

### 火炮装药内弹道性能次要功计算系数测试方法

赵煜华, 闫光虎, 严文荣, 杨伟涛

引用本文:

赵煜华, 闫光虎, 严文荣, 等. 火炮装药内弹道性能次要功计算系数测试方法[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 90-93.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 基于多岛遗传算法的12.7 mm枪管结构优化

引用本文: 王力, 杨臻, 蔡翘楚, 等. 基于多岛遗传算法的12.7 mm枪管结构优化[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10): 53-57.

#### 2. SRM装药界面力学性能研究进展

引用本文: 乔栋, 强洪夫, 王哲君. SRM装药界面力学性能研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 13-18.

#### 3. 一种点传火管特性参数的理论预估与实验验证

引用本文: 焦旭英, 严蕊, 周敬, 等. 一种点传火管特性参数的理论预估与实验验证[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10): 183-187.

#### 4. 一种TNT基熔铸装药的加速老化研究

引用本文: 邓海, 梁争峰, 闫峰. 一种TNT基熔铸装药的加速老化研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 42-45.

#### 5. 弹目偏差仿真系统的设计与实现

引用本文: 陈浩, 屈艺, 吴盘龙, 等. 弹目偏差仿真系统的设计与实现[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 154-159.

# 火炮装药内弹道性能次要功计算系数测试方法

赵煜华, 闫光虎, 严文荣, 杨伟涛

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

**摘要:**提出了一种基于多普勒原理的弹丸膛内运动微波干涉测试系统和多点压力同步测试技术的火炮装药内弹道性能次要功计算系数测试方法。该方法可以有效获得涵盖弹丸整个膛内运动过程的装药内弹道性能次要功计算系数,为发射装药内弹道性能预估提供可靠的计算参数。采用微波干涉仪、压电压力测试系统,30 mm 火炮对建立的次要功计算系数测试方法进行了试验研究。结果表明:在弹丸膛内运动过程中,次要功计算系数随着弹丸速度的增加而逐渐减小并趋于一个定值;在进行装药内弹道性能预估计算时,次要功计算系数需根据弹丸速度进行分段取值,以提高预估计算精度。

**关键词:**发射装药;测试方法;次要功计算系数;微波干涉仪

**本文引用格式:**赵煜华, 闫光虎, 严文荣, 等. 火炮装药内弹道性能次要功计算系数测试方法[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(09): 90-93.

**Citation format:**ZHAO Yuhua, YAN Guanghu, YAN Wenrong, et al. Measurement Method of Subordinate Work Calculation Coefficient for Interior Ballistic Performance of Gun Propellant Charge[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(09): 90-93.

中图分类号:TJ55

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2020)09-0090-04

## Measurement Method of Subordinate Work Calculation Coefficient for Interior Ballistic Performance of Gun Propellant Charge

ZHAO Yuhua, YAN Guanghu, YAN Wenrong, YANG Weitao

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** A testing method was founded by the microwave interferometer measurement system of the projectile motion based on the Doppler principle and the multi-points pressure synchronous test technology of the gun's interior ballistic performance. The method can obtain the subordinate work calculation coefficient of the gun, which covers the whole process of the projectile motion in the chamber. And the method provides a reliable basic calculation parameter for the estimation of the interior ballistic performance. The experiment was done to test the subordinate work calculation coefficient using microwave interferometer, pressure testing system with piezoelectricity sensors and 30 mm artillery. The results show that the subordinate work calculation coefficient is a set of changing values, which decreases with the increase of the projectile velocity and gradually approaches a fixed value. In the process of predicting the interior ballistic performance of gun propellant charge, the subordinate work calculation coefficient should be evaluated in sections according to the projectile velocity to improve the calculation accuracy of the interior ballistic performance parameters.

