

高压物理讲座

动态高压技术

经福谦
(北京工业学院)

用静高压方法^[1]产生高压, 由于受到静压设备材料强度的限制, 长期局限在 200—300 kbar 水平, 只是到了近年才研制成能产生近 2Mbar 的压力的装置. 我们知道, 地核压力约为 3.6Mbar, 太阳中心压力约为 1.5×10^5 Mbar. 由此可见, 用静高压技术研究高压下物质性质的能力目前仍是很有限制的. 为了适应在更高压力下研究物质行为的需要, 从本世纪四十年代以来, 又发展了动高压技术^[2], 用这一技术目前已能产生大约 70 Mbar 的高压^[3]. 动高压技术是利用波的传播将外力作用逐渐遍及整个受压物体, 因而对物体微元的受压约束是靠它本身的惯性来实现, 所以原则上只要在压力源可能的条件下, 用动压方法可以无限制地提高压力. 同时, 由于波传播很快, 在固体材料中一般为每秒几千米, 压力作用的机械功所产生的热效应来不及与其周围物质发生热交换, 所以压缩过程是绝热的.

任何材料的 $p = p(v)$ 关系在高压下都是

非线性的, 并且多数具有 $(\partial^2 p / \partial v^2)_s > 0$ 的性质 (p 为压力, V 为比容, s 为熵), 它等效于

$$\left[\frac{\partial^2(u+c)}{\partial p} \right]_s > 0$$

的性质^[4] (u 为波后粒子速度, c 为波后声速). 上面的不等式说明, 高压波元的速度 ($u+c$) 大于低压波元的速度, 因而在加载过程中, 由各个阶跃压力脉冲所形成的波阵面元将逐渐地“堆集”起来, 最终形成一个陡峭状的波阵面(见图 1). 这种波称做冲击波. 由冲击波产生的压缩作用叫做冲击压缩.

产生冲击波高压的技术有三类: (1) 接触爆炸法; (2) 高速飞片撞击法; (3) 能量快速沉积法.

狭义的动高压技术就是指冲击波高压技术. 但在广义上, 动高压技术是指利用形成冲击波阵面之前的压缩波对试件进行压缩(见图 1). 这种压缩过程中的熵增较小, 故又称为准等熵压缩技术.

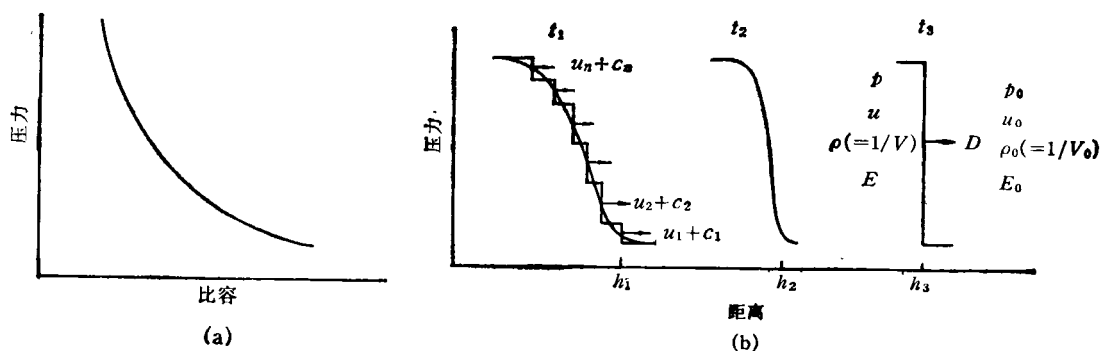


图 1 冲击波的形成条件及其演化过程
(a) 具有 $(\partial^2 p / \partial v^2) > 0$ 性质的 $p-v$ 线; (b) 冲击波在试件中的演化过程(t 为时间,
 $t_1 < t_2 < t_3$; h 为试件中的位置, $h_1 < h_2 < h_3$)

