

文章编号:1006-9941(2025)06-0645-13

## 图像末制导炮弹内弹道性能与发射过载分析

蔡灿伟,宁全利,邓海飞,张之文,刘立稳

(陆军炮兵防空兵学院,安徽合肥230031)

**摘要:**为准确分析图像末制导炮弹内弹道性能及所受的发射过载,根据适配的火炮发射平台、发射装药特性与作用原理,研究了不同装药号发射的内涵本质,建立了图像末制导炮弹内弹道两相流模型,依据两种不同工况条件仿真与实测的相关数据对模型进行了合理性验证;以此为基础,基于验证的内弹道两相流模型,分析了某型图像末制导炮弹不同装药号发射时膛内压力波动、弹丸膛内运动等的演变规律,并通过搭建的发射过载工程计算模型,研究了该型图像末制导炮弹在各装药号下所受的发射过载特性。结果表明,两种验证工况下的膛底最大压力和弹丸炮口速度的相对误差均在2%以内,仿真与实测的膛底压力和膛内压力波随时间的变化规律吻合度也均较高;基于验证的模型获得的不同装药条件下图像末制导炮弹内弹道性能与发射过载变化规律与实际发射过程的一般规律一致。

**关键词:**内弹道;压力波;数值模拟;图像末制导炮弹;装药变换;发射过载

**中图分类号:** TJ55;TJ410.2;TJ413.+6

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2025023

### 0 引言

随着战争形态的不断演变发展,对目标的精确打击要求越来越高。为提高炮弹的精确打击能力,基于现有发射平台,将弹药制导化逐渐成为了世界各国常规火炮弹药系统的发展方向,而有效解决弹载器件抗高发射过载则是推动各类新型制导弹药发展首要解决的技术难题。

图像末制导炮弹作为一种新型精确打击弹药,其上搭载有光电、成像等多种敏感元器件且高度集成,极易受到火炮膛内发射环境的影响。而根据经济性、适应性等的基本原则,新型制导炮弹设计时通常要求适配现有制式火炮内膛与发射装药。对于中大口径火炮而言,发射装药主要采用药筒分装式、多个药号分级的

配置布局,每个装药号对应不同的炮口初速,通过变换装药号以调整火力的打击范围。考虑到采用不同装药号发射,除装入膛内的装药量及装药分布改变以外,装药类型和弹丸-装药间自由间隙等也会同步产生变化,而这些因素的改变,直接关系到火药膛内的燃烧规律,影响膛内压力波动、弹丸膛内运动及其过载行为规律,最终也就决定了弹丸发射后能否安全、可靠工作。因此,研究不同发射装药条件下图像末制导炮弹内弹道性能,尤其是准确分析出采用不同装药号发射时弹丸膛内所受的发射过载,对于图像末制导炮弹设计优化、抗过载能力提升以及弹载功能组件失效与抗过载机理研究具有重要的现实意义。

受试验与测试条件的限制,膛内压力波动、弹丸膛内运动等很难真实获得,目前主要采用理论与仿真的方法进行定性与定量的研究,并配以一定的试验加以验证评估<sup>[1-10]</sup>。近几年,典型代表成果主要有:文献[1-3]根据所研究弹丸的发射特性并与其结构相耦合,建立相关内弹道数值仿真模型,较好模拟了不同类型弹丸膛内运动规律、膛内气压和相关载荷的变化规律;文献[4-6]通过算法的创新对不同类型弹丸内弹道性能进行了仿真模拟,一定程度提高了仿真结果的准确度;文献[7-10]主要分析了装药性质、装填方式、

收稿日期:2025-02-16;修回日期:2025-03-28

网络出版日期:2025-04-29

基金项目:安徽省新时代研究生学术创新资助课题(2023xscx147)、院自主科研项目(PFXY230101029)

作者简介:蔡灿伟(1988-),男,讲师,博士研究生,主要从事武器系统与运用工程研究。e-mail:553526977@qq.com.com

通信联系人:宁全利(1978-),男,教授,博士生导师,主要从事武器系统与运用工程研究。e-mail:17756005262@163.com

引用本文:蔡灿伟,宁全利,邓海飞,等.图像末制导炮弹内弹道性能与发射过载分析[J].含能材料,2025,33(6):645-657.

CAI Can-wei, NING Quan-li, DENG Hai-fei, et al. Analysis of Interior Ballistic Performance and Launch Overload of Image Terminal Guided Projectiles[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(6):645-657.

装药量、弹丸质量等参数变化对不同类型火炮弹药系统内弹道性能的影响,为相关武器装备平台内弹道性能的优化提升提供了有益借鉴与参考。但总体来看,现有研究大多基于研究对象,根据经典内弹道理论、运用集总参数法,或是根据反应两相流体力学为基础的现代内弹道理论,将发射装药膛内初始分布视为弹后空间的均匀分布,分析弹丸内弹道性能并估算其所受发射过载,也多是单纯分析装药量、弹丸质量等单个因素变化的影响,并未深入分析采用不同装药号发射时装药类型、装药量及其膛内分布与弹丸-装药间自由间隙交叉变化的影响规律,无法对图像末制导炮弹及其他新型炮弹的设计优化、性能与效能提升形成系统性指导。

为此,以某型图像末制导炮弹及其发射平台、发射装药为例,通过精细构建内弹道两相流模型并进行数值仿真,研究不同发射装药条件下内弹道性能及所受发射过载的演变规律,可为图像末制导炮弹的优化设计、抗过载能力提升以及弹载器件失效与抗过载机理研究提供必要的支撑,也可为其他新型炮弹的设计优化、研制应用提供借鉴与参考。

## 1 不同装药号发射的内涵本质

为实现较大范围的火力机动,某型图像末制导炮弹所适配的火炮发射平台,其内膛采用弹丸药筒分装式结构,发射时通过全变(0#全#和1#)与减变(2#至6#)不同装药号的调整变换,可使射弹出炮口时的初速达到7个不同数值量级。由图1所示的发射装药结构来看,全变与减变发射装药的主要区别在于发射药的分布、附加发射药包的数量。对于各号发射装药而言,全变装药出厂时即为0#装药,其发射药主要由散布在除铜剂后端装药空间内的主发射药和1个附加药包组成,而将0#装药附加药包取出即为1#装药;减变装药出厂时即为2#装药,其发射药主要由1个基本药包、3个立式附加药包和1个环形药包组成,而将2#装药环形与立式附加药包依次取出相应数量,即可变为3#至6#装药。为实现不同初速度量级并且能保证发射药在膛内燃尽,一般全变与减变装药的具体形状和性质也有所不同。

此外,由于火炮身管内膛的特殊性,设计出与其内膛结构完全吻合的发射装药很困难。因此,当弹丸、药筒装填到位后,发射装药与弹底之间通常存在一定的自由间隙,如图2所示。结合图1所示的各号装药结

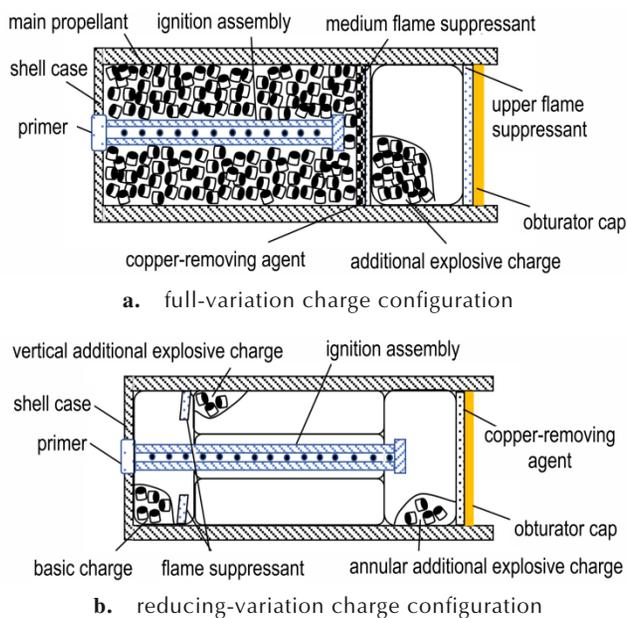


图1 全变与减变发射装药结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of full-variation charge and reducing-variation charge configurations

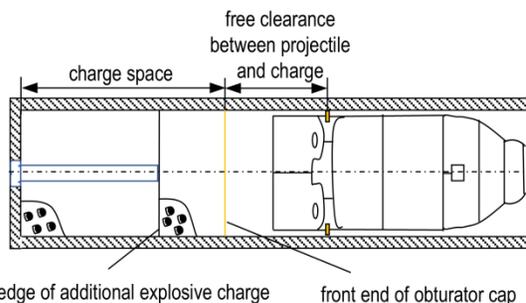


图2 弹药合膛示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ammunition chambering

构来看,随着装药号调整变换时药包的增减,除使发射装药在膛内分布发生变化以外,同时也会使其与弹底之间的自由间隙发生改变。

综上所述,通过装药调整变换以不同装药号发射弹丸,实际上是一个涉及装药类型、装药量及其膛内分布与弹丸-装药间自由间隙交叉变化的复杂过程。加之发射时射弹种类的不同,弹丸质量也发生了改变,这些因素的综合结果可能会造成膛内压力异常波动、反常增加,进而影响弹载器件性能,甚至在极端情况下可能会导致弹载器件失效<sup>[11-16]</sup>。

