

doi: 10.7690/bgzd.2020.06.016

## 基于动网格的炮口制退器两相流场数值模拟

董靖宇, 李志刚, 于存贵

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为较准确地研究火炮发射时高温高压高速的燃气射流经由炮口制退器的流场, 对基于动网格的炮口制退器两相流场进行数值模拟。利用 FLUENT 软件, 采用光顺和重构的非结构动网格更新方法, 使用结构非结构混合网格技术, 建立炮口制退器的流场模型, 对弹丸飞出炮口制退器过程中的膛口流场进行数值模拟, 并对比分析了燃气射流中的固相颗粒与气相耦合的两相流场和单纯气相流场对炮口制退器的影响。计算结果表明: 考虑了两相的流场与单纯气相流场在压强分布上存在明显的区别, 可为后续炮口制退器的结构设计与优化研究提供一定的参考。

**关键词:** 炮口制退器; 燃气射流; 数值模拟; 动网格; 两相流

**中图分类号:** TJ303 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation of Muzzle Brake Two-phase Flow Field Based on Dynamic Grid

Dong Jingyu, Li Zhigang, Yu Cungui

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to accurately study the flow field of high-temperature, high-pressure and high-speed gas jet passing through muzzle brake during gun launching, the two-phase flow field of muzzle brake based on moving grid was numerically simulated. Using FLUENT software, the flow field model of muzzle brake was established by using smoothing and reconstructing unstructured dynamic mesh updating method and structured/unstructured hybrid mesh technology, and the effects of two-phase flow field coupled by solid particles and gas phase in gas jet and single gas phase flow field on muzzle brake were compared and analyzed. The results show that there are obvious differences in pressure distribution between two-phase flow field and pure gas-phase flow field, which can provide some reference for the structural design and optimization of muzzle brake.

**Keywords:** muzzle brake; gas jet; numerical simulation; dynamic grid; two-phase flow

### 0 引言

高威力的火炮发射时会产生很大的后坐力, 不仅会影响射击精度, 而且为了降低后坐力而增加的炮架质量会导致火炮整体设计负荷变大<sup>[1]</sup>。为解决这一问题, 研究人员通过优化设计来控制后效期火药气体的流量、气流速度和气流方向, 给身管提供一个制退力, 从而减小炮膛合力, 最终减小炮架的设计负荷和火炮的后坐动能, 这便是炮口制退器的作用原理<sup>[2]</sup>。炮口制退器是火炮非常重要的一个制退装置。火炮发射时会产生大量高温、高压、高速的火药气体。这些火药燃气会在膛口附近形成复杂的膛口流场。流场区域内不仅存在如强激波、膛口焰和膛口噪声等有害扰动, 会使阵地暴露, 给人员和设备带来不利影响, 导致射击精度降低<sup>[3]</sup>; 而且流动还伴随着固体颗粒和燃气的耦合作用以及燃烧的化学反应, 加强了这些有害扰动的影响, 同时对

炮口制退器结构的冲击更加严重。

为提高炮口制退器的效率而降低火炮后座动能, 也存在一些问题: 1) 炮口冲击波扰动导致炮手区超压值升高, 即炮口制退器的效率和超压值的平衡是一个问题; 2) 膛口流场多相, 并且伴随化学反应的复杂结构在仿真分析中并没有被考虑进去, 一定程度上影响了炮口制退器结构设计的精度。Schmidt 等大量研究了炮口射流的热化学特性、炮口冲击波及其方向性和后坐力的减小方法<sup>[4-5]</sup>。进入 21 世纪, 研究人员开始采用模拟仿真的手段对膛口流场进行研究。江坤采用多目标遗传算法 NSGA-II 对斜切扩张喷口制退器结构参数进行研究, 以制退器所受冲击力和炮手方向给定点超压值为目标进行多目标优化, 最终优化得到 Pareto 最优解集<sup>[6]</sup>。

笔者使用 FLUENT 软件, 运用动网格技术对弹丸的运动加以处理, 建立膛口流场 3 维数值模型,

收稿日期: 2020-03-02; 修回日期: 2020-03-23

作者简介: 董靖宇(1993—), 男, 山西人, 硕士, 从事流体仿真研究。E-mail: 1548599080@qq.com。

计算炮口制退器单纯气相的常规流场和考虑燃气中固体颗粒与气相耦合作用的两相流场，并进行对比分析。

### 1 数值计算方法

膛口流场是非定常、多相、伴随化学反应的复杂湍流流场，因此，仿真计算一般都在一些理论假设的前提下进行<sup>[7]</sup>。笔者在计算之前作如下假设：流动为 1 维准定常等熵流动；火药气体为理想气体，忽略燃气组分和化学反应的影响；炮口为临界截面，即假设炮口马赫数为 1；后效期各瞬时膛内火药气体密度均匀分布<sup>[8]</sup>。

