

误差是比较大的.

4 结论

本文首次提出用定向耦合器确定共振腔内场强的方法,给出了计算公式.同现行方法相比,它简单可靠,引入误差较小,对测试系统无严格要求.实验证明,该方法在原理上是成立的,可以用来确定微波铁氧体高功率吸收的阈

值场强.该方法不但可以确定腔内微波磁场强度,也可用来确定微波电场强度,可望用于研究水和其他介质经过高强度微波电场处理后的物理特性.

参 考 文 献

- [1] 黄宏嘉,微波原理,科学出版社,(1963),116.

气体炮技术*

王 金 贵

(中国工程物理研究院流体物理研究所,成都 610003)

摘 要 气体炮是当前世界上应用最广的实验室用冲击加载装置.由于气体炮具有高速发射弹丸的能力,它的冲击加载可在固体材料中产生几百 MPa 至几百 GPa 的冲击波压力,是研究材料在动态高压下的状态方程、本构关系以及断裂和相变的有效工具.同时,也是研究高速弹道学的理想装置.文章介绍了一、二级气体炮的一般工作原理和相关技术,讨论了其使用特点和当前水平,并简要介绍了几个典型的应用实例.

关键词 气体炮,冲击加载,冲击波物理

本世纪 50 年代,人类已经具有发射航天器的能力.摆在人们面前的一个重要问题是:如果航天器在太空以 8km/s 以上的速度运动时与陨石相碰,将会遭到多大的破坏? 60 年代以来,坦克和飞机的性能都有很大的提高.对坦克来说,不仅装甲的厚度不断地增加,而且在装甲的结构方面也发生很大的变化.采用“夹心饼干”式的复合装甲大大提高了抗御破甲弹的能力.飞机的航速已经达到 2.5—3 马赫数.在这样快的飞行速度下,原来初速仅约 1km/s 的高射炮射击的命中率显著下降.火箭技术的发展特别需要一种观测缩比箭体模型飞行气动力性能的手段——弹道靶.高压物理的发展要求人们产生更高的压力载荷.当前最有效的实验室条件是利用高速飞片与材料相碰,借助所产生的强冲击波对材料冲击加载.这些技术领域的发展,刺激人们更深入地研究高速发射技术.

人们已经探索了加速弹丸和粒子的一些方

法. C. N. Scully 等^[1]报道了采用电热炮使小型硅酸盐球体 (10^{-8} — 10^{-6} g) 的速度可达到 20km/s. 球体由锂离子流的气动力加速,由电弧放电给离子流供能. J. F. Friichtenicht 等^[2]用静电方法把小型带电粒子(直径为 0.1—10 μ m)加速到高达 28km/s 的速度. S. Kronman 等^[3]把 0.01—1g 的离散粒子用向心爆轰技术已经加速到 ~21km/s 的速度. 虽然这些发射技术创造了相当高的速度指标,但是从应用于实验研究角度看,都还达不到能与气体炮发射器相竞争的地步.

与其他发射器相比,气体炮是一种特别通用的装置.这是因为它能发射各种形状的弹

* 国家 863 高技术计划资助项目;国家自然科学基金资助项目;中国工程物理研究院科学基金资助项目.

1995 年 6 月 5 日收到初稿,1995 年 11 月 1 日收到修改稿.

