

存在侵蚀燃烧的发射药高、低温内弹道性能研究^{*}

张方方, 侯 健, 魏 平, 可学为

(海军工程大学, 武汉 430033)

摘 要:为研究存在侵蚀燃烧的发射药高、低温内弹道性能,分析了发射药初温变化引起的火药热焓变化及对侵蚀燃烧的影响,修正了常温发射药的侵蚀函数,得到了高、低温多孔药燃速的数学表达式,建立了多孔发射药高、低温内弹道数学模型。应用该模型对某大口径舰炮高、低温内弹道进行仿真,计算结果和试验值一致性较好。通过对比仿真研究可得结论:考虑火药热焓变化对侵蚀燃烧影响的多孔发射药高、低温内弹道仿真结果更接近试验值。

关键词:内弹道;发射药初温;侵蚀燃烧;内弹道性能

中图分类号:TJ013.1 **文献标志码:**A

Study on Interior Ballistic Performance for Propellant of Erosive Burning at High and Low Temperature

ZHANG Fangfang, HOU Jian, WEI Ping, KE Xuewei

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To study the interior ballistic performance for propellant of erosive burning at high and low temperature, the effect of propellant's temperature on powder heat content and erosive burning was analyzed. The mathematic equation of burning speed for porous propellant at high and low temperature was deduced by modifying the erosive burning function at normal temperature. The mathematic model of interior ballistic for porous propellant was established. The interior ballistic of a large caliber ship gun at high and low temperature was calculated by use of this model, the calculated results consisted with test results well. The conclusion which was that the simulated results were more close to test results with considering the effect of powder heat content on erosive burning was drawn by contrastive simulation.

Keywords: interior ballistic; propellant's temperature; erosive burning; interior ballistic performance

0 引言

侵蚀燃烧是具有内孔燃烧火药的一种普遍现象。侵蚀燃烧可在不改变发射药配方的条件下,增加火药燃速,改变内弹道性能。

文献[1]分析了发射药与火箭推进剂侵蚀燃烧的异同,并对发射药侵蚀燃烧进行了理论分析;文献[2]推导了发射药的侵蚀函数,并分析了装填条件变化引起的侵蚀燃烧变化及对内弹道性能的影响。文献[3]在考虑推进剂初温对侵蚀燃烧影响的基础上建立了火箭推进剂的侵蚀燃烧模型。文献[1-2]中均建立了常温发射药侵蚀燃烧模型,但对于高、低温内弹道,火药燃速和火药热焓发生变化且均对侵蚀燃烧有影响,仍采用常温下的侵蚀函数显然不能满足内弹道精

确仿真的需要。

文中在保持文献[2]中各类假设的前提下,重点分析发射药初温变化引起的火药热焓变化及对侵蚀燃烧和内弹道性能的影响。

1 高、低温发射药侵蚀函数的推导

1.1 高、低温内弹道仿真的处理方法

高、低温内弹道仿真的常用方法^[4]:既考虑燃速的变化,用系数 BL 修正;又考虑发射药初温对火药热焓的影响,用系数 IT 修正,具体方程为:

$$\frac{de}{dt}(u_1 p^n + k_v v) BL \quad (1)$$

$$f' = f \cdot IT \quad (2)$$

$$T'_1 = T_1 \cdot IT \quad (3)$$

^{*} 收稿日期:2011-03-23

作者简介:张方方(1987-),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向:火炮与自动武器设计理论及总体技术。

式中： u_1 为燃速系数； p 为膛内平均压力； n 为燃速指数； k_v 为侵蚀燃烧系数； v 为弹丸速度； f 、 T_1 分别为火药力和火药定容燃烧温度。

分析式(1)~式(3)知：常用高、低温内弹道仿真方法中对侵蚀燃烧的修正考虑了燃速变化的影响(k_v 修正为原来的 BL 倍)，却忽略了火药热焓对侵蚀燃烧的作用。火药热焓变化致使火药性质发生变化，必将对其侵蚀燃烧产生影响。

