

武器装备

基于 CFD 仿真的炮口制退器 性能影响因素研究

杨丽*, 徐笑阳

(沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159)

摘要: **目的** 在降低火炮后坐力的同时, 保证炮手区域超压和温度符合要求。**方法** 利用流体仿真软件进行炮口流场的数值模拟, 对制退器性能影响因素进行仿真分析。根据分析结果, 得到改进后的制退器模型, 并进行仿真和试验对比。**结果** 加装侧孔外反射挡板和侧孔倾斜对制退器性能的影响较大, 并随角度的变化而变化, 加装吹孔能有效降低炮后超压和温度。改进后, 制退器的效率提升 8.33%, 炮后超压值平均降低 44.10 kPa, 炮后温度值平均降低 358.28 K。**结论** 改进后的制退器具有更高的制退效率以及较低的炮后超压值和温度值。

关键词: 炮口制退器; 炮口流场; 制退器效率; 炮口冲击波; 数值模拟; 结构设计; 声发射

中图分类号: TJ303+.2; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)03-0001-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.03.001

Influencing Factors of Muzzle Brake Performance Based on CFD Simulation

YANG Li*, XU Xiaoyang

(College of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the recoil of the gun while ensuring that the overpressure and temperature in the gunner's area meet the requirements. A numerical simulation of the muzzle flow field was carried out by fluid simulation software. The influencing factors of brake performance were simulated and analyzed. According to the analysis results, the improved brake model was obtained, and the simulation and experiment were compared. The results showed that the performance of the brake was most affected by the side hole external reflection baffle and the side hole inclination, and this impact varied with changes in the angles. The overpressure and temperature behind the muzzle were reduced effectively by installing the blow hole. The efficiency of the improved brake was increased by 8.33%. The overpressure behind the muzzle was decreased by 44.10 kPa on average. And the temperature behind the muzzle was decreased by 358.28 K on average. It is proved that the improved brake has higher efficiency and lower overpressure and temperature behind the muzzle.

KEY WORDS: muzzle brake; muzzle flow field; muzzle brake efficiency; muzzle shock wave; numerical simulation; structural design; acoustic emission

收稿日期: 2023-12-11; 修订日期: 2024-02-20

Received: 2023-12-11; Revised: 2024-02-20

基金项目: 辽宁省高等学校创新人才支持计划 (LR2019060)

Fund: Liaoning Provincial Higher Education Institutions Innovative Talent Support Plan (LR2019060)

引文格式: 杨丽, 徐笑阳. 基于 CFD 仿真的炮口制退器性能影响因素研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(3): 1-10.

YANG Li, XU Xiaoyang. Influencing Factors of Muzzle Brake Performance Based on CFD Simulation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(3): 1-10.

*通信作者 (Corresponding author)

炮口制退器对于火炮来说至关重要,其主要作用是通过改变一部分火药燃气的流动方向,从而消耗后坐动能,使炮架受到的作用力减小^[1]。评价炮口制退器性能的主要参数有制退效率、炮后超压值和炮后温度值,其中,制退效率与炮后超压值、炮后温度值往往呈正比关系^[2]。因此,在对炮口制退器的性能影响因素进行分析时,有必要权衡这3个参数之间的增减,在提高火炮作战能力的同时,降低制退器对炮手和其他设备的危害^[3-5]。

相比国外对炮口制退器的研究,国内的研究稍有落后,但近几年发展迅速,涌现出大量科研成果^[6-8]。Sherif等^[3]研究了某狙击步枪的最佳制退效率、制退力和反冲力,目的是获得制退器的侧面开口、倾斜角度和腔室数量的最佳参数,以提高制退效率,从而降低武器的后坐力。葛苗冉等^[9]使用流场仿真方法,研究了多个炮口制退器结构参数变化对制退效率和冲击波的影响,为炮口制退器设计提供了重要的数据支持。陈艺元^[10]结合转管武器发射系统的实际特点,研究了不同制退结构方案对炮口超压流场的影响,最终提出了适用于转管武器发射系统的制退器布局方案,包括一体式和组合式。对于制退器性能的评价标准,大多数学者考虑的都是制退效率和炮后超压值这2个参数,在提高制退效率的同时,保证炮后超压值不变或减小,研究模型逐渐从二维升级到三维,研究方法也逐渐完善。然而,很少有学者考虑炮后温度值这一评价指标。李鸿志等^[11]提出了新的结构设计原则,为炮口制退器的优化提供了方向,随后进行了对比试验,研究了不同类型的炮口制退器,以更全面地了解其性能差异。李伟^[12]在基于二维炮口流场计算的基础上,通过分析多种结构参数,进行了效率对比,并结合结构比较,以综合性能作为评价标准得出最终研究结果。对于制退器结构的改变,大多数学者的研究都是基于制退器某一特定部位的变化进行多角度分析,理论基础已经稳固,但仅有少数学者的研究是基于某一制退器整体结构变化,同时也缺少对炮后温度值这一评价指标的分析。

本文应用计算流体动力学仿真软件进行炮口流场的数值模拟,基于制退器整体结构,选择加装侧孔外反射挡板倾角 0° 、加装侧孔外反射挡板倾角 15° 、中间挡板倾斜、第二腔室加装辅助挡板、侧孔倾斜、第二腔室前挡板倾斜和加装倾斜吹孔这7种方案进行仿真分析,得到不同结构参数对制退效率、炮后超压值和炮后温度值这3个指标的影响。根据分析结果,得到改进后的制退器模型。通过仿真并结合试验对比发现,改进后的制退器具有更高的制退效率,以及较低的炮后超压值和炮后温度值。