**Key words:** propellant charge; measurement method; subordinate work calculation coefficient; microwave interferometer

收稿日期:2020-01-03;修回日期:2020-03-04

基金项目:国防科技重点实验室稳定支持项目(2019SYSZCJJ);基础产品创新科研火炸药专项(JCKY46)

作者简介:赵煜华(1985—),男,硕士,工程师,主要从事发射药及装药技术研究,E-mail:guoke051@163.com。

随着新型高能发射药的不断研制成功,发射装药内弹道性能仿真对发射药的装药设计及火炮的身管结构设计有着重要意义。通过对内弹道方程组的求解计算,可以深入的了解膛内压力、速度等参量的变化规律<sup>[1]</sup>。准确的内弹道性能仿真可以对发射药制备提供指导意见,有效降低发射药装药方案的试验量,减少试验成本,缩短发射药研制周期;基于内弹道模型仿真获得的火炮膛内压力分布状况可以为火炮的身管结构、反后坐装置等的设计提供准确可靠的基础数据。国内外学者采用内弹道模型对发射装药的性能进行了大量计算研究工作,为发射装药技术研究提供了重要技术支撑<sup>[2-5]</sup>。

次要功计算系数是内弹道仿真模型中的一个重要参数,包含了弹丸的旋转运动功及摩擦功等信息,其数值的准确性对内弹道仿真结果的精度存在较大影响<sup>[6]</sup>。获得次要功计算系数的传统方法一般是采用理论公式或经验公式进行计算,其中弹丸结构、膛线缠角、弹带的材料性能及其与膛壁之间的摩擦系数、火炮后坐机构质量等参数需进行测量并作为初始计算输入参数,计算工作量较大;此外,还需根据装药内弹道初速膛压等试验数据进行符合计算,对计算出的次要功系数进行修正,才能获得与该火炮匹配的内弹道预估用的次要功计算系数。整个计算过程繁琐,对于大口径火炮而言试验成本较为昂贵,周期长且耗费大量人力物力。

本研究针对以上方法的不足,建立了一种基于多普勒原理的弹丸膛内运动微波干涉测试系统<sup>[7-10]</sup>和多点压电压力同步测试技术<sup>[11]</sup>的次要功计算系数测试方法,在单次试验中,通过同步测试弹丸在火炮膛内的运动参数及膛内压力参数并联立内弹道方程即可获得次要功计算系数。与传统方法相比,本研究建立的方法实施过程简单,试验成本也较低,不需考虑弹丸结构、材料等因素的影响,获得的次要功计算系数是一组随弹丸运动过程变化的数据,涵盖火炮发射过程中整个膛内弹丸运动过程,数值更为准确,有助于提高基于该次要功计算系数进行的发射药装药内弹道性能预估及装药设计的准确性。

## 1 测试系统及原理

### 1.1 测试系统

为完成火炮装药内弹道性能次要功计算系数的测试,采用30 mm 火炮、压电压力传感器、数据采集系统、微波干涉仪等组成的次要功计算系数测试系统,其系统原理如图1所示。

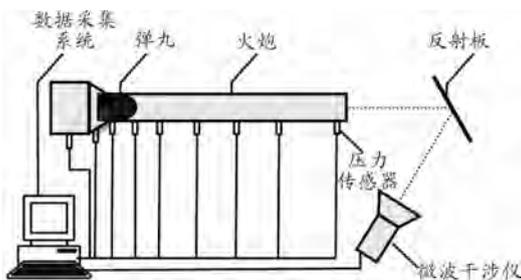


图1 次要功计算系数测试系统原理示意图

### 1.2 试验原理

微波干涉仪的测试原理如图2所示。结合图1和图2所示,弹丸在膛内运动过程中,微波干涉仪持续进行微波信号的发射与接收。发射出的信号经过反射板反射进身管;当弹丸前端面接触微波信号后,又将其反射至反射板,继而由反射板再次反射给微波干涉仪;微波干涉仪将接收到的微波通过混频滤波后,即可得到含有弹丸运动信息的微波干涉信号。