#### 1.1 基本控制方程

笔者采用 3 维非定常 N-S 方程：

$$\partial U / \partial t + \partial F / \partial x + \partial G / \partial y + \partial H / \partial z = 0。 \quad (1)$$

式中：

$$U = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E \end{Bmatrix}; F = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p + \sigma_x \\ \rho uv + \tau_{xy} \\ \rho uw + \tau_{xz} \\ (E + p)u + u\sigma_x + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \end{Bmatrix};$$

$$G = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho uv + \tau_{yx} \\ \rho v^2 + p + \sigma_y \\ \rho vw + \tau_{yz} \\ (E + p)v + u\tau_{yx} + w\tau_{yz} + v\sigma_y - q_y \end{Bmatrix};$$

$$H = \begin{Bmatrix} \rho w \\ \rho uw + \tau_{xz} \\ \rho vw + \tau_{yz} \\ \rho w^2 + p + \sigma_z \\ (E + p)w + u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\sigma_z - q_z \end{Bmatrix}。$$

其中： $\rho$  为气体密度； $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量； $E$  为总能量，表达式为

$$E = p / (\gamma - 1) + \rho(u^2 + v^2 + w^2) / 2。 \quad (2)$$

式中  $\gamma$  为理想气体绝热指数。理想气体状态方程为

$$p = \rho RT。 \quad (3)$$

式中  $R$  为通用气体常数。

#### 1.2 湍流模型

笔者使用标准  $k-\varepsilon$  模型，因其经济、计算精度高等优点而逐渐成为工程流场计算中主要的湍流模型。标准  $k-\varepsilon$  模型对表征湍动能的  $k$  方程和一个与

耗散率有关的  $\varepsilon$  方程进行计算，2 个方程组合在一起就是  $k-\varepsilon$  两方程模型。标准  $k-\varepsilon$  模型对完全湍流的流动状态的计算模拟非常适合<sup>[9]</sup>。2 方程的数学表达式具体如下：

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M; \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}。 \quad (5)$$

式中： $G_k$  为湍动能的大小，由呈梯度分布的速度引起； $G_b$  为湍动能的大小，由浮力导致； $Y_M$  为可压缩湍流流动的震荡对总耗散率的影响；湍流黏性系数  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ ； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  和  $C_{3\varepsilon}$  是通过大量的计算得到的经验常数； $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  为普朗特常数，分别表征湍动能和耗散率。湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  对湍流流动特性都有一定的影响，具体表现为： $k$  值与湍流波动长度和时间尺度成正比，而  $\varepsilon$  值则与湍流波动长度和时间尺度成反比。

#### 1.3 离散方法

方程离散采用有限体积法，使用 Roe 一阶迎风格式将对流项离散，数学表达式为：

$$U_j^{n+1} = U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{j+1/2}^n - F_{j-1/2}^n); \quad (6)$$

$$F_{j+1/2}^n = \frac{1}{2} (F_j^n + F_{j+1}^n) - \frac{1}{2} A_{Roe, j+1/2} (U_{j+1}^n - U_j^n)。 \quad (7)$$

式中： $A_{Roe, j+1/2}$  为 Roe 矩阵， $F_{j+1/2}^n$  为 Roe 通量。

#### 1.4 两相流模型

考虑到粒子负载比较低，燃气射流马赫数较大，故而选择密度基下的 DPM 离散相模型来模拟气固两相流模型，连续相的燃气通过曳力以及湍流影响粒子的运动，具体的理论公式如下：

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = m_p \frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F}。 \quad (8)$$

其中： $m_p$  为粒子质量； $\mathbf{u}$  为连续相流体速度； $\mathbf{u}_p$  为离散颗粒相速度； $\rho$  为流体相密度； $\rho_p$  为颗粒相密度； $\mathbf{F}$  为一种附加力； $m_p \frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_p}{\tau_r}$  为拖曳力； $\tau_r$  为颗粒松弛时间，其计算公式为

$$\tau_r = \left( (\rho_p d_p^2) / 18\mu \right) (24 / (C_d \cdot Re))。 \quad (9)$$