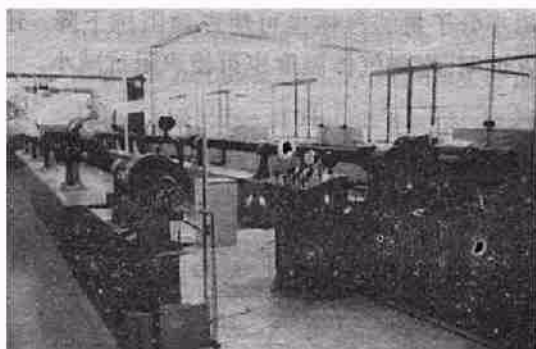


图1 中国工程物理研究院的一级气体炮

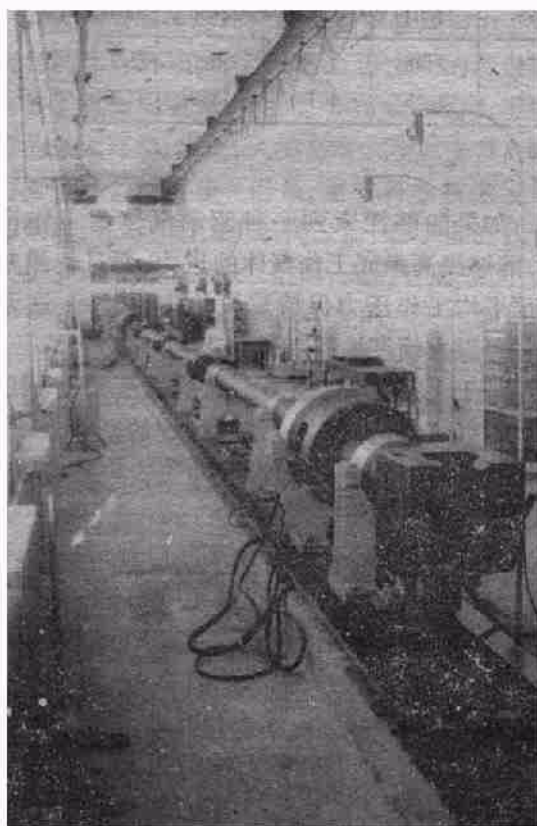


图2 中国工程物理研究院的二级轻气炮

丸,弹丸的质量、尺寸和材料有宽广的适应范围。它最突出的优点是,弹丸在承受较低的加速度和较小应力的情况下,能获得高速度。虽然这种发射器产生的速度还没有达到上述几种方法创造的速度指标,但是它现有的能力和优良的使用性能,包括了当今许多研究工作者感

兴趣的飞行范围,所以气体炮已成为非常有效和实用的高速试验设备。图1是两门一级气体炮的照片。其中左边一门口径为57mm,可使200g弹丸发射后速度到达1.4km/s;右边一门口径为100mm,可使500g弹丸发射后速度到达1.5km/s。

图2是一门二级轻气炮的照片。该炮配有30和37mm口径两套发射管。在30mm口径发射管上,曾将30g弹丸发射到8.62km/s;在37mm口径发射管上,曾将51.75g弹丸发射到6.85km/s。

1 气体炮工作原理的讨论

就一般火炮而言,它仅能提供 $\sim 2\text{km/s}$ 的弹丸速度。这个速度上限是由于火药气体分子量太大造成的。用分子量大的气体加速弹丸时,气体有很大一部分能量用来加速气体本身,因此用来加速弹丸的能量就减少了。所以,即使非常轻的弹丸所能获得的最大速度也是比较低的。从表1给出的气体性能参数^[4]可以清楚地看到,以不同种类的气体注入同一容器内,获得相同的压力所需的气体质量是很不相同的。假设使某容器内气体压力达200MPa,那么注入氢气时,其质量相当空气的7%,或相当火药气体的4%就可以了。

直观上很容易理解,若要提高弹丸速度,必须在有限的气体压力做功时间内,尽可能增大气体的流动速度。气体动力学将这两者用以下关系式联系起来^[4]:

$$dP = \rho a du,$$

式中 P 为声波阵面上的压力; ρ 为气体密度; a 为气体音速; u 为气体粒子速度。从上式可知,为了产生较大的气体粒子速度变化而仅引起较小的压力变化,那就必须要求气体的 ρa 值(称作声阻抗)要小。由气体动力学基本关系式^[4]可以推导出,对于给定的气室压力 P_r 与气体压力 P 之比 P_r/P 来说,减小 γ 值(气体比热比)或增加气体音速 a ,在给定压力损失情况下,将使气体速度增加。音速是一个很重要的量,使

用不同气体可使它的选择余地很大. 而 γ 值对不同气体而言, 变化范围是十分有限的. 此外, 选用小分子量的气体也可使声速阻抗下降. 还可以证明, 增加气体温度也可使声阻抗减小.