1 炮口制退器有限元建模仿真

1.1 不同影响因素下的模型选择与三维建模

以某105 mm火炮为应用背景,根据炮口制退器

的作用原理和设计准则^[13],在原始制退器的基础上,通过加装侧孔外反射挡板,改变外反射挡板倾角、侧孔倾角、中间挡板和第二腔室前挡板倾角,改变侧孔面积、中央弹孔面积,改变腔室容积、制退器长度和壁厚,在原有腔室内加装辅助挡板等操作,均可对制退器性能产生影响。经分析,对于倾斜角度的改变不宜过大,过大将会减小挡板的有效面积,同时影响制退器结构刚强度和加工难易程度;对于侧孔面积和中央弹孔面积的大小,在火炮设计手册中有具体的公式对其取值范围进行限制,取最大值或最小值对制退器性能的影响并不大;对于改变腔室容积、制退器长度和壁厚,这种方法对原始制退器的结构改变过大,不确定性因素过多,同时也大幅增加制退器质量,改变火炮重心位置,对制退器性能产生不利影响。综上所述,选择加装侧孔外反射挡板倾角 0° 、加装侧孔外反射挡板倾角 15° 、中间挡板倾斜、第二腔室加装辅助挡板、侧孔倾斜和第二腔室前挡板倾斜这6种方案进行深入分析。

分别建立这6种方案的三维实体模型,通过对膛腔和药室等结构的简化^[14-15],得到身管长度为4 460 mm,火炮口径为105 mm。膛外计算区域选为炮口制退器前方1 906 mm,炮口制退器后方1 050 mm,半径为800 mm的圆柱形区域。利用三维建模软件生成模型,并进行模型修复优化,优化不重要结构、锐边和尖角等^[16-19]。为简化计算,取1/4计算区域进行计算,建模如图1所示。由图1可以看出,模型分为膛内外2个计算区域。坐标原点设在炮口中心位置,由炮口远离制退器的方向设为x轴的正方向^[20]。

1.2 制退器的网格划分及求解设置

选择有限元分析系统中的“流体流动”模块(带有网格划分功能),进入网格划分界面。炮口附近网格相对密集,远场区域网格相对稀疏^[21]。采用流体网格划分功能中的“马赛克”网格技术,有效降低网格总体数量与求解时间,提高网格质量。为方便进行性能分析比较,数值计算开始之前,在流场中设定了远近3个监测点(如图2所示),利用这3个点对制退器后方气流所产生的超压和温度进行实时监测^[22]。

依据该火炮给出的性能参数^[23],并结合内弹道理论^[10],根据有限元模型坐标位置,得出速度 v 、温度 T 和压强 P 在膛内的分布方程:

$$\begin{cases} v_x = -\left(900 - 900 \frac{x}{4.46}\right) \\ T_x = 1877 + 333.4 \left(\frac{x}{4.46}\right)^2 \\ p_x = 39.3 + 6.98 \left(\frac{x}{4.46}\right)^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_x 、 T_x 和 p_x 分别为 x 坐标点处火药燃气的速度、温度和压强; x 为对应横坐标数值。

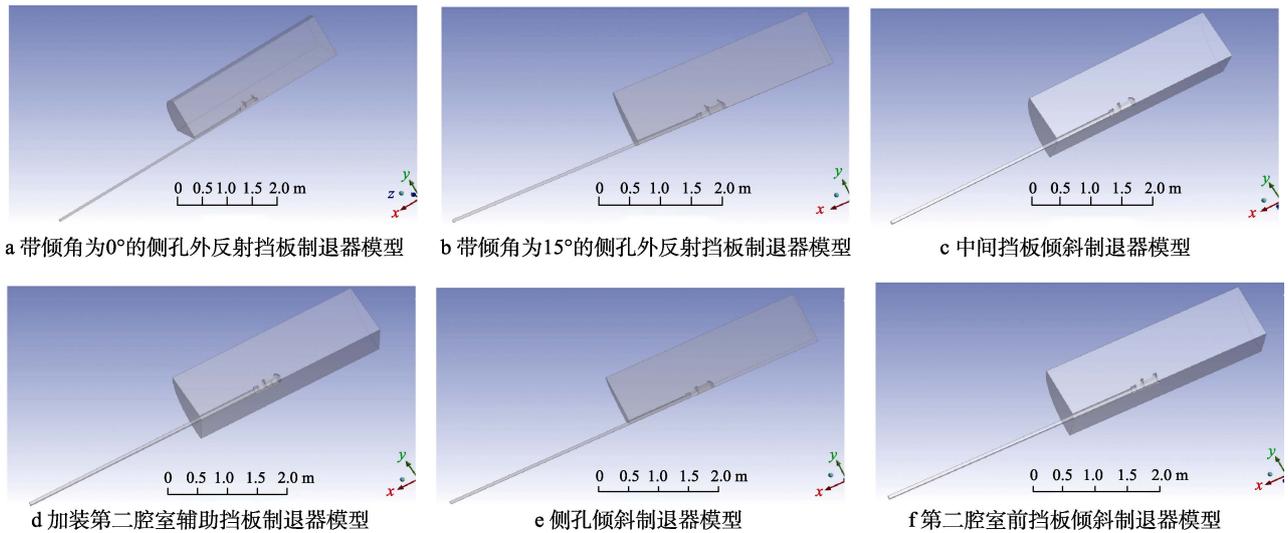


图 1 不同影响因素下的三维模型

Fig.1 Three dimensional model under different influencing factors: a) model of brake with side baffles with an inclination angle of 0°; b) model of brake with side baffles with an inclination angle of 15°; c) model of brake with an inclined center baffle; d) model of brake with a second chamber auxiliary baffle; e) model of brake with an inclined side hole; f) model of brake recessed in the front baffle of the second chamber

