文章编号：1000-5773(2011)04-0296-07

二级轻气炮遮挡式激光光幕测速系统*

邓云飞，张 伟，贾 斌，庞宝君，曹宗胜

（哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心，黑龙江哈尔滨 150080）

摘要：研制了用于测量二级轻气炮毫米级弹丸速度的遮挡式激光测速系统。该系统主要包括测速平台和激光测速仪，采用红光半导体激光器作光源，硅光电二极管为光电探测器。测速平台安装于炮管测速段，具有结构简单紧凑、抗振动、激光光幕易于准直和测量等特点。激光光幕高度为 20 mm，避免了弹丸偏离轴线过多时因无法遮断光束导致的测速失败。运用该测速系统进行了一系列二级轻气炮测速实验，成功测量了金属弹丸和非金属弹丸的速度，测速范围为 1.58～4.51 km/s。将测量数据与磁测速系统测量数据进行比较，结果表明，该激光测速系统的测量精度高、稳定性好、灵敏度高、抗干扰性强、适用范围广。

关键词：激光测速；二级轻气炮；半导体激光器；光电二极管

中图分类号：O521.3；TN247 **文献标识码**：A

1 引 言

二级轻气炮作为气体炮的一种，一般可获得 2～7 km/s 的弹速[1-2]。它不仅可以发射各种形状弹丸，而且对弹丸材料、质量和尺寸有较宽的适用范围，更重要的是同一速度的可重复性好，这为评价空间碎片防护方案提供了极为有利的条件，是目前超高速弹丸驱动中应用最广泛的技术之一[3]。在超高速撞击实验中，撞击速度是描述空间碎片状态、分析碎片和防护层动态特性的重要参数，因此在地面超高速撞击模拟实验中必须得以准确测量。但是，实验中弹丸的发射速度很高（一般在几千米每秒的量级），尺寸较小（一般为毫米级），并且弹丸材料包含金属和非金属，所以弹丸速度测量既是重点也是难点。

在二级轻气炮中，通常使用磁感应测速法测量弹丸速度。这种方法结构简单、经济性好，但是它要求弹丸材料必须是导体材料，否则得不到感应信号，并且当弹丸体积过小时，感生电流的磁场不能引起原磁场的明显变化，也会导致测速失败[4]。

为解决上述问题，人们发展了激光测速系统，并已在轻气炮上成功应用[5]。激光测速法主要分为 3 类：遮挡/遮断式激光测速法、反射式激光测速法和激光多普勒测速法。其中，遮挡式激光光幕测速法比遮断式激光光束测速法要复杂许多，但在多级（二级或三级）轻气炮的毫米级小弹丸超高速碰撞实验中，后者遇到了弹丸偏离轴线过多时无法遮断光束而导致测速失败的困难，前者在原理上有望解决这一难题。目前，还没有采用遮挡式激光测速技术稳定实现二级轻气炮超高速弹丸速度测量的公开报道。基于此，本研究采用激光光幕遮挡式测速法作为测速手段，研制准确可靠的遮挡式激光测速系统。

2 遮挡式激光光幕测速系统的工作原理及研制方案

2.1 激光光幕测速系统的工作原理

由于弹丸较小，尤其是亚毫米级弹丸，如采用单束激光测速，飞行时弹道稍有偏差就可能导致测速失败。此外，炮管内气体冲击和发光、烟雾、残渣等因素使测速环境变得非常复杂，单束窄激光很容易受

* **收稿日期**：2010-04-18；**修回日期**：2010-07-08

作者简介：邓云飞（1982－），男，博士研究生，主要从事穿甲力学及冲击动力学研究. E-mail：dengyunfei6@eyou.com

到干扰,引起测速信号紊乱,如泄漏到弹丸前面的氢气发光会严重干扰光电探测器的信号输出。因此,用激光光幕代替激光光束,可提高激光的抗干扰能力和捕捉飞行弹丸能力,增大测速系统的适用范围。

