

## 动态超高压技术(一)\*

经福谦

(1984年2月10日收到)

本文评述了超高压技术 ( $p > 10 \text{ Mbar}$ ) 的研究状况, 它包括可能性、目前状态及尚存在的问题。

在天体物理、固体物理、地球物理、核爆炸及惯性约束聚变等研究中, 常常需要了解在高压、高温等极端条件下物质行为的知识。在这种极端条件的作用下, 将引起宇宙中万物表现出千姿万态的性态变化。对于这种变化规律的探求, 可以归结为对物态方程的研究。

图1是一幅表示一种典型材料物态变化的内能—密度关系示意图。图的上部标出了各种理论模型的适用范围, 下方的部分区域标出用目前常用实验技术(如静压<sup>[1]</sup>, 炸药爆轰及二级轻气炮等方法<sup>[2,3]</sup>)可以进行物态方程实验研究的区域, 其中部的“空白”区域则代表了目前既无可用的理论模型、又缺乏可用的实验手段进行研究的区域。在后一个区域内, 虽然C. Б. Корнер等曾提出过用内插方法解决这个区域内物态方程的理论模型<sup>[5,6]</sup>, 但是用它只能描述物质性态变化的一种“平均的”

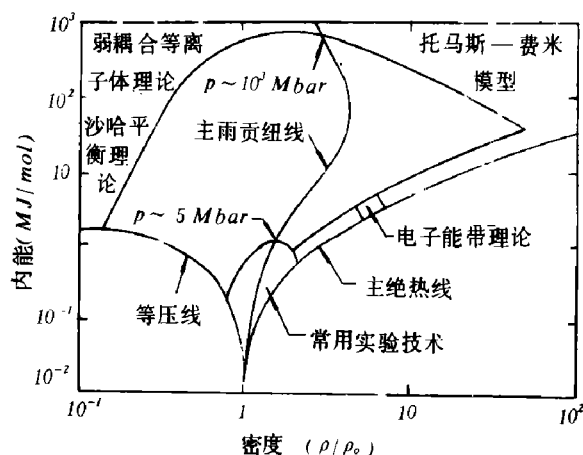


图1 (本图取自文献[4])

的”近似特性。事实上, 在这个压力及温度范围内, 物质的压缩特性仍然要受到复杂的原子壳层和温度电离等效应的影响, 即使是一般认为托马斯—费米理论适用的区域, 也不能完全摆脱这种影响的存在。对于这个问题, Zink<sup>[7]</sup>和Graboske及Wong<sup>[8]</sup>都有过理论分析(见图2), Аврорин等也得到了实验证实<sup>[9]</sup>, 见图3。图中Fe为标准材料, 实线为用统计模型的计算结果, 空心园点为实验点。由图看出, 除H<sub>2</sub>O以外, 其他材料的实测结果均与统计模型计算结果有明显差别, 它反映了该压力区内原子壳层结构影响的存在。H<sub>2</sub>O的实测数据与

\* 本文曾于1983年6月在成都召开的第二届全国高压学术讨论会上宣读, 这次发表时作了修改和删节。

统计模型计算结果的重合,被认为仅是由于温度效应补偿结果的“巧合”现象。因此,当代从事高压物态方程研究者面临的重要任务之一,便是解决在实验室内实现这个压力区的压力加载的技术。从图1看出,这个尚待解决的加载压力区大致复盖了从10-300兆巴的广阔区域。一般说来,可以把压力 $p > 10$ 兆巴的区域叫做超高压区。

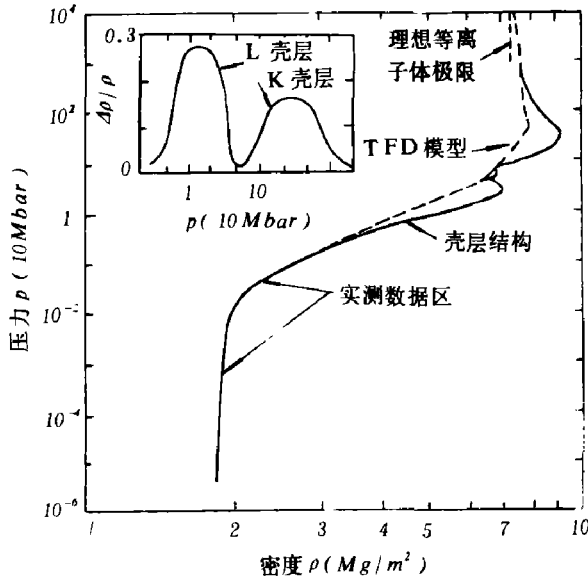


图2 铍的雨贡纽线 (本图取自文献 [ 8 ])