一、接触爆炸法

凡发生快速释放能量的化学反应或物理反应的现象都称为爆炸。由于爆炸生成的高温、高压和高密度反应产物的直接作用，将给相邻介质(试件)施以巨大冲击力。

梯恩梯、黑索金和奥克托金等是常用的化学炸药。以梯恩梯为例，它爆炸时释放的能量约为 10^3 kcal/kg，化学反应约在 $0.1 \mu\text{s}$ 时间内完成，因而是一种快速释放能量的化学爆炸式的冲击能源。图 2 是一种典型的化爆接触爆炸

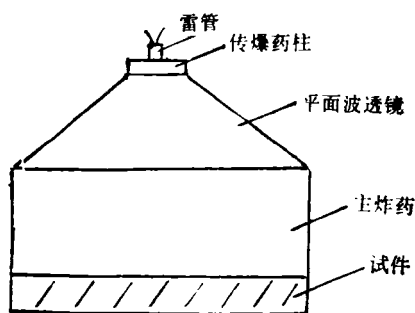


图 2 化爆接触爆炸装置示意图

装置。平面波发生器是一个把雷管引爆的散心爆轰波(一种带化学反应的冲击波)改造成平面爆轰波的装置。由平面波发生器送出的平面爆轰波引发主炸药。主炸药中传播的平面爆轰波在与试件相撞后，即向试件驱动一冲击波，对试件进行冲击压缩。冲击压力随主炸药种类及试件材料的冲击阻抗(冲击阻抗定义为材料初始密度与冲击波速度的乘积)而异。用化爆接触爆炸法，在一般金属材料中产生的冲击压力的上限值不会超过 800kbar。

由裂变材料或聚变材料组成的核炸药是一种比化学炸药猛烈得多的爆炸物质。以裂变材料为例，单位质量的裂变材料裂变后释放的能量约为化学炸药的 10^7 倍，释放能量也很快，因而可以产生更高的冲击压力。以地下核爆炸为例，由于核爆炸释放能量，使爆炸后的气体产物在很短的时间内充填在整个爆室中，并迅速形成一个近似为均匀压力的等温球。这时，爆

室中的内能 E 和压力可以近似写成^[9]

$$E = \frac{3}{2} n k T + \frac{4\sigma T^4}{c},$$

$$p = n k T + \frac{1}{3} \frac{4\sigma T^4}{c},$$

两式中等号右端第一项分别代表物质能及物质压，第二项分别为辐射能和辐射压。 n 为爆室内单位体积粒子数(等于 $A\rho/\mu$ ，其中 A 为阿伏伽德罗常数， μ 为爆室内物质的平均分子量， ρ 为爆室内物质的平均密度)， k 为玻耳兹曼常数， T 为温度， σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数。由上两式算出的爆室壁上压力是很大的。例如，在半径为 1m 的爆室内，若核装置总重为 1t，核爆当量为 3—237 kt 梯恩梯时，爆室壁上的压力可达 12—524 Mbar。当然，由于核爆环境中存在强烈的核辐照及电磁干扰，试件及其测量系统一般应置于离爆室壁一至二米的地方，试件处的压力应比爆室壁处的低，因为压力衰减规律大致按离爆室壁距离的负二次方变化。

二、高速飞片撞击法

高速运动的平板(飞片)与静止靶相撞后，即可向靶内驱动一冲击波，对靶(试件)进行冲击压缩。若靶的材料一定，则飞片对靶的作功能力取决于飞片的动能 $\frac{1}{2} M W^2$ (M 为飞片质量， W 为飞片击靶时的速度)，因此撞击面上的冲击压力 $p \sim \rho_0 W^2$ 。由此可知，飞片-靶界面上的压力大致与飞片初始密度 ρ_0 及飞片速度 W 的平方的乘积成正比。因此，要进行强冲击压缩，就要设法使飞片有较高的初始密度和尽可能高的飞行速度。

