第6卷 第2期
1986年4月

爆 炸 与 冲 击
EXPLOSION AND SHOCK WAVES

Vol. 6, No. 2
Apr., 1986

讲 座

电爆炸导体及其应用

王 莹

(1985年12月10日收到)

一、爆炸的物理现象概述

所谓电爆炸导体（丝或箔），就是以电流形式快速向导体输入能量，使其迅速地发生相转变（固体→液体→汽体→等离子体）。电爆炸导体（以下简称电爆炸）的概念，早在1874年就有人提出过[1]。1920年又有人提出用它产生 3000℃以上高温的设想，于是引起科学工作者的关注。1950年以后，电爆炸曾成为当时的“热门”研究课题。1959—1968年曾四次召开“国际爆炸丝现象会议”，交流研究和应用成果，并由 Chace 和Moore 将会议论文汇编成文集[2]，在这期间，Bennett 也发表了较详细的研究报告[3]。70年代，苏联人结合新的应用也发表了许多研究成果[4-16]。最近几年，由于大脉冲功率技术和等离子体物理等领域的需求，特别是电磁轨道炮和用聚爆产生X激光研究的需要，电爆炸的研究工作越加活跃起来[11,12,18,25]。

从本质上讲，电爆炸技术是大脉冲功率技术的一种，它的工作原理很简单。如图 1 所示，电源部可以是 Marx 发生器、单极发电机、炸药激励的磁通压缩发生器，或其他直流和脉冲电源；但为了方便和经济起见，通常多用电容器组 C，其上充以电压 U_0。当闭合开关 S 时，电源通过回路的固有电感 L_0 和导体 W 放电（忽略回路电阻）。导体被电流焦耳加热，一般在几微秒内完成固→液→汽→等离子体态的相转变，并伴有光、冲击波、导体电阻骤增和电磁辐射等物理现象。

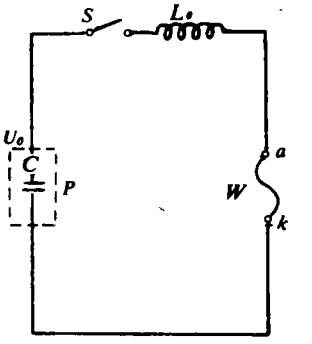

图 1 电爆炸导体用的典型电路

根据输入到导体能量的多寡，可把导体爆炸分为两类：提供的能量大于或等于导体汽化所需的能量时，称为快爆炸；否则为慢爆炸。对于快爆炸，电流密度一般应大于 $10^7 A/cm^2$，功率一般大于 $10^8 W$。由于慢爆炸不能完全地实现四态相变，用途较少，本文仅讨论快爆炸情况。

在接通电流之后，导体很快被加热到熔点，转变为液体，但由于惯性和磁力作用，它仍保持着一定的形体。之后，过热的液态金属更快达到沸点，热能使原子激发，克服材料的化学键和内力，开始汽化，此刻为图 2C 的 t_0；而 t_0 值的大小，视电路特征时间 $(L_0C)^{1/2}$ 而异，一般在几微秒至几十微秒范围内。由于集肤效应，汽化波首先从导体表面开始向中心运动（汽化波速度视材料而异，一般为 200—500 m/s），汽化的金属蒸汽具有高压力、高密度，以致在电场作用下的电子不能获得充足能量进行碰撞电离，几乎是不导电的。由于汽化波的向内运动，导体的导电面积不断缩小，其电阻近似地反比于截面半径的平方而增加；当汽化波接近导体中心（即全部被汽化）时，导体电阻陡然增加，电流突然下降（图 2 中 t_{s0}）。在汽化开始之后，金属蒸汽同时还不断向外膨胀，并向周围空气推出冲击波。膨胀又使蒸汽内部压力降低、密度减小，到一定程度时，由于电子碰撞电离将使膨