图 1 为遮挡式激光光幕测速法示意图。弹丸飞行时,依次穿越布置在弹道上的若干束(一般为 3 束)平行激光光幕,对应的光电探测器将变化的光信号转换为电流信号,输入到激光测速仪。激光测速仪对输入的电流信号进行 I/V 转换,并对电压信号进行放大,然后将放大的电压信号输入到示波器,通过示波器显示光信号的变化。

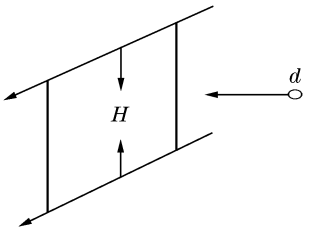


图 1　遮挡式激光光幕测速示意图

Fig. 1　Sketch map of velocity measurement with laser screens

设激光光幕的光强为 φ,光幕高度为 H,弹丸直径为 d,则探测电路产生的原始信号电压 U 为

$$U = (\beta\varphi \frac{d}{H})R \tag{1}$$

式中:响应系数 $\beta=\eta q/(h\nu)$;ν 为入射光频率;η 为量子效率;h 为普朗克常数;q 为电子电荷;R 为转换电路电阻,即光电二极管的偏置电阻。由(1)式可知,弹丸穿越光幕产生的信号电压与弹丸直径和光幕光强成正比,与光幕高度成反比。

当弹丸依次通过 3 束光幕时,测量示波器上 3 个波峰的时间差,可以得出弹丸穿过 3 束光幕的时间差 Δt。若已知光幕之间的距离 l,则可以计算出弹丸的速度 v 为

$$v = l/\Delta t \tag{2}$$

2.2　激光光幕测速系统方案

遮挡式激光光幕测速系统的基本方案如图 2 所示。激光器 L1、L2、L3 与光电探测器 S1、S2、S3 构成 3 路激光测速装置。经过测量,可以得到光幕 S1 与 S2 的间距 l_1 以及 S2 与 S3 的间距 l_2。通过示波器,可以读取弹丸通过 3 束光幕的时刻 t_1、t_2 和 t_3,由(2)式可以得到 3 组弹丸速度

$$v_1 = l_1/(t_2 - t_1) \tag{3}$$

$$v_2 = l_2/(t_3 - t_2) \tag{4}$$

各测速装置的位置分布如图 3 所示。磁测速装置 1 安装在膨胀段,激光测速装置安装在测速段,磁测速装置 2 安装在靶舱内。在靶舱和测速段为非真空状态下,磁测速 2 的测量速度最接近弹丸的着靶速度。

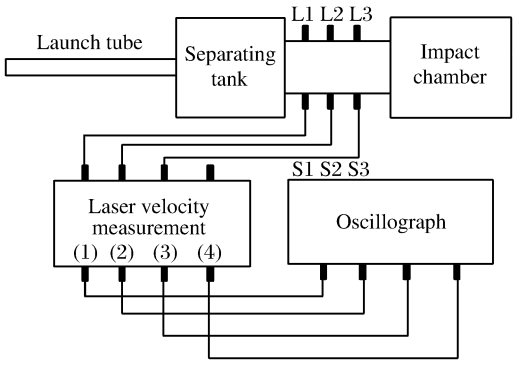


图 2　遮挡式激光光幕测速基本方案

Fig. 2　Basic principle of velocity measurement with laser screens

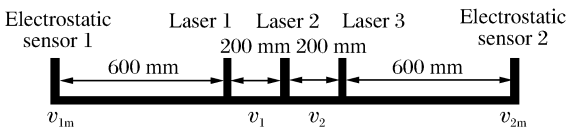


图 3　测速装置分布图

Fig. 3　Layout of the velocity measurement equipments

3 激光光幕测速系统设计

激光光幕测速系统由测速平台和激光测速仪两部分组成。

3.1 测速系统安装平台

由于弹丸从出炮口到撞击靶件需经历一段时间间隔,实际飞行过程中不可能是匀速过程,所以应将测速平台放入靶舱内。但是,由于靶舱内的环境十分复杂,弹丸、弹托残渣、反溅碎片、电离气体、烟雾等都会对测速产生影响,因此一般将测速平台安装在最靠近靶舱的炮管测速段上[6-7],测速段与膨胀段、靶舱用直径很小的子口连通。

