

二级轻气炮模拟空间碎片 超高速碰撞试验技术

杨继运

(北京卫星环境工程研究所, 北京100094)

摘要: 二级轻气炮是用来模拟空间碎片超高速碰撞效应的重要设备。文章首先介绍了目前二级轻气炮国内外的发展的概况; 阐述了其工作原理及所使用的工作气体和试验用品; 然后讨论了影响二级轻气炮性能的初始注气压力、活塞速度、弹丸释放压力、活塞质量、弹丸质量等若干参量; 最后对反映二级轻气炮性能的重要指标弹丸出口速度和动态碰撞角的测试技术和方法进行了分析。

关键词: 二级轻气炮; 试验技术; 影响参量; 测试技术

中图分类号: V524.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379 (2006) 01-0016-07

1 引言

众所周知, 太空中已经存留着大量的空间碎片。随着人类航天活动的频繁开展, 其数量还会进一步剧增。它们对航天器超高速碰撞所造成的危害严重威胁着在轨运行和即将发射的航天器, 尤其是载人航天器的安全。从1957年发射第一颗人造地球卫星至今, 空间碎片总数已经超过四千万个, 总质量已达数百万公斤。

空间碎片和航天器的平均撞击速度是10 km/s。大于10 cm的空间碎片将导致航天器毁灭性损坏, 由于目前能够通过地基望远镜或雷达测定其轨道, 可以采取预警规避的策略有效防止其伤害; 厘米级空间碎片也可导致航天器彻底损坏, 目前尚无切实可行的防护措施, 唯一的办法只能是在航天器设计及运营上, 设法降低风险; 毫米级空间碎片能够导致航天器表面产生撞坑甚至使舱壁穿孔, 撞击部位不同, 其危害程度也有所差异; 微米级空间碎片的单次撞击对航天器的结构强度虽然不会造成直接的影响, 但其累积撞击效应将导致光敏、热敏等器件功能下降。因此需要采取必要的防护措施, 积极开展空间碎片防护技术的试验研究。

为此, 首先就是建立具有超高速碰撞试验能力的地面模拟设备。经过近几十年的研究, 目前可用于超高速碰撞试验的试验技术主要有以下几

种: (1)炸药爆轰加载技术; (2)气体炮加载技术; (3)炸药枪加载技术; (4)电炮加载技术; (5)强激光驱动发射技术; (6)磁压缩驱动发射技术。其中, 气体炮设备不仅可以发射各种形状的弹丸, 而且弹丸的质量、尺寸和材料有宽广的适应范围, 因此, 气体炮设备是一种模拟超高速撞击试验的比较通用的装置。它最为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可获得较高的速度, 更为重要的是同一速度的可重复性好, 这就为评价空间碎片防护方案提供了极为有利的条件。

2 二级轻气炮设备概述

在气体炮出现之前, 火炮是冲击动力学研究的重要研究工具。一级气体炮是在火炮的基础上改用压缩气体发射弹丸的, 二级轻气炮则是用火炮作为压缩级再加上气体炮所构成的发射器, 根据所需弹丸速度不同, 可以用空气或轻质气体作为一级气体炮的工作介质。因此, 二级轻气炮是一种在一级气体炮基础上加以改进用于追求更高弹速的设备, 它利用炸药爆炸时瞬间释放的能量, 将处于低压状态的工作气体在较短时间内压缩到轻气炮的高压段内, 当工作气体被压缩到很高的压力状态后再迅速膨胀推动弹丸加速。

二级轻气炮结构简图如图1所示。

收稿日期: 2005-08-30; 修回日期: 2006-01-09

作者简介: 杨继运 (1975-), 男, 工学博士, 现从事空间碎片防护以及断裂力学与损伤力学方面的研究。联系电话: (010) 68746609; E-mail: yhahay@sina.com

