

强脉冲电流下金属爆炸理论及其应用

邹永庆

(1981年12月29日收到)

本文提出了一种强脉冲电流加热金属爆炸的汽化——爆炸模型。根据这种理论,作者分析了金属箔爆炸推动聚脂薄膜时的波系和运动情况。用这种方法计算了Cu、Al和Mg金属箔爆炸推动的聚脂薄膜飞片速度,其数据和某些发表的实验数据一致。最后介绍了电炮在高压物理中的应用。

一、引言

1964年Bennett等人⁽¹⁾首次提出了在爆炸丝实验中汽化波的概念。接着,他⁽²⁾用汽化膨胀波来解释实验中观测到的电流剧烈衰减和电阻率反常上升的现象。

Krokhin⁽³⁾将汽化波概念应用到激光打靶中所出现的高温等离子体现象,并给出解析解。Fauquignon, Floux⁽⁴⁾提出爆燃——冲击波的理论模型,该模型认为吸收激光的能量支持一个稳态的冲击波和加热等离子体。

实际上,通电金属爆炸的问题和激光打靶爆炸的问题是相似的。前者是由电流加热物质,后者是由激光加热物质。根据脉冲电流的频率和金属的导电率,电流在不同的集肤层内加热导体,而激光则在表面一定厚度内被吸收来加热物质。所以,它们的加热机制虽然不同,但加热的部位和加热之后发生的物理过程应该是相似的。在这基础上,本文提出汽化——爆炸波的理论模型,认为金属箔获得的电能不但支持一个稳态的爆炸波,而且加热汽化伴随的等离子体。另一方面,通电金属箔爆炸也类似于化学炸药爆炸。前者,将电能转变为金属箔爆炸时所具有的能量;后者,是化学反应生成热,即化爆所释放的能量。所以,金属箔可视为金属炸药,于是爆炸波类似于爆轰波,汽化伴随的电离等离子体类似于爆轰产物。它们的差别是金属炸药爆炸后汽化伴随的电离等离子体产物(以后简称汽化产物)能够继续获得电能,而化学炸药爆炸完毕时,化学能全部释放出来了,形成爆轰产物。汽化产物和爆轰产物的作用一样,能够驱动飞片运动。

对于电爆炸箔驱动飞片运动的计算,由Tucker, Stanton⁽⁵⁾采用电格尼能量分析给出了飞片运动的终速度的解析解。该解析解的特点是比较简单、应用方便,但结果不是令人满意的。Schmidt等人⁽⁶⁾指出了电格尼能量方法低于实验的能量沉积的原因,并提出了从经验出发的修正模型。文献⁽⁶⁾对于大的铝、镁和铜三种金属箔和小的铝箔爆炸来驱动飞片运动进行了数值计算。但是,在计算中要采用不同的经验修正因子,并且对于铜箔,计算出来的

飞片速度与实验测量的飞片速度差别是较大的。Stanton⁽⁷⁾采用Chart D—维流体力学编码计算了金属箔的熔化、汽化最后成为电离等离子体的大致的物理过程,也计算了飞片运动的轨迹,其结果也是不能令人满意的。

本文,采用汽化——爆炸波的理论模型,在已知实验的比功率曲线条件下,推导出达到峰值比功率时的爆炸压力。该理论应用到电炮实验中可以计算在爆炸时刻金属箔的位移和飞片获得的速度,可以计算任意时刻(或任意空腔位置上)的飞片速度和汽化产物内的平均压力。在计算过程中经验地找到了电能通过金属箔提供给飞片运动的能量吸收效率的表达式。

二、理论模型

强电流脉冲快速地加热金属箔(或丝),使它经过熔化,汽化,最终变成电离等离子体,完成上述物理过程,一般小于2微秒。在很短的时间内,设想一定存在某一时刻 t_0 ,从 t_0 开始产生汽化——爆炸波,见图1。

在图1中 v 是汽化波阵面, s 是爆炸波阵面, r 是反射波阵面。(0)区是过热金属液体和部分汽化物,该区的状态是不能形成汽化波的,其压力和粒子速度可视为零。(1)区是压缩状态,它传递和吸收电能,支持一个稳态的爆炸波。(2)区是汽化产物,并进行等温膨胀的状态。(3)区是能量沉积、释放的状态。因为电流加热导体的集肤效应,所以汽化——爆炸波结构向金属箔厚度中心是对称地运动着,它相当于在金属箔厚度中心存在固壁条件。当汽化波快速地完全汽化掉金属箔时,沉积在区域(3)中的能量释放出来,形成金属爆炸。