1.2 高、低温发射药侵蚀函数的推导

多孔发射药侵蚀燃烧机理：火药燃烧过程中存在的快速且强烈的传热、传质和传动量过程，使多孔燃烧火药孔内压力大于孔外，受此压差作用，燃气从内孔中央处的零流速增加到内孔端面处的最大流速；随着流速的加快，燃气进入燃烧反应区对火药表面的给热显著加强，同时高速燃气流对火药燃面的冲刷使燃面被吹蚀，这些作用的综合结果使火药燃速提高，形成侵蚀燃烧。

由上述分析可知，侵蚀燃烧发生的直接原因是火药燃烧过程中燃气的传热和冲刷作用。传热使药粒端面处燃气温度相对膛内温度升高 ΔT ，冲刷则与燃气流速 U 有关，因此侵蚀函数可表示为：

$$\epsilon = \Delta\epsilon_1 + \Delta\epsilon_2 = A \cdot \Delta T + B \cdot U \quad (4)$$

式中： A 、 B 分别为火药燃气的传热和流动对火药燃速的影响系数。

由侵蚀燃烧机理知，侵蚀燃烧发生的本质原因是药孔内外存在的压差。因此， ΔT 、 U 应为药孔中央处压力 p_1 和药粒端面处压力 p_2 的函数，结合内弹道能量守恒方程将文献[2]中公式变形为：

$$\Delta T = T \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \left[1 - \frac{\varphi m v^2 (k-1)}{2\omega_b f} \right] \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (5)$$

$$U = \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)}{\rho_p}} \sqrt{\frac{2L}{A_c}} \quad (6)$$

式中： T 为膛内燃气温度； k 为火药气体比热比； φ 为次要功系数； m 为弹丸质量； ω_b 为已燃火药质量； ρ_p 为火药密度； L 为药粒长度的 $1/2$ ； A_c 为药粒内孔横截面面积。

分别对药孔内和药室内的火药燃气列诺贝尔—阿贝尔气体状态方程，可得 p_1 、 p_2 表达式为：

$$p_1 = \frac{RT_1 \omega_{b1}}{\left(V_1 + \frac{\omega_{b1}}{\rho_p} \right) - \alpha \omega_{b1}} = \frac{f \omega_{b1}}{V_1 - \left(\alpha - \frac{1}{\rho_p} \right) \omega_{b1}} \quad (7)$$

$$p_2 = \frac{RT_1 \omega_b}{V_0 - \frac{\omega - \omega_b}{\rho_p} - \alpha \omega_b} = \frac{f \omega_b}{V_0 - \frac{\omega}{\rho_p} - \left(\alpha - \frac{1}{\rho_p} \right) \omega_b} \quad (8)$$

式中： ω_{b1} 为药孔内已燃火药质量； V_1 为火药内孔初始体积； V_0 为药室容积； ω 为装药量； α 火药气体余容。

欲分析发射药初温对侵蚀燃烧的影响，只需分析发射药初温变化引起的孔内外压力 p_1 、 p_2 的变化即可。对于高温内弹道，发射药初温升高，由式(1)知燃速增加，则相同时间内 ω_{b1} 、 ω_b 增加；由式(2)、式(3)知 f 、 T_1 增加，则同一时刻高温内弹道的弹丸速度 v 大于常温。低温内弹道的情形则相反。可见 f 、 T_1 、 ω_{b1} 、 ω_b 、 v 随发射药初温的变化趋势一致。分析式(7)、式(8)知：装填条件一定时， V_1 和 $V_0 - \omega/\rho_p$ 为定值， $(\alpha - 1/\rho_p) > 0$ (α 取值 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 左右， ρ_p 取值 $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 左右^[5])，则发射药初温变化时， p_1 和 p_2 随 f 、 ω_{b1} 、 ω_b 的增大而增大，减小而减小。