表 1 推进气体的性能

气体	压力 P (MPa)	比热比 γ	密度	音速 a (m/s)	声阻抗 ρa (kg/m ² s)	a/γ (m/s)	定压比热 C_p (kJ/kgK)	定容比热 C_v (kJ/kgK)	$C_p T$ (kJ/kg)	温度 T (K)
氢	0.1	1.40	0.0887	1260	1.12×10^2	899	14.3	10.2	3910	273
	200 *	1.40	20.2	3730	7.53×10^4	2660	14.3	10.2	34200	3392
氦	0.1	1.67	0.176	971	1.71×10^2	583	5.19	3.11	1420	273
	200 *	1.67	16.8	4440	7.46×10^4	2660	5.19	3.11	29700	5723
空气	0.1	1.40	1.27	330	4.19×10^2	236	1.01	0.722	274	273
	200 *	1.40	291	974	2.83×10^5	695	1.01	0.722	2400	2376
火药 气体	0.1	~1.25	1.23	318	3.91×10^2	254	1.48	1.18	405	273
	200 *	~1.25	542	681	3.69×10^5	545	1.48	1.18	1850	1250

* 等熵压缩, 忽略热产生的问题和分子间相互作用力.

从表 1 数据可以看出, 在满足低声阻抗 ρa 和高音速 a 方面, 氢和氦明显比火药气体优越. 在低分子量和低的比热比方面, 氢是比较优越的. 因此, 在给定的火炮上, 使用氢作为驱动气体会得到最好的极限性能. 从表 1 给出的温升数据可以看出, 假定等熵压缩至 200MPa 时, 氢气的温升比氦气要小得多. 高温气体烧蚀发射管会在工作气体中掺入很多金属蒸气, 加大了气体分子量, 使气体性能下降. 因此, 在相同工作压力下, 氢气对发射管的烧蚀作用比氦要小得多. 但是, 从使用安全方面考虑, 氦又超过氢.

综上所述, 如果在火炮的基础上更换轻质气体作为驱动介质, 将会大大提高弹丸速度.

然而, 火炮的气室容积在初始发射时刻是最小的, 随着弹丸运动, 气室容积将逐渐增加. 因此作用在弹丸底部的气体压力也在逐渐下降. 即使换成轻质气体, 情况也是如此. 对于一门口径已确定的炮而言, 弹速越高, 所需的气体压力也越高. 如果能够把初始注气压力提得很高, 加到弹丸底部的平均压力仍然不会太高. 而且过份提高初始注气压力也受到注气设备能力的限制.

如果能够探索到一种驱动气体的工作模式, 能够提高弹底工作气体的压力, 而且使弹丸底部平均工作压力保持较长的作用时间, 这无疑将可以大幅度地提高弹丸速度.

基于上述思路, 于是在火炮的基础上研究成功一级气体炮; 而在一级气体炮的基础上, 改善弹丸底部工作气体压力与时间的关系曲线, 就研制成功了二级轻气炮.

1946 年, 美国研制成功第一门利用轻质气体作为驱动气体的一级气体炮^[5], 1995 年, 美国 Z. I. Slawsky 等^[6]发展了第二种工作模式的轻气炮——二级轻气炮. 以后, 美国、加拿大、英国和法国以及我国一些单位陆续建立了气体炮设备, 使这种类型的弹丸发射装置成为产生高达 10km/s 以上速度的极其有用的试验设备.

