\frac{12.25}{1.90} + \frac{14.45}{2.85} + \frac{7.7}{3.55} + \frac{10.05}{3.70}} = 2.71$$

2. 按照公式(6-3-9)~(6-3-12)计算 ρ_H 、 p_H 、 u_H 和 c_H

$$\begin{aligned}\rho_H &= \frac{\gamma + 1}{\gamma} \rho_0 \\ &= \frac{2.71 + 1}{2.71} \times 1.6 = 2.19 (\text{g/cm}^3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_H &= \frac{\gamma}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 \\ &= \frac{1}{2.71 + 1} \times 1.6 \times 10^3 \times 7500^2 \\ &= 24.2 \times 10^8 (\text{Pa})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}u_H &= \frac{1}{\gamma + 1} D \\ &= \frac{1}{2.71 + 1} \times 7500 = 2022 (\text{m/s})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}c_H &= \frac{\gamma}{\gamma + 1} D \\ &= \frac{2.71}{2.71 + 1} \times 7500 = 5478 (\text{m/s})\end{aligned}$$

3. 按照经验式(6-3-14)计算 T_H

$$\begin{aligned}T_H &= 4.8 \frac{p_H}{\rho_H} \left(-\frac{1}{\rho_H} - 0.20 \right) M_H \\ &= 4.8 \frac{242}{2.19} \left(-\frac{1}{2.19} - 0.20 \right) \\ &\quad \cdot \frac{12.25 \times 18 + 14.45 \times 28 + 7.7 \times 12 + 10.05 \times 28}{12.25 + 14.45 + 7.7 + 10.05} \\ &= 3060 (\text{K})\end{aligned}$$

§ 6-4 瞬 时 爆 轰

正常爆轰考虑爆轰波在炸药中传播的过程。当爆轰波到

达装药的某个位置时，该位置的参数立即由炸药的初始状态上升到爆轰终了状态，这时产物的压力、密度、音速和质点速度皆达到化学反应区末端面上的值 p_H 、 ρ_H 、 C_H 和 u_H ；当爆轰波过后，由于爆轰产物的剧烈膨胀，产物的压力、密度、音速和质点速度迅速衰减。

瞬时爆轰不考虑爆轰波在炸药中传播的过程，假想爆轰在整个炸药上瞬时完成，产物的压力、密度、音速和质点速度同时在整个炸药上达到均匀值。

瞬时爆轰是一种简化问题的方法，这种方法在实际问题中经常用到。例如，炸药在封闭容器内爆炸时，由于波系在容器壁面上来回地反射，状态很快趋近于均匀值，爆轰产物的密度等于炸药初始密度，产物的质点速度等于零，产物的压力和音速皆为容器内爆轰产物均匀化后的值。

瞬时爆轰的爆轰参数值和正常爆轰的爆轰参数值不同，但是它们能量来源相同，都是来自于炸药爆炸放出的热量 Q_v ，按照能量守恒方程

$$e - e_0 = -\frac{1}{2} (p + p_0)(v_0 - v) + Q_v$$

在采用简化状态方程

$$p = A\rho^\gamma$$

以及忽略热内能的前提下，内能的形式可以写为

$$e = \frac{pv}{\gamma - 1}$$

忽略初始压力 p_0 后，能量守恒方程为

$$\frac{pv}{\gamma - 1} = -\frac{1}{2} p(v_0 - v) + Q_v \quad (6-4-1)$$

对于正常爆轰，将 $v_H = \frac{\gamma}{\gamma + 1} v_0$ 代入(6-4-1)式得到

$$-\frac{p_H}{\gamma-1} - \frac{\gamma}{\gamma+1} v_0 = -\frac{1}{2} p_H \left(v_0 - \frac{\gamma}{\gamma+1} v_0 \right) + Q_v$$

移项、整理后, 得到爆压 p_H 与爆热的关系

$$p_H = 2(\gamma-1)\rho_0 Q_v \quad (6-4-2)$$

对于瞬时爆轰, 将 $v_m = v_0$ 代入(6-4-1)式得到

$$-\frac{p_m}{\gamma-1} v_0 = -\frac{1}{2} p_m (v_0 - v_0) + Q_v$$

整理后得到爆压 p_m 与爆热的关系

$$p_m = (\gamma-1)\rho_0 Q_v \quad (6-4-3)$$

对照(6-4-2)式和(6-4-3)式可以获得

$$p_m = \frac{1}{2} p_H$$

或者写成

$$p_m = \frac{1}{2(\gamma-1)} \rho_0 D^2 \quad (6-4-4)$$

公式(6-4-4)表明: 瞬时爆轰时爆轰产物的压力是正常爆轰时化学反应区末端面上爆轰产物压力的一半。

按照爆轰产物的音速公式

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$$

将压力、密度代入瞬时爆轰的值

$$p_m = \frac{1}{2(\gamma-1)} \rho_0 D^2, \quad \rho_m = \rho_0$$

则可以得到瞬时爆轰时产物的音速

$$c_m = \sqrt{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}} D \quad (6-4-5)$$

(6-4-4)和(6-4-5)式中的 D , 仍作为炸药的爆速。

为了比较瞬时爆轰和正常爆轰的差别, 现将两种情况下爆轰参数的计算公式列于表6-4-1。

表6-4-1 爆轰参数计算公式

爆轰参数	正常爆轰	瞬时爆轰
p	$-\frac{1}{\gamma+1} \rho_0 D^2$	$\frac{1}{2(\gamma+1)} \rho_0 D^2$
ρ	$-\frac{\gamma+1}{\gamma} \rho_0$	ρ_0
u	$-\frac{1}{\gamma+1} D$	0
c	$-\frac{\gamma}{\gamma+1} D$	$\sqrt{\frac{\gamma}{2(\gamma+1)}} D$

当将爆轰产物的多方指数 γ 取作 3 时, 正常爆轰和瞬时爆轰的公式可以得到简化(见表6-4-2), 这是在初步计算凝聚相炸药爆轰时经常采用的公式。

表6-4-2 $\gamma = 3$ 时爆轰参数计算公式

爆轰参数	正常爆轰	瞬时爆轰
p	$-\frac{1}{4} \rho_0 D^2$	$\frac{1}{8} \rho_0 D^2$
ρ	$-\frac{4}{3} \rho_0$	ρ_0
u	$-\frac{1}{4} D$	0
c	$-\frac{3}{4} D$	$\sqrt{\frac{3}{8}} D$

〔例6-5〕 封闭容器(例如炮弹弹体)内装填梯恩梯炸药, 已知装药密度 $\rho_0 = 1.55 \text{ g/cm}^3$, 爆速 $D = 6700 \text{ m/s}$, 试计算

壳体膨胀所受到的初始压力，以及壳体内爆轰产物的其它参数。

解 炸药在容器内爆炸后，爆轰产物迅速均匀化，然后容器壳体在均匀化的爆轰产物作用下进行膨胀，因而可以用瞬时爆轰计算。

当取 $\gamma = 3$ 时，壳体膨胀所受到的初始压力

$$\begin{aligned} p_m &= \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \\ &= \frac{1}{8} \times 1.55 \times 10^3 \times 6700^2 \\ &= 8.7 \times 10^9 (\text{Pa}) \end{aligned}$$

壳体未膨胀时产物的密度、质点速度和音速分别为

$$\begin{aligned} \rho_m &= \rho_0 = 1.55 (\text{g/cm}^3) \\ u_m &= 0 \end{aligned}$$

$$c_m = \sqrt{\frac{8}{3}} D = \sqrt{\frac{8}{3}} \times 6700 = 4103 (\text{m/s})$$

§ 6-5 爆速和爆压的工程计算

炸药的爆速和爆压是两个很重要的爆轰参数。而在理论计算方面，由于精确描述高温高压爆轰产物各参数间相互关系的状态方程不容易确定，因而难于进行精确计算；上述简化理论计算中，只解决了爆压与爆速间的函数关系，并没有提出爆速计算的方法，所以在实际应用中也非常不方便。

康姆莱特等人对于碳、氢、氧、氮类型的炸药进行了大量的研究分析，提出了爆速和爆压计算的经验公式，此公式适用于装药密度 $\rho_0 > 1 \text{g/cm}^3$ 的条件之下，经验公式为

$$\left. \begin{aligned} p_e &= 7.617 \times 10^8 \varphi \rho_0^2 \\ D &= 0.706 \varphi^{1/2} (1 + 1.30 \rho_0) \\ \varphi &= NM^{1/2} Q^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (6-5-1)$$

式中 p_e ——正常爆轰时爆轰压力，单位Pa；

D ——炸药的爆速，单位km/s；

ρ_0 ——装药密度，单位g/cm³；

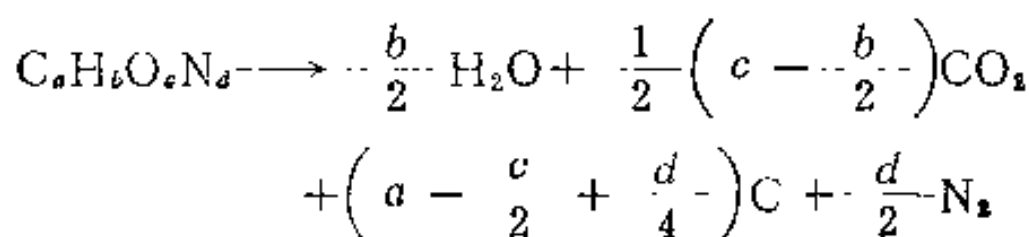
M ——爆轰产物中，气体组分的平均mol量，单位g/mol；

N ——1g炸药爆炸所形成气体的mol数，单位mol/g；

Q_{PR} ——炸药的定压生成热，单位J/g。

由于经验公式的系数是在规定单位条件下获得的，因而采用经验公式进行计算时，必须按照规定单位代入数据。

N 、 M 、 Q 是在最大放热条件下获得的，即炸药中的氧首先将氢生成H₂O，余下的氧将碳生成CO₂，由于常用炸药一般都是负氧炸药，所以爆炸反应方程式可以写成为



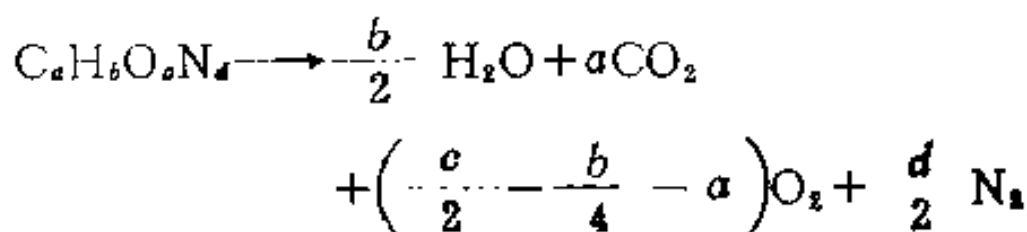
按照 N 、 M 、 Q 的定义，计算

$$\begin{aligned} N &= \frac{\text{气体产物mol数}}{\text{炸药克数}} \\ &= \frac{\frac{b}{2} + \frac{1}{2} \left(c - \frac{b}{2} \right) + \frac{d}{2}}{12a + b + 16c + 14d} \\ &= \frac{2c + 2d + b}{48a + 4b + 64c + 56d} \quad (6-5-2a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{\text{气体产物克数}}{\text{气体产物mol数}} \\
 &= \frac{\frac{b}{2} \times 44 + \frac{1}{2} \left(c - \frac{b}{2} \right) \times 44 + \frac{d}{2} \times 28}{\frac{b}{2} + \frac{1}{2} \left(c - \frac{b}{2} \right) + \frac{d}{2}} \\
 &= \frac{88c + 56d - 8b}{2c + 2d + b} \quad (6-5-2b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{\text{定压反应放热量(J)}}{\text{炸药克数}} \\
 &= \frac{\left[\frac{b}{2} \times 241.8 + \frac{1}{2} \left(c - \frac{b}{2} \right) \times 395.4 \right] \times 10^3 - Q_{PK}}{12a + b + 16c + 14d} \\
 &= \frac{\left[120.9b + 197.7 \left(c - \frac{b}{2} \right) \right] \times 10^3 - Q_{PK}}{12a + b + 16c + 14d} \quad (6-5-2c)
 \end{aligned}$$

对于正氧平衡炸药 $\left(c > 2a + \frac{b}{2} \right)$, 按照最大放热原则, 爆炸反应方程式可以写成为



按照 N 、 M 、 Q 的定义, 可以计算出

$$\left. \begin{aligned}
 N &= \frac{2c + 2d + b}{48a + 4b + 64c + 56d} \\
 M &= \frac{48a + 4b + 64c + 56d}{2c + 2d + b} \\
 Q &= \frac{[395.4a + 120.9b] \times 10^3 - Q_{PK}}{12a + b + 16c + 14d}
 \end{aligned} \right\} \quad (6-5-3)$$

式中 Q_{pR} 是炸药定压生成热, 单位J/mol, 按照表4-4-1查得。

应用本经验公式计算爆速、爆压时, 只要知道炸药的分子式和装药密度, 就可以进行, 并且精度相当高。通过大量与实测数据对比表明: 对于爆速, 计算值与实测值的相对偏差大部分在3%之内; 对于爆压, 计算值与实测值的相对偏差大部分在5%之内。因而, 适用于工程计算。

【例6-6】计算黑索金炸药, 装药密度 $\rho_0 = 1.75 \text{ g/cm}^3$ 时的爆速和爆压。

解 黑索金炸药的分子式是 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$, 并按照表4-4-1查得黑索金炸药的定压生成热 $Q_{pR} = -65.44 \times 10^3 \text{ J/mol}$, 按照(6-5-2)各式计算

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{2c + 2d + b}{48a + 4b + 64c + 56d} \\ &= \frac{2 \times 6 + 2 \times 6 + 6}{48 \times 3 + 4 \times 6 + 64 \times 6 + 56 \times 6} \\ &= 0.03378 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= \frac{8c + 56d - 8b}{2c + 2d + b} \\ &= \frac{8 \times 6 + 56 \times 6 - 8 \times 6}{2 \times 6 + 2 \times 6 + 6} = 27.2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\left[120.9b + 197.7 \left(c - \frac{b}{2} \right) \right] \times 10^3 - Q_{pR}}{12a + b + 16c + 14d} \\ &= \frac{\left[120.9 \times 6 + 197.7 \left(6 - \frac{6}{2} \right) \right] \times 10^3 + 65.44 \times 10^3}{12 \times 3 + 6 + 16 \times 6 + 14 \times 6} \\ &= 6.23396 \times 10^3 \end{aligned}$$

按照(6-5-1)第三式

$$\varphi = NM^{1/2}Q^{1/2} = 0.03378 \times 27.2^{1/2} \times (6.23396 \times 10^3)^{1/2} \\ = 13.910$$

按照(6-5-1)前两式可以计算出

$$p_H = 7.617 \times 10^8 \varphi \rho_0^3 = 7.617 \times 10^8 \times 13.91 \times 1.75^3 \\ = 324.5 \times 10^8 (\text{Pa})$$

$$D = 0.706 \varphi^{1/2} (1 + 1.3 \rho_0) = 0.706 \times 13.910^{1/2} \times (1 \\ + 1.3 \times 1.75) = 8.62 (\text{km/s})$$

〔解 6-7〕 计算梯恩梯 50/黑索金 50 炸药在 $\rho_0 = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 时的爆速和爆压。

解 1 kg 梯恩梯 50/黑索金 50 炸药, 由 2.2 mol 的梯恩梯和 2.25 mol 的黑索金组成, 其组合分子式为 $\text{C}_{22.15}\text{H}_{24.5}\text{O}_{26.7}\text{N}_{20.1}$ 。
查表 4-4-1

$$(Q_{PK})_{\text{TNT}} = 73.2 \times 10^3 \text{ J/mol}$$

$$(Q_{PK})_{\text{RDX}} = -65.44 \times 10^3 \text{ J/mol}$$

则梯恩梯 50/黑索金 50 炸药的定压生成热

$$Q_{PK} = 2.2 \times 73.2 \times 10^3 + 2.25 \times (-65.44 \times 10^3) \\ = 13.80 \times 10^3 (\text{J/mol})$$

按照(6-5-2)各式计算

$$N = \frac{2 \times 26.7 + 2 \times 20.1 + 24.5}{48 \times 22.15 + 4 \times 24.5 + 64 \times 26.7 + 56 \times 20.1} \\ = 0.0296$$

$$M = \frac{88 \times 26.7 + 56 \times 20.1 - 8 \times 24.5}{2 \times 26.7 + 2 \times 20.1 + 24.5} \\ = 27.8$$

$$Q = \left\{ \left[120.9 \times 24.5 + 197.7 \left(26.7 - \frac{1}{2} \times 24.5 \right) \right] \right. \\ \left. \times 10^3 - 13.8 \times 10^3 \right\} / (12 \times 22.15 + 24.5 + 16 \times 26.7 \\ + 14 \times 20.1) = 5.881 \times 10^3$$

按照(6-5-1)各式计算

$$\varphi = NM^{1/2}Q^{1/2} = 0.0296 \times 27.8^{1/2} \times (5.811 \times 10^3)^{1/2} \\ = 11.897$$

$$p_H = 7.617 \times 10^3 \varphi \rho_0^2 = 7.617 \times 10^3 \times 11.897 \times 1.6^2 \\ = 232 \times 10^3 (\text{Pa})$$

$$D = 0.706 \varphi^{1/2} (1 + 1.3 \rho_0) = 0.706 \times 11.897^{1/2} \\ \times (1 + 1.3 \times 1.6) = 7.50 (\text{km/s})$$

从以上计算可看出, 炸药性质的因素都体现在 φ 值上, 炸药不同, 其 φ 值不同。当炸药确定后, 再根据装药密度就可以计算出具体条件下炸药的爆速和爆压。为了查用方便, 表6-5-1提供了常用炸药爆速和爆压的计算值。

表6-5-1 几种常用炸药的爆速、爆压计算值

炸药	φ	$\rho_0 (\text{g/cm}^3)$	$D (\text{m/s})$	$p_H (\text{Pa} \times 10^3)$
梯恩梯	9.930	1.00	5116	75.6
		1.45	6418	159.0
		1.50	6562	170.2
		1.55	6707	181.7
		1.60	6852	193.6
		1.64	6968	203.4

(续)

炸药	Ψ	$P_0(\text{g/cm}^2)$	$D(\text{m/s})$	$p_H(\text{Pa} \times 10^5)$
黑索金	13.910	1.00	8058	106.0
		1.60	8110	271.2
		1.65	8281	288.5
		1.70	8453	306.2
		1.75	8624	324.5
		1.80	8795	343.2
特屈儿	11.507	1.00	6508	87.6
		1.50	7065	197.2
		1.60	7376	224.4
		1.65	7688	238.6
		1.70	7690	253.3
		1.73	7782	262.3
奥克托金	13.865	1.00	6046	105.6
		1.70	8438	305.2
		1.75	8610	323.4
		1.80	8780	342.2
		1.85	8950	361.4
		1.90	9122	381.2
泰安	13.907	1.00	6055	105.9
		1.60	8109	271.2
		1.65	8280	288.4
		1.70	8452	306.1
		1.75	8623	324.4
		1.77	8692	331.8
梯恩梯50/ 黑索金50	11.897	1.00	5600	90.6
		1.50	7184	203.8
		1.55	7343	217.7
		1.60	7502	232.0
		1.65	7660	246.7
		1.68	7755	255.8

(续)

品种	φ	ρ_0 (g/cm ³)	D (m/s)	p_H (Pa $\times 10^3$)
梯恩梯10 黑索金 9	12.277	1.00	5690	93.5
		1.50	7297	210.4
		1.60	7620	239.4
		1.65	7780	254.6
		1.70	7940	270.2
		1.72	8005	276.6
梯恩梯35 黑索金 65	12.459	1.00	5732	94.9
		1.50	7350	213.5
		1.60	7675	242.9
		1.65	7837	258.4
		1.70	8000	274.3
		1.72	8064	280.8
泰安50/ 梯恩梯50	11.876	1.00	5595	90.5
		1.50	7177	203.5
		1.55	7335	217.3
		1.60	7494	231.6
		1.65	7652	246.3
		1.68	7746	255.3
奥克托金75/ 梯恩梯25	12.882	1.00	5828	98.1
		1.60	7805	251.2
		1.65	7970	267.1
		1.70	8186	283.5
		1.75	8300	300.5
		1.80	8464	318.0
特留尼50/ 梯恩梯 3	11.028	1.00	5390	84.0
		1.50	6915	109.0
		1.55	7067	201.8
		1.60	7220	215.0
		1.65	7372	228.7
		1.70	7525	242.8

(续)

炸药	φ	ρ_0 (g/cm ³)	D (m/s)	p_H (Pa $\times 10^5$)
硝酸铵50/ 梯恩梯50	10.231	1.00	5192	17.9
		1.50	6660	175.3
		1.55	6806	187.2
		1.60	6953	199.5
		1.65	7100	212.2
		1.68	7188	219.9
苦味酸	10.526	1.00	5270	80.2
		1.50	6758	180.4
		1.60	7056	205.2
		1.65	7205	218.3
		1.70	7353	231.7
		1.75	7504	245.5
硝基胍	11.362	1.00	5472	85.5
		1.50	7020	194.7
		1.60	7328	221.6
		1.65	7482	235.6
		1.70	7637	250.1
		1.75	7700	256.0

§ 6-6 混合炸药爆速和爆压计算经验公式

康姆莱特经验公式只限制使用于碳氢氧氧类型的炸药, 对于含有金属粉和惰性添加物的混合炸药不能使用。但是, 含有金属粉和惰性添加物的混合炸药应用非常广泛, 下面介绍一种应用“加和”方法, 对于这类炸药爆速和爆压计算的公式。

一、混合炸药爆速经验计算

混合炸药的爆速可以用各组分的体积百分数对应乘以各

组分的爆速(或特性传播速度), 然后相加而得。

若用 D 表示混合炸药的爆速, 用 D_i 表示混合炸药某组分的爆速或特性速度, 用 ε_i 表示该组分的体积百分数, 按照体积加和原理得到

$$D = \sum D_i \varepsilon_i \quad (6-6-1)$$

式中 i 应包括组成混合炸药的所有各组分, 除了组成混合炸药的物质之外, 炸药颗粒之间的空隙也应包括在内。

当混合炸药处于结晶密度 $\rho_{\max}$ 时, 炸药中不存在空隙, 完全由各组分物质组成, 其速度加和公式可写为

$$D_{\max} = \sum D_i \varepsilon_i \quad (6-6-2)$$

式中 i 只包括组成混合炸药的实际物质组分。

当混合炸药处于任意密度 ρ_0 时, 可看作混合炸药由炸药物质和空气所组成, 其速度加和公式可写为

$$D = D_a \varepsilon_a + D_{\max} (\sum \varepsilon_i) \quad (6-6-3)$$

式中 D_a , ε_a ——炸药中空气空隙的特性速度和体积百分数,

$D_{\max}$, $\sum \varepsilon_i$ ——不含空气的纯混合炸药爆速和体积百分数。

因为

$$\varepsilon_a + \sum \varepsilon_i = 1, \quad \sum \varepsilon_i = \frac{\rho_0}{\rho_{\max}}$$

则
$$\varepsilon_a = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{\max}}$$

将上式代入(6-6-3)式, 得

$$\begin{aligned} D &= D_a \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \right) + D_{\max} \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \\ &= D_a + (D_{\max} - D_a) \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \end{aligned}$$

取空气的特性传播速度

$$D_a = \frac{1}{4} D_{\max}$$

则上述公式为

$$D = \frac{1}{4} D_{\max} + \frac{3}{4} D_{\max} \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \quad (6-6-4)$$

通过(6-6-4)式看出, 计算混合炸药的爆速, 必须首先计算出此混合炸药不含空气气隙时的最大密度和最大爆速后, 才能确定。为了应用的方便, 将混合炸药爆速计算公式归纳如下

$$\left. \begin{aligned} D &= D_{\max} \left(0.25 + 0.75 \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \right) \\ D_{\max} &= \frac{\sum D_i V_i}{\sum V_i} \\ \rho_{\max} &= \frac{\sum m_i}{\sum V_i} \\ V_i &= \frac{m_i}{\rho_i} \end{aligned} \right\} \quad (6-6-5)$$

式中 D ——混合炸药装药密度为 ρ_0 时的爆速(m/s);

$D_{\max}$ ——混合炸药结晶密度 $\rho_{\max}$ 时的爆速(m/s);

D_i —— i 组分物质在结晶密度 ρ_i 时的爆速或特性速度(m/s);

V_i —— i 组分物质在结晶密度 ρ_i 时所占有的体积(cm^3);

m_i —— i 组分物质的质量(g)。

此公式可以用于含有金属粉和惰性添加物的混合炸药, 也可应用于单质炸药, 应用范围比康姆莱特公式广, 而且精度相当高, 其计算值与实测值的误差大约在 2% 以内。某些

炸药和常用添加物的结晶密度及爆速（或特性速度）列于表6-6-1。

表6-6-1 某些炸药和常用添加物的 ρ_i 、 D_i 值

炸药	ρ_i (g/cm ³)	D_i (m/s)	添加物	ρ_i (g/cm ³)	D_i (m/s)
梯恩梯	1.650	6970	铝粉	2.70	6350
黑索金	1.810	8800	镁粉	1.74	7200
特屈儿	1.730	7660	石蜡	0.90	
奥克托金	1.900	9150	蜂蜡	0.96	
泰安	1.770	8280	硬脂酸	0.87	
地恩梯	1.520	6200	聚醋酸乙烯酯	1.16	
硝化棉	1.570	6700	尼龙	1.24	
硝基酚	1.720	7740	聚乙烯	0.93	
2 [#] 炸药	1.840	8970	聚苯乙烯	1.05	
1 [#] 炸药	1.780	8148	聚四氟乙烯	2.15	7400
达那	1.630	7708	氯丁橡胶	1.23	
			硅酮树脂	1.05	
			水	1.00	

〔例6-8〕 计算 8701 炸药装药密度 $\rho_0 = 1.72 \text{ g/cm}^3$ 时的爆速。

解 8701 炸药的组成为黑索金 95/地恩梯 3/聚醋酸乙烯酯 2/外加硬酯酸 0.5，也就是说在 100.5g 炸药中含有黑索金、地恩梯、聚醋酸乙烯酯和硬酯酸分别为 9g、3g、2g 和 0.5g。

按照 $V_i = \frac{m_i}{\rho_i}$ ，查表 6-6-1 计算

$$V_1 = \frac{95}{1.81} = 52.49$$

$$V_2 = \frac{3}{1.52} = 1.97$$

$$V_3 = \frac{2}{1.16} = 1.72$$

$$V_4 = \frac{0.5}{0.87} = 0.575$$

进一步计算混合炸药的最大密度和最大爆速

$$\begin{aligned}\rho_{\max} &= \frac{\sum m_i}{\sum V_i} \\ &= \frac{100.5}{52.49 + 1.97 + 1.72 + 0.575} \\ &= 1.77(\text{g/cm}^3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D_{\max} &= \frac{\sum D_i V_i}{\sum V_i} \\ &= \frac{8800 \times 52.49 + 6200 \times 1.97 + 5400 \times (1.72 + 0.575)}{52.49 + 1.97 + 1.72 + 0.575} \\ &= 8572(\text{m/s})\end{aligned}$$

所求密度下的爆速

$$\begin{aligned}D &= D_{\max} \left(0.25 + 0.75 \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \right) \\ &= 8572 \left(0.25 + 0.75 \times \frac{1.72}{1.77} \right) = 8390(\text{m/s})\end{aligned}$$

〔例6-9〕 计算AIX-2炸药装药密度 $\rho_0 = 1.77\text{g/cm}^3$ 时的爆速。

解 AIX-2炸药的组成为黑索金76/石蜡4/铝粉20，即100g炸药中含有黑索金76g、石蜡4g、铝粉20g。

按照(6-6-5)式依次计算

$$V_1 = \frac{76}{1.81} = 42.00$$

$$V_2 = \frac{4}{0.9} = 4.44$$

$$V_3 = \frac{20}{2.7} = 7.41$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\max} &= \frac{\sum m_i}{\sum V_i} \\
 &= \frac{100}{42 + 4.44 + 7.41} \\
 &= 1.857 (\text{g/cm}^3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{\max} &= \frac{\sum D_i V_i}{\sum V_i} \\
 &= \frac{8800 \times 42 + 5400 \times 4.44 + 6850 \times 7.41}{42 + 4.44 + 7.41} \\
 &= 8251 (\text{m/s})
 \end{aligned}$$

所求密度下的爆速

$$\begin{aligned}
 D &= D_{\max} \left(0.25 + 0.75 \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \right) \\
 &= 8250 \left(0.25 + 0.75 \times \frac{1.77}{1.857} \right) \\
 &= 7961 (\text{m/s})
 \end{aligned}$$

二、混合炸药爆压经验计算

惰性添加物在混合炸药中主要起粘接和钝感作用，不参加化学反应，对爆压没贡献。对于铝粉等物质在爆炸过程中虽然参加化学反应，但是这种反应是二次反应，在爆轰波化学反应区之后进行，放出的热量提供不到爆轰波上来，因而对爆压也不起作用。由于上述原因，计算混合炸药爆压时，可以不考虑惰性添加物和铝粉等物质的影响。

采用康姆莱特经验公式的形式对混合炸药的爆压进行计算。混合炸药的 φ 值为混合炸药中各个参加瞬间爆炸反应组分 α 值的质量加和，即

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i \omega_i$$

因而，混合炸药爆压计算公式可以写成

$$p_H = 7.617 \times 10^8 \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i \omega_i \right) \rho_0^2 \quad (6-6-6)$$

式中 p_H ——混合炸药密度为 ρ_0 (g/cm^3) 时的爆压 (Pa);

φ_i ——混合炸药中, i 爆炸组分的 φ 值;

ω_i ——混合炸药中, i 爆炸组分的质量百分数。

〔例6-10〕 计算 8701 炸药装药密度 $\rho_0 = 1.72 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的爆压。

解 8701 炸药中含有四种组分, 爆炸组分有两个: 黑索金和地恩梯, 黑索金炸药的 φ 值可以由表 6-6-1 查出, 地恩梯炸药的 φ 值可以按定义计算出来。

地恩梯分子式 $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_4\text{N}_2$, $Q_{PK} = 28.9 \times 10^3 \text{ J/mol}$

按(6-5-2)式

$$N = \frac{2 \times 4 + 2 \times 2 + 6}{48 \times 7 + 4 \times 6 + 64 \times 4 + 56 \times 2} = 0.02473$$

$$M = \frac{88 \times 4 + 56 \times 2 - 8 \times 6}{2 \times 4 + 2 \times 2 + 6} = 23.11111$$

$$Q = \frac{\left[120.9 \times 6 + 197.7 \left(4 - \frac{6}{2} \right) \right] \times 10^3 - 28.9 \times 10^3}{12 \times 7 + 6 + 16 \times 4 + 14 \times 2} = 4.91319 \times 10^3$$

按(6-5-1)第三式

$$\begin{aligned} \varphi &= NM^{1/2}Q^{1/2} = 0.02473 \times 23.11111^{1/2} \\ &\quad \times (4.91319 \times 10^3)^{1/2} = 8.333 \end{aligned}$$

运用公式(6-6-6), 计算混合炸药爆压

$$\begin{aligned}
 p_H &= 7.617 \times 10^8 \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i \omega_i \right) \rho_0^2 \\
 &= 7.617 \times 10^8 \times \left(13.910 \times \frac{95}{100.5} + 8.333 \times \frac{5}{100.5} \right) \\
 &\quad \times 1.72^2 = 302 \times 10^8 (\text{Pa})
 \end{aligned}$$

〔例6-11〕 计算AIX-2炸药在 $\rho_0 = 1.77 \text{ g/cm}^3$ 时的爆压。

解 AIX-2 炸药中的爆炸成分只有黑索金, 其含量为 76%。

运用公式(6-6-6)计算

$$\begin{aligned}
 p_H &= 7.617 \times 10^8 \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i \omega_i \right) \rho_0^2 \\
 &= 7.617 \times 10^8 \times (13.910 \times 76\%) \times 1.77^2 \\
 &= 252 \times 10^8 (\text{Pa})
 \end{aligned}$$

为了查用方便, 表6-6-2列出了几种常用混合炸药爆速、爆压的计算值。这些计算值与实测值非常接近, 可满足工程应用的需要。

表6-6-2 几种常用混合炸药爆速、爆压计算值

名称	混 合 炸 药	ρ_0 (g/cm^3)	D (m/s)	p_H ($\text{Pa} \times 10^8$)
	成 分			
AIX-1	黑索金95/蜡5	1.50	7652	226
		1.55	7837	241
		1.60	8021	257
		1.65	8206	273
		1.70	8390	290
		1.723	8475	298

混 合 炸 药		ρ_0	D	P_H
名称	成 分	(g/cm ³)	(m/s)	(Pa × 10 ⁸)
AIX-2	AIX-180/铝20	1.60	7395	205
		1.70	7729	232
		1.75	7894	246
		1.80	8061	260
		1.83	8161	269
		1.857	8251	277
8791	黑索金95/地恩梯3/聚醋酸 乙烯酯2/外加硬脂酸0.5	1.50	7590	229
		1.60	7953	260
		1.65	8134	277
		1.70	8316	294
		1.75	8497	312
		1.77	8570	319
8702	8701 80/铝20	1.60	7344	208
		1.70	7673	235
		1.75	7838	249
		1.80	8002	264
		1.85	8166	278
		1.90	8331	294
8321	黑索金94/4#炸药3/聚醋 酸乙烯酯2/硬脂酸1	1.50	7638	230
		1.60	8004	262
		1.65	8186	279
		1.70	8369	296
		1.75	8552	311
		1.77	8625	321
A-3	黑索金91/蜡9	1.45	7455	202
		1.50	7641	216
		1.55	7827	231
		1.60	8013	246
		1.64	8162	258
		1.66	8236	265

(续)

混 合 炸 药		ρ_0 (g/cm ³)	L (m/s)	P_{H_1} (Pa × 10 ⁸)
名称	成 分			
H IX	梯恩梯54, 黑索金24, 铝 5 / 铝17	1.50	6437	148
		1.55	6654	158
		1.60	6810	169
		1.65	6967	180
		1.70	7123	191
		1.729	7214	197
梯铝炸药	梯恩梯80/ 铝20	1.45	5820	158
		1.50	5965	170
		1.55	6110	181
		1.60	6255	193
		1.65	6400	205
		1.668	6455	210

§ 6-7 爆速的实验测定

炸药的爆速是衡量炸药爆炸性能的重要标识量,也是爆轰参数中测定得最准确的一个参数。爆速的实验测定在炸药应用研究上具有重要作用,并且也为检验爆轰理论的正确性提供了依据。

测定爆速的方法比较多,通常采用的方法有三种。第一种是导爆索法,这是一种古老的方法,非常简便,不用什么仪器就能测定,但是精度较低;第二种是脉冲示波器测定法,这种方法精度最高,是当前测定爆速最实用的方法;第三种方法是高速摄影法,这种方法可以测量爆速沿着爆炸物传播过程中速度变化的情况。

一、导爆索测定法

导爆索法是法国人道特里斯提出来的，故又称为道特里斯法。这种方法测定爆速的原理，是将被测炸药与已知爆速的导爆索相比较，以确定被测炸药的爆速。

实验装置如图 6-7-1 所示。把被测炸药制成直径为

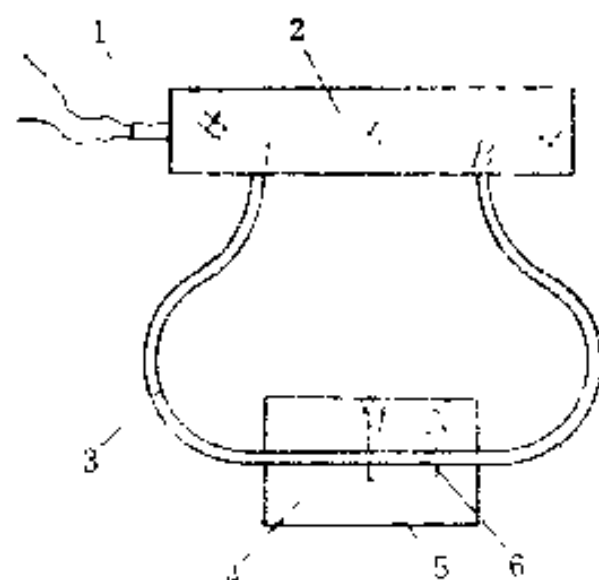


图6-7-1 导爆索法测爆速的装置

1—雷管；2—被测炸药；3—已知爆速的导爆索；4—铅板；
5—导爆索中间位置；6—爆轰波相遇点。

20mm、长度为 300~400mm 的药柱，放在预先做好的硬壳纸筒或金属管内，纸筒(或金属管)上开有两个小孔 A 和 B，A、B 间的距离约为 100~200mm，把长约 1 m 的已知爆速的导爆索两端插入固定的小孔内，与被测药柱紧紧相接，导爆索中段固定在一块数毫米厚的铅板上，在铅板上正对着导爆索中间的位置上刻有痕迹线 M。

当雷管起爆炸药后，爆轰波沿药柱传播，当爆轰波到达 A 点后分成两路，一路沿导爆索传播，另一路沿炸药至 B 点后从导爆索的另一端沿导爆索传播，这样从导爆索两端传入的两个爆轰波必然会相遇，由于爆轰波碰撞时，局部压力升

高，铅板上留有明显的痕迹，其位置在中点 M 右边 N 点处。

如果已知导爆索的爆速为 D_f ，导爆索的全长为 L ， A 、 B 间的距离为 l ，测量得 MN 的距离为 a ，则爆轰波从 A 点沿导爆索经 M 点至 N 点的时间

$$t_1 = \frac{\frac{L}{2} + a}{D_f}$$

设炸药的爆速为 D ，则爆轰波由 A 点沿炸药经 B 点至 N 点的时间

$$t_2 = \frac{l}{D} + \frac{\frac{L}{2} - a}{D_f}$$

因为 $t_1 = t_2$ ，故

$$\frac{a}{D_f} = \frac{l}{D} - \frac{a}{D_f}$$

从而得到被测药柱的爆速

$$D = \frac{l}{2a} \cdot D_f \quad (6-7-1)$$

这种方法非常简便，精确度取决于导爆索爆速的精确度，导爆索的均匀性，以及距离 l 和 a 测量的准确程度。一般来说，这种方法测定爆速的相对误差为3~5%。

二、脉冲示波器测定法

该法是用脉冲示波器测定爆轰波通过被测装药两个固定断面之间的时间间隔。

脉冲示波器借助于各种类型的传感器提供脉冲信号，图6-7-2是采用脉冲示波器测定爆速的示意图。

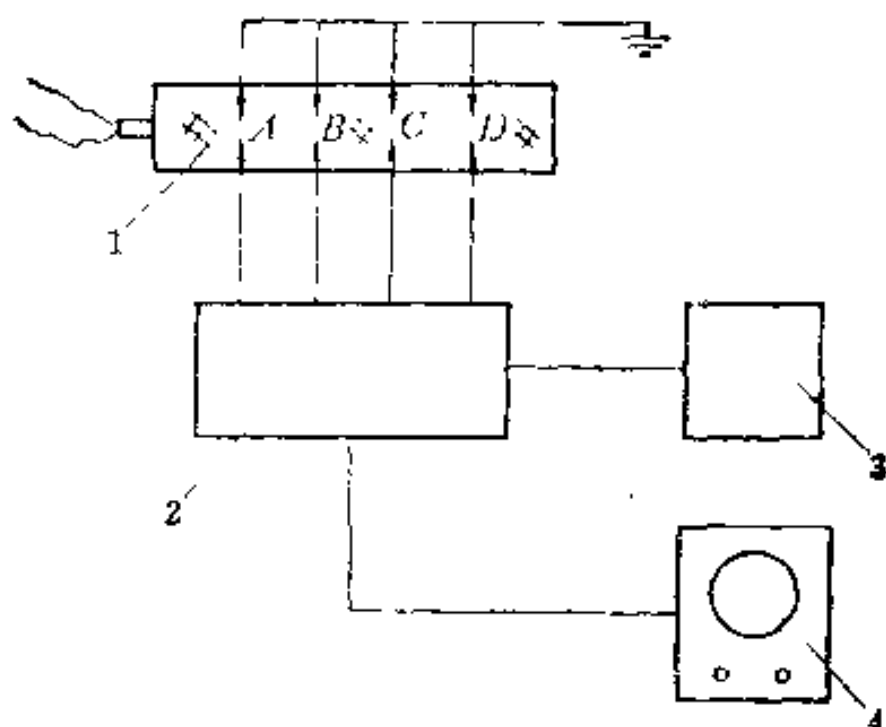


图6-7-2 脉冲示波器测定爆速示意图

1—被测药柱；2—讯号发生器；3—直流电源；4—脉冲示波器。

爆速测定时，在被测药柱不同距离的地方装入多对互相绝缘的探针传感器，传感器可由铝箔或由很细的镍铬丝线做成，传感器一端接地，另一端通过讯号发生器与示波器相连。爆炸前，因为炸药本身不导电，线路中没有电流通过。炸药爆炸时，爆轰波沿着药柱传播，爆轰波到达的地方，爆轰产物在高温、高压下发生离解，具有良好的导电性，陆续使探针A、B、C、D接通，讯号发生器中电容放电，向示波器输入电压脉冲，在示波器荧光屏上显示出输入波形，由照相机拍照下来。通过底片测量可以确定出爆轰波相继通过各传感器的时间，由于药柱在A、B、C、D间的距离预先已经精确测量出来，所以可以计算出爆轰波在炸药中稳定传播的速度。

设各相邻探针间的距离为 $\Delta L_i (i = 1, 2, \dots, n-1)$ ，爆轰波通过探针间距离的相应时间间隔为 Δt_i ，则爆轰波在

各段距离上传播的速度

$$D_i = \frac{\Delta L_i}{\Delta t_i} \quad (6-7-2)$$

假若共计 n 对探针，可测出 $(n-1)$ 段距离上的爆轰波传播速度，因而被测炸药的爆速可以取其平均值

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} D_i}{n-1} \quad (6-7-3)$$

下面对讯号发生器和脉冲示波器的要求，进行一点简单的说明。

典型的讯号发生器线路图如图 6-7-3 所示，它是由电阻、

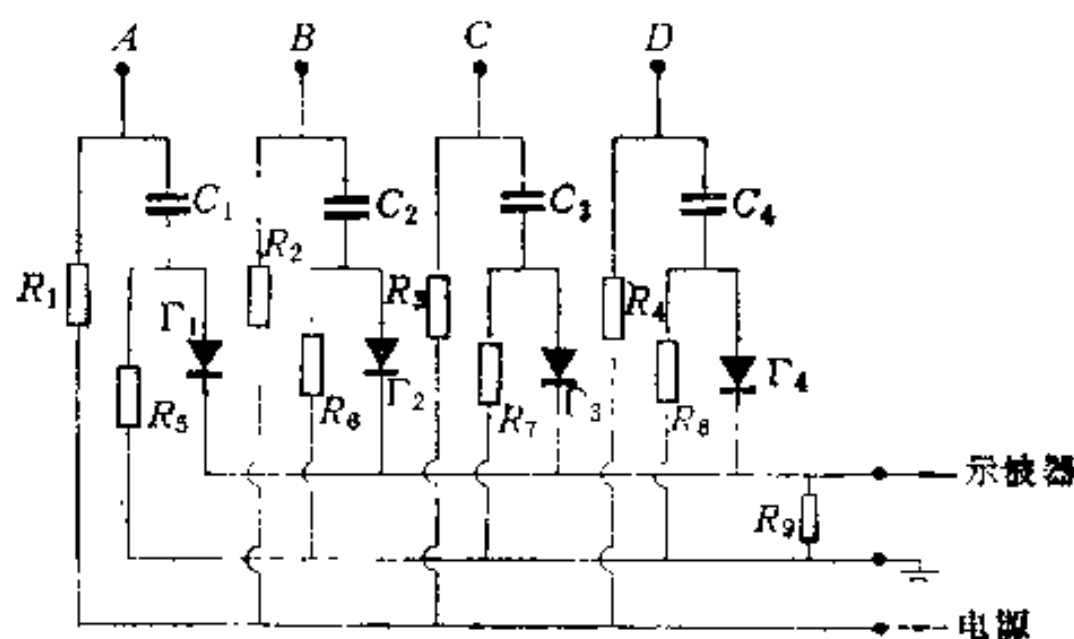


图6-7-3 讯号发生器典型线路图

电容等元件组成且能形成脉冲信号的装置。线路图中 R_1 、 R_2 、 $\dots$ 、 R_8 是限流电阻， C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 是充电电容， R_9 是分压电阻，使之与电缆特性阻抗匹配，二极管的作用是减小放电回路的振荡，增加波形的清晰度。实验前，电源加上

负压，通过回路 $R_1-C_1-R_5$ 、 $R_2-C_2-R_6$ 、 $R_3-C_3-R_7$ 、 $R_4-C_4-R_8$ 分别使电容 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 充电；实验时，爆轰波沿着药柱陆续通过探针 A 、 B 、 C 、 D ，爆轰产物依次在 A 、 B 、 C 、 D 处使探针接通，电容 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别沿着回路 $C_1-\Gamma_1-R_5$ 、 $C_2-\Gamma_2-R_6$ 、 $C_3-\Gamma_3-R_7$ 、 $C_4-\Gamma_4-R_8$ 放电，这样陆续由分压电阻 R_5 两端向脉冲示波器输入四个脉冲电压，从而由示波器的波形图上可以测定出波形间的时间间隔。

脉冲示波器起记录时间间隔的作用，由于爆轰波传播速度很快，因而对使用的示波器有高压、快速的要求，最常用的示波器是国产 SB-16 型螺旋扫描示波器，它的扫描频率为 1MHz，即螺旋扫描一圈的时间为 1 μ s，时间分辨率可达 m μ s。

由于脉冲示波器分辨率高，故药柱可以做得较小。脉冲示波器测定爆速具有精度高、用药量小的优点，其精度可以达到相对误差为 0.3%。

三、高速摄影法

该方法是利用爆轰波沿药柱传播时的发光现象，用高速照相机将爆轰波沿药柱移动的光拍摄在胶片上，得到爆轰波传播的时间-距离扫描曲线，从而测定出爆轰波在药柱中各点传播的距离。

图 6-7-4 是采用高速照相测定爆速的示意图。雷管起爆后，爆轰波沿着药柱由上向下传播，爆轰波波阵面所发射出的光经过透镜到达高速旋转的转镜上，然后再由转镜反射到胶片上。因此，当爆轰波由 A 传播到 B 时，反射到胶片上的光点由 A' 移动到 B' ，这样药柱爆轰完后，在胶片上就得到了一条相应的扫描曲线。

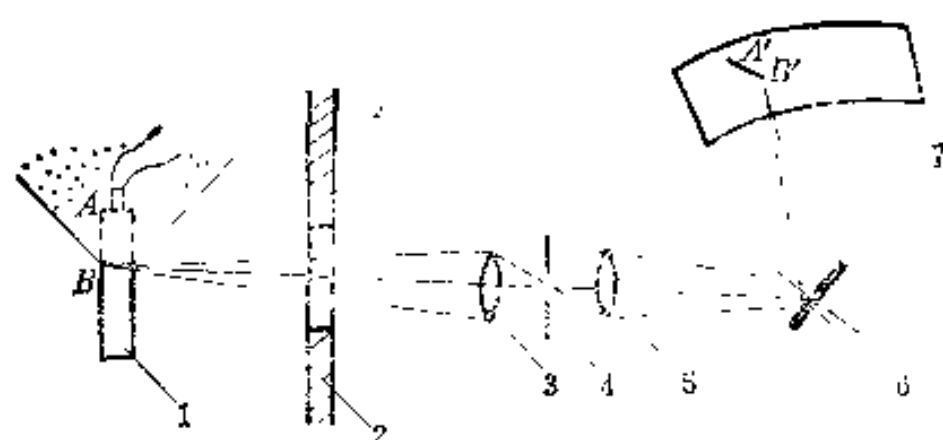


图6-7-4 高速照相机测定爆速示意图

1—正在爆轰的药柱；2—装有防护玻璃的防护墙；3，5—透镜；
4—狭缝；6—转镜；7—胶片。

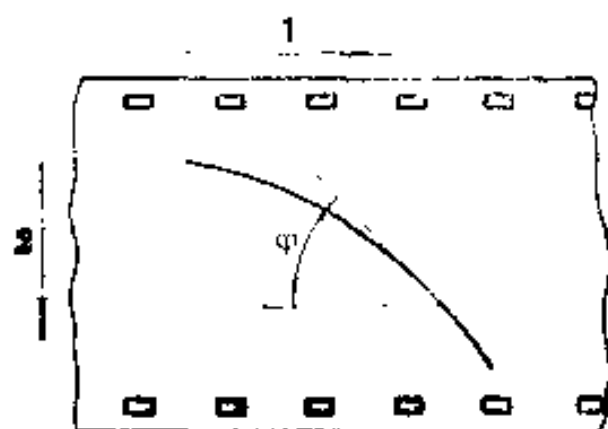


图6-7-5 胶片上的扫描曲线

1—转镜转动的扫描方向；2—波传播方向。

高速照相机测得爆速的胶片如图6-7-5所示，转镜转动的扫描方向是胶片的水平方向，爆轰波传播方向是胶片的竖直方向，则扫描线是有关爆轰波传播速度和转镜转速的一条曲线。

若扫描点在胶片水平方向移动的速度是 u_1 ，扫描点在竖直方向移动的速度是 u_2 ，设扫描线在某点与水平线的夹角为 φ ，则

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{u_2}{u_1} \quad (6-7-4)$$

水平扫描速度 u_1 可以根据转镜的转速和扫描半径进行确定。若转镜的转速是 n ，扫描半径为 R ，由于光线反射角是转镜转动角的二倍，故光线通过转镜反射到胶片上的水平速度

$$u_1 = 4\pi Rn$$

竖直扫描速度 u_2 可以根据爆轰波向下传播的速度和照相机放大系数进行确定。设爆轰波沿药柱传播在某点处速度为 D ，相机放大系数是 β ，则光线在胶片上对应点的竖直速度

$$u_2 = \beta D$$

将 u_1 、 u_2 代入 (6-7-4) 式，得

$$D = \frac{4\pi Rn}{\beta} \tan \varphi \quad (6-7-5)$$

式 (6-7-5) 是按照测定的扫描线与水平线的夹角进行计算爆速的公式。由于扫描线是爆轰过程实测的结果，扫描线各点的斜率与水平线夹角不同，因而所测定的爆速是爆轰沿药柱传播的瞬时速度。

通常采用的高速相机是国产 GSJ 型，该相机最大转速为 $7.0 \times 10^4 \text{ min}^{-1}$ ，可以满足测定爆速的要求。

高速摄影法的优点是可以测定爆轰波沿药柱传播过程的瞬时速度。但是测量底片时，由于 φ 角不易测得很准，因而该方法与脉冲示波器测定法相比，精确度较差。

§ 6-8 爆压的实验测定

爆轰波化学反应区末端面上爆轰产物的压力是衡量炸药爆炸性能的重要标志，它的实验测定对有效地使用炸药以及检验爆轰理论的正确性都具有重要的意义。

目前测定爆压比较成熟的方法，有自由表面速度测定法、水箱法和电磁法三种。自由表面法是测定炸药爆炸作用下金属板的自由表面速度，然后反推出炸药的爆压；水箱法是测定炸药在水中爆炸后所形成的初始冲击波的速度，然后反推出炸药的爆压；电磁法是直接测定爆轰产物的质点速度，用以计算炸药的爆压。

一、自由表面速度测定法

自由表面速度测定法的实验装置如图 6-8-1 所示。在被

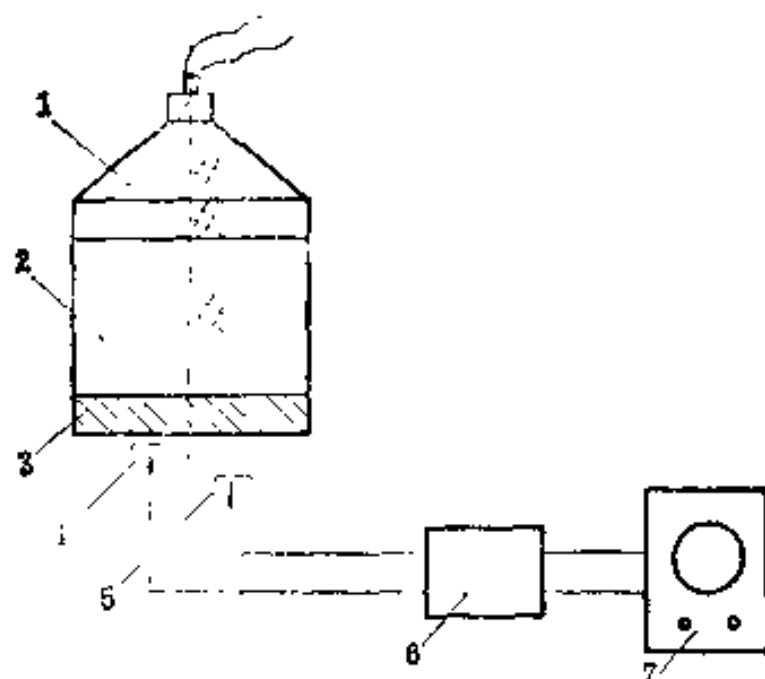


图6-8-1 测定自由表面速度的示意图

1—平面波发生器；2—被测药柱；3—金属板；4，5—探针；
6—讯号发生器；7—脉冲示波器。

测炸药上方放置平面波发生器，被测炸药下方放置金属板，金属板外不同距离上安装两对探针，使用仪器为脉冲示波器，通过讯号发生器转换信号。

当雷管起爆后，爆轰波首先沿着平面波发生器传播，平面波发生器的作用是将沿着药柱传播的弧形爆轰波，传播至平面波发生器底端面时，转变成为平面爆轰波，这时在同一

个平面上爆轰波参数一样，从而制造出爆轰波传播的一维情况。

平面爆轰波继续沿着被测药柱传播，当爆轰波传播至与金属板相接触的表面时，这时向金属板中传入一道冲击波，同时向爆轰产物中反射回一道冲击波；进入金属板的冲击波继续向前传播，当冲击波到达金属板与空气相接触的自由表面时，向空气中传入一道空气冲击波，同时又向金属板中反射回一束膨胀波。在波系的共同作用下，金属板自由表面处的质点向空气中飞散。

当向空气中飞散的金属板自由表面质点，碰到预先装置好的带有防护罩的探针时，使线路接通，通过讯号发生器在示波器上记录信号，这样就测定了金属板自由表面质点通过两对探针的时间间隔，从而也就得出了金属板自由表面速度。

当测定金属板自由表面速度后，就可以通过炸药爆压与自由表面速度的关系，计算出被测炸药的爆压。

为了确定炸药爆压与自由表面速度的关系，必须从研究在炸药和金属板中传播着的波系着手。

1. 被测炸药和金属板相接触界面上的波系

被测炸药和金属板相接触界面上的波系如图 6-8-2 所

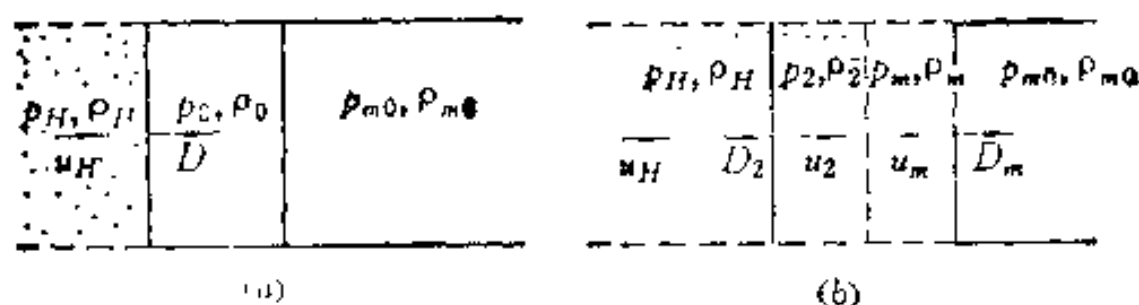


图6-8-2 被测炸药和金属板接触界面上的波系

(a) 爆轰波到达界面之前；(b) 爆轰波到达界面之后。

示。设被测炸药的初始密度为 ρ_0 ，初始压力和质点速度分别为 $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$ ， $u_0 = 0$ ，炸药的爆速为 D ；爆轰波后化学反应区末端面爆轰产物的压力、密度和质点速度分别为 p_H 、 ρ_H 、 u_H ；向炸药爆轰产物中反射回来的冲击波速度为 D_2 ，反射冲击波 D_2 后产物的压力、密度和质点速度分别为 p_2 、 ρ_2 、 u_2 。金属板的初始密度为 ρ_{m0} ，初始压力和质点速度分别为 $p_{m0} = 10^5 \text{ Pa}$ ， $u_{m0} = 0$ ；向金属板中传入的冲击波速度为 D_m ，入射冲击波 D_m 后金属介质的压力、密度和质点速度分别为 p_m 、 ρ_m 、 u_m 。按照质点运动方向的一致，设 u_2 和 u_m 的速度方向皆向右。

下面采用质量守恒方程和动量守恒方程，分别考察三道波前、后参数间的关系。

对于在炸药中传播的爆轰波，可以在整个流动中迭加一个向左的运动速度 D ，如图 6-8-3 所示，这时流动转变成

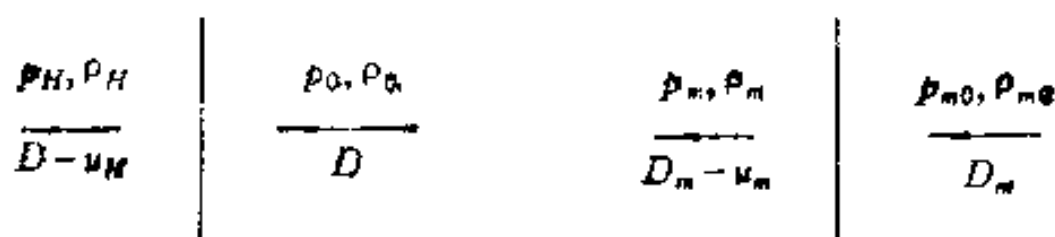


图 6-8-3 爆轰波前、后的流动

图 6-8-4 入射冲击波前、后的流动

爆轰波不动的相对坐标，可以列出爆轰波前、后的参数关系

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 D &= \rho_H (D - u_H) \\ p_H - p_0 &= p_0 D u_H \end{aligned} \right\} \quad (6-8-1)$$

对于金属板中传播的冲击波，可以在整个流动中迭加一个向左的运动速度 D_m ，如图 6-8-4 所示，这时流动转变成入射冲击波不动的相对坐标，可以列出入射冲击波前、后

的参数关系

$$\left. \begin{aligned} \rho_{m0} D_m &= \rho_m (D_m - u_m) \\ p_m - p_{m0} &= \rho_{m0} D_m u_m \end{aligned} \right\} \quad (6-8-2)$$

对于爆轰产物中传播的冲击波，可以在整个流动中迭加一个向右的运动速度 D_2 ，如图 6-8-5 所示，这时流动转变

$$\left. \begin{aligned} p_H, \rho_H \\ D_2 + u_H \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} p_2, \rho_2 \\ D_2 + u_2 \end{aligned} \right\}$$

图6-8-5 反射冲击波前、后的流动

成为反射冲击波不动的相对坐标，可以列出反射冲击波前、后的参数关系

$$\left. \begin{aligned} \rho_H (D_2 + u_H) &= \rho_2 (D_2 + u_2) \\ p_2 - p_H &= \rho_H (D_2 + u_H) (u_H - u_2) \end{aligned} \right\} \quad (6-8-3)$$

入射冲击波 D_m 和反射冲击波 D_2 间的金属介质和爆轰产物，由分界面隔开，分界面的条件为

$$\left. \begin{aligned} p_2 &= p_m \\ u_2 &= u_m \end{aligned} \right\} \quad (6-8-4)$$

将分界面条件 (6-8-4) 代入方程 (6-8-3) 的第二式，得

$$p_m - p_H = \rho_H (D_2 + u_H) (u_H - u_m) \quad (6-8-5)$$

与 p_H 相比忽略 p_0 ，由方程 (6-8-1) 的第二式得

$$u_H = \frac{p_H}{\rho_0 D}$$

与 p_m 相比忽略 p_{m0} ，由方程 (6-8-2) 的第二式得

$$u_m = -\frac{p_m}{\rho_{m0} D_m}$$

二者皆代入 (6-8-5) 式

$$p_m - p_H = \rho_H (D_2 + u_H) \left(-\frac{p_H}{\rho_0 D} - \frac{p_m}{\rho_{m0} D_m} \right)$$

两端同除以 p_H 得

$$\frac{p_m}{p_H} - 1 = -\frac{\rho_H (D_2 + u_H)}{\rho_0 D} - \frac{p_m}{p_H} \frac{\rho_H (D_2 + u_H)}{\rho_{m0} D_m}$$

移项整理为

$$\frac{p_m}{p_H} \frac{\rho_{m0} D_m + \rho_H (D_2 + u_H)}{\rho_{m0} D} = \frac{\rho_0 D + \rho_H (D_2 + u_H)}{\rho_0 D}$$

从而得到金属板内所达到的压力与爆压之比 $\frac{p_m}{p_H}$ ，和运动参数之间的关系：

$$\frac{p_m}{p_H} = \frac{\rho_{m0} D_m [\rho_0 D + \rho_H (D_2 + u_H)]}{\rho_0 D [\rho_{m0} D_m + \rho_H (D_2 + u_H)]} \quad (6-8-6)$$

下面对 (6-8-6) 式进行一下简化。由于爆轰产物的压力 p_H 已经很高，反射冲击波后的压力 p_2 虽然有所增高，但是也大不了很多。例如当采用 1mm 厚的铝板时，几种炸药的爆压和反射冲击波后压力的数值如表 6-8-1 所示，从表中数据看出反射冲击波前、后的压力比 $\frac{p_2}{p_H}$ 大约为 1.2 左右。

表 6-8-1 几种炸药反射冲击波前、后的压力

	黑索金	梯恩梯	B 炸药
$\rho_0 (\text{g/cm}^3)$	1.767	1.637	1.713
$p_H (\text{Pa} \times 10^5)$	337.9	189.1	292.2
$p_2 (\text{Pa} \times 10^6)$	397.3	239.0	354.8

由于反射冲击波很弱，因而可以近似将反射冲击波作为弱波处理，这样所引起的误差也不会太大。按照这种设想，反射波的速度可以近似等于当地音速，即

$$D_2 \approx c_H + u_H$$

因而

$$\rho_H(D_2 + u_H) \approx \rho_H c_H$$

代入

$$\rho_H = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \rho_0, \quad c_H = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + 1}} D$$

可以得到

$$\rho_H(D_2 + u_H) \approx \rho_0 D \quad (6-8-7)$$

将 (6-8-7) 代入 (6-8-6) 式，进行简化后得

$$\frac{p_m}{p_H} = \frac{2\rho_{m0}D_m}{\rho_{m0}D_m + \rho_0 D}$$

从而得到爆压与金属板中冲击波参数之间的关系式

$$p_H = p_m \frac{\rho_0 D + \rho_{m0} D_m}{2\rho_{m0} D_m} \quad (6-8-8)$$

再代入 $u_m = \frac{p_m}{\rho_{m0} D_m}$ ，上式则成为

$$p_H = \frac{1}{2} u_m (\rho_0 D + \rho_{m0} D_m) \quad (6-8-9)$$

(6-8-9) 式表明，当测定出炸药爆轰在相接触金属板中所形成的冲击波速度 D_m 和波后质点速度 u_m 之后，就可以计算出炸药的爆压。

2. 金属板内冲击波参数的测定

金属板内冲击波速度 D_m 与质点速度 u_m 相比，测定 D_m

比较容易。

测定金属板内冲击波速度 D_m 的方法，可以采用脉冲示波器进行，测定装置如图 6-8-6 所示。当冲击波沿着金属板

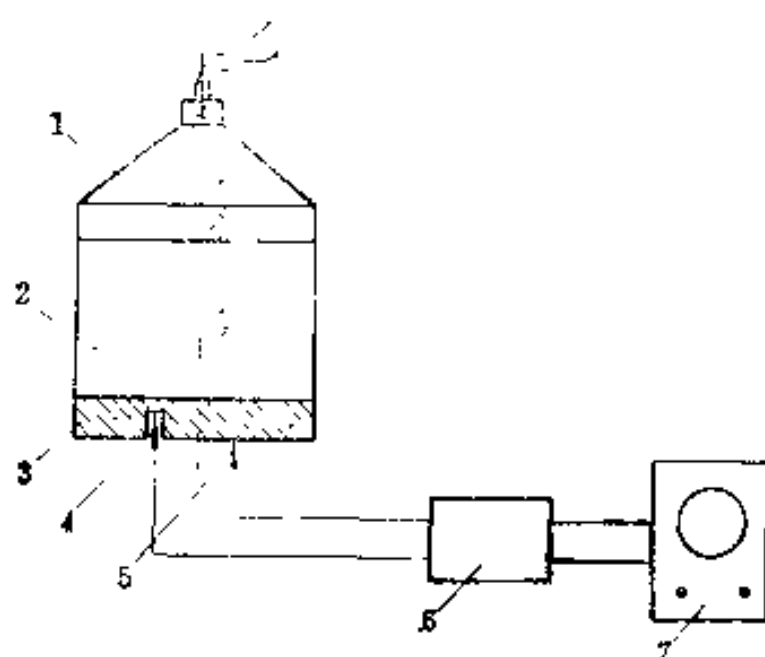


图6-8-6 测定金属板内冲击波速度的示意图

1—平面波发生器；2—被测炸药；

3—金属板；4，5—探针；

6—讯号发生器；7—脉冲示波器。

传播时，通过安装金属板中的两对探针，测定冲击波到达金属板不同位置的时间，从而计算出冲击波速度 D_m 。

对于绝大多数密实介质（包括固体和液体）来说，根据大量的实验数据，可以将冲击波速度与波后质点速度之间的关系归纳成为线性形式

$$D_m = a + bu_m \quad (6-8-10)$$

式中 a 、 b 是与材料性质有关的常数。一些常用材料的 a 、 b 值见表 6-8-2。

表6-8-2 常用材料的 a 、 b 值

材料	ρ_{mn} (g/cm^3)	a (m/s)	b	压力范围 (GPa)
铜	8.9	3940	1.489	240
铁	7.8	3574	1.920	270
铝	2.7	5320	1.338	120
钛	1.74	4492	1.263	80
钨	4.5	5220	0.767	106
钨	19.2	4029	1.237	270
碳化硅	3.12	8000	0.950	110
碳化钨	15.0	4920	1.339	200
聚乙烯	0.92	2900	1.481	50
聚苯乙烯	1.04	2746	1.319	14
聚氯乙烯	1.68	1952	1.660	20
环氧树脂	1.20	2678	1.520	20
酚醛塑料	1.37	2847	1.404	85
聚四氟乙烯	2.15	1682	1.819	22
石棉	0.90	2960	1.531	56
有机玻璃	1.18	2870	1.880	10
花岗岩	2.63	2100	1.630	40
大理石	2.70	4000	1.320	13
石灰石	2.60	3500	1.430	16
混凝土	1.16	2336	1.818	56
水	1.00	1700	1.700	114

因而，当测定 D_m 后，可以通过 (6-8-10) 式计算出 u_m ，然后一起代入 (6-8-9) 式，就可以计算出被测炸药的爆压 p_H 。

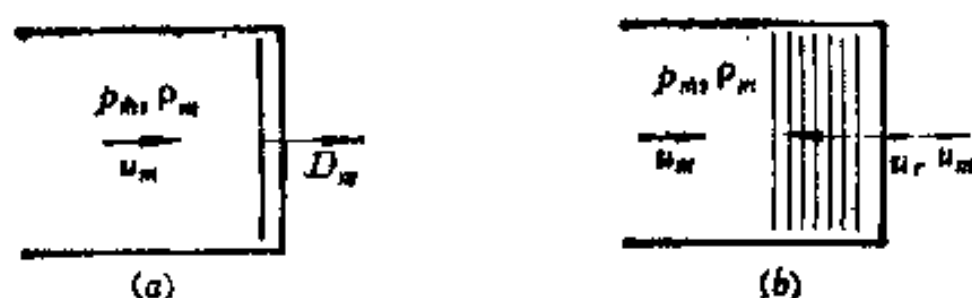
3. 用测定自由表面速度的方法计算爆压

对于金属板中的冲击波参数，经常采用测定金属板自由表面速度的方法给以确定。

首先研究一下自由表面速度与质点速度的关系。我们知

道, 当冲击波以速度 D_m 通过金属介质后, 质点速度为 u_m , 当冲击波到达金属板与空气相接触的自由表面时, 马上向金属板中反射回一束膨胀波, 迅速使金属板内的压力与外界大气压力相平衡, 由于向板内传入膨胀波的作用, 因而使金属板自由表面处的质点又获得了一个与膨胀波反向的向外运动速度 u_r 。如图 6-8-7 所示, 这时自由表面的运动速度

$$u_{f.s} = u_m + u_r$$



• 图6-8-7 自由表面处的波系

(a) 冲击波到达自由表面前; (b) 冲击波到达自由表面后。

在冲击波不是太强的情况下, 理论计算和实验数据都具有

$$u_m \approx u_r$$

因而

$$u_{f.s} = 2u_m \quad (6-8-11)$$

(6-8-11) 式称为自由表面处质点速度倍增公式。对绝大多数

固体材料而言, 当压缩程度 $\frac{\rho_m}{\rho_{m0}} < 1.4$ 时, 应用(6-8-11)

式引起的误差只有 1 ~ 2 %。

将 (6-8-11) 代入 (6-8-9) 式, 得到用自由表面速度表示的爆压公式

$$p_H = -\frac{1}{4}u_{f,s}(\rho_0 D + \rho_{m0} D_m) \quad (6-8-12)$$

通过实验的方法测定出自由表面速度 $u_{f,s}$ 后, 再通过关系式 (6-8-10) 计算出冲击波速度

$$D_m = a + -\frac{b}{2}u_{f,s}$$

从而, 就可以按照 (6-8-12) 式计算出被测炸药的爆压。

然而实际测量中发现, 自由表面速度的测定值 $u_{f,s}$ 与金属板的厚度 x_m 有关, 随着 x_m 的增加, $u_{f,s}$ 减小, 二者大约成为线性关系, 图 6-8-8 表示了这种关系, 这主要是由于冲

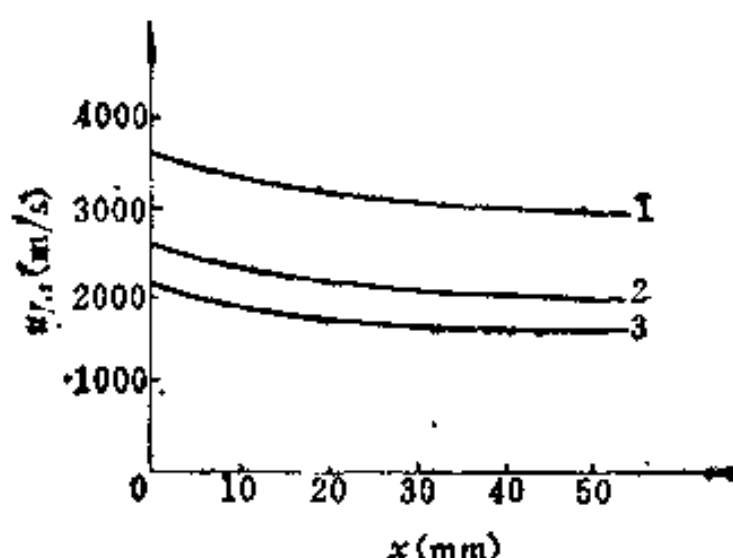


图6-8-8 自由表面速度与板厚的关系

1—铸铝板, 64黑索金/36梯恩梯; 2—铸铝板, 梯恩梯;
3—黄铜板, 64黑索金/36梯恩梯。

击波沿金属板传播过程中逐渐衰减所造成的。

为了确定被测炸药的爆压, 必须选定合适的金属板厚度。实验表明, 炸药爆轰在金属板中所形的冲击波压力 p_m 沿板厚 x_m 的分布规律, 与爆轰波化学反应区内、外的压力分布有着一一对应的关系, 如图 6-8-9 所示。在爆轰波沿炸药传播的过程中, 首先前沿冲击波到达与金属板相接触的界

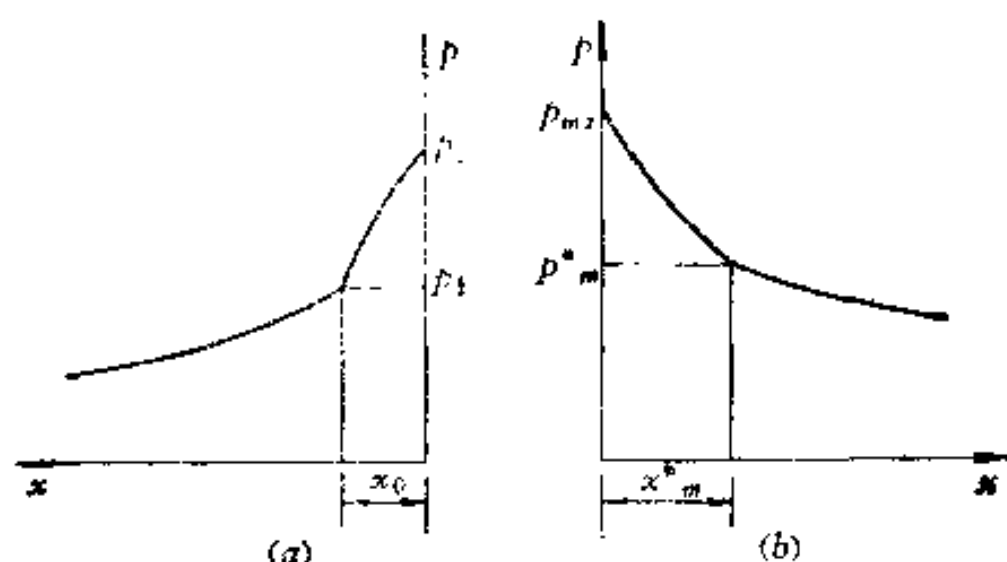


图6-8-9 冲击波压力沿板厚的分布与
爆轰波反应区的压力分布

- (a) 爆轰波化学反应区内、外的压力分布；
(b) 金属板内冲击波压力沿板厚的分布。

面，这时向金属板中传入的冲击波波阵面压力为 p_{mz} ，对应于前沿冲击波的压力 p_0 ；此后，爆轰波化学反应区内各层依次到达界面，这时向金属板中传入冲击波波阵面的压力，随着化学反应区各层压力的下降对应下降；至爆轰波化学反应区末端面时，由于化学反应区内、外压力变化规律显著不同，在化学反应区末端面处存在有压力拐点，而在金属板冲击波压力测量中，也存在着压力拐点，此处冲击波压力 p_m^* 与化学反应区末端面处压力 p_1 相对应。

实验表明，压力拐点所对应的金属板厚度 x_m^* 大约为 1mm 左右。

由于金属板太薄，实验数据不准确。通常采用测定一系列大于 1mm 厚金属板的自由表面速度 $u_{f,r}$ ，然后按照线性规律外推到 1mm 处，从而求得相应的自由表面速度 $u_{f,r}^*$ 。

这样就可以计算出被测炸药的爆压

$$p_H = \frac{1}{4} u_{f,s}^* (\rho_0 D + \rho_{m0} D_m^*) \quad (6-8-13)$$

式中

$$D_m^* = a + \frac{b}{2} u_{f,s}^*$$

表 6-8-3 给出了用这种方法测定的爆压数据。

表 6-8-3 自由表面法测定的几种炸药的爆压

被 测 炸 药	黑索金	梯恩梯	黑索金 64/ 梯恩梯 36
$\rho_0 (\text{g}/\text{cm}^3)$	1.767	1.637	1.713
$D (\text{m}/\text{s})$	8639	6042	8018
$\rho_{m0} (\text{g}/\text{cm}^3)$	2.788	2.790	2.791
$u_{f,s} (\text{m}/\text{s})$	3693	2462	3379
$p_H (\text{Pa} \times 10^8)$	337.9	189.1	292.2

二、水 箱 法

水箱法的实验装置如图 6-8-10 所示。当装在被测炸药

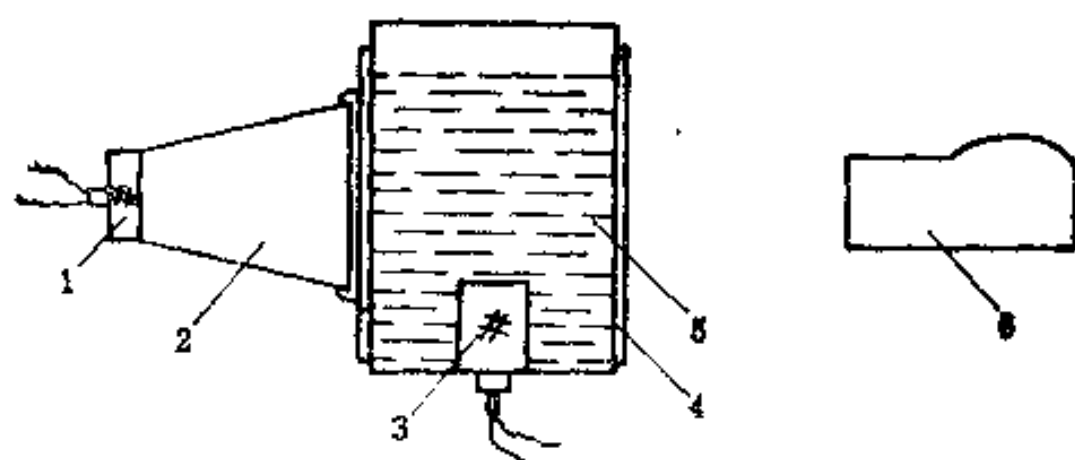


图 6-8-10 水箱法测爆压示意图

- 1 一装有雷管的光源药柱； 2 一充有氩气的爆炸光源；
3 一装有雷管的被测药柱； 4 一带有透明玻璃的水箱；
5 一水； 6 一高速照相机。

上的雷管起爆后，爆轰波沿着药柱进行传播，当爆轰波到达与水相接触的药柱顶端面时，向水中传入一道冲击波，同时向爆轰产物中反射回一束膨胀波。水箱法测爆压，主要是测定水中冲击波的速度。

水是透明的，当水中冲击波从药柱顶端一层层地向上传播时，冲击波所到之处，水层突然受到压缩，水的密度立即增大，这一层水的透明度大大降低，因而随着冲击波的传播，在水中就显示出一个暗层从药柱顶端向水面移动。测定冲击波速度，就是测定这个暗层在水中移动的轨迹，由于暗层无法在照相机胶片上感光，为此在水箱后面设置了一个与被测药柱爆炸同步的爆炸光源。当被测药柱爆炸时，光源药柱同时爆炸，光源药柱爆炸所形成的冲击波冲击氩气发出强光，而在水中移动着的暗层遮住光亮，在高速照相机胶片上就拍照出了暗层移动的轨迹。

图 6-8-11 表示高速照相机拍照的扫描曲线，其中扫描线 1 是爆轰波的扫描轨迹，扫描线 2 是水中冲击波的扫描轨迹。在水中冲击波扫描线与爆轰波扫描线交接点处，测量出水中冲击波扫描线与水平线的夹角 φ ，应用公式 (6-7-5) 就可以计算出水中冲击波的初始速度

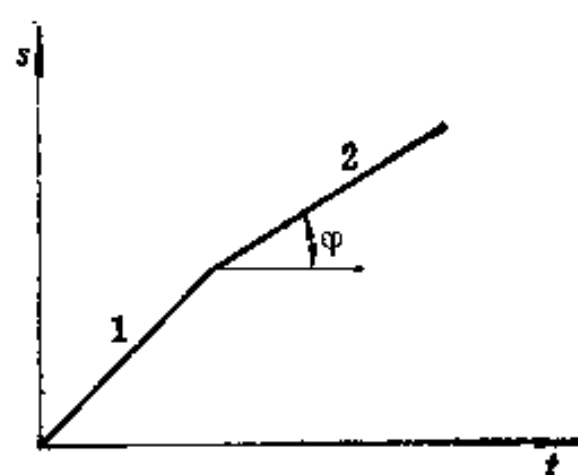


图6-8-11 水箱法测试的扫描线

- 1 — 爆轰波扫描线；
2 — 水中冲击波扫描线。

$$D_w = \frac{4\pi Rn}{\beta} \operatorname{tg} \varphi \quad (6-8-14)$$

式中 R 是相机扫描半径， β 是相机放大系数， n 是采用的转

镜转速。

当测定出水中冲击波初始速度后，就可以通过爆压与水中冲击波初始速度的关系，计算出被测炸药的爆压。

下面，研究一下炸药爆压与水中冲击波速度的关系。如图 6-8-12 所示，设被测炸药的初始密度为 ρ_0 ，初始压力和质

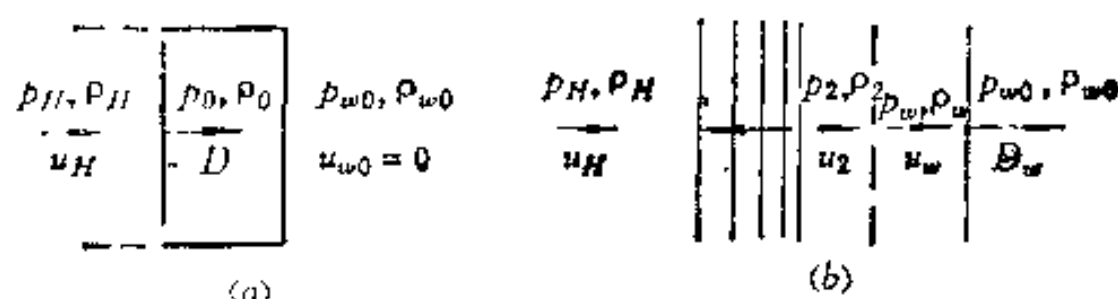


图6-8-12 药柱和水接触界面上的波系

(a) 爆轰波到达界面之前；(b) 爆轰波到达界面之后。

点速度分别为 $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$ 、 $u_0 = 0$ ，炸药的爆速为 D ，爆轰波化学反应区末端面上的压力、密度和质点速度分别为 p_H 、 ρ_H 、 u_H ；向水中传入的冲击波速度为 D_w ，冲击波前水的初始密度 ρ_{w0} ，水的初始压力和质点速度分别为 $p_{w0} = 10^5 \text{ Pa}$ 、 $u_{w0} = 0$ ，冲击波后水的压力、密度和质点速度分别为 p_w 、 ρ_w 、 u_w ；向爆轰产物中反射回膨胀波后产物的压力、密度和质点速度分别为 p_2 、 ρ_2 、 u_2 。

通过爆轰波前、后，水中冲击波前、后，以及反射膨胀波前、后的质量守恒和动量守恒，可以联立求出爆压与水中冲击波参数之间的关系。但是，这样求解的公式非常复杂，使用不方便，通常需作一些近似处理，以使公式简化。

如表 6-8-4 所示，向爆轰产物反射回的膨胀波前、后压力变化不大，因而将向爆轰产物反射回的膨胀波既可以看作

是弱波，又可以近似作为弱冲击波进行处理，这样带来的误差也不会太大。

表6-8-4 反射膨胀波前、后的压力

炸 药	ρ_0 (g/cm ³)	p_H (Pa $\times 10^8$)	p_2 (Pa $\times 10^8$)
炸药棉	0.97	63	60
	0.99	68	64
黑索金	1.10	112	94
	1.18	135	108

将向爆轰产物反射回的膨胀波近似当作弱冲击波，建立波前、后质量守恒和动量守恒关系，并且弱冲击波的速度仍采用当地音速，这样如同在自由表面法测爆压时确定爆压与金属板中冲击波参数间的关系一样，同样可以确定出爆压与水中冲击波的关系

$$p_H = \frac{1}{2} u_w (\rho_0 D + \rho_{w0} D_w) \quad (6-8-15)$$

式中 $\rho_{w0} = 1 \text{ g/cm}^3$ ， D_w 由实验测定后通过 (6-8-14) 式计算出来， u_w 通过已知的水中冲击波速度和波后质点速度关系确定出来。

在 $0.2 \sim 114 \times 10^8 \text{ Pa}$ 的范围内，水中冲击波速度和波后质点速度关系为

$$D_w = 1700 + 1.7 u_w (\text{m/s}) \quad (6-8-16)$$

因而，通过测定水中冲击波初始速度 D_w ，按照公式 (6-8-15) 和 (6-8-16)，就可以计算出被测炸药的爆压。表 6-8-5 提供了用这种方法测定的几种炸药的爆压数据。

表6-8-5 水箱法测定的几种炸药爆压

炸 药	黑索金	梯恩梯	特屈儿
ρ_0 (g/cm ³)	1.742	1.505	1.65
D (m/s)	8585	6609	7420
D_w (m/s)	6800	5500	6040
p_H (Pa $\times 10^6$)	329	187.2	238.2

三、电 磁 法

电磁法的实验装置如图 6-8-13 所示, 磁场由两个线圈绕组构成, 药柱放在磁场之间, 传感器由铝箔制成, 嵌入被测药柱内, 铝箔框平面与磁场方向垂直, 铝箔引线由同轴电缆连接到脉冲示波器。

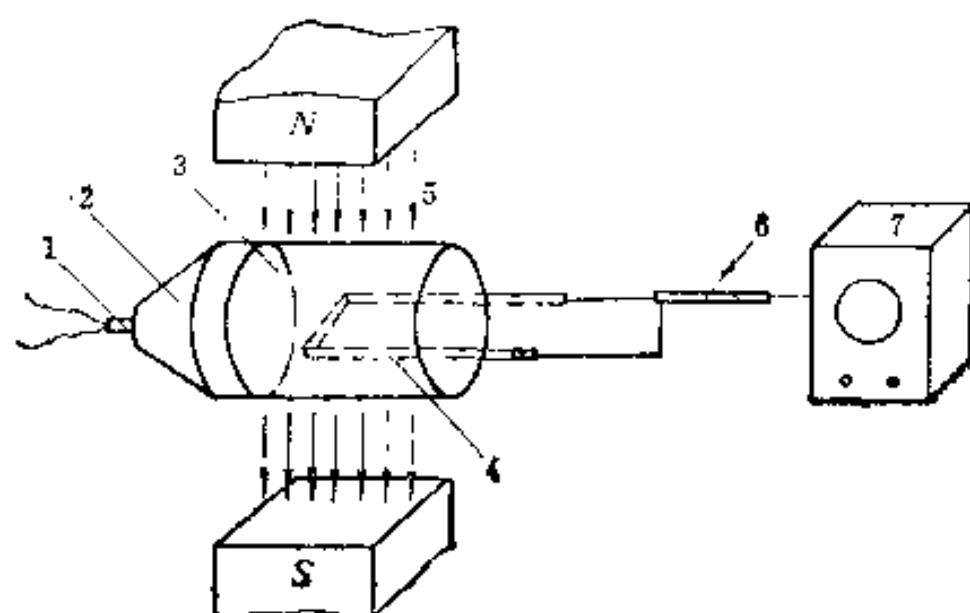


图6-8 13 电磁法测爆压示意图

1—雷管; 2—平面波发生器; 3—被测炸药; 4—“Π”形铝箔传感器; 5—磁场; 6—电缆; 7—脉冲示波器。

雷管起爆后, 通过平面波发生器向被测炸药中传入一道平面爆轰波, 当稳定传播的平面爆轰波到达“Π”形铝箔框

时, 铝箔框底立即获得与爆轰产物质点相同的运动速度 u_H , 与爆轰产物一起运动, 由于铝箔框底的运动方向与磁场所产生磁力线的方向垂直, 因而在回路中产生一个感应电动势 ε , 此电动势通过与铝箔相连接的导线输入到示波器中, 由示波器记录下感应电动势的波形。典型的感应电动势波形如图6-8-14所示, 波形最高点相应于铝箔以化学反应区末端面处爆轰产物质点速度运动时所产生的电动势。

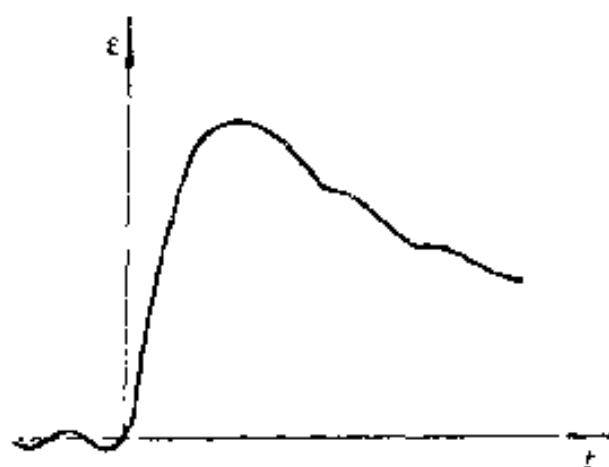


图6-8-14 典型的感应电动势波形图

设磁场强度为 $H(G)$, 铝箔底框运动速度为 $u_H(\text{mm}/\mu\text{s})$, 其长度为 $l(\text{mm})$ 。按照法拉第定律, 所产生的感应电动势

$$\varepsilon = H u_H l \times 10^{-4} (\text{V}) \quad (6-8-17)$$

若所绕线圈的半径为 $R(\text{mm})$, 线圈的总匝数为 n , 通过线圈的电流为 $I(\text{A})$, 则磁场强度可以由下式计算出来

$$H = 4.5 \frac{nI}{R} \quad (6-8-18)$$

因而当测定感应电动势 ε 后, 可以通过 (6-8-17) 和 (6-8-18) 二式计算出化学反应区末端面处爆轰产物的质点速度 u_H 。

当 u_H 求出后, 可以通过爆轰波的动量守恒方程, 确定被测炸药的爆压

$$p_H = \rho_0 D u_H \quad (6-8-19)$$

式中 ρ_0 、 D 是被测炸药的装药密度和爆速， u_H 是上面求出的化学反应区末端面处爆轰产物的质点速度。表 6-8-6 是用这种方法确定的几种炸药的爆压数据。

表 6-8-6 电磁法测定的几种炸药爆压

炸 药	ρ_0 (g/cm ³)	D (m/s)	u_H (m/s)	p_H (Pa $\times 10^8$)
梯恩梯	1.45	640	1660	159
	1.50	650	1760	194
黑索金	1.50	810	2000	259
	1.57	850	2120	310
特屈儿	1.56	660	1500	110
	1.68	750	1870	236
泰安	1.51	7420	1670	137
	1.66	8100	1830	246

§ 6-9 爆轰反应机理

经典爆轰波理论，采用理想的爆轰波模型和爆轰稳定传播条件。理想爆轰波模型认为化学反应区所发生的反应过程是一层层按次序进行的，至化学反应区末端面处化学反应结束；而爆轰波稳定传播条件则是说爆轰波传播速度等于当地音速，这样化学反应放出的热量全部用来供给爆轰波，使之稳定传播。这种理论没有考虑爆轰波化学反应区化学反应的历程，没有考虑各种具体条件下爆轰反应的差别，因而它无法解释炸药爆轰过程中所出现的一系列复杂现象。

诸如：为什么压装梯恩梯比注装梯恩梯容易起爆？单质炸药中加入铝粉后，为什么爆热增加了，反而爆速降低？一般来说，随着装药密度的提高，爆速是增加的，但是对于个别混合炸药，当密度过高时却出现反常现象，这又是为

什么?