根据加速飞片的能源的不同，可以分为五类主要的飞片加速装置：化学爆炸驱动飞片；高压气炮驱动飞片；电炮驱动飞片；电磁轨道炮驱动飞片及核爆炸驱动飞片。

炸药爆炸加速飞片装置的示意图见图 3。飞片在爆轰产物的推动下，经过几厘米的空腔飞行，可以较充分地吸收爆轰产物提供的能量，

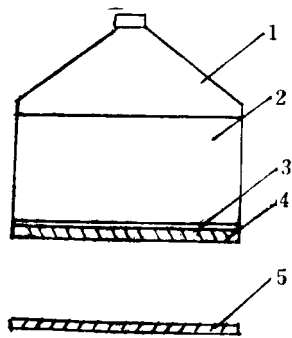


图3 化爆加速飞片装置示意图

1——平面波发生器；2——主炸药；3——塑料片或空气隙；4——飞片；5——靶（即试件）

以达到一定的飞行速度。飞片在空腔中的加速过程是依靠飞片中来回反射的波实现的，也就是波把在飞片后界面上吸收的能量带向飞片的前界面，使之得到加速，然后又返回后界面再次吸收能量。通过这种多次的来回反射，使飞片不断吸收爆轰产物的能量，最后达到其极限速度。由此可知，飞片要达到它的极限速度，就必须有一定的时间，或者说要有一定的飞行空腔长度。一般情况下的空腔长度选为5 cm左右。飞片的极限速度 W_{\max} 由下式求得：

$$\frac{W_{\max}}{D} = 1 + \frac{1}{\eta} - \sqrt{\frac{2}{\eta} + \frac{1}{\eta^2}}$$

式中 D 为爆轰波速度， $\eta = \frac{16m}{27M}$ (m 为炸药质量， M 为飞片质量)。改变装药结构(主炸药种类、飞片材料以及整个装置的几何配置)，可以使飞片速度在每秒几百米到一万多米的范围内调节。在同类炸药和同类试件材料的条件下，用这种方法获得的冲击压力一般比接触爆炸时的高三倍左右，如果采用特殊的装药结构，则还可以提高到五倍以上。

用高压气体作为驱动源的加速飞片装置称做高压气炮。高压气炮主要由高压室、膜片和发射管组成。图4(a)是一级高压气炮的结构示意图。实验时，先向高压室充气，当达到预定压力时，膜片破裂，高压气体随之进入发射管，推动弹丸飞行(飞片贴于弹丸的前端面上)，最后平稳地与置于管口外不远处的试件相撞。工

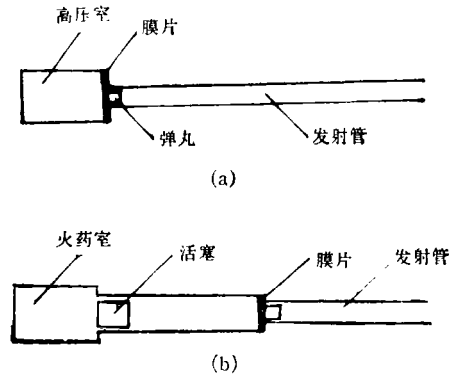


图4 高压气炮装置示意图
(a) 一级炮；(b) 二级轻气炮

作气体一般为空气、氮气、氦气或氢气。工作气体、气体初始压力 p 与弹丸速度 u 的关系可近似写为

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u}{c_0}\right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}},$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{\mu}}$$

式中 c_0 为工作气体的初始声速， R 为普适气体常数， μ 为气体分子量， γ 为气体绝热指数， T_0 为气体初始温度。由上两式可看出，选择分子量小，初速声速大，以及通过加温提高工作气体初始声速的办法，都有利于提高弹丸速度。一级炮的弹丸速度一般为每秒数十米到一千多米，击靶时产生的压力约为数十千巴到数百千巴。当欲获得约大于 600 m/s 的弹丸速度时，一般要用氢气或氦气作为工作气体。如欲获得更高的弹丸速度，就要采用二级轻气炮，见图4(b)。它首先用引燃的火药推动活塞去压缩泵管中的高压氢气或氦气，使工作气体达到更高的压力时再破膜，以便更强力地驱动发射管中的弹丸。二级轻气炮弹丸的最高速度目前可达 8000 m/s 左右，在高密度材料试件中约可产生 7 Mbar 的压力。与化爆驱动飞片的装置相比，高压气炮的优点是飞片速度连续可调，重复性好，飞片的平面性好。

