

炸药能量利用的某些可能途径

张寿齐 王炳成 谢明恕 董庆东 马淑媛

(1983年12月13日收到)

一、炸药能量利用问题概述

自从有了炸药,武器研制出现了巨大变革,直到1945年出现第一枚原子弹为止,炸药(包括高能与低能炸药)可说是各种先进杀伤武器的唯一能源,不论是用于抛掷工具,还是作为破碎手段。即使是现代化的大规模杀伤武器,如各种核弹,目前也还离不开炸药能量的利用。然而,炸药能量的利用绝不是仅限于军事目的,当然,更不是单纯地只能用于杀伤武器。相反,除了爆发大规模战争时期外,世界各国生产的炸药主要用于民用工程方面。

炸药具有极高潜能,以一种得到广泛应用的高能炸药—TNT为例,用单位质量的爆炸转化热表示的比能高达 10^8 cal/kg (约 $4.2 \times 10^6 \text{ J/kg}$),比通常的优质电容器的比能高万倍左右。炸药爆炸时的极高放能速率使其具有惊人的巨大输出功率。例如,用硝化棉作发射药,用TNT作主炸药的 122 mm 炮用榴弹,发射和碎裂作用时的有效平均功率可分别达 10^5 和 10^7 w 水平。因此,探讨炸药能量利用的各种可能途径,研究提高炸药能量利用率,以充分发挥炸药与爆炸技术的优异作用,无疑是很有意义的。

炸药爆炸后,生成大量高温高压的气态产物,急剧膨胀并作用于周围介质,造成压缩、破碎、驱动、飞散等效果。迄今为止,炸药能量利用方式主要地都是直接利用气态产物的极高压力,以TNT为例,在高密度装药中传播的爆轰波阵面上的压力可达 20 GPa 。而其它常用高能炸药,如RDX, HMX、PETN等都比TNT更高。与炸药直接接触的介质,受爆轰波作用后,将形成强冲击波,冲击波阵面上的压力取决于爆轰波参数和介质本身特性—波阻抗 $\rho_m C_m$ (介质初始密度与声速之积)。如果取弱冲击波近似,对于平面一维情况,入射到介质中的初始冲击波峰值压力可由下式估算:

$$P_m = \frac{2 \rho_m D_m}{\rho_m D_m + \rho_o D} \cdot P_c \quad (1)$$

式中 ρ_o 为装药初速密度, D_m 是介质中的冲击波速度, D 为爆轰波在装药中传播速度,对于 $\rho_o = 1.65 \text{ g/cm}^3$ 的TNT装药, $D = 7.0 \text{ mm}/\mu\text{s}$, P_c 为爆轰波压力(C-J压力),

$$P_c = \frac{\rho_o D^2}{k + 1} \quad (2)$$

k 为爆轰产物的多方指数,作为粗估,对常用固态炸药,可近似地取 $k = 3$ 。

因此,为提高初始入射冲击波峰值压力,应提高 $\rho_m D_m$ 与 P_c 。对于一定介质,为提高 P_c ,则应使用高爆速和低 k 值的炸药。如果能实测 P_m 、 D_m 与 D 值,也可用(1)来确定各种炸药的 P_c 与 k 值

对于大多数实际应用来说,不一定都要求很高的峰值压力,有时更重要的是要求有较长的压力持续时间,这主要取决于装药量和几何特性。

研究、合成有合适爆轰性能(用简化的爆轰理论处理时,控制参量为 ρ_o 、 D 和 k 或 P_c)的炸药

以用作装药原料,是炸药学的任务。下面我们将主要地在同种炸药的假定前提下,来探讨炸药能量利用问题,也就是更多地关心有关爆轰原理设计方面的问题。此外,我们将有意识地对某些尚属开发阶段或者在国内还没有得到足够广泛重视的炸药能量利用途径作一些简介。

二、爆轰驱动

一般金属在爆轰产物的直接作用下,只能产生几十 GP 量级的冲击波压力,而在爆轰驱动的高速飞片撞击下,则可能产生几百 GP 甚至 TP 量级的压力。因此,爆轰驱动高速飞片已成为动高压研究的有用工具之一。当然,探讨爆轰驱动的意义远不祇为此目的。

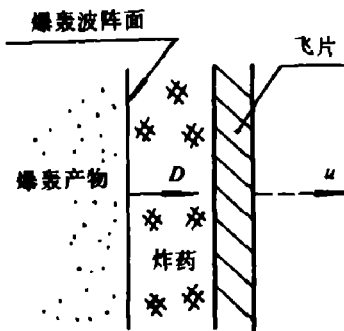


图1 一维平面爆轰驱动

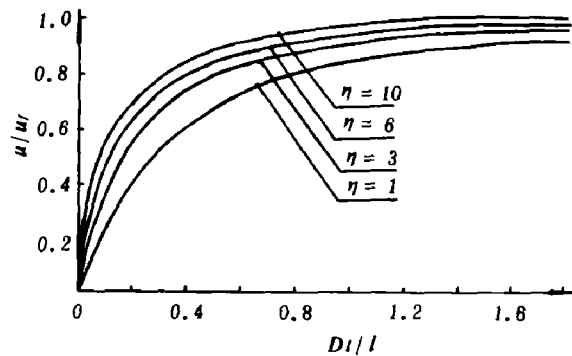


图2 $u/u_f \sim Dt/l$ (以飞片起动为零时)