2 一级气体炮

典型的一级气体炮如图 1 所示. 它由气室、发射管和供碰撞实验用的靶室等组成. 靶室上方管道连接抽真空机组. 气室和发射管之间是发射释放装置. 由压缩机产生的高压气体借助两门炮之间的注气控制台, 可分别注入两门炮

的气室。弹丸装入系统以后,真空系统将气室、发射管和靶室抽真空,然后将高压气体注入气室。接到发射指令后将释放装置解脱,高压气体立即推动弹丸完成加速过程,并在靶室内进行碰撞实验。实验信号由靶室壁上特设窗口引到电子学或光学等记录系统上。

最使设计者感兴趣的一级炮部位是释放机构的设计。也就是说,用什么方式使气室内的高压气体迅速作用到弹丸上。图3给出了中国工程物理研究院100mm一级气体炮使用的双破膜式释放机构(其他常用的机构见文献[7])。

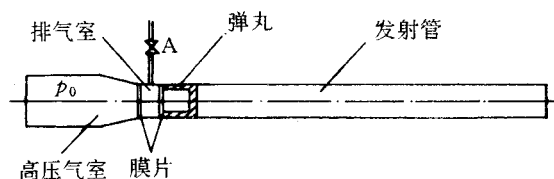


图3 双破膜式释放装置示意图

高压气室预定充气压力为 P_0 。首先将排气室(或称双膜室)充入 $P_0/2$ 压力,然后再将高压气室充到 P_0 压力。选用的两个膜片破裂压力大于 $P_0/2$ 而小于 P_0 ,此时两个膜片两侧的压力差都不能引起膜片破裂。释放动作是由于打开A阀排掉排气室内压力而完成的。由于排气室突然排气,其压力迅速下降,左端的膜片不能承受 P_0 压力而立即破裂;高压气室的气体进入排气室后又使右端膜片破裂。于是高压气体进入发射管推动弹丸高速运动。

这种释放机构的瞬时性较好,常在大口径的炮上使用。为了与不同的注气压力 P_0 匹配,必须用实验方法确定多种强度规格的电影片。

3 二级轻气炮

图4是二级轻气炮的工作原理示意图。借助火炮系统发射一个塑性活塞,大质量的活塞以较平稳的速度压缩泵管内预先注入的轻质气体,使其压力和温度不断上升。当高压段内气体压力达到某预定值时,该膜片破裂,开始驱动

弹丸运动。在弹丸高速运动过程中,活塞进入锥形高压段,并发生塑性变形。弹道计算的重要指导作用在于:控制装填参数(例如火药质量、初始充气压力、两道膜片的破裂压力、活塞和弹丸质量等)的变化,力争使弹丸移动所增加的气室容积能够由活塞挤进所压入的容积补偿,保持弹丸后部驱动气体具有压力较高、持续时间较长的压力平台,从而可以获得最好的气动力性能。以后的过程随着弹丸速度急剧增加和活塞消耗完自身的动能而停留在高压段内,弹丸将以一级气体炮的工作方式完成最后的加速。二级轻气炮采用前级火药泵和塑性活塞的方法,可将驱动气体压力压缩到几百MPa,解决了提高弹底工作压力和改善弹底驱动压力与时间的关系曲线两个问题。因此,二级轻气炮的弹丸速度取得了突破性的提高。

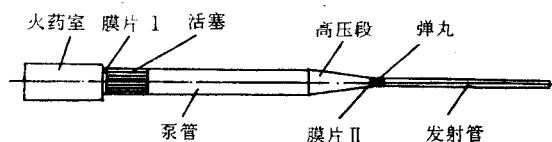


图4 二级轻气炮工作原理示意图

表2列出的是国外一些单位^[4]和中国工程物理研究院(CAEP)的二级轻气炮^[8]已达到的最高弹速指标。这是当前国际上比较有代表性的数据。图5给出了由表2数据作出的弹丸速度和弹丸质量的关系。弹丸速度作为纵坐标。为了比较不同口径二级轻气炮的实验结果,横坐标用弹丸质量除以发射管口径 D_s^3 。这些速度是在多门几何形状很不相同的二级轻气炮上获得的。各种弹丸质量所获得的最大速度包络线表明,当弹丸质量增加时将损失多大的速度。