用过热的高密度金属蒸气作为驱动能源的飞片装置称做电炮。电炮的主要动作过程是：由贮能电容器组向一金属膜作快速放电，对之

进行欧姆加热,并使金属膜在很短的时间内完成固-液-气态的相转变。由于整个过程的时间仅约 $0.1-1 \mu\text{s}$,此气态金属将基本保持为其原来的初始密度,因而是一种高温高密度金属蒸气。这个金属蒸气将驱动与之相贴的飞片作加速运动,加速空腔的大小一般为几毫米。电炮飞片速度目前可在每秒几百米到一万多米之间调节。最近的报道数据表明^[6],在钽飞片撞击速度为 9.7km/s ,且钽试件压力为 7.8 Mbar 时,测得的冲击波速度值与其他作者用别的加载手段测得的数据相比,在 2.7% (均方根差)的范围内符合。电炮方法的优点是实验费用小和实验准备的周期短。

用电磁力驱动飞片的装置称做轨道炮^[7]。它的工作原理是:在两条平行的刚性金属导轨间,放置一个可运动的导体(电枢)与弹丸-飞片组合体。当一强电流通过金属导轨与电枢组成的电回路时,导轨间要产生一强磁场,该磁场与流过电枢的电流相互作用,就产生洛伦兹推力 $F = \frac{1}{2} LI^2$,这时弹丸-飞片组合体的速度 W 为

$$W = \frac{L}{2M} \int I^2 dt,$$

式中 I 为电流, L 为单位长度轨道的电感, M 为弹丸-飞片组合体质量, t 为时间。因此,如果 $I = 10^6 \text{ A}$, 馈入电流时间为 1ms , $L = 0.4 \mu\text{H/m}$, $M = 5\text{g}$, 则飞片速度可达 40 km/s 。实际上,由于轨道炮系统中存在许多能量耗损机制,再加上洛伦兹力 F 过大时会出现飞片破碎现象,故目前尚未达到这么高的飞片速度。根据最近的报道,用这一技术,已获得了速度为 10km/s 左右的、无破碎的飞片,但尚未见到有较精确的冲击压缩数据的公开报道。

C. E. Ragar III 于 1981 年还介绍过利用核爆能量驱动飞片的系统^[8]。他用这一系统把 5 mm 厚的钽飞片加速到约 40 km/s 的速度,加速空腔为 150 mm ,但是飞片击靶时的倾斜度较大($\sim 15^\circ$)。如果能改善这一性能,那么这一技术将是当代可产生最高冲击压力的唯一手段,

因为对中等密度材料的试件来说,在这一速度的撞击下,大约可产生 100 Mbar 压力的冲击压缩。

三、能量沉积产生冲击波

当高能量密度粒子束(电子、离子和光子等)辐照在靶(试件)表面上时,就会有部分能量被反射,有部分能量将沉积于靶表面的一薄层材料内。该薄层材料在吸收了这部分的能量之后,被迅速加热,形成一个热层。在辐照功率密度不大的情况下(一般指小于 10^9 W/cm^2 的情况),该热层最多只能发生固-液-气的相转变,不发生电离现象。此热层再通过热弹性耦合,对相邻的“冷”靶材膨胀作功,产生冲击波,发生冲击压缩。但是,在辐射源功率密度大于 10^9 W/cm^2 时,靶内冲击波产生的机制将有所变化。以激光束照射为例^[9],这时被照射靶表面的一薄层汽化层将进一步转变为等离子体层,并继续吸收后继的激光能量,形成高温等离子体,然后向背后的真空中快速飞散。根据动量守恒定理,这种向后飞散的等离子体将同时向“冷”靶反冲,向“冷”靶中驱入一个冲击波。同时,向后飞散的等离子体自身的密度也降低,因此激光束就得以向更深部的靶材中穿透,并产生新的高温等离子体。这一新的高温等离子体层又将在其向后飞散的过程中向“冷”靶产生反冲作用。由于以上过程是持续进行的,故靶中将维持着一个稳定冲击波,此过程将持续到激光脉冲终止。激光停止辐照后,受照面上的压力急剧地降为零,冲击波的驱动力随之消失,这时又向靶内传入一个稀疏波。在靶的一定厚度上,这个稀疏波将赶上冲击波阵面,并使压力下降。以上过程可参见图 5。激光产生冲击波的压力-功率密度关系式是