设计测速平台时,不仅要确保实现测速功能,达到较高测速精度,同时还需考虑平台的抗干扰能力和可调节性,尽量做到安装结构简单。如图 4 所示,测速平台由发射端和接收端两部分组成。发射端采用 650 nm 红光半导体激光器作为光源:一方面,光电探测器对该波长的光具有较高的灵敏度;另一方面,红光为可见光,实验时可以很方便地调节光幕。激光器为圆柱体,外径是 23 mm,利用光栅可以得到所需光幕(光幕宽度为 2 mm,高度为20 mm,功率为 2 mW)。将激光器置于专门设计的定位爪中,用以调节激光器位置。接收端的光电探测器采用 PIN 光电二极管,光敏面直径为 1 mm,响应时间为 22 ns,响应率为 0.62 A/W,暗电流为 50 nA,结电容为 30 pF,响应频谱范围为 400～1 100 μm。由于光电二极管的光敏面小于光幕高度,因此需要对光幕进行会聚。本系统利用直径为 25.4 mm、焦距为 38.1 mm 的平凸透镜,将整个光幕聚焦到光电二极管光敏面上,这样光幕中任意位置的光通量变化就都能被检测到。由于气炮实验室的环境复杂,存在电磁干扰、空气中含有大量粉尘和烟雾等不利因素,在实际测速中应尽量减少环境对测速系统光电器件的影响。本系统采用金属套筒对发射端和接收端分别进行密封,有效降低了外界环境污染等因素对光电器件造成的不利影响。

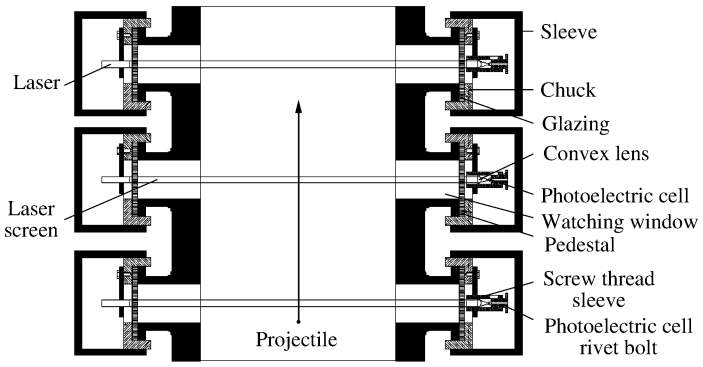


图 4 测速平台结构示意图

Fig. 4 Sketch map of the velocity measurement system installation platform

3.2 激光测速仪

激光测速仪是整个系统的核心。实验中,毫米级弹丸遮挡光幕时,光电二极管接收到的电信号仅发生微小变化,即测速信号为中频小信号,必须综合考虑测速仪的响应灵敏度、响应速度和噪声等参数,对信号进行放大滤波处理。针对高速小弹丸的测速特点,设计了专门的测速电路板,如图 5 所示。整个测速电路分为两部分:光电管部分和信号处理部分,分别对应着光电检测电路和信号放大电路。光电管部分主要提供两种可选光电转换模式(串联偏置电阻模式和互阻抗放大器模式)进行光电转换。信号处理部分是将光电管部分输出的高频小信号进行放大处理,然后输入示波器进行显示判读。

本测速电路中包含两级精密放大电路,可根据不同初始实验条件进行选择。电路中要求 $R_{17}/R_{16}=R_{19}/R_{18}$,$R_{13}=R_{15}$,否则会影响电路共模抑制比。整个电路的放大倍数为

$$A=-\left(1+2\frac{R_{13}}{R_{14}}\right)\frac{R_{19}}{R_{18}}\frac{R_{23}+R_{22}}{R_{22}} \tag{5}$$