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

胀开来的蒸汽通道再次放电，并形成等离子体。由于等离子体内带电粒子的复杂作用，将辐射出宽频谱（$10-10^{-10}mm$ 波长）的电磁波，包括可见光和X射线。

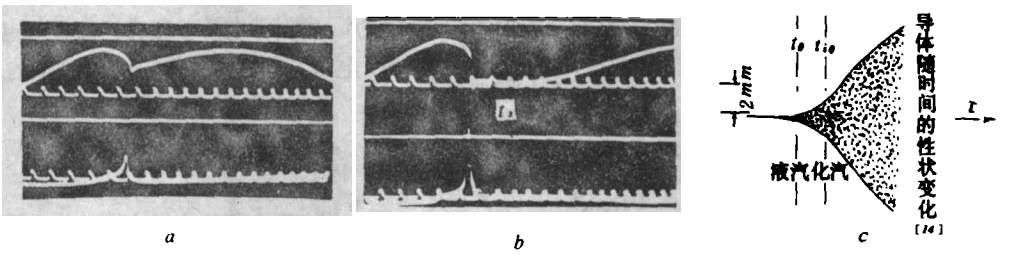

图 2　爆炸导体的典型电流、电压与爆炸过程的时间示意对应。　　（a、b 中，上为电流，下为电压）

在导体电阻快速增加期间（t_0-t_{s0}），导体上势必感生一脉冲高压 $L_0(dI/dt)$（I 为变化电流），它的峰值要比电容器电压 U_0 大数倍。这样一来，将会出现下面三种情况之一

（1）无暂停时间。当电极 $a-k$ 间隙较短时，电压击穿导体周围的介质以形成电弧，电流将沿低阻抗的外围介质分路放电，形成发光强烈的电弧路径。此电弧是一个包围导体的中空圆柱。此时所观察到的辐射是导体周围介质的发光辐射。导体继续膨胀，电弧也随之外扩并在强度上减弱；如果电路中有足够的剩余能量，将在弥散开来的金属蒸汽空心圆柱内形成另一电弧；几乎同时膨胀开的金属蒸汽也开始传导电流，彻底形成等离子体。图 2a 表明了此种情况下导体的电流和电压随时间的变化过程。沿周围介质电弧放电之后，电流将按 $R-L_0-C$ 电路阻尼振荡放电。

（2）有暂停时间。$a-K$ 间隙较长，感生高压不能沿导体表面造成击穿放电。因为没有电弧，此刻的爆炸不甚明亮，并且因电阻陡增而出现电流暂停（图 2b）、其暂停时间 t_s 与导体长度 l 有关。在暂停期间，导体蒸汽内部还保持着一定的压力和密度，此时几乎没有电流通过。当持续若干微秒后，在蒸汽向外膨胀到一定程度时，电源剩余电压将使蒸汽柱内部形成电弧，继之电流也通过全部蒸汽柱，形成等离子体，而出现明亮的爆炸现象，其电流和电压曲线示于图2b。此时电流将按 $R-L_0-C$ 电路阻尼振荡而衰减完毕。

（3）准匹配状态。如果精心选择导体，使其阻抗与电路阻抗匹配，则电弧分路放电和“暂停”均可避免。此时储存的磁场能量，将全部用于爆炸导体的电阻性负载上，电路不会出现振荡情况。

从上述三种情况可见，最好的电爆炸是匹配情况。然而在用电爆导体做断路开关时，却希望出现“暂停”。除导体长度影响暂停时间外，导体材料的自身性质也有一定影响，铝的“暂停”最短，其次是铂、镍，而银最长。不同材料汽化比能不同，电阻率增长也不同，其他性能也不同。但有趣的是，总横截面相同的同种材料，几何形状不同时电阻增长速率差别较大，多根圆柱并联增长最快，其次是单根圆柱导体，再次是矩形截面导体[4]。

如上所述，为能在导体内沉积较大能量，导体爆炸过程的平均电阻 $\overline{R}$ 应与电路参量满足近似的匹配关系[3]

$$1.1\leqslant\overline{R}(C/L_0)^{1/2}\leqslant 1.24 \qquad (1)$$

为了有效地利用能量和电感储能最大，要求导体在电路准衰减振荡的 1/4 周期附近爆炸，此时导体的横截面积为[13]

$$S_c\approx 1.5\times 10^{-3}(CU_0^2/Z_0)^{1/2} \qquad (2)$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中，$Z_0=(L_0/C)^{1/2}$—电路特性阻抗。