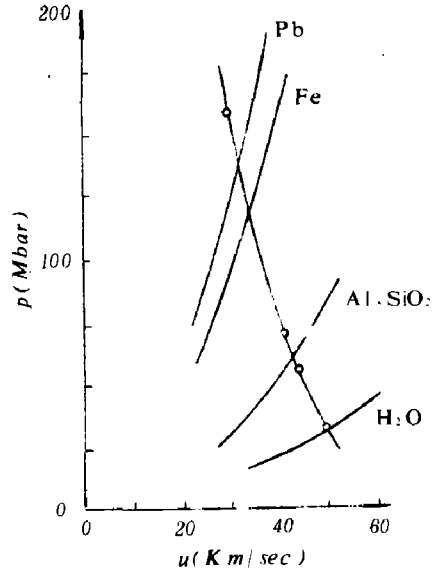


图3 超高压下Pb, SiO2, Al, H2O的雨贡纽线 (本图取自文献 [ 9 ])

从热力学知道,压力是内能体密度的一种度量。由此可知,当我们设法把有限的能量集中于被压缩物质的一个很小的体积内,实现能量在空间的高度集中,便可以造成高压条件。在实践中,由于这种高能量密度是很难约束的,故数百万巴以上的压力目前只能有赖于动态压缩技术。动态压缩是一种利用波传播过程把外力作用施于被压缩物质内部局部区域的一种技术;由于波具有有限的传播速度值,即外力的作用功不能“瞬时”地遍及被压缩物质的整体,即被作用物质由此获得的能量将有可能由于其自身的惯性而短时间地约束在离外力作用面不远的局部区域内,以实现能量的瞬时集中,达到实现高压的目的。由这种脉冲式外力作用所形成的波称做冲击波,它可用一个陡峭的波阵面来表征(见图4)。波阵面前方的物质是未受压缩作用的原始物质,波阵面后方的物质是经受过冲击压缩的物质。图1中的主雨贡纽线代表了从同一常态出发,由不同强度冲击波产生的冲击压缩终态的轨迹线。在冲击压缩过程中,由于它伴随有不可逆的热力学过程,故在产生高压的同时还伴随有高温。正是由于这个特点,冲击波技术也是一种能同时提供高压和高温条件进行科学研究的唯一手段。图1业已表明,当前的实验室动高压技术水平,其上限压力一

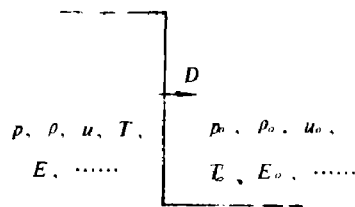


图4 平面冲击波

$p$ : 压力,  $u$ : 粒子速度  
 $\rho$ : 密度,  $D$ : 冲击波速度  
 $T$ : 温度,  $E$ : 内能

般不超过 10 兆巴, 相应的冲击温度约为  $2 \times 10^4 K$ 。因此, 近年来高压物理工作者正致力于解决把用这种技术获得的压力提高一个数量级的工作, 并且已经取得了可喜的初步成果。在这方面, 主要是沿着以下四条途径探索的, 它们是: (1) 核炸药; (2) 轨道炮; (3) 电炮; 以及 (4) 激光产生冲击波。其中, 以核炸药的超高压技术研究得最为成熟, 并且已经测得了一批超高压区的动力压缩数据。轨道炮、电炮及激光产生冲击波三项技术也取得了初步成果, 但还很不完善, 所得结果的精度也不高。本文将主要侧重于这些超高压技术的原理和进展状况, 而对实施物态方程实验测量的具体技术问题则仅作简单讨论。