如果取 $R_{17}=R_{19}=R_{16}=R_{18}$,测速信号采用一级放大,则电路的放大倍数为

$$A_1=-\left(1+2\frac{R_{13}}{R_{14}}\right) \tag{6}$$

如果取 $R_{17}=R_{19}=R_{16}=R_{18}$,测速信号采用二级放大,则电路的放大倍数为

$$A_2 = -\left(1+2\frac{R_{13}}{R_{14}}\right)\frac{R_{23}+R_{22}}{R_{22}} \tag{7}$$

在测速电路中,取 $R_{13}=R_{15}=R_{17}=R_{19}=R_{16}=R_{18}=10\ \mathrm{k\Omega}$、$R_{23}=100\ \mathrm{k\Omega}$、$R_{22}=10\ \mathrm{k\Omega}$、$R_{14}=2\ \mathrm{k\Omega}$,则电路的放大倍数 $A_1=11$,$A_2=-66$。如果将 R_{23} 选用可调电阻,则测速电路的放大倍数还可以进行微调。

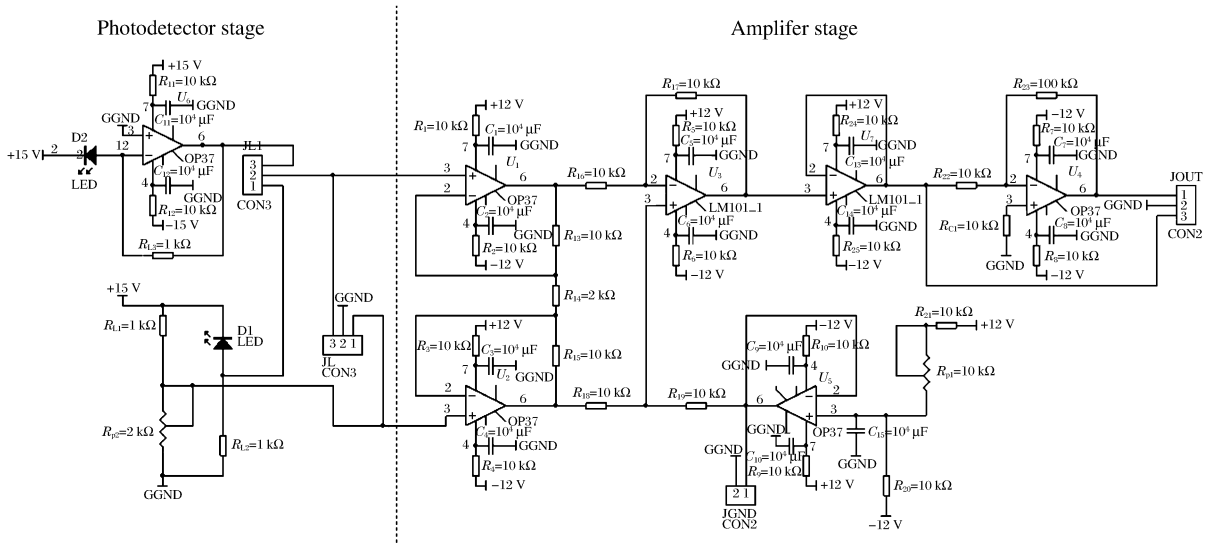


图 5　光电转换与放大电路图

Fig. 5　Schematic diagram of optical-electrical converter and amplifier

安装调试好测速平台和激光测速仪后,对系统进行整体联调。激光测速系统的整体照片如图 6 所示。该激光测速系统有 4 个测速通道,其中一个通道作为备用通道(该通道还可以用于处理弹丸撞击靶件的发光信号),各通道之间相互独立,互不干扰,并且每个通道的放大倍数可以分别调节。此外,对整个测速系统进行抗噪声处理,以屏蔽外界干扰信号的影响。