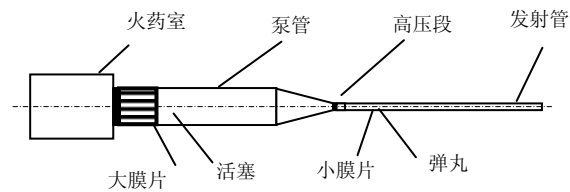


图1 二级轻气炮结构简图

Fig. 1 Sketch of two stage light gas gun

1946年，美国成功研制了第一门利用轻质气体作为驱动气体的一级气体炮。1995年，美国Z. I. Slawsky等通过改善弹丸底部工作气体压力与时间的关系曲线，研制成功了二级轻气炮设备。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。目前，美国拥有数十座二级轻气炮专门从事超高速碰撞的试验技术研究。这些设备主要集中在NASA的Johnson Space Center, AEDC, AMES气动中心以及LLNL和SNL等国家重点实验室。我国自20世纪70年代末以来，也相继研究了二级轻气炮设备。

3 二级轻气炮试验技术

3.1 工作原理

二级轻气炮由压缩级和发射级组成，第一级压缩级里的贮能气体推动活塞压缩第二级里的轻质气体，第二级发射级里的轻质气体再加速弹丸。通常用火炮的火药燃烧气体作为第一级驱动气体，也就是说把固体火药点火之后，二级轻气炮就开始工作了。当火药产生的压力超过某一压力值时，大膜片破裂，大质量活塞以较低且平稳的速度压缩泵管内预先充入的轻质气体，使其压力和温度不断上升。当泵管内小膜片左端压力达到某预定值时，该膜片破裂，高压气体驱动弹丸开始运动。在弹丸加速运动过程中，活塞仍然不断

向轻质气体传递能量。特别是由塑性材料高压聚乙烯制成的活塞进入高压段的锥形段时，其头部速度明显提高，使得作用到弹丸底部的气体压力有一短暂的等底压阶段。弹丸在该短暂平台压力作用下以匀加速方式获得较高速度。当弹速进一步提高时，后部活塞挤进程度有所下降，直到停止。此后弹丸在发射管内继续加速，一直飞出炮口。

综上所述，二级轻气炮的压力释放时间由两个膜片的破裂强度调整。强度高、尺寸大的高压段是连接泵管和发射管的重要部件，活塞进入高压段后开始变形，由锥形壁的摩擦和挤压以及前端气体压力所形成的阻滞力，使其不断减速直至停止运动。锥形高压段提供的缓冲作用使二级轻气炮的寿命得以延长，成为可以长期重复使用的实验设备；并且，锥形高压段还为进入发射管的气体提供了平滑流动的过渡区。

3.2 工作气体

就一般火炮而言，它仅能提供1~2 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可以清楚地看到^[1]，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有较大差别。假设使某容器内气体压力达200 MPa，那么注入氢气时，其质量仅相当空气的7%，或相当火药气体的4%就可以了。所以，更换轻质气体作为工作介质肯定对提高弹速是有好处的。

表1 推进气体的性能
Table 1 Properties of propulsive gases

气体	压力 $p/$ MPa	绝热指数 γ	密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	声速 $a/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	声阻抗 $\rho a/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	a/γ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	定压热容 $C_p/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	定容热容 $C_v/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$C_p T/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	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。

3.3 试验用品

3.3.1 弹丸

作为二级轻气炮能量传递的最后一个部件,在发射过程中弹丸应保持完整,不能有破碎等现象出现;同时,弹丸在发射管中运动时应有自密封性能,防止后部推进气体从弹丸与管壁间的间隙泄漏到弹丸前面。目前,弹丸有两种结构形式。

(1) 分解式弹丸

分解式弹丸用于发射复杂模型,如小圆球、火箭头部缩比模型等。它有几瓣组成,中间镶嵌着要发射的模型,发射时模型受发射管壁的约束,在发射管中外形仍成圆柱体形状。当它飞出发射管时,受到靶室内预先充入的稀薄气体的气动力作用,几个瓣开始散开,改变飞行方向,最后打到阻滞板上,而中心部的模型仍沿原先的弹道轨迹飞出阻滞板中间的孔洞。这种弹丸的目的是观测模型的气动力性能以及其它的有关现象,它把弹丸的整体质量作为发射质量,弹丸的密封有特殊的设计要求。