我们先讨论图1所示的一维平面爆轰驱动的情况。当右端没有飞片时,爆轰装药总质量的 $5/9$ 将携带总能量的 $11/27$ 向左飞散,其余向右飞散。当右端有飞片时,质量和能量的分配情况随 η 值而变。

$$\eta = \frac{M_e}{M_f} \quad (3)$$

式中, η 为质量比, M 为质量,下标 e 和 f 分别表示炸药和飞片。

取 $k=3$, 则飞片速度 u 可用下式表示^[1]:

$$u = D \left[1 + \frac{\theta - 1}{\eta_1 \theta} - \frac{l\theta}{Dt} \right] \quad (4)$$

式中, $\theta = \left[1 + 2\eta_1 \left(1 - \frac{l}{Dt} \right) \right]^{-1/2}$

$$\eta_1 = \frac{16}{27}\eta, \quad l \text{ 为装药长度。}$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,飞片极限速度为^[2]

$$u_f = \frac{Z-1}{Z+1} D \quad (5)$$

式中, $Z = (1 + 2\eta_1)^{1/2}$

u/u_f 值与无量纲时间的关系如图2所示。

炸药能量利用率为

$$F_e = \frac{E_f}{M_e E_e} = \frac{8}{\eta} \left(\frac{Z-1}{Z+1} \right)^2 = \frac{256}{27} \frac{(Z-1)}{(Z+1)^3} \quad (6)$$

式中, E_0 为炸药比能, E_f 为飞片获得能量, 当 $Z = 2$, 即 $\eta = 81/32$ 时, 上式有极大值。

$$F_{max} = \frac{256}{729} \approx 35.1\%$$

F_e 与 η 的关系如图7实线所示。就速度变化而言, 则 η 越大, 飞片加速越明显。

在此基础上, 讨论提高能量利用率和为特定目的进行爆轰设计的例子。

(1) “炮塞”的应用。在图1的左端用质量为 M_s 的“炮塞”限制爆轰产物的向左飞散, 是提高爆轰驱动的飞片速度和炸药能量利用率的简便而有效的方法。图3与图4给出有无“炮塞”, 飞片极限速度与炸药能量利用率的变化情况^[3]。

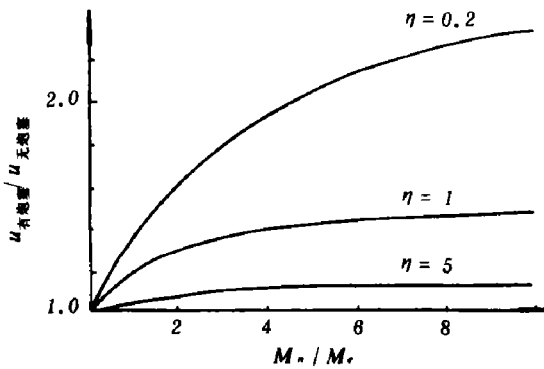


图3 “炮塞”对 u_f 作用

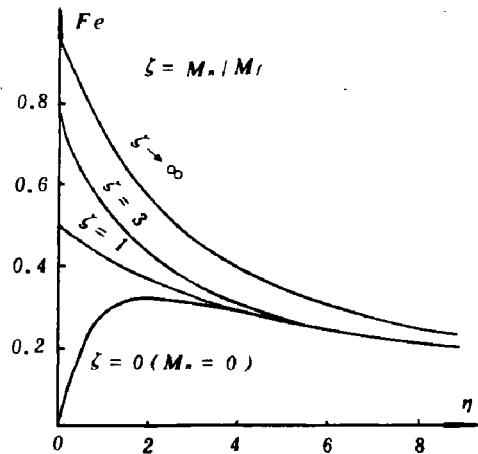


图4 “炮塞”对 F_e 作用

可见, “炮塞”有利于提高 u_f 与 F_e , η 越小, 作用越明显, 当 $\eta > 5$ 时, “炮塞”作用就很小了。

(2) 加“炮塞”并改变起爆面位置。对于图5所示模型, 在不同深度处起爆时, 飞片速度 u 与飞行距离 x 的关系定性如图6所示。这样, 可根据需要, 选取合适的起爆面位置。当然, 飞经一定距离后, 不论起爆面位于何处, 飞片终速趋于一致, 这与 Gurney 理论相符。

