

文章编号: 1006-9941(2011)01-0078-04

发射药膛内两种燃速测试方法的比较

张江波, 张玉成, 李强, 严文荣, 闫光虎, 赵晓梅

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了研究发射药在火炮膛内的燃烧规律, 以经典内弹道理论为基础, 从理论上分析了常规测试和微波测试的可行性, 并建立了相关的计算处理方法。常规测试方法和微波测试方法分别采用 $p-t$ 曲线、炮口初速和 $v-t$ 曲线作为基础数据, 经相关计算得到发射药膛内燃速。试验结果表明, 理论计算 $p-t$ 曲线和试验 $p-t$ 曲线能够较好地吻合, 在 80 ~ 250 MPa 压力范围内, 常规测试和微波测试所测燃速范围分别为 17 ~ 29 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 8 ~ 23 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。发射药在膛内的燃速关系式偏离指数式较远, 微波测试方法的准确性在一定程度上要高于常规测试方法。

关键词: 复合材料; 发射药; 燃速; 炮口初速; 微波测试方法

中图分类号: TJ55; TB332

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.018

1 引言

发射药是身管武器完成弹丸发射的动力能源, 它的燃烧性能直接决定了弹丸的初速、武器身管的寿命、武器发射的稳定性。密闭爆发器试验作为发射药燃烧性能的评估手段和发射药燃速测试的主要方法, 为发射药的研制和发射装药的设计提供了基本保障。由于发射药在炮膛内的燃烧伴随着发射药及燃气的高速运动, 爆发器所测燃速不能很好的应用于内弹道及装药设计中, 而是普遍采用发射药燃速的经验值, 这在一定程度上增大了理论值和试验值之间的误差^[1]。国外对发射药膛内燃速的研究从来未间断过, 国内黄振亚^[2-3]、肖正刚^[4]对发射药的膛内燃速规律进行了研究。

本文根据经典内弹道理论基础, 从理论上分析了两种试验方法的可行性并建立了相关的计算方法, 分别对膛内燃速进行了试验测试和计算, 实测数据和理论计算能够较好地符合。两种方法都能给出发射药膛内燃速范围, 微波测试方法所得结果较常规测试方法所得结果的准确性较高。

2 基本原理

2.1 测试系统

为完成膛内燃速的测试, 采用 30 mm 高压滑膛炮、

压电传感器、数据采集仪、微波干涉仪组成的膛内弹丸运动微波干涉仪测试系统如图 1 所示。微波干涉仪通过高频微波头发射微波经过信号反射面板后射向弹丸表面, 在发射药点燃后, 当弹丸在火药气体作用下运动时, 微波行程距离变短, 通过微波信号处理单元即可获得膛内弹丸的实时运动状态。通过膛底压力传感器及炮口信号传感器可获得膛底压力和弹丸出炮口时间。

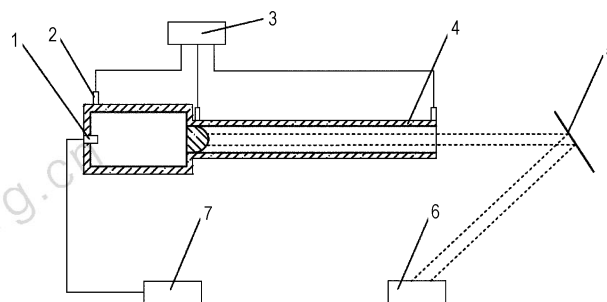


图 1 微波干涉仪测试系统示意图

1—底火, 2—压力传感器, 3—数据采集仪, 4—火炮, 5—微波反射板, 6—信号处理器, 7—点火电源

Fig. 1 Sketch of testing system with microwave interferometer
1—portfire, 2—pressure sensor, 3—signal capture, 4—artillery, 5—reflect board, 6—signal processing, 7—igniter body

2.2 基本假设及公式推导

发射药在火炮膛内的燃烧过程伴随着高温、高压、高速等复杂的物理化学过程, 因此发射药在膛内的燃烧所受影响因素较多, 燃速的测量求解结果具有很大的波动性。为了能够从多方面认识并计算发射药在膛