研究表明,爆轰波沿炸药进行传播时,引起化学反应的原因是温度作用,而不是压力作用,试验证实即使使用 10^{10} Pa 的压力缓慢压实炸药,也不会引起炸药的爆炸。因而,炸药在前沿冲击波的冲击压缩下,波后温度立即上升,达到很高的温度,这个温度是引起化学反应的直接原因。

研究还表明,爆轰波沿炸药传播过程中所进行的化学反应,不是一成不变的,它不仅与炸药的化学组成有关,而且与炸药的化学结构和装药的物理状态有关。

在实验研究的基础上,提出了以下三种爆轰反应传播的机理。

一、均匀灼热机理

这种机理适用于均匀液体炸药(其中无气泡、无其杂质)和结构很均匀的固体炸药(如炸药的单晶结构)。

当爆轰波在均匀炸药中传播时,前沿冲击波的冲击压缩使整个一薄层炸药温度同时升高,以这个温度引起炸药进行化学反应。通常炸药爆轰传播时,前沿冲击波冲击压缩下薄层温度可达 10^3°C , 化学反应能够在 $10^{-9}\sim 10^{-7}\text{s}$ 的时间内完成,从而保证爆轰过程以 $(5\sim 8)\times 10^3\text{m/s}$ 的速度传播。

由于炸药的均匀性,使整个一层炸药升高到一定的温度,需要很高的热量,也就是说需要很强的冲击压缩才能达到,因而这一类炸药起爆较难。

二、不均匀的灼热机理

这种机理适用于结构不均匀的炸药,例如含有气泡和杂质的液体炸药,松散多孔的散装炸药和颗粒状炸药压制成形

的药柱。

当爆轰波在非均匀状态的炸药中传播时，前沿冲击波的冲击压缩对各个点来说是不均匀的，其中会使某些个别点温度升得很高，形成“热点”，化学反应首先在热点处进行，然后再向其它地方迅速扩展。由于不需要很强的冲击压缩就能够形成很高的热点温度，因而这一类炸药的起爆比较容易。

例如，无杂质的、均匀的液态梯恩梯，在冲击波压力为 $11 \times 10^9 \text{Pa}$ 的强冲击波的冲击压缩下，才能起爆；密度为 1.62g/cm^3 的铸装梯恩梯，在冲击波压力为 $11.5 \times 10^9 \text{Pa}$ 的强冲击波的冲击压缩下，才能起爆；而密度为 1.63g/cm^3 的压装梯恩梯，因为药柱由片状炸药压制而成，结构不均匀，易形成热点，因而在冲击波压力为 $2.2 \times 10^9 \text{Pa}$ 的冲击波的冲击压缩下，就能够起爆。再如，结晶密度时的黑索金，以冲击波压力为 $10 \times 10^9 \text{Pa}$ 的强冲击波进行冲击，才能起爆；而密度为 1.74g/cm^3 的压装黑索金，以冲击波压力为 $1.5 \times 10^9 \text{Pa}$ 的冲击波进行冲击，就能够起爆。

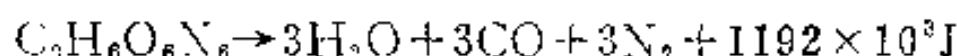
三、混合反应机理

这种机理适用于由氧化剂和可燃剂所组成的固体混合炸药，例如含铝炸药和硝酸铵、梯恩梯混合炸药。

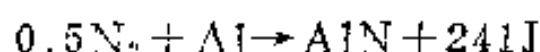
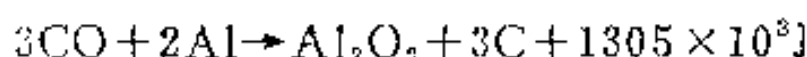
这类混合炸药的反应过程比较复杂，由于混合物性质的不同，其化学反应机理又有不同的特点。一种是混合炸药中易于分解的成分在前沿冲击波的冲击压缩下进行化学反应，生成气体产物，其气体产物再与未反应的成分进行化学反应；另一种是炸药的各组分在前沿冲击波的冲击压缩下，分别进行分解反应，然后分解产物之间再进行相互作用。

例如，由黑索金和铝粉组成的混合炸药，在前沿冲击波

的冲击压缩下，黑索金首先进行分解反应

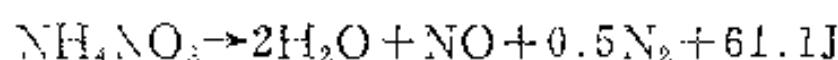


然后气体产物 CO 和 N_2 再与铝粉进行反应



前一个阶段，黑索金的分解反应在化学反应区内进行，放出热量维持爆轰波的运动；而后一个阶段，产物气体与铝粉的反应，时间较晚，在化学反应区之后进行，称为“后燃”效应，这部分反应放出的热量无法供给前沿冲击波，所以就造成了含铝炸药爆热增加而爆速降低的结果。

再如，硝酸铵混合炸药在前沿冲击波的冲击压缩下，硝酸铵分解生成氧化剂 NO，即



然后 NO 再与混合炸药其它成分的分解产物继续进行化学反应，放出更多的热量。

这类炸药的爆轰传播过程受很多因素的影响，主要是颗粒度、混合均匀性和装药密度。当颗粒度大、混合不均匀时，不利于这类炸药化学反应的扩展，因而使爆轰传播速度下降；当装药密度过大，炸药各组分颗粒之间的空隙就会过小，不利于各组分所分解出的气体产物之间的混合和反应，因而导致反应速度的下降，甚至熄爆。

以上几种爆轰反应机理，可以帮助分析爆轰的化学物理本质，有助于解释爆轰过程中所出现的一些复杂现象。

§ 6-10 影响爆轰传播的因素

在爆轰波理论研究中，除了采用了理想爆轰波模型和稳定传播条件外，实际上还采用了装药无限大，以及爆轰不受

外界影响的假设，只有在装药无穷大和不受外界影响的条件下，才可以不考虑爆轰波化学反应区中产物向四周的膨胀，只考虑在爆轰传播方向上从后面进来的膨胀波的作用，而在实际情况下，炸药装药并不是理想的，各种具体的装药结构都不可能是无穷大，而有一定的尺寸，装药在有限尺寸下爆轰会发生什么变化呢？装药的尺寸是否可以无限地小呢？这些都是实际应用中需要解决的问题，

装药密度对于爆轰传播也有着密切的影响。一般来说，随着装药密度的提高，爆轰传播速度增加，这在实际工作中具有重要的使用价值。

另外，向炸药中加入一些惰性添加物，对爆轰的传播也有着直接的影响。

本节主要从实验的角度出发，讨论装药直径和装药密度对爆轰传播的影响。

一、装药直径对爆轰传播过程的影响

对于一定装药密度的药柱，随着药柱直径的变化，炸药的爆速是有变化的，实验证明：当装药直径小于某一定值时，爆轰不能稳定传播；当装药直径超过这一定值时，爆轰就能稳定进行，并且爆速随装药直径的增加而增加；当装药直径增加到另一定值时，其爆速不再增加，而是以理想爆速进行传播。图 6-10-1 定性地表示了爆速与装药直径的关系，前一个定值是能够使爆轰稳定传播的最小装

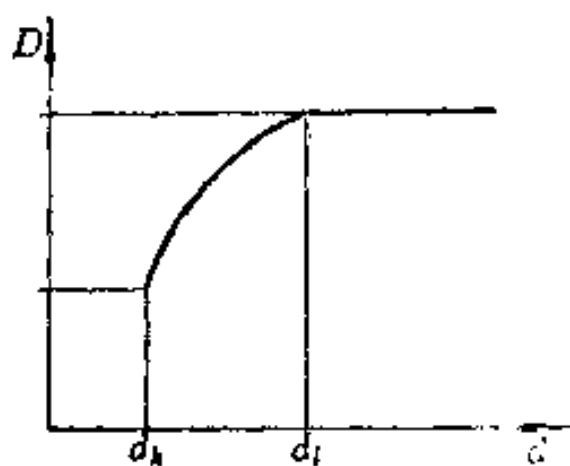


图 6-10-1 爆速与装药直径的关系

药直径，称为临界直径。临界直径的爆速称为临界爆速，后一个定值是能够以理想爆速传播时的最小装药直径，称为极限直径。

为什么装药直径变化时，爆轰传播速度会发生变化呢？原因在于爆轰波沿有限尺寸的药柱传播时，爆轰波化学反应区除了有化学反应的放热过程之外，同时还存在着能量的耗散过程，由于化学反应区内产物压力很高，具有这样高压的反应产物除了向后进行膨胀外，必然还要向四周进行侧向膨胀。

产物向后膨胀所引起的由后面传播过来的膨胀波，到达反应区末端面处时具有 $u_H + c_H = D$ 的特点，因而后面传播过来的膨胀波，只能紧跟在反应区之后而不能进入反应区，但是产物侧向膨胀所产生的侧向膨胀波却能够进入反应区内，如图 6-10-2 所示，侧向膨胀波以当地音速向装药轴线会聚，侧向膨胀波所到之处，反应区内反应产物压力迅速下降，其热量也随之向外散失，因此，维持爆轰波向前传播的能量就会减少。

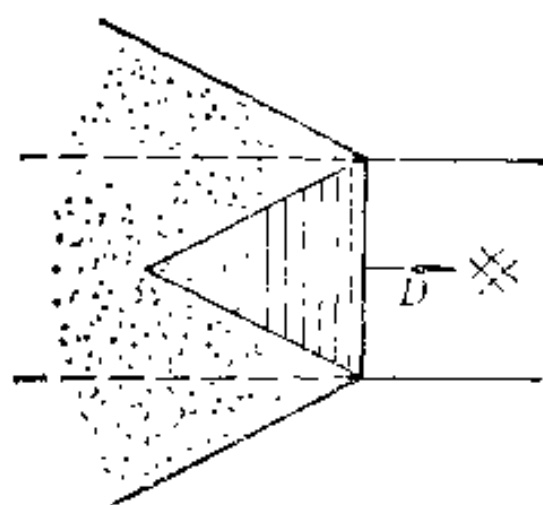


图6-10-2 爆轰产物的飞散

当装药直径很小时，侧向膨胀波进入化学反应区所引起的能量损耗相对很大，剩余的能量不足以激起下层炸药的爆轰化学反应，因而爆轰波不能再继续稳定传播，而是逐渐衰减，最后自行熄灭。

当装药直径增加后，侧向膨胀波进入化学反应区所引起

的能量损耗,较比起爆轰反应放出的总能量来说相对地减少,也就是说维持爆轰波传播的有效能量相对增大,因而爆轰可以稳定传播。并且,随着装药直径的增加,爆轰稳定传播的速度也不断增加。

当装药直径增加到一定值时,侧向膨胀波进入化学反应区所引起的能量损耗,不足以使理想爆速降低,因而爆速以理想爆速传播。

爆速和装药直径的关系与装药密度、颗粒度大小等因素有关,图 6-10-3 表示了梯恩梯炸药的这种关系。一般来说,装药密度增加,爆速增大,这样既增加了爆轰化学反应的总能量,又相对削弱了侧向能量损失的比例,因而临界直径和极限直径都减小;炸药颗粒度减小,有利于化学反应的进行,化学反应时间缩短,化学反应区变窄,同样削弱了侧向能量损失,因而临界直径和极限直径也都减小。

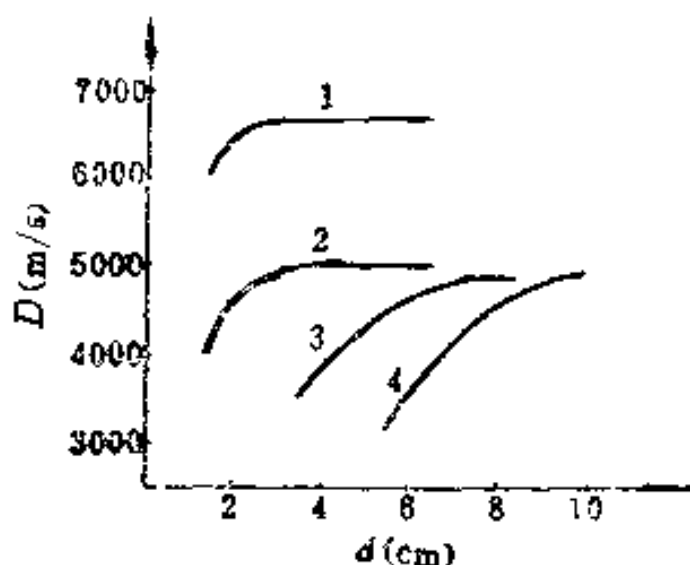


图6-10-3 梯恩梯爆速与药柱直径颗粒度大小的关系

- 1—细粒注装, $\rho_0 = 1.6 \text{ g/cm}^3$;
- 2—颗粒度 $0.15 \sim 0.2 \text{ mm}$, $\rho_0 = 1.0 \text{ g/cm}^3$;
- 3—颗粒度 $3 \sim 4 \text{ mm}$, $\rho_0 = 1.0 \text{ g/cm}^3$;
- 4—颗粒度 $4 \sim 6 \text{ mm}$, $\rho_0 = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。

装药的临界直径在炸药应用上具有重要的意义,例如火工品设计中需要考虑在保证产品的威力性能条件下,尽量减少装药直径;再如传爆系列设计中,既要保证爆轰能够稳定传播,又要传爆系列足够的小,下面扼要讨论一些因素对装药临界直径的影响。

1. 炸药的化学性质不同, 炸药的临界直径明显不同。表 6-10-1 给出了把炸药装在薄玻璃管中所得到的数据, 装药密度皆为 $0.9 \sim 1.0 \text{g/cm}^3$, 颗粒度皆为 $0.05 \sim 0.20 \text{mm}$ 。

表 6-10-1 同样试验条件下, 不同炸药的临界直径

炸 药	$d_K(\text{mm})$
迭氮化铅	0.01~0.02
泰安	1.0~1.5
黑索金	1.0~1.5
苦味酸铅	2~3
苦味酸	6
梯恩梯	8~10
80硝酸铵/20铝粉	12
硝酸铵	100

在同样条件下, 炸药的临界直径愈小, 表示炸药的爆轰能力愈强。从表 6-10-1 中看出, 迭氮化铅的临界直径最小, 因而用来作为雷管中的起爆药, 泰安、黑索金的临界直径比梯恩梯小得多, 因而常采用在雷管中作为主装药, 硝酸铵临界直径最大, 只能用来作为矿山爆破之用。

图 6-10-4 给出了不同硝酸铵和梯恩梯比例的混合炸药的临界直径, 装药密度皆为 $0.83 \sim 0.85 \text{g/cm}^3$, 硝酸铵和梯恩梯在混合前, 皆用孔径为 0.4mm 的筛子过筛, 从图中可以看出随着硝酸铵成分的增加, 临界直径增加, 起初在硝酸铵比例低时增加较慢, 当硝酸铵超过 80% 之后, 临界直径急剧增加, 此时爆轰传播的临界速度大约界于 $1100 \sim 1300 \text{m/s}$ 之间。

2. 炸药物理状态对临界直径的影响

实验证明, 炸药的物理状态不同, 临界直径也有很大差

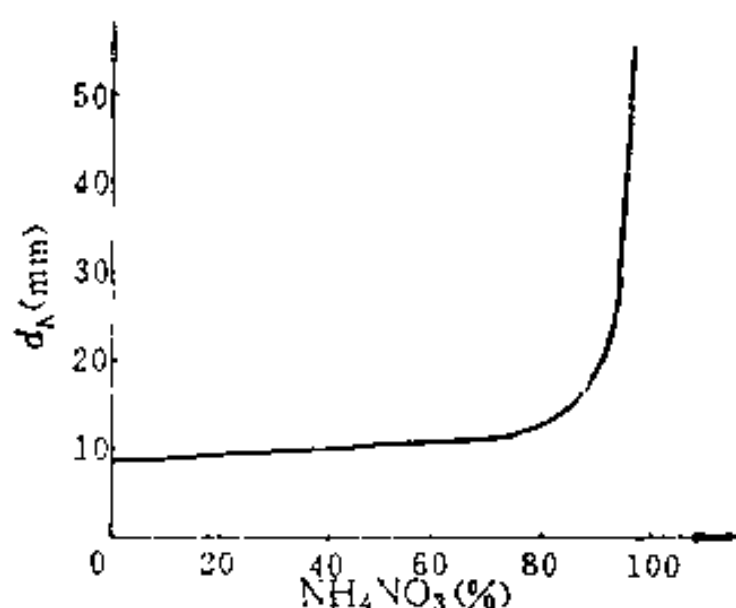


图6-10-4 不同硝酸铵和梯恩梯比例混合炸药的临界直径

别，表 6-10-2 给出了梯恩梯炸药在液态、固态（铸装和压装）条件下的临界直径。

表6-10-2 梯恩梯炸药在不同状态下的临界直径

炸药状态	ρ_0 (g/cm ³)	d_K (mm)
81°C液态	1.46	62
铸装(结晶结构)	1.62	38
压装(颗粒度140μ)	1.62	1.8~2.5

从表中看出不仅液态、固态时临界直径不同，就是装药方法不同时临界直径也相差很大。造成这种差别的原因，主要在于它们的物理状态不同时，爆轰发生和传播的机理不同。对于液态和铸装的梯恩梯，由于结构均匀，爆轰发生和传播机理是均匀灼热机理，爆轰传播过程中，要使一整层炸药同时激发高速化学反应，需要很高的能量，当装药直径小时，由于侧向膨胀波进入化学反应区损失能量的比例较大，剩余的能量不足以达到激发下一层炸药进行高速化学反应的要求，因而爆轰无法稳定传播，所以临界直径大。而压装梯恩

梯由于是由颗粒状炸药压制而成, 结构不均匀, 属于不均匀灼热机理。在前沿冲击波冲击压缩下, 容易形成大量的热点, 因而需要较少的能量就可以使激发炸药的爆轰化学反应, 所以压装梯恩梯的临界直径就比铸装和液态条件下临界直径小。

3. 炸药颗粒度对临界直径的影响

炸药的颗粒度愈小, 装药的临界直径愈小。表 6-10-3 表示了颗粒度对临界直径的影响。

表6-10-3 颗粒度对临界直径的影响

炸 药	ρ_0 (g/cm ³)	颗粒尺寸(mm)	d_K (mm)
梯恩梯	0.85	0.01~0.05	5.5
		0.07~0.2	11.0
泰安	1.00	0.025~0.1	0.8
		0.15~0.25	2.2
苦味酸	0.95	细小颗粒	5.5
		0.75~0.1	9

颗粒度愈小, 爆轰反应进行得愈快, 反应区愈窄, 侧向膨胀引起的能量损失相对减少, 导致临界直径减小。但是有时也出现了一些似乎反常的现象, 例如把磨得很细且在每平方厘米 300kg 的压力下, 压紧的泰安药块粉碎成 4~5 mm 的碎粒, 再把这些碎粒装进直径为 15mm 的铜管中, 此时装药平均密度为 0.753g/cm³, 但是爆速却达到 7924m/s, 而在这种密度下, 正常的爆速也只不过是 4740m/s。对于梯恩梯炸药在这种条件下也进行了同样的实验, 并没有发现这种爆速反常的现象。

通过研究表明, 上述现象仍然与临界直径有关, 如果药

粒尺寸超过临界直径，这时爆轰不是以连续波阵面的形式沿炸药传播，而是在炸药药粒中以药粒密度相对应的速度自行爆轰，然后爆轰从一个药粒传到另一个药粒；如果药粒的尺寸小于临界直径，它们就不能以单个药粒进行爆轰，而是在总体炸药上进行爆轰，这个爆轰以连续阵面的形式沿炸药传播，就象以正常速度在均匀炸药中传播一样。由于4mm药粒大于泰安的临界直径，而小于梯恩梯的临界直径，所以对于泰安来说爆轰可以在各个药粒中进行传播，而对于梯恩梯来说，爆轰只能在总体炸药上进行传播。

4. 装药密度对临界直径的影响

对于单质炸药来说，随着装药密度的增加，临界直径减小。图6-10-5表示了压装梯恩梯密度与临界直径的关系。曲线1是指颗粒度为0.2~0.7mm的装药，曲线2是指颗粒度为0.05~0.1mm的装药，从图6-10-5看出当密度由0.85g/cm³增加到1.5g/cm³时，梯恩梯的临界直径

减小 $\frac{2}{3}$ 以上。

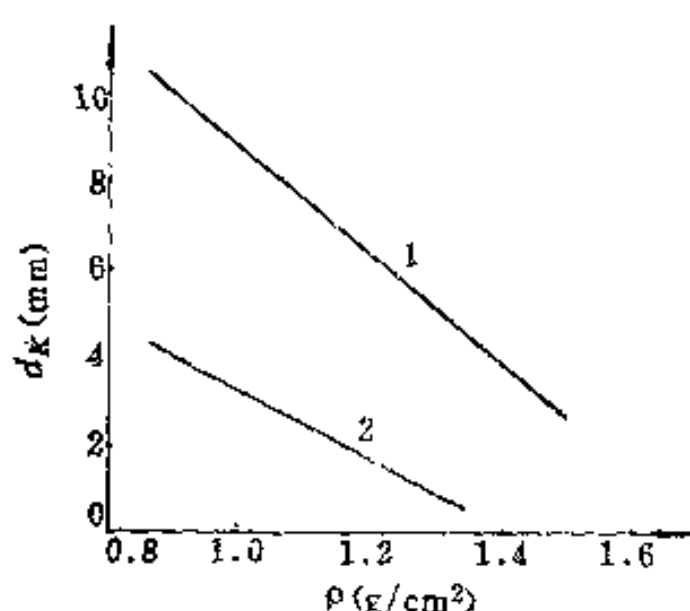


图6-10-5 压装梯恩梯密度与临界直径的关系

1 — 颗粒度0.2~0.7mm;
2 — 颗粒度0.05~0.1mm。

但是，当单质炸药接近单晶密度时，其临界直径反而增加，例如单晶泰安的临界直径是5mm，单晶黑索金的临界直径是7mm，单晶奥克托金的临界直径为18mm，单晶梯恩梯的临界直径却达到110mm，这主要在于单晶密度时，爆

轰传播的机理由不均匀灼热机理转变为均匀灼热机理的缘故。

由氧化剂和可燃剂组成的混合炸药与单质炸药相比，其装药密度与临界直径的关系，具有完全不同的性质。

图 6-10-6 表示两种硝酸铵混合炸药的密度与临界直径的关系。曲线 1 是指

88% 硝酸铵和 12% 泥炭组成的混合炸药，曲线 2 是指 80% 硝酸铵和 20% 梯恩梯组成的混合炸药，它们的临界直径都是随着密度的增加而增加，主要原因在于这类炸药属于混合反应机理，密度增加后，不利于分解的气体的进一步混合，再次发生反应，因而临界直径增大。

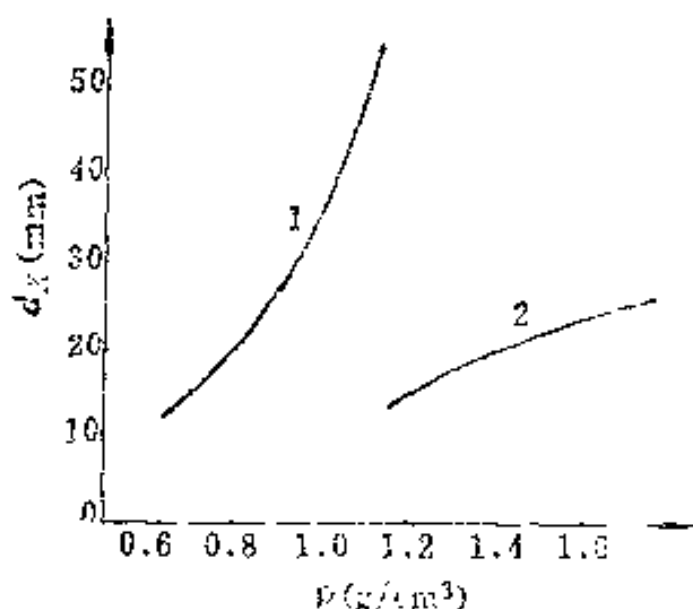


图6-10-6 混合炸药装药密度与临界直径的关系

1—88%硝酸铵/12%泥炭；

2—80%硝酸铵/20%梯恩梯。

图 6-10-7 表示了 50% 硝酸铵和 50% 梯恩梯所组成混合炸药装药密度与临界直径的关系。当密度小于 1.1g/cm^3 时，与常用工业炸药相似，随密度的增加，临界直径增加；当密度大于 1.3g/cm^3 时，与单质炸药相似，随密度的增加，临界直径减小。

5. 外壳对临界直径的影响

装药有外壳可以使临界直径减小。外壳的存在主要在于限制了药柱侧向的膨胀，促进了爆轰反应区中能量有效地利

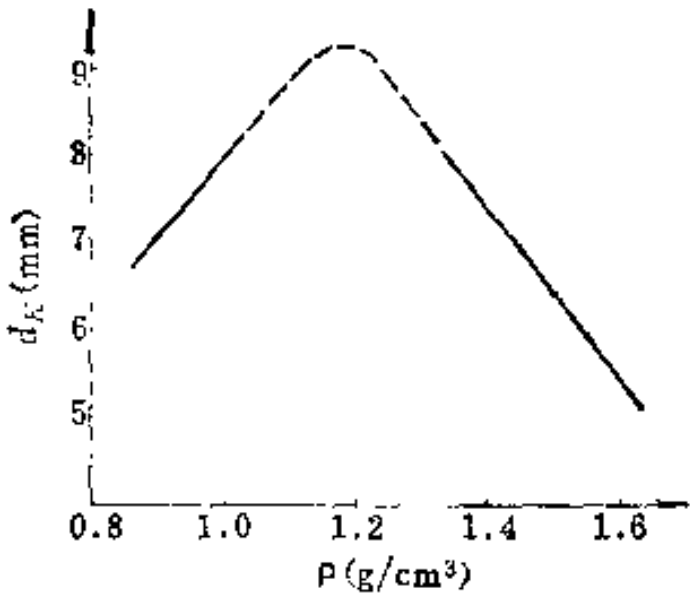


图6-10-7 50%硝酸铵和50%梯恩梯混合
炸药的密度与临界直径的关系

用。对于爆轰能力较低的炸药来说，外壳对临界直径的影响更加明显，表 6-10-4 列出了硝酸铵和梯恩梯不同比例混合时，有壳和无壳的临界直径数据，装药密度在 0.83~0.85 g/cm³之间，有水壳时，水层的厚度为 2~3 倍的装药直径。

表6-10-4 硝酸铵和梯恩梯混合炸药在
有、无外壳时的临界直径

混 合 比 例		d_K (mm)	
硝酸铵%	梯恩梯%	无壳	有水壳
0	100	9	—
78	22	12	4
88	12	15	6
94	6	21	8
97	3	30	14
100	0	100	19

外壳的作用主要和质量有关，对于低猛度的炸药外壳的强度也起一定的作用。从表中看出增加外壳之后，对爆轰的作用如同增加药柱的直径一样。例如对于 88% 硝酸铵和 12% 梯恩梯的混合炸药，在没有外壳时药柱直径 15mm 时，才能达到临界爆速 1650m/s，而当增加水壳之后药柱直径 5mm 时就能达到临界爆速 1650m/s。

二、装药密度对爆轰传播过程的影响

如果装药直径大于极限直径，爆轰可以以理论爆速稳定传播，从理论上讲，这时只有爆热和装药密度对爆速才有影响，其他因素只能影响爆轰的起爆条件。

对于单质炸药来说，随着装药密度的增加，爆速一直增加。表 6-10-5 和表 6-10-6 给出了几种炸药在不同装药密度下的实验数据，图 6-10-8 和图 6-10-9 分别表示了这种关系的实验曲线。

表6-10-5 三种炸药爆速与装药密度的关系

苦味酸		梯恩梯		泰安	
ρ_0 (g/cm ³)	D (m/s)	ρ_0 (g/cm ³)	D (m/s)	ρ_0 (g/cm ³)	D (m/s)
0.7	4020	0.52	3940	1.03	5615
0.97	4963	0.69	4444	1.22	6357
1.32	6190	0.96	5387	1.37	6970
1.41	6510	1.22	6291	1.50	7418
1.62	7200	1.52	7373	1.62	7913
1.70	7483	1.68	7740	1.73	8350

表6-10-6 两种炸药爆速与装药密度的关系

梯 恩 梯		钝化黑索金	
$\rho_t (\text{g/cm}^3)$	$D (\text{m/s})$	$\rho_0 (\text{g/cm}^3)$	$D (\text{m/s})$
1.30	6025	1.25	6660
1.35	6200	1.30	6875
1.40	6315	1.35	7125
1.45	6480	1.40	7315
1.50	6610	1.45	7470
1.55	6735	1.50	7640
1.60	6960	1.55	7820
1.61	7000	1.60	7995

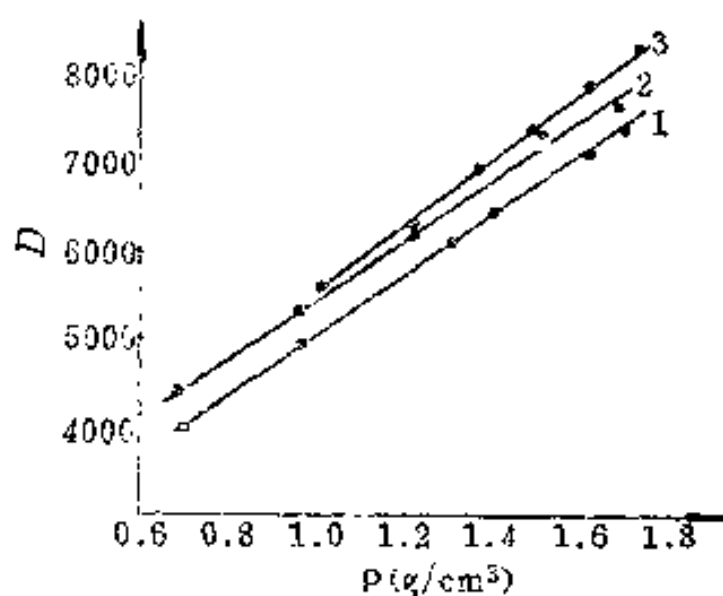


图6-10-8 三种炸药装药密度与爆速的关系

1 — 苦味酸； 2 — 梯恩梯； 3 — 泰安。

大量实验表明，当装药密度 $\rho_0 > 1 \text{g/cm}^3$ 时，爆速与装药密度成线性关系。设 D_{ρ_0} 为装药密度为 ρ_0 时的爆速， $D_{1.0}$

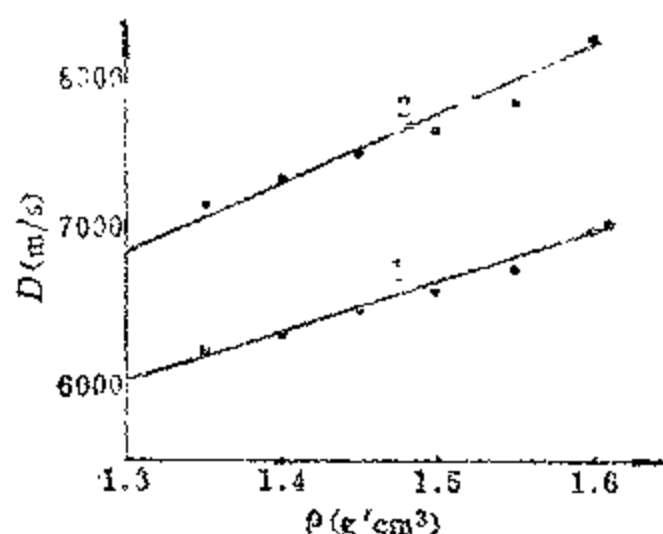


图6-10-9 两种炸药装药密度与爆速的关系

1—梯恩梯；2—钝化黑索金。

是密度 1g/cm^3 时的爆速，则在密度 1g/cm^3 至结晶密度的范围内，其爆速随装药密度的关系可表示为公式

$$D_{\rho_0} = D_{1.0} + M(\rho_0 - 1.0)$$

式中 M 是与炸药性能有关的系数，表示当炸药密度每增加 1g/cm^3 时爆速的增加量。当爆速单位采用 m/s ，密度单位采用 g/cm^3 时， M 的单位是 $\frac{\text{m}}{\text{s}} / \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ 。 M 值一般在 $3000 \sim 4000$ 范围内。表 6-10-7 给出了一些炸药 $D_{1.0}$ 和 M 的实验数据。

对于由氧化剂和可燃剂构成的机械混合炸药来说，随着装药密度的增加，起初爆速是增加的，当达到某一密度时，随着密度的增加，爆速反而下降。并且当密度接近结晶密度时，经常会出现拒爆现象。图 6-10-10 描述了这种情况，本实验为 90% 硝酸铵/10% 地恩梯和 90% 硝酸铵/10% 铝粉两种混合炸药。装药直径皆为 100mm 。

表6-10-7 几种常用炸药的 $D_{1.0}$ 和 M 值

炸 药	$D_{1.0}(\text{m/s})$	$M\left(\frac{\text{m/s}}{\text{g/cm}^3}\right)$
梯恩梯	5010	3225
苦味酸	5255	3045
泰安	5500	3950
特屈儿	5600	3225
奥克托金	5720	3733
黑索金	6080	3530
黑索金91/石蜡9	5780	4000
B炸药	5690	3085
泰安50/梯恩梯50	5480	3100
硝酸铵50/梯恩梯50	5100	4150
黑索金73/蜡9/铝18	4785	4415
黑索金42/梯恩梯40/铝18	4650	3605

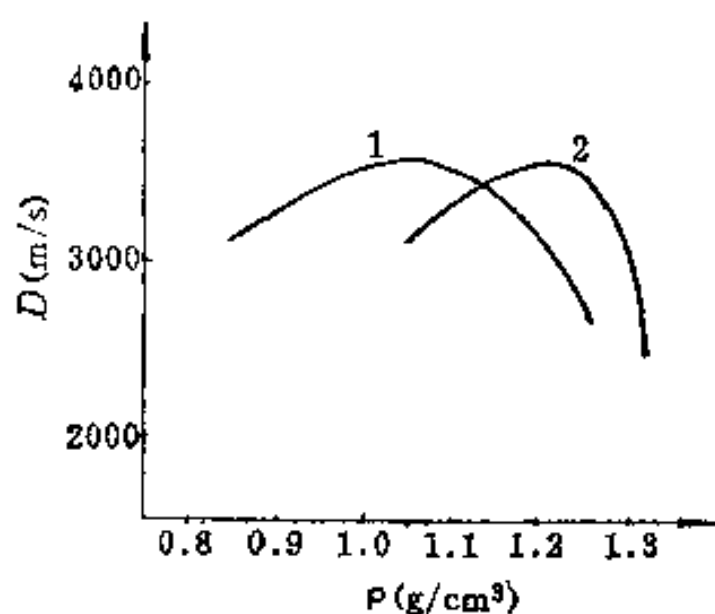


图6-10-10 硝酸铵混合炸药爆速与装药密度的关系

1—90%硝酸铵/10%地恩梯；2—90%硝酸铵/10%铝粉。

混合炸药爆速和密度之所以有这种关系，主要原因在于装药密度过大时，妨碍了分解组分的进一步接触和混合，导致反应速度降低，甚至引起熄爆。

§ 6-11 燃烧转变为爆轰

炸药在一定压力、湿度的条件下,可以进行稳定地燃烧,但是当条件变化时,燃烧又能够变成不稳定的形式,并且能够转化成为爆轰。

从安全生产的角度来说,对于炸药在生产加工、销毁、贮存过程中,了解炸药的燃烧以及燃烧向爆轰的转变,有着实际重要的意义,本节只介绍固体炸药的燃烧和燃烧向爆轰的转变问题。

一、炸药的稳定燃烧

炸药的稳定燃烧是指在一定条件(环境压力、湿度、药柱密度等)下,炸药以确定的速度燃烧,不发生波动和不转变成爆轰的过程。

研究炸药燃烧,通常把要研究的药柱(或药包)侧表面用不燃或难燃材料包复,按照一定的方式,放在燃烧室中,控制室内惰性气体的压力、温度,而后由药柱的一端点燃药柱,观察炸药燃烧的情况。

实验表明,炸药的燃烧过程是以燃烧反应波的形式传播,燃烧反应波传播过程中,反应区的能量是通过热传导、辐射及燃烧气体的扩散作用传入未反应下层炸药,但是对于不同类型的炸药,其反应区形式又不尽相同。

对于易挥发的炸药来说,在环境压力不大的条件下,燃烧反应主要在炸药气体中进行。图 6-11-1 描述了这种反应区以及反应区内温度分布的情况。在稳定燃烧的过程中,原始炸药表面首先在热传导、辐射等作用下进行加热,其温度由初始值加热到沸点温度,在炸药表面形成一个固相加热层,

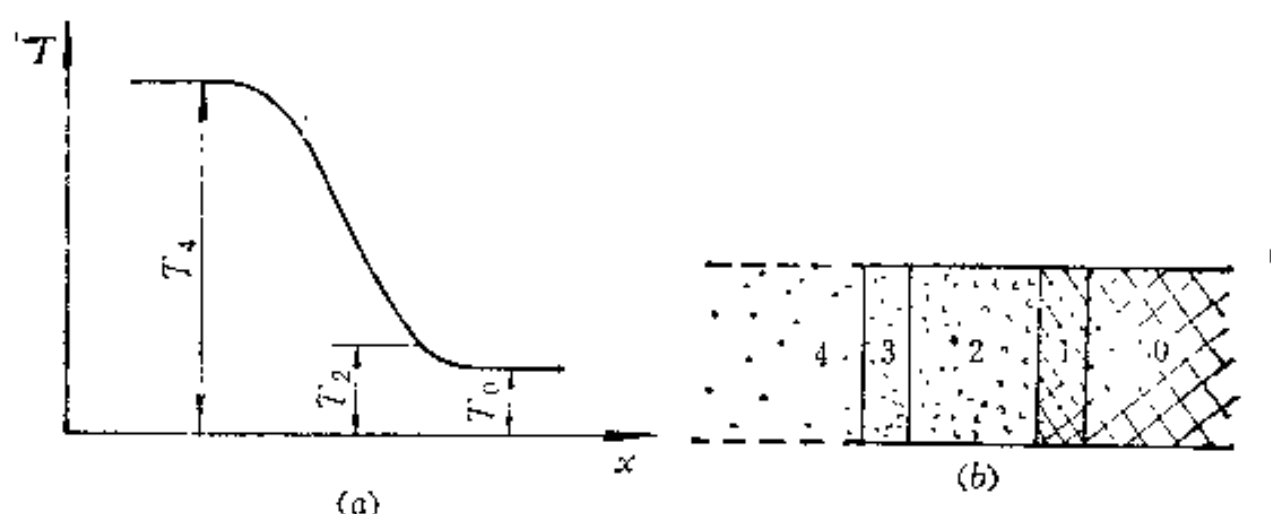


图6-11-1 挥发炸药燃烧反应区

(a) 反应区温度分布; (b) 反应区结构。

0—原始炸药; 1—固体炸药加热区; 2—炸药蒸气加热区;
3—化学反应区; 4—燃烧产物。

当固相加热层达到沸点之后不断受热挥发, 变成蒸气, 炸药蒸气在蒸气加热区中不断继续加热, 在一定外界压力条件下, 蒸气加热区的厚度是一定的, 当蒸气加热到一定程度后, 进入化学反应区(火焰区)发生燃烧反应, 放出热量, 燃烧产物向后扩散。

对于大部分起爆药和固体炸药来说, 由于它们是不易挥发的, 因而其燃烧机理与上述易挥发炸药的燃烧机理又大不相同, 图 6-11-2 表示了这类炸药燃烧过程, 这类炸药燃烧



图6-11-2 难挥发炸药燃烧反应区

0—原始炸药; 1—固相分解反应区; 2—气相固相共存反应区;
3—气相火焰区; 4—燃烧产物。

时，通过热传导、辐射的作用使前面的固体炸药受热，引起固相炸药进行分解反应，固相炸药的分解反应对难挥发炸药的燃烧具有重要意义，它不仅放出热量，促使反应继续进行，而且使固体炸药初步进行分解。

具有助燃作用的分解产物与气相和固相的可燃物继续进行化学反应，放出热量，气、固相共存反应区内温度仍然较低，颜色为暗兰色，在上述放热反应的基础上，温度很快地提高，反应气体发生强烈的放热反应，出现明亮的火焰。

燃烧过程的稳定性、燃烧速度的快慢是与燃烧反应区中的放热速度以及向下层炸药和周围介质传热的速度紧密相关的。一般说来，当反应区放出的热量抵偿不了向原始炸药和周围介质传出的热量时，燃速将减慢甚至熄灭；当反应区放出的热量超过向原始炸药和周围介质传出的热量时，燃速将增快甚至转向爆轰。反应区的放热性取决于炸药的性质和周围条件，向原始炸药传热的条件主要取决于炸药的热传导，因此燃烧过程与炸药的性质、环境压力、初始温度、装药直径和密度以及有无外壳有着密切的关系，下面分别从实验的角度介绍一下各个因素对燃烧的影响。

1. 炸药性质对燃烧的影响

通常起爆药的燃烧是不稳定的，容易转变为爆轰；火药恰恰相反，它的燃烧极为稳定，只是在极特殊条件下，才可能转变为爆轰；猛炸药稳定燃烧的能力介于起爆药和火药之间。

起爆药和猛炸药多属于难挥发性炸药，燃烧反应在固相和气相同时进行，但是由于化学反应速度不同，其燃烧性能也完全不同。

起爆药化学反应速度很快，在固相反应时就放出大量的

气体产物和热，以致使固相表面强烈迸碎，大量的气体产物夹带尚未反应的炸药碎块进入气相区，而后在气相区继续进行反应。由于固相表面迸裂是和燃烧同时进行的，自然会加大燃烧比表面和反应速度，因而起爆药的燃烧速度最快，而且极不稳定。

猛炸药燃烧时化学反应速度缓慢，并且可以通过炸药良好的导热性把热量扩散到未燃烧的炸药中去，不足以激起更强烈的化学反应，所以燃烧比较稳定。

2. 环境压力对燃烧的影响

环境压力对炸药燃烧速度有着重要的关系。一般来说，随着压力的提高，燃烧速度增加，压力很高时，燃烧变得不稳定，从而转为爆轰。

燃烧速度 u 与压力 p 的关系可表示为

$$u = A + Bp^\alpha$$

式中 A 、 B 、 α 是与炸药燃烧性质有关的常数。常数 A 与压力无关，而仅与固相反应有关；常数 B 与气相反应有关； α 是燃速与压力有关的幂指数。图 6-11-8 给出了几种炸药质量燃速与压力的关系，质量燃速是炸药燃烧线速度与炸药密度的乘积，单位为 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ 。

对于起爆药和猛炸药在低压范围内其燃速与压力也可写成线性关系，此时 $\alpha = 1$ ，即

$$u = A + Bp$$

在一个大气压以下，两种起爆药与燃烧有关的常数 A 、 B 的实验数据，如表 6-11-1 所示。在两个大气压以下几种猛炸药与燃烧性能有关的常数 A 、 B 的实验数据，如表 6-11-2 所示。

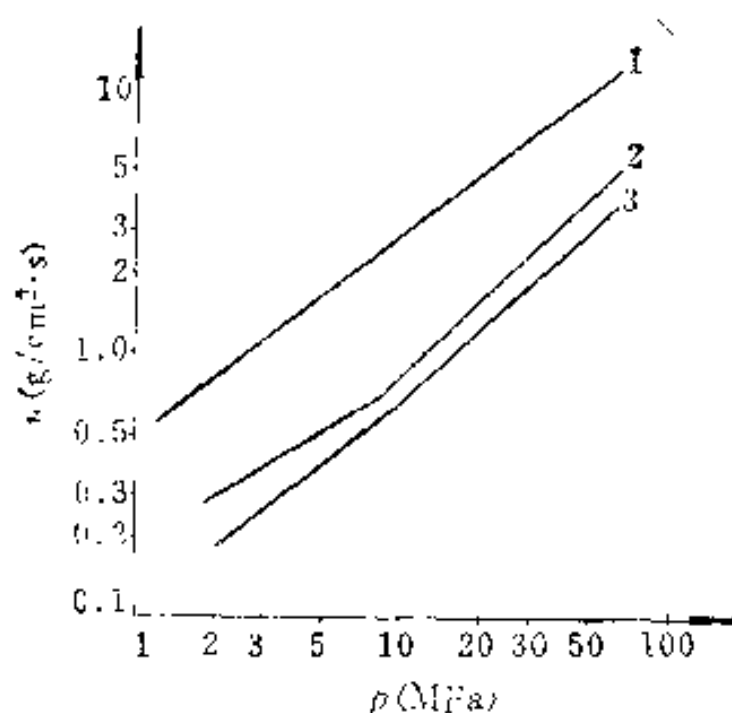


图6-11-3 燃速与环境压力的关系

1—黑索金；2—苦味酸；3—梯恩梯。

表6-11-1 两种起爆药的燃烧常数

起爆药	$A(\text{cm/s})$	$B(\text{cm/s} \cdot \text{Pa})$
雷汞	0.45	1.08×10^{-5}
迭氮三硝基苯	0.10	0.55×10^{-5}

表6-11-2 几种猛炸药的燃烧常数

炸 药	$A(\text{cm/s})$	$B(\text{cm/s} \cdot \text{Pa})$
特屈儿	0.011	0.034×10^{-5}
黑索金	0.009	0.05×10^{-5}
甲基硝酸酯	0.008	0.102×10^{-5}
硝草乙二醇	0.003	0.025×10^{-5}

从实验数据可以看出，猛炸药的燃烧速度比起爆药要慢得多，并且在压力影响下，猛炸药的随压力增加而提高的加速值比起爆药也慢得多。

3. 炸药初温对燃烧的影响

炸药燃烧速度随初始温度的升高而增加，但增加不是太大，大约初温增大 100°C 时，炸药的燃烧速度增加 $1.5\sim 2$ 倍。图 6-11-4 表示黑索金和特屈儿炸药随温度变化的曲线从图上看由 0°C 增加到 100°C ，黑索金的燃烧速度大约增加到 1.5 倍，特屈儿的燃烧速度大约增加到 1.8 倍。

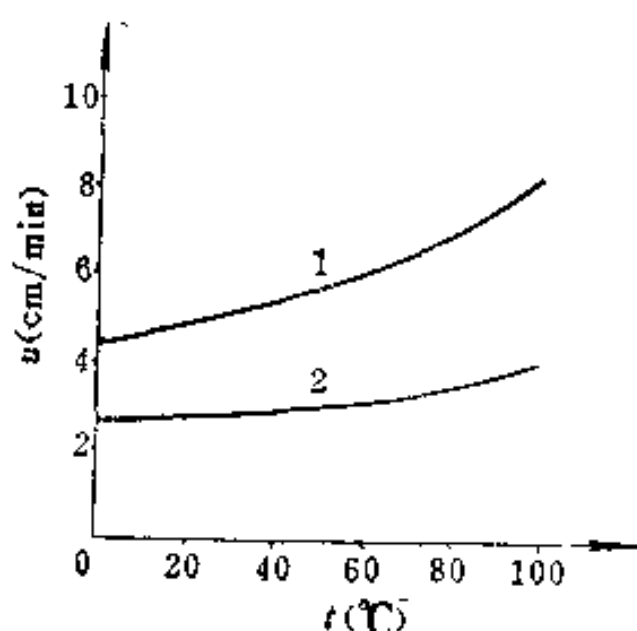


图6-11-4 燃速与初温的关系

1—特屈儿；2—黑索金。

即使在接近爆燃温度时，炸药随温度升高而提高的加速值也不是太快。表 6-11-3 给出了常压下硝基乙二醇由 20°C

表6-11-3 常压下初温对硝基乙二醇燃速的影响

$t_0(^{\circ}\text{C})$	$u(\text{cm/s})$
20	0.029
60	0.034
100	0.044
145	0.052
169	0.057
184	0.062

表6-11-4 常压下初温对梯恩梯燃速的影响

$t (^{\circ}\text{C})$	$u (\text{cm/s})$	备 注
112	0.0426	
145	0.0472	
200	0.0496	
238	0.060	波动较大
260	0.081	同上
290	0.275	同上

升高到 184°C 时, 燃烧速度变化的数据, 常压下硝基乙二醇正常燃烧的极限温度是 185°C , 由表中看出当硝基乙二醇的初温增加到接近爆燃温度时, 燃速也大约增加到 2 倍左右。表 6-11-4 给出了常压下梯恩梯由 112°C 升高到 290°C 时燃烧速度变化的数据, 当初温在 240°C 以下时, 燃烧是均匀的, 由 112°C 到 238°C 的范围之间, 燃速增加到 1.58 倍, 此后由于喷出炽热融体, 出现波动而使燃速迅速增加。

4. 装药密度的影响

几乎对所有炸药而言, 燃烧速度都随装药密度的增加而减小。密度对燃烧速度影响的原因, 是由于炸药中间的孔隙度所引起的, 随着密度的增加, 炸药颗粒之间的空隙缩小, 燃烧形成的高压气体产物不易向未燃炸药中渗入, 因而不利于燃烧的进行, 当然装药过于松散, 由于散热量增加, 也不一定利于燃烧的进行。

表 6-11-5 给出了黑索金和特屈儿燃烧速度随着装药密度变化的情况, 燃烧在玻璃管中进行, 由表中数据看出燃速不仅随密度的增加而降低, 并且还存在着一个密度下限, 当

表6-11-5 密度对炸药燃烧速度的影响

炸药名称	ρ_0 (g/cm ³)	u (cm/s)
黑索金	0.68	没有燃烧
	0.69	0.0576
	0.85	0.0532
	1.05	0.0415
	1.16	0.0365
特屈儿	0.65	没有燃烧
	0.74	0.0902
	0.85	0.0805
	1.04	0.0743
	1.07	0.0711

装药密度低于这个密度下限时，燃烧不能传播。

对于难熔炸药则存在一个密度上限，当密度超过这个密度上限时，由于热传导过快，燃烧也不能进行。表6-11-6给出的一号低氮硝化纤维素的燃速随密度变化的关系说明了这种情况。

表6-11-6 一号低氮硝化纤维素的燃速与密度的关系

ρ_0 (g/cm ³)	u (cm/s)
0.24	87.5
0.30	31.1
0.57	14.8
0.59	熄灭

5. 装药直径对燃烧的影响

实验发现，炸药燃烧也存在着临界直径。只有当装药直径大于临界直径时，燃烧才能进行。

当装药直径较小时, 表面积与体积的比值加大, 因而散热的相对量增加, 当燃烧反应放出的热量减去散失的热量, 不足以引起炸药燃烧继续进行时, 燃烧熄灭。燃烧临界直径与炸药性质、装药密度以及外界压力、温度条件有关, 随着装药密度的减少, 或者随着压力和温度的增加, 炸药燃烧的临界直径将减少。表 6-11-7 给出了常温、常压下几种炸药的燃烧临界直径。

表 6-11-7 在常温、常压条件下几种炸药的燃烧临界直径

炸 药	$\rho_j (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$d_K (\text{mm})$
铸装梯恩梯	1.59	32.0
特屈儿	1.60	5.7
黑索金	1.6	6.0
一号低氮硝化纤维素	0.6	5.5
硝基乙二醇	-	2.0

二、炸药的不稳定燃烧

当炸药稳定燃烧时, 燃烧值是一定的。只要压力、温度不改变, 燃速就不会改变, 直至炸药全部燃尽为止。稳定燃烧还有一个特点, 即炸药是一层层顺序发生燃烧反应, 反应区以一个规则的区域向尚未反应的炸药进行传播, 与上面现象相反, 不稳定燃烧的特点是在压力、温度不变时, 燃烧速度也是忽快忽慢, 有时甚至出现燃速突增和突降的现象, 并且燃烧反应区也成为极不规则的区域。

由颗粒炸药压制而成的多孔装药, 燃烧极容易变得不稳

定。因为多孔装药在稳定燃烧时，虽然也是一层层地顺序进行，但是与密实炸药的层层燃烧仍然不同，燃烧气体产物可以通过药柱中的空隙向未燃炸药中渗透，当燃烧气体产物在未燃炸药中渗透的距离超过了正常稳定燃烧应有的加热厚度，并且在透入的灼热气体足以点燃孔隙中的炸药时，炸药的燃烧速度就会愈来愈大，最后达到不稳定的地步。

一般利用变压燃烧室研究不稳定燃烧，通常用临界破坏压力表示燃烧的不稳定性。图 6-11-5 表示变压燃烧室中，压力与时间的关系曲线，由图看出，当燃烧稳定进行时，压力随时间平滑上升，当曲线出现突然上升时，标志着稳定燃烧的破坏，突变点的压力称为临界破坏压力，以 p_k 表示。

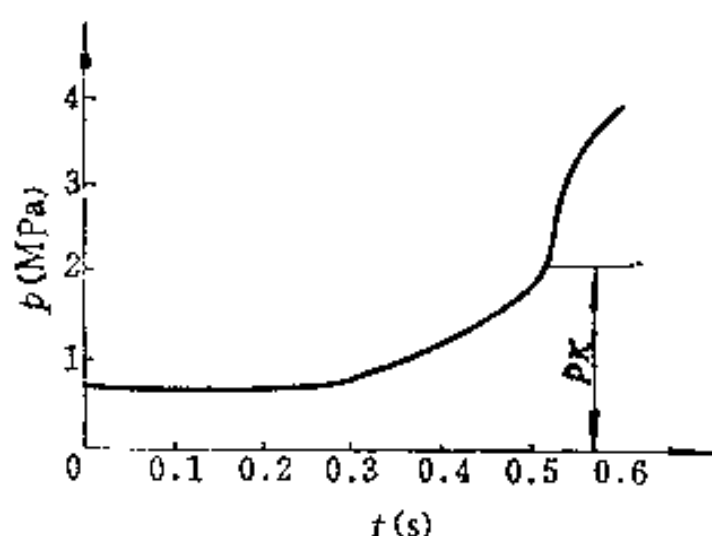


图6-11-5 变压室中多孔药柱稳定燃烧破坏示意图

药柱孔隙中的体积 V_c 与药柱总体积 V_o 的比值，称为多孔性值，以 μ 表示，

$$\mu = \frac{V_c}{V_o}$$

实验表明，炸药临界破坏压力随多孔性值的增加而减小，二者的关系可表达为公式

$$p_k = \frac{a}{\mu - b}$$

式中 a 、 b 是与炸药性质有关的常数，几种炸药的 a 、 b 值列在表6-11-8中。

表6-11-8 几种炸药的特性值

炸 药	a	b
梯恩梯	24	0.05
苦味酸	15	0.05
泰安	20	0.025

图6-11-6也表示了几种猛炸药的临界破坏压力与多孔性的关系。由图上看，梯恩梯保持稳定燃烧的能力最好，黑

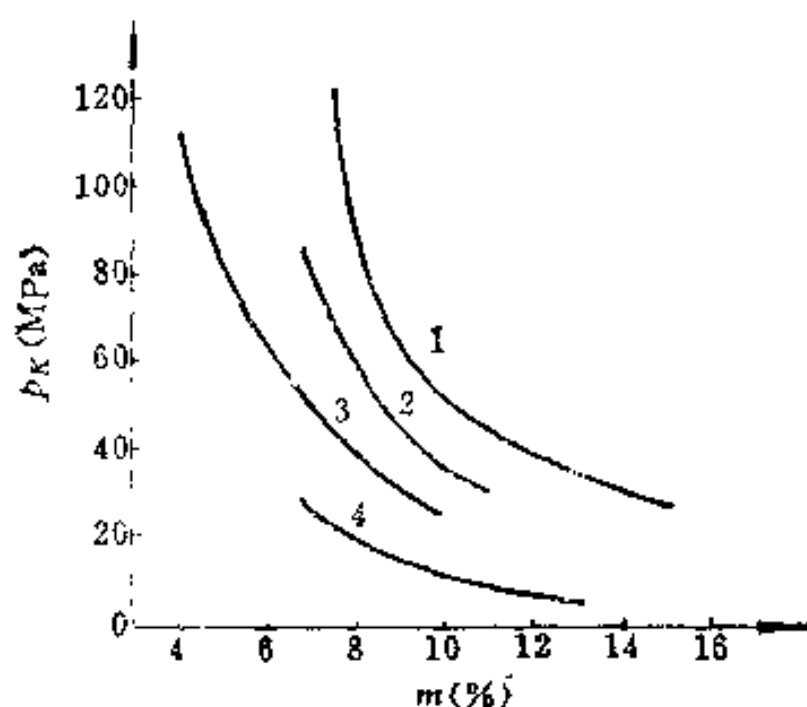


图6-11-6 几种炸药临界破坏压力与多孔性的关系

1—梯恩梯；2—苦味酸；3—泰安；4—黑索金。

索金保持稳定燃烧的能力较差。例如多孔性值为 0.1 时，当压力达到 10^7Pa 时，黑索金的稳定燃烧就会受到破坏，而当压力达到 $5 \times 10^7 \text{Pa}$ 时，梯恩梯的稳定燃烧才会受到破坏。

当炸药的稳定燃烧被破坏后，透入孔隙内的灼热气体点燃了孔隙内的炸药，明显扩大了燃烧表面，使燃烧速度达到稳定燃烧时的几十到几百倍，从而使燃烧远远超过了稳定的界限，这种不稳定现象叫做对流燃烧。

对流燃烧的表面凸凹不平，发展也不平衡，就是对同一个药柱来说，燃速也不是固定的，有时剧烈上升，有时又突然下降，而对流燃烧向药柱的空隙中传播时，同样也是不均匀的，引燃可能优先在大孔隙中出现，当燃烧进一步发展，形成的局部压力更大时，再使中小孔隙引燃，所以孔隙大小的分布，以及孔隙间是否连通都影响到对流燃烧的传播。

对流燃烧时的另一个重要现象是药柱迸裂。孔隙中燃烧过程产生的过高局部压力，是造成孔隙迸裂的原因。孔隙迸裂后，形成大量的飞掷的小炸药块，使燃烧表面更加不规则。迸裂的后果可能会有两种，当药柱在短的外壳中燃烧时，迸裂使孔隙中的压力降低，而迸裂形成的雾状悬浮物又因外壳短而能尽快扩散，这样使得燃速不会急剧增加，对流燃烧不会进一步强化，当药柱在长外壳或封闭空间发生迸裂现象时，迸裂产生的雾状悬浮物在表面近处继续燃烧，加快了燃速，也加强了灼热气体向孔隙中的透入，这样使得对流燃烧进一步强化，更加快了燃烧不稳定性的发展。

三、燃烧转向爆轰

炸药的稳定性消失后，就会产生燃烧向爆轰的转变。总的看来，固体炸药从燃烧向爆轰的转变可以分为四个阶段：

1. 稳定燃烧；
2. 对流燃烧；
3. 低速爆轰；

1. 正常的理想爆轰。

图6-11-7表示了这种燃烧向爆轰转变的示意图。这四个阶段的激发方式和传播机理都不相同，稳定燃烧主要靠热传

导把热量传给下一层炸药，引起固体炸药分解，然后分解的产物再进一步反应，放出热量；对流燃烧传热方式主要是通过燃烧气体的强制对流，促使燃烧表面扩大和燃烧的不稳定；低速爆轰是由较弱冲击波的冲击压缩引起化学反应，在反应过程中只放出一部分化学能，传播速度在2000m/s左右；正常理想爆轰由强冲击波的冲击压

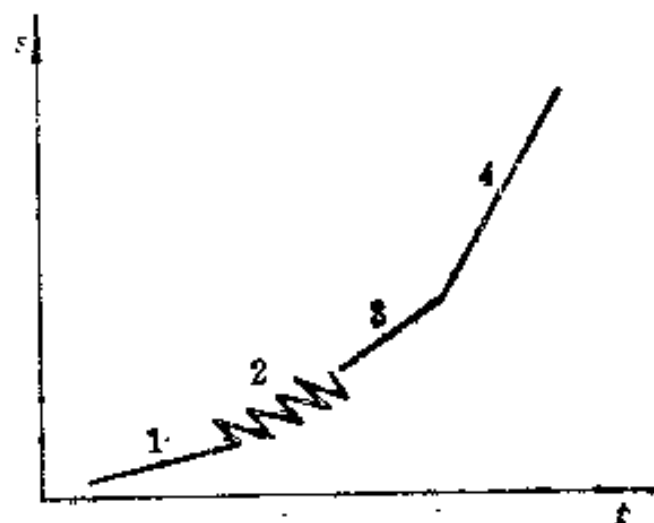


图6-11-7 固体炸药由燃烧向爆轰转变

1—稳定燃烧；2—对流燃烧；
3—低速爆轰；4—正常理想爆轰。

缩所引起，反应过程中放出全部化学能，传播速度在6000~8000m/s左右。

在一定条件下，低速爆轰可以稳定传播，这在早期研究硝化甘油爆轰现象时就已经发现过，表6-11-9表明了这种现

表6-11-9 不同起爆能量时，硝化甘油的爆速(m/s)

装药直径(mm)	2*雷管起爆	6*雷管起爆	8*雷管起爆
25.4	2190	2025	8130
32.0	1760	1480	8119

象,当以较弱强度的起爆能量引爆时,硝化甘油仅以2000m/s左右的传播速度进行低速爆轰,只有当以较强的起爆能量引爆时,硝化甘油才会以8000m/s的理想速度进行爆轰。

表6-11-10给出了几种炸药低速爆轰的数据,实验条件为药柱直径20mm,装药密度0.92~1.0g/cm³。

表6-11-10 几种炸药低速爆轰数据

炸 药	颗粒度(mm)	$D(m/s)$	$p_H(Pa \times 10^3)$
梯恩梯	0.5	2120	14.8
特屈儿	1.3	2140	14.5
黑索今	2.0	1950	10.4

当条件发生变化时,低速爆轰就会变得不稳定,增加装药直径或提高装药密度都会促使低速爆轰向高速爆轰转化。图6-11-8表示了特屈儿和泰安药柱在不同装药直径时爆轰由低速向高速的转变,特屈儿的装药密度为0.92g/cm³,泰安的装药密度为0.95g/cm³,图中的三条曲线对应不同炸药颗粒度的情况。当密度相同,颗粒大小不同时,低速爆轰传播的直径范围不同,一般来说,装药直径过小,低速爆轰也停止,装药直径过大,低速爆轰又能转变为正常爆轰,从图中也看出低速爆轰的速度大约为2000m/s左右。

对于高密度药柱来说,当药柱直径达到了爆轰临界直径数值,并且在药柱中所形成的冲击波速度超过低速爆轰的稳定值时,爆轰会飞跃地转成正常理想爆轰。

对于低密度药柱来说,在由燃烧转变为爆轰的过程中,没有明显的低速爆轰阶段。当产生对流燃烧后,由于对流燃烧在药柱中的快速发展,结果在燃烧阵面前,形成一系列压

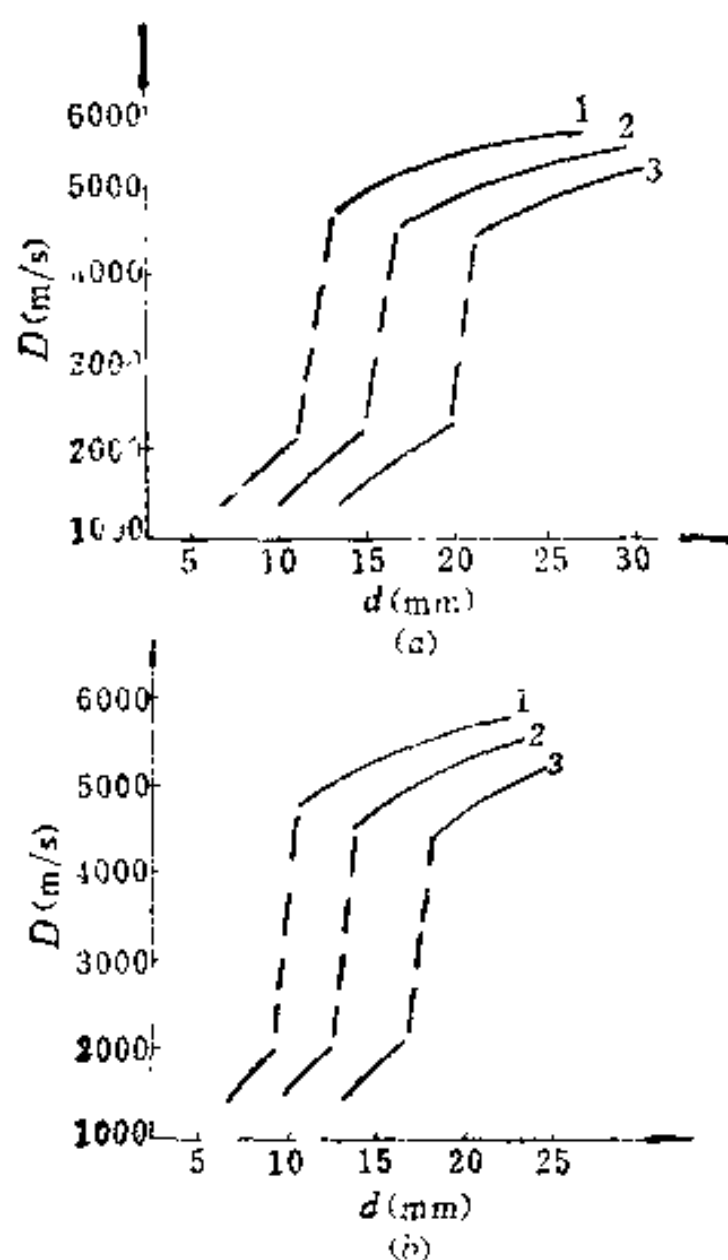


图6-11-8 爆轰的转变与药柱直径的关系

a — 特屈儿

b — 泰安

1 — 颗粒度 $0.5\mu\text{m}$;

1 — 颗粒度 $1.3\mu\text{m}$;

2 — 颗粒度 $0.8\mu\text{m}$;

2 — 颗粒度 $2.0\mu\text{m}$;

3 — 颗粒度 $1.3\mu\text{m}$ 。

3 — 颗粒度 $4.2\mu\text{m}$ 。

然波，压缩波具有双重作用，一则压缩波的压缩作用使燃烧阵面前的炸药不断压实，药柱密度相应提高，二则压缩波会在靠近对流燃烧阵面的局部部位或阵面前的某些部位引起炸药的热爆炸，而后发展成为其余部分的爆轰。

第七章 炸药的威力和猛度

炸药爆轰后，通过高温、高压气体产物的膨胀对外界产生作用。爆炸瞬间爆轰产物对外作用的猛烈程度，即炸药局部破坏作用的能力，称为猛度；爆轰产物膨胀过程中对外作用的大小，即炸药做功的能力，称为威力。

威力和猛度是经常采用的评定炸药爆炸作用性能的重要参数，实践中通常用实验的方法给以确定。本章作为炸药爆轰性能的补充，介绍一下确定威力、猛度的实验方法。

§ 7-1 炸药的威力

威力是炸药爆轰产物对外做功的能力，这个能力经常用炸药的潜能来表示，也经常用炸药的爆热来表示，但是确切地说炸药的潜能和爆热都不是炸药对外做功的数量。

炸药的潜能是炸药内部储存的全部化学能量。严格说来，潜能是在理想情况下，爆轰产物气体无限绝热膨胀而冷却到热力学零度时所完成的最大功数量。但是由于爆轰产物不可能冷却到热力学零度，并且由于化学反应的不完全性，存在着化学损失，因而炸药潜在的能量不可能全部释放出来，炸药的爆热小于潜能。

炸药的爆热是炸药爆炸时所释放出来的能量，这个能量也不可能全部转变为机械功，因为高温高压的爆轰产物是以激烈地冲击压缩形式对外界做功的，在冲击压缩过程中，会使周围介质的温度升高，熵值增加，并且在做功完结时，爆

轰产物内部仍还会有一部分残余能量，由于上述几种热损失的存在，炸药对外所做的机械功远小于炸药的爆热。

实际应用中，通常采用标准实验方法来表示炸药的威力，本节介绍弹道臼炮法和铅埤测定法两种实验方法。

一、弹道臼炮法

此法可以直接由爆炸时测量出的功值大小来相对评定炸药的威力。

图 7-1-1 表示弹道臼炮装置。它由一悬挂在钢支架上可以自由摆动的钢制臼炮构成，臼炮呈圆柱形，炮身轴线上有一个爆炸室，被测试炸药置于爆炸室中心，插上 8 号雷管，药室用直径 100mm、质量 13.5kg 的钢弹头塞住，炸药试样起爆后，活塞式弹体被抛掷到砂堆内，臼炮反向转动一个角度，这个角度由装置上指针记录下来。

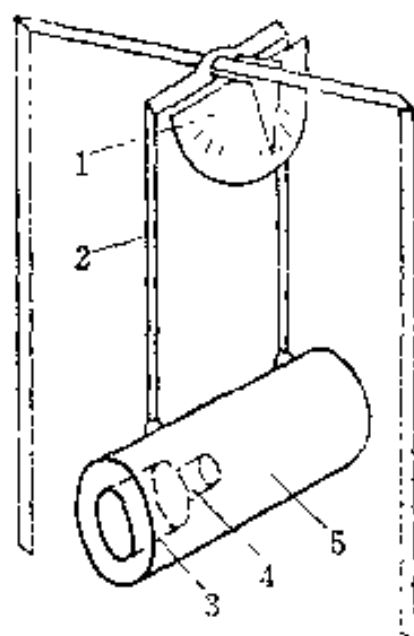


图7-1-1 弹道臼炮示意图

1—摆角指示器；2—摆臂；3—活塞式弹头；4—药室；5—臼炮体。

设摆体的惯性矩为 J ，摆体的角速度为 ω ，活塞式弹体的重量为 m ，弹体的速度为 u ，则臼炮本身的动能和弹体的动能分别为

$$E_m = \frac{1}{2} J \omega^2$$

$$E_b = \frac{1}{2} m u^2$$

炸药爆炸在白炮装置上所得到的总机械能为二者之和

$$E = E_m + E_b = E_m \left(1 + \frac{m u^2}{J \omega^2} \right)$$

按照白炮装置的构造，弹体运动的方向通过白炮摆体的质心，因此将弹体和白炮一起向悬挂点求矩

$$J \omega = m u l$$

式中 l 是白炮轴线到悬挂点的距离。

将此关系代入上式可得

$$E = E_m \left(1 + \frac{J}{m l^2} \right)$$

按照机械能守恒定律，在白炮上升的高度上，动能完全转变成势能，即

$$E_m = M g h$$

式中 M —— 白炮的质量， g —— 重力加速度， h —— 白炮重心上升的高度。

设试验测量的白炮转动角为 α ，则

$$h = l (1 - \cos \alpha)$$

所以白炮装置所得到的总机械能

$$E = M g l (1 - \cos \alpha) \left(1 + \frac{J}{m l^2} \right)$$

对于确定的白炮装置来说，量 $M g l \left(1 + \frac{J}{m l^2} \right)$ 是一个常数，用 E_0 表示，最后得到用机械能表示的威力

$$E = E_0 (1 - \cos \alpha)$$

若试验测得梯恩梯炸药的白炮摆角为 α_0 ，被测炸药的白炮摆角为 α ，以梯恩梯炸药的相对威力为 100，则被测炸药

的相对威力为

$$\varphi_h = \frac{1 - \cos \alpha}{1 - \cos \alpha_0} \times 100$$

表 7-1-1 给出了臼炮装置测定的机械功和以梯恩梯为基准的相对值。

表 7-1-1 弹道臼炮测定的威力

炸 药	$E(\text{J} \cdot \text{g})$	φ_E
梯恩梯	1254	100
苦味酸	1274	102
硝基胍	1303	104
司屈比	1627	130
黑索金	1882	150
太安	1823	145
硝化甘油	1754	140
泰安50/梯恩梯50	1578	126
黑索金50/梯恩梯30	1695	135
黑索金60/梯恩梯10	1668	133

二、铅埭测定法

此方法是用一定量的炸药在铅埭孔中爆炸时，按照爆轰气体产物膨胀所引起的铅埭孔扩孔的大小，来表示炸药的威力。

图 7-1-2 a 表示铅埭装置。标准方法规定铅埭是用纯铅所铸成的圆柱体，圆柱体高 200mm，直径 200mm，在圆柱体的中心线上有一个直径为 25mm、深 125mm 的圆柱形孔。铅埭约 10kg，所采用的铅应为纯度很高的精炼铅，用后的铅埭可熔化后再浇铸铅埭，重新使用，但是由于反复使用，会使铅的纯度降低，可塑性变坏，因而反复使用的次数不能超

过四次。

铅铸实验时，采用10 g炸药的试样，放入其直径为24mm的锡箔纸卷成的筒内，插好8号雷管，捏紧筒口小心地放入铅铸内，并轻轻推压至铅铸孔底部，然后用经144孔/cm²筛子筛选过的细砂自由填入铅铸孔上部孔隙内。

进行炸药爆炸试验后，清扫孔内残渣，此时扩孔如图7-1-2b所示，用量筒向铅铸孔内倒水，测量其容积。

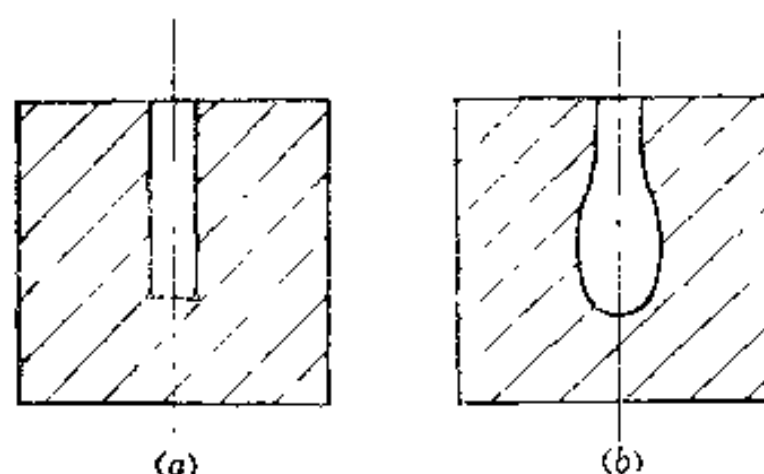


图7-1-2 铅铸

(a) 扩孔前剖面；(b) 扩孔后剖面。

铅铸扩孔值是实验前、后铅铸孔容积的差值。

由于试验时环境温度和所用雷管对铅铸扩孔值都有影响，因而需要进行修正。

对于温度的修正，以15°C为标准，其他温度时按表7-1-2进行修正。

表7-1-2 铅铸扩孔温度修正量

t (°C)	ξ (%)	t (°C)	ξ (%)
-10	+10	8	+2.5
0	+5	15	0
5	+3.5	20	-2.0

对于雷管的修正，一般采用经验数据。

威力除了用铅铸扩孔实际数值表示之外，还通常以梯恩梯铅铸扩孔值为100，用相对值来表示炸药的威力，表7-1-3给出了铅铸扩孔值和相对值。

表7-1-3 铅铸扩孔测定的威力

炸 药	威 力	
	$V(\text{cm}^3)$	Φ_p
梯恩梯	335	100
苦味酸	308	101
硝基胍	308	101
特屈儿	381	125
黑索今	479	157
奥克托金	412	145
泰安	427	140
硝化甘油	427	140
乙炔二硝酸铵	372	122
硝酸铵	171	56
泰安50/梯恩梯50	372	122
黑索金60/梯恩梯60	396	130

§ 7-2 炸药的猛度

猛度是爆轰产物对邻近相接触物体的局部破坏能力，这个能力是由于高温、高压的爆轰产物对装药相邻近的物体猛烈冲击而造成的，经常可以用炸药爆炸时爆轰产物对所接触物体单位面积的冲量来表示。

按照一维流动理论，可以计算出炸药爆炸时作用在所接触物体上的冲量。但是实际上炸药在与其接触的物体上爆炸时，难于保持一维情况，即使炸药在相当坚固的外壳内，也

不可能消除爆轰产物向四周扩散的影响，以致实际作用值远远低于计算值。

在实际应用中，通常仍是采用标准实验方法来表示炸药的猛度。本节介绍猛度摆、铅柱压缩和钢板炸坑三种实验方法。

一、猛度弹道摆法

此法由炸药爆炸时测量出的冲量大小，来评定炸药的猛度。

图 7-2-1 表示猛度弹道摆装置，此装置由一悬挂在钢支架上可以自由摆动的实心摆体构成。摆体呈圆柱形，两端有可供更换的摆头，摆头前端粘接两块直径 30mm、质量 33.5g 的被测药柱，药柱前粘接一个直径 20mm、质量 3 g 的特屈儿传爆药片，用 8 号雷管起爆。

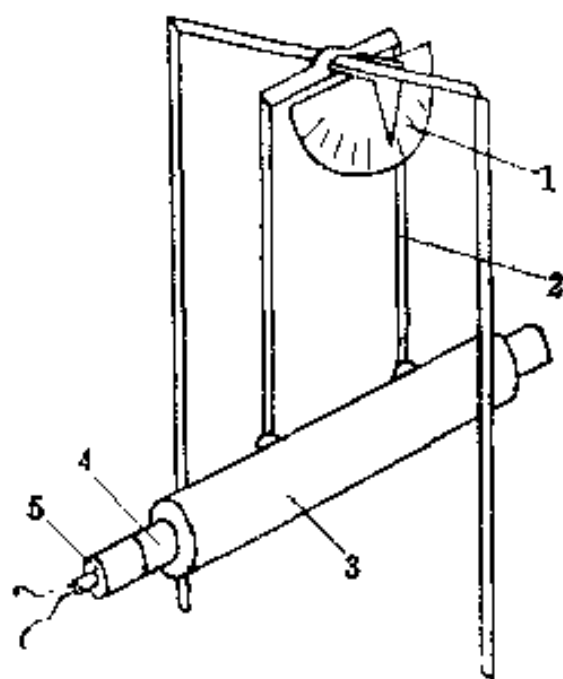


图7-2-1 猛度弹道摆示意图

1—摆角指示器；2—摆臂；3—摆体；4—摆头；5—药柱。

在炸药爆轰产物的直接作用下摆体向后转动一个角度，用摆角指示器把角度记录下来。

设摆体的质量为 M ，摆臂的长度为 L ，摆的惯性矩为 I ，摆体的角速度为 ω ，炸药爆炸传给摆体的冲量为 I ，按照动量矩守恒定律

$$IJ = J\omega$$

则

$$I = \frac{J\omega}{\omega}$$

假若摆转动的角度为 α ，当摆体上升到摆角 α 相应高度上时，动能全部变成了势能，按照机械能守恒定律

$$-\frac{1}{2} J\omega^2 = Mgl(1 - \cos \alpha)$$

将之代入上式

$$I = \frac{\sqrt{2MgLJ(1 - \cos \alpha)}}{\omega}$$

$$= \frac{2\sqrt{MgLJ}}{I} \sin \frac{\alpha}{2}$$

在小摆角 情况下，摆的周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{MgL}}$$

因此

$$I = \frac{MgL T}{\pi} \sin \frac{\alpha}{2}$$

对于确定的猛度摆来说，量 $\frac{MgL T}{\pi}$ 是一个常数，用 C 表示，最终得到冲量所表示的猛度值

$$I = \frac{C}{L} \sin \frac{\alpha}{2}$$

若试验测得梯恩梯炸药装药密度为 1.58g/cm^3 时，猛度摆的转角为 α_0 ，被测炸药的猛度摆转角为 α ，以装药密度为 1.58g/cm^3 梯恩梯炸药的相对猛度为 100，则被测炸药的相

对猛度为

$$\eta_I = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha_0}{2}} \times 100$$

炸药的猛度主要是爆轰压力和爆速的体现，二者均与装药密度有着密切的关系，因而猛度是装药密度的函数。随着装药密度的增加，用猛度摆所测得的炸药传给摆体的冲量也随着增加，表 7-2-1 给出了不同装药密度时，梯恩梯和钝感黑索金两种炸药单位面积冲量的试验数据，试验条件采用装药重量 50 克，装药直径 40mm，从表中数据看出，当梯恩梯装药密度由 1.3g/cm³ 增加到 1.5g/cm³ 和钝感黑索金装药密度由 1.2g/cm³ 增加到 1.4g/cm³ 时，在两种情况下单位面积的冲量都增加了 12%~13%。

表 7-2-1 不同装药密度时单位面

积冲量(N·s/cm²)

P_c (g/cm ³)	梯恩梯	钝化黑索金
1.20	—	3.06
1.25	—	3.19
1.30	2.82	3.29
1.35	2.89	3.36
1.40	2.97	3.48
1.45	3.05	—
1.50	3.14	—

表 7-2-2 给出了猛度摆装置测定的、以梯恩梯为基准的相对猛度值。

表 7-2-2 某些炸药的相对猛度

炸 药	q _r
梯恩梯	100
特屈儿	115
雷汞	125
黑索金 50/梯恩梯 50	115
环三次甲基三硝胺	107
六二号二硝酸盐	98

二、铅柱压缩法

本法是以一定规格的炸药试样爆炸后对铅柱的压缩量来相对衡量炸药的猛度。

图 7-2-2 表示铅柱压缩法实验装置，在原钢板上放置一个纯铅制成的铅柱体，铅柱高 60mm，直径 40mm，实验前并用卡尺准确测量其高度，精度为 0.1mm，在铅柱体上放置一块厚 10mm、直径 41.5mm 的钢片，钢片上面放置被测炸药试样并且将炸药试样用木片压住，捆扎在钢板上。

炸药试样 50 g，压制成直径 40mm 带雷管孔的药柱，雷管孔距药柱底为 15mm。

起爆雷管，炸药爆炸后，铅柱被压缩成为蘑菇形（图 7-2-3），用卡尺在不同位置上测量压缩后铅柱高度，精确到 0.1mm，计算其平均值作为压缩后铅柱的高度。

铅柱压缩量为铅柱体原来的高度减去压缩后铅柱体的高

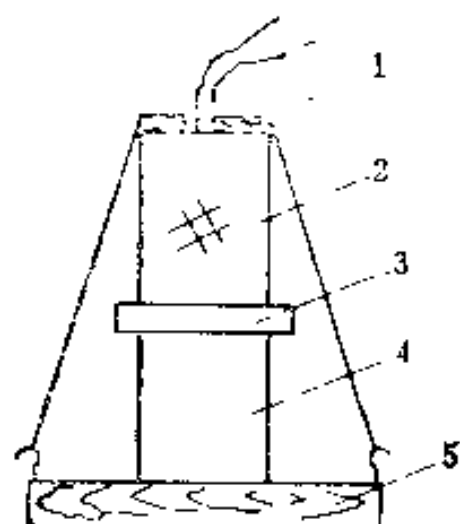


图7-2-2 铅柱压缩法装置

1—木片；2—被测炸药；3—钢片；4—铅柱；5—钢板。



图7-2-3 压缩后的铅柱

度。对几种炸药实验得到的铅柱压缩量如表 7-2-3 所示。

表7-2-3 铅柱压缩测定的猛度

炸 药	$\Delta h(\text{mm})$	$\varphi_{\Delta h}$
梯恩梯	18.2	100
黑索金	24.9	132
苦味酸	19.2	102
黑索金95/蜡5	22.6	114
梯恩梯25/硝基胺73.5/硬脂酸锌1.5	16.5	89

三、钢板炸坑法

此法是用一定规格炸药爆炸后，对钢板炸坑的深度来相对衡量炸药的猛度。

图 7-2-4 表示美国采用的钢板炸坑法的实验装置。将炸

药放置在一个钢管内，钢管内径 19mm，壁厚 1.59 mm；把装好药的钢管垂直地放在厚度为15.88mm的冷轧钢板上，钢板下面放置内径为 38.1 mm、外径为 76.2 mm 的支承钢管。实验时，20 g 被试炸药用 5 g 特屈儿药柱传爆，以 8 号雷管起爆。

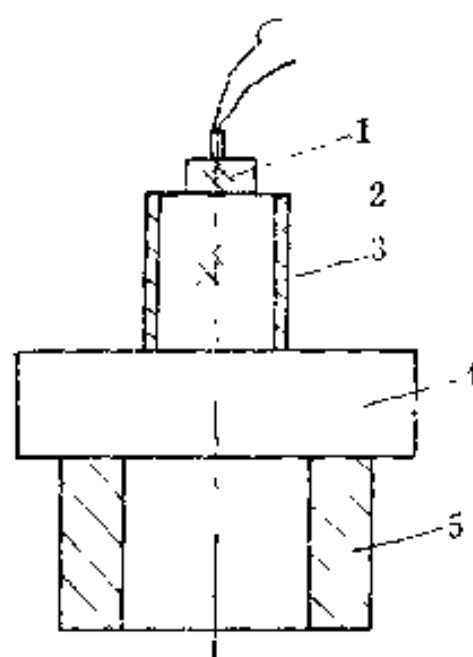


图7-2-4 钢板炸坑实验装置

由于猛度与装药密度有着密切的关系，在以钢板炸坑深度度量炸药的猛度值时，通常是以装药密度 $1.61\text{g}/\text{cm}^3$ 的梯恩梯装药进行钢板炸坑实验所得到的炸

1—传爆药柱；2—被测药柱；3—薄钢管；4—方钢板；5—钢管。

药深度为 100，用炸坑深度的相对值来衡量各种炸药的猛度，表 7-2-4 给出了用这种实验方法得到的相对猛度。

表7-2-4 用带壳装药钢板炸坑深度的
相对值测定的猛度

炸 药	$\rho_0 (\text{g}/\text{cm}^3)$	q_1
梯恩梯	1.61	100
苦味酸	1.50	107
硝基胍	1.50	95
特屈儿	1.50	116
黑索金	1.50	133
泰安	1.50	129
乙烯二硝酸	1.50	122
特屈儿75, 梯恩梯25	1.62	114

钢板炸坑试验的另一种方法是采用无外壳的裸体药柱。

图7-2-5表示了这种钢板炸坑试验中的实验装置。药柱直径41.27mm，高127mm，放在一块厚44.45mm的冷轧钢板上，钢板下面再放一块或几块同样的钢板。装药用直径为41.27mm的20g特屈儿药柱传爆，8号雷管起爆。

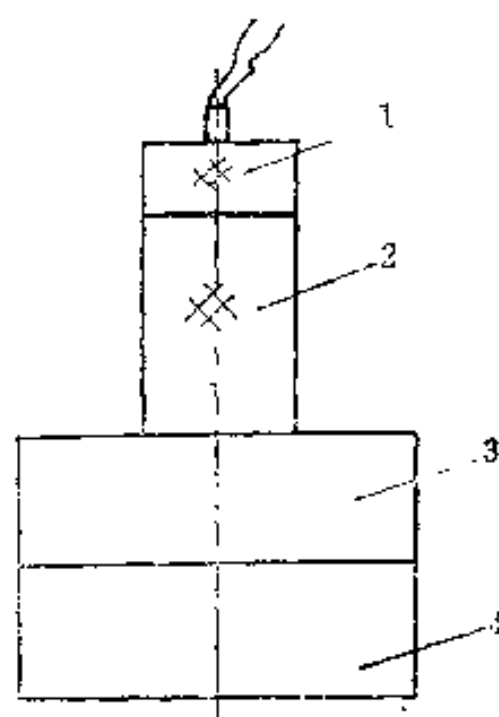


图7-2-5 钢板炸坑实验装置

1—传爆药柱；2—被测药柱；
3—钢板；4—钢板。

钢板炸坑深度仍以装药密度 1.61g/cm^3 的梯恩梯装药实验值为100，用炸坑深度的相对值来衡量各种炸药的猛度，表7-2-5给出了用这种实验方法所得到的相对猛度。

表7-2-5 不带壳装药钢板炸坑深度的猛度相对值

炸 药	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	φ_d
梯恩梯	1.61	100
特屈儿	1.59	115
黑索金60/梯恩梯10	1.72	132
黑索金70/梯恩梯30	1.725	136
泰安50/梯恩梯50	1.66	121
特屈儿75/梯恩梯25	1.66	118
黑索金91/蜡9	1.61	126
硝酸铵50/梯恩梯50	1.55	52

第八章 爆轰产物的直接作用

炸药爆轰后，对周围介质产生很大的破坏作用。这种作用有直接的，也有间接的。所谓直接作用是指爆轰产物对直接接触介质的作用，而间接作用是指爆轰产物通过中间介质对另一介质的作用。

爆轰产物对物体作用的大小，取决于爆轰产物本身以及被作用物体的性质。爆轰产物本身的作用能力可用压力或比冲量来衡量，但是当被作用物体性质不同时，即使爆轰产物本身作用能力相同，物体所受到的实际作用也不同。例如，密度为 1.6g/cm^3 的梯恩梯药柱爆炸时，在铁中的初始压力达 $3.2 \times 10^{10}\text{Pa}$ ，在水中的初始压力为 $1.4 \times 10^{10}\text{Pa}$ ，而在空气中的初始压力仅是 $5.7 \times 10^4\text{Pa}$ 。

本章先研究爆炸产物飞散的规律性，然后研究炸药与各种介质接触爆炸时，在介质中所形成的初始冲击波强度。

§ 8-1 爆轰产物的一维流动

炸药爆炸后，高温、高压的爆轰产物必须立刻迅速向周围进行膨胀。从力学角度上讲，爆轰产物膨胀的原因是由于膨胀波进入造成的，膨胀波进入后降低了爆轰产物的压力，引起了爆轰产物向外飞散。

研究爆轰产物的一维流动问题，即在严格坚固的刚性直管中装填炸药，炸药爆炸后爆轰产物在径向不能发生膨胀，而只是在轴向发生变化，也就是说膨胀波只是跟随在爆轰波

后，从后面进入爆轰产物。紧跟爆轰波后的第一道膨胀波，是以波阵面所在处的当地音速传播的，而爆轰波波阵面处的质点速度是 u_H ，音速是 c_H ，因而波阵面处的当地音速为 $u_H + c_H$ 。按照爆轰波稳定传播条件，紧跟在爆轰波阵面后的第一道膨胀波是以爆轰波的速度传播的。第二道膨胀波是在通过第一道膨胀波后的介质中传播的，这时由于第一道膨胀波的衰减，爆轰产物的质点速度 u_2 和音速 c_2 较比起波阵面上的值来说都有微小的降低，因而第二道膨胀波传播的当地音速 $u_2 + c_2$ 小于第一道膨胀波传播的当地音速 $u_H + c_H$ 。同样第三道膨胀波传播的速度 $u_3 + c_3$ 小于第二道膨胀波传播的速度 $u_2 + c_2$ ，第四道膨胀波传播的速度 $u_4 + c_4$ 小于第三道膨胀波传播的速度 $u_3 + c_3$ ，……。

按照当地音速的定义，当膨胀波相对于介质质点是向右（坐标 x 的正方向）传播时，当地音速为 $u + c$ ；当膨胀波相对于介质质点是向左（坐标 x 的负方向）传播时，当地音速为 $u - c$ 。

把速度为 $u \pm c$ 的每一道波在 $t-x$ 图上的迹线叫物理特征线，其中波速为 $u + c$ 的特征线叫第一族特征线，波速为 $u - c$ 的特征线叫第二族特征线。这种特征线有无限多条（对有限扰动来说），这无限多条特征线构成一个流场区间。