## 一、核 炸 药

核炸药技术是利用核爆炸释放的巨大能量作为产生超高压条件的一种技术。以裂变材料计, 它爆炸时释放的能量约为  $1.7 \times 10^{10}$  千卡/公斤, 释放时间为微秒量级, 因而是一种体功率密度很高的压力能源。Альтшулер 等于 1968 年首次报导了利用核爆炸技术测量的 31 兆巴下铁的雨贡纽数据<sup>[10]</sup>, 以后又陆续发表了多种材料的雨贡纽点的实测结果<sup>[9, 11, 12 等]</sup>。但遗憾的是他们没有发表实验技术的细节。美国的 Ragan 等于 1976 年首次报导了他们在核爆条件下测得的钨的 20 兆巴的雨贡纽点数据<sup>[13]</sup>, 后来也陆续发表了铀 (238)、铝等材料在超高压区的实测雨贡纽数据<sup>[14, 15]</sup>。在以上的报导中, 以 Ragan 等发表的实验细节较为系统和完整。

Ragan 等发表的一种核炸药的实验系统示意图可见图 5。它的基本原理是, 在离核爆点约 1 米的地方, 放一块铀 (235) 层, 它的后面是一薄层塑料片, 再后是待测的钨样品。由核装置爆炸放出的强中子束使铀 (235) 层起裂变反应, 并导致其迅速地加热到约数十电子伏的高温。铀层的膨胀将压缩塑料层, 然后再向钨样品层驱动一强冲击波。塑料层是主要用做中子慢化层的, 其作用亦可从图 6 看出。由以上讨论可知, 把铀 (235) 层当做一块核炸药, 用核装置爆炸产生的强中子束引发它, 就可以向被测样品中驱动一高压冲击波, 进行雨贡纽线的实验测量。

他们用光测方法测量钨的冲击波速度  $D$ ——由于强冲击波伴随有高温效应, 故当冲击波到达钨的自由面时将出现强烈的闪光。在几个不同的厚度上记录下这些闪光讯号出现的时间, 便可计算出冲击波速度值。令人感兴趣的是他们用于测量粒子速度  $u$  的独特方法——对许多材料来说, 某些速度 (对应于一定的能量) 的中子将被该材料强烈地吸收, 即发生共振吸收现象。这个速度称为“共振吸收速度”。这个速度是以中子相对于核的运动速度计算的。如果吸收体 (核) 与中子在同一方向上运动, 则共振点要发生多普勒频移, 与静止吸收体相比, 将在较高的中子速度点上发生共振吸收现象。因此, 如果在具有明显共振吸收特性的样品中有一冲击波传过, 同时又有一束有一定能谱范围的中子进入样品, 则冲击波阵面后的物质将强烈地吸收某些速度点上的中子, 而冲击波阵面前方的物质则将在与之对应的、较低速度点

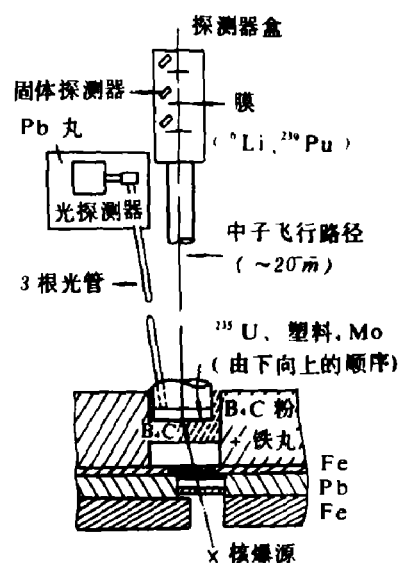
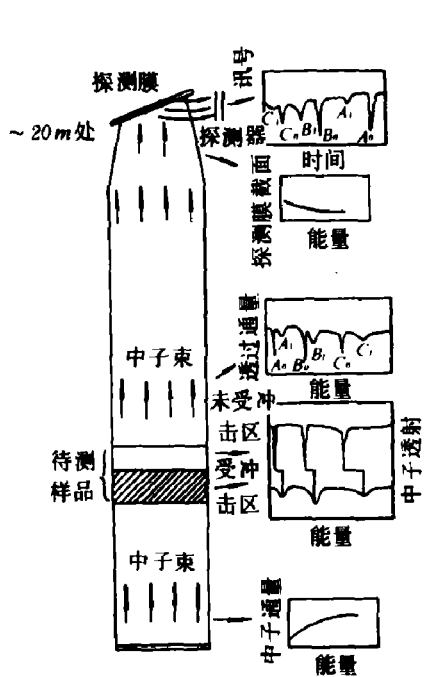