## 2 内弹道两相流数值模型构建

为准确分析不同装药号发射图像末制导炮弹时膛内压力波动、弹丸膛内运动等的变化规律,精细构建内

弹道两相流模型如下：

### 2.1 基本假设

根据图像末制导炮弹发射过程及其发射装药结构特点，提出以下几点假设：

(1) 发射装药着火采用表面温度准则，并且通过阻力系数、气动压力与形状特征量来考虑弹丸与膛间的机械作用、药粒运动破碎等，与此同时也不考虑高温火药气体的粘性耗散及其对膛壁的热损失，虽一定程度简化了弹丸内弹道过程的复杂性，但可通过符合计算法修正相关系数来减小其中的影响；

(2) 由于现代火炮多采用形状规则的发射装药，并且制药工艺大体可保证装药内部结构均匀、各部理化性质一致以及燃烧时各点燃速相同，故而认为发射装药膛内燃烧服从几何燃烧规律<sup>[11-15]</sup>；

(3) 发射装药膛内燃烧过程中，由于反应物浓度变化使火药燃速与火药气体压力近似呈现指数型的变化关系，故而采用指数燃速定律来描述发射装药膛内燃速的变化趋势；

(4) 对于高温高压火药气体而言，其分子间的相互作用力相比于火药气体压力很小，可忽略不计；但火药气体密度高，其分子本身占据的体积大，不可忽略，故而采用诺贝尔-阿贝尔状态方程来描述膛内火药气体状态的变化规律<sup>[13]</sup>；

(5) 发射装药点燃以后，虽然火药颗粒在膛内的运动具有一定的离散性，但从整体宏观上来讲其运动具有一定的连续性，故而在分析时认为火药颗粒群是连续地分布在火药气体中，即将其视为一种连续介质特性的拟流体处理；

(6) 发射装药点燃以后，火药颗粒群伴随火药气体在膛内主要沿炮膛轴线方向流动，而在径向上流动相对很小，故而可将膛内发射流场视为火药颗粒与火药气体的固气一维两相流动；

(7) 由于图像末制导炮弹气缸张开式尾翼正常工作时在弹丸出炮口后张开，并且气缸充放气使弹丸质量改变很小，故不考虑尾翼及其气缸膛内充放气过程对弹后容积、弹丸质量的影响。

### 2.2 数学模型

在上述假设基础上，根据现代内弹道理论和发射装药结构特点，将膛内流动划分为点传火管区和身管内膛区，建立两相流动控制方程<sup>[11-13]</sup>。

#### 2.2.1 点传火管区的两相流动控制方程

对于点传火管区域的流动，取图3所示的控制体为研究对象。

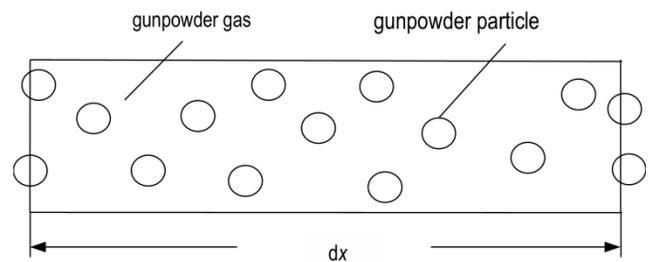


图3 长度为  $dx$  的控制体

Fig.3 Control volume with length  $dx$

因点传火管为一等截面体，而根据穿过控制体表面的通量及其源项，可建立火药气体和固相火药颗粒在该控制体内的质量、动量和能量方程的守恒向量形式如式(1)：

$$\frac{\partial \mathbf{U}_1}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial x} = \mathbf{H}_1$$

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} \phi_{dh} \rho_{dhg} \\ \sigma_{dh} \rho_{dhp} \\ \phi_{dh} \rho_{dhg} u_{dhg} \\ \sigma_{dh} \rho_{dhp} u_{dhp} \\ \phi_{dh} \rho_{dhg} E_{dhg} \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} \phi_{dh} \rho_{dhg} u_{dhg} \\ \sigma_{dh} \rho_{dhp} u_{dhp} \\ \phi_{dh} (\rho_{dhg} u_{dhg}^2 + p_{dh}) \\ \sigma_{dh} (\rho_{dhp} u_{dhp}^2 + p_{dh} + R_{dhf}) \\ \phi_{dh} u_{dhg} (\rho_{dhg} E_{dhg} + p_{dh}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \dot{m}_{dhc} - \dot{m}_{dhg} \\ -\dot{m}_{dhc} - \dot{m}_{dhp} \\ -f_{dhs} + \dot{m}_{dhc} u_{dhp} - \dot{m}_{dhg} u_{dhg} + p_{dh} \frac{\partial \phi_{dh}}{\partial x} \\ f_{dhs} - \dot{m}_{dhc} u_{dhp} - \dot{m}_{dhp} u_{dhp} + p_{dh} \frac{\partial (1 - \phi_{dh})}{\partial x} \\ -Q_{dhp} - f_{dhs} u_{dhp} - p_{dh} \frac{\partial \phi_{dh}}{\partial t} + \dot{m}_{dhc} H_{dhp} - \dot{m}_{dhg} H_{dhs} \end{bmatrix}$$

式中， $\phi_{dh}$  为点传火管区气相空隙率，且有  $\sigma_{dh} = 1 - \phi_{dh}$ ，无量纲； $\rho_{dhg}$ 、 $\rho_{dhp}$  分别为点传火管区火药气体和固相火药颗粒的物质密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； $u_{dhg}$ 、 $u_{dhp}$  分别为点传火管区火药气体和固相火药颗粒的运动速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $p_{dh}$  为点传火管区火药气体压力，Pa； $R_{dhf}$  为点传火管区固相火药颗粒间应力，Pa； $E_{dhg} = e_{dhg} + u_{dhg}^2/2$ ，其中  $e_{dhg}$  为点传火管区火药气体比内能， $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； $\dot{m}_{dhc}$  为点传火管区火药燃烧生成火药气体质量速率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $\dot{m}_{dhg}$  为点传火管区经传火孔流入身管内膛区的气相质量流率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $\dot{m}_{dhp}$  为点传火管区经传火孔流入身管内膛区的固相质量流率， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $f_{dhs}$  为点传火管区气固两相的相间阻力，Pa； $Q_{dhp}$  为点传火管区气固两相的相间热交换量，J； $H_{dhp}$  为点传火管区火药燃烧释放焓，J； $H_{dhs}$  为点传火管区经传火孔流入身管内膛区的火药气体带出焓，J。

#### 2.2.2 身管内膛区的两相流动控制方程

身管内膛区发射药被点燃以后开始迅速燃烧并生

产大量火药气体,在身管内腔形成气固两相流动。同理,根据质量、动量和能量守恒可列相应的控制方程,但不同于点传火管区,发射药可能由多种类型的装药混合组成,身管内腔横截面积也是变化的,并且控制方程中表征两区间质量、动量和能量交换的相关项符号相反。

基于以上几点考虑,为了不失一般性,最终所建立的身管内腔区发射药控制方程的守恒型向量形式如式(2):

$$\frac{\partial \mathbf{U}_2}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial x} = \mathbf{H}_2$$

$$\mathbf{U}_2 = \begin{bmatrix} A\phi\rho_g \\ A\sigma_i\rho_{p_i} \\ A\phi\rho_g u_g \\ A\sigma_i\rho_{p_i} u_{p_i} \\ A\phi\rho_g E_g \end{bmatrix}, \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} A\phi\rho_g u_g \\ A\sigma_i\rho_{p_i} u_{p_i} \\ A\phi(\rho_g u_g^2 + p) \\ A\sigma_i(\rho_{p_i} u_{p_i}^2 + p + R_{F_i}) \\ A\phi u_g(\rho_g E_g + p) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} A \sum_{i=1}^n \dot{m}_{ic} + A_{dh} \dot{m}_{dhg} \\ -A \sum_{i=1}^n \dot{m}_{ic} + A_{dh} \dot{m}_{dhp} \\ -A \sum_{i=1}^n f_{s_i} + A \sum_{i=1}^n \dot{m}_{ic} u_{p_i} + A_{dh} \dot{m}_{dhg} u_{dhg} + p \frac{\partial A\phi}{\partial x} \\ Af_{s_i} - A \sum_{i=1}^n \dot{m}_{ic} u_{p_i} + A_{dh} \dot{m}_{dhp} u_{dhp} + p \frac{\partial A\sigma_i}{\partial x} + \sigma_i R_{F_i} \frac{\partial A}{\partial x} \\ -A \sum_{i=1}^n Q_{p_i} - A \sum_{i=1}^n f_{s_i} u_{p_i} - A p \frac{\partial \phi}{\partial t} + A \sum_{i=1}^n \dot{m}_{ic} H_{p_i} + A_{dh} \dot{m}_{dhg} H_{dhg} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $A$  为身管内腔横截面积,  $m^2$ ;  $\phi$  为身管内腔区气相空隙率,无量纲;  $\sigma_i$  为第  $i$  种发射药的体积百分比,无量纲,  $i = 1, 2, \dots, n$  且有  $\phi = 1 - \sum_{i=1}^n \sigma_i$ , 其中  $n$  为腔内发射药种类数,个;  $\rho_g$ 、 $u_g$  分别为身管内腔区火药气体

