

doi: 10.7690/bgzdh.2026.01.019

多腔室封闭反射膨胀装置流场仿真分析

明夏雷, 刘帅君, 王茂森, 戴劲松

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为研究多腔室对装置制退效率的影响, 设计一种具有 3 腔室多反射面结构的封闭反射膨胀装置, 并基于 3 维非定常 $N-S$ 方程并利用动网格技术进行数值模拟仿真。通过仿真确定装置受力, 同时探究与膛口制退器配合后各自制退效率和炮口超压的变化规律。计算结果表明: 多腔室对比单腔室情况下其受力有明显提升更有利于提高装置制退效率, 通过调整装置进气孔参数能够有效降低炮口超压。对该装置进一步设计具有一定的参考价值。

关键词: 封闭反射膨胀原理; 动网格; 制退效率

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Simulation Analysis of Flow Field in Multi-chamber Enclosed Reflective Expansion Device

Ming Xialei, Liu Shuaijun, Wang Maosen, Dai Jingsong

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

Abstract: In order to study the effect of multi-chamber on the recoil efficiency of the device, a closed reflective expansion device with three chambers and multiple reflectors was designed, and numerical simulation was carried out based on three-dimensional unsteady $N-S$ equations and dynamic mesh technology. The force of the device is determined by simulation, and the change law of the self-braking efficiency and the muzzle overpressure is explored after the device is matched with the muzzle brake. The calculation results show that the force of multi-chamber is significantly higher than that of single-chamber, which is more conducive to improving the efficiency of the device, and the muzzle overpressure can be effectively reduced by adjusting the parameters of the inlet hole. It has a certain reference value for the further design of the device.

Keywords: closed reflection expansion principle; moving grid; recoil efficiency

0 引言

火炮发射过程中会在膛内产生大量高温高压燃气, 当弹丸出炮口后高温高速燃气在膛口形成复杂的流场, 由于气体产生的巨大反作用力, 会对火炮发射的精度产生较大影响^[1]。膛口制退器作为常用的火炮反后坐装置, 能够通过后效期的火炮气体减小火炮后坐力, 影响射击精度。国内外已经对炮口制退器进行了很多研究, 赵佳俊等^[2]通过对比研究炮口制退器各排侧孔的射流总反力, 得到了制退器不同侧孔对制退效率的贡献大小; 徐达等^[3]研究了炮口制退器上侧孔的参数对炮口冲击波及超压值的影响规律, 分析了带有 2 排等径侧孔的炮口制退器的流场动态特性。为了降低炮口冲击波产生的危害, 王加刚等^[4]通过将仿真射击实验对比, 验证了某新型高效低危害炮口制退器的可行性。王永河等^[5]通过对制退器和炮口流场的原理分析, 分别讨论了从 4 种不同途径改进制退器结构, 从而达到不降低制退效率减弱压力波的目的。Chaturvedi 等^[6]创新设

计了可调式膛口制退器, 通过数值仿真得到了该装置的减后坐力等参数, 体现了该设计的可调性和创新性。肖俊波等^[7]合理匹配制退器与缓冲器使得后坐力得到了明显的降低, 发现制退器与缓冲器参数匹配不好会导致减后坐力效果减弱。邵中年等^[8]为了缓解大口径舰炮冲击波对舰面的影响, 缓解炮口制退器所产生不利影响, 设计了一种复合式炮口制退器, 有效解决了制退效率和冲击波危害的矛盾。张焕好等^[9]为了消除制退效率提高造成的负面效应, 进行了制退器内部流场的研究, 完善了膛口制退器设计理论。戴劲松等^[10-12]在现有炮口制退器研究的基础上, 提出了封闭反射膨胀减后坐机理, 有效缓解了制退器制退效率高超压危害高的问题, 但其只考虑了单腔室情况, 多腔室结构并未做出研究。

为研究多腔室结构下封闭反射膨胀装置的制退效果, 设计了一种基于封闭反射膨胀减后坐机理的 3 腔室多反射面结构的装置。使用高精度的 Roe 格

收稿日期: 2024-11-10; 修回日期: 2024-12-25

第一作者: 明夏雷(1997—), 男, 安徽人, 硕士。

式和结构化网格动网格技术,对弹丸从身管最大膛压后某位置开始的发射过程进行了仿真分析。通过仿真得到了多腔室结构下封闭反射膨胀装置的受力情况,结果显示比单腔室结构更有利于提高制退效率,并继续通过仿真研究了配合膛口制退器使用的情况下,进气孔参数对装置及膛口制退器性能的影响规律。

1 工作原理

如图 1 为基于仿真所建立装置的工质模型。

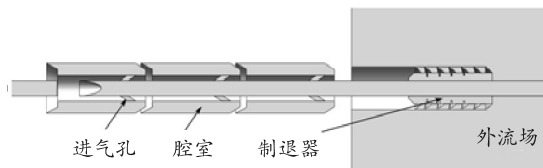


图 1 工质模型

弹丸穿过各个进气孔位置后,弹后高温高压气体经由进气孔进入各腔室,并作用于腔室前端面产生与弹丸运动方向相同的力用以抵消部分后坐。随着弹丸逐渐原理炮口,腔室压力大于膛内压力后,气体产生回流至身管并从炮口排出。

