

文章编号:1006-9941(2025)01-0057-08

钝感高能硝胺发射药内弹道性能的预测

郭志罡¹,李梓超¹,李曼曼¹,郭睿¹,魏伦¹,于慧芳¹,王琼林¹,温晓沐²

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中国兵器工业第208研究所, 北京 102202)

摘要: 为了分析钝感高能硝胺发射药内弹道性能的影响因素,基于密闭爆发器试验和14.5 mm弹道测试构建了高能硝胺发射药的内弹道模型,采用粒子群算法拟合了模型修正系数,进而基于模型理论计算分析了燃烧渐增性因子 Pr 及装药量 ω 对弹丸初速 V_0 和最大膛压 p_m 的影响。结果表明:基于经典内弹道理论预测高能硝胺发射药动态燃烧特性时,需考虑燃速修正系数 χ 和火药力利用系数 η 。与静态燃烧相比,动态燃烧的等效燃速相对增长可超过10%。同时,由于能量耗散的影响,理论计算中仅80%左右的火药力可有效转换为弹丸动能。发射药内弹道性能受 Pr 、 ω 、 χ 和 η 的耦合影响。作为主要机制,发射药静态燃烧性能和装药量显著影响着内弹道性能; V_0 和 ω 线性正相关, p_m 可表征为 ω 的指数函数; Pr 决定了不同关联式中的系数。然而,在不同工艺条件下, χ 和 η 的波动使内弹道性能变化,增大了拟合关联式的预测偏差。

关键词: 钝感高能硝胺发射药;内弹道性能;燃速修正系数;火药力利用系数;拟合关联式

中图分类号:TJ55

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2024280

0 引言

发射药是枪炮武器的关键构成,其燃烧特性决定了装备的威力^[1]。面向高效毁伤的应用需求,提高发射药的能量水平是武器发展的主要趋势^[2-3]。其中,高能硝胺发射药是现役装备的典型高能配方^[4]。近年来,不同学者关注着高能硝胺发射药的燃烧规律^[2,5]、烧蚀作用^[6]、力学性能^[7]和安全特性^[8]等。作为发射药正向设计的最根本要求,高燃烧渐增性和内弹道性能的关联分析一直属于热点。

为实现发射药能量的有序释放,以达到渐增性燃烧的目的,基于钝感材料的缓燃层构筑可作为主要调控途径^[9]。王琼林等^[10]基于密闭爆发器试验和30 mm火炮内弹道测试,论述了含缓燃层的高能硝胺发射药的高燃烧渐增性,其装药设计能提高30%的炮口动能。

王峰等^[5]采用三氨基三硝基苯(TATB)对粒状高能硝胺发射药进行包覆,由密闭爆发器及12.7 mm内弹道测试表明,在燃烧渐增性的改善下,包覆处理可相对提高5%的弹丸初速。魏伦等^[11]制备了含新型钝感剂的高能硝胺发射药,在燃烧渐增性高的同时,内弹道参数的长贮性能好。从上述研究可知,试验方法是评估发射药燃烧性能变化的重要手段。通过密闭爆发器测试表征静态燃烧渐增性,进而解释内弹道测试中的弹丸初速变化。通常,在工况约束条件下,弹丸初速和燃烧渐增因子存在正相关关系^[12]。因此,为了节省试验成本,也有文献仅通过密闭爆发器测试来研究发射药燃烧^[9]。

然而,仅依靠试验研究所得的数据量较少,研究结论以局部最佳工况点为主,难以详细解释发射药内弹道特性的影响因素。目前,发射药静态燃烧性能和动态燃烧性能间的定量联系仍有待探索,这有利于促进研究推广,指导发射药产品的正向设计。为填补试验研究方法的空白,可发展相应的理论计算模型。赵煜华等^[13]为分析切口参数对部分切口杆状发射药内弹道性能的影响,基于经典内弹道理论建立了装药内弹道计算模型,并通过了30 mm火炮的试验验证。赵军和廖昕^[14]提出了考虑散热修正的内弹道模型,将传热

收稿日期:2024-11-04;修回日期:2024-12-12

网络出版日期:2024-12-19

基金项目:国防科技重点实验室稳定支持项目(JCKY2023209C005)

作者简介:郭志罡(1995-),男,助理研究员,主要从事发射药应用技术研究。e-mail:940897281@qq.com

通信联系人:于慧芳(1982-),女,副研究员,主要从事发射药应用技术研究。e-mail:50793647@qq.com

引用本文:郭志罡,李梓超,李曼曼,等.钝感高能硝胺发射药内弹道性能的预测[J].含能材料,2025,33(1):57-64.

GUO Zhi-gang, LI Zi-chao, LI Man-man, et al. Interior Ballistic Performance Prediction of Desensitized High-Energy Nitramine Gun Propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(1):57-64.