密度,  $kg \cdot m^{-3}$  和运动速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\rho_{p_i}$ 、 $u_{p_i}$  分别为身管内腔区第  $i$  种发射药颗粒的物质密度,  $kg \cdot m^{-3}$  和运动速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $p$  为身管内腔区火药气体压力, Pa;  $R_{F_i}$  为身管内腔区第  $i$  种发射药的颗粒间应力, Pa;  $E_g = e_g + u_g^2/2$ , 其中  $e_g$  为身管内腔区火药气体比内能,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $\dot{m}_{ic}$  为身管内腔区第  $i$  种发射药燃烧时生成的火药气体质量速率,  $kg \cdot s^{-1}$ ;  $f_{s_i}$  为身管内腔区第  $i$  种发射药的相间阻力, Pa;  $Q_{p_i}$  为身管内腔区第  $i$  种发射药的相间热交换量, J;  $H_{p_i}$  为身管内腔区第  $i$  种发射药的燃烧释放焓, J。

### 2.2.3 辅助方程

上文所述控制方程均是基于微元控制体内火药气体和固相火药颗粒,运用质量、动量和能量守恒而得到的等式组合,在给定火炮内膛构造及弹丸诸元、发射装药性能参数等条件下,方程中还涉及  $\dot{m}_c$ 、 $f_s$ 、 $R_F$ 、 $Q_p$  等多个变量。为使方程封闭,还需根据固相火药颗粒和火药气体的物理化学性质以及它们间的质量、动量和能量输运条件,建立相应的火药气体质量生成速率、气固相间阻力与热交换量、固相火药颗粒间应力、火药形状函数与燃烧速率、火药颗粒表面温度与火药气体状态等辅助方程,详见文献[11-13]。相较而言,点传火管区与身管内腔区上述相关辅助方程形式基本相同,但前者还需补充底火射流的处理方程和经传火孔流出的质量流量方程。

#### (1) 底火射流的处理

对于底火射流的处理,通常将底火射流视为点传火管区左端第一个控制体内的“源”,并采用底-4底火质量流量的测试结果进行估算,该底火在高温和常温条件下的质量流量  $\dot{m}_{dhh}$  为:

$$\dot{m}_{dhh} = \begin{cases} 5.19t^2 + 1.74t & (t \leq 0.663 \text{ ms}) \\ -0.0845t^3 - 4.725t^2 + 11.74t - 2.53 & (0.663 < t \leq 1.547 \text{ ms}) \\ -2.958t + 8.576 & (1.547 < t \leq 2.431 \text{ ms}) \\ 2.0115 \times 10^3 e^{-2.95t} & (t > 2.431 \text{ ms}) \end{cases} \quad (3)$$

将(3)式计算出的  $\dot{m}_{dhh}$  乘上一个质量比例系数(点传火管所用底火与底-4底火的装药量之比),即为点传火管底火射流的质量流量。

#### (2) 经传火孔流出的质量流量

$$\dot{m}_{dhg} = \begin{cases} \frac{c_0 n_0 s_{kp} \phi_{dh} \rho_{dhg}}{A_{dh}} \left\{ \frac{2k}{k-1} RT_{dh} \left[ \left( \frac{p}{\rho_{dh}} \right)^{2/k} - \left( \frac{p}{\rho_{dh}} \right)^{k+1/k} \right] \right\}^{1/2} & \frac{p}{\rho_{dh}} > \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{c_0 n_0 s_{kp} \phi_{dh} \rho_{dhg}}{A_{dh}} \frac{2k}{k-1} \left[ \frac{2k}{k-1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k+1}} RT_{dh} \right]^{1/2} & \frac{p}{\rho_{dh}} \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (4)$$

根据小孔流动理论,将传火孔按控制体内的“源”项处理,可建立点传火管区经传火孔流入身管内腔区的火药气体质量流量  $\dot{m}_{dhg}$  方程为:

式中,  $c_0$  为传火孔质量流量系数,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $n_0$  为控制体内传火孔个数, 个;  $s_{kp}$  为传火孔横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $R$  为火药气体常数,  $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $T_{dh}$  为点传火管区经传火孔流入身管内膛区的火药气体温度,  $\text{K}$ ;  $k$  为火药气体比热比, 无量纲。

相对应的点传火管区经传火孔流入身管内膛区的固相火药颗粒质量流量  $\dot{m}_{dhp}$  方程则为

$$\dot{m}_{dhp} = \frac{\sigma_{dh} \rho_{dhp} u_{dhp}}{\phi_{dh} \rho_{dhg} u_{dhg}} \dot{m}_{dhg} \quad (5)$$

### 2.3 定解条件

为使建立的控制方程适定, 除补充相关辅助方程以外, 还需明确初始与边界条件。

#### 2.3.1 初始条件

以火炮击发时刻为初始时刻, 初始条件即为火炮击发时相关变量的初始值, 其中涉及的变量主要包括空隙率、火药气体密度、火药气体运动速度、单个火药颗粒质量和燃烧表面积、固相火药颗粒运动速度、火药气体压力、火药颗粒相对燃烧质量、火药颗粒相对燃烧厚度、火药气体比内能、火药气体温度和火药颗粒表面温度。对于点传火管区和身管内膛区初始条件而言, 各变量具体取值稍有不同。

##### (1) 点传火管区的初始条件

由于一般将点传火管内点火药初始分布视为均匀分布, 则火炮击发瞬间该区各微元控制体内相关变量的初始值如式(6)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \phi_{dh}(x, 0) &= 1 - \frac{\omega_{dh}}{\rho_{dhp} V_{dh0}} \\ \rho_{dhg}(x, 0) &= \frac{p_0}{\alpha p_0 + RT_0} \\ u_{dhg}(x, 0) &= 0 \\ M_{dhp}(x, 0) &= m_{dhp0} \\ S_{dhp}(x, 0) &= s_{dhp0} \\ u_{dhp}(x, 0) &= 0 \\ \rho_{dh}(x, 0) &= \rho_0 \\ \psi_{dh}(x, 0) &= 0 \\ z_{dh}(x, 0) &= 0 \\ e_{dhg}(x, 0) &= \frac{p_0}{\rho_{dhg}(x, 0)(k-1)} [1 - \alpha \rho_{dhg}(x, 0)] \\ T_{dhg}(x, 0) &= T_0 \\ T_{dhp}(x, 0) &= T_0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中,  $\omega_{dh}$  为点火药量,  $\text{kg}$ ;  $V_{dh0}$  为点传火管容积,  $\text{m}^3$ ;  $\rho_0$

为当地气压,  $\text{Pa}$ ;  $T_0$  为当地环境温度,  $\text{K}$ ;  $\alpha$  为气体余容,  $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $M_{dhp}$  和  $S_{dhp}$  分别为某时刻单个点火药颗粒质量,  $\text{kg}$  和燃烧表面积,  $\text{m}^2$ ;  $m_{dhp0}$  和  $s_{dhp0}$  分别为初始时刻单个点火药颗粒质量,  $\text{kg}$  与燃烧表面积,  $\text{m}^2$ , 而具体由火药颗粒的理化性质和尺寸参数决定。

##### (2) 身管内膛区的初始条件

相较而言, 由于火药类型与身管内膛结构的特殊性, 该区的单个发射药颗粒初始质量与初始燃烧表面积、空隙率与点传火管区有所不同, 但其余相对应各变量的初始取值则基本相同。

##### ① 单个药粒初始质量与燃烧表面积取值

对于身管内膛区单个发射药颗粒初始质量与初始燃烧表面积的取值是由射击时所装入的具体火药性质及其结构尺寸确定的, 比如装入炮膛的发射药为多孔圆柱形火药, 则单个药粒初始质量  $m_0$  和表面积  $s_0$  可按式(7)计算得到。

$$\left\{ \begin{aligned} m_0 &= \rho_p \frac{\pi}{4} [D_0^2 - N d_0^2] L_0 \\ s_0 &= \pi L_0 [D_0 + N d_0] + \frac{\pi}{2} [D_0^2 - N d_0^2] \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中,  $\rho_p$  为火药颗粒的物质密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $D_0$  为火药颗粒的外径,  $\text{m}$ ;  $N$  为火药的孔数, 个;  $d_0$  为火药颗粒的内径,  $\text{m}$ ;  $L_0$  为火药颗粒的长度,  $\text{m}$ 。

##### ② 初始空隙率取值

初始空隙率的取值由具体装填条件决定, 与发射药初始分布有关。因装药号调整变换最后均用紧塞盖压实装药, 同时弹底至弹带间的体积相对于弹后空间很小, 为了简化问题, 将药筒装填到位后发射药分布等效成如图4所示模型, 并按下列方法对该区初始空隙率进行取值:

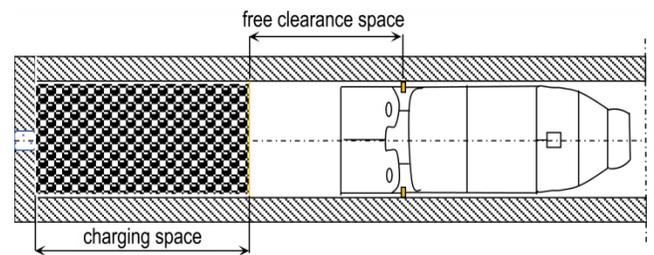


图4 药筒装填到位后发射药分布等效模型  
Fig.4 Equivalent model of propellant distribution with cartridge in battery

一是对于有发射装药的空间, 认为该空间内发射药初始分布为均匀分布, 则该空间各微元控制体初始空隙率按  $\phi(x, 0) = 1 - \sum_{i=1}^n \omega_{i0} / (\rho_{pi} V_{zy0})$  计算, 其中:

$\omega_{i0}$ 为该装药空间内所含第*i*种发射药的质量, kg;  $\rho_{pi}$ 为该装药空间内所含第*i*种发射药的颗粒密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $V_{zy0}$ 为该装药空间的容积,  $\text{m}^3$ ;

二是对于自由间隙空间, 因其内部无火药颗粒存在, 则该空间各微元控制体空隙率均为1。

从以上分析来看, 若弹炮合膛时弹底与装药存在自由间隙或是某装药号所包含的不同类型火药膛内初始分布不均匀, 则会导致初始空隙率取值不连续、存在间断的现象。

### 2.3.2 边界条件

(1) 点传火管区的边界条件

点传火管左右两端均为固壁, 具有如下特征:

$$\begin{cases} u_{\text{chg}}(0, t) = u_{\text{chg}}(0, 0) = 0 \\ u_{\text{chp}}(0, t) = u_{\text{chp}}(0, 0) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

基于以上特点, 对于边界上其他变量的计算取值, 采用第二网格系(图5)的镜像反射法来进行处理, 即在边界外设置一虚拟点, 利用反射原理, 按照标量相同、矢量反向等大确定该点各变量的值, 表达式如式(9)所示。

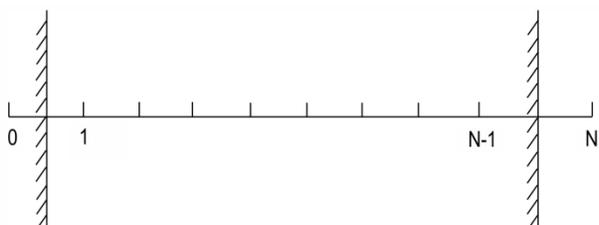


图5 第二网格系的固壁边界处理示意图

Fig.5 Schematic diagram of solid wall boundary treatment in second grid system

$$\begin{cases} \text{左边界: } \begin{cases} u_0 = -u_1, u = (u_{\text{chg}}, u_{\text{chp}}) \\ q_0 = q_1, q = (\phi_{\text{dh}}, \rho_{\text{dhg}}, \dots, T_{\text{dhg}}, T_{\text{dhps}}) \end{cases} \\ \text{右边界: } \begin{cases} u_n = -u_{n-1}, u = (u_{\text{chg}}, u_{\text{chp}}) \\ q_n = q_{n-1}, q = (\phi_{\text{dh}}, \rho_{\text{dhg}}, \dots, T_{\text{dhg}}, T_{\text{dhps}}) \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

(2) 身管内膛区的边界条件

身管内膛区左边界为膛底。若忽略身管后坐的影响, 膛底即为静止不动的固壁边界, 对于其上各变量的计算取值参考点传火管的左边界。

身管内膛区右边界为弹底。弹丸运动前, 弹底静止不动, 同膛底边界相同处理; 弹丸运动后, 弹底处火药气体速度等于弹丸运动速度, 即有:

$$u_g(x_d, t) = v = \int_0^t \frac{A(\rho_d - \rho_i)}{\varphi_1 m} dt \quad (10)$$

式中,  $x_d$ 为弹底处坐标, 无量纲;  $v$ 为弹丸运动速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\rho_d$ 为弹底压力, Pa;  $\rho_i$ 为弹前空气阻力, Pa;  $m$ 为弹丸质量, kg;  $\varphi_1$ 为阻力系数, 无量纲;  $t$ 为运动时间, s。

对于运动边界上其他各变量的计算取值, 具体通过以质量、动量和能量三大守恒为基础的运动控制体方法进行处理, 详见文献[11-13]。

## 3 模型合理性验证与结果分析

为验证上节所建模型的合理性, 依据某口径火炮发射制式榴弹与图像末制导炮弹相关试验条件, 设置仿真场景并进行数值仿真分析。

### 3.1 实验验证环境搭建

(1) 发射试验架构采用发射平台。某口径火炮及其相适配的制式榴弹和图像末制导炮弹、2#和3#装药。

(2) 仪器设备包括铜柱测压器、电子测压器、测速雷达及其他相配套仪器设备。

(3) 两种工况条件分别为工况一: 采用3#装药高温发射制式榴弹, 工况二: 采用1#装药常温发射图像末制导炮弹。

(4) 按有关要求搭建发射试验场地, 完成两组工况下的膛压和弹丸炮口初速的测量。两种工况下的膛压和弹丸炮口初速量试的主要过程如下:

工况一: 首先, 将药筒中的装药全部取出, 将电子测压器放置在药筒底部边缘; 其次, 将定量装药(3#药量)装入药筒, 并同步在火炮右后方适当位置架设测试雷达, 使其瞄准镜头对准射击方向; 最后, 将弹丸、药筒装入炮膛后击发, 并通过数据接口与处理软件, 实时处理电子测压器和测速雷达数据, 获取膛压曲线和弹丸炮口初速数值。

工况二: 该条件下的弹丸炮口初速测量方法与工况一完全一致, 但膛压的测量所有不同, 其主要方法是: 先将铜柱测压器放入药筒底部边缘, 而后将定量装药(2#药量)装入药筒; 待弹丸和装药依次装入炮膛后击发火炮, 回收铜柱测压器; 最后通过射击前后测压铜柱的变形量, 查询相对应的变形量压力表, 获得膛底最大压力值。

### 3.2 仿真环境设置

依据发射试验所涉及的火炮内膛结构尺寸、射弹诸元和发射装药理化性质等, 设置仿真计算参数, 并通过二阶 MacCormack 有限差分法编制仿真计算程序对模型进行自动解算。部分计算参数如表1所示。

表 1 部分计算参数<sup>[13]</sup>

Table 1 Some computational parameters<sup>[13]</sup>

$V_0 / \text{m}^3$	$k$	$\alpha / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\rho_0 / \text{Pa}$	$\varphi_1$	$T_z / \text{K}$
0.023	1.25	0.001	101325	1.12	298

Note:  $V_0$  is the charge room volume;  $k$  is the specific heat ratio;  $\alpha$  is the gas residual volume;  $\rho_0$  is the local atmospheric pressure;  $\varphi_1$  is the drag coefficient;  $T_z$  is the propellant ignition temperature.

### 3.3 模型验证结果分析

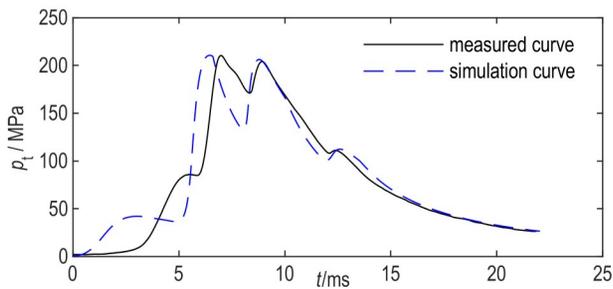
相同工况下,仿真与实测得到的膛底最大压力  $p_m$ 、弹丸炮口初速  $v_0$  以及膛底压力与膛内压力波随时间的变化规律对比情况如表 2 和图 6 所示。

表 2 仿真与实测相关数据

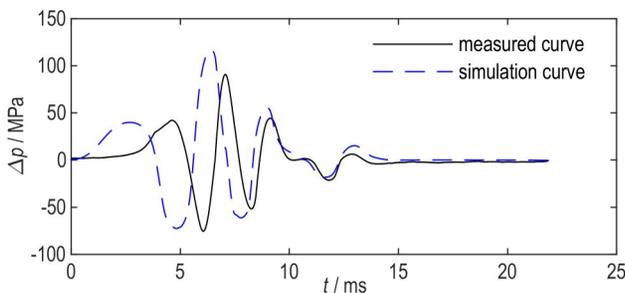
Table 2 Relevant data of simulation and measurement

	$p_m / \text{MPa}$			$v_0 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		
	exper.	test	erro	exper.	test	erro
working condition one	210.4	211.6	0.6%	623.0	618.4	0.7%
working condition two	260.0	255.3	1.8%	760.0	769.8	1.3%

Note:  $p_m$  is the maximum pressure at bore base;  $v_0$  is the muzzle initial velocity of projectile.



