



# 火药颗粒群对坡膛撞击冲蚀的数值模拟

肖 硕, 余永刚\*, 张欣慰

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**底火击发点燃发射药后,火药燃气携带并推动火药颗粒沿轴向运动。坡膛作为药室和身管间的渐缩段,必然受到火药颗粒的无规则碰撞,导致坡膛处发生冲蚀磨损。在起始弹道阶段,膛压高、颗粒运动速度较快、颗粒尺寸大,火药颗粒撞击坡膛导致的冲蚀磨损现象更为突出。为重点研究火药颗粒对坡膛的碰撞损伤效应,根据起始弹道阶段颗粒运动、碰撞及气固两相流动特点,基于欧拉-拉格朗日框架,采用计算流体力学-离散单元法(CFD-DEM)耦合方法建立了三维非稳态气固两相流模型,以 155 mm 火炮为例进行了数值模拟。结果表明:坡膛起始段冲蚀磨损量大,呈环状分布,其余区域冲蚀磨损量较小,呈不规则云状分布;坡膛质量损失随时间呈指数递增;坡膛锥度由 1/10 增加到 1/5 时,坡膛质量损失随锥度的增加而增加,且锥度越大,质量损失率越大。

**关键词:**冲蚀磨损;气固两相流;火药颗粒;CFD-DEM 方法

中图分类号:TJ012 文献标志码:A 文章编号:1004-499X(2025)02-0091-08

## Numerical Simulation of Impact Erosion on a Slope Chamber by a Cluster of Gunpowder Particles

XIAO Shuo, YU Yonggang\*, ZHANG Xinwei

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Upon primer ignite the firing charge, the combustion gases propel gunpowder particles through controlled axial propulsion. The sloping chamber, which is a gradual shrinkage section between the chamber and the barrel bore, will inevitably be subjected to the irregular collision of the gunpowder particles, resulting in localized erosive wear. In the initial ballistic stage, with high chamber pressure, fast particle velocity and large particle size, the erosive wear caused by the impact of gunpowder particles on the sloped chamber is more prominent. In order to focus on this collision damage effect, according to the characteristics of particle motion, collision and gas-solid two-phase flow in the initial ballistic phase, a three-dimensional unsteady gas-solid two-phase flow model was established based on the Euler-Lagrange approach, using the computational fluid dynamics-discrete element method (CFD-DEM) coupled method. Numerical simulation of the erosion and wear of the gunpowder particles on the sloped chamber of a 155 mm artillery was carried out. The results show that the erosive wear in the starting section of the sloping chamber is significant and has an annular distribution, while the erosive wear in the rest of the area is minor and has an irregular cloud-like distribution. The mass loss of the sloping chamber increases exponentially with time. When the taper of the sloping chamber is increased from 1/10 to 1/5, the mass loss of the sloping chamber increases with the increase of taper, and the larger the taper is, the larger the rate of mass loss is.

**Key words:** erosive wear; gas-solid two-phase flow; gunpowder particles; CFD-DEM method

火炮身管烧蚀磨损现象普遍存在于各类火炮射击过程中,在热、化学和机械等因素作用下,内膛的几何形状和尺寸发生改变<sup>[1-2]</sup>。已有的研究多通过热因素和化学因素来解释火炮身管烧蚀磨损现象,关于火药颗粒撞击的研究较少。王斐等<sup>[3]</sup>进行了在发射药内添加硬质微粒的射击试验,结果表明硬质微粒对枪管内壁有极大的破坏,间接证明了硬质火药对枪炮身管存在一定的冲蚀作用。因此,开展起始弹道阶段火药颗粒群撞击坡膛导致的冲蚀磨损研究具有重要意义。

在化工、能源等领域,有关颗粒群在金属管内运动造成冲蚀磨损的研究较多。KLEIS 等<sup>[4]</sup>研究了颗粒撞击角度、撞击速度、颗粒尺寸和颗粒浓度等对管壁冲蚀磨损的影响。LIN 等<sup>[5]</sup>提出了一种考虑气体压力、气体速度和颗粒速度的管壁冲蚀磨损预测方法,发现在低速高压管道中,重力对颗粒运动轨迹的影响较大;在高压管道中,气相对颗粒速度、冲蚀速率的影响较大。徐义华等<sup>[6]</sup>分析了颗粒与炭化层的作用机制,根据强度理论建立了粒子流侵蚀模型,在颗粒与绝热材料炭化层的撞击实验中该模型计算精度较高。HONG 等<sup>[7]</sup>建立了气流携带沙砾对 90°弯管的冲蚀模型,分析了气流速度、颗粒质量流量、颗粒尺寸和管径等因素对侵蚀速率的影响,发现气流速度、颗粒质量流量与侵蚀速率呈正相关,管径与侵蚀速率呈负相关,并建立了包含雷诺数、直径比、密度比和颗粒数 4 个无量纲量的关联式。HUSER 等<sup>[8]</sup>利用二氧化碳气体裹挟沙砾对铸铁材料的渐缩管开展了冲蚀实验,发现颗粒在撞击缩颈处管壁后发生发弹,在出口段接近颈缩处发生二次撞击,此处冲蚀磨损最为严重。DARIHAKI 等<sup>[9]</sup>研究了锥角和收缩比对颗粒轨迹和冲蚀速率的影响。