方程带入了经典内弹道方程组中, 所预测膛压和初速与实测值的偏差小于 2.5%。汪俊杰等^[15]指出, 由密闭爆发器所测得的发射药燃速参数进行内弹道设计时, 预测值与实际弹道试验结果会出现较大偏差。总体来看, 采用经典内弹道理论研究发射药内弹道性能, 需通过试验验证, 必要时引入修正项。

为增强高能硝胺发射药内弹道性能的理论预测能力, 本研究针对空白高能硝胺发射药和钝感高能硝胺发射药样品, 通过密闭爆发器测试和 14.5 mm 弹道试验建立了含修正系数的经典内弹道模型, 采用粒子群优化算法拟合了模型参数。基于此, 本研究对发射药内弹道性能的影响因素开展分析, 建立静态燃烧渐增性和内弹道性能间的拟合关联式, 解释了关联式预测的不确定性。

1 试验部分

1.1 发射药样品

在内弹道模型的研究中, 所涉发射药样品如下: 样品 B-1, 7 孔粒状空白高能硝胺发射药, 西安近代化学研究所; 样品 C-1、C-2 和 C-3, 7 孔粒状钝感高能硝胺发射药, 西安近代化学研究所。在钝感发射药的制备中, 采用类干法钝感工艺, 在空白发射药表面构筑燃速缓慢的钝感层。在样品 C-1、C-2 和 C-3 的钝感层中, 钝感剂含量存在差异; 与空白发射药相比, 钝感发射药火药力将随钝感剂含量占比增加而减小。

在拟合关联式的验证中, 额外独立选取的发射药样品如下: 样品 1, 空白高能硝胺发射药, 西安近代化学研究所; 样品 2~样品 23, 钝感高能硝胺发射药, 西安近代化学研究所。在制备过程中, 样品 2~样品 23 经历了不同钝感工况, 在后续试验测试中静态燃烧渐增性和弹丸初速随之变化。

1.2 密闭爆发器测试

按照 GJB 770B-2005 703.1 测试方法, 通过密闭爆发器测得不同样品静态燃烧压力 p 随时间 t 的变化曲线, 并计算对应的燃烧渐增性因子 Pt^{12} 。在测试工况中, 药室容积为 100 cm^3 ; 装填密度 $\Delta=0.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; 点火药为 1.1 g 的 2# 硝化棉; 对应点火压力 $p_0=10 \text{ MPa}$ 。

1.3 内弹道试验

选用 14.5 mm 口径弹道枪测试不同发射药样品的内弹道性能, 弹头和弹壳均采用 14.5 mm 的制式器材。随装药量 ω 变化, 基于 GJB349.5-87 中的铜柱测压法测得最大膛压 p_x , 基于 GJB349.4-87 中的恒磁靶

测速法测得膛口弹丸初速 V_0 。表 1 汇总了试验弹道枪的工况参数, 包括了挤进压力 p_x 、弹丸质量 m 、枪膛截面积 S_0 、绝热指数 θ 、药室容积 Vol_0 及弹丸总行程 l_{\max} 。

表 1 14.5 mm 弹道枪的参数

Table 1 Parameters of the 14.5 mm ballistic gun

p_x / MPa	m / g	S_0 / cm^2	θ	Vol_0 / m^3	l_{\max} / m
30	64	1.745	0.24	3.77×10^{-5}	1.24

Note: p_x is the engraving pressure; m is the mass of projectile; S_0 is the chamber section area; θ is the adiabatic exponent; Vol_0 is the chamber volume; l_{\max} is the total travel distance of projectile.

2 基于参数拟合的内弹道模型

2.1 基于密闭爆发器测试的 Ψ -Z

图 1 展示了不同发射药样品的静态燃烧特性。对于 7 孔粒状的空白发射药, 可根据几何燃烧定律, 计算燃去体积分数 Ψ 随相对燃去厚度 Z 的变化^[16]。将 Ψ -Z 结果带入如式 (1) 所示的定容燃烧方程, 经离散求解, 即可获得 p - t 预测值。最终, 空白发射药 p - t 预测值和试验值的对比见图 1a, Ψ -Z 求解结果见图 1b。由图 1a

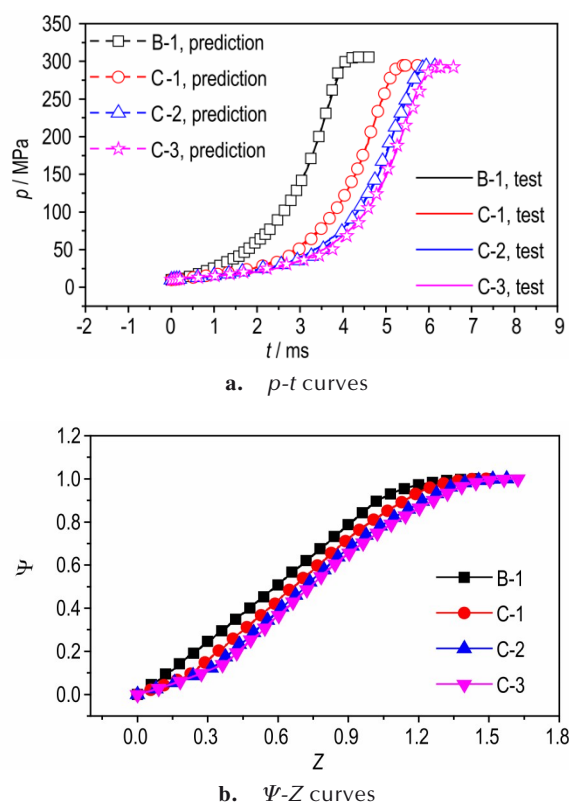


图 1 不同发射药样品的静态燃烧特性

Fig. 1 Characteristics of static combustion for different propellant samples

可知,计算结果和试验值能较好吻合,这表明了式(1)的定容燃烧模型是可信的。

$$\begin{cases} dZ/dt = u/e_1 \\ u = u_0 + u_x p^n \\ \rho = \rho_0 + \frac{f_{pe} \Delta \Psi}{1 - \Delta/\rho - (\alpha - 1/\rho) \Delta \Psi} \end{cases} \quad (1)$$