2 数值方法

2.1 基本假设

火炮发射过程具有高初速、高炮口压力特点,炮口气流的组分、相态、化学反应非常复杂,很难建立一个全面的数学模型来描述整个过程,因此结合装置实际情况做出如下简化假设:

- 1) 不考虑化学反应,将火药气体简化为单一高温高压气体,并将大气视为理想气体。
- 2) 火药气体速度从膛底至弹底由 0 呈线性增长至与弹丸等速,并忽略弹丸自旋。
- 3) 火炮发射是瞬态忽略温度的传递,因此视固壁的导热系数为 0。
- 4) 忽略身管的后坐以及膛内反射的压力波。

2.2 控制方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

式中: $U = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E]^T$; $F = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, \rho uw, (E + p)u]^T$; $G = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, \rho vw, (E + p)v]^T$; $H = [\rho w, \rho uw, \rho vw, \rho w^2 + p, (E + p)w]^T$ 。 ρ 为气体密度; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的速度分量; p 为气体压强; E 为总能量,其表达式为:

$$E = \frac{p}{r-1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2). \quad (2)$$

式中 r 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 为气体参数; T 为热力学温度。

2.3 湍流模型

湍流是一种高度复杂的非稳态 3 维流动,也是工程应用中最常见的一种流动类型,根据火炮膛口流场特点,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型作为湍流模型,其表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (5)$$

式中: G_k 为层流速度梯度引起的湍流动能; G_b 为浮力引起的湍流动能; Y_m 为湍流过渡的扩散产生的波动; σ_k 和 σ_ε 分别为湍动能 k 、湍流耗散率 ε 的普朗特数,一般取 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$; C_1 、 C_2 、 C_3 为常数,一般取 $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, C_3 与浮力有关,当主流方向与重力方向平行时 $C_3=1$,当主流方向与重力方向垂直时 $C_3=0$ 。 G_k 、 G_b 、 Y_m 为湍动能系数,分别与平均速度梯度、浮力及可压湍流中的脉动扩张有关:

$$\left. \begin{aligned} G_k &= u_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ G_b &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} g_i \frac{u_i}{pr} \frac{\partial T}{\partial x_i} \\ Y_m &= 2 \rho \varepsilon \frac{k}{\gamma RT} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

式中: u_i 、 u_j 为计算位置处流场气体速度分量; x_i 、 x_j 为计算位置处流场气体位移分量; g_i 为计算位置处重力分量; γ 为气体比热比(对火药燃气通常取 1.25); R 为气体常数。

笔者主要采用 $N-S$ 方程以及标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对某 30 mm 火炮膛口流场进行了数值模拟。文献[13]相同的计算方法,并将仿真结果与实验数据作对比,验证了计算方法的准确性,同时证明了笔者所提出算法的正确性。

3 计算模型

3.1 边界条件

为模拟气体流经封闭反射膨胀装置以及膛口制退器的状态, 根据装置原理及射击环境, 取火药完全燃烧且弹丸接近位置建立流场计算区域。带装置及冲击式膛口制退器的火炮计算模型的边界条件如图 2 所示。

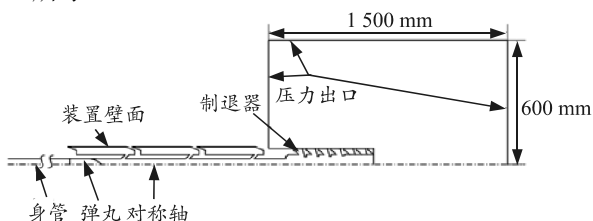


图 2 计算模型的边界条件

在计算开始之前, 使用 INT 宏进行计算区域初始化, 此时刻弹丸运动至身管 0.7 m 处弹后平均压力为 128 MPa, 弹丸速度 682 m/s。

3.2 动网格的运用

网格质量直接关系到仿真结果的准确性, 因此使用六面体结构化网格对工质模型进行划分。由于制退器内部流场复杂为提高计算精度, 因此, 在制退器内部加密网格以提高网格质量。为模拟弹丸相对于身管运动把整个计算域分为动网格区和静网格区, 动网格区域为弹前弹后, 其他区域为静网格区, 运用动态层铺法实现弹前网格合并, 弹后网格分裂形成新网格。部分网格如图 3 所示。

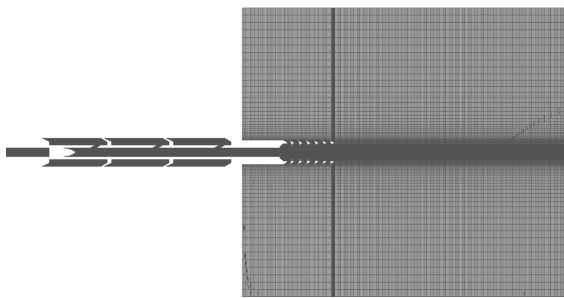


图 3 部分网格

弹丸运动规律由弹后气体压力推动弹丸得到, 并利用 CG_MOTION 宏编写 UDF。

$$a = SP / \phi m. \quad (7)$$

式中: S 为火炮口径; P 为弹底压强; ϕ 为次要功系数; m 为弹丸的质量。

4 仿真结果及分析

笔者首先分别对膛口制退器有无添加装置的膛口流场进行了数值模拟, 观察添加装置前后对膛口

流场结构的影响并得到了装置各腔室的受力结果, 然后在有装置的情况下, 分别对装置进气孔孔径以及角度参数分别进行调整得到仿真结果, 对比分析不同参数结果下装置及制退器的受力、炮口超压值以及弹丸运动速度的变化规律。