如果人们关心的是获得高弹丸动能,而不是高速度的话,增加弹丸质量就能增加弹丸的能量。图5中最重的弹丸为 $m_s/D_s^3 = 4\text{g/cm}^3$,速度为4.18km/s;最轻的弹丸为 $m_s/D_s^3 = 0.26\text{g/cm}^3$,速度为11.29km/s,但重弹丸的动

表2 国内外部分二级轻气炮的弹速指标*

序号	发射管口径 (mm)	弹丸质量 (g)	最高弹速 (km/s)	设备所在单位
1	5.6	0.045	11.30	Ames [安曼研究中心(美)]
2	5.6	0.076	9.84	
3	7.1	0.163	9.24	
4	12.7	0.941	9.46	
5	25.4	7.418	8.44	
6	38.1	15.205	9.07	
7	38.1	50.0	5.21	CARDE (加拿大军械研究中心)
8	101.6	1251.0	4.57	
9	7.6	0.21	8.84	Douglas [道格拉斯公司(美)]
10	12.7	1.00	9.14	
11	19.1	10.0	7.62	
12	31.8	10.0	7.92	
13	31.8	25.0	7.31	
14	5.6	0.0533	10.80	GM [通用汽车公司(美)]
15	20.0	3.73	9.90	
16	60.0	87.0	8.90	
17	12.7	1.30	8.17	NOL [海军军械研究室(美)]
18	32.0	73.0	5.55	
19	50.8	82.0	6.89	
20	7.6	0.41	9.20	NRL [国立研究实验室(美)]
21	21.0	5.20	8.00	
22	63.5	253.0	6.16	
23	6.4	0.08	9.20	RARDE (英国军械研究发展中心)
24	25.4	14.0	5.18	
25	30.0	30.0	8.62	CAEP (中国工程物理研究院)
26	30.0	62.5	5.56	
27	37.8	51.75	6.85	

* 除 CAEP 数据取自文献[8]外,其余数据取自文献[4].

能是轻弹丸动能的 40 倍。

质量最小的弹丸($0.026\text{g}/\text{cm}^3$)获得了最高的速度,它是一个聚乙烯圆柱体,材料密度为 $0.95\text{g}/\text{cm}^3$,长度约为口径的 1/3 倍。这大概是能成功发射的最小长度。长度再小将无法保持飞行姿态的稳定性,并很难克服驱动气体通过弹丸圆柱面时产生的泄漏。

4 气体炮优越的使用性能

冲击压缩技术可以在物质中产生高达几百 GPa 的冲击波压力。它已被广泛应用于确定冲击载荷下各种材料特性的研究。最初的超高压是利用平面波爆轰装置加速一薄飞片,获得高速度。利用这种方法可将 2mm 厚度的铝飞片加

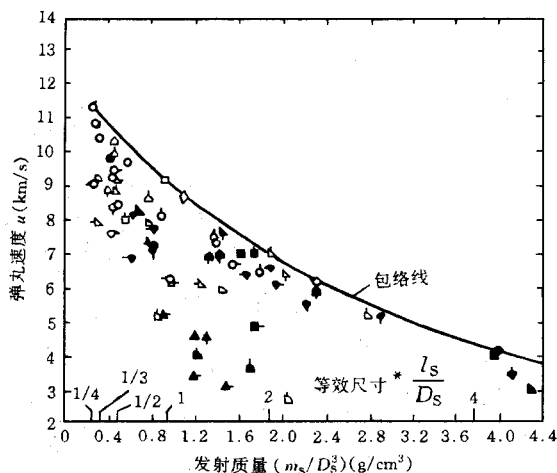


图5 部分代表性二级轻气炮获得的最高发射速度
(* 是对比重为 1.2 的聚碳酸酯而言;图中实心符号
为套座模型的数据;图中空心符号为表 2 中所列单位
的数据,例如◇为中国工程物理研究院的数据)