式中, u 为燃速, $m \cdot s^{-1}$; e_1 为半弧厚, m ; u_0 为基准燃速, $m \cdot s^{-1}$; u_x 为燃速系数, $m \cdot Pa^{-n} \cdot s^{-1}$; n 为燃速指数,无量纲; ρ_0 为点火压力, Pa ; f_{pe} 为火药力, $J \cdot kg^{-1}$; Δ 为装填密度, $kg \cdot m^{-3}$; Ψ 为燃去体积分,无量纲; ρ 为发射药真实密度, $kg \cdot m^{-3}$; α 为发射药余容, $m^3 \cdot kg^{-1}$; Z 为发射药相对燃去厚度,无量纲; t 为燃烧时间, s ; p 为燃烧压力, Pa 。

对于钝感发射药,由于未获取钝感层燃烧参数和理化性能,难以正向求解 $\Psi-Z$ 来计算 $p-t$ 曲线。因此,本研究将基于式(1)和图 1a 中的 $p-t$ 测试结果,反向求解不同钝感发射药样品的等效形状函数 $\Psi-Z$ ^[13],作为内弹道模型的输入条件;所求结果见图 1b。在等效形状函数 $\Psi-Z$ 中,采用空白发射药的相对燃去厚度 Z 表征发射药的燃烧进程;在钝感发射药的真实燃烧中,早期钝感层的燃去占据了主导地位,其缓燃作用将延缓 $\Psi-Z$ 的增长趋势。所以,在样品 C-1~C-3 间随钝感剂用量的上升,初始阶段 Ψ 的水平减小;可通过等效 $\Psi-Z$ 的变化综合表征钝感层对燃烧的影响。后续计算中,可将等效 $\Psi-Z$ 带入空白发射药的燃烧方程,获得钝感发射药的燃烧性能;如图 1a 所示,该操作下 $p-t$ 预测值与试验结果存在较好的一致性。

2.2 引入修正系数的经典内弹道模型

在挤进阶段,燃去的发射药体积分 Ψ_0 如式(2)所示:

$$\Psi_0 = \frac{Vol_0/\omega - 1/\rho}{\eta f_{eq}/\rho_x + (\alpha - 1/\rho)} \quad (2)$$

在第一阶段, $\Psi \in [\Psi_0, 1]$ 的区间,相对燃去厚度 Z 、速度 v 和弹丸行程 l 随燃烧时间 t 变化的控制方程为:

$$\begin{cases} dZ/dt = \chi u/e_1 \\ u = u_0 + u_x p^n \\ dv/dt = \frac{S_0 p}{m\varphi} \\ dl/dt = v \\ S_0 p(l + l_\psi) = \eta f_{eq} \omega \Psi - \theta \varphi m v^2 / 2 \\ l_\psi = \frac{Vol_0}{S_0} \left[1 - \frac{\omega}{Vol_0 \rho} (1 - \Psi) - \frac{\alpha \omega \Psi}{V_0} \right] \end{cases} \quad (3)$$

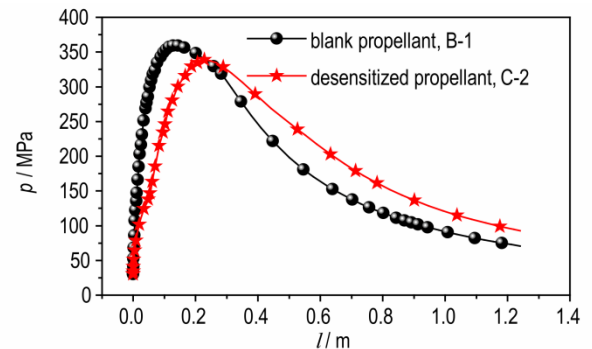
在式(2)和式(3)中,次要功系数 φ 仅表征了弹丸

旋转功、弹丸摩擦功、火药气体运动功和后座部分运动功等功耗^[16],无法表征实际过程中全部能量耗散。例如, φ 未考虑散热损失^[14]对弹丸动能的影响。因此,本研究引入了火药力利用系数 η 修正火药力 f_{eq} ,简化修正能量耗散对弹丸动能的综合影响。同时,式(3)中 $\Psi-Z$ 的关系按图 1b 表征, u 是空白发射药定容燃烧的燃速;在内弹道性能的预测时,为表征发射药静态燃烧和动态燃烧间的差异,引入燃速修正系数 χ 。

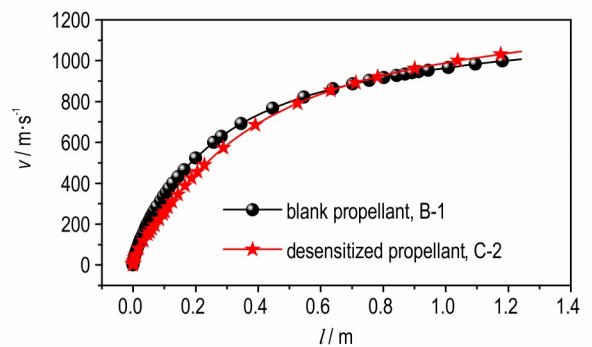
在第二阶段, $\Psi=1$ 且 $l < l_{max}$ 的区间, v 和 l 随 t 变化的控制方程为:

$$\begin{cases} dv/dt = \frac{S_0 p}{m\varphi} \\ dl/dt = v \\ p \left[l S_0 + Vol_0 \left(1 - \frac{\alpha \omega}{Vol_0} \right) \right] = \eta f_{eq} \omega - \theta \varphi m v^2 / 2 \end{cases} \quad (4)$$