a. pressure at bore base



b. pressure wave in bore

图 6 工况一下膛底压力与膛内压力波仿真与实测对比

Fig. 6 Comparisons of pressure at bore base and pressure wave in bore between simulation and measurement for case 1

从表 2 和图 6 所示的仿真与实测对比情况来看,两种工况条件下膛底最大压力和弹丸炮口速度的相对误差均在 2% 以内,并且仿真与实测得到的膛底压力

波(图 6a)和膛内压力波(图 6b)随时间的变化规律曲线一致性也比较好的,说明所建模型合理、求解方法正确,能一定程度反映出火炮发射流场及射弹膛内运动特性。而仿真与实测存在偏差的原因主要在于下述三方面:

一是测量误差,发射试验中测量膛压和弹丸炮口速度的相关器具具有一定的测量误差;

二是模型误差,在建立模型时引入了一些假设,这些假设简化了火药膛内燃烧、弹丸膛内运动及能量转换等过程,虽对相关参数进行了符合修正,但很难刻画出与实际完全一致的模型;

三是计算误差,求解模型所代入的炮膛、弹丸与发射装药有关结构、理化性质等参数存在偏差;此外,采用 MacCormack 有限差分法对模型解算,其本质是用有限差分近似微分,故而存在截断误差,且计算机求解时还存在舍入误差。

## 4 发射装药变化的影响与分析

准确获取不同发射装药条件下射弹尤其是采用所适配发射平台不同制式装药号发射时内弹道性能的变化规律,是新型弹丸抗过载设计与优化的前提与基础。前文已分析装药号调整变化并不仅仅是装药量的增加,还会涉及到装药类型、装药膛内分布以及弹丸与装药间自由间隙的改变。本节基于所验证的模型,主要分析某型图像末制导炮弹采用不同装药号发射时膛内压力波动、弹丸膛内运动及所受过载的变化规律。

### 4.1 对内弹道性能的影响与分析

#### 4.1.1 全变装药发射时内弹道性能的变化规律

图 7 和表 3 分别为仿真得到的常温条件下采用全变 0# 和 1# 装药发射图像末制导炮弹时膛底压力  $p_b$  与弹底压力  $p_d$ 、膛内压力波  $\Delta p$ 、弹丸膛内速度  $v$ 、膛底处空隙率  $\Phi_1$  和弹底处空隙率  $\Phi_d$  随时间的变化规律曲线以及相对应主要内弹道指标一览表。

从仿真结果来看,其他条件不变,当图像末制导炮弹由 0# 调整为 1# 装药发射时,膛内压力(图 7a)、弹丸膛内运动(图 7b)和膛内压力波(图 7c)随时间的变化趋势均有所减弱,相应膛底最大压力、弹底最大压力、弹丸炮口初速以及表征其强度的膛内压力波最大负向波峰和正向波峰值也均相应减小(表 3),产生这种变化的主要原因是因为在 0# 装药的基础上,1# 装药拿掉了附加药包,导致装药量和弹炮合膛时的弹丸-装药间自由间隙发生了变化,从而使火药膛内燃烧与气体生

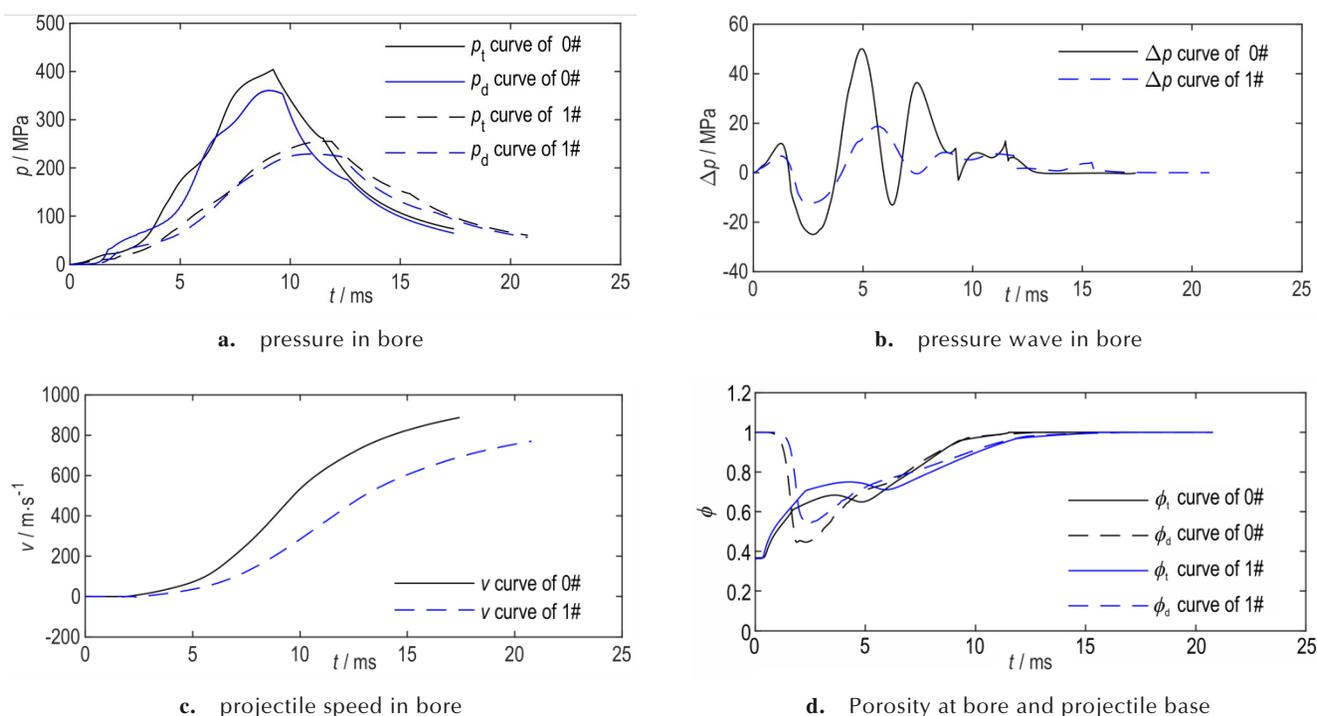


图7 全变0#和1#装药发射时相关内弹道指标变化

Fig.7 Variations of related interior ballistic indicators when full-variation 0# and 1# charge firing

表3 全变0#和1#发射时相关内弹道指标仿真结果

Table 3 Simulated results of related interior ballistic indicators when full-variation 0# and 1# charge firing

class	$p_{tm}$ / MPa	$p_{dm}$ / MPa	$v_0$ / $m \cdot s^{-1}$	$\Delta p_{im}$ / MPa	$\Delta p_{zm}$ / MPa
0#	404.1	360.5	887.2	-24.9	50.0
1#	255.3	228.8	769.8	-12.3	18.6

Note:  $p_{tm}$  is the maximum pressure at bore base;  $p_{dm}$  is the maximum pressure at projectile base;  $v_0$  is the muzzle initial velocity of projectile;  $\Delta p_{im}$  is the maximum negative peak value of pressure wave in bore;  $\Delta p_{zm}$  is the maximum positive peak value of pressure wave in bore.

成、发射药床及弹丸膛内运动等规律也发生了变化<sup>[16-19]</sup>,具体分析如下:

(1) 相比于0#装药,1#装药发射时的装药量少,意味着膛内单位时间内火药燃烧的总面积小,火药燃烧生成的火药气体量和能量也就小,膛内火药气体压力上升慢,继而火药气体压力推动弹丸膛内加速的趋势也就慢,因此膛底最大压力、弹底最大压力和弹丸炮口初速减小;

(2) 相比于0#装药,弹炮合膛时1#装药的弹丸与装药间自由间隙大,火药颗粒在点火瞬间初始压力梯度的推动下会以更大的速度向外运动而挤压、堆积,导致膛内发射药床局部装填密度增加而使相应的空隙率/透气性降低(图7d),以致于发射药燃烧生成的火药气体向外扩散时将受到更大的阻滞,进而使膛内压

力梯度变大,有利于促使膛内压力波的形成,也更易造成装药运动和挤压破碎而使药粒燃面短时间内急剧增加,使膛内压力反常增加;但装药量少的同时,1#装药初始时刻在膛内分布的空间也小,总体上整个药床初始时刻的空隙率/透气性与0#相当;此外,装药量少,火药气体生成速率小,单位时间内生成的火药气体量小,膛压上升慢,膛内整个压力梯度也就小,因而产生的压力波有更多时间在膛内衰减,故最终1#装药膛内压力波强度相对减弱,表征其强度的膛内压力波最大负向和正向波峰有所减小。由于发射药颗粒伴随火药气体在膛内运动及聚散,使膛内产生压力波动现象,但总体上发射药还是相对集中于膛底附近的装药空间内燃烧,因而膛底处火药气体压力的峰值要高于弹底处火药气体压力的峰值。