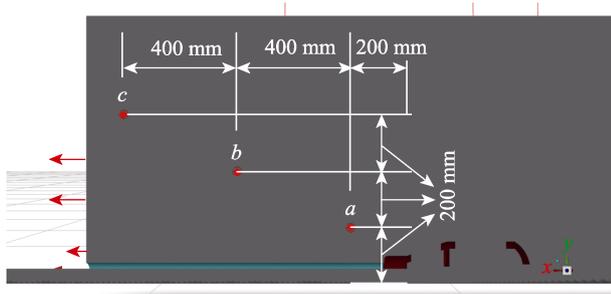


图 2 监测点 a、b、c 分布

Fig.2 Distribution map of monitoring points a, b and c

通过 UDF (User Defined Functions) 编写程序, 将方程 (1) 赋给膛内火药气体, 膛外区域以大气压条件进行初始化。求解器类型选择“密度基”, 时间选择“瞬态”, 模型选择 Spalart-Allmaras 方程模型, 这种模型专门为涉及壁面有界流动的航空航天外流场而设计的, 其单方程特性能有效减少计算时间, 提高计算效率。膛外区域材料设定为空气, 膛内区域材料设定为火药气体^[24-25]。在该例子中, 将火药气体密度选为“理想气体”, 并通过火药力对其定压比热容 C_p 进行求解, 得 $C_p=1\ 491.2\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 火药气体的黏度和热导率采用默认值。定义 2 个 Symmetry (对称面), 定义外流场区域 3 个面为 Pressure-outlet (压力出口), 压力值设置为标准大气压 (101 325 Pa)。各监测点监测信息选为“压力”和“温度”, 并对身管和炮口制退器设置轴向力监测。库朗数设为 0.5, 时间步长设为 0.01 ms。

2 制退器性能影响因素分析

2.1 制退器效率计算方法

通过仿真得到制退器所受平均轴向力 $\overline{F_N}$ 和身管

所受平均轴向力 $\overline{F_{pt}}$, 进而计算冲量特征量 χ :

$$\chi = \frac{\overline{F_{pt}} - \overline{F_N}}{\overline{F_{pt}}} \quad (2)$$

根据火炮后效期理论, 冲量特征量可表示为^[26]:

$$\chi = \frac{\beta_T - 0.5}{\beta - 0.5} \quad (3)$$

式中: β 和 β_T 分别为火炮不带和带制退器时的火药气体作用系数。

采用适用性广的理论计算公式准确地计算 β 值^[27]:

$$\beta = 0.5 + \frac{4-k}{2k} \sqrt{\frac{1}{1+\frac{3-k}{6}k}} \sqrt{k \frac{p_g}{\rho_g} \frac{1}{v_0}} \quad (4)$$

式中: k 为气体比热比; p_g 和 ρ_g 分别为后效期开始时刻膛内火药燃气的平均压强和平均密度; v_0 为弹丸飞离炮口时刻的速度。

由式 (2) ~ (4) 可求得 β_T , 最后通过式 (5) 求得炮口制退器效率:

$$\eta_T = 1 - \left(\frac{m + \beta_T \omega}{m + \beta \omega} \right)^2 \quad (5)$$

式中: m 为弹丸质量; ω 为装药量。

2.2 不同结构效率对比

不同结构的身管和炮口制退器的受力随时间的变化曲线如图 3 所示。根据 2.1 节制退器效率计算方法和图 3 所得数据, k 取 1.33, p_g 取 $4 \times 10^7\ \text{Pa}$, m 取值为 13 kg, 计算结果见表 1。从表 1 可以看出, 在原始制退器侧孔外加反射挡板是提高效率的有效手段之一, 与倾角为 0° 时的侧孔外反射挡板相比, 有一定倾角的侧孔外反射挡板对火药气体的阻碍作用更明显, 提供给制退器的轴向力也更大, 效率更高。中

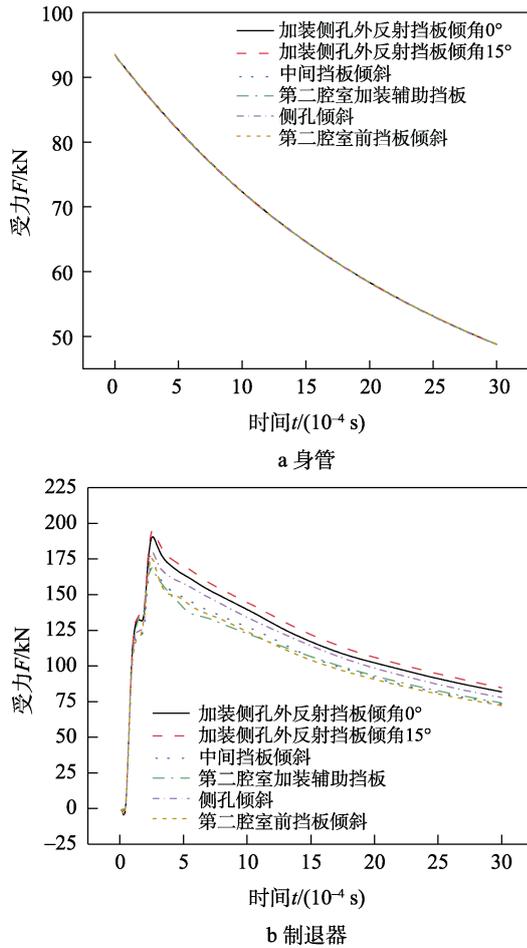


图3 1/4不同结构的身管和制退器受力随时间变化曲线
Fig.3 Curve of force change of 1/4 pipe and brake with different structure over time: a) tubes; b) brakes

表1 制退器不同结构效率对比
Tab.1 Comparison of efficiency of brakes with different structures

制退器类型	效率/%
原始制退器	40.01
侧挡板倾角 0°时的制退器	44.36
侧挡板倾角 15°时的制退器	48.69
中间挡板倾斜时的制退器	40.19
第二腔室加装辅助挡板时的制退器	39.71
侧孔倾斜时的制退器	42.56
第二腔室前挡板倾斜时的制退器	40.35

间挡板倾斜对于效率的提升作用并不明显,同时中间挡板倾斜对于制退器中间结构刚强度的影响较大,使连接部分的体积变小,给加工也带来很多困难。加装第二腔室辅助挡板的制退器相比原制退器的效率降低,这是由于改变了原始火药气体流向,使原始结构起不到充分的制退作用。侧孔倾斜也是提高效率的有效手段之一,且这种方法不需要加装额外的结构,不影响制退器整体质量。第二腔室前挡板倾斜对于效率的提升作用并不明显,这是因为第二腔室前挡板内凹