图 8-1-1 画出了爆速为 8000m/s 的炸药，爆轰波后膨胀波传播的迹线。膨胀波都是从原点（ $t = 0$ ， $x = 0$ ）发出的， $10\mu\text{s}$ 时各道膨胀波到达的位置如图中虚线所示。

图中流场区域中各条特征线，可以用两个式子来描述

$$x - x_0 = (u + c)(t - t_0) \quad (8-1-1)$$

$$x - x_0 = (u - c)(t - t_0) \quad (8-1-2)$$

(8-1-1) 式是右传波的波线方程，(8-1-2) 式是左传波

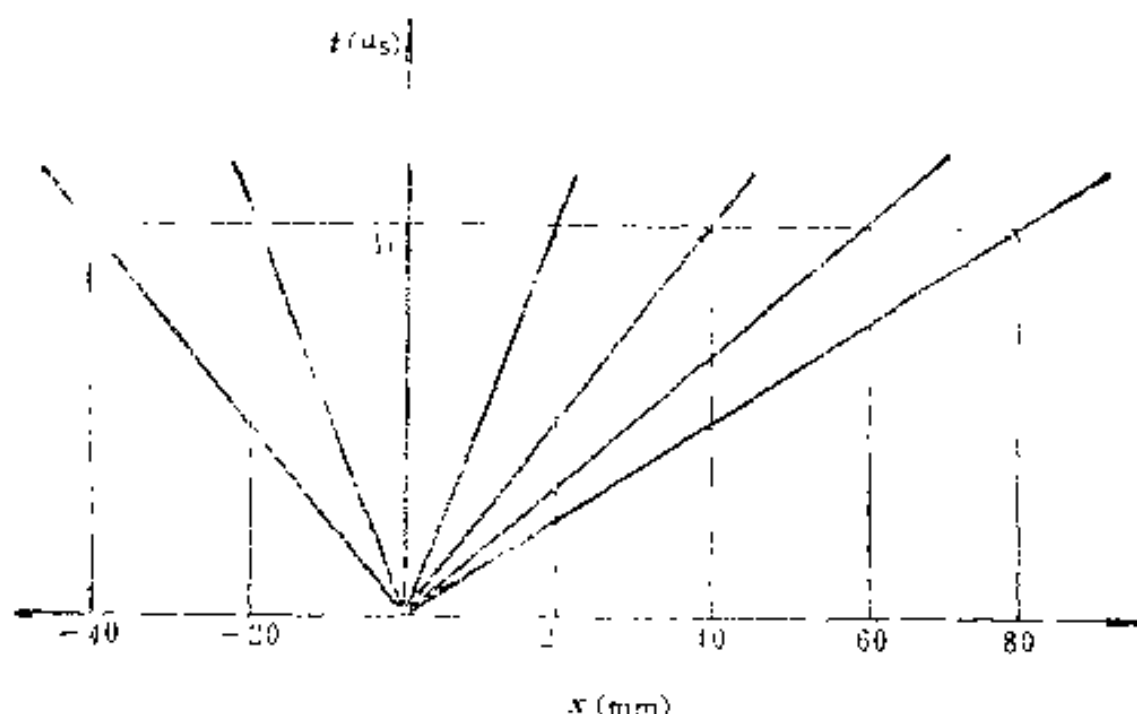


图8-1-1 爆轰产物中膨胀波传播迹线

的波线方程。用 (8-1-1) 和 (8-1-2) 两式联合求解, 可以确定左、右传波都存在情况下的复合波区域。

在有些情况下, 只存在单向波, 而在相反方向上没有波的传播, 这时波区的状态可以根据下列方程求解。

对于右传波

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= (u + c)(t + t_0) \\ u - c &= \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (8-1-3)$$

对于左传波

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= (u - c)(t - t_0) \\ u + c &= \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (8-1-4)$$

根据这些规律, 下面讨论一些典型问题。

一、一端引爆后, 爆轰产物飞散问题

设装在刚壁管中的炸药密度为 ρ_0 , 爆速为 D , 炸药柱是半无限长的, 引爆面左端是真空(见图8-1-2)。爆轰产物状

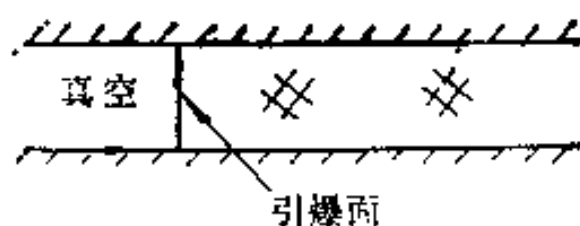


图8-1-2 半无限长炸药，一端起爆装药示意图

态方程采用 $p = A\rho^\gamma$ ，且 $\gamma \approx 3$ 。则爆轰波阵面上的参数如下

$$p_H = \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 = -\frac{1}{4} \rho_0 D^2 \quad (8-1-5)$$

$$\rho_H = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \rho_0 = -\frac{4}{3} \rho_0 \quad (8-1-6)$$

$$u_H = \frac{1}{\gamma + 1} D = \frac{1}{4} D \quad (8-1-7)$$

$$c_H = \frac{\gamma}{\gamma + 1} D = -\frac{3}{4} D \quad (8-1-8)$$

式中 p —压力； ρ —密度； D —爆速； c —音速。注脚“ H ”指的是爆轰波波阵面产物的参数，注脚“ 0 ”指的是炸药的原始参数。 A 为常数， γ 称为多方指数，对大多数凝聚炸药 $\gamma \approx 3$ 。

当炸药在引爆面引爆后，爆轰波以 D 的速度由引爆面沿炸药向右传播。同时，爆轰波波阵面后的高压爆轰产物迅速向左飞散，即有一簇稀疏波跟着爆轰波波阵面向右传播。由于传入的区域为爆轰波稳定流动区（在该区中， $u = u_H = \frac{1}{4} D$ ， $c = c_H = -\frac{3}{4} D$ ），因此该膨胀波为一簇右传简单波，并且是以 $t = 0$ ， $x = 0$ 为始发点的一簇中心膨胀波。它的解为

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= (u + c)(t - t_0) \\ u - c &= \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (8-1-9)$$

由初始条件 $t_0 = 0$, $x_0 = 0$, 可把 (8-1-9) 第一式化简为

$$x = (u + c)t \quad (8-1-10)$$

由边界条件, 即爆轰波稳定流动区参数 $u = u_H = \frac{1}{4}D$, $c = c_H = \frac{3}{4}D$, 可以确定 (8-1-9) 第二式中的常数

$$u - c = \frac{1}{4}D - \frac{3}{4}D = -\frac{1}{2}D \quad (8-1-11)$$

联立 (8-1-10) 和 (8-1-11) 式, 解得这个流场区间的参数 $u(t, x)$ 和 $c(t, x)$ 为

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{x}{2t} - \frac{D}{4} \\ c &= \frac{x}{2t} + \frac{D}{4} \end{aligned} \right\} \quad (8-1-12)$$

此问题的特征线图见图8-1-3。从图中可看出, 传入爆轰波稳定流动区的第一道波是以爆速 D 行进, 最后一道波, 即流动区域的左边界可这样来确定: 因为左边界是真空, $c = 0$, 并且已知 $u - c = -\frac{D}{2}$, 即 $u = -\frac{D}{2}$, 所以左边界

这道波以 $u + c = -\frac{D}{2} + 0 = -\frac{D}{2}$ 的速度行进。

由 (8-1-12) 式求出 $u(t, x)$ 和 $c(t, x)$ 以后, 还可应用状态方程 $p = A\rho^5$ 来求出其它参数 $p(t, x)$, $\rho(t, x)$ 。

按照

$$\frac{p}{p_H} = \left(\frac{\rho}{\rho_H} \right)^5$$

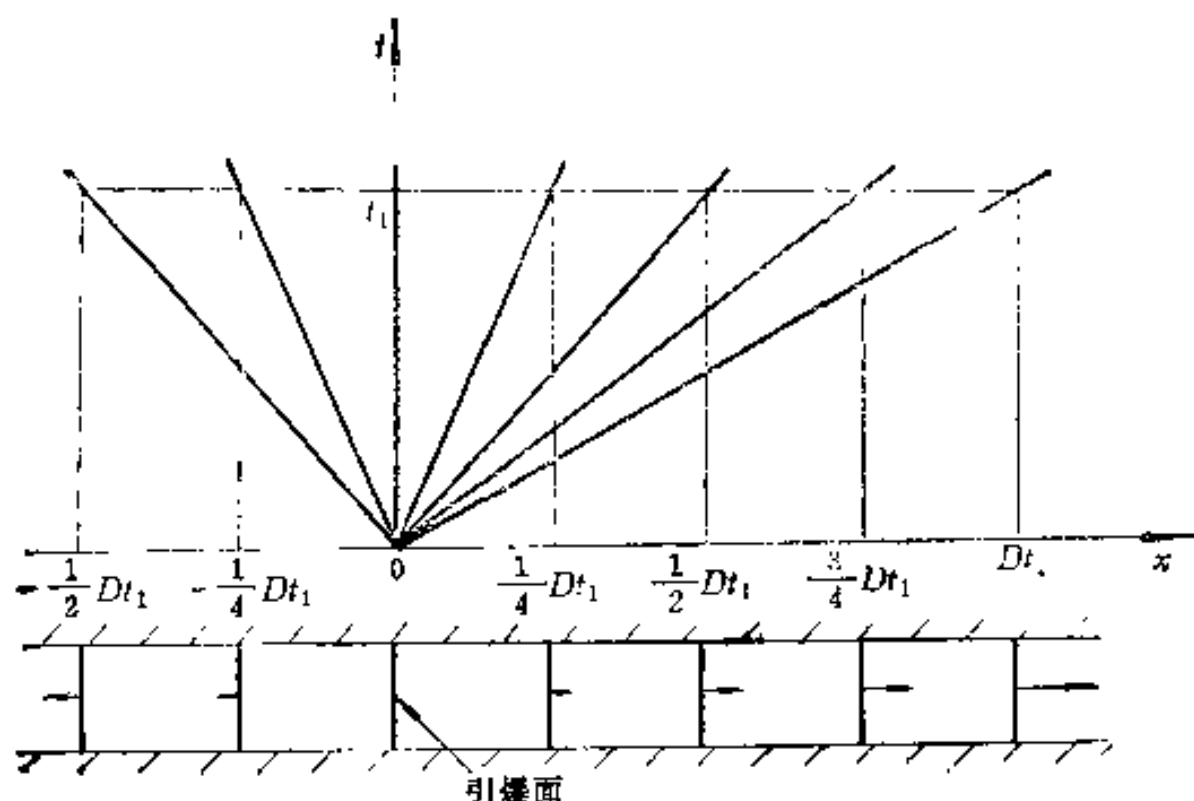


图8-1-3 半无限长炸药，一端引爆的特征线图

且由于
$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\Delta \gamma} \rho$$

所以
$$\frac{\rho}{\rho_H} = \frac{c}{c_H} \quad (8-1-13)$$

$$\frac{p}{p_H} = \left(\frac{c}{c_H} \right)^3 \quad (8-1-14)$$

将 (8-1-12) 分别代入 (8-1-13) 和 (8-1-14) 式，得

$$\rho = \frac{\rho_H}{c_H} \left(\frac{x}{2t} + \frac{D}{4} \right) \quad (8-1-15)$$

$$p = \frac{p_H}{c_H^3} \left(\frac{x}{2t} + \frac{D}{4} \right)^3 \quad (8-1-16)$$

此二式即为左端引爆条件下，爆轰波面后爆轰产物一维飞散流场中状态参数 p 和 ρ 的分布规律。

由 (8-1-12)、(8-1-13) 和 (8-1-14) 式可以看出，状

态参数 p 、 ρ 、 u 和 c 仅仅是 $\frac{x}{t}$ 的函数。这种关系可用图 8-1-4 给以表示。

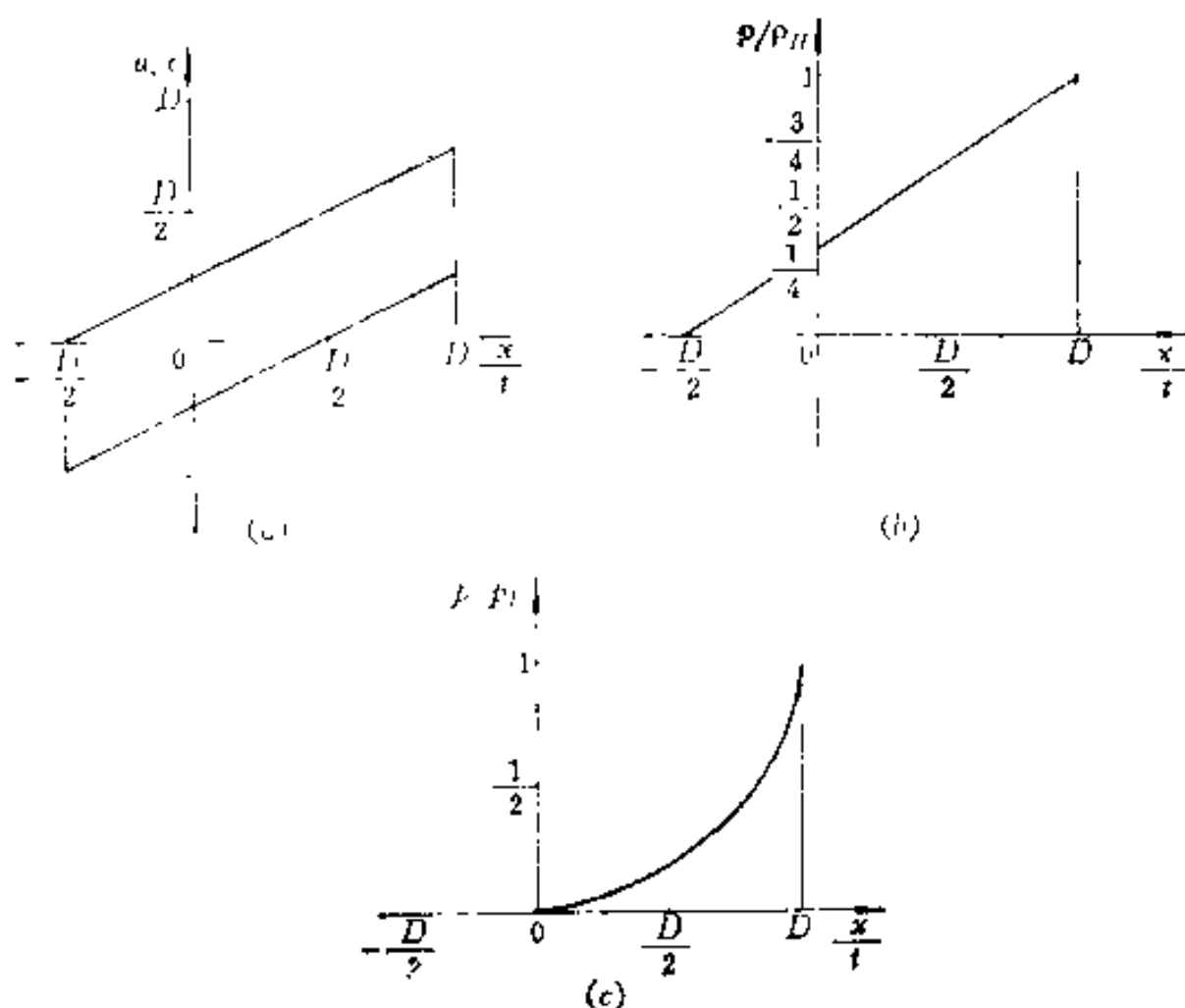


图8-1-4 状态参数 p 、 ρ 、 u 、 c 与 $\frac{x}{t}$ 的关系

〔例8-1〕 假定在刚性壁管壳中装有梯恩梯炸药，装药密度 $\rho_0 = 1.6 \text{ g/cm}^3$ ，爆速 7000 m/s ，药柱左端是真空，右端是半无限长药柱，计算当从左端引爆后 $10 \mu\text{s}$ 时，在距左端面 35 mm 处爆轰产物的状态参数 u 、 c 、 p 、 ρ 。

解 首先计算爆轰波波阵面上的参数

$$u_H = \frac{1}{4} D = 1750 \text{ m/s}$$

$$c_H = -\frac{3}{4} \cdot D = 5250 \text{ m/s}$$

$$\rho_H = -\frac{4}{3} \cdot \rho_0 = 2.13 \text{ g/cm}^3$$

$$p_H = -\frac{1}{4} \rho_0 D^2 = 196 \times 10^8 \text{ Pa}$$

按 (8-1-12) 式计

$$u = \frac{35 \times 10^{-3}}{2 \times 10 \times 10^{-3}} - \frac{7000}{4} = 0$$

$$c = \frac{35 \times 10^{-3}}{2 \times 10 \times 10^{-3}} + \frac{7000}{4} = 3500 \text{ (m/s)}$$

按 (8-1-13) 式和 (8-1-14) 式计:

$$\rho = \rho_H \left(-\frac{c}{c_H} \right) = 2.13 \left(\frac{3500}{5250} \right) = 1.42 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$p = p_H \left(-\frac{c}{c_H} \right)^2 = 196 \times 10^8 \times \left(\frac{3500}{5250} \right)^2 = 58 \times 10^8 \text{ (Pa)}$$

二、引爆面为刚壁时, 爆轰产物的流动

刚性壁面为引爆面的一维装药结构如图 8-1-5 所示。

由于引爆面为刚壁, 产物流的反向运动受到阻碍, 所以在 $0 \leq x \leq \frac{1}{2} Dt$

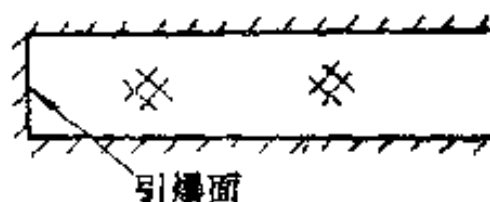


图 8-1-5 引爆面为刚壁的一维装药示意图

区间内, 产物流速 u 为零, 不可能像真空引爆面那样进

行反向流动(流速为负值)。此时的波面两侧状态参数仍应满足

$$u - c = \text{const} = -\frac{1}{2} D$$

由于 $u = 0$ ，所以有 $c = -\frac{1}{2}D$ 。

这样我们得到引爆面为刚壁时流场参数分布，在 $-\frac{1}{2}Dt < x < Dt$ 区间，其解仍为

$$\begin{cases} u = \frac{x}{2t} - \frac{D}{4} \\ c = \frac{x}{2t} + \frac{D}{4} \end{cases}$$

而在 $0 \leq x \leq -\frac{1}{2}Dt$ 区间，则有 $u = 0$ ， $c = -\frac{1}{2}D$ 。

所以整个流场的 u 、 c 分布见图 8-1-6 所示。

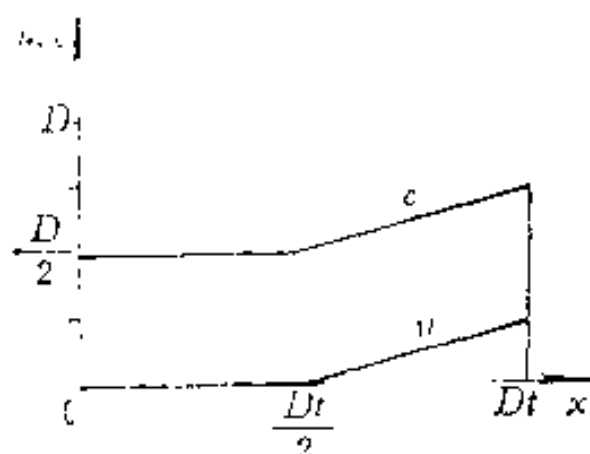


图8-1-6 引爆面为刚壁时参数分布

密度和压力的分布读者可根据 (8-1-15) 和 (8-1-16) 进行计算。

三、一端引爆有限长装药时爆轰产物的流动

设装药长度为 l ，左端引爆，装药两侧皆为真空。显然，当爆轰波到达装药右端面之前，只存在一簇右传中心膨胀波，该右传波的运动规律可用 (8-1-3) 描述，状态参数由 (8-1-12)、(8-1-15) 和 (8-1-16) 式计算。

当 $t = \frac{l}{D}$ 时，爆轰波到达右端面，这时将有一簇左传

中心膨胀波传入爆轰产物中，形成包含两簇膨胀波的复合波区，如图 8-1-7 所示。

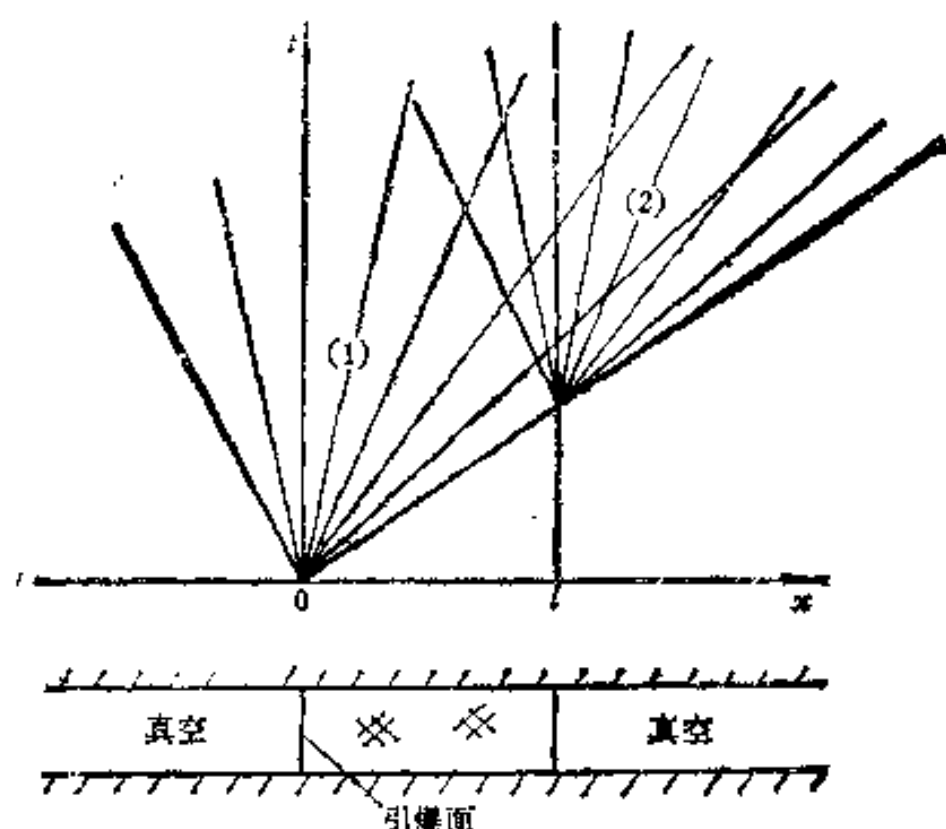


图8-1-7 有限装药一端引爆的特征线图

上述两簇简单波交会后所形成的复合波区，其状态参数分布规律可由下列一般解确定

$$x - x_0 = (u + c)(t - t_0) \quad (8-1-17)$$

$$x - x'_0 = (u - c)(t - t'_0) \quad (8-1-18)$$

右传波的初始条件仍然为 $t = 0$ ， $x = 0$ ，所以 (8-1-17) 式仍然是

$$x = (u + c)t$$

而左传膨胀波的初始条件为 $t'_0 = \frac{l}{D}$ 时， $x'_0 = l$ ，则有

$$(x - l) = (u - c)\left(t - \frac{l}{D}\right)$$

于是这两簇相向运动相遇而形成的复合波区流动规律可由下

式来描述

$$x = (u + c)t \quad (8-1-19)$$

$$x - l = (u - c) \left(t - \frac{l}{D} \right) \quad (8-1-20)$$

(8-1-19) 和 (8-1-20) 两式联立解得

$$u = \frac{x}{2t} + \frac{x - l}{2 \left(t - \frac{l}{D} \right)} \quad (8-1-21)$$

$$c = \frac{x}{2t} - \frac{x - l}{2 \left(t - \frac{l}{D} \right)} \quad (8-1-22)$$

在用 (8-1-22) 式求得 c 后, 可借助于 (8-1-15) 和 (8-1-16) 式求得相应的 p 和 ρ 。

(8-1-21) 和 (8-1-22) 即为右传波与左传波相交后所形成的新区——复合波区中爆轰产物状态参数的分布规律。装药内任一断面 x 处, 左传膨胀波到达的时间 t 应为装药爆轰时间 $\left(\frac{l}{D} \right)$ 与第一道左传膨胀波由 $x = l$ 处传至 x 断面所需时间之和。左传膨胀波的第一道波是在右传波扰动过后的区域内传播, 而右传波过后产物中各处的 $u - c = -\frac{D}{2}$ 。

可见, 第一道左传膨胀波的传播速度为 $-\frac{D}{2}$ 。因此, 它到达 x 断面处的时间为

$$t = \frac{l}{D} + \frac{l - x}{\frac{D}{2}} = \frac{3l - 2x}{D} \quad (8-1-23)$$

由此得出结论, 在本问题中, 爆轰产物流场中任一断面 x 处参数变化规律为:

当 $\frac{3l-2x}{D} \geq t \geq \frac{x}{D}$ 时, 有

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{x}{2t} - \frac{D}{4} \\ c &= \frac{x}{2t} + \frac{D}{4} \end{aligned} \right\} \quad (8-1-24)$$

当 $t > \frac{3l-2x}{D}$ 时, 有

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{x}{2t} + \frac{x-l}{2\left(t - \frac{l}{D}\right)} \\ c &= \frac{x}{2t} - \frac{x-l}{2\left(t - \frac{l}{D}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (8-1-25)$$

四、爆轰波对迎面刚壁的作用

爆轰波到达右端刚性壁面时, 马上发生反射, 反射波也是一个冲击波, 但是由于爆轰产物压力很高, 反射冲击波过后其压力再增加也增加不了太多, 因而这个反射冲击波是很弱的。为了计算方便, 把这个弱冲击波近似看作弱扰动波, 仍然用等熵关系来处理反射后的流动。

爆轰波对迎面刚壁作用的装药布置和特征线图如图8-1-8所示。

取引爆面处 $x=0$, 引爆后, 爆轰波以 D 的

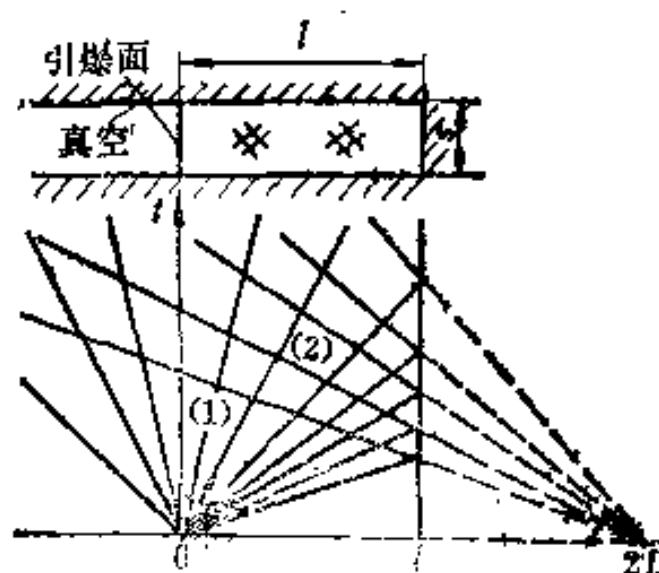


图8-1-8 爆轰波对迎面刚壁的作用

(1) — 简单波区, (2) — 复合波区。

速度向右传播。紧跟在爆轰波后面的是由 $t = 0$ 、 $x = 0$ 点发出的右传中心膨胀波。它的波头以 D 的速度向右传播，而最后面的波尾的传播速度为 $-\frac{D}{2}$ 。

当 $t = \frac{l}{D}$ 时，爆轰波抵达右边壁面，立即反射回来一左传波系，此左传波系在被右传中心波传播过的区域内传播，从而构成复合波区。区域内产物状态的变化服从于复合波区规律

$$x - x_0 = (u + c)(t - t_0) \quad (8-1-26)$$

$$x - x'_0 = (u - c)(t - t'_0) \quad (8-1-27)$$

右传波的初始条件为 $t_0 = 0$ ， $x_0 = 0$ 。而左传波的初始条件由如下方法确定：

根据弱扰动反射前、后参数连续条件知

$$u_1 + c_1 = u'_1 + c'_1 = u_H + c_H = D$$

式中 $u_1 + c_1$ 为反射前到达壁面的第一道波的波速， $u'_1 + c'_1$ 是反射后离开壁面的第一道波的波速。而反射前的波速就是爆轰波速 $D = u_H + c_H$ 。

由于在壁面处 $u_H = 0$ ，所以 $u'_1 + c'_1 = u_H + c_H = c_H = D$ 。则代入 (8-1-27) 式得到

$$l - x'_0 = (0 - D) \cdot -\frac{l}{D}$$

$$\text{即} \quad x'_0 = 2l$$

所以 (8-1-27) 式变成如下形式

$$x - 2l = (u - c)t$$

这样，整个流场可由下面两式描述

$$\left. \begin{aligned} x &= (u + c)t \\ x - 2l &= (u - c)t \end{aligned} \right\} \quad (8-1-28)$$

由 (8-1-28) 式解得

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{x-l}{t} \\ c &= -\frac{l}{t} \end{aligned} \right\} \quad (8-1-29)$$

在任一断面 x 处, 反射波头到达的时间为

$$t = \frac{l}{D} + \frac{l-x}{D} = \frac{2l-x}{D} \quad (8-1-30)$$

所以在 $-\frac{x}{D} \leq t \leq \frac{2l-x}{D}$ 范围内, 产物状态没有受到反射波的影响, 仍为简单波, 参数变化规律仍有

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{x}{2t} - \frac{D}{4} \\ c &= \frac{x}{2t} + \frac{D}{4} \end{aligned} \right\} \quad (8-1-31)$$

在 $t \geq \frac{2l-x}{D}$ 时, 产物状态已受反射波影响, x 断面已处在复合波区中, 参数变化由 (8-1-29) 确定。

在壁面上压强变化规律为

$$\begin{aligned} p &= p_H \left(\frac{\rho}{\rho_H} \right)^3 = p_H \left(\frac{c}{c_H} \right)^3 = p_H \left(\frac{\frac{l}{-\frac{3}{4}D}}{-\frac{l}{t}} \right)^3 \\ &= \frac{64}{27} p_H \left(\frac{l}{Dt} \right)^3 \end{aligned} \quad (8-1-32)$$

图 8-1-9 为爆轰产物在刚壁面上反射后, 壁面处压力随时间的变化规律。从图中看出, 产物在壁面反射瞬间的压力是入射压力的 $\frac{64}{27}$ 倍。而产物膨胀一倍装药长度后的压力,

就衰减到原来压力的 $\frac{8}{27}$ 倍, 即为峰值压力的 $\frac{1}{8}$ 。

对这一条 $p-t$ 曲线求积, 就可以得到作用在壁面上的比冲量

$$i = \frac{8}{27} l \rho_0 D \quad (8-1-33)$$

因此作用在刚壁面上的总冲量为

$$I = S_0 i = \frac{8}{27} S_0 l \rho_0 D = \frac{8}{27} m D \quad (8-1-34)$$

式中 $m = S_0 \rho_0 l$, 即为装药质量。

〔例8-2〕 设在刚性壁管中装有密度为 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 、爆速为 $7000\text{m}/\text{s}$ 的梯恩梯炸药, 装药长度 $l = 70\text{mm}$, 管子右端封口、左端开口, 药柱从左端引爆, 引爆面左侧为真空(图8-1-10)。

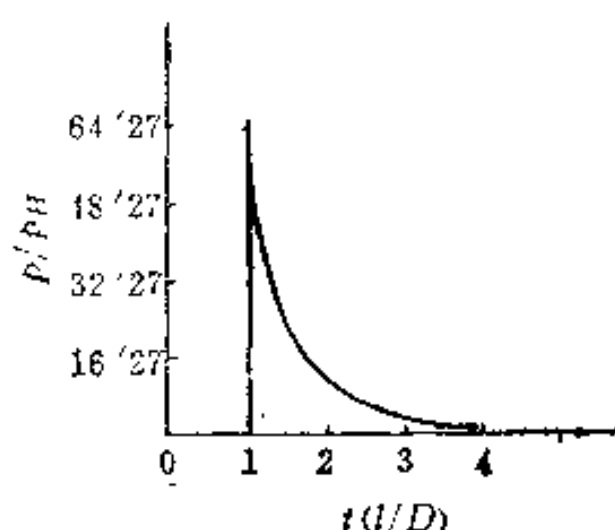


图8-1-9 刚壁面上压力
随时间变化

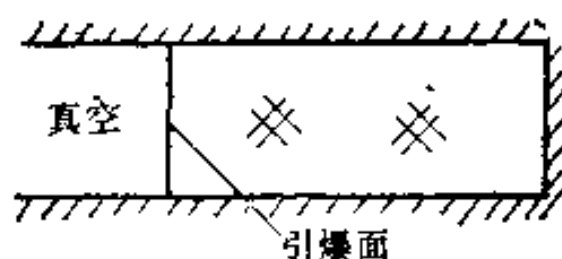


图8-1-10 一端封口管
的装药示意图

求引爆后 $35\mu\text{s}$ 时在 $\frac{l}{2}$ 处的 u 、 c 、 ρ 、 p , 并求右端壁面上所承受的比冲量。

解 右传稀疏波在壁面处反射, 反射波到达 $\frac{l}{2}$ 处的时

间为 $\frac{2l-x}{D} = 15\mu\text{s}$ 。

$t = 35\mu\text{s} > \frac{2l-x}{D}$ ，即为反射波到达后的复合波区。此

时状态参数由 (8-1-29) 确定

$$u\left(-\frac{l}{2}, t\right) = \frac{x-l}{t} = \frac{(55-70) \times 10^{-3}}{35 \times 10^{-6}} = 1000 (\text{m/s})$$

$$c\left(-\frac{l}{2}, t\right) = \frac{l}{t} = \frac{70 \times 10^{-3}}{35 \times 10^{-6}} = 2000 (\text{m/s})$$

$$\rho\left(-\frac{l}{2}, t\right) = \rho_H \frac{c\left(-\frac{l}{2}, t\right)}{c_H} = 2.13 \times \frac{2000}{5250} = 0.81 (\text{g/cm}^3)$$

$$p\left(-\frac{l}{2}, t\right) = p_H \left[\frac{c\left(-\frac{l}{2}, t\right)}{c_H} \right]^3 = 196 \times 10^8 \times \left[\frac{2000}{5250} \right]^3 = 10.8 \times 10^8 (\text{Pa})$$

右端壁面所承受的比冲量，按 (8-1-33) 式计算

$$i = \frac{8}{27} l \rho_0 D = \frac{8}{27} \times 7 \times 1.6 \times 10^{-3} \times 7000 = 23.23 \left(\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} / \text{cm}^2 \right)$$

五、无壳装药接触爆炸对迎面刚壁的作用

上述讨论的问题，都是一维接触爆炸问题，即假设爆轰产物只作理想的一维流动，装药外壳壁及端部物体都假定为

绝对刚体，即使在高压爆轰产物作用下也不发生变形。在此情况下，只考虑轴向稀疏波的作用，而不考虑装药外壳破裂、变形所引起的径向膨胀波所引起的能量损耗。

在装药的实际爆轰过程中，理想的一维流动实际上是不存在的。因为凝聚炸药爆轰时，爆轰波阵面的压力高达 10^{10} Pa 以上，与装药相接触的外壳或受作用物体都不可避免地受到不同程度的破坏和变形，从而引起复杂的膨胀波向爆轰波阵面的传播，导致产物能量的多维耗散。即使炸药在密闭的外壳中进行爆轰，也很难达到理想的一维流动状态，至少也只能和一维流动状态相接近。

下面来考察一个圆筒形的圆柱形装药一端引爆的情况。在爆轰波向前传播过程中(如图8-1-11)，除了在爆轰波后面必然产生的轴向膨胀波随时传入爆轰产物之外，还同时有固体物径向飞散而造成的径向膨胀波，以当地音速向轴向回流。径向膨胀波所到之处，爆轰产物压强迅速下降，因而使得装药端部物体壁面所受到的作用冲量大大减小。物体壁面在产物作用下的变形所引起的稀疏作用将进一步减小爆轰产物对物体壁面的作用冲量。

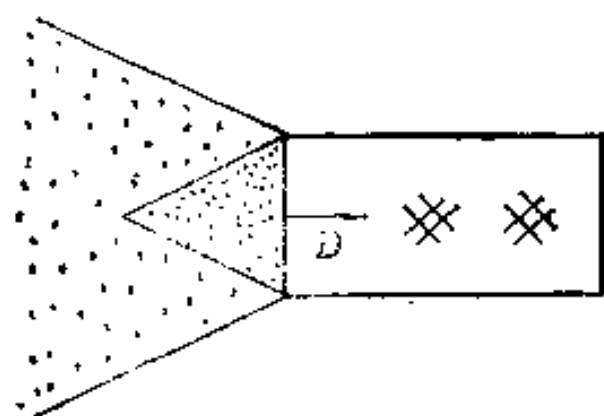


图8-1-11 爆轰产物侧向飞散

工程计算上通常采用一种有效装药的方法。所谓有效装药是指爆轰产物在给定方向上(比如在爆轰波传播方向上)飞散的那一部分装药。当装药直径一定时，随着装药长度的增加，有效装药量 m_0 也增加，但只能增加到一定程度。因此

冲量计算式 $I = \frac{8}{27} mD$ 中的 m 应该换成裸露装药情况下的有效装药量 m_a 。这样该式就不仅适用于一维情况,而且还可近似用于估算三维情况。

根据有效装药理论,装药长度 l 达到装药直径 d 的 2.25 倍时,有效装药量达到最大值,再增加装药长度时,有效装药量不再增加。在 $l \geq 2.25d$ 时有效装药量为一直圆锥体的炸药量;这个圆锥体的底等于装药直径 d ,圆锥高等于装药直径,即 $l_a = d$ 。所以此时有效装药量为

$$m_a = \frac{2}{3} \pi R^2 \rho_0 \quad (8-1-35)$$

式中 R 为装药半径, ρ_0 为装药密度。

当装药长度 $l < 2.25d$ 时,有效装药为一截锥体,截锥高度为 $\frac{4}{9}l$,其有效装药量计算式为

$$m_a = \left(\frac{4}{9}l - \frac{8}{81} \frac{l^2}{R} + \frac{16}{2187} \frac{l^3}{R^2} \right) \rho_0 \quad (8-1-36)$$

将 (8-1-35)、(8-1-36) 式代入计算式 (8-1-34), 可得总冲量

$l \geq 2.25d$ 时

$$I = \frac{8}{27} mD \left(\frac{2R}{3l} \right) \quad (8-1-37)$$

$l < 2.25d$ 时

$$I = \frac{8}{27} \left(\frac{4}{9}l - \frac{8}{81} \frac{l^2}{R} + \frac{16}{2187} \frac{l^3}{R^2} \right) \pi R^2 \rho_0 D \quad (8-1-38)$$

表 8-1-1 列出了应用 (8-1-37) 和 (8-1-38) 对不同尺寸梯恩梯装药端部比冲量计算结果,并且与实验值进行了比较。数据表明,二者是相近的,其相对误差不超过 10%。

表8-1-1 梯恩梯装药端部比冲量

l (mm)	d (mm)	ρ_0 (g/cm ³)	D (m/s)	i (N·s/cm ²)	
				实验值	计算值
80	20.0	1.40	6320	1.56	1.74
80	23.5	1.40	6350	2.13	2.04
80	31.4	1.40	6320	3.01	2.72
80	40.0	1.40	6320	3.70	3.53
70	20.0	1.50	6640	2.61	1.96
70	23.5	1.50	6640	2.61	2.30
70	31.4	1.50	6640	3.18	3.08
67	40.0	1.30	6025	3.12	3.04
61	40.0	1.30	6025	3.10	2.99
43	40.0	1.30	6025	2.90	2.67

由表 8-1-1 的数据可以看出,当装药密度 ρ_0 及装药长度 l 相同时, i 随着装药直径 d 的增大而增大。这是由于 d 增大时, 径向稀疏波的影响相对减弱的缘故。

当装药有外壳存在时, 径向稀疏波的影响比裸露装药情况要小, 因而装药端部的冲量相应增大, 表 8-1-2 的实验数据便是很好的证据。

表8-1-2 外壳对装药端部比冲量的影响

炸药	l (mm)	d (mm)	ρ_0 (g/cm ³)	i (N·s/cm ²)		
				6 mm 钢外壳	3 mm 钢外壳	无壳
TNT	30	23.5	1.30	5.13	3.80	—
TNT	50	23.5	1.30	6.23	4.22	—
TNT	60	23.5	1.30	6.93	4.66	2.13
钝化RDX	60	23.5	1.30	8.14	—	3.63

§ 8-2 炸药爆炸对接触介质 直接作用的初始值

炸药起爆后，爆轰波沿着炸药迅速传播，当爆轰波传播到与炸药相接触介质的分界面上时，在介质中必然产生入射冲击波，同时在爆轰产物中还反射回一个波，这个反射波可能是冲击波，也可能是膨胀波。反射波的性质取决于炸药与介质的一个重要特性参数——冲击阻抗。所谓冲击阻抗，就是物质的初始密度与冲击波速度的乘积。它的物理意义是：在冲击波作用下，为使物质获得单位运动速度所需要施加的冲击波压力大小，要使物质获得同样的运动速度，冲击阻抗愈大的物质所需要的冲击压力愈大。

如果炸药的冲击阻抗 $\rho_0 D$ 小于被冲击介质的冲击阻抗 $\rho_{m0} D_m$ ，而且反射冲击波的压力(初始压力) p_r 高于爆轰波波阵面压力 p_H ，则产物中的反射波为冲击波。反之，如果炸药的冲击阻抗大于介质的冲击阻抗，界面上的压力 p_r 将低于爆轰波波阵面压力 p_H ，则传入产物中的反射波为膨胀波。如果两者冲击阻抗相等，则界面处不发生反射现象，入射波强度不变地传入介质中去。下面分别进行讨论。

一、分界面处压力 $p_r < p_H$ 的情况

分界面处介质的压力低于爆轰波波阵面压力，说明介质的冲击阻抗低于炸药的冲击阻抗。此时在爆轰波的作用下，介质中形成冲击波，爆轰产物中反射回膨胀波。为了简化问题，作如下两点假设：

1. 整个过程是一维的，平面爆轰波向介质进行平面冲击；

2. 在一个很短的时间间隔内,爆轰波面后产物的参数近似地看成与波阵面参数相等。

爆轰波到达介质分界面前、后炸药爆轰产物与介质发生作用瞬间的 $p-x$ 分布以及波系的 $x-t$ 图分别示于图 8-2-1 的 a , b , c 上。

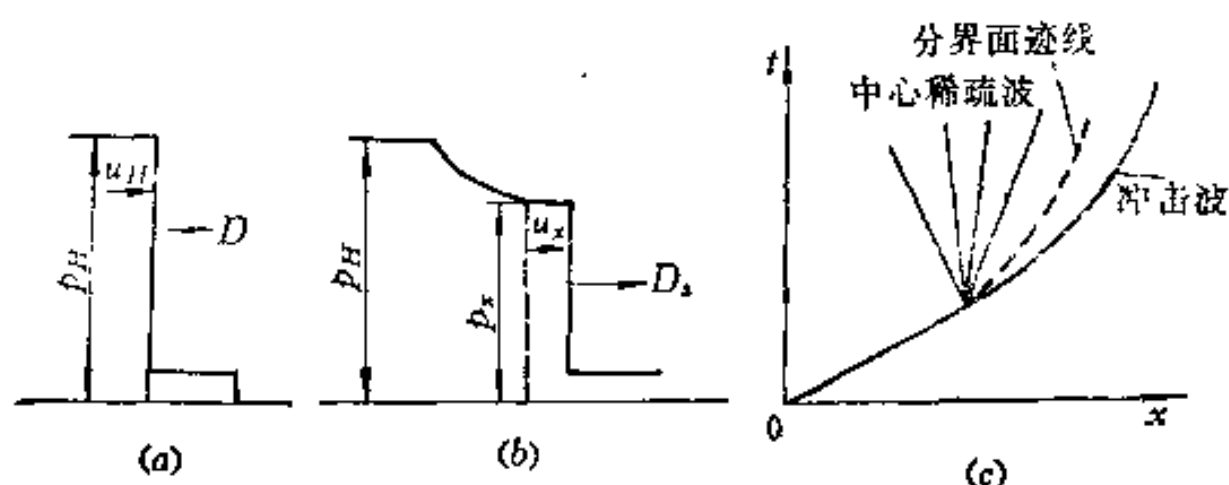


图8-2-1 $p_x < p_H$ 时界面附近的参数分布

a —爆轰波到达界面前; b —爆轰波到达界面后; c —波的 $x-t$ 图。

如果采用 $p = A\rho^\gamma$ 作产物的状态方程, 则爆轰波波阵面上产物的参数为

$$\left. \begin{aligned} p_H &= \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 & \rho_H &= \frac{\gamma + 1}{\gamma} \rho_0 \\ u_H &= \frac{1}{\gamma + 1} D & c_H &= \frac{\gamma}{\gamma + 1} D \end{aligned} \right\} \quad (8-2-1)$$

式中 p_H 、 ρ_H 、 u_H 、 c_H 是爆轰波波阵面的压力、密度、质点速度和音速, ρ_0 是炸药初始密度, D 是爆速。

先考察爆轰产物的膨胀过程。当爆轰波传至分界面但尚未发生膨胀时, 产物的质点速度为 $u_H = \frac{1}{\gamma + 1} D$ 。由于膨胀波传入, 产物发生等熵膨胀, 使产物得到一个附加速度 u_r , 因此分界面的速度为

$$u_x = u_H + u_r \quad (8-2-2)$$

爆轰产物压力从 p_H 膨胀减小到 p_x 过程中, 累计获得的附加加速度 u_r 可由下式计算得到

$$u_r = \frac{2\gamma D}{\gamma^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{p_x}{p_H} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \quad (8-2-3)$$

代入 (8-2-2) 式得

$$u_x = \frac{D}{\gamma + 1} \left\{ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_x}{p_H} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \right\} \quad (8-2-4)$$

由于分界面处压力和质点速度是连续的, 即

$$\left. \begin{aligned} u_x &= u_{mx} \\ p_x &= p_{mx} \end{aligned} \right\} \quad (8-2-5)$$

式中 u_{mx} 和 p_{mx} 均为介质中的初始参数。 u_x 和 p_x 为反射回爆轰产物中的初始参数。

上面 (8-2-4) 式已经给出了 u_x , p_x 和炸药爆轰产物参数 p_H 和 γ 之间的关系; 而介质中冲击波初始参数 u_{mx} 和 p_{mx} 之间应满足冲击波基本关系 (动量守恒定律)

$$p_{mx} = \rho_{m0} D_m u_{mx} \quad (8-2-6)$$

如果介质的状态方程或冲击压缩规律已知, 例如采用形式 $D_m = a + bu_m$, 则 (8-2-6) 式为

$$p_{mx} = \rho_{m0} (a + bu_{mx}) u_{mx} \quad (8-2-7)$$

可以根据方程 (8-2-4) 和 (8-2-7) 式, 以及界面连续条件 (8-2-5) 式, 联立解出介质中冲击波的初始参数。

〔例8-3〕 已知黑索金炸药的装药密度 $\rho_0 = 1.65 \text{ g/cm}^3$, 爆速 $D = 8280 \text{ m/s}$, 取 $\gamma = 3$, 计算此炸药在水中爆炸时, 在水中产生的初始冲击波参数。

解 由于水的冲击阻抗比固体炸药的冲击阻抗小, 故炸

药爆炸后在水中形成冲击波，而在爆轰产物中反射回膨胀波，故可以按照(8-2-4)和(8-2-7)式进行计算。

水的冲击压缩方程

$$D_w = 1700 + 1.7u_w \quad (\text{m/s})$$

爆轰波波阵面压力

$$p_H = \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 = 2.83 \times 10^{10} \quad (\text{Pa})$$

以及 $D = 8280 \text{ m/s}$ 、 $\gamma = 3$ 和 $\rho_{w0} = 1 \text{ g/cm}^3$ ，将其代入(8-2-4)和(8-2-7)中，且注意到单位的一致，得到

$$u_x = 2070 \left\{ 1 + 3 \left[1 - \left(\frac{p_x}{2.83 \times 10^{10}} \right)^{1/3} \right] \right\} \quad (8-2-8)$$

$$p_{wx} = 10^8 (1700 + 1.7u_{wx}) u_{wx} \quad (8-2-9)$$

按照界面连续条件 $p_x = p_{wx}$ 、 $u_x = u_{wx}$ ，因而(8-2-8)和(8-2-9)是含有两个未知数的两个方程，可以解出压力和质点速度。但是为了解的方便，采用试探法，首先假设一个 p_x ，代入(8-2-8)式计算出 u_x ，以 $u_x = u_{wx}$ 代入(8-2-9)式，再计算出 p_{wx} 。若计算值 p_{wx} 与假设值 p_x 相等，则假设值 $p_x = p_{wx}$ 即为所求；若计算值 p_{wx} 与假设值 p_x 不等，则需要重新假设进行计算。

首先假设 $p_x = 1.8 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ，由(8-2-8)计算

$$u_x = 2070 \left\{ 1 + 3 \left[1 - \left(\frac{1.8 \times 10^{10}}{2.83 \times 10^{10}} \right)^{1/3} \right] \right\} = 2938 \quad (\text{m/s})$$

以 $u_{wx} = u_x$ 代入(8-2-9)式，计算

$$\begin{aligned} p_{wx} &= 10^8 (1700 + 1.7 \times 2938) \times 2938 \\ &= 1.97 \times 10^{10} \quad (\text{Pa}) \end{aligned}$$

由于计算值和假设值不相符合，重新假设 $p_x = 1.88 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ，由(8-2-8)式计算出

$$u_x = 2860 \text{ m/s}$$

代入 (8-2-9) 式计算出

$$p_{ax} = 1.88 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

由于计算值与假设值基本相等 (或在误差要求范围内), 因而可以得出水中冲击波初始参数 $p_w = 1.88 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、 $u_w = 2860 \text{ m/s}$ 。同时还可计算出

$$D_w = 1700 + 1.7 \times 2860 = 6562 (\text{m/s})$$

表8-2-1给出了几种炸药在水中爆炸时, 水中冲击波初始参数的计算值。

表8-2-1 水中爆炸冲击波的初始参数

炸药	$\rho_0 (\text{g/cm}^3)$	$D (\text{m/s})$	$p_w (\text{GPa})$	$u_w (\text{m/s})$	$D_w (\text{m/s})$
黑索金	1.65	8280	18.8	2860	6562
梯恩梯	1.60	6950	13.6	2330	5740
泰安	1.69	8400	19.4	2960	6732

二、分界面处压力 $p_x > p_1$ 的情况

分界面处介质的压力高于爆轰波波阵面压力, 说明介质的冲击阻抗高于炸药的冲击阻抗。此时在爆轰波的作用下, 介质中形成冲击波, 爆轰产物中也反射回冲击波。图 8-2-2

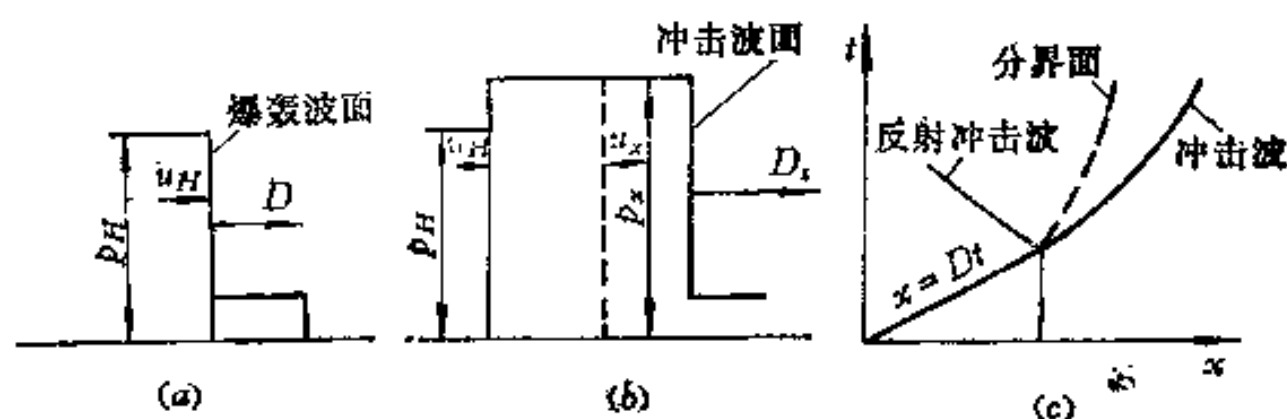


图8-2-2 $p_x > p_H$ 时界面附近的参数分布

a—爆轰波到达界面前; b—爆轰波到达界面后; c—波的 $x-t$ 图。

表示了这种情况下分界面附近的参数分布。

由于反射回产物中的波为一冲击波 D'_r ，而冲击波传过后质点速度与波传播方向是同方向的，即反射波 D'_r 后产物所获得的附加速度方向是与爆轰波后质点速度方向相反的。因此，分界面速度 u_x 应为两个速度之差，即

$$u_x = u_H - u_r = u_H - \sqrt{(p_x - p_H)(v_H - v_x)} \quad (8-2-10)$$

利用爆轰产物的多方方程 $p = A\rho^\gamma$ ，可将反射冲击波的冲击绝热线写成

$$\frac{v_x}{v_H} = \frac{(\gamma - 1) \frac{p_x}{p_H} + (\gamma + 1)}{(\gamma + 1) \frac{p_x}{p_H} + (\gamma - 1)} \quad (8-2-11)$$

将 (8-2-11) 代入 (8-2-10) 式，得到

$$u_x = u_H - \sqrt{p_H v_H \left(\frac{p_x}{p_H} - 1 \right) \left[1 - \frac{(\gamma - 1) \frac{p_x}{p_H} + \gamma + 1}{(\gamma + 1) \frac{p_x}{p_H} + \gamma - 1} \right]}$$

代入 $u_H = \frac{1}{\gamma + 1} D$ ， $p_H = \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2$ ， $v_H = \frac{\gamma}{\gamma + 1} v_0$ ，上式可以整理为

$$u_x = \frac{D}{\gamma + 1} \left[1 - \frac{\sqrt{2\gamma} \left(\frac{p_x}{p_H} - 1 \right)}{\sqrt{(\gamma + 1) \frac{p_x}{p_H} + (\gamma - 1)}} \right] \quad (8-2-12)$$

另一方面，在原来静止的介质中入射的冲击波过后，波后介质质点速度为

$$u_{mx} = \sqrt{(p_{mx} - p_{m0})(v_{m0} - v_{mx})}$$

由于 $p_{m0} \ll p_{mx}$, 故可略去 p_{m0} , 上式成为

$$u_{mx} = \sqrt{p_{mx} \left(\frac{1}{\rho_{m0}} - \frac{1}{\rho_{mx}} \right)} \quad (8-2-13)$$

再利用界面连续条件

$$p_x = p_{mx}, \quad u_x = u_{mx}$$

这样, 上述两个方程 (8-2-12) 和 (8-2-13) 式, 仍还包含三个未知数 p_x 、 u_x 和 ρ_{mx} 。为了求解方程, 还需要知道介质材料的状态方程或者冲击压缩性关系, 这样才能计算出介质中冲击波的初始参数。

许多固体材料的状态方程, 通常采用下列形式

$$p_m = A \left[\left(\frac{\rho_m}{\rho_{m0}} \right)^n - 1 \right] \quad (8-2-14)$$

式中 A 和 n 是由实验确定的系数, 对几种材料的 A 、 n 值表示在表 8-2-2 中。

表 8-2-2 几种材料的 A 、 n 值

材料	$\rho_{m0} (\text{g/cm}^3)$	$A (\text{GPa})$	n
铁	7.8	21.5	5.5
铜	8.9	30.2	4.8
铝合金	2.78	19.7	4.2
铝	11.34	8.6	5.3
钛	4.51	26.0	3.8

解出 p_x 、 u_x 、 ρ_{mx} 后, 介质中入射冲击波速度 D_m 和爆轰产物中反射冲击波速度 D'_r , 可以分别由下列公式计算

$$D_m = v_{m0} \sqrt{\frac{p_{mx}}{v_{m0} - v_{mx}}} \quad (8-2-15)$$

$$D'_c = a_{II} \sqrt{\frac{p_c}{\rho_{II} - \rho_x}} - u_{II} \quad (8-2-16)$$

〔例8-4〕 已知梯恩梯炸药 $\rho_0 = 1.6 \text{ g/cm}^3$, $D = 6950 \text{ m/s}$, $p_{II} = 1.93 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 取 $\gamma = 3$ 。计算该炸药在铁板上爆炸时, 在铁板中所产生的冲击波初始参数。

解 采用方程 (8-2-12)、(8-2-13) 和 (8-2-14) 式, 代入具体的数据, 并且注意到单位的一致, 得到

$$u_x = 1737.5 \left[1 - \frac{\sqrt{6} \left(\frac{p_x}{1.93 \times 10^{10}} - 1 \right)}{\sqrt{\frac{4\rho_x}{1.93 \times 10^{10}} + 2}} \right] \quad (8-2-17)$$

$$u_{mx} = \sqrt{\frac{1}{10^{-3} \rho_{mx}}} \left(\frac{1}{7.8} - \frac{1}{\rho_{mx}} \right) \quad (8-2-18)$$

$$p_{mx} = 2.15 \times 10^{10} \left[\left(\frac{\rho_{mx}}{7.8} \right)^{6.5} - 1 \right] \quad (8-2-19)$$

仍然采用试探法求解, 首先假定一个 p_{mx} , 由 (8-2-19) 计算出 ρ_{mx} , 然后再由 (8-2-17) 和 (8-2-18) 分别计算出 u_x 和 u_{mx} , 比较二者是否相等, 若相等则为所求, 若不等需重新假设进行计算。

首先假设 $p_{mx} = 3 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 代入 (8-2-19) 计算出

$$\rho_{mx} = 7.8 \left(\frac{p_{mx}}{2.15 \times 10^{10}} + 1 \right)^{1/6.5} = 9.14 (\text{g/cm}^3)$$

代入 (8-2-17) 计算

$$u_x = 1737.5 \left[1 - \frac{\sqrt{6} \left(\frac{3 \times 10^{10}}{1.98 \times 10^{10}} - 1 \right)}{\sqrt{\frac{4 \times 3 \times 10^{10}}{1.93 \times 10^{10}} + 2}} \right] = 914 (\text{m/s})$$

代入 (8-2-18) 计算

$$u_{mx} = \sqrt{3 \times 10^7 \left(\frac{1}{7.8} - \frac{1}{9.14} \right)} = 751 \text{ (m/s)}$$

由于二式计算出的 u_x 和 u_{mx} 不等, 重新假设 $p_{mx} = 3.19 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 由 (8-2-19) 式计算出

$$\rho_{mx} = 9.20 \text{ g/cm}^3$$

代入 (8-2-17) 计算得

$$u_x = 791 \text{ m/s}$$

代入 (8-2-18) 计算得

$$u_{mx} = 789 \text{ m/s}$$

二式计算的 u_x 和 u_{mx} 值基本相等 (或者在误差要求范围内), 因而可以得到铁中爆炸冲击波初始参数 $p_m = 3.19 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $\rho_m = 9.20 \text{ g/cm}^3$, $u_m = 790 \text{ m/s}$ 。

同时还可以按 (8-2-15) 式计算出铁中入射冲击波速度

$$D_m = \frac{1}{7.8} \sqrt{\frac{319 \times 10^5}{\frac{1}{7.8} - \frac{1}{9.2}}} = 5184 \text{ (m/s)}$$

表 8-2-3 给出了几种炸药在不同金属上爆炸时, 入射冲击波初始参数的计算值。

表 8-2-3 两种炸药在铁、铝、铜中的爆炸冲击波初始参数

金属	炸 药			p_m (GPa)	ρ_m (g/cm ³)	u_m (m/s)	D_m (m/s)
	种类	ρ_0 (g/cm ³)	D (m/s)				
铁	黑索金	1.65	8280	43.8	9.57	1010	5510
	梯恩梯	1.62	7000	32.7	9.24	810	5187
铝	黑索金	1.65	8280	34.5	8.45	1635	7580
	梯恩梯	1.62	7000	25.6	8.30	1285	7100
铜	黑索金	1.65	8280	45.0	10.80	940	5380
	梯恩梯	1.62	7000	33.7	10.42	750	5040

第九章 爆炸空气冲击波

炸药爆炸后，在空气中形成很强的冲击波。爆炸空气冲击波传播距离很远，大大超出了炸药本身所占有的范围，比如1m见方的散装梯恩梯药包爆炸后，会在周围直径100m的范围内造成房屋倒塌，在周围直径200m的范围内对人员产生程度不同的杀伤；再如容量 $10 \times 10^3 \text{kg}$ 的炸药库爆炸后，除在当地造成巨型大坑之外，还会在周围直径200m的范围内造成房屋倒塌，在周围直径近500m的范围内对人员产生不同程度的杀伤。从而看出，爆炸空气冲击波对周围建筑物会造成大面积的破坏，对周围人员会产生大范围的杀伤，空气冲击波上的超压是造成这种破坏和杀伤的直接原因。

本章主要研究爆炸空气冲击波随距离衰减的规律，以及冲击波对外界所产生的破坏效应。在此基础上进一步讨论设防安全距离和炸药间的殉爆问题。

§ 9-1 空气中爆炸的基本现象

炸药在空气中爆炸后，形成一团高温高压气体产物。由于这一团气体产物较比周围空气压力高得多，因而必然迅速向外进行膨胀，迅速膨胀的高压气体产物如同一个巨大的活塞一样，以超音速的速度剧烈地冲击压缩着周围原来静止的空气，使其压力、密度、温度突跃升高，形成很强的冲击波。

炸药爆炸周围所形成的爆炸场，与装药的形状和距装药

中心的距离有关。装药的形状大约可以归纳为球形、柱形和一维平面装药，在近距离范围内，球装药周围的爆炸场相当于高压气体产物的三维体膨胀，柱装药径向（两端除外）的爆炸场相当于高压气体产物的二维面膨胀，平面装药的爆炸场相当于高压气体产物的一维线膨胀；随着距离的增加，装药形状的影响愈来愈小；在距离足够远时，爆炸场相当于同质量球形装药的爆炸场。

本节主要以球形装药来分析爆炸产物的膨胀，用一维流动理论研究爆炸初始冲击波，以及爆炸冲击波在空气中的传播。

一、爆轰产物的膨胀

炸药爆炸后，随着爆轰波的传播形成高温、高压气体产物，此高温、高压气体不断向外膨胀。由于爆炸非常迅速，并且装药尺寸是有限的，因而可以不考虑爆轰波传播过程，假定爆轰是瞬时完成的，用瞬时爆轰来研究爆轰产物的膨胀。

假若装药是球形，装药初始半径为 R_0 ，容积为 V_0 ，瞬时爆轰的压强为 $\bar{p}_1$ ，爆轰产物的最初阶段，压力下降得非常快，符合产物状态方程

$$pV^\gamma = \text{const} \quad (9-1-1)$$

式中 γ 近似可以取作 3。随着产物的膨胀，压力愈来愈下降，当压力不太高时，可以近似用理想气体状态方程进行描述，此时

$$pV^k = \text{const} \quad (9-1-2)$$

式中 k 取 1.2~1.4。

为了描述问题方便，用 $p_k = 2 \times 10^8 \text{Pa}$ 作为界限，当压强 $p \geq p_k$ 时，采用膨胀规律 (9-1-1)；当压强 $p < p_k$ 时，采用膨

胀规律 (9-1-2)。

首先, 计算一下爆轰产物压力膨胀到 $p_k = 2 \times 10^8 \text{Pa}$ 时, 爆轰产物所膨胀的半径, 按照 (9-1-1) 的规律

$$p_k V_k^\gamma = \bar{p}_H V_0^\gamma$$

式中 V_k 是与压强 p_k 相对应的容积。由于球形容积 V 与半径 R 成三次方关系, 故上式可以写为

$$p_k R_k^{3\gamma} = \bar{p}_H R_0^{3\gamma}$$

取 $\gamma = 3$, 且对于中等威力炸药, 取 $\bar{p}_H = 10^{10} \text{Pa}$, 则

$$\frac{R_k}{R_0} = \left(\frac{\bar{p}_H}{p_k} \right)^{\frac{1}{3\gamma}} = \left(\frac{10^{10}}{2 \times 10^8} \right)^{\frac{1}{3 \times 3}} = 1.545$$

计算表明: 爆轰产物由 R_0 仅仅膨胀到 $1.545R_0$ 时, 产物压强就由 10^{10}Pa 下降到 $2 \times 10^8 \text{Pa}$, 从而看出初始阶段爆轰产物膨胀非常剧烈, 压力下降得特别快。

当压强下降到 $2 \times 10^8 \text{Pa}$ 时, 爆轰产物的压力还要继续下降, 再计算一下压力下降到与周围静止空气压力相等时, 爆轰产物膨胀的半径是多大? 设爆轰产物压强下降到 $p_0 = 10^5 \text{Pa}$ 时的极限容积为 V_1 , 此时按照 (9-1-2) 式的规律

$$p_0 V_1^k = p_k V_k^k$$

取 $k = 1.3$, 且用球半径代替容积, 则

$$\frac{R_1}{R_k} = \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{1}{3k}} = \left(\frac{2 \times 10^8}{10^5} \right)^{\frac{1}{3 \times 1.3}} = 7$$

代入 $R_k = 1.545R_0$, 得

$$R_1 = 7R_k = 7 \times 1.545R_0 = 10.8R_0$$

从计算中看出, 当压力从 10^{10}Pa 下降到 10^5Pa 时, 爆轰产物的膨胀半径仅仅是原装药半径的 10.8 倍, 说明爆轰产物直接作用的范围是很小的。

应当指出, 爆轰产物的压力膨胀到 $p_0 = 10^5 \text{Pa}$ 时, 爆轰产物并没有停止运动, 由于惯性的作用, 将继续进行膨胀, 直到惯性消失为止, 一般来说产物过度膨胀的最大容积量约比极限容积大 30%~40%, 这时爆轰产物中的平均压力低于周围静止空气的压力 p_0 。反过来, 周围空气对爆轰产物进行压缩, 使其压力不断增加, 当产物压力等于周围静止大气压力 p_0 时, 由于惯性作用又会产生过度压缩。爆轰产物过度压缩后, 由于压力又大于周围静止空气的压力 p_0 , 所以又会产生第二次的膨胀和压缩, 等等。但是, 有实际意义的只是第一次的膨胀和压缩过程。

图9-1-1表示爆点周围产物压力随时间变化的情况。

下面初步估计一下炸药爆炸时, 转为周围空气介质的能量, 设炸药爆炸前装药密度为 ρ_0 , 装药体积为 V_0 , 单位质量的爆热为 Q , 则炸药的初始能量

$$E_0 = \rho_0 V_0 Q$$

由于周围大气压强为 p_0 , 爆轰产物膨胀到与周围大气平衡时的极限容积为 V_1 , 则爆轰产物膨胀到极限体积时所具有的能量

$$E_1 = \frac{p_0 V_1}{k-1}$$

所以, 如果不考虑其它能量的损失, 炸药爆炸后传给周围介质的能量

$$E = E_0 - E_1 = \rho_0 V_0 Q - \frac{p_0 V_1}{k-1}$$

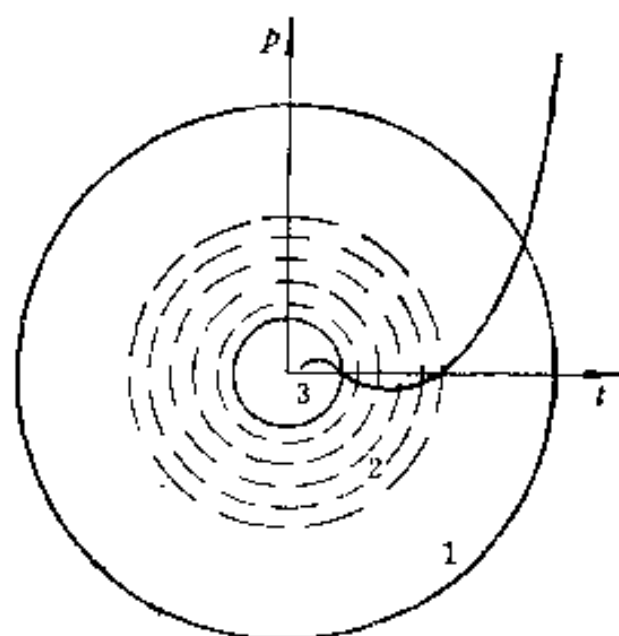


图9-1-1 爆点周围产物压力随时间的变化

得到

$$\frac{E}{E_0} = 1 - \frac{\rho_0}{(k-1)\rho_0 Q} \frac{V_1}{V_0}$$

或

$$\frac{E}{E_0} = 1 - \frac{p_0}{(k-1)\rho_0 Q} \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^3$$

对于中等威力的炸药, 取 $\rho_0 = 1.6 \text{ g/cm}^3$, $Q = 4.184 \times 10^6 \text{ J/kg}$, 仍取 $K = 1.3$, 可以计算出

$$\begin{aligned} \frac{E}{E_0} &= 1 - \frac{10^5}{(1.3-1) \times 1.6 \times 10^3 \times 4.184 \times 10^6} \\ &\times (10.8)^3 = 0.937 \end{aligned}$$

由估算看出, 当不考虑其它能量损失时, 炸药爆炸所放出能量的90%以上都传给了周围介质, 而残留在爆轰产物中的能量不到10%。但是, 由于炸药爆炸的不完全, 不可能放出全部能量, 另外由于爆轰产物在剧烈向外膨胀过程中形成很强的空气冲击波, 冲击波对空气进行冲击压缩, 把一部分能量变成为热而消耗掉, 并且爆轰产物与冲击波后空气介质的分界面在平衡位置发生振荡, 也消耗不少的能量, 所以实际上, 爆炸真正传给周围空气介质的能量要小得多, 大约为炸药初始总能量的60%~70%。

二、爆炸在空气中形成的初始冲击波

假若在直管中装好一段炸药, 炸药的一端与空气相接触, 当炸药从另一端起爆, 爆轰波传播到与空气相接触的这一端后, 由于高压产物的剧烈膨胀, 立即向空气中传出一道很强的冲击波, 同时向爆轰产物中反射回一束膨胀波, 在冲击波和膨胀波区后之间的流场中存在着一个分界面, 用以隔开空气和爆轰产物。

图9-1-2a表示直管中炸药爆炸所形成初始冲击波的距离

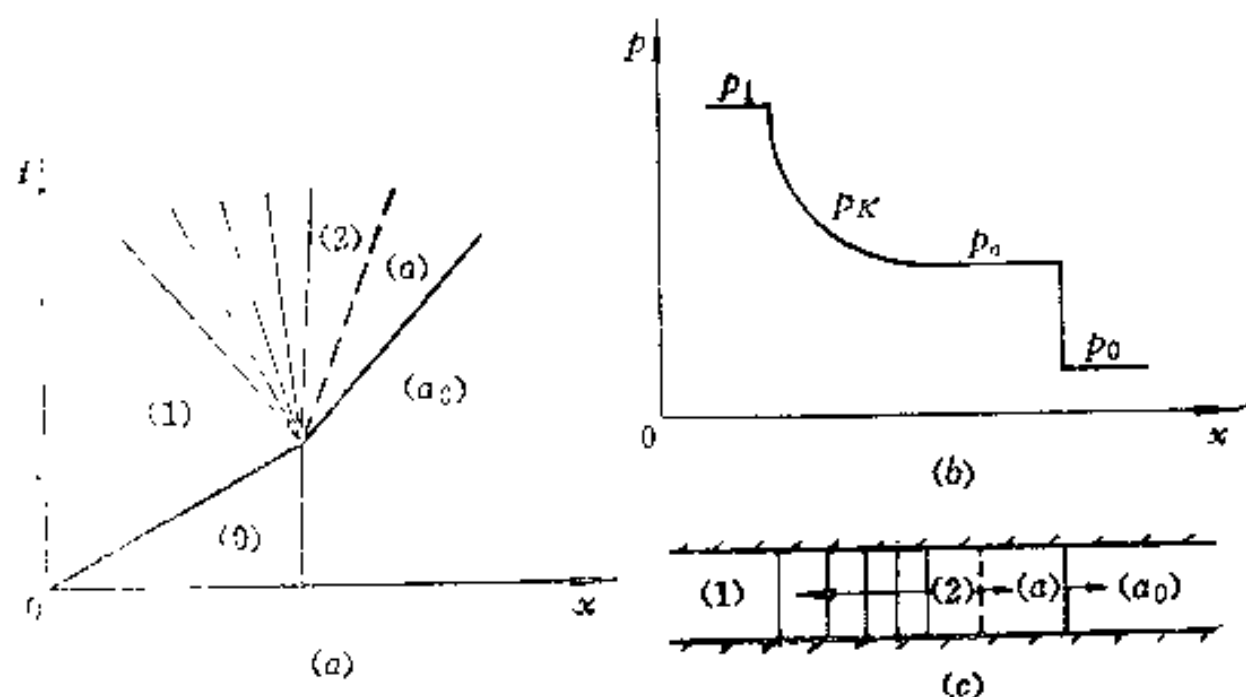


图9-1-2 爆炸初始冲击波的形成

(a) 直管中形成初始冲击波时波系传播的距离-时间图；(b) 直管中某时刻的压力分布；(c) 直管中某时刻波系的传播。

一时间图，(0)区为原始炸药，(a0)区为静止空气，(1)区为爆炸波后未膨胀的爆轰产物，(a)区为冲击波后被压缩的空气，(2)区为膨胀波区后的爆轰产物，(a)区和(2)区间的虚线表示空气与爆轰产物的分界面。图9-1-2c为某一瞬间波系在直管中传播的情况，图9-1-2b为该时刻压力沿管道的分布。

按照分界面条件，(a)区和(2)区的压强和速度分别相等

$$p_a = p_2, \quad u_a = u_2$$

现在分别研究一下(a)区和(2)区的参数。

首先分析冲击波后的(a)区，由于初始冲击波很强，可以按照强冲击波关系，假若冲击波速度为 D_a ，则

$$u_s = \frac{2}{k+1} D_s$$

$$p_s = \frac{2}{k+1} \rho_{s0} D_s^2$$

将后式代入前式，消去 D_s 得：

$$u_s = \sqrt{\frac{2}{k+1} \frac{p_s}{\rho_{s0}}} \quad (9-1-3)$$

式中 k 是空气的等熵绝热指数，其值可取 $k = 1.2 \sim 1.4$ 。

再分析膨胀波区后的 (2) 区。爆轰产物从 (1) 区状态膨胀到 (2) 区状态，在这个膨胀过程中，压力变化范围很大。对于压力为 10^9Pa 以至 10^{10}Pa 以上的爆轰产物，等熵膨胀指数 γ 一般取作 3；而对于压力在 10^7Pa 以下的气体，等熵膨胀指数 k 取 $1.2 \sim 1.4$ 。因而，爆轰产物从 (1) 区到 (2) 区变化过程中，等熵指数从 3 到 $(1.2 \sim 1.4)$ 连续变化。为了计算方便起见，仍然可以象前面处理问题的方法一样，近似取 $p_k = 2 \times 10^8 \text{Pa}$ ，把产物膨胀过程分成两个阶段，前一阶段按指数 γ 进行膨胀，后一阶段按指数 k 进行膨胀。

当 $p \geq p_k$ 时，等熵膨胀关系

$$\frac{c_k}{c_R} = \left(\frac{T_k}{T_R} \right)^{1/\gamma} = \left(\frac{p_k}{p_R} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}$$

当 $p < p_k$ 时，等熵膨胀关系

$$\frac{c_k}{c_k} = \left(\frac{T_k}{T_k} \right)^{1/k} = \left(\frac{p_k}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{2k}}$$

按照膨胀波区前、后气流速度与状态参数的关系，并且考虑到膨胀波区变化的两个阶段，可以写成

$$\begin{aligned}
 u_2 - u_H &= \frac{2}{\gamma - 1} (c_H - c_k) + \frac{2}{k - 1} (c_k - c_2) \\
 &= \frac{2c_H}{\gamma - 1} \left(1 - \frac{c_k}{c_H} \right) + \frac{2c_k}{k - 1} \left(1 - \frac{c_2}{c_k} \right)
 \end{aligned}
 \quad (9-1-4)$$

将膨胀过程两个阶段的等熵关系和 (1) 区的参数

$$u_H = \frac{1}{\gamma + 1} D, \quad c_H = \frac{\gamma}{\gamma + 1} D$$

代入 (9-1-4) 式, 可以得到

$$\begin{aligned}
 u_2 = \frac{D}{\gamma + 1} &\left\{ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_H} \right)^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} \right] \right\} \\
 &+ \frac{2c_k}{k - 1} \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_H} \right)^{\frac{k - 1}{2k}} \right]
 \end{aligned}
 \quad (9-1-5)$$

按照分界面条件, 联立 (9-1-3) 和 (9-1-5) 两式, 可以确定出初始冲击波后的压力和气体流动速度, 再由 $D_s = \frac{2}{k + 1} u_s$ 又可以确定初始冲击波的传播速度。

取 $\rho_{ao} = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $k = 1.3$, $\gamma = 3$, $p_k = 2 \times 10^8 \text{ Pa}$, 以及

$$c_k = c_H \left(\frac{p_k}{p_H} \right)^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} = \frac{3}{4} D \left(\frac{2 \times 10^8}{p_H} \right)^{\frac{1}{3}}$$

将之全部代入 (9-1-3) 和 (9-1-5) 二式, 可以得到更清晰包含 p_s 和 u_s 两个未知数的方程

$$u_s = 0.8425 \sqrt{p_s} \quad (9-1-6)$$

$$u_s = -\frac{D}{4} \left\{ 1 + 3 \left[1 - \left(\frac{2 \times 10^8}{p_H} \right)^{1/3} \right] \right\}$$

$$+5D\left(\frac{2 \times 10^8}{p_u}\right)^{1/3}\left[1 - \left(\frac{p_a}{2 \times 10^8}\right)^{0.115}\right] \quad (9-1-7)$$

〔例9-1〕 黑索金炸药 $\rho_0 = 1.7 \text{ g/cm}^3$ ，计算在空气中爆炸时所形成初始冲击波的传播速度和波后压力。

解 黑索金炸药 $\rho_0 = 1.7 \text{ g/cm}^3$ 时的爆速和爆压，可以按 (6-5-1) 式计算

$$p_u = 7.617 \times 10^6 \varphi \rho_0^2 = 306 \times 10^6 (\text{Pa})$$

$$D = 0.706 \varphi^{1/2} (1 + 1.3 \rho_0) = 4843 (\text{m/s})$$

将 p_u 、 D 值代入 (9-1-7) 式，化简，连同 (9-1-6) 式可以得到下面两个方程

$$u_a = 7259 + 7893 \left[1 - \left(\frac{p_a}{2 \times 10^8} \right)^{0.115} \right]$$

$$u_a = 0.8425 \sqrt{p_a}$$

采用图解法求解。

假设 $p_a = 850 \times 10^6$ ， 900×10^6 ， $950 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，按照上述二式分别计算 u_a ，其计算结果

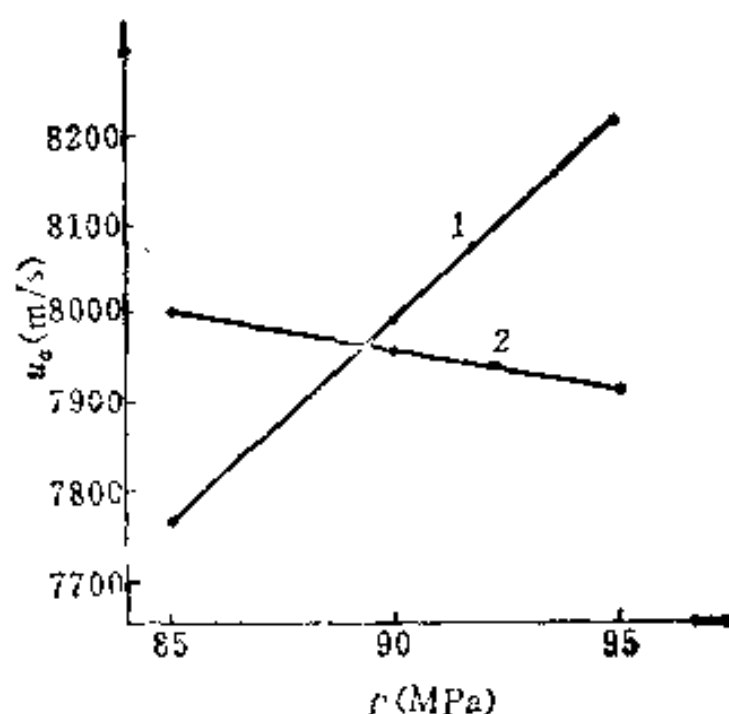
假设 $p_a (\text{Pa})$	$u_a (\text{m/s})$	
	按 (9-1-6) 式	按 (9-1-7) 式
850×10^6	7767	8000
900×10^6	7993	7962
950×10^6	8212	7907

将计算数据绘成两条曲线，如图 9-1-3 所示，二曲线交点

$$p_a = 892 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$u_a = 7960 \text{ m/s}$$

即为在空气中所形成初始冲击波波后状态的 压 力 和 气 流 速度。

图9-1-3 $p_a \sim u_a$ 曲线

1—按 (9-1-6) 式计算；2—按 (9-1-7) 式计算。

初始冲击波速度

$$D_a = \frac{k+1}{2} u_a = \frac{1.3+1}{2} \times 7960 = 9154 (\text{m/s})$$

表9-1-1给出了几种炸药所形成空气冲击波的初始值。从数值看出，空气冲击波波阵面的压力虽比爆轰产物未膨胀时的压力低几百倍，但空气冲击波的速度甚至比爆速还高。这说明爆轰产物在迅速膨胀的同时，对周围还产生着剧烈的冲击作用，这个冲击作用是对周围建筑和人员杀伤的重要因素。

表9-1-1 几种炸药所形成空气冲击波的初始值

炸 药			$p_a (\text{MPa})$	$u_a (\text{m/s})$	$D_a (\text{m/s})$
名称	$\rho (\text{g/cm}^3)$	$D (\text{m/s})$			
梯恩梯	1.60	7000	5.7	6150	7415
黑索金	1.60	8200	7.6	7450	8565
泰安	1.69	8400	8.1	7700	8855

三、空气冲击波的传播

炸药在空气中爆炸形成初始冲击波后，冲击波迅速向外传播，在传播初期，波后面跟随着膨胀的爆轰产物，当爆轰产物停止膨胀往回运动时，空气冲击波脱离爆轰产物，独自向前运动。

图9-1-4表示爆炸场内某点处的冲击波波形，由于爆轰产物的剧烈膨胀，高压气体迅速向外运动，对周围气体猛烈进行压缩，形成冲击波。冲击波到达瞬间，空气压力由 p_0 突跃上升到 p ，图中以超压 $\Delta p = p - p_0$ 表示；随后由于爆轰产物膨胀逐渐变慢，高压气体向外运动的速度减小，这相当于在冲击波

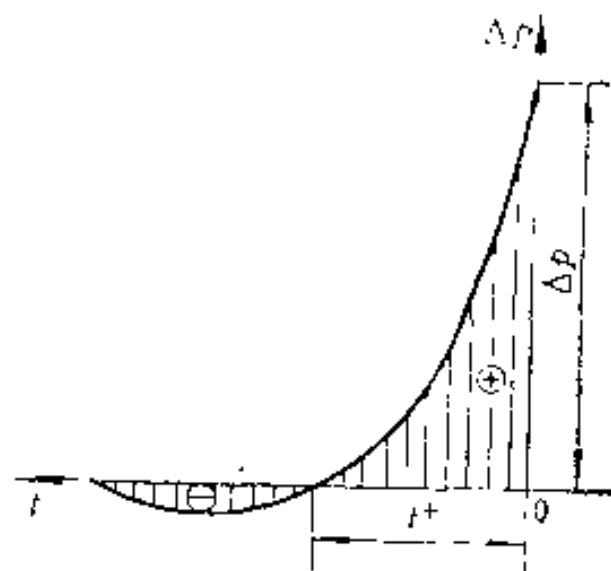


图9-1-4 空气冲击波波形

后面跟随着一系列的膨胀波，使冲击波突跃上升的压力不断衰减，以致超压 Δp 降低到零后又出现了低于周围气体的压力；当压力的降低与惯性平衡后，周围气体又压缩过于膨胀的气体，使之压力回升，这相当于又产生了一系列的压缩波，使过于膨胀的气体压力回升到与周围大气压力平衡。从图9-1-4看出，冲击波波形分两部分，紧跟在冲击波后面超压 Δp 大于零的前半部分，称为正压区；超压 Δp 小于零的后半部分，称为负压区。

空气冲击波通过时，正压区对空气介质的作用要比负压区大，所以从对目标破坏的角度来说，负压区可以不考虑。通常空气冲击波对目标的破坏作用以三个特征量来衡量：

1. 峰值超压 Δp : 冲击波波阵面到达时, 空气被压缩突然升高的压力减去冲击波未到达时空气的压力;

2. 正压区作用时间 t^+ : 从冲击波到达时开始, 至超压降低到零为止, 正压区所经历的时间;

3. 比冲量 i : 冲击波波形在正压区作用时间内压力与时间的乘积, 即正压区波形所包围的面积。

图9-1-5表示某点处单位正方体气体变化的情况。冲击波

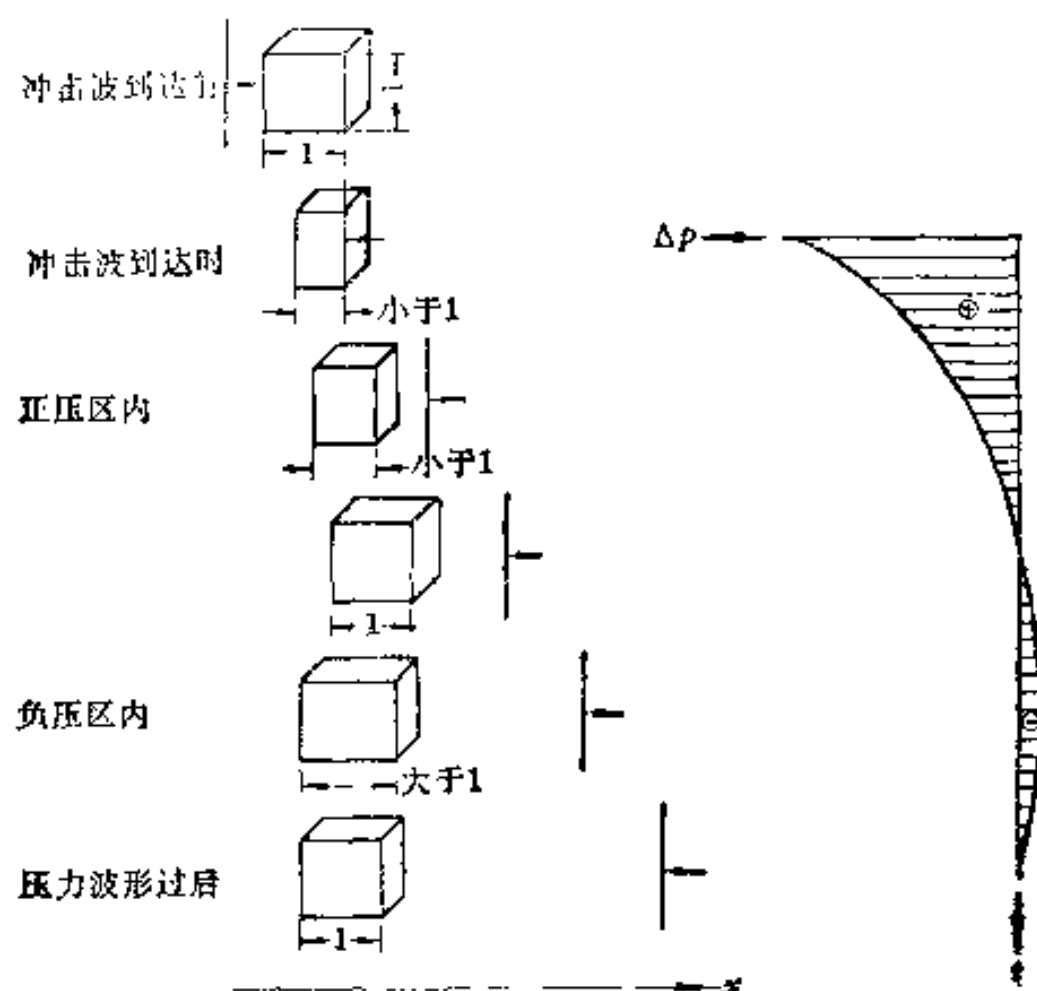


图9-1-5 冲击波通过某点时单位正方体空气的变化

到达该点之前, 边长为 1 的正方体空气是静止的, 压强为 p_0 , 密度为 ρ_0 ; 当冲击波到达该点时, 压力和密度都急剧增加, 在冲击波传播方向上, 正方体空气被压扁, 并且具有一个跟随冲击波传播方向的运动速度; 随着正压区的传播, 压力、

密度和气流速度逐渐降低，但是仍然都大于未压缩前的初始状态；在正压区末端，气体的压力和密度降低到 p_0 、 ρ_0 ，压扁的正方体空气恢复成正方体形状，气体也停止运动；在负压区内，气体呈稀疏状态，气体压力和密度皆小于 p_0 、 ρ_0 ，在冲击波传播方向上，正方体空气被扩强成长方体，气体具有一个与冲击波传播方向相反的运动速度；负压区过后，正方体空气仍恢复到原来的静止状态。

图9-1-6表示空气冲击波在传播过程中，波形变化的情况

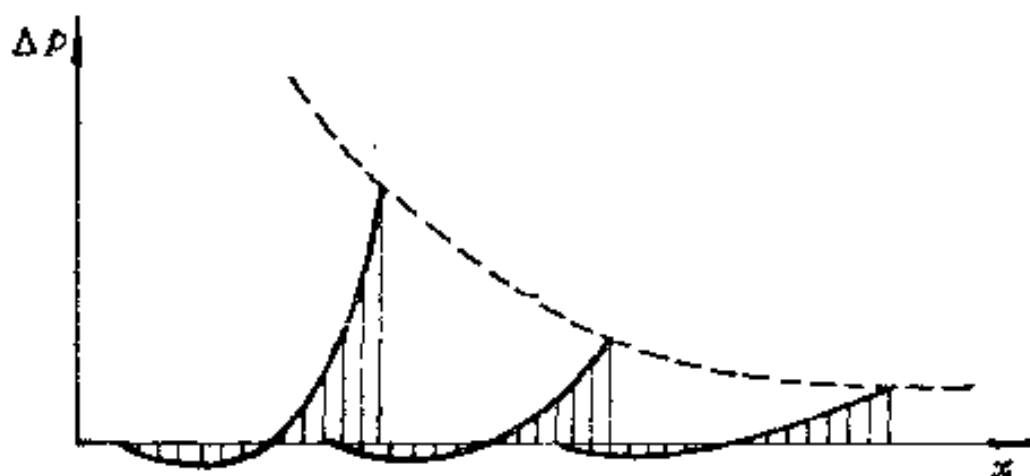


图9-1-6 空气冲击波随距离的衰减

况。首先冲击波峰值压力和波阵面速度迅速下降，其原因主要在于空气冲击波与一维平面冲击波不同，它是以球形向四面八方传播，随着球半径 R 的增加，球表面以 $4\pi R^2$ 的速率增加，因而即使在没有其它能量损耗的条件下，通过冲击波波阵面单位面积上的能量也不断减少；另一方面由于冲击波的传播过程是不等熵过程，空气受冲击压缩后要将部分机械能转变成热能而消耗掉，使维持冲击波运动的能量减少，由于上述两种原因，空气冲击波在传播过程中，必然要迅速衰减。其次，空气冲击波在传播过程中，正压区作用时间不断加长，其原因主要在于正压区前端是冲击波波阵面，它以超音速相