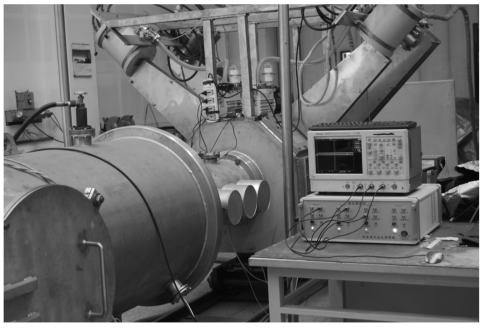


图 6　遮挡式激光光幕测速系统照片

Fig. 6　Photograph of the velocity measurement system with laser screens

4　测速实验及结果

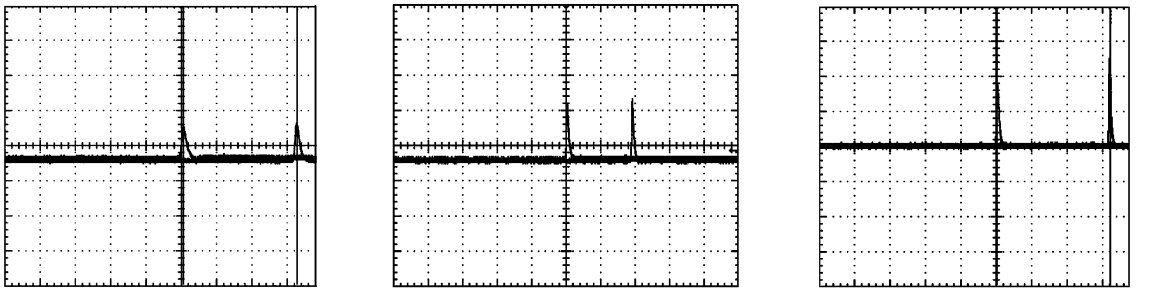
为了检验激光测速系统的稳定性以及激光测速仪对中频小信号的处理能力,在二级轻气炮上进行磁测速和激光测速实验。实验中,弹丸、弹托采用气动分离,靶舱和测速段抽真空,膨胀段充入少量氮气,膨胀段与测速段用薄膜片隔开。

4.1　两路激光测速实验

图 7(a)为∅3.97 mm 的金属弹丸通过光幕时的测速信号。其中,第 1 个波峰对应弹丸通过第 1 束光幕的时刻 t_1,第 2 个波峰对应弹丸通过第 2 束光幕的时刻 t_2,$t_2-t_1=64.4\ \mu\mathrm{s}$,信号电压幅值约为5 V,结合两光幕间距 $l_1=200$ mm,由(3)式可知弹丸速度 $v=3.11$ km/s,与磁测速测量结果($v_{1\mathrm{m}}=3.13$ km/s,$v_{2\mathrm{m}}=3.07$ km/s)相比,误差小于 1.3%。因为靶舱、测速段和膨胀段不是绝对的真空环境,氮气和空气对飞行弹丸起阻碍作用,弹丸的运动应为减速运动,因此激光测速系统与磁测速装置之间的测速误差一部分是由速度衰减造成的。图 7(b)为∅4.76 mm 的金属弹丸通过光幕时的测速信号,其中 $t_2-t_1=76.34\ \mu\mathrm{s}$,弹丸速度 $v=2.62$ km/s,信号电压幅值约为 8 V。图 7(c)给出了∅4.76 mm 的非金

属弹丸通过光幕时的测速信号曲线，其中 $t_2-t_1=44.35\ \mu s$，$v=4.51$ km/s，信号电压幅值约为 6.2 V。对比图 7(a)～图 7(c)可知，测速信号的大小与弹丸直径、弹丸速度密切相关：弹丸直径越大，弹丸速度越低，则测速信号越强；反之，弹丸直径越小，速度越高，测速信号就越弱。

从图 7 还可以看出，激光测速系统获得的弹丸速度信号清晰，信号幅值较大，没有其它干扰信号。结合磁测速结果可知，该激光光幕测速系统的抗干扰性较强、灵敏度和测量精度较高，可以应用于测量毫米级弹丸的飞行速度。