导体爆炸时呈现出一个明显的非线性电阻，它对电流脉冲有重要影响，而电路中的电流脉冲又在很大程度上决定了导体爆炸过程，这表明了导体和电路的相互影响（它们必将也影响与爆炸有关的其他物理量）。因此分析电爆炸特性时，必然要把导体的几何形状、材料、电参量和其他参量与电路参量联系起来考虑。这也是为什么人们总把导体电参量（电流、电压、电阻率）作为重点分析的原因。

二、导体电爆炸特性分析

一般认为，可以把导体爆炸分成两种基本机理[12]：与焦耳热有关的热机理和为磁流体动力学不稳定性发展所决定的“力学”机理。在输入能量速率足够高（铜材料为 $10^{12}-10^{13}W/kg$）时，研究爆炸导体机理问题可归结为用高密度电流绝热加热导体的动力学问题，此时，爆炸时刻被一临界温度 T_c 所决定（T_c时电导率消失）。描述电爆炸导体被绝热加热的动力学方程组通常包括放电 $R-L_0-C$ 回路方程和热平衡方程[12]

$$\left.\begin{aligned} &L_0\frac{d^2I}{dt^2}+\frac{d}{dt}(IR)+\frac{1}{C}I=0\\ &c_vm\frac{dT}{dt}=I^2R\\ &R=R_0(1-T/Tc)^{-n}\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

式中：c_v、m 一导体的热容量和质量；T 一温度；$n=aT_c$ 一临界指数，a 是常态电阻的温度系数；R 一导体爆炸过程中的非线性电阻。在方程（3）中忽略了由于集肤效应引起的电阻变化。为了求解方程（3），做了下列参量变换，$i=I/I_m$，$I_m=U_0C\omega$，$\omega=(L_0C)^{-1/2}$ $R_r=R/R_0$，$\theta=T/T_c$；其中 R_0 为导体常态电阻。这样，方程（3）可改写成对 $\tau=\omega t$ 微分的新方程组，再加上 $\tau=0$、$\theta(0)=\theta_0$ 的初始条件，解得相对电阻随相对电流的变化关系式为

$$R_r=U^{-\frac{n}{n+1}} \qquad (4)$$

式中：$U=(1+\theta_0)^{n+1}-a\int_0^\tau i^2d\tau$；$\theta_0=T_0/T_c$；$a=I_m^2R(n+1)/(C_vmT_c\omega)$。在许多文献[4,8,11等]中都把 $\int_0^\tau i^2d\tau$ 称作“作用积分”，借助它可描述导体的某些性状。电容器储能 $W_0=\frac{1}{2}CU_0^2$，导体升华能量 $W_s=C_vmT_c$，当用 $\Pi_1=RC\omega$ 表示爆炸特性的相似判据时，则有相似判据的组合

$$a=2(n+1)\frac{W_0}{W_s}\Pi_1 \qquad (5)$$

公式（4）是用平均热容量获得的。从中可见，电阻变化强烈地依赖于常数 a。由于 $\int_0^\tau i^2d\tau<1$，当 $a<1$ 时，公式（4）第二项小于 1，此时不能反映所提模型的爆炸特性，即只能产生慢爆炸；以 $a=1$ 的假设条件，可从公式（5）得到能保障快爆炸的电源储能阈值

$$W_{on}=W_s/[2(n+1)\Pi_1] \qquad (6)$$

这说明对于 $W_0>W_{on}$ 的系统，方程（3）所描述的加热的动力学最后阶段能导致快爆炸；而对于

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$W_0 < W_s$，导体只能慢爆炸。

从输入能量到汽化的时间及汽化开始时刻的电流分别为

$$t_{n0} = \left(\frac{3}{2(n+1)\Pi_2}\right)^{1/3} \tag{7}$$

$$I_{n0} = \left(\frac{3I_m^3}{2(n+1)\Pi_2}\right)^{1/3} \tag{8}$$

式中，$\Pi_2 = \Pi_1(W_0/W_s)$。由式（7）和（8）能确定回路参数和 n 值，例如，导体在放电的 1/4 周期内爆炸时，Π_2 最大值是 0.9，此时 $I/I_m \approx 0.95$，$n = 10$。

Котов 给出输入到导体的能量公式[7]

$$W = \beta_1(10^{-6}\varepsilon)^{-0.5}W_0 \tag{9}$$

式中，$\varepsilon = CU_0^2/N^2d^4Z_0^2$，$N$、$d$ —圆导体根数及直径。

对铜导体上的电压幅值 U_u 可近似地表示[7,8]为

$$U_u = 0.45(10^{-6}\varepsilon)^{-0.2}\exp[-0.012(\varepsilon\cdot 10^{-6})^{-0.4}\cdot v] \tag{10}$$