4.1 有无装置的膛口流场及腔室受力分析

根据装置的特点, 分别对加装装置前后膛口流场发展过程进行对比分析。未加装装置的方案视作方案 1, 加装装置的方案视作方案 2, 如图 4—7 所示。

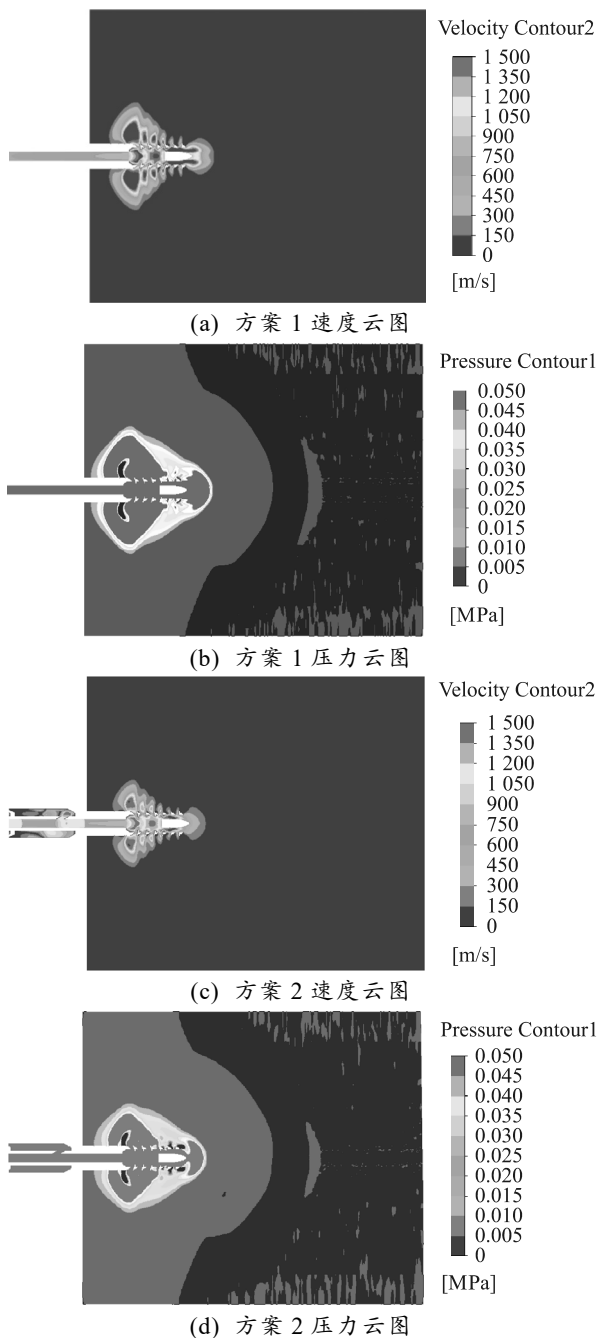
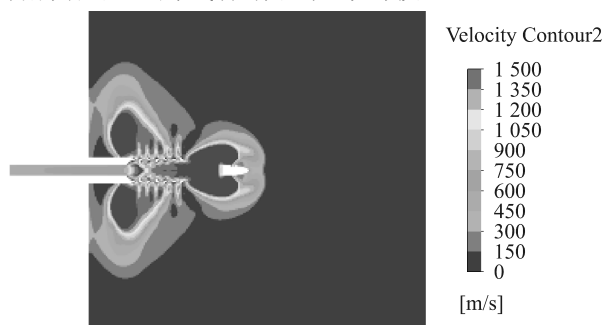
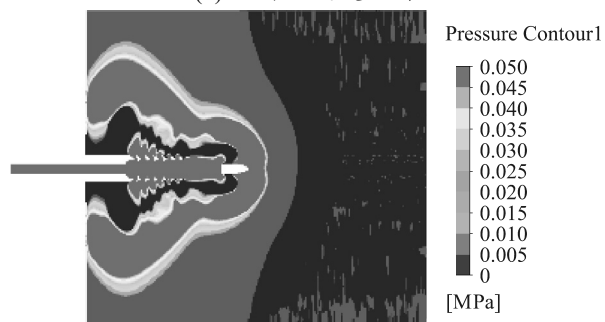


图 4 弹丸出炮口 0.15 ms

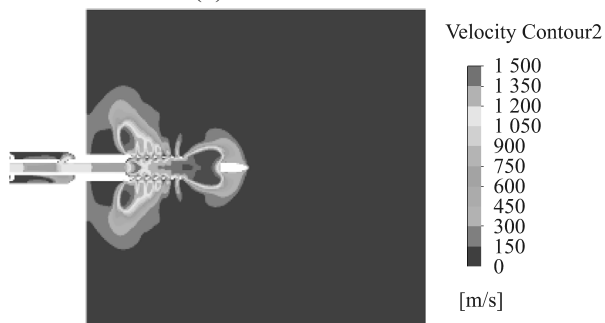
图 4 中, 初始时刻弹丸冲出炮口 0.15 ms 时的膛口流场特征, 此时弹丸已全部飞离膛口进入膛口制退器, 高温高压火药气体迅速膨胀为超音速射流, 由于制退器与弹丸之间存在一定间隙, 所以火药气体逐渐追赶并包围弹丸。弹后火药气体也经流侧孔开始形成独立的气体射流和冲击波。



