

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0303

## 基于微波干涉测速技术的二级轻气炮/火炮 内弹道参数诊断\*

贾 兴<sup>1,2</sup>, 唐隆煌<sup>1,2</sup>, 翁继东<sup>1,2</sup>, 马鹤立<sup>1,2</sup>, 陶天炯<sup>1,2</sup>, 刘盛刚<sup>1,2</sup>, 陈 龙<sup>1,2</sup>, 章林文<sup>1</sup>, 王 翔<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 测量二级轻气炮/火炮弹丸在内弹道的速度历程, 对轻气炮/火炮的设计、内弹道计算、弹道异常现象诊断分析具有重要作用。因为不同波长微波的传输特性在不同炮管中不同, 不同目标的反射特性也不同, 为获得最佳的测试结果, 设计了两个波长的微波干涉测速系统。对二级轻气炮和高速火炮的内弹道速度进行了连续测量, 并利用短时傅里叶变换与相位计算相结合的方法进行了数据处理。实验成功获取了完整的内弹道数据, 所测弹丸炮口速度与光束遮断测速装置测试结果差异小于 0.5%。通过对内弹道实验数据的分析, 证实了二级轻气炮在某些装填条件下易出现碎弹现象。此外, 首次观测到二级炮内弹道内前冲气体速度历史, 可为研究高速气体的温度、压力、电离等状态提供数据支撑。

**关键词:** 微波干涉仪; 二级轻气炮; 火炮; 速度测量; 内弹道; 前冲气体

中图分类号: O384 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Microwave velocity interferometry for the parameter diagnosis of the interior ballistic of a two-stage light gas gun or powder gun

JIA Xing<sup>1,2</sup>, TANG Longhuang<sup>1,2</sup>, WENG Jidong<sup>1,2</sup>, MA Heli<sup>1,2</sup>, TAO Tianjiong<sup>1,2</sup>,  
LIU Shenggang<sup>1,2</sup>, CHEN Long<sup>1,2</sup>, ZHANG Linwen<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

**Abstract:** The measurement of the interior ballistic projectile velocity in a two-stage light gas gun or powder gun and the observation of the state of the precursor gas in the launch tube are very important for the design and calculation of the interior ballistic and for the analysis of the abnormal ballistic. In order to obtain the better results, two microwave interferometers in the Ka-band and X-band were designed by the Doppler principle, since the transmission and reflection characteristics of microwave are related with the caliber of launch tube and objects materials respectively. A combination of the short-time Fourier transform and phase calculation was used to process the interference signal, and then the velocity, acceleration, displacement, projectile bottom pressure and other information were obtained by calculation. Complete interior ballistic data for a two-stage light gas gun and a high-speed powder gun were obtained experimentally. The difference in the projectile velocity measured by the microwave interferometer and the optical beam blocking (OBB) device is less than 0.5%. Moreover, it was demonstrated in our experiments that under some conditions, shock waves may cause premature breaking of the diaphragm in the high pressure

\* 收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(62101518); 中物院培育基金(PY20210006)

第一作者: 贾 兴(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, [jiaxing@caep.cn](mailto:jiaxing@caep.cn)

通信作者: 王 翔(1968—), 男, 硕士, 研究员, [xiangwang102@126.com](mailto:xiangwang102@126.com)

section, which results in the projectile having a secondary loading at high pressure, and then becoming fragmented with a probability. In addition, based on the reflection and transmission characteristics of the ionized gas at different microwave wavelengths, the velocity of the precursor  $H_2$  gas in the launch tube of the two-stage light gas gun was measured using the X-band microwave interferometer for the first time, which can provide data for studying the temperature, pressure, ionization and other states of the high-speed ionized gas.

**Keywords:** microwave interferometer; two-stage gas gun; powder gun; velocity measurement; interior ballistic; precursor gas

基于测量的弹丸速度历史曲线计算出的位移、加速度、弹底压力等参数,对轻气炮/火炮设计、弹道计算、调试、异常现象的诊断具有重要作用,且可为模拟内/外弹道全过程阻力分布和发展新的内弹道理论提供重要的实验数据支撑<sup>[1-2]</sup>。

二级轻气炮/火炮的发射管较长(数米),弹丸在管内运动时间长(数毫秒),弹丸速度高(近 10 km/s)<sup>[3]</sup>。常规的光束遮断法、电探针法、磁感应法虽然具有系统简单的优点,但均只能测量弹丸在炮口处的平均速度,无法获得整个弹丸从启动到出炮口的速度历史,且易受到前冲气体的影响<sup>[4-6]</sup>,此外,由于这些用方法测量得到的是平均速度,因此在弹丸出炮口前还有较大加速度时,测得的速度误差会比较大。基于激光的任意反射面速度干涉测量系统(velocity interferometer system for any reflector, VISAR)和全光纤位移干涉测量系统(doppler pin system, DPS 或 displacement interferometer system for any reflector, DISAR)具有较高的时间分辨率,但在炮管内有较强前冲气体影响时,均无法获得完整的速度历史曲线<sup>[7-9]</sup>,两者还对待测面的倾角和表面粗糙度敏感。此外,VISAR 的光路和系统比较复杂,而 DPS 或 DISAR 对数据采集记录系统的带宽和实时存储容量要求非常高,尤其是内弹道测量的速度高(二级炮可高达 7 km/s 以上)、加速时间长(数毫秒),这就要求 DPS 的数据采集记录系统不仅要具有 10 GHz 以上的带宽,而且还要具有  $2 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$  以上的实时采样率和大于 200 MB 的存储长度,目前能满足这些性能指标的记录系统很少、而且价格昂贵,这些都限制了该技术的应用。陶天炯等<sup>[10]</sup>提出了“欠采样”的 DPS 技术,并成功测量了口径 28 mm 二级轻气炮的内弹道,“欠采样”技术降低了对记录系统的要求,但仍然没有解决前冲气体对测量的影响。