对于静止气体传播，而正压区末端面是膨胀波，它以与静止状态相同的当地音速向前传播，这样很容易看出正压区前端的速度大于末端的速度，所以空气冲击波在传播过程中，正压区不断加宽，正压区作用时间不断加长。

§ 9-2 相 似 理 论

从炸药在空气中爆炸的现象看出，一方面炸药爆炸形成的初始冲击波在向外传播的过程中，随着距离的加长不断衰减；另一方面，在冲击波所到点处，随着时间的进展，压力也不断衰减，以至发生振荡。这个过程仅仅用数学的方法进行处理是非常复杂的，通常采用相似理论进行分析，然后根据实验数据确定具体的关系，这样既方便又实用，只要相似关系分析的全面、合理，所确定的关系就能够较好地反映实际规律。本节简单介绍一下相似理论。

何为相似？对具体的问题要进行认真的分析。最简单几何图形的相似是大家所熟知的，凡是对应角相等而对应边成比例的几何图形，都是几何相似图形。物理现象的相似，仅仅几何形状相似就不能满足要求，对于运动学相似来说，除了几何相似之外，在各个对应点上还要求速度指向相同，速度大小成比例；对于动力学相似来说，除了几何相似、运动相似之外，还要求各个对应点上作用力方向相同，作用力大小成比例，其它物理量如密度、温度等也要分别成比例。但是，对于复杂的物理现象来说，如何综合评价现象的相似呢？这要从量纲分析说起。

一、量纲一致原理

量纲是度量物理量的标准，即通常所说的单位。

单位有基本单位和导出单位之分,基本单位是独立的量,导出单位是不独立的量,当基本单位选定后,导出单位也就确定了。如取长度的单位是基本单位,则面积的单位就不是独立的,可以从长度单位中导出来,故面积称为导出单位;如取长度和时间的单位为基本单位,则速度的单位也不是独立的,可以从长度和时间的单位中导出来,故速度也是导出单位。原则上说,基本单位的选取是任意的,若将面积和速度选为基本单位后,长度和时间也可以看作为导出单位。但是通常来说,一般取公认的单位作为基本单位比较方便,在力学问题中一般选取长度、质量和时间三个量为基本单位,在包括热效应的现象中,再加上温度为基本单位。

长度的单位为 m , 质量的单位为 kg , 时间的单位为 s , 而面积的单位为 m^2 , 体积的单位为 m^3 , 速度的单位为 m/s , 加速度的单位为 m/s^2 。对于其它物理量的量纲也可以导出,如

$$\text{力的单位} \quad N = kg \cdot m/s^2 = m \cdot kg \cdot s^{-2}$$

$$\text{压强的单位} \quad Pa = N/m^2 = m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$$

对于一些常用物理量的量纲列于表9-2-1。

在同一个方程中,各项必须具有相同的量纲。这种具有相同量纲的性质,称为量纲一致性原理。

例如,冲击波前、后压力与冲击波速度的关系

$$p_i - p_o = \frac{2}{k+1} \rho_o D^2 \left(1 - \frac{c_o^2}{D^2} \right)$$

方程左端的单位为

$$Pa = m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$$

方程右端的单位为

$$kg/m^3 \cdot (m/s)^2 = m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$$

再如,冲击波前、后能量的变化

表9-2-1 某些常用物理量的量纲

物 理 量	量 纲
长度	m
质量	kg
时间	s
面积	m ²
体积	m ³
速度	m·s ⁻¹
加速度	m·s ⁻²
密度	m ⁻³ ·kg
比容	m ³ ·kg ⁻¹
力	m·kg·s ⁻²
压强	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²
动量、冲量	m·kg·s ⁻¹
功、能	m ² ·kg·s ⁻²
功率	m ² ·kg·s ⁻³

$$F_1 - E_0 = -\frac{1}{2} (p_1 + p_0)(v_0 - v_1)$$

方程左端的单位

$$\text{J/kg} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} / \text{kg} = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

方程右端的单位

$$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} = \text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

可见，方程两端各项的量纲都是相同的。通过量纲一致性原理，可以确定物理量之间的关系。如果方程左端的量纲 $\text{m}^{a_1} \text{kg}^{b_1} \text{s}^{c_1}$ ，方程右端的量纲 $\text{m}^{a_2} \text{kg}^{b_2} \text{s}^{c_2}$ ，按照量纲一致性原理

$$\text{m}^{a_1} \text{kg}^{b_1} \text{s}^{c_1} = \text{m}^{a_2} \text{kg}^{b_2} \text{s}^{c_2}$$

必定有

$$a_1 = a_2, \quad b_1 = b_2, \quad c_1 = c_2$$

二、Π 定 理

假若对于一个物理现象, 在其有关的 $n+1$ 个物理量之间存在着函数关系

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (9-2-1)$$

式中 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 是已知的物理量, a 是待定的物理量。

如果取物理量 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 中的前 k 个量为基本单位, 注意基本单位必须是彼此独立, 不能相互导出的单位, 在不含热效应的力学问题中基本单位是三个。设选定的这 k 个基本单位的量纲为

$$[a_1] = A_1, [a_2] = A_2, \dots, [a_k] = A_k$$

则其它 $(n+1)-k$ 个物理量的量纲, 可以用这 k 个量的量纲表示出来

$$\left. \begin{aligned} [a] &= A_1^{m_1} A_2^{m_2} \dots A_k^{m_k} \\ [a_{k+1}] &= A_1^{p_1} A_2^{p_2} \dots A_k^{p_k} \\ &\dots \dots \dots \\ [a_n] &= A_1^{q_1} A_2^{q_2} \dots A_k^{q_k} \end{aligned} \right\} \quad (9-2-2)$$

当所采用的单位不同时, 所得物理量的数值也不相同, 但是反映物理量间的函数关系不应该改变, 即

$$a' = f(a'_1, a'_2, \dots, a'_n) \quad (9-2-3)$$

式中 $a'_1, a'_2, \dots, a'_n$ 是改变单位的已知物理量, a' 是改变单位的待定物理量。

假若前 k 个物理量的单位分别是原来单位的 $c_1, c_2, \dots, c_k$ 倍, 即

$$[a'_1] = c_1 A_1, [a'_2] = c_2 A_2, \dots, [a'_k] = c_k A_k$$

则其它 $(n+1)-k$ 个物理量的单位, 可以写为

$$\left. \begin{aligned}
 [a'] &= (c_1 A_1)^{m_1} (c_2 A_2)^{m_2} \cdots (c_k A_k)^{m_k} \\
 &= (c_1^{m_1} c_2^{m_2} \cdots c_k^{m_k}) [a] \\
 [a'_{k+1}] &= (c_1 A_1)^{p_1} (c_2 A_2)^{p_2} \cdots (c_k A_k)^{p_k} \\
 &= (c_1^{p_1} c_2^{p_2} \cdots c_k^{p_k}) [a_{k+1}] \\
 &\cdots \cdots \cdots \\
 [a_n] &= (c_1 A_1)^{q_1} (c_2 A_2)^{q_2} \cdots (c_k A_k)^{q_k} \\
 &= (c_1^{q_1} c_2^{q_2} \cdots c_k^{q_k}) [a_n]
 \end{aligned} \right\} \quad (9-2-4)$$

将所选定的单位代入 (9-2-3) 式, 得

$$(c_1^{m_1} c_2^{m_2} \cdots c_k^{m_k}) a = f(c_1 A_1, \cdots, c_k A_k, c_1^{p_1} c_2^{p_2} \cdots c_k^{p_k} a_{k+1}, \cdots, c_1^{q_1} c_2^{q_2} \cdots c_k^{q_k} a_n)$$

由于 $c_1, c_2, \cdots, c_k$ 是任意的, 为了简化方程, 可以选取

$$c_1 = \frac{1}{A_1}, \quad c_2 = \frac{1}{A_2}, \quad \cdots, \quad c_k = \frac{1}{A_k}$$

则方程成为

$$\frac{a}{A_1^{m_1} A_2^{m_2} \cdots A_k^{m_k}} = f\left(1, \cdots, 1, \frac{a_{k+1}}{A_1^{p_1} A_2^{p_2} \cdots A_k^{p_k}}, \cdots, \frac{a_n}{A_1^{q_1} A_2^{q_2} \cdots A_k^{q_k}}\right) \quad (9-2-5)$$

从 (9-2-2) 式所表示的各物理量的量纲可以看出, 方程 (9-2-5) 中的各项皆是无量纲量。

若令

$$\begin{aligned}
 \Pi &= \frac{a}{A_1^{m_1} A_2^{m_2} \cdots A_k^{m_k}} \\
 \Pi_1 &= \frac{a_{k+1}}{A_1^{p_1} A_2^{p_2} \cdots A_k^{p_k}} \\
 &\cdots \quad \cdots \quad \cdots \\
 \Pi_{n-k} &= \frac{a_n}{A_1^{q_1} A_2^{q_2} \cdots A_k^{q_k}}
 \end{aligned}$$

则方程 (9-2-5) 可以写作

$$\Pi = \varphi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) \quad (9-2-6)$$

方程 (9-2-6) 表示 $(n+1)-k$ 个无量纲量之间存在着的函数关系, 它与方程 (9-2-1) 具有同等的作用。

从上面的分析, 可以这样明确的叙述 Π 定理: 假若某一个物理现象中, 在 $n+1$ 个物理量间具有函数关系

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_n)$$

当选取 k 个基本单位后, 则此物理量间的函数关系可以化作只连系 $(n+1)-k$ 个无量纲变数之间的函数关系

$$\Pi = \varphi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k})$$

三、相 似 律

在两个物理规律相同的系统中, 如果第一个系统各物理量之间的关系为

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_n)$$

第二个系统各物理量之间的关系为

$$a' = f(a'_1, a'_2, \dots, a'_n)$$

按照 Π 定理, 这两个系统可以分别变换成 $(n+1)-k$ 个无量纲量之间的函数关系

$$\Pi = \varphi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) \quad (9-2-7)$$

和

$$\Pi' = \varphi(\Pi'_1, \Pi'_2, \dots, \Pi'_{n-k}) \quad (9-2-8)$$

如果 $\Pi_1 = \Pi'_1, \Pi_2 = \Pi'_2, \dots, \Pi_{n-k} = \Pi'_{n-k}$, 则必定

$$\Pi = \Pi' \quad (9-2-9)$$

表明这两个系统所描述的物理现象相似。

方程 (9-2-7) 和 (9-2-8) 中的无量纲量, 称为相似参数。方程 (9-2-9) 可以这样描述: 凡是相似的物理现象, 其相似参数必定对应相等。

§ 9-3 爆炸空气冲击波随距离衰减时 参数的计算

一、爆炸相似律

首先分析炸药在空气中爆炸时,影响空气冲击波超压 Δp 的因素。这些因素大约是:

炸药的能最 E_0 ,

空气初始状态的压强和密度 p_0 、 ρ_0 ,

空气冲击波传播的距离 R 和时间 t 。

用数学形式,可以写作

$$\Delta p = f(E_0, p_0, \rho_0, R, t) \quad (9-3-1)$$

按照 Π 定理,选取彼此独立的三个物理量 E_0 、 p_0 、 ρ_0 的单位作为基本单位,则上述物理量之间的函数关系,可以化作 $(n+1) - k = (5+1) - 3 = 3$ 个无量纲量之间的函数关系

$$\Pi = \varphi(\Pi_1, \Pi_2) \quad (9-3-2)$$

按照量纲一致原理,可以分别将无量纲量 Π 、 Π_1 、 Π_2 确定出来。

对于

$$\Pi = \frac{\Delta p}{E_0^{a_1} p_0^{b_1} \rho_0^{c_1}}$$

式中 a_1 、 b_1 、 c_1 为待定系数。

有 $[\Delta p] = [E_0]^{a_1} [p_0]^{b_1} [\rho_0]^{c_1}$

直接得到

$$a_1 = 0, \quad b_1 = 1, \quad c_1 = 0$$

故

$$\Pi = \frac{\Delta p}{\rho_0}$$

对于

$$\Pi_1 = \frac{R}{E_0^{a_2} p_0^{b_2} \rho_0^{c_2}}$$

式中 a_2 、 b_2 、 c_2 为待定系数

$$\text{有} \quad [R] = [E_0]^{a_2} [p_0]^{b_2} [\rho_0]^{c_2}$$

代入量纲

$$\begin{aligned} m &= (m^2 \text{kg s}^{-2})^{a_2} (m^{-1} \text{kg s}^{-2})^{b_2} (\text{kg m}^{-3})^{c_2} \\ &= m^{2a_2 - b_2 - 3c_2} \text{kg}^{a_2 + b_2 + c_2} \text{s}^{-2a_2 - 2b_2} \end{aligned}$$

由量纲一致原理

$$2a_2 - b_2 - 3c_2 = 1$$

$$a_2 + b_2 + c_2 = 0$$

$$-2a_2 - 2b_2 = 0$$

解得

$$a_2 = -\frac{1}{3}, \quad b_2 = -\frac{1}{3}, \quad c_2 = 0$$

故

$$\Pi_1 = \frac{R}{E_0^{-1/3} p_0^{-1/3}}$$

对于

$$\Pi_2 = \frac{t}{E_0^{a_3} p_0^{b_3} \rho_0^{c_3}}$$

式中 a_3 、 b_3 、 c_3 为待定系数

$$\text{有} \quad [t] = [E_0]^{a_3} [p_0]^{b_3} [\rho_0]^{c_3}$$

代入量纲

$$\begin{aligned} s &= (\text{m}^2 \text{kg s}^{-2})^{a_3} (\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-2})^{b_3} (\text{kg m}^{-3})^{c_3} \\ &= \text{m}^{2a_3 - b_3} \text{kg}^{a_3 + b_3 + c_3} \text{s}^{-2a_3 - 2b_3} \end{aligned}$$

由量纲一致原理

$$\begin{cases} 2a_3 - b_3 - 3c_3 = 0 \\ a_3 + b_3 + c_3 = 0 \\ -2a_3 - 2b_3 = 1 \end{cases}$$

解得 $a_3 = -\frac{1}{3}, b_3 = -\frac{5}{6}, c_3 = \frac{1}{2}$

故

$$\Pi_2 = \frac{t}{E_0^{1/3} p_0^{-5/6} \rho_0^{1/2}}$$

因而, 无量纲量的函数关系 (9-3-2) 可以明确表示为

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \varphi \left(\frac{R}{E_0^{1/3} p_0^{-1/3}}, \frac{t}{E_0^{1/3} p_0^{-5/6} \rho_0^{1/2}} \right) \quad (9-3-3)$$

(9-3-3) 式说明, 炸药在空气中爆炸的相似条件为当无量纲量 $\frac{R}{E_0^{1/3} p_0^{-1/3}}, \frac{t}{E_0^{1/3} p_0^{-5/6} \rho_0^{1/2}}$ 对应相等时, 超压与空气的初始压力比 $\frac{\Delta p}{p_0}$ 相等。

分析 (9-3-3) 式, 由于空气的初始状态是一定的, p_0, ρ_0 不变; 又若将 t 理解为正压区作用时间, 对于冲击波峰值超压, t 等于零, 因而函数关系中的第二项可以不考虑。并且注意到, 超压 Δp 是随着炸药能量 E_0 的增加而增加, 随着距离 R 的增加而减少的, 所以 (9-3-3) 式可以写为

$$\Delta p = \psi \left(\frac{\sqrt[3]{E_0}}{R} \right) \quad (9-3-4)$$

为了使用方便, 用炸药的质量 ω 乘以爆热 Q_0 代替炸药的总能量 E_0 , 且以梯恩梯炸药为基准, 采用梯恩梯炸药的爆热

$Q_c = 4184 \times 10^3 \text{ J/kg}$, 所以爆炸相似律公式可以整理为

$$\Delta p = f\left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}\right) \quad (9-3-5)$$

式中 ω 是以梯恩梯为基准的炸药质量。

(9-3-5)式表明: 空气冲击波峰值超压 Δp 是 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}$ 的函数, 既不论 ω 和 R 为何值, 只要 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}$ 相等, 则超压 Δp 相等。

二、用最小二乘法确定超压公式

爆炸相似律关系式 (9-3-5) 只是表明 Δp 是组合参数 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}$ 的函数, 但是具体的函数形式并未确定。关于具体的函数形式, 要通过大量的试验数据, 进行数据处理后才能完成。

一般来说, 可以将 (9-3-5) 式展成为多项式

$$\Delta p = a_0 + a_1 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right) + a_2 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 + a_3 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3 + \dots$$

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 $\dots$ 是待定系数。

由于炸药质量 $\omega = 0$ 时, $\Delta p = 0$, 可以首先确定出 $a_0 = 0$, 并且只取多项式的前三项, 这时冲击波超压公式为

$$\Delta p = a_1 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right) + a_2 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 + a_3 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3 \quad (9-3-6)$$

对于一定量的炸药, 在不同距离 R_1 、 R_2 、 $\dots$ 、 R_n 上, 所测得的超压分别为 Δp_1 、 Δp_2 、 $\dots$ 、 Δp_n , 即

$$\Delta p_i = a_1 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R_i} \right) + a_2 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R_i} \right)^2 + a_3 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R_i} \right)^3$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

如果 a_1 、 a_2 、 a_3 能够满足上式的偏差平方和

$$\phi = \sum_{i=1}^n \left[a_1 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R_i} \right) + a_2 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R_i} \right)^2 + a_3 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R_i} \right)^3 - \Delta p_i \right]^2$$

为极小值，则 a_1 、 a_2 、 a_3 便是方程 (9-3-6) 式的最优系数。

根据取极小值的条件，可以得到所谓正规方程组

$$\left. \begin{aligned} a_1 \sqrt[3]{\omega} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i} \right)^2 + a_2 (\sqrt[3]{\omega})^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i} \right)^3 \\ + a_3 \omega \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i} \right)^4 &= \sum_{i=1}^n \Delta p_i \left(\frac{1}{R_i} \right) \\ a_1 \sqrt[3]{\omega} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i} \right)^3 + a_2 (\sqrt[3]{\omega})^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i} \right)^4 \\ + a_3 \omega \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i} \right)^5 &= \sum_{i=1}^n \Delta p_i \left(\frac{1}{R_i} \right)^2 \\ a_1 \sqrt[3]{\omega} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i} \right)^4 + a_2 (\sqrt[3]{\omega})^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i} \right)^5 \\ + a_3 \omega \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i} \right)^6 &= \sum_{i=1}^n \Delta p_i \left(\frac{1}{R_i} \right)^3 \end{aligned} \right\} \quad (9-3-7)$$

对于正规方程组 (9-3-7)， Δp_i 的单位取作 $\text{Pa} \times 10^5$ ， m 的单位取作 kg ， R_i 的单位取作 m 。可以按照实验数据，以表 9-3-1 的形式，列表进行计算。

由表9-3-1分别计算出

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_i \left(-\frac{1}{R_i} \right) = b_{10}, \quad \sum_{i=1}^n \Delta p_i \left(-\frac{1}{R_i} \right)^2 = b_{20},$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_i \left(-\frac{1}{R_i} \right)^3 = b_{30}$$

$$\sqrt[3]{\omega} \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{R_i} \right)^2 = b_{11}, \quad \sqrt[3]{\omega} \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{R_i} \right)^3 = b_{21},$$

$$\sqrt[3]{\omega} \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{R_i} \right)^4 = b_{31}$$

$$\begin{aligned} \left(\sqrt[3]{\omega} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{R_i} \right)^3 &= b_{12}, \quad \left(\sqrt[3]{\omega} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{R_i} \right)^4 \\ &= b_{22}, \quad \left(\sqrt[3]{\omega} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{R_i} \right)^5 = b_{32} \end{aligned}$$

$$\omega \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{R_i} \right)^4 = b_{13}, \quad \omega \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{R_i} \right)^5 = b_{23},$$

$$\omega \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{R_i} \right)^6 = b_{33}$$

从而得到关于 a_1 、 a_2 、 a_3 的三元一次方程组

$$\left. \begin{aligned} b_{11}a_1 + b_{12}a_2 + b_{13}a_3 &= b_{10} \\ b_{21}a_1 + b_{22}a_2 + b_{23}a_3 &= b_{20} \\ b_{31}a_1 + b_{32}a_2 + b_{33}a_3 &= b_{30} \end{aligned} \right\} \quad (9-3-8)$$

由方程组 (9-3-8) 可以求得待定系数 a_1 、 a_2 、 a_3 ，将所求得的待定系数代入公式 (9-3-6) 式，从而确定出冲击波超压公式的具体形式。

三、冲击波超压计算公式

1. 点爆炸冲击波超压计算公式

根据大量实验数据的处理, 空中爆炸时冲击波峰值超压计算式

$$\Delta p = 0.084 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.27 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 + 0.7 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3 \quad (9-3-9)$$

使用范围 $1 \leq \frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 10 \sim 15$

式中 Δp —— 无限空中爆炸时冲击波峰值超压, 单位MPa。
无限空中爆炸, 表示爆炸不受周围界面的影响, 当爆点距地面高度为 h (m) 时, 应满足

$$\frac{h}{\sqrt[3]{\omega}} \geq 0.35$$

ω —— 梯恩梯炸药质量, 单位kg。若是其它炸药, 需要按照爆热换算成梯恩梯当量, 设实验中所使用炸药的质量为 ω' (kg), 爆热为 Q' (J/kg), 取梯恩梯炸药的爆热为 4184×10^3 J/kg, 则所采用炸药的梯恩梯当量为

$$\omega = \omega' \frac{Q'}{4184 \times 10^3}$$

R —— 距爆点的距离, 单位m。

由于 $\frac{R}{\sqrt[3]{\omega}}$ 相同时, 冲击波峰值超压相同, 故称

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{\omega}}$$

为对比距离, 单位 $\text{m}/\text{kg}^{1/2}$ 。当采用对比距离 R 时, 公式 (9-3-9) 可以写成

$$\Delta p = \frac{0.084}{R} + \frac{0.27}{R^2} + \frac{0.7}{R^3} \quad (9-3-9')$$

如果炸药放置在地面上爆炸, 由于地面的阻挡, 空气冲击波不能再向整个空间传播, 而只能向半无限空间传播, 这样一来爆炸放出的能量随距离的衰减就要慢得多。

若地面是钢板、混凝土、岩石等一类的刚性地面, 可以不考虑地面的变形, 认为空气冲击波能量全部都反射出去, 这时不同距离的空气冲击波超压, 可以近似看作是二倍的药量在无限空气中爆炸时所造成的超压。因而, 位于刚性地面上爆炸时, 冲击波超压公式为

$$\Delta p_r = 0.106 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.43 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 + 1.4 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3 \quad (9-3-10)$$

使用范围 $1 \leq \frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 15$

若地面是沙、粘土等一类的普通地面, 此时在爆炸作用下地面会明显发生变形而消耗能量, 空气冲击波的能量就不可能全部反射出去, 这时不同距离上的冲击波超压可以近似看作1.8倍的药量在无限空气中爆炸时所造成的超压。因而, 位于普通地面上爆炸时, 冲击波超压公式为

$$\Delta p_o = 0.102 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.399 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 + 1.26 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3 \quad (9-3-11)$$

使用范围 $1 \leq \frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 10 \sim 15$

公式 (9-3-9)~(9-3-11) 计算结果列于表9-3-2, 相应的曲线绘于图9-3-1。从图中曲线看出, 随着对比距离的增

表9-3-2 不同对比距离 R 处的超压 Δp

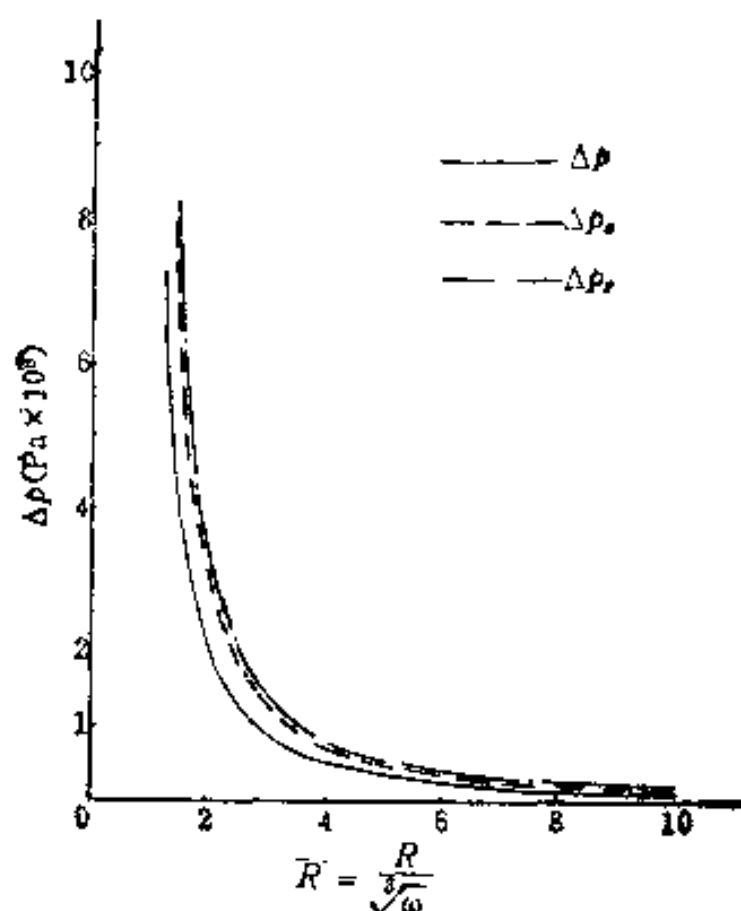
$R(\text{m} \cdot \text{kg}^{1/3})$	$\Delta p(\text{Pa} \times 10^5)$	$\Delta p_r(\text{Pa} \times 10^5)$	$\Delta p_e(\text{Pa} \times 10^5)$
1.0	10.54	19.36	17.61
1.1	8.25	15.04	13.69
1.2	6.63	11.97	10.91
1.3	5.43	9.73	8.88
1.4	4.53	8.05	7.36
1.5	3.83	6.77	6.19
1.6	3.29	5.76	5.27
1.8	2.50	4.31	3.98
2.0	1.97	3.25	3.08
2.5	1.22	2.01	1.85
3.0	0.84	1.35	1.25
3.5	0.623	0.981	0.911
4.0	0.488	0.753	0.701
4.5	0.397	0.602	0.562
5.0	0.332	0.496	0.464
6	0.247	0.361	0.339
7	0.196	0.280	0.264
8	0.161	0.227	0.214
9	0.136	0.190	0.180
10	0.113	0.163	0.155
12	0.093	0.126	0.120
15	0.07	0.094	0.089

加，冲击波超压单调的下降，在小对比距离范围内，超压下降剧烈，在大对比距离范围，超压下降趋于缓慢。

〔例9-2〕 10kg 梯恩梯炸药在10 m高度上爆炸，分别计算距爆点5 m和10 m处冲击波峰值超压。

解 判别

$$\frac{h}{\sqrt[3]{\omega}} = \frac{2}{\sqrt[3]{10}} = 0.93 > 0.35$$

图9-3-1 空气冲击波超压与 $\bar{R}$ 的关系

可以按无限空中爆炸计算冲击波超压。

对于 5 m 处

$$\frac{R}{\sqrt{\omega}} = \frac{5}{\sqrt{10}} = 2.32 \text{ 适用于公式 (9-3-9) 范围}$$

$$\Delta p = \frac{0.084}{2.32} + \frac{0.27}{2.32^2} + \frac{0.7}{2.32^3} = 0.143 (\text{MPa})$$

对于 10 m 处

$$\frac{R}{\sqrt{\omega}} = \frac{10}{\sqrt{10}} = 4.64 \text{ 适用于公式 (9-3-9) 范围}$$

$$\Delta p = \frac{0.084}{4.64} + \frac{0.27}{4.64^2} + \frac{0.7}{4.64^3} = 0.031 (\text{MPa})$$

〔例9-3〕 假若 1000kg 黑索金炸药放置在普通地面上进行爆炸，试计算距爆点 20m、50m 和 100m 处的冲击波

超压。

解

对于普通地面上的爆炸, 采用公式 (9-3-11), 且将黑索金炸药换算成梯恩梯当量, 取黑索金爆热 $Q_v = 5440 \times 10^3 \text{ J/kg}$, 则

$$\omega = 1000 \times \frac{5440 \times 10^3}{4184 \times 10^3} = 1300 (\text{kg})$$

当 $R = 20 \text{ m}$ 时

$$\frac{R}{\sqrt[3]{\omega_{\text{当}}}} = \frac{20}{\sqrt[3]{1300}} = 1.833 \text{ 适用于公式 (9-3-11) 的范围}$$

$$\Delta p_c = \frac{0.102}{1.833} + \frac{0.399}{1.833^2} + \frac{1.26}{1.833^3} = 0.379 (\text{MPa})$$

当 $R = 50 \text{ m}$ 时

$$\frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} = \frac{50}{\sqrt[3]{1300}} = 4.581 \text{ 适用于公式 (9-3-11) 的范围}$$

$$\Delta p_c = \frac{0.102}{4.581} + \frac{0.399}{4.581^2} + \frac{1.26}{4.581^3} = 0.054 (\text{MPa})$$

当 $R = 100 \text{ m}$ 时

$$\frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} = \frac{100}{\sqrt[3]{1300}} = 9.163 \text{ 适用于公式 (9-3-11) 的范围}$$

$$\Delta p_c = \frac{0.102}{9.163} + \frac{0.399}{9.163^2} + \frac{1.26}{9.163^3} = 0.18 (\text{MPa})$$

公式 (9-3-9)~(9-3-11) 仅适用于对比距离 $\bar{R}$ 在 1 至 10~15 之间, 原因在于上述公式是在这个范围内处理的实验数据。在更大的对比距离范围内, 对于无限空中爆炸时可以采用下述公式计算空气冲击波峰值超压

$$\Delta p = 2.006 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.194 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 - 0.004 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3$$

使用范围 $0.05 \leq \frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 0.5$

$$\Delta p = 0.067 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.301 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 + 0.431 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3$$

使用范围 $0.5 \leq \frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 70.9$

(9-3-12)

对于放置在刚性地面和普通地面上的炸药爆炸，可分别将实际药量乘以 2 或 1.8 倍，应用上式进行计算冲击波峰值超压。

2. 坑道中爆炸冲击波计算公式

当炸药在坑道、有掩盖的堑壕中爆炸时，由于空气冲击波只是沿着坑道方向传播，而不是四面八方传播，因而这种情况下的冲击波超压，较比同样距离上无限空中爆炸时冲击波超压要大得多。

设在坑道中爆炸的药量为 ω ，坑道的截面积为 S ，而在空中爆炸时相应的炸药当量为 ω' ，距爆心距离 R 处的球面积为 $4\pi R^2$ ，按照能量相似律，当超压相等时

$$\frac{\omega}{2S} = \frac{\omega'}{4\pi R^2}$$

则

$$\omega' = \frac{2\pi R^2}{S} \omega$$

代入 (9-3-9) 式，得到

$$\Delta p = 0.084 \left(\frac{3}{2\pi R^2} \frac{\omega}{S} \right)^{1/3} + 0.27 \left(\frac{3}{2\pi R^2} \frac{\omega}{S} \right)^{2/3} + 0.7 \left(\frac{3}{2\pi R^2} \frac{\omega}{S} \right)^{3/3}$$

整理成为

$$\Delta p = 0.155 \left(\frac{\omega}{SR} \right)^{1/3} + 0.92 \left(\frac{\omega}{SR} \right)^{2/3} + 4.4 \frac{\omega}{SR} \quad (9-3-13)$$

$$\text{适用范围} \quad 1 \leq \left(\frac{SR}{2\pi\omega} \right)^{1/3} \leq 10 \sim 15$$

使用公式 (9-3-13) 时, 不再区分无限空中爆炸和地面爆炸的情况, 因为不论在那种情况下, 空气冲击波皆是沿坑道截面传播。

〔例9-4〕 设 10kg 梯恩梯炸药在直径为 3 m 的地下坑道中爆炸, 计算距爆点 10 m 和 100 m 处的冲击波超压。

解

对于距爆点 10 m 处

$$\left(\frac{SR}{2\pi\omega} \right)^{1/3} = \left(\frac{\pi \times 1.5^2 \times 10}{2\pi \times 10} \right)^{1/3} = 1.04 \text{ 适用于公式 (9-3-13) 的范围。}$$

$$\begin{aligned} \Delta p &= 0.155 \left(\frac{10}{\pi \times 1.5^2 \times 10} \right)^{1/3} + 0.92 \left(\frac{10}{\pi \times 1.5^2 \times 10} \right)^{2/3} \\ &\quad + 4.4 \times \frac{10}{\pi \times 1.5^2 \times 10} = 0.953 (\text{MPa}) \end{aligned}$$

对于距离爆点 20 m 处

$$\left(\frac{SR}{2\pi\omega} \right)^{1/3} = \left(\frac{\pi \times 1.5^2 \times 100}{2\pi \times 10} \right)^{1/3} = 2.24 \text{ 适用于公式 (9-3-13) 的范围。}$$

$$\begin{aligned}\Delta p = & 0.155 \left(\frac{10}{\pi \times 1.5^2 \times 100} \right)^{1/3} \\ & + 0.92 \left(\frac{10}{\pi \times 1.5^2 \times 100} \right)^{2/3} \\ & + 4.4 \frac{10}{\pi \times 1.5^2 \times 100} = 0.154 (\text{MPa})\end{aligned}$$

从实际计算中看出, 炸药在坑道中爆炸时的冲击波超压, 比在露天爆炸时冲击波超压大得多, 并且随着距离的衰减也慢得多。

3. 线型装药爆炸冲击波超压计算公式

当很长的线型装药爆炸时, 在装药两侧不远的地方, 其到达的冲击波不是球面波, 而近似可以看作是柱面波。这种装药形式可能是由于工程应用上的需要, 或者是炸药存放所造成的一连串爆炸而引起的。

若线型装药长度为 L , 距装药轴线为 R 处的柱形波表面积为 $2\pi RL$, 设线型装药的质量为 ω , 而相应于球爆炸时的炸药当量为 ω' , 按照能量相似率

$$\frac{\omega}{2\pi RL} = \frac{\omega'}{4\pi R^2}$$

则

$$\omega' = \frac{2R}{L} \omega$$

代入 (9-3-9) 式, 得到无限空中爆炸时空气冲击波超压

$$\Delta p = 0.084 \sqrt[3]{\frac{2R}{L} \frac{\omega}{R}} + 0.27 \left(\sqrt[3]{\frac{2R}{L} \frac{\omega}{R}} \right)^2 + 0.7 \left(\sqrt[3]{\frac{2R}{L} \frac{\omega}{R}} \right)^3$$

整理成为

$$\Delta p = 0.106 \left(\frac{\omega}{LR^2} \right)^{1/3} + 0.43 \left(\frac{\omega}{LR^2} \right)^{2/3} + 1.4 \frac{\omega}{LR^2} \quad (9-3-14)$$

对于线型装药放置在刚性地面和普通地面上爆炸时, 其冲击波超压分别为

$$\Delta p_r = 0.134 \left(\frac{\omega}{LR^2} \right)^{1/3} + 0.683 \left(\frac{\omega}{LR^2} \right)^{2/3} + 2.8 \frac{\omega}{LR^2} \quad (9-3-15)$$

$$\Delta p_s = 0.129 \left(\frac{\omega}{LR^2} \right)^{1/3} + 0.634 \left(\frac{\omega}{LR^2} \right)^{2/3} + 2.52 \frac{\omega}{LR^2} \quad (9-3-16)$$

公式 (9-3-14)~(9-3-16) 的使用范围, 需要满足

$$1 \leq \left(\frac{LR^2}{2\omega} \right)^{1/3} \leq 10 \sim 15$$

并且

$$R < L$$

〔例9-5〕 线型梯恩梯装药放置在普通地面上, 长度30 m, 质量1000 kg, 试计算爆炸时两侧10 m、30 m和50 m处冲击波超压。

解 采用线型装药爆炸计算冲击波超压公式 (9-3-16)

对于 $R = 10 \text{ m}$ 处

$$\left(\frac{LR^2}{2\omega} \right)^{1/3} = \left(\frac{30 \times 10^2}{2 \times 1000} \right)^{1/3} = 1.145$$

且 $R = 10 \text{ m} < L = 30 \text{ m}$

适用于公式 (9-3-16) 的范围

$$\begin{aligned} \Delta p_s &= \frac{0.129}{1.145 \times 2^{1/3}} + \frac{0.634}{(1.145 \times 2^{1/3})^2} \\ &\quad + \frac{2.52}{(1.145 \times 2^{1/3})^3} = 1.234 (\text{MPa}) \end{aligned}$$

对于 $R = 30 \text{ m}$ 处

$$\left(\frac{LR^2}{2\omega}\right) = \left(\frac{30 \times 30^2}{2 \times 1000}\right)^{1/3} = 2.381$$

且 $R = 30 \text{ m} = L = 30 \text{ m}$

适用于公式 (9-3-16) 的范围

$$\begin{aligned} \Delta p_c &= \frac{0.129}{2.381 \times 2^{1/3}} + \frac{0.634}{(2.381 \times 2^{1/3})^2} + \frac{2.52}{(2.381 \times 2^{1/3})^3} \\ &= 0.207 (\text{MPa}) \end{aligned}$$

对于 $R = 500 \text{ m}$ 处, 由于 $R > L$, 不能再采用该公式进行计算。

四、正压区作用时间计算

同样对于冲击波正压区作用时间 t^* 也可以运用相似律方法进行处理, 获得

$$\frac{t^*}{\sqrt[3]{\omega}} = f\left(\frac{R}{\sqrt[3]{\omega}}\right) \quad (9-3-17)$$

将此函数关系一般可以写成多项式形式, 也可以写成幂指数形式

$$\frac{t^*}{\sqrt[3]{\omega}} = a \left(\frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} \right)^n$$

幂指数形式与多项式形式具有同样的效果, 后面讲到设防安全距离时也是采用这种处理方法。根据实验数据, 运用最小二乘法进行处理, 可以确定待定系数 a 和待定指数 n , 这种具体处理方法在设防安全距离一节再讲, 这里只给出结果。

对于梯恩梯炸药在无限空中爆炸, 根据大量实验数据处理得

$$\alpha = 1.35 \times 10^{-2}, \quad n = \frac{1}{2}$$

则

$$\frac{t^*}{\sqrt{\omega}} = 1.35 \times 10^{-2} \left(\frac{R}{\sqrt{\omega}} \right)^{1/2}$$

即

$$t^* = 1.35 \times 10^{-2} \sqrt{R \omega} \quad (9-3-18)$$

炸药在刚性地面和普通地面爆炸时, 冲击波正压区作用时间分别为

$$t_r^* = 1.52 \times 10^{-2} \sqrt{R \omega} \quad (9-3-19)$$

$$t_g^* = 1.49 \times 10^{-2} \sqrt{R \omega} \quad (9-3-20)$$

公式 (9-3-18)~(9-3-20) 所采用的单位, 正压区作用时间为 s, 距离为 m, 梯恩梯炸药的质量是 kg。

五、比冲量的计算

比冲量应当由冲击波波阵面后随着时间衰减的超压和正压区作用时间进行确定, 但是由于计算较复杂, 实际上经常采用经验公式

$$i = A \frac{\omega^{2/3}}{R} \quad (9-3-21)$$

对于梯恩梯炸药在无限空中爆炸时, 系数 $A = 26 \sim 25$, 比冲量单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 梯恩梯炸药的质量单位是 kg, 距离的单位是 m。

在不同条件下, 炸药爆炸的比冲量公式, 可以分别写成

$$i = 220 \frac{\alpha^{2/3}}{R} \quad (9-3-22)$$

$$i_r = 350 \frac{\omega^{2/3}}{R} \quad (9-3-23)$$

$$i_c = 326 \frac{\omega^{2/3}}{R} \quad (9-3-24)$$

〔例9-6〕 10kg 梯恩梯炸药在普通地面上爆炸, 计算距爆点 5 m 处空气冲击波的正压区作用时间和冲量。

解 按照公式 (9-3-20) 计算正压区作用时间

$$\begin{aligned} t_c^+ &= 1.49 \times 10^{-3} \sqrt{R^6 \omega} = 1.49 \times 10^{-3} \sqrt{5^6 \times 10} \\ &= 0.00489(\text{s}) \end{aligned}$$

按照公式 (9-3-24) 计算冲击波作用比冲量

$$i_c = 326 \frac{\omega^{2/3}}{R} = 326 \frac{10^{2/3}}{5} = 303 (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$$

六、冲击波波阵面上参数的计算

当计算出空气冲击波峰值超压之后, 可以按照在第五章所导出的冲击波公式计算对应点处冲击波传播的速度, 以及波阵面处空气的速度、密度、温度和音速值

$$D = 340 \sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \Delta p} \quad (9-3-25)$$

$$u_1 = \frac{2.4 \times 10^{-3} \Delta p}{\sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \Delta p}} \quad (9-3-26)$$

$$\rho_1 = 1.225 \frac{7.08 \times 10^5 + 6 \Delta p}{7.08 \times 10^5 + \Delta p} \quad (9-3-27)$$

$$T_1 = 288 \frac{(1 + 10^{-5} \Delta p)(7.08 \times 10^5 + \Delta p)}{7.08 \times 10^5 + 6 \Delta p} \quad (9-3-28)$$

$$c_1 = 20.05 \sqrt{T_1} \quad (9-3-29)$$

〔例9-7〕 假若 5000kg 梯恩梯 50/黑索金50炸药在刚性

地面上发生爆炸, 试计算100m远处的冲击波超压、正压区作用时间、冲量以及波阵面上的其它参数。

解 梯恩梯50/黑索金50炸药的爆热取作为 $4812 \times 10^3 \text{ J/kg}$, 5000kg 梯恩梯 50/黑索金 50 炸药的梯恩梯当量为

$$\omega = 5000 \times \frac{4812 \times 10^3}{4184 \times 10^3} = 5750 (\text{kg})$$

对比距离

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} = \frac{100}{\sqrt[3]{5750}} = 5.58$$

按照公式 (9-3-10) 计算冲击波超压

$$\Delta p_r = \frac{0.106}{5.58} + \frac{0.43}{5.58^2} + \frac{1.4}{5.58^3} = 0.041 (\text{MPa})$$

按照公式 (9-3-19) 计算正压区作用时间

$$t_r^* = 1.54 \times 10^{-3} \sqrt[3]{\bar{R}^6 \omega} = 1.54 \times 10^{-3} \sqrt[3]{100^6 / 5750} \\ = 0.065 (\text{s})$$

按照公式 (9-3-23) 计算冲击波比冲量

$$i_r = 350 \frac{\omega^{2/3}}{R} = 350 \times \frac{5750^{2/3}}{100} = 1123 (\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2)$$

按照公式 (9-3-25)~(9-3-29) 计算冲击波波阵面参数

$$D = 340 \sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \Delta p_r} \\ = 340 \sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \times 0.41 \times 10^6} \\ = 395 (\text{m/s})$$

$$\rho_1 = 1.225 \frac{7.08 \times 10^5 + 6 \Delta p_r}{7.08 \times 10^5 + \Delta p_r} \\ = 1.225 \frac{7.08 \times 10^5 + 6 \times 0.41 \times 10^6}{7.08 \times 10^5 + 0.41 \times 10^6} \\ = 1.560 (\text{kg/m}^3)$$

$$\begin{aligned}
u_1 &= \frac{2.4 \times 10^{-8} \Delta p}{\sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \Delta p}} \\
&= \frac{2.4 \times 10^{-8} \times 0.41 \times 10^5}{\sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \times 0.41 \times 10^5}} \\
&= 85 \text{ (m/s)} \\
T_1 &= 288 \frac{(1 + 10^{-5} \Delta p)(7.08 \times 10^5 + \Delta p)}{7.08 \times 10^5 + 6 \Delta p} \\
&= 288 \times \frac{(1 + 0.41)(7.08 \times 10^5 + 0.41 \times 10^5)}{7.08 \times 10^5 + 6 \times 0.41 \times 10^5} \\
&= 318 \text{ (K)} \\
c_1 &= 20.05 \sqrt{T_1} = 358 \text{ (m/s)}
\end{aligned}$$

§ 9-4 空气冲击波的测定

炸药爆炸时,空气冲击波的测定非常重要,它不仅直接提供了炸药爆炸的冲击波参数,而且按照相似律所确定的空气冲击波计算公式,也是根据实验数据通过数学处理得到的。

空气冲击波的测定大致可以分为机测和电测两大类。机测的优点是设备简单、使用方便,但是一般只能测定超压,且精度较低;电测的优点是精度高、灵敏性好,可以测定空气冲击波的波形,但是设备较为复杂。

本节主要介绍自记仪、应变测压和压电测压三种方法。

一、自 记 仪

实验装置如图9-4-1所示,它是由阻尼孔、金属波纹膜片和转动的记录片等几部分组成。测定空气冲击波时,把自记仪放置在欲测定的地点,冲击波通过阻尼孔进入自记仪作用

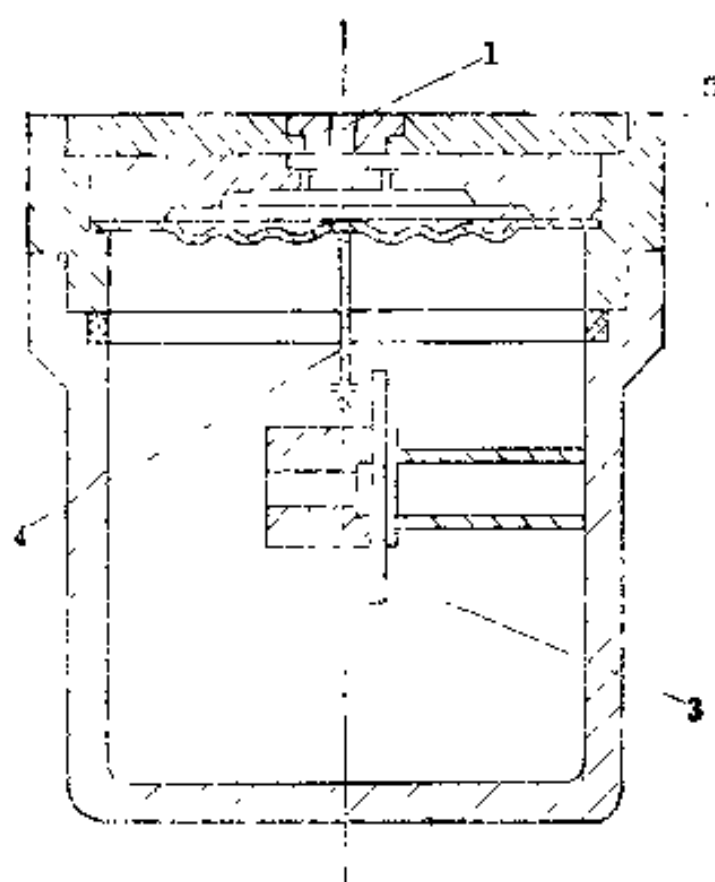


图9-4-1 自记仪

1—阻尼孔；2—波纹膜片；3—记录片；4—划针。

在波纹膜片上，致使膜片发生变形，此变形由连接在膜片上的划针将变形在由齿轮带动的旋转着的记录片记录下来。

自记仪记录下来的曲线是膜片变形高度随着时间的曲线，通过标定后可以得到冲击波超压随时间的变化关系。自记仪的标定，一般是采用静态标定的方法，即通过油压泵一类装置找出膜片变形高度和压力的关系，绘出膜片变形高度—压力关系曲线，按照此曲线可以将自记仪记录的曲线转化成冲击波超压随时间变化的曲线。

自记仪全部是机械结构，频率响应低，对上升时间快、作用时间短的尖脉冲信号，反应迟钝，记录压力偏低。自记仪适用于作用时间较长的脉冲压力信号，对于测定核爆炸空气冲击波很合适，对于测定大药量炸药爆炸在距离较远的压力点也是合适的。

二、电阻应变测压

电阻应变测压是一种调幅式的非电量电测法，量测系统见图9-4-2。

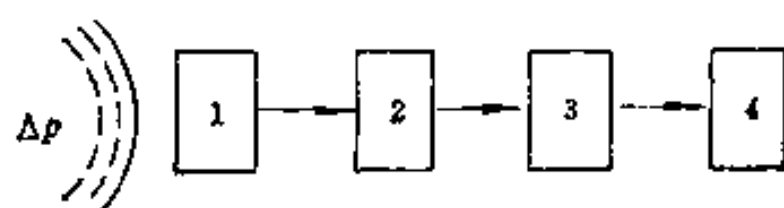


图9-4-2 电阻应变测压方块图

1—应变空气传感器；2—电桥；3—动态电阻应变仪；4—振子示波器。

炸药爆炸后，空气冲击波作用在应变空气传感器上，致使传感器中的敏感元件——电阻应变片发生变形，使电阻发生变化，通过电阻应变片的电阻与应变关系，将非电量讯号转变成电的讯号，然后将微弱的电讯号通过足够的电压、功率放大，通过相敏检波器鉴别讯号相位，经过低频滤波器滤掉其载波频率，使力学讯号还原，最后振动磁电式振动物子产生足够的偏转，并使电讯号化为光讯号，在振子示波器记录纸上描绘出来。

振子示波器记录的讯号也需要进行标定，标定分静态标定和动态标定两种。静态标定仍是采用油压泵一类的装置，通过试验得出传感器应变和压力的关系；动态标定是在激波管内进行，测得激波管所产生的冲击波压力与传感器应变的关系，作为标定实验曲线的依据。

电阻应变仪系统测定空气冲击波，具有灵敏度高，易于进行多点和远距离测量，但是由于该系统工作频率不高，因而对空气冲击波波头的测量可能会产生较大的影响，导致峰

值超压降低，峰值超压上升时间变长，即在波头处会产生频率和幅度的失真。总地说来，采用电阻应变系统测定空气冲击波是可行的，也是目前测定空气冲击波的一个重要方法。

三、压电测压

压电测压是一种电测法，其量测系统见图9-4-3。

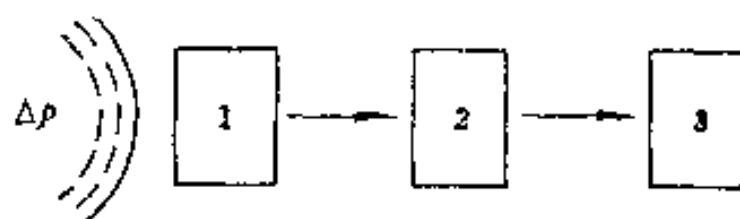


图9-4-3 压电测压方块图

1—压电晶体传感器；2—测压前置级；3—示波器。

炸药爆炸后，空气冲击波作用在压电晶体传感器上，致使石英、钛酸钡和锆钛酸铅一类的晶体在冲击波压力作用下产生电荷，电荷的量与压力成正比，再通过对外电路充电而转换成为电压讯号，此电压讯号通过示波器显示出来。

为了将压电晶体传感器产生的电讯号无泄漏地传给示波器，要求高阻抗输入，但是示波器的输入阻抗又需要与高频电缆特性阻抗（一般50~100欧姆）相匹配，因此在示波器前配置了阻抗转换装置——测压前置级，它具有高阻抗输入和低阻抗输出的特点。

示波器显示的讯号也需要进行标定，标定仍然分静态标定和动态标定两种，以已知的压力和传感器晶体电荷的关系，作为标定实测曲线的依据。

压电晶体系统测定空气冲击波，具有频率响应高、灵敏度高的优点，当冲击波作用到压电晶体上时，由于压电效应是无惯性过程，压电晶体能够瞬时产生电荷，因而对空气冲

击波从上升阶段、峰值超压和冲击波全过程的波形都能清楚的测定出来，是当前测定空气冲击波比较先进的一种方法。但是，由于压电晶体传感器比较敏感，易受外界干扰，使用过程应当十分注意。

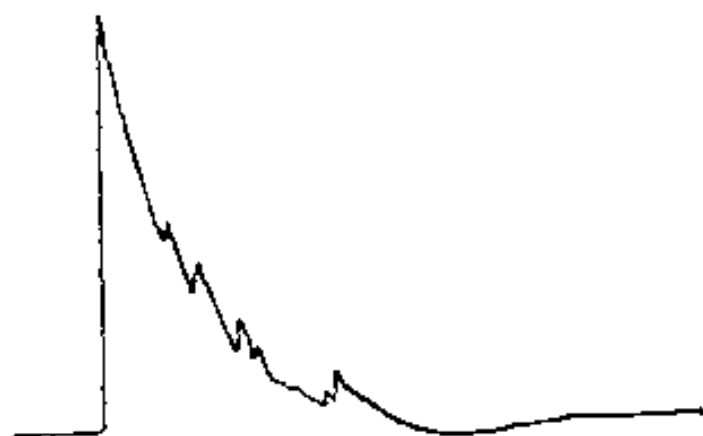


图 9-4-4 是实测空气冲击波波形，波形头部尖锐，后部平缓，且有跳动。所以一般来说，冲击波峰值超压能够较好地测量出来，而高压区作用时间只能近似地进行测量。

图9-4-4 实测空气冲击波波形

§ 9-5 空气冲击波在目标上的反射

一、冲击波反射的现象

在第五章波的相互作用一节中，介绍了波在刚性壁面上的反射，但是实际情况远非这么简单，假若炸药在距地面高度为 H 的位置发生爆炸，爆炸所形成的空气冲击波以球形向四面八方传播，空气冲击波到达地面时，在地面上发生反射，其反射图形如图9-5-1所示。

当冲击波垂直到达地面 A 点时，此时由于入射冲击波波阵面在 A 点处与地面平行，从而发生正碰撞， A 点处反射冲击波也平行于地面；当冲击波以一定的角度 φ 斜着到达地面（如 B 、 C 、 F 点）时，入射冲击波波阵面与地面的夹角也是 φ ，从而发生斜碰撞，反射冲击波波阵面也与地面存在夹角。

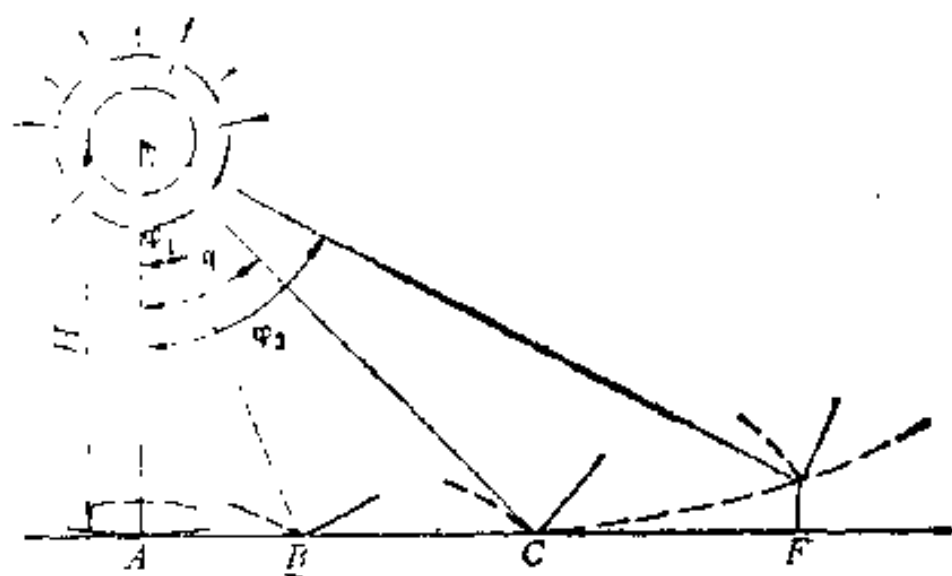


图9-5-1 空气冲击波在不同位置上的反射

——入射波波阵面；-----反射波波阵面。

冲击波正反射时，必须满足反射冲击波后气流速度等于零（地面不动）的条件；而冲击波斜反射时，由于入射冲击波平行于地面方向具有速度分量，因而不能再满足这种条件。

斜入射冲击波沿着地面推进，相当于波前气流平行于地面以大小等于

$$q_0 = \frac{D}{\sin \varphi}$$

的速度向静止的冲击波运动，如图9-5-2所示，气流通过入射冲击波后，运动方向必然向地面折转，设折转角为 θ_1 ，折转后气流速度为 q_1 ，气流 q_1 通过反射冲击波后必须再度发生反向折转 θ_2 ，气流速度为 q_2 。当冲击波入射角 φ 较小时，气流运动方向折转不大，容易满足

$$\theta_1 = \theta_2$$

使得反射冲击波后气流 q_2 的运动方向平行于地面，这种斜反射称为正规斜反射。

当冲击波入射角较大时，通过入射冲击波后气流折转角

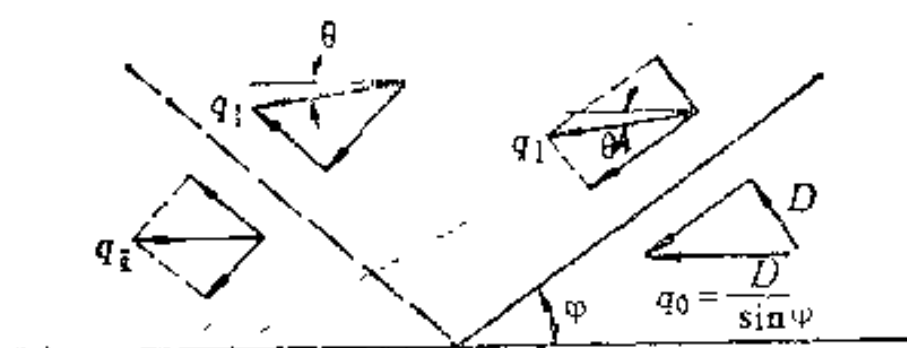


图9-5-2 正规斜反射

θ_1 过大，折转后的气流通 过反射冲击波后其反向折转角

$$\theta_2 < \theta_1$$

这样一来，反射波后气流不是平行于地面，而是以与地面成一定的角度冲向地面，因而在反射点附近造成了气流的拥挤，迫使反射波上移，使得在距地面一定距离处与入射波相汇，形成三波结构，如图9-5-3所示。除了入射冲击波和反射冲击波外，还存在着一个垂直地面的过度压缩冲击波，过度压缩冲击波后气流状态的变化要比一般冲击波剧烈得多，因而通过两条斜冲击波和通过过度压缩冲击波后的气流速度显然不等，二者之间存在着一道涡旋面，这种斜反射称为非正规反射。

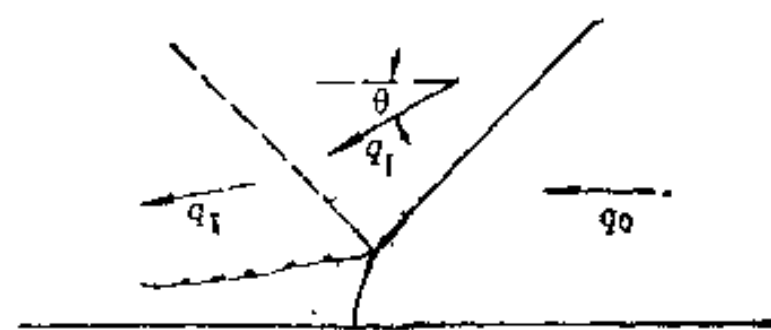


图9-5-3 非正规反射

参看图9-5-1, 当入射角 φ 较小时 (如B点), 产生正规反射, 当入射角 φ 较大时 (如F点), 产生非正规反射, 开始出现非正规反射 (C点) 时所对应的入射角称为极限入射角, 记为 φ_l 。极限入射角 φ_l 与入射冲击波强度有关, 由于入射冲击波强度是参数 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}$ 的函数, 因而也可以将 φ_l 处理成为 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}$ 的函数, 图9-5-4表示了 φ_l 与 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}$ 关系的实验曲线。

在 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}$ 很小时, 相当于入射冲击波强度很弱的情况。当入射波是音波时, 对应 $\varphi_l = 90^\circ$, 随着 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}$ 的增加, φ_l 不断减小, 并且大约趋近于 40° 。

对于一定的 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}$, 确定地面上不同点的冲击波反射时,

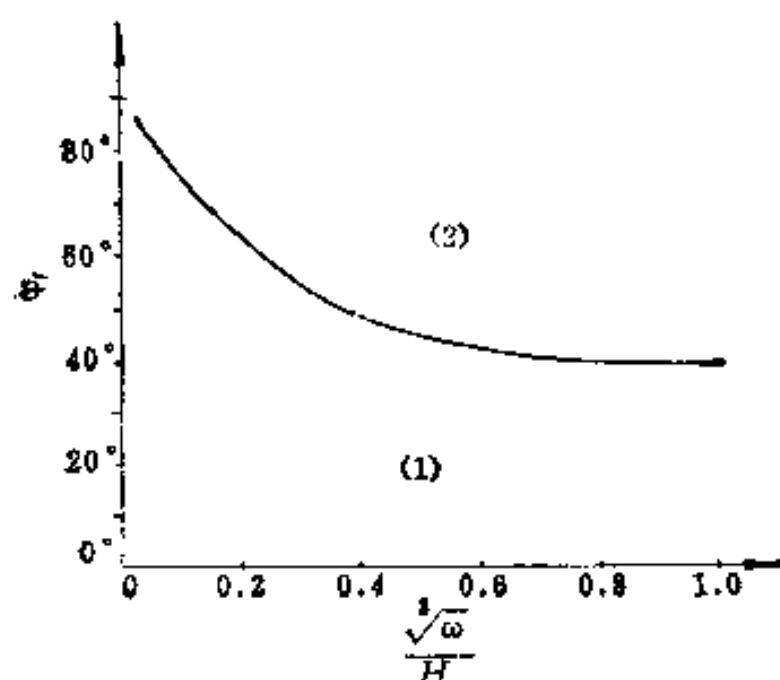


图9-5-4 φ_l 与 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}$ 的关系曲线

(1) — 正规反射区, (2) — 非正规反射区。

可以首先计算出各个点的入射角 φ ，按照 $\frac{\sqrt{\omega}}{II}$ 与 φ 的数值在图9-5-4确定坐标点。若此坐标点在曲线的下方，则发生正规反射；若此坐标点在曲线的上方，则发生非正规反射。

二、冲击波反射时峰值超压的计算

1. 正反射

当空气冲击波传播方向与地面垂直时，冲击波到达地面发生反射，由于空气冲击波波后压力一般为 10^6Pa 以下，波强度不是太高，故可以认为地面不发生变形，而为刚壁反射情况。

如图9-5-5所示，设入射冲击波传播速度为 D_1 ，波前空气状态为 $p_0, \rho_0, u_0 = 0$ ；波后空气状态为 p_1, ρ_1, u_1 ，反射冲击波传播速度为 D_2 ，波后压力、密度为 p_2, ρ_2 ，波后气流速度满足壁面条件 $u_2 = 0$ 。

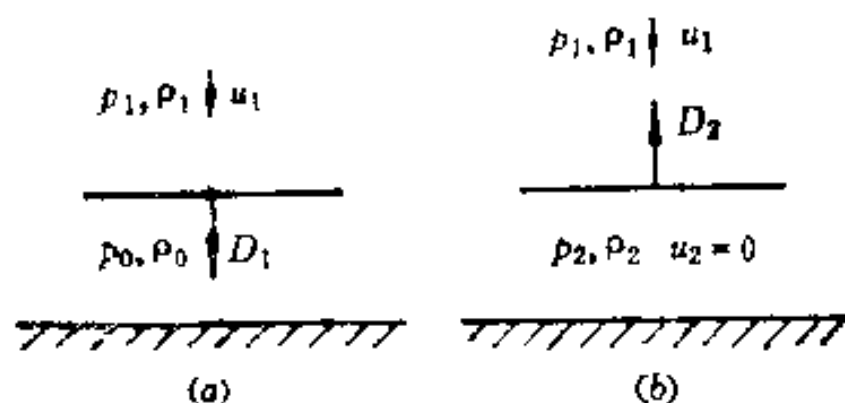


图9-5-5 冲击波在刚壁上的正反射

(a)反射前；(b)反射后。

对于入射冲击波，按照波前气体静止的波速方程，波后气流速度

$$u_1 = \sqrt{(p_1 - p_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_1} \right)} \quad (9-5-1)$$

对于反射冲击波，为了采用波前气体静止的波速方程，可以在反射波的整个流场中，迭加一个向上的速度 u_1 ，如图9-5-6所示，冲击波以速度 $D_2 + u_1$ 向上传播，波前气体处于静止状态，而波后气体以 u_1 的速度跟随冲击波运动。

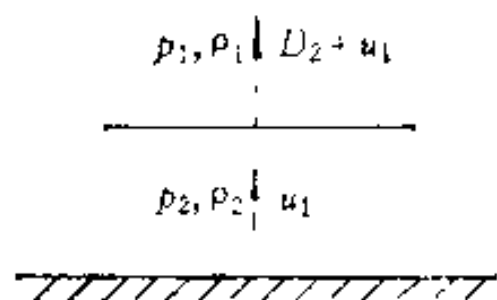


图9-5-6 反射波化为波前气体静止的图形

按照波前气体静止的波速方程，反射波后气流速度

$$u_1 = \sqrt{(p_2 - p_1) \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right)} \quad (9-5-2)$$

由上述二式，可以得到

$$(p_1 - p_0) \left(-\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_1} \right) = (p_2 - p_1) \left(-\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right)$$

代入 $\Delta p_1 = p_1 - p_0$ ， $\Delta p_2 = p_2 - p_0$ ，上式可以化为

$$\frac{\Delta p_1}{\rho_1} \left(-\frac{\rho_1}{\rho_0} - 1 \right) = \frac{\Delta p_2 - \Delta p_1}{\rho_1} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)$$

代入冲击波前、后压力与密度的关系

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{\frac{k+1}{k-1} p_1 + p_0}{p_1 + \frac{k+1}{k-1} p_0}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\frac{k+1}{k-1} p_2 + p_1}{p_2 + \frac{k+1}{k-1} p_1}$$

可以得到

$$\Delta p_1 \left(\frac{k-1}{k+1} \right) \frac{p_1 + (k+1)p_0}{p_1 + (k+1)p_0}$$

$$=(\Delta p_2 - \Delta p_1) \frac{2(p_2 - p_1)}{(k+1)p_2 + (k-1)p_1}$$

或者

$$\frac{(\Delta p_1)^2}{(k-1)\Delta p_1 + 2kp_0} = \frac{\Delta p_2 - \Delta p_1}{(k+1)\Delta p_2 + (k-1)\Delta p_1 + 2kp_0}$$

则反射冲击波峰值超压为

$$\Delta p_2 = 2\Delta p_1 + \frac{(k+1)\Delta p_1^2}{(k-1)\Delta p_1 + 2kp_0} \quad (9-5-3)$$

对于空气, 取 $k=1.4$, 得到

$$\Delta p_2 = 2\Delta p_1 + \frac{6\Delta p_1^2}{\Delta p_1 + 7p_0} \quad (9-5-4)$$

公式(9-5-4)表明, 当知道入射冲击波峰值超压后, 可以计算出正反射冲击波的峰值超压, (9-5-4)式的计算结果如表9-5-1所示。

表9-5-1 正反射时, 反射冲击波超压与入射冲击波超压的关系

$\Delta p_1 (\text{Pa} \times 10^5)$	$\Delta p_2 (\text{Pa} \times 10^5)$	$\Delta p_1 (\text{Pa} \times 10^5)$	$\Delta p_2 (\text{Pa} \times 10^5)$
0.1	0.21	3.0	11.4
0.2	0.43	3.5	14.0
0.3	0.67	4.0	16.7
0.4	0.93	4.5	19.6
0.5	1.20	5.0	22.5
0.6	1.49	6	28.6
0.7	1.78	7	35.0
0.8	2.10	8	41.6
0.9	2.42	9	48.4
1.0	2.75	10	55.3
1.5	4.59	15	91.4
2.0	6.67	20	128.9
2.5	8.95	30	206.0

对于弱冲击波, 即 $\Delta p_1 \ll p_0$ 时

$$\Delta p_2 \approx 2\Delta p_1$$

对于强冲击波, 即 $\Delta p_1 \gg p_0$ 时

$$\Delta p_2 \approx 8\Delta p_1$$

当已知炸药药量和爆炸高度时, 反射冲击波峰值超压的计算步骤, 可以分为两步:

第一步 首先按公式 (9-3-9) 计算入射冲击波超压 Δp_1 ;

第二步 再按公式 (9-5-4) 计算反射冲击波峰值超压 Δp_2 。

2. 正规反射

理论计算表明正规反射时, 反射冲击波峰值超压与正反射冲击波峰值超压相差不大, 只是在入射角由 0 增加到极限值 φ_l 过程中, 开始稍有减小, 而在到达 φ_l 附近时又上升到正反射冲击波的峰值超压, 因而在正规反射范围内计算反射冲击波峰值超压, 可以仍然采用公式 (9-5-4)。具体计算步骤为:

第一步 首先计算入射角 φ 和 $\frac{\sqrt[3]{\cos \varphi}}{H}$, 按照图 9-5-4 判别

是否正规反射, 假若确定是正规反射, 可以按照此法计算;

第二步 以空中爆炸点至地面计算点的斜线距离为准, 按公式 (9-3-9) 计算入射冲击波峰值超压 Δp_1 ;

第三步 按照公式 (9-5-4) 计算反射冲击波峰值超压 Δp_2 。

3. 非正规反射

非正规反射计算比较复杂, 实用时经常采用经验公式

$$\Delta p_N = \Delta p_r (1 + \cos \varphi) \quad (9-5-5)$$

式中 Δp_r 是以空中爆炸点至地面计算点的斜线距离为准, 将炸药放置在刚性地面上所确定的冲击波峰值超压。

具体计算步骤为:

第一步 首先计算入射角 φ 和 $\frac{Q}{H}$, 按照图 9-5-1 判别

是否非正规反射, 假若确定是非正规反射, 可以按此法计算;

第二步 以空中爆炸点至地面计算点的斜线距离为准, 按公式 (9-3-10) 计算入射冲击波峰值超压 Δp_r ;

第三步 按照公式 (9-5-5) 计算反射冲击波峰值超压 Δp_N 。

〔例9-8〕 假若100kg梯恩梯炸药在10m高度处爆炸, 分别计算正下方地面以及距正下方点5m、20m处的反射波后超压。

解 将题中数据作成图9-5-7, 高度和距离分别为

$$OA=10\text{ m}, AB=5\text{ m}, AC=20\text{ m}$$

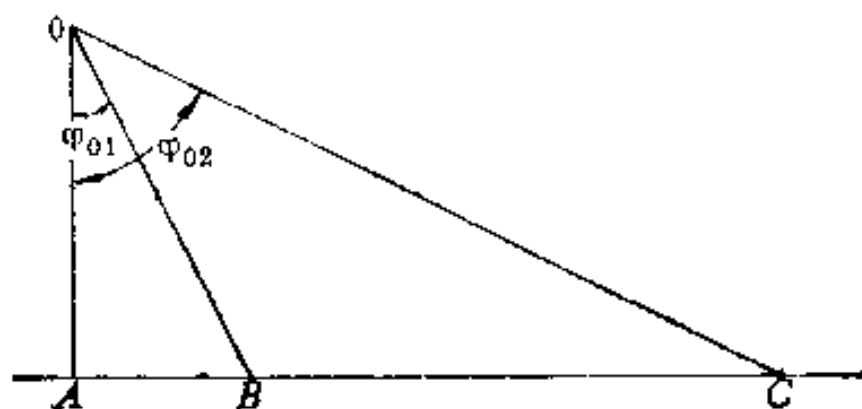


图9-5-7 空爆位置示意图

计算A点反射波后超压

第一步 按照 (9-3-9) 式计算 Δp_1

$$\Delta p = 0.084 \times \frac{\sqrt[3]{100}}{10} + 0.27 \times \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{10} \right)^2 \\ + 0.7 \times \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{10} \right)^3 = 0.168 (\text{MPa})$$

第二步 按照 (9-5-4) 式计算 Δp_2

$$\Delta p_2 = 2\Delta p_1 + \frac{6\Delta p_1}{\Delta p_1 + 7p_0} = 2 \times 1.68 \times 10^5 \\ + \frac{6 \times 1.68 \times 10^5}{1.68 \times 10^5 + 7 \times 10^5} = 5.57 \times 10^5 (\text{Pa})$$

计算 B 点反射波后超压

第一步 判别属于何种斜反射

$$\text{tg} \varphi_{01} = \frac{AB}{OA} = \frac{5}{10} = 0.5 \\ \varphi_{01} = 26.5^\circ$$

$$\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H} = \frac{\sqrt[3]{100}}{10} = 0.464$$

按此二数据查图 9-5-4, 表明此点在曲线下方, 确定为正规反射。

第二步 按照 (9-3-9) 式计算 Δp_1

$$R = OB = \sqrt{10^2 + 5^2} = 11.2 (\text{m}) \\ \Delta p_1 = 0.084 \times \frac{\sqrt[3]{100}}{11.2} + 0.27 \times \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{11.2} \right)^2 \\ + 0.7 \times \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{11.2} \right)^3 = 0.131 (\text{MPa})$$

第三步 按照 (9-5-4) 计算 Δp_2

$$\begin{aligned}\Delta p_2 &= 2\Delta p_1 + \frac{6\Delta p_1}{\Delta p_1 + 7p_0} = 2 \times 1.31 \times 10^5 \\ &+ \frac{6 \times 1.31 \times 10^5}{1.31 \times 10^5 + 7 \times 10^5} = 3.86 \times 10^5 (\text{Pa})\end{aligned}$$

计算C点反射波后超压

第一步 判别何种斜反射

$$\text{tg} \varphi_{c2} = \frac{AC}{OA} = \frac{20}{10} = 2$$

$$\varphi_{c2} = 77^\circ$$

$$\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H} = \frac{\sqrt[3]{100}}{10} = 0.464$$

按此二数据查图9-5-4, 表明此点在曲线上方, 确定为非正规反射。

第二步 按照 (9-3-10) 式计算 Δp_r

$$R = OC = \sqrt{10^2 + 20^2} = 22.4 (\text{m})$$

$$\begin{aligned}\Delta p_r &= 0.106 \times \frac{\sqrt[3]{100}}{22.4} + 0.43 \times \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{22.4} \right)^2 \\ &+ 1.4 \times \left(\frac{\sqrt[3]{100}}{22.4} \right)^3 = 0.053 (\text{MPa})\end{aligned}$$

第三步 按照 (9-5-5) 式计算 Δp_N

$$\begin{aligned}\Delta p_N &= \Delta p_r (1 + \cos \varphi_{c2}) \\ &= 0.53 \times 10^5 (1 + \cos 77^\circ) \\ &= 0.65 \times 10^5 (\text{Pa})\end{aligned}$$

三、冲击波反射后冲量的计算

当 $0^\circ < \varphi_0 \leq 45^\circ$ 时

$$i = i_r (1 + \cos \varphi_0) \quad (9-5-6)$$

当 $45^\circ < \varphi_0 \leq 90^\circ$ 时

$$i = i_r (1 + \cos^2 \varphi_0) \quad (9-5-7)$$

式中 i_r 是按照 (9-3-23) 式计算出的刚性地面爆炸冲击波冲量, R 取从爆点至该点的斜线距离。

〔例9-9〕 仍以例1为例, 计算 A 、 B 、 C 点反射波后的冲量。

解 A 点: $\varphi_0 = 0^\circ$

$$i_r = 350 \frac{\omega^{2/3}}{R} = 350 \times \frac{100^{2/3}}{10} = 754 (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$$

$$i_A = i_r (1 + \cos^2 \varphi_0) = 754 (1 + \cos^2 0^\circ) = 1508 (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$$

B 点: $\varphi_0 = 26.5^\circ$

$$i_r = 350 \frac{\omega^{2/3}}{R} = 350 \times \frac{100^{2/3}}{11.2} = 673 (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$$

$$i_B = i_r (1 + \cos^2 \varphi_0) = 673 (1 + \cos^2 26.5^\circ) = 1275 (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$$

C 点: $\varphi_0 = 77^\circ$

$$i_r = 350 \frac{\omega^{2/3}}{R} = 350 \times \frac{100^{2/3}}{22.4} = 337 (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$$

$$i_C = i_r (1 + \cos^2 \varphi_0) = 337 (1 + \cos^2 77^\circ) = 351 (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$$

§ 9-6 大药量爆炸时冲击波的环境作用

一、空气冲击波的环境现象

当小药量爆炸时, 由于空气冲击波作用的范围小, 在建筑物上不会形成明显的环流现象。而当大药量炸药爆炸时, 由于空气冲击波作用的范围广, 这时冲击波除了在建筑物正面发生反射外, 在建筑物顶部和两侧还会发生环流现象。

图 9-6-1 表示空气冲击波由建筑物顶部所产生的环流现象。

当空气冲击波作用到建筑物上时，冲击波在建筑物上发生反射，反射冲击波 D_2 后压力增高，而在建筑物顶部以上，由于冲击波不受阻挡，不会发生反射，这时顶部空气压力低于墙前面的空气压力，因而从建筑物顶部向墙前面传入一系列膨胀波，使得墙前面的空气压力急剧下降，另一方面由于空气的反向运动而形成了由下而上绕建筑物运动的环流。随着环流的发展，环流绕过建筑物顶部向后面运动，使得建筑物背面也受有超压的作用。

图 9-6-2 表示空气冲击波由建筑物两侧所发生的环流现象。

对于高而不宽的建筑物，如烟囱、水塔等，

经常会发生这种现象，环流从建筑物两侧同时发生，向建筑物背后发展，这时作用在建筑物上的净压力是前、后面压力

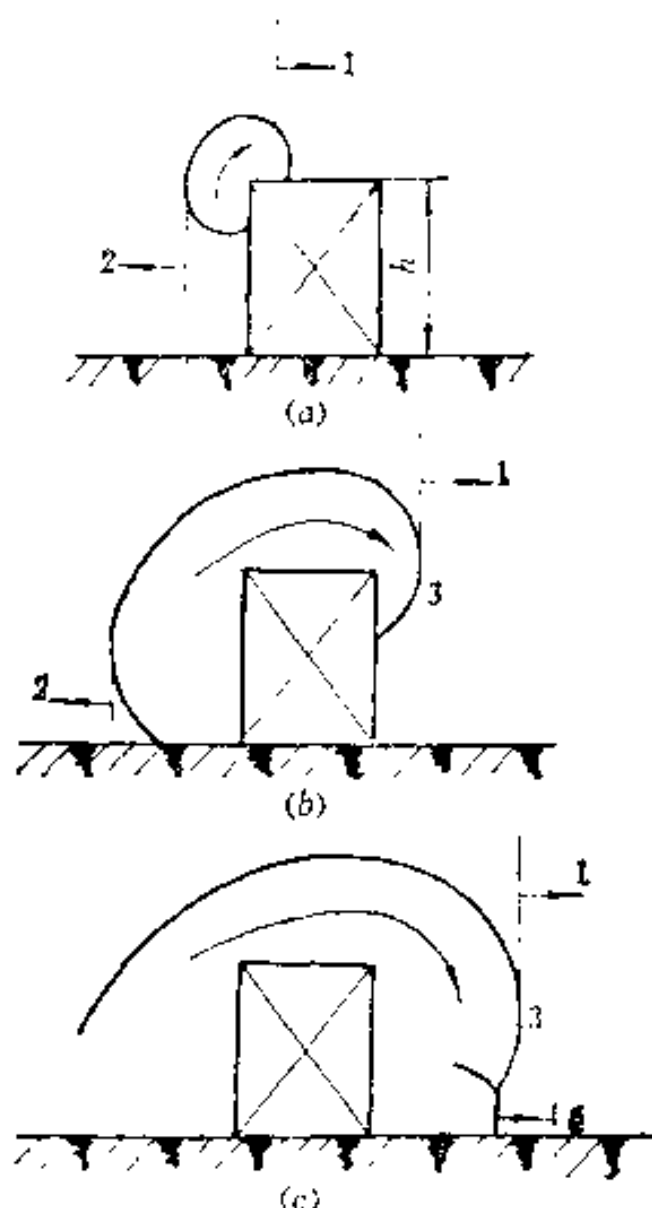


图9-6-1 建筑物顶部的环流

a—冲击波碰到建筑物初期阶段；b—环流开始形成；c—环流进一步发展。1—入射冲击波，2—反射冲击波，3—环流；4—环流在地面的反射。

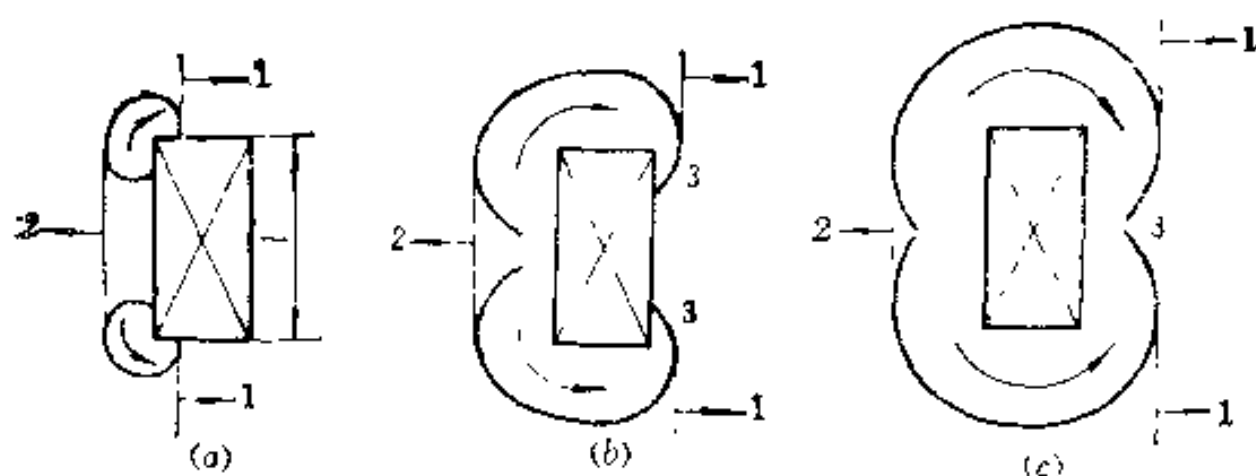


图9-6-2 建筑物两侧的环流

a—冲击波碰到建筑物初期阶段；b—环流开始形成；c—环流完全形成。1—入射冲击波；2—反射冲击波；3—环流。

之差。

二、建筑物承受负载的计算

空气冲击波的波形是迅速随时间衰减的一条曲线，并且在波阵面后最初阶段衰减得剧烈，随后衰减缓慢。但是当空气冲击波峰值超压不太高时，可以用压力随时间线性变化的三角形波形来代替冲击波正压区的真实波形，如图9-6-3所示，这样造成的误差也不会太大。

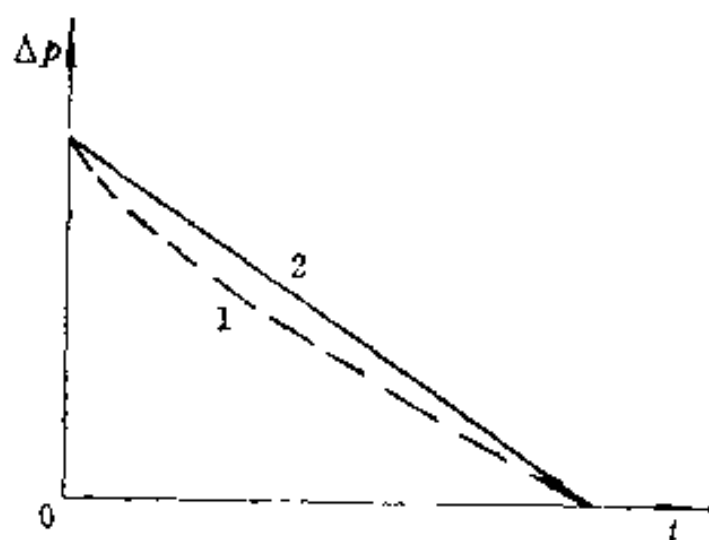


图9-6-3 空气冲击波超压不太高时的冲击波波形

1—真实波形；2—简化波形。

1. 作用在建筑物正面的超压波形

假若空气冲击波垂直到达建筑物，则冲击波在建筑物正

面发生正反射，反射冲击波峰值超压

$$\Delta p_2 = 2\Delta p_1 + \frac{6\sqrt{p_1^2}}{\Delta p_1 + 7p_0}$$

反射冲击波正压区作用时间按公式 (9-3-18) 或 (9-3-19)、(9-3-20) 计算，如炸药放置在普通地面上爆炸

$$t_c^* = 1.49 \times 10^{-8} \sqrt{R^6 / \omega}$$

这时作用在建筑物正面的冲击波波形如图 9-6-4 中虚线所示。

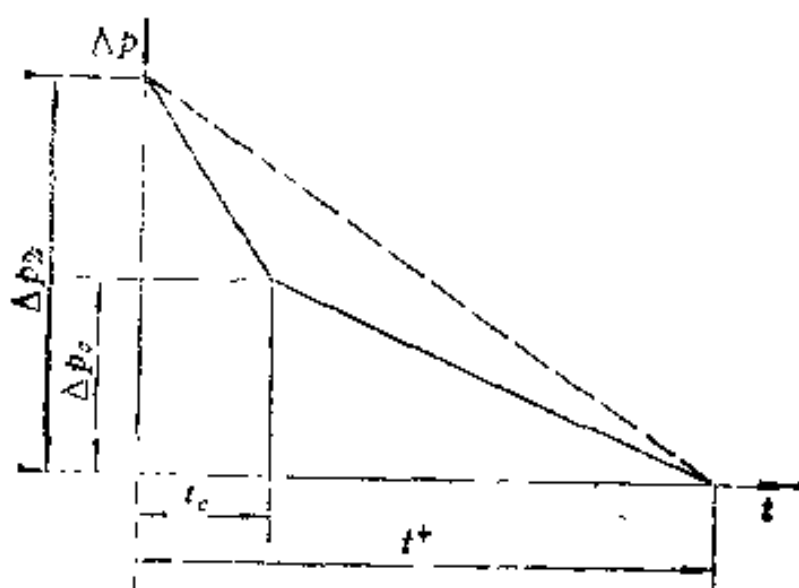


图9-6-4 作用于建筑物正面的超压波形

实线—考虑环流作用；虚线—不考虑环流作用。

但是由于环流的作用，从建筑物顶部和两侧向前墙壁面传入膨胀波，使得前墙壁面处的空气压力下降，近似按公式 (9-3-29) 计算传入膨胀波的速度

$$c_1 = 23.05 \left[\frac{288(1 + 10^{-5}\Delta p)(7.08 \times 10^5 + \Delta p)}{7.08 \times 10^5 + 6\Delta p} \right]^{1/2}$$

假设建筑物的高度为 h ，长度为 l ，膨胀波由建筑物顶部到达底部的时间为 $\frac{h}{c_1}$ ，膨胀波由建筑物两侧到达前壁面中间

相遇的时间为 $\frac{l}{2c_1}$ ，不过此时前墙壁面各点的压力是不均匀的，近似取二倍的这个时间时前墙壁面处压力呈均匀状态，则环流时间

$$t_e = \frac{2l}{c_1} \quad (9-6-1)$$

或

$$t_e = \frac{l}{c_1} \quad (9-6-2)$$

对于具体计算来说，取二者之中的较小值，因为在较小的方向上首先形成环流。

环流时间所对应的前壁面平均压力，称为环流压力，通常认为形成环流时前壁面所达到的均匀超压为峰值超压的一半，即

$$\Delta p_e = \frac{1}{2} \Delta p_2 \quad (9-6-3)$$

随后 Δp_e 在正压区范围内沿着时间线性衰减到零。

因此，作用在建筑物正面上的超压波形如图 9-6-4 中的实线所示。

2. 作用在建筑物背面超压波形

环流随着冲击波沿着建筑物顶部和两侧向后运动，设建筑物宽度（沿着冲击波传播方向）尺寸为 b ，环流冲击波的速度为 D_1 ，则环流通过宽度 b 到达背面边缘的时间

$$t_e = \frac{b}{D_1} \quad (9-6-4)$$

式中 D_1 按照公式 (9-3-25) 计算。

当环流到达建筑物背面边缘之前，背面不受冲击波超压作用，当环流到达背面边缘并沿着背面运动时，背面受有超

压的作用，此超压不断增加。从环流开始由边缘向背面扩展算起，一直到背面压力达到均匀状态为止，所经历的时间仍然用公式 (9-6-1) 或 (9-6-2) 计算。

假若冲击波传播到建筑物背面边缘时的峰值超压为 Δp_1 ，由于环流沿着背面扩展，使得背面平均超压有所降低。实验表明，建筑物背面最大平均超压约为 Δp_1 的三分之二，即

$$\Delta p_b = \frac{2}{3} \Delta p_1 \quad (9-6-5)$$

随后 Δp_b 在正压区范围内沿着时间线性衰减到零。

因此，作用在建筑物背面上的超压波形如图 9-6-5 所示。

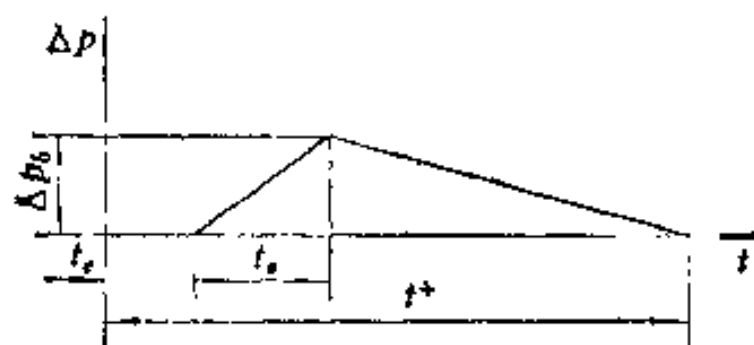


图 9-6-5 作用于建筑物背面的超压波形

3. 环流形成后作用在建筑物上的净载荷

当空气冲击波对小型建筑物或建筑物的个别凸出部分迅速形成环流时，空气冲击波对建筑物的作用具有上述明显的两个特点，一是前表面反射压力迅速降低，二是后表面超压具有解除负载的作用，这样作用在这些建筑物上的净载荷是前、后表面压力之差，如图 9-6-6 中阴影部分所示。