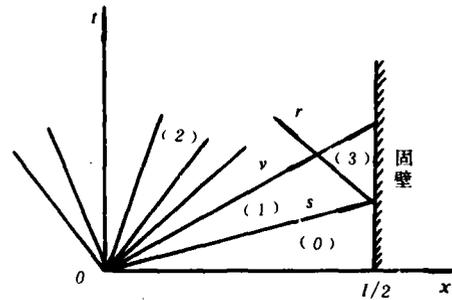


图1 汽化——爆炸波结构理论模型波系图。 l 是金属箔厚度。

在这个汽化——爆炸波的理论模型里,我们采用的假定是:(1)设想汽化——爆炸波是在某一时刻 t_0 同时发生的,而不考虑形成爆炸波结构的瞬变现象;(2)流动是平面一维的,忽略物质的横向膨胀;(3)认为汽化波以常速度向金属箔中心方向运动;(4)认为爆炸波具有化爆中的爆轰波的特性;(5)汽化波满足Chapman——Jouguet条件;(6)金属箔是单原子的理想气体,即 k 等于5/3。

三、金属炸药爆炸时汽化产物参数计算

根据上述的基本假定(4),在爆炸波阵面上有

$$p_1 = \frac{1}{k+1} \rho_1 D_1^2 \quad (3.1)$$

$$u_1 = \frac{1}{k+1} D_1 \quad (3.2)$$

$$\rho_1 = \frac{k+1}{k} \rho_0 \quad (3.3)$$

$$e_1 = \frac{p_1}{(k-1)\rho_1} \quad (3.4)$$

其中, p, u, ρ 和 e 分别是压力、粒子速度、密度和比内能, 它们的角标对应于图 1 中的区域号码。 D 是爆炸波传播速度。

因为汽化波速度 D 是十分接近于爆炸波波后粒子速度 u 的事实⁽⁴⁾, 我们有

$$D \simeq u_1 \quad (3.5)$$

而 D 可用实验给出的比功率曲线 $A(t)$ 来确定。我们把比功率曲线 $A(t)$ 的峰值所对应的时间作为金属炸药爆炸时间即 t_b , 而把它的半高度所对应的时间作为形成汽化——爆炸波的初始时刻即 t_0 , 这样一来, 汽化波速度 D 的表达式为

$$D = \frac{x_0}{2(t_b - t_0)} \quad (3.6)$$

其中, x_0 是对应于 t_0 时刻的金属炸药厚度, 它不同于金属箔的初始厚度。于是, 知道了 D , 就确定了 u_1 , 这样可以求出区域(1)中的物理参量。与激光加热的处理方法相同, 分别写出汽化波阵面 v 上的动量守恒和能量守恒方程:

$$p_2 + \rho_2(D - u_2)^2 = p_1 + \rho_1(D - u_1)^2 \quad (3.7)$$

$$e_2 - e_1 = \frac{1}{2}(p_2 + p_1)\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right) \quad (3.8)$$

根据基本假定(5), 有

$$D = u_2 + a_T \quad (3.9)$$

其中, a_T 是等温音速。把方程(3.5)和(3.9)代入方程(3.7)有

$$p_2 = \frac{1}{2}p_1 \quad (3.10)$$

由方程(3.8)容易得到

$$\rho_2 = \frac{3k-1}{3k+1}\rho_1 \quad (3.11)$$

比内能是

$$e_2 = \frac{p_2}{(k-1)\rho_2} \quad (3.12)$$

这样, 方程(3.10)——(3.12)决定了区域(2)的状态参数。 p_2 和 e_2 是金属炸药在爆炸前的平均汽化产物的压力和汽化产物吸收电能所具有的比内能。

现在来求区域(3)的状态参数。固壁条件有

$$\sqrt{(p_3 - p_1)(1/\rho_1 - 1/\rho_3)} = \sqrt{(p_1 - p_0)(1/\rho_0 - 1/\rho_1)} \quad (3.13)$$

反射冲击波 r 的 Hugoniot 方程为

$$\frac{\rho_3}{\rho_1} = \frac{(k+1)p_3 + (k-1)p_1}{(k-1)p_3 + (k+1)p_1} \quad (3.14)$$