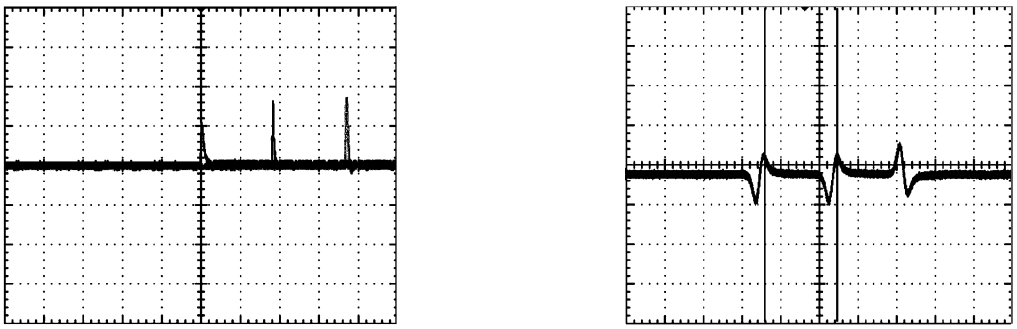
(a) Metallic projectile, v_1=3.11 km/s (b) Non-metallic projectile, v_1=2.62 km/s (c) Non-metallic projectile, v_1=4.51 km/s

图 7 不同直径弹丸的双路测速波形

Fig. 7 Double-peak waveforms of velocity measurement for projectiles with different diameters

4.2 3 路激光测速实验

为了提高测速系统的稳定性，保证成功测量弹丸速度，在两束激光测速的基础上增加了一束测速激光光幕，这样只要有两束激光光幕捕捉到弹丸，就可以计算出弹丸的飞行速度。图 8(a)为∅3.97 mm 的金属弹丸通过光幕时的测速信号曲线。其中，3 个波峰为弹丸依次通过 3 束光幕的时刻，时间差为 $t_2-t_1=74.63\ \mu s$，$t_3-t_2=75.47\ \mu s$，速度 $v_1=2.68$ km/s，$v_2=2.65$ km/s，信号电压幅值约为 8.5 V。图 8(b)为磁测速装置测得的弹丸速度信号曲线，弹丸速度 $v_{1m}=2.70$ km/s，$v_{2m}=2.63$ km/s，信号电压幅值约为 350 mV。对比图 8(a)和图 8(b)可知，激光测速结果与磁测速结果的相对误差小于 1.9%，激光测速信号电压幅值约为磁测速信号电压的 24.3 倍。