关于火药颗粒群运动特性的研究主要集中在膛内两相流理论和相关撞击实验上。周彦煌等<sup>[10]</sup>给出了内弹道两相流理论,预测了不同时刻固相的速度分布,并得到了脉冲 X 射线摄影试验的验证<sup>[11-12]</sup>。陈安等<sup>[13-14]</sup>和李梓钰等<sup>[15]</sup>基于可视化模块装药点传火平台研究了药粒的飞散过程,先后基于拟球法和球元法研究了火药颗粒群的飞散过程和模块药盒初始装填位置对药粒散布特征的影响。邹瑞荣等<sup>[12]</sup>利用多幅脉冲 X 射线摄影,获得了火炮膛内早期点火阶段药床运动状况的阴影照片和示踪药粒沿药室轴向的运动速度。程啟华等<sup>[16]</sup>设计并试制了适合火炮膛内发射条件下测量火药颗粒对弹底

撞击应力的弹载传感器,获得了火炮发射时火药颗粒应力及其对弹底的撞击力。

本文以火药颗粒群对坡膛的机械撞击冲蚀为研究背景,采用计算流体力学-离散单元法(CFD-DEM)耦合方法,建立三维非稳态气固两相流模型,对起始弹道阶段火药颗粒群对坡膛撞击导致的冲蚀磨损进行数值模拟,为后续评估火炮身管烧蚀磨损提供参考。

## 1 数学模型

火炮发射时,底火击发点燃发射药,当膛内燃气压力达到了弹丸启动压力时,弹丸开始运动。此时火药燃气也会携带并推动火药颗粒沿轴向运动。如图 1 所示,坡膛作为药室和身管间的渐缩段,必然受到火药颗粒的无规则碰撞,产生冲蚀磨损。为重点研究这种碰撞损伤效应,采用如下假设:

①用质量等效法将火药颗粒视为球形,在起始弹道阶段考虑到火药颗粒燃烧较少,颗粒当量直径取平均值;

②忽略高温火药燃气对坡膛的烧蚀作用,仅考虑火药颗粒对坡膛的单一机械撞击效应;

③颗粒间、颗粒与壁面的碰撞均采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型;

④采用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型描述火药燃气的湍流流动。

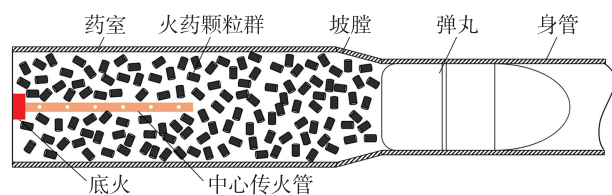


图 1 火药颗粒撞击坡膛示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gunpowder particles impacting the chamber

### 1.1 气相控制方程

火药燃气的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,表达形式如下:

$$\frac{\partial(\varphi \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi \rho_g \mathbf{v}_g) = \dot{m}_{in} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\varphi \rho_g \mathbf{v}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi \rho_g \mathbf{v}_g) = -\varphi \nabla p - M_{cp} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\varphi \rho_g E_g)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ \varphi \rho_g \mathbf{v}_g \left( E_g + \frac{p}{\rho_g} \right) \right] + p \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \dot{m}_{in} \left( E_{in} + \frac{p}{\rho_{in}} \right) \quad (3)$$

式中: $\varphi$  为气相体积分数, $\rho_g$  为气体密度, $v_g$  为气体速度, $\dot{m}_{in}$  为气体源相的质量流率, $p$  为气体压力, $M_{cp}$  为相间作用造成的气相动量增量, $E_g$  为气相总能量, $E_{in}$  为输入气体的总能量, $\rho_{in}$  为输入气体的密度。

### 1.2 颗粒运动方程

颗粒运动方程包括平动方程和转动方程,表达式如下<sup>[17-18]</sup>:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_f + F_g + F_c \quad (4)$$

$$0.4m_p R^2 \frac{d\omega_p}{dt} = R_i \cdot F_\tau \quad (5)$$

式中: $m_p$  为颗粒质量, $v_p$  为颗粒的运动速度, $F_f$  为颗粒所受到流体作用的压力梯度力, $F_g$  为颗粒所受重力, $F_c$  为碰撞力, $R$  为颗粒半径, $\omega_p$  为颗粒的角速度, $R_i$  为颗粒质心到接触点的矢量, $F_\tau$  为颗粒间、颗粒与壁面间碰撞力的切向分量。

### 1.3 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型

颗粒间、颗粒壁面间碰撞采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型<sup>[19]</sup>,法向力  $F_n$  和切向力  $F_\tau$  分别由法向或切向弹性力和阻尼力组成,其中切向力受到静摩擦力限制。表达式分别如下:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_{n1} \quad (6)$$

$$F_\tau = -S_t \delta_t - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_{t1} \quad (7)$$

其中等效杨氏模量  $E^*$ 、等效半径  $R^*$ 、法相刚度  $S_n$ 、切向刚度  $S_t$ 、等效质量  $m^*$  以及  $\beta$  的表达式分别如下:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j}, \quad \frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n}, \quad m^* = \left( \frac{1}{m_j} + \frac{1}{m_i} \right)^{-1}$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_t}, \quad \beta = \frac{-\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$$

