

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.018

某小口径火炮多功能膛口装置流场数值仿真

薛滨, 何永, 蒋鑫

(南京理工大学机械学院, 南京 210094)

摘要: 针对小口径火炮身管长度和后坐力与无人作战平台不匹配、传统膛口装置功能单一等问题, 设计集制退、消声、消焰为一体的多功能膛口装置, 提出一种适用于该膛口装置的超压分布模型。采用截短型火炮身管, 利用 Fluent 软件建立 2 维轴对称气体动力学模型来计算膛口流场; 采用大涡模拟模型, 使用 Ffowcs Williams and Hawkings 方法计算噪声变化情况, 结果显示, 该膛口装置的制退效率为 70%, 消音率为 17.8%, 制退效率与实验误差为 14%, 消音率与实验误差为 11%。数值仿真结果表明: 该膛口装置能有效降低火炮后坐力, 并且在射击时有良好的隐蔽性, 满足现代战争的需要。

关键词: 小口径火炮; 无人作战平台; 膛口流场; 制退; 消音

中图分类号: TJ399 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Flow Field in Multifunctional Muzzle Device of Small Bore Gun

Xue Bin, He Yong, Jiang Xin

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

Abstract: Aiming at the problems that the barrel length and recoil force of small bore gun do not match the unmanned combat platform, and the traditional muzzle device has a single function, a multi-functional muzzle device integrating recoil control, noise reduction and flame reduction was designed, and an overpressure distribution model suitable for the muzzle device was proposed. The muzzle flow field of a truncated gun barrel is calculated by using Fluent software to establish a two-dimensional axisymmetric gas dynamics model; The results show that the recoil efficiency of the muzzle device is 70%, the noise reduction rate is 17.8%, and the error of the recoil efficiency and the noise reduction rate is 14% and 11% respectively. The results of numerical simulation show that the muzzle device can effectively reduce the recoil force of the gun, and has good concealment when firing, which meets the needs of modern warfare.

Keywords: small bore gun; unmanned combat platform; muzzle flow field; recoil; noise reduction

0 引言

体积小、重量轻、射程远、功率大、打击类型多是无人战车发展的重要方向^[1]。然而, 武器的威力和它的后坐力成正比, 因而限制了装配火炮的火力。20 世纪 40 年代炮口制动器的诞生, 缓解了军队火力与机动性之间的矛盾, 促进了火炮^[2]的发展。随着战争的发展, 轻武器要求将膛口的各种负效应得到一定程度的抑制或减弱, 单功能膛口装置已不能满足现代化战争的需求。研究一种同时具有消声、制退、消音、防跳和振动功能的膛口制退器对野战武器的意义很大^[3]。

目前, 国内刘嘉鑫、葛苗冉等^[4-5]使用钛合金材料代替传统的炮钢设计了一款新型的炮口制退器并对其进行了性能分析; 吴喜富等^[6]基于流固耦合对炮口制退器强度进行了分析; 董靖宇、殷鹏贤等^[7-8]

通过流场软件对膛口流场进行了分析; 王振嵘等^[9]基于 2 维流场计算了炮口制退器的效率; 徐达等^[10]对炮口制退器侧孔超压值进行了研究。国外, Li P F 等^[12]对膛口装置附近的噪声做了详细研究。Chaturvedi 等^[13]通过研究过去 30 年的专利对膛口装置进行了探究。

1 数学模型

1.1 基本假设

由于膛口流场是伴随化学反应的复杂流场, 为便于后效期的计算, 对其进行简化, 数学模型采用如下假设^[14]:

- 1) 膛口流场气体无化学反应, 火药气体与外界气体为同一介质, 火药完全燃烧且流动是等熵的。
- 2) 假设膛口火药气体所形成的射流服从轴对称规律, 对称轴为膛线且膛线与地面对弹丸无影响。