图5 Ragan 等核爆高压实验装置全貌示意图 (取自文献[16])

上的中子发生共振吸收。这两个对应的共振吸收峰之间的速度差，就是被测量样品中冲击波阵面后的粒子速度。以上测量粒子速度的过程可参见图 6。这是雨贡纽线的一种绝对测量的方法<sup>[18]</sup>，可用做超高压区测量标准材料的物态方程之用。



测量过程（其顺序是自上而下）

- (9) 每对共振峰间的距离对应于粒子速度；
- (8) 高能中子首先到达；
- (7) 记录固体探测器输出电流随时间的变化；
- (6) 用中子飞行时间法测量能谱；
- (5) 在透过中子通量中每一个 Mo 的共振吸收峰将表现为两个峰；
- (4) 对应于受冲击材料及未受冲击材料共振吸收点能量的中子通量受到明显的削弱；
- (3) 冲击波在待测样品中传播时，有一束一定能谱范围的中能中子穿过样品；
- (2) 通过塑料慢化层向 Mo 中驱动一平面冲击波，塑料层起脉冲中子源的作用；
- (1) 离核装置约 1 m 处的铀片（未画在图上），在核爆块中子的作用下发生裂变加热。

图 6 用多普勒频移法测量粒子速度的过程示意图各过程的说明示于图右。本图取自文[17]。

利用核炸药技术产生高压的途径当然不会仅限于上述的一种方式。例如，在原则上，利用核装置爆炸后产生的高温环境也可以在与之相接触的样品表面上直接产生高压。这时温度和压力的关系式可以写为

$$p = 0.83 \times 10^8 \frac{\rho}{\mu} T + 2.25 \times 10^{-15} T^4 \quad (1)$$

$$E = 1.25 \times 10^8 \frac{\rho}{\mu} T + 7.65 \times 10^{-15} T^4 \quad (2)$$

式中  $p$  为压力 ( $\text{dyne/cm}^2$ )， $E$  为内能 ( $\text{erg/cm}^3$ )， $\rho$  为物质密度 ( $\text{g/cm}^3$ )， $\mu$  为平均原子量 (在高温条件下可近似取为 2)， $T$  为温度 (K)。如果高温物质的密度  $\rho \approx 1 \text{ g/cm}^3$ ，则当温度为  $10^6 \text{ K}$  时，样品表面的压力约为 40 兆巴；当温度为  $10^7 \text{ K}$  时，样品表面的压力约为 400 兆巴。由此看出，由核爆高温条件所产生的压力是很高的，实验设计时需要解决的主要困难是所采用的冲击波探测系统能否经受核爆近区强烈的辐照环境。上述的高温环境可以是某种特殊结构的爆室，例如地下核试验中的爆室等。

1981年 Ragan 还报导了另一种用核爆能量驱动飞片加速

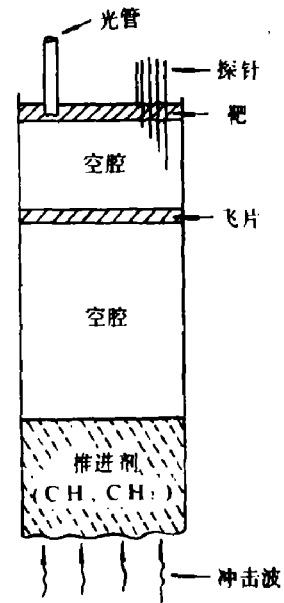


图 7 核爆能量对飞片无冲击加速装置示意图。强冲击波使推进剂汽化，充满空腔，并驱动飞片（取自文献[17]）

的装置示意图(见图7),其基本原理类似于压缩气体炮<sup>[3]</sup>,不过是它对飞片的驱动能源不同罢了。但是,由于它利用的是核爆能量驱动源,因而在实验设计中应注意两个重要环节:一是飞片的冲击加热不能过高(按“对称碰撞”的要求,一般不应超过摄氏几百度),二是要保持核爆产物气体对飞片的“平稳推动”,并削弱核爆气体—飞片界面不稳定性的影响<sup>[19]</sup>。因此,应对实验装置的结构设计做仔细推敲。Ragan未对这种装置的几何设计细节做具体报导。