微波能穿透烟雾、气体、非极性电介质材料等待测目标进行无接触式测量,微波干涉测速对待测对象的表面粗糙度不敏感,对记录系统带宽要求低(兆赫兹量级),测速范围宽(几毫米每秒至上百千米每秒)等优点<sup>[11-12]</sup>,其在炸药爆轰参数测试、火炮弹道测试中已有应用<sup>[13-15]</sup>。相对于激光干涉测速,微波干涉系统的缺点是波长较长,时间分辨率较低。为适应不同的待测对象,本文中设计了 30 mm(频率 10 GHz)和 8 mm(频率 37.5 GHz)两个波长的微波干涉系统,并采用短时傅里叶变换和相位解调算法相结合的数据处理方法<sup>[16-18]</sup>,大大提高了时间分辨率,对弹丸启动时的低速段测量也取得了较好的结果。实验中还利用不同波长微波对电离气体反射系数不同的特点,同时获取了内弹道前冲气体的速度和弹丸速度。此外,本文中设计的微波干涉测速系统也可用于炸药的燃烧转爆轰、冲击转爆轰过程的研究,非极性电介质材料在冲击作用下的冲击波和粒子速度的测量,以及气体不稳定爆轰过程的研究<sup>[19-21]</sup>。

## 1 微波干涉测速系统基本原理与设计

微波干涉测速的基本原理是依据多普勒效应,运动目标反射的电磁波会产生频移。发射电磁波信号和从运动目标反射回的电磁波信号之间的频差与运动目标的速度成正比:

$$v(t) = \frac{\lambda_0}{2} f_d(t) \quad (1)$$

式中:  $v(t)$  为待测目标速度,  $\lambda_0$  为自由空间电磁波波长,  $f_d(t)$  为多普勒频移量, 对非匀速运动目标,  $f_d(t)$  随时间变化。设计的微波干涉测速系统原理图如图 1 所示。

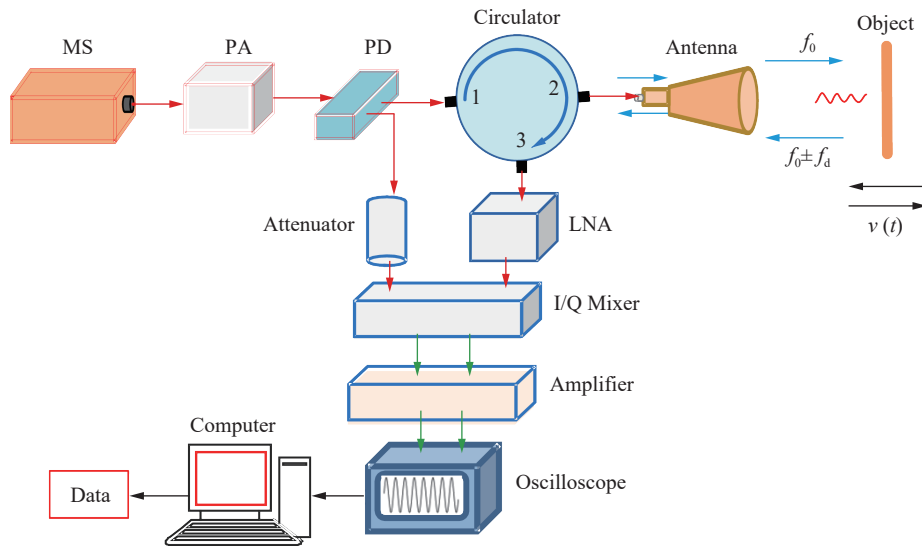


图 1 微波干涉测速系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the microwave interferometer

从连续微波源 (microwave source, MS) 发出的信号经功率放大 (power amplifier, PA) 和功率分配 (power divider, PD) 后, 一路信号经衰减器后作为正交混频器 (IQ mixer) 的本振 (local oscillation, LO) 信号, 另一路信号经环形器、天线发射到待测目标表面并产生反射, 反射信号经天线、环形器、低噪声放大器 (low-noise amplifier, LNA) 后输入给 IQ 混频器, 与 LO 信号混频后的输出 I、Q 信号频率为  $f_d(t)$ , I、Q 信号经放大器放大后由示波器记录。略去直流分量和固定相位差, 幅值归一后, I、Q 信号  $U_I(t)$  和  $U_Q(t)$  的表达式如下:

$$U_I(t) = \cos \left[ 2\pi \int_0^t f_d(t) dt \right] \quad (2)$$

$$U_Q(t) = \sin \left[ 2\pi \int_0^t f_d(t) dt \right] \quad (3)$$

$$2\pi \int_0^t f_d(t) dt = \phi(t) \quad (4)$$

$\phi(t)$  即为待测目标在空间运动时引起的电磁波相位变化。当目标的位移为  $s(t)$  时, 因探测的是从目标反射回来的电磁波, 所以相对于混频的参考信号, 反射回来的电磁波的传播距离相对变化量为  $2s(t)$ , 此时引起的相位变化量也可由下式表示:

$$\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2s(t) \quad (5)$$

即待测目标每移动二分之一波长的距离, 在混频信号中引起  $2\pi$  的相位变化。由式(5)可得待测目标的位移:

$$s(t) = \frac{\lambda_0}{4\pi} \phi(t) \quad (6)$$

由上述原理可知, 对采集到的  $U_I(t)$  和  $U_Q(t)$  信号, 在数据处理时, 一种方式是对  $U_I(t)$  信号进行短时傅里叶变换  $T_{stf,x}$  (short-time Fourier transform, STFT), 求出  $f_d(t)$  后由式(1)计算出速度  $v(t)$ ; 另一种方式是利用正交的  $U_I(t)$  和  $U_Q(t)$  信号求出  $\phi(t)$ , 由式(6)计算出随时间变化的位移  $s(t)$ , 再对  $s(t)$  求微分得到速度  $v(t)$ 。STFT 的定义为:

$$T_{\text{stf},x}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)w(\tau-t)e^{-2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