其中： $\mu$  为流体的分子黏度； $d_p$  为颗粒直径； $Re$  为相对雷诺数。

## 2 炮口制退器结构及其计算模型

文中的炮口制退器选用冲击一反作用式结构。实体模型如图 1 所示，首先在 SolidWorks 里面进行 3 维建模，之后导入 ICEM CFD 中进行流场构建，网格划分。考虑到炮口制退器结构的复杂性和计算速度，选用 interface 方法对模型进行结构和非结构混合的网格划分，弹丸运动的区域采用非结构动网格，外部燃气流场区域采用六面体结构化网格，最终网格数量在 300 万左右。网格模型如图 2、图 3 所示。



图 1 炮口制退器 3 维模型

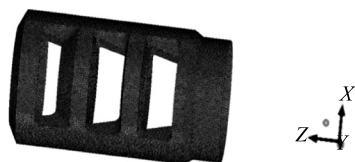


图 2 炮口制退器面网格模型

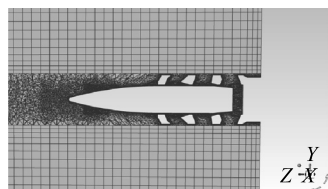


图 3 弹丸轴向截面混合格

将生成的网格文件导入 fluent，采用基于密度的求解器，设置压力入口和压力出口，利用 UDF 控制边界条件。弹丸运动区域为非结构网格，所以动网格的更新选用弹性光顺和网格重构的组合方法，其思想为：弹性光顺方法将网格边界被理想化为节点间相互连接的弹簧，移动前的网格间距相当于边界移动前由弹簧组成的系统处于平衡状态时的

距离。当网格边界节点移动后，弹簧系统会产生与位移成比例的力，力的大小由胡克定律进行计算。边界节点移动产生的力破坏了弹簧系统原有的平衡，但是在外力的作用下，弹簧系统经过调整会达到新的平衡，这便是弹簧光顺方法的思想。如果运动边界位移过大，只采用光顺方法可能会导致网格质量下降，甚至出现负体积网格，进而导致计算终止；因此，笔者同时采用网格重构方法，即软件将畸变率过大或尺寸变化过于剧烈的网格集中在一起，进行局部网格重新划分<sup>[10]</sup>。

求解模型采用标准  $k-\epsilon$  湍流模型，两相流模型采用 fluent 中的 DPM 模型对固体颗粒相进行设置。假设入射颗粒均匀分布在入口表面，颗粒直径均为  $10\ \mu\text{m}$ ，从零时开始释放，入射速度为  $950\ \text{m/s}$ ，方向为垂直于入口，总质量流率为  $500\ \text{kg/s}$ ，颗粒和燃气从入口以相同的初始速度进入流场。弹丸运动的动网格区域采用 6DOF 求解器计算，使用 UDF 控制弹丸初始运动。燃气和空气均为理想气体，采用标准大气进行全局初始化，最后进行求解计算。

## 3 计算结果分析

笔者计算并对比了单纯气相作用的流场及考虑燃气中固体颗粒和气相耦合作用的流场。以弹丸飞离炮口瞬间(即后效期的起始时刻)开始计算，得到不同时刻单相和两相的膛口流场结构。炮口制退器对火药气体的分流作用和特定的收缩扩张结构使得火药气体出炮口后在炮口制退器内部形成复杂的流场。弹丸底部离开炮口后，膛内高温高压的火药气体迅速膨胀，流入炮口制退器后继续膨胀。气流首先从侧孔流出，之后才从制退器前方中央弹孔流出，所以侧孔冲击波的发展速度明显快于主冲击波<sup>[11]</sup>。如图 4 所示，分析炮口制退器轴线截面不同时刻的等值线图可知：在主膛口流场的形成过程中可以看到弹底激波、弹头激波、膛口的瓶状激波和马赫盘， $0.45\ \text{ms}$  时弹丸离开炮口制退器，膛口瓶状波系结构基本成形， $1.4\ \text{ms}$  时流场发展完全。

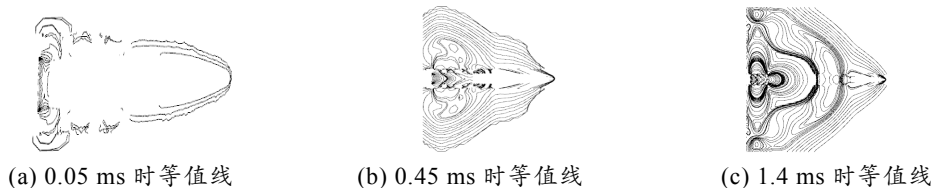
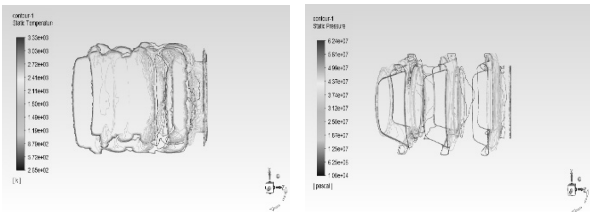