(2) 整体式弹丸

整体式弹丸是用聚碳酸酯、高压聚乙烯等塑料制成的圆柱体,在它的碰撞面上粘上感兴趣的材料,尾部是一个锥形裙体,用来阻止气流的泄漏。圆柱体部分与发射管内径尺寸相同,稍有负公差。裙体边缘外径大于发射管,需用力才能使其变形推入发射管。发射时,后部气流在裙体上的分力使裙边紧密贴在发射管上,隔离了后部气体向前泄漏。发射这种弹丸最关心的是碰撞板在飞行后能否保持原先的平面性,因此,圆柱体部分的长度大约是口径的 $2/3 \sim 1$ 倍。裙体的轴向长度决定它与管壁的贴紧程度。实践表明,过长的裙体虽然能够更好地密封,但因贴紧力过大,使弹丸轴向运动的阻力增加,致使弹速下降。

3.3.2 活塞

目前常用的活塞一般由两部分组成:活塞体与金属配重。添加配重的目的是使活塞质量达到一定的要求。活塞头部制成与锥形孔相同的锥度,这样,当活塞速度较低时,活塞头部先进入锥形孔,而圆柱部分仍在泵管内运动。锥头底部的密

封裙很容易在锥形孔入口处变形,使锥形头与锥形孔壁立即贴紧,造成较强的挤压压力。此时头顶部的锥形截面积减小,压缩气体对活塞的反向压力下降,活塞比较容易停在高压段内。

4 二级轻气炮发射性能的影响参量^[1~4]

4.1 初始注气压力

弹丸发射时初始注气压力影响其承受的弹底压力。AMES研究中心在其7.1 mm/39 mm(前一数据为发射管口径,后一数据为泵管口径)的二级轻气炮上进行了两种初始注气压力情况下弹丸的弹底压力实验,实验其它条件近似相同。

另外,AMES研究中心也研究了不同活塞和弹丸质量情况下初始注气压力对最大弹底压力的影响。研究发现,在初始注气压力减小时,最大弹底压力增加。对于重的弹丸来说,上述的这种作用很大。

4.2 活塞速度

活塞速度对弹丸底部压力的持续过程有很大的影响。在弹丸运动的初期,只有很少质量的气体流进发射管,此时气室压力的上升速率是活塞速度的函数。

在允许的极限范围内,恰当地选择装药,可以获得任意所需的活塞速度。例如在弹丸开始运动时,可以把活塞加速到给定要求的泵压缩速率所需的速度。除了在压缩后期,靠改变活塞质量可以改变活塞减速时泵的压缩速率外,对活塞速度的连续变化不能作任何调整。活塞的速度变化,在整个压缩期间不可能满足不变弹底压力所要求的速度,因此,使用的活塞速度应尽量满足所需条件。

AMES研究中心研究了活塞速度影响弹丸初速和最大弹底压力的情况,活塞速度是在离实验用炮的过渡段起点前1.5 m位置处测量的。实验结果表明,沿初始注气压力为常数的曲线,随着活塞速度的增加,弹速和最大弹底压力也增加,但当活塞速度增大到一定程度时两个参数增加的比例变小。另一方面,在同时增加初始注气压力和活塞速度的情况下,可以使最大弹底压力下降但仍能获得同样的弹速。

4.3 弹丸释放压力

对弹底压力进行控制的另一个重要方法是改变压缩周期中弹丸释放点的位置,即改变弹丸的释放时间,具体可通过调节高压段和发射管之间的小膜的破裂压力来实现。改变弹丸的释放压力不仅改变了弹丸最初承受的压力,而且也影响弹丸连续的压力过程。较重的弹丸在发射最初阶段有比较高的弹底压力,可以用减小弹丸释放压力来降低其弹底压力。

AMES研究中心对弹丸释放压力对弹底压力的影响进行了研究。从实验结果发现,在获得相同速度的情况下,采用较低的释放压力可取得对试验更为有利的弹底压力。另外,还研究了在负载条件变化情况下弹丸释放压力对弹速的影响。除了轻弹丸的一组实验外,所有其他条件下不同释放压力对应的弹速并无太大变化。在实验中发现采用较低的释放压力具有明显的优点,当释放压力降到最小时,虽然采用轻弹丸使速度有所降低,但是这种情况下的发射是最接近不变弹底压力要求的。同时实验还表明,降低释放压力可以使最大弹底压力明显减小,而且最大弹底压力的减小在比例上要大于速度的减小。