联立方程(3.13)和(3.14), 可以得到

$$\frac{p_3}{p_1} = \frac{5k+1+\sqrt{17k^2+2k+1}}{4k} \quad (3.15)$$

这就确定了金属炸药爆炸时中心点邻域内的爆炸压力 p_3 。这时金属炸药释放出来的能量为

$$e_3 = \frac{p_3}{(k-1)\rho_3} \quad (3.16)$$

这时汽化产物的总比内能是

$$e_b = e_2 + e_3 \quad (3.17)$$

当已知实验的比功率曲线 $A(t)$ 时, 可以求出从 t_0 到 t_b 时间内电能所提供的总能量为

$$Q_b = \int_{t_0}^{t_b} A(t) dt \quad (3.18)$$

因为, 这段时间内的比功率曲线基本上是直线, 所以有

$$Q_b = \frac{3}{4} A(t_b) (t_b - t_0) \quad (3.19)$$

在这里 $A(t_b)$ 是比功率曲线 $A(t)$ 的峰值。所以, 到金属炸药爆炸时刻为止, 电能提供给汽化产物的能量的平均利用效率为

$$\psi_b = \frac{e_b}{Q_b} \quad (3.20)$$

四、汽化产物驱动飞片运动

现在, 仅讨论金属箔一端是飞片, 另一端是固壁情况下的飞片运动, 它相当于电炮装置。金属箔从初态到爆炸时物理过程的变化, 见图2。

根据第三节建立起来的公式, 我们很容易得到

$$u_b = \frac{p_2}{M} (t_b - t_0) \quad (4.1)$$

$$x_b = x_0 + \frac{1}{2} \frac{p_2}{M} (t_b - t_0)^2 \quad (4.2)$$

其中, M 是单位面积飞片质量, u_b 是爆炸时刻飞片具有的速度, x_b 是 $t = t_b$ 时金属爆炸所对应的厚度, x_0 是 $t = t_0$ 时金属炸药所对应的厚度。

为了寻求运动的解析解, 我们假定: (1)在固壁和飞片之间的汽化产物的速度是线性分布的; (2)汽化产物的膨胀过程是瞬时热动平衡状态。也就是说, 汽化产物内的压力, 密度和比内能是空间均匀分布的; (3)飞片认为是不可压缩的刚体。于是, 我们可以写出下列的方程组运动方程

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (4.3)$$

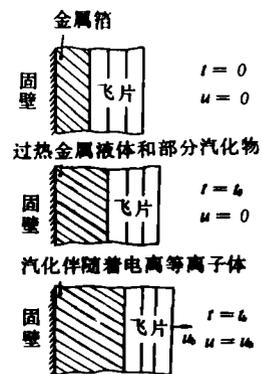


图2 电爆炸箔系统物理过程简化描述

牛顿第二定律

$$p = M \frac{du}{dt} \quad (4.4)$$

电能提供的能量方程

$$\frac{dQ}{dt} = A \quad (4.5)$$

能量守恒的微分方程

$$m\varphi dQ = (M + \frac{1}{3}m)udu + mde \quad (4.6)$$

这里, x 和 u 分别是汽化产物—飞片界面上的位置和速度; Q 是电能提供的能量; m 是金属炸药 (或金属箔) 质量; φ 是电能提供给汽化产物的能量的平均利用效率。我们经验地找到

$$\varphi = B\varphi_0 \frac{lz}{w} \quad (4.7)$$

其中, l , w 和 z 分别是金属箔的初始厚度, 初始宽度和原子序数; B 是常数。

将方程(4.3)~(4.5)代入方程(4.6), 经过整理可以得到

$$du^2 = 6\varphi A dt \quad (4.8)$$

从 t_0 积分到 t 并利用积分中值定律, 获得

$$u(t) = \sqrt{u_0^2 + 3[A(t_0) + A(t)]\varphi(t - t_0)} \quad (4.9)$$

于是, 很容易得到

$$x(t) = x_0 + \frac{2u^3(t)}{9\varphi[A(t_0) + A(t)]} \quad (4.10)$$

和

$$p(t) = \frac{3M\varphi A(t)}{u(t)} \quad (4.11)$$

因此, 根据实验给定的比功率曲线 $A(t)$, 我们可以采用表达式(4.9)~(4.11)来求出飞片运动的速度、飞行距离和金属箔汽化产物内的压力变化, 它同样也是汽化产物——飞片界面处的压力变化。