从以上谈到的各种核炸药高压装置看到,在进行这种条件下的高压冲击波测量时,除去实验设计时需要进行繁长的理论设计工作外,在实验技术上需着重解决探测系统的抗核辐照能力。我们知道,布置在核爆近区的冲击波测量点处于很强烈的核辐照环境中,这里既有 $n$ 和 $\gamma$ 的直接辐照,又有其感生的电磁干扰场。冲击波探测器必须具有在这种环境下的正常工作能力。对这方面的实验技术问题,除了有若干研究报导外<sup>[20-21]</sup>,但对其确切的性能数据报导尚未见到。根据了解和分析,在精心设计的条件下,电测系统 $\gamma$ 剂量率不大于 $10^{12}$  rad/sec的条件下是可以正常工作的。中子剂量率的允许值也大约与此相仿。光测系统也可以在类似的或稍低剂量率的条件下正常工作。实际的安排是,测点距爆点越近,冲击波压力就越高,但核辐照环境十分严峻;测点距爆点远,虽然核辐照的强烈程度可以降低,但测点的冲击波压力也要降低。实验工作者必须在上述两个矛盾着的因素中综合权衡,适当选取。

## 二、轨道炮

早在本世纪五十年代末期,就有人报导过利用轨道式电磁力驱动弹丸达到高速的研究工作<sup>[22]</sup>,并在常规武器、航天技术等多种研究领域内得到了广泛的应用。经过多年的研究,特别是在对其电枢结构的研究取得了突破性的进展之后,从70年代末又开始用于超高压区物态方程测量的研究。在这方面,以美国的Hawke和Marshall等人的工作为主要代表<sup>[23,24]</sup>,他们预计,用电磁轨道炮所推动的飞片速度可达 $10-40$  Km/sec,用此速度飞片与中等密度材料靶相碰撞,约可产生 $10-100$ 兆巴的冲击压力。

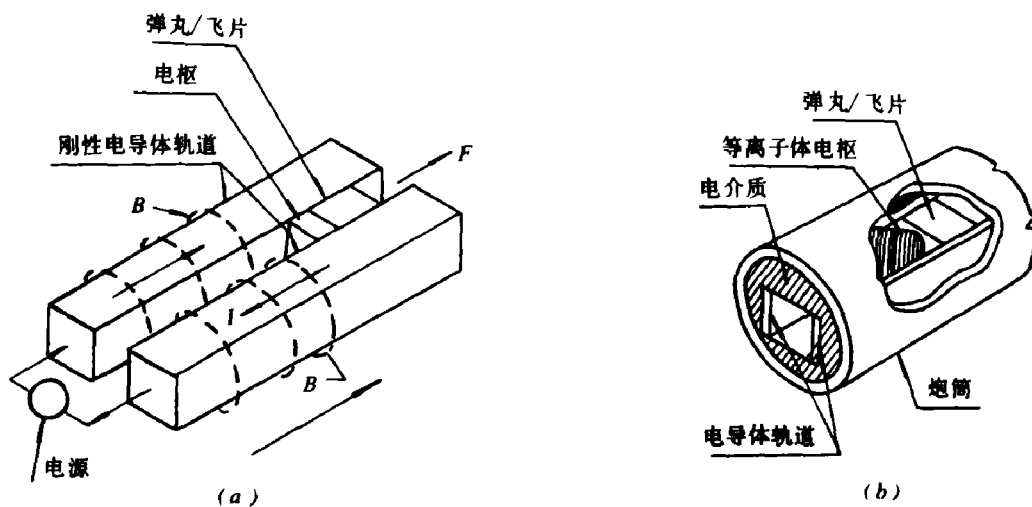


图8 (a)图: 轨道炮原理图—由电源馈入轨道之电流产生一磁场 $B$ , 该磁场与流过电枢的电流相互作用, 就会产生对轨道中弹丸背表面上驱动力。  
(b)图: 实际装置的剖视图—电介质用于固紧轨道的位置, 还与轨道一起约束弹丸后表面的等离子体(本图取自文献〔25〕)