后,腔室体积变小,前挡板内凹带来的轴向力增加与腔室体积减小带来的轴向力减小相互抵消,和中间挡板倾斜一样,第二腔室前挡板倾斜给结构刚强度和加工都带来很大影响。

2.3 不同结构超压值对比

通过对不同结构相同位置的监测点进行超压监测,得到各监测点超压值随时间的变化曲线如图4所示。可以看出,加装倾角为 0°的侧孔外反射挡板后,3点的超压值都同比例上升。当外反射挡板倾角变为

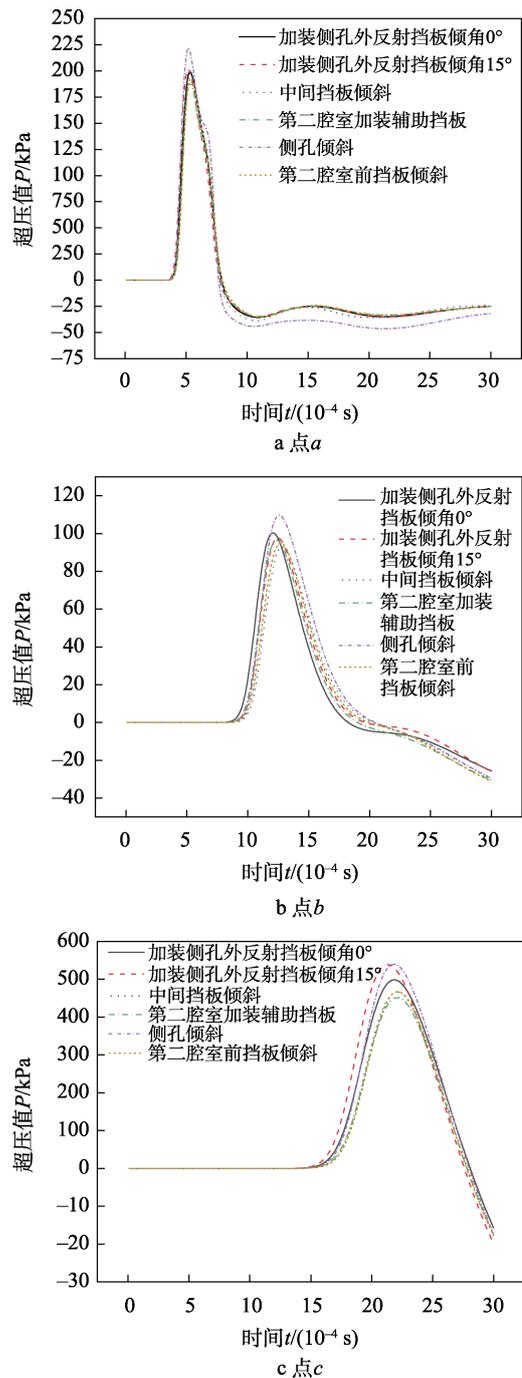


图4 不同结构监测点超压值曲线
Fig.4 Overpressure curves of monitoring points with different structures: a) points a; b) points b; c) points c

15°时, 相比倾角为 0°时的值小幅上涨, 但 *b* 点的值小幅下降。中间挡板倾斜后, *a* 点的超压值相比原制退器上升, *b* 点稍有下降, *c* 点几乎不变。第二腔室加装辅助挡板后, 除 *b* 点超压值有小幅上升外, *a* 点和 *c* 点都小幅下降。这是由于辅助挡板的添加, 影响了原有制退器结构的作用。侧孔倾斜后, 由于侧孔倾斜方向向后, 所以 *a*、*b*、*c* 这 3 点的超压值都有大幅上升。第二腔室前挡板倾斜后, 对 *a*、*b*、*c* 这 3 点超压值的影响不大。

2.4 不同结构温度值对比

通过对不同结构相同位置的监测点进行温度监测, 得到各监测点温度值随时间变化曲线如图 5 所示。可以看出, 加装倾角为 0°的侧孔外反射挡板后, 3 点的温度值都同比例小幅上升。当倾角变为 15°时, *a*、*c* 点温度值的上升幅度与加装倾角为 0°的侧孔外反射挡板模型的上升幅度相同, 但 *b* 点的温度值明显下降, 这与 *b* 点的超压值变化情况相似。中间挡板倾斜后, *a*、*b* 点温度明显上升, 这是由倾斜的中间挡板将灼热的火药气体导向后方造成的。第二腔室加装辅助挡板后, *a*、*c* 点温度值有小幅减小的趋势, 整体变化不明显。侧孔倾斜后的制退器, *a* 点和 *b* 点的温度值相比其他几种情况明显上升, 尤其是 *b* 点温度上升 260 °C。这是由于 *b* 点与倾斜侧孔中心点的连线正好平行于侧孔倾斜方向, 但过了 *b* 点后, *c* 点的温度变化基本恢复正常, 所以炮手和重要设备的布置要避免与侧孔倾斜方向的中心线共线。第二腔室前挡板倾斜后的制退器, *a*、*b*、*c* 点的温度值变化都不大。

3 制退器结构优化

3.1 结构选择

综合分析几种模型中的炮口制退器效率、监测点温度值和监测点超压值 3 个指标后, 采用侧孔倾斜的同时, 加装倾角为 15°的侧孔外反射挡板, 得到改进后的结构模型。然而, 效率提升带来的超压值和温度值上涨不能忽略^[9,28]。为了减小炮后超压值和温度值, 在改进后的制退器与身管连接部分增加一组倾斜吹孔, 吹孔的几何轴线与腔室轴线之间的夹角为 105°, 如图 6 所示。

3.2 仿真分析

对改进后的制退器进行网格划分, 如图 7 所示。用同样的方法仿真分析后得到三维条件下 1.2 ms 时, 无吹孔和倾斜吹孔 2 种情况下的速度和温度云图, 如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 高速、高温的火药气体从倾斜吹孔喷出, 形成斜向前的射流, 对侧孔产生的倾斜向后的射流产生干扰作用。因此, 速度云图和