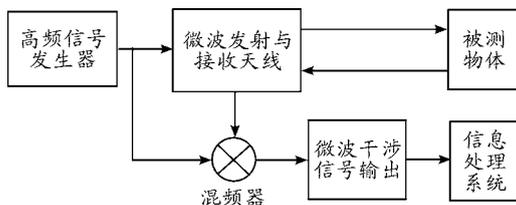


图2 微波干涉仪测试原理框图

通过对所测微波干涉信号进行时频分析,根据多普勒原理完成弹丸速度的计算,得到弹丸运动速度时间曲线,计算公式如式(1)所示:

$$v = \frac{(f_1 - f_2)\lambda_0}{2} \quad (1)$$

式中: $f_1$ 为微波干涉仪发射的电磁波频率(Hz); $f_2$ 为弹丸反射后微波干涉仪接收的电磁波频率(Hz); $\lambda_0$ 为微波干涉仪发出电磁波的波长(m); $v$ 为弹丸在膛内的运动速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。对弹丸膛内速度时间曲线分别进行积分和微分计算,即可获得弹丸在膛内的行程时间曲线、加速度时间曲线。

在试验中采用15枚压电压力传感器测试不同位置的膛内压力变化曲线( $p-t$ 曲线),利用微波干涉仪测试火炮发射过程中弹丸运动参数,微波干涉仪和压力采集系统用同步触发器进行时间同步。将测试获得的弹丸膛内运动速度时间曲线( $v-t$ 曲线)起点对应的时刻记为 $t_0$ ,将曲线沿横轴向坐标轴原点方向平移 $t_0$ ,平移后曲线的最大时刻点记为 $t_1$ ,得到系列速度值 $v(t)$ ;将15枚压电压力传感器测试的各条 $p-t$ 曲线沿横轴向坐标轴原点方向平移 $t_0$ ,得到系列压力值。

基于火炮膛内压力分布服从拉格朗日假设及经典内弹道理论<sup>[12]</sup>,弹丸运动方程如式(2)所示:

$$sp = \varphi m \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

式(2)中: $s$ 为身管截面积( $\text{m}^2$ ); $\varphi$ 为次要功计算系数,无量纲; $m$ 为弹丸质量(kg); $t$ 为时间(s); $v$ 为弹丸速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),由微波干涉仪测试获得; $p$ 为膛内平均压力(Pa),按照式(3)计算获得。

膛后膛内平均压力按照式(3)计算:

$$p = \frac{1}{l_i} \int_0^{l_i} p_i dl, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

式(3)中: $p_i$ 指弹丸行程 $l$ 为 $l_i$ 时对应位置的压电压力传感器测试的膛内压力(Pa); $i$ 为压电压力传感器的位置编号; $n$

为压电压力传感器的个数; $l$ 为弹丸行程(m)。

弹丸运动加速度与速度关系按照式(4)计算:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

联立式(2)~式(4)可计算出火炮装药内弹道性能次要功计算系数,如式(5)所示:

$$\varphi = \frac{s \cdot \int_0^{l_i} p_i dl}{l_i \cdot m \cdot a} \quad (5)$$

## 2 次要功计算系数测试方法验证试验

试验中的发射药样品:单基药-5/7樟发射药,主要成分为硝化棉、二苯胺、樟脑和石墨等,泸州北方化学工业有限公司研制。

试验中采用的测试仪器:DEWE-2010型数据采集仪,奥地利德维创公司;6213B型压电压力传感器,瑞士Kistler公司;IM-W95型微波干涉仪(波长3 mm、频率95 GHz)、SYS-TRIG-L型同步触发系统(同步精度1  $\mu$ s),中北大学研制。

在30 mm火炮上进行了次要功计算系数测试试验,采用中心传火管结构,黑火药作为传火药,点火方式为电底火点火。沿膛底至炮口安装15枚压电压力传感器,同时使用微波干涉仪测量弹丸在膛内的运动过程参数。

30 mm火炮的装填参数为:药室容积315 mL,截面积7.07  $\text{cm}^2$ ,弹丸行程2 085 mm,弹丸质量0.2 kg,装药量0.185 kg。

试验中采用的15枚6213B型压电压力传感器的安装位置编号及坐标信息如表1所示。

表1 压电压力传感器安装位置参数

编号	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
坐标/mm	307	317	370	380	442	472	562
编号	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$
坐标/mm	587	732	787	1 352	1 427	2 342	2 392