对应 U_u 的导体电流[8]

$$I_u = 0.75U_0(\varepsilon\cdot 10^{-6})^{-0.3}/Z_0 \tag{11}$$

Котов 等认为能通过导体的最大电流[7]

$$I_M = 0.43U_0(\varepsilon\cdot 10^{-6})^{-0.25}/Z_0 \tag{12}$$

汽化开始时的电阻，由 Азаркевич 给出[7]

$$R_{n0} = (4/\pi)\rho_{n0}Z_0\lambda \tag{13}$$

式中 ρ_{n0} —汽化波开始运动时刻的电阻率，对于铜 $\rho_{n0} = 4.5\times 10^{-4}\Omega\cdot mm$。汽化波以速度 V 经过导体半径的特征时间 $\tau = d/2V$，则汽化阶段电阻[9,14]

$$R_n(t) = R_{n0}/(1-S)^2 \tag{14}$$

式中 $S = (t-t_0)/\tau$，$\varphi = \tau/\tau_0$。当导体在电路第一准峰值电流附近爆炸时，$\tau_0 \approx L_0/R_{n0}$；若 $L_0 \approx 0$ 或远离第一准峰值爆炸，$\tau_0 \approx R_{n0}C$。解两种简化情况下电路微分方程，可得汽化阶段电流

$$i_n = I_{n0}\exp[-\varphi S/(1-S)] \tag{15}$$

由式（14）和（15），可得汽化阶段导体的电压

$$U_n = I_{n0}R_{n0}(1-S)^{-2}\exp[-\varphi S/(1-S)] \tag{16}$$

显然汽化阶段功率 $P_n = i_nU_n$。对 U_n 和 P_n 表达式微分求极值，在 $\varphi = 2$ 时有极大值，$\varphi = 1$ 时有极小值。根据以上的基本计算，可定性地说明各种脉冲形状，例如电流衰减 e 倍的时间小于汽化波通过半径的时间（即 $\varphi > 2$），电流和电压的衰减曲线为无峰的指数波形状；反之，$\varphi < 1$ 且汽化波比较快时，电流衰减在开始期间是平坦的，随汽化接近中心则很快地变陡，而峰值电压随 φ 的减小快速增加。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

三、电爆炸导体的应用

电爆炸的实质，就是把电能快速地集中在少量的导电物质中（可达 10^4—$10^6 J/g$）[3,14]，并在很短的时间内转化为冲击波、热和电磁能辐射，并有一电阻迅增的期间。所有这些物理现象已经和正在被广泛地应用着

1. 用作脉冲强光源

电爆炸时，沉积在导体中电能之一部分以可见光形式辐射出来，其光强可达 $10^8 cd$。它可作为自身不发光高速运动物体高速摄影时的单次照明光源[16]。在文献〔2〕中，Jäger 等提出用它作为定量光谱学的光源，并获得了许多有用数据；Ya'akobi 爆炸锂丝产生高温高密度等离子体，用以研究它的光谱；Marcus 用它作光源，研究光化反应的开始。此外，还可用它在试验室标定有关光学仪器或模拟某些光辐射效应。

2. 用作脉冲X射线源

用适中程度的电流使导体在真空室内爆炸，电离出自由电子，它们在 $a-k$ 极间被电场加速获得动能，碰撞慢速离子，产生轫致辐射[17]。此外，在等离子体中的自由—束缚过程，将产生轫致谱的复合辐射；束缚—束缚过程将产生线谱辐射。X射线能量在 10—$10^3 eV$ 之间[2,3]。文献〔2〕中的 Stenerhg 等则用爆炸钨丝产生的X射线对铜丝进行闪光X射线摄影，并测出X射线半宽度为 $20 ns$；Vitkovitsky、Händel 等分别用爆炸金丝获得 5—23 keV 的X射线。近年来，美国核武器局建成了名为“OWL Ⅱ”的X射线源模拟器，它是用 4—6 MV 的 Marx 发生器爆炸真空容器内的金属丝以获得低能X射线的。最近，Вавилов [17] 也强调了用电爆炸产生X射线的技术。除辐射摄影外，它们也被用于核物理和其他有关领域的研究中。