式中:  $x(\tau)$  为待变换信号,  $w(\tau)$  为窗函数, 窗口宽度由  $\tau$  决定,  $w(\tau-t)$  表示窗函数沿着时间轴  $t$  移动。当窗函数以宽度  $\tau$  沿着时间轴移动时, 相当于不断的截取信号的一小段, 再对每一小段做傅里叶变换, 从而得到信号的时频分布。在对有限长度信号做傅里叶变换时, 受时宽带宽不确定原理约束:

$$\Delta f \Delta t \geq \frac{1}{4\pi} \quad (8)$$

由式(7)~(8)可知, 当对信号  $U_1(t)$  作 STFT 分析时, 受窗函数宽度的影响, 当选择较宽的窗函数, 其频率分辨率高, 但时间分辨率变低。对于典型二级轻气炮/火炮微波干涉测速信号, 在弹丸的高速段, 信号频率高, 窗函数选择较短的窗口, 也可保证较高的相对频率分辨率。但在弹丸启动阶段, 速度较低, 干涉信号的频率低, 为分辨其速度, 窗函数需要选择较宽的窗口, 从而导致其时间分辨率极低。此外, STFT 得到的时频图谱中, 因噪声的功率谱强度一般较弱, 可在谱图中较方便地去除噪声频谱, 因而 STFT 对信噪比要求不高。

因干涉仪设计的正交混频输出, 因此可利用相位计算位移。由式(2)~(4)可得:

$$\phi(t) = \arctan \frac{U_1(t)}{U_0(t)} \quad (9)$$

利用式(9)进行相位解调计算时, 对  $U_1(t)$  和  $U_0(t)$  信号采用逐点计算, 无窗口影响, 其时间分辨率很高(纳秒量级), 仅受示波器采样率的限制。通过计算的  $\phi(t)$  求出位移  $s(t)$ 。但在利用相位解调方式求速度时, 需要对  $s(t)$  求微分, 因而对信号的信噪比要求较高。对于信噪比低、噪声频段和信号频段重合的信号, 无法通过滤波等方式提高信噪比, 这种情形不适用采用相位解调方式处理。但在弹丸启动的低速阶段, 信号频率低、噪声频率高, 可通过数字滤波有效地去除噪声。

综合考虑 STFT 和相位解调法的优缺点, 以及二级轻气炮/火炮微波干涉测速信号的特点, 对所测得的信号进行分段。对低速段, 信号频率低, 用低通滤波去除高频噪声后, 逐点进行相位解调, 计算出位移和速度; 对于高速段, 直接采用 STFT 变换, 选择较窄的窗口, 进而求出速度和位移; 最后对数据进行合成。由于在低频段是逐点计算相位, 在高频段选择的是较窄的时间窗口, 因而提高了时间分辨率。

此外, 实验测量的是弹丸在金属炮管中的运动速度, 而电磁波在炮管中的传播相当于在金属圆波导中传播, 此时式(1)、(6)中的波长  $\lambda_0$  需要由波导波长  $\lambda_g$  替换。 $\lambda_g$  由下式计算:

$$\lambda_g = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_c$  为截止波长, 由相应的传播模式和炮管直径确定。

对弹丸速度  $v(t)$  求微分可得其加速度  $a(t)$ , 在忽略弹丸与发射管壁之间摩擦阻力的情况下, 可由下式计算出弹底的压力曲线:

$$p(t) = ma(t) / \pi r^2 \quad (11)$$

式中:  $p(t)$  为弹底压力,  $m$  为弹丸质量,  $r$  为弹丸半径。

基于前述原理, 干涉仪的硬件主要采用锁相介质振荡器作为连续微波源, 圆喇叭线极化天线作为收发天线, 设计的微波干涉仪如图 2 所示。其主要参数为: 输出功率 100 mW; 工作频点 10 GHz(X 波段)和 37.5 GHz(Ka 波段); 自由空间工作距离大于 5 m(有效反射截面  $\varnothing 20$  mm 条件下); 测速范围 1 mm/s~100 km/s; 采用专用记录仪可持续记录时间大于 1 h。