式中: $E_i$ 、 $R_i$ 、 $\nu_i$ 、 $m_i$  和  $E_j$ 、 $R_j$ 、 $\nu_j$ 、 $m_j$  分别为颗粒  $i$  和颗粒  $j$  的杨氏模量、半径、泊松比、质量, $G^*$  为等效剪切模量, $\delta_n$ 、 $\delta_t$  分别为法相重叠量和切向重叠量, $v_{n1}$ 、 $v_{t1}$  分别为相对速度的法相分量和切向分量, $e$  为恢复系数。

### 1.4 起始内弹道模型

起始内弹道模型如下:

$$\begin{cases} \psi = \chi Z (1 + \lambda Z + \mu Z^2) \\ \frac{dZ}{dt} = \frac{\mu_1}{e_1} P^n \\ SP = \varphi_p m \frac{dv}{dt} \\ v = \frac{dl}{dt} \\ SP(l_\psi + l) = f w \psi - \frac{\theta}{2} \varphi m v^2 \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$l_\psi = l_0 \left[ 1 - \frac{\Delta}{\rho_p} (1 - \psi) - \alpha \Delta \psi \right], \quad \Delta = \frac{w}{V_0}, \quad l_0 = \frac{V_0}{S}$$

式中: $\psi$  为火药已燃百分数, $Z$  为火药已燃相对厚度, $\chi$ 、 $\lambda$ 、 $\mu$  为火药形状特征量, $\mu_1$  为火药燃速系数, $e_1$  为火药弧厚, $P$  为膛内平均压力, $n$  为燃速指数, $S$  为炮管横截面积, $\varphi_p$  为次要功系数, $m$  为弹丸质量, $v$  为弹丸速度, $l$  为弹丸行程, $f$  为火药力, $w$  为装药质量, $\theta$  为绝热指数, $V_0$  为药室容积, $\alpha$  为火药气体余容, $\rho_p$  为火药密度。

### 1.5 冲蚀模型

颗粒对壁面的冲蚀磨损计算采用 Oka 冲蚀模型<sup>[20-21]</sup>,该模型由颗粒撞击而产生的冲蚀磨损是颗粒大小、撞击速度和撞击角度的函数,模型依赖于磨损材料的硬度和材料磨损常数进行预测。模型表达式如下:

$$H = g_a E_a m_p / A \quad (9)$$

$$g_a = (\sin \alpha)^{0.71 H_v^{0.14}} [1 + H_v (1 - \sin \alpha)^{2.4 H_v^{-0.94}}] \quad (10)$$

$$E_a = 65 W^{-k_1} \left( \frac{V_p}{104} \right)^{2.3 H_v^{0.038}} \cdot \left( \frac{d}{0.326} \right)^{0.19} \quad (11)$$

式中: $H$  为冲蚀磨损深度; $A$  为壁面模型中一个三角元素的面积; $\alpha$  为颗粒冲击角; $H_v$  为颗粒材料的维氏硬度,文中  $H_v = 1$  GPa; $W$  为材料磨损常数,文中  $W = 3$ ; $k_1$  为经验系数取 -0.12; $V_p$  为颗粒撞击壁面时的速度值; $d$  为颗粒冲击壁面时的直径。

## 2 模型验证

为验证本文所建立气固两相流撞击管壁模型的有效性,采用文献[8]中使用二氧化碳气体携带沙砾冲刷由碳钢材料组成的渐缩管的冲蚀实验进行验证。该实验与火药颗粒撞击坡膛的情形类似,实验示意图如图2所示,实验参数如表1所示。

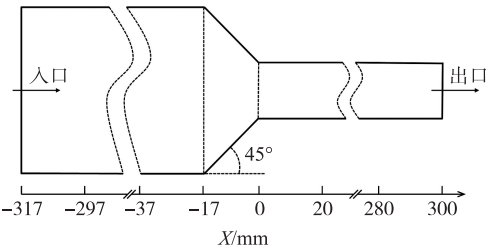


图 2 实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experiment

表 1 实验参数

Table 1 Parameters of the experiment

| 入口段<br>直径<br>/mm | 出口段<br>直径<br>/mm | 锥角<br>/(°) | 入口速度<br>/(m·s <sup>-1</sup> ) | 颗粒密度<br>/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 颗粒<br>直径<br>/mm | 颗粒质量<br>流量/<br>(g·s <sup>-1</sup> ) |
|------------------|------------------|------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
| 54               | 20               | 45         | 11.4                          | 2 650                          | 0.25            | 0.164                               |

数值模拟得到的冲蚀磨损深度沿出口段分布结果与实验结果的比较如图 3 所示,二者平均误差为 9.52%。在出口段管道起始处,二者变化趋势基本相同;数值模拟的最大冲蚀磨损深度在  $X=0.06\text{ m}$  处,位于实验最大冲蚀磨损深度区域  $0.042\sim0.063\text{ m}$  内;模拟结果也和实验结果基本吻合。