对上述方程离散求解,即可求得 $p-l$ 和 $v-l$ 的响应结果,相关示意图 2。最终, $p-l$ 曲线的峰值可记作 p_m ;铜柱测压法所得的 p_v 低于 p_m ,动态偏差可落于 10%~30%^[17] 的区间。而 $v-l$ 曲线的终点即为试验测得的弹丸初速 V_0 。



a. chamber pressure with distance



b. muzzle velocity with distance

图 2 空白发射药和钝感发射药的内弹道性能计算

Fig. 2 Calculation of the interior ballistic performance of blank propellant and desensitized propellant

2.3 基于粒子群算法的模型参数拟合

在上述模型中, η 、 χ 和 φ 是涉及复杂物理过程的模型系数, 难以直接获取。本小节将采用粒子群算法构建 η 、 χ 和 φ 的拟合方法。

对于发射药样品 i , 当火药力利用系数 η 、燃速修正系数 χ 和次要功系数 φ 确定后, 即可根据上一小节所述的方法, 求得预测值 $V_{0,i,cal}$ 和 $p_{m,i}$ 。在拟合过程中, $V_{0,i,cal}$ 应与弹道试验测试值 $V_{0,i,exp}$ 尽可能接近; 而 $p_{m,i}$ 与试验测试值 $p_{v,i}$ 只需满足偏差区间^[17]的模糊约束; 故可定义拟合评价函数 $Cost_i$ 如式(5)所示。对于样品 i , 合理的模型系数应使 $Cost_i$ 趋于极小值。

$$Cost_i = \begin{cases} \frac{|V_{0,i,cal} - V_{0,i,exp}|}{V_{0,i,exp}} & \text{if } 0.1 < \frac{|p_{m,i} - p_{v,i}|}{p_{v,i}} < 0.3 \\ 100 & \text{if } \frac{|p_{m,i} - p_{v,i}|}{p_{v,i}} \leq 0.1 \text{ or } \frac{|p_{m,i} - p_{v,i}|}{p_{v,i}} \geq 0.3 \end{cases} \quad (5)$$

在实际拟合过程中, 可选取 N 个样品 ($N > 1$) 作为拟合集, 求解多个待定模型系数; 对应的, 拟合计算的目标函数 $Goal$ 定义为式(6):

$$Goal = \min \sum_i^N Cost_i \quad (6)$$

火药力利用系数 η 与能量耗散有关, 散热损失^[14]属于重要影响因素。较高的火药力能引起工况温度上升, 增强散热, η 可能下降。因此, 在拟合求解中, 空白发射药样品和钝感发射药样品的火药力利用系数预设两个独立的变量, η_b 和 η_d ; 若拟合结果为 $\eta_b = \eta_d$, 则表

$$\begin{cases} V\eta_{par,b,k} \in [0.1(\eta_{b,min} - \eta_{b,max}), 0.1(\eta_{b,max} - \eta_{b,min})] & V\eta_{par,d,k} \in [0.1(\eta_{d,min} - \eta_{d,max}), 0.1(\eta_{d,max} - \eta_{d,min})] \\ V\chi_{par,k} \in [0.1(\chi_{min} - \chi_{max}), 0.1(\chi_{max} - \chi_{min})] & V\varphi_{par,k} \in [0.1(\varphi_{min} - \varphi_{max}), 0.1(\varphi_{max} - \varphi_{min})] \end{cases} \quad (9)$$

5) 在第 k 次计算中, 更新不同粒子 par 的位置 $C_{par,k}$;

$$C_{par,k} = C_{par,k-1} + Vel_{par,k} \quad (10)$$

$C_{par,k}$ 不得超出空间 C 的定义域。

最终, $k=100$ 的 $C_{global-min} = (\eta_{global-min,b}, \eta_{global-min,d}, \chi_{global-min}, \varphi_{par-min})$ 即为拟合结果。

2.4 拟合计算校核

表2汇总了不同发射药样品的14.5 mm内弹道试验测试结果, 分别作为参数拟合计算的拟合集和验证集。表3给出了2种计算工况及参数拟合结果。在不同工况中, 拟合集的样本数目 N 不同。最终, $Goal$ 函数的收敛情况和弹丸初速的验证结果如图3所示。

明在试验工况范围内, f_{eq} 的变化不会引起 η 的波动, 散热损失的相对差异有限。最终, 在式(6)的拟合问题中, 模型待定参数包括 η_b 、 η_d 、 χ 和 φ 这4个变量。

针对上述拟合问题, 粒子群优化算法的主要流程如下所示:

1) 以变量 η_b 、 η_d 、 χ 和 φ 构造4维空间 C ; 本研究中, C 定义域初始化为:

$$\begin{cases} \eta_b \in [0.7, 1] & \eta_d \in [0.7, 1] \\ \chi \in [0.99, 1.2] & \varphi \in [1, 1.5] \end{cases} \quad (7)$$

在该区域随机生成 M 个粒子 ($M \geq 30$) 作为初始种群, 粒子 par 的初始速度 $Vel_{par,0} = (0, 0, 0, 0)$; 粒子 par 的初始位置 $C_{par,0} = (\eta_{par,b,0}, \eta_{par,d,0}, \chi_{par,0}, \varphi_{par,0})$;

2) 执行100轮迭代计算, 不断更新每一个粒子的位置和速度;

3) 在第 k 次计算中, 按 $\sum_i^N Cost_i$ 计算每个粒子的适应值 $par-goal$; 在全部计算结果中, 统计每个粒子的历史最小值 $par-min$ 和对应的粒子位置 $C_{par-min} = (\eta_{par-min,b}, \eta_{par-min,d}, \chi_{par-min}, \varphi_{par-min})$;