#### 4.1.2 减变装药发射时内弹道性能的变化规律

在上述仿真基础上,保持其他条件不变,分别采用减变装药2#至6#发射图像末制导炮弹,相对应结果如图8和表4所示。

从仿真结果来看,其他条件不变,当图像末制导炮弹依次由2#分别调整至3#、4#、5#和6#装药发射时,随着装药号数增大,装药-弹丸间自由间隙增大,虽然易导致膛内发射药床局部的装填密度增加而使相应的膛底空隙率/透气性(图8e)和弹底空隙率/透气性

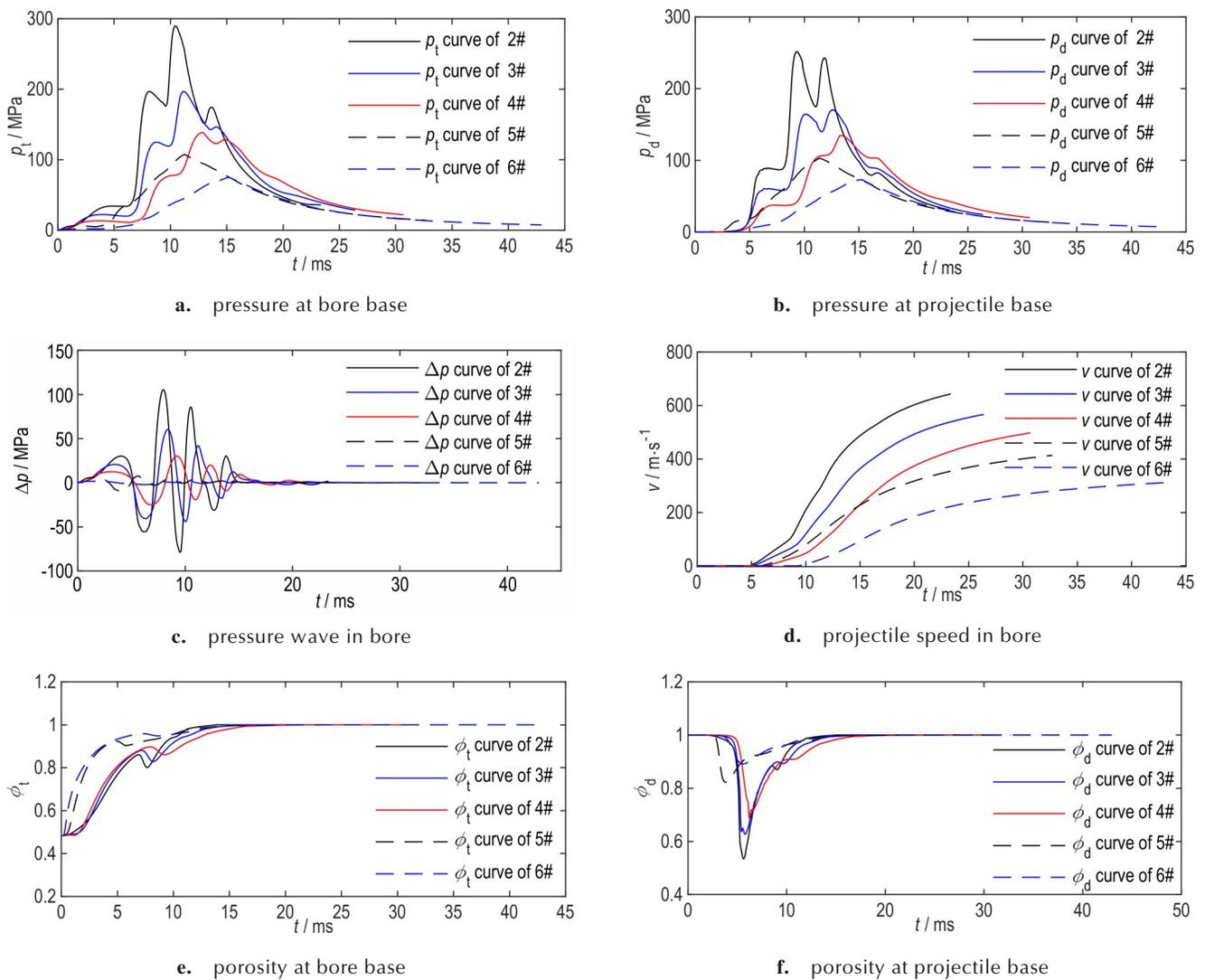


图8 减变2#至6#装药发射时相关内弹道指标变化

Fig.8 Variations of related interior ballistic indicators when reducing-variation 2# to 6# charge firing

表4 减变2#至6#装药发射时相关内弹道指标仿真结果

Table 4 Simulated results of related interior ballistic indicators when reducing-variation 2# to 6# charge firing

class	$p_{im}$ / MPa	$p_{dm}$ / MPa	$v_0$ / m·s <sup>-1</sup>	$\Delta p_{im}$ / MPa	$\Delta p_{zm}$ / MPa
2#	289.7	251.5	643.5	-78.7	105.4
3#	196.7	170.3	566.8	-43.9	60.5
4#	138.5	134.6	497.6	-24.5	30.2
5#	107.6	103.0	413.5	-9.1	7.6
6#	75.0	72.9	311.2	-2.1	2.4

(图8f)均有所降低,也更易造成药粒运动和挤压破碎,但随着装药量减少,各装药初始时刻在膛内分布的空间也小,故而对于整个发射药床而言,各号装药初始时刻空隙率/透气性相当,而且装药量减少,膛内单位时间内发射药燃烧总面积减小,火药燃烧生成的火药气

体量和能量减小,致使火药燃烧前期膛底压力(图8a)与弹底压力变化趋势(图8b)相对均有所减小,继而火药气体压力推动弹丸膛内运动的趋势也就慢(图8c),膛内随之产生的压力波也有更多的时间得到衰减(图8d),因此最终导致膛底最大压力、弹底最大压力、弹丸炮口初速以及膛内压力波负向和正向波峰随装药号数增大而减小(表4)。也正是由于发射装药相对集中于膛底附近的装药空间内燃烧,因而这些装药膛底压力的峰值仍要大于弹底压力的峰值。

#### 4.1.3 不同装药号发射时内弹道性能差异分析

综合0#至6#发射装药的相关仿真结果来看,其他条件不变,改变装药号,对于各号装药发射时膛底和弹底最大压力、弹丸炮口初速以及膛内压力波最大负向和正向波峰而言,相对应的大小关系如表5所示,并且

表5 不同装药号下相关内弹道指标对比

Table 5 Comparisons of relevant interior ballistic indicators for different charge numbers

indicator	charge number						
	0#	1#	2#	3#	4#	5#	6#
$p_{tm}$	1	3	2	4	5	6	7
$p_{dm}$	1	3	2	4	5	6	7
$v_0$	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta p_{im}$	3	5	1	2	4	6	7
$\Delta p_{zm}$	3	5	1	2	4	6	7

Note: for each indicator, the numbers from 1 to 7 represent the ranking from largest to smallest.

2#至4#装药发射时膛内火药气体压力变化曲线具有较为明显的“双峰”现象,而产生这种变化的主要原因是由于全变装药和减变装药采用不同的装药布局而致,具体分析如下:

(1)为覆盖不同初速等级并保证装药在膛内燃尽,该型图像未制导炮弹发射平台对应的0#和1#发射药采用同一性质、相同形状的增面型三基药,但装药量有所增减;6#发射药则是采用另一形状的减面型单基药,而2#至5#发射药则在6#发射药基础上分别附加一定质量又一形状的增面型单基药,即2#至5#发射药是由同一性质、两种不同形状的减面型与增面型单基药混合而成。为便于分析,如图9所示,将2#至6#装药中所含的两型单基药分别记为I型和II型,而将0#和1#所含的一型三基药记为III型。结合图9和图10所示的2#至5#膛内初始分布及两型药膛内体积百分比 $\sigma$ 变化情况来看,燃烧前I型药主要集中位于膛底附近某一较小的装药空间内(图10a),弹底处为0(图10c);而II型药紧接其后放置,初始也主要集中于膛底附近某一装药区域内(图10b),弹底处为0(图10d),并且各号装药中I型药质量相等,而II型药质量与所占比重随装药号数增大依次递减,直到5#装药时I型药所占比重超过II型药;发射药被点燃后各

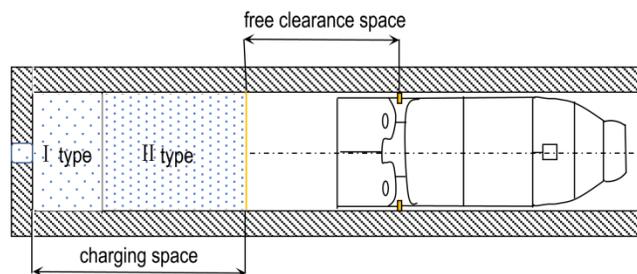
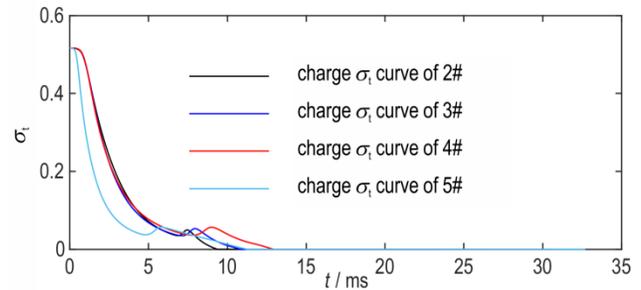