注:编号 $X_1$ 的传感器为膛底位置, $X_1 = 130$  mm。

## 3 结果与讨论

微波干涉仪测试获得的弹丸在火炮身管内运动的速度时间曲线及位移时间曲线如图3所示。从图3可以看出:弹丸在火炮身管内运动的炮口速度为1 380.3  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,弹丸在膛内运动时间为2.964 ms。

对于试验中测试获得的15路膛内不同位置处的压力-时间曲线,将编号为 $X_2$ 的压力-时间曲线起点归零处理,将其余的14条压力时间曲线按照前文所述的方法进行平移变换,获得的多点同步测试压力曲线如图4所示。

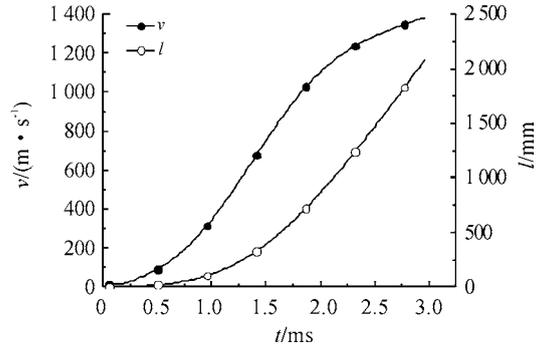


图3 弹丸膛内速度-时间曲线及位移-时间曲线

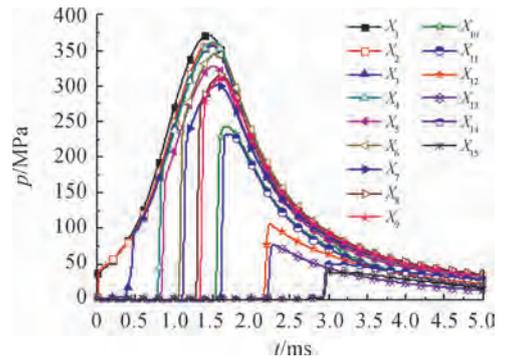


图4 膛内不同位置处的压力时间曲线

将图4中的各个不同位置处的膛内压力时间变化曲线选择不同的时刻点取压力值,获得不同时刻的膛内压力分布曲线,如图5所示。

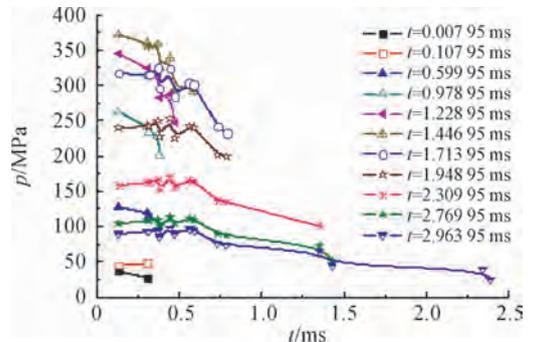


图5 不同时刻的膛内压力分布曲线

将图5中不同时刻的膛内压力分布曲线沿 $x$ 轴积分,按照式(3)计算获得弹后空间平均压力随时间变化曲线,如图6所示。

将图3中的弹丸膛内速度-时间曲线对时间进行微分,按照式(4)计算获得弹丸在膛内运动的加速度时间曲线;将计算获得的弹丸膛内加速度、图6中计算获得的弹后空间平均压力,按照式(5)计算获得装药内弹道性能次要功计算系数变化曲线,如图7所示。