$$p = \alpha I_0^\beta,$$

式中 I_0 为入射激光束功率密度, α 和 β 为常数。在 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $I_0 = (10^{12} - 5 \times 10^{14}) \text{ W/cm}^2$ 时, $\alpha \approx 8$, $\beta = 0.6 - 0.8$ 。例如, R. J. Trainor 等在 1981 年报道,在 $I_0 = 2.9 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$

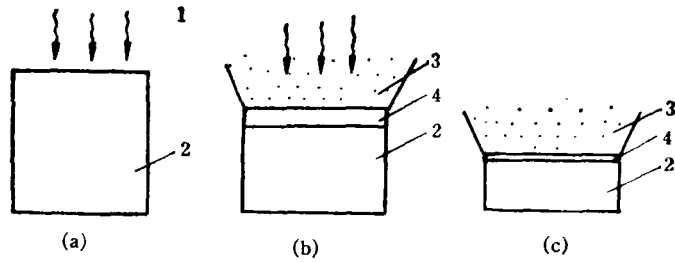


图5 激光产生冲击波 (a) 激光束辐照前; (b) 激光束辐照中; (c) 激光束停止辐照后
(1——入射激光束; 2——靶; 3——高温等离子体; 4——冲击压缩的靶层)

cm^2 的照射下,在金靶中获得了 3.5 Mbar 的冲击压缩效果。

四、准等熵压缩技术

等熵压缩仅在物质状态处于绝热变化甚缓时才能出现,因此当我们不是利用冲击波而是利用较缓陡度波阵面的压力波压缩试件时,便可得到熵增小的压缩作用。下面介绍两类一维平面的准等熵压缩技术:一种叫做斜波发生器,另一种是变冲击阻抗的缓冲层垫层技术。

斜波发生器是一种可以把间断冲击波改造为连续加载波的技术^[10],其原理恰为图1所讨论情况的逆过程。当某种材料具有 $(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2})_s < 0$ 的性质或者说具有 $[\frac{\partial(u+c)}{\partial p}]_s < 0$ 性质时,在有一间断阵面冲击波传入该材料后,波阵面将随其传播距离的增长而逐渐展宽,因此当它从该材料背面传出时,将表现为具有一定时间宽度波阵面的压力波。具有这种特殊性质的材料可用来设计成斜波发生器。这类材料通常有玻璃陶瓷、熔融石英和钛硅玻璃等。但是,用斜波发生器技术产生的连续加载波的最高幅度一般只能到 100—200 kbar,因为压力再高时, $(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2})_s < 0$ 的条件就可能不成立了。

如欲获得更高压力幅度的连续加载波,可以采用变化冲击阻抗的缓冲层垫层技术^[11],其原理及结构可见图6。图中飞片前的缓冲垫层由逐渐变化冲击阻抗的材料制成。根据波系作

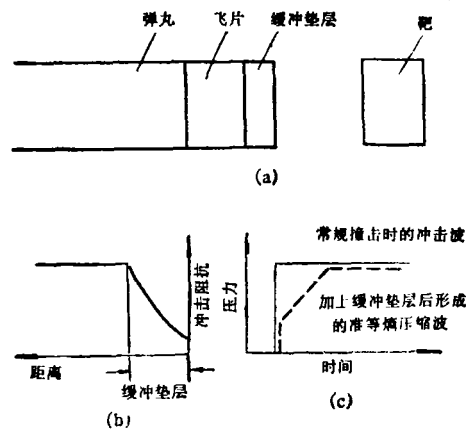


图6 缓冲垫层产生准等熵压缩的原理图
(a)装置示意图;(b)飞片与缓冲垫层材料的冲击阻抗变化图;(c)撞击界面上的压缩波形图

用的分析可知,虽然垫层材料本身的性质是 $(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2})_s > 0$ 的,但是击靶后在靶内产生的将是具有缓变阵面特性的准等熵的压缩波。利用这一技术,已获得了大约 2Mbar 幅度的等熵压缩效果。