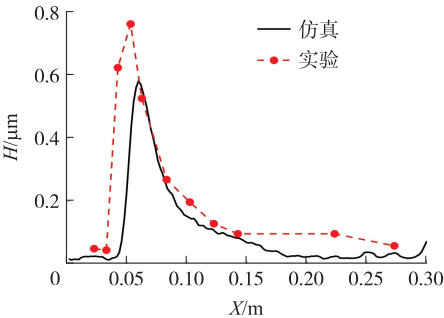


图 3 计算结果与实验结果的对比

Fig. 3 Comparison of calculated results with test results

综上所述,本文所建立的三维非稳态气固两相流撞击管壁模型与渐缩管的冲蚀试验结果吻合较好,因此所建立的模型合理,可用于火药颗粒冲蚀坡膛的数值预测。

3 数值模拟与分析

3.1 计算模型

在上述工作基础上,采用 FLUENT 和 EDEM 两种仿真软件,对如图 4 所示的 155 mm 弹模型开展起始弹道阶段火药颗粒群撞击坡膛导致的冲蚀磨损数值模拟,模型坡膛锥度  $K$  为 1/10。由于火药颗粒群的体积分数较大,不能忽略固相和气相的相互作用,因此必须采用气固两相双向耦合方法进行数值计算,求解时选择压力基求解器求解,压力-速度耦

合采用 SIMPLEC 格式。

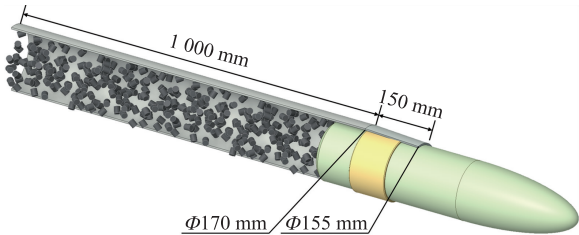


图 4 计算模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the computational model

根据 2.4 节所述起始内弹道模型和文献[22]的数据,起始弹道阶段膛底压力  $p_t$  和弹底压力  $p_d$  的压力曲线如图 5 所示。计算弹丸运动前期 4 ms 内不同时刻火药颗粒群对坡膛的冲蚀磨损,计算过程中火药颗粒及壁面参数如表 2 所示,火药颗粒和壁面材料的泊松比分别为 0.29 和 0.3。

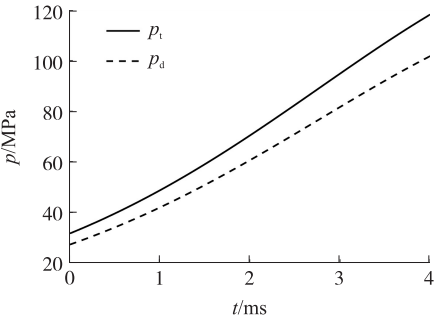


图 5 膛底压力、弹底压力随时间的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of chamber bottom pressure and cartridge bottom pressure with time

表 2 计算模型基本参数

Table 2 Basic parameters of the model

| 口径<br>/mm | 药室<br>容积<br>/L | 火药颗粒<br>初始总质<br>量/kg | 火药颗粒<br>当量等效<br>直径/mm | 火药颗粒<br>密度/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 火药颗粒<br>杨氏模量<br>/GPa | 壁面材料<br>密度/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|-----------|----------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| 155       | 23             | 15                   | 9.5                   | 1 680                                | 5.029                | 7 890                                |

3.2 网格与时间步长无关性验证

对图 4 所示计算模型采用结构网格进行划分,考虑到 FLUENT 与 EDEM 仿真软件耦合中网格尺寸必须大于颗粒尺寸,而现颗粒等效直径为 9.5 mm,因而选取 10 mm、12 mm、16 mm 3 种网格尺寸进行网格无关性验证,选择监测坡膛磨损质量损失  $M$  随时间  $t$  的变化,使用这 3 套网格的计算结果如图 6 所示。

以 10 mm 网格的模拟值为基准,12 mm 和 16 mm 网格划分类型下,坡膛磨损质量损失与该基准的平均误差分别为 2.86% 和 5.79%。综合考虑计算效率和计算精度,本文选取 12 mm 的网格划分类型进行后续计算。

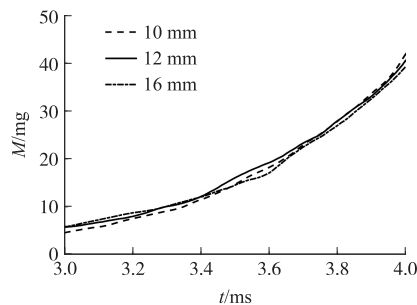


图 6 不同网格划分计算结果比较

Fig. 6 Comparison of calculation results with different meshing

时间步长分别选取  $5 \times 10^{-5}$  s、 $1 \times 10^{-5}$  s 和  $1 \times 10^{-6}$  s,结果如图 7 所示。计算结果表明:时间步长为  $5 \times 10^{-5}$  s 时,计算过程发散,时间步长分别为  $1 \times 10^{-5}$  s、 $1 \times 10^{-6}$  s 时,两者最大误差为 2.1%,综合考虑计算效率和节省计算资源,时间步长定为  $1 \times 10^{-5}$  s。