3. 用作脉冲高温源

产生的等离子体温度可达几十电子伏或更高，相当于 10^5—$10^6 K$ 的高温[2,3,14]，远高于化学反应和空气电弧放电的温度。可以用它模拟核爆炸的等温球。在金属与非金属无机物化合时，有的产物（如无水 MgI_2）用一般方法不易获得，但是若用电爆炸技术，则能获得较高产额的镁、铝等金属的碘化、硫化、碳化合成物。Joncich 等[2]把镁条放在熔化的碘或硫中涂复一层外壳，然后在抽空的容器内爆炸，获得产额 56.4 % 的 MgI_2，产额 60.6 % 的 MgS，他还指出电爆炸合成技术在无机、有机和生物化学方面的应用前景。Spangler[2] 在氢中爆炸碳丝，生成甲烷，乙炔以及氘、氢混合物。

4. 用作动态高压源

电爆炸的另一个用途是产生动态高压，这时导体可能将沉积能量的 50 % 转换成冲击波。

a 在大气中爆炸。用高速摄影机摄取击波照片从而得到不同 R_s 时的 $\dot{R}_s$，根据文献[2]可计算得到不同位置上的波阵面压力，其值可达 10^7—$10^8 Pa$。这种冲击波源，用于试验室模拟的实验中显然要比化爆简单、安全和经济。

b 束缚爆炸。在导体周围用某些物体或容器加以限制，以便造成各向或单向加载的条件，例如，可以在单向开通的管道内加速抛体。若爆炸的高温高密度汽态产物质量为 M_1，被推单向运动的抛射体质量为 M，工作汽体中的声速为 V_1 时，Linhart[14] 给出的抛射体最大速度为

$$V_m \approx V_1 \left(\frac{M_1}{M + fM_1}\right)^{1/2} \tag{17}$$

式中：$V_1 = (fKT/m)^{1/2}$，m 一气体分子（原子或离子）的质量，f 一依赖于分子自由度的数，K 一波尔兹曼常数。由此可见，提高工作温度T能使抛射体获得更高速度。

这方面的一个典型应用是电炮（一种用爆炸箔片产物沿“炮管”单向加速薄膜飞片打靶的装

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

置)[14]。它是获得动态超高压很有前途的方法之一，目前电炮已能将厚 12.7 mm 的飞片加速到 16 Km/S，击靶时可产生 2×10^{12} Pa 的冲击压力，并有达到 5×10^{12} Pa 的潜力。电炮为研究材料状态方程和TATB、HNS之类纯感炸药冲击起爆提供了比较有效的方法。

其次，在文献〔2〕中 Bohn 等用一种叫做“爆炸丝丸”的类似装置，将 1 mm 直径的钢球加速到 3.3 Km/s，将小玻璃球加速到 7 Km/s。为了加速小粒子进入空间的模拟试验，Rosebrock 等建成了一个称为“轨道型等离子体加速器”，把推进剂（箔片）置于转轮上旋转，从而实现连续加速；O′keefe 等用低原子序数的金属（如锂）做成小圆柱体，然后用绝热壁将其包围，在端部连接的那个抽空“炮管”中等离子流达 20 Km/s，它可将玻璃或陶瓷小球加速到宇宙速度。

c　在水中爆炸。建立在水中的压力环境，以研究冲击波在水中传播的性质和进行水声测位。水中电爆炸的冲击波压力峰值为

$$P_{WM} \approx P_0 (2a_i)^{0.6} G^{0.55} / (2D_i)^{1.15} \qquad (18)$$

式中：P_0 一等离子体壁压力，a_i 一初始等离子体半径，G 一接导体的电极间隙长度，D_i 一导体与探测器间的垂直距离。Kersavag[2]用 300 KJ 电容器在水中爆炸 7.6 cm 长、直径 0.025 mm 的铝硅合金丝，在 91cm 处测得峰值压力为 3447 Pa，脉宽为 400 μs，并发现在第一水泡脉冲期间，从泡中辐射出明亮的闪光（为氢、氧再化合所致）。同时也可观测水下爆炸产生的水墩浪花和羽毛状烟柱的形成过程，以及圆柱形蒸汽泡膨胀—收缩—再膨胀的反复变化。采用电爆炸模拟法比化爆模拟法优越，它产生的蒸汽泡透明，可照相，爆炸速度可用参量控制。然而在设计和试验时，应遵循 Buntzen[2] 给出的模拟比例关系