全局最小值 $global-min$ 和对应的粒子位置 $C_{global-min} = (\eta_{global-min,b}, \eta_{global-min,d}, \chi_{global-min}, \varphi_{par-min})$;

4) 在第 k 次计算中, 更新不同粒子 par 的速度 $Vel_{par,k} = (V\eta_{par,b,k}, V\eta_{par,d,k}, V\chi_{par,k}, V\varphi_{par,k})$;

$$Vel_{par,k} = 0.99^{k-1} Vel_{par,k-1} + 1.5 \text{rand}(C_{par-min} - C_{par,k-1}) + 2 \text{rand}(C_{global-min} - C_{par,k-1}) \quad (8)$$

式(8)中, $\text{rand}()$ 函数是对输入的向量分量以随机比例减小。最终, $Vel_{par,k}$ 需以式(9)约束:

由表3可得, $N=2$ 的拟合结果和 $N=3$ 的拟合结果已较为接近, 不同参数差值的量级处于 $O(10^{-2})$ 以下。在图3a中, 不同计算工况随迭代步数的增加, 式(6)的 $Goal$ 函数迅速减少, 趋于稳定水平; 随着样本数目 N 的增加, 更多发射药样品的预测偏差进行加权, 图3a的稳定水平存在差异, 但均低于 $O(10^{-2})$ 。最终, 对于拟合集和验证集的不同发射药样品, 图3b给出了弹丸初速的对比; 不同工况中模型预测值和试验测试值吻合较好, 预测偏差均小于1%。

上述结果表明, 当拟合集样本数 $N \geq 2$ 时, 粒子群算法已经能有效地求解内弹道模型的待定参数; 最终, 在最大膛压的模糊约束下, 带修正系数的经典内弹道

表2 不同发射药样品的14.5 mm内弹道试验结果

Table 2 Experimental results for different propellant samples in 14.5 mm interior ballistic test

sample	Pr	ω/g	p_c / MPa	$V_0 / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
B-1	0.2695	28	278.3	1007.3
C-1	0.4004	30	289.7	1036.0
C-2	0.4371	32	297.1	1046.8
C-3	0.4491	33	295.3	1064.2

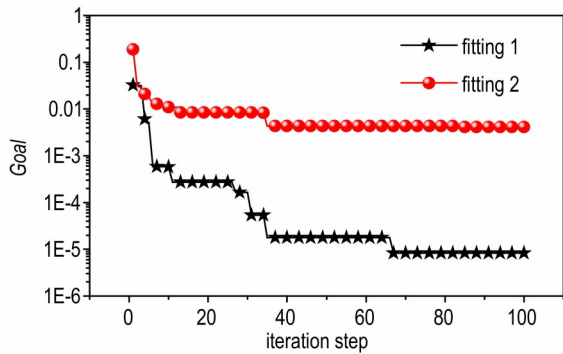
Note: Pr is burning progressive factor; ω is charge mass; p_c is maximum chamber pressure; V_0 is muzzle velocity.

表3 基于粒子群算法的拟合计算

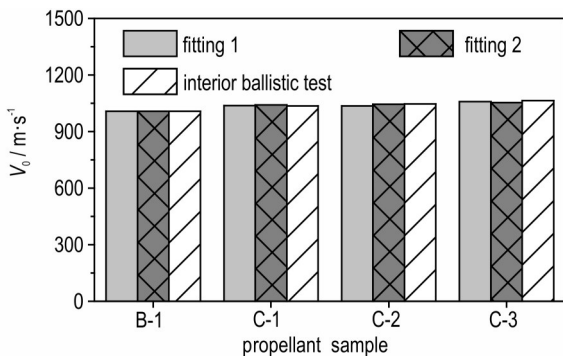
Table 3 Fitting calculation by the particle swarm optimization algorithm

case index	propellant sample		fitting result			
	fitting set	validation set	η_b	η_d	χ	φ
fitting 1	B-1, C-1	C-2, C-3	0.784	0.858	1.116	1.237
fitting 2	B-1, C-1, C-2	C-3	0.775	0.854	1.132	1.235

Note: η_b is utilization coefficient of propellant force for blank propellant; η_d is utilization coefficient of propellant force for desensitized propellant; χ is correction coefficient of burning rate; φ is secondary work coefficient.



a. iterations for particle swarm optimization algorithm



b. comparison of muzzle velocities

图3 内弹道模型参数的拟合计算

Fig. 3 Fitting calculation for parameters of interior ballistic model

模型可用于拟合集外的发射药性能预测。因此,研究基于参数拟合的内弹道模型可信,可用于研究钝感高能硝胺发射药内弹道性能的影响因素。在后续分析中,主要将 fitting 2 的拟合结果带入计算模型。

3 结果与讨论

3.1 内弹道模型修正系数

在表3中, $\chi > 1.1$ 意味着:在内弹道试验中,发射药动态燃速与定容燃烧测试中的静态燃速存在差异。与静态燃烧相比,动态燃烧的燃速系数相对增长可超过10%。经分析,这可能与动态燃烧过程中的燃面变化有关。实际燃烧中因药粒碎裂等因素,燃面迁移情况较几何燃烧定律^[16]更复杂;故在理论模型中,需要通过等效燃速系数的增长补偿这部分动态偏差。