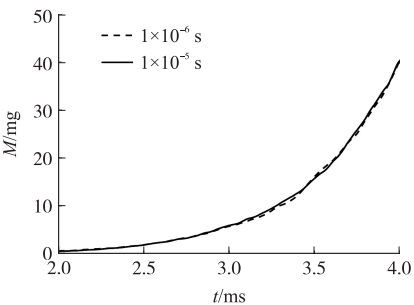


图 7 不同时间步长的计算结果比较

Fig. 7 Comparison of calculation results with different time steps

3.3 仿真结果与分析

根据图 5 的压力加载曲线,计算起始弹道阶段火药颗粒群的运动特性。图 8 表示不同时刻计算域内颗粒运动情况,其中坐标原点位于坡膛左端与药室相交处。

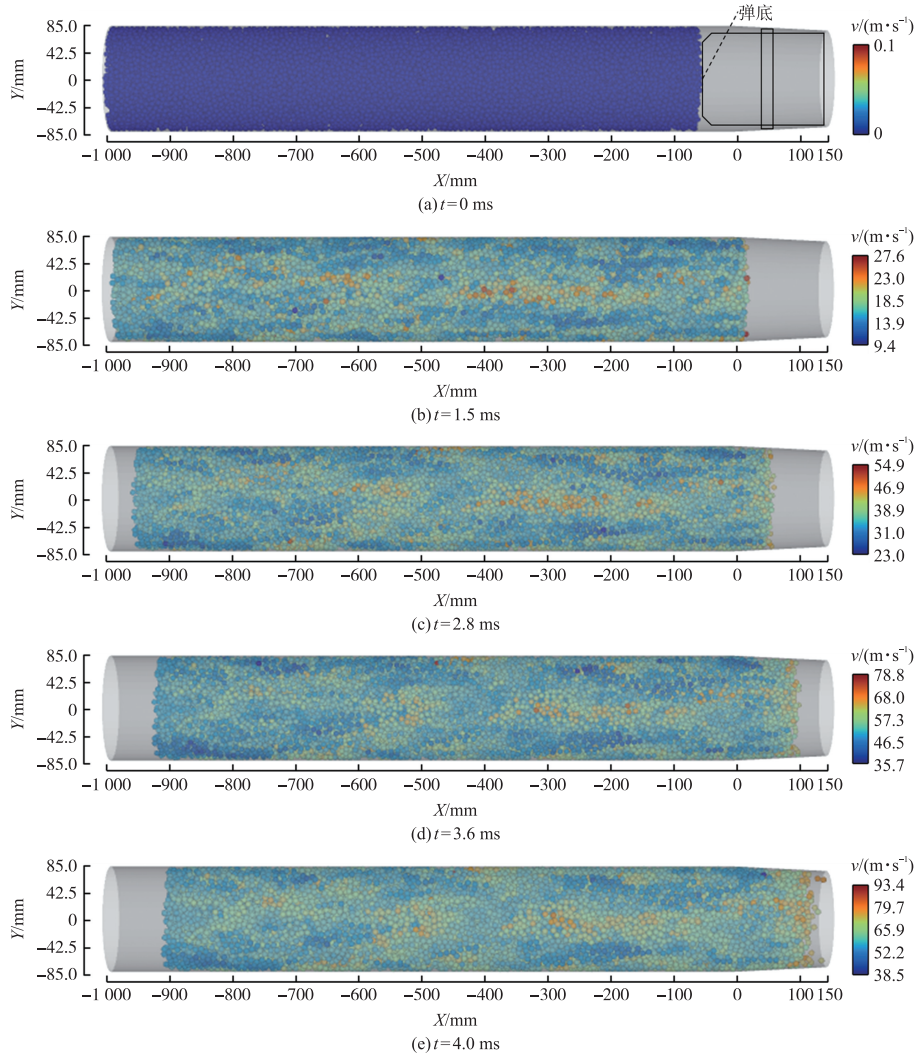


图 8 不同时刻颗粒运动情况

Fig. 8 Particle motion at different moments

由图 8 可知,在起始弹道阶段,颗粒群整体上向右加速运动,运动过程中由于坡膛的阻力致使边沿流颗粒速度小于核心流颗粒速度。约 1.5 ms 时,颗粒群右端颗粒进入坡膛计算域内,颗粒间速度梯度小,极少数边沿流颗粒与坡膛发生撞击,受坡膛阻力的作用,其速度小于核心流颗粒速度。约 2.8 ms 时,颗粒群边沿流颗粒与核心流颗粒间速度梯度增加,大量边沿流颗粒开始撞击坡膛。约 3.6 ms 时,颗粒群边沿流颗粒与核心流颗粒间速度梯度继续增加,部分边沿流颗粒在撞击坡膛后冲击角变小,由冲击状态转变为摩擦状态,坡膛对其阻力降低,致使部分边沿流颗粒速度接近核心流颗粒速度。颗粒群向右加速运动的过程中,由于坡膛的阻力及冲击角的变化,颗粒群边沿流颗粒速度小于核心流颗粒速度,且部分边沿流颗粒速度接近核心流颗粒速度,后续的运动中颗粒群遵循这一规律继续向右侧发展。