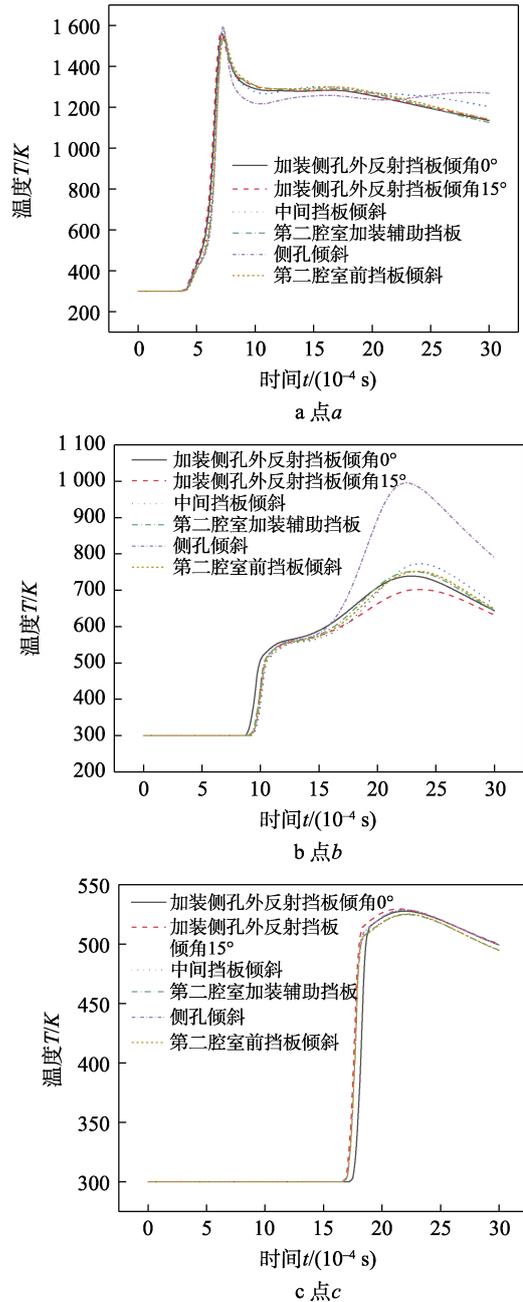


图 5 不同结构监测点温度值曲线
Fig.5 Temperature curves of monitoring points with different structures: a) points a; b) points b; c) points c

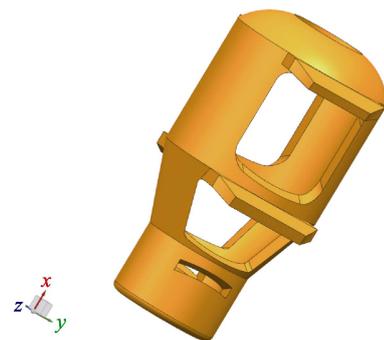


图 6 改进后制退器外观
Fig.6 Appearance of the improved brake

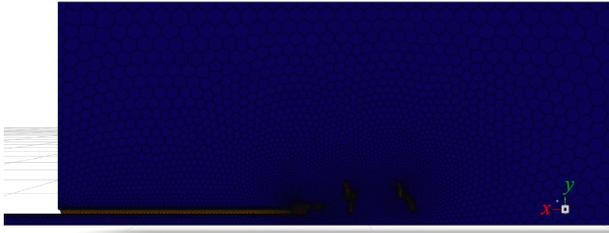


图7 改进后制退器流场网格
Fig.7 Flow field grid of the improved brake

温度云图向炮口前方倾斜的趋势明显,使炮口后方超压区和超温区整体向前移动,有效降低了炮后的超压和温度。

监测点 *a*、*b*、*c* 的超压值和温度值随时间的变化曲线如图 9 所示。1/4 身管和 1/4 炮口制退器所受轴向力随时间的变化曲线如图 10 所示。根据 2.1 节制退器效率计算方法和图 10 所得数据,最终求得改进后制退器的 η_T 为 48.34%。