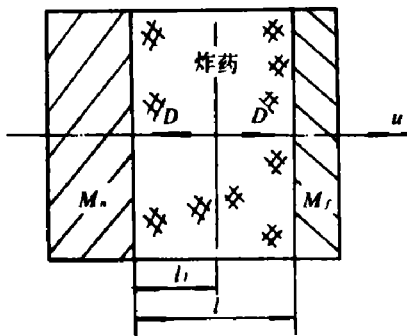


图5 加“炮塞”并改变起爆面位置

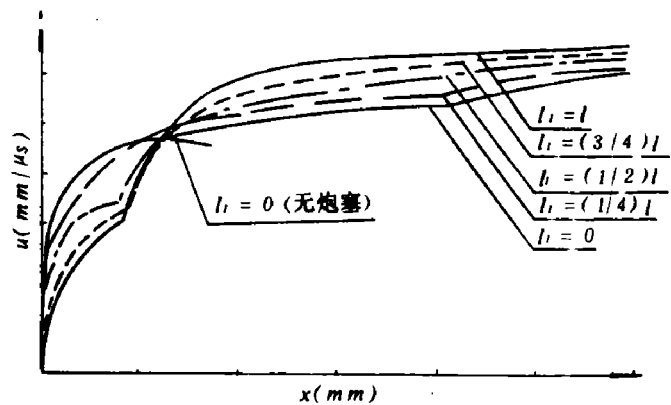


图6 $u \sim x$ (图5模型)

(3) 增加起爆面数量。其极限情况就是整个装药的瞬时爆轰。对于图1模型, 用特征线法计算瞬时爆轰时的飞片极限速度为

$$u_f = D \left\{ \bar{c}_0 + \frac{2}{\eta_2} \left[\frac{1 + \eta_2 \bar{c}_0 - \sqrt{1 + 4\eta_2 \bar{c}_0 + 2\eta_2^2 \bar{c}_0}}{2 + \eta_2 \bar{c}_0} \right] \right\} \quad (7)$$

$$\text{式中, } \bar{c}_0 = \frac{c_0}{D} = \sqrt{\frac{k}{2(k+1)}}$$

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{8}{27}} \eta = (2/3)^{3/2} \eta$$

炸药能量利用率与 η 关系如图 7 虚线所示。

由图可知, 只有当 $\eta < 1.6$ 时, 瞬时报才略有提高能量利用率; $\eta > 1.6$ 时, 利用率反而小。由此推论, 增加起爆面数一般并无益处。

(4) 其它。以上讨论的都是装药右端紧贴飞片的情况。如果装药右端和飞片之间有一段长为 h 的空气隙, 爆轰产物先近于等熵膨胀, 然后驱动飞片。这样做, 可以避免厚飞片的层裂。此时, 难以导出飞片速度的解析表达式, 数值计算表明, 用 $k = 3$ 的简单的产物状态方程的计算结果与实验相差较明显, 实验结果与用 JWL 状态方程的计算结果较为接近。

为了提高飞片速度以取得更高的击靶后压力, 还可以采用柱形或球形内爆技术^[4]; 加强约束产物的侧向飞散, 使其沿轴向会聚;^[5] 利用装药的内沟槽效应以及多级飞片^[6,9] 技术等。

此外, 利用冲击波或爆轰波相互作用中形成的马赫波可获得较高压力, 利用成形装药的金属射流可使能量高度集中, 此处均从略。

三、利用炸药爆轰能量的脉冲发电机

将炸药爆轰能量转换为电磁场能量是最近 20 多年来兴起的, 显然, 对于需要一次性高功率供电的场合, 这是具有吸引力的途径。

(1) 爆轰驱动的脉冲电流放大器^[8]。属于磁压缩装置, 有多种工作方式, 其中研究得较多的是螺旋管形式。结构原理如图 8(a) 所示。事先用初级能源给变间距螺旋管回路充以初始电流 I_0 , 装药爆轰后, 金属内管膨胀飞散, 并逐步短接螺旋线圈压缩初始磁场, 最后在负载中获得脉冲大电流。运行过程中, 实际包括炸药的化学能转换为金属内管动能和进而转化为电磁能两个过程, 每个过程的能量转换率大约在 20% 到 40% 左右。整个过程可以用磁流体力学和电工学方法进行 研究。从电工学观点, 我们画出图 8(b) 等效回路, 并写出回路方程:

$$\frac{d\phi}{dt} + R'I = 0 \quad (8)$$

式中, $\phi = LI$, 是 t 时刻被幽禁于系统内的磁通, L 是回路电感 $L_c(t)$ 和负载电感 L_L 之和, $L = L_c(t) + L_L$, R 与 I 分别为回路电阻与电流。