图 9 为不同时刻坡膛冲蚀磨损分布云图,图 10 为不同时刻坡膛环形截面平均冲蚀磨损深度的分布。

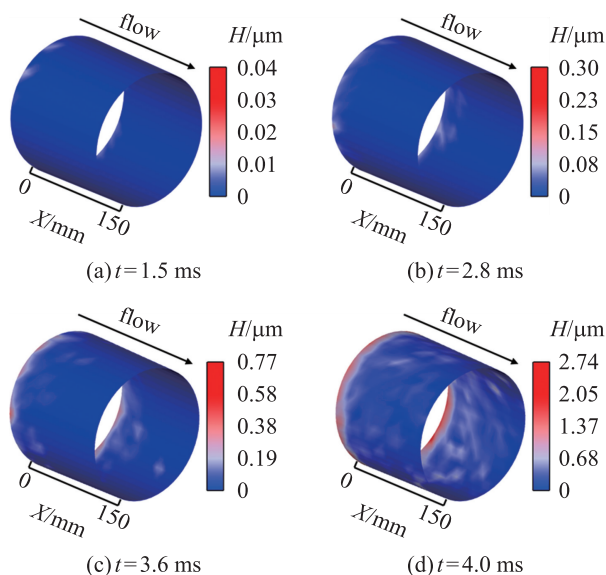


图 9 不同时刻坡膛冲蚀磨损分布 ( $K=1/10$ )

Fig. 9 Distribution of erosion wear on the slope chamber at different moments ( $K=1/10$ )

结合图 8~图 10 可知,约 1.5 ms 时,颗粒群开始进入坡膛计算域内,极少部分颗粒撞击坡膛,导致坡膛左端少量区域发生冲蚀磨损。约 2.8 ms 时,大量颗粒撞击坡膛,导致坡膛左端大部分区域发生冲蚀磨损,初步构成了冲蚀磨损在坡膛左端环状分布的特征。约 3.6 ms 时,部分边沿流颗粒撞击坡膛后冲击角变小,颗粒对坡膛中部的冲蚀磨损相应减小,

初步构成了冲蚀磨损不规则云状分布的特征。颗粒群后续的运动进一步加强了上述两类冲蚀磨损,最终形成的冲蚀磨损在坡膛左端呈环状分布,其他区域呈不规则云状分布的特征。

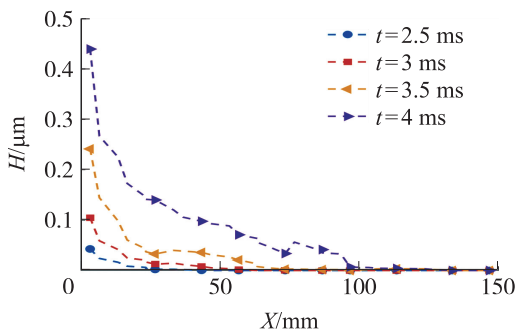


图 10 不同时刻坡膛冲蚀磨损深度的分布 ( $K=1/10$ )

Fig. 10 Distribution of the depth of erosive wear of the slope chamber at different moments of time ( $K=1/10$ )

该冲蚀磨损特征的形成,一方面归结于颗粒群边沿流颗粒动能的降低,颗粒群与坡膛未接触时速度主要沿轴向发展,开始接触时部分边沿流颗粒与坡膛发生挤压、撞击,部分颗粒开始向颗粒群内部运动,与颗粒群核心流颗粒碰撞,致使边沿流颗粒动能骤降;另一方面归结于冲击角的转变,颗粒群运动初期颗粒群沿轴向发展,运动方向与坡膛呈一定角度,中后期边沿流颗粒在颗粒群的推动下沿坡膛向前运动,冲击角变小,颗粒由冲击状态转变为摩擦状态。上述因素的综合作用最终形成了图 8(d) 的冲蚀磨损分布。

### 3.4 坡膛锥度对坡膛磨损的影响

上述研究可知,冲击角对冲蚀磨损影响较大,通过改变坡膛锥度研究冲击角对坡膛冲蚀磨损的影响。坡膛常用锥度取值范围为  $1/10 \sim 1/5$ ,分别对锥度为  $1/9$ 、 $1/8$ 、 $1/7$ 、 $1/6$ 、 $1/5$  共 5 种工况下的冲蚀磨损再次开展数值模拟。

图 11 表示不同工况下坡膛环形截面平均冲蚀磨损深度随时间的变化规律。结合图 10 和图 11 可知,同一工况下,坡膛左端冲蚀磨损深度大于右端,且这一趋势随时间的增加逐渐增强。不同工况下,同一时刻,坡膛锥度越大坡膛冲蚀磨损深度越大。这是因为颗粒群先运动到坡膛左端,后运动到坡膛右端,这一过程中颗粒群边沿流颗粒不断撞击坡膛壁面,致使坡膛左端的冲蚀磨损严重;锥度的增加导致冲击角增加,致使颗粒对坡膛的作用力增加,进而加重了冲蚀磨损深度。