速到 $\sim 5\text{km/s}^{[9]}$ 。由于爆轰产物的边侧飞散,常使飞片击靶时具有几十 ns 的波形差。而且炸药爆轰时一个压力约几十 GPa 的冲击波首先传入飞片内,使飞片击靶时有一定的残留温升,不能保持完好的机械加工状态和初始热力学状态。

利用气体炮发射的平头弹丸,击靶时的波形差仅为几个 ns。平头弹丸飞行出炮口时的轴线偏离炮膛轴线的角度对于一级气体炮约为 0.03° ,对于二级轻气炮约为 $0.5^\circ\text{--}1^\circ$ 。所以气体炮发射弹丸产生的碰撞具有极好的平面性和极小的倾斜角,使实验数据更为真实和易于处理。推动弹丸运动的气体压力仅为几十 MPa 到几百 MPa,在弹丸设计上完全可以保证该压力不作用到碰撞飞片上。因此可使飞片不产生温升,保持了飞片的初始加工状态和热力学状态,便于实现理想初始条件的碰撞。

利用化学爆炸方法很难产生具有足够使用面积的更高速度飞片,更难产生每秒几十米的低速度,而气体炮可以产生每秒几十米的低速度直到 8km/s 以上的高速度,并且弹丸速度可以连续调整,重复发射的稳定性很好。

气体炮是实验室设备,工作环境良好,弹丸是在真空靶室内进行碰撞实验的。这可以排除

许多有害的干扰因素。仪器和试样靶之间的信号电缆可以短到 3m 以下,极大地提高了电测信号的保真度。靶室内不会产生气体抖动而干扰光学测试系统。

气体炮靶室内充入一定量的氮气,弹丸设计成几瓣弹托组成,中间包裹着任意感兴趣形状的模型,借助气动力实现弹托和模型分离。可以模拟该模型在大气层不同高度飞行。这种能力是其他发射手段不可比拟的。

5 气体炮应用简介

利用气体炮发射中低速弹丸进行碰撞实验,可以研究材料或结构的微损伤和破坏。从已经回收的受碰撞材料的放大照片中发现,致密的金属材料在被具有 $100\text{--}200\text{m/s}$ 的速度的弹丸撞击后,内部出现大量的微孔洞。随着碰撞速度增加,小微孔互相贯通成为大孔。人们可以对微孔形成机制作出解释。低速碰撞可以用来研究火工品的安全性。由不同速度的碰撞实验,可以找出引起起爆或燃烧的碰撞速度阈值,分析在阈值以下的碰撞速度将会带来什么危害。由此可以判断运输过程中发生的碰撞或弹体落地发生的碰撞是否安全?能否继续保持原有的使用性能?还可以在气体炮弹丸内镶嵌不同形状的缩比弹体模型,对不同靶材料进行碰撞实验。例如对水泥材料碰撞可以观察水泥孔洞、穿透深度、裂纹发展情况与弹体形状和碰撞速度的关系。这类研究对民用建筑、军事设施(如水泥工事、机场跑道)都有重要的实用价值。如果碰撞的是一单一钢板或间隔放置的多重钢板,可以研究弹体的穿透性能或者观察钢板的装甲性能。

在弹丸前端粘上平板材料与待研究的靶材料碰撞,人们可以研究材料在强冲击载荷作用下,发生的动态断裂、动态屈服强度、相变规律、本构关系等。这些研究得到的规律和数据,是对材料在特殊条件下(例如炸药爆炸对材料的作用)进行理论研究和数值计算的基础。