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-09-20

作者简介: 薛滨(1997—), 男, 江苏人, 硕士, 从事火炮总体技术研究。E-mail: 1915375191@qq.com。

3) 为便于研究膛口装置的超压与噪声情况, 将弹丸出膛口到后效期阶段视为膛口流场全过程。

1.2 控制方程

基于连续性介质假设^[15], 2 维轴对称雷诺平均 Navier-Stokes 方程可表示为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + H = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial F_v}{\partial x} + \frac{1}{y^\delta} \frac{\partial y^\delta G_v}{\partial y} + H_v \right) \quad (1)$$

式中:

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e+p)u \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv + p \\ \rho v^2 \\ (e+p)v \end{bmatrix};$$

$$H = \frac{\delta}{y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e+p)v \end{bmatrix}; \quad F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + q_x \end{bmatrix}; \quad H_v = -\frac{\delta}{y} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_{\theta\theta} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$G_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + q_y \end{bmatrix}; \quad \left. \begin{aligned} \tau_{xx} &= -\frac{2\mu}{3} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{v}{y} \right] + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{yy} &= -\frac{2\mu}{3} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{v}{y} \right] + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{\theta\theta} &= 2\mu \frac{v}{y} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \circ$$

式中: ρ 、 p 、 u 、 v 和 Re 分别为密度、压强、 x 、 y 方向的平均速度和雷诺数; e 为单位体积总能量, $e = p/(\gamma-1) + \rho(u^2+v^2)/2$; γ 为气体比热比; $Re = \rho_0 u_0 D / \mu_0$, ρ_0 , u_0 , μ_0 均为射流中心入口参数, D 为膛口流场火炮口特征长度。计算忽略密度脉动项、压力脉动项和温度脉动项。系数 $\delta=0$ 为直角坐标系下的 2 维流动。粘性系数 μ 由层流粘性系数 μ_l 和湍流粘性系数 μ_t 组成。

2 计算模型及边界条件

2.1 膛口装置建模

计算模型采用一款新型多功能膛口装置。该膛口装置的腔室直径较大, 火药气体从膛口进入膛口装置时发生膨胀, 火药气体被分成 2 部分, 一部分向前经弹孔排出, 另一部分经侧孔的二次膨胀后排出, 最终在炮口一侧合并为一个巨大的冲击波^[16], 有效降低火炮的后坐动能。此外, 多功能膛口制退

器的特殊结构能有效降低气流的压力和速度及出口的秒流量, 使声音功率和膛口激波减弱, 从而达到消声的目的。膛口火药燃气经多次膨胀后压力与温度极大的降低, 经特殊的锥形装置导出后, 装置外筒屏蔽了火焰, 除正前方外, 外界看不到火焰。

多功能膛口装置的建模如图 1 所示, 该膛口装置采用不锈钢制造, 重量为 8.5 kg, 长度 120 mm, 腔室外开 8 排面积相同的圆形侧孔, 腔室最大外径为 88 mm, 每排侧孔孔径为 6 mm。

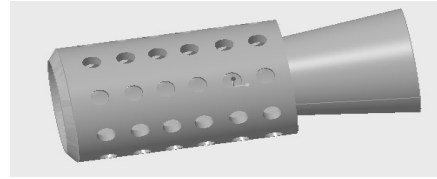


图 1 多功能膛口装置建模

2.2 边界条件

为使气流能在大气中充分膨胀, 并容纳监测点, 取炮口前方 3 m, 炮口后方 2.5 m, 高度 3 m 建立流场区域。由于膛口装置内部流场较为复杂, 对膛口装置附近采用网格重建的方法, 使之适合解决复杂的边界问题^[17]。选用 2 维轴对称模型, 压力求解基, 将火药气体简化为理想气体^[18], 采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型。将弹丸出炮口时刻设为初始时刻, 在 Fluent 中采用 patch 方法初始化膛内压力、温度等。