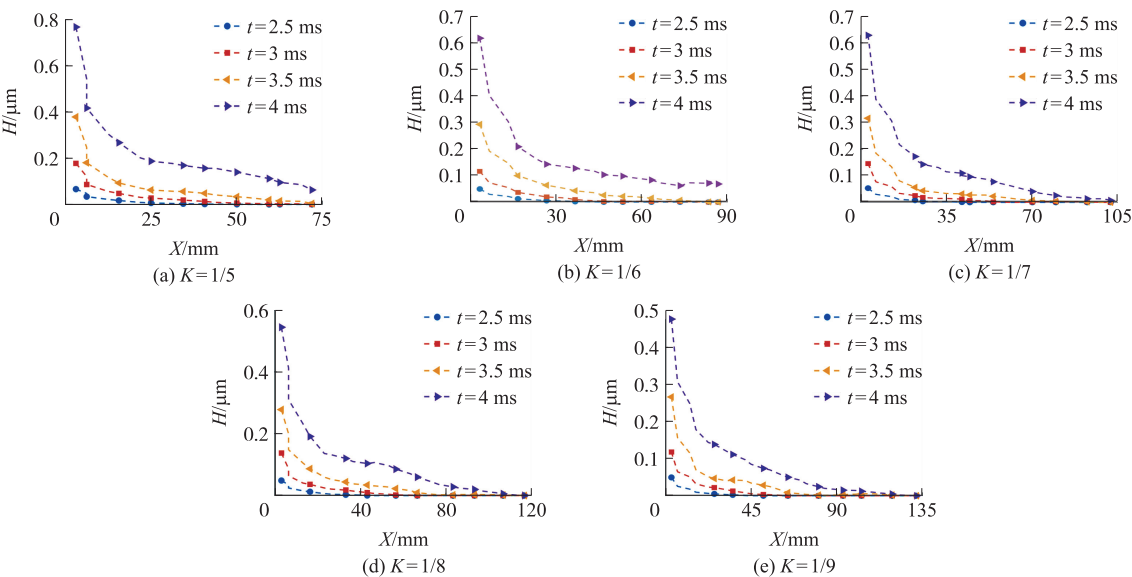


图 11 不同工况下坡膛冲蚀磨损深度的分布

Fig. 11 Distribution of erosion wear depths of the slope chamber under different operating conditions

图 12 为不同工况下坡膛整体质量损失随时间的变化。利用指数方程对各工况下坡膛质量损失根据如下的形式进行拟合。

$$M=AKe^{(Bt)}+C \tag{12}$$

式中： $M$  为坡膛质量损失，mg； $A$ 、 $B$  和  $C$  分别为拟合参数，各工况下拟合参数如表 3 所示。

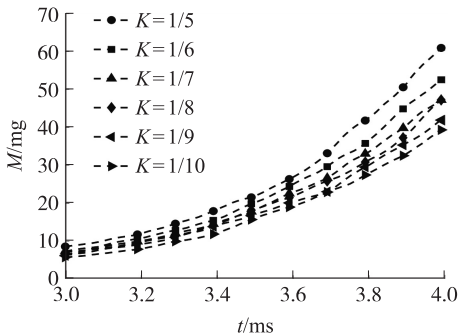


图 12 不同工况下坡膛冲蚀磨损深度的分布

Fig. 12 Variation of overall mass loss of slope chamber with time under different working conditions

表 3 不同工况的拟合参数

Table 3 Fitting parameters for different working conditions

| 工况       | $A/\text{mg}$ | $B/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $C/\text{mg}$ | $R^2$   |
|----------|---------------|----------------------------------|---------------|---------|
| $K=1/5$  | 0.078 7       | 2.075 872                        | -0.015 731    | 0.998 8 |
| $K=1/6$  | 0.098 2       | 2.030 680                        | -0.016 368    | 0.919 5 |
| $K=1/7$  | 0.133 9       | 1.964 012                        | -0.019 128    | 0.972 0 |
| $K=1/8$  | 0.155 1       | 1.948 498                        | -0.019 386    | 0.957 3 |
| $K=1/9$  | 0.193 0       | 1.902 175                        | -0.021 451    | 0.923 7 |
| $K=1/10$ | 0.167 0       | 1.949 987                        | -0.016 704    | 0.929 9 |

由图 12 可知，在同一工况下，坡膛整体质量损失随时间呈指数递增；不同工况下，同一时刻坡膛整体质量损失随锥度的增加而增加，不同工况间质量损失的增速随锥度逐渐线性递增。这是因为发生冲蚀时，颗粒群边沿流颗粒与坡膛撞击导致冲击角变小，部分边沿流颗粒向颗粒群内部运动导致颗粒间能量耗散增加。在后续的运动中，这一部分颗粒对坡膛的作用力整体降低，故而在颗粒群的持续撞击下，坡膛整体质量损失随时间呈指数递增而非线性增加。在不同工况下，随坡膛锥度的增加颗粒对坡膛的作用力增加，故坡膛整体质量损失增加。