4.4 活塞质量

处于通常负载情况下的等熵压缩式二级轻气炮,在弹丸开始起动之前活塞首先达到最大速度,此时用来加速活塞的第一级驱动气体处于低压状态,不再给活塞传递额外能量。因此,压缩推进气体所需能量主要来自活塞的动能。而活塞速度已根据给定弹底压力所要求的泵压缩速率确定,只有活塞质量作为可变参数能够调整。

4.5 弹丸质量

弹丸质量对弹丸的发射性能有较大的影响。在特定的负载条件组合下,增加弹丸质量将使气室和弹底压力升高,而弹速下降。

如果要使不同质量的弹丸具有相同加速过程以获得同样的弹速,那么弹底压力增加必须与弹丸质量增加成正比。在依次按比例增加释放压力、气室压力、气体质量和活塞质量(保持活塞速度不变)的情况下即可实现上述要求。但是能够实现这些条件的弹速和弹丸质量的变化范围是十分有限的,这是因为弹丸质量和气室压力的许可范

围都受一定的限制。或者说,在提高所需弹速时能够保持弹底压力近似不变的弹丸质量的可选择范围是非常小的。

在低速重弹丸的发射过程中,与上述情况有较大的偏差,对每种重量的弹丸和弹速可以采用最优的负载条件进行发射。开始时,负载条件造成泵的压缩速率比弹丸开始运动时所需的速率高得多。此时,减小弹丸释放压力成为减小初始泵的压缩速率的一个非常有效的方法,这样做可以在整个发射过程中将弹底压力控制在弹丸强度范围内。实验表明,若假定负载条件已经最优化,那么当弹丸质量增加时,能得到的最好情况是弹速减小量与弹丸质量增加量的平方根成正比。

4.6 推进气体的温度

在理想气体方程里可以看到:增加气体温度使声速增加,从而可使弹速产生增量。因此,可以使用大容积的泵管获得高的压缩比,进而获得较高的气体温度。

许多人曾经设想用增加初始气体温度的方法来增加弹速,但是实验结果表明,弹速不但没有增加,反而在很多情况下还有所降低。造成这种结果的原因之一可能是与管壁的热交换有关,当温度上升时,热交换造成的能量损失增加,这样使计算预期的性能与实验结果有较大的偏差。但是上述理由可能是造成弹速下降的部分原因。在AMES研究中心的实验中,注意到了预热气体使炮膛表面烧蚀加剧,从而认为金属蒸气污染了推进气体,使气体分子量增加,导致弹速下降。除此之外,最重要的因素可能与真实气体效应有关。例如,气体的高密度对声速的影响可能降低了高温的作用。

在轻气炮压缩后期,产生的真实气体温度比对应压力下由理想气体计算的温度要低得多。利用增加初始气体温度提高炮的性能,还不如利用增加气体压力有效。然而这两个因素又是不可分割的,在增加气体压力时也就提高了气体温度。因此,选择合适的气体压力,同时控制气体温度的剧烈上升,是提高炮性能的重要措施。

4.7 装药

在压缩周期里,需要用一定的火药装药量来

加速给定质量的活塞,使活塞在某个预定位置达到所需的速度,进而通过实验找出活塞速度与装药量的关系。下面关系式可以用来估算密闭药室内火药燃烧所产生的压力值 p_y :

$$p_y V_y = \frac{m_h}{M_h} RT, \quad (1)$$

式中: m_h 是火药装药质量; V_y 是药室容积; M_h 为火药的克分子量。根据 m_h 与 V_y 的比值,硝化纤维火药对于的典型值在500~1100 MPa cm³/g(比值小 RT 也取值小)。式(1)对速燃火药有效,即活塞在移动一个相当的距离之前,火药可以烧尽。但是在二级轻气炮上,为了减小药室峰值压力,经常使用燃速较慢的火药。在活塞运动时,火药仍能继续燃烧,从而扩展了药室的容积。因此用慢速火药可以降低活塞的加速度,使活塞前的推进气体里形成的冲击波较弱,有助于实现等熵压缩的目的。