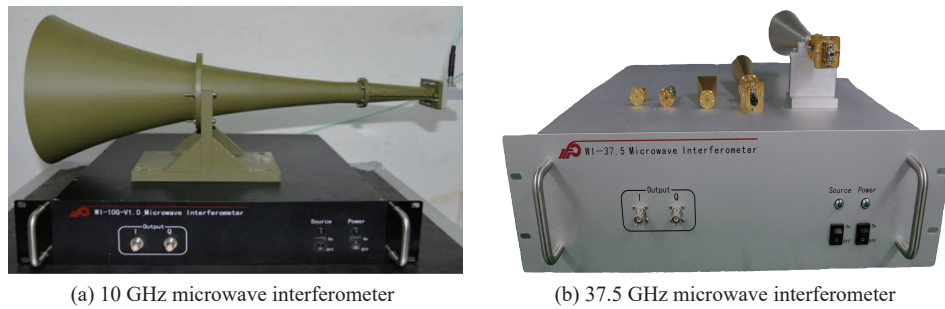


图 2 微波干涉仪图片

Fig. 2 Photos of microwave interferometers

## 2 内弹道测试系统布局

实验用的二级轻气炮发射管内径 28 mm、长度 7.8 m。整个二级炮内弹道测试系统和实验装置如图 3 所示。

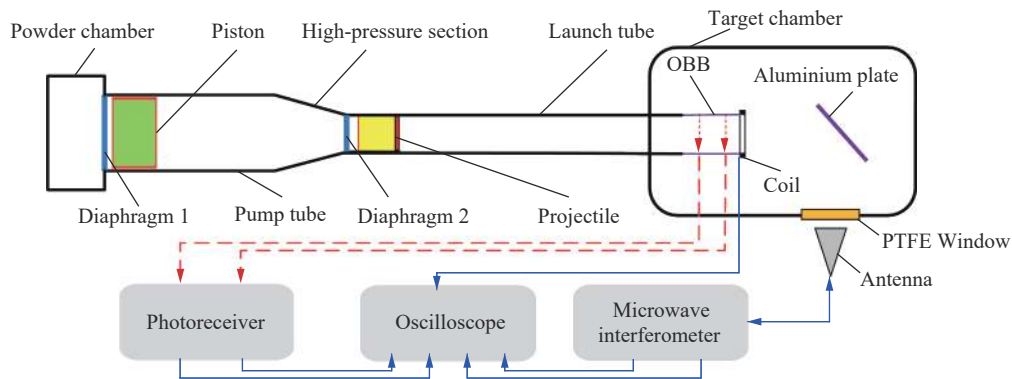


图 3 二级炮内弹道测试系统及实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the interior ballistic measurement system

炮口安装光束遮断测速装置(optical beam blocking, OBB)监测弹丸炮口速度, OBB 出口处安装法拉第磁感应线圈, 利用弹丸飞过磁环时在线圈中的感应信号作为示波器触发信号。微波干涉仪发出的微波经天线、铝反射板后, 馈入发射管, 到达弹丸前端面, 弹丸前端粘有金属飞片, 微波经金属飞片反射后沿相同路径返回微波干涉仪, 最后由示波器记录 MI 输出的两路正交 I、Q 干涉信号。整个实验过程是: 电点火头点燃火药室的硝化棉, 火药室内压力逐渐升高; 当火药室的压力达到膜片 1 的破膜压力时, 膜片 1 破裂, 火药燃气推动活塞在泵管中向前运动, 泵管中活塞前部的氢气被压缩; 当压力上升到一定值时, 膜片 2 破裂, 压缩气体推动弹丸开始运动, 此时微波干涉仪开始记录弹丸的速度信号, 直到弹丸撞击铝反射板。

火炮内弹道测试系统及实验装置与图 3 所示装置类似, 差别主要是火炮没有泵管、高压段和靶室等, 示波器的触发信号由火炮点火信号给出。

## 3 实验结果分析

### 3.1 高弹速弹道测试结果

采用 37.5 GHz(Ka 波段)微波干涉仪测量得到了 28 mm 二级轻气炮在不同发射速度下的完整内弹道数据。实验前依据装药、活塞质量和弹丸质量等装填参数预估弹速。图 4 为其中一发典型高速发射实验的内弹道测量结果(该发实验预估弹速 6.5 km/s, 实验号为 2SLGG0511(装药 1200 g、弹丸质量 24.3 g、

活塞质量 5.21 kg), 由图 4(a)可知, 在微波干涉仪测量的原始干涉信号的  $t_1$  时刻, 弹丸从静止开始加速运动,  $t_3$  时刻到达炮口,  $t_4$  时刻撞击到铝反射板。注意到, 在  $t_2$  时刻前后, 微波信号的幅值变小, 分析认为应该是此时前冲气体对 Ka 波段的微波具有较强的吸收所致。图 4(b)为微波干涉仪信号的时频谱, 可见在主信号频率外, 还有多个频率旁瓣, 这是由于微波在炮管内传播的多个模式形成的干涉信号以及部分倍频信号。图 4(c)为处理得到的内弹道信息, 实验中微波穿透前冲气体, 获得了弹丸完整的内弹道及外弹道的速度历史, 在炮口处 ( $t_3$  时刻) 速度为 6.516 km/s, 与炮口 OBB 测速结果 6.51 km/s 的差异仅为 0.09%, 验证了微波干涉仪测量结果的正确性。对速度曲线进行积分, 得到弹丸运动位移, 在  $t_3$  时刻 (炮口) 的位移与二级炮炮管长度一致。图 4(c)中还给出了由测量的速度曲线计算的弹底压力曲线, 可以看出, 弹丸在膜片 2 破裂后受到多次冲击加载, 弹底最高压力约 275 MPa。