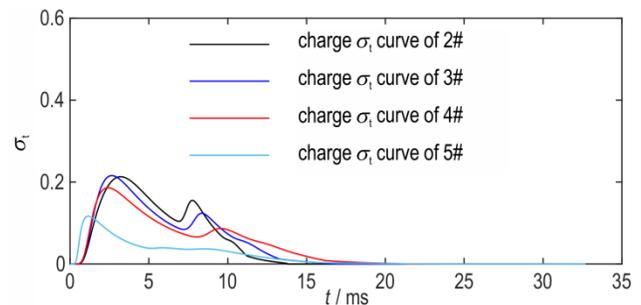
图9 减变2#至5#两型药初始分布示意图

Fig. 9 Schematic diagram of initial distribution of reducing-variation 2# to 5# charges with two types

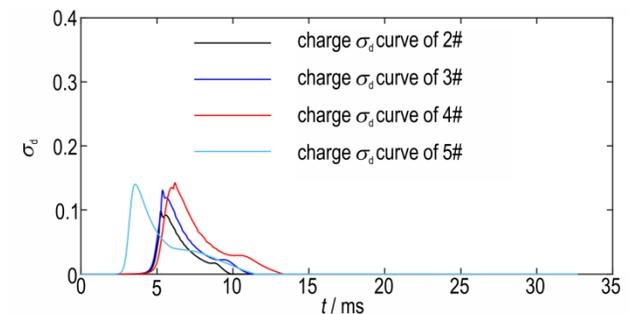
型药同步燃烧,生成大量火药气体使膛内压力快速上升,但由于燃烧的减面性,前期火药气体生成主要由I型药燃烧产生,随着燃烧的进行,其燃烧表面积大幅减小,使膛内火药气体生成量相对减小,而弹丸在火药气体压力作用下加速使弹后空间不断增大,当火药气体



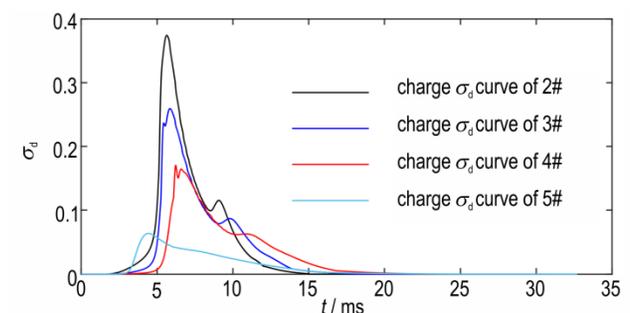
a. volume percentage at bore base of type I



b. volume percentage at bore base of type II



c. volume percentage at projectile base of type I



d. volume percentage at projectile base of type II

图10 减变2#至5#两型药膛底和弹底处体积百分比变化

Fig. 10 Variations of volume percentages at bore base and projectile base of reducing-variation 2# to 5# charge with two types

生成使膛压上升的趋势小于弹丸运动造成弹后空间增大而使膛压下降的趋势时,膛内火药气体压力达到极大值并开始下降,直至 I 型药燃尽,从而形成了第一峰;当 I 型药燃完以后,2#至 4#装药中还剩下大部分 II 型药未燃完而继续燃烧,由于其燃烧的增面性,又使膛内火药气体量相对增大,导致膛压上升的趋势大于弹后空间而使膛压下降的趋势,继而膛内火药气体压力达到极小值并开始升高,直到 II 型药燃烧后期,由于燃烧表面积大幅减小,火药气体生成量随之大幅减小,而此时弹丸由于得到了进一步加速,当火药气体生成使膛压上升的趋势再次大于弹丸运动造成弹后空间增大而使膛压下降的趋势时,膛内火药气体压力又再次达到极大值并开始下降,直至弹丸飞出炮口,从而形成了第二峰;相比较而言,5#装药量小且 II 型药比 I 型药量小, I 型药燃完时 II 型药也燃烧了绝大部分,此后由于弹丸运动造成弹后空间增大而使膛压下降的趋势始终占主导因素,故其膛内压力波曲线只有一个明显的峰值,即当膛内火药气体生成使膛压上升趋势刚好等于弹丸运动造成弹后空间增大而使膛压下降趋势时;而 0#和 1#装药中只含 III 型药,6#装药中只含 I 型药,故它们膛内压力变化曲线也只有一个明显的峰值(图 7a 与图 8a)。

(2)由前面分析可知,相同条件下,弹药合膛时弹丸与装药自由间隙越大,发射药床初始空隙率/透气性越低,越利于膛内压力波的加强并引起膛内压力的反常增加,但膛内压力波强度也与火药气体生成速率有关,并随之减小而减小。而发射装药调整变化时,不仅涉及弹丸-装药间自由间隙的变化,同时还涉及装药量的增减、药形及其膛内初始分布等因素的变化,从而也就改变了膛内火药气体生成速率与整个发射药床初始空隙率/透气性。相比于全变装药,总体上减变装药合膛时弹丸与装药间自由间隙大,同时药粒尺寸小、孔隙少又分布在较小的装药空间内,装药相对密实,因而整个发射药床初始空隙率/透气性相对较低;但装药号数增大、药量不断减小,火药气体生成速率也就相对变低,也正是由于这些因素的综合作用,最终造成如表 4 所示的膛内压力峰值及波动强度的变化;

(3)对于 0#至 6#发射装药而言,随着装药号数增大,总装药量依次减少,也就意味着发射图像末制导弹所用的总能量依次减小,膛内火药气体推动弹丸做功转化为弹丸炮口动能也就依次减小,而发射的图像末制导弹质量不变,因而最终弹丸获得的炮口初速依次减小。

## 4.2 对弹丸发射过载的影响与分析

将图像末制导弹丸看成一个理想等效刚体,由发射原理可知<sup>[20]</sup>,弹丸在膛内运动过程中,忽略身管约束力、装填物压力等的作用,主要受到弹底处火药气体压力和弹前部空气阻力,其所受发射过载  $G(g)$  可按式(11)进行工程计算:

$$G(g) = \frac{(p_d - p_f) \times \pi d^2}{4 \times m \times g} \quad (11)$$

式中,  $p_d$  为弹底压力, Pa;  $d$  为弹丸口径, m;  $m$  为弹丸质量, kg;  $g$  为重力加速度, 一般取值为  $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $p_f$  为弹前空气阻力, Pa, 其表达式如式(12)所示:

$$p_f = p_0 \left( 1 + \frac{Ma^2(k+1)k}{4} + kMa \sqrt{1 + \left( \frac{k+1}{4} \right)^2 Ma^2} \right) \quad (12)$$

式中,  $p_0$  为大气压, Pa;  $k$  为气体比热比, 无量纲;  $Ma$  为马赫数, 无量纲。

基于弹丸口径、弹丸质量与弹底压力仿真数据,得到不同装药号发射时图像末制导弹膛内所受发射过载如图 11 所示。

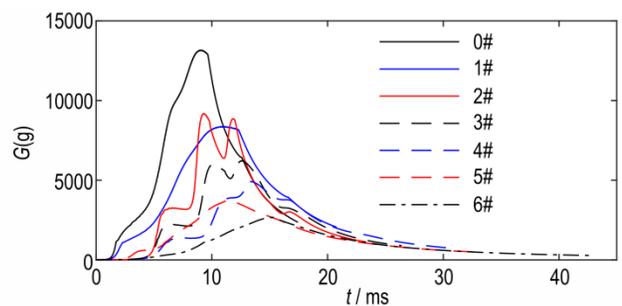


图 11 不同装药号下图像末制导弹所受发射过载

Fig. 11 Launch overload of image terminal guided projectiles with different charge numbers

从图 11 所示的仿真结果来看,随着装药号数增大,图像末制导弹发射时膛内所受发射过载总持续时间不断减小,所受过载峰值也基本呈现减小的趋势,但 2#装药下弹丸所受发射过载要大于 1#装药,同时 2#、3#和 4#装药下弹丸所受发射过载的波动现象较为明显。各号装药弹丸所受发射过载环境具有以下特点:

(1) 0#装药下过载水平最高,峰值为 13147.4 g,故对弹载器件结构强度要求相对严苛;

(2) 2#装药下过载水平次之,峰值为 9172.6 g,同时该工况下过载波动最明显,故对弹载器件结构动态响应要求相对严苛;

(3) 1#装药下过载水平较高, 峰值为 8345.1 g, 但该工况下过载波动不明显; 3#装药下过载波动较为明显, 但过载水平相对较低, 峰值为 6211.6 g, 故对弹载器件结构要求相对较低;

(4) 4#、5#和 6#装药下过载总持续时间相对较长, 但过载值均在 5000 g 以下, 过载水平相对有限, 故对弹载器件结构要求相对也低。

## 5 结论

基于图像末制导炮弹及其适配的火炮发射平台、发射装药特性及其相互作用原理, 建立了图像末制导炮弹内弹道两相流模型, 并将两种不同工况条件仿真与实测得到的膛底压力最大值、弹丸炮口初速以及膛底压力与膛内压力波变化曲线进行对比分析, 验证模型的合理性。从具体对比情况来看, 各工况条件下膛底最大压力和弹丸炮口速度的相对误差均在 2% 以内, 同时仿真与实测得到的膛底压力和膛内压力波曲线一致性也都较好。