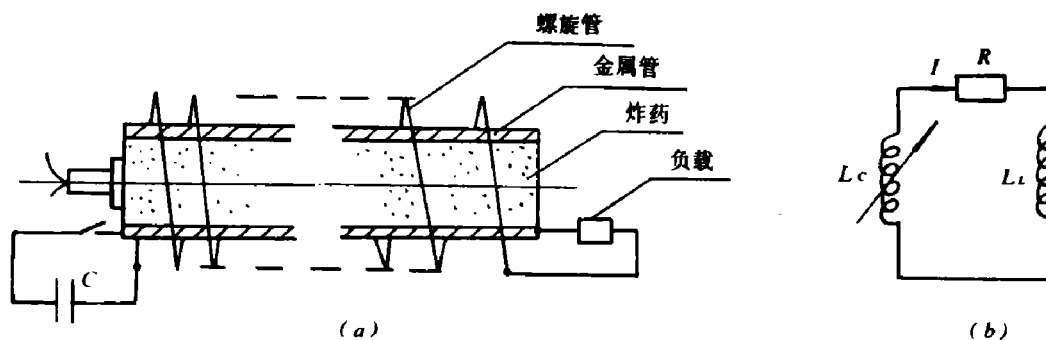


图 8 (a) 螺旋管式电流放大器原理图, (b) 等效回路

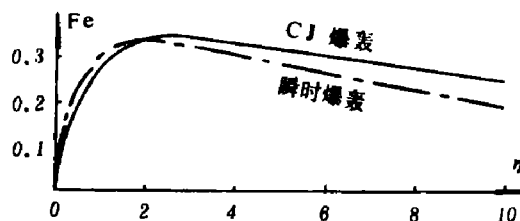


图 7 $F_e \sim \eta$ 关系

式(8)的解为

$$LI = L_0 I_0 e^{-R \int_0^t \frac{dt}{L}} \quad (9)$$

如 $R = 0$, 则 $LI = L_0 I_0$, 即磁通守恒定律。

L_0 为 $t = 0$ 时刻的初始总电感。 $L_0 I_0$

引入磁通量系数

$$\lambda(t) = \frac{LI}{L_0 I_0} = e^{-\int_0^t \frac{R}{L} dt}$$

和电感压缩比

$$v_L(t) = \frac{L_0}{L(t)}$$

则电流放大系数

$$v_I(t) = \frac{I(t)}{I_0} = v_L(t) \lambda(t) \quad (10)$$

由(8)还可导出能量关系

$$-\frac{1}{2} \frac{dL}{dt} \cdot I^2 = RI^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} LI^2 \right) \quad (11)$$

表明机械力在减少电感时所做的功, 一部分消耗于焦耳损失, 其余则用来增加回路磁能 $E_H(t)$, 显然,

$$E_H(t) - \frac{1}{2} LI^2 = v_L(t) \lambda^2(t) \quad (12)$$

这一类装置的优点之一是可以根据对脉冲能源的要求来设计输出能量, 高效的设计可产生 $10^4 A$ 和 $10^7 J$ 以上的脉冲电流或磁能。国内一种典型的小型装置, 本身重约二公斤, 在 KA 级初始电流条件下, 利用几百克高能炸药, 可以得到 $800 KA$ 的大电流输出。

(2) 爆轰驱动的强磁场发生器^[4]。这是另一类磁压缩装置, 用金属飞层直接压缩磁通以产生极高的磁能密度和强磁场。也有多种工作方式, 下面讨论由中空柱形装药内爆驱动金属圆筒压缩轴向磁场的情况。

一般说来, 运行过程是一个相当复杂的磁流体力学问题。但是, 原则上, 只要金属圆筒内壁的运动速度超过磁扩散速度, 被捕集在圆筒内的初始磁通必将受到压缩。举一个比较简单的理想化的例子: 假设金属圆筒是理想刚性导体, 这样, 忽略了磁扩散效应, 磁通量守恒得以建立:

$$H(t) = H_0 \left[\frac{R_1}{r_1(t)} \right]^2 \quad (13)$$

式中符号意义参见图9, H 代表磁场

强度。

内爆过程中, 飞层克服磁压做功, 将其动能转化为磁能:

$$\begin{aligned} W_{K_0} &+ \frac{1}{2} \mu_0 H_0^2 \pi R_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 H^2(t) \pi r_1^2(t) \end{aligned} \quad (14)$$

式中, W_{K_0} 是飞层每单位长度的动能。

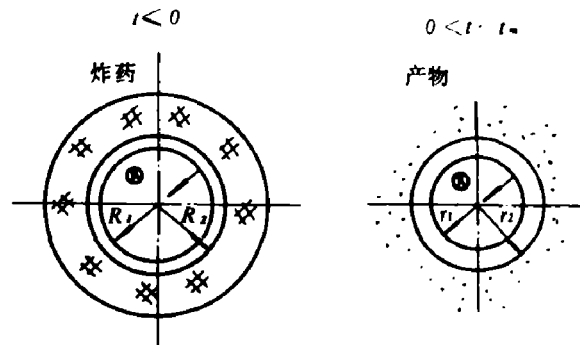


图9 理想化的磁压缩模型

因此,在最大压缩时刻,即 $r_i(t) = r_m$ 时,磁场为

$$\frac{H_m}{H_0} = 1 + \frac{W_{K_0}}{W_{H_0}}$$

由于金属圆筒内壁的飞行速度限制(一般 $< 5 \text{ mm}/\mu\text{s}$),可能获得的最大磁场大约在 10^7 G ,美、苏在60年代先后公布了他们已达到 10^7 G 的报导,后来没听到有进一步的突破。

