

文章编号: 1003-1480(2025)01-0051-04

基于弹丸膛内运动参数和压力测试的火炮膛内 燃气温度估算方法

赵煜华, 闫光虎, 肖霞, 严文荣, 梁磊

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 为了解决火炮膛内测试环境恶劣而导致发射药燃气温度测试难度大的问题, 基于微波干涉仪、压力测试系统, 结合发射药配方性能计算理论、装药内弹道性能计算模型等理论, 建立了一种基于实测参数的火炮膛内燃气温度估算方法, 并开展了试验研究。结果表明: 火炮膛内燃气温度的最高值约为 2 631.8 K, 随着弹丸运动迅速降低, 弹丸出炮口时膛内燃气温度降低到约 1 858.4 K; 建立的火炮膛内发射药燃气温度估算方法可以有效地获得火炮整个内弹道过程中火药燃气温度随时间的变化规律, 为低烧蚀发射药及装药的研制提供了一种新的研究手段。

关键词: 发射药; 膛内燃气温度; 估算方法; 微波干涉仪

中图分类号: TJ55; TQ562 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.009

Estimation Method for Gas Temperature in Bore Based on Motion Parameters of the Projectile and Pressure Testing

ZHAO Yu-hua, YAN Guang-hu, XIAO Xia, YAN Wen-rong, LIANG Lei

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

Abstract: To solve the problem that it is difficult to accurately measure the gas temperature in the gun bore because of the harsh testing environment, based on microwave interferometer and pressure testing system, and combined with the calculation theory of the propellant formula performance and the interior ballistic performance, a method for estimating transient temperature of gas in bore was established based on the measured parameters, and the tests were conducted. The results show that the maximum gas temperature in bore is about 2 631.8 K, the gas temperature decreases rapidly with the projectile movement, and the gas temperature in bore drops to 1 858.4 K when the projectile exits the muzzle. With this method, the change law of gas temperature in bore with time can be obtained effectively, which provides a new mean for the research on low-ablation propellants and charges.

Key words: Propellant; Gas temperature in bore; Estimation method; Microwave interferometer

火炮以射程远、威力大的特性, 在现代陆军武器装备中占有极其重要的地位。火炮身管的烧蚀不仅影响火炮的寿命, 同时也会对火炮的射程、精度等性能造成影响^[1]。热因素是影响身管烧蚀的主导因素。发射药在火炮膛内燃烧的过程中产生的高温气体可以使身管表面熔化、产生相变, 导致膛壁的材料机械强

度、硬度降低, 进而产生磨损、变形、热裂等, 直接影响火炮身管寿命^[2-3]。因此, 火炮膛内燃气温度的测量对火炮性能、身管寿命的研究有着重要意义。

目前, 对于膛内火药燃气温度的研究主要集中在理论计算和测试技术方面。在理论计算方面, 主要采用内弹道方程组计算出压力及弹丸运动参数, 进而根

收稿日期: 2023-12-04

作者简介: 赵煜华(1985-), 男, 副研究员, 主要从事发射药及装药技术研究。

引用本文: 赵煜华, 闫光虎, 肖霞, 等. 基于弹丸膛内运动参数和压力测试的火炮膛内燃气温度估算方法[J]. 火工品, 2025(1):51-54.

据变容状态方程获得膛内燃气温度^[4-5]。由于发射药在爆发器内测试的燃烧规律与在膛内的实际燃烧规律存在差异^[6]，内弹道计算获得的弹丸运动参数及压力参数变化的过程与火炮膛内的真实状况存在差距，进而对理论计算的膛内燃气温度引入了一定的误差。在测试方面，主要采用热电偶或者蓝宝石高温光纤等温度传感器进行信号采集，并经软件处理后得到膛内燃气温度^[7-9]。但由于火炮内弹道过程典型的高温、高压、时间短的特点，对温度传感器的耐压和响应频率要求苛刻，测量精度难以保证。

基于多普勒效应的微波干涉仪，可以准确的获得弹丸在火炮膛内的运动参数^[10]。本文采用微波干涉仪、压力测试设备，结合发射药配方性能计算理论、装药内弹道计算模型等理论建立了一种火炮膛内燃气瞬态温度估算方法，并以某三基发射药、30 mm 口径模拟试验装置开展了试验研究，获得了发射药的膛内燃气温度随时间的变化规律，为火炮膛内燃气温度的研究提供了一种新方法。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