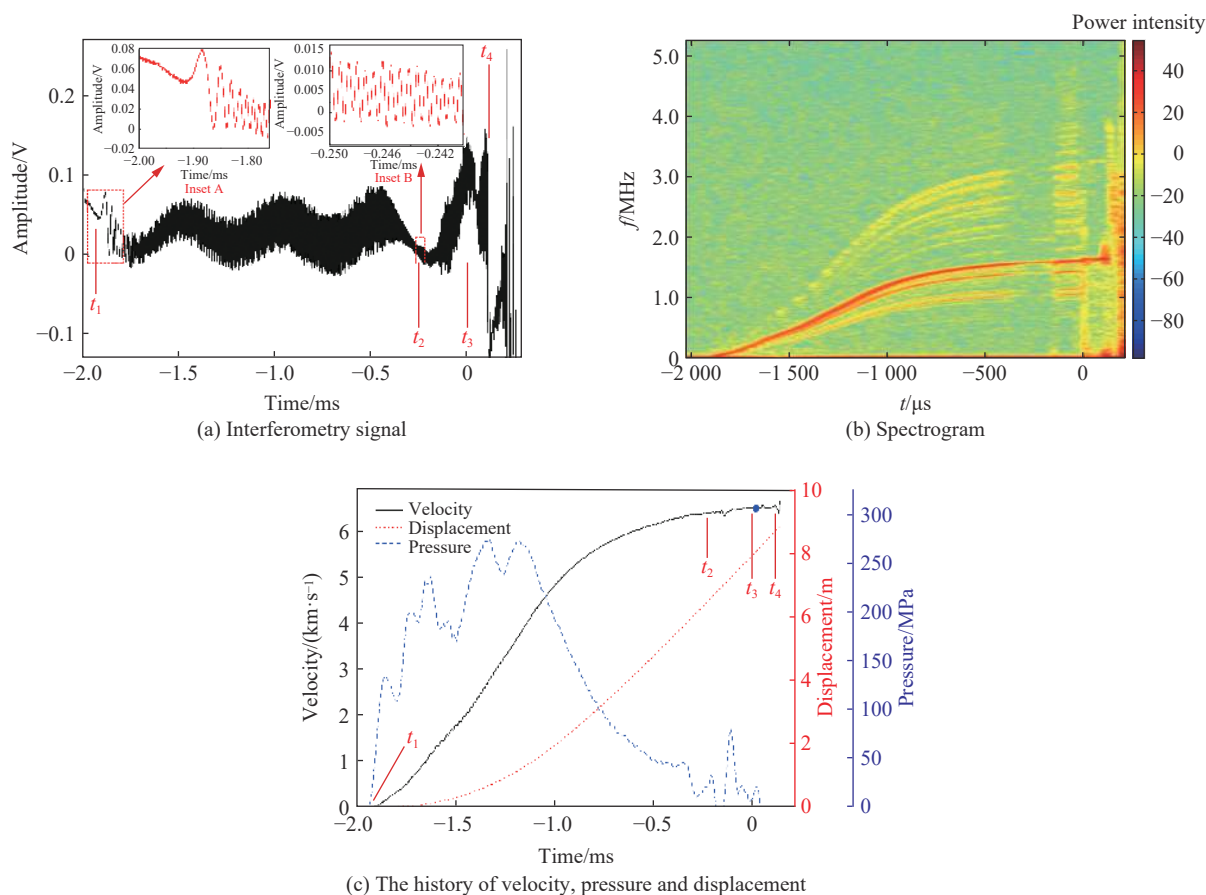


图 4 二级轻气炮实验数据(实验号 2SLGG0511)

Fig. 4 Experimental data from the two-stage light gas gun (test No. 2SLGG0511)

### 3.2 故障弹速段测试结果

该二级炮装置在过往的发射实验中存在一个令人费解的现象: 在大装药量、高弹速发射情况下(如前述实验, 装药量为 1200 g)几乎没有发生过碎弹现象, 反而在 900 g 左右装药、其他装填参数如活塞质量、注气压力和弹丸质量等相同的条件下, 该二级炮有一定概率发生弹丸在启动后不久就碎弹的现象, 这与“常识”不符。希望能够通过实测的内弹道信息探究该装填参数下碎弹的原因。

图 5 为该装填参数条件(实验号为 2SLGG0429, 装药 900 g、弹丸质量 24.4 g、活塞质量 5.21 kg)下利用 37.5 GHz 微波干涉仪实测的内弹道结果。该发实验微波干涉仪测量的弹丸出炮口速度为 5.56 km/s, 而 OBB 测速结果为 5.55 km/s, 两者差异为仅 0.18%。从实测的速度曲线和对应的弹底压力曲线上看, 其

曲线特征与图 4 实验结果不同, 图 5 中弹丸启动后, 经历了较长时间(约 0.7 ms)的低加速运动, 在  $t_2$  时刻以前, 最高弹底压力约为 35 MPa, 在  $t_2$  时刻突然受到很强的加载, 随后很快弹底压力达到最大值 250 MPa。对比图 4 和图 5 的弹底压力曲线, 可明显看出图 4 中弹底压力上升时间较长(约 0.7 ms), 类似准等熵加载, 而图 5 中的  $t_2$  时刻附近弹底压力上升时间比较快速(约 0.2 ms), 即弹丸在  $t_2$  时刻受到很强的二次冲击加载, 从而容易导致碎弹。此外,  $t_2$  时刻对应的位移约为数百毫米, 也与实际碎弹的位置相符合。