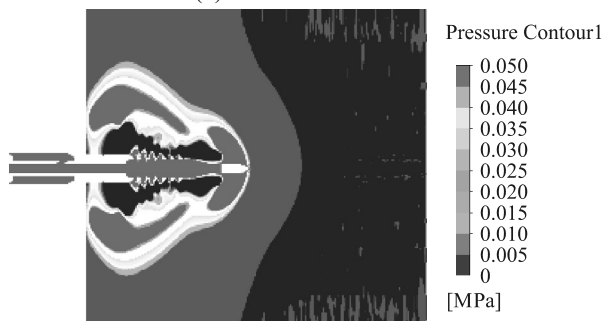
(a) 方案 1 速度云图



(b) 方案 1 压力云图



(c) 方案 2 速度云图

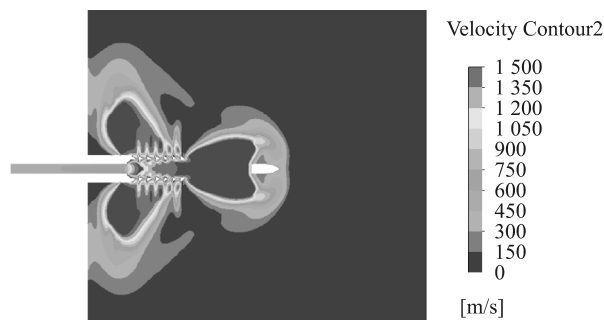


(d) 方案 2 压力云图

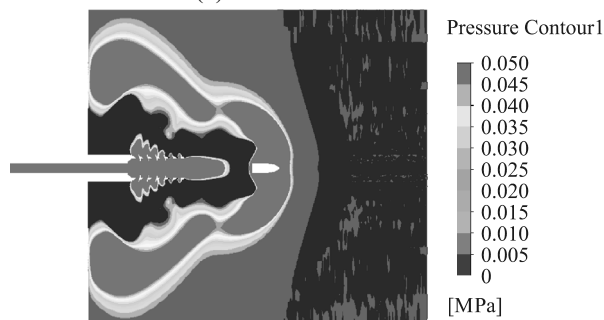
图 5 弹丸出炮口 0.4 ms

由图 5 可以看出: 弹丸完全飞离膛口制退器之后, 气体主射流在弹后不断地扩大并始终跟随着弹

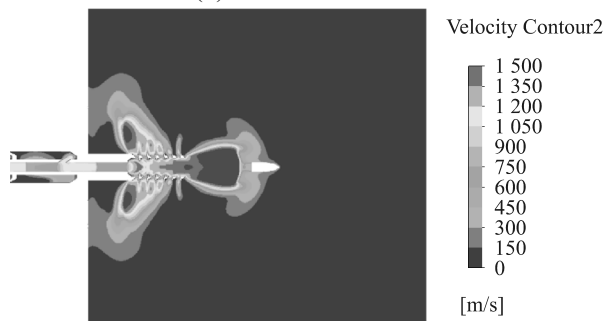
丸, 并且通过膛口制退器侧孔向侧后方喷出的高温高压气体也迅速发展不断加速膨胀。



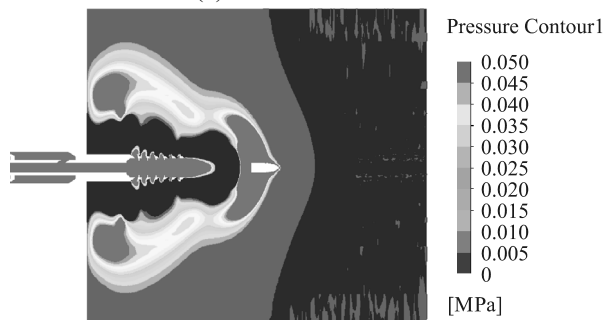
(a) 方案 1 速度云图



(b) 方案 1 压力云图



(c) 方案 2 速度云图



(d) 方案 2 压力云图

图 6 弹丸出炮口 0.5 ms

由图 6 可知: 由于火药气体不断膨胀使得其速度迅速衰减, 弹丸逐渐开始脱离火药气体, 通过观察仿真云图可以看出: 在弹丸逐渐远离炮口的过程中, 加装装置后的膛口流场与原有的典型特征相比未发生改变, 但在整个出炮口期间由火药气体产生的冲击波有明显的降低。

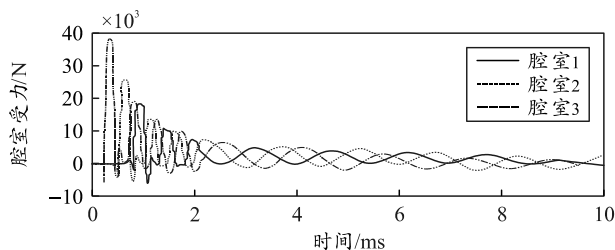


图 7 10 mm 孔径下各腔室受力

观察图 7 可知：在弹丸出炮口前的 1 ms 前，装置各腔室的受力峰值分别为 36.96、25.66 和 18.24 kN。虽然 2、3 腔室相对于腔室 1 受压峰值随着距离炮口近而有所降低，但由于其腔室多反射面积大的结构特点，相比于单腔室受力仍有明显提升。