$$B_r = \psi B_a \qquad H_r = \psi H_a \qquad (19)$$

式中：B 一汽泡半径；H 一爆炸深度；下标 r、a 分别表示“真空与模拟”；ψ 一比例因子，一般可取 $\psi = 4.5 \times 10^{11}$。

5. 爆炸效应的综合利用

a　模拟地下爆炸。用电爆炸对地下爆炸空腔的物理化学环境模拟，可以获得令人满意的结果。文献〔20〕报导了把铜丝及包围它的岩石介质装入一个莫雷型爆室内密封起来，用 50 KJ 的电容器组爆炸铜丝，发现丝周围岩石被汽化和熔化，形成类似地下爆炸空腔的物理化学环境和大约 0.5 mm 厚 1 g 重的冷凝玻璃体，据此可以有效地判定爆炸当量。

b　模拟高空核爆炸。为模拟不同高度核爆炸的力学、光学、烟云乃至辐射效应，可采用爆炸模拟器，将其内部抽空到不同压强进行电爆炸，以模拟不同高度的核爆炸。

c　爆炸丝起爆器。弹药在电磁环境（静电、雷电和大功率射频）中常出现意外爆炸事故，85 年 1 月美国在西德卸运“潘兴”Ⅱ导弹时，被不可名状的静电感应引起爆炸。弹药不安全多因灼热桥丝电雷管对电磁环境敏感所致。为抗电磁环境，可采用不装起爆药而用爆炸导体直接起爆猛炸药的装置—爆炸线雷管；它和用爆炸线直接点燃烟火剂的爆炸线爆管统称爆炸丝起爆器。这两种电火工品有很强的抗杂散电流的能力，特别适合于火箭和有关空间运载系统发射。

d　研究汽化波的转变。用电爆炸方法研究被脉冲加热的流体从液态变为汽体的动态过程，即汽化波转变，是有效的。Bonnett[14]测得 Au、Ag、Cu、Al、Pb、和 Hg 六种金属爆炸时的汽化波速，证实了用他假设的热力学模型分析汽化波转变是可行的。

6. 产生等离子体聚爆

a　产生等离子体。用电爆炸产生的高温高密度等离子体是一个简便的等离子体试验源，其稠密的等离子体心子能很好地稳定等离子体，防止来自电磁的过早弹射排斥和不稳定性的发展，此外

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

它还能延迟等离子体形成最大电流，有利于提高效率。Ross等[12]用 3.8 kJ 电容器组在真空中爆炸 0.045 mm 的金丝，获得 $2.2\times10^{6}K$ 高温、$10^{-8}g\cdot cm^{-1}$ 密度和 $2.5\times10^{6}cm/s$ 速度的等离子体，其外表面磁压力约为 $10^{6}Pa$。

b 等离子体弧电枢。70年代电磁轨道炮技术的一项重大突破，就是用等离子体弧电枢代替传统的固体滑块电枢。它是利用置于两导轨间的一金属箔片，借助加速电流把它爆炸成等离子体，形成电通路，由此产生的洛伦兹力可以驱动它前面的弹丸。等离子体与轨道是“软”接触，克服了传统滑块电枢与导轨摩擦的缺点，从而可提高弹丸速度。

c 聚爆等离子体。爆炸产生等离子体，继续流过的电流或等离子体形成后，外加的电流均沿轴（Z）向流过，它们及其磁场的作用力（$\vec{J}\times\vec{B}$）把等离子体径向压缩，这便是聚爆或 Z 箍缩（Z -*pinch*）等离子体技术。聚爆所用的电流一般在兆安级。*Bartels*等[21]先用一组辅助电容器爆炸金属丝预形成一个等离子体，然后再用 200 kJ 的主电容器对等离子体放电，因而他获得了高初始密度的Z箍缩，并拍摄到了高速摄影的照片。近年来的聚爆负载，多半是金属丝阵列或薄壁箔圆筒，其目的是为产生更多的软X射线，以进行聚变、材料研究和核武器效应的模拟。最近，还有用聚爆等离子体方法以实现粒子数反转，从而进行X光激光的研究的报导[22]。洛斯阿拉莫斯国家试验室(L A N L）和空军武器试验室（A F W L）都用这种方法做了许多工作，后者建成了当今世界上最大的电容器组聚爆装置（储能9.5 MJ、电流 90MA）[23]。顺便指出，通过对聚爆产生的X射线的测量，可诊断等离子体本身的性状。Workman等[24]指出：被箍缩的等离子体高温心区的密度为 10^{19}—10^{20} 离子/cm^{3}，对于原子序数 $Z<40$ 的材料，辐射X射线的峰值总功率