轨道炮由一对刚性电导体组成其轨道炮,被驱动的弹丸本身也是一个导电电枢,由这两个主要部件构成了一个电回路(图8)。当有一强电流  $I$  流过此电回路时,作用在弹丸上的力  $F$  等于

$$F = \frac{1}{2} L I^2 \quad (3)$$

$L$  是单位长度轨道上的电感。为了保证在加速过程中弹丸飞行的稳定性,弹丸直径与其长度之比一般设计为  $0.65 - 0.5$ 。用于物态方程测量的飞片紧贴于弹丸的前表面上。在驱动高速飞片的轨道炮中,弹丸前的炮膛内应抽真空 ( $< 10^{-4}$  托),以避免高速弹丸前的气体摩擦损失和可能发生的气体电离效应所导致的杂散电弧击穿现象,免于使弹丸不能得到正常的加速作用。

以一个无损耗的轨道炮系统而言,利用动量守恒原理及(3)式,不难求得弹丸速度  $V$  关系式

$$V = \frac{L}{2M} \int I^2 dt \quad (4)$$

式中  $M$  为弹丸质量,  $t$  为时间。 $L$  一般为  $0.4 \mu H/m$ , 因此,如果在  $1$  毫秒内向轨道炮馈送  $1 MA$  电流,则可将  $5$  克重的弹丸驱动到  $40 Km/sec$  的速度。原则上,如欲获得高的飞片速度,可以通过增大电流或增加加速长度(或增长馈入电流的持续时间)的办法达到。但是如果加速长度增加过大,由于轨道上欧姆加热的能量损失也随之增大,对有效地利用能量是不利的;如果增大馈入电流,则施于弹丸后表面的加速力也随之增大,这时一方面将使弹丸发生附加的侧向膨胀,使之更好地保持电枢与轨道有良好的接触,但同时也将增大弹丸与炮膛间的磨擦损失,另一方面当加速力大于弹丸材料的弹性强度极限之后,对保持弹丸在飞行中的完整性又是很不利的,故最佳的峰值应力与强度极限的比值要通过实验确定(参见表1)。

表1 用FCG系统作能源的12.7 mm炮膛轨道炮的实验结果

加速长度 (m)	0.9	1.8	1.8
弹丸质量 (g)	2.9	3.1	3.1
电容器组的初始贮能 (KJ)	70	200	390
峰值电流 (MA)	0.6	0.8	1.2
峰值加速度 ( $10^6 g$ )	1.9	3.2	7
峰值应力/弹性强度极限	5	9	15
飞片速度 (Km/sec)	2.8	5.5	10
飞片完整性的观测结果	完整	完整	看不清

弹丸的电枢部分,实际上是一种等离子体电弧。它是由附在非导电材料制成的弹丸主体后表面上的一薄层金属或非金属材料,在高电压作用下迅速加热形成的一种等离子体型电枢,用以导通两条轨道间的电通路。这种等离子体电枢的一个重要优点是驱动电流不通过弹丸的主体,避免了弹丸主体的电加热。弹丸主体一般用聚碳酸酯等材料制成,故弹丸的总质量较小,这对增高飞片速度是有利的。

事实上,在弹丸的加速过程中,由能源馈入轨道炮系统的能量必将有一部分用于无功损耗,如轨道的欧姆加热、弹丸—炮膛壁之间的摩擦损耗等, Buchingham<sup>20</sup> 对此有过较全

面的分析, 因此实际的飞片速度与输入能量的关系将比(4)式估算的有所下降。Hawke 等对两种装置的数值模拟结果可见图9<sup>[23]</sup>。从图上看, 在50 MJ的贮存电能条件下, 用20米长的轨道可以把直径12.5 mm炮膛的钽飞片驱动到约36 Km/sec的速度(钽片厚度1.5 mm)。在理论上, 把贮存电能降低一半, 炮筒加长一倍, 也可以获得相同的飞片速度。用这个速度撞击钽靶, 可以获得约100兆巴的冲击压力。