5 二级轻气炮的测试技术^[5~8]

弹丸出口速度和动态碰撞角是气体炮的两项重要指标。弹丸出口速度反映的是气体炮的发射能力;弹丸动态碰撞角是指弹丸平端面和靶平面相碰时的夹角。其中弹丸动态碰撞角既反映气体炮的单轴碰撞的近似程度,即动态加载的使用性能,又反映了气体炮的加工精度。国内外发表有关气体炮的文章中,无不谈到这两个方面的数据。

5.1 弹丸出口速度的测量方法

虽然弹丸出口速度的测量方法可以有多种途径,但从适用性和经济性考虑,以下方法是经常被广泛采用的。

5.1.1 电探针方法

在图2中给出了用电探针方法测量弹速的原理。

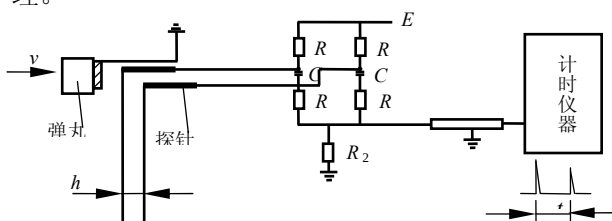


图2 电探针测量弹速的原理图
Fig. 2 Principle of electric probe measuring velocity of projectile

在实验过程中,以速度 v 飞行的弹丸前端面首先与接地探针接触,然后依次接通间距为 h 的两根探针。在弹丸碰撞板接触每根探针时,放电回路都有信号输出,判读计时仪器上两次信号的时间间隔 t 就得到了弹速 $v = h / t$ 。就目前设备水平看,这种方法最简单,对一般实验室配仪器经济上也承受得起。

5.1.2 磁感应方法^[7]

固定磁体感应测速方法的原理如图3所示。

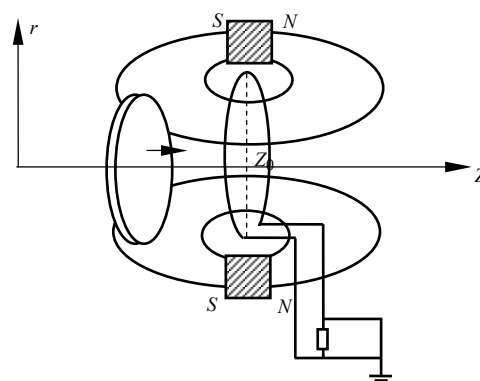


图3 固定磁体感应测速方法的原理
Fig. 3 Principle of magnetic induction measuring velocity of projectile

导体运动时,穿过导体(即飞片)的磁通量发生变化,并在飞片内部激发起感生电流,感生电流的方向与磁通量变化的方向垂直。由于任何电流过程都将伴随有磁场生成,所以根据电磁相互作用原理和场的叠加性,这个感生电流的磁场将使原有的磁场强度发生变化。飞片通过固定磁体的磁场时,使安装在磁体附近线圈中的磁通量改变,在线圈的输出端得到一个感应电信号。在弹丸飞行路径上的不同位置放置两个或多个线圈与磁体组件,根据各感应信号出现的时间就可以计算出弹丸的飞行速度。

这种测量方法使弹丸结构简单,可以制成强度较好的整体弹丸。但是,飞片材料必须是导体材料,否则得不到感应信号。因为口径较小的磁环在发射过程中容易保护,实验装置可以多次重复使用,所以这种方法在小口径二级轻气炮上使用起来较为经济。在大口径二级轻气炮上,用这种方法可以取得满意的实验结果,但是大口径的磁环在高压气体作用下很容易碎裂,消耗很大,而且价格偏高。