收稿日期: 2010-02-25; 修回日期: 2010-04-27

作者简介: 张江波(1982-), 主要从事发射药装药及点火内弹道性能研究。e-mail: zhangjiangbo1981@163.com

内的燃速,本文采用常规和微波两种测试方法分别对燃速进行推导计算。基本假设如下^[5-6]:

- (1) 发射药在膛内的燃烧服从平行层燃烧;
- (2) 火炮膛内气体压力分布服从拉格朗日假设;
- (3) 发射药能量转换及弹丸运动过程按经典内弹道过程进行处理。

第一种试验计算方法即常规测试方法,由试验所测得的 $p-t$ 曲线和炮口初速及炮口时间为基础,进行发射药膛内燃速计算。对于任意时刻某一数据点根据拉格朗日假设有^[7]:

$$p = p_i \frac{\varphi}{\varphi_i}, \quad \varphi_i = \varphi_1 + \frac{\omega}{2m}, \quad \varphi = \varphi_1 + \frac{\omega}{3m} \quad (1)$$

其中, φ 为与平均压力相应的次要功计算系数; p 为平均压力, MPa; p_i 为膛底压力(即所测膛底压力), MPa; φ_i 为与膛底压力相应的次要功计算系数, φ_1 为与火炮口径类型相关的次要功计算系数(30 mm 口径根据经验值一般取 1.05)^[6], ω 为装药量, kg; m 为弹丸质量, kg。

由弹丸运动方程进行变换后有:

$$v^{i-1} = v^i - \frac{s p^i}{\varphi m} \Delta t \quad (2)$$

式中, v 为弹丸速度, $m \cdot s^{-1}$; s 为炮膛横断面积, m^2 ; t 为时间, s。对于初值问题而言,炮口处点的值为 $i = n(\max)$, n 为数据点数, $v^{n(\max)} = v_g$, v_g 为炮口初速, $m \cdot s^{-1}$; $\Delta t = t_n - t_{n-1}$, 由此可以求出与 $p-t$ 曲线所对应的一系列速度值。

根据内弹道基本方程中的能量守恒方程式^[7]:

$$sp \left\{ l_0 \left[1 - \frac{\Delta}{\delta} - \Delta \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \psi \right] + l \right\} = f \omega \psi - \frac{\theta}{2} \varphi m v^2 \quad (3)$$

其中, l_0 为药室缩径长, m; α 为火药余容, $m^3 \cdot kg^{-1}$; l 为弹丸行程长, m; f 为火药力, $kJ \cdot kg^{-1}$; δ 为发射药密度, $kg \cdot m^{-3}$; Δ 为装填密度, $g \cdot mL^{-1}$; ψ 为已燃百分数, 即可求出 ψ 的值, 由于此方程只适合发射药燃烧阶段, 因此只计算到 $\psi = 1$ 。

第二种试验计算方法即微波测试法, 由微波干涉仪试验所测得 $v-t$ 曲线为基础进行求解。由弹丸运动方程进行变换后有

$$p = \frac{\varphi m}{s} \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

φ 的取值计算同第一种方法, 由 $v-t$ 曲线即可求出 $p-t$ 曲线, 根据内弹道基本方程中的能量守恒方程式, 可以求出已燃百分数 ψ 。

在分别求得已燃百分数 ψ 以后, 以下计算通用。为保证求解的准确性, 取发射药等弧厚燃烧过程的函数

$$\psi = \chi Z(1 + \lambda Z) \quad 0 \leq Z \leq 1 \quad (5)$$

在各参数已求解的情况下, 可得到发射药的膛内燃速关系式

$$u = f(p) \quad (6)$$

3 试验部分

3.1 密闭爆发器试验

试验采用 5/7 单基发射药, 密闭爆发器的容积为 100 mL, 装填密度为 $0.2 g \cdot mL^{-1}$, 点火药包采用 1.1 g 硝化棉, 正常点火压力为 10 MPa, 在此条件下对 5/7 单基发射药进行了密闭爆发器性能测试。