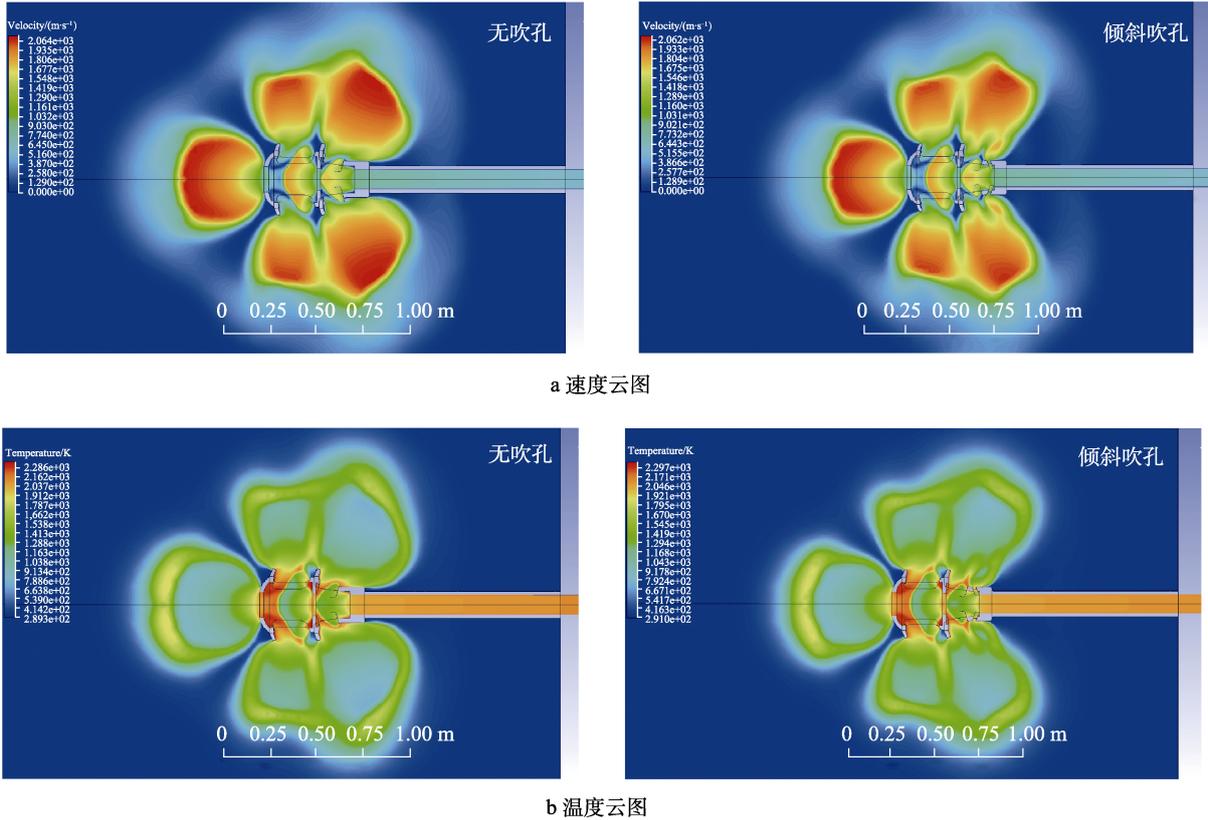


图8 无吹孔和倾斜吹孔2种情况流场对比

Fig.8 Comparison diagram of flow field under two conditions without blowing hole and with inclined blowing hole:
a) speed diagram; b) temperature diagram

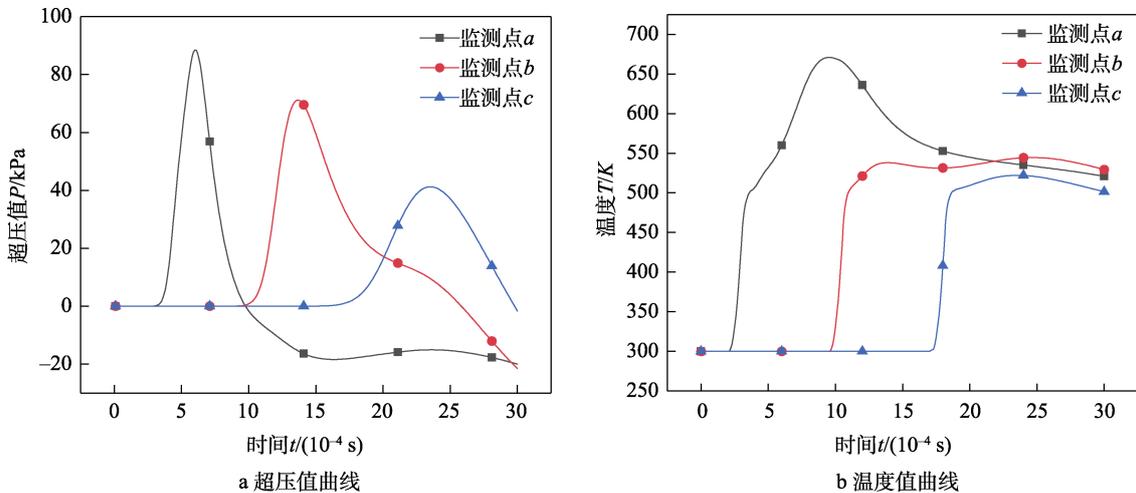


图9 改进后制退器监测点曲线

Fig.9 Monitoring point curve of improved brake: a) overpressure curve; b) temperature curve

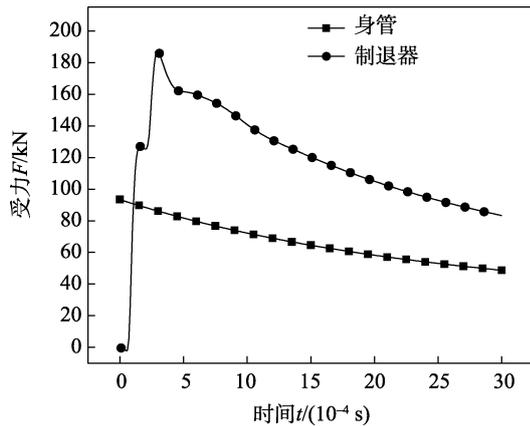


图 10 身管和制退器受力随时间变化曲线
Fig.10 Curve of stress on pipe and brake over time

改进前后的制退器效率、监测点最大超压值和最大温度值见表 2~4。从表 2 可以看出,改进后的制退器效率上升明显,比原始制退器提升 8.33%。从表 3 可以看出,改进后,制退器 a 点的超压值下降最为明显, b 点其次, c 点最小,经计算,炮后超压值平均降低 44.10 kPa。从表 4 可以看出,改进后,制退器 a、b 点的温度值均有下降, a 点下降最为明显, b 点其次, c 点几乎不变,经计算,炮后温度值平均降低 358.28 K。综合分析表 2~4 可得,相比原始制退器,改进后的制退器效率提高,炮后超压值和温度值均降低,这说明制退器结构的改变使其性能得到整体提升。

表 2 改进前后制退器效率对比
Tab.2 Comparison of brake efficiency before and after improvement

制退器类型	效率/%
原始	40.01
改进后	48.34

表 3 改进前后制退器最大超压值对比
Tab.3 Comparison of maximum overpressure of brake before and after improvement

制退器类型	kPa		
	监测点 a	监测点 b	监测点 c
原始	192.69	94.37	46.09
改进后	88.46	71.17	41.23

表 4 改进前后制退器最大温度值对比
Tab.4 Comparison of maximum temperature of brake before and after improvement

制退器类型	K		
	监测点 a	监测点 b	监测点 c
原始	1 552.35	734.84	525.31
改进后	670.90	544.58	522.17

4 试验验证

4.1 试件制备

试件材料选用 PCrNi₃MoVA 钢,根据万能试验机

的型号和前文仿真结果,设计试验所用试件的形状,简化制出原始制退器试件和改进后制退器试件,分别如图 11 和图 12 所示。



a 第一腔室



b 第二腔室

图 11 原始制退器试件实物
Fig.11 Physical picture of the original muzzle brake test piece: a) first chamber; b) second chamber



a 第一腔室



b 第二腔室

图 12 改进后制退器试件实物
Fig.12 Physical picture of the improved muzzle brake test piece: a) first chamber; b) second chamber