现对火药热焓变化与火药燃速变化对侵蚀燃烧的影响分别加以分析。火药热焓变化时，分析式(5)知：因发射药初温变化致使的 f 、 ω_b 、 v 的变化趋势一致，使 $\varphi m v^2 (k-1)/(2\omega_b f)$ 的分子分母同时以变量的二次方变化，又因 f 、 ω_b 、 v 的变化量有限，可近似认为 $[1 - \varphi m v^2 (k-1)/(2\omega_b f)]$ 的值相对同时刻的常温态不发生变化，而 T_1 、 T 、 ΔT 增为原来的 IT 倍。因此将式(2)、式(3)依次代入式(7)、式(8)、式(5)、式(6)、式(4)，得火药热焓影响下的侵蚀函数：

$$\epsilon = A \cdot \Delta T \cdot IT + B \cdot U \cdot \sqrt{IT} \quad (9)$$

火药燃速增大时， ω_{b1} 、 ω_b 、 p_1 、 p_2 增加。因多孔火药燃烧前阶段为增面燃烧， ω_{b1} 的相对增加量大于 ω_b ，则 p_1 较 p_2 有更大的增加量。药孔内外压差增大致使侵蚀燃烧更剧烈，而侵蚀剧烈又提高火药燃速。可见火药燃速与侵蚀燃烧相互影响，要定量确定燃速变化对侵蚀燃烧的影响较为困难，可将此影响计入式(1)的燃速温度系数，用 BL' 表示。则高、低温发射药的侵蚀函数可表示为：

$$\epsilon = (A \cdot \Delta T \cdot IT + B \cdot U \cdot \sqrt{IT}) \cdot BL' \quad (10)$$

2 多孔装药高、低温内弹道模型

去掉式(1)中侵蚀燃烧作用项后 ($k_v = 0$ ， BL 中

除掉侵蚀燃烧与燃速的相互作用系数 BL'), 将式 (10) 代入式 (1), 得高、低温发射药燃速的数学表达式:

$$\frac{de}{dt} = u_1 p^n \frac{BL}{BL'} \tau \epsilon = u_1 p^n \frac{BL}{BL'} (A \cdot \Delta T \cdot IT + B \cdot U \cdot \sqrt{IT}) \cdot BL' = [u_1 p^n + \frac{u_1 p^n (A \cdot \Delta T \cdot IT + B \cdot U \cdot \sqrt{IT} - 1)}{U}] BL \quad (11)$$

$$\text{令: } k'_v = \frac{u_1 p^n (A \cdot \Delta T \cdot IT + B \cdot U \cdot \sqrt{IT} - 1)}{U} \quad (12)$$

则式 (11) 可变形为:

$$\frac{de}{dt} = (u_1 p^n + k'_v U) BL \quad (13)$$

将燃气流速 U 取为弹丸速度 v , 其差异可在系数 k_v 取代 k'_v 时加以修正, 最终得到燃速方程为:

$$\frac{de}{dt} = (u_1 p^n + k_v v) BL \quad (14)$$

式 (14) 与式 (1) 形式相同, 却有本质区别: 式 (14) 较之式 (1) 考虑了火药热焓对侵蚀燃烧的影响; 分析式 (12) 知, 火药热焓温度系数 IT 随发射药初温的升高而增大, p, U 为发射药初温的隐函数, 也随药温升高而增大; 可见, 进行高、低温内弹道仿真时, 式 (14) 中 k_v 的取值相对常温时应有所增减, 而式 (1) 中 k_v 为定值。

通过分析发射药初温变化引起的火药热焓变化及对侵蚀燃烧和火药燃速的影响, 可建立存在侵蚀燃烧发射药高、低温内弹道数学模型。引入相对变量 $\bar{t}, \bar{l}, \bar{v}, \bar{p}$, 将其无量纲化为:

$$\frac{d\psi}{d\bar{t}} = \begin{cases} \chi(1 + 2\chi Z + 3\mu Z^2) dZ/d\bar{t} & (Z < 1) \\ \chi_s/Z_k(1 + 2\lambda_s Z/Z_k) dZ/d\bar{t} & (1 \leq Z < Z_k) \\ 0 & (Z \geq Z_k) \end{cases}$$

$$\frac{dZ}{d\bar{t}} = \begin{cases} (\sqrt{\theta/(2B)} \bar{p}^n + k_v \bar{v} l_0 / e_1) BL & (Z < Z_k) \\ 0 & (Z \geq Z_k) \end{cases}$$

$$\frac{d\bar{l}}{d\bar{t}} = \bar{v}, \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = \frac{\theta}{2} \bar{p}$$

$$\frac{d\bar{p}}{d\bar{t}} = \frac{1}{\bar{l} + \bar{l}_\psi} [1 + \Delta(\alpha - \frac{1}{\rho_p}) \bar{p}] \frac{d\psi}{d\bar{t}} - \frac{1 + \theta}{\bar{l} + \bar{l}_\psi} \bar{p} \bar{v}$$