4.2 有装置时不同进气孔参数仿真结果分析

4.2.1 不同孔径的影响

由于装置受力影响因素较多且不尽相同，选取影响因素较大的进气孔参数进行调整。由于进气口结构的不同会导致火药气体进入装置内的流量和速度产生变化，从而对装置受力、弹丸受力及速度、制退器受力、制退效率、炮口超压值产生重要影响。在保持进气孔角度为 30° 其他参数保持不变的情况下，选取进气孔孔径为 6、8、10、12 和 14 mm 进行仿真计算，如图 8—12 所示。

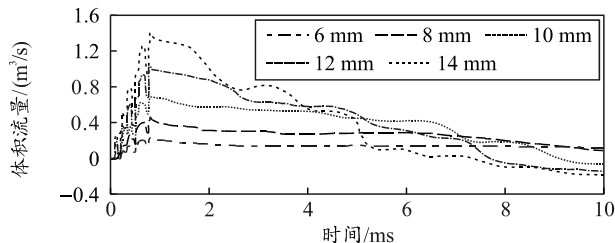


图 8 不同进气孔孔径下体积流量

观察图 8 可知：随着进气孔孔径的增大气体流量随之增大，且孔径为 14 mm 时在 5 ms 时便开始产生回流现象。对曲线处理可知，在弹丸出炮口时流入装置各腔室的气体体积随着孔径的增加急剧提高，分别为 $1.35\text{e-}4$ 、 $2.64\text{e-}4$ 、 $4.29\text{e-}4$ 、 $6.18\text{e-}4$ 和 $8.36\text{e-}4 \text{ m}^3$ 。

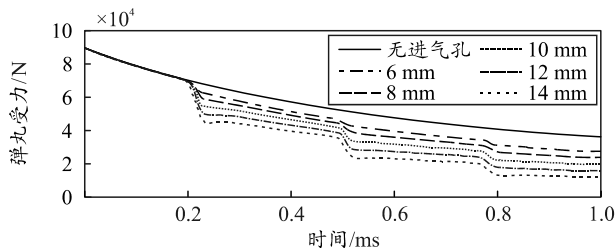


图 9 不同进气孔孔径下弹丸受力

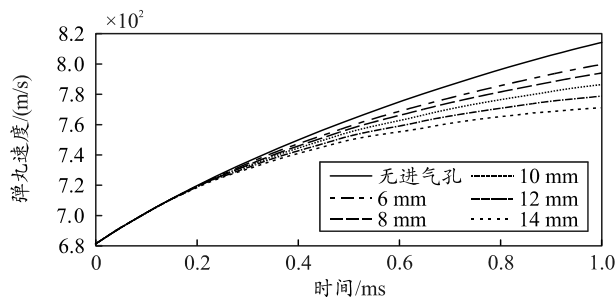


图 10 不同进气孔孔径下弹丸速度

由图 9 和 10 可知：随着孔径的增加弹丸的受力和速度呈现不断下降的趋势，速度分别为 817、802.84、796.28、789.03、780.91 及 772.98 m/s。相较于无进气孔速度分别下降 1.84%、2.57%、3.42%、4.52% 和 5.50%。

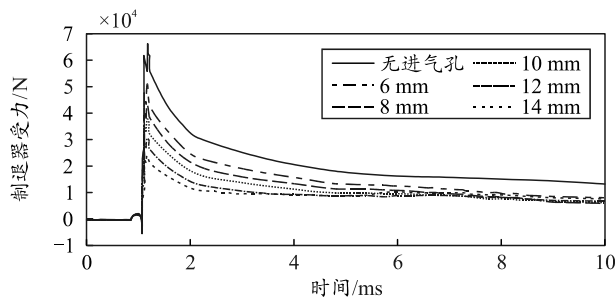


图 11 不同进气孔孔径下制退器受力

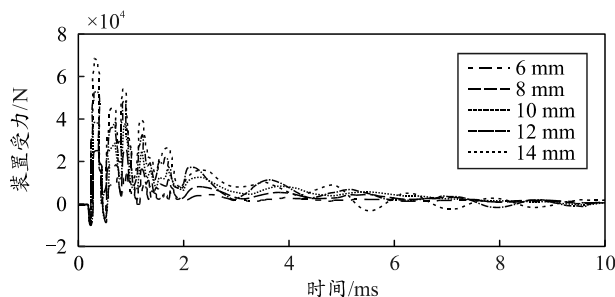


图 12 不同进气孔孔径下装置受力

观察图 11 和 12 可知：在弹丸出炮口之前由于多腔室的结构，不同孔径大小的装置受力均有 3 个显著峰值，其中最远离炮口的腔室受力最大。由于弹后高压高速气体首先进入该腔室产生较大的向前力，其后 2 个腔室依然能够保持较高的受力，随着孔径的增大装置受力有明显提高。不同孔径下的装置受力峰值分别为 14.25、25.98、36.96、52.86 和 68.77 kN，因此，增大进气孔可以有效降低后坐力。当弹丸出炮口后，膛口制退器的受力会随着孔径的增加逐渐降低，受力峰值分别为 66.27、50.71、44.47、37.57、30.68 和 24.17 kN。因气体在出炮口前会分流部分气体进入装置，从而降低了膛口制退器的受力，将装置和膛口制退器分别进行受力积分得到冲量。对比发现孔径的改变与装置及制退器收