利用各种动高压技术目前可实现的压力范围绘于图7。如果我们以 10^7 bar 作为划分高压

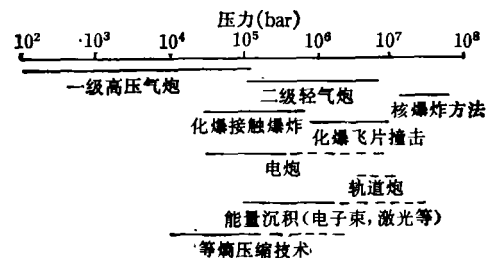


图7 各种动高压技术目前可实现的压力范围示意图(实线为目前可实现精确测量的区域;虚线为技术尚不十分成熟的区域)

区与超高压区的界线,则目前用于高压区的成熟技术是化爆技术(接触爆炸和飞片撞击法)和高压气炮技术。此外,电炮、高能粒子束的能量沉积和等熵压缩等技术也是可被采用的技术,但是它们的测量精度目前还不高。超高压区唯一可用的技术是核爆产生冲击波的技术。激光产生冲击波、高能电炮及轨道炮技术是正在发展中的技术,尚未达到可供实用的阶段。

利用动高压技术,除可以进行常规的 p 和 v 测量外,近年来还发展了对温度 T 的测量,因而更有利于我们对受压物质的高压行为的了解。此外,直接测量高压相变(固-固相变、固-液相变)和高压物性(电阻、折射率和磁性等)等技术近年来也得到了很大的发展。

参 考 文 献

[1] P. W. Bridgman, *The Physics of High Pressure*,

Bell and Sons, (1944).

- [2] G. E. Duvall and G. R. Fowles, in *High Pressure Physics and Chemistry*, edited by R. S. Bradley, Academic Press, (1963), Chap. 9;
G. R. Fowles, in *Dynamic Response of Materials to Intense Impulsive Loading*, edited by P. C. Chou and A. K. Hopkins, (1972), Chap. 8;
C. E. Ragan III, LA-UR-76-2286.
- [3] C. E. Ragan III, *Phys. Rev. A*, **25**(1982), 3360.
- [4] G. E. Duvall, in *Les Ondes de Détonation*, CNRS, Paris, (1962), 337.
- [5] G. W. Johnson et al., *J. Geophys. Res.*, **64**(1959), 1457.
- [6] K. E. Froeschner et al., in *Shock Waves in Condensed Matter*, (1983), edited by J. R. Asay, R. A. Graham and G. K. Straub, APS, (1984), 85.
- [7] R. S. Hawke et al., in *High Pressure Science and Technology*, edited by B. Vodar and P. H. Harteau, (1980), 979.
- [8] C. E. Ragan III, in *Shock Waves in Condensed Matter* (1981), edited by W. J. Nellis, L. Seaman and R. A. Graham, APS, (1982), 664.
- [9] R. J. Trainor et al., see ref. [8], 145.
- [10] M. Germain-Lacour, et al., see ref. [9], 481.
- [11] L. M. Barker, see ref. [6], 217.

(上接第 304 页)



图3 心脏目标的再现断层象

数字方法。前者是用白光透照叠合后的子编码图组实现相乘;后者则是将图象数字化后用计算机实现相乘。

四、实验结果

按照图 1 所示的光路原理,我们建立了消除旁瓣噪声与几何象畸变的 X 射线编码三维成像系统,包括 X 射线编码系统与白光解码系统,同时也建立了光学相乘解码系统。由此获得了数字目标与离体心脏的多层断层象,实验结果与理论一致。

金属数字目标(间距 1 cm)的子编码图与解码后的再现断层象如图 2 所示。与传统方法相比^[1],图象质量有明显提高。用编码成像技术获得心脏目标的多层断层象(图 3),在国内属于首次。

参 考 文 献

- [1] H. Weiss et al., *Optica Acta*, **24**(1977), 305.
- [2] 刘立人等,物理, **10**(1981), 134.