为了明确起见，将具有环流作用时的计算列方块图如图 9-6-7 所示。

图 9-6-7 表明，当已知炸药量、建筑物距爆点距离和建筑物外形尺寸时，可以运用已有的公式分别计算超压 Δp_2 ，

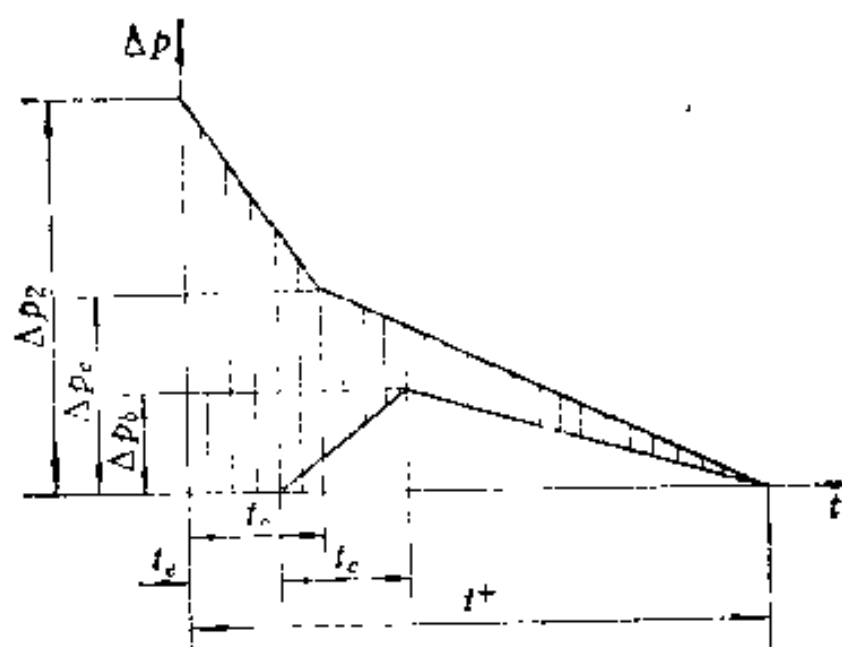


图9-6-6 环流形成后作用在建筑物上的净载荷

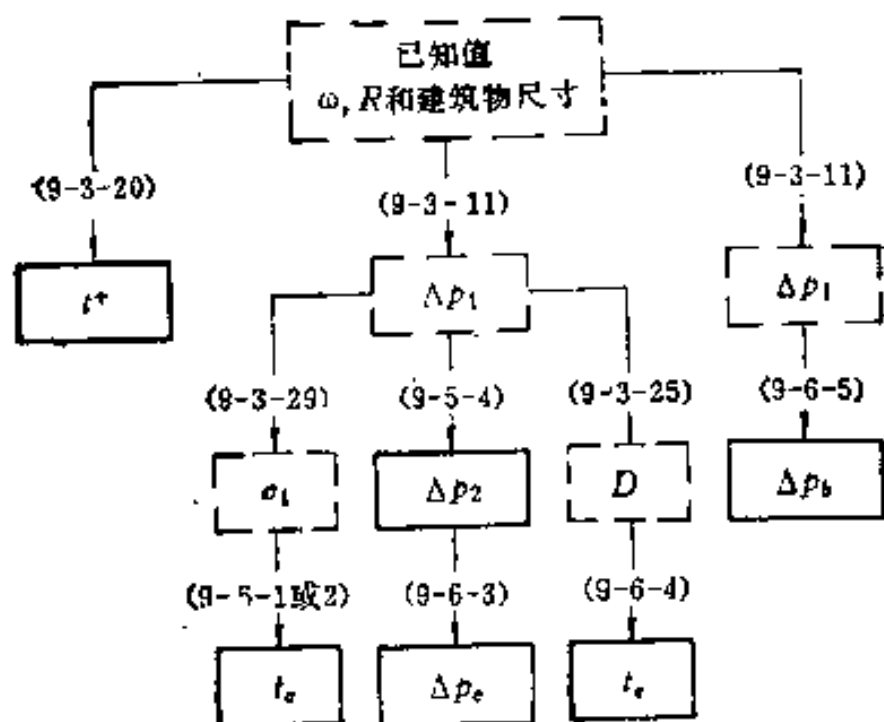


图9-6-7 环流作用在建筑物上的净载计算方块图

Δp_2 、 Δp_3 以及时间 t^* 、 t_c 、 t_e 。然后, 按照图 9-6-6 进行作图, 从而求出作用于建筑物上的净载荷。

由于在小建筑物上比在大建筑物上易形成环流, 因而作用在小建筑物上的净载荷比作用在大建筑物上同样大小面积上的载荷要小得多, 所以小建筑物比大建筑物具有更好地抵抗空气冲击波的作用。

〔例9-10〕 靶场试验小房长5m、宽4m、高3m, 如图9-6-8所示, 假若在小房正面前100m处发生放置在普通地

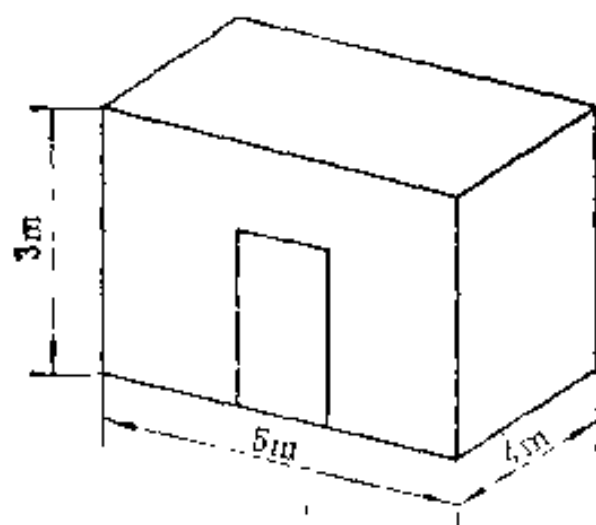


图9-6-8 本例小房

面上 10000kg 梯恩梯炸药的爆炸, 试计算空气冲击波作用在小房上的净载荷。

解 由于爆炸药量比较大, 而小房又比较小, 当空气冲击波到达小房时, 空气流动造成的环流迅速把小房包围起来, 作用在小房上的净载荷是前、后面载荷之差。确定作用在小房前表面的载荷, 需要求出 Δp_2 、 t^* 、 Δp_3 和 t_e ; 确定作用在小房后表面的载荷, 需要求出 Δp_3 和 t_e , 具体计算步骤如方块图 9-6-7 所示。

1. 计算 10000kg 梯恩梯炸药爆炸在 100m 处的冲击波峰值超压和正压区作用时间。

按照公式 (9-3-11) 计算冲击波峰值超压

$$\begin{aligned}\Delta p_1 &= 0.102 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.399 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 + 1.26 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3 \\ &= 0.102 \times \frac{\sqrt[3]{10 \times 10^3}}{100} + 0.399 \left(\frac{\sqrt[3]{10 \times 10^3}}{10} \right)^2 \\ &\quad + 1.26 \left(\frac{\sqrt[3]{10 \times 10^3}}{10} \right)^3 = 0.053 (\text{MPa})\end{aligned}$$

按照公式 (9-3-21) 计算正压区作用时间

$$\begin{aligned}t_1^+ &= 1.48 \times 10^{-2} \sqrt[3]{R \sqrt[3]{\omega}} = 1.48 \times 10^{-2} \sqrt[3]{100 \sqrt[3]{10 \times 10^3}} \\ &= 0.0687 (\text{s})\end{aligned}$$

2. 计算小房正面反射冲击波峰值超压和环流压力。

按照公式 (9-5-4) 计算反射冲击波峰值超压

$$\begin{aligned}\Delta p_2 &= 2\Delta p_1 + \frac{6\Delta p_1^2}{\Delta p_1 + 7p_0} = 2 \times 0.053 \times 10^6 \\ &\quad + \frac{6 \times (0.053 \times 10^6)^2}{0.053 \times 10^6 + 7 \times 10^5} = 1.28 \times 10^6 (\text{Pa})\end{aligned}$$

按照公式 (9-6-3) 计算环流超压

$$\Delta p_c = \frac{1}{2} p_2 = 0.64 \times 10^6 (\text{Pa})$$

3. 计算小房正面的环流时间。

按照公式 (9-3-29) 计算音速

$$\begin{aligned}c_1 &= 20.05 \left[\frac{288(1 + 10^{-5} \Delta p_1)(7.08 \times 10^5 + \Delta p_1)}{7.08 \times 10^5 + 6\Delta p_1} \right]^{1/2} \\ &= 20.05 \left[\frac{288(1 + 0.53)(7.08 \times 10^5 + 0.53 \times 10^6)}{7.08 \times 10^5 + 6 \times 0.53 \times 10^5} \right]^{1/2} \\ &= 362 (\text{m/s})\end{aligned}$$

按照 (9-5-2) 式计算环流时间

$$t_c = \frac{l}{c_1} = \frac{5}{362} = 0.0138(\text{s})$$

4. 计算环流沿小房侧面到达后墙边缘的时间。

按照公式 (9-3-25) 计算冲击波速度

$$\begin{aligned} D &= 340 \sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \Delta p_1} \\ &= 340 \sqrt{1 + 0.85 \times 10^{-5} \times 0.53 \times 10^5} \\ &= 409(\text{m/s}) \end{aligned}$$

按照 (9-6-4) 式计算环流到达后墙边缘的时间

$$t_e = \frac{b}{D} = \frac{4}{409} = 0.0098(\text{s})$$

5. 计算小房背面的环流超压,

小房后墙距爆点 104m, 此处爆炸冲击波超压, 按 (9-3-11) 式计算

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= 0.102 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.399 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 + 1.26 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3 \\ &= 0.102 \times \frac{\sqrt[3]{10 \times 10^8}}{104} + 0.399 \left(\frac{\sqrt[3]{10 \times 10^8}}{104} \right)^2 \\ &\quad + 1.26 \left(\frac{\sqrt[3]{10 \times 10^8}}{104} \right)^3 = 0.049(\text{MPa}) \end{aligned}$$

按照公式 (9-6-5) 计算房背面环流超压

$$\Delta p_2 = -\frac{2}{3} \Delta p_1 = 0.33 \times 10^5(\text{Pa})$$

在以 $\Delta p - t$ 为坐标的图 9-6-9 上, 按照计算数据分别画出环流作用于小房前、后的超压, 二超压线所围面积即是爆炸冲击波作用于小房上的净载荷。

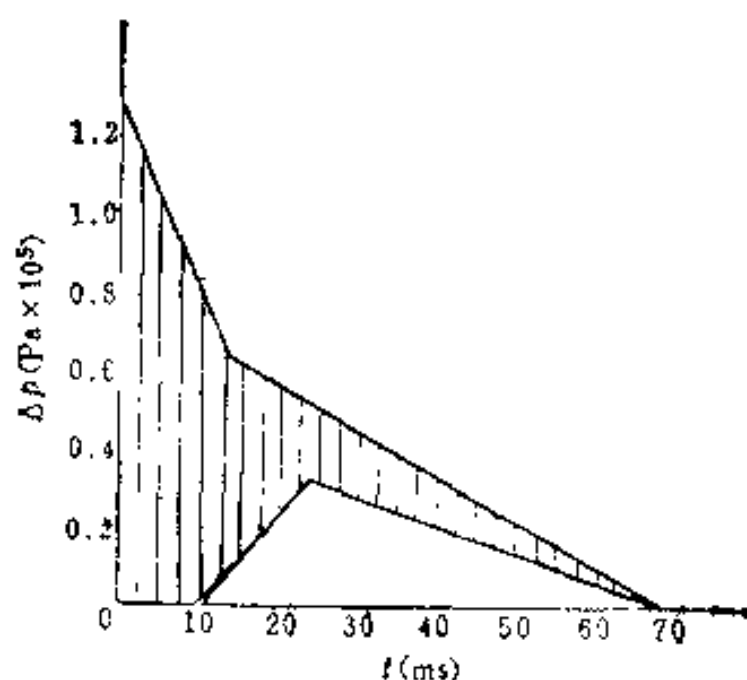


图9-6 9 作用于小房上的净载荷

§ 9-7 空气冲击波的破坏作用

一、空气冲击波破坏作用的分析

炸药爆炸，引起建筑物破坏的因素有以下几方面：爆轰产物的作用，空气冲击波的作用以及爆炸所掀起的固体飞散物的直接作用。由于爆轰产物作用范围大约只在10至15倍装药半径范围之内，破片、砖石等固体飞散物虽然飞散很远，但是对建筑物只能造成局部破坏，并且与外界条件关系很大，所以爆炸对建筑物的破坏主要考虑空气冲击波。

空气冲击波对目标的破坏，与冲击波本身强弱和目标的特性有关。

描述空气冲击波强弱的参数有三个：峰值超压、正压区作用时间和冲量。冲击波峰值超压表示冲击波瞬间作用的量，而冲量表示在正压区时间范围内超压的持续作用量，二者对目标都起破坏作用，但是哪一个起主要作用呢？这要看目标

对冲击波破坏载荷接受的情况。

一个物体或者一个结构（例如建筑物的墙，装配在窗子上的玻璃等），本身都有确定的振动周期，也就是说物体是按照本身的特性，每秒钟进行一定次数的周期性振动。如果外力作用在某个物体上时，物体振动的情况与外力性质和物体性质都有关系，在物体振动的一个周期范围内，有时外力方向与物体振动方向相同，有时外力方向与物体振动方向相反，当外力方向与物体振动方向相同时，则外力会使振动加强，当外力方向与物体振动方向相反时，则外力会使振动削弱。

如果冲击波正压区作用时间 t^+ 小于物体的四分之一自振周期 T ，如图9-7-1所示。

这时，当空气冲击波刚作用在物体上时，物体开始振动，而当冲击波随着时间将正压区范围内的超压陆续作用到物体上时，一直保持物体振动的方向与冲击波超压所加外力的方向一致，所以冲击波正压区内全部冲量都用在加速物体振动上。也就是说，当

$t^+ \leq \frac{T}{4}$ 时，物体的破坏靠冲击

波的冲量作用。

如果冲击波正压区作用时间 t^+ 比物体振动周期 T 大得多，如图9-7-2所示。

当空气冲击波作用在物体上时，物体开始振动，最初 $\frac{T}{4}$

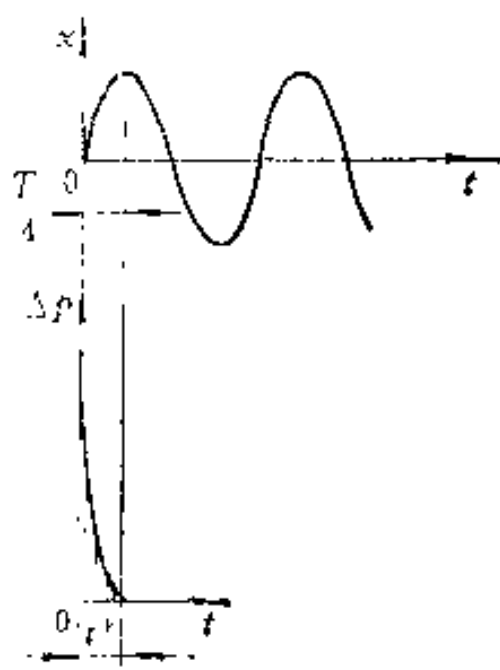


图9-7-1 t^+ 小于 $\frac{T}{4}$ 的情况

范围内,物体振动方向与空气冲击波超压所加外力方向一致,使得物体的振动得到加

强;在 $\frac{T}{4} \sim \frac{3T}{4}$ 范围

内,物体振动的方向与空气冲击波超压所加外力方向相反,使得物体的振动受到削弱;在

$\frac{3T}{4} \sim \frac{5T}{4}$ 范围内,物

体振动方向与空气冲击波超压所加外力方向一

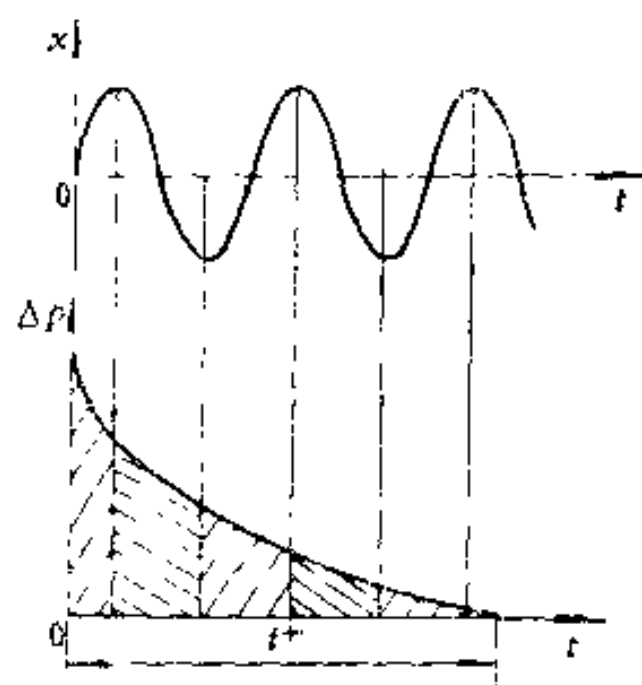


图9-7-2 t^* 较比 T 大得多的情况

致,使得物体振动又得到加强;……。因而,空气冲击波对物体的作用,是物体振动多次受到加强和多次受到削弱的过程。第一次最初四分之一周期的加力,既是正压区冲量的一部分,又体现了冲击波的峰值超压。实验研究表明,当 $t^* \geq 10T$ 时,物体的破坏可以靠冲击波峰值超压计算。

表 9-7-1 给出了一些建筑物构件的自振周期和破坏载荷的数据,只要把冲击波正压区作用时间与构件的自振周期相

表9-7-1 一些构件的自振周期和破坏载荷

构件	$T(s)$	$\Delta p(\text{Pa} \times 10^5)$	$i(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$
砖墙(2层砖厚)	0.01	0.25	2156
砖墙(1.5层砖厚)	0.015	0.15	1862
钢筋混凝土墙(0.25米厚)	0.015	3.0	—
木梁楼板	0.3	0.10~0.16	—
轻隔板	0.07	0.05	—
玻璃窗	0.02~0.04	0.05~0.10	—

比较，就可以确定空气冲击波作用的性质。

二、空气冲击波对建筑物的破坏

空气冲击波对建筑物的破坏，是由峰值超压和冲量共同作用的结果。由于正压区作用时间随着距爆点距离和药量的增加而增加，故大药量远距离作用时，一般以峰值超压的破坏为主，小药量炸药爆炸近距离作用时，一般以冲量破坏为主。而对于核爆炸来说，由于作用时间很长，通常以峰值超压来衡量冲击波的破坏作用。

本节不作详细计算，而只是通过试验数据和事故统计的材料，以冲击波峰值超压为准，给出一些建筑物破坏的情况，提供一些感性知识。

通过 $300\text{kg}\sim 40\times 10^3\text{kg}$ 梯恩梯炸药的爆炸试验和事故分析表明，对于砖墙建筑物：

当 $\Delta p < 0.02 \times 10^5\text{Pa}$ 时，基本上没有破坏；

当 $\Delta p = (0.02 \sim 0.12) \times 10^5\text{Pa}$ 时，造成玻璃窗的部分或全部破坏；

当 $\Delta p = (0.12 \sim 0.30) \times 10^5\text{Pa}$ 时，造成门窗部分破坏，砖墙出现小裂纹；

当 $\Delta p = (0.30 \sim 0.50) \times 10^5\text{Pa}$ 时，造成门窗大部分破坏，砖墙出现严重裂纹；

当 $\Delta p = (0.50 \sim 0.76) \times 10^5\text{Pa}$ 时，造成门窗全部破坏，砖墙部分倒塌；

当 $\Delta p > 0.76 \times 10^5\text{Pa}$ 时，造成墙倒屋塌。

对于核爆炸来说，由于爆炸威力通常相当于 10^5kg 左右梯恩梯炸药当量，其爆炸所形成的空气冲击波比炸药爆炸所形成的冲击波要强得多，作用范围也大得多。对于砖墙建

建筑；

当 $\Delta p = (0.02 \sim 0.05) \times 10^5 \text{Pa}$ 时，造成玻璃窗破坏；

当 $\Delta p = (0.05 \sim 0.10) \times 10^5 \text{Pa}$ 时，造成门窗破坏，屋顶部分掀起；

当 $\Delta p = (0.10 \sim 0.20) \times 10^5 \text{Pa}$ ，造成砖墙出现裂缝，屋顶大部分掀起；

当 $\Delta p = (0.20 \sim 0.30) \times 10^5 \text{Pa}$ 时，造成砖墙部分倒塌；

当 $\Delta p > 0.30 \times 10^5 \text{Pa}$ 时，造成房屋倒塌。

空气冲击波对于车辆、飞机、船只皆有严重的破坏作用，而对于坦克等重型装甲防护的军事装备作用不大。

地下设施能够有效地防护空气冲击波的作用，壕沟加护板比不加护板的防护效果要好，地下室较为安全。

三、空气冲击波对人员的杀伤作用

空气冲击波对人员杀伤的主要征象是引起听觉器官的损伤、内脏出血，以及死亡。不大的冲击波就能引起耳膜破裂，稍大的冲击波会引起肺、肝、脾等内脏器官的严重损伤，在无掩蔽的情况下，人员无法承受 $0.2 \times 10^5 \text{Pa}$ 以上的冲击波超压。

本节仍然以冲击波峰值超压为准，通过动物试验，提供一些空气冲击波对人员杀伤的感性知识。试验用狗、羊作为对象，炸药采用梯恩梯，药量 $(1 \sim 40) \times 10^3 \text{kg}$ ，试验中动物姿态两后腿站立，腹部朝向爆点。试验结果表明：

当 $\Delta p < 0.1 \times 10^5 \text{Pa}$ 时，动物无损伤；

当 $\Delta p = (0.1 \sim 0.25) \times 10^5 \text{Pa}$ 时，动物轻伤，造成四分之一肺气肿，散在性气肿，二至三个内脏出血点；

当 $\Delta p = (0.25 \sim 0.45) \times 10^5 \text{Pa}$ 时，动物中伤，造成三分

之一肺气肿，一至三个片状内脏出血，一个大片内脏出血；

当 $\Delta p = (0.45 \sim 0.75) \times 10^5 \text{Pa}$ 时，动物重伤，造成二分之一肺气肿，三个以上的片状内脏出血，两个以上的大片内脏出血；

当 $\Delta p > 0.75 \times 10^5 \text{Pa}$ 时，动物当场死亡，或伤势严重无法抢救。

从以上试验数据表明，空气冲击波对人员的杀伤是很严重的。

§ 9-8 冲击波设防安全距离

冲击波设防安全距离，是指根据国家规定的建筑物安全等级标准确定的防护冲击波破坏的最小距离。下面简称为设防安全距离。

设防安全距离是对一定安全等级而言，并不是一提安全距离，就一切什么都安全了。例如，对于允许有中等程度破坏的危险品生产工房，在符合该安全距离的条件下发生爆炸，仍然会使工房门窗大部分破坏；而对于职工生活住宅来说，在符合该安全距离条件下发生爆炸，就只允许安装在窗子上的玻璃稍有损坏。设防安全距离要求把建筑物的破坏程度，控制在允许的安全等级范围之内，合理地防护冲击波的破坏作用。

研究设防安全距离，对于弹药的生产、试验、贮存、运输和销毁过程中的安全，是很重要的问题。

一、建筑物破坏等级

按照国家规定，建筑物破坏等级划分成六级。

一级：基本无破坏，状况是窗上玻璃偶尔裂纹和震落；



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

图9-8-1 建筑物破坏等级

a—基本无破坏；b—玻璃破坏；c—轻度破坏；d—中等破坏；
e—严重破坏；f—倒塌。

二级：玻璃破坏，状况是玻璃部分或全部破坏；

三级：轻度破坏，状况是玻璃破坏，门窗部分破坏，砖墙出现小裂纹（5 mm以内）和稍有倾斜，瓦屋顶面局部掀起；

四级：中等破坏，状况是门窗大部分破坏，砖墙有严重裂缝（5～50 mm）和倾斜（10～100 mm），钢筋混凝土屋顶裂缝，瓦屋顶面大部分掀起；

五级：严重破坏，状况是门窗摧毁，砖墙严重开裂（50 mm以上）和倾斜，甚至部分倒塌，钢筋混凝土屋顶严重开裂，瓦屋顶面塌下；

六级：房屋倒塌，状况是砖墙倒塌，钢筋混凝土屋顶塌下。

六个等级的破坏程度见图9-8-1。

二、设防安全距离的确定

由于爆轰产物的作用范围有限，在研究设防安全距离时主要考虑空气冲击波的破坏作用。建筑物的破坏程度如何，与冲击波的强弱和建筑物的性质都有很大关系。通过前面的讨论得知，当冲击波正压区作用时间小于四分之一建筑物自振周期时，建筑物的破坏主要靠冲量，当冲击波正压区作用时间大于十倍建筑物自振周期时，建筑物的破坏主要靠峰值超压。

但是在大多数情况下，冲击波正压区作用时间和建筑物自振周期之间，并不满足上述的极端条件，例如：

当10 kg梯恩梯炸药放置在普通地面上爆炸，距爆点5 m和20 m处的正压区作用时间分别为

$$t_{5m}^+ = 1.48 \times 10^{-3} \sqrt[6]{5} \sqrt[6]{10} = 0.0049 (\text{s})$$

$$t_{20m}^+ = 1.48 \times 10^{-3} \sqrt[6]{20} \sqrt[6]{10} = 0.0097 (\text{s})$$

当 1000kg 梯恩梯炸药放置在普通地面上爆炸, 距爆点 10m 和 100m 处的正压区作用时间分别为

$$t_{10m}^+ = 1.48 \times 10^{-3} \sqrt{10^6 / 1000} = 0.0148 (\text{s})$$

$$t_{100m}^+ = 1.48 \times 10^{-3} \sqrt{100^6 / 1000} = 0.0468 (\text{s})$$

对于 2 层砖厚的砖墙来说, 其自振周期为 0.01 s, 对于 25cm 厚的钢筋混凝土墙来说, 其自振周期为 0.015 s。比较上述数值可以看出, 正压区作用时间一般在四分之一建筑物自振周期和十倍建筑物自振周期范围之间。

按照爆炸相似律, 当以冲击波峰值超压衡量作用效果时, 距离 R 与药量 ω 的三分之一次幂成正比; 当以冲量衡量作用效果时, 距离 R 与药量 ω 的三分之二次方成正比。也就是说:

$$\text{当 } t^+ \leq \frac{T}{4} \text{ 时} \quad R \sim \omega^{2/3}$$

$$\text{当 } t^+ \geq 10 T \text{ 时} \quad R \sim \omega^{1/3}$$

而在一般情况下, 必然具有

$$\frac{T}{4} < t^+ < 10 T, \quad R \sim \omega^{1/3 \sim 2/3}$$

上述分析表明, 在一般情况下设防安全距离的确定, 不能单纯地光看超压, 也不能单纯地光看冲量, 要看建筑物实际破坏程度。设防安全距离与爆炸药量的幂次关系, 一般在 $\frac{1}{3}$ 次幂和 $\frac{2}{3}$ 次幂之间。通常可以写成

$$R = K \omega^a \quad (9-8-1)$$

式中 R ——某种建筑物破坏等级下的安全距离(m);

ω ——在 R 距离上达到此种破坏所对应的梯恩梯药量(kg);

K, a ——待定系数和指数, 其中 $a = \frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}$ 。

待定系数和指数 K, a , 可以通过实验数据处理确定。
将 (9-8-1) 式两边取对数

$$\ln R = \ln K + a \ln \omega$$

令 $\ln K = b$, 则

$$\ln R = b + a \ln \omega$$

按照一定的建筑物破坏等级, 对于不同的梯恩梯药量 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, 测得对应的距离 $R_1, R_2, \dots, R_n$, 即

$$\ln R_i = b + a \ln \omega_i$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

应用最小二乘法, 如果 a, b 能够满足上式的偏差平方和

$$\varphi = \sum_{i=1}^n [(b + a \ln \omega_i) - \ln R_i]^2$$

为极小值, 则 a, b 便是方程 (9-8-1) 式的最优系数。

根据取极小值的条件, 可以得到所谓正规方程组

$$\left. \begin{aligned} nb + a \sum_{i=1}^n \ln \omega_i &= \sum_{i=1}^n \ln R_i \\ b \sum_{i=1}^n \ln \omega_i + a \sum_{i=1}^n (\ln \omega_i)^2 &= \sum_{i=1}^n \ln R_i \ln \omega_i \end{aligned} \right\} (9-8-2)$$

对于正规方程组 (9-8-2), 可以按照实验数据, 以表 9-8-1 的形式进行计算。

计算出

$$c_1 = \sum_{i=1}^n \ln \omega_i \quad c_2 = \sum_{i=1}^n \ln R_i$$

表9-8-1 正规方程 (9-8-2) 计算表

i	ω_i	R_i	$\ln \omega_i$	$\ln R_i$	$(\ln \omega_i)^2$	$\ln R_i \ln \omega_i$
1						
2						
3						
$\vdots$						
n						
$\sum_{i=1}^n$			c_1	c_2	c_3	c_4

$$c_3 = \sum_{i=1}^n (\ln \omega_i)^2 \quad c_4 = \sum_{i=1}^n \ln R_i \ln \omega_i$$

从而得到

$$\left. \begin{aligned} nb + c_1 a &= c_2 \\ c_1 b + c_3 a &= c_4 \end{aligned} \right\} \quad (9-8-3)$$

由方程组 (9-8-3) 可以求得 a 、 b ，也就是说确定了待定系数 $K = e^b$ 和指数 a ，将之代入公式 (9-8-1)，从而就确定了设防安全距离的具体形式。

〔例9-11〕 某爆破队做了四次爆炸试验，梯恩梯药量分别为 6.4Mg、10Mg、20Mg 和 30Mg，按照国家规定的破坏等级衡量，测得五级严重破坏的距离分别为 96m、116m、155m 和 185m，试处理允许五级破坏的安全距离公式。

解 按照表 9-8-1 的格式进行计算，计算数据如表 9-8-2 所示。

表9-8-2 本试验的计算数据

i	$\omega_i(\text{kg})$	$R_i(\text{m})$	$\ln \omega_i$	$\ln R_i$	$(\ln \omega_i)^2$	$\ln R_i \ln \omega_i$
1	6400	96	8.76	4.56	76.8	40.0
2	10000	116	9.21	4.76	81.8	43.8
3	20000	155	9.90	5.05	98.0	50.0
4	30000	185	10.30	5.22	106.2	53.8
$\sum_{i=1}^n$			38.17	19.59	365.8	187.6

将数据代入 (9-8-3) 式, 得方程组

$$\begin{cases} 4b + 38.17a = 19.59 \\ 38.17b + 365.8a = 187.6 \end{cases}$$

连立解得

$$a = 0.417$$

$$b = 0.916$$

则

$$K = e^b = e^{0.916} = 2.5$$

将 K 和 a 代入 (9-8-1) 式, 得到允许五级严重破坏时的设防安全距离公式

$$R = 2.5\omega^{0.417}$$

或

$$R = 2.5\omega^{1/2.4}$$

三、设防安全距离公式

通过大量试验和事故资料分析, 并且进行必要的调整修

正后，得到各个破坏等级所对应的设防安全距离公式。注意下述公式的试验条件是在爆点周围设有土围墙，土围墙高度高出建筑物房檐 1m，顶宽 1m，底宽为高度的 1.5 倍。

对于允许五级严重破坏所对应的设防安全距离，处理成为两段：

$$\left. \begin{array}{l} \text{当药量 } \omega \leq 6.4 \times 10^3 \text{ kg 时} \\ R = 1.2 \omega^{1/2} \\ \text{当药量 } \omega > 6.4 \times 10^3 \text{ kg 时} \\ R = 2.5 \omega^{1/2.4} \end{array} \right\} \quad (9-8-4)$$

式中 R 的单位为 m， ω 的单位为 kg（梯恩梯当量）。

公式 (9-8-4) 如图 9-8-2 所示，在双对数坐标中是斜率相差不大的两条直线，当药量在 $6.4 \times 10^3 \text{ kg}$ 以下时，直线与

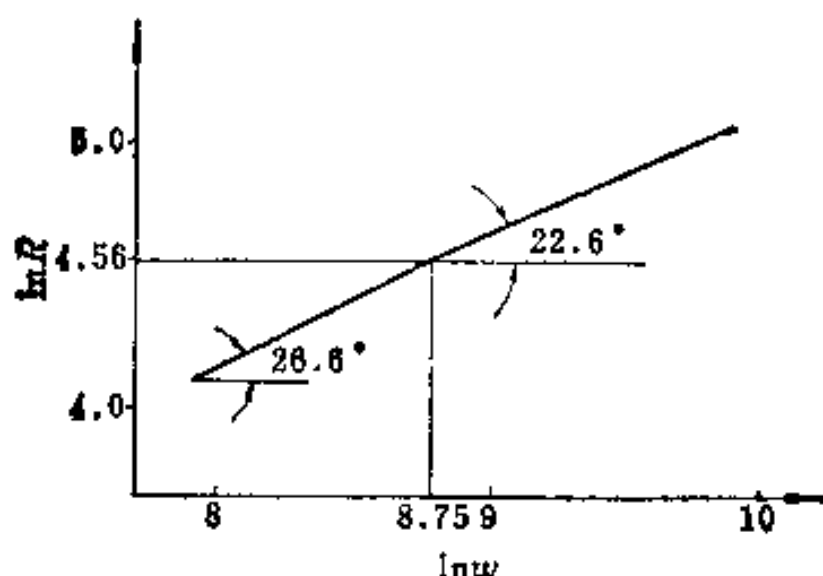


图 9-8-2 五级破坏时的 $\omega - R$ 关系

横轴的夹角 $\arctg \frac{1}{2} = 26.6^\circ$ ，当药量在 $6.4 \times 10^3 \text{ kg}$ 以上时，直线与横轴的夹角 $\arctg \frac{1}{2.4} = 22.6^\circ$ 。这两段直线相比，由于药量的增加，后者比前者更偏重于超压作用。

当药量较大时,其它破坏等级所对应的安全距离公式,分别是

对于三级轻度破坏

$$R = 7\omega^{1/2.3}$$

对于四级中度破坏

$$R = 4\omega^{1/2.3}$$

对于六级房屋倒塌

$$R = 1.6\omega^{1/2.3}$$

为了便于使用上述公式,以五级严重破坏为准,重新进行调整,按照国家安全规范的规定,实际采用表 9-8-3 中的公式,注意表中公式仍是适用于爆点周围单方有土围墙的条件。

表9-8-3 现行采用的设防安全距离公式

破坏等级	公 式
三级破坏	$R_3 = 2.0R_5$
四级破坏	$R_4 = 1.5R_5$
五级严重	$R_5 = \begin{cases} 1.0\omega^{1/2} & (\text{当 } \omega < 6400\text{kg}) \\ 2.0\omega^{1/2.3} & (\text{当 } \omega > 6400\text{kg}) \end{cases}$
六级破坏	$R_6 = 0.75R_5$

为了保证人民生活的安全,上述设防安全距离不能用于职工住宅区,职工住宅区的安全条件是不允许建筑物有较大的破坏,不允许对人员有任何损伤,只许可在不幸发生事故时住宅区窗子上的玻璃有损坏现象。在这种安全等级标准下,安全距离公式为

$$R = 25\omega^{1/2.3} \quad (9-8-5)$$

式中 R 的单位为 m , ω 的单位为 kg 。

〔例9-12〕 在有土围墙的靶场中, 进行 $300kg$ 梯恩梯炸药的爆炸试验, 试计算各个破坏等级所对应的安全距离, 以及住宅区的安全距离。

解 按照公式 (9-8-4), 五级严重破坏

$$R = 1.2\omega^{1/2} = 1.2 \times 300^{1/2} = 21(m)$$

按照表 9-8-3 中的公式

三级破坏

$$R = 2R_5 = 42(m)$$

四级破坏

$$R = 1.5R_5 = 31.5(m)$$

六级破坏

$$R = 0.75R_5 = 15.75(m)$$

按照公式 (9-8-5), 住宅区的安全距离

$$R = 25\omega^{1/2.8} = 25 \times 300^{1/2.8} = 192(m)$$

〔例9-13〕 设计 $10 \times 10^3 kg$ 黑索金炸药库房, 库房周围设有土围墙, 问各破坏等级的距离和距职工住宅区的距离。

解 取黑索金炸药的爆热为 $5440 \times 10^3 J/kg$, $10 \times 10^3 kg$ 黑索金炸药相当于梯恩梯当量

$$\omega = 10 \times 10^3 \times \frac{5440 \times 10^3}{4184 \times 10^3} = 13000(kg)$$

按照公式 (9-8-4) 计算五级严重破坏

$$R = 2.5\omega^{1/2.4} = 2.5(13000)^{1/2.4} = 129(m)$$

按照表 9-8-3 中公式, 计算

三级破坏

$$R = 2R_5 = 258(m)$$

四级破坏

$$R = 1.5R_s = 194(\text{m})$$

六级破坏

$$R = 0.75R_s = 97(\text{m})$$

按照公式 (9-8-4) 计算住宅区的安全距离

$$R = 25\omega^{1/2.8} = 25(13000)^{1/2.8} = 736(\text{m})$$

四、土围墙的作用

土围墙对于防护冲击波破坏有一定的效果。根据理论分析和试验结果表明,当爆点单方设有土围墙时,虽然在土围墙附近一段距离(大约是几倍土围墙高度)内,冲击波峰值超压有时比无土围墙时可能高些,但是在几倍土围墙高度以外的大部分范围内,冲击波峰值超压降低很多。并且当有土围墙时,冲击波超压在传播过程中衰减得更快。

爆点周围设有土围墙,梯恩梯药量从 $0.3 \times 10^3 \text{kg}$ 到 $40 \times 10^3 \text{kg}$ 范围内,通过试验得到放置在地面上进行爆炸时,冲击波峰值超压随距离衰减的公式

$$\Delta p = 0.041 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.69 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^2 + 0.688 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^3 \quad (9-8-6)$$

$$\text{适用范围} \quad 3 \leq \frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 18$$

式中 Δp 的单位为 MPa, ω 的单位为 kg, R 的单位为 m。

表 9-8-4 和图 9-8-3 比较了在爆点周围有、无土围墙的情况下,对外界冲击波超压作用的影响。

计算数据表明,在对比距离 R 大于 3 的范围,爆点周围有土围墙的冲击波峰值超压,比爆点周围无土围墙的冲击波峰值超压皆有所降低,其下降百分数约为 10%~30%,效果非

表9-8-4 爆点周围有、无土围墙的超压

$R/\sqrt{\omega}$	$\Delta p(\text{Pa} \times 10^5)$		Δp 降低量%
	有土围	无土围	
3	1.151	1.250	7.9
4	0.837	0.701	9.1
5	0.413	0.464	11.0
6	0.291	0.339	14.2
7	0.219	0.264	17.0
8	0.172	0.214	19.6
9	0.140	0.180	22.2
10	0.117	0.155	24.5
15	0.060	0.089	32.6

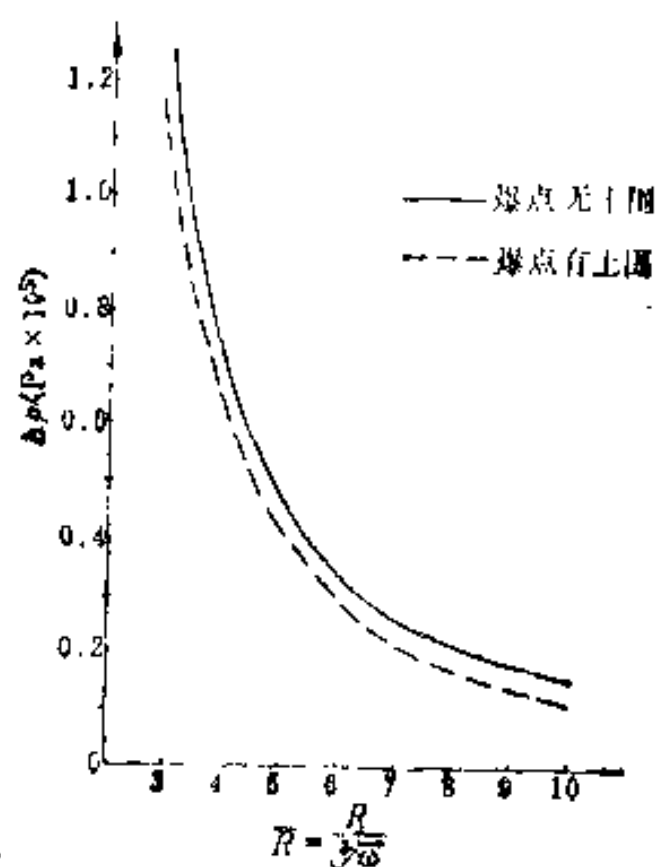


图9-8-3 冲击波峰值超压随距离衰减曲线

常明显。

在爆点和被防护建筑物双方都设有土围墙时，其防护效果更好。根据实验和事故资料分析，按照土围墙对冲击波的防护作用，在爆点单方设有土围墙时，其设防安全距离比无围墙时的设防安全距离可减少15%左右；在爆点和被防护建筑物双方都设有土围墙时，其设防安全距离比单方有土围墙的设防安全距离又可减少25%左右。

土围墙除了能够有效地降低冲击波超压之外，还能够更加有效地阻挡弹片和固体飞散物，因而，在危险生产区和危险品库房周围都应当设置土围墙。

土围墙的设置应当符合土围墙的各项技术要求，在设置土围墙时，应具备安全疏散和生产运输的通道，图 9-8-4 表示在建筑物周围设置土围墙的示意图。

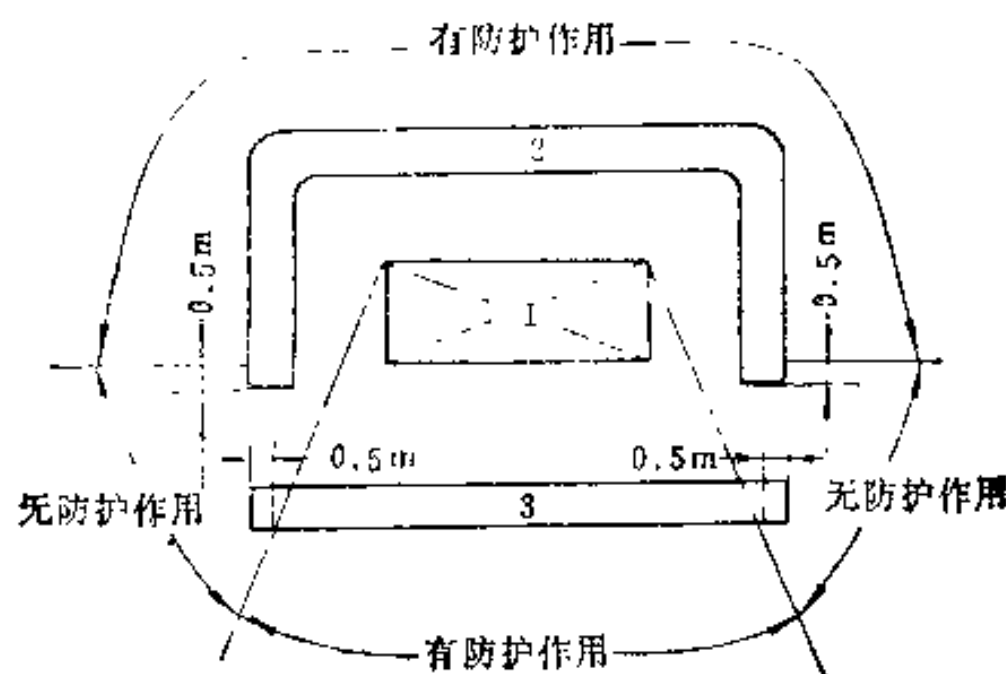


图9-8-4 设置土围墙的示意图

1—建筑物；2、3—土围墙。

建筑物两侧和背面土围墙连成“U”形，土围墙与建筑物之间的距离宜取作3m，建筑物前面与土围墙之间设有运

输管道，其间距按照使用要求确定。土围墙高度宜高出建筑物房檐1m，最低不能低于房檐高度，土围墙顶部宽度不应小于1m，底部宽度不应小于高度的1.5倍。

如图9-8-4所示，在土围墙之外径向范围内认为有防护作用，在两侧通道开口的扇形区内认为无防护作用。

五、地形的影响

上述的研究和分析，均是平地情况下的结果，当在山区、丘陵或周围地形变化比较大的情况下，对设防安全距离都会有很大的影响。

假若爆炸在一个山脚下进行，由于冲击波在山壁的反射，冲击波强度在山前有很大增加，由于山的阻挡和山背后山坡的稀疏作用，冲击波强度在山后有很大降低。因而，山前设防安全距离比平地时要有增加，山后设防安全距离比平地时要有减少。

在几种特定地形条件下，设防安全距离的增减量可以按照下列情况作以参考。

一个山沟内，一侧山高30~60m，坡度 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ，另一侧山高30~80m，坡度 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，沟宽100m左右，当在一边山脚下进行爆炸时，与平坦地面相比，对面山前设防安全距离要增加10~50%；

一个山沟内，一侧山高30~60m，坡度 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ，另一侧山高30~80m，坡度 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，沟宽40~100m，沟的纵坡4~10%，当在沟内进行爆炸时，与平坦地形相比，沿沟的纵深及出口方向，设防安全距离要增加10~40%；

山高10~30m，坡度 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ，当在山前爆炸时，与平坦地形相比，山背后设防安全距离可以减少10~30%；

山高30~80 m，坡度 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ，当在山前爆炸时，与平坦地形相比，山背后设防安全距离可以减少30~50%。

§ 9-9 殉 爆

炸药爆炸后，能够激起位于一定距离处的另一炸药发生爆炸，这一现象称为殉爆。

激发爆轰的装药称为主发装药，被激发爆轰的装药称为被发装药。殉爆设防安全距离是主发装药爆炸而不能引起被发装药爆炸的最小距离。

殉爆与如下三个方面的因素有关：

1. 主发装药的激发能力，表示这方面性质的量主要是与主发装药冲击力有关的量，例如主发装药的质量、能量以及引爆方向；

2. 被发装药接受激发的能力，表示这方面性质的量主要是被发装药的感爆性，例如被发装药的热感度和冲击波感度；

3. 主发和被发装药之间的性质和条件，例如主发装药和被发装药之间的介质，可能是空气，也可能是水、墙、钢板等密实介质，其条件可能是正常状态，也可能是二者之间有某种渠道相连，或者有某些障碍相隔。

研究殉爆，对于炸药的生产 and 贮存安全有着十分重要的意义。本节主要研究空气中的殉爆问题。

装药在空气中殉爆时，主发装药的能量可能会通过三种途径传递给被发装药：爆轰产物流，空气冲击波和装药外壳破碎所形成的碎片。当主发装药没有外壳时，借助于外壳破碎形成碎片引起殉爆的现象就不存在了，剩下的可能就只有爆轰产物和空气冲击波两种。

被发装药在空气冲击波和爆轰产物的作用下，当表面层的温度达到某个极限值（易挥发炸药的沸腾温度或难挥发炸药的气化温度和局部分解温度）时，就会产生蒸气或生成分解产物，并且很快达到进行高速化学反应的温度，引起炸药燃烧。对于含有气隙的多孔装药，被加热的空气和装药表面层燃烧的热产物进入孔隙，使燃烧急剧增长；或者是在空气冲击波的作用下，气隙内的空气受到绝热压缩，形成热点，急剧的化学反应由热点开始，最后形成整个被发装药的爆轰。

实验表明，当由较低的空气冲击波引起殉爆时，被发装药在爆轰之前通常有一段明显的燃烧过程；只有在冲击波很强和爆轰产物作用很大的区域范围内，被发装药才立即转为爆轰。无论哪种情况，被发装药爆轰的激发都具有热的性质。

下面，通过一些实验资料研究各种因素对殉爆的影响。

一、主发装药质量

主发装药质量是引起殉爆的最重要因素。主发装药愈多，能量愈大，空气冲击波作用范围愈大，因而殉爆距离就愈大。

空气冲击波的作用，无非是冲击波超压和冲量的作用。当冲击波峰值超压愈大时，冲击压缩性愈强，波后温度上升得愈高，愈容易引起殉爆；当冲量愈大时，冲击波提供的能量愈多，加热时间愈长，也愈容易引起殉爆。

按照冲击波峰值超压和冲量的相似准则，在其它条件固定的情况下，殉爆距离与炸药量的关系可以表示成为

$$R = K \omega^{1/2 \sim 2/3} \quad (9-9-1)$$

式中 R 是同等程度的殉爆距离，例如可以是引起被发装药百分之百殉爆的最大距离，以 $R_{100\%}$ 表示，可以是引起被发

装药百分之五十殉爆的对应距离，以 $R_{50\%}$ 表示，也可以是被发装药不殉爆的最小距离，以 $R_{0\%}$ 表示。关系式的待定系数 K 和待定指数 $\left(-\frac{1}{3} \sim -\frac{2}{3}\right)$ ，其具体数值要按照实验数据进行处理确定，对于不同程度的殉爆距离，关系式中的系数和指数也不一定完全相同。

当主发装药量不是太大，例如不超过几百千克时，对于 50% 殉爆相对应的距离，(9-9-1) 式可以处理成为二分之一次方的形式，即

$$R_{50\%} = K \omega^{1/2} \quad (9-9-2)$$

式中 $R_{50\%}$ 的单位为 m， ω 的单位为 kg，系数 K 的值见表 9-9-1。

表 9-9-1 几种情况下的 K 值

主发装药		被发装药		K
种类	ρ_0 (g/cm ³)	种类	ρ_0 (g/cm ³)	
梯恩梯	1.25	梅里尼特	1.0	0.33
特屈儿	1.25	梅里尼特	1.0	0.34
梅里尼特	1.25	梅里尼特	1.35	0.40
梅里尼特	1.25	梯恩梯	1.0	0.30
梅里尼特	1.25	特屈儿	1.35	0.50

当主发装药质量比较大的情况下，例如在几百千克之上时，对于殉爆距离 (9-9-1) 式，可以处理成为三分之一次方的形式

$$R = K \omega^{1/3} \quad (9-9-3)$$

式中 R 的单位为 m， ω 的单位为 kg，系数 K 的值见表 9-9-2。

表9-9-2 几种情况下的K值

炸药	K		试验条件
	殉爆	不殉爆	
梯恩梯	0.65	0.86	麻袋装, 放置在地面上
特屈儿	1.28	2.14	木箱装, 被发装药放置位置高于主发装药
泰安	—	2.14	木箱装, 放置在建筑物内
硝酸炸药	0.52	0.60	纸袋装, 放置在地面上

二、主发装药起爆方向

主发装药起爆方向对殉爆作用影响很大, 这主要由于当主发装药从一个方向起爆时, 空气冲击波在各个方向上分布不均匀所造成的。图9-9-1 a 表示了圆柱形装药一端起爆时, 在近区内冲击波的形状, 从图中看出在起爆方向上冲击波传播得最远, 在药柱两侧冲击波传播得较近, 在药柱棱角方向上冲击波传播得最近。

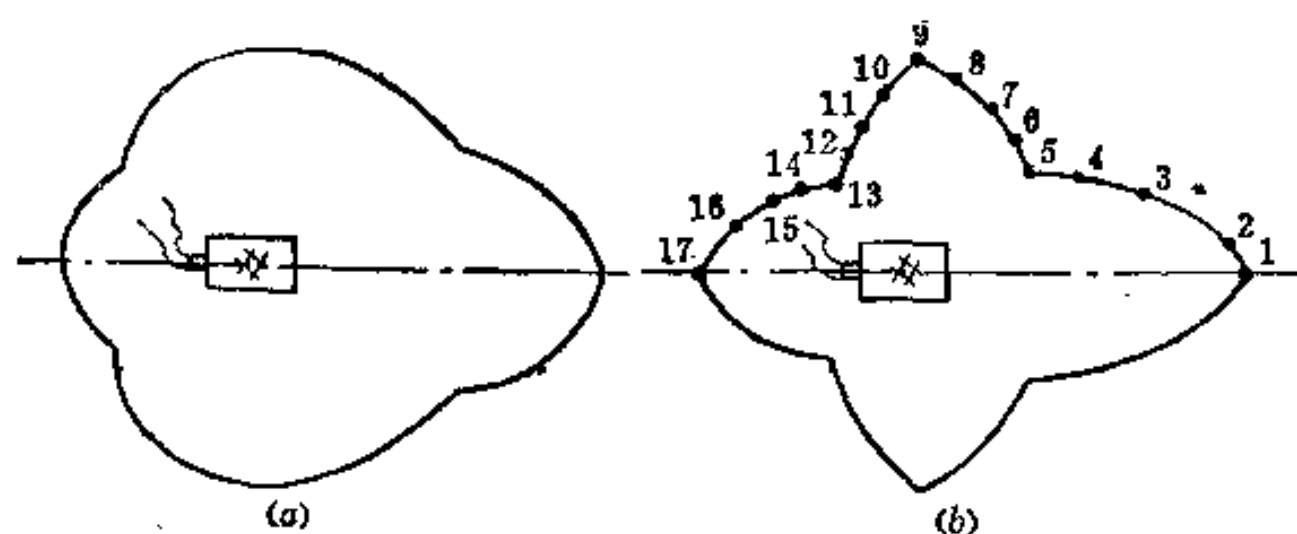


图9-9-1 起爆方向对殉爆的影响

a—冲击波形状, b—殉爆范围。

图9-9-1b表示了同样条件下，在圆柱形装药各个方向上殉爆的范围。

假若主发装药为代拿买特炸药，药柱尺寸为长50mm、直径32mm的圆柱体，被发装药也是代拿买特炸药，这时图9-9-1b中在各个方向上的殉爆距离如表9-9-3所示，其中角度为各个方向上的殉爆点和药柱中心点连线与起爆方向的夹角。

表9-9-3 圆柱形装药各个方向上的殉爆距离

殉爆点编号	角度	殉爆距离(mm)	殉爆点编号	角度	殉爆距离(mm)
1	0°	130	10	115°	80
2	5°	175	11	117°	60
3	20°	115	12	123°	50
4	35°	80	13	135°	40
5	45°	60	14	148°	60
6	56°	70	15	157°	80
7	67°	100	16	170°	100
8	75°	110	17	180°	105
9	90°	120			

假若雷管从圆柱形装药棱角上斜着起爆，实验同样表明在起爆方向上殉爆距离最大。图9-9-2表示从装药棱边斜着起爆时几个方向上的殉爆范围。对于主发装药和被发装药皆是代拿买特炸药的殉爆试验，主发装药长度为50mm，直径为32mm，这时图9-9-2中在各个方向上的殉爆距离如表9-9-4所示，其中角度为各个方向上的殉爆

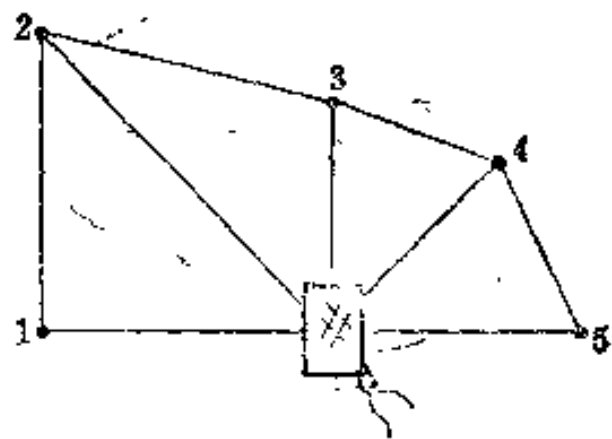


图9-9-2 斜起爆的殉爆范围

表9-9-4 斜起爆时各个方向的殉爆距离

殉爆点编号	角度	殉爆距离(m)
1	90°	100
2	45°	150
3	0°	70
4	-15°	75
5	-90°	85

点和药柱中心点连线与药柱轴线的夹角，并规定在起爆点一边角度为正，另一边角度为负。

三、被发装药的冲击波感度

被发装药的冲击波感度，表示被发装药接受冲击波能量的能力。被发装药的冲击波感度愈高，接受冲击波能量的能力愈强，装药也就愈容易引起殉爆。

冲击波感度通常采用隔板试验或蜡间隙试验进行评定。隔板试验是用隔板（铝板、黄铜、有机玻璃等）把主发装药和被发装药隔开，测试一定主发装药条件下引起被发装药殉爆所对应的隔板厚度；蜡间隙试验是用蜡层把主发装药和被发装药隔开，测试一定主发装药条件下引起被发装药殉爆所对应的蜡层厚度。

蜡间隙试验装置如图9-9-3所示，主发装药为高度50.8mm、直径41.3mm、质量100g的特屈儿药柱，被发装药直径与主发装药相同，测定引起被发装药50%殉爆所对应的蜡层厚度，一些炸药的测试结果如表9-9-5所示。

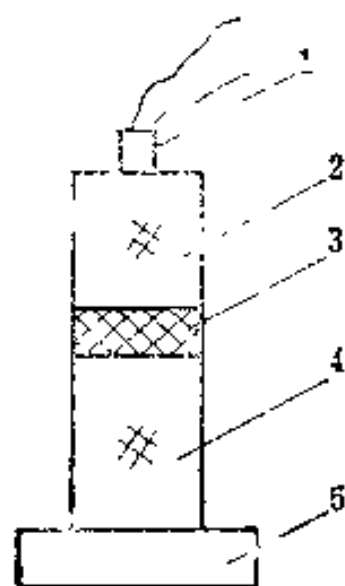


图9-9-3 蜡间隙试验装置

1—管嘴；2—主发装药；3—蜡间隙层；4—被发装药；5—铜座。

表9-9-5 某些炸药的蜡间隙试验结果

炸药	装药方法	ρ_0 (g/cm ³)	50%殉爆的蜡层厚 (mm)
梯恩梯	铸装	1.60	20.8
梯恩梯	压装	1.55	42.6
特屈儿	压装	1.58	61.0
黑索金	压装	1.54	59.2
B炸药	铸装	1.69	35.6
泰安50/梯恩梯50	铸装	1.65	52.8
泰安50/梯恩梯50	压装	1.61	60.0
特屈儿75/梯恩梯25	铸装	1.60	42.1
苦味酸铵	压装	1.54	32.2

四、被发装药密度

被发装药密度对殉爆影响也很大，随着被发装药密度的降低，殉爆距离增加。

当被发装药密度降低后,装药内部空隙增大,在冲击波作用下空隙内的气体容易受到冲击压缩形成热点,而引起被发装药的爆轰。表 9-9-6 表示了被发装药密度与殉爆距离的

表9-9-6 被发装药密度与殉爆距离的关系

被发装药		殉爆距离 (mm)
炸药	ρ (g/cm ³)	
梯恩梯	1.50	100
	1.10	110
	1.30	130
钝化黑索金	1.60	75
	1.50	90
	1.40	95

关系,试验采用钝化黑索金为主发装药,密度 1.6g/cm^3 ,直径 23.2mm 、质量 35.5g ,被发装药有梯恩梯和钝化黑索金两种炸药,试验时主发装药和被发装药之间用 0.15mm 厚的醋酸纤维管相连。从表中数据看出,随着被发装药密度的降低,殉爆距离增加,并且由于黑索金炸药钝化后其冲击波感度降低,因而在同样密度下其殉爆距离比梯恩梯的殉爆距离还低。

图 9-9-4 表示采用 50g 的梅里尼特炸药为主发装药,当装药密度分别为 1.5g/cm^3 和 1.0g/cm^3 时,对于某种被发装药进行殉爆试验,所得到的被发炸药装药密度与殉爆距离的关系,从图中试验数据看出,二者皆近似为直线的。

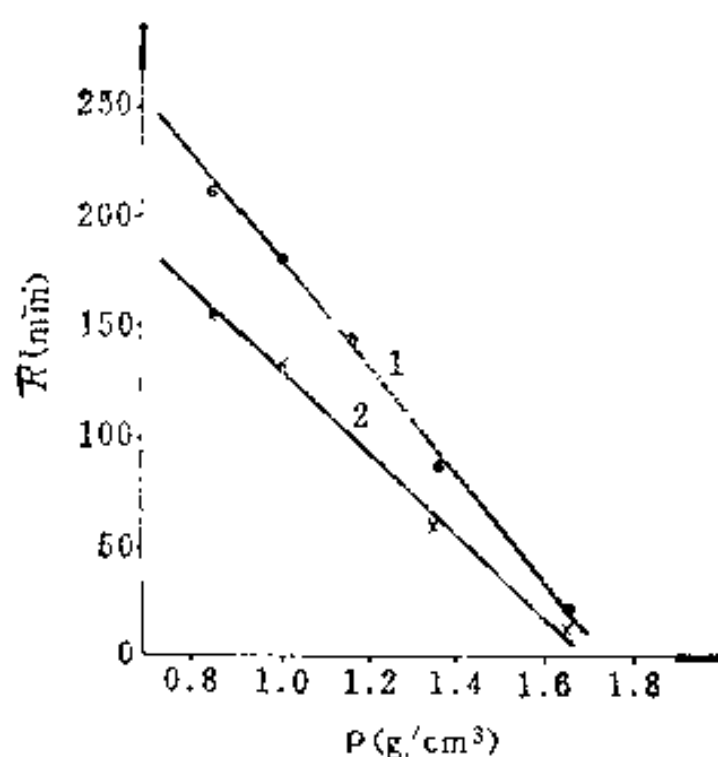


图9-9-4 殉爆距离与被发装药密度的关系

1—主发装药梅里尼特密度为 1.5 g/cm^3 ，2—主发装药梅里尼特密度为 1.0 g/cm^3 。

五、被发装药的湿度

被发装药的湿度对殉爆距离的影响也很大，这主要在于被发装药受潮后，冲击波感度降低的缘故。表 9-9-7 表示了被

表9-9-7 被发装药湿度与殉爆距离的关系

湿度(%)	$R_{100\%}(\text{mm})$	$R_{50\%}(\text{mm})$	$R_{0\%}(\text{mm})$
0.15	17	19.5	22
3.05	6	7.5	9
4.50	5	6.5	8
6.75	4	5	6
12.0	2	2.5	3
16.8	0	0.5	1

发装药湿度与殉爆距离的关系，试验中主发装药和被发装药皆采用梅里尼特炸药，主发装药密度 $1.25\text{g}/\text{cm}^3$ ，质量 50g ，被发装药密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 。

从表中数据看出，当被发装药开始受潮后，殉爆距离降低很快，此后随着湿度的增加，殉爆距离缓慢的降低。

六、装药以管道相连

当用管道将主发装药和被发装药连接起来后，由于管道限制了冲击波传播方向，与无管道相比，在同样距离上冲击波强度增加很多，因而使得殉爆距离有很大增加，即使管道强度很低，殉爆距离增加量也相当大。

表 9-9-8 表示不同管道强度对殉爆距离的影响，试验中

表 9-9-8 管道强度对殉爆距离的影响

两装药间有无管道	$R_{50\%}(\text{mm})$
无管道	190
壁厚 1 毫米的纸管	590
壁厚 5 毫米的钢管	1250

主发装药和被发装药皆采用苦味酸炸药，主发装药密度 $1.25\text{g}/\text{cm}^3$ 、质量 50g ，被发装药密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ，二装药皆为圆柱形，装药直径 28mm ，管道内径与装药直径相同。从试验数据看出，管道作用异常显著，当管道为 1mm 厚的纸管时，殉爆距离比无管道时殉爆距离增加到三倍，当管道为 5mm 厚的钢管时，殉爆距离比无管道时殉爆距离增加到六倍半。

表 9-9-9 表示不同管道内径对殉爆距离的影响。试验中

表9-9-9 管道内径与殉爆距离关系

管道条件	殉爆情况	
	殉爆 (mm)	不殉爆 (mm)
无管道	64	69
管道内径32mm (与装药直径同)	318	476
管道内径40mm	—	318
管道内径70mm	—	80
管道内径 100mm	—	69

主发装药和被发装药皆采用代拿买特炸药, 装药圆柱形, 直径32mm, 质量50g. 管道为壁厚1.5mm的聚氯乙烯管。试验表明, 当管道内径与装药直径相同时, 殉爆距离较比无管道时的殉爆距离增加5~6倍, 随着管道内径的增加, 殉爆距离的增加量不断减小, 到管道内径增加到100mm时, 殉爆距离较比无管道时已没有什么差别。

表9-9-10表示了管道形状对殉爆距离的影响。试验中主发装药和被发装药皆采用代拿买特炸药, 装药圆柱形, 直径32mm, 质量50g, 将主发装药和被发装药皆放置在内径为35mm的不同形状的管道内, 对于弯管来说, 主发装药和被

表9-9-10 弯管对殉爆的影响

管道条件	殉爆情况			
	全爆 (mm)	$\frac{2}{3}$ 爆 (mm)	$\frac{1}{2}$ 爆 (mm)	不爆 (mm)
直管	50	100	—	200
圆角半径40mm的弯管	—	—	60	—
直角弯管	—	—	—	25

发装药分别放置在弯管拐角的两边，图 9-9-5 表示了管道形状和装药放置的位置。

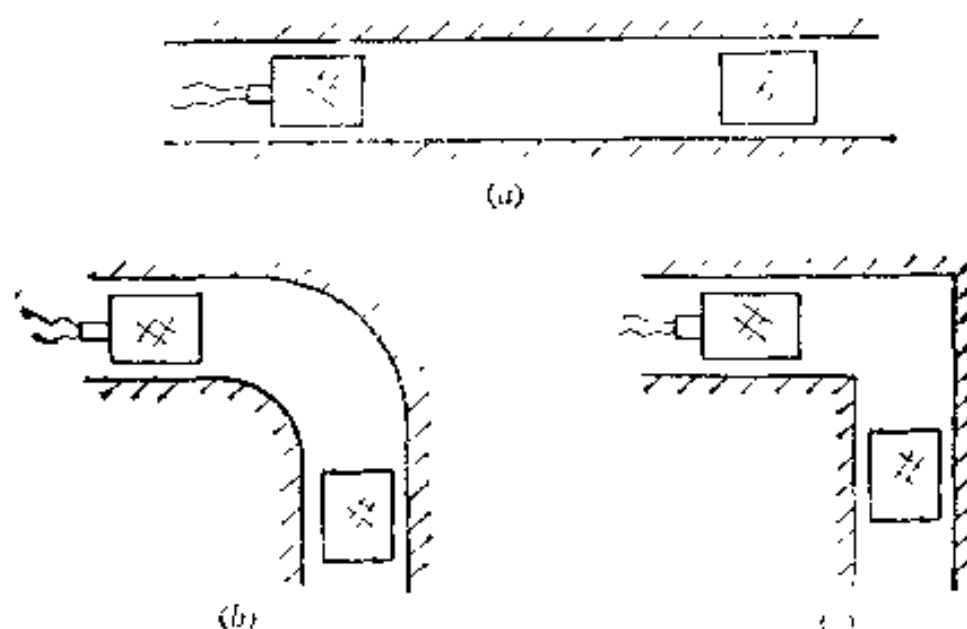


图9-9-5 不同管道形状时的装药放置

a—直管；*b*—圆角弯管；*c*—直角弯管。

试验数据表明弯管对于阻止殉爆有很大作用，并且直角弯管比圆角弯管作用要大得多。

七、装药间放置带孔钢板

当主发装药和被发装药间放置一个带孔钢板时，主发装药爆炸形成的空气冲击波只能通过钢板中间的孔道传过，随着钢板孔径的缩小，传过的冲击波能量不断减少，殉爆距离也就不断变小。图 9-9-6 表示两装药间放置带孔钢板位置的图形，试验中主发装药和

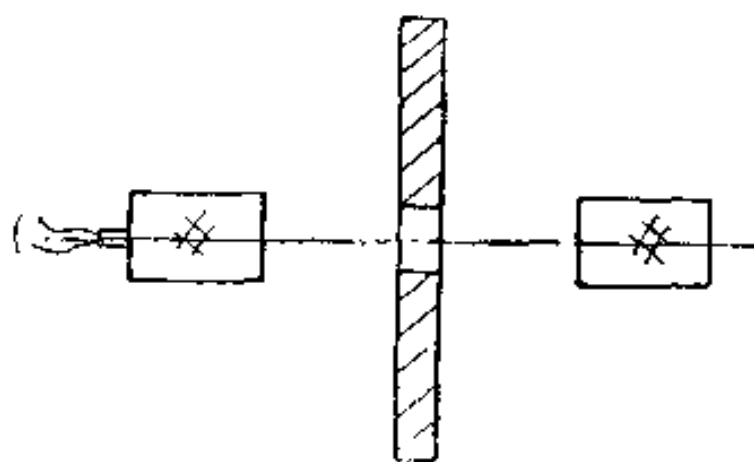


图9-9-6 两装药间放置带孔钢板的试验

被发装药皆采用代拿买特炸药，装药圆柱形，装药直径 32 mm，质量 50g，表 9-9-11 给出了不同钢板孔径时的试验数据。

表 9-9-11 钢板孔径对殉爆的影响

钢板孔径 (mm)	殉爆距离 (mm)
∞	114
64	110
48	103
32	90
16	50

试验数据表明，当钢板孔径在两倍装药直径以上时，钢板的放置对于殉爆没有什么影响，当钢板孔径与装药直径相同时，殉爆距离较比无钢板时的殉爆距离缩短 20%，当钢板孔径是装药直径的一半时，殉爆距离较比无钢板时的殉爆距离缩短 55% 以上。

八、装药放置地面

装药放置的地面对殉爆也有影响。从前面空气冲击波参数的计算已经知道，当装药放置在地面上进行爆炸时，由于地面对冲击波的反射作用，冲击波只能在半无限空间中传播，使得空气冲击波加强，因而殉爆距离增加，并且地面刚度愈大，殉爆距离增加得愈多。

表 9-9-12 表示装药放置地面对殉爆影响的情况。试验中主发装药和被发装药皆采用代拿买特炸药，装药圆柱形，装药直径 32mm，质量 50g，试验时两装药轴线放置在同一直线上。

表9-9-12 装药放置地面对殉爆的影响

放置地面条件	殉爆距离(m m)
吊挂在空中	140
放置在砂地上	110
放置在水面上	120
放置在钢板上	180

本节所介绍的数据，虽然都是在一定的试验条件下取得的，适用性不一定很强，但是试验所表明规律对研究殉爆却有十分重要的意义。

例如，在室内放置两包炸药时，为了防止两包炸药的殉爆，可以将它们放置在墙拐角的两边，并且用土块垫起，如图9-9-7所示，这样在相同的空间范围内就能够尽量减小殉爆的危险性。再如，对于两个炸药库房，用土围墙将它们隔开，并且两库房不要长面相对，这样也可以对防止殉爆起很大作用。

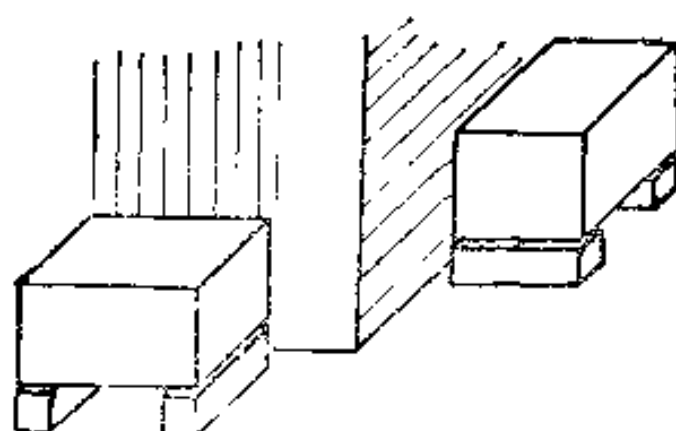


图9-9-7 室内两包炸药的放置

§ 9-10 危险建筑物(A级)设防

安全距离的确定

火药、炸药、火工品和弹药厂的危险生产工房和库房,根据危险程度制定成各个等级,对于各个等级建筑物之间以及与外部住宅、村庄、城镇等建筑物之间的距离,按照设防安全标准以及有关因素,进行了具体规定,具体规定的条文见国家“火药、炸药、弹药及火工品工厂设计安全规范”。

一、建筑物的危险等级

建筑物危险等级的划分,主要是根据建筑物内所制造、加工或贮存危险品的燃烧、爆炸性能和发生事故时的破坏能力,并且考虑到工艺加工方法、工艺防护措施和建筑物本身的抗爆、泄爆措施等因素。按照国家的规定,划分成为 A_1 、 A_2 、 A_3 、B、 C_1 、 C_2 、D (按汉语拼音字母) 七级。

1. A_1 级

高威力炸药(如黑索金、泰安、特屈儿等)或高威力混合炸药(如黑索金为主体的炸药、梯恩梯和黑索金的混合炸药等)的制造、加工、熔化、铸装等工房;

贮存上述炸药及其无金属壳制品的库房;

贮存起爆药、针刺药、击发药等的库房。

2. A_2 级

猛性炸药(如梯恩梯)或猛性混合炸药(如梯恩梯和硝酸铵混合炸药、梯恩梯和二硝基萘混合炸药等)的制造、加工、熔化、铸装等工房;

贮存上述炸药及其无金属壳制品的库房;

贮存高威力炸药、猛性炸药及其混合炸药的大、中口径炮弹、火箭弹、航空炸弹、地雷等的库房；

贮存火帽、雷管等火工品库房。

3. A₂级

硝酸炸药、黑火药、烟火药的制造、加工工房；

贮存上述炸药及其制品的库房；

贮存小口径炮弹、手榴弹等的库房。

4. B级

危险性作业或危险品暂存是在抗爆小室内或装甲防护装置内进行的；

起爆药制造由于溶剂或水中作业，而使生产危险程度显著降低的工房；

起爆药贮存在水中的工房；

较钝感炸药（如地恩梯等）的制造、加工工房和贮存库房；

贮存只装填烟火药的手榴弹、炮弹和航空炸弹的库房。

5. C₁级

无烟药在制造、贮存过程中，爆炸危险性较大，且发生爆炸破坏能力也较大的工房和库房。

6. C₂级

除C₁级以外的无烟药制造工序；

装填无烟药的药筒、火箭发动机装药、装配工房，无烟药发射药管、发射药包的装药工房；

贮存无烟药、无烟发射管、装填无烟药的药筒及火箭发动机等的库房。

7. D级

制造过程中危险性较低的作业，如硝化纤维素的生产等；

火药、炸药、火工品及弹药生产中使用的氧化剂、燃烧剂的加工工房或贮存库房；

火药、炸药、烟火药、起爆药等的理化实验室。

二、A级建筑物的设防标准

A₂级是指相当于梯恩梯威力炸药的生产工房和贮存库房，A₁级是指爆炸威力大于梯恩梯的炸药生产工房和贮存库房，A₃级是指爆炸威力小于梯恩梯的炸药生产工房和贮存库房，A₁、A₂、A₃级的建筑物合称A级建筑物。本节只介绍A级建筑物设防安全距离的制定，表9-10-1给出了A级

表9-10-1 A级建筑物的设防标准

设防距离类型		建筑物类型	相邻建筑物	设防标准
危险区内 部距离	危险生产区	A级建筑物	其它建筑物	五
	总库房区	A级总库房	其它危险品总库房	不殉爆、不殉燃
危险区 外部距离	厂内	A级建筑物	本厂住宅区边缘 本厂独立的机加区、总仓库区、靶场区的建筑物	二 二+三-
	厂外	A级建筑物	国家铁路 县以上公路 110kV高压输电线路 35kV高压输电线路 零星住户边缘 村庄边缘、铁路车站边缘 小于10万人口的城镇边缘 大于10万人口的城镇边缘	二+ 二+三- 二+三- 三+ 二+三- 二 基本无破坏 无破坏

建筑物设防标准，表中设防标准一栏中，中文数字二、三、五分别表示二级玻璃破坏，三级轻度破坏和五级严重破坏，二+、三-、三+分别表示二级中的强破坏、三级中的弱破坏和

三级中的强破坏。

设计建造A级建筑物时，必须考虑表中设防标准的规定，目的是一旦发生爆炸事故，便于把相邻建筑物的破坏程度控制在允许范围之内，尽量减少国家和人民的损失。

三、危险生产区

火药、炸药、火工品和弹药厂都应该根据生产特性、危险程度进行分区。

危险生产区布置要合理，不应使工厂的主要人流、货流通过。在山区对于危险生产区的布置要合理地利用地形，应该考虑到人员的疏散和有害气体的扩散，危险生产区不应该布置在山坡陡峻的狭窄沟谷中。

危险生产区内部布置应符合工艺生产流程，避免危险品的往返运输和交叉。同一类生产分类的生产工房和库房应该尽量集中，存药量大或危险性较大的工房和库房，宜布置在危险生产区的边缘，危险生产工房之间尽量避免建筑物长面相对。

危险生产区内A级建筑物应该设有土围墙，只是在A₁级建筑物内存药量小于100kg，A₂级建筑物内存药量小于200kg，A₃级建筑物内存药量小于250kg时，可以允许不设置防护土围。

危险生产区周围应该设置围墙，围墙高度不低于2.0m，围墙距危险生产工房的距离不宜小于25m。

1. A级建筑物的内部距离

在危险生产区内，建筑物之间的距离称为内部距离。

按照设防标准规定，A级建筑物内部距离的设防标准是五级严重破坏，即一旦A级建筑物发生爆炸事故时，允许危

险生产区内相邻建筑物遭受五级严重破坏。由于 A_2 级建筑物是相当于梯恩梯威力炸药的工房和库房，当单方设置土围墙时，允许五级严重破坏所对应的设防安全距离，可以按照公式 (9-8-4) 确定

$$R_{A_2} = \begin{cases} 1.2\omega^{1/2} & \text{当 } \omega < 6400\text{kg} \\ 2.5\omega^{1/2.4} & \text{当 } \omega \geq 6400\text{kg} \end{cases}$$

式中 ω —— A_2 建筑物内的存药量 (kg)；

R_{A_2} —— A_2 建筑物的内部距离 (m)。

当单方有土围墙时， A_2 级建筑物的内部距离确定后，对于单方有土围墙时 A_1 级建筑物和 A_3 级建筑物的内部距离，可以分别按照以下二式计算

$$R_{A_1} = 1.4R_{A_2}$$

$$R_{A_3} = 0.9R_{A_2}$$

表9-10-2给出了 A_2 级建筑物在不同存药量时，在危险生产区内距其它建筑物的最小允许距离。

表9-10-2 R_{A_2} 值 表

ω (kg)	R_{A_2} (m)	ω (kg)	R_{A_2} (m)
< 100	12	1200	42
200	17	1400	46
300	21	1600	50
400	25	1800	53
500	28	2000	55
600	30	2200	57
700	32	2400	59
800	34	2600	61
900	36	2800	63
1000	38	3000	65

(续)

ω (kg)	R_{A_2} (m)	ω (kg)	R_{A_2} (m)
3200	67	13500	131
3400	69	14000	133
3600	71	14500	135
3800	73	15000	137
4000	75	15500	139
4200	77	16000	141
4400	79	16500	143
4600	81	17000	145
4800	83	17600	147
5000	85	18200	149
5200	87	18800	151
5400	89	19400	153
5600	91	20000	155
5800	92	20800	167
6100	94	21200	159
6400	96	21800	161
6700	98	22600	163
7000	100	23300	165
7300	102	24100	167
7600	104	24900	169
8000	106	25700	171
8400	108	26500	173
8800	110	27000	175
9200	112	28000	179
9600	114	29000	183
10000	116	30000	185
10400	118	31000	187
11000	121	32000	189
11500	123	33000	191
12000	125	34000	193
12500	127	35000	195
13000	129	36000	197

(续)

ω (g)	R_{A_2} (m)	ω (kg)	R_{A_2} (m)
37000	199	52000	229
38000	201	54000	233
40000	205	56000	237
42000	209	60000	245
44000	213	65000	253
46000	217	70000	261
48000	221	75000	269
50000	225	80000	277

对于土围墙的作用，国家试行“规范”中规定：当两个建筑物双方都没有土围墙时，内部设防安全距离是单方有土围墙时内部设防安全距离的二倍；当两个建筑物双方都有土围墙时，内部设防安全距离是单方有土围墙时内部设防安全距离的60%。以A₂级建筑物单方有土围墙时的内部距离 R_{A_2} 为基准，表9-10-3给出了有、无土围墙时各种情况下，A级建筑物在危险生产区内距其它建筑物的最小允许距离。

表9-10-3 A级建筑物的内部距离

内部距离 危险等级	有无土 围墙	两个建筑物	两个建筑物	两个建筑物
		均无土围墙	中一个有土围墙	均有土围墙
A ₁		$2.8R_{A_2}$	$1.4R_{A_2}$	$0.84R_{A_2}$
A ₂		$2.0R_{A_2}$	R_{A_2}	$0.60R_{A_2}$
A ₃		$1.8R_{A_2}$	$0.9R_{A_2}$	$0.54R_{A_2}$

2. A级建筑物的外部距离

危险生产工房或危险品存放库房与危险区外部其它建筑

物的距离，称为外部距离。

按照设防标准规定，A级建筑物外部距离的设防标准由表9-10-1给出。其中A₂级建筑物距本厂职工住宅区边缘的距离，按照二级玻璃破坏其值由公式（9-8-5）确定

$$R = 23\omega^{1/2.3}$$

式中 ω —— A₂级建筑物内的存药量 (kg)；

R —— A₂级建筑物距本厂住宅区边缘的距离 (m)。

当A₂级建筑物距本厂住宅区边缘的外部距离确定后，A₁级建筑物和A₃级建筑物距本厂住宅区边缘的距离，可以分别按照以下二式计算

$$R_1 = 1.25 R$$

$$R_3 = 0.9 R$$

表9-10-4制定了由（9-8-5）式和以上二式所确定的数据。为了使用方便，制表时将药量分成了等级范围，并且把计算得到的距离取成为规整的数字。

表9-10-4 A级建筑物距本厂住宅区边缘的外部距离 R

存药量 (Mg)	>40	>30	>20	>10	>5	>2	
	<80	<40	<30	<20	<10	<5	<2
A ₁			1250	1100	850	650	450
A ₂	1400	1100	1000	850	650	600	350
A ₃		1000	900	750	600	450	300

当A级建筑物距本厂住宅区的外部距离确定后，A级建筑物距危险生产区外其它建筑物的距离，可以根据表9-10-1中给出的设防标准，按照表9-10-4的数据乘以一定的系数进行确定，表9-10-5制定了这个比例系数，在求具体数值时也

表9-10-5 A级建筑物的外部距离

相邻建筑物		外部距离
厂内	本厂住宅区边缘	R
	本厂独立的机加区、总仓库区、靶场区的建筑物	$0.6R$
厂外	国家铁路	$0.7R$
	县以上公路	$0.5R$
	110kV高压输电线路	$0.6R$
	35kV高压输电线路	$0.3R$
	零星住户边缘	$0.6R$
	村庄边缘、铁路车站边缘	R
	小于10万人口的城镇边缘	$1.5R$
	大于10万人口的城镇边缘	$3.0R$

可以取成规整的数字,并且A级建筑物的外部距离不应小于200m。表9-10-5中的 R 是表9-10-4中的数值,当危险生产工房是 A_1 、 A_2 、 A_3 中的那一级时,就取表9-10-4中相应级的外部距离作为表9-10-5中的 R 。

〔例9-14〕设计梯恩梯50/黑索金50铸装工房,炸药溶化、浇铸、生产流程中最大存药量为 $3 \times 10^8 \text{kg}$,问这个工房与危险生产区内建筑物和危险生产区外其它各种建筑之间,按照设防标准要求所应满足的最小允许距离。

解

按照国家“建筑物危险等级”规定,梯恩梯50/黑索金50铸装工房属于 A_1 级建筑物,工房内存药量达 $3 \times 10^8 \text{kg}$ 时工房周围应该修建土围墙。

(1) 梯恩梯50/黑索金50铸装工房的内部距离

按照表9-10-2查得,当存药量 $3 \times 10^8 \text{kg}$ 时对应的 R_{A_2} 值

$$R_{A_2} = 65 \text{m}$$

再按照表9-10-3查得，对应于 R_{A_2} 值， A_1 级建筑物的内部距离。

当相邻建筑物无土围墙时

$$R_{A_1} = 1.4 R_{A_2} = 91 \text{ m}$$

当相邻建筑物也有土围墙时

$$R_{A_1} = 0.84 R_{A_2} = 55 \text{ m}$$

(2) 梯恩梯50/黑索金50铸装工房的外部距离

按照表9-10-4查得，存药量 $3 \times 10^3 \text{ kg}$ 的 A_1 级建筑物，距本厂住宅区边缘的最小允许距离为

$$R = 650 \text{ m}$$

按照表9-10-5的关系，可以计算得所建工房距危险生产区外各种建筑物间的最小允许距离。

距本厂独立的机加区、总仓库区、靶场区建筑物

$$0.6 \times 650 = 390$$

取作 $R = 400 \text{ m}$

距国家铁路

$$0.7 \times 650 = 455$$

取作 $R = 450 \text{ m}$

距县以上公路

$$0.5 \times 650 = 325$$

取作 $R = 300 \text{ m}$

距 110kV 高压输电线路

$$0.5 \times 650 = 325$$

取作 $R = 300 \text{ m}$

距 35kV 高压输电线路

$$0.3 \times 650 = 195$$

取作 $R = 200 \text{ m}$

距零星住房边缘

$$0.6 \times 650 = 390$$

取作 $R = 400 \text{ m}$

距村庄边缘、铁路车站边缘

$$R = 650 \text{ m}$$

距小于10万人口的城镇边缘

$$1.5 \times 650 = 975$$

取作 $R = 1000 \text{ m}$

距大于10万人口的城镇边缘

$$3 \times 650 = 1950$$

取作 $R = 2000 \text{ m}$

四、危险品总库房区

危险品总库房区应布置在工厂偏僻地段，在山地宜将总库房区布置在有自然屏障的山沟或丘陵地带。

总库房区的平面布置，不宜采用长面相对的布置形式。各种危险品均宜采用单独品种专库存放，危险性较大或存药量较大的总库房，不宜布置在库区出口附近。

A、B级总库房应设有土围墙，C级总库房宜设土围墙，D级总库房可以不设土围墙。

总库房区四周应设有围墙，围墙高度不小于2.5m，围墙距相邻总库房的距离不小于25m。

1. A级总库房的内部距离

按照设防标准规定，在总库房区内A级总库房距其它总库房的设防标准是不殉燃、不殉爆。

由于对于殉燃、殉爆，影响因素很多，制定殉爆设防安

全距离时，必须充分考虑各种因素，不宜规定在接近殉爆的边缘状态。在两边都有土围墙的情况下，A级总库房的殉爆设防安全距离可以按下式计算

$$R = K \omega^{1/3}$$

式中 ω ——A级总库房内的存药量 (kg)；

R ——A级总库房的内部距离 (m)；

K ——殉爆设防安全距离公式系数，见表9-10-6。

表9-10-6 几种炸药的K值

炸药种类	K
梯恩梯	1.9
黑索金	2.2
特屈儿	2.2
泰安	2.8~3.2

表9-10-7制定了有土围的A级总库房距有土围的相邻总库房间的最小允许距离，当相邻总库房无土围墙时，表中数据应当增加一倍。

表9-10-7 有土围的A级总库房距有土围的相邻总库房间的内部距离

存药量(Mg)		>150	>100	>50	>30	>20	>10
R(m)		<=200	<=150	<=100	<=50	<=30	<=20
存药种类							
A ₁	黑索金、特屈儿类型炸药及无金属壳制品			100	80	70	60
	泰安炸药及无金属壳制品				100	90	80
							70

(续)

存药种类		存药量 (Mg)						
		$R(m)$	>150	>100	>50	>30	>20	>10
			≤ 200	≤ 150	≤ 100	≤ 50	≤ 30	≤ 20
A ₂	梯恩梯炸药及无金属壳制品, 大于30毫米口径的榴弹、迫弹、穿甲弹、破甲弹、碎甲弹、火箭弹、航空炸弹、地雷、爆破筒			100	90	70	60	50
	传爆管				100	80	70	60
	枪弹底火、火帽、雷管、带雷管的发火件、导爆索						90	80
								70
A ₃	硝酸炸药、烟火药及其压制品	100	90	80	70	60	50	40
	黑火药及其制品、手榴弹		100	90	70	60	50	40
	37毫米炮弹			100	80	70	60	50

2. A级总库房的外部距离

按照设防标准规定, A级总库房距库区外各种建筑物的最小允许距离, 仍然按表9-10-1给出的设防标准。

不过, 与危险生产区中A级工房的设防标准相比, 库区中A级总库房的设防标准取为破坏等级的上界, 也就是说在同样存放药量下, A级总库房的外部距离比A级工房的外部距离小一些, 但是最小值不能低于200 m, 其关系约为

$$R_{A\text{级总库房}} = 0.85 R_{A\text{级工房}}$$

表9-10-8制定了A级总库房距本厂住宅区边缘的最小允许距离。对于A级总库房距库区外其它各种建筑物的最小允许距离, 可以根据表9-10-8中的数据, 按照表9-10-5制定的比例关系进行确定。

表9-10-8 A级总库房距本厂住宅区边缘的外部距离 R

危险等级	$R(m)$	存药量(Mg)					
		>150	>100	>50	>30	>20	>10
		≤ 200	≤ 150	≤ 100	≤ 50	≤ 30	≤ 20
A_1				1600	1250	1100	950
A_2			1500	1300	1000	800	700
A_3		1500	1350	1150	900	750	650

〔例9-15〕 修建存放手榴弹产品的总库房，计划最大存药量 $5 \times 10^3 \text{kg}$ ，问这个库房与库区内其它库房和库区外各种建筑物之间，按照设防标准要求所应满足的最小允许距离。

解

按照国家“建筑物危险等级”规定，手榴弹贮存库房属于 A_3 级建筑物，根据A级总库房的要求，手榴弹总库房周围应该设有土围墙。

(1) 手榴弹总库房的内部距离

按照表 9-10-7 查得，存药量 $5 \times 10^3 \text{kg}$ 时的内部距离

$$R = 40 \text{ m}$$

(2) 手榴弹总库房的外部距离

按照表9-10-8查得，存药量 $5 \times 10^3 \text{kg}$ 的 A_3 级总库房，距本厂住宅区边缘的最小允许距离为

$$R = 500 \text{ m}$$

按照表9-10-5的关系，可以计算出手榴弹总库房距库区外各种建筑物的最小允许距离。

距本厂生产区、靶场区建筑物

$$R = 0.6 \times 500 = 300 \text{ (m)}$$

距国家铁路

$$R = 0.7 \times 500 = 350 \text{ (m)}$$

距县以上公路

$$R = 0.5 \times 500 = 250 \text{ (m)}$$

距 110kV 高压输电线略

$$R = 0.5 \times 500 = 250 \text{ (m)}$$

距 3.7kV 高压输电线路

$$0.3 \times 500 = 150 \text{ 取作 } R = 200 \text{ m}$$

距零星住户边缘

$$R = 0.6 \times 500 = 300 \text{ (m)}$$

距村庄边缘、铁路车站边缘

$$R = 500 \text{ m}$$

距小于 10 万人口的城镇边缘

$$R = 1.5 \times 500 = 750 \text{ (m)}$$

距大于 10 万人口的城镇边缘

$$R = 3 \times 500 = 1500 \text{ (m)}$$

五、销 毁 场

销毁场的用途是销毁残、废、次品炸药和药柱。

销毁场应当布置在生产区以外，并且有利于安全的单独场地，例如山沟、丘陵、盆地、河滩等处，销毁场的地表面应当选择不含有石块的土质地。

销毁场内应当设有掩体，位置布置在常年主导风向的上风方向，出、入口背向销毁作业场地，距作业场边缘距离不应小于 50m。

销毁场四周应设有围墙，围墙距作业场地和掩体等边缘距离不宜小于 20m。

销毁场距场外建筑物的距离不应小于 200m。

火、炸药的销毁，应当采用烧毁法，尽量不采用炸毁法。对于带有金属壳的弹药，应当尽可能地把炸药从壳体里拆除出来。对于无法拆除的弹药也要尽量采用烧毁法。烧毁时，把炸药铺成长条状，并且药层不宜太厚，从下风方向进行点燃。