3.2 发射药膛内燃烧试验

在 30 mm 高压滑膛弹道炮上进行了发射药膛内燃烧测试试验, 装药采用中心传火管结构, 2[#] 小粒黑作为传火药, 5/7 单基发射药作为主装药, 点火方式为 DDR2 电底火点火, 对膛底和炮口处采用压电传感器进行了测量, 使用微波干涉仪测试系统对弹丸在膛内的运动过程进行了测试。

4 结果及分析

4.1 密闭爆发器试验结果

为了获得发射药在定容条件下的燃速, 在以上试验条件下对 5/7 单基发射药进行了密闭爆发器实验^[8], 5/7 单基发射药的基本参数见表 1。

表 1 发射药基本参数

Table 1 Parameters of gun propellant

gun propellant	$2e_1$ /mm	d_0 /mm	$2c$ /mm	f /kJ · kg ⁻¹	ρ /g · cm ⁻³
5/7-single-base-propellant	0.64	0.16	3.2	980	1.6

Note: $2e_1$ is web thickness of grain, d_0 is diameter of grain perforation, $2c$ is length of grain, f is impetus of propellant, ρ is density of grain.

图 2、3 分别为爆发器的 $p-t$ 曲线和计算所得 $u-p$ 曲线。

图 3 的 $u-p$ 曲线由爆发器 $p-t$ 曲线经数据处理计算^[7]后得到, 在 40 ~ 170 MPa 之间以指数式的形式对 5/7 单基发射药的 $u-p$ 曲线进行了指数拟合, 得到 5/7 单基发射药的燃速系数为 $0.31 cm \cdot MPa^{-n} \cdot s^{-1}$, 与此相对应的压力指数为 0.79。从图 3 中可以看出, 5/7 单基发射药在 40 ~ 170 MPa 范围内的燃速为 $5 \sim 16 cm \cdot s^{-1}$,

且较好地符合指数式燃烧规律。

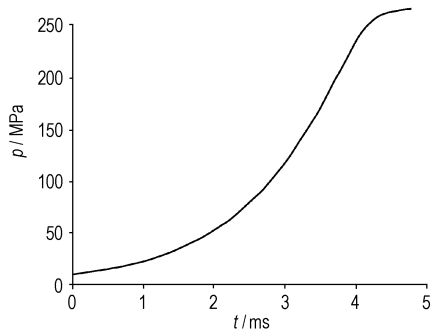


图2 爆发器 $p-t$ 曲线

Fig. 2 $p-t$ curves of closed bomb

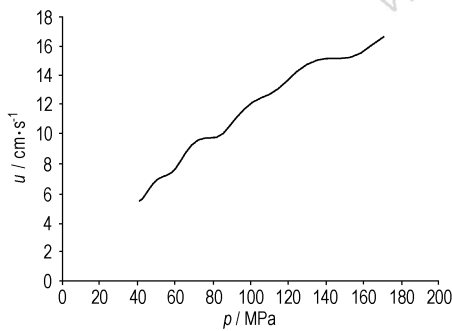


图3 爆发器 $u-p$ 曲线

Fig. 3 $u-p$ curves of closed bomb

4.2 发射药膛内燃烧结果分析

采用微波干涉仪测试系统进行了膛内弹丸运动测试,采用压电传感器测量了膛底和炮口的压力曲线,30 mm 高压滑膛炮的装填控制参数见表2。

常规方法和微波方法的内弹道测试结果见表3。

表2 30 mm 炮装填控制参数

Table 2 Formation parameters of 30 mm artillery

artillery style	W_0 /cm ³	s /cm ²	l_g /m	m /kg	ω /kg	φ_1
30 mm	314.5	7.07	1.6	0.203	0.19	1.05

Note: W_0 is chamber volume; s is transection area of barrel; l_g is traveling length of projectile; m is mass of projectile; ω is charge mass; φ_1 is coefficient of secondary work.

表3 内弹道测试结果

Table 3 Results of interior ballistic

testing means	p_t /MPa	v_0 /m · s ⁻¹
ordinary testing	345	1288
microwave testing	-	1284

Note: - is not available, p_t is maximum pressure, v_0 is muzzle velocity.