5.1.3 X射线方法

X射线方法测量弹速的工作示意图如图4所示。

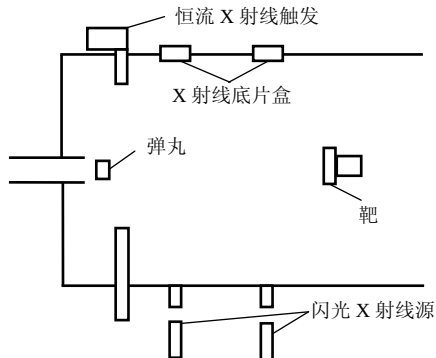


图4 X射线方法测量弹速工作示意图

Fig. 4 Sketch of measuring velocity of projectile with X-ray

当弹丸进入测速区后，首先遮断恒流X射线触发系统，生成的触发信号使计时仪开始计时。当弹丸进入第一支X射线管照相区时，X射线管闪光，将弹丸投影到底片上，计时仪记录下闪光时间。到达第二支X射线管照相区时，第二支X射线管又一次闪光，将弹丸投影到第二个底片上，同时又被计时仪记录下第二次闪光时间。在照相的通道上，放置一个镶嵌铅刻度线的标尺，因此闪光照相时在底片的背景上同时将标尺刻度拍照下来。在底片判读仪上可以读出两次闪光期间弹丸所飞行的距离，结合计时仪记录的两次闪光时间，就可以得到弹速。这种测量方法直观且精度高，缺点是造价十分昂贵。

5.1.4 激光光束遮断法

激光光束遮断法的测试原理简图如图5所示。

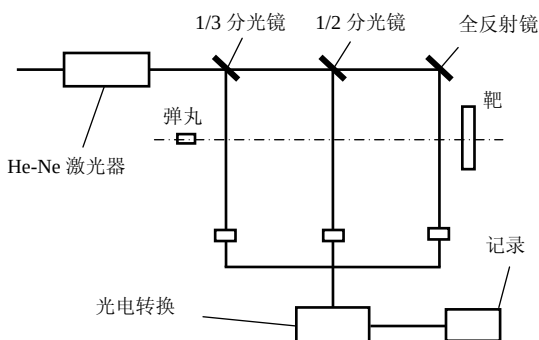


图5 激光光束遮断法的测试原理

Fig. 5 Principle of measuring velocity of projectile with laser shading

利用光学分光系统，将激光器输出的一束激光分为强度近似相等的三束光，构成三个激光探

测器。这三束光分别射到与计时系统连接的三个光电管上。弹丸飞越三束光时，依次遮断每束光，造成光电管依次输出截止，所产生的脉冲信号记录到计时仪上，就提供了弹丸飞越时间的数据。这种方法在二级轻气炮上应用时遇到了困难。这是因为二级轻气炮由弹丸间隙飞到弹丸前端的氢气是发光的，而且持续时间较长，这样弹丸虽然遮断了光束，但光电管仍然受到发光氢气的照射，不能产生输出截止信号。

5.2 弹丸动态碰撞角的测量方法

弹丸经发射管加速后，弹丸端面将发生倾斜和弯曲变形，这种畸变主要是由炮口的几何精度、弹丸与发射管的间隙公差以及安装不当引起的。测量弹丸端面形状畸变的方法大致有两种：一种是利用X射线阴影照相和炮轴线进行比较；另一种是利用同一平面上布置的探针，记录弹丸碰撞各探针的时间差，经过数学处理可以换算出畸变量。第二种方法尽管要求较高的仪器分辨率，但是由于它的测量结果可以方便地用于数据修正，因此得到广泛认可。下面主要介绍这种测量方法。

利用垂直于炮管轴线的平面靶上规则布置的探针，可以对弹丸端面形状进行细微的监测。采用的平面靶和探针布局方式如图6所示。

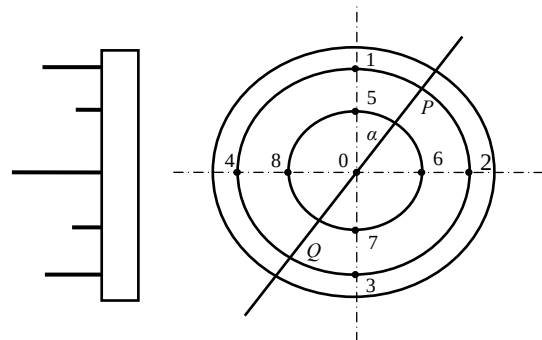


图6 弹丸动态碰撞角的测量方法示意图

Fig. 6 Sketch of dynamic impact angel measurement of projectile

在靶的两个平面高度上共布置8根探针，每个平面都有4根探针正交布置在同心圆上，每个平面上的4根探针自成体系，可以确定出一组碰撞角数据，从中心探针到每个平面的时间差可以得到弹速。