五、计算结果

文献〔7〕和〔6〕分别给出铜箔、铝箔、镁箔和大、小铝箔的实验比功率曲线和实验飞片速度曲线。采用上述提出的方法进行解析计算, 其主要参数和结果列于表 1 和图 3——7。

表1 模型参数和结果

模型(mm)	w(mm)	ρ_3 (万大气压)	φ	u(mm/ μ s)	对应的图	文献
0(cu)0.036(Mylar)0.127	9.53	3.6901	0.12394	6.1695	3	[7]
0(Al)0.051(Mylar)0.127	9.53	2.2302	0.036997	6.4545	4	[7]
0(Mg)0.051(Mylar)0.127	6.35	1.2592	0.043372	7.4545	5	[7]
0(Al)0.051(Mylar)0.25	25.4	2.5931	0.017652	5.1455	略	[6]
0(Al)0.152(Mylar)0.25	25.4	2.6368	0.065950	5.0704	略	[6]
0(Al)0.051(Mylar)0.25	12.7	1.8867	0.023947	5.7318	6	[6]
0(Al)0.011(Mylar)0.025	1.524	0.52973	0.030374	3.0310*	7	[6]
0(Al)0.011(Mylar)0.051	1.524	0.40363	0.021237	2.5625*	略	[6]
0(Al)0.011(Mylar)0.127	1.524	0.21702	0.0085641		略	[6]