图4为采用两种方法所得的试验和计算 $p-t$ 曲线、图5为采用两种方法所得的 $v-t$ 曲线、图6为采用两种方法所得的 $u-p$ 曲线。

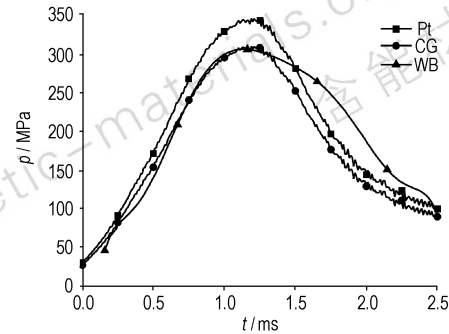


图4 两种方法所得 $p-t$ 曲线

Fig. 4 $p-t$ curves obtained from two methods

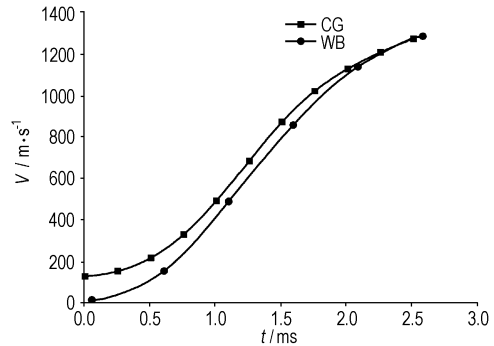


图5 两种方法所得 $v-t$ 曲线

Fig. 5 $v-t$ curves obtained from two methods

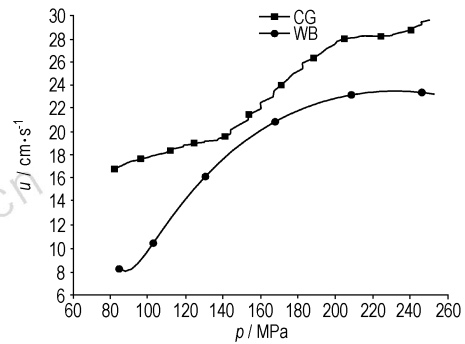


图6 两种方法所得 $u-p$ 曲线

Fig. 6 $u-p$ curves obtained from two methods

由表3知,采用常规方法所测的初速(1288 m · s⁻¹)和采用微波干涉仪所测的初速(1284 m · s⁻¹)基本相符,说明微波干涉仪所测的试验曲线($v-t$)能够较好地反映弹丸在膛内的运动过程。图4中, p_t 曲线为试验所测的膛底压力曲线,CG 曲线为常规方法采用公式(1)计算所得的膛内平均压力曲线,WB 曲线为微波试验方法采用公式(1)和(4)计算所得的膛内平均压力曲线。从图4知,在最大压力前 CG 曲线和 WB 曲线能够较好地重合,最大压力后 WB 曲线明显高于 CG 曲线和 p_t 曲线,这主要是

由于经典内弹道中采用拉格朗日假设,当弹丸运动到最大压力以后,实际气体分布已经偏离拉格朗日假设,因此采用膛底压力曲线计算所得的结果就有了一定的偏差。从图5中也可以看出,常规计算方法计算的 $v-t$ 曲线较微波干涉仪所测的 $v-t$ 曲线高。由于微波干涉仪所测的 $v-t$ 曲线反映了弹丸在膛内的实际运动过程,因此采用微波干涉仪试验计算方法所得的 $p-t$ 曲线具有更好的准确性。图6中, $u-p$ 曲线(CG)为采用常规方法中公式(1)、(2)、(3)、(5)、(6)计算所得的发射药膛内燃速曲线,压力范围为80~250 MPa,燃速范围为17~29 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $u-p$ 曲线(WB)为采用微波测试方法中公式(4)、(5)、(6)计算所得的发射药膛内燃速曲线,压力范围为80~250 MPa,燃速范围为8~23 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。常规计算方法所得的燃速高于微波测试方法所得的燃速,这可能是由于常规方法所得燃速是基于膛底压力曲线,实测膛底压力较理论膛底压力值偏高,因此所得燃速偏高,微波测试方法所得燃速是基于膛内弹丸运动速度,相当于基于弹底压力进行计算,所得燃速稍低。微波干涉仪所测的 $v-t$ 曲线基本反映了弹丸在膛内的实际运动过程,因此准确性较常规测试方法高,但由于数学模型的限制,实际中的发射药燃速应该略高于微波测试方法所得值。对比图6和图3知,发射药在炮膛内的燃速曲线偏离指数式较远,这是由于膛内燃烧的复杂性和气流分布的随机性要远高于密闭爆发器中的燃烧特性,因此文中两种膛内燃速测试方法只能粗略地描述发射药的膛内燃速,给出大致的燃烧规律。