炸药一次最大销毁量不应超过表 9-10-9 中所规定的数量。

表9-10-9 一次最大销毁量

销毁炸药种类	一次最大销毁量(kg)
梯恩梯	500
黑索金	200
泰安	100
胶质炸药	100
火工品	2
起爆药	2

当无法采用烧毁，而必须采用炸毁法进行销毁时，场地必须具有允许爆炸弹药以及防护杀伤破片的条件。当销毁场不能满足弹药销毁的安全条件时，绝不能轻易进行，可在符合该项产品试验的靶场中进行销毁。

第十章 杀伤作用

带壳体的装药爆炸后形成的破片对有生目标的破坏作用，称为杀伤作用。

常规杀伤弹药在空气中爆炸时，其作用主要有两种，一种是利用破片的杀伤作用来杀伤、摧毁目标，另一种是利用爆炸空气冲击波的超压来摧毁目标。这两种作用的破坏机理不同，对于爆炸空气冲击波来说，只要知道冲击波超压随着距离的衰减规律，那么就能够确定在不同距离上空气冲击波的破坏效果。但是，对于杀伤破片来说，必须知道破片的质量和速度，也就是说必须知道破片的动能以及动能随距离变化的规律，才能确定破片的杀伤效果。由于破片在空间的分布是不连续的，在距爆炸点相同的距离上，破片碰上了才能杀伤，破片碰不上就不会杀伤。因而确定破片的杀伤效果，只是确定在不同距离上破片杀伤的可能性。

由于破片衰减比冲击波衰减缓慢，因而破片的杀伤范围比冲击波破坏范围大得多。

对于从事生产、使用弹药的人员来说，在技安上必须充分考虑到这两种破坏作用的效果。尤其是在销毁大量的弹药和其它带壳体的装药时，必须充分估计到在冲击波对人员已不发生危险的安全距离上，仍然不是安全的。因此，有必要对破片杀伤作用的机理进行了解，以满足安全生产和使用的需要。

§ 10-1 杀伤弹爆炸的基本现象

一般的常规弹药是由壳体、炸药、引信和雷管等组成的。其有壳装药的爆炸过程与无壳装药爆炸有所不同。当弹丸爆炸时，炸药装药的爆炸能量既用于使壳体变形、破坏，随着壳体的膨胀、破裂、形成许多破片，并使破片加速；同时又用于爆轰产物的膨胀、飞散和形成空气冲击波。由于壳体的存在，延迟了圆周侧向的稀疏波进入炸药装药的时间，因此，可以减少装药的能量损失，提高了装药的能量利用率。图10-1-1所示为弹丸爆炸过程示意图。

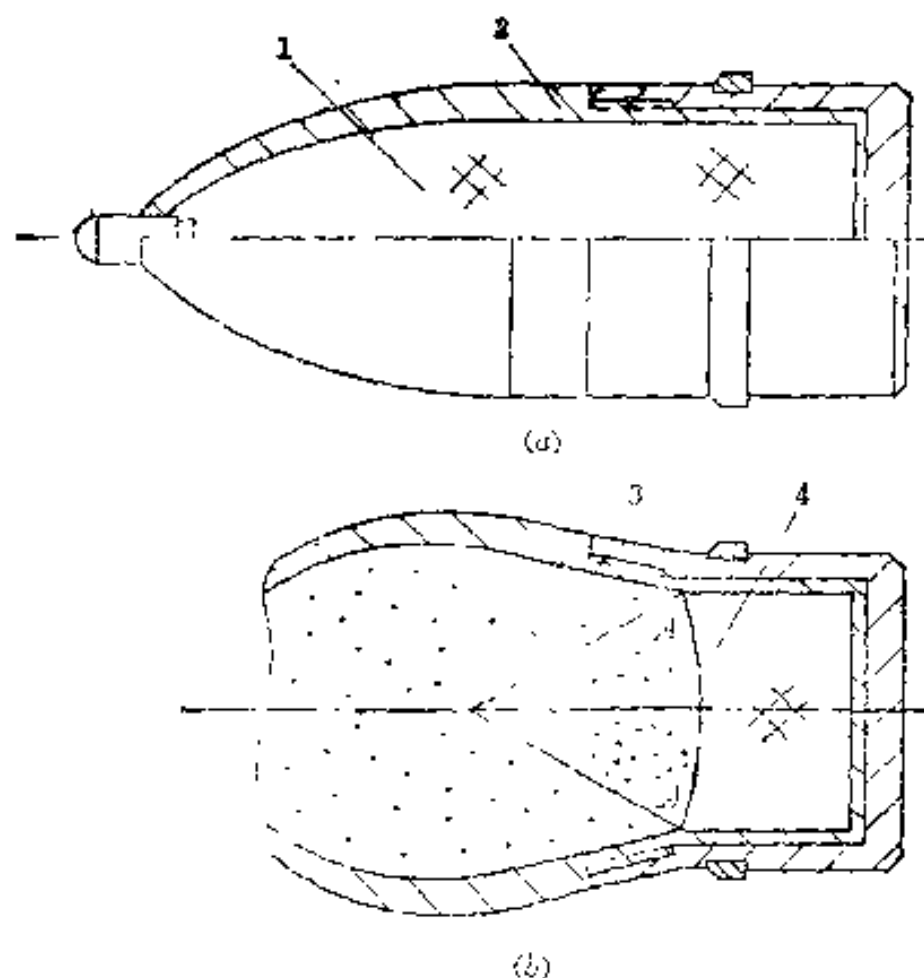


图10-1-1 弹丸爆炸过程示意图

a—爆炸前；b—爆炸过程中。

1—炸药；2—壳体；3—稀疏波；4—爆轰波。

引信起爆后,爆轰波沿口部以稳定爆速向右传播。在爆轰波后面紧跟着稀疏波。爆轰波在传播过程中,以大约 $(10\sim 30)\times 10^9\text{Pa}$ 的压力冲击壳体,在冲击点A处压力达到最大,但由于稀疏波迅速到达,压力又迅速下降。爆轰波传到弹底时,弹丸内部的炸药装药爆轰结束。壳体在爆轰产物作用下,从冲击点开始沿内表面产生塑性变形,同时壳体迅速地向外膨胀。壳体出现裂缝后,爆轰产物即通过裂缝漏泄出去,作用于壳体内表面的压力迅速下降。壳体裂缝全部形成后,即以破片的形式,以所获得的一定初速向四周飞散。

根据典型杀伤弹爆炸过程的X光照片以及一些有关试验可以看出,整体式弹丸爆炸过程具有如下一些特点。

弹丸炸药装药由起爆到爆轰结束所经过的时间,与壳体由开始变形至全部破裂成破片所经过的时间相比,是很短暂的,约为后者的 $\frac{1}{4}$ 。以122mm榴弹为例,炸药装药由起爆到爆轰结束约需 $60\mu\text{s}$,而壳体由塑性变形开始至全部形成破片约需 $250\mu\text{s}$ 。

弹丸在爆炸过程中,壳体要承受很大的冲击压力。例如,TNT炸药爆炸时,冲击点的压力可达 $15\times 10^9\text{Pa}$ 以上,此压力超过中碳钢强度约25倍。在静载条件下,破坏最先发生在材料最薄弱的环节(如应力集中的地方),而在爆炸载荷作用下,破坏则不一定首先发生在最薄弱的地方。

通过试验表明,低碳钢制成的壳体膨胀到 $r_p=(1.6\sim 2.1)r_0$ 时发生破裂(r_p 是壳体破裂时的半径, r_0 是壳体初始半径);中碳钢制成的壳体膨胀到 $r_p=1.84r_0$ 时发生破裂;铜制壳体膨胀到 $r_p>2.6r_0$ 时才发生破裂。

弹丸在爆炸过程中,由于爆轰产物的作用,壳体向外膨

胀的速度很高,对于装填梯恩梯炸药的壳体,膨胀速度最小在 $500 \sim 1000 \text{ m/s}$ 以上,装填高威力炸药的壳体,膨胀速度在 2000 m/s 以上。壳体破碎瞬间的膨胀速度即是破片的初速度。壳体破碎所形成的破片,在爆轰产物作用下将继续加速。破片受到的空气阻力与爆轰产物对破片的推力平衡时,破片速度达到最大,此后破片速度随着距离的增加逐渐衰减。

因为杀伤弹药是利用爆炸产生的高速金属破片,对人员及软目标提供杀伤破坏效果。所以,研究弹药破片及其形成的机理有助于大幅度提高杀伤弹药的威力。从60年代后期起,国外大力研究脆性较大的高破片率弹体钢(抗压强度为 $(7 \sim 14) \times 10^8 \text{ Pa}$),要求它既有足够的韧性,抵抗搬运和发射的应力,又能提供尺寸小于弹体厚度的有效破片。

大量的研究表明,炸药装药爆轰后,在爆轰波作用下,不但在冲击点承受很大压力,而且内部的高压爆轰产物要膨胀向外扩张,使弹体内部在切向拉伸应力作用下发生径向拉伸开裂,进而裂纹向弹体内、外表面扩展。如果材料塑性较好,裂纹变钝,形成空隙,不能再进一步扩展,代之以剪切破碎;如果是脆性材料,裂纹就继续扩展。又由于弹体内部处于高压流体动态应力区,裂纹遇阻,发生剪切破碎,结果在径向拉伸破碎和剪切破碎结合,导致了弹体沿壁厚的破碎。通常认为剪切裂纹的方向倾斜于轴向,径向裂纹平行于轴向。

当应力波传入壳体后,壳体内质点要产生同方向的运动。当质点运动速度大于材料所允许的质点临界速度时,壳体出现裂纹。

按照动量守恒

$$\sigma_s = \rho c u_s$$

式中 σ_c ——临界应力；
 c ——应力波速度；
 u_c ——质点临界速度。

表10-1-1列出了几种材料的 σ_c 和 u_c 值。

表10-1-1 几种材料的 σ_c 、 u_c 值

材 料	$\sigma_c (\text{Pa} \times 10^8)$	$u_c (\text{m/s})$	备 注
铝合金	1.02	61.5	相当于T2
铜	2.98	80.1	
青铜	2.17	65.6	
1020钢	1.12	25.6	相当于20Mn
4030钢	3.66	72.4	相当于30CrMo

裂纹产生后，要向外扩展，裂纹在钢中的传播速度约为 1550 m/s 。裂纹传播的准则是裂纹出现后不能传入压缩区，裂纹的两边立即出现卸载波，在卸载区内不会出现新的裂纹。只有当裂纹在壳体表面全部沟通相交时，破片才全部形成了。

§ 10-2 杀伤破片的计算

前已述及，既然杀伤弹药是依靠破片本身所获得的动能对目标进行杀伤破坏的。那么，当杀伤弹药爆炸后所形成的破片数量、大小及破片所具有的速度如何呢？下面来讨论这些问题。

一、破片飞散速度的计算

破片飞散速度通常采用格尼提出的公式，根据弹药不同的几何形状，格尼公式有下列几种形式。

1. 对称几何形状

a. 平面层状结构 (图10-2-1 a)

$$\frac{u_0}{\sqrt{2E_g}} = \left[\frac{M}{m} + \frac{1}{3} \right]^{-1/2} \quad (10-2-1)$$

b. 圆柱形壳体 (图10-2-1 b)

$$\frac{u_0}{\sqrt{2E_g}} = \left[\frac{M}{m} + \frac{1}{2} \right]^{-1/2} \quad (10-2-2)$$

c. 球形壳体 (图10-2-1 c)

$$\frac{u_0}{\sqrt{2E_g}} = \left[\frac{M}{m} + \frac{3}{5} \right]^{-1/2} \quad (10-2-3)$$

2. 非对称几何形状

a. 一端开口的层状结构 (图10-2-1 d)

$$\frac{u_0}{\sqrt{2E_g}} = \left[\frac{\left(1 + 2\frac{M}{m}\right)^3 + 1}{6\left(1 + \frac{M}{m}\right)} + \frac{M}{m} \right]^{-1/2} \quad (10-2-4)$$

b. 非对称的层状结构 (图10-2-1 e)

$$\frac{u_0}{\sqrt{2E_g}} = \left[\frac{1 + A^3}{3(1 + A)} + \frac{N}{m} A^2 + \frac{M}{m} \right]^{-1/2} \quad (10-2-5)$$

$$A = \frac{1 + 2\frac{M}{m}}{1 + 2\frac{N}{m}} \quad (10-2-6)$$

以上各式中符号说明如下:

u_0 ——破片初速, 单位 m/s;

E_g ——单位质量炸药的动能, 单位 J/kg;

$$E_s = E - E_r \quad (10-2-7)$$

其中 E ——单位质量炸药的化学能,

E_s ——单位质量炸药残余在爆轰产物中的内能。

$\frac{M}{m}$ ——壳体金属质量与炸药质量之比;

$\frac{N}{m}$ ——限制件质量与炸药质量之比。

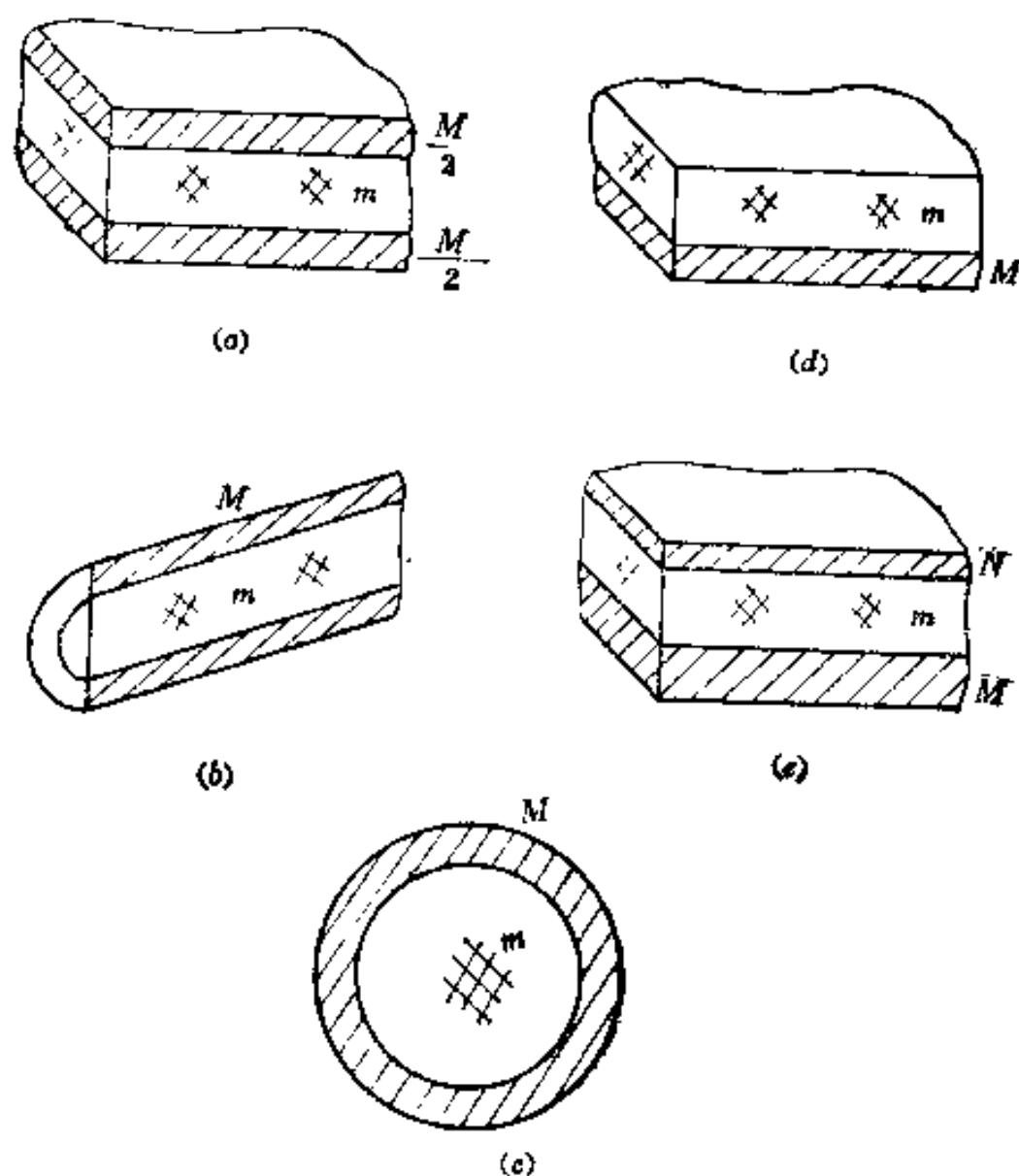


图10-2-1 适合于格尼方程的几何形状

a — 平面层状结构; b — 圆柱形壳体结构; c — 球形壳体结构;
d — 一端开口的层状结构; e — 非对称的层状结构。

就常用的圆柱形壳体导出格尼公式。

假定：（1）爆轰是瞬时的；

（2）炸药能量除用来变为壳体动能和爆轰产物动能外，还有残留在爆轰产物中的内能；

（3）爆轰产物的膨胀速度按线性分布。

按照第二点假定，对于圆柱形壳体，装药爆炸过程中的能量守恒方程为

$$m(E - E_r) = \frac{1}{2} M u_0^2 + \frac{1}{2} m v^2 \quad (10-2-8)$$

再根据第三点假定

$$v = \frac{1}{2} u_0$$

将之代入（10-2-8）式为

$$m(E - E_r) = \frac{1}{2} u_0^2 \left(M + \frac{m}{2} \right)$$

令 $E_g = E - E_r$ ，从而得到破片初速公式

$$u_0 = \sqrt{2E_g} \sqrt{\frac{m/M}{1 + \frac{1}{2} \frac{m}{M}}} \quad (10-2-9)$$

式中 $\sqrt{2E_g}$ 称为格尼系数，量纲为 m/s。

由（10-2-9）式可以清楚看出， m 、 M 是与装药初始条件有关的已知量，假若能够知道了 $\sqrt{2E_g}$ 值，马上就可以计算出破片初速 u_0 。

由于炸药爆炸加速破片后，残余在爆轰产物中的内能是无法确定的，因而直接从 $E - E_r$ 计算 E_g 很困难。下面，采用工程计算的方法，把 $\sqrt{2E_g}$ 与炸药的初始参数联系起来，以便于 $\sqrt{2E_g}$ 的计算。

按照康姆莱特等人计算爆压和爆速的公式, 可以把爆压和爆速写成炸药的示性数 φ 和装填密度 ρ_0 的函数, 即

$$\left. \begin{aligned} p &= K \varphi \rho_0^2 \\ D &= a \varphi^{1/2} (1 + b \rho_0) \end{aligned} \right\} \quad (10-2-10)$$

对于 $\sqrt{2E_g}$ 来说, 它表示炸药化学能转变成弹、药有效动能的部分, 与炸药的标志量 p 和 D 一样, 必然也能够表示成为 φ 和 ρ_0 的函数。

按照 (10-2-10) 第一个表达式可以得到

$$\sqrt{\varphi \rho_0} = \sqrt{K \frac{p}{\rho_0}}$$

此式恰好具有速度的量纲。

由于 $\sqrt{\varphi \rho_0}$ 的量纲与 $\sqrt{2E_g}$ 的量纲相同, 我们近似把 $\sqrt{2E_g}$ 处理成为 $\sqrt{\varphi \rho_0}$ 的线性函数, 写成

$$\sqrt{2E_g} = A + B \sqrt{\varphi \rho_0} \quad (10-2-11)$$

利用最小二乘法, 通过对60种单质炸药和混合炸药的计算, 确定系数

$$A = 0.739, \quad B = 0.435$$

因而格尼系数可按下式计算

$$\sqrt{2E_g} = (0.739 + 0.435 \sqrt{\varphi \rho_0}) \times 10^3 (\text{m/s}) \quad (10-2-12)$$

公式 (10-2-12) 中的 φ 值, 按照下列方法计算。对于 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2\text{N}_4$ 炸药

$$\varphi = NM^{1/2}Q^{1/2} \quad (10-2-13)$$

当 $c \leq 2.5 \div -\frac{b}{2}$ 时

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{b + 2c + 2d}{48a + 4b + 64c + 56d} \\
 M &= \frac{88c + 56d + 8b}{b + 2c + 2d} \\
 Q &= \frac{\left[120.9b + 197.7 \left(c + \frac{b}{2} \right) \right] \times 10^6 - Q_{PR}}{12a + b + 16c + 14d}
 \end{aligned}
 \tag{10-2-14}$$

当 $c = 2c + \frac{b}{2}$ 时

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{b + 2c + 2d}{48a + 4b + 64c + 56d} \\
 M &= \frac{48a + 4b + 64c + 56d}{b + 2c + 2d} \\
 Q &= \frac{[120.9b + 395.4a] \times 10^6 - Q_{PR}}{12a + b + 16c + 14d}
 \end{aligned}
 \tag{10-2-15}$$

式中 Q_{PR} 是炸药的定压生成热，单位 J/mol 可按表 4-4-1 查得。

对于由几种单质炸药组成的混合炸药，或者是对于含有惰性添加物和铝粉的混合炸药，其 φ 值可以按照各爆炸组分 φ 值的质量加和进行计算

$$\varphi = \sum \varphi_i \omega_i \tag{10-2-16}$$

式中 φ_i 是各爆炸组分的 φ 值， ω_i 是各爆炸组分的质量百分数。

因而，当知道了弹丸所装填炸药的组分、装填密度、装药质量以及壳体金属的质量后，就可以利用以上各式计算出

弹丸爆炸后所形成破片的初速。

〔例10-1〕 试计算122mm榴弹爆炸后破片的初速（已知弹丸壳体质量为21.5kg，装药梯恩梯密度 $\rho_0=1.48\text{g/cm}^3$ ，质量3.5kg）。

解

已知 $\varphi_{\text{TNT}}=9.896$

按公式 (10-2-12)

$$\sqrt{2E_s}=0.739+0.435\sqrt{9.896\times 1.48}=2.403(\text{km/s})$$

由公式 (10-2-9) 计算出破片初速

$$\begin{aligned} u_0 &= \sqrt{2E_s} \sqrt{\frac{m/M}{1+0.5\frac{m}{M}}} \\ &= 2.403 \sqrt{\frac{3.5/21.5}{1+0.5\times\frac{3.5}{21.5}}} \\ &= 0.953(\text{km/s}) \end{aligned}$$

〔例10-2〕 试计算130mm火箭榴弹爆炸后破片初速（已知战斗部壳体金属质量11.44kg，装药梯恩梯密度 $\rho_0=1.5\text{g/cm}^3$ ，质量3.24kg）。

解

已知 $\varphi_{\text{TNT}}=9.896$

$$\sqrt{2E_s}=0.739+0.435\sqrt{9.896\times 1.50}=2.415(\text{km/s})$$

$$\text{又 } \frac{m}{M}=\frac{3.24}{11.44}=0.28322$$

破片初速

$$u_0=2.415\sqrt{\frac{0.28322}{1+0.5\times 0.28322}}=1.203(\text{km/s})$$

〔例10-3〕 有一钢质圆筒，内径为50.8mm，外径为76.2mm，高为330.2mm；内装梯恩梯炸药， $\rho_0=1.58\text{ g/cm}^3$ 。试计算爆炸后产生破片的初速。

解 钢筒壳体的体积和质量为

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{\pi}{4} (R^2 - r^2) h \\ &= 0.7854 \times (7.62^2 - 5.08^2) \times 33.02 \\ &= 836.576 (\text{cm}^3) \end{aligned}$$

$$M = \rho V_1 = 7.8 \times 836.576 = 6525.29 (\text{g})$$

$$\begin{aligned} \text{又 } V_2 &= \frac{\pi}{4} r^2 h = 0.7854 \times 5.08^2 \times 33.02 \\ &= 669.261 (\text{cm}^3) \end{aligned}$$

$$m = \rho_0 V_2 = 1.58 \times 669.261 = 1057.43 (\text{g})$$

$$\text{故 } \frac{m}{M} = \frac{1057.43}{6525.29} = 0.16205$$

$$\text{已知 } \varphi_{\text{TN1}} = 9.896$$

$$v \sqrt{2E_g} = 0.739 + 0.435 \sqrt{9.896 \times 1.58} = 2.459 (\text{km/s})$$

破片初速

$$u_0 = 2.459 \sqrt{\frac{0.16205}{1 + 0.5 \times 0.16205}} = 0.952 (\text{km/s})$$

〔例10-4〕 试计算130/58岸舰炮榴弹爆炸后破片的初速（已知弹内装填AⅨ-2炸药， $\rho_0 = 1.65\text{ g/cm}^3$ ，药量2.49kg，弹质量33.4kg）。

解

AⅨ-2由76%的黑索金、4%的地蜡加20%的铝粉组成，其中仅黑索金是爆炸成分。

$$\text{已知 } \varphi_{\text{RDX}} = 13.877$$

$$\text{则 } \varphi_{\lambda E-2} = 13.877 \times 76\% = 10.547$$

$$\sqrt{2E_g} = 0.739 + 0.435\sqrt{10.547 \times 1.65} = 2.553(\text{km/s})$$

$$\text{又 } \frac{m}{M} = \frac{2.49}{33.4 - 2.49} = 0.08056$$

破片初速

$$u_0 = 2.553\sqrt{\frac{0.08056}{1 + 0.5 \times 0.08056}} = 0.710(\text{km/s})$$

〔例10-5〕 试计算 57mm 高炮榴弹爆炸后的破片初速 (已知装药为8702炸药, $\rho_c = 1.74 \text{ g/cm}^3$, 装药量164 g, 壳体质量2.552kg)。

解

8702炸药的爆炸组分为76%黑索金、2.4%地恩梯, 查表 $\varphi_1 = 13.877$, $\varphi_2 = 8.587$ 。则

$$\varphi_{8702} = 13.877 \times 76\% + 8.587 \times 2.4\% = 12.608$$

$$\sqrt{2E_g} = 0.739 + 0.435\sqrt{12.608 \times 1.74} = 2.620(\text{km/s})$$

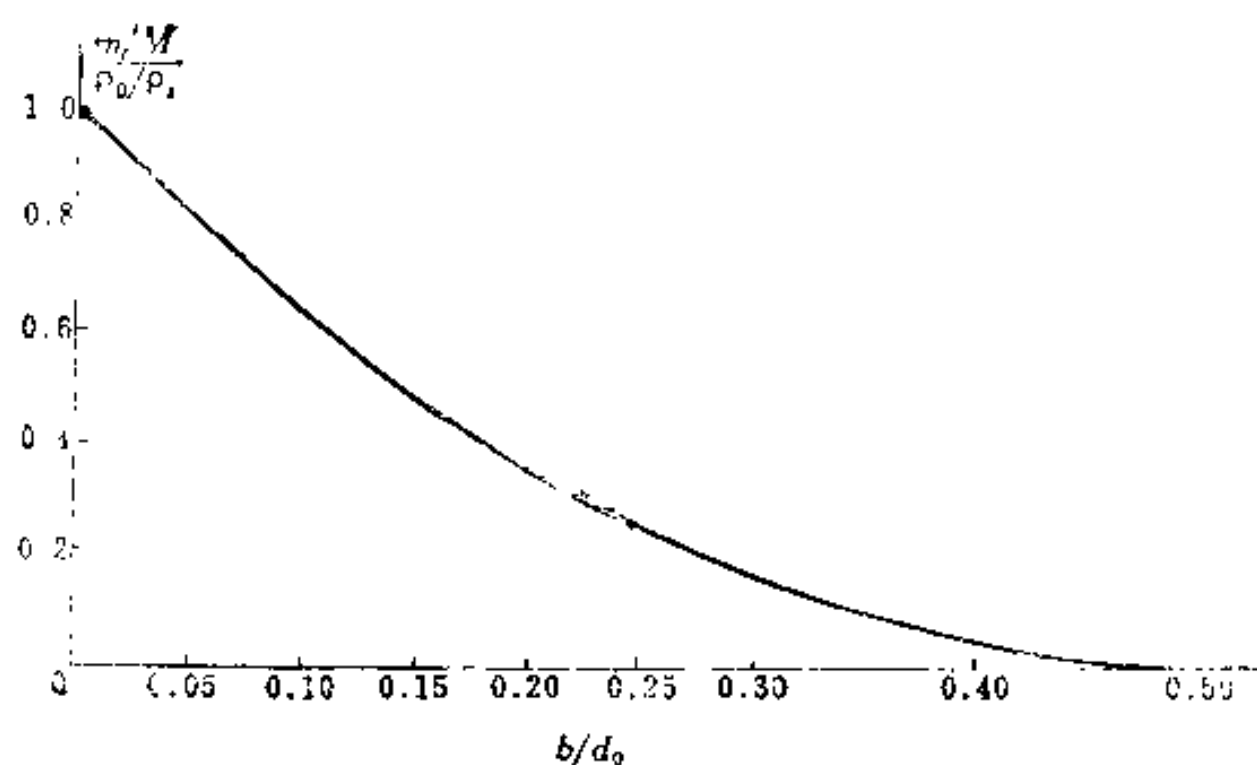
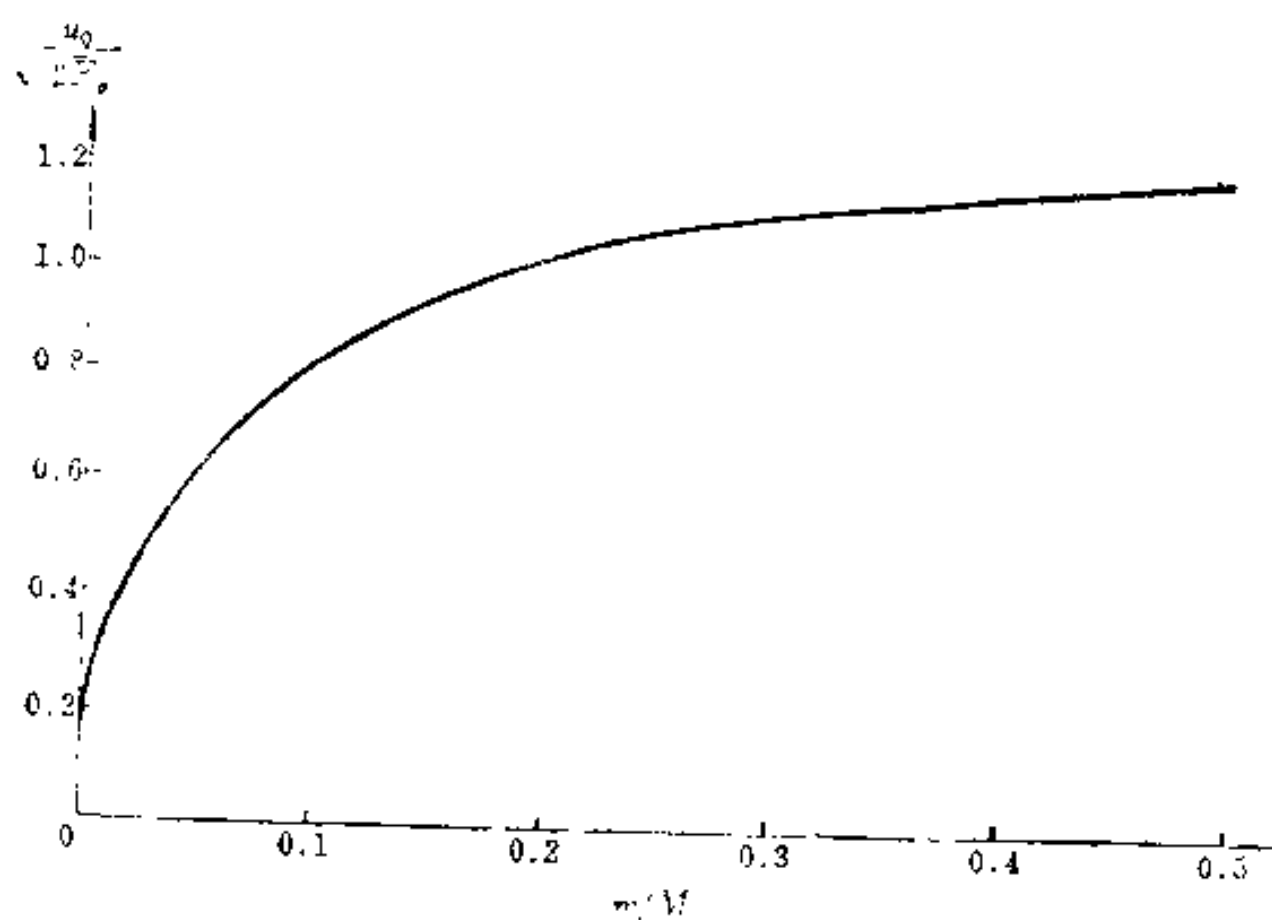
$$\text{又 } \frac{m}{M} = \frac{164}{2552} = 0.06426$$

破片初速

$$u_0 = 2.620\sqrt{\frac{0.06426}{1 + 0.5 \times 0.06426}} = 0.654(\text{km/s})$$

二、图表法计算破片初速

在工程计算中, 有时不利用公式而利用图表曲线在某种情况下往往方便些。利用图10-2-2和图10-2-3的曲线图, 根据弹丸的外径 d_0 和弹壁厚度 b 、炸药装药密度和金属壳体

图10-2-2 计算 u_0 的曲线图10-2-3 计算 u_0 的曲线

密度之比, 即 b/d_0 及 ρ_0/ρ_r ; 再利用炸药的格尼系数 $\sqrt{2E_g}$, 来简化计算 u_0 。计算步骤如下,

如果知道了 b/d_0 , 那么, 从图 10-2-2 上可以查得 $\frac{m/M}{\rho_0/\rho_r}$, 然后乘以 ρ_0/ρ_r 的比值就可求出 m/M ; 再利用 m/M 值从图 10-2-3 上查出 $u_0/\sqrt{2E_g}$ 值, 再乘以相应的 $\sqrt{2E_g}$ 值, 便求出了破片初速 u_0 。

〔例 10-6〕 130mm 火箭弹外径 130.25mm, 弹壁厚 14.75mm, 装药梯恩梯的密度为 1.50 g/cm^3 , 且已知 $\sqrt{2E_g} = 2.415 \text{ km/s}$, 试用图表法计算破片初速。

解

$$\text{计算 } \frac{b}{d_0} = \frac{14.75}{130.25} = 0.1132$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_r} = \frac{1.5}{7.8} = 0.1923$$

$$\text{由图 10-2-2 得 } \frac{m/M}{\rho_0/\rho_r} = 0.6$$

$$\text{得 } \frac{m}{M} = 0.1154$$

$$\text{由图 10-2-3 查得 } \frac{u_0}{\sqrt{2E_g}} = 0.45$$

得破片初速

$$u_0 = 1087 \text{ m/s}$$

130mm 火箭弹实测破片初速为 1257 m/s , 前面公式计算破片初速 1203 m/s , 相对偏差仅 4.3%, 而现在用图表计算破片初速 1087 m/s , 相对偏差达 13%。从而看出, 图表法误差较大, 只适用于某些情况下的粗略估算。

三、计算破片初速的半经验、经验公式

1. 半经验公式

在工程上还常常应用下面的半经验公式计算破片的初速 即

$$u_0 \approx 1.237 \sqrt{\frac{Q_v}{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{2}}} \approx 1.237 \sqrt{\frac{Q_v}{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{2}}} \quad (\text{m/s}) \quad (10-2-17)$$

式中 $\beta = \frac{m}{M}$

$$\alpha = \frac{m}{M+m}$$

m — 装药质量,

M — 金属壳体质量。

〔例10-7〕 试计算152mm, 加榴弹爆炸后破片的初速 (已知弹丸壳体金属质量38.2kg, 梯恩梯装药量5.8kg, 爆热 $Q_v = 4.561 \times 10^6 \text{ J/kg}$)。

解

$$\beta = \frac{m}{M} = \frac{5.8}{38.2} = 0.15183$$

按 (10-2-17) 式

$$\begin{aligned} u_0 &= 1.237 \sqrt{\frac{Q_v}{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{2}}} = 1.237 \sqrt{\frac{4.561 \times 10^6}{\frac{1}{0.15183} + \frac{1}{2}}} \\ &= 992 \text{ m/s} \end{aligned}$$

152mm 加榴弹破片初速实测值为 945m/s, 此计算值

相对偏差为5.2%。

〔例10-8〕 试计算57mm高榴炮弹爆炸后破片速度（已知装药用AⅨ-2炸药，装药量160g，爆热为 $6.443 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ，壳体质量2.552kg）。

解

$$\beta = \frac{m}{M} = \frac{160}{2552} = 0.06270$$

按(10-2-17)式计算

$$\begin{aligned} u_0 &= 1.237 \sqrt{\frac{Q_v}{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{2}}} = 1.237 \sqrt{\frac{6.443 \times 10^6}{\frac{1}{0.0627} + \frac{1}{2}}} \\ &= 774 \text{ m/s} \end{aligned}$$

57mm高榴炮弹破片初速实测值为670m/s，此计算值相对偏差为15.5%。

如果此例题采用(10-2-9)式计算，可得

$$u_0 = 630 \text{ m/s}$$

与实测值的相对偏差仅为6%。

通过上面两个例题的计算对比可知，由于此半经验公式用炸药的爆热作为基本参数来计算初速，对单质炸药来说计算精度还较好；但是，对含铝粉或其它放热金属粉的混合炸药而言误差就大了。原因在于铝粉和其它放热金属粉使炸药所增加的爆热，是由二次反应所得，并来不及供给破片的加速，因此用(10-2-17)式计算的破片速度偏大。

2. 经验式

许多科学工作者在实践中总结了一些经验公式，这些经验公式具有一定的局限性，只适用于某种条件下的某一类产品，应用时要慎重。介绍一个适用于火箭弹的公式。

$$u_0 = 0.6D \sqrt{\frac{4m}{5(m+3M)}} \quad (\text{m/s}) \quad (10-2-18)$$

式中 D ——炸药装填密度下的爆速, m/s ;

m ——炸药的质量;

M ——弹丸壳体的质量。

〔例10-9〕 试计算 107mm 火箭弹爆炸后破片的初速 (战斗部金属质量 6.97kg, 梯恩梯装药量 1.27kg, 装填密度为 $\rho_c = 1.50 \text{ g/cm}^3$, 在此装填密度下的爆速为 $D = 6554 \text{ m/s}$)。

解 将题给数据代入公式 (10-2-18) 计算

$$\begin{aligned} u_0 &= 0.6D \sqrt{\frac{4m}{5(m+3M)}} \\ &= 0.6 \times 6554 \sqrt{\frac{4 \times 1.27}{5(1.27 + 3 \times 6.97)}} = 842 (\text{m/s}). \end{aligned}$$

四、破片数计算

用理论方法来预先估计弹丸爆炸后产生的破片总数及其随质量的分布规律是一个很困难的问题, 至今尚没有十分完善的公式。而在工程设计上, 有时很需要在试验前预先进行估算, 以便确定设计方案时参考。不少研究人员在试验基础上总结出一些半经验公式, 这些公式虽有一定局限性, 但仍有一定参考价值。

1. 破片总数 N 的半经验公式

$$N = 3200 \sqrt{G}^\alpha (1 - \alpha) \quad (10-2-19)$$

式中 G ——壳体金属质量与炸药装药质量之和, 单位 kg ;

α ——装填系数，即装药质量与全弹质量之比。

此式适用于火箭弹战斗部在1g以上的破片。实验证明，此公式的误差在10%以内。

2. 破片总数 N 的经验公式

$$N = 7130 \left(\frac{m}{M} \right)^{0.72} \quad (10-2-20)$$

此式适用于估算火炮榴弹、迫击炮弹的破片，误差比上式稍大。

〔例10-10〕 试计算107mm火箭弹战斗部爆炸后形成的破片总数(战斗部壳体质量7kg,装药梯恩梯质量为1.27kg)。

解

$$\alpha = \frac{m}{m+M} = \frac{1.27}{1.27+7} = 0.15357$$

按(10-2-19)式计算

$$\begin{aligned} N &= 3200 \sqrt{G \alpha (1 - \alpha)} \\ &= 3200 \sqrt{1.27 + 7} \times 0.15357 (1 - 0.15357) = 1196 \end{aligned}$$

107mm火箭弹战斗部爆炸后实测破片为1082片，此计算值相对偏差为10%。

〔例10-11〕 试计算152mm加榴弹爆炸后破片总数(已知弹丸壳体质量38.2kg,梯恩梯装药量5.8kg)。

解 采用(10-2-20)式计算

$$N = 7130 \left(\frac{m}{M} \right)^{0.72} = 7130 \left(\frac{5.8}{38.2} \right)^{0.72} = 1835$$

152mm加榴弹爆炸后实测破片为2098片，此计算值相对偏差为12.5%。

3. 影响榴弹破片的因素

a. 炸药猛度：在一定范围内，猛度愈高，破片数愈

多；反之则少。如用57mm高榴弹试验时，用猛度为117（梯恩梯当量）的A-32炸药，1kg弹体金属有175个破片；而用猛度为107的AⅨ-2炸药，1kg金属仅能生成130个破片。

b. 弹壳金属机械性能：降低弹壳金属的塑性提高强度，可使弹体破裂更为合理。但是降低塑性，在壳体形成破片时膨胀变形小，炸药传给破片的能量随着减少（因为破碎早，炸药对破片加速时间短），从而减小了破片的飞散速度。

c. 传爆系列的影响：传爆药柱的威力愈大，整个装药爆炸反应的就愈完善，从而破片就愈多，破片飞行速度就愈高。另外起爆位置影响着爆轰波的传播方向，当采用杆状传爆药柱时（即沿装药轴装入传爆药柱），爆轰波便沿着装药的径向传播，这样作用在弹壁上的能量大，破片数和速度均有所提高。经验证明，用带有抛物线凹槽（或锥形凹槽）的传爆药柱能提高弹壳的破碎程度，特别是对于起爆爆速较低的炸药，其效果更好。

d. 弹丸口径和结构：随着弹丸口径的增加破片数也增加。实践证明，增加口径时，主要是质量大的破片数增加，在破片总数的增加量中，70~80%是4g以上的破片，20~30%是1~3g的破片。

e. 装药结构和装药量：装药量增加，破片数目也相应增多，装药结构越致密，破片均匀性就越好，过大、过小的破片就会相应的减少。装药和弹壁之间的接触越紧密，破片就会相应地增加，间隙过大，破片就会大而少。如57mm高射榴弹，由两节压装的AⅨ-Ⅱ药柱用粘合剂粘结，改为热塑装药（炸药改为RS-57），虽然炸药性能相差并不很大，可是由于塑态装药药柱致密而均匀，又取消了装药与弹壁间的

粘合剂，使药柱更好地与弹壁相接触，并能多装10~12 g炸药，从而提高了弹丸的破片性能。试验证明，有效破片数由原来的305块增加到376块，即增加了24%。

f. 装填系数的影响：恰当地选择炸药和弹体金属之间的适当比例，可得到较多的破片。从分析各种中口径杀伤爆破榴弹弹丸破片试验结果来看，其装填系数 $\alpha = 10 \sim 12\%$ 时，杀伤破片（质量4 g以上的破片）为最多，否则，则减少。例如85mm野炮榴弹，其装填系数为 $\alpha = 7.7\%$ ，因此其破片很大，最大破片达559 g，破片数仅有441块。使其装填系数增加到11%时，则杀伤破片数增加到570块，即增加了29%。因而，对于装填梯恩梯炸药而言，认为杀伤和杀伤爆破弹装填系数的选择，以平均1 kg的弹壳金属，能得到4 g以上的破片50~55块以上为较好方案。

五、破片的运动和最大杀伤距离

弹丸爆炸后，形成一定尺寸和质量的破片，离开弹丸向空气中运动。那么，所形成的破片平均尺寸和质量是多少呢？破片的运动规律怎样、最大杀伤距离又如何呢？下面讨论这些问题。

1. 破片的平均尺寸和质量

假设弹丸爆炸后的破裂过程为一维应变问题。即弹丸膨胀时只有切向应变，而无轴向应变，相应地只产生轴向裂缝，而不产生切向裂缝。

按照这种模型处理，可以获得

$$l_2 = \frac{1.5 r}{u_0} \sqrt{\frac{2\sigma_b}{K\rho_r}} \quad (10-2-21)$$

式中 r ——弹丸破裂半径；

- u_0 —— 破片初速;
 σ_b —— 弹体材料的破坏极限;
 ρ_r —— 弹体材料密度;
 K —— 弹体材料系数, 查表10-2-1。

表10-2-1 常用材料K值

材 料	K
铝 铁	20
10* 钢	42
25* 钢	53
45* 钢	67
60* 钢	77

试验表明, 对于通常整体式碳钢弹丸, 在大多数情况下, 破片宽度是厚度的 $1 \sim 3$ 倍, 破片长度是厚度的 $3 \sim 7$ 倍, 取其平均值, 可设破片长: 宽: 厚 为 $5:2:1$ 。以 l_1 、 l_2 分别表示破片的平均长度和厚度, 则有

$$\frac{l_1}{l_2} = 2.5, \quad \frac{l_3}{l_2} = 0.5 \quad (10-2-22)$$

若以 q_f 表示破片的平均质量, 则

$$q_f = l_1 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \rho_r = 1.25 \rho_r l_2^3$$

〔例10-12〕 H212火箭战斗部的破片初速 $u_0 = 1605 \text{ m/s}$, 壳体材料为 60* 钢, $\sigma_b = 9 \times 10^8 \text{ Pa}$, $\rho_r = 7.8 \text{ g/cm}^3$ 。试计算破片的平均尺寸和质量。

解 查表10-2-1 60* 钢 $K = 77$

按照公式 (10-2-21)

$$l_2 = \frac{1.5r}{u_0} \sqrt{\frac{2\sigma_s}{K\rho_s}}$$

$$= \frac{1.5r}{1605} \sqrt{\frac{2 \times 9 \times 10^8}{77 \times 7.8 \times 10^3}} = 0.051r$$

$$l_1 = 2.5l_2 = 0.128r$$

$$l_3 = 0.5l_2 = 0.026r$$

近似取战斗部破裂半径 $r \approx 2r_0 = 130\text{mm}$, 则破片平均尺寸

$$l_1 = 0.128 \times 130 = 16.6(\text{mm})$$

$$l_2 = 0.051 \times 130 = 6.63(\text{mm})$$

$$l_3 = 0.026 \times 130 = 3.33(\text{mm})$$

破片的平均质量为

$$q_l = l_1 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \rho_s = 1.66 \times 0.663 \times 0.333 \times 7.8 = 2.86(\text{g})$$

由以上的分析和计算实例可知, 战斗部结构和材料决定后, 若已知破片的初速 u_0 , 则可求出破片的平均尺寸及相应的平均质量。应该指出, 以上的方法是按薄壁圆筒推导出来的, 仅适用于整体式弹丸, 计算出的平均尺寸仅能作参考。

2. 破片的运动规律

破片获得初速后, 即在空气中飞行, 此时在破片上作用着两个力: 重力和空气阻力。重力的作用使破片的飞行弹道发生弯曲, 空气阻力的作用使破片速度减小。由于破片飞至目标的时间短、距离不大, 因此可以不考虑重力的影响, 而把破片弹道近似认为是直线。

由牛顿第二定律

$$q_l \frac{du}{dt} = -\frac{1}{2} c_x \rho S u^2 \quad (10-2-23)$$

式中 q_f ——破片质量;
 c_x ——破片迎面阻力系数;
 S ——破片垂直于飞行方向上迎风面积;
 t ——破片飞行过程中的任一瞬间;
 u ——破片任一瞬间的速度。

经数学运算, 得到破片运动规律

$$u_x = u_0 e^{-\frac{c_x \rho S}{2q_f} x} = u_0 e^{-ax} \quad (10-2-24)$$

式中 a 称为速度衰减系数

$$a = \frac{c_x \rho S}{2q_f}$$

下面我们分别讨论衰减系数中各参数的计算。

a. 破片迎风阻力系数 c_x

由空气动力学知, 阻力系数 c_x 与破片速度及形状有关。对于形状已选定的破片, c_x 是马赫数 Ma 的函数, 即 $c_x = c_x(Ma)$ 。但在工程设计时, 为处理问题方便起见, $c_x(Ma)$ 常取为常数, 即

球形破片 $c_x = 0.97$

圆柱形破片 $c_x = 1.1708$

矩形和菱形破片:

规则破片 $c_x = 1.24$

不规则破片 $c_x = 1.5$

整体式弹丸在爆炸后, 破片形状很不规则, 由试验证明可以把整体式弹丸的破片按长方体处理, 即 $l_1:l_2:l_3 = 5:2:1$, 由风洞试验得

$$c_x = 1.5$$

b. 当地空气密度

当地空气密度 ρ 是指破片在空气中飞行高度处的空气密度, 空气密度 ρ 随离地面高度而变化。一般表达式为

$$\rho = 1.225 H(y) \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (10-2-25)$$

式中 1.225 kg/m^3 ——海平面标准空气密度,

$H(y)$ ——距离海平面高度为 $y \text{ km}$ 处空气密度修正系数, 可由空气动力学表查得。

一般当炮弹离地面不太高爆炸时, 可取

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

当弹丸在高空爆炸时, 要进行高度修正。例如

$$y = 10 \text{ km}, \quad \rho = 0.408 \text{ kg/m}^3$$

$$y = 20 \text{ km}, \quad \rho = 0.086 \text{ kg/m}^3$$

c. 迎风受阻面积 S

弹丸爆炸后, S 是一个随机量, 因此很难确定。根据破片各个面向前飞行的概率算出 S 的一般表达式为

$$S = \frac{4}{\pi^2} (l_1 l_2 + l_2 l_3 + l_3 l_1) \quad (10-2-26)$$

但是在一般工程计算中, 对于整体式弹丸总是假定破片呈长方体形状, 即 $l_1:l_2:l_3 = 5:2:1$, 代入 (10-2-26) 式, 则

$$S = \frac{68}{\pi^2} l_3^2$$

又

$$q_f = \rho_r \cdot l_1 l_2 l_3 = 10 \rho_r l_3^3$$

将之代入上式, 并且代入 $\rho_r = 7.8 \text{ g/cm}^3$, 最终得

$$S = 0.0038 q_f^{2/3} \quad (10-2-27)$$

式中 S 的单位取 m^2 , q_f 的单位取 kg 。

将上述关系代入速度衰减系数以及公式 (10-2-24), 可以得到

$$\alpha = 0.0019 c_x \rho q_f^{\frac{1}{3}} \quad (10-2-28)$$

和

$$u_x = u_0 e^{-0.0019 c_x \rho q_f^{\frac{1}{3}} x} \quad (10-2-29)$$

3. 破片的最大杀伤距离

由 (10-2-24) 式取对数, 我们便可以得到

$$x = -\frac{1}{\alpha} \ln \frac{u_0}{u_x} \quad (10-2-30)$$

如果令 $E_{\min}$ 为破片杀伤目标最小必要动能,

$u_{\min}$ 为一定质量破片杀伤目标时必须具备的飞散速度。则

$$u_{\min} = \sqrt{\frac{2 E_{\min}}{q_f}} \quad (10-2-31)$$

一定质量的破片最大杀伤距离为

$$x_{\max} = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{u_0}{u_{\min}} \right) \quad (10-2-32)$$

对于碳钢, 长方体破片最大杀伤距离近似为

$$x_{\max} = 2.86 \times 10^2 q_f^{1/3} \ln \left(\frac{u_0}{u_{\min}} \right) \quad (10-2-33)$$

公式 (10-2-33) 中, $x_{\max}$ 数值的单位为 m , q_f 数值的单位为 kg 。

〔例 10-13〕 H—212 火箭在地面爆炸, 平均破片尺寸 $l_1 = 10.6mm$, $l_2 = 6.65mm$, $l_3 = 3.33mm$, 且 $u_0 = 1605 m/s$, 弹体材料为碳钢, $\rho_s = 7.8 g/cm^3$, 且知道杀伤有生目标的最小动能应为 $98.1 J$ 。

求: 1. 距离炸点 $10m$ 处的破片速度,

2. 在 10 m 处能否杀伤有生目标;
3. 破片最大杀伤距离。

解

1. 10 m 处破片速度

$$q_f = l_1 l_2 l_3 \rho_f = 1.66 \times 0.665 \times 0.333 \times 7.8$$

$$= 2.86 \text{ (g)}$$

$$a = 0.0019 c_x \rho q_f^{-\frac{1}{3}}$$

$$= 0.0019 \times 1.5 \times 1.225 \times (2.86 \times 10^{-3})^{-\frac{1}{3}}$$

$$= 0.0246$$

得

$$u_x = u_0 e^{-ax} = 1605 e^{-0.0246 \times 10} = 1255 \text{ (m/s)}$$

2. 10 m 处破片动能

$$E_x = \frac{1}{2} q_f u_x^2 = \frac{1}{2} \times 2.86$$

$$\times 10^{-3} \times 1255^2 = 2252 \text{ (J)}$$

故在 10 m 处可以杀伤有生目标。

3. 破片最大杀伤距离

$$u_{\min} = \sqrt{\frac{2E_{\min}}{q_f}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 98.1}{2.86 \times 10^{-3}}} = 262 \text{ (m/s)}$$

得

$$x_{\max} = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{u_0}{u_{\min}} \right) = \frac{1}{0.0246} \ln \left(\frac{1605}{262} \right)$$

$$= 74 \text{ (m)}$$

§ 10-3 杀伤标准及确定原则

所谓破片杀伤标准是指有效地杀伤、破坏各类目标时，破片参数的极限值。从武器弹药的设计和使用的角度来说，正确地制定破片杀伤、破坏各类目标的标准是一个十分重要的问题。根据资料报导，衡量破片杀伤破坏作用的参数可归纳为以下几种。

一、破片动能 E_f

杀伤战斗部和杀伤榴弹对目标的破坏是以破片的击穿作用为主，而击穿作用主要是靠破片碰击目标时的动能 E_f 。因此，通常以破片的动能 E_f 来衡量破片的杀伤效应。

$$E_f = \frac{1}{2} q_f u_f^2 \quad (10-3-1)$$

有关国外破片杀伤动能标准的数据列述如下。

苏联标准：

杀伤人员 不少于 (73.6~78.5) J 或 98.1 J；

比动能为 $1.47 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ ；

粉碎人骨头：167 J；

杀伤马匹：不少于 123 J；

折断马骨头：157 J；

粉碎马骨头：344 J；

击穿金属飞机：981~1962 J；

打穿金属机翼，汽油箱，油管：196~294 J；

穿 50cm 厚墙：1913 J；

穿 10cm 混凝土墙：2453 J；

穿 7 mm 厚装甲: 2158 J;
 穿 10 mm 厚装甲: 3434 J;
 穿 13 mm 厚装甲: 5788 J;
 穿 16 mm 厚装甲: 10202 J;

法国标准:

人员轻伤: 21.1 J;
 伤人骨但不断: 49.1 J;
 致命伤: 98.1 J;
 折断人的大骨头: 157 J;
 轻伤马: 98.1 J;
 伤马的中等骨头: 167 J;
 碎马的大骨头: 343 J;
 穿飞机发动机: 883~1324 J;

日本标准:

杀伤人员: 78.5 J;

联邦德国标准:

打伤人: 19.6 J;
 杀伤人: 78.5 J;

美国标准:

杀伤人员: 78.5 J
 地面上的飞机 (应击穿 3.17 mm 中碳钢板): 216~1619 J;
 车辆 (应击穿 6.35 mm 中碳钢板): 1766~2551 J;
 轻型战车及铁道车辆 (应击穿 12.7 mm 中碳钢板)
 14568~22073 J;

我国在杀伤各种目标所需动能方面也做了很多实验, 根据实验结果确定了杀伤的标准见表 10-3-1。

表10-3-1 杀伤各种目标所需能量

目 标 性 质	杀伤动能 (J)
杀伤人	78.5~128
杀伤马	186
土木类 (非金属)	245~392
飞机 (金属)	981~1962
厚度为10cm的砖墙	981
厚度为10cm的水泥墙	1472
钢筋水泥墙 (10cm)	3924
7mm厚装甲板	2158
10mm厚装甲板	3434
18mm厚装甲板	5783
16mm厚装甲板	10202

二. 破片比动能 e_f

由于破片是多边形体, 在飞行中又是旋转的, 因此, 破片与目标遭遇时的面积是个随机变量。所以, 用比动能 e_f 来衡量破片的杀伤效应更为确切。

$$e_f = \frac{E_f}{S} = \frac{q_f u_f^2}{2S} \quad (10-3-2)$$

式中 $\bar{S}$ ——破片与目标相遇时, 面积的数学期望值。对于碳钢整体式弹丸爆炸后, 一般工程计算取 $S = 0.0038q_f^{2/3}$ 。

现收集到的数据有: 对付飞机时, 由于各个部件的强度不同, 破片击穿各部件所需的比动能也不相同。击毁飞机润滑系统、冷却系统和供给系统, 或者击穿铝制蒙皮所需破片的比动能 e_f 为 392~491 J/cm²; 破坏飞机大梁和操纵杆需要比动能 e_f 为 785 J/cm²; 击穿 4 mm 飞机钢甲比动能 e_f 不

应小于 785 J/cm^2 ；击穿 12mm 飞机钢甲需比动能 e_f 为 3434 J/cm^2 ；使人被杀伤的比动能一般为 147 J/cm^2 。

三、破片密度 ν

弹丸爆炸后，杀伤破片在空间的分布是不连续的，如果近似的把杀伤弹丸的作用范围看成一个球缺表面，则破片的作用范围并不是一个封闭的球缺表面，而是一个不连续的球缺表面。随着破片离炸点距离的增大，破片之间的距离也加大了。就破片本身而言，即使具有足够的动能，也不一定命中目标，因此，单纯确定破片动能 E_f 、破片比动能 e_f 作为杀伤标准是不够全面的，还必须同时确定破片的分布密度 ν 块/ m^2 。对于反飞机等空中目标的杀伤弹药来说，满足 ν 的要求更为重要。

破片密度 ν 值愈大，弹丸破片命中目标的概率和击毁目标的概率也愈大。但 ν 值增大，相应地要求破片数 N 愈多，弹丸质量增大，或在一定弹丸质量条件下，壳体质量增加，装药量减少，即 β 变小，破片初速 u_0 降低。因此，存在一个合理地选择 ν 值的问题。一般来说，破片质量小的，破片密度要选大些；破片质量大的，破片密度 ν 可选小些。现搜集到的数据有：对空弹丸如果破片质量为 $3 \sim 6 \text{ g}$ 时，破片密度 ν 为 4 块/m^2 左右；破片质量为 $7 \sim 11 \text{ g}$ 时， ν 为 $1.5 \sim 2.5 \text{ 块/m}^2$ 左右。

四、如何确定破片对有生力量杀伤的标准

杀伤战斗部和杀伤弹丸，除了对付空中一大类目标以外，其余主要的是用来对付敌方的有生力量，如人员、马匹等。弹片伤在战场上占有很大的比重，第一次世界大战中占

表10-3-2 限制破片的形状、质量和尺寸

序 号	1	2	3	4	5
形 状	方形	球形	方形	方形	方形
质量 (g)	0.5	1.0	1.0	1.5	5.0
外形尺寸 (mm)	4 × 4 × 4	φ 6.35	6 × 6 × 4	6 × 6 × 6	10 × 10 × 6
着靶面积 (cm ²)	0.16	0.32	0.28	0.36	0.73

表10-3-3 破片贯穿狗胸腔的试验

破片种类	0.5 g 方形	1 g 球形	1 g 方形	5 g 方形
动能 (J)	20.2	33.3	36.6	99.1
比动能 (J/cm ²)	126.5	104.0	130.5	135.4

表10-3-4 杀伤动物狗与穿透标准松木板的关系

破片种类 目标种类 能量	0.5 g 方形		1 g 方形		5 g 方形	
	狗	木板	狗	木板	狗	木板
动能 (J)	21.3	24.3	35.4	35.3	102.0	104.0
比动能 (J/cm ²)	138.4	148.1	110.9	110.9	139.3	142.2

60.39%；第二次世界大战及朝鲜战争中均占75%以上。因此，研究破片对有生力量的杀伤标准，客观地评价弹丸杀伤作用的大小，不但对改进弹药威力设计，且对部队的实际使用有很大的意义。

表10-3-2列出了进行杀伤试验的五种破片，表10-3-3列出了对狗胸腔进行杀伤作用的试验结果，表10-3-4列出

了杀伤狗与穿透标准松木板的关系。

通过五种破片对 164 只狗的直接杀伤及对 38 块红、白松木板的穿透试验得出, 0.5 g 的破片以 300 m/s 速度命中狗的胸腔时, 狗立即死亡; 质量 1 g 钢球以 260 m/s 的撞击速度可使狗丧命。可将贯穿狗胸腔的能量近似作为人体致伤的能量, 由表 10-3-4 可知这个能量与贯穿 25mm 厚松木板的能量相当。因此, 规定对人体的杀伤比动能为 147 J/cm^2 左右, 并且用 25mm 厚松木板检验有效破片。

§ 10-4 影响破片杀伤作用的因素

一、弹丸结构方面的影响

弹体材料性能, 炸药的装填系数和性质, 传爆系列和弹丸的口径及结构等均会影响破片的大小和数量。因此, 也影响着破片的杀伤作用, 在前面已经述及。

近年来, 对于导弹、火箭弹及低膛压炮弹, 采用预制破片或半预制破片的办法, 以获得有利的破片形状、质量和飞散能力, 扩大杀伤面积和杀伤效果。

二、弹丸运动的影响

1. 旋转运动的影响

由于弹丸的高速旋转使弹丸的单个破片飞散方向将偏向弹丸旋转运动方向, 其速度有所增大, 一般不超过 10%。但考虑到弹丸是对称的旋转体, 因此, 破片将受到同样力的作用, 所以所有破片都偏向同一角度, 因而对杀伤作用影响较小, 故可忽略不计。

2. 直线运动的影响

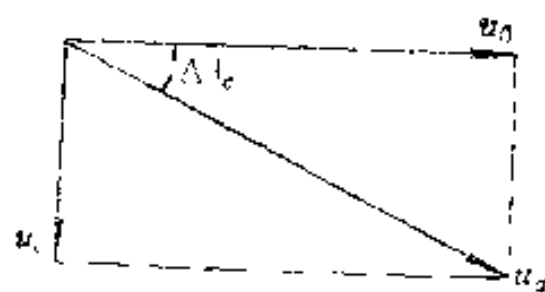


图10-4-1 弹丸存速与破片初速的叠加

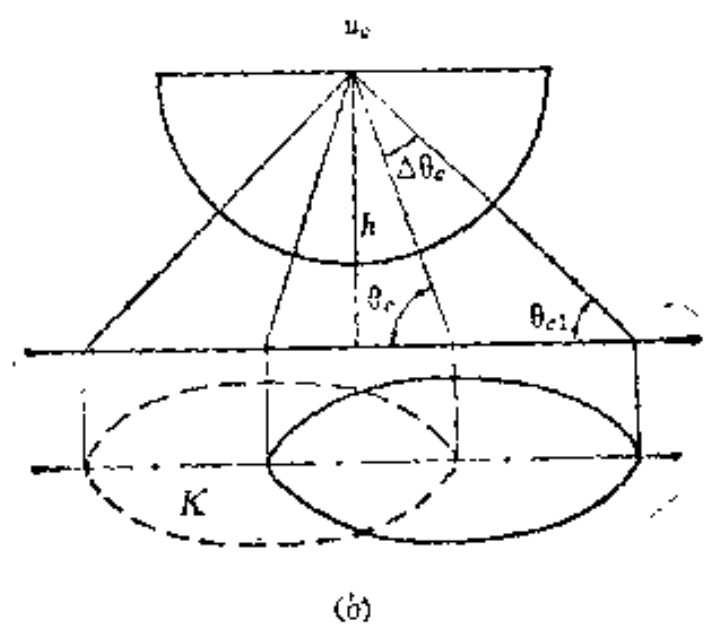
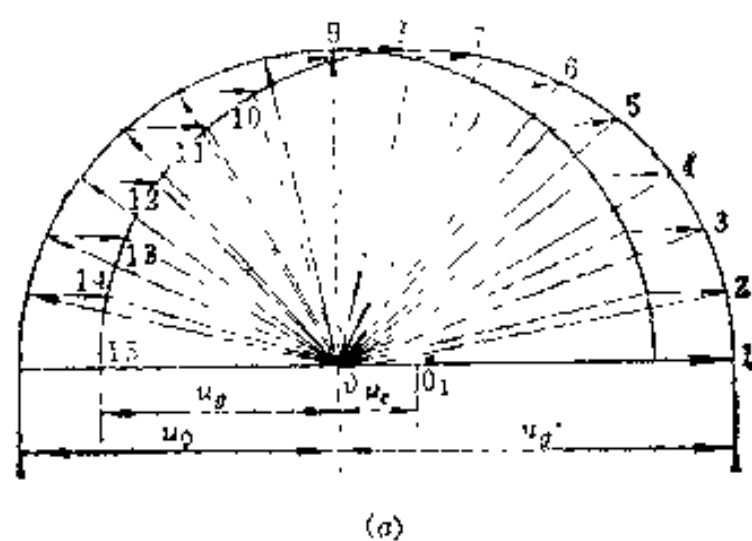


图10-4-2 偏转角对杀伤作用的影响

a —破片场的分布, b —对具体目标 K 的影响。

在爆炸瞬间，假如弹丸还具有一定的速度 u_0 ，则将使破片飞散发生一偏转角。如图 10-4-1 所示。图中 u_0 为弹丸存速， u_0 为破片飞散速度， u_g 为合成速度， $\Delta\theta_0$ 为偏转角。

由于各破片运动方向互不相同，因而 $\Delta\theta_0$ 也不相同。合成速度 u_g 有加有减，如图 10-4-2 a。

由于 $\Delta\theta_0$ 的存在，破片的命中率有所改变，如图 10-4-2b 所示。

当静止爆炸时，目标 K 为破片所命中，是危险的，然而当弹丸在飞行中爆炸时，它可能是安全的。

三、射击条件对弹丸杀伤作用的影响

1. 着发射击时

a. 落角的影响：落角过小，下部的破片钻入土内不起作用，向上飞的破片落下后失去了自身的速度，丧失了杀伤能力。纵深方向破片数很少，因此杀伤效果不佳。

当落角增大，特别是弹丸在爆炸瞬间近似垂直位置时，破片的杀伤面积近于圆形，所得效果最佳。

b. 弹着目标至弹丸爆炸延滞时间长，侵入土内距离就大，大量破片被土壤所吸收或阻止，失去了杀伤作用。根据实验，76mm 榴弹的杀伤作用在落角大于 30° 、漏斗坑深 15~20cm 时最大，深 33cm 时效力减少一半，当深为 45cm 时，效力极小。

2. 跳弹射击时的杀伤作用

根据实验，跳弹射击的杀伤效力较着发射击大一倍，其理由有如下几点：

- a. 破片不会象着发射击那样为漏斗坑的边缘所阻；
- b. 弹头和弹底部破片均有杀伤效力；

c. 可以杀伤隐蔽在掩体内、洼低地形上和反斜面中均
有生力量。

着发射击和跳弹射击的杀伤效果的不同,可从表 10-4-1
中看出。

表10-4-1 着发和跳弹射击的杀伤效果

火 炮 名 称	装药种类 (火药)	射击种类 和 引信装置	射击 距离 (m)	人形靶子被杀伤的数目		
				共计	其中包括	
					站立靶	卧倒靶
76 mm 榴 农炮	全装药	着发射击 (瞬)	3800	3.8	3.0	0.8
		跳弹射击 (延)	3800	31.5	6.5	5
120 mm 榴 农炮	四号装药	着发射击 (瞬)	5200	9.3	6.2	3.1
		跳弹射击 (延)	5200	22.6	10.1	6.5
榴弹炮	二号装药	着发射击 (瞬)	5600	13.5	9.0	4.5
		跳弹射击 (延)	5600	21.8	14.0	7.8

跳弹射击时,虽具有很大优点,但是由于第二弹道(碰
地后跳起的弹道)不规律,加之跳弹炸高对杀伤效果有较大
影响,所以使用跳弹射击时,要根据土质、着速、着角等进
行适当调整,以得到最理想的炸高。实验证明,当炸高在
(7~10) m 范围内,杀伤效力最大,过低或过高效果欠佳。

3. 空炸(定时)射击时的杀伤作用

榴弹用时间引信使弹丸在弹道上某点爆炸,是提高杀伤
作用的有利方法。

4. 其它影响因素

如土质,对着发作用杀伤效力有所影响,当土质硬和冬
季射击时,由于侵深度较浅因而杀伤作用就大。反之则杀伤
威力就小。弹着点对目标区的偏离越远,杀伤威力越小。

§ 10-5 控制破片的方法

整体式弹丸爆炸后，破片大小不一，有效破片数量少，弹丸飞散距离近。因此，炸药和金属材料的利用率低。为了提高杀伤威力，采用预制破片是比较有效的方法。

通过科研实践证明，杀伤有生力量（人员）的破片质量以 $0.4\sim 1.0\text{ g}$ 为合适；杀伤马匹的破片质量以 $0.7\sim 1.5\text{ g}$ 为宜；破坏汽车和飞机的破片质量以 $2\sim 8\text{ g}$ 为宜；破坏装甲车和火炮等技术兵器的破片质量以 $10\sim 18\text{ g}$ 为宜。质量小于以上相应数值的破片，除非增加破片初速，否则动能过低或作用距离过小；质量大于以上这些数值的破片，动能较大，飞行距离较远，但此种破片数量愈多则破片总数愈少，分布密度愈低。因此，要求弹丸爆炸后，所产生的破片质量分布，最好处在以上所要求的范围内。为此，在科研和生产实践中总结出了下面控制破片的方法。

一、全预制破片

所谓全预制破片，是按照所需要的破片质量、大小和形状预先制好放在战斗部内。一般有球形、立方体和圆锥形等，材料多为碳钢。预制破片按照一定顺序排列好，然后用环氧树脂胶将其粘结在一起。粘结后，在外面包上薄钢板制成的壳体或其它材料的壳体，内部有内衬套筒。当然也有不衬套筒的，直接将预制破片粘结在炸药装药的外表面上。图 10-5-1 是全预制破片示意图。

预制破片本身一般都是采用实体形式。但近年来也有在预制破片内加入填料的，外壳可用任意材料制成，只要在破片加上和飞行过程中能保持壳体几何形状且能包容着填料直

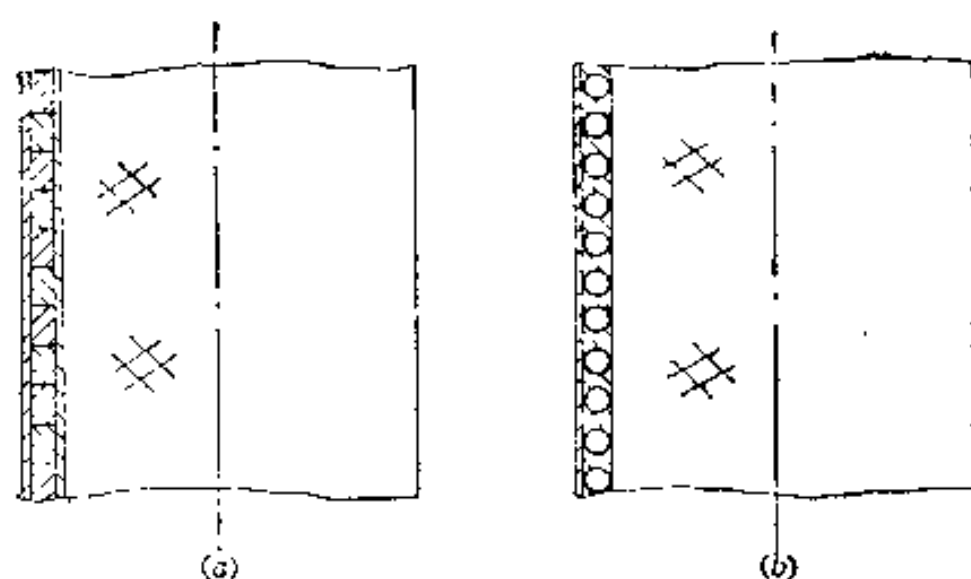


图10-5-1 预制破片结构示意图

a—带内套筒，b—不带内套筒。

到命中目标即可。这种材料可以是钢、铝、塑料或是具有类似性能的其它合成材料。

作填料的材料在破片加速过程中为固体，但当在向目标飞行的后阶段能够熔化或变软。命中目标时，填料碎成小破片，小破片向目标传递能量，提高破坏效果。填料必须用遇热就能熔化或变软的材料制造，例如伍德合金、锌锡铅的合金等；也可用烧结材料，像钨合金或球墨铸铁等。同时也可使用液体芯材料，如液态汞等等。

还有的预制破片外面涂有一层金属增加剂，使其在命中目标时，能起侵彻与燃烧两种作用。破片外面涂的金属增加剂必须与钢制破片紧密结合，以便在破片飞往目标的过程中不致脱落。增加剂中尤以铝和铝合金为最好。

预制破片的实体形式用于对付地面目标和空中目标，而内装填料和外面有涂层的破片主要用于对付空中目标。

二、壳体刻槽

按照有效杀伤破片的要求，预先在战斗部或弹丸壳体上刻槽，人为地造成薄弱环节，以达到在战斗部或弹丸爆炸时，控制破片尺寸和数目的目的。刻槽的方式可以是轧制，也可以是机械加工而成。刻槽的形式有：内表面刻槽，外表面刻槽，内外表面同时刻槽。见图 10-5-2 实践证明，内表面刻槽比外表面刻槽更易保证有效杀伤破片数，槽与战斗部或弹丸纵轴的夹角常采用 30° 、 45° 、 60° 。

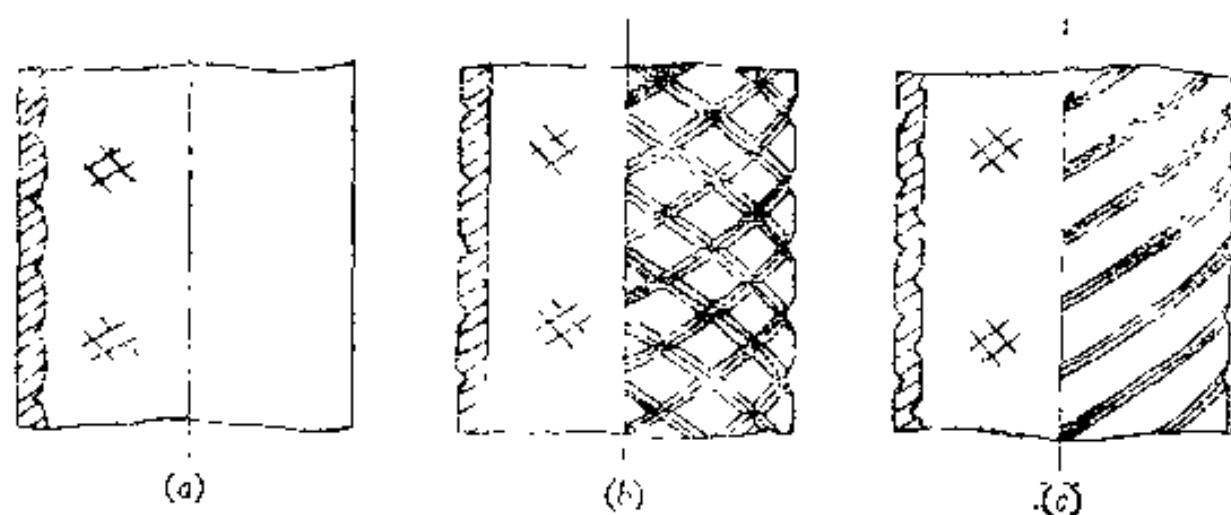


图 10-5-2 壳体刻槽

■ — 内表面刻槽； b — 外表面刻槽； c — 内外表面刻槽。

由于一般的杀伤战斗部都是单层结构，依靠壳体的内表面或外表面刻槽，或是在壳体内表面与装药之间放置预制形状的塑料衬套，使局部应力集中，以形成开始破裂点，但这种方法控制杀伤破片并不太理想。为了消除过大或过小的破片，使一定量的材料产生更多的有效杀伤破片，将战斗部制成多层壁结构，其效果较好。如图 10-5-3 所示。

壳体材料一般采用低碳钢，因其易剪断且价廉，当然其

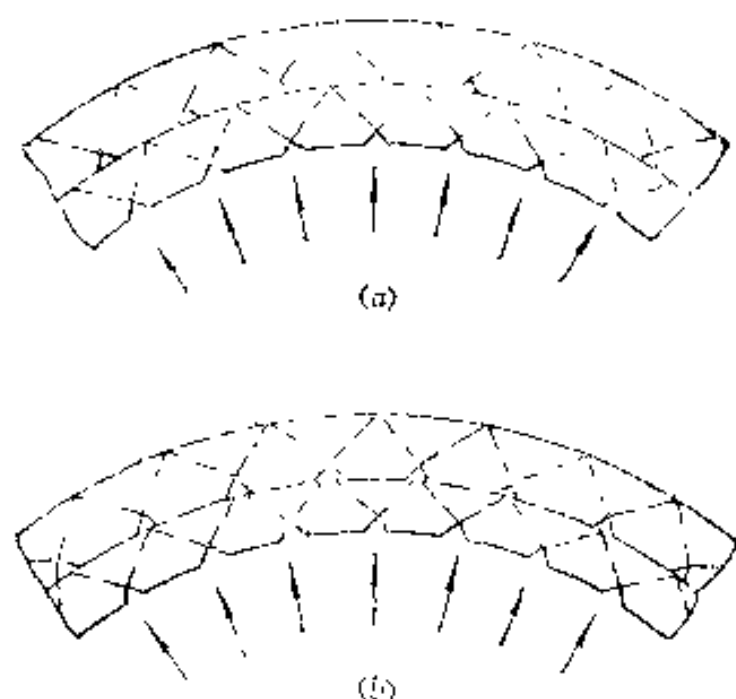


图10-5-3 多层壁可控杀伤破片战斗部
 a—不能产生最大数量有效杀伤破片的内外壁
 配合情况；b—能产生最大数量有效杀伤破片
 内外壁配合情况。

它材料也适用。壳体的厚度必须满足只引起剪切应力破坏，而不产生拉伸应力破坏为条件。每层壁厚与各层壁预制槽的间隔距离有关。在与壁的纵轴垂直的平面上，最大剪切应力发生在与壁的内周切线约成 45° 的线上。于是从两个相邻平行槽所引出的两条 45° 线必然相交在内表面盾面的某一点上，并且由该点确定壁的厚度。

螺旋上升应力槽的横截面通常取“V”形，槽深约为0.8 mm，壁厚可取4~5 mm。

五、利用聚能效应

在战斗部壳体的内表面与药柱之间放一层塑料套，此套表面上压制有一定尺寸的空心聚能槽，如图10-5-4所示。将塑料套的整个表面分割成同等大小的许许多多四方块，炸药

铸装在塑料套内。因此，炸药凝固后就在装药的外表面上形成塑料套上的空心装药槽。装药爆轰时，空心装药槽起聚能效应的作用，形成高速运动的爆炸气体流，将壳体切割出具有一定尺寸和质量的破片。

塑料套的材料常采用邻苯二甲酸酯增塑的醋酸纤维素，国外近年来也有采用硅橡胶的。

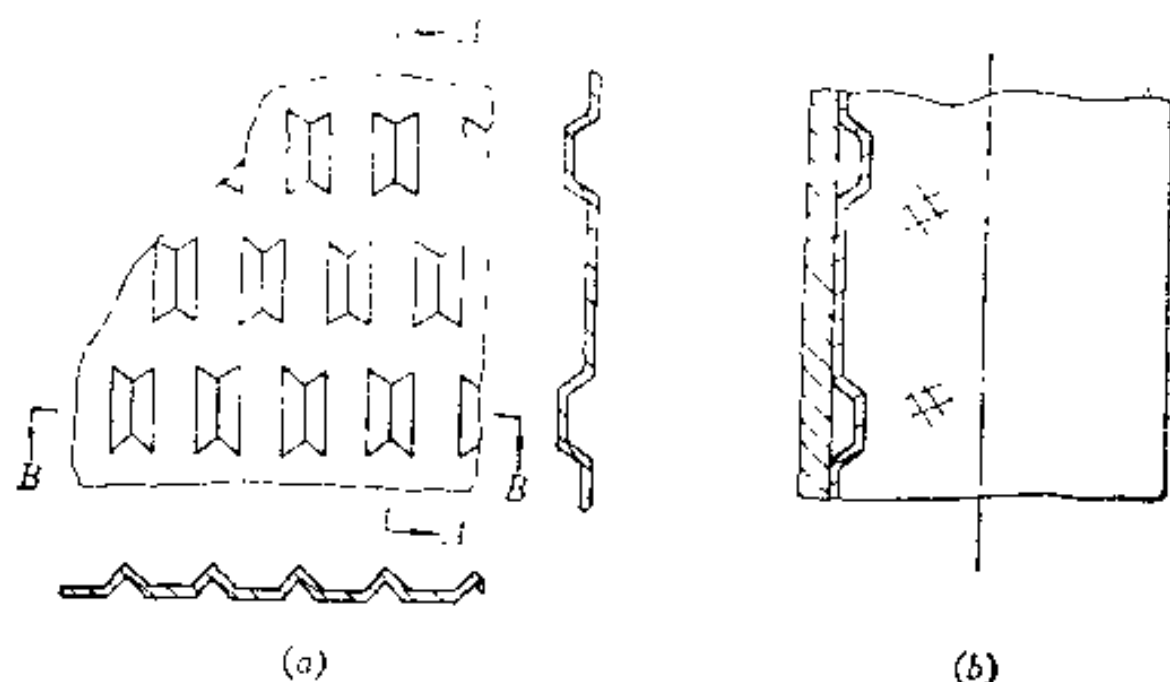


图10-5-4 塑料衬套及装药上的聚能槽
a—塑料衬套上的聚能槽；b—装药上形成的聚能槽。

四、缠制壳体

战斗部壳体用6~12 mm的方钢缠成或者把方钢缠在壳体外表面（图10-5-5）。这种方法可以解决壳体轴向形成破片长短不一致的问题，但壳体的径向破裂仍有随机性。

为了进一步控制径向破裂的均匀性，曾摸索出在钢带内表面每隔一定距离刻一个角度为 30° 的小槽，试验效果较好。

五、圆环叠加壳体

圆环叠加时，可以是单层的，也可以是双层的。环与环之间用点焊连接（一般在圆周上焊三点），焊点是错开的，焊好后壳体成为一个整体。这种方法仅能使轴向形成的破片均匀一致，但在径向的破片不免要有长条状。图 10-5-6 表示了圆环叠加的结构。

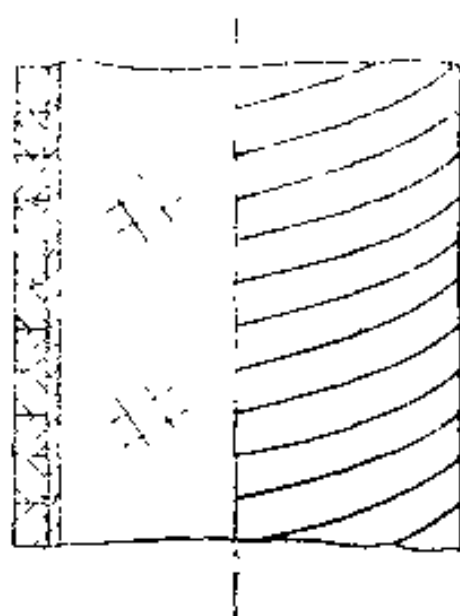


图10-5-5 缠制壳体

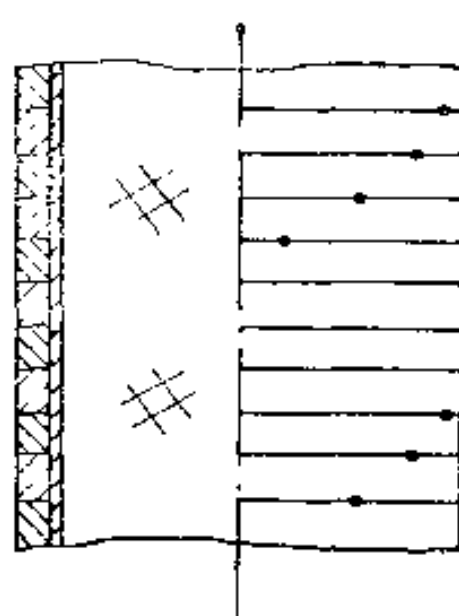


图10-5-6 圆环叠加壳体

六、组合式壳体

同时采用两种控制破片的方法，以保证破片更好地满足设计要求，这样的壳体称为组合式壳体。图 10-5-7 是由圆环叠加与药柱聚能槽组合在一起的壳体，组合方法是将圆环一个个套在内壳体上，然后用专门夹具夹紧，灌上环氧树脂胶粘住，再纵向铣 1.5mm 的槽；内壳体里面是一层带空心聚能槽的塑料衬套，将炸药浇铸在此衬套里。当炸药爆裂时，形

成菱形破片，效果很好。

必须注意，以上关于预制破片的各种方法，要根据不同的弹种加以选择。有些是导弹战斗部、火箭弹战斗部及低膛压弹丸都可采用的，如全预制破片等；有些是高膛压弹丸可以采用的，如表面刻槽等；对于导弹及火箭弹战斗部可以分别情况任意采用上述各种形式的预制破片来满足其杀伤效应。

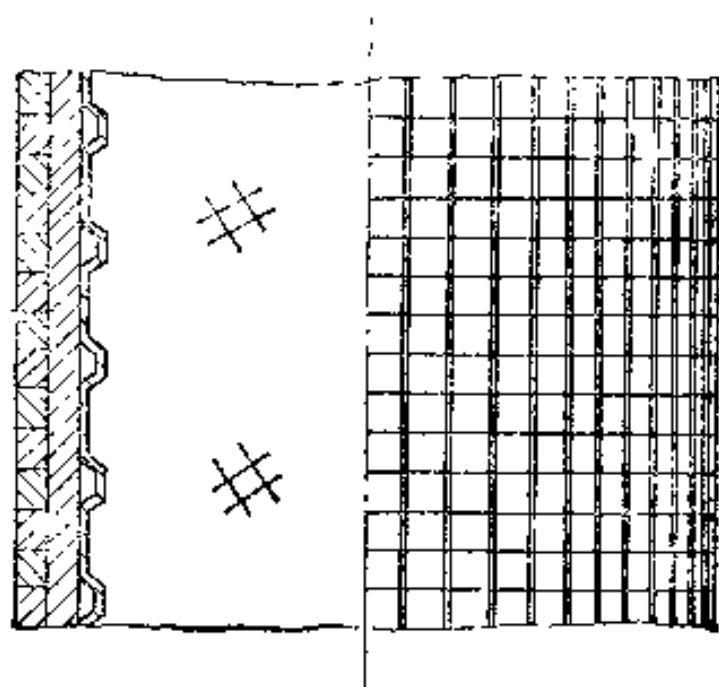


图10-5-7 组合式壳体

第十一章 聚 能 效 应

聚能效应是炸药爆炸对外作用的重要方式之一，在军、民两个方面都有着广泛的应用。聚能破甲弹作为反坦克的主要弹种，从手雷、枪榴弹、火箭弹、无座力炮弹、坦克炮弹到反坦克导弹等，都配有聚能装药；反坦克地雷采用聚能装药用以击毁坦克底甲和侧甲；对付军舰的大型导弹也采用聚能装药，以增加击穿甲板的能力。聚能装药在民用上，主要用于石油井下打孔、水下切割构件等方面，具有较其它方法更优越的特性。

聚能装药在聚能方向的爆炸作用效果，比炸药爆炸时要剧烈得多，因而从技术安全角度着眼，也应了解聚能效应的作用机理。

§ 11-1 聚 能 现 象

聚能效应是通过采用凹槽装药，把爆炸的能量在一个方向上集中起来的效应。图 11-1-1 表示了实心柱形装药和一端带有凹穴的柱形装药爆炸后对于钢板的穿透能力。

如果药柱为实心柱形装药，放置在钢板上爆炸后，在钢板上只炸出一个浅浅的凹坑；如果柱形装药一端做成锥形孔的形状，把锥形孔方向放置在钢板上，虽然装药减少了药量，但是爆炸后在钢板上却炸出一个较深的凹坑，其深度等于装药直径的三分之一左右；如果在装药锥形孔内放上一个薄薄的金属罩，这样爆炸后在钢板上炸孔深度能提高到装药

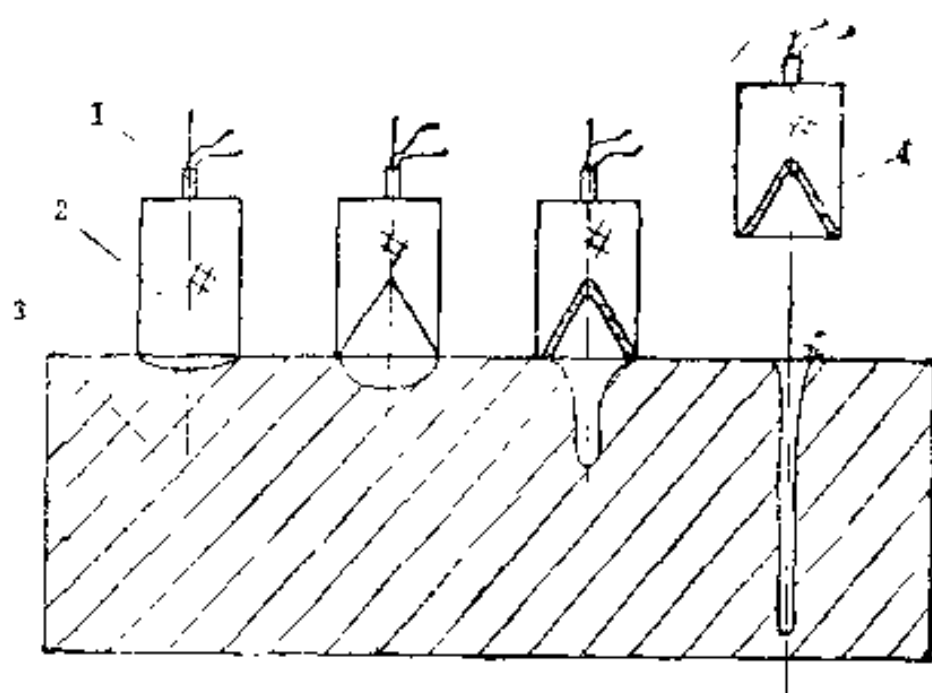


图11-1-1 不同装药结构的穿透能力

1—雷管；2—药柱；3—钢板；4—金属罩。

直径的两倍左右；如果再把带有金属罩的装药提高到距钢板高度适当的位置，对着钢板进行爆炸，这时钢板炸坑深度还会大大地提高，其深度可达到五倍装药直径以上。

实验清楚地表明，当药柱带有凹槽时，对钢板的穿透能力，较比无凹槽实心药柱的穿透能力有很大提高，当在凹槽内放入金属罩时，对钢板的穿透能力，较比无金属罩的凹槽装药对钢板的穿透能力又有很大提高；而当凹槽内放置金属罩的药柱距钢板一定距离进行爆炸时，其对钢板的穿透能力就有更大的提高。