另一方面,表3中不同发射药样品的火药力利用系数处于0.8左右。空白发射药 η_b 约为0.78,钝感发射药 η_d 约为0.85。这意味着,为修正能量耗散对试验14.5 mm内弹道性能的综合影响,理论计算中仅部分火药力可有效地驱动弹丸运动。文献[16]表明,步兵武器的相对散热损失占火药全部能量的15%~20%,且随口径减小而增加。这与上述火药力利用系数的拟合值水平接近。因此,可通过 η 的修正,在经典内弹道模型中考虑散热损失的影响。在空白发射药和钝感发射药间,火药力利用系数将随 f_{pe} 水平的降低轻微增长。本研究中,随火药力水平的下降, η 的变化可达0.08。

3.2 内弹道性能的关联式拟合

在试验研究中,仅依靠表2所示的小样本数据,难以详细解释 Pr, ω 对内弹道性能的定量影响。因此,基于参数拟合的内弹道模型,图4在表2基础上补充了数据点。在此基础上,可分析弹丸初速 V_0 、最大膛压 p_m 与 ω, Pr 间的函数关系。

由图4a可知,发射药 V_0 和 ω 成显著正相关,而 Pr 能影响 V_0 - ω 线性拟合的截距和斜率,可由式(11)的方程形式进行拟合:

$$V_0 = f_1(Pr)\omega + f_2(Pr) \quad (11)$$

经分析,对于本研究的钝感高能硝胺发射药,式(12)是式(11)的可行解之一,拟合相关系数 $R^2 > 0.93$,式(11)对图4a中 V_0 的预测偏差不得超过3.2%。由式(12)可知,钝感高能硝胺发射药的燃烧渐增性主要改变 V_0 - ω 的截距,在相同装药量下,使用钝感剂不利于 V_0 的提升。

$$\begin{cases} f_1(Pr) = 31.18 \\ f_2(Pr) = 177.7 - 1553Pr^3 \end{cases} \quad (12)$$

由图4b可得, p_m 与 ω 可采用指数函数形式拟合:

$$p_m = f_3(Pr)e^{f_4(Pr)\omega} \quad (13)$$

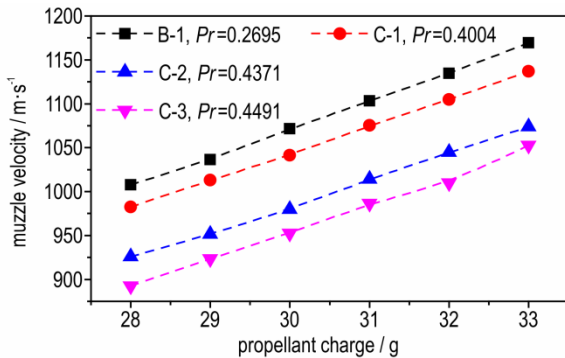
具体的, 式(14)是式(13)的可行解之一, 拟合相关系数 $R^2 > 0.99$, 式(13)对图4b中 p_m 的预测偏差可小于1.2%。由式(14)可得, 随着 ω 的提高, 钝感高能硝酸发射药对 p_m 增长的抑制, 主要通过系数 $f_4(Pr)$ 的影响。

$$\begin{cases} f_3(Pr) = 10.03 + 24.16Pr \\ f_4(Pr) = 0.02879 + 0.5668Pr - 0.9902Pr^2 \end{cases} \quad (14)$$

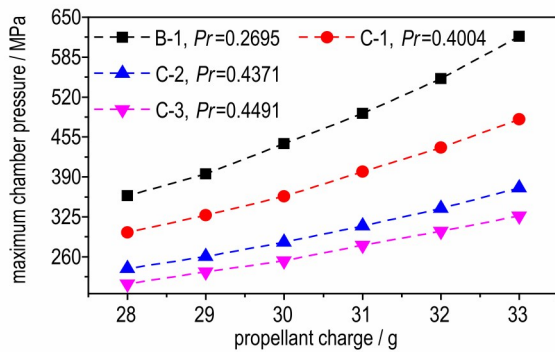
综合来看, 在 V_0 - ω 和 p_m - ω 的关系中, 发射药燃烧渐增性主要影响关联式中的待定系数, 且 Pr 的作用可整理为与 ω 相对独立的系数。最终, 基于式(11)和式(13), 对于发射药装药设计: $V_0 \geq V_{\text{goal}} \& p_m \leq p_{\text{goal}}$, ω 需满足式(15):

$$\frac{V_{\text{goal}} - f_2(Pr)}{f_1(Pr)} \leq \omega \leq \frac{\ln[p_{\text{goal}}/f_3(Pr)]}{f_4(Pr)} \quad (15)$$

可以看出, 较小的 $f_4(Pr)$ 是式(15)存在实数解的



a. muzzle velocity



b. maximum chamber pressure

图4 装药量及燃烧渐增性对内弹道性能的影响

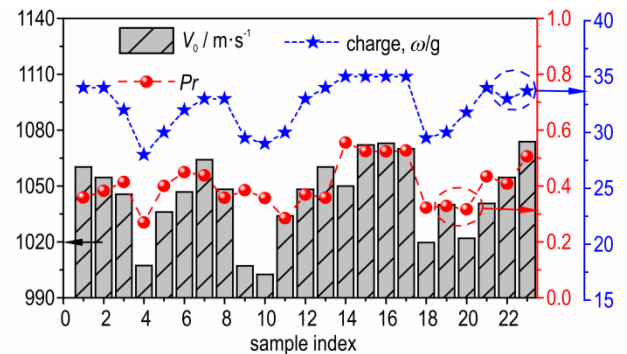
Fig.4 Influence of charge mass and burning progressive factor on interior ballistic performance