4 结论

本文针对火药颗粒群对坡膛撞击冲蚀问题，建立了三维非稳态气固两相流撞击管壁模型，进行了冲蚀磨损的数值模拟，得出如下结论：

①颗粒群边沿流颗粒在撞击坡膛后冲击角减小，由冲击状态转变为摩擦状态，核心流颗粒运动几乎不受影响。

②坡膛起始段冲蚀磨损严重，呈环状分布，其余区域呈不规则云状分布。

③同一工况下，锥度由 1/10 增加到 1/5 时坡膛质量损失随时间增加呈指数递增；不同工况下，锥度越大质量损失越多、质量损失率越大。

参考文献

[1] 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 Junjun, 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. (in Chinese)
- [2] 郭俊行, 樵军谋, 李宗虎, 等. 烧蚀磨损对某大口徑自行加榴炮动态响应的影响[J]. 弹道学报, 2021, 33(1): 44-49.
- GUO Junhang, QIAO Junmou, LI Zonghu, et al. Effect of bore erosion on dynamic response of large-caliber self-propelled gun-howitzer [J]. Journal of Ballistics, 2021, 33(1): 44-49. (in Chinese)
- [3] 王斐, 陈永才, 陶辰立, 等. 纳米硬质微粒对枪管内膛破坏机理的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(3): 99-101.
- WANG Fei, CHEN Yongcai, TAO Chenli, et al. Mechanism of nanometer hard particles destroying gun barrel bore [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(3): 99-101. (in Chinese)
- [4] KLEIS I, KULU P. Solid particle erosion: occurrence, prediction and control [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [5] LIN N, LAN H, XU Y, et al. Effect of the gas-solid two-phase flow velocity on elbow erosion [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26(9): 581-586.
- [6] HONG B, LI Y, LI X, et al. Experimental investigation of erosion rate for gas-solid two-phase flow in 304 stainless/L245 carbon steel [J]. Petroleum Science, 2022, 19(3): 1347-1360.
- [7] HUSER A, KVERNVOLD O. Prediction of sand erosion in process and pipe components [C]//Proceeding of 1st North American Conference on Multiphase Technology. Banff, Canada: BHR, 1998.
- [8] DARIHAKI F, ZHANG J, SHIRAZI S A. Solid particle erosion in gradual contraction geometry for a gas-solid system [J]. Wear, 2019, 426(6): 643-651.
- [9] 周彦煌, 刘千里, 王升晨. 底部点火装药结构两相流内弹道模型及计算[J]. 兵工学报, 1989, 10(1): 2-9.
- ZHOU Yanhuang, LIU Qianli, WANG Shengchen. A two-phase flow interior ballistic model and computational procedures for the charge configuration with base ignition bag [J]. Acta Armamentarii, 1989, 10(1): 2-9. (in Chinese)
- [10] SOPER W G. Grain velocities during ignition of gun propellant [J]. Combustion and Flame, 1975, 24(2): 199-202.
- [11] 邹瑞荣, 袁亚雄, 金志明, 等. 火炮点火初期膛内火药床运动规律研究[J]. 南京理工大学学报, 1994, 18(2): 33-37.
- ZOU Ruirong, YUAN Yaxiong, JIN Zhiming, et al. Study on the movement law of gunpowder bed in the chamber at the early stage of artillery ignition [J]. Journal of Nanjing University and Technology, 1994, 18(2): 33-37. (in Chinese)
- [12] 程啟华, 李永新. PVDF 传感器在火炮弹底撞击应力测试中的应用[J]. 测试技术学报, 2007, 61(1): 90-94.
- CHENG Qihua, LI Yongxin. Application of PVDF sensor to the collision stress detection on the projectile base of artillery [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, 61(1): 90-94. (in Chinese)
- [13] 陈安, 余永刚. 单模块装药点传火过程中药粒散布模拟试验与仿真[J]. 含能材料, 2020, 28(8): 731-739.
- CHEN An, YU Yonggang. Modeling test and simulation study of granular dispersion characteristics for single modular charge ignition and flame-spreading [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(8): 731-739. (in Chinese)
- [14] 陈安, 余永刚. 两模块装药点传火过程及药粒散布特性[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(7): 39-49.
- CHEN An, YU Yonggang. Ignition process and propellant grains distribution of the two-module charge [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(7): 39-49. (in Chinese)
- [15] 李梓钰, 余永刚. 基于非球形颗粒离散单元法分析单模块装药药粒散布特性[J]. 兵工学报, 2023, 44(5): 1330-1338.
- LI Ziyu, YU Yonggang. Analysis of propellant grains' dispersion characteristics of single modular charge based on discrete element method for non-spherical particles [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(5): 1330-1338. (in Chinese)
- [16] 顾兴鹏, 李军伟, 乔文生, 等. 固相颗粒在 C1xb 固体火箭发动机中的运动规律[J]. 兵工学报, 2022, 43(3): 489-502.
- GU Xingpeng, LI Junwei, QIAO Wensheng, et al. Motion trajectory of solid particles in C1xb solid rocket motor [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(3): 489-502. (in Chinese)
- [17] 官典, 郭亚雯, 李世鹏, 等. 横向过载下气-粒两相流对固体火箭发动机点火过程影响[J]. 兵工学报, 2022, 43(8): 1792-1807.
- GUAN Dian, GUO Yawen, LI Shipeng, et al. Influence of gas-particle two-phase flow on ignition of the solid rocket motor under lateral acceleration [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(8): 1792-1807. (in Chinese)
- [18] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- WANG Guoqiang, HAO Wanjun, WANG Jixin. Discrete element method and its practice on EDEM [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010. (in Chinese)
- [19] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact part 1: effects of impact parameters on a predictive equation [J]. Wear, 2005, 259(1): 95-101.
- [20] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact part 2: mechanical properties of materials directly associated with erosion damage [J]. Wear, 2005, 259(1): 102-109.
- [21] 金志明. 枪炮内弹道学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- JIN Zhiming. Interior ballistics of guns [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)