4.2 试验流程

选用 UTM5105SLXY 电子万能试验机对制退器试件进行拉伸,利用声发射设备进行数据采集。测试系统实物和试件夹装示意图分别如图 13 和图 14 所示。



图 13 测试系统实物
Fig.13 Physical picture of test system

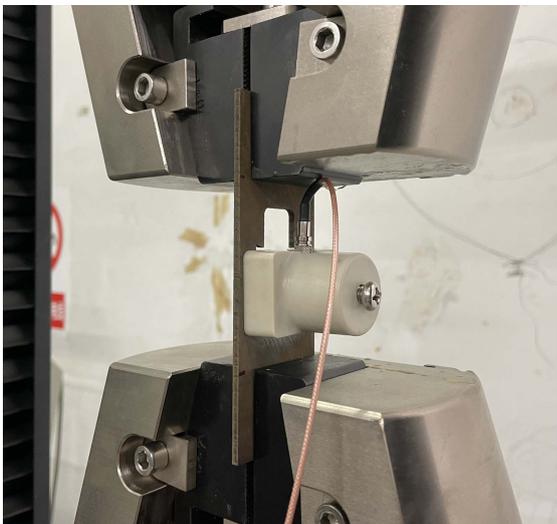


图 14 万能试验机夹装
Fig.14 Universal testing machine clamping diagram

4.3 结果与分析

通过声发射设备监测得到的幅度和能量来描述制退器试件所受轴向力大小,从而依据 2.1 节所述制退器效率计算方法,对比验证不同结构制退器的效率。改进前后制退器试件的幅度和能量对比分别如图 15 和图 16 所示。可以看出,原始制退器幅度和能量最大值分别为 6 898.9 dB 和 6.29×10^5 K/J,平均值分别为 5 947.5 dB 和 $9 944.5$ K/J;改进后制退器幅度和能量最大值分别为 9 949.8 dB 和 1.27×10^6 K/J,平均值分别为 8 869.5 dB 和 $15 429.8$ K/J。改进后制退器的幅度和能量的最大值和平均值均大于原始制退器,进而得出改进后制退器所受轴向力更大,最后证明改进后的制退器效率大于原始制退器,与仿真结果一致。

综上所述,最终确定该火炮炮口制退器的结构为改进后的制退器,仿真和试验得出改进后的制退器具有更高的制退效率以及较低的炮后超压值和炮后温度值。

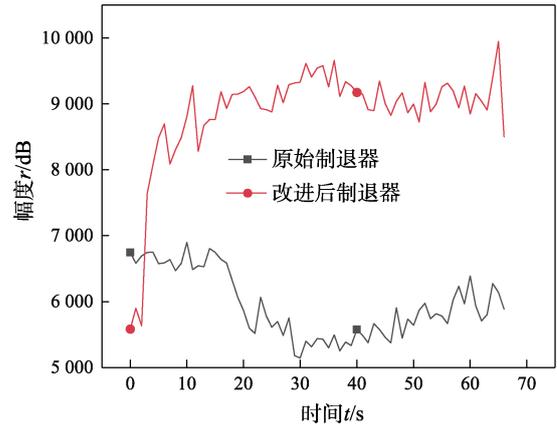


图 15 幅度时间历程
Fig.15 Amplitude time history graph

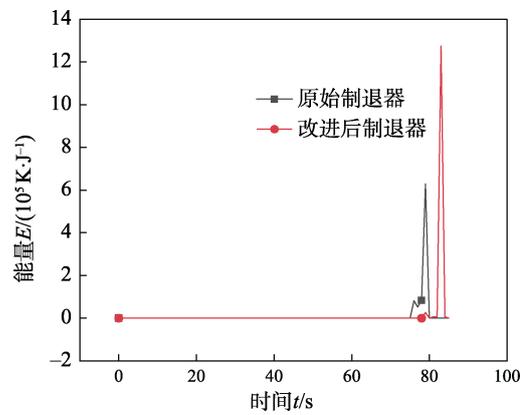


图 16 能量时间历程
Fig.16 Energy time history graph

5 结论

1) 经仿真分析发现,加装侧孔外反射挡板和侧孔倾斜都能使制退器的效率明显提升,并随着倾角的增大而增大,但炮后超压值和温度值也随之增大,侧孔倾斜情况下增大最明显。中间挡板倾斜和第二腔室前挡板倾斜对制退器效率提升不明显,第二腔室加装辅助挡板使制退器效率下降。炮后超压值和温度值与制退效率呈正比关系。

2) 在改进后的制退器与身管连接部分加装一组倾斜吹孔后,经对比仿真云图发现,炮口后方超压区和超温区整体向前移动,有效降低了炮后的超压和温度。

3) 仿真结果表明,改进后的制退器效率提升 8.33%,炮后超压值平均降低 44.10 kPa,炮后温度值平均降低 358.28 K,改进后的制退器性能比原制退器优越,具有较高的实用价值。

4) 试验结果证明,改进后的制退器效率大于原始制退器,与仿真所得结果一致。

本文进行数值模拟的起始时刻是弹丸刚出膛口时,以后建立的仿真模型可以考虑弹丸从膛底发射时

处在弹丸前方的初始冲击波的影响, 这将使仿真结果更真实, 提供的参数更可靠。

参考文献:

- [1] 岳明凯, 刘欣宁. 炮口制退器现状及其发展趋势[J]. 兵工自动化, 2015, 34(3): 1-6.
YUE M K, LIU X N. Situation and Development of Muzzle Brake[J]. Ordnance Industry Automation, 2015, 34(3): 1-6.
- [2] 刘辉, 梁其诚. 某大口径火炮炮口制退器改进研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 34(4): 82-85.
LIU H, LIANG Q C. Research on Muzzle Brake Improvement of a Large Caliber Gun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2013, 34(4): 82-85.
- [3] SHERIF M, ABDELSALAM O R, ABOUL M. Design Optimisation of Muzzle Brake for Sniper Rifle[J]. Defence Science Journal, 2018, 68(5): 438-444.
- [4] CHATURVEDI E, DWIVEDI R K. Computer Aided Design and Analysis of a Tunable Muzzle Brake[J]. Defence Technology, 2019, 15(1): 89-94.
- [5] 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.
- [6] 苏晓鹏, 钱林方, 戴劲松. 带炮口装置时某火炮膛口流场数值仿真[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 15-18.
SU X P, QIAN L F, DAI J S. Muzzle Flow Field Simulation of Gun with a Muzzle Attachment[J]. Computer Simulation, 2009, 26(9): 15-18.
- [7] 乐贵高, 马大为, 冯勇, 等. 某火炮膛口流场数值仿真[J]. 兵工学报, 2004, 25(1): 19-22.
LE G G, MA D W, FENG Y, et al. Numerical Simulation of Muzzle Best Flow Fields of Large Caliber Guns[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(1): 19-22.
- [8] 王雨舒, 吕续舰. 水下枪炮发射问题研究综述[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 1-13.
WANG Y S, LYU X J. Review on Underwater Gun Launching Problems[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 1-13.
- [9] 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及性能分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(12): 160-164.
GE M R, YUAN J T, WANG Z H, et al. Structural Design and Performance Analysis of Muzzle Brake Based on Orthogonal Test[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(12): 160-164.
- [10] 陈艺元. 转管发射系统制退器的超压流场研究及适应性优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
CHEN Y Y. Study on Overpressure Flow Field of Retarder in Rotating Tube Launching System and Its Adaptability Optimization[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [11] 李鸿志, 崔东明, 何正求, 等. 高膛压滑膛炮炮口制退器的设计特点及性能评价指标[J]. 南京理工大学学报, 1994, 18(5): 20-24.
LI H Z, CUI D M, HE Z Q, et al. Design Characteristics and Performance Evaluation Index of Muzzle Brake for High Bore Pressure Smooth Bore Gun[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1994, 18(5): 20-24.
- [12] 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.
LI W. Numerical Simulation Study on Flow Field of Muzzle Brake[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [13] 王永河, 张世全, 赵静, 等. 炮口制退器高效率低危害技术探讨[J]. 火炮发射与控制学报, 2007, 28(3): 37-39.
WANG Y H, ZHANG S Q, ZHAO J, et al. Discussion about Muzzle Brake of High Efficiency but Low Hazard Technology[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2007, 28(3): 37-39.
- [14] 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.
DONG J Y, LI Z G, YU C G. Numerical Simulation of Muzzle Brake Two-Phase Flow Field Based on Dynamic Grid[J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(6): 65-68.
- [15] 刘龙涛, 李传日, 马甜, 等. 有限元仿真在振动结构疲劳分析中的应用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 23-29.
LIU L T, LI C R, MA T, et al. Application of Finite Element Simulation in Vibration Structure Fatigue Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 23-29.
- [16] 周雪鹏, 代小强, 杨珍, 等. 非对称双轨火箭橇动力学建模与仿真研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 53-62.
ZHOU X P, DAI X Q, YANG Z, et al. Dynamic Modeling and Numerical Simulation of Asymmetric Double Orbit Rocket Sled[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 53-62.
- [17] 王亮宽, 周加永, 薛庆阳, 等. 轮式自行高炮车体刚度分析与结构优化[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(3): 44-48.
WANG L K, ZHOU J Y, XUE Q Y, et al. Stiffness Analysis and Structure Optimization of a Wheeled Self-Propelled Anti-Aircraft Artillery Vehicle[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(3): 44-48.
- [18] 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.
HUANG H. Numerical Simulation and Analysis of Muzzle Flow Field of Muzzle Brake[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [19] ZHANG H H, CHEN Z H, JIANG X H, et al. Investigations on the Exterior Flow Field and the Efficiency of the Muzzle Brake[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(1): 95-101.
- [20] CAYZAC R, CARETTE E, ALZIARY DE ROQUEFORT

- T, et al. Computational Fluid Dynamics and Experimental Validations of the Direct Coupling between Interior, Intermediate and Exterior Ballistics Using the Euler Equations[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(6): 1.
- [21] 吴喜富. 复合结构炮口制退器研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
WU X F. Study on Composite Structure Muzzle Brake[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [22] JIANG K, WANG H. Design of Experiment, Approximate Model and Optimization of a Muzzle Brake[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 295/296/297: 2563-2567.
- [23] ZBOINSKI K. Modelling Dynamics of Certain Class of Discrete Multi-Body Systems Based on Direct Method of the Dynamics of Relative Motion[J]. *Meccanica*, 2012, 47(6): 1527-1551.
- [24] 陈明亮, 李志刚, 鲍密. 基于 CFD 的炮口制退器结构特征量特性研究[J]. *兵工自动化*, 2013, 32(1): 4-7.
CHEN M L, LI Z G, BAO M. A Study of Muzzle Brake Structure Characteristics Based on CFD[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2013, 32(1): 4-7.
- [25] 孙建亮, 赵保平. 武器装备温度冲击试验数值模拟[J]. *装备环境工程*, 2006, 3(1): 42-45.
SUN J L, ZHAO B P. Numerical Simulation of Temperature Shock Test for Materiel[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2006, 3(1): 42-45.
- [26] 高杰, 刘树华. 炮口制退器效率计算方法分析[J]. *机械工程与自动化*, 2013(6): 176-177.
GAO J, LIU S H. Computation Methods of Muzzle Brake Efficiency[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2013(6): 176-177.
- [27] 徐志远, 葛建立, 杨国来. 影响炮口扰动的火炮总体结构参数灵敏度分析与优化[J]. *兵器装备工程学报*, 2016, 37(6): 45-48.
XU Z Y, GE J L, YANG G L. Overall Structural Parameter Sensitivity Analysis and Optimization of Gun Muzzle Disturbance[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(6): 45-48.
- [28] 邵文博, 任晓栋, 胡博. 基于 CFD 方法的土工离心机数值建模[J]. *装备环境工程*, 2022, 19(10): 110-119.
SHAO W B, REN X D, HU B. Numerical Modeling of Geotechnical Centrifuge Based on CFD Method[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(10): 110-119.