$$K_L^M \simeq 10^{-27} Z^{5/4} N_i^2 \qquad (20)$$

式中 N_i 为离子密度。在（20）式表示的总产额中 K-壳层共振线产额占70%左右。

d 聚集电磁能。在薄金属箔壳筒内的空间中预先建立一强磁场，然后用电流聚爆壳筒，由于磁通的“冻结”效应，聚爆箔筒在向内收缩时也把磁通高度地压缩，其结果是动能转化为高密度的磁能。Knoepfel[14]给出了理论分析和计算方法。

7. 充任大功率脉冲电源的断路开关

近20年来人们很注意电感储能的应用，因为它的储能密度是电容的 10^{2}—10^{3} 倍。然而使用电感储能实现大功率的关键，是要有一个大容量的断路开关转换电流，以便把脉冲时间“压缩”短。由于电爆炸导体具有很大容量（截流 30—300 MA、承压 0.3—3 MV）[25]，且电阻增加迅速、动作时间快、简单经济，近几年来已引起了人们的高度重视，正在把它作为断路开关应用于等离子体物理、核聚变、大功率粒子束和电磁轨道炮的电感储能装置中。这类装置的典型原理表示在图 3。图中电感 L 系回路固有电感与外加电感之和，选择最佳导体参数使其在准振荡电流第一峰值附近爆炸，感应电压击穿锐化开关 S_1，把能量传给负载。

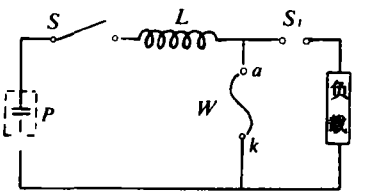

图 3 具有爆炸导体断路开关的典型电路

这种开关装置可用于：（*a*）电磁轨道炮[26]；（*b*）大功率毫微秒脉冲电源，以产生强脉冲粒子束或X射线[13]；（*c*）聚爆等离子体[11,23]（*d*）等离子体聚焦（DPF）[27,28]，以产生X射线或中子；（*e*）θ 箍缩（θ —*pinch*）[29]；（*f*）电磁脉冲发生器[30]；（*g*）修正 Marx 发生器的高电压输出波形[10,31]；（*h*）推进导电的物体[32]。

8. 电爆炸导体的其他应用

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电爆炸导体辐射出的某些波段的电磁波，可以作为电磁辐射源，我们曾在距导体 1—2 米处测得爆炸产生的高频（1—2 MHz）场强为 7000—5000 V/m。此外，有人用大电流爆炸含氘、锂的导体产生中子，以用于人工热核聚变研究；也有人提出在水中爆炸以进行海底探矿；爆炸贵重金属线以进行工业上的贵重金属喷涂。MeFarlane 用它保护大容量的高压电容器组[2]；这种"爆炸式开关"被用于电力系统作为限流装置中的保护元件[33]以及对电子设备进行高压保护[34]。还可用它防止 Marx 发生器重复放电[22]，有效地利用能量等等。

四、结　语

电爆炸导体的研究和应用一直在进行着，由于近年来新技术的需求，再次唤起人们的兴趣。无疑，随着对它研究的深入，它的潜力一定能在更广泛的领域中充分发挥其作用。

限于篇幅，本文没能讨论在人工介质环境和低温处理条件[18-23]下的爆炸特性，其他有关方面也未能涉及。

图 2 中的 a 和 b 是笔者与孙盘甫、赵子元、徐贵林、高敏同志一起试验获得的。

参 考 文 献

1　史山群，《国外火工品》，国防工业出版社）(1979)，150.