到的总冲量大小并无明确关系,当孔径较小时,进入装置气体较少,所以产生的冲量较小,大部分气体进入膛口制退器产生较大冲量,而孔径较大时则情况相反。

通过式(8)–(9)计算得到装置制退效率如表 1 所示。计算结果表明:随着进气孔孔径的增加,装置制退效率逐渐提高,制退器效率随之降低,总体制退效率依然保持较高水平。

$$\eta_z = \frac{\int_0^{t_d} F dt}{(m_d + \frac{\omega}{2} \beta) v_0}; \tag{8}$$

$$\eta_E = 1 - (1 - \eta_z)^2. \tag{9}$$

式中: η_z 为冲量制退效率; η_E 为制退效率为装置受力时长取 10 ms; F 为装置受力大小; m_d 和 v_0 分别为弹丸质量和弹丸初速; ω 为装药量; β 为后效期系数。计算可得表 1 所示制退效率。

表 1 不同进气孔孔径下制退效率

孔径/mm	冲量 $I/(\text{N}\cdot\text{s})$	装置制退 效率/%	制退器制退 效率/%
无进气孔	188.28	—	71.13
6	163.58	12.59	56.86
8	160.67	20.99	49.94
10	158.57	29.59	41.90
12	163.64	33.40	36.69
14	162.95	38.18	36.50

为检测超压值的变化规律,在膛口制退器周围分别设置了 2 个超压主要监测点,如图 13 所示。

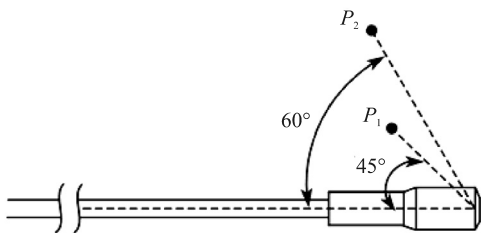


图 13 超压监测点

监测点超压数据如表 2 和图 14 所示。

表 2 不同进气孔孔径下炮口超压峰值

监测点	无进气孔	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	14 mm
P_1	212.89	170.44	153.59	131.14	112.45	95.26
P_2	69.67	50.95	42.91	35.12	30.21	26.81

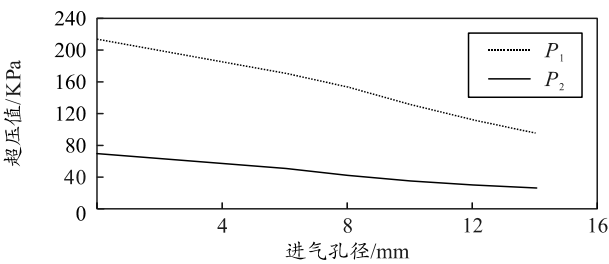


图 14 不同进气孔孔径下监测点超压峰值对比

对比不同进气孔孔径下的超压峰值可知:随着进气孔直径的增加,超压峰值均有大幅度降低,6、8、10、12 和 14 mm 下监测点 P_1 处超压峰值较无进气孔情况降低 19.94%、27.85%、38.26%、47.18% 和 55.25%,监测点 P_2 处超压峰值较无进气孔情况降低 26.87%、38.41%、49.59%、56.64% 和 61.52%。综上分析:孔径的增加会降低弹丸初速,但也会显著降低超压值,当进气孔孔径大于 10 mm 后,超压峰值降低幅度开始逐渐降低;因此,在保证弹丸初速的前提下,应该尽量提高进气孔孔径。

4.2.2 不同角度的影响

进气孔角度同样也会对装置性能造成影响,在保持进气孔孔径为 10 mm 和其他参数保持不变的情况下分别选取参数为 30°、45°、60°、90° 4 个进气孔角度进行仿真分析得到计算结果如图 15–19 所示。

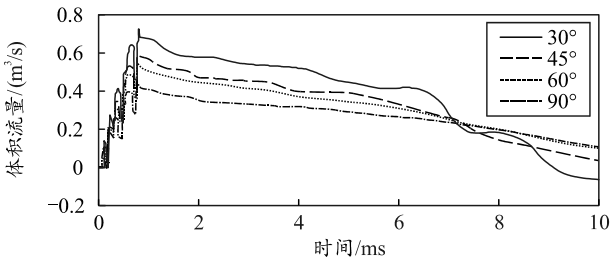


图 15 不同进气孔角度下体积流量

如图 15 可知:随着进气孔角度的增加气体流量呈现不断降低的趋势。处理曲线可得:在弹丸出炮口时不同进气孔角度进入装置的气体体积分别为 $3.98\text{e-}4$ 、 $3.45\text{e-}4$ 、 $3.17\text{e-}4$ 、 $2.61\text{e-}4\text{ m}^3$ 。分析可知,角度越小,越有利于气体的流入。