实际问题中还要考虑初始磁场建立,规则圆柱内爆实现,磁扩散,圆筒可压缩性,圆筒表面的微喷射、融化、蒸发、电离以及运动过程的界面不稳定性等问题。因此是比较复杂的。

(3) 爆电和爆磁换能器^[9,10]。铁电(铁磁)材料具有剩余极化(磁化)强度的特性,在外力作用下,将产生去极化(去磁化)效应,释放出极化(磁化)过程中贮存的电磁能。如果用高炸能药的爆轰能量提供外力,就叫爆电(爆磁)换能器。

典型的长方体样品的爆电换能原理装置如图 10(a) 所示,其中,平面冲击波速度 D_m 垂直于剩余极化强度 P_r ,构成所谓垂直工作模式。设足够强的冲击波传经样品,并且样品的电容率与电阻率不变;冲击波时间宽度大于铁电相到反铁电相的相变时间,则相变过程可视为瞬时完成的,换能过程的等效电路如图 10(b) 所示。

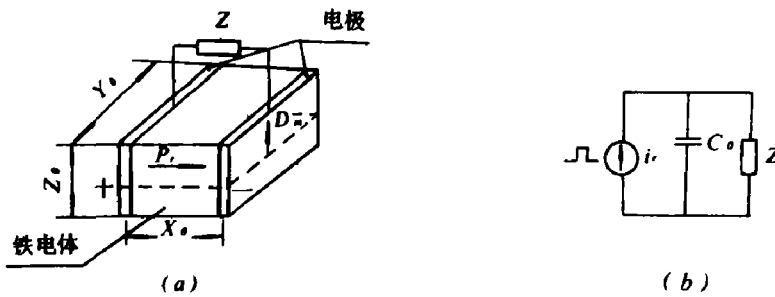


图 10 (a) 典型爆电换能装置原理图, (b) 等效电路图

其中, C_0 为样品自身电容, 矩形脉冲电流源为

$$i_r = \begin{cases} q_0 \tau & (0 < t < \tau) \\ 0 & (t > \tau) \end{cases} \quad (15)$$

$\tau = Z_0 / D_m$, $Z_0 = 0$ 时, $t = 0$, $q_0 = P_r Z_0 Y$ 为电极面上的束缚电荷。流经负载 Z 的电流和负载两端的电压与 Z 的性质有关,可参见 [11]。

国内用掺钨 PZT 97.5/2.5 铁电陶瓷样品,以炸药爆轰加载,在垂直工作模式下,已取得电感、电容并联负载上流经 1360 A 峰值电流和电阻负载两端峰值电压为 145 kV 的良好结果^[11]。当然,具体效果与装置设计密切相关。

典型的爆磁换能原理性装置和等效电路如图 11 所示。设铁磁体芯的截面为 $l \times W$, 当平面冲击波以速度 D_m 垂直于截面通过时,在 dt 时刻内去除剩余磁化强度,产生感应电场在负载 Z 两端产生的电压为

$$V = N \frac{d\phi}{dt} = N \frac{dB_r W l}{dt} = N B_r W D_m \quad (16)$$

式中, N 为输出线圈匝数, B_r 为剩余磁化强度,输出电压脉冲形状与磁芯截面有关。为提高输出电压,需增大 B_r 与 D_m 也就是取决于铁磁材料的选取。据国外报导,这一类换能装置可取

得 mV 或 kA 量级的电压和电流，输出能量为 $10 - 100 J$ 量级。

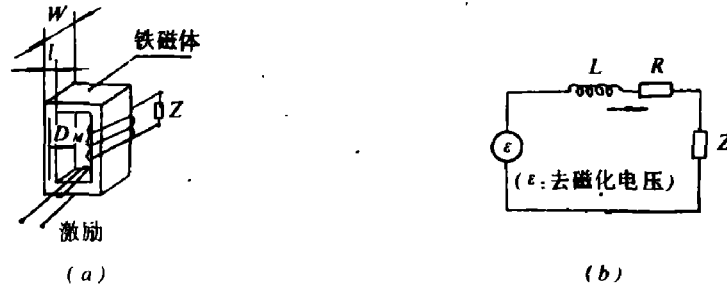


图 11 (a) 典型的爆磁换能装置原理图, (b) 等效电路图

上述四种炸药爆轰能量转化为电磁场能量的装置都是适应爆炸物理、冲击波物理、高速流体动力学和等离子体物理等科研需要而发展起来的，在需要一次性脉冲强电磁能的应用中，正日益得到重视，并已取得实际效果^[12]。