假定碰撞板在飞行之后其几何形状呈倾斜的轴对称弯曲状与靶相碰，弹丸端面和平面靶的夹

角为 θ ，那么沿着碰撞轴线 PQ （ P 为最先碰撞点， Q 为最后碰撞点）上的探针所记录的到达时间应该相同。假设 PQ 线与最先响应的探针初始夹角为 α ，则应有

$$t_i - t_0 = -\frac{tg\theta}{v} R \cos(\alpha + i \cdot 90^\circ) \quad i=1,2,3,4, \quad (2)$$

式中： R 是探针所在圆半径； $i=1$ 特指最先响应的探针； t_0 是4根探针到达时间的平均值，由下式确定：

$$t_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (t_1 + t_3) + \frac{1}{2} (t_2 + t_4) \right] \quad (3)$$

这样平均的结果消除了倾斜因素所带来的系统误差。实验结果如果成功，这两组平均值应该极为接近。

6 结论

二级轻气炮主要用来进行超高速碰撞的地面模拟试验，是研究超高速撞击下材料动态响应特性的一种性能优良的高压设备。在航天领域内，二级轻气炮可用来模拟空间碎片对飞行器的超高速撞击。针对具体防护结构进行的超高速撞击试验，可用来研究超高速碰撞理论和材料的损伤破坏特性并建立材料模型，建立包括弹丸弹道极限方程和靶板尺寸方程在内的工程模型，确定防护结构材料的损伤机理和防护性能。因此，对二级轻气炮试验技术进行较为广泛的研究，将对空间

碎片试验工作的顺利展开起着至关重要的作用。

参考文献 (References)

- [1] Berggren R E, Reynolds R M. The light-gas-gun model launcher[R]. AD-713195, 1970
- [2] Seigel A E. The theory of high speed gas guns[R]. AD-475660, 1965
- [3] 王金贵. 二级轻气炮超高速弹丸发射技术的研究[J]. 高压物理学报, 1992, 6(4):264[Wang Jingui. Research on hypervelocity projectile launching technology of two stage light gas gun[J]. Journal of High Pressure Physics, 1992, 6(4): 264]
- [4] Nonaka S, Takayama K, Kibe S. Hypervelocity impact test with bumper-walled structure against space debris[J]. AIAA-98-0800, 1998
- [5] William L. Measurement problem in high velocity impact experiments[R]. AD-A105550, 1981
- [6] Barker L M, Chhabildas L C, Trucano T G. High gas pressure acceleration of flier plates: experimental technique[J]. J Impact Engng, 1990, 10: 67
- [7] 施尚春, 等. 高速弹丸的磁感应测速方法[J]. 高压物理学报, 1991, 5(3):205[Shi Shangchun, etc. Method of magnetic induction measuring velocity of projectile at high velocity[J]. Journal of High Pressure Physics, 1991, 5(3): 205]
- [8] 杨业敏. 超高速弹丸撞击靶板的脉冲X光照相实验研究[J]. 测试技术学报, 1996, 10(2, 3):590~593[Yang Yemin. Research on pulsing X-ray photograph test for hypervelocity projective impacting target[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 1996, 10(2, 3): 590~593]

Technology of Simulating Space Debris Hypervelocity Impact Using Two Stage Light Gas Gun

YANG Jiyun

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Two stage light gas gun is one of the important devices to simulate hypervelocity impact effect of space debris. Firstly recent development about two-stage light gas gun is reviewed. The principle of two-stage light gas gun, its driver gas and test things are expounded. And then certain parameters affecting performance of two-stage light gas gun are discussed, including initial pressure, piston velocity, burst pressure, piston mass, projectile mass, etc. As two important performance indexes of two-stage light gas gun, the measurement technologies of projectile velocity and dynamic impact angle are presented finally.

Key words: two stage light gas gun; test technology; influencing parameters; measurement technology