图 4 不同时刻炮口制退器轴线截面压力等值线

$0.45\ \text{ms}$  时流场现象基本形成，笔者对此时单相和两相炮口制退器的温度和压强云图进行分析。由

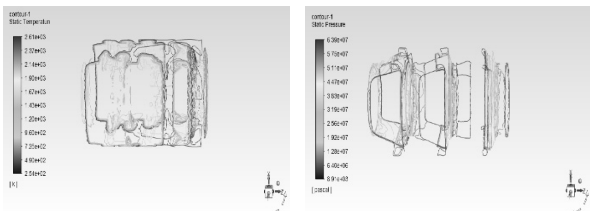
图 5、图 6 可知：燃气从身管流出之后，进入腔室膨胀加速，冲击炮口制退器，两边侧孔对气流的导

向使得膨胀减弱，即减小了对炮口制退器第一腔室两侧的冲击，压强对炮口制退器第一腔室上下内壁的冲击最大，两相气流因为携带同样速度的固体颗粒，从而加强了对壁面的冲击，增加的冲击强度约 5%。而两相流在温度方面的影响则比较小，是因为没有考虑其中化学反应引发的二次燃烧。



(a) 炮口制退器温度云图 (b) 炮口制退器压力云图

图 5 0.45 ms 时炮口制退器单相云图



(a) 炮口制退器温度云图 (b) 炮口制退压力云图

图 6 0.45 ms 时炮口制退器两相云图

炮口制退器单相和两相压强随时间的变化规律如图 7 所示，两者的变化趋势基本一致，不同之处在于：在起始段 0.45 ms 之前，弹丸未离开炮口制退器，单相的气体在炮口制退器内部与弹丸耦合作用，膨胀耗散较大；因此，冲击压强出现很大的下降，而两相流场中气相、固相和弹丸在炮口制退器内部耦合作用，固体颗粒和气体进行的质量和热量上的传递，使得能量耗散较小，因而变化波动没有像气相一样剧烈，保持相对稳定的状态。

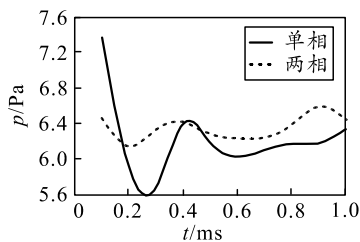


图 7 单相两相变化

#### 4 结束语

计算结果表明：考虑弹丸运动后，弹丸和燃气的耦合作用，炮口制退器膛口流场呈现更为复杂的波系结构；考虑了燃气中混合的固体火药颗粒的影响，两相耦合作用，强化了冲击波的强度，增加幅度约 5%；单相和两相流场的炮口制退器压强随时间的变化规律相似，但在弹丸未离开炮口制退器的阶段，因两相中气固耦合作用，存在质量能量的相互传递，在流动中的能量耗散较单相气体的小，所以压强变化没有单相剧烈，保持相对稳定；计算中没有考虑二次燃烧的化学反应，单相两相对温度场的变化影响较小。

#### 参考文献：

- [1] 黄欢. 炮口制退器的炮口流场数值模拟与分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [2] 高跃飞. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 324-325.
- [3] 尤国钊, 许厚谦. 中间弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 38-39.
- [4] SCHMIDT E, SHEAR D. Optical measurement of muzzle blast[J]. AIAA Journal, 1975(13): 1086-1069.
- [5] SCHMIDT E, SHEAR D, GION E J. Acoustic thermometric measurements of propellant gas temperatures in guns[J]. AIAA Journal, 1977(15): 222-226.
- [6] 江坤. 炮口制退器优化设计理论与方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [7] 李伟. 炮口制退器流场数值仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [8] 刘欣宁. 膛口流场三维数值模拟及稳定装置气动力研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
- [9] 周珊. 某智能型烟草除杂机流场的仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [10] 许蕾, 罗会信. 基于 ANSYS ICEM CFD 和 CFX 数值仿真技术[J]. 机械工程师, 2008(12): 65-66.
- [11] 李凯, 潘玉田, 张金龙, 等. 一种新型火炮炮口制退器流场的数值仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 1-5.