表中, 飞片速度 u 是对应于飞行距离 5 毫米处的速度; 带* 符号的是对应于飞行距离 0.75 毫米处的速度。

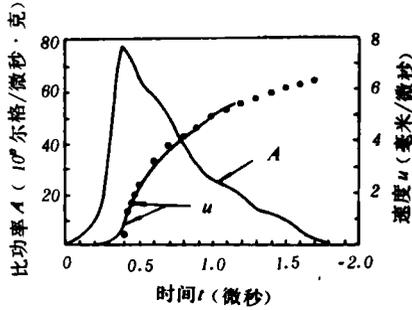


图 3A 实线是实验给出的铜箔比功率和飞片速度与时间的关系, 园点是本文计算的飞片速度

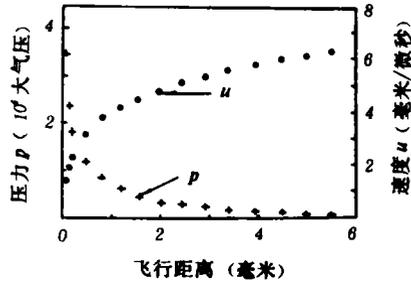


图 3B 本文计算的飞片速度和箔气体产物中的压力与距离的关系

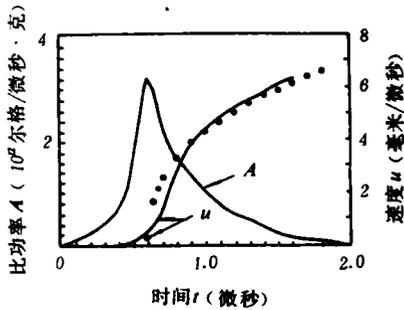


图 4A 实线是实验给出的铝箔比功率和飞片速度与时间的关系, 园点是本文计算的飞片速度

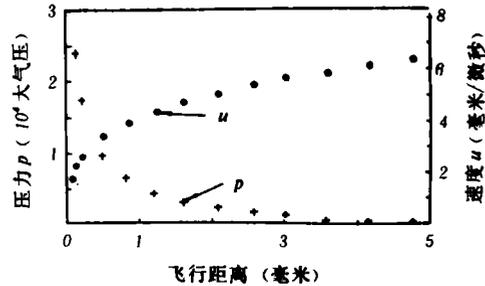


图 4B 本文计算的飞片速度和箔气体产物中的压力与飞行距离的关系

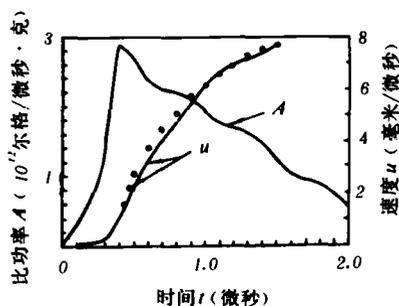


图 5A 实线是实验给出的镁箔比功率和飞片速度与时间的关系。园点是本文计算的飞片速度

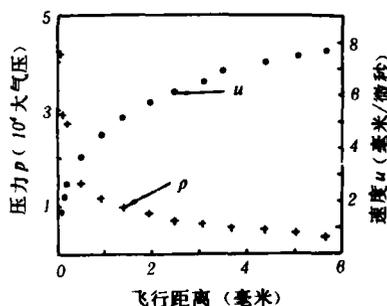


图 5B 本文计算的飞片速度和箔气体产物中的压力与距离的关系

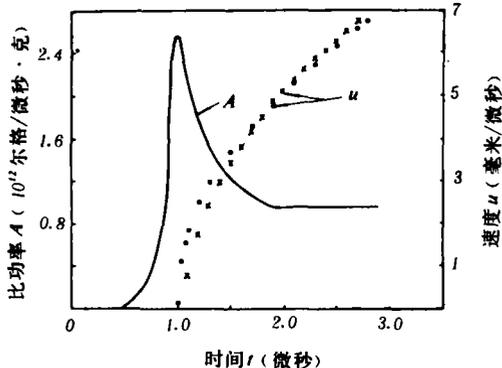


图 6A 实线是实验给出的铝箔比功率与时间的关系。园点是本文计算的飞片速度。×符号是文献〔6〕的数值计算的飞片速度

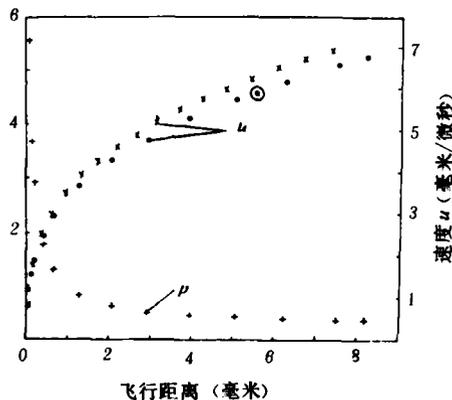


图 6B 园点是本文计算的飞片速度。×符号是文献〔6〕的数值计算的飞片速度。⊙符号是实验测量的飞片速度。+符号是本文计算的箔气体产物中的压力

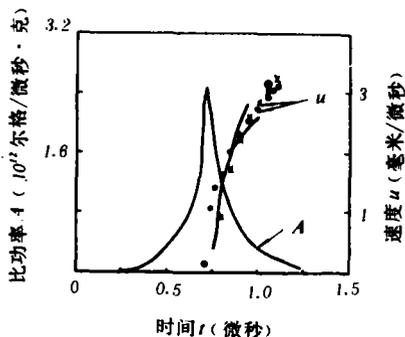


图 7A 实线是实验给出的铝箔比功率和飞片速度与时间的关系。园点是本文计算的飞片速度。×符号是文献〔6〕的数值计算的飞片速度。⊙符号是用梯级闪光测得的飞片速度的数据

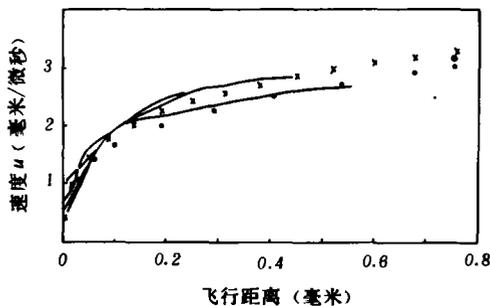


图 7B 实线是实验测量的飞片速度与飞行距离的关系。⊙符号是用梯级闪光测得的飞片速度的数据。×符号是文献〔6〕的数值计算的飞片速度。园点是本文计算的飞片速度

从这些图和表中可以看出, 要使电爆炸箔驱动飞片在一定距离上获得较大的速度, 必须匹配好如下几个参数。

(1) 在固定峰值比功率条件下要求 t_1 到 t_0 之间的时间要短。这意味着平均气化波速度 D , 就大, 从而加强爆炸波 D 的强度, 使得爆压 p_1 增大, 金属炸药释放的能量就多, 提高了电能的利用率。

(2) 金属箔爆炸以后比功率曲线 $A(t)$ 不能下降太快, 应该像图5A中的镁爆炸箔那样缓慢下降, 或者稳定在某个高度上, 如图6A中的铝爆炸箔那样。这样可提高电源传给汽化产物的能量。

(3) 从公式(4.7)和(4.9)来看, 需要选择峰值功率高, 金属箔厚和宽度小以及原子序数大的良导电金属。

六、应 用

电爆炸金属加速飞片的技术, 可以直接用来引爆猛炸药, 见图8。可以看到, 只要Mylar飞片速度达到 $7\text{mm}/\mu\text{s}$ 就能充分地引爆猛炸药。而这个飞片速度在电炮装置中是可以达到的。