因而在实际应用中，通常采用带有金属罩的凹槽装药，用以增加对钢板的穿透能力。

一、射流形成过程

1. 无金属罩的气体射流

普通实心药柱爆炸时，爆轰产物和传播在爆轰产物前面

的冲击波，在药柱周围基本上处于均匀状态，并且随着距离的增加，衰减很快。而对于有凹槽的聚能装药，其情况就完全不同。

爆轰波作用在装药斜面上时，装药表面层大部分能量都集中在一个很小角度范围内。如图 11-1-2 所示，当爆轰波波阵面与装药表面夹角为 φ 时，装药表面层所形成的爆轰产物 70% 以上都集中在与表面外法线夹角成 γ 的角度范围内，当 φ 等于 45° 时， γ 角约为 10° 左右。

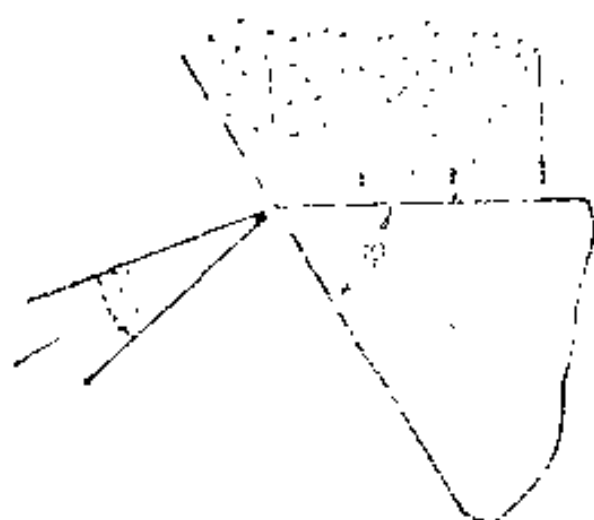


图11-1-2 爆轰产物在斜面上的飞散

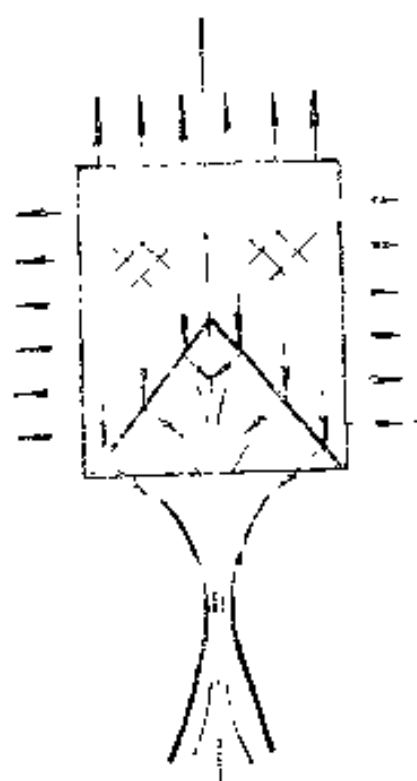


图11-1-3 聚能气流的形成

对于带锥形凹槽的聚能装药，当爆轰波扫过锥形槽两侧表面时，其两侧表面上几乎垂直于装药表面飞散的爆轰产物，在装药轴线上汇聚，聚合成为沿着轴线方向运动的具有更高压力和密度的聚能气流，如图 11-1-3 所示。

由于锥形槽两侧装药表面爆轰产物的不断汇聚, 在距离装药底部一定距离处聚能气流发生最大的聚合, 往后随着爆轰产物的径向膨胀, 聚能气流迅速分散。

鉴于聚能气流易于分散, 因而只能在装药表面附近才有其一定作用, 随着距装药表面距离的增加, 聚能效应迅速消失。为了提高凹槽装药的聚能效应, 在凹槽内放入金属罩, 把爆轰产物的能量转换为金属流的动能, 这样就极大地提高了装药的聚能效应。

2. 小锥角药形罩装药的射流形成过程

带有金属罩聚能装药的射流形成过程, 可以通过脉冲 X 光照相和可见光分幅照相拍照下来。

图 11-1-4 示出了小锥角药形罩装药形成射流的过程。试验采用装药由梯恩梯 50/黑索金 50 铸装而成, 装药直径 36 mm、高 60 mm, 装药密度 1.69 g/cm^3 , 药形罩由紫铜材料做成, 锥角 $42^\circ 30'$, 壁厚 1 mm, 罩顶角半径 2 mm、底部直径 34 mm, 传爆药柱由特屈儿炸药做成, 药柱直径 30 mm、高 6 mm, 微秒雷管起爆。

雷管起爆后, 爆轰波扫过药形罩, 在大约 10^{10} Pa 的爆轰产物作用下, 药形罩开始变形, 罩壁倾斜地向内运动, 图 11-1-4 b 表示了雷管起爆后 10.1 微秒时金属罩变形的情况, 此时罩顶部已经闭合, 罩中部正在向轴线方向移动, 罩底部尚未运动; 图 11-1-4 c 表示雷管起爆后 $15.9 \mu\text{s}$ 时金属罩变形的情况, 此时金属罩有更多的部分向轴线方向闭合, 向轴线运动的金属壁而在轴线上相碰后, 能量进行重新分配, 犹如两股高速运动的水流相碰后中间会激起一个更高速度运动的水柱一样, 金属罩内层的金属被挤出来, 形成了高速运动的金属射流; 图 11-1-4 d 表示雷管起爆后 $20.5 \mu\text{s}$ 时金属罩

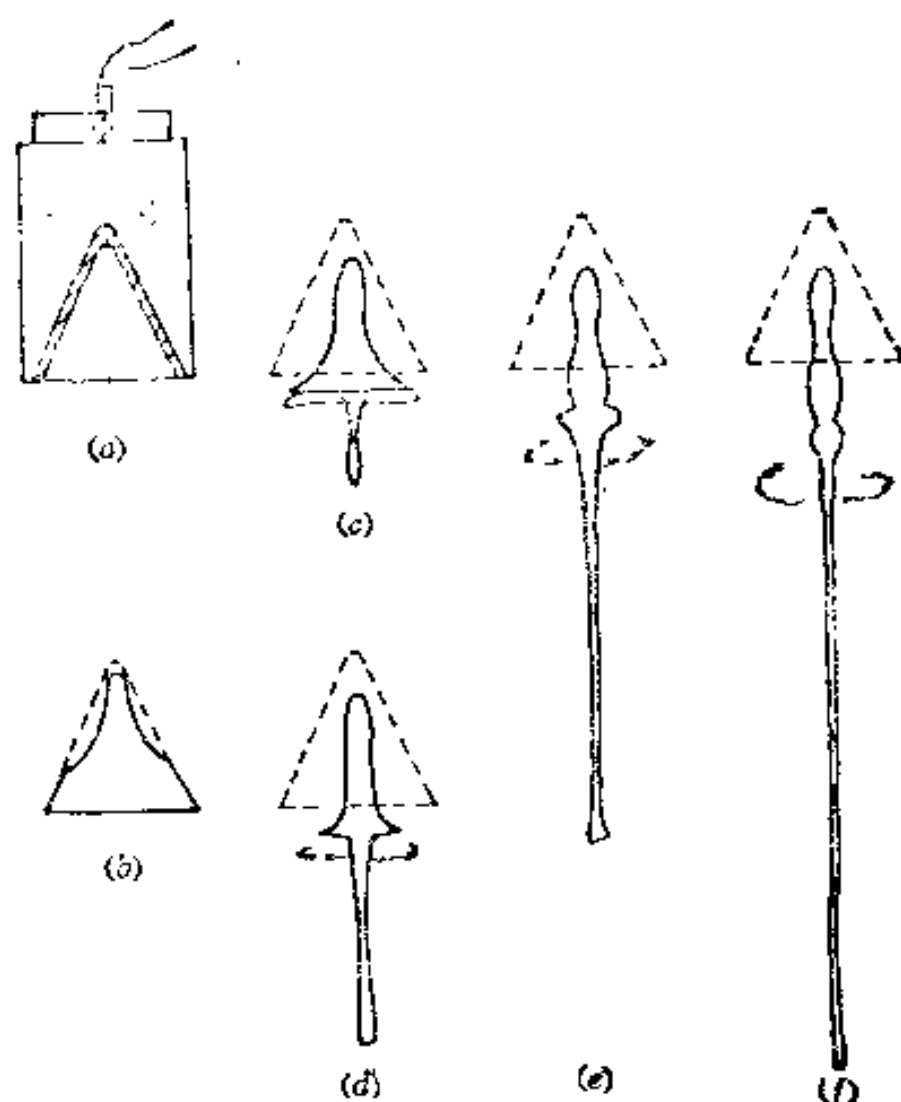


图11-1-4 小锥角药形罩装药射流形成过程

a—装药结构；b— $10.1\mu\text{s}$ ；c— $15.9\mu\text{s}$ ；d— $20.5\mu\text{s}$ ；
e— $27.5\mu\text{s}$ ；f— $35.1\mu\text{s}$ 。

的变形情况，此时金属罩完全闭舍，金属射流形成量增加，罩底部一圈金属不能形成射流而成为无效的破片环，图11-1-4 e 和 f 分别表示了雷管起爆后 $27.5\mu\text{s}$ 和 $35.1\mu\text{s}$ 时金属射流形成的情况，此时射流不断延伸加长。

金属射流头部速度达 $7000\sim 8000\text{m/s}$ ，射流尾部粗大的金属部分称为“杵”，杵的速度约为 500m/s 。

金属射流很长，直径很小，其头部直径约为罩底部直径的 $3\sim 4\%$ ，尾部直径约为罩底部直径的 $5\sim 7\%$ ，其质量

约为罩重量的 15% 左右，温度估计为 $800 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，是一个高速运动的热塑性金属流。

杵体比较粗大，是一个由罩壁汇聚而成的结构致密的金属整体，从完整杵体的观察看出，杵体中心有一个椭圆小孔，表明射流从罩内壁分离出来的痕迹。

3. 半球形药形罩装药的射流形成过程

半球形药形罩装药的射流形成过程见图 11-1-5，试验采用装药由梯恩梯 40/黑索金 60 铸装而成，药柱直径 36mm 、高 40mm ，装药密度 1.69 g/cm^3 ，药形罩由紫铜材料做成，球半径 30mm ，罩壁厚 1mm ，传爆药柱由特屈儿炸药做成，药柱直径 30mm 、高 6mm ，微秒雷管起爆。

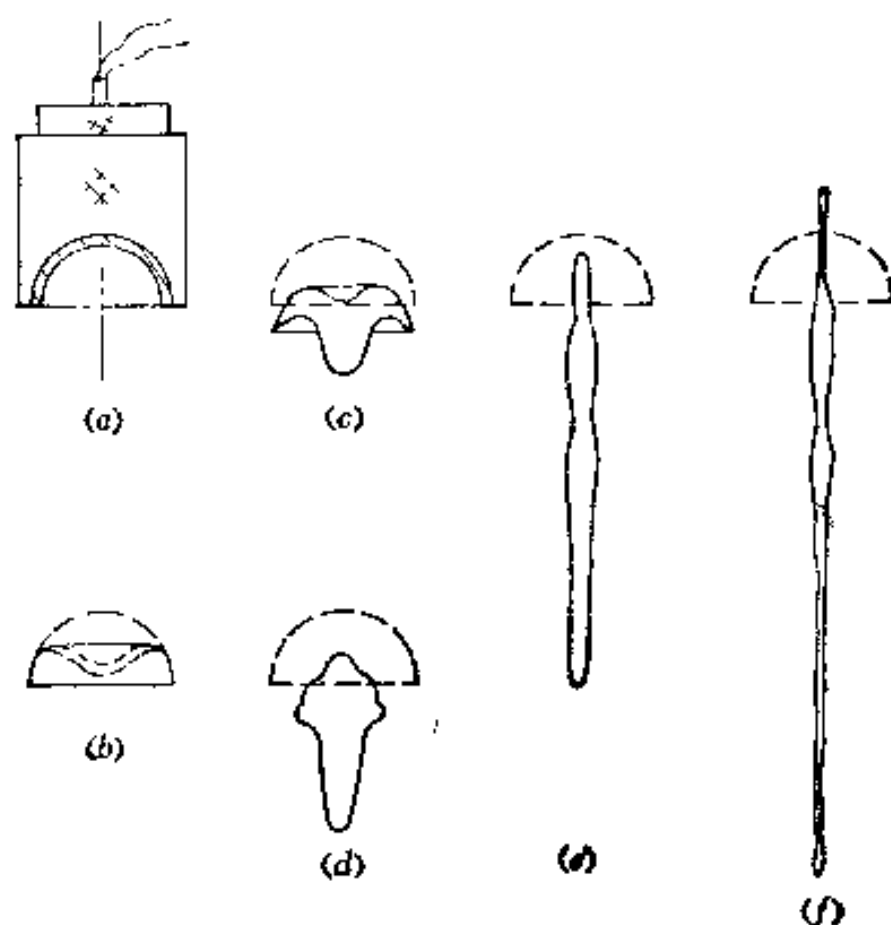


图11-1-5 半球形药形罩装药的射流形成过程

a—装药结构； b— $10\mu\text{s}$ ； c— $13\mu\text{s}$ ； d— $16.8\mu\text{s}$ ；
e— $26.8\mu\text{s}$ ； f— $42.1\mu\text{s}$ 。

半球形药形罩的变形过程比小角度锥形药形罩变形过程复杂。药形罩在爆轰波作用下,顶部首先向下运动,侧面随后向轴线运动,图 11-1-5b 和 c 分别表示雷管起爆后 $10\mu\text{s}$ 和 $10\mu\text{s}$ 的情况,此时由于顶部运动在前,两侧运动在后,结果使罩顶部翻转过来,形成向上的凹穴;图 11-1-5d 表示雷管起爆后 $16.8\mu\text{s}$ 时半球罩变形的情况,此时由于向轴向运动的药形罩侧面在轴线上的撞击,形成了向前运动的射流,同时由于罩翻后顶部凹穴的存在,又形成了反向射流,罩底部一圈金属不能形成射流而成为碎片;图 11-1-5e 和 f 分别表示雷管起爆后 $26.8\mu\text{s}$ 和 $42.1\mu\text{s}$ 时射流形成的情况,此时射流不断延伸拉长,而反射流也不断拉长。

半球罩形成的射流与锥形罩相比,射流直径较大,质量较重,但速度较低,射流头部速度约为 4000m/s 。

4. 大锥角药形罩和圆弧形药形罩的变形过程

图 11-1-6 表示了大锥角药形罩的变形过程,试验采用梯恩梯 40/黑索金 60 铸装装药,药柱直径 36mm 、高 29mm ,装药密度 1.67g/cm^3 ,紫铜药形罩,罩锥角 150° ,壁厚 1mm ,罩底部直径 30mm ,特屈儿传爆药柱直径 30mm 、高 6mm ,微秒雷管起爆。

雷管爆炸后,大锥角药形罩在爆轰波作用下,顶部首先向下运动,侧面部分向轴线运动,产生了罩顶的翻转,药形罩侧面运动的部分在轴线上汇聚,但是由于药形罩的锥角过大,侧面药形罩在轴线上的撞击不是十分严重,不会形成明显的正向射流和反向射流,除两顶端部分有可能分离之外,其余大部分分不开,而成为整体形的翻转弹丸,翻转弹丸的速度大约为 2000m/s 。

图 11-1-7 表示了圆弧形药形罩的变形过程,试验采用

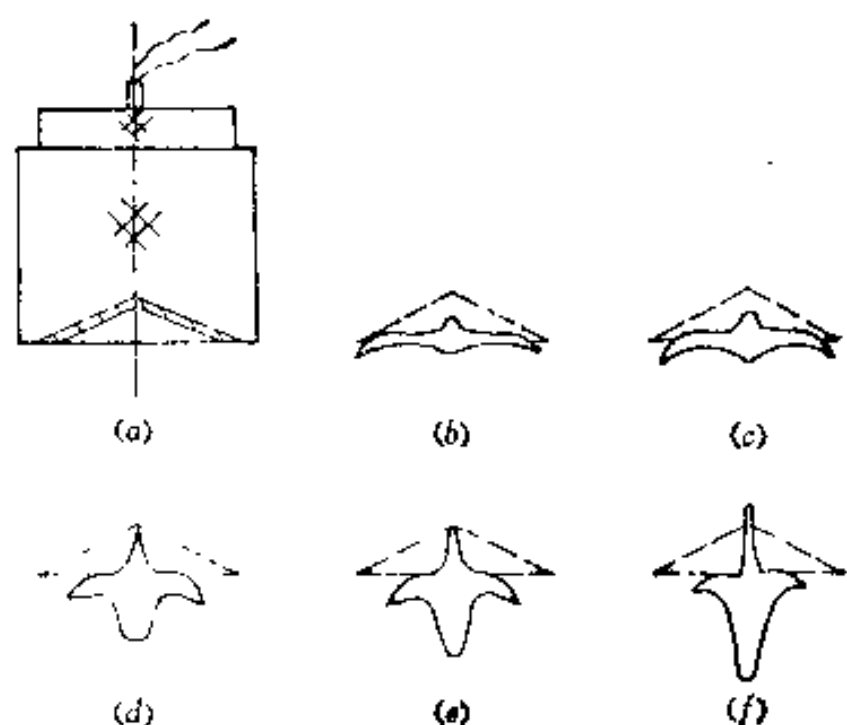


图11-1-6 大锥角药形罩的变形过程

a—装药结构, b— $11.7\mu\text{s}$, c— $15.2\mu\text{s}$, d— $18.9\mu\text{s}$,
e— $20\mu\text{s}$, f— $21\mu\text{s}$ 。

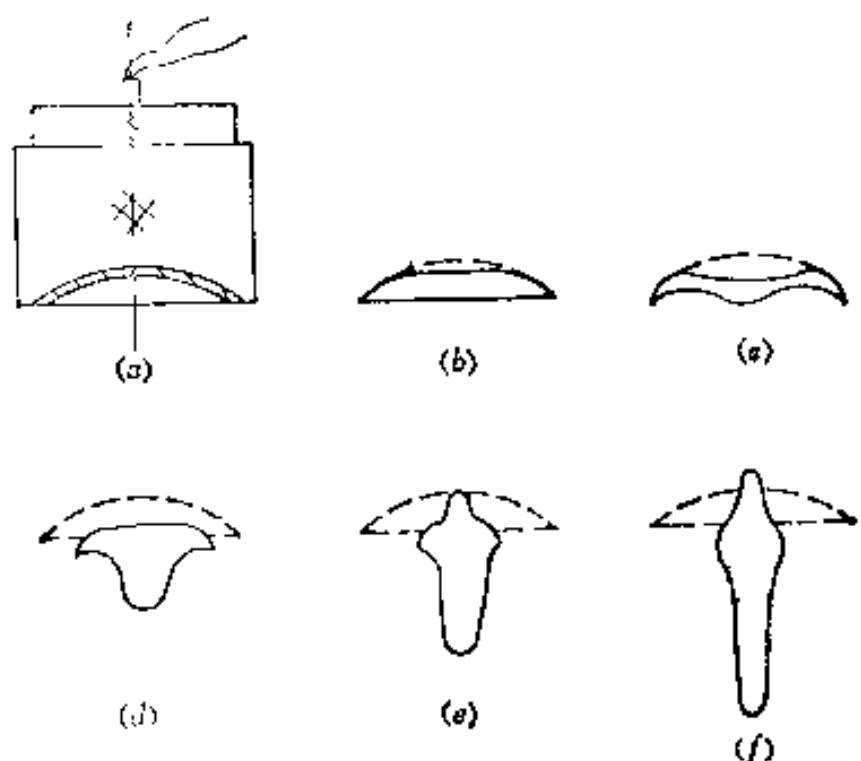


图11-1-7 圆弧形药形罩的变形过程

a—装药结构, b— $5.7\mu\text{s}$, c— $10\mu\text{s}$, d— $14\mu\text{s}$,
e— $23\mu\text{s}$, f— $26.3\mu\text{s}$ 。

梯恩梯40/黑索金60 铸装装药, 药柱直径 36mm、高 18mm, 装药密度 $1.67\text{g}/\text{cm}^3$, 紫铜药形罩, 罩圆弧半径 20mm, 罩底部直径 30mm, 壁厚 1mm, 特屈儿传爆药柱直径 30mm、高 6mm, 微秒雷管起爆。

实验表明, 圆弧形药形罩的变形过程与大锥角药形罩的变形大致相同, 药形罩翻转变形后形成弹丸, 翻转弹丸的速度大约为 $2000\text{m}/\text{s}$ 。

二、破甲过程

物体以不同速度撞击钢板时, 由于物体速度的不同而差别很大。用一个铁钉在钢板上至多能打出一个小坑, 用铜钉在钢板上连一个小坑也打不出, 速度 $1000\text{m}/\text{s}$ 左右的钢质弹丸冲击钢板时能撞击出与弹直径相同的孔径, 而聚能铜射流冲击钢板却能打出数倍于射流直径的孔径来, 图 11-1-8 表示弹丸和聚能射流冲击靶板孔径大小的比较。

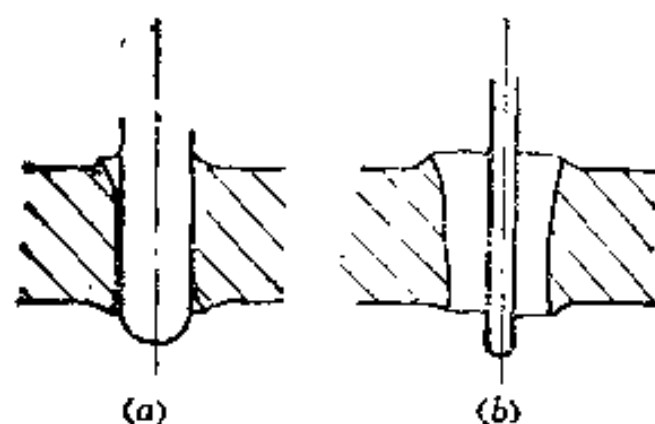


图11-1-8 弹丸和聚能射流冲击
钢板孔径大小的比较

a—速度 $1000\text{m}/\text{s}$ 左右的弹丸,

b—聚能射流。

弹丸和聚能射流冲击钢板，主要依靠弹丸和射流的动能对靶板进行穿透。由于弹丸速度不是太高，弹丸冲击钢板所产生的压力与钢板强度相当，此时钢板强度起很大作用；而射流速度很高，射流冲击钢板所产生的压力远远地高于钢板的强度，此时钢板强度的作用就很小。

聚能射流侵彻钢板的过程，称为破甲。破甲过程大致可以分为三个阶段：

第一个阶段（破甲开始阶段）

由于射流头部速度达 $7000\sim 8000\text{m/s}$ ，如果药形罩由铜制成，当速度为 8000m/s 时，射流头部能量密度达到 10^{11}Pa 以上，温度升高到 $4000\sim 5000^\circ\text{C}$ ，撞击点附近钢板材料迅速沿径向和轴向往四周运动，形成较大的坑口，并且向外还产生一些靶板残渣的飞溅。

第二阶段（均匀侵彻阶段）

此阶段射流速度较头部速度逐渐降低，并且靶板材料在初始冲击波的作用下，已经不是静止状态，而具有相当大的质点运动速度，因而此时撞击点的压力比射流撞击钢板初期要低得多，其撞击压力约为 $(2\sim 3)\times 10^{10}\text{Pa}$ ，但是即使这样，其撞击压力也比钢板强度高得多，并且残留射流在撞击点附近形成堆积，维持撞击点的压力不致于很快下降，使得钢板材料在后续射流的作用下，不断向下移动，形成愈来愈深的穿孔。

第三阶段（破甲终止阶段）

此阶段对应于射流后部对钢板侵彻，由于这部分射流速度相当低，钢板强度的影响愈来愈明显，并且后续射流也愈来愈推不开堆积在撞击点附近的残余射流，最后使得破甲过程停止。

射流破甲过程中，钢板发生强烈的变形，如图 11-1-9 所示，破甲之前靶板材料成方格形，射流侵入后，方格扭曲变形，孔底轴向受压，然后挤向两边、径向拉断，孔壁周围材料处于强烈压缩之中。

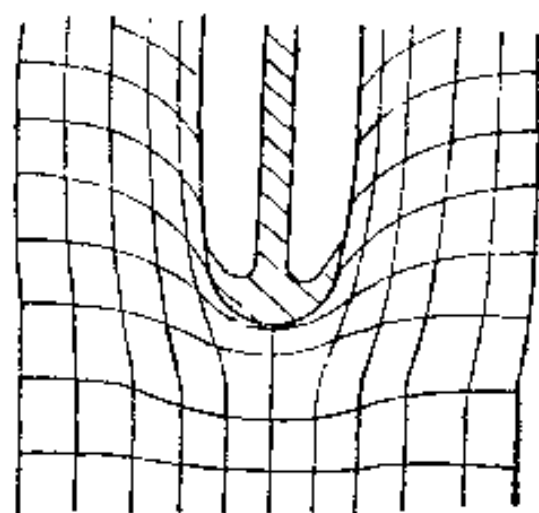


图11-1-9 射流穿孔周围材料的变形情况

射流各个部分撞击靶板之后，除了少部分飞溅出去之外，大部分都附在孔壁上，从解剖开的孔形可以看出，孔内壁镀上了一层铜。

破甲前后，靶板的质量基本上没有发生变化，表 11-1-1 给出了一个小型破甲弹在不同材料的板中进行穿孔后，板材在穿孔前、后质量的比较。从实验数据中看出，除了石蜡有可能有稍微的气化而略有减少质量之外，其它材料质量变化都很小，这也充分说明了穿孔是由于挤压变形所造成的，而不是熔化、气化等原因所造成的。

表11-1-1 不同材料板穿孔前、后的质量

材料	穿孔体积 (cm^3)	穿孔前质量 (g)	穿孔后质量 (g)	质量差 (g)
铅	30.0	5492.7	5490.0	-2.7
锌	20.0	8538.0	8536.0	-2.0
铝	8.0	1448.0	1451.3	+3.3
铁	3.5	1480.0	1485.0	+5.0
橡皮	2.5	1597.5	1600.0	+2.5
石蜡	150.0	1775.0	1764.0	-11.0

典型的破甲孔形如图 11-1-10 所示, 具体尺寸数据见表 11-1-2。孔形口部呈喇叭形, 孔径减小得较快, 这部分相当射流侵彻靶板的开始阶段, 其深度约占总深的 10%; 此后孔径由 20mm 均匀地下降到 7mm, 这部分相当于射流均匀侵彻靶板阶段, 其深度约占总深的 85%; 孔下部出现一小段葫芦形, 说明侵彻此处时射流已经断裂, 再往下就是略微增大的袋形孔底, 里面堆满失去能量的射流残渣, 这部分相当于破甲终止阶段, 其深度约占总深的 5%。

表11-1-2 典型破甲孔形不同深度处的直径

编号	深度 (mm)	孔径 (mm)	编号	深度 (mm)	孔径 (mm)
1	0	37×31.5	6	210	8.5
2	30	18.3	7	300	7.0
3	60	17.8	8	330	6.8
4	120	13.8	9	360	6.5
5	180	9.8	10	390	10×7.8

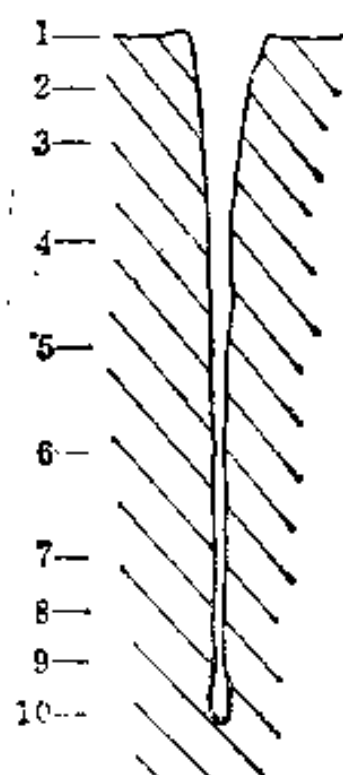


图11-1-10 典型的破甲孔形

§ 11-2 射流的速度和质量

射流侵彻靶板，主要依赖于射流所具有的动能，为了确定射流各部分的动能，必须知道沿着射流长度各部分射流的运动速度和质量。

一、射流速度和质量计算

药形罩在爆轰波的作用下，初始压力达到 10^{10}Pa 以上，在这么强的压力作用下，罩微元各部分陆续向轴线运动，然后在轴线上聚合形成射流和杵体。由于炸药爆炸作用在罩上的压力较比罩的强度大得多，因而在近似计算中，可以不考虑罩的强度，而把药形罩当作流体来处理。

图 11-2-1a 表示爆轰波到达药形罩 A 点位置处时，药形罩变形的模型，药形罩壁面从变形前位置 AO ，移动到变形过程中的位置 AB ，药形罩变形前的半锥角 α ，变形过程中 AB 与轴线的夹角（闭合角）为 β ， A 点以闭合速度 u_0 向轴线运动，闭合速度 u_0 方向与药形罩壁面外法线的夹角（变形角）为 δ 。当罩微元运动到轴线上后，分成射流和杵两部分，射流以速度 u_j 运动，杵以速度 u_r 运动，碰撞点 B 以速度 u_1 运动。

假设爆轰波到达药形罩壁面上各点时，罩微元各部分都发生相同的变形运动，并且假设罩各微元的闭合速度 u_0 、闭合角 β 和变形角 δ 都相等，变形过程中罩长度不变、密度不变，罩金属作为理想流体进行处理。

为了便于观察上述运动，可以用碰撞点不动的相对坐标进行描述。在整个运动图形上都叠加一个向左的运动速度 u_1 ，如图 11-2-1b 所示，这时碰撞点不动，药形罩壁面微元沿罩

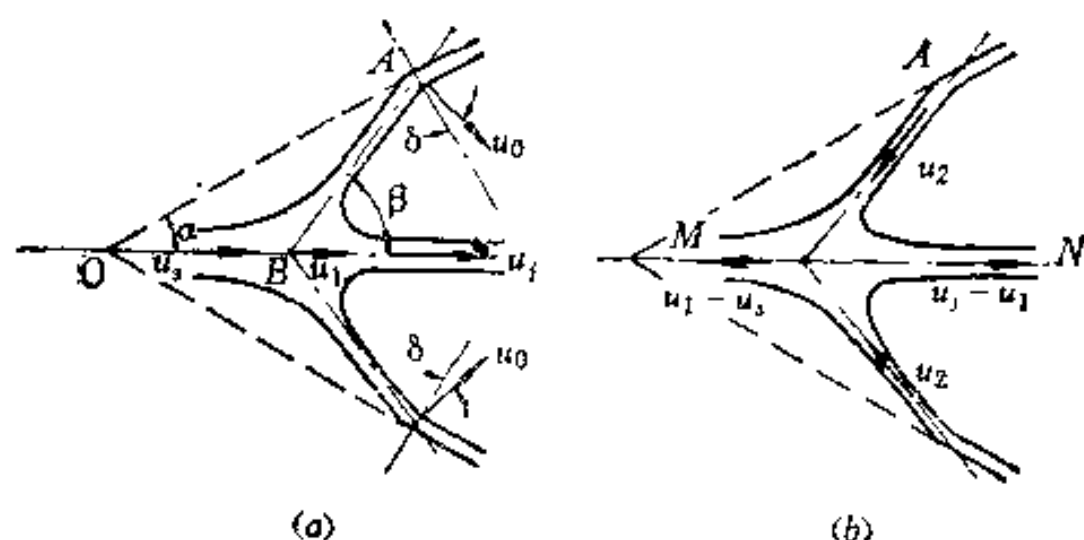


图11-2-1 射流形成模型

a —静坐标； b —相对坐标。

变形位置以速度 u_2 向碰撞点运动，到达碰撞点之后，射流部分以速度 $u_j - u_1$ 向右运动，杵部分以速度 $u_1 - u_r$ 向左运动。

对于从罩壁 A 至射流 N 的流动和从罩壁 A 至射流 M 的流动，分别采用能量守恒方程。由于单位质量罩微元的动能为

$-\frac{1}{2}u_2^2$ ，压力位能为 $\frac{p_2}{\rho_2}$ ，单位质量射流的动能和压力位能

分别为 $\frac{1}{2}(u_j - u_1)^2$ 和 $\frac{p_j}{\rho_j}$ ，单位质量杵的动能和压力位能

分别为 $-\frac{1}{2}(u_1 - u_r)^2$ 和 $\frac{p_r}{\rho_r}$ ，从而可以列出

$$-\frac{p_j}{\rho_j} + \frac{1}{2}(u_j - u_1)^2 = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{1}{2}u_2^2$$

$$-\frac{p_r}{\rho_r} + \frac{1}{2}(u_1 - u_r)^2 = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{1}{2}u_2^2$$

由于已经假设罩变形过程中，密度保持不变，即

$$\rho_2 = \rho_j = \rho_r$$

又假若将 M 、 N 以及 A 点取得离碰撞点足够远时，可以认为由于爆轰产物的膨胀，它们趋于一致，即

$$(p_2)_A = (p_1)_B = (p_2)_M$$

将上述条件代入能量方程, 可以分别得到射流和杵体的速度

$$\left. \begin{aligned} u_j &= u_1 + u_r \\ u_r &= u_1 - u_2 \end{aligned} \right\} \quad (11-2-1)$$

由于射流和杵体的质量都是来自于药形罩的变形, 设药形罩的质量为 m , 射流和杵的质量分别为 m_j 和 m_r , 按照质量守恒

$$m = m_j + m_r \quad (11-2-2)$$

按照轴线方向上的动量守恒

$$-mu_2 \cos \beta = -m_r(u_1 - u_r) + m_j(u_j - u_r) \quad (11-2-3)$$

将 (11-2-1) 和 (11-2-2) 式代入 (11-2-3) 式, 分别消去 u_r 和 u_j , 可以得到射流质量和杵体质量的表达式

$$\left. \begin{aligned} m_j &= \frac{m}{2} (1 - \cos \beta) = m \sin^2 \frac{\beta}{2} \\ m_r &= \frac{m}{2} (1 + \cos \beta) = m \cos^2 \frac{\beta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (11-2-4)$$

式中 m 是药形罩质量, β 是药形罩的闭合角。

按照药形罩变形的过程以及假设, 当爆轰波由 A 点沿着壁面传播到 C 点时, 罩微元 A 到达轴线上 E 点, 也就是说碰撞点从 B 点移动到了 E 点, 由图 11-2-2 可以看出

$$AE = u_0 t, \quad BE = u_1 t, \quad AB = u_2 t$$

$$\angle ABE = \beta$$

$$\angle BAE = 90^\circ - (\beta - \alpha) + \delta$$

$$= 90^\circ - (\beta - \alpha - \delta)$$

$$\angle AEB = 180^\circ - \beta - [90^\circ - (\beta - \alpha - \delta)]$$

$$= 90^\circ - (\alpha + \delta)$$

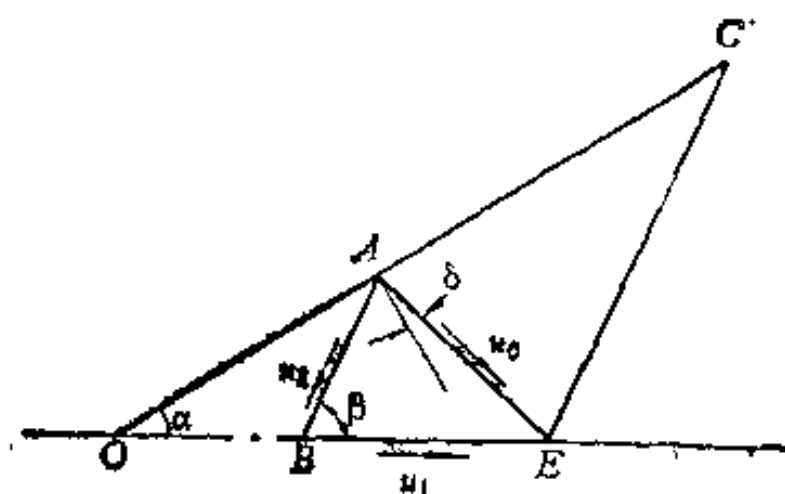


图11-2-2 射流速度计算图形

对于三角形 ABE ，运用正弦定律

$$\frac{BE}{\sin \angle BAE} = \frac{AB}{\sin \angle BEA} = \frac{AE}{\sin \angle ABE}$$

或

$$\frac{u_1}{\sin[90^\circ - (\beta - \alpha - \delta)]} = \frac{u_2}{\sin[90^\circ - (\alpha + \delta)]}$$

$$= \frac{u_0}{\sin \beta}$$

得到

$$u_1 = u_0 \frac{\cos(\beta - \alpha - \delta)}{\sin \beta}$$

$$u_2 = u_0 \frac{\cos(\alpha + \delta)}{\sin \beta}$$

将之代入 (11-2-1) 式，可以得到射流速度和柝体速度

$$u_f = u_0 \left[\frac{\cos\left(\frac{\beta}{2} - \alpha - \delta\right)}{\sin \frac{\beta}{2}} \right] \quad (11-2-5)$$

$$u_j = u_0 - \frac{\cos \left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2} \right)}{\sin \frac{\beta}{2}}$$

式中 u_0 是药形罩的闭合速度, β 是药形罩的闭合角, δ 是变形角, α 是罩的半锥角。

由公式 (11-2-4) 和 (11-2-5) 二式可以看出, 为了求出 u_j 、 u_r 、 m_j 、 m_r 四个量, 需要知道 m 、 α 、 β 、 δ 和 u_0 五个量, 其中 m 、 α 由药形罩的结构给出, 而 β 、 δ 、 u_0 需要计算。

对于实际装药来说, u_0 、 β 、 δ 并不是常数, 如图 11-2-3 给出了某种装药结构条件下 u_0 、 β 、 δ 沿轴向位置的实测曲线, 由于药形罩顶部位置炸药量多, 罩闭合速度大, 药形罩底部位置炸药量少, 罩闭合速度也就小, 从罩顶至罩底, 闭合角一直在增加, 变形角也不是常数。

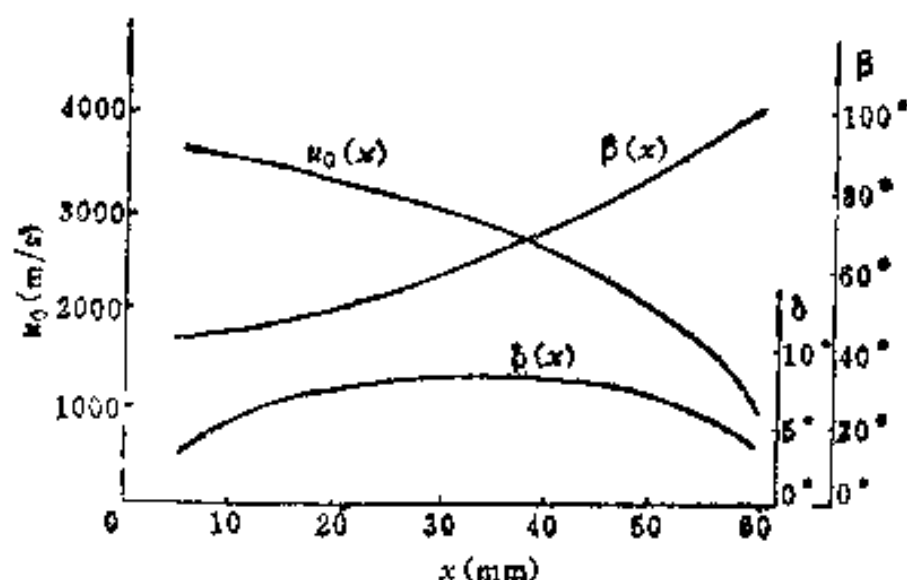


图11-2-3 u_0 、 β 、 δ 沿药形罩母线上的分布曲线

总的看来, u_0 在整个药形罩大部分范围内变化都不大, 只是在接近罩底时降低得快些; δ 在罩顶和罩底两端下降得

较多，而在整个药形罩大部分位置上变化量很小； β 变化得较大一些，但沿着罩母线变化比较均匀。因而，虽然 u_0 、 β 、 δ 不是常数，但是对应于某个罩微元，只要将该罩微元的 u_0 、 β 、 δ 代入 (11-2-4) 和 (11-2-5) 式，就可以将该微元所对应的 u_j 、 u_r 、 m_j 、 m_r 计算出来。

二、射流速度分布的实验测定

用脉冲 X 光、可见光高速照相或示波器测定射流头部速度是很方便的，但是要测定射流速度分布就需要采取一定的措施才行。

通常的办法是让射流穿透一定厚度的钢板，消耗掉一段射流，剩下的射流穿过钢板后在空气中继续运动，测定此剩余射流的端部速度，通过采用不同厚度的试验测量，就可以得到截掉不同长度射流后的射流端部速度。

测定截掉不同长度射流的端部速度后，采用下面几点假设：

1. 射流各个微元部分在运动过程中，速度保持不变；
2. 射流各个微元之间，相互不发生作用，没有能量交换；
3. 射流保持连续，不发生间断；
4. 破甲过程只是不断陆续消耗前面射流的过程，而对后面未消耗的射流不产生影响。

按照这几点假设，就可以将通过不同厚度钢板所截取的剩余射流端部，恢复到原来射流的位置上，从而得到射流速度沿射流长度的分布。

表 11-2-1 给出了某种聚能装药采用不同厚度钢板截取射流后，所测后剩余射流端部速度的实验数据。从测定的数

看出，沿着射流的长度，射流速度是不断变化的，其值从头部至尾部逐渐减少。

表11-2-1 不同厚度钢板截取后的射流端部速度

钢板厚度 (mm)	u_j (m/s)	试验发数	钢板厚度 (mm)	u_j (m/s)	试验发数
0	7560	5	240	3480	2
40	6340	3	280	2770	1
80	5420	2	320	2720	2
120	4850	2	360	2420	2
160	4380	2	400	2260	2
200	3840	2	420	2000	1

图 11-2-4 表示不同时刻射流速度沿射流长度分布的实验曲线。从实验数据中看出，随着时间的增加，射流愈拉愈长，并且射流速度沿着射流是线性分布的。

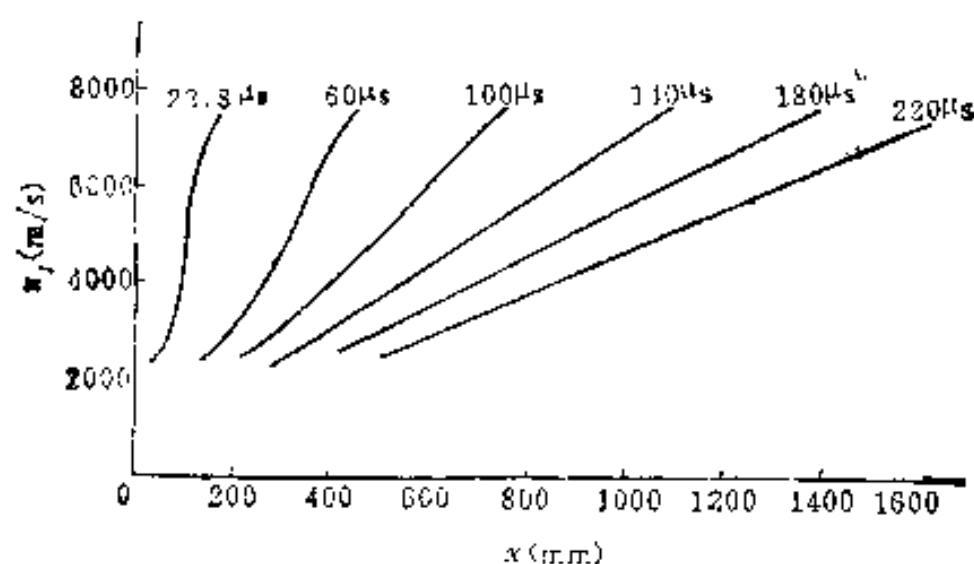


图11-2-4 不同时刻射流速度的分布

三、射流质量分布的测定

用脉冲 X 光照相得到射流的外形，假定射流的横截面是圆的，由外形量得直径，则可以计算出射流各部分的质量，

表11-2-2 沿着射流长度的速度、质量、能量分布

u (m/s)	Δm (g)	E (J $\times 10^3$)
7500~7310	1.57	29.69
7310~7060	0.80	17.74
7060~6810	0.50	13.87
6810~6560	0.69	12.35
6560~6310	0.55	11.47
6310~6060	0.74	11.07
6060~5810	0.55	10.49
5810~5560	0.68	9.81
5560~5310	0.80	9.47
5310~5060	0.76	8.97
5060~4810	0.75	8.71
4810~4560	0.95	8.68
4560~4310	0.90	8.65
4310~4060	1.09	8.77
4060~3810	1.01	8.92
3810~3560	1.39	9.02
3560~3310	1.45	9.04
3310~3060	1.74	8.87
3060~2810	2.11	8.75
2810~2560	2.25	8.33
2560~2310	3.07	7.89
2310~2060	3.16	7.49
2060~1810	2.13	7.09

$$\Delta m = \frac{\pi}{4} \rho_f d^2 \Delta l$$

式中 ρ_f ——射流密度, 取为单金属密度, 如铜为 8.9g/cm^3 ,
 d 、 Δl ——量得该部分射流的直径和长度。

当已知射流各部分微元的速度和质量后, 则可以计算出该部分射流所具有的动能

$$E = \frac{1}{2} \cdot \Delta m u^2$$

式中 u_j 为该部分射流的平均速度。

表 11-2-2 给出了某种聚能装药结构, 沿着射流长度不同速度间隔范围所测定的质量, 并且按照实测数据也计算出了各部分射流所具有的能量。

图 11-2-5 表示该装药结构在射流长度为 140mm 时射流速度、质量以及能量沿着射流的分布曲线。由曲线中明确看出, 从射流头部至射流尾部, 速度线性降低, 质量不断增加, 能量则逐渐减少。

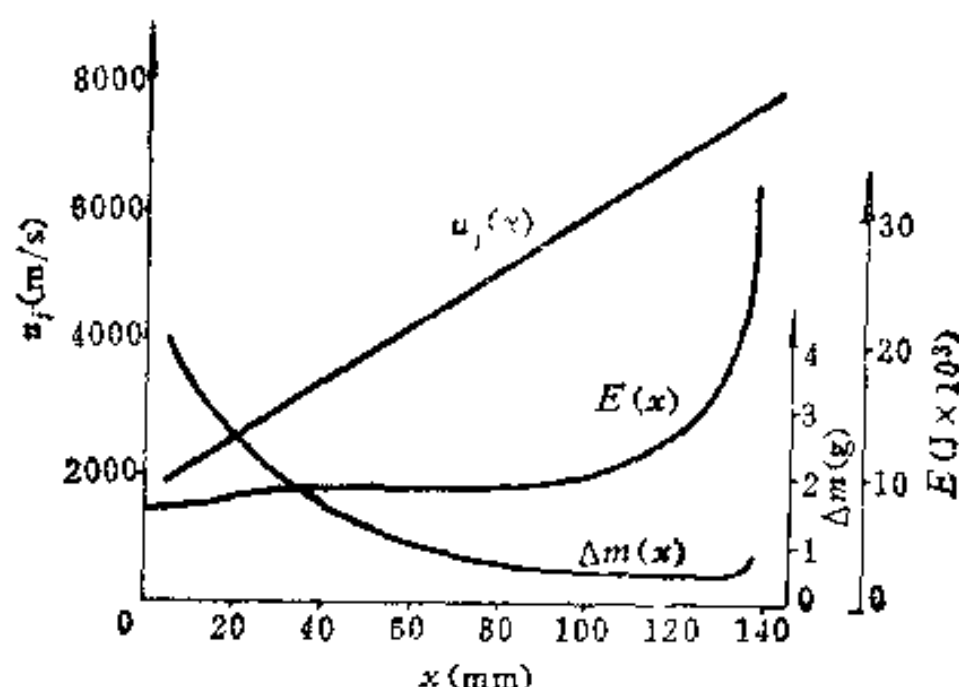


图11-2-5 射流速度、质量、能量
沿着射流的分布

§ 11-3 破 甲 深 度

破甲深度是衡量聚能装药结构好坏的重要标准。在现有的破甲深度计算中, 多是以射流参数实验测量数据为依据进

行计算，即使这样也不易考虑装药结构的各种情况。

下面主要阐述视破甲过程为定常流动的初步理论，并介绍计算破甲深度的经验公式。

一、破甲深度计算

破甲的过程如图 11-3-1a 所示，射流运动的速度为 u_j ，穿透靶板的破甲速度为 u ，由于碰撞压力很高，在近似计算中可以不考虑射流和靶板材料的强度，不考虑它们密度的变化，把射流和靶板当作理想流体对待。

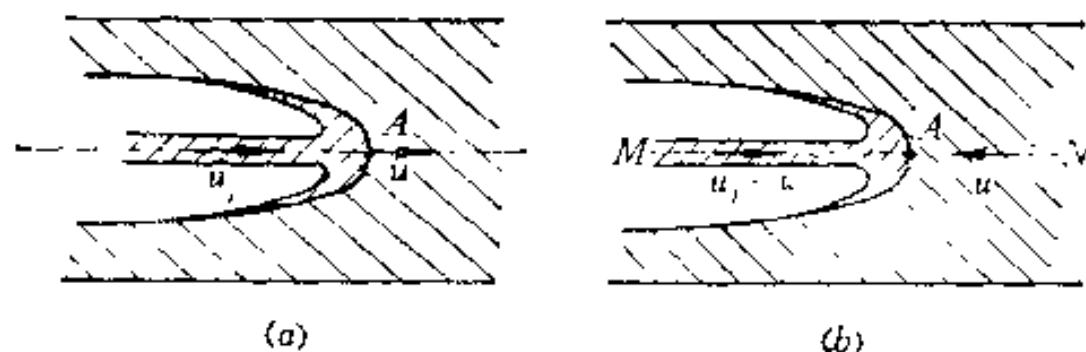


图11-3-1 破甲过程

a —静坐标； b —相对坐标。

为了便于观察上述运动，可以用射流与靶板接触点不动的相对坐标进行描述，在整个运动图形上都叠加一个向左的运动速度 u ，如图 11-3-1b 所示。这时接触点不动，靶板以速度 u 向左运动，射流以速度 $u_j - u$ 向右运动。假若在射流速度不变的条件下，射流的总长度为 l ，破甲总时间为 t ，则破甲时间

$$t = \frac{l}{u_j - u} \quad (11-3-1)$$

破甲深度

$$L = ut \quad (11-3-2)$$

对于在射流上从 M 点至 A 点的流动, 可以运用能量守恒方程。由于 M 点处单位质量射流的动能为 $-\frac{1}{2}(u_j - u)^2$, 压力位能为 $\frac{(p_j)_M}{\rho_j}$, A 点处单位质量射流的动能为 0, 压力位能为 $\frac{(p_j)_A}{\rho_j}$ 。能量守恒可以写成

$$-\frac{(p_j)_M}{\rho_j} + -\frac{1}{2}(u_j - u)^2 = \frac{(p_j)_A}{\rho_j}$$

对于在靶板上从 N 点至 A 点的流动, 也可以运用能量守恒方程, 由于 N 点处单位质量靶板的动能为 $-\frac{1}{2}u^2$, 压力位能为 $\frac{(p_t)_N}{\rho_t}$, A 点处单位质量靶板的动能为 0, 压力位能为 $\frac{(p_t)_A}{\rho_t}$ 。能量守恒可以写成

$$\frac{(p_t)_N}{\rho_t} + -\frac{1}{2}u^2 = \frac{(p_t)_A}{\rho_t}$$

由于接触点 A 处, 射流和靶板的压力相等, 即

$$(p_j)_A = (p_t)_A$$

又当取 M 和 N 都离接触点 A 足够远时, 可以认为它们与周围环境压力相平衡。

从上述两个能量守恒方程得到

$$\rho_j(u_j - u)^2 = \rho_t u^2$$

因而, 求出破甲速度与射流速度的关系

$$u = \frac{u_j}{1 + \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_j}}} \quad (11-3-3)$$

将 (11-3-3) 代入 (11-3-1) 和 (11-3-2) 式, 消去 t

后，可以得到破甲深度公式

$$L = l \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_t}} \quad (11-3-4)$$

公式 (11-3-4) 表明，破甲深度与射流长度成正比，与射流密度和靶板密度之比的平方根成正比。

公式 (11-3-4) 是在不考虑靶板强度以及将射流速度作为不变的条件下得到的。可是实际上，这些条件都与实际情况不相符合，从实验测定中得知射流各点的速度是不相等的，头部速度高，尾部速度低，而靶板又多是高强度的合金钢，因而在真正计算中还必须考虑射流速度的变化以及靶板强度的影响。

二、破甲深度经验计算

破甲弹的聚能装药有两种主要形式，一种是不带隔板的聚能装药，一种是带隔板的聚能装药，如图 11-3-2 所示。这两种装药结构在实际中都经常采用。

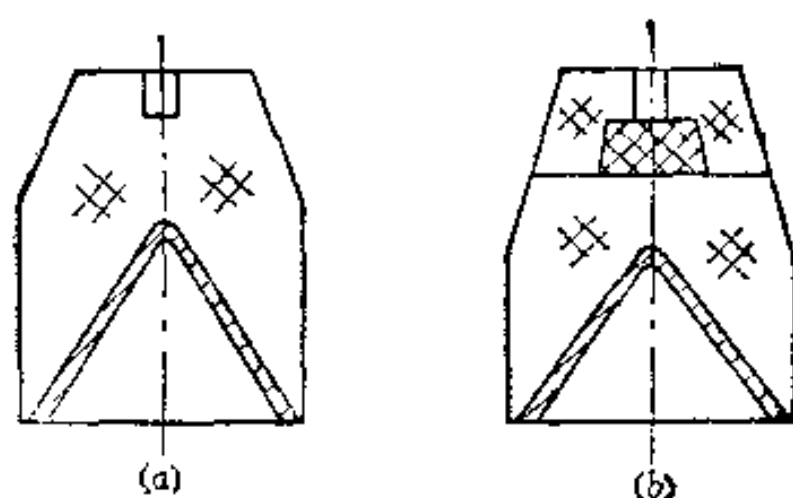


图11-3-2 聚能装药结构

a — 不带隔板， b — 带隔板。

针对这两种装药形式, 介绍两个较实用的破甲深度经验计算公式

$$L_N = \eta(0.0118 \times 10^{-3} \alpha^3 + 0.106 \alpha + 0.250 \times 10^{-7} \rho_0 D^3 - 0.53) l_m \quad (11-3-5)$$

$$L_y = \eta(-0.706 \times 10^{-3} \alpha^3 + 0.593 \alpha + 0.475 \times 10^{-7} \rho_0 D^3 - 9.84) l_m \quad (11-3-6)$$

式中 L_N 、 L_y ——无隔板和有隔板装药结构的静破甲深度 (mm);

α 、 l_m ——药形罩半锥角 ($^\circ$) 和母线长 (mm);

ρ_0 、 D ——装药密度 (g/cm^3) 和爆速 (m/s);

η ——药形罩和靶板性能的特征系数, 其数据见表 11-3-1。

表11-3-1 η 值

药形罩	靶板	η	药形罩	靶板	η
紫铜车制	装甲钢	0.88~0.93	钢冲压	装甲钢	0.77~0.79
紫铜车制	碳钢	1.00	铝车制	装甲钢	0.40~0.49
紫铜冲压	装甲钢	0.97~1.02	玻璃	装甲钢	~0.22
紫铜冲压	碳钢	1.10			

破甲深度是有利炸高时的值, 公式 (11-3-5) 适用于药形罩角度为 $30^\circ \sim 70^\circ$ 的范围, 公式 (11-3-6) 适用于药形罩角度为 $40^\circ \sim 70^\circ$ 的范围。

〔例11-1〕 假若有一不带隔板的聚能装药, 冲压钢制药形罩锥角 60° , 底部直径 100mm, 装填梯恩梯 50/黑索金 50 炸药, 装药密度 $1.60 \text{ g}/\text{cm}^3$, 试计算对装甲钢板的破甲深度。

解 按照不带隔板聚能装药计算破甲深度的经验式(11-

3-5), 进行计算。

梯恩梯50/黑索金50装药密度 $\rho_0 = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 时, 爆速可按康姆莱特公式进行计算。其爆速值为

$$D = 7500 \text{ m/s}$$

药形罩半锥角 $\alpha = 30^\circ$, 底直径 100mm, 罩母线长

$$l_m = \frac{50}{\sin 30^\circ} = \frac{50}{0.5} = 100 \text{ (mm)}$$

实验条件为钢制冲压药形罩和装甲钢板, 取 $\eta = 0.78$ 。则破甲深度

$$\begin{aligned} L_N &= \eta(0.0118 \times 10^{-2} \alpha^2 + 0.106 \alpha + 0.250 \\ &\quad \times 10^{-7} \rho_0 D^2 - 0.53) l_m \\ &= 0.78(0.0118 \times 10^{-2} \times 30^2 + 0.106 \times 30 + 0.250 \\ &\quad \times 10^{-7} \times 1.6 \times 7500^2 - 0.53) \times 100 \\ &= 0.78 \times 5.006 \times 100 \\ &= 394 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

〔例11-2〕 假若有一带隔板的聚能装药, 冲压紫铜药形罩锥角 50° , 底部直径 80mm, 装填钝感黑索金炸药, 密度 1.65 g/cm^3 , 试计算对装甲钢板的破甲深度。

解 按照带隔板聚能装药计算破甲深度的经验式 (11-3-6) 进行计算。

钝感黑索金炸药装药密度 $\rho_0 = 1.65 \text{ g/cm}^3$ 时, 炸药爆速可以按混合炸药爆速计算公式进行计算, 其值为

$$D = 8300 \text{ m/s}$$

药形罩半锥角 $\alpha = 25^\circ$, 罩底直径 80mm, 罩母线长

$$l_m = \frac{40}{\sin 25^\circ} = \frac{40}{0.423} = 94.6 \text{ (mm)}$$

实验条件为紫铜药形罩和装甲钢板, 取 $\eta = 1$ 。则破甲

深度

$$\begin{aligned}
 L_v &= \eta(-0.706 \times 10^{-2} \alpha^2 + 0.593 \sigma + 0.475 \\
 &\quad \times 10^{-7} \rho_0 D^2 - 9.84) l_m \\
 &= 1 \times (-0.706 \times 10^{-2} \times 25^2 + 0.593 \times 25 + 0.475 \\
 &\quad \times 10^{-7} \times 1.65 \times 8300^2 - 9.84) \times 94.6 \\
 &= 1 \times 5.95 \times 94.6 \\
 &= 562(\text{mm})
 \end{aligned}$$

§ 11-4 影响破甲威力的因素

聚能装药是对付重型装甲的,为了有效地摧毁装甲防护,要求聚能装药有足够的破甲威力,其中包括破甲深度、前效作用和金属射流的稳定性。后效作用指金属射流穿透装甲后,还有足够的能力破坏装甲内部设施;要求金属射流稳定,就是说尽量改善装药结构,减少各种因素对金属射流的影响,以使得每发聚能装药都能达到规定的技术要求。

破甲威力是聚能装药作用效果的最终体现,所采用的炸药、药形罩、隔板、装药对称性、炸高以及装药壳体和旋转运动,都对破甲效果有影响,靶板材料不同对破甲防护的效果也不相同。下面对各种主要因素,进行一下讨论。

一、炸 药

1. 炸药性能

炸药是聚能破甲的能源。炸药爆炸后很快将能量传给药形罩,药形罩在轴线上闭合,产生高速运动的金属流,然后依靠金属流破甲。理论分析和实验研究都表明,炸药影响破甲威力的主要因素是爆压。

表 11-4-1 给出了采用不同炸药的破甲试验数据,试验

药柱直径为 48mm、长度为 140mm，药形罩材料为软钢，锥角 44° ，底径 41mm，炸高为 50mm。

表 11-4-1 炸药性能对破甲的影响

炸 药	ρ (g/cm ³)	P_H (Pa $\times 10^8$)	L (mm)	V (cm ³)	试验发数
梯恩梯	1.71	232	144 ± 4	35.1 ± 9	8
B 炸药 60% 梯恩梯 20	1.562	209	136 ± 9	29.8 ± 1.7	4
B 炸药 50% 梯恩梯 50	1.616	194	140 ± 4	27.5 ± 1.2	5
B 炸药 20% 梯恩梯 80	1.634	171	138 ± 7	23.5 ± 0.7	5
梯恩梯	1.591	152	124 ± 7	19.2 ± 1.2	10
黑索金	1.261	123	114 ± 5	12.6 ± 0.9	10

从表中看出，随着炸药爆压的增加，破甲深度和孔容积都增加。将表中数据作图 11-4-1，图中曲线表明破甲效果与炸药爆压基本上成线性关系。

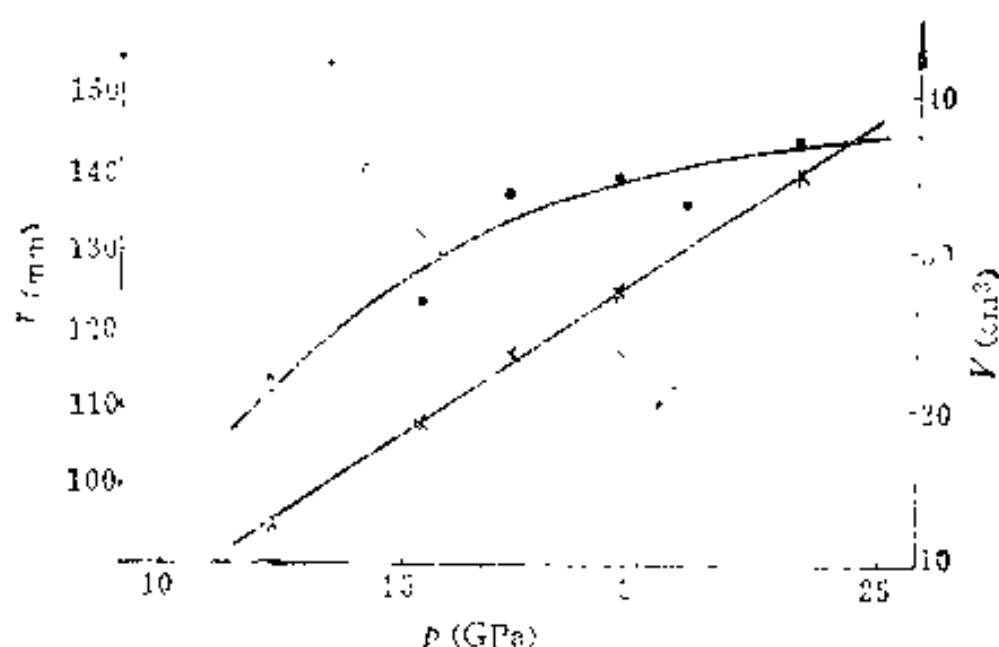


图 11-4-1 破甲深、孔容积与爆压的关系

图中孔容积-爆压关系比破甲深-爆压关系的线性规律性

要好。原因在于本试验是在固定炸高下进行的，对于不同爆压的聚能装药，其有利炸高不可能相同，对破甲深度会有影响。而孔容积却能更有效地表示破甲过程中靶板所吸收的能量。

对于含铝炸药，其破甲效果明显降低。这主要由于虽然铝粉增加了爆热，但此能量是在爆轰波阵面后二次反应中释放出来的，而药形罩闭合的过程很快，主要取决于最初 5~10 μs 内的爆轰能量，铝粉反应放出的能量来不及推动药形罩，却降低了波阵面上的压力，因而使破甲效果降低。

炸药爆压是爆速和装药密度的函数，按照爆轰理论

$$p = \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2$$

式中 γ 值可以近似取作 3，而对于同种炸药，爆速与装药密度间又存在着线性关系。所以，为了提高破甲能力，必须尽量选取高爆压炸药；当装药选定后，为了提高破甲能力，还必须尽可能地提高装填密度。

2. 装药形状

聚能装药的破甲深度与装药直径和长度有关，随着装药直径和长度的增加，破甲深度增加。

增加装药直径（相应地增加药形罩直径）对提高破甲威力特别有效，破甲深度和孔径都随着装药直径的增加而线性地增加。但是装药直径受着弹径的限制，增加装药直径后就要相应增加弹径和质量，在实际设计中是有限制的。在较小的装药直径和质量下，尽量提高聚能装药的破甲威力，才是设计工作者的任务。

随着装药长度的增加，破甲深度增加，试验表明当药柱长度增加到三倍装药直径以上时，破甲深度不再增加。这里

可以用“爆轰头”理论加以解释，当装药由左端引爆后，随着爆轰波的传播，在轴向和径向都有稀疏波进入，致使爆轰产物向后面和侧面飞散，作用在右端物体上的药量仅仅相当于图11-4-2中的圆锥区部分。对于轴向稀疏波影响，按照一维流动计算结果表明，朝爆轰传播方向飞散的装药仅占总质量的4.9，而径向稀疏波向里传播的速度为 $D/2$ 。这样，当药柱长度小于2.25倍装药直径时，爆轰头为截锥形，其长度随装药长度的增加而增加，当药柱长度大于2.25倍装药直径时，爆轰头呈完整的圆锥形，并且不随装药长度的增加而变化。

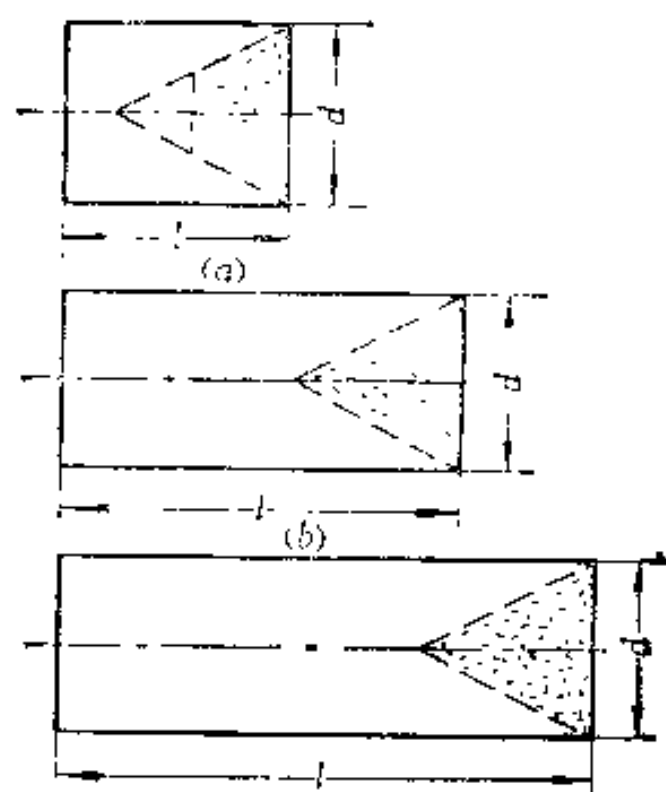


图11-4-2 爆轰头随装药长度的变化

$a-l < 2.25d$; $b-l = 2.25d$; $c-l > 2.25d$ 。

在确定聚能装药的结构形状时，必须综合考虑多方面的因素，以使得更加有效地利用炸药。

二、药 形 罩

1. 药形罩材料

当药形罩闭合后，形成连续而不断裂的射流愈长，密度愈大，其破甲愈深。从原则上说，要求药形罩材料密度大、塑性好，在形成射流过程中不气化。

表 11-4-2 是不同材料药形罩的破甲数据。试验条件：采用梯恩梯50/黑索金50装药，药柱直径 36mm，药量 100g，密度 1.6g/cm^3 ，药形罩锥角 40° ，罩壁厚 1mm，罩底部直径 30mm，炸高 60mm。

表 11-4-2 不同材料药形罩的破甲试验

罩材料	$L_{\max}(\text{mm})$	$L_{\min}(\text{mm})$	$\bar{L}(\text{mm})$	试验发数
紫铜	140	103	123	23
生铁	121	98	111	4
钢	113	96	103	5
铝	73	70	73	5
锌	93	80	79	5
铅			91	1

试验表明，紫铜的密度较高，塑性好，破甲效果最好，生铁虽然在通常条件下是脆性的，但是在高速、高压条件下却具有良好的可塑性，所以破甲效果也相当好，铝作为药形罩虽然延展性好，但密度太低；铅作为药形罩虽然延展性好、密度高，但是由于铅的熔点和沸点都很低，在形成射流过程中易于气化，所以铝罩和铅罩的破甲效果都不好。

对于粉末冶金罩也曾做过试验，试验采用带隔板的梯恩梯 50/黑索金 50 药柱，药柱质量 165g，药形罩锥角 45° ，罩底径 50mm，炸高 100mm，试验数据见表 11-4-3。

表 11-4-3 粉末冶金药形罩试验

罩 材 料	L (mm)	试验发数
车制紫铜罩	200	3
铜粉末冶金罩	180	3
铁粉末冶金罩	120	8

试验表明：粉末冶金罩的破甲深度比同种材料车制药形罩的破甲深度浅，但它不形成整杵，此外铁粉末冶金罩破甲时伴随有强烈的火光，有一定的燃烧效应。

2. 药形罩锥角

按照射流速度和质量的计算公式

$$u_j = u_0 \frac{\cos \left(\frac{\beta}{2} - \alpha - \delta \right)}{\sin \frac{\beta}{2}}$$

$$m_j = \frac{1}{2} m (1 + \cos \beta)$$

为了分析问题简便起见，进一步假设炸药为瞬时爆炸，并且药形罩壁面同时平行地向轴线闭合，这时 $\alpha = \beta$ ， $\delta = 0$ ，因而

$$u_j = u_0 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$$

$$m_j = \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

由此简化公式看出,射流速度随药形罩锥角的减小而增加,射流质量随药形罩锥角的减小而减少。

表11-4-4给出了不同药形罩锥角时的破甲试验结果,试验条件与表11-4-2的试验条件相同,只是药形罩锥角不同时,罩高度和药柱高度皆有所不同。

表11-4-4 不同锥角的药形罩破甲试验

罩锥角	$v_{jet}(m/s)$	$L(mm)$			试验 发数
		max	min	平均值	
30°	14000				
35°	7800	155	104	132	12
40°	7000	140	119	129	5
50°	6200	135	114	123	7
60°	6100	127	106	120	7
75°	5700	124	113	121	7
120°	4000	80	68	85	5

试验表明:当药形罩锥角低于30°时,射流质量少,孔径很细,且破甲深度跳动很大;当药形罩锥角在30°到70°之间时,射流具有足够的质量和速度,锥角小时射流速度高,利于提高破甲深度,锥角大时射流质量大,利于增大孔径,提高后效作用,这个范围适宜于破甲弹的需要;当药形罩锥角大于70°之后,金属流形成的过程发生变化,破甲深度迅速下降;药形罩锥角达到120°以上时,药形罩在变形过程中产生翻转现象,出现反射流,药形罩主体变成翻转弹丸,其破甲深度很小,但孔径很大,这种结构对付薄装甲效果很好,例如反坦克车底雷就采用这种结构形式。

2. 药形罩壁厚

药形罩最佳壁厚随药形罩材料、锥角、直径以及有无外

壳而变化。总起来说，药形罩最佳壁厚随罩材料密度的减小而增加，随罩锥角的增大而增加，随罩口径的增加而增加，随装药外壳的加厚而增加。

为了改善射流性能，提高破甲效果，实践中通常采用变壁厚的药形罩。图11-4-3表示药形罩壁厚变化对破甲效果的影响，试验采用钢制药形罩，罩外锥角 45° ，罩底径111mm，炸高152mm，其它尺寸如图所示。从试验中看出：采用顶部厚、底部薄的药形罩，穿孔浅，且成喇叭形；采用顶部薄、底部厚的药形罩，只要壁厚变化适当（图11-4-3c），则穿孔进口变小，随之出现鼓肚，且收敛缓慢，能够提高破甲深度，但是如果壁厚变化不合适，仍会降低破甲深度。

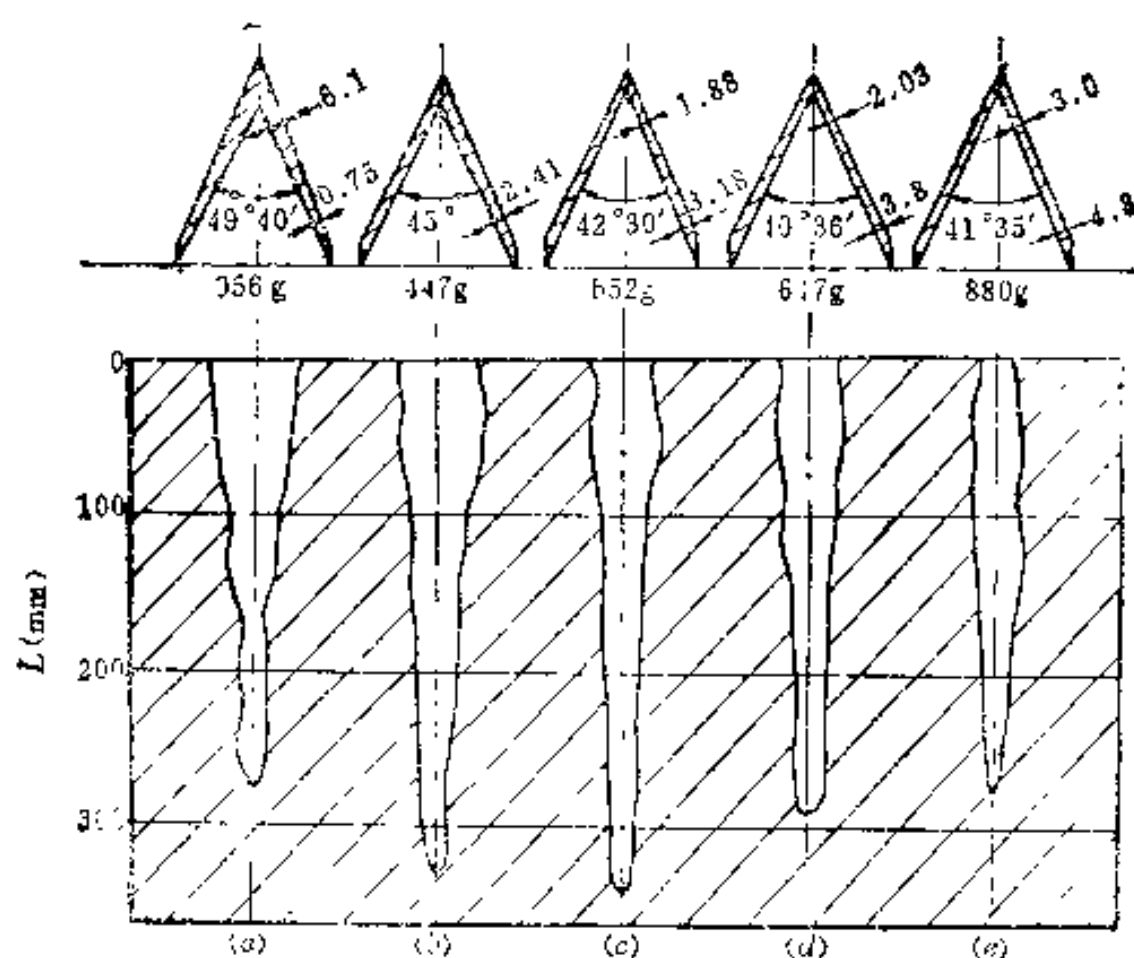


图11-4-3 各种变壁厚药形罩破甲孔形

适当采用顶部薄、底部厚的变壁厚药形罩，提高破甲深度的原因主要在于增加了射流头部速度，降低了射流尾部速度，使射流拉长，从而使破甲深度增加。

三、隔 板

1. 隔板的作用

在聚能装药中采用隔板，目的在于改变在药柱中传播的爆轰波形，控制爆轰方向和爆轰波到达药形罩的时间，提高爆轰波作用在药形罩上的载荷，从而增加射流速度，达到提高破甲深度的目的。

图11-4-4是爆轰波在装药中传播的示意图，无隔板装药的爆轰波形是由起爆点发出的球面波，波阵面与罩母线的夹角为 φ_1 ；有隔板装药的爆轰波传播方向，由起爆点开始绕过隔板指向药形罩壁面，作用于药形罩上的爆轰波波阵面与罩母线的夹角为 φ_2 。显然

$$\varphi_2 < \varphi_1$$

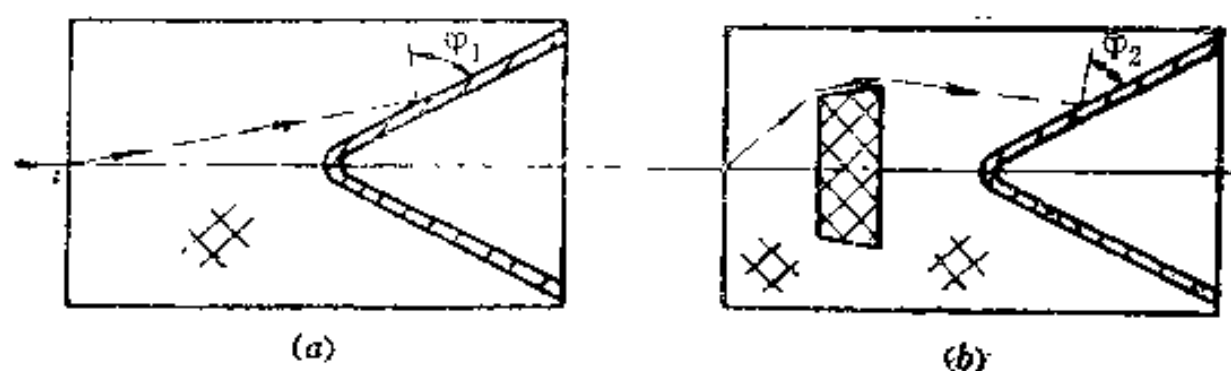


图11-4-4 爆轰波传播示意图

a—无隔板装药；b—有隔板装药。

理论分析和试验结果表明，作用于药形罩壁面上某点的初始压力与 φ 角有很大关系。对于紫铜药形罩，这个关系可

以近似表达为

$$p = p_H(\cos\varphi + 0.68)$$

式中 p_H 是炸药爆压。

采用隔板之后, φ 角变小, 从而使得作用于罩面上的初始压力增加。

实验表明, 有隔板聚能装药较比无隔板聚能装药, 射流头部速度可以提高25%左右, 破甲深度可以提高15~30%。

采用隔板结构, 除了有利方面之外, 也存在着不利方面, 即有隔板时破甲深度跳动大, 破甲性能不稳定。

2. 隔板的选择

隔板材料来源一般说来是广泛的, 在某种装药结构上, 曾用层压布板、泡沫塑料、酚醛压塑料、玻璃纤维压塑料、石膏、粘土、蜡、钢、铝和空气等材料做成隔板进行破甲对比试验, 试验结果表明, 除了空气和铝之外, 其余几种材料隔板与层压布板隔板的破甲效果皆相近, 破甲深度的差值在 $\pm 5\%$ 左右。

作为隔板一般要求: 隔爆性能好, 材料组织均匀、质量轻, 且有足够的强度。通常采用塑料隔板, 表11-4-5是常用的几种塑料。

表11-4-5 常用的几种隔板材料

材 料	酚醛层压布板 3302-1	酚醛压塑料 PS 501	聚苯乙烯泡沫塑料 PB1-20
ρ_0 (g/cm ³)	1.30~1.45	1.4	0.18~0.22
σ (Pa $\times 10^5$)	2500	1450	30

隔板直径的确定与药形罩锥角有很大关系, 一般随药形罩锥角的增加而增加。当药形罩锥角小于40°时, 采用隔板

会使破甲性能更加不稳定，因而必要性不大。

隔板厚度的确定与隔板材料的隔爆性能有关，隔板厚度需保证从起爆点开始沿隔板侧面传播的爆轰波和从起爆点开始通过隔板中心的爆轰波，同时到达药形罩罩面，过厚、过薄都没有好处，过厚会增加药高和质量，过薄会降低隔板效果，都对破甲不利。图11-4-5是某种装药结构采用不同隔板厚度时的破甲孔形，从图中看出：无隔板时破甲进口大、收敛快，呈喇叭形，破甲深度浅；随着隔板加厚，破甲进口减小，收敛变慢，破甲深度增加；当隔板厚度为12.7mm时，达到最佳状态，此时破甲进口小，进口后出现鼓肚，且在鼓肚后收敛缓慢，使得破甲最深；当隔板厚度再继续增加时，破甲深度反而下降。

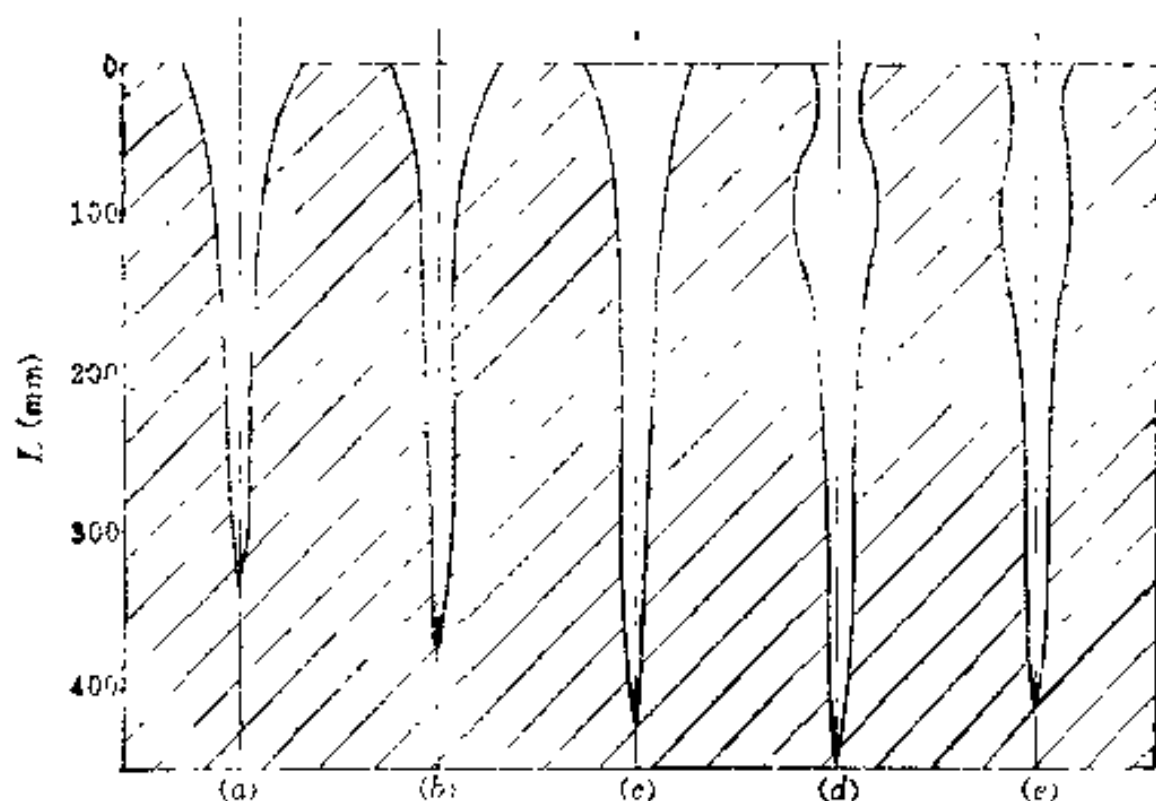


图11-4-5 不同厚度隔板时的破甲孔形

a—无隔板；b—8mm(隔板厚度，下同)；c—10mm，
d—12.7mm；e—15mm。

四、装药结构的对称性

上面分别介绍了聚能装药的三个主要部分——炸药、药形罩、隔板对破甲性能的影响，当将炸药、药形罩、隔板制成聚能装药时，由于加工、装配过程中的偏差、缺陷以及运输过程中的磕碰，都会造成装药结构的对称性变坏，易使射流偏离轴线，降低破甲效果。

表11-4-6表示药形罩轴线与装药轴线偏离时的破甲试验结果。试验采用梯恩梯50/黑索金50装药，药柱直径60mm、高92mm，紫铜药形罩锥角 40° ，罩高65mm。

表11-4-6 药形罩轴线与装药轴线偏离时的破甲试验

类 型		L (mm)	试验发数
轴对称标准装药		252	7
两轴平移 (mm)	0.20	224	4
	0.25	218	6
	0.30	206	5
两轴夹角	$40'$	213	4
	$50'$	208	7
	1°	202	8

从试验数据看出：当药形罩轴线与装药轴线偏移0.3mm时，破甲深度降低18%，当药形罩轴线偏离 1° 时，破甲深度降低20%。并且破甲孔形多是倾斜喇叭形。

五、炸 高

聚能装药距离靶板一定高度时，才能发挥聚能装药的破甲威力，称装药底端面距离靶板的高度为炸高。

炸高对破甲威力的影响可以从两方面进行分析，一方面

随着炸高的增加，射流伸长，从而提高破甲深度；另一方面随着炸高的增加，射流会产生径向分散和摆动，延伸到一定程度后会产生断裂现象，从而使得破甲深度降低。

与最大破甲深度相对应的炸高，称为有利炸高。有利炸高是一个区间，实际上选择有利炸高都是选择有利炸高的下限，即在有利炸高范围内以最低的高度作为实际采用的有利炸高，这样既能够保证破甲深度，又可以减少弹的长度。

表11-4-7表示某种聚能装药在不同炸高条件下的破甲试验数据，图11-4-6给出了这种装药的炸高与破甲深度关系的试验曲线，图11-4-7给出了不同炸高条件时的破甲孔形。试验表明：炸高为零时，孔浅成瓦罐形；10~30mm炸高时，孔形上下同样粗成桶形；120~150mm炸高时，孔形均匀逐渐收敛；180~300mm炸高时，孔形小而圆，能量利用好，破甲深度最大；500mm以上炸高时，孔扁而乱，靶板上有麻点，进口后孔形马上变细，破甲深度降低；1000mm炸高时，孔扁且乱，出现多孔，进口后孔径马上缩小为8mm，且破甲深度很浅。

表11-4-7 不同炸高时的破甲试验

炸高 (mm)	L (mm)	试验发数	炸高 (mm)	L (mm)	试验发数
0	69	3	250	422	5
10	119	3	300	426	5
20	183	4	400	459	3
30	217	3	500	355	3
60	280	5	600	392	3
90	328	3	700	389	3
120	345	4	800	226	3
150	393	4	900	206	3
180	427	3	1000	163	3
210	434	3			

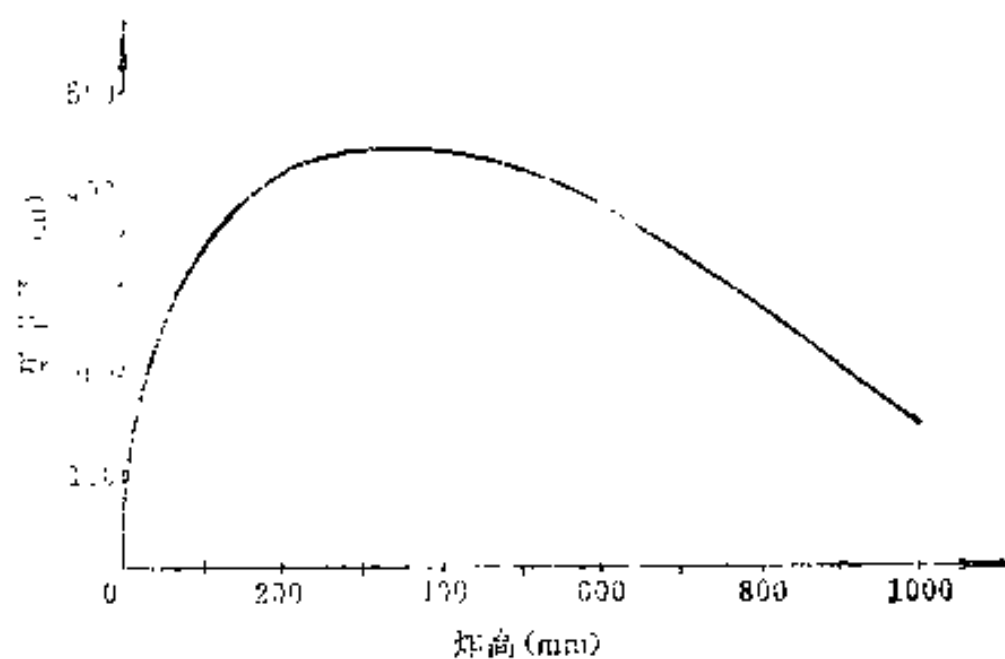


图11-4-6 炸高-破甲深度曲线

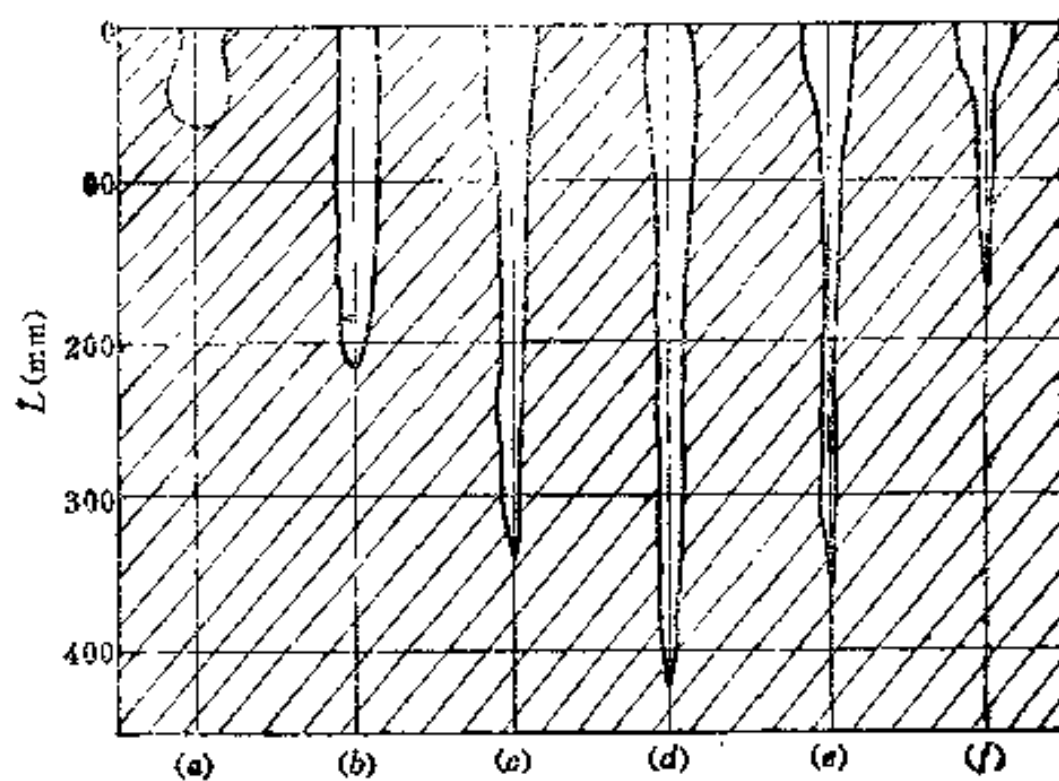


图11-4-7 不同炸高时的破甲孔形

a —0 (炸高, 下同), b —30mm, c —120mm,
 d —180mm, e —500mm, f —1000mm。

炸高的确定与药形罩锥角、药形罩材料、炸药性能以及有无隔板都有关系。

图11-4-8描述了不同药形罩锥角条件下炸高和破甲深度的关系。从图中曲线看出，有利炸高随着药形罩锥角的增加而增加，对于一般常用药形罩，有利炸高是罩底径的1~3倍。