为完成火炮膛内燃气温度测试，采用 30mm 口径模拟试验装置、压力传感器、数据采集系统、微波干涉仪等组成试验装置，如图 1 所示。

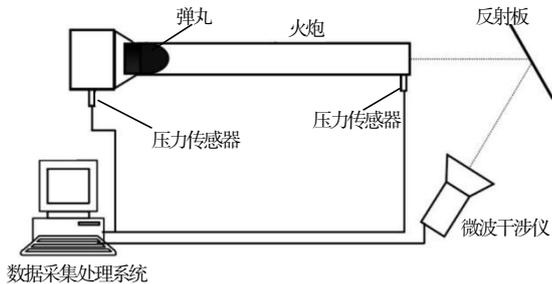


图 1 火炮膛内燃气温度试验系统图

Fig.1 Test system diagram of gas temperature in gun bore

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火炮身管；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，基于多普勒原理进行处理即可获得弹丸在膛内的行程——时

间曲线、膛内速度——时间曲线。数据采集处理系统采集压电压力传感器测试的压力——时间数据^[11]。

1.2 计算方法

为了获得发射药膛内燃气温度，做出以下假设条件^[12]：(1) 火药的燃烧服从几何燃烧定律；(2) 膛内射击过程中弹后空间的混合气体服从拉格朗日假设；(3) 用比例系数考虑各种次要功；(4) 弹带挤进膛线是瞬时完成，以一定的挤进压力标志弹丸的启动条件；(5) 弹带密封完好不漏气；(6) 火药燃气服从 Nober-Abel 状态方程；(7) 忽略弹丸启动前时期内药室壁面的热散失。

基于上述假设，膛内燃气温度计算原理如下：

(1) 弹丸运动后将膛底位置处测试的压力换算成弹后空间的平均压力，如式 (1) 所示：

$$p = p_t \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{\omega}{\varphi_1 m}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega}{\varphi_1 m}\right)^{-1} \quad (1)$$

式 (1) 中： p_t 为测试的膛底压力； p 为弹后空间平均压力； φ_1 为阻力系数； m 为弹丸质量； ω 为发射药装药量。

(2) 选择弹丸运动之前的膛底压力数据代入式 (2)，获得弹丸运动之前的膛内发射药已燃百分比：

$$\psi_{\text{pre}} = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho_p}}{\frac{f}{p_t} + \alpha - \frac{1}{\rho_p}} \quad (2)$$

式 (2) 中： Δ 为发射药装填密度； ρ_p 为发射药密度； α 为余容； f 为发射药火药力。

(3) 将微波干涉仪测试获得的弹丸在膛内的行程——时间曲线、膛内速度——时间曲线上的数据及弹后空间的平均压力 p 数据代入式 (3) 计算，获得弹丸运动后的膛内发射药已燃百分比：

$$\psi_{\text{mov}} = \frac{Sp[L_0(1 - \Delta/\rho_p) + l] + (k-1)\varphi mv^2/2}{f\omega + SpL_0\Delta(\alpha - 1/\rho_p)} \quad (3)$$

式 (3) 中： S 为身管截面积； L_0 为药室容积缩径长； k 为比热比； φ 为次要功计算系数； l 为弹丸行程； v 为弹丸速度。

(4) 将式 (2) ~ (3) 中计算获得的膛内发射药已燃百分比随时间的变化函数代入 Nobel-Abel 状态方程，即可获得膛内燃气温度随时间变化的表达式：

$$T = \begin{cases} p \left[\frac{V_0 - \alpha(1 - \psi_{pre}) / \rho_p}{\omega \psi_{pre}} - \alpha \right] \frac{1}{R} & p_b \leq p_0 \\ p \left[\frac{V_0 + Sl - \alpha(1 - \psi_{mov}) / \rho_p}{\omega \psi_{mov}} - \alpha \right] \frac{1}{R} & p_b > p_0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: p_b 为弹底压力; p_0 为挤进压力; V_0 为药室容积; R 为发射药燃气气体常数, 根据式(5)计算获得:

$$R = R_0 \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^j n_i M_i}{\sum_{i=1}^j n_i} \right)^{-1} \quad (5)$$