(a) Laser screen measurement (b) Magnetic induction measurement

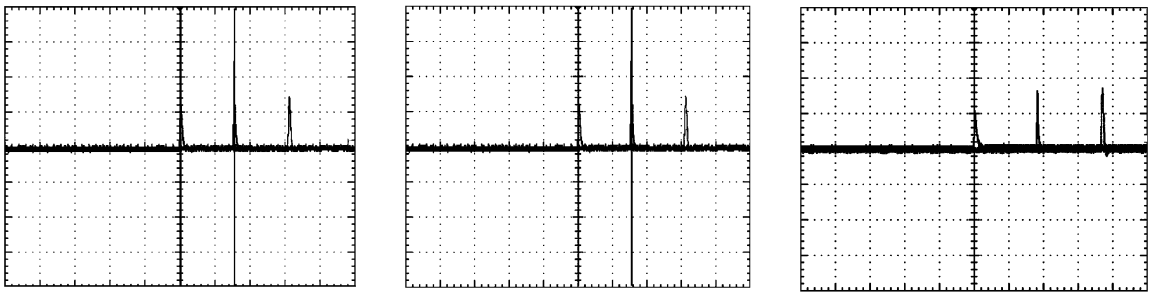
图 8 金属弹丸的 3 路测速波形

Fig. 8 Triple-peak waveforms of velocity measurement for metallic projectile

为了验证激光测速系统对高速非金属弹丸速度信号的响应特性，在气炮上进行了非金属弹丸 3 路激光测速实验。图 9(a)、图 9(b)和图 9(c)分别为∅4.80 mm、∅4.00 mm 和∅4.76 mm 的非金属弹丸通过光幕时的测速信号曲线。图 9(a)中，时间差 $t_2-t_1=61.54\ \mu s$，$t_3-t_2=62.31\ \mu s$，速度 $v_1=3.25$ km/s，$v_2=3.21$ km/s，信号电压幅值约为7.6 V；图 9(b)中，时间差 $t_2-t_1=69.69\ \mu s$，$t_3-t_2=70.67\ \mu s$，速度 $v_1=2.87$ km/s，$v_2=2.83$ km/s，信号电压幅值约为 7.3 V；图 9(c)中，时间差 $t_2-t_1=$

124.22 μs,t_3-t_2=126.58 μs,速度 v_1=1.61 km/s,v_2=1.58 km/s,信号电压幅值约为 9.2 V。由图 9 可知,本激光测速系统可以较好地完成非金属弹丸的速度测量。

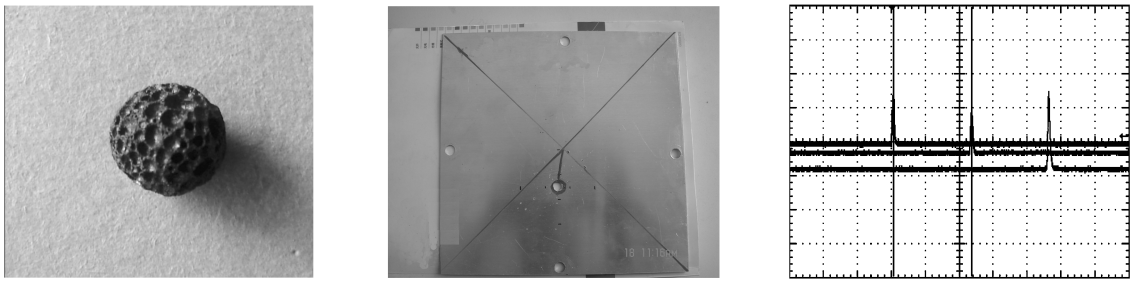
在二级轻气炮毫米级小弹丸的超高速撞击实验中,遮断式激光光幕测速法遇到了弹丸偏离轴线过多时将无法遮断光束进而导致测速失败的困难,采用遮挡式激光光幕测速法有望解决这一困难。利用本激光测速系统,测量了二级轻气炮发射多孔火山岩弹丸速度,多孔火山岩的弹体结构见图 10(a)。图 10(b)为多孔火山岩弹丸撞击靶件的照片,其中靶件中心对应弹道,可以看出弹孔偏离靶件中心。这是由于多孔火山岩弹丸的表面为不规则的多孔结构,弹丸在超高速飞行时弹道不稳定,容易发生偏移。图 10(c)为∅4.8 mm 的多孔火山岩弹丸的测速信号曲线,时间差 t_2-t_1=56.66 μs,t_3-t_2=56.98 μs,速度 v_1=3.53 km/s,v_2=3.51 km/s。虽然多孔火山岩弹丸偏离轴线较多,但是由于本测速系统的激光光幕高度达 20 mm,在弹丸能够着靶的情况下可以较好地捕捉到弹丸,稳定性较高。



(a) d=4.80 mm　　(b) d=4.00 mm　　(c) d=4.76 mm

图 9　不同直径非金属弹丸的 3 路测速波形

Fig. 9　Triple-peak waveforms of velocity measurement for non-metallic projectiles with different diameters



(a) Porous volcano rock projectile　　(b) Target after impact　　(c) Velocity waveforms

图 10　多孔火山岩弹丸的超高速碰撞实验结果

Fig. 10　Experimental results of hypervelocity impact for porous volcano rock projectile