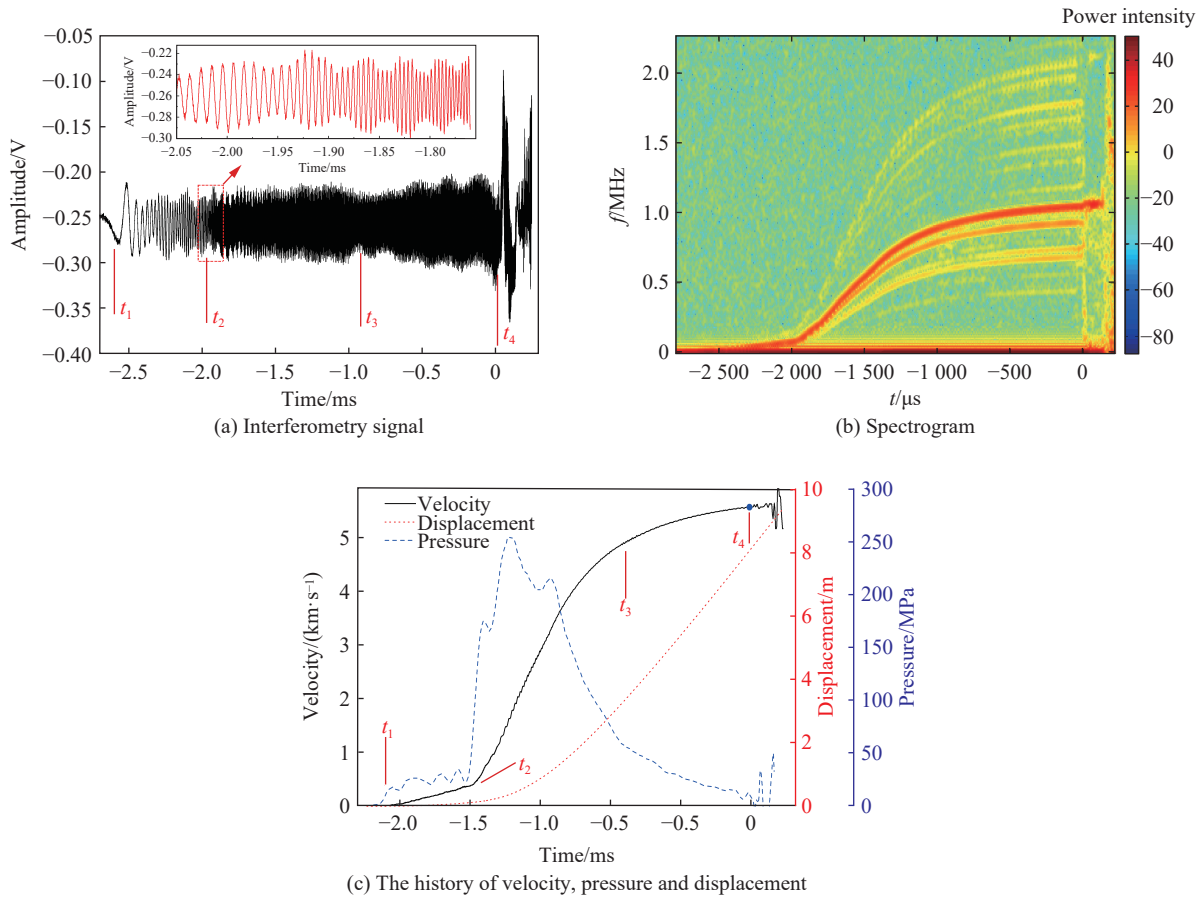


图 5 二级轻气炮实验数据(实验号 2SLGG0429)

Fig. 5 Experimental data from the two-stage light gas gun (test No. 2SLGG0429)

### 3.3 前冲气体和弹速测试结果

采用激光干涉技术测量二级炮内弹道工作中, 测量会受到前冲气体影响而难以获得完整的内弹道数据。为观测发射管内高速前冲气体情况, 依据电离气体对 X 波段的微波具有强的反射和弱的透射, 而对 Ka 波段的微波具有强的透射和弱的反射特点<sup>[22]</sup>, 采用 10 GHz(X 波段)微波干涉仪测量二级炮前冲气体的状态。实验前依据装填参数预估弹速为 4.7 km/s。实验号为 2SLGG1201(装药 700 g、弹丸质量 22.1 g、活塞质量 5.21 kg), 实验数据及处理结果如图 6 所示。在  $t_1$  时刻, 前冲气体干涉信号出现, 速度为 7.25 km/s, 随后连续测量到前冲气体在发射管中运动, 由于等熵膨胀气体压力温度下降, 因此气体速度随之下降。在  $t_2$  时刻, OBB 信号受到前冲气体干扰, 且速度曲线上出现跳变, 可判定此时前冲气体冲出炮口, 微波信号开始从弹丸表面反射, 此刻气体速度下降到 2.92 km/s, 弹丸速度为 4.12 km/s。  $t_2 \sim t_3$  时间段, 弹丸继续在发射管内加速运动, 直到  $t_3$  时刻弹丸出炮口, 此时弹速为 4.691 km/s,  $t_3 \sim t_4$  时间段为弹丸在发射管外运动, 并在  $t_4$  时刻撞击到铝反射板。OBB 测量的炮口速度为 4.67 km/s, 与微波干涉仪测试结果的差异为 0.43%。该发实验首次观测到二级轻气炮发射管内的前冲气体的完整运行过程。

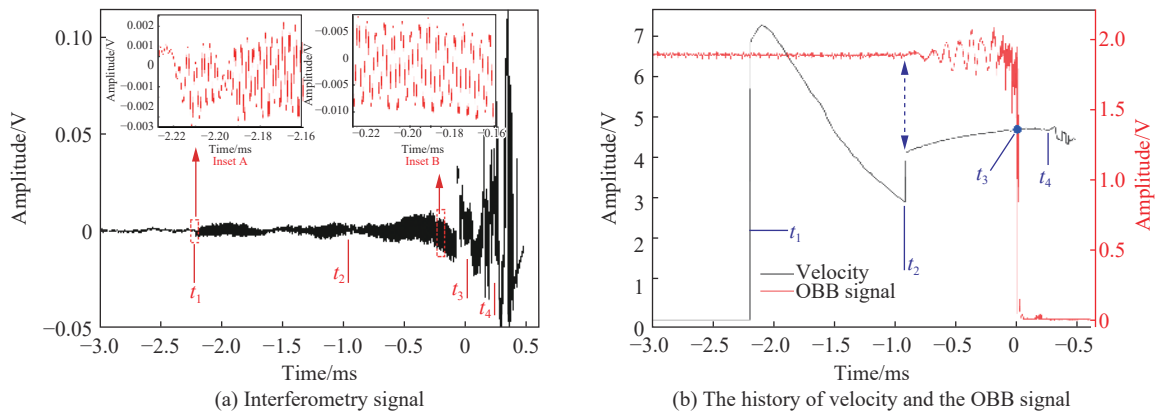


图 6 二级轻气炮实验数据(实验号 2SLGG1201)