式(5)中: R_0 为通用气体常数; n_i 、 M_i 分别为根据发射药配方计算出的发射药燃气成分的相应物质的量及摩尔质量。

2 试验

2.1 试验样品与仪器

试验样品: 某三基发射药, 主要成分为硝化棉、硝化甘油、叠氮硝胺和硝基胍等, 火药力约 1 002 J/g, 密度 1.6 g/cm³。

测试仪器: 采用瑞士 Kistler 公司的 6213B 型压电压力传感器、奥地利德维创公司的 DEWE-2010 型数据采集仪进行压力测试, 采用中北大学研制的 IM-W95 型微波干涉仪(波长为 3 mm、频率为 95 GHz)进行弹丸膛内运动参数测试。

2.2 试验过程

在 30 mm 模拟试验装置上进行膛内发射药燃气温度测试试验。在射击过程中, 膛底和炮口位置采用压电压力传感器测试压力, 使用微波干涉仪测量弹丸在膛内的运动过程参数, 采用同步触发系统对压力测试设备和微波干涉仪进行时间同步。

30 mm 模拟试验装置的装填参数为: 药室容积 315 cm³, 截面积 7.07 cm², 弹丸行程 2 085 mm, 弹丸质量 0.2 kg, 装药量为 0.2 kg。

3 结果与讨论

根据某三基发射药的配方参数计算的单位质量的发射药燃气主要成分及其含量如表 1 所示。

表 1 单位质量的发射药燃气主要成分及含量

Tab.1 Main components and content of gas per unit mass of propellant

燃气成分	H ₂	H ₂ O	CO ₂	CO	N ₂	HCN
含量/(mol·kg ⁻¹)	9.095	7.552	1.868	14.603	12.492	0.107

根据表 1 中的发射药燃气成分及其含量, 结合各燃气组分的摩尔质量, 采用公式(5)进行计算, 得到发射药燃气气体常数 R 为 381 J·kg⁻¹·K⁻¹。

试验中进行温炮射击后, 进行了 3 发装药量为 0.2 kg 的成组试验, 试验中测试的膛底及炮口压力如图 2 所示。

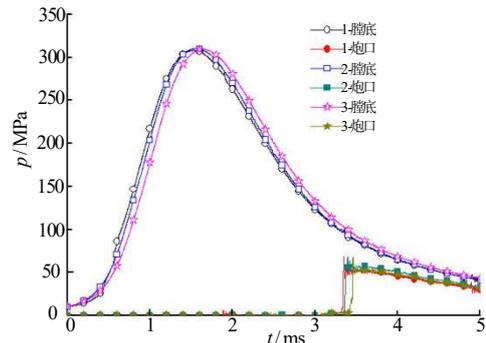


图 2 膛内燃烧 $p-t$ 曲线

Fig.2 $p-t$ curve

由图 2 可知, 最大压力分别为 308.8, 310.6, 309.9 MPa, 对应的出炮口时间分别为 3.34, 3.36, 3.45 ms, 结合膛压曲线的形状, 表明测试的发射药膛内燃烧过程具有良好的一致性。以图 2 测试的炮口压力曲线的阶跃时刻作为弹丸出炮口的时刻, 对微波干涉仪测试的弹丸膛内运动参数进行处理, 获得弹丸膛内运动的速度—时间及位移—时间曲线, 如图 3 所示。

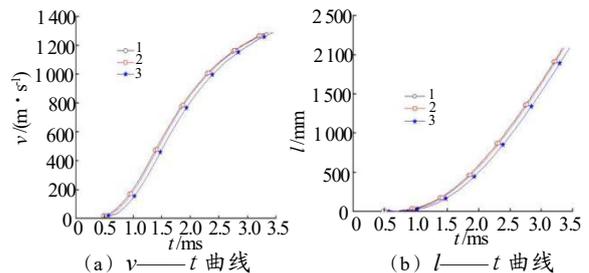


图 3 弹丸膛内运动参数曲线

Fig.3 Motion parameters curve of projectile in bore

由图 3 (a) 可知测试的弹丸初速分别为 1 287.1, 1 287.8, 1 287.1 m·s⁻¹, 结果表明弹丸膛内运动过程一致性良好。将图 2 的膛底压力数据、图 3 的弹丸膛内运动参数, 联立公式(1)~(4)进行计算, 获得射击过程中膛内燃气温度随时间的变化规律, 如图 4