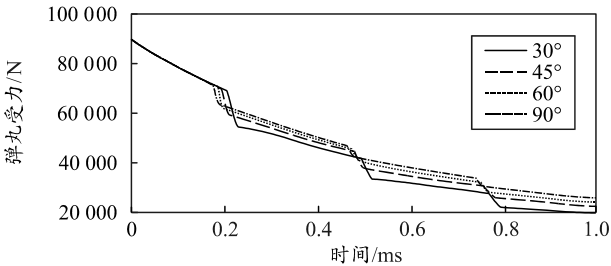


图 16 不同进气孔角度下弹丸受力

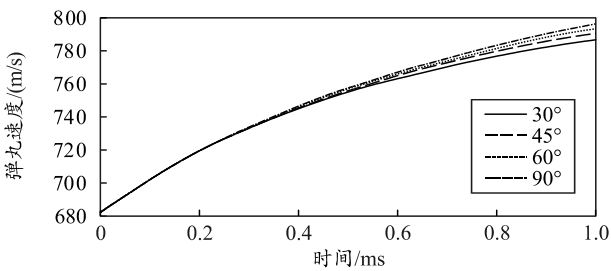


图 17 不同进气孔角度下弹丸速度

观察图 16 和 17 可知：提高进气孔角度可以提高弹丸的受力，降低弹丸速度损失，其速度分别为 789.03、793.79、796.32 和 799.28 m/s，较 30°情况下的速度均有提升。

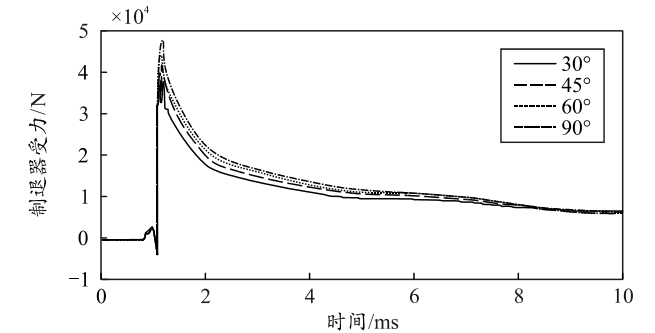


图 18 不同进气孔角度下制退器受力

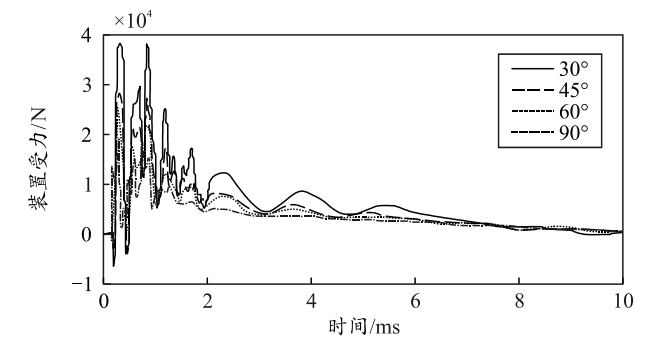


图 19 不同进气孔角度下装置受力

观察图 18 和 19 可知：随着进气孔角度的增加，装置受力会不断降低，膛口制退器的受力随之增加。对比图 12 可知：曲线波动随着角度的增加有所减缓，角度越大，相同时间进气越少，减小总反力的同时也减小了装置后端面产生的后坐力。通过对装置进行受力积分，并计算制退效率，可得如表 3 所示的 4 种不同角度的制退效率。

表 3 不同进气孔角度下制退效率

角度/(°)	冲量 $I/(\text{N}\cdot\text{s})$	装置制退 效率/%	制退器制退 效率/%
30	158.57	29.59	41.90
45	156.29	23.06	45.30
60	153.94	20.50	47.08
90	153.37	17.39	51.40

随着进气孔角度的增大，装置制退效率下降的同时制退器效率不断上升，与孔径参数改变对制退效率的影响，是由于气流分流的结论保持一致。总体所受冲量和制退效率几乎无损失。

监测点超压数据如表 4 和图 20 所示。

表 4 不同进气孔角度下炮口超压峰值

监测点	超压峰值/KPa			
	30°	45°	60°	90°
P_1	131.14	146.74	148.30	155.23
P_2	35.12	40.58	44.21	48.72

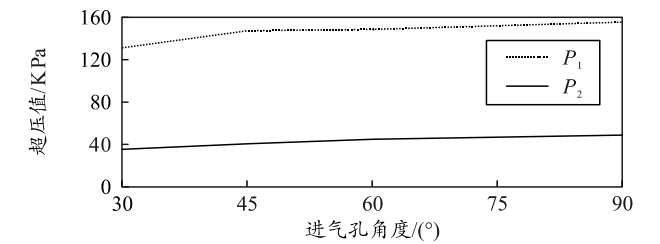


图 20 不同进气孔角度下超压峰值

对比不同进气孔角度下的超压峰值可知：随着进气孔角度的增大，超压峰值逐渐提高，在 45°、60°、90°情况下监测点 P_1 处超压峰值较 30°时增加 11.89%、13.09%、18.37%。 P_2 处超压峰值较 30°时增加 15.54%、25.88%、38.72%。综上分析：进气孔斜向前有利于气体进入装置腔室内，从而提高制退效率降低超压值，但角度越低，装置分流到的气体体积越多，膛内压力也会随之降低影响弹丸初速；所以在保证弹丸初速的前提下应该尽量降低进气孔倾斜角度。

5 结束语

笔者对基于封闭反射膨胀装置原理的多腔室结构装置进行了流场仿真分析，并通过调整进气孔参数得出：1) 多腔室比单腔室结构的封闭反射膨胀装置受力情况要更好，有利于制退效率的提升；2) 通过仿真发现，进气孔孔径和角度的改变对总体效率影响不大，但对装置和膛口制退器的制退效率以及炮口超压有较大影响。经分析，在保证弹丸初速的情况下应尽量提高进气孔孔径，减小进气孔角度。

参考文献：

[1] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京：北京理工大学出版社，2014.