该技术, 可以用来研究材料状态方程, 如图9。可看到, Mylar飞片速度达到 $18\text{mm}/\mu\text{s}$ 时使铝材料获得225万大气压的高压点。

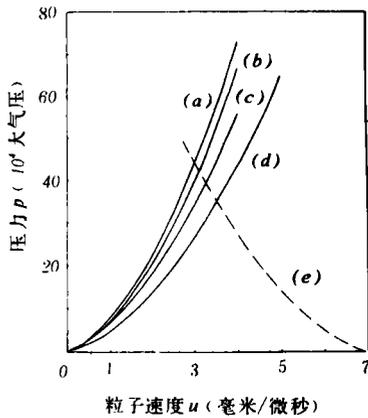


图8 Mylar飞片冲击引爆猛炸药
 (a) PBX-9404^[10]
 (b) Composition^[9]
 (c) TNT^[8]
 (d) Mylar^[12]
 (e) Mylar的对称线

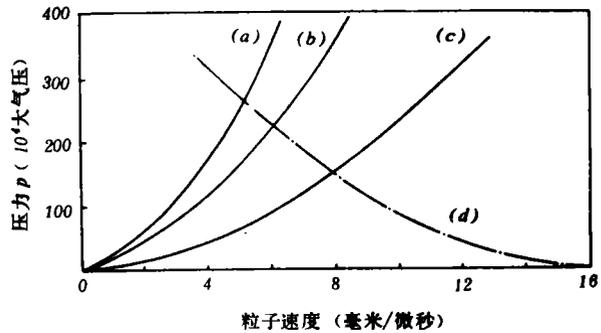


图9 材料的P—u曲线。
 (a) UD;
 (b) Al^[11]
 (c) Mylar^[12]
 (d) Mylar的对称线

顺便指出, 电爆炸金属箔加速飞片技术或电爆炸金属箔直接在材料表面爆炸, 采用本文理论和弹——塑性理论, 则可研究材料的强度, 确定弹——塑性理论中的一些参数。

必须说明, 本文计算压力 p 和粒子速度 u 曲线所用到的物质参数 C 和 ρ 均取自文献(8—12)

七、讨 论

因为从 t_0 到 t_b 之间的时间较短,要求实验测量的比功率曲线精度较高,否则对汽化波速度 D 的计算要带来较大的误差,造成预估的飞片速度偏离实际的飞片速度也较大。

本文中的计算方法与李冈同志进行过有益的讨论,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Bennett, F. D. et al., *Exploding Wires*, 3 (1964), 80, Edited by Chace, W. G. and Moore, H. K. New York.
- [2] Bennett, F. D., *Phys. Fluids*, 8 (1965), 1425.
- [3] Krokhin, O. N., *Proceedings of the International School of Physics « Enrico Fermi » Course*, 40 (1971), 278. Edited by Caldirola, A. and Knoepfel, H.; Acad. Press, New York and London.
- [4] Fauquignon, C.; Floux, F.; *Phys. Fluids*, 13 (1970), 386.
- [5] Tucker, T. J. et al., *SAND-75-0244*.
- [6] Schmidt, S. C. et al., *LA-6809* (1977).
- [7] Stunton, P. L. *SAND-75-0221*.
- [8] Ильхин, В. С., Пахил, П. Ф., Розанов, О. К., *Докл АН СССР*, 131 (4—6) (1960).
- [9] Mader, C. L. et al., *LA-6259* (1976).
- [10] Mader, C. L. *LA-4475* (1970).
- [11] 杨中正, 常用化爆压力装置系列, 私人通信.
- [12] Weingart, R. C.; Lee, R. S. et al., *UCRL-77610* (1976).

THEORY AND APPLICATIONS OF METALLIC EXPLOSION BY IMPULSIVE CURRENT

Zou Yongqing

Abstract

A vaporization-explosion model has been developed for the metallic explosion heated by intense impulsive current. Applying this model, the author analyses the wave series and the motion of a Mylar foil driven by a bursting metal-foil. Velocities of flyers driven by bursting foils of Cu, Al and Mg have been calculated on the basis of this theory. Results are in accordance with some experimental data published previously. Additionally, the applications of electrical gun in high pressure physics are also given.