所示。

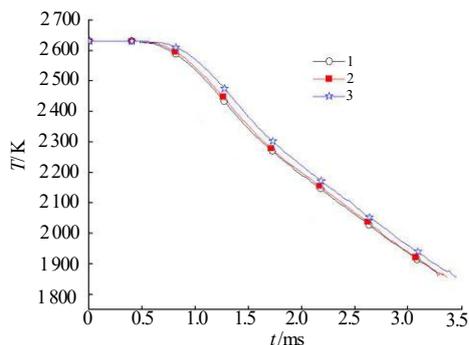


图4 膛内燃气温度曲线

Fig.4 Gas temperature curve in gun bore

由图4曲线数据可知,3次试验曲线的形状基本一致,将序号3的曲线沿时间轴平移后,3发曲线基本重合,表明建立的膛内燃气温度估算方法具备良好的一致性。在弹丸运动之前即约0.5 ms之前,膛内燃气温度基本维持在2631.8 K;在弹丸达到挤进压力后,随着火药燃气做功推动弹丸向炮口方向运动,弹后空间不断增加,膛内燃气温度迅速降低;弹丸出炮口时,燃气温度下降到平均值1858.4 K。在整个膛内射击过程中,发射药的燃气温度最高值出现在弹丸运动之前、膛内定容燃烧状态的环境下,燃气温度的极值与该配方发射药的低爆温、低烧蚀特性相对应。

4 结论

(1) 建立了一种基于膛内弹丸运动参数和压力测试的火炮膛内燃气温度估算方法,并采用某三基发射药进行了试验验证,结果表明膛内燃气温度的最高值2631.8 K出现在弹丸运动之前,随着弹丸运动迅速降低,弹丸出炮口时膛内燃气温度降低到1858.4 K。

(2) 建立的火炮膛内燃气温度估算方法采用更为成熟、测试精度更高的瞬态量即压力、速度、位移

等测试技术来获取膛内温度计算的初始参数,进而基于一定的理论假设计算获得燃气温度,相较以往的方法更接近膛内的真实状况,且具有良好的 consistency,为研究发射药的膛内烧蚀性提供了新的研究手段。

参考文献:

- [1] 朱梦然,曹京华,先赫,等.身管内表面烧蚀磨损研究进展[J].兵器装备工程学报,2023,44(10):159-164.
- [2] 刘朋科,杨雕,许耀峰,等.火炮身管内膛表层温度及其梯度规律研究[J].兵工学报,2022,43(6):1225-1232.
- [3] 田雨生.基于超声波渡越时间的非稳态温度场数值计算及测量装置研究[D].南京:南京理工大学,2022.
- [4] 毛保全,兰图,宋鹏.火炮膛内火药燃气温度控制仿真研究[J].计算机仿真,2017,34(8):22-26,109.
- [5] 王锋锋,毕小平,索文超.坦克射击过程中炮膛内火药气体温度计算[J].装甲兵工程学院学报,2009,23(5):48-51.
- [6] 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(6):98-102.
- [7] 张文静.火炮膛内火药燃气温度测试技术研究[D].太原:中北大学,2019.
- [8] 赵海涛,张政保.基于单片机的火炮膛内瞬态温度测试系统[J].仪表技术,2010(2):16-18.
- [9] 任先贞,裴东兴,沈大伟.盲孔测温传感器瞬态温度测试研究[J].中国测试,2016,42(11):84-88.
- [10] 闫光虎,赵煜华,肖霞,等.发射药使用寿命预估技术[J].火工品,2021(1):35-38.
- [11] 赵煜华,闫光虎,梁磊,等.火炮发射过程中的弹丸过载测试方法[J].探测与控制学报,2019,41(4):62-65.
- [12] 金志明.枪炮内弹道学[M].北京:北京理工大学出版社,2004.