2.3 弹道计算

根据已知的内弹道参数, 建立 Matlab 程序求解其内弹道数据及后效期数据, 得到火炮的压力时间与速度时间如图 2、3 所示。

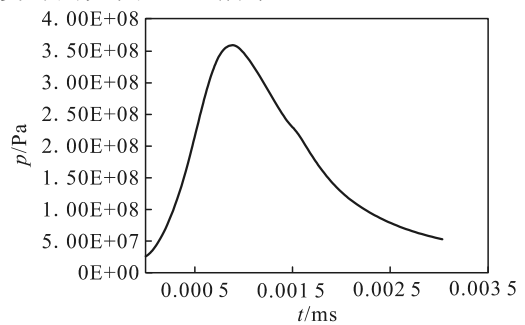


图 2 压力随时间变化曲线

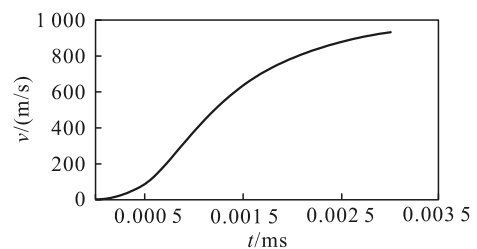


图 3 速度随时间变化曲线

由上图可知, 截短火炮身管后弹丸出膛口速度为 933 m/s, 膛内最大压力为 370 MPa。

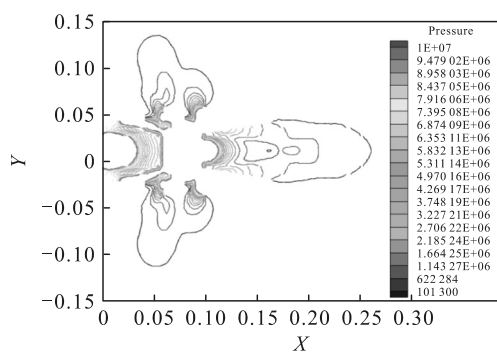
3 流场仿真结果与分析

分别对不含膛口装置和含膛口装置的膛口流场进行仿真。仿真总时间为 10 ms。这段时间可观察到含膛口装置膛口流场的形成、发展与消亡, 并设置相应的监测点, 完成监测点超压与噪声的监测。

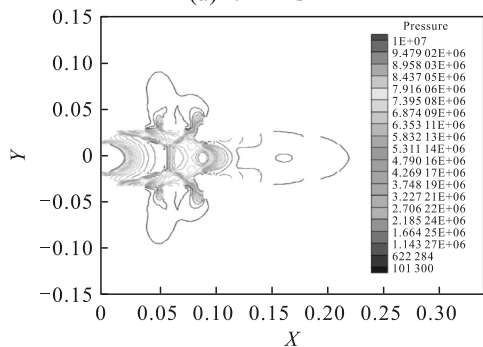
3.1 膛口流场发展过程研究

为能清晰地对比膛口瓶装激波、斜激波系, 在显示压力等值线时, 将压强区间统一为 101 300~10 000 000 Pa, 并将压力区间等分 20 份来显示压力等值线。1 ms 时炮口压力等值线如图 4(a)所示, 此时为瓶装激波形成的前期阶段, 只能观察到中央弹孔和两侧孔处流出的火药气体流场。因为侧孔之间的间隔较小, 每个侧孔之间形成的激波相互挤压, 形成清晰的激波群。由压力等值线图可见, 靠近身管侧孔的激波长度最长, 由此可得出靠近膛口的侧孔为多功能膛口装置的主要制退效率孔^[19]。

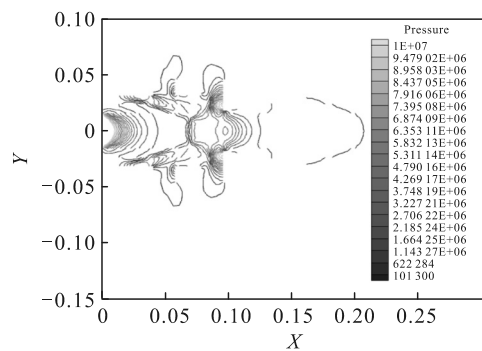
3 ms 压力等值线如图 4(b)所示, 此时中央弹孔前已经形成较为完整的瓶装激波, 同时上线两侧侧孔射流交汇, 受到上方常压大气的挤压, 指向炮口后方。如图 4(c)所示, 当后期为 5 ms 时, 身管内的射流为瓶装激波提供的能量在逐渐减小, 马赫盘的直径变小, 膛口流场的整体压力减小。