四、利用炸药爆轰的热核微聚变

轻核聚变的前提是克服核间的库仑斥力，为此，必须使它们以很高相对速度互相碰撞。加热氘气或氘氚气混合物使温度达到 keV 量级或略低，就有可能出现热核微聚变($1eV$ 能量相当于 $1.16 \times 10^4 K$ 的温度)。采用强脉冲激光会聚冲击氘气小囊，形成冲击波聚焦，使气体受压缩并加热，已经实现了上述设想，国内外都有报导。还有一条不需要巨大设备、能源和投资的途径，就是充分利用炸药爆轰和会聚的瞬时极高压力，近年来国际上有不少报导，简述如下：

(1) 利用马赫反射会聚。典型装置如图 12 所示^[13]。轴对称同步起爆的成形装药驱动金属薄层冲击铜锥，形成马赫波，加速塑料薄膜，使其以 $40 \sim 50 mm/\mu s$ 的速度压缩并加热约 $10^{-7} g$ 的氘气，此时氘的压缩比可达 10^3 以上，压力达 TP_0 量级，平均温度约 $0.5 keV$ ，持续时间约 $2.7 ns$ ，最终测得聚变中子产额为 3×10^7 个。如果用二个这样的装置对碰^[14]，如图 13 所示，可以提高压缩比，减少能量漏泄，降低辐射损失，据称可使中子产额提高到 $10^{10} \sim 10^{11}$ 个。

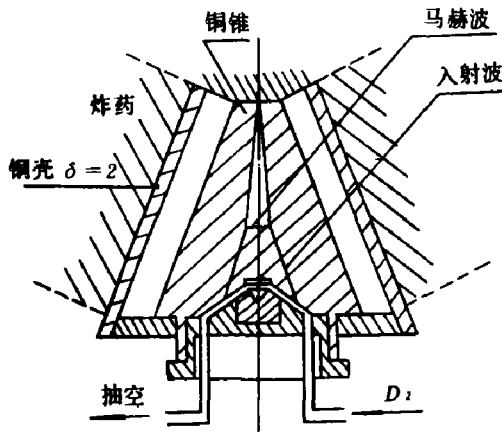


图 12 利用马赫反射的化爆热核微聚变装置

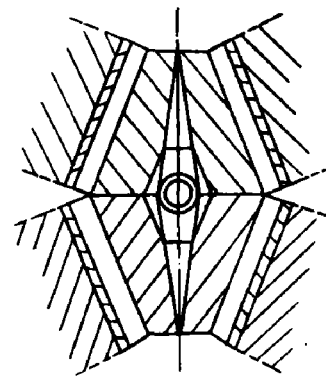


图 13 对碰型装置

(2) 半球形会聚装置。一种比较巧妙的半球形会聚装置的设计如图 14^[15]。在半径 $100 mm$ 的半球形重介质内壁上敷以厚为 $3 mm$ ，重约 $100 g$ ，可释能约 $0.6 MJ$ 的超细 PETN 炸药壳层；在球心处置一直径 $0.13 mm$ ，长 $1 mm$ 的爆炸金属丝，用以引爆予先充入半球腔内的 50 大气压按一定比例混合的氘、氧气体。气体爆轰波同步引爆 PETN 壳层，形成聚焦的内

爆波，在中心反射后，可在 0.01 mm 半径内聚焦生成高温高压等离子体并导致微聚变。由实测结果推算中子产额为 10^4 量级。

(3) 其它会聚方式。由上述报导，结合爆炸力学常识，可以推论，设计良好的柱形会聚，半球会聚对碰或球形会聚等内爆技术，原则上都可以实现热核微聚变过程。实际上，美国人也已透露了这方面的进展^[16]。但是，想来这些技术也一定是很复杂的。

五、炸药爆轰脉冲光源

对于自身不发光物体的运动轨迹或流场显示的高速摄影，常用外照明的阴影或纹影技术，也有利用反射光或截断透光途径的显示方法的。这时，需要一个高强度的外照明脉冲光源。利用炸药爆轰能量作脉冲光源具有设备简单、价格低廉、光强与持续时间满足需要和易于同步等优点。利用爆轰发光作激光光泵的设想也一直在努力探索中。

(1) 炸药爆轰驱动空气冲击波阵面的发光特性^[17]。利用钨带灯作标准光源，以高速转镜相机和分光光电记录系统，测量用炸药平面波发生器起爆的 $\phi 100 \times 20\text{ mm B}$ 混合炸药爆轰生成平面空气冲击波阵面的光学特性为：在可见光谱段，发射特性与 $8200 \pm 260\text{ K}$ 的黑体辐射规律一致，其辐射亮度和目视亮度分别为 $3.2 \times 10^3\text{ W/cm}^2 \cdot \text{Sr}$ 和 $7.3 \times 10^5\text{ lm/cm}^2 \cdot \text{Sr}$ ，发光持续时间(底宽)为 $44.4\text{ }\mu\text{s}$ ，发光强度已超过常用万次闪光灯。