Fig. 6 Experimental data from the two-stage light gas gun (test No. 2SLGG1201)

### 3.4 火炮弹道测试结果

常规火炮弹速一般在 2 km/s 以下,对高速火炮的研究较少,弹道实验数据缺乏。为给高速火炮设计优化以及内弹道计算程序相关参数的修正提供实验数据支撑,采用 10 GHz 微波干涉仪对新研制的  $\phi 57$  mm 高速火炮开展内弹道测试,实验前预估弹速为 2.6 km/s,实验装药 2 200 g,弹丸质量 279 g。测试结果如图 7 所示。 $t_1$  时刻弹丸启动, $t_2$  时刻达到炮口,此时测得的弹丸速度为 2.53 km/s。 $t_1 \sim t_2$  时间段为弹丸在发射管内运动。 $t_4$  时刻弹丸撞击到铝反射板, $t_2 \sim t_4$  时间段为部分外弹道过程。从图 7(a)中可以看到, $t_2 \sim t_3$  时间段干涉信号幅值明显变小,且信号基线也受到扰动,持续时间约 350  $\mu$ s。这是因为在  $t_2$  时刻弹丸出炮口,弹丸后面的火药燃烧产物及气体前冲到弹丸前部,强烈吸收微波所致,不过因为此段信号是采用短时傅里叶变换进行信号处理,对幅值不敏感,所以并不影响数据处理结果。因火药燃烧气体的强烈干扰,此发实验 OBB 测速装置信号无法计算出炮口弹速。从图 7(b)中加速度曲线看,火炮的弹丸没有明显受到冲击波多次冲击加载现象。

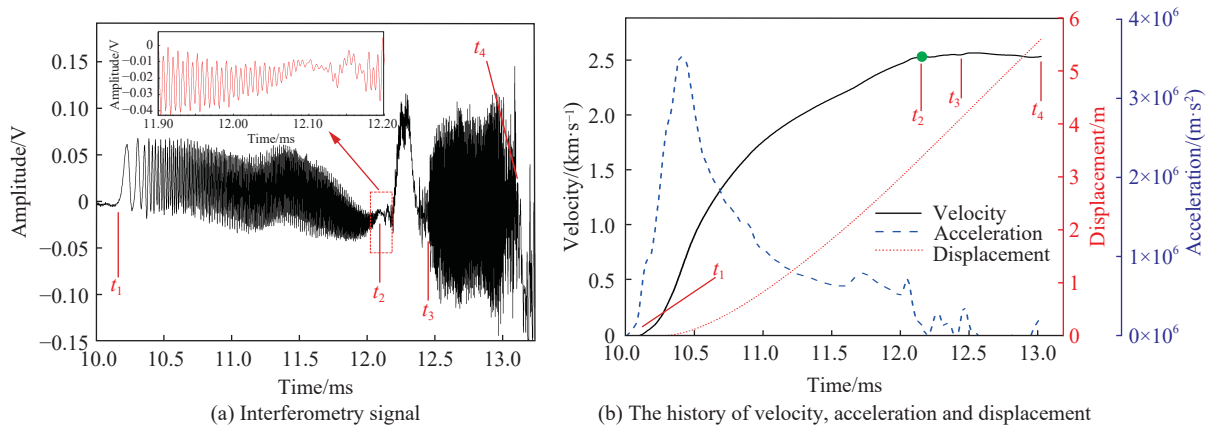


图 7 高速火炮实验数据

Fig. 7 Experimental data from the high-speed powder gun

## 4 结束语

研制了 Ka 和 X 两个波段的微波干涉测速仪,可应用于高速弹丸和高速电离气体的速度测量,对二级轻气炮/高速火炮内弹道进行了测试,获取了二级轻气炮/高速火炮完整的内弹道弹速曲线,进而获得加速度、位移、弹底压力等信息。利用电离气体对不同频段微波的反射、吸收和透射特性,采用 X 波段



的微波干涉仪,获取了二级轻气炮发射管内前冲气体的速度历史曲线。通过对弹丸在加速过程中弹底压力变化数据分析,从实验上证实了在某些装填参数下,弹底承受了很强的二次冲击,容易导致碎弹。实验测量的内弹道数据对二级炮/高速火炮的设计、弹道计算程序参数修正、装填参数优化以及异常现象分析等具有重要意义和实用价值。

该实验技术可避免其他二级炮内弹道诊断技术易受前冲气体影响、不能连续测速等缺点,是较理想的气炮/火炮弹道参数诊断手段。此外,利用不同频段微波对不同材料的透射和反射特性,该实验技术亦可用于炸药爆轰、气体爆轰、电介质材料冲击压缩研究中。若测试同时采用双频段(或多频段)干涉系统,利用不同频段对不同材料界面的反射特性差异,则有望在一发实验中实现多个不同界面速度的测量。