(a) $t=1$ ms



(b) $t=3$ ms



(c) $t=5$ ms

图 4 各时段压力等值线

3.2 膛口装置制退效率研究

多功能膛口装置的设计重点是制退效率的提高。通过改变膛口装置的外形可增大膛口装置的制退效率, 但是超压值就会随之增大, 因此平衡制退效率和超压值十分重要。多功能膛口装置受力如图 5 所示, 随着气体从膛口流出, 多功能膛口装置腔室内压力不断上升, 炮口制退器轴向力不断增加, 当膛内压力流到第 1 个等效侧孔时, 膛内压力大幅降低, 炮膛合力降低。当腔室内气流达到前挡板时, 膛口制退器受轴向力增加。在 0.002 2 s 时, 腔室内气流通过多功能膛口装置的锥形出口, 向 X 轴负方向产生了一个反向推力, 造成膛口装置受力的一个突降。

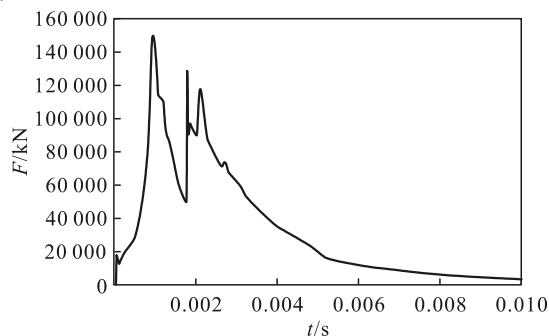


图 5 多功能膛口装置受力

膛口装置的效率定义公式为:

$$\eta = -\frac{E_0 - E_1}{E_0} \times 100\% = \frac{m_0 W_{\max 0}^2 - m_1 W_{\max 1}^2}{m_0 W_{\max 0}^2} \times 100\% \quad (2)$$

由膛口装置的效率公式可求得该多功能膛口装置的效率为 70%。

3.3 膛口超压值研究

由于多功能膛口装置的侧孔形状较为复杂, 对其进行相应的等效。带有多功能膛口装置的膛口流场较普通的膛口流场更为复杂。在无膛口装置时, 炮口冲击波由一个能量球组成, 能够在短时间内提

高压力。在由膛口装置时，其侧孔激波由中央弹孔和两侧侧孔激波迭代而成，且冲击波传播越远，对流场的扰动越小。

由于该火炮放置在无人战车上，考虑到步兵与其作战协同，因此以水平线上膛口装置出口点为基点， 165° 为基角，对 1.0, 1.5, 2.0 处进行相应的超压值监测，位置如图 6 所示。

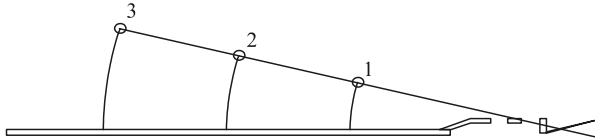
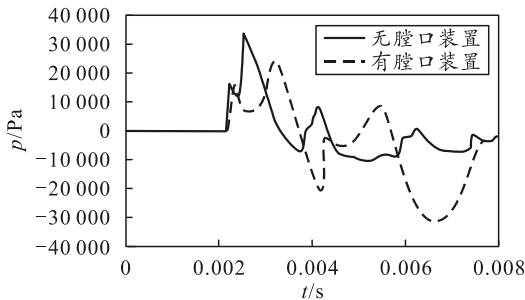
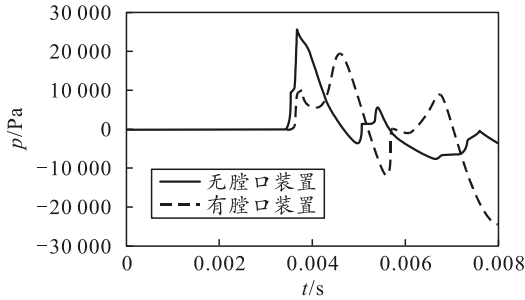