(2) 爆轰驱动氩气脉冲光源的发光特性。为了进一步提高发光亮度，可用惰性气体代替空气，估计用氩时，色温可达 $3 \times 10^4\text{ k}$ ，但氩来源困难，常用氩代替。

研究了如图 15 所示两种氩气脉冲光源，I 型是园柱形装药直接驱动，II 型增加了炸药筒，使总药量增大，但利用了柱形会聚冲击波效应，亮度也提高了。

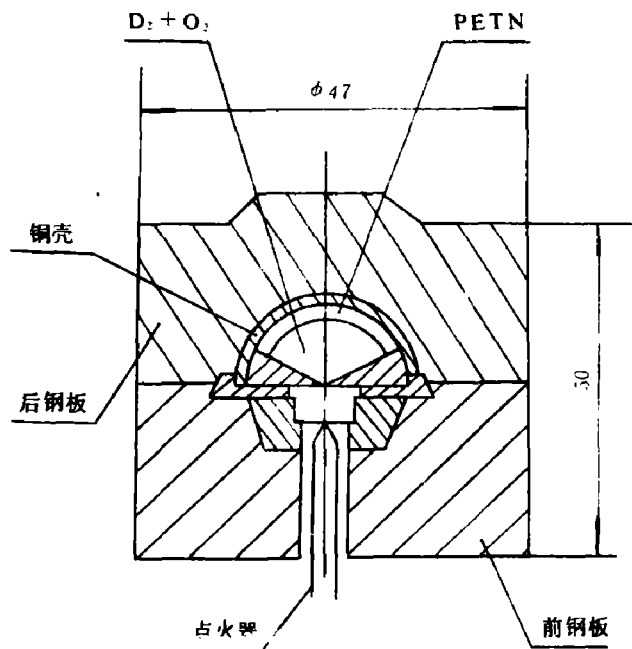


图 14

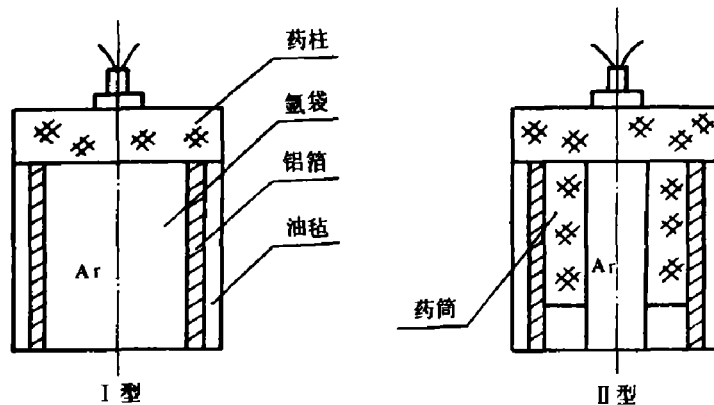


图 15 爆轰驱动氩气脉冲光源

对 I 型装置实测发光特性的结果说明, 当氩气袋长度为 $175 \sim 380 \text{ mm}$ 范围内, 发光亮度是前述空气冲击波的 $5.5 \sim 6.7$ 倍, 光波形底宽为 $28 \sim 61 \mu\text{s}$ 。对 II 型装置的实测结果说明, 当炸药筒长度为 $30 \sim 100 \text{ mm}$ 时, 亮度增益为 $6 \sim 10$ 倍, 光波形底宽为 $32 \sim 38 \mu\text{s}$ 。上述结果中, 氩气袋或药筒长度的改变与亮度变化之间无明显规律, 但与持续时间变化之间近于线性关系。

(3) 爆轰发光作激光光源。图 16 是用爆轰驱动氩气脉冲光源作激光光源的一种设想。

用反射镜聚焦系统, 把氩气脉冲光源的光聚焦在激光工作物质上, 工作物质采用钢反射镜兼作保护, 以防爆炸击波损伤。实验证明^[18], 不到 2 g 的炸药得到的结果与 200 J 电能的脉冲氩灯相近, 即 $T \approx 8000 \text{ k}$, 持续时间 $300 \mu\text{s}$ 和大致相似的光谱组成, 有关这方面的探索还在继续进行。

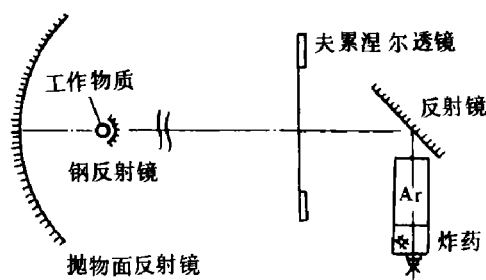


图 16

六、炸药能量利用问题的其它方面

上面举的几方面应用, 大都属于科研领域, 真正使用炸药最多的是工程爆破, 已有各种专著, 这里只想提一个与上面谈的有关的实例: 通常钻孔爆破时, 雷管是最后装的, 离孔口最近, 为了提高爆破效率, 必须使用“炮泥”堵塞, 这是很不安全的, 而且堵塞质量与爆破效果直接有关。如果反过来雷管装在炮眼底部, 堵塞问题就基本上不存在了, 这相当于上述爆轰驱动中加了一个质量极大的“炮塞”, 有助于提高炸药的能量利用率。此外, 对于许多排险或重复破碎大块岩石的爆破, 则可以使用前面讲到的使能量会聚于局部指定区域的方式, 成形装药这时往往可以发挥很好作用。