关键。基于式(11)和式(15)的约束, 以增加 ω 为前提, V_0 与 Pr 可遵循文献所述的正相关规律^[12]。

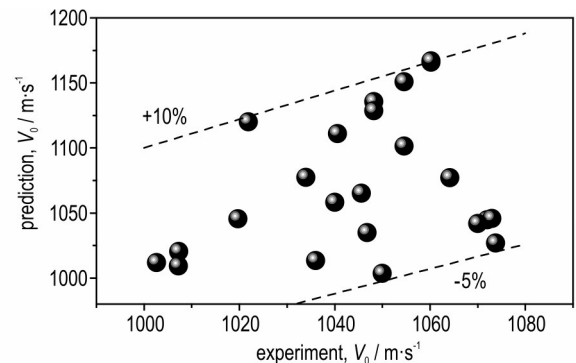
3.3 拟合关联式预测的不确定性

为验证 V_0 拟合关联式的预测, 图5a展示了样品1~23的密闭爆发器测试及14.5 mm内弹道试验结果; 图5b给出了 V_0 拟合关联式预测值和试验结果的对比, 相对偏差处于-5%~10%的范围。综合来看, V_0 拟合关联式能用于解释 V_0 和 ω 、 Pr 的宏观响应; 作为主要机制, 发射药静态燃烧渐增性和装药量显著影响着内弹道性能。

然而, 前文 V_0 关联式拟合是以燃速修正系数 χ 和火药力利用系数 η 近似恒值为前提。在不同工艺条件下, 装药结构和环境温度的变化, 都可能引起发射药燃速和散热的差异, 使 χ 和 η 出现波动, 扩大模型预测的偏差; 故图5b的预测精度较图3b变差。如图6所示, 基于钝感发射药样品C-2, 在控制变量法下分别给出了 p_m 、 V_0 随 χ 、 η 的变化。由图6可得: p_m 、 V_0 对 χ 、 η 较为敏感, 近似存在线性响应。特别地, 在 $\Delta\chi=0.06$ 的变化下, Δp_m 可达56.7 MPa; 在 $\Delta\eta=0.06$ 的变化下, ΔV_0 可达50.7 m·s⁻¹。



a. experimental results



b. comparison for prediction

图5 弹丸初速 (V_0) 关联式的预测应用

Fig.5 Application of the prediction by fitting correlation of muzzle velocity (V_0)

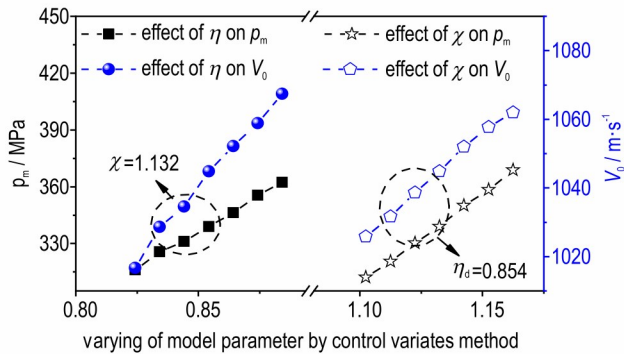


图6 基于钝感发射药C-2的模型参数敏感性分析

Fig.6 Sensitivity analysis of the model parameters based on desensitized propellant C-2

4 结论

针对钝感高能硝胺发射药,本研究构建了基于参数拟合的内弹道模型,进而分析了发射药样品内弹道性能的影响因素,主要结论如下:

(1)为了提高钝感高能硝胺发射药性能的预测精度,在经典内弹道理论中需引入燃速修正系数 χ 和火药力利用系数 η 的修正;

(2)可构造弹丸初速 V_0 、最大膛压 p_m 与装药量 ω 、燃烧渐增性因子 Pr 间的函数关联式;但在实际工艺中, χ 和 η 的波动能引起 V_0 和 p_m 的波动,扩大了关联式预测的不确定性。

参考文献:

- [1] 苟永亮,刘波,李梓超,等.基于神经网络算法的发射药钝感剂浓度分布快速预测技术[J].火炸药学报,2022,45(1):115-119.
GOU Yong-liang, LIU Bo, LI Zi-chao, et al. Prediction of desensitizer concentration distribution in gun propellant based on artificial neural network algorithm [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(1): 115-119.
- [2] 魏伦,王琼林,刘少武,等.高能量密度化合物CL-20、DNTF和AND在高能发射药中的应用[J].火炸药学报,2009,32(1):17-20.
WEI Lun, WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, et al. Application of high energy density compounds CL-20, DNTF and AND in high energy propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(1): 17-20.
- [3] 岳春晖,刘波,李曼曼,等.DIANP合成及其在发射药中的应用研究进展[J].含能材料,2024,32(8):871-884.
YUE Chun-hui, LIU Bo, LI Man-man, et al. Progress in the synthesis of DIANP and its application in propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(8): 871-884.
- [4] 郑双,魏学涛,魏伦,等.高能硝胺发射药流变性能研究[J].火工品,2016,3:35-38.
ZHENG Shuang, WEI Xue-tao, WEI Lun, et al. Study on the rheological property of high energy nitramine propellant [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2016, 3: 35-38.
- [5] 王锋,刘少武,姚月娟,等.TATB表面包覆高能硝胺发射药的性能研究[J].四川兵工学报,2013,34(9):134-136.
WANG Feng, LIU Shao-wu, YAO Yue-juan, et al. Study on the performance of coated high energy nitramine propellant with TATB [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2013, 34(9): 134-136.
- [6] 李强,魏伦,崔建芳,等.含新型有机硅缓蚀剂的制备及性能研究[J].火炸药学报,2020,43(2):225-229.
LI Qiang, WEI Lun, CUI Yan-fang, et al. Study on preparation and properties of a new type of silicone ablation inhibitor [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(2): 225-229.
- [7] 骞超,张丽华.不同粒度RDX对DAGR发射药试样抗冲击性能的影响[J].精细化工中间体,2017,47(4):51-54.
PIAN Chao, Zhang Li-hua. The Influence of particle-size of RDX on the impact resistance of DAGR nitramine gun propellant [J]. *Fine Chemical Intermediates*, 2017, 47(4): 51-54.
- [8] 石先锐,许灿敢,贾永杰,等.典型高能硝胺发射药的摩擦静电电特性[J].火炸药学报,2022,45(1):109-114.
SHI Xian-rui, XU Can-qi, JIA Yong-jie, et al. Frictional static electricity characteristics of typical high energy nitramine gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(1): 109-114.
- [9] 周港澳,陶忠安,范文豪,等.包覆微孔球扁药的结构与性能[J].含能材料,2024,32(8):795-803.
ZHOU Gang-ao, TAO Zhong-an, Fan Wen-hao, et al. Structure and properties of coated microporous oblate spherical propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(8): 795-803.
- [10] 王琼林,刘少武,朱扬春,等.多层高能硝胺发射药研究[J].火炸药学报,2008,31(2):64-67.
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, ZHU Yang-chun, et al. Research on multilayer disc nitramine gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(2): 64-67.
- [11] 魏伦,于慧芳,韩冰,等.一种新型聚酯钝感剂在发射药中的应用[J].火炸药学报,2012,35(3):91-94.
WEI Lun, YU Hui-fang, HAN Bin, et al. Application of a novel deterrent polyester in gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(3): 91-94.
- [12] 王琼林,刘少武,张远波,等.程序控制燃烧发射药的概念和原理[J].火炸药学报,2009,32(5):71-74.
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, ZHANG Yuan-bo, et al. Conception and principle of controlled burning gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5): 71-74.
- [13] 赵煜华,杨伟涛,严文荣,等.部分切口杆状发射药内弹道性能的数值模拟[J].含能材料,2019,27(6):487-492.
ZHAO Yu-hua, YANG Wei-tao, YAN Wen-rong, et al. Numerical simulation of the interior ballistic performance for partially cut multi-perforated stick propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(6): 487-492.
- [14] 赵军,廖昕.考虑火炮膛内热散失的内弹道建模与仿真[J].系统仿真学报,2011,23(3):465-468.
ZHAO Jun, LIAO Xin. Modeling and simulation of interior ballistics considering heat loss in chamber [J]. *Journal of System*

- Simulation*, 2011, 23(3): 465-468.
- [15] 汪俊杰, 黄振亚, 何飞, 等. 发射药药型结构对燃速测试结果的影响[J]. 弹道学报, 2014, 26(2): 80-85.
WANG Jun-jie, HUANG Zhen-ya, HE Fei, et al. Influence of propellant structure on test results of burning rate[J]. *Journal of Ballistics*, 2014, 26(2): 80-85.
- [16] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004.
JIN Zhi-ming. Gun interior ballistics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [17] 官汉章, 邹瑞龙. 实验内弹道学[M]. 北京:兵器工业出版社, 1997.
Guan Han-zhang, ZOU Rui-long. Experimental Interior Ballistics[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1997.

Interior Ballistic Performance Prediction of Desensitized High-Energy Nitramine Gun Propellants

GUO Zhi-gang¹, LI Zi-chao¹, LI Man-man¹, WU Rui¹, WEI Lun¹, YU Hui-fang¹, WANG Qiong-lin¹, WEN Xiao-mu²

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. No.208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract: To obtain the factors which affect the interior ballistic performance of desensitized high-energy nitramine gun propellants, the interior ballistic model was built through the closed vessel test and the 14.5 mm ballistic test. The correction coefficients were fitted by the particle swarm optimization algorithm. Then, the effects of muzzle velocity V_0 and maximum chamber pressure p_m on burning progressive factor Pr and charge mass ω were analyzed through the theoretical model calculation. It was found that, the correction coefficient of burning rate χ and the utilization coefficient of propellant force η should be considered to predict the dynamic combustion characteristics of high-energy nitramine gun propellants by the classical interior ballistic theory. Compared with the case of static combustion, the relative increase of burning rate could exceed 10% in the dynamic combustion. Meanwhile, because of the energy dissipation, only about 80% of the propellant force can be effectively converted into the kinetic energy of projectile in the theoretical calculation. In result, the interior ballistic performance of gun propellants is affected by the coupling of Pr , ω , χ and η . As the major mechanism, the interior ballistic performance is significantly affected by the static combustion characteristics and the charge mass. There is a linear positive correlation between V_0 and ω , while p_m can be expressed by an exponential function of ω , and the coefficients in different correlations are determined by Pr . Nevertheless, with the different process conditions, the fluctuations of χ and η lead to the varying of interior ballistic performance, which increases the prediction deviation of the fitting correlation.

Key words: desensitized high-energy nitramine gun propellant; interior ballistic performance; correction coefficient of burning rate; utilization coefficient of propellant force; fitting correlation

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024280

Grant support: The Project of Stable Support for National Key Laboratory of Transient Impact (No. JCKY2023209C005)

(责编:姜梅)