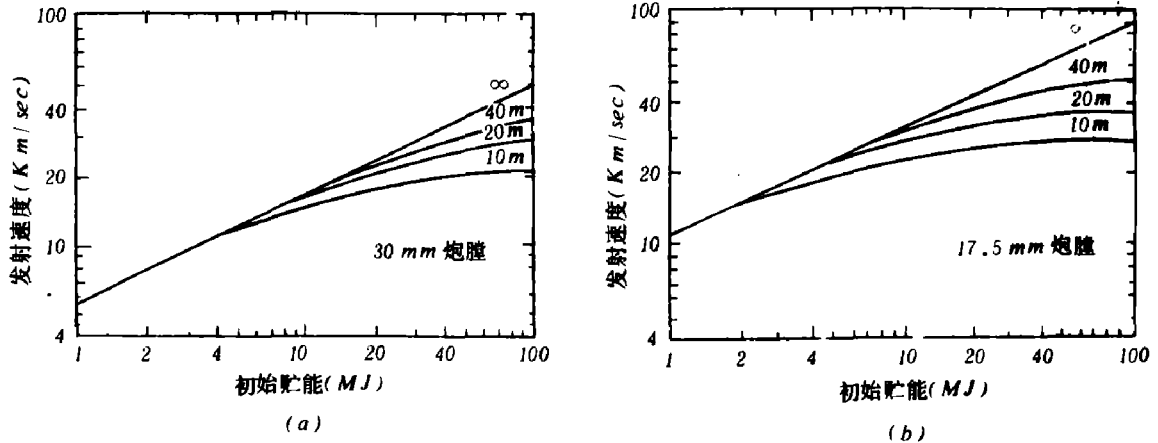


图9 发射速度与初始贮能的关系

(a) 25 mm 直径弹丸, 1.5 mm 厚钽飞片; (b) 12.5 mm 直径弹丸, 1.5 mm 厚钽飞片

轨道炮的能源可以是一个电容器组, 或用电容器组去激励另一个磁通量压缩发生器 (FCG) 以组成轨道炮的能源 (见图10)。前者提供的脉冲强电流的持续时间较短, 后者则便于将电流幅度及其持续时间作适当调整。例如, 我国的龚兴根、宗士瑜等曾研制过用400克炸药量、总重约1.8公斤的磁通量压缩发生器, 产生了约900 KA的脉冲大电流<sup>[27]</sup>。Hawke 等于1981年发表的实验结果可见表1<sup>[25]</sup>。由表看出, Hawke 等已基本研制成功10 Km/sec碰撞速度的、完整性较好的弹丸。

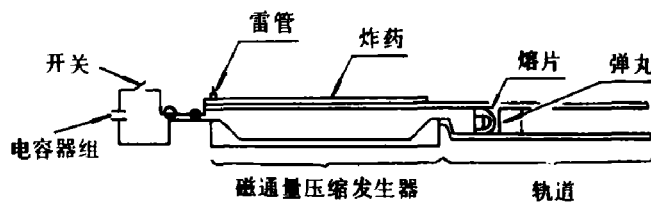


图10 FCG系统与轨道炮系统的连接图——由电容器组向FCG的电感放电, 输入电流。在FCG充电以后, 雷管引爆炸药, 把上部导体驱向下部导体。这时, 电路在FCG的输入端短接, 并“拘留”下FCG及轨道中之磁通。FCG中炸药的持续爆炸, 将把磁通驱进轨道中, 并在轨道炮中维持住有一定时间周期的、近于恒定的电流脉冲 (本图取自文献[25])

日本东京理工学院工程材料实验室的 Sawaska 等也在与 Hawke 实验结果报导的同时,发表了他们利用二级轻气炮与轨道炮联用的加速装置的计划<sup>[28]</sup>。他们准备先用二级轻气炮把弹丸加速到约  $5 \text{ Km/sec}$  的速度,在弹丸进入轨道炮后再进行第二次加速,使其速度提高到  $15 \text{ Km/sec}$ 。他们用的轨道为  $2 \text{ m}$  长,炮膛为  $8 \text{ mm}$  直径。轨道炮用电容器组 ( $500 \text{ KJ}$ ,  $10 \text{ KV}$ ) 作能源。根据数值计算,他们预计在峰值电流为  $1 \text{ MA}$  时,把  $1 \text{ g}$  质量的弹丸加到  $15 \text{ Km/sec}$ 。

总之,轨道炮技术目前已达到  $10 \text{ Km/sec}$  飞片速度的水平,下一步的工作除去要解决进一步提高飞片速度的问题外,尚需着重解决在轨道炮的强电磁干扰环境下冲击波参数的测量技术的问题。