图 6 超压点位置

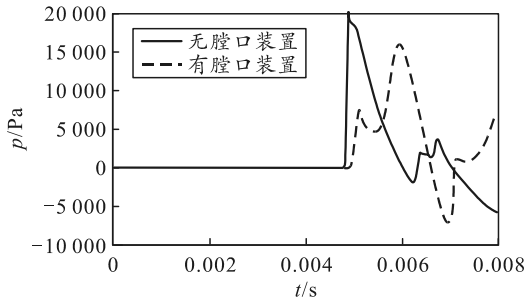
如图 7(a)所示，在基角 165° 距离 1 m 且有膛口装置时， r_1 点超压值为 33 553.89，无膛口装置时超压值为 40 701.36。如图 7(b)所示，在基角 165° 距离 1.5 m 且有膛口装置时， r_1 点超压值为 19 325.48，无膛口装置时超压值为 25 597.48。如图 7(c)所示，在基角 165° 距离 2 m 且有膛口装置时， r_1 点超压值为 16 020.95，无膛口装置时超压值为 20 174.16。



(a) 165° 1 m 处超压



(b) 165° 1.5 m 处超压



(c) 165° 2 m 处超压

图 7 超压点位置

根据计算可知： r_1 点超压下降率为 17.5%； r_2 点超压下降率为 24.5%； r_3 点超压下降率为 20.58%。计算对比了多点的超压率，为评估冲击波对炮口周围其他设备和部件的影响提供了重要的参考^[20]。

3.4 膛口噪声研究

膛内气体膨胀通过中央弹孔和侧孔均会产生噪声，且喷射处的气体属于脉动噪声，具有声压高、频率低和时间短的特点。采用计算流体力学耦合计算气动声学方法对射流噪声做了初步研究，在近场通过 LES 大涡模拟方法计算射流流场，通过提取声源面的流场变量，利用 FW-H 模型计算声压。

设监测点的位置在 165° 距离 2 m 处，有膛口装置时，测得该处声压变化如图 8 所示。

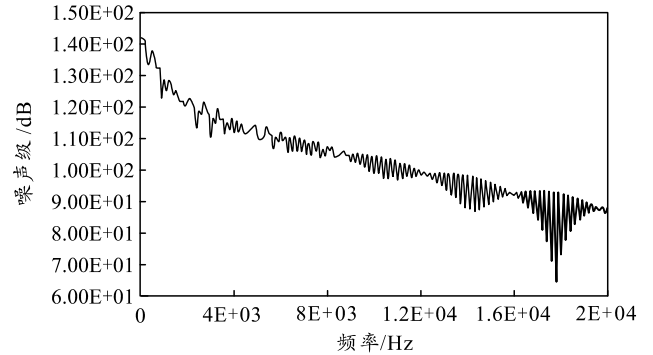


图 8 有膛口装置噪声变化曲线

无膛口装置时，测得该处声压变化如图 9 所示。

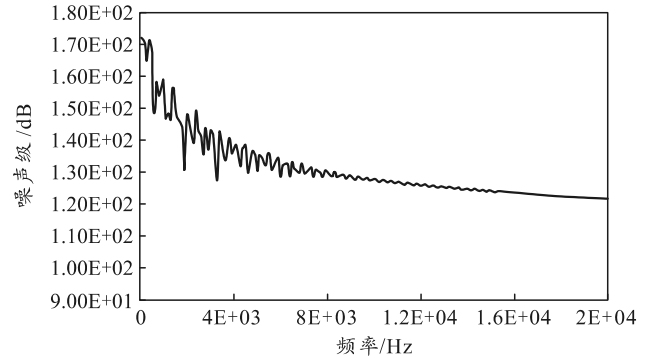


图 9 无膛口装置噪声变化曲线

根据图 8、9 可知，无膛口制退器时噪声最大值为 174 dB，有膛口制退器时噪声最大值为 143 dB，可见此多功能膛口制退器降噪率为 17.8%。

4 实验结果与对比

对此多功能膛口装置进行实验验证，测得膛口火焰长度为 0.8 m，夜晚开火最大观察距离为 800 m，后坐力降低率为 60%，降噪率为 20%，实测 165° 距离 2 m 处噪声为 145 dB，膛口装置热率降低 70%。将实验数据与计算数据列表对比结果如表 1 所示。