2　Chace, W. G., Moore, H.K., edit, Exploding wires, Vol. 1, 2, 3, 4, (1959, 1962, 1964, 1968, respectively), Plenum Press, New York.

3　Bennett, F. D., *AD-807768* (1966), 125.

〔4〕Месяц, Г. А., Генерирование Мощных Наносекундных Импульсов.《Советское Ратео》(1974), 141.

〔5〕Котов, ю. А., идр., Мощные Наносекундные Импульсные Источныки Ускоренных Электронов, Под ред. Г. А. Месяца,《Наука》(1974), 89.

〔6〕Ковальчук, Б. М., идр., Силъноточные Наносекундные Коммутаторы,《Наука》(1979), 151.

〔7〕Месяц, Г. А., Редак., РазраБотка и Применение Источников Интенсивных Электронных ПучкоВ,《Наука》(1976), 56.

〔8〕Седой, В.С., *ЖТФ*, **46**(8)(1976), 1078.

〔9〕Кривицкий, Е.В., Литвиненко　. В. П., *ЖТФ*, **46**(10)(1976), 2081.

〔10〕Азаркевич, Е. И., идр., *ПТЭ*, **1**(1979), 101.

〔11〕Lindemuth, I.R., et al., *J. Appl. phys.*, **57**(9)(1985), 4447.

〔12〕Кривицкий, Е. В., Хайнацкий, С. А., Техническая Злектродинамика, **4**(1982), 22.

〔13〕王莹，《电工电能新技术》，1（1985），21.

〔14〕E·特勒等著，徐锡申等译，《高能密度物理学》，原子能出版社（1982）.92.103.136.

〔15〕Мартынюк, М. М., *ЖТФ*, **44**(6)(1974), 1262.

〔16〕Stenerhag, B., et al., *J. Appl. Phys.*, **42**(5)(1971), 1876.

〔17〕Вавилов, С. П., Кн. Импульсная Рентгеновская техника, М. Знерггия(1981), 10.

〔18〕Bueck, J.C., et al., *IEEE Inter. Pulsed Power Conf.(4th: 1983, Aibu, N.Mex.)*, 122.

〔19〕经福谦，《爆炸与冲击》，**4**(4)(1984), 24.

〔20〕铁志杰等，《试验与研究》，**4**(1983), 354.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

〔21〕杨震华，《高功率粒子束学术交流会文集》（二），中国粒子加速器学会，(1985)．
〔22〕Сафронов, В. Н., *SU-851747*, *C. 3*, *Заявлено* 22.1. 79, *Опулнковано* 30. 7. 81．
〔23〕Reinovisky, R.E., et al., *IEEE Inter. pulsed power conf. (4 th: 1983, Albu., N. Mex)*, 196.
〔24〕Workman, J. B., Prettie, C. W., *AD-A 131178* (1982), 8.
〔25〕Mcclenahan, C. R. R., et al., *AFWL-TR-78130* (1983), 5.
〔26〕Jamison, K. A., Burden, H. S., *AD-A 131153* (1983), 17.
〔27〕上野，他：电气学会论文志 B，102 (1983，昭和58)，116.
〔28〕田口，他：电气学会论文志 B，103 (1983，昭和 58)，116.
〔29〕Crawford, J. C., et al., *J. Appl. Phys.*, **39** (11) (1968), 5224.
〔30〕Soo Hoo K. M., *AD-751907* (1972), 25.
〔31〕Азаркевич, Е. И., идр., *ПТЭ*, **6** (1982), 79.
〔32〕Чемерис, В. Т., идр., *Электричество*, **1** (1985), 53.
〔33〕刘绍峻，《高压电器》，机械工业出版社 (1982)，224．
〔34〕Nilov, O. M., et al., *Instrum. and Exp. Tech.*, **22** (2) Pt Ⅱ (1979), 589.

ELECTRICAL EXPLODING CONDUCTOR AND ITS APPLICATIONS

Wang Ying

编 辑 部 启 事

本刊自1986年第3期开始不再由邮局发行，改由编辑部直接发行。发行办法按本刊第1、2两期刊物内所附订阅单实行。还需要订阅者，请向本编辑部索取。

通信地址：成都市 523 信箱12号爆炸与冲击编辑部
联 系 人：姚 敏

《爆炸与冲击》编辑部启
一九八六年四月

责任编辑：陆 明

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net