### 参 考 文 献

- [1] Bridgman, P. W., *The Physics of High Pressure*, London Bell and Sons (1958).
- [2] Duvall, G. E. and Fowles, G. R., in "*High Pressure Physics and Chemistry*", Edited by Bradley R. S., Vol. 2, Chap. 9, Academic Press, New York and London (1963).
- [3] Fowles, G. R., in "*Dynamic Response of Materials to Intense Impulsive Loading*", Edited by Chou P. C. and Hopkins A. K., Chap. 8, U. S. A. (1972).
- [4] Laser-Driven Shock-wave Experiments, *Energy and Technology Review* (October 1979).
- [5] Кормер, С. Б. и Урлин, В. Д., *ДАН СССР*, 131 (1960), 542.
- [6] Кормер, С. Б., Урлин, В. Д. и Попова, Л. Т., *ФТТ*, 111 (1961), 2131.
- [7] Zink, J. W., *Phys. Rev.*, 176 (1968), 279.
- [8] Graboske, H. and Wong, L., *UCRL-52323* (1977).
- [9] Аврорин, Е. Н., Водолага, Б. К., Волков, Л. П., Владимиров, А. С., Симоненко, В. А., Черноволук, Б. Т., *Письма в ЖЭТФ*, 31 (1980), 727.
- [10] Альтшулер, Л. В., Моисеев, Б. Н., Попова, Л. В., Симаков, Г. В. и Трунин, Р. Ф., *ЖЭТФ*, 54 (1968), 785.
- [11] Трунин, Р. Ф., Побурец, М. А., Моисеев, Б. Н., Симаков, Г. В. и Попова, Л. В., *ЖЭТФ*, 56 (1969), 1172.
- [12] Трунин, Р. Ф., Побурец, М. А., Симаков, Р. В., Попов, Л. В. и Моисеев, Б. Н., *ПМТФ*, Вып. 4 (1972), 1043.
- [13] Ragan, C. E., Silbert, M. G. and Diven, B. C., *LA-UR-76-2286*.
- [14] Ragan, C. E., *Phys. Rev.*, A 21 (1980), 458.
- [15] Ragan, C. E., Diven, B. C., Rich, M., Teasdale, W., A. and Robinson, E. E., *1983-Conference digest on "Shock Waves in Condensed Matter"*, p. 28, Santa Fe, NW, (July 18-21, 1983).
- [16] Ragan, C. E., Silbert, M. G. and Diven, B. C., in "*High Pressure Science and Technology*" (*6th AIRAPT Conference*), Edited by Timmerhaus, K. D. and Barber, M. S., Vol. 2, p. 993, Plenum Press, New York and London (1979).
- [17] Ragan, C. E., in "*Shock waves in Condensed Matter - 1981*", Edited by Nellis, W. J., Seaman, L. and Graham, R. A., p. 644, American Institute of Physics, New York (1982).
- [18] McQueen, R. G., Marsh, S. P., Taylor, J. W., Fritz, J. N. and Carter, W. J., in "*High-Velocity Impact Phenomena*", Edited by Kinslow, R., pp. 294-419, Academic



- Press, New York and London (1970).
- [19] Taylor, G., *Proc. Roy. Soc. (London)*, **201** (1065)(1950), 192.
- [20] Ragan, C. E., Silbert, M. G., Ellis, A. N., Robinson, E. E. and Daddario, M. J., *LA - 6946-MS* (1977).
- [21] LLL H - Division Quarterly Report, *UCRL - 50028 - 75 - 1*, P. 16.
- [22] 可参见 Cable, A. J., in "*High-Velocity Impact Phenomena*", Edited by Kinslow, R., pp. 1-21, Academic Press, New York and London (1970).
- [23] Hawke, R. S. and Scudder, J. K., in "*High Pressure Science and Technology*", Edited by Voder, B. and Harteau, P. H., pp. 979-982, Pergamon Press, Oxford and New York (1980).
- [24] Marshall, R. A., *LA - 8000 - C* (1979).
- [25] Hawke, R. S., Brooks, A. L. et al., 同 [17], P. 179.
- [26] Buckingham, A. C., *UCRL - 82856* (1979).
- [27] 龚兴根 (私人通信).
- [28] Sawaoka, A. and Kondo, K., 同 [17], P. 696.

## ULTRAHIGH DYNAMIC PRESSURE TECHNIQUES

Jin Fuqian

### Abstract

The ultrahigh dynamic pressure techniques, currently investigated in the world, are reviewed in this paper. The capabilities, present situations and the existing problems in this field are included.