基于验证的内弹道两相流模型, 仿真分析了某型图像末制导炮弹不同装药号发射时膛内压力波动、弹丸膛内运动等的演变规律; 并以此为基础, 通过建立的发射过载工程计算模型, 研究了该型图像末制导炮弹各装药号下所受的发射过载特性。综合过载峰值、高位持续时间和波动情况来看, 在现有装药结构下, 0#和 2#装药发射时膛内过载环境相对更为复杂, 故而对弹载器件安全可靠性的要求和影响相对更大一些。

### 参考文献:

- [1] 靳展, 杨富锋, 江镇宇, 等. 电磁轨道炮发射动力学建模与仿真研究[J]. 海军工程大学学报, 2023, 35(3): 43-49.  
JIN Zhan, YANG Fu-feng, JIANG Zhen-yu, et al. Modeling and simulation of electromagnetic rail gun launch dynamics [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2023, 35(3): 43-49.
- [2] 袁永润, 马国鹭, 陈万华, 等. 基于压力损失的轻气炮内弹道建模及仿真分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2022, 43(16): 15-20.  
YUAN Yong-run, MA Guo-lu, CHEN Wan-hua, et al. Interior ballistic modeling and simulation analysis of a light gas gun based on pressure loss [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2022, 43(16): 15-20.
- [3] 郭俊廷, 余永刚. 半可燃药筒埋头弹内弹道性能数值模拟[J]. 弹道学报, 2021, 33(3): 52-56.  
GUO Jun-yan, YU Yong-gang. Numerical simulation of interior ballistic performance of cased telescoped ammunition with semi-combustible cartridge [J]. *Journal of Ballistics*, 2021, 33(3): 52-56.
- [4] 王渤, 罗懿, 薛涛, 等. 基于 DENN 的 NSGA-II 算法的串联多药室火炮内弹道性能优化[J]. 弹道学报, 2023, 35(2): 20-27.  
WANG Bo, LUO Yi, XUE Tao, et al. Optimization of interior ballistic performance of series multi-chamber gun via DENN-based NSGA-II algorithm [J]. *Journal of Ballistics*, 2023, 35(2): 20-27.
- [5] HE X J, CHAO L. Study on optimization of interior ballistic performance of cased telescoped ammunition based on improved firefly algorithm [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2023, 48(2): e202200254.
- [6] 何新佳, 马中亮, 代淑兰. 改进萤火虫算法在混合装药内弹道性能优化中的应用[J]. 炮发射与控制学报, 2022, 43(3): 26-32.  
HE Xin-jia, MA Zhong-liang. Application of an improved firefly algorithm for optimizing the interior ballistic performance of a mixed charge [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2022, 43(3): 26-32.
- [7] 李彦君, 李全俊, 韩智鹏, 等. 基于发射药序列装填的火炮内弹道性能优化[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(8): 154-161.  
LI Yan-jun, LI Quan-jun, HAN Zhi-peng, et al. Optimization of artillery interior ballistic performance based on sequential loading of propellants [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(8): 154-161.
- [8] 刘宁, 高永峰, 於永硕, 等. 液体发射药迫击炮低压发射性能的数量及实验研究[J]. 弹道学报, 2023, 35(3): 89-94.  
LIU Ning, GAO Yong-feng, YU Yong-shuo, et al. Numerical and experimental research on low-pressure launching performances of liquid propellant mortar [J]. *Journal of North University of CHINA*, 2023, 35(3): 89-94.
- [9] HE P, LI L, ZHU J Z, et al. Study on Charge Parameter Effects to Gun Interior Ballistic Performance [C]//IEEE 6th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. Chongqing, China: IEEE, 2023: 1455-1460.
- [10] 蒋俊君, 陆欣. 烧蚀磨损理论下多参数变化对火炮内弹道性能的影响分析[J]. 弹道学报, 2021, 33(4): 45-50.  
JIANG Jun-jun, LU Xin. Analysis of influence of multiple parameters on internal ballistic performance of gun under ablative wear theory [J]. *Journal of Ballistics*, 2021, 33(4): 45-50.
- [11] 熊佳敏, 陆欣. 发射药冲击破碎对埋头弹装药燃烧和内弹道性能影响的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2023, 46(4): 352-360.  
XIONG Jia-min, LU Xin. Numerical simulation of the effect of impact crushing of propellant grains on the combustion and internal ballistic of the CTA [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(4): 352-360.
- [12] CHEN S S, JIANG K, XUE S, et al. Performance analysis of internal ballistic multiphase flow of composite charge structure [J]. *Energies*, 2023, 16(2127): 21-27.
- [13] 胡朝斌. 内弹道精细化建模及其在身管烧蚀磨损研究中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 89-91.  
HU Chao-bin. Refined Modeling of Interior Ballistics and Its Application in the Study of Erosion and Wear in Gun Bores [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019: 89-91.
- [14] 王克, 张领科, 王戴思源. 基于火炮膛内气固两相流的热散失模型数值仿真[J]. 弹道学报, 2023, 35(1): 69-75.  
WANG Ke, ZHANG Ling-ke, WANG Dai-si-yuan. Numerical Simulation of heat loss model based on gas-solid two-phase flows in a gun bore [J]. *Journal of Ballistics*, 2023, 35(1): 69-75.
- [15] 马天一, 陶如意, 森思义, 等. 单模块装药膛内流场特性试验及

- 数值仿真[J]. 含能材料, 2023, 31(1): 70-82.
- MA Tian-yi, TAO Ru-yi, SEN Si-yi, et al. Experiment and simulation of flow field characteristics for single modular artillery charge system[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Han-neng Cailiao)*, 2023, 31(1): 70-82.
- [16] YWA B, LJA B, JD C, et al. Three-dimensional network structure nitramine gun propellant with nitrated bacterial cellulose [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6): 15094-15101.
- [17] 胡雨博, 陈双, 郑监, 等. 装填参数对水下新型气幕式发射内弹道性能的影响[J]. 火炸药学报, 2024, 47(8): 738-746.
- HU Yu-bo, CHEN Shuang, ZHEN Jian, et al. Effect of filling parameters on internal ballistic performance of underwater gas-curtain launch[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2024, 47(8): 738-746.
- [18] 王马法, 李俊玲, 柳森, 等. 驱动气体的密度梯度对弹丸发射速度的影响[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(4): 13-22.
- WANG Ma-fa, LI Jun-ling, LIU Sen, et al. Influence of the density gradient of the driving gas on the projectile launch speed[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(4): 13-22.
- [19] 田中旺, 牛兰杰, 宁变芳, 等. 中大口径榴炮发射环境极限边界工况炮-弹-引耦合响应特性[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(1): 33-39.
- TIAN Zhong-wang, NIU Lan-jie, NING Bian-fang, et al. Rifled gun barrel-projectile-fuze coupling characteristics of limit boundary conditions launching environment[J]. *Journal of Detection & Control*, 2024, 46(1): 33-39.
- [20] 蔡灿伟, 宁全利, 陈翠华, 等. 耦合稳定结构特性的图像末制导炮弹内弹道性能研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2024, 45(5): 64-71.
- CAI Cai-wei, NING Quan-li, CHEN Cui-hua, et al. Study on interior ballistic performance of image terminal guided projectile coupled with stabilized structure characteristics[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2024, 45(5): 64-71.

## Analysis of Interior Ballistic Performance and Launch Overload of Image Terminal Guided Projectiles

CAI Can-wei, NING Quan-li, DENG Hai-fei, ZHANG Zhi-wen, LIU Li-wen

(Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031, China)

**Abstract:** To accurately analyze the interior ballistic performance and launch overload of image terminal guided projectiles, the connotative essence of the firing with different charge numbers was investigated based on the characteristics and working principles of the adaptive launch platform and launch charge. The interior ballistic two-phase flow model for image terminal guided projectile was established, and its rationality was verified through simulations and measured data under two different working conditions. Building on this, the evolution laws of pressure fluctuation and projectile motion in the bore of a certain type of image terminal guided projectile with different charge numbers were analyzed using the verified interior ballistic two-phase flow model. Furthermore, the launch overload characteristics of this type of image terminal guided projectile with different charge numbers were studied through the established engineering calculation model of launch overload. The results show that the relative errors of the maximum pressure at the bottom of the bore and the initial velocity of the projectile between two verification conditions are less than 2%, and the variation laws of the pressure at the bottom of the bore and the pressure wave in the bore with time are highly consistent between simulation and measurement. The internal ballistic performance and launch overload variation laws of the image terminal guided projectile with different charges obtained from the verified model are consistent with the general laws of the actual launching process.

**Key words:** interior ballistic; pressure wave; numerical simulation; image terminal guidance projectile; charge transformation; launch overload

**CLC number:** TJ55; TJ410.2; TJ413.+6

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2025023

(责编: 姜梅)