炸药能量的利用与经济建设直接有关的, 除工程爆破外, 还有下列几个方面:

(1) 各种专门设计的爆炸作用件。

将炸药另部件与机械设计结合, 可以执行许多特定功能, 例如: 爆炸活塞、爆炸拉销器、缆管切割器、爆炸阀门、爆炸电路通断器、爆炸螺栓、爆炸螺帽、爆炸充气器、爆炸锚桩器、以及产生光、烟、声响效果的专用信号标志等。

所有这些爆炸作用件, 都是一次性作功, 但具有体积小、重量轻、成本低、动作可靠和不需大的作业面积以及庞大能源的优点。

(2) 爆炸加工。

利用炸药爆轰能量, 可以完成许多用通常工艺无法实现的加工任务, 特别是大型工件成形和难熔或易氧化金属焊接等。例如: 爆炸成形 (包括封闭式与开放式), 爆炸焊接 (包括板料和管料), 爆炸铆接, 爆炸箍缩、爆炸硬化, 爆炸压实等。当前在国内外开展得都很活跃。

(3) 爆炸信息传递。

炸药种类, 装药结构与尺寸选定后, 爆轰波传播速度 D 只是装药初始密度 ρ_0 的函数, 而且, 许多高能炸药在金属软管中封装拉伸后, 在 $\phi 1 \text{ mm}$ 以上就可以保持相当稳定的爆速, 例如常用这一类柔爆束 (MDF) 的稳定爆速为 $6.5 \sim 7.0 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。这样, 就可以利用 MDF 作信息传递介质, 具有体积小, 重量轻, 抗电磁干扰, 动作可靠和无需外加其它能源的优点。如果使用长度小于 1 m , 一般可收到传达信息时间误差 $\approx 0.1 \mu\text{s}$ 的优良效果, 而且可以多根并, 串联, 从一个动作指令出发, 于不同时间将信息传递到不同的指定地点。与爆炸作用件设计结合, 还可以起到某些简单的逻辑线路的作用。

炸药爆轰能量还是当前新兴的冲击波化学的重要能源^[19]; 炸药能量利用率的提高, 关键在于搞

好爆轰装药（序列）设计，这些都已超出本文范围，此处从略。

参 考 文 献

- [1] 鲍姆 Ф.А. 等(众智译), 爆炸物理学, 科学出版社 (1983) P. 449 .
- [2] Aziz, A. K. et al., *3rd Symp. on Det.*, (1960), P. 205.
- [3] Kennedy, J. E., *SC-RR-70-790* (1970) .
- [4] Skidmore, C. et al., *Pro. of Symp. (Thermodynamics of Nuclear Materials)*, Vienna (1962 .5), 173 .
- [5] Tan Bing-Sheng, Jing Fu-qian, *Preprints of 7th Symp. on Det.* (1981), 762 - 768 .
- [6] Balchan, A. S. et al., *R. S. I.* **35** (8) (1964), 937 .
- [7] Иванов, А. Г. и др., *ПМТФ*, No. 2 (1982), 86.
- [8] Kneopfel, H., *Pulsed High Magnetic Fields*, North-Holland Publ. Co. (1970) .
- [9] Neilson, F. W., *SCTM-23013-56-51* (1956) .
- [10] Sandia Lab. Technical Capabilities, *SAND 74-0086* (1975) .
- [11] 王永令, 物理学报, **32** (6) (1983), 780-785.
- [12] Hawke, R. S. et al., *UCRL-74442* (1972) .
- [13] Kaliski, S. et al., *JOTP (Poland)*, **10** (4) (1977), 465-471.
- [14] Kaliski, S., *J. of Tech. Phys. (Poland)*, **19** (3) (1978), 283-289 .
- [15] Glass, I. I., Sagie, D., *Phys. of Fluids*, **25** (2) (1982), 269-270.
- [16] Devolpi, A. et al., *Born Secret*, Pergamon Press, New York (1981) .
- [17] 赵长源, 爆炸与冲击, **3** (2) (1983), 17-22.
- [18] Byrom, S., Peters, D., *Philco Co. Res. Lab. U-2771* (1964) .
- [19] 可参见 Nellis, W. J. et al., *AIP Conf. Pro. No. 78 Shock Waves in Condensed Matter - 1981*, 1, 4, 14, 27, 42. American Institute of Physics, New York (1982) .

SOME POSSIBLE APPLICATIONS OF EXPLOSIVE ENERGY

Zhang Shouqi Wang Bingcheng

Xie Mingshu Dong Qingdong Ma Shuyuan