5 结 论

(1) 基于经典内弹道理论,通过理论推导与试验研究,建立了常规和微波两种发射药膛内燃速测试计

算方法。试验表明,这两种测试方法是可行的。

(2) 两种计算方法都能够给出发射药的膛内燃速。常规方法能够简单方便地计算出膛内燃速,所得燃速偏高,微波测试计算方法所得燃速的准确性较常规测试方法高。

参考文献:

- [1] 张江波,张玉成,蒋树君,等. 双药室实现能量补偿的技术研究[J]. 火炸药学报,2008,31(2): 68-70.
ZHANG Jiang-bo, ZHANG Yu-cheng, JIANG Shu-jun, et al. Study on energy compensation technique of double chambers charge [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2008, 31(2): 68-70.
- [2] 黄振亚,杨丽侠,李丽. 发射药膛内动态燃速规律研究[J]. 火炸药学报,1996,18(2): 11-13.
HUANG Zhen-ya, YANG Li-xia, LI Li. Study on the dynamic burning rate law for gun propellant in bore [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 1996, 18(2): 11-13.
- [3] 黄振亚,王泽山,张远波. 发射药燃速压力指数变化规律研究[J]. 含能材料,2006,14(2): 123-126.
HUANG Zhen-ya, WANG Ze-shan, ZHANG Yuan-bo. Regularity of burning rate pressure exponent for propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(2): 123-126.
- [4] 肖正刚,应三九,徐复铭. 深钝感球扁药发射装药膛内实际燃烧规律[J]. 兵工学报,2001,22(2): 23-25.
XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, XU Fu-ming. Rules of combustion of deep-deterred oblate spherical powder propelling charge in the bore [J]. *Journal of China Ordnance*, 2001, 22(2): 23-25.
- [5] 王泽山,何卫东,徐复铭. 火药装药设计原理[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.
- [6] 翁春生,王浩. 计算内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,2006: 23-25.
- [7] 鲍廷钰,邱文坚. 内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,1994: 48.
- [8] 王泽山. 火药试验方法[M]. 北京:兵器工业出版社,1996: 202-207.

Two Methods to Test Gun Propellant Burning Rate in Gun Chamber

ZHANG Jiang-bo, ZHANG Yu-cheng, LI Qiang, YAN Wen-rong, YAN Guang-hu, ZHAO Xiao-mei

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

Abstract: In order to study the burning rules of gun propellant in gun chamber, feasibility of microwave interferometer testing and ordinary testing was analyzed based on the classical interior ballistic theory, and a relative calculation method was proposed. $p-t$ curves and muzzle velocity were considered as basic data by the ordinary testing method, however $v-t$ curves was considered as basic data by the microwave interferometer testing method. The burning rate of gun propellant in gun chamber could be obtained by both methods. Results show that the calculated $p-t$ curves are consistent with the $p-t$ curves of testing. Under pressure between 80 MPa and 250 MPa, the range of burning rate is between 17 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ and 29 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ by ordinary testing method, and under pressure between 80 MPa and 250 MPa, the range between 8 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ and 23 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ by microwave interferometer testing method. The formula of gun propellant burning rate in gun chamber deviates far from the exponential function. The precision of microwave interferometer testing method is better than that of ordinary testing method.

Key words: composite materials; gun propellant; burning rate; muzzle velocity; microwave interferometer testing method

CLC number: TJ55; TB332

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.018