[2] 赵佳俊，郭张霞，赵秀和，等. 基于 CFD 的炮口制退器侧孔射流研究[J]. 火炮发射与控制学报，2021，42(4): 13-17.

[3] 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.

[4] 王加刚，余永刚，周良梁. 埋头弹火炮高效低危害炮口制退器的实验研究[J]. 兵工学报，2017，38(5): 1035-1040.

[5] 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(3): 37-39.

[6] CHATURVEDI E, DWIVEDI R K. Computer aided design and analysis of a tunable muzzle brake[J]. Defence Technology, 2019, 15(1): 89-94.

[7] 肖俊波，杨国来，李洪强，等. 膛口制退器与缓冲器匹

- 配对后坐力的影响[J]. 弹道学报, 2017, 29(4): 86-92.
- [8] 邵中年, 张志瑞, 苏冰. 复合式炮口制退器上舰研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2010, 20(4): 60-62.
- [9] 张焕好, 陈志华, 姜孝海, 等. 膛口装置三维流场的数值模拟及制退效率计算[J]. 兵工学报, 2011, 32(5): 513-519.
- [10] 戴劲松, 何福, 苏晓鹏, 等. 速射火炮定向反射膨胀减后坐力机理研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(12): 2407-2415.
- [11] 谭添, 戴劲松, 王茂森, 等. 封闭反射膨胀装置流场仿真分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(4): 1-5.
- [12] 戴劲松, 何福, 苏晓鹏, 等. 定向反射膨胀装置作用特性研究[J]. 弹道学报, 2019, 31(2): 92-96.
- [13] 刘帅君, 戴劲松, 何福, 等. 一种降超压值的高效率身管装置流场分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2023, 44(1): 99-106.
- *****
- (上接第 83 页)
- [11] 刘颖, 王凤伟, 刘卫华, 等. 基于亮度分区模糊融合的高动态范围成像算法[J]. 计算机应用, 2020, 40(1): 233-238.
- [12] 赵金波, 肖照, 白本督, 等. 基于 $L^*a^*b^*$ 颜色空间的高动态范围成像算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(12): 247-250, 257.
- [13] HOU X L, LUO H B, ZHOU P P, et al. High Dynamic Range Imaging Using Multiple Exposures[J]. Journal of Physics Conference Series, 2017, 844(1): 1-9.
- [14] CHEN G Y, CHEN C F, GUO S, et al. HDR Video Reconstruction: A Coarse-to-fine Network and A Real-world Benchmark Dataset[C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision(ICCV).
- *****
- (上接第 94 页)
- Montreal, QC, Canada, 2021: 2482-2491.
- [15] XU P, CHEN K, XIE A, et al. Parallax-Tolerant Image Stitching with Optimal Homography[J]. Journal of Physics Conference Series, 2019, 1237(3): 1-7.
- [16] BRIAND T, FACCIOLO G, SANCHEZ J. Improvements of the Inverse Compositional Algorithm for Parametric Motion Estimation[J]. Image Processing On Line, 2018, 222(8): 435-464.
- [17] EKSTRM S, MALMBERG F, AHLSTRM H, et al. Fast Graph-Cut Based Optimization for Practical Dense Deformable Registration of Volume Images[J]. Journal of LaTeX Class Files, 2018, 14(8): 1-8.
- [18] YOO J S, KIM J O. Noise-Robust Iterative Back-Projection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 29: 1219-1232.
- *****

5 结论

射击模拟训练系统以 3 维仿真技术为支撑, 利用虚拟现实等技术模拟多样化战场环境和作战目标, 采用虚实结合的形式将训练器材和虚拟战场环境融为一体, 不仅使受训学员能够在未来可能的战场环境中训练, 而且训练过程也更加贴近实战, 创新了射击教学训练模式。

参考文献:

- [1] 孙宝材, 彦顺. 军事地形学[M]. 北京: 光明日报出版社, 2013: 1-5.
- [2] 张志勇, 汪涵, 朱虹旭, 等. 沉浸式军人战场适应性训练系统的设计与实现[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 36(9): 24-26.
- [3] 黄柯棣, 刘宝宏, 黄健. 作战仿真技术综述[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1187-1195.
- [4] 戴礼灿. 面向作战的侦察情报数据仿真系统设计[J]. 电讯技术, 2017, 57(7): 806-812.
- [5] 丁必林, 戴伟. 智能主体在侦察情报模拟仿真中的应用[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 30(5): 78-81.
- [6] 刘彬, 孙晓, 杜小明, 等. 面向实体的军事仿真规则提取方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(3): 21-24.
- [7] CHENG L, GONG J, LI M, et al. 3D building model reconstruction from multi-view aerial imagery and lidardata[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2011, 77(2): 125-139.
- [8] 申普兵, 高凯, 赵卫伟. 作战指挥流程建模研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 40(6): 938-941.
- [9] 王鹏. 虚实结合的武器装备试验方法的若干技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- [10] 董韵佳. 基于动力学仿真和迁移学习的滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [11] 王鹏. 快速构建逼真三维虚拟仿真地球场景的若干关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
- [12] 闫瑞雷. 十四自由度车辆动力学模型仿真分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.