式中: e_1 为火药起始弧厚的 $1/2, l_0$ 为药室容积缩径长; $\bar{t}, \bar{l}, \bar{v}, \bar{p}$ 分别为相对时间、相对位移、相对速度和相对压力: $\bar{t} = v_j t / l_0, \bar{l} = l / l_0, \bar{v} = v / v_j, \bar{p} = p / (f\Delta), v_j =$

$$\sqrt{(2f\omega)/(\theta\varphi m)}; \theta = K - 1, \bar{l}_\psi = 1 - \Delta/\rho_p - \Delta(\alpha - 1/\rho_p)\psi, B = S^2 e_1^2 (f\Delta)^{2(1-n)} / (f\omega\varphi \mu u_1^2).$$

3 仿真案例

由得到的内弹道数学模型, 利用四阶五级龙格-库塔法, 借助 Matlab 软件编写计算程序, 并对某大口径舰炮高、常、低温内弹道过程进行数值仿真。仿真中修正系数的选取如表 1。

表 1 内弹道仿真中修正系数的选取

发射药温 / °C	修正系数		
	IT	BL	k_v
50	1.07	1.07	0.000034
15	1	1	0.000030
-40	0.91	0.92	0.000024

由发射药平均弧厚 $2e_1 = 0.00165\text{m}$ 、内孔直径 $d = 0.00078\text{m}$ 、药粒长度 $2c = 0.169\text{m}$ 计算出火药形状特征量 $\chi = 0.7257, \lambda = 0.213, \mu = -0.029, \chi_s = 1.7688, \lambda_s = -0.4347$ 和 $Z_k = 1.4353$, 代入内弹道方程组可得该大口径舰炮高、常、低温内弹道的 $p-t$ 曲线和 $v-t$ 曲线, 与试验拟合曲线的对比如图 1 和图 2。图中仿真曲线和试验拟合曲线基本重合, 可见仿真结果与试验结果一致性较好。

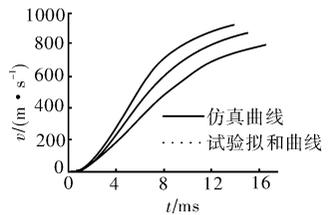
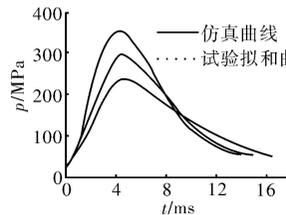


图 1 某大口径舰炮高、常、低温内弹道 $p-t$ 曲线

图 2 某大口径舰炮高、常、低温内弹道 $v-t$ 曲线

利用黄金分割法搜寻最高膛压 p_m , 插值法计算炮口速度 v_0 , 得仿真值如表 2, 和试验值 (铜柱法测膛底压力并换算为最大膛压) 如表 3 相比, 高、常、低温内弹道 p_m 的相对误差分别为 0.28%、0.78%、0.21%, v_0 的相对误差分别为 0.58%、0.64%、0.39%。精度较高, 可满足工程实践需要。

表 2 内弹道计算结果

内弹道性能	发射药温 / °C		
	50	15	-40
p_m/MPa	356.37	298.70	238.10
$v_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	921.65	869.36	799.10

表 3 内弹道试验结果

内弹道性能	发射药温 / °C		
	50	15	-40
p_m / MPa	357.38	296.39	238.61
v_0 / (m · s ⁻¹)	927	875	796

若采用常用方法对该炮进行高、低温内弹道仿真,即忽略火药热焓对侵蚀燃烧的影响,始终令 $k_v = 0.000030$,可得计算结果如表 4。

表 4 忽略火药热焓对侵蚀燃烧影响的内弹道计算结果

内弹道性能	发射药温 / °C		
	50	15	-40
p_m / MPa	354.20	298.70	239.61
v_0 / (m · s ⁻¹)	919.77	869.36	804.82