## 参考文献:

- [1] 王金贵. 气体炮原理及技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 71-94.
- [2] 杨敏涛. 微波干涉仪在武器研制中的应用 [J]. 火炮发射与控制学报, 1996(4): 23-27.  
YANG M T. Application of microwave interferometer in the armament research [J]. Journal of Gun Launch & Control, 1996(4): 23-27.
- [3] 王东方, 肖伟科, 庞宝君. NASA 二级轻气炮设备简介 [J]. 实验流体力学, 2014, 28(4): 99-104. DOI: 10.11729/sytltx2014pz02.  
WANG D F, XIAO W K, PANG B J. A brief introduction on NASA's two stage light gas guns [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(4): 99-104. DOI: 10.11729/sytltx2014pz02.
- [4] 王为, 王翔. 二级轻气炮发射过程中前冲气体的初步研究 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(1): 94-96. DOI: 10.11858/gywlb.2004.01.017.  
WANG W, WANG X. Measurement of the precursor gas accompanied with the launch of two-stage gas gun [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(1): 94-96. DOI: 10.11858/gywlb.2004.01.017.
- [5] 杨继运. 二级轻气炮模拟空间碎片超高速碰撞试验技术 [J]. 航天器环境工程, 2006, 23(1): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2006.01.003.  
YANG J Y. Simulation of space debris hypervelocity impact using two stage light gas gun [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(1): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2006.01.003.
- [6] 王为, 陈宏, 王翔. 紧凑型全光纤内弹道弹速测量系统 [J]. 应用光学, 2011, 32(4): 723-729. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2082.2011.04.026.  
WANG W, CHEN H, WANG X. Compact all fiber interior ballistic projectile velocity measurement system [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(4): 723-729. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2082.2011.04.026.
- [7] WENG J D, TAN H, WANG X, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(11): 111101. DOI: 10.1063/1.2335948.
- [8] 王德田, 彭其先, 刘俊, 等. 激光干涉测速技术在弹道弹丸速度测量中的应用研究 [J]. 高压物理学报, 2011, 25(2): 133-137. DOI: 10.11858/gywlb.2011.02.007.  
WANG D T, PENG Q X, LIU J, et al. Application of laser velocity interferometry in interior ballistic projectile velocity measurement [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(2): 133-137. DOI: 10.11858/gywlb.2011.02.007.
- [9] 彭其先, 蒙建华, 刘俊, 等. 激光干涉测速技术在火炮内弹道研究中的应用 [J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 96-99.  
PENG Q X, MENG J H, LIU J, et al. Laser velocity interferometry for interior ballistic research [J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 96-99.
- [10] 陶天炯, 王翔, 陈宏, 等. 频率混叠在气体炮内弹道速度测量中的应用 [J]. 高压物理学报, 2013, 27(4): 523-527. DOI: 10.11858/gywlb.2013.04.009.  
TAO T J, WANG X, CHEN H, et al. Frequency aliasing used in interior ballistic velocity measurements for gas guns [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(4): 523-527. DOI: 10.11858/gywlb.2013.04.009.
- [11] BEL'SKII V M, MIKHAILOV A L, RODIONOV A V, et al. Microwave diagnostics of shock-wave and detonation processes [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2011, 47(6): 639-650. DOI: 10.1134/S0010508211060037.
- [12] TASKER D G, BAE Y K, JOHNSON C, et al. Voitenko experiments with novel diagnostics detect velocities of 89 km/s [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 135: 103406. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103406.

- [13] ELIA T, CHUZEVILLE V, BAUDIN G, et al. Review of the wedge test and single curve initiation principle applied to aluminized high explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(10): 1541–1553. DOI: 10.1002/prop.201900300.
- [14] MAYS R O, TRINGE J W, SOUERS P C, et al. Experimental and computational investigation of microwave interferometry for detonation front characterization [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1979(1): 160016. DOI: 10.1063/1.5045015.
- [15] 张玉成, 张江波, 严文荣, 等. 基于弹丸膛内速度微波测量的发射药燃烧规律 [J]. *火炸药学报*, 2010, 33(4): 74–77. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2010.04.019.
- ZHANG Y C, ZHANG J B, YAN W R, et al. Burning rules of gun propellant in powder chamber based on bullet velocity measurement with microwave interferometer [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(4): 74–77. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2010.04.019.
- [16] CHEN X H, ZENG X L, FAN D, et al. Note: phase retrieval method for analyzing single-phase displacement interferometry data [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(2): 026016. DOI: 10.1063/1.4865113.
- [17] 孔伟, 肖剑, 常增田, 等. 基于相位解卷绕的膛内弹丸运动信号处理 [J]. *弹箭与制导学报*, 2012, 32(2): 189–192. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2012.02.052.
- KONG W, XIAO J, CHANG Z T, et al. Signal processing of projectile moving in-bore based on phase unwrapping algorithm [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(2): 189–192. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2012.02.052.
- [18] KITTELL D E, MARES J O, SON S F. Using time-frequency analysis to determine time-resolved detonation velocity with microwave interferometry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(4): 044705. DOI: 10.1063/1.4916733.
- [19] TRINGE J W, KANE R J, VANDERALL K S, et al. Microwave interferometry for understanding deflagration-to-detonation and shock-to-detonation transitions in porous explosives [C] // 15th International Detonation Symposium. San Francisco: LLNL, 2014: LLNL-CONF-656294.
- [20] HALOUA F, BROUILLETTE M, LIENHART V, et al. Characteristics of unstable detonations near extinction limits [J]. *Combustion and Flame*, 2000, 122(4): 422–438. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00134-6.
- [21] KRALL A D, GLANCY B C, SANDUSKY H W. Microwave interferometry of shock waves. I. unreacting porous media [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(10): 6322–6327. DOI: 10.1063/1.355154.
- [22] DAN L, GUO L X, LI J T. Propagation characteristics of electromagnetic waves in dusty plasma with full ionization [J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25(1): 013707. DOI: 10.1063/1.5003717.

(责任编辑 曾月蓉)