表 1 仿真结果与实验数据对比 %

结果分析	制退效率	降压率	降噪率
计算值	70.0	20.6	17.8
实验值	60.0	18.0	20.0
误差	14.0	12.6	11.0

由上表可知, 计算值与实验值较为吻合, 可作为设计参考。

5 结论

根据 Fluent 对多功能膛口装置进行分析并与实验验证可得:

1) 该装置主要功能为制退, 同时兼具消音、消焰的功能, 消除了单一功能膛口装置因一种负效应被减弱而其他负效应加剧的严重缺点, 符合现代化战争的需要。

2) 该装置有利于全面达到战术技术指标的要求, 有利于各种矛盾的平衡。

3) 经过降压与消音后发现, 在连续射击时, 预测炮手位置的声压级仍超出了可允许的声压值, 会对该位置人员造成伤害, 在该位置的人员应该佩戴防护耳罩等安全性装置。

参考文献:

- [1] LIU J B, HUANG H S, ZHU W F, et al. Research on high efficiency muzzle brake technology of small caliber automatic gun[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1507: 032003.
- [2] WANG Z. Flow Field Simulation and Efficiency Calculation of Muzzle Brake Based on ANSYS Fluent[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 261: 02022.
- [3] 李鸿志, 姜孝海, 王杨, 等. 中间弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 75-76.
- [4] 刘嘉鑫, 袁军堂, 汪振华, 等. 新型钛合金炮口制退器结构设计与分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(1): 32-35.
- [5] 葛苗冉, 袁军堂, 汪振华, 等. 基于正交试验的炮口制退器结构设计与性能分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(12): 160-164.
- [6] 吴喜富, 郑建国. 基于流固耦合的复合结构炮口制退器强度分析[J]. 兵工自动化, 2016, 35(7): 19-22.
- [7] 董靖宇, 李志刚, 于存贵. 基于动网格的炮口制退器两相流场数值模拟[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 65-68.
- [8] 殷鹏贤, 赵俊利, 李立州. 网格对炮口制退器仿真计算的影响[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(4): 38-42.
- [9] 王振嵘, 高跃飞, 刘国志, 等. 基于二维流场的炮口制退器效率计算[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 211-215, 221.
- [10] 徐达, 罗业, 张杰, 等. 侧孔参数对炮口制退器流场结构及超压的影响研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(4): 32-37, 69.
- [11] LI P F, ZHANG X B. Numerical research on adverse effect of muzzle flow formed by muzzle brake considering secondary combustion[J]. Defence Technology, 2020(prepublish).
- [12] ZHAO X Y, ZHOU K D, HE L, et al. Numerical Simulation and Experiment on Impulse Noise in a Small Caliber Rifle with Muzzle Brake[J]. Shock and Vibration, 2019(4): 1-12.
- [13] CHATURVEDI E, DWIVEDI R K. Review of various designs and material research studies of muzzle brakes with a proposal of an improved design[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(9): 18681-18688.
- [14] 王美懿, 王浩. 超大口径平衡炮膛口流场数值仿真与流动特性分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38(2): 15-19.
- [15] 廖振强, 邱明. 自动武器气体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 13-15.
- [16] 余海伟, 袁军堂, 汪振华, 等. 新型结构炮口制退器的膛口冲击波数值研究与性能分析[J]. 高压物理学报, 2020, 34(6): 103-113.
- [17] WANG L, XUE R, CAI N, et al. Application of Three-Dimensional Meshless Method in Muzzle Flow Field of Projectile with Large Displacement[J]. International Journal of Heat and Technology, 2021, 39(1): 41-50.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] CHEN Q K, LI P F, ZHOU Q, et al. Research on the Measurement of Muzzle Shock Wave Pressure Field for a Naval Gun[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 791(1): 1-9.