利用本激光测速系统测量金属和非金属弹丸速度,取得了较好的实验结果。一系列实验结果验证了整个测速系统的设计比较成功。

5　结　论

采用红光半导体激光器作光源,硅光电二极管为光电探测器,建立了光幕高度为 20 mm 的遮挡式激光光幕测速系统。利用该系统,在二级轻气炮上进行了一系列实验,成功地测量了金属和非金属弹丸速度,测速范围为 1.58～4.51 km/s。实验结果表明,弹丸速度信号脉冲清晰,信号幅值较大,没有其它干扰信号,对非金属弹丸的速度测量同样有很好的响应特性,与磁测速数据的相对误差约为 1%。

实验验证,本激光光幕测速系统具有结构紧凑、可调性好、精度高、稳定性好、抗干扰性强、灵敏度高

和适用范围广等优点。该系统拓宽了对非金属材料测速的应用范围，基本解决了毫米级小尺寸弹丸在二级轻气炮实验中的测速问题，为开展相关研究工作提供了技术支持。

References:

[1] Kawakita S, Hata H, Furukawa K. Development of High Velocity Projectile with Pressure Chamber [A]//Proceedings of the Twenty-Third International Symposium on Space Technology and Science [C]. Tokyo, Japan, 2002: 2490-2494.

[2] Zhang Z C, Feng D R, Shi J J, et al. Practice of Studying Rock Damage by One-Stage Compressing Light Gas Gun Technology [J]. Mining & Processing Equipment, 2005, 33(8): 9-11. (in Chinese)
张志呈，冯德润，史瑾瑾，等. 单级压缩轻气炮技术研究岩石损伤的实践 [J]. 矿山机械，2005，33(8)：9-11.

[3] Zhang D Z, Tang R D, Lin J D, et al. Development of a New Type Gas-Driven Two-Stage Light Gas Gun [J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(1): 14-18. (in Chinese)
张德志，唐润棣，林俊德，等. 新型气体驱动二级轻气炮研制 [J]. 兵工学报，2004，25(1)：14-18.

[4] Zhang W B. Velocity Measurement Technologies of Space Debris Driven by Ground-Base Simulation Devices [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(3): 138-141. (in Chinese)
张文兵. 地基模拟空间碎片速度测试技术 [J]. 航天器环境工程，2006，23(3)：138-141.

[5] Zhao J W, Hu Z Y, Zhao X Y, et al. An Optoelectronic Device for mm-Size Projectile Velocity Measurement [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(5): 395-400. (in Chinese)
赵军卫，胡志云，赵新燕，等. 用于毫米级弹丸速度测量的光电检测装置 [J]. 高压物理学报，2009，23(5)：395-400.

[6] Shi Y C, Liu F Q. A Laser System for Measuring the Projectile Velocity in Gas Gun [J]. Explosion and Shock Waves, 1986, 6(1): 71-79. (in Chinese)
史有程，刘风琴. 一个测量气体炮弹速的激光测量装置 [J]. 爆炸与冲击，1986，6(1)：71-79.

[7] Zhang G J, Tian C J, He P. The Projectile Impacting Velocity Measurement Technique with Splitting Laser Beams [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1997, 11(2): 156-160. (in Chinese)
张光军，田常津，何 鹏. 弹体撞击速度的激光分束测量技术 [J]. 高压物理学报，1997，11(2)：156-160.

A System for Measuring Two-Stage Light Gas Gun Projectile Velocity with Laser Screen and Photodetector

DENG Yun-Fei, ZHANG Wei, JIA Bin, PANG Bao-Jun, CAO Zong-Sheng

(*Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: A new velocity measurement system is set up for measuring the millimetre-sized projectile velocity in two-stage light gas gun. The system consists of an installation platform and a laser velocimeter which using red light semiconductor laser as lamp-house and silicon photodiode as photodetector. The platform installed in the barrel test section has numerous advantages of simple structure, aseismic design, easy adjustment and measurement. Using this new measurement system, the metallic and non-metallic projectiles velocities are successfully achieved. Moreover, the velocities of metallic projectile measured by this system are compared with those using magnetic induction sensors. The results show that this system not only has high reliability and accuracy but also high sensitivity, strong anti-interference and wide range of applications.

Key words: laser velocity measurement; two-stage light gas gun; semicondutor laser; photodiode