高速弹丸的碰撞实验可以研究材料的冲击

压缩曲线. 如果飞片和靶由相同材料制成, 测量每次碰撞实验的弹丸速度和靶内冲击波速度, 则根据冲击波基本关系式^[9]可知, 此时冲击波后的粒子速度等于弹丸速度的二分之一. 对多组实验, 可以将冲击波速度 D 和粒子速度 u 测得的数据表示在 $D-u$ 直角坐标系上, 便得到一条拟合曲线. 用相同材料制成的飞片和靶将这条曲线确定的 $D-u$ 关系与冲击波基本关系式联立, 便可以得到冲击波压力 P_H 与材料在此压力下的密度 ρ_H 的关系曲线. 这条 $P_H-\rho_H$ 曲线就表示材料受冲击压缩后从初始状态变到终点状态的密度值与冲击压力的对应关系. 借助以上实验结果, 根据物态方程理论可以计算高压状态方程. 中国工程物理研究院利用二级轻气炮已经在钨合金中获得 500GPa 的实验数据^[10]. 这是当前在实验室条件下所能产生的最高压力.

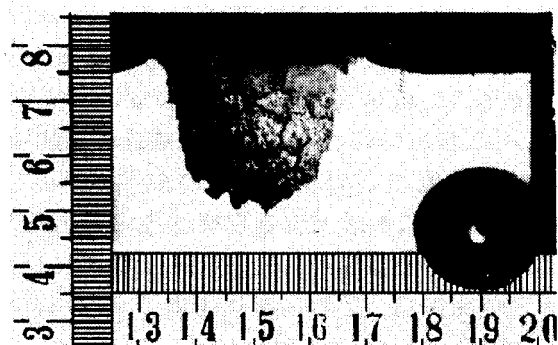


图6 直径5mm、质量0.5g的钢珠发射到速度为7.3km/s时与LY₁₂靶相碰撞生成的弹坑剖面照片
(右下角亮点是钢珠实际大小)

超高速碰撞现象的研究具有极其重要的应用背景. 因为太空中人造的星球或天体中星球之间的碰撞问题都具有几 km/s 的高速碰撞特征. 研究这类问题可以为 航天器的防护设计提

供理论和实验的依据, 还可以解释或预估天体物理中发生的碰撞现象. 利用二级轻气炮发射各种感兴趣材料制成的模型, 使它与相应的靶材料进行碰撞, 找出碰撞能量与弹坑的关系, 得出无量纲化的拟合曲线. 利用这条曲线可以对更大尺寸的碰撞进行预估. 如果发射某种岩石模型与岩石靶碰撞, 所得的曲线可以预估成分相近的星球碰撞问题. 根据这种曲线还可以对现有的坑体, 推算是由多大尺寸和多高速度的碰撞体产生的. 利用二级轻气炮发射的高速弹丸还可以进行结构抗御能力的研究. 研究结果已经证明, 采用多层间隔靶比与多层靶厚度相同的单一靶具有更强的抗御能力. 这一结果已经用到航天器外壳和坦克装甲设计上. 图6是利用二级轻气炮将自行车滚珠(直径5mm, 质量0.5g)发射到速度为7.3km/s时与硬铝靶碰撞产生的弹坑剖面照片^[11]. 钢珠已经熔化在坑壁上. 图中右下角的亮点是钢珠的实际大小. 生成弹坑体积为钢珠体积的143倍.

参 考 文 献

- [1] C.N. Scully et al., Proc. of the 4th Hypervelocity Impact Symposium, (1960), 1.
- [2] J.F. Friichtenicht et al., Proc. of the 7th Hypervelocity Impact Symposium, (1965), 249.
- [3] S. Kronman, Proc. of the 5th Hypervelocity Impact Symposium, (1962), 78.
- [4] R.E. Berggren and R.M. Reynolds, AD-713915.
- [5] W.D. Crozier and W. Hume, *J. Appl. Phys.*, **28**(1957), 892.
- [6] Z.I. Slawsky, NOL Report, (1959), 1238.
- [7] 王金贵, 爆炸与冲击, **8-1**(1988), 89.
- [8] 王金贵, 高压物理学报, **6-4**(1992), 264.
- [9] 经福谦等, 实验物态方程导引, 科学出版社, (1986).
- [10] 王金贵、施卫丰, 高压物理学报, **9-3**(1995), 195.
- [11] 王金贵, 高压物理学报, **7-2**(1993), 143.