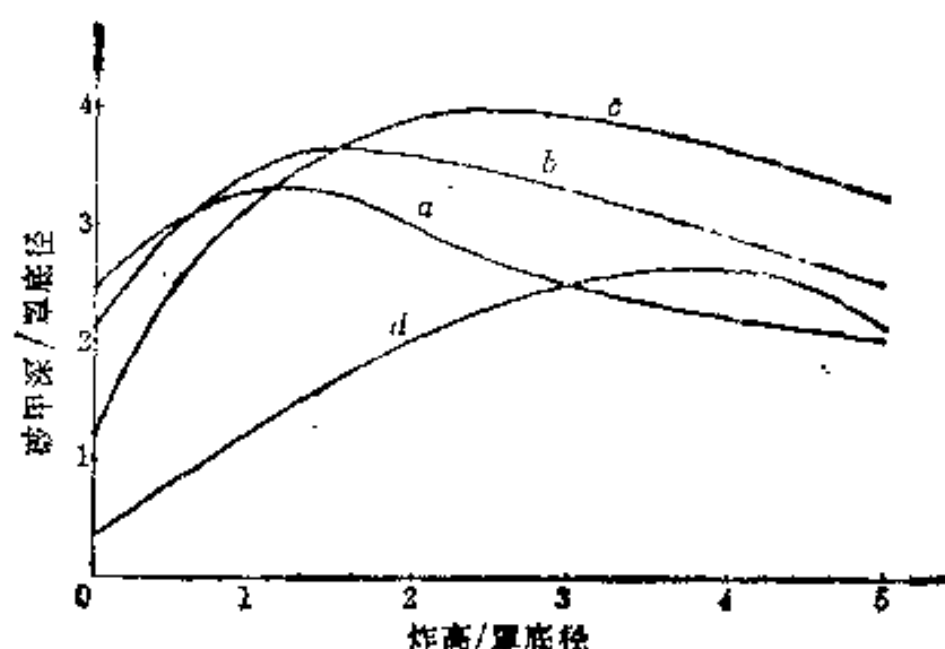


图11-4-8 不同罩锥角时炸高-破甲深度曲线

a—30°(罩锥角，下同)，b—45°；c—50°；d—120°。

图11-4-9描述了罩锥角45°时，不同材料药形罩条件下炸高和破甲深度的关系。从图中曲线看出，铝材料由于延展性好，形成射流较长，其有利炸高比铜、钢等材料作为药形罩时的有利炸高显著增加，适用于大炸高的场合。

另外，采用高爆速炸药以及增大隔板直径，都能使药形罩所受冲击压力增加，从而增大射流速度，并使射流拉长，故有利炸高增加。

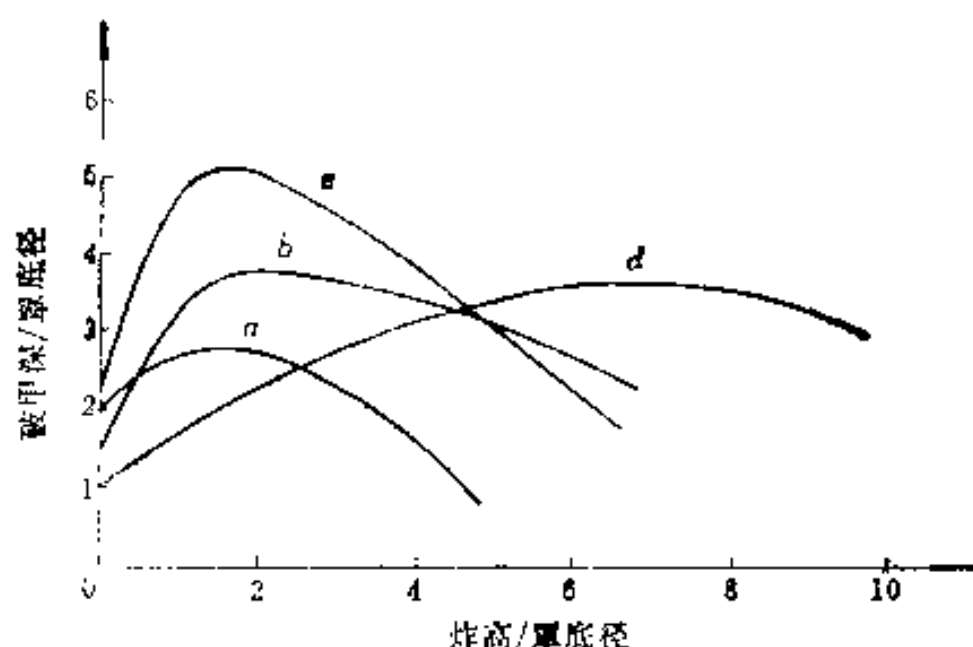


图11-4-9 不同罩材料时炸高-破甲深度曲线

a—钢； b—304； c—铜； d—铝。

六、壳 体

聚能装药有、无壳体，对破甲性能影响很大。

表11-4-8试验数据表示某种破甲性能很好的无壳体聚能装药，加上壳体后破甲性能变坏的情况。试验中采用的药柱直径为80mm，隔板火端直径58mm，壳体钢质，厚度3~4mm。

壳体对破甲性能的影响是通过壳体对爆轰波形的影响而造成的，其中主要表现在爆轰波形成的初始阶段。装药无壳体时，原来试验所保证的通过隔板中心的爆轰波和通过隔板周围的爆轰波同时到达罩顶的条件，当加上壳体后受到了破坏，由于爆轰波在壁面上的反射以及壳体对爆轰产物膨胀的阻止，都有助于加强侧向爆轰波，使通过隔板周围的爆轰波较比通过隔板中心的爆轰波提前到达药形罩壁面，迫使罩顶后喷，形成反射流，破坏了罩的正常闭合秩序，使得形成的射流不集中、不稳定，导致破甲深度下降。

表11-4-8 壳体的影响

壳 体 条 件	L (mm)	破甲降低量 (%)
无壳体	455	
全壳体	282	38
全壳体中去除隔板周围装药壳体	436	4
全壳体中去除装药顶端的壳体	440	3

实际上加上壳体后,并不一定使破甲深度下降,上述试验中破甲深度降低的原因,只是在于加上壳体后破坏了原来配合很好的爆轰波形造成的,假若适当改变装药结构,尤其是隔板尺寸,仍然可以提高破甲深度。

一般来说,对于带隔板的聚能装药,增加壳体后可以将原来无壳体时的隔板尺寸减小,使爆轰波形趋向合理,从而提高破甲深度;对于不带隔板的聚能装药,增加壳体后可以通过改变药柱锥度和药形罩锥角的办法,来达到调整爆轰波形的目的。

七、旋 转

聚能装药的旋转运动,对破甲威力影响很大。原因在于一方面旋转运动破坏了射流的正常形成,另一方面又使形成的射流在离心力的作用下,金属颗粒甩向四周,横截面积增大,中心变空,致使破甲效果严重下降。

表11-4-9表示旋转运动对破甲威力影响的试验数据,图11-4-10绘出了转速不同时的破甲深度曲线。试验采用带壳聚能装药,弹径90mm,药形罩锥角 54° ,底径80mm,炸高182mm。

表11-4-9 旋转运动对破甲的影响

转速 (s^{-1})	L (mm)	V (cm^3)	转速 (s^{-1})	L (mm)	V (cm^3)
0	352	101	163	155	62
32	318	106	189	113	70
67	233	88	243	135	62
102	172	87	278	105	65
118	169	83	320	101	69
181	184	82			

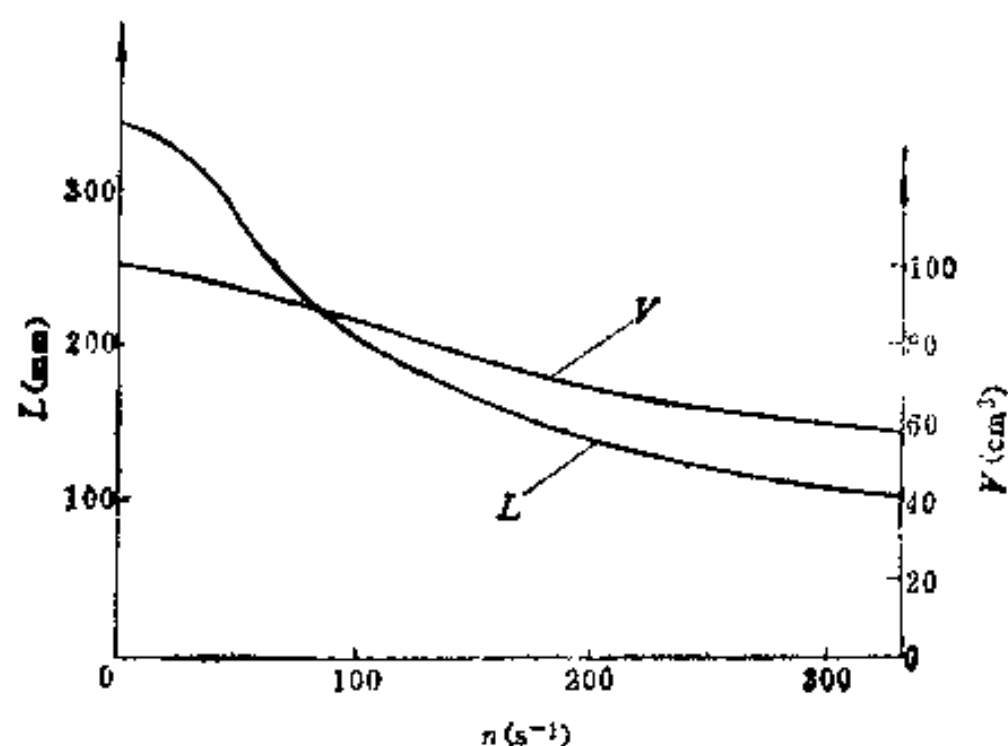


图11-4-10 旋转对破甲的影响

试验表明：当转速在 $30s^{-1}$ 以内时，旋转运动对破甲性能没有什么影响；当转速由 $30s^{-1}$ 增加到 $100s^{-1}$ 时，破甲深度下降很快；当转速为 $100s^{-1}$ 时，破甲深度大约下降了50%，然

后随转速的增加，破甲深度继续下降；当转速为 300s^{-1} 时，破甲深度仅为无旋转时破甲深度的30%。穿孔容积随转速的增加也在下降，但孔容积的下降比破甲深度下降得均匀且缓慢。

图11-4-11表示了不同转速时的破甲孔形。从图中看出，随着转速的增加，孔形逐渐变得浅而粗，表面粗糙，并且愈来愈不规则。

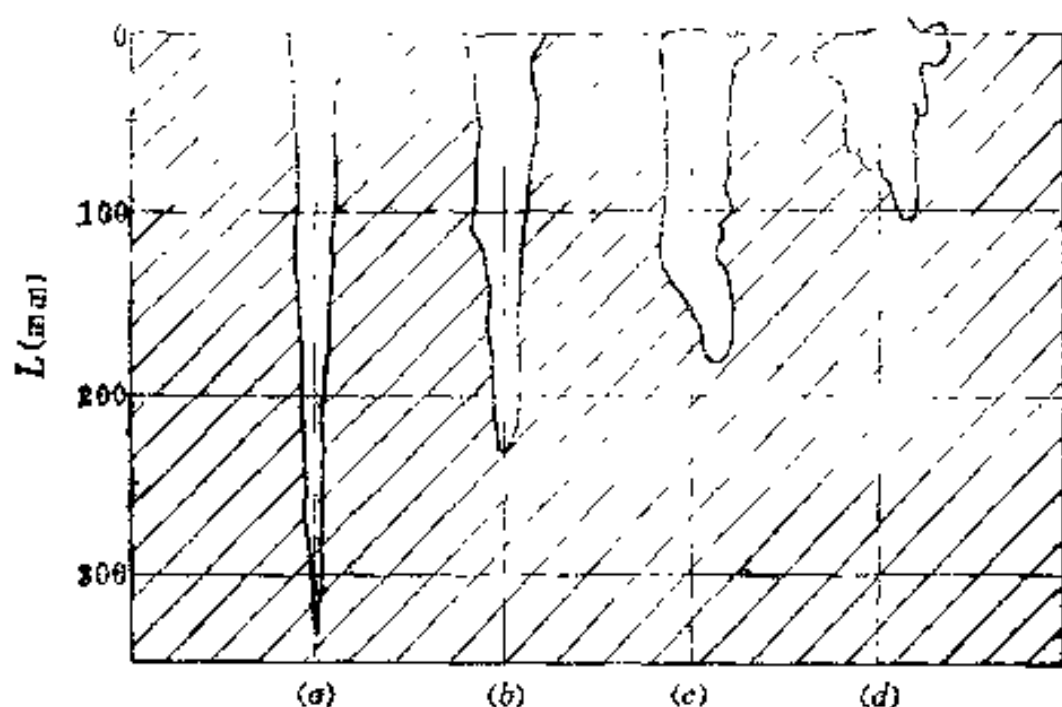


图11-4-11 不同转速时的破甲孔形

a—0 (转速, 下同); b— 67s^{-1} ; c— 181s^{-1} ;
d— 320s^{-1} 。

旋转运动对破甲性能的影响随装药直径的增加而增加。表11-4-10的试验数据表示了这种情况，同样是在 320s^{-1} 条件下，装药直径76mm时破甲深度的降低量比装药直径32mm时破甲深度的降低量增加一倍。

表11-4-10 不同装药直径时旋转对破甲的影响

装药直径 (mm)	药形罩底径 r_0 (mm)	L (mm)		降低量 (%)
		不旋转	$320s^{-1}$	
32	26	74	44	31
76	56	205	82	60

旋转运动对破甲性能的影响随药形罩锥角的减小而增加。表11-4-11给出了在转速为 $320s^{-1}$ 的条件下,不同罩锥角时破甲深度的数据,试验采用直径为76mm的聚能装药,钢制药形罩底径为56mm。

表11-4-11 不同罩锥角时旋转对破甲的影响

药形罩锥角	L (mm)		降低量
	不旋转	$320s^{-1}$	
60°	130	90	32%
35°	160	86	46%
27°	205	82	60%

另外,由于旋转运动对破甲威力的影响,在大炸高时比小炸高时更加严重,因而当聚能装药具有旋转运动时,有利炸高比无旋转运动时的有利炸高缩短很多。

八、靶板材料

靶板是聚能装药作用的对象,因而认真研究靶板材料,对提高防护能力是非常重要的。

靶板材料影响破甲效果的主要因素,是材料的密度和强度。

按照不考虑靶板强度、恒速射流条件下的破甲深度公式

$$L = l \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_i}}$$

可以看出，破甲深度与靶材密度的平方根成反比。

表11-4-12给出了三种强度相当、密度不同材料作为靶板时的破甲深度试验数据。从试验数据也可以看出，靶板密度高时破甲深度降低。

表11-4-12 靶板材料密度对破甲深度的影响

靶 板	$\rho_b (\text{g/cm}^3)$	$\sigma (\text{MPa})$	$L (\text{mm})$	试验次数
铝 (热处理)	2.7	590	576	3
钛	4.5	560	500	1
45# 钢	7.8	610	432	6

实际上，不考虑靶板强度是不合适的，射流也不是恒速射流。前面已经阐述过，射流是一个速度连续变化的金属流，当射流头部撞击靶板时，由于射流头部速度很高（达7000~8000m/s），撞击压力高达 10^{11}Pa ，相比之下靶板强度可以忽略；但随着射流的消耗，射流端部的速度逐渐降低，当射流端部速度低于5000m/s时，靶板强度的影响就不能再忽略；此后随着射流端部速度的降低，靶板强度的作用愈来愈明显地显示出来，并且当射流速度降低到某个值后，射流就没有能力再继续穿孔。

射流不能继续穿孔的速度，称为射流临界速度。射流临界速度与靶板强度有关，靶板强度愈高时，射流临界速度愈大，也就是说不能进行破甲的射流愈多，因而这也致使破甲深度降低。

表11-4-13给出了不同强度的钢板在同种聚能装药条件下的破甲试验数据,图11-4-12显示了钢板强度与破甲深度关系的试验曲线。从试验曲线中看出,随着靶板强度的增加,破甲深度降低,二者近乎成线性关系。

表11-4-13 不同强度钢板的破甲试验

σ (MPa)	u_j (m/s)	L (mm)	试验发数
610	1810	432	6
1000	2000	404	5
1380	—	338	4
1690	2600	299	6
1800	2800	265	4
2040	2900	251	3

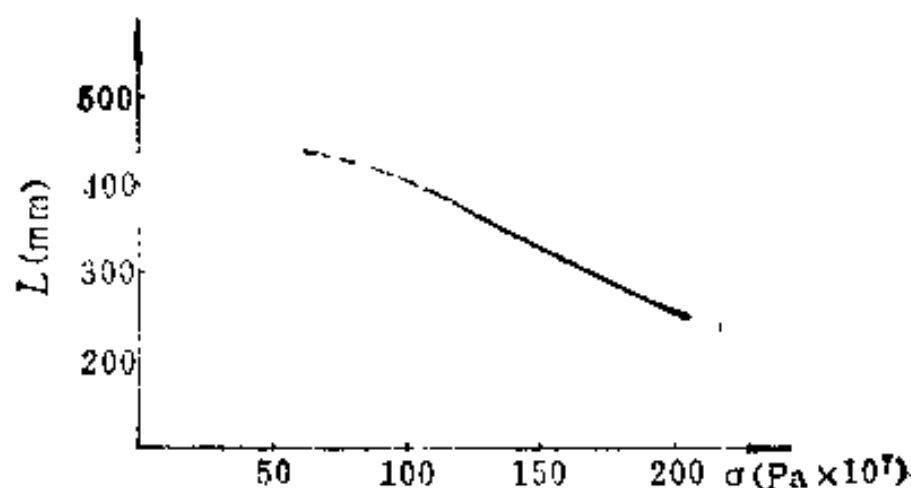


图11-4-12 靶板强度与破甲深度的关系曲线

第十二章 岩土中爆炸

炸药放置在岩石和土壤中的爆炸，习惯上称为“爆破”，它与炸药在空气中爆炸不同。炸药在岩土中爆炸，除了有可能传出地面进入空气中，形成空气冲击波外，更主要的是形成地震波对周围产生作用。地震波对房屋建筑破坏性很大，因而在有可能发生的地下爆炸中，必须考虑地震效应对周围造成的影响。

另外，岩土中爆炸作为一门爆破技术，在国民经济尤其是矿山冶金、开挖隧道、防洪筑坝和劈山造田等方面也有着广泛的应用。

本章主要介绍岩土中爆炸的基本现象，破坏区的范围，地震安全距离和影响岩土中爆炸的因素。

§ 12-1 岩土中爆炸的基本现象

炸药在岩土中爆炸时，由原来仅占很小体积的炸药团，进行化学反应后，立即变成数百倍体积的高温、高压气体产物，并以冲击波的形式作用于包围炸药的周围岩土上，使岩土产生变形和运动，以至破坏原来的结构状态。由于岩土变形速度较比爆炸冲击波速度小得多，这样爆炸冲击波多次反射后使产物压力趋于均匀化，因而可以作为瞬时爆轰研究炸药对岩土的作用。

一、炸药在无限岩土内部的爆炸

炸药在无限岩土内部爆炸时，由于爆炸产物均匀地向周

围冲击，在距离爆炸中心不同的地方受到不同的作用，因而产生不同破坏程度的球形破坏区，如图12-1-1所示。

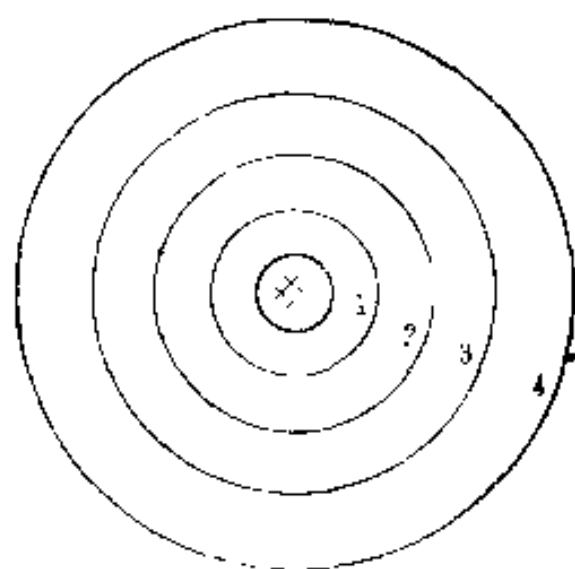


图12-1-1 岩土中爆炸作用区示意图

1—强烈压缩区；2—抛掷区；3—松动区；
4—振动区。

炸药爆轰后，爆轰产物压力达 10^{10} Pa以上，直接与炸药接触的岩土受到强烈的压缩，整个岩土结构受爆轰产物的作用产生径向移动，此区称为强烈压缩区。对于可塑性土壤，此区会受强烈压缩而形成球形空腔；对于坚硬的脆性岩石，此区会受强烈压缩而被粉碎。

强烈压缩区外是抛掷区，在此区内冲击波强度比强烈压缩区低，但是岩土结构仍然受到破坏，分裂成为不同尺寸的碎块，而且尚有力量使这些碎块获得运动。假若在有限深度的岩土中，这个区域的一部分位于地平面上，破碎了的岩土碎块就会被抛掷出去。

抛掷区外是松动区，在此区内冲击波强度较弱，仅能使岩土结构受到较小的破坏，产生裂缝成为较大的碎块，但没

有力量推动这些碎块运动。

松动区外是振动区，在此区内冲击波强度很弱，并且随着向外传播而逐渐成为弱波。此区内岩土结构不发生破坏，只是岩土质点发生振动，而产生地震效应，可以使地面上方的房屋结构受到破坏。

二、炸药在有限深度岩土中的爆炸

前面讨论炸药在无限岩土内部爆炸时，以爆炸点为中心将破坏范围分成强烈压缩区、抛掷区、松动区和振动区，当炸药在有限深度岩土中爆炸时，仍然具有相同的作用。只是由于炸药埋藏在岩土的有限深度处，地面上临空而成为薄弱环节，这时在爆炸作用下所产生的岩土碎块会朝这个方向大量运动，同时不断向周围扩展，最终形成倒立圆锥形的漏斗坑，此坑称为爆破漏斗，如图12-1-2所示。图中 O 点为爆炸中心， A 点为爆炸中心距离岩土自由表面的最近点，线段 OA 称为最小抵抗线， B 、 C 为爆破漏斗在自由表面上的边缘点， AB 和 AC 是爆破漏斗口部半径。

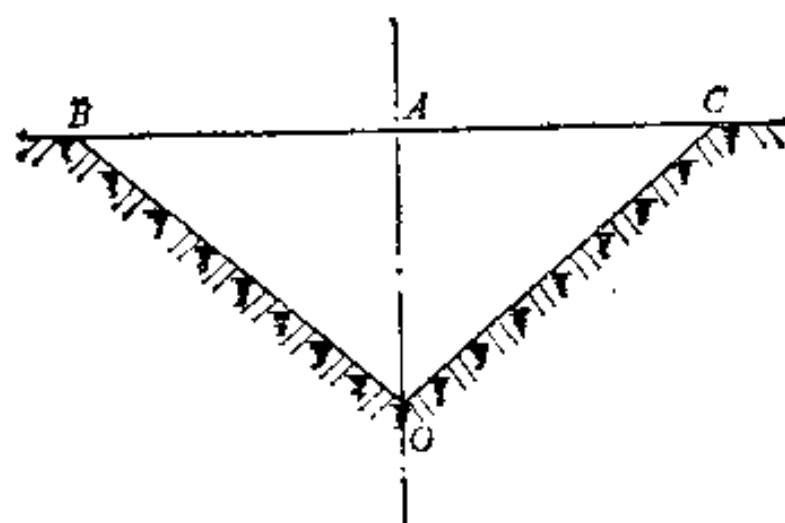


图12-1-2 爆破漏斗

用 r 表示爆破漏斗口部半径，用 H 表示最小抵抗线，二者之比称为爆破作用指数，以 n 表示，即

$$n = \frac{r}{H}$$

爆破作用指数表示爆破漏斗开口程度。按照爆破作用指数的大小，可以将抛掷爆破分成几种情况，工程应用上规定：

$n = 1$ 时，称为标准抛掷爆破，此时爆破漏斗顶角为 90° ；

$n > 1$ 时，称为加强抛掷爆破，此时爆破漏斗顶角大于 90° ；

$n < 1$ 时，称为减弱抛掷爆破，此时爆破漏斗顶角小于 90° 。

实践表明：对于平坦地面下的爆破，只有当 $n = 0.75$ 以上时，才会出现可见爆破漏斗；当 $n = 0 \sim 0.75$ 时，仅是岩石或土壤的隆起，而没有可见的爆破漏斗，这样的爆破称为松动爆破；要使岩石的块度破碎的比较细小，需要将 n 值适当增大，通常大于 0.75 而小于 1 ，因而当 $n = 0.75 \sim 1$ 时，又叫做加强松动，它与减弱抛掷是相互交叉的。实践还表明，爆破作用指数不是随着炸药量的增加而无限增加的，而是在 $n = 3$ 左右时，就不再继续增加了。

§ 12-2 爆破作用区

炸药在岩土中爆炸时，无论炸药量多少，都会出现上述叙述的基本现象。为了进一步了解炸药爆炸对周围岩土的作用，首先研究破坏区的计算方法，并且介绍一下工程上的应用。

假定炸药团的体积是球形的，则炸药团半径与炸药质量的三分之一次幂成比例，由于炸药在岩土中爆炸时，其破坏程度是按照球形的扩展而逐步衰减的，所以各个破坏区的半径同样与炸药质量的三分之一次幂成比例，即

$$R = A\sqrt[3]{\omega} \quad (12-2-1)$$

式中 R ——破坏区半径；

ω ——炸药量；

A ——比例系数，对于不同的破坏区其值不同。

一、抛 掷 区

对于岩土中爆炸，抛掷区内岩石粉碎，形成可见的爆破漏斗坑，是明显可见的、易于测量的区域。因而研究起来比较方便，并且其研究结果还可以作为衡量各个破坏区的标准。

在工程爆破中，抛掷区也是应用比较广泛的区域，为了使爆破能够一次完成一定形式的构筑物，如筑坝、填筑路堤或路轨、渠道等工程，抛掷爆破是行之有效的爆破方法。

抛掷区范围的计算，可以按照 (12-2-1) 式的形式进行，抛掷区半径

$$R_1 = A_1\sqrt[3]{\omega} \quad (12-2-2)$$

式中 R_1 是抛掷区半径，单位 m； ω 是炸药质量，单位 kg；比例系数 A_1 依岩土性质而定，其值一般为 0.65~1.0。

1. 标准抛掷爆破

标准抛掷爆破是最小抵抗线与爆破漏斗口部半径相等的情况，研究标准抛掷爆破主要是确定形成标准抛掷漏斗所需要的药量，其意义是作为衡量各种抛掷爆破的标准。

抛掷爆破所消耗的炸药量，与岩土对爆破作用抵抗的能

力成正比，这种抵抗能力主要是重力作用。按照这种概念，可以认为岩土对炸药爆破作用的抵抗实际上就是被抛掷部分的岩土体积。因而写成

$$\omega = KV$$

式中 V 是标准抛掷爆破漏斗的体积

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 H$$

按照标准抛掷爆破定义

$$n = \frac{r}{H} = 1$$

故

$$V = \frac{1}{3} \pi H^3 \approx H^3$$

从而，可以得到标准抛掷爆破的计算公式

$$\omega_s = KH^3 \quad (12-2-3)$$

公式 (12-2-3) 中的 ω 是炸药质量，单位取作 kg。由于各种炸药的爆炸威力不一样，因而得到相同的标准抛掷漏斗，不同炸药所消耗的炸药质量肯定不一样。公式 (12-2-3) 中的炸药质量，是以威力 280 cm^3 (铅铸扩孔体积) 的炸药作为标准进行计算的，对于其它炸药可以用当量质量进行计算，当量质量

$$\omega = \varphi \omega' \quad (12-2-4)$$

式中 ω' —— 炸药的实际质量，

φ —— 炸药的当量换算系数，对于不同的炸药其值见表 12-2-1。

表12-2-1 一些炸药的当量系数

炸 药	φ	炸 药	φ
1*露天铵梯炸药	1.08	1*铵油炸药	1.16
2*露天铵梯炸药	1.00	2*铵油炸药	1.20
3*露天铵梯炸药	0.92	3*铵油炸药	1.18
4*露天硝铵炸药	1.06	硝酸铵	0.74
1*岩石铵梯炸药	1.26	梯恩梯	1.07
2*岩石铵梯炸药	1.15	苦味酸	1.08
1*煤矿铵梯炸药	1.05	特屈儿	1.31
2*煤矿铵梯炸药	0.90	泰安	1.55
3*煤矿铵梯炸药	0.86	黑索金	1.65

公式(12-2-3)中的 K 是比例系数。其物理意义是在标准抛掷爆破中,抛掷单位体积岩土所需要的炸药质量,称为单位耗药量系数,单位为 kg/m^3 。 K 值的大小取决于岩土的 性质,表12-2-2给出了不同岩土材料的 K 值。

表12-2-2 单位耗药量系数

岩 土	K	岩 土	K
砂、干砂土	1.8~2.0	砾岩、钙质砾岩	1.35~1.65
密实或潮湿的砂土	1.4~1.5	层状砂岩、土质砂岩	1.35~1.65
重砂粘土	1.2~1.30	钙质砂岩、白垩岩	1.5~1.95
坚实粘土	1.2~1.5	石灰岩、砂岩	1.5~2.4
黄土	1.1~1.5	花岗岩	1.8~2.55
白垩土	0.9~1.1	玄武岩、安山岩	2.1~2.7
石膏、泥灰岩、蛋白石	1.2~1.5	石英岩	1.8~2.1
裂隙的喷出岩、玄武浮石	1.5~1.8	斑岩	2.4~2.55
贝壳石灰岩	1.8~2.1		

通过公式(12-2-3)不仅可以计算达到标准抛掷爆破所消耗的药量,而且反过来在已知炸药和岩土的条件下,能够

计算标准抛掷爆破所对应的最小抵抗线

$$H = \sqrt[3]{\frac{\omega_s}{K}}$$

另外，也可以通过实验的方法，在满足标准抛掷爆破的条件下，实际测量出对于某个最小抵抗线所消耗的炸药量，从而确定出试验岩石的 K 值

$$K = \frac{\omega_s}{H^3}$$

2. 加强和减弱抛掷爆破

公式 (12-2-3) 所表示的炸药质量与最小抵抗线三次幂成比例的关系，只是适用于标准抛掷爆破条件下，当爆破漏斗形状改变，即 $n \neq 1$ 时，这种关系相差较大，并且随着 n 偏离于 1 程度的增加，其偏差愈大。

实验表明，在同样炸药品种和同样地质条件下，当炸药在平坦地面下埋藏深度不变时，如果增加炸药质量，就会增加爆破漏斗口部半径，爆破作用指数 $n = \frac{r}{H}$ 增加；反之，如果减少炸药质量，就会减小爆破漏斗口部半径，爆破作用指数 $n = \frac{r}{H}$ 减小。研究结果认为，对于加强和减弱抛掷爆破的药量与标准抛掷爆破所耗药量之间的关系是 n 的函数，用 $f(n)$ 表示，并称为爆破作用指数函数。

这样，一般形式下抛掷爆破药量

$$\omega = KH^3 f(n) \quad (12-2-5)$$

下面，推导一下爆破作用指数函数的形式。

假设同样地质条件下，不同质量的药包炸药 ω_1 和 ω_2 ，形成的标准抛掷爆破所对应的最小抵抗线分别为 H_1 和 H_2 ，如

图 12-2-1 所示。

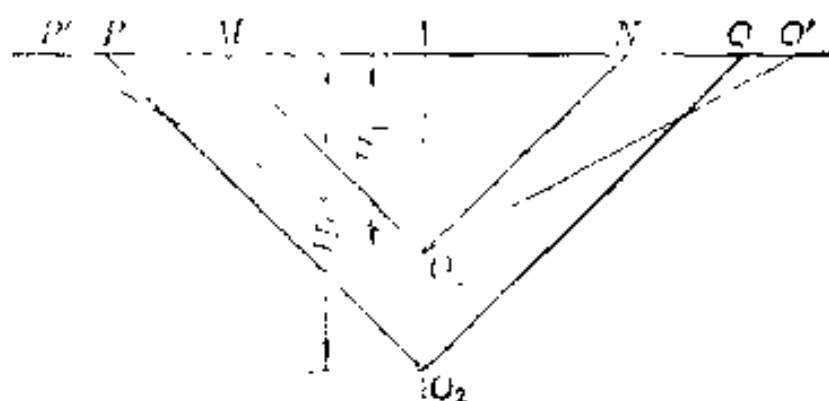


图 12-2-1 不同药量的抛掷爆破漏斗

按照

$$\omega_1 = KH_1^3, \quad \omega_2 = KH_2^3$$

得到

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^3$$

此式说明两个标准抛掷爆破中，炸药质量比等于最小作用线立方之比。

如果药包 ω_1 的位置 O_1 不动，而移动药包 ω_2 的位置，并且将之移动到 ω_1 的位置 O_1 上，若 $\omega_2 > \omega_1$ ，则药包 ω_2 爆炸所形成的爆破漏斗 $P'O_1Q'$ 肯定要比药包 ω_1 爆炸所形成的爆破漏斗 MO_1N 大，按照加强抛掷爆破的定义，实际上 ω_2 就是在位置 O_1 上的加强抛掷药包。假若在 O_1 点上进行药包 ω_2 的加强抛掷爆破，改用 ω 代替 ω_2 ，用 H 代替 H_1 ，而用 ω_r 表示 ω_1 ，用 H' 表示 H_2 ，则

$$\frac{\omega}{\omega_r} = \left(\frac{H'}{H} \right)^3$$

此式说明，加强抛掷爆破与同一位置上标准抛掷爆破间炸药质量之比，等于加强药包作为标准抛掷爆破时的最小抵

抗线与现实最小抵抗线之比的立方。

代入

$$\omega_r = KH^3$$

则

$$\omega = KH^3 \left(\frac{H'}{H} \right)^3$$

此式与 (12-2-5) 式相比, 得到爆破作用指数函数

$$f(n) = \left(\frac{H'}{H} \right)^3 \quad (12-2-6)$$

公式 (12-2-6) 的关系, 对于减弱抛掷爆破同样成立。从公式 (12-2-6) 看出, 爆破作用指数函数是该炸药质量在相当于标准抛掷爆破情况下的最小抵抗线与现实最小抵抗线之比的立方。

按照 (12-2-6) 式的关系, 可以论证出许多关于爆破作用指数函数 $f(n)$ 的计算公式。通常采用下列计算式

$$f(n) = 0.4 + 0.6n^3$$

对于标准抛掷爆破, $n = 1$, $f(n) = 1$; 对于加强抛掷爆破 $n > 1$, $f(n) > 1$; 对于减弱抛掷爆破, $n < 1$, $f(n) < 1$ 。

因而, 抛掷爆破的一般性公式

$$\omega = KH^3(0.4 + 0.6n^3) \quad (12-2-7)$$

当已知最小作用线和爆破作用指数时, 可以通过 (12-2-7) 式计算出该爆破的炸药质量。反过来, 当已知炸药质量和最小作用线时, 同样可以计算出爆破作用指数

$$n = \sqrt[3]{\frac{\omega}{0.6KH^3} - \frac{2}{3}} \quad (12-2-8)$$

3. 斜坡地面的抛掷爆破

公式 (12-2-7) 仅适用于平坦地面情况, 在斜坡地面条

件下，特别是当地面斜度大于 30° 时，公式的计算结果与实际效果差别很大。

斜坡地面的抛掷爆破，如图12-2-2所示。

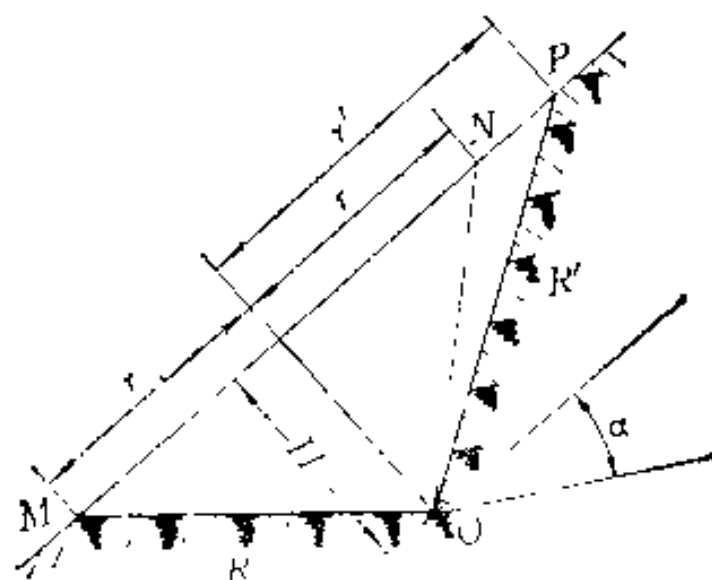


图12-2-2 斜坡地面的爆破漏斗示意图

当炸药在斜坡地面下爆炸时，除了按爆炸能量形成爆破漏斗 MON 外，同时还会由于斜坡的原因，使漏斗上半部的坡度变得很陡峭，陡峭部分在重力和振动作用下必然往下坍塌，最终成为一个椭圆形口部的、倒立圆锥形的爆破漏斗。

原爆破漏斗 MON 的边缘线

$$R = \sqrt{H^2 + r^2} = H\sqrt{1 + n^2}$$

按照实验统计，斜坡爆破漏斗的破裂线 R' 是 R 和斜角 α 的函数，具体可以写成

$$R' = H\sqrt{1 + \beta n^2}$$

式中 β 是与地面坡度 α 有关的系数。

对于土壤或软石地质

$$\beta = \left[1 + 0.04 \left(\frac{\alpha}{10} \right)^8 \right]^{1/3}$$

对于硬石地质

$$\beta = \left[1 + 0.016 \left(\frac{\alpha}{10} \right)^3 \right]^{1/2}$$

式中 α 的单位是“°”。

斜坡椭圆形口部的爆破漏斗体积，可以近似取作以椭圆形长轴为口径的圆锥体体积和以椭圆形短轴为口径的圆锥体体积的平均值。由于以椭圆形短轴为口径的圆锥体体积为

$$\frac{1}{3} \pi r^2 H = \frac{\pi}{3} n^2 H^3 \approx n^2 H^3$$

以椭圆形长轴为口径的圆锥体体积为

$$\frac{1}{3} \pi r'^2 H = \frac{\pi}{3} (R'^2 - H^2) H \approx \beta n^2 H^3$$

因而斜坡爆破漏斗体积

$$V' = \frac{1}{2} n^2 H^3 (1 + \beta)$$

对于土壤或软石地质

$$V' = \frac{1}{2} n^2 H^3 [1 + (1 + 4\alpha^3 \times 10^{-5})^{1/2}]$$

对于硬石地质

$$V' = \frac{1}{2} n^2 H^3 [1 + (1 + 1.6\alpha^3 \times 10^{-5})^{1/2}]$$

令 $f(\alpha)$ 为斜坡地面爆破漏斗体积的增量函数，与平坦地面爆破漏斗体积相比较，可以得到

$$\left. \begin{aligned} f(\alpha)_{\text{soft}} &= 0.5 + (0.25 + \alpha^3 \times 10^{-5})^{1/2} \\ f(\alpha)_{\text{hard}} &= 0.5 + (0.25 + 0.4\alpha^3 \times 10^{-5})^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (12-2-9)$$

表12-2-3给出了斜坡地面爆破漏斗体积增量函数 $f(\alpha)$ 随 α 变化的数值。从表中数值看出，随着地面坡度的增加，爆破漏斗体积不断增加，当 α 为 45° 时，爆破漏斗体积为平

即地面爆破漏斗体积的 1.5 倍左右；当 α 为 90° 时，爆破漏斗体积为平坦地面爆破漏斗体积的 2 ~ 3 倍。

表12-2-3 爆破漏斗增量函数 $f(\alpha)$

α	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$f(\alpha)_{\text{soft}}$	1.00	1.03	1.22	1.58	2.05	2.61	3.23
$f(\alpha)_{\text{hard}}$	1.00	1.01	1.10	1.23	1.56	1.89	2.28

考虑到斜坡地面爆破漏斗体积增量函数，利用平坦地面抛掷爆破公式，可以得到斜坡地面抛掷爆破公式

$$\omega = KH^3 \frac{f(n)}{f(\alpha)} \quad (12-2-10)$$

对于土壤或软石地质

$$\omega = KH^3 \frac{0.4 + 0.6n^3}{0.5 + (0.25 + \alpha^3 \times 10^{-5})^{1/2}} \quad (12-2-11)$$

对于硬石地质

$$\omega = KH^3 \frac{0.4 + 0.6n^3}{0.5 + (0.25 + 0.4\alpha^3 \times 10^{-5})^{1/2}} \quad (12-2-12)$$

不难看出，当 $\alpha = 0$ 时， $f(\alpha) = 1$ ，公式 (12-2-10) 恰好给出平坦地面抛掷爆破公式；当 $\alpha \neq 0$ 时， $f(\alpha) > 1$ ，公式 (12-2-10) 给出了考虑地面坡度的更为一般性的公式。为了计算方便，表12-2-4给出了土壤和软石地质爆破作用指数函数与爆破漏斗体积增量函数的比值，表12-2-5给出了硬石地质爆破作用指数函数与爆破漏斗体积增量函数的比值。

表 12-2-4 $\frac{f(n)}{f(\alpha)_{\text{soft}}}$

$\frac{f(n)}{f(\alpha)_{\text{soft}}}$ α	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1.00	1.00	0.97	0.82	0.63	0.49	0.38	0.31
1.25	1.57	1.53	1.29	0.99	0.78	0.60	0.49
1.50	2.43	2.36	1.99	1.53	1.19	0.92	0.75
1.75	3.62	3.51	2.97	2.28	1.77	1.38	1.12
2.00	5.20	5.04	4.26	3.28	2.55	1.98	1.61
2.25	7.23	7.01	5.93	4.55	3.54	2.75	2.24
2.50	9.78	9.49	8.02	6.16	4.79	3.72	3.03
2.75	12.88	12.49	10.58	8.11	6.31	4.89	3.99
3.00	16.60	16.10	13.61	10.46	8.13	6.31	5.15

 表 12-2-5 $\frac{f(n)}{f(\alpha)_{\text{hard}}}$

$\frac{f(n)}{f(\alpha)_{\text{hard}}}$ α	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1.00	1.00	0.99	0.91	0.78	0.64	0.53	0.44
1.25	1.57	1.55	1.43	1.22	1.00	0.83	0.69
1.50	2.43	2.41	2.21	1.90	1.56	1.29	1.07
1.75	3.62	3.58	3.29	2.82	2.32	1.92	1.59
2.00	5.20	5.15	4.73	4.08	3.33	2.76	2.29
2.25	7.23	7.16	6.58	5.64	4.63	3.83	3.18
2.50	9.78	9.68	8.90	7.63	6.26	5.18	4.30
2.75	12.88	12.75	11.72	10.05	8.24	6.83	5.67
3.00	16.60	16.43	15.11	12.95	10.62	8.80	7.30

4. 抛掷爆破坑的真实尺寸

炸药在地面下爆炸时，形成倒立圆锥形的爆破漏斗，但是由于爆炸时抛掷起来的岩土的回落和飞散，最终真实的抛掷爆破坑如图12-2-3所示。

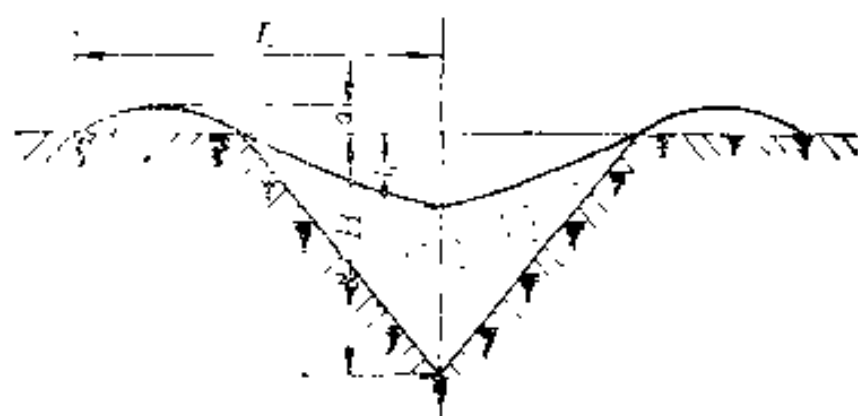


图12-2-3 真实抛掷爆破坑

真实抛掷爆破坑的主要形状，由可见深度 h 、堆积高度 a 和堆积距离 L 所表示。由于抛掷爆破坑的真实尺寸与炸药条件、岩土性质关系很大，很难用统一的公式进行表达，根据实验数据统计的结果，只给出一般常用的计算式。

常用的抛掷爆破坑可见深度公式

$$h = \frac{1}{3}(2n-1)H \quad (12-2-13)$$

从(12-2-13)式看出，当 $n=1$ 时，标准抛掷爆破坑的可见深度仅为最小抵抗线的三分之一，当 $n=2$ 时，抛掷爆破坑的可见深度等于最小抵抗线，当 $n>2$ 时，仍取 $h=H$ 。

常用的堆积高度公式

$$a = 0.05(n^2 + 1)H \quad (12-2-14)$$

从(12-2-14)式看出：当 $n=1$ 时，抛掷岩土在坑周围堆积起来的高度为最小抵抗线的十分之一，当 $n=2$ 时，抛

抛岩土在坑周围堆积起来的高度为最小抵抗线的四分之一。

常用的堆积距离公式

$$L = 5nH \quad (12-2-15)$$

从(12-2-15)式看出：当 $n = 1$ 时，抛掷岩土在坑周围堆积的距离为最小抵抗线的五倍；当 $n = 2$ 时，抛掷岩土在坑周围堆积的距离为最小抵抗线的十倍。

〔例12-1〕平坦地面下5 m放置的炸药爆炸后，地面抛掷爆破漏斗的口部半径为8 m，假若地面为坚实粘土，求炸药量。

解 已知 $H = 5$ m， $r = 8$ m，爆破作用指数

$$n = \frac{r}{H} = \frac{8}{5} = 1.6$$

对于坚实粘土，按照表12-2-2可以查出单位耗药量系数 $K = 1.2 \sim 1.5$ ，取 $K = 1.4$ 。

通过(12-2-7)式计算炸药量

$$\begin{aligned} \omega &= KH^3(0.4 + 0.6n^3) = 1.4 \times 5^3 \times (0.4 + 0.6 \times 1.6^3) \\ &= 500 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

〔例12-2〕1000 kg 梯恩梯炸药在平坦地面下5 m的深度处爆炸，地面为坚硬的砂岩，试计算抛掷爆破漏斗的口部半径，并计算抛掷爆破坑的真实尺寸。

解 1. 计算爆破作用指数

已知梯恩梯炸药1000 kg，按照表12-2-1查当量系数 $\varphi = 1.07$ 。则梯恩梯的当量质量

$$\omega = 1000 \times 1.07 = 1070 \text{ (kg)}$$

按照坚硬砂岩地面，查表12-2-2，取 $K = 2$ ，

又已知 $H = 5$ m。

由公式(12-2-8)计算爆破作用指数

$$n = \sqrt[3]{\frac{\omega}{0.6KH^3} - \frac{2}{3}} = \sqrt[3]{\frac{1070}{0.6 \times 2 \times 5^3} - \frac{2}{3}} \\ = 1.86$$

2. 计算爆破漏斗的口部半径

$$r = nH = 1.86 \times 5 = 9.3 \text{ (m)}$$

3. 计算爆破坑的真实尺寸

按照公式 (12-2-13) 计算可见深度

$$h = \frac{1}{3} (2n - 1)H = \frac{1}{3} (2 \times 1.86 - 1) \times 5 \\ = 4.53 \text{ (m)}$$

按照公式 (12-2-14) 计算堆积高度

$$a = 0.05(n^2 + 1)H = 0.05(1.86^2 + 1) \times 5 = 1.11 \text{ (m)}$$

按照公式 (12-2-15) 计算堆积距离

$$L = 5nH = 5 \times 1.86 \times 5 = 46.5 \text{ (m)}$$

〔例12-3〕 在坡度为 60° 的石灰岩山坡上,在垂直斜坡方向深度5 m地方放置的梯恩梯炸药爆炸后,形成抛掷爆破坑,测量得爆破作用指数为2,问炸药量是多少。

解 按照题意已知 $\alpha = 60^\circ$, $H = 5 \text{ m}$, $n = 2$;

对于石灰岩,查表取 $K = 1.9$,

按照公式 (12-2-12) 计算

$$\omega = KH^3 \cdot \frac{0.4 + 0.6n^3}{0.5 + (0.25 + 0.4\alpha^3 \times 10^{-6})} \\ = 2 \times 5^3 \times \frac{0.4 + 0.6 \times 2^3}{0.5 + (0.25 + 0.4 \times 60^3 \times 10^{-6})} \\ = 836 \text{ (kg)}$$

由于公式计算的炸药质量是以威力 280 cm^3 的炸药为标准的,故可以按照当量系数换算成梯恩梯炸药,其质量为

$$\frac{836}{1.07} = 781 \text{ (kg)}$$

二、松 动 区

松动区是岩土介质被松动，而不产生抛掷的区域。对于炸药埋藏在有限深度岩土下的情况来说，炸药爆炸后在地面上只有被破坏的痕迹，而没有可见的爆破漏斗坑，在这种情况下，爆破作用指数应当为0，但是实际情况表明， n 必须大于0.75以上才可能看到明显的爆破漏斗。因此，可以认为 $n = 0 \sim 0.75$ 的范围内都是松动爆破。

在工程上，松动爆破应用范围也很广泛，按照应用要求一般又分为正常松动、加强松动和减弱松动三种。控制爆破、崩塌爆破等要求爆炸周围建筑不受强烈破坏，必须采用减弱松动的计算法；采石、矿山揭开盖层要求岩石有一定程度的破碎块，而又不致塌散过宽，适宜采用正常松动爆破；石质完整的矿山爆破要求岩石碎块有适当的翻动，甚至可以抛掷一部分，这时需要采用加强松动爆破。

按照公式(12-2-1)的形式，松动区半径

$$R_2 = A_2 \sqrt{\omega} \quad (12-2-16)$$

式中 R_2 是松动区半径，单位m； ω 是炸药质量，单位kg；比例系数 A_2 依岩土性质而定，其值一般为1.0~1.5。

1. 正常松动爆破

正常松动爆破可以按照这样的定义来确定，即假定在平坦地面条件下，把炸药埋藏到一定的深度，炸药爆炸后产生一个和标准抛掷爆破一样的松动爆破漏斗，这个松动爆破漏斗的口部半径与最小抵抗线相等，如图12-2-4所示。

但是，由于对于破碎标准缺乏明确的规定，并且松动爆

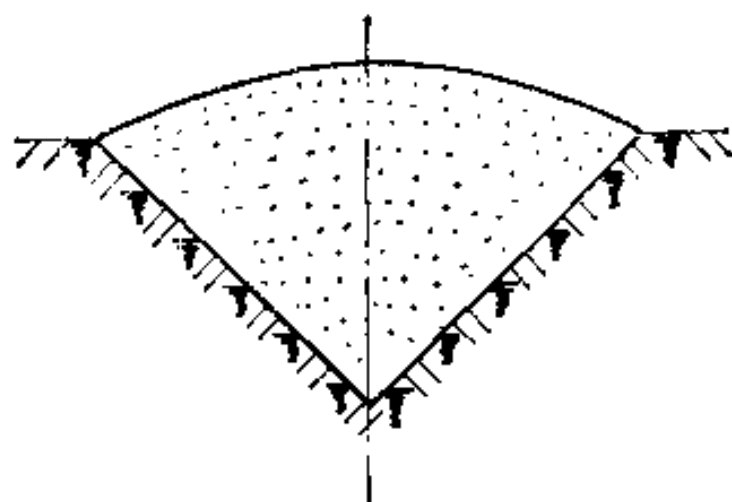


图12-2-4 正常松动爆破

破漏斗又没有明显可见的边界，很不容易确定。因而，实际上通常采用经验的办法确定松动爆破，经验规定以0.44倍的标准抛掷爆破的 K 值系数作为正常松动爆破的单位耗药量系数。

正常松动爆破公式

$$\omega = 0.44KH^3 \quad (12-2-17)$$

式中 ω ——松动爆破的药量，单位 kg。以威力 280cm³ 的炸药为标准，其它炸药换算为当量质量；

K ——标准抛掷爆破的单位耗药量系数，查表12-2-2；

H ——最小抵抗线，单位 m。

2. 加强松动爆破

加强松动爆破的药量比正常松动爆破药量多，比减弱抛掷爆破药量少，但与减弱抛掷爆破相交叉。

加强松动爆破的单位耗药量系数，一般选择在 (0.44~1.0) K 范围，其公式

$$\omega = (0.44 \sim 1.0)KH^3 \quad (12-2-18)$$

式中 K ——标准抛掷爆破单位耗药量系数。

3. 减弱松动爆破

减弱松动爆破的药量比正常松动爆破耗药量少，其单位耗药量系数一般选择在 $(0.125 \sim 0.44)K$ 范围，其公式

$$\omega = (0.125 \sim 0.44)KH^3 \quad (12-2-19)$$

式中 K ——标准抛掷爆破单位耗药量系数。

三、强烈压缩区

强烈压缩区是最靠近炸药爆炸源的区域，这个区域内的岩上受到强烈压缩，形成空腔。利用这个特点，在地层深处建造危险物品存放的地下仓库，是大有发展前途的。

按照公式 (12-2-1) 的形式，强烈压缩区半径

$$R_s = A_s \sqrt[3]{\omega} \quad (12-2-20)$$

式中 R_s 是强烈压缩区半径，单位 m ； ω 是炸药质量，单位 kg ；比例系数 A_s 依岩土性质而定，其值一般为 $0.1 \sim 0.5$ 。

当在有限深度岩土中爆炸时，也可以根据标准抛掷爆破单位耗药量系数，来选择形成强烈压缩区的极限药量。这时要求炸药在岩土深处爆炸后，不仅不使岩土抛掷形成漏斗坑，也不达到岩土破碎的松动程度，只是在岩土深度形成一个封闭的空腔。

强烈压缩区极限药量，可以取松动爆破的下限

$$\omega = 0.125KH^3 \quad (12-2-21)$$

式中 K ——标准抛掷爆破单位耗药量系数。

§ 12-3 地下爆炸安全距离

研究安全距离，目的为了确定爆炸对于人员、房屋建筑和仪器设备等相对没有危险的范围。地下爆炸的安全距离与空气中爆炸的安全距离有很大的不同，空气中爆炸时，主要

是爆炸所产生的空气冲击波对周围人员和建筑物起伤害作用，当炸药埋入地下深处爆炸时，由于很大一部分能量需要消耗在破碎岩土和推动岩土碎块的移动上，因而大大降低了爆炸进入空气的冲击波的能量。当地下爆炸在标准抛掷爆炸范围以内时，空气冲击波强度基本上等于0；当抛掷爆破漏斗口部半径等于最小抵抗线的一倍半时，空气冲击波只有地面爆炸空气冲击波的百分之几；当抛掷爆破漏斗口部半径等于最小抵抗线的三倍时，空气冲击波也只有地面爆炸空气冲击波的10~20%。所以，地下爆炸一般不考虑空气冲击波的作用，而主要是考虑地震波的作用。

另外，地下爆炸时抛掷起来的岩石碎块，会互相撞击，以至导致个别碎块飞到很远的地方，这也会给周围人员和建筑物的安全带来危险。

一、地震效应

炸药在地下爆炸时，高温、高压的爆轰产物对周围岩土产生冲击、抛掷等作用，同时向周围传播地震波。前者直接冲击和抛掷的范围有限，而后者地震波的影响却可以达到很远的距离。

炸药在地下爆炸时，向周围传播的地震波包括两个体波和一个表面波，它们传播的速度皆与岩土的弹性系数有关。一个体波称为纵波，纵波过后介质质点运动方向与纵波传播方向一致，岩土介质承受有压缩和剪切两种作用，纵波的传播速度为

$$c_1 = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

式中 ρ — 岩土介质的密度；

E ——岩土介质的弹性模量；

ν ——岩土介质的泊桑比。

另一个体波称为横波，横波过后介质质点运动方向与横波传播方向垂直，岩土介质承受有剪切和旋转两种作用，横波的传播速度为

$$c_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

式中符号含义同上。

表面波是体波在地表面反射产生的，表面波过后介质质点以椭圆轨迹进行运动，岩土介质承受有压缩、剪切和旋转三种作用。表面波的重要特点是波幅随着深度的增加而迅速减小，在地表面处表面波达到最大值，表面波的传播速度比横波略小，大约是横波波速的0.92倍。

在一般情况下，由于地下岩土介质是不均匀的，并且经常有节理、裂缝等不连续面，地震波在这些不连续面上发生折射和反射现象，使得波系非常复杂。因而在下面的研究中，不再分纵波、横波和表面波，而笼统地讨论地震波的作用。

典型的地震波如图 12-3-1 所示，它可以分成开始部分、主震部分和结尾部分三个阶段，其中主震部分振幅最大，作用时间最长，是造成地震破坏的主要因素。

在地震波的作用之下，岩土介质发生振动，振动的强度随爆炸药量的增加而增加，随着距爆点距离的增加而减小。按照爆炸相似律，可以得到岩土质点振动的振幅是参数 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}$ 的函数，即

$$l = f\left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}\right)$$

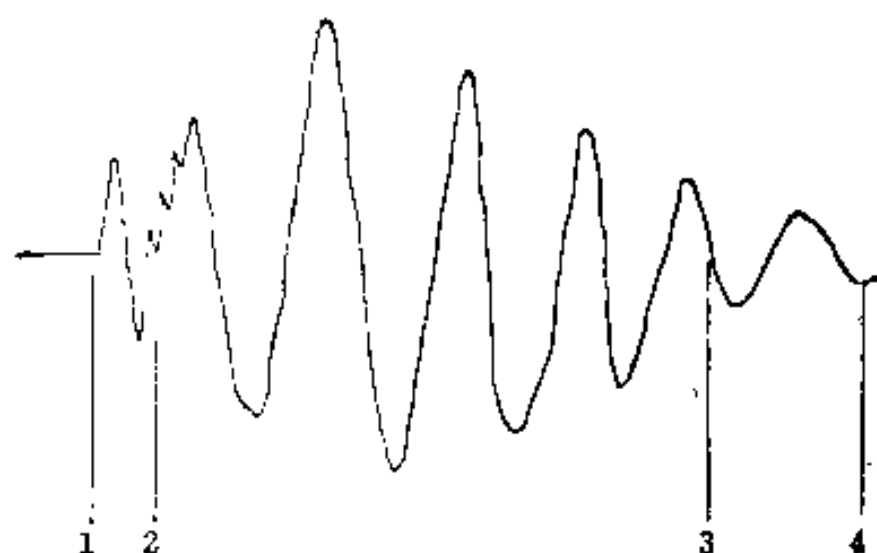


图12-3-1 典型地震波

1~2—开始部分；2~3—主震部分；3~4—结尾部分。

式中 l 是岩土质点振动的振幅， ω 是爆炸药量， R 是距爆点的距离。

工程上，通常采用岩土质点振动速度作为判别地震波的依据，其经验表达式为

$$u = \frac{B}{\sqrt[3]{0.4 + 0.6n^3}} \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^{1.5} \quad (12-8-1)$$

式中 u —— 岩土质点振动速度，单位 cm/s ；

ω —— 炸药质量，单位 kg ；

R —— 距爆点的距离，单位 m ；

n —— 爆破作用指数；

B —— 随岩土介质不同而变化的系数。当介质是土质时，取 $B = 200$ ，当介质是岩石时，取 $B = 30 \sim 70$ 。

随着质点振动速度的增加，岩土破坏程度加剧。大量试验结果表明：

当质点振动速度为 $0.8 \sim 3.2 \text{ cm/s}$ 时，一切如故，不受

影响；

当质点振动速度为 10 cm/s 时，隧洞顶部有个别落石，低强度矿石破坏；

当质点振动速度为 11 cm/s 时，产生松石和小块震落；

当质点振动速度为 13 cm/s 时，原有裂缝张开，或者产生新的细裂缝；

当质点振动速度为 19 cm/s 时，大石滚落；

当质点振动速度为 26 cm/s 时，边坡有较小的张开裂隙；

当质点振动速度为 52 cm/s 时，大块浮石翻动；

当质点振动速度为 56 cm/s 时，地表有小裂缝；

当质点振动速度为 76 cm/s 时，花岗岩露头裂缝宽约 3 cm ；

当质点振动速度为 110 cm/s 时，花岗岩露头上裂缝宽 3 cm ，地表有裂缝 10 cm ，表土断裂成块；

当质点振动速度为 160 cm/s 时，岩石崩裂，地形有明显变化；

当质点振动速度为 234 cm/s 时，巷道顶壁及混凝土支座严重破坏。

并且试验还表明，当地基质点振动速度达到 $12 \sim 14 \text{ cm/s}$ 时，地上建筑就开始遭受破坏。

岩土介质振动的时间对其破坏程度影响也很大。质点振动周期随介质性质不同有很大差别。对于含水的松散土壤，振动周期最大；对于坚硬的岩石，振动周期最小。并且，随着距爆点距离的增加，振动周期不断增加。其表达式

$$T = c \log R \quad (12-3-2)$$

式中 T —— 岩土介质振动周期，单位 s ，

R ——距爆点的距离, 单位 m ;

τ ——与介质性质有关的系数, 见表12-3-1。

表12-3-1 系数 τ

岩 土 类 别	τ 值
含水土 (流沙、泥炭)	0.11~0.13
中等坚硬的冲积土	0.06~0.09
岩石	0.01~0.03

二、地震安全距离

炸药在地下爆炸, 由于地震波引起的岩土质点振动, 会导致很大范围的建筑物的破坏。通过大量试验分析, 建筑物不受破坏的安全距离表达为

$$R_e = K_e \alpha \sqrt{\omega} \quad (12-3-3)$$

式中 R_e ——自爆点至建筑物的距离, 单位 m ;

ω ——炸药药量, 仍然以威力 280 cm^3 的炸药作为标准炸药, 单位 kg ;

α ——依爆破作用指数不同而定的系数, 见表12-3-2或图12-3-2;

表12-3-2 α 值

爆破作用指数	α 值	备 注
$n \leq 0.5$	1.2	地面上爆炸 时, 地震作 用不予考虑
$n = 1.0$	1.0	
$n = 2.0$	0.8	
$n \geq 3.0$	0.7	

K_0 ——依建筑物地基特征而确定的系数,见表12-3-3。

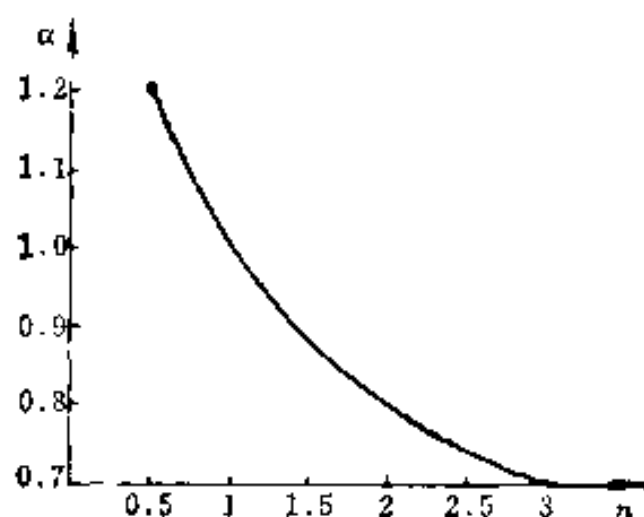


图12-3-2 α 值随 n 值的变化曲线

表12-3-3 K_0 值

地 基 条 件	K_0 值	备 注
坚硬致密的岩石	3.0	炸药在水中和 含水的土壤中 爆炸时, 系数 应增加 0.5~ 1倍。
坚硬破裂的岩石	5.0	
砾石, 碎石土壤	7.0	
砂土	8.0	
粘土	9.0	
回填土	15.0	
流沙, 泥煤地层	20.0	

公式(12-3-3)是单个爆炸点爆炸时, 建筑物不受破坏的安全距离。

假若几个爆炸点同时爆炸, 这种情况也经常会出现, 例如工程上的多点爆破, 或者是事故爆炸中的殉爆, 此时运用公式(12-3-3)需要注意下面几点:

1. 如果建筑物距各个爆炸点的距离之差不超过总距离的10%时, 这时可以近似认为各个爆炸点的地震波同时到达

建筑物，公式(12-3-3)中的炸药质量为各个爆炸点的炸药质量之和。

2. 如果建筑物距各个爆炸点的距离之差超过总距离的10%时，这时各爆炸点的地震波陆续到达建筑物，岩土振动虽为各个爆炸点的爆炸所造成，但不是峰值相加，而必须采用等效药量的概念。

按照

$$\frac{\omega_e}{R_e^3} = \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i}{R_i^3}$$

可以计算等效药量

$$\omega_e = \sum_{i=1}^m \omega_i \left(\frac{R_e}{R_i} \right)^3 \quad (12-3-4)$$

式中 ω_i ——各个爆炸点的药量；

R_i ——建筑物距各个爆炸点的距离；

R_e ——等效距离。

等效距离按照下式计算

$$R_e = \frac{\sum_{i=1}^m (R_i^3 \sqrt[3]{\omega_i})}{\sum_{i=1}^m \sqrt[3]{\omega_i}} \quad (12-3-5)$$

这时，在用公式(12-3-1)计算岩土振动速度时，公式为

$$u = \frac{B}{\sqrt[3]{0.4 + 0.6n^3}} \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_e}}{R_e} \right)^{1.5} \quad (12-3-6)$$

在用公式(12-3-3)确定建筑物不受破坏的安全距离时，

公式为

$$R_s = K_s \alpha^{\frac{3}{n}} / \sqrt[n]{\omega_s} \quad (12-3-7)$$

〔例12-4〕 平坦地面下 5 m 处放置的 500 kg 梯恩梯炸药发生爆炸，爆破作用指数 $n = 1.6$ ，地面为粘土，试计算地震安全距离。

解 500 kg 梯恩梯炸药换算成当量质量为

$$500 \times 1.07 = 535 \text{ (kg)}$$

按照 $n = 1.6$ ，查图12-3-2，得 $\alpha = 0.86$ ；

按照粘土地面，查表12-3-3，取 $K_s = 9$ 。

地震安全距离

$$\begin{aligned} R_s &= K_s \alpha^{\frac{3}{n}} / \sqrt[n]{\omega} = 9 \times 0.86 \times \sqrt[1.6]{535} \\ &= 63 \text{ (m)} \end{aligned}$$

〔例12-5〕 平坦地面下 10 m 埋藏的 5×10^3 kg 炸药（当量质量）爆炸，地面为沙质黄土层，试计算距爆点 50 m 处介质质点振动速度，并计算地震安全距离。

解 1. 计算爆破作用指数

已知炸药埋藏深度和炸药量，并且按照沙质黄土层条件，查表12-2-2，取 $K = 1.3$ 。则

$$\begin{aligned} n &= \sqrt[3]{\frac{\omega}{0.6KH^3} - \frac{2}{3}} \\ &= \sqrt[3]{\frac{5000}{0.6 \times 1.3 \times 10^3} - \frac{2}{3}} = 1.79 \end{aligned}$$

2. 计算距爆点 50 m 处介质质点振动速度

已知炸药质量、爆破作用指数和计算点距爆点的距离。再根据沙质黄土取 $B = 200$ 。按照公式 (12-3-1) 计算

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{B}{\sqrt[3]{0.4+0.6n^3}} \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} \right)^{1.3} \\
 &= \frac{200}{\sqrt[3]{0.4+0.6 \times 1.79^3}} \left(\frac{\sqrt[3]{5000}}{50} \right)^{1.3} \\
 &= 25.54 \text{ (cm/s)}
 \end{aligned}$$

3. 计算地震安全距离

按照 $n = 1.79$, 查图12-3-2, 得 $\alpha = 0.81$;

按照沙质黄土, 查表12-3-3, 取 $K_e = 8$ 。

则

$$\begin{aligned}
 R_s &= K_e \alpha \sqrt[3]{\omega} = 8 \times 0.81 \times \sqrt[3]{5000} \\
 &= 111 \text{ (m)}
 \end{aligned}$$

〔例12-6〕 在砾石地层下8 m的深度处埋藏着三堆梯恩梯炸药, 这三堆炸药布置在同一直线上, 间距为100 m, 其质量分别为1 Mg、3 Mg和5 Mg, 如图12-3-3所示, 假若三堆炸药同时爆炸, 试计算在炸药堆布置线的垂直方向上, 距第一个炸药堆200 m处地基质点的振动速度, 并且计算该处位置是否符合地震安全距离的要求。

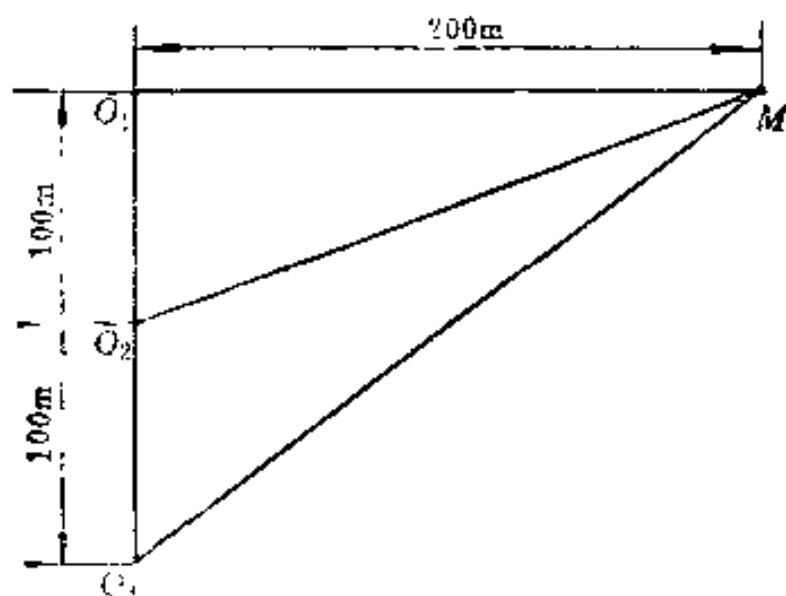


图12-3-3 本题计算点与炸药放置示意图

解 1. 计算等效距离和等效药量

按照图12-3-3, 已知 $O_1O_2=O_2O_3=100\text{ m}$, $O_1M=200\text{ m}$, 很容易计算出建筑物距第二、三个炸药堆的距离分别为

$$O_2M = \sqrt{200^2 + 100^2} = 224(\text{ m})$$

$$O_3M = \sqrt{200^2 + 200^2} = 283(\text{ m})$$

由于建筑物距各个炸药堆的距离之差大于实际距离的10%, 因而当三堆炸药同时爆炸计算地震效应时, 必须采用等效距离和等效药量。

等效距离按照(12-3-5)式计算

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{\sum_{i=1}^m (R_i^{\frac{3}{2}} \sqrt{\omega_i})}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\omega_i}} \\ &= [200 \times \sqrt[3]{1000 \times 1.07} + 224 \times \sqrt[3]{3000 \times 1.07} \\ &\quad + 283 \times \sqrt[3]{5000 \times 1.07}] \div [\sqrt[3]{1000 \times 1.07} \\ &\quad + \sqrt[3]{3000 \times 1.07} + \sqrt[3]{5000 \times 1.07}] \\ &= \frac{2046 + 3304 + 4950}{10.23 + 14.75 + 17.49} = 243(\text{ m}) \end{aligned}$$

等效药量按照(12-3-4)式计算

$$\begin{aligned} \omega_e &= \sum_{i=1}^m \omega_i \left(\frac{R_e}{R_i} \right)^3 \\ &= 1070 \times \left(\frac{243}{200} \right)^3 + 3210 \times \left(\frac{243}{224} \right)^3 + 5350 \times \left(\frac{243}{283} \right)^3 \\ &= 1919 + 4098 + 3397 = 9414(\text{ kg}) \end{aligned}$$

2. 计算爆破作用指数

按照地质为砾石层，查表12-2-2，取 $K=1.5$ ，
已知 $H=8\text{ m}$ ， $\omega_s=9414\text{ kg}$ 。

爆破作用指数

$$\begin{aligned} n &= \sqrt[3]{\frac{\omega_s}{0.6KH^3} - \frac{2}{3}} \\ &= \sqrt[3]{\frac{9414}{0.6 \times 1.5 \times 8^3} - \frac{2}{3}} = 2.70 \end{aligned}$$

3. 计算M处建筑物地基的质点振动速度

对于砾石地面，取 $B=70$ 。按照(12-3-6)式

$$\begin{aligned} u &= \frac{B}{\sqrt[3]{0.4+0.6n^3}} \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_s}}{R_s} \right)^{1.5} \\ &= \frac{70}{\sqrt[3]{0.4+0.6 \times 2.7^3}} \left(\frac{\sqrt[3]{9414}}{243} \right)^{1.5} \\ &= 0.78 \text{ (cm/s)} \end{aligned}$$

4. 计算地震安全距离

按照 $n=2.70$ ，查图12-3-2，得 $\alpha=0.72$ ，

按照砾石地面，查表12-3-3，取 $K_s=7$ 。

则

$$\begin{aligned} R_s &= K_s \alpha \sqrt[3]{\omega_s} = 7 \times 0.72 \times \sqrt[3]{9414} \\ &= 106 \text{ (m)} \end{aligned}$$

所以，M处位置符合地震安全距离的要求。

三、个别碎块飞散的安全距离

炸药在岩土中爆炸时，岩土碎块被抛掷到空中，并且在抛掷过程中发生相互撞击，使得一些碎块获得较大的速度，

可以抛掷得很远，这些个别飞散的碎块严重威胁着周围人员的安全。

个别碎块飞散的远近，受着各种具体条件的影响，除了与炸药量、炸药埋藏条件和地质条件有关外，还与地形和气候条件有关，其影响因素分述如下。

1. 炸药量和炸药埋藏条件。可以用最小抵抗线和爆破作用指数表示，当 H 和 n 愈大时，炸药量愈多，碎块飞散距离就愈远，并且碎块飞散距离随 n 增加的程度比随 H 增加的程度要大。

2. 地质条件。可以用岩土密度和形成碎块的形态来表示，对于土壤来说，爆炸抛掷容易使土壤成为松散状态，土壤变形消耗的能量大，因而剩余抛掷土壤运动的能量少，并且由于土壤密度低，保持运动的惯性小，所以碎块飞散距离小。对于岩土来说，受爆炸作用成为碎块，能量消耗少，因而剩余抛掷碎块运动的能量多，并且石块密度大，保持运动的惯性也大，所以岩石碎块飞散距离也大。

3. 地形条件。在平坦地面下爆炸时，由于地面宽阔，岩土碎块可以四面八方抛射无阻，这时在爆点周围碎块飞散的比较均匀，其范围也比较大；在斜坡地面下爆炸时，岩土碎块就最小抵抗线方向抛掷具有了一个向下的角度，因而在斜坡与向上碎块飞散距离较比两侧方向碎块飞散距离要大得多。

4. 气候条件。风向、风速对碎块飞散也产生不小的影响，风速大时比风速小时飞散距离远；顺风方向比逆风方向碎块飞散距离远。实验表明，大风速时顺风方向个别碎块飞散距离，比无风时个别碎块飞散距离大一倍以上。

通过上面的分析看出，计算个别岩土碎块飞散的安全距

离，是一个很复杂的问题，不能简单地按爆炸点为圆心，碎块飞散的最大距离为半径，作出一个大圆圈，而是要考虑具体情况来确定。另外，由于岩石碎块的飞散距离要比土壤飞散距离大得多，但是即使土壤也难免土层中夹杂着石块，因而计算碎块飞散只是考虑岩石碎块。

计算个别碎块飞散的安全距离经验公式为

$$R_b = 20K_b n^2 H \quad (12-3-8)$$

式中 R_b ——个别碎石飞散的安全距离，单位 m；

n ——爆破作用指数；

H ——最小抵抗线，单位 m；

K_b ——与地质、地形、气候和炸药埋藏深度有关的系数，见表12-3-4。

表12-3-4 K_b 值

条 件	K_b 值
平坦地形、风速不大的正常情况	1.0~1.5
山区斜坡正对最小抵抗线方向	1.5
风速大在顺风方向	1.5~2.0
山谷	1.5~2.0

根据公式(12-3-8)计算的个别碎块飞散的安全距离数值，如果小于爆破试验规定所允许的最小距离时，应当按照爆破试验规定所允许的最小距离设置警戒。

对于抛掷爆破，在地形较平坦、风速不大的正常条件下，个别飞石碎块对人员和建筑物伤害的危险半径，可以按照表12-3-5和表12-3-6来确定。这两个表是根据大量试验资料制成的，可以用来校核公式(12-3-8)的计算数据。

表12-3-5 个别碎块对人的危险半径

$R_b(m)$ $H(m)$	n	1.0	1.5	2.0	2.5~3.0
1.5		200	300	350	400
2.0		200	400	500	600
4.0		300	500	700	800
6.0		300	600	800	1000
8.0		400	600	800	1000
10.0		500	700	900	1000
12.0		500	700	900	1200
15.0		600	800	1000	1200
20.0		700	800	1200	1500
25.0		800	1000	1500	1800
30.0		800	1000	1700	2000

表12-3-6 个别碎块对建筑物的危险半径

$R_b(m)$ $H(m)$	n	1.0	1.5	2.0	2.5~3.0
1.5		100	150	250	300
2.0		100	200	350	400
4.0		150	250	500	550
6.0		150	300	550	650
8.0		200	350	600	700
10.0		250	400	600	700
12.0		250	400	700	800
15.0		300	400	700	800
20.0		350	400	800	1000
25.0		400	500	900	1000
30.0		400	500	1000	1200

〔例12-7〕 地面下10 m处放置的 $5 \times 10^3 \text{ kg}$ 炸药(当量质量)爆炸, 爆破作用指数为1.79, 试计算个别碎块飞散的安全距离。

解 已知 $H=10 \text{ m}$, $n=1.79$,

平坦地面、风速不大的正常条件下, 查表12-3-4取 $K_b=1.3$ 。

按照公式(12-3-8)计算

$$R_b = 20K_b n^2 H = 20 \times 1.3 \times 1.79^2 \times 10 = 833 \text{ (m)}$$

再按照表12-3-5和表12-3-6, 查得此时人员和建筑物的危险半径分别为780 m和480 m。

因而, 人员的安全距离可以确定为833 m, 而建筑物的安全距离确定为480 m。

〔例12-8〕 $8 \times 10^3 \text{ kg}$ 梯恩梯炸药放置在地下15 m的位置处, 地质为含碎石的沙土地面, 爆炸时恰巧是大风天气, 试计算地震安全距离和个别碎块飞散的安全距离。

解 1. 计算爆破作用指数

已知梯恩梯质量 $\omega=8000 \text{ kg}$, $H=15 \text{ m}$,

按照沙土地查表12-2-2, 取 $K=1.45$,

由公式(12-2-8)计算

$$\begin{aligned} n &= \sqrt[3]{\frac{\omega}{0.6KH^3} - \frac{2}{3}} \\ &= \sqrt[3]{\frac{8000 \times 1.07}{0.6 \times 1.45 \times 15^3} - \frac{2}{3}} = 1.31 \end{aligned}$$

2. 计算地震安全距离

按照 $n=1.31$, 查图12-3-2, 得 $\alpha=0.92$;

按照沙土地, 查表12-3-3, 取 $K_s=8$ 。

由公式 (12-3-3) 计算

$$R_s = K_s \alpha \sqrt[3]{\omega} = 8 \times 0.92 \times \sqrt[3]{8000 \times 1.07} \\ = 151 \text{ (m)}$$

3. 个别碎块飞散的安全距离

已知 $H = 15 \text{ m}$, $n = 1.31$;

大风天气顺风方向, 查表 12-3-4, 取 $K_b = 2$ 。

由公式 (12-3-8) 计算

$$R_b = 20 K_b n^2 H = 20 \times 2 \times 1.31^2 \times 15 = 1030 \text{ (m)}$$

从计算中可以看出, 个别岩石碎块飞散的危险范围, 大大超过了地震波的危险范围。在野外试验中更应该注意到这一点, 地震波影响不到的地方, 个别岩石碎块可能会给人们带来意外的伤害。

§ 12-4 岩土中爆炸的影响因素

炸药在岩土中爆炸时, 影响因素是多种多样的, 主要从炸药和地质条件两个方面进行讨论。

一、炸 药

炸药是岩土中爆炸的能源, 是影响爆炸效果的主要原因。由于炸药在岩土中爆炸的效果是以抛掷岩土量的多少、形成爆破漏斗坑的大小或者是以岩土粉碎程度进行衡量。因此, 从炸药性能参数来说, 主要用威力和猛度来表示。

实际上, 威力和猛度这两个炸药性能指标, 对于不同的岩土介质, 有着不同的破坏效果。对于土壤和松软岩石, 主要是抛掷, 威力大的炸药能够抛掷更多的土方; 对于坚硬完整的岩石, 粉碎是重要的, 猛度大的炸药粉碎效果严重。

军用炸药如梯恩梯、特屈儿、泰安和黑索金等, 由于炸

药威力高、猛度大，即使在坚硬岩石情况下，爆破效果也很严重，并能抛掷到很远的地方。

工业炸药主要是以硝酸铵为主体制成的炸药，如在硝酸铵中加入梯恩梯和木粉的铵梯炸药，这类炸药的威力与梯恩梯炸药的威力相当，而猛度只有梯恩梯炸药猛度的50~70%，其爆炸效果同样能够达到较大的范围，但是由于猛度低，碎块不会飞得过远，所以这类炸药广泛地应用在矿山民用爆破上。表12-4-1给出了几种常用硝铵炸药的数据。

表12-4-1 几种常用硝铵炸药性能

炸 药	组 分	威力 (cm^2)	猛度 (mm)
1号露天铵梯	硝酸铵82/梯恩梯10/木粉8	310	11
2号露天铵梯	硝酸铵86/梯恩梯5/木粉9	280	9
3号露天铵梯	硝酸铵88/梯恩梯3/木粉9	260	8
4号露天炸药	硝酸铵91/木粉6/柴油3	300	9
1号岩石铵梯	硝酸铵85/梯恩梯11/木粉3	350	13
2号岩石铵梯	硝酸铵85/梯恩梯11/木粉4	320	12
1号煤矿铵梯	硝酸铵58/梯恩梯15/木粉2/食盐15	290	12
2号煤矿铵梯	硝酸铵71/梯恩梯10/木粉4/食盐15	250	10
3号煤矿铵梯	硝酸铵67/梯恩梯10/木粉3/食盐20	240	10
1号抗水铵梯	硝酸铵82/梯恩梯10/木粉7.2/沥青0.4/石蜡0.4	300	10
2号抗水铵梯	硝酸铵86/梯恩梯5/木粉8.2/沥青0.4/石蜡0.4	250	8
3号抗水铵梯	硝酸铵85/梯恩梯11/木粉3.2/沥青0.4/石蜡0.4	320	12
1号高威力铵梯	硝酸铵70/梯恩梯10/黑索金20	496	18.4
2号高威力铵梯	硝酸铵80/梯恩梯12/铝粉7/沥青1	—	17
3号高威力铵梯	硝酸铵30/梯恩梯50/黑索金15/铝粉3	445	13.4
1号铵油炸药	硝酸铵92/柴油4/木粉4	325	10
2号铵油炸药	硝酸铵92/柴油5/木粉3	335	11
1号铵药炸药	硝酸铵31/木粉8.5/松香1.7/石蜡0.8	325	12
2号铵药炸药	硝酸铵90/木粉8/石蜡1/沥青1	275	10

关于炸药的当量系数，通常也是以威力和猛度进行衡量，

习惯上采用威力 280cm^3 (铅块扩孔) 和猛度 10cm (铅柱压缩) 作为标准值。对于威力和猛度这两个量, 应当以威力为主, 适当考虑猛度的作用, 来确定炸药的当量系数, 本书采用了这种方法。

除了用威力和猛度作为衡量标准外, 在试验现场还可以采用简单的比较爆破漏斗法确定炸药当量系数。其具体方法是将同等质量的未知炸药和某种已知当量系数的炸药, 一起做爆破漏斗试验, 地质条件最好选在湿沙或比较均匀的土壤中, 试验后分别测量两个爆破漏斗的最小抵抗线和爆破漏斗口部半径, 计算出爆破漏斗体积 V_1 和 V_2 , 按照下列关系

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

假若 φ_2 是已知炸药的当量系数, 则未知炸药的当量系数为

$$\varphi_1 = \varphi_2 \frac{V_1}{V_2}$$

用比较爆破漏斗试验确定炸药当量的方法, 简单易行, 而且接近实际情况, 包含了综合因素, 是一种很好的方法。

二、地质条件

地质是爆破的对象, 它与炸药是岩土爆炸中对立统一的两个方面。地质条件包括岩土性质、岩土结构和地质构造等主要因素, 地质条件的不同直接影响爆炸的效果。

1. 岩土性质

岩土性质主要指物理性质和力学性质, 岩土的物理性质包括密度、硬度、脆性、塑性、孔隙度和湿度等, 岩土的力学性质包括抗拉、抗压和抗剪等对外力作用的抵抗能力。

由于岩土性质的不同，爆炸后其效果也不同。例如，在密度小、强度低的土壤中爆炸，其爆炸效果远比在密度大、强度高的岩石中爆炸严重；但是密度大、抗压强度高的石英岩，由于脆性大，抗爆性能不如含云母成分多、韧性好的花岗岩；同样是沙，干沙和湿沙差别很大，对于干沙根本无法抛掷，对于湿沙抛掷就严重得多。

再如，在坚硬致密的岩石中爆炸时，地震危险半径较小而破坏影响却很大；反之，在松软岩石中爆炸时，地震危险半径较大而破坏影响却很小。在脆性岩石中爆炸时，岩石不仅容易震裂，而且产生环向和径向裂缝的范围也很大；但是在松软岩石中爆炸，其效果却正好相反。

2. 岩石结构

岩石结构上的差异，各种岩石、即使同一种岩石，由于它们的层理、节理和裂隙等结构特性的不同，对爆炸效果影响也很大。

岩层层理是岩石内部的许多分层，这种分层在沉积岩最为严重，片麻岩等也存在。层理对爆炸效果影响的原因在于，除爆炸点附近范围之外，较远距离的岩石只是沿着已有的层理面开裂。从实际观察看出，薄的岩层比厚的岩层容易破碎，并且岩石多沿层面破裂成块，如片状或板状的岩层往往破裂成针瓦块状；条带状板岩多沿条状面破裂；变质岩多沿片理、片面、片麻状结构方向破裂，而火成岩，由于没有层次，受力比较均匀，块度多成正方形或矩形。

裂隙在岩石中是普遍存在的，节理也可以看作是裂隙，是结构特征的重要表现，完整无缝的岩体在自然界中并不多见。如果岩层仅受一组主要节理和裂隙切割时，对爆炸作用的影响与层理的影响相似；如果岩层受到两组主要节理、裂

隙切割时，其情况与单方向的节理、裂隙影响大不一样。这时抛掷方向不致改变，但抛掷量会受到影响；如果岩层受到多组程度类似的节理、裂隙切割时，岩层被切割成碎块，各组节理、裂隙都不能起主导作用，反而接近于均质岩石。

3. 地质构造

断层、溶洞等地质构造，以及各种各样的地形条件，对爆炸效果都会产生很大的影响。这些问题必须针对具体情况，进行具体分析。在实际工作中，可充分利用大自然的现有条件，开展安全防护工作。

标准抛掷爆破的单位耗药量系数 K ，应当根据地质条件的各个因素进行确定，但是由于因素复杂，在实用中，只是考虑了岩土介质的物理和力学性质。具体方法是，按照抗压强度定出岩土的分类等级，然后按照分类等级做爆破漏斗试验，最终确定相应的 K 值。

采用以抗压强度划分岩土等级的方法，把岩土分成十六级。表12-4-2给出了岩土等级划分情况。

表12-4-2 岩土等级表

岩土等级	σ (Pa $\times 10^5$)	岩 土 名 称	ρ (kg/m ³)
I	50~60	砂	1500
		粘土	1800
		种植土	1200
II	60~80	黄土质砂粘土	1600
		潮湿松散的黄土	1600
		密实含草根种植土	1400
III	80~100	重型砂粘土	1800
		干燥黄土	1800
		含碎石、碎屑的粘砂土	1900

(续)

岩土等级	$\sigma (P_n \times 10^8)$	岩 土 名 称	$\rho (kg/m^3)$
IV	100~150	板状粘土	2000
		硬化黄土	1800
		胶结的建筑材料碎屑	1830
V	150~200	泥煤	1200
		白垩土和硅藻土	1550
		石膏	2200
VI	200~400	无烟煤	1500
		明亮石灰岩	1200
		浮石	1100
VII	400~600	砾岩	2200
		坚实的泥灰岩	2500
		坚硬的泥质页岩	2800
VIII	600~800	泥灰质石灰岩	2300
		粘土质砂岩	2200
		云母页岩	2300
IX	800~1000	密实的石灰岩	2500
		石灰质页岩	2500
		菱铁岩	2700
X	1000~1200	坚实的石灰岩	2700
		大理石和白云岩	2700
		砂质页岩和石灰质砂岩	2600
XI	1200~1400	粗粒花岗岩	2800
		石英质砂岩	2700
		粗粒正长岩	2700
XII	1400~1600	风化玄武岩	2700
		片麻岩	2600
		粗面岩	2600

岩土等级	σ ($\text{Pa} \times 10^5$)	岩 土 名 称	ρ (kg/m^3)
XIII	1600~1800	中粗花崗岩	3100
		輝綠岩	2700
		玢岩	2500
		中粒正长岩	2800
XIV	1800~2000	細粒花崗岩	3300
		閃长岩	2900
		堅实的玢岩	2700
XV	2000~2500	玄武岩	3100
		堅实的輝綠岩和閃长岩	2900
		石英岩和輝长岩	2800
XVI	2500以上	钙质玄武岩	3300
		特別堅实的輝綠岩和玢岩	3000
		特別堅实的石英岩和輝长岩	3000

从表12-4-2看出, 岩土上的密度与抗压强度之间基本上存在着正比关系, 因而有时也经常通过岩土上的密度, 近似计算标准抛掷耗药量系数, 其经验公式为

$$K = 0.4 + \left(\frac{\rho}{2450} \right)^2$$

式中 ρ —— 岩土样品的密度, 单位 kg/m^3 。

当然这样计算的 K 值, 比较粗糙, 准确性较差, 但是在现场一时没有确切资料时, 用这种估算非常方便, 并且有相当的参考价值。

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 爆炸基本原理

作者 = 张守中

页数 = 6 2 0

S S 号 = 1 0 1 0 0 3 5 4

出版日期 = 1 9 8 8 年 0 4 月 第 1 版

前言	
目录	
第一章	炸药的爆炸
第二章	热力学知识
第三章	炸药的起爆及感度
第四章	爆炸反应
第五章	波
第六章	爆轰波理论
第七章	炸药的威力和猛度
第八章	爆轰产物的直接作用
第九章	爆炸空气冲击波
第十章	杀伤作用
第十一章	聚能效应
第十二章	岩土中爆炸