由表 3、表 4 知,如不考虑火药热焓对侵蚀燃烧的影响,高、低温内弹道 p_m 的相对误差分别升至 0.89% 和 0.42%, v_0 的相对误差分别升至 0.78% 和 1.11%。可见考虑火药热焓对侵蚀燃烧影响的高、低温内弹道仿真结果更接近试验结果。

4 结论

发射药初温变化引起的火药燃速变化和火药热

焓变化均对侵蚀燃烧产生影响,在常用高、低温内弹道仿真方法中考虑火药热焓变化对侵蚀燃烧的作用使仿真结果更接近试验值。考虑火药热焓变化对侵蚀燃烧的影响增加了内弹道建模的复杂度,但是对于计算精度要求较高的场合(例如:身管强度设计)有必要采用此种模型。因此,在多孔装药高、低内弹道仿真中,考虑发射药初温变化引起的火药热焓变化及对侵蚀燃烧和内弹道性能的影响是必要的。

参考文献:

[1] 张柏生. 炮药侵蚀燃烧的理论分析[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,1986,38(2):73-87.
 [2] 张洪林. 侵蚀燃烧在发射装药内弹道中的应用研究[J]. 兵工学报,2008,29(2):129-133.
 [3] D R Greatrix, J J Cottlieb. Erosive burning model for composite-propellant rocket motors with large length-to-diameter ratios [J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, September, 1987, 33(3):133-142.
 [4] 王道宏, 张长琪. 现代火炮设计计算程序选编[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
 [5] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.

(上接第 144 页)

3.3 箭体尾流分析

选取迎角为 45°、90°时的两个状态点的流场轨迹图进行比较分析,如图 5 所示。

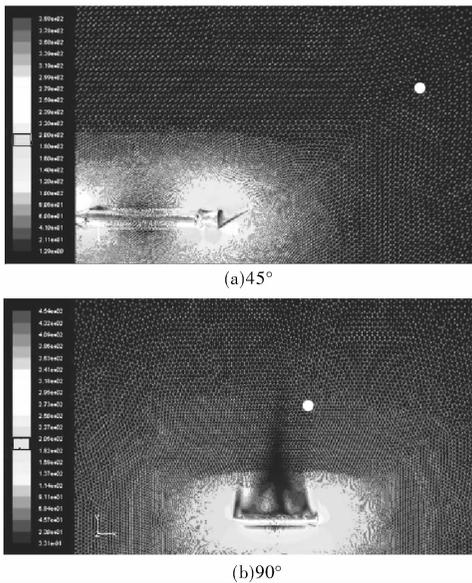


图 5 流场轨迹图

由图 5 可以看出,运载火箭在流场中会产生较大范围的尾流区,特别是迎角 90°的状态点,形成严重扰流。如果选用稳定伞来调整运载火箭姿态,考虑稳定伞的正常工作,应当尽量避免其落入运载火箭引起的尾流区域。结合稳定伞工作特点,图中选取两个白色标记点,这两个区域的流场受运载火箭尾流影响已经

较小,能够保证稳定伞正常工作。比较运载火箭的外形尺寸,可知运载火箭与稳定伞之间的连接绳不应当小于 20m。

4 结论

利用 CFD 技术,对空射运载火箭系统中箭体在不同迎角下的流场进行了数值仿真,得到了运载火箭以迎角为自变量的气动系数;分析箭体周围的流场特点及箭体表面压力分布情况,为运载火箭姿态控制方式的选择提供了参考依据;通过运载火箭的尾流分析,以为稳定伞为运载火箭初期姿态稳定方式的设计提供了连接绳的长度限制。仿真实验只进行了单独运载火箭大迎角流场特性分析,有载机和稳定伞的流场则需要进一步研究。

参考文献:

[1] 李易. 内装式空射运载火箭箭机分离动力学研究[D]. 西安:西北工业大学,2009.
 [2] 张登成, 闫杰, 张久星. 内装式空射运载火箭与载机的分离研究[J]. 弹箭与制导学报 2009, 29(5):158-161.
 [3] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
 [4] 陈廷楠. 应用流体力学[M]. 北京:航空工业出版社,2006:18-23.
 [5] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.