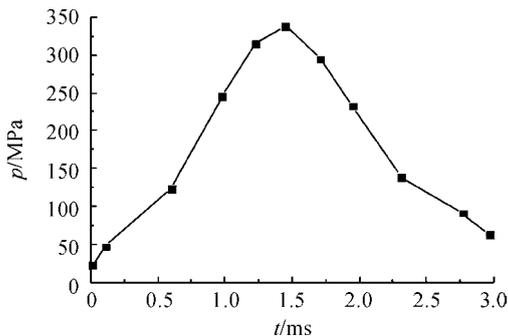


图6 弹后空间平均压力随时间变化曲线

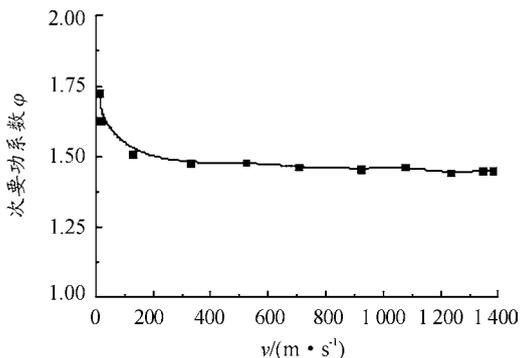


图7 次要功计算系数变化曲线

从图7可以看出,在弹丸膛内运动过程中,次要功计算系数是一组变化的值,并在弹丸速度达到  $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以后趋近于一个定值;对图7数据进行分析可知,在进行装药内弹道性能预估计算过程中,当弹丸速度在  $0 \sim 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  内时,次要功计算系数取平均值 1.58;当弹丸速度大于  $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,次要功计算系数取平均值 1.46。图7结果表明:在整个内弹道性能预估过程中,次要功计算系数需根据弹丸的速度范围进行分段取值,以提高内弹道性能参数的预估计算精度。

## 4 结论

基于微波干涉仪及多点压力同步测试技术建立的次要功计算系数测试方法,可以有效获得火炮装药内弹道性能次要功计算系数,涵盖火炮发射过程中弹丸整个膛内运动过程,为发射装药内弹道性能预估提供了可靠的基础计算参数。

在弹丸膛内运动过程中,次要功计算系数随着弹丸速度的增加而逐渐减小并趋近于一个定值;在进行装药性能预估

计算时,次要功计算系数需根据弹丸速度范围进行分段取值,以提高内弹道性能参数的预估计算精度。

## 参考文献:

- [1] 王泽山,何卫东,徐复铭.火炮发射装药设计原理及技术[M].北京:北京理工大学出版社,2014.
- [2] HIMADRI S S, SUNIL J, SHETTY C P, et al. Interior Ballistic Model with Variable Burn Rate Coefficients for Gun Propulsion System [C]//31st International Symposium on Ballistics. Hyderabad, 2019: 242 - 250.
- [3] HU C B, ZHANG X B. Influence of Multiple Structural Parameters on Interior Ballistics Based on Orthogonal Test Methods [J]. Defence Technology, 2019 (05): 26 - 33.
- [4] XIN T, YANG G L, SUN Q Z. Numerical Simulation of Interior Ballistic Performance of Modular Charge by Two Models [C]//31st International Symposium on Ballistics. Hyderabad, 2019: 554 - 561.
- [5] WANG J G, YU Y G, ZHOU L L, et al. Numerical Simulation and Optimized Design of Cased Telescoped Ammunition Interior Ballistic [J]. Defence Technology, 2018, 14 (2): 119 - 125.
- [6] 翁春生,王浩.计算内弹道学[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [7] 杭宇,孔德仁,边鹏,等.弹丸内弹道特性参数测试方法综述[J].测控技术,2016,35(11):25-28.
- [8] 彭军涛.基于微波干涉原理的膛内外弹丸运动参数测量雷达终端的设计与实现[D].南京:南京理工大学,2016.
- [9] 闫光虎,赵煜华,张玉成,等.DAGQ发射药膛内静态和动态燃烧性能[J].火炸药学报,2016,39(06):98-102.
- [10] 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(04):74-77.
- [11] 赵煜华,闫光虎,张玉成,等.基于多点压力测试系统的发射药膛内燃速测试技术[J].火炸药学报,2019,42(06):303-307.
- [12] 张小兵.枪炮内弹道学[M].北京:北京理工大学出版社,2014.

科学编辑 张相炎(南京理工大学教授)  
责任编辑 周江川