



等径身管发射过程中闭气环闭气机理研究

赵金玉,黄 勇*,王 浩,陈常顺

(南京理工大学 能源与动力工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:以一种等径身管发射装置-气体炮为背景,根据其工作原理和结构特点,在考虑弹丸和身管的间隙存在漏气的条件下,建立气体炮的内弹道方程。在 Autodyn 中建立气体炮的仿真模型,将仿真模型计算得到的结果与理论模型结果进行对比,证明了仿真模型的正确性。对不同弹管间隙的仿真模型和理论模型进行计算,结果表明随着弹管间隙的增大,气体泄漏量逐渐增大,弹丸炮口初速逐渐减小。通过 Autodyn 分别对使用锥面闭气环和带尾裙闭气环两种条件下的发射装置进行仿真计算,将得到的弹丸速度与不使用闭气环的弹丸速度进行对比,结果表明使用闭气环的弹丸速度明显大于不使用闭气环的弹丸速度。分别在两种闭气环上施加多个观测点,通过观测点记录两种闭气环在受到高压气体、身管和弹丸共同作用下的径向位移及压力,研究闭气环的闭气机理,并对两种闭气环的闭气效果的差异进行分析,分析结果表明带尾裙闭气环的闭气效果更佳。

关键词:气体炮;内弹道;Autodyn;闭气环

中图分类号:TJ358 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2025)02-0112-10

Study on the Sealing Mechanism of Obturator Ring in Uniform-diameter Barrels During Launching

ZHAO Jinyu, HUANG Yong*, WANG Hao, CHEN Changshun

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

Abstract: Based on the background of a kind of uniform-diameter barrel gas gun and considering its working principles and structural characteristics, the internal ballistic equations of the gas gun were established, taking into account gas leakage through the gap of projectile and barrel. A simulation model of the gas gun was developed in Autodyn. The correctness of the simulation model was verified by comparing the calculated results of the simulation model with those of the theoretical model. Computations were conducted on both simulation model and theoretical model with different gaps between projectile and barrel. The results show that with the increase of gap size, the gas leakage rises gradually, and the muzzle velocity of projectile shows a corresponding gradual decrease. The launching device under the two conditions of using conical obturator ring and tail skirt obturator ring was simulated and calculated respectively through Autodyn. The obtained projectile velocities were compared with the projectile velocity without an obturator ring. The results show that the projectile velocities using obturator ring are obviously higher than those without an obturator ring. Multiple monitoring points were applied to the two kinds of obturator rings. The radial displacement and pressure of the two kinds of obturator rings under the coupled effects of high-pressure gas, barrel and projectile constraints were recorded by the monitoring points. The mechanism of the obturator ring was studied, and the difference of the sealing effect of the two kinds of obturator rings was analyzed. Analytical results revealed that the tail-skirted obturator ring exhibits superior sealing effectiveness compared to its conical counterpart.

Key words: gas gun; internal ballistic; Autodyn; obturator ring

等径身管发射装置的身管直径通常大于弹丸直径,这必然导致发射过程中弹丸身后的高压气体从弹丸与身管之间的间隙泄漏,影响发射装置的弹丸初速。为了防止等径身管发射装置发射过程中的气体泄漏,可在弹丸尾部增加一闭气环,保证发射过程的气密性。

目前,对于气体炮内弹道的研究已有大量成果。赵俊利等^[1-2]建立了气体炮的内弹道数学模型。赵希欣等^[3]建立了考虑气体泄漏的内弹道模型。李锋等^[4]对一级气体炮的经典内弹道方程进行修正,使其更适用于气室容积比较大的情况。刘刚等^[5]建立了轴向底推式弹射系统的内弹道数学模型并进行计算分析。赫雷等^[6]建立了气动发射过程充气 and 气体膨胀做功相互耦合的变质量热力学模型。廖欢欢等^[7]建立了高低压室发射内弹道计算模型,并对其影响因素进行分析。仲伟君等^[8]研究了通过使用气体炮来模拟火炮弹药系统的膛内过程。范奥博等^[9]、丛龙腾等^[10]基于 Autodyn 研究了压缩空气弹射内弹道特性。雒智林等^[11]比较了4种不同的楔式炮门的闭气方式,并对闭气可靠性进行评估。阮伟靖等^[12]利用 Ansys Workbench 对某转膛式武器不同材料的闭气环的闭气效果进行了研究。刘朋科等^[13]利用 Abaqus 对橡胶紧塞垫闭气机构的闭气性能进行了分析。

目前,针对等径身管发射装置的闭气环闭气机理研究较少。为此,本文建立弹丸与身管存在间隙的情况下的气体炮内弹道方程,并利用 Autodyn 仿真软件对不同闭气环在发射过程中的作用效果进行分析,对闭气环在发射过程中的闭气机理进行研究。

1 气体炮内弹道建模与仿真

1.1 考虑漏气的气体炮内弹道方程

基于枪炮内弹道理论,在研究气体炮时做以下假设^[2]:

①弹丸在气体作用下向前运动时,任一时刻弹后容积的气体压力均匀一致;

②由于发射过程时间很短,气体膨胀过程认为是等熵绝热过程;

③引入次要功计算因数来考虑摩擦功及其他能量的损失。

则在不考虑漏气条件下的气体炮的内弹道方程如下所示:

运动方程为

$$\varphi m \frac{dv}{dt} = pS \quad (1)$$

气体状态方程为

$$p_0 V_0^\gamma = p(V_0 + Sl)^\gamma \quad (2)$$

式中: φ 为次要功计算系数; m 为弹丸质量; S 为炮口面积; p 为弹后气体压力; p_0 为高压气体的初始压力; V_0 为高压气体初始体积; l 为弹丸受高压气体作用的运动距离; γ 为气体绝热指数; v 为弹丸运动速度; t 为弹丸运动时间。

在枪炮内弹道学理论中,次要功计算系数的经验公式为^[14]

$$\varphi = K + \frac{m_q}{3m} \quad (3)$$

式中: K 为取决于气体做功效率的实验因数,其值在1~1.10之间^[15],本文中取 $K=1.1$; m_q 为弹后高压气体质量。

但在弹丸与身管之间存在间隙的情况下,上述气体炮内弹道方程便不再适用,因此弹丸运动方程可描述为

$$\varphi m \frac{dv}{dt} = pS_b \quad (4)$$

式中: S_b 为弹底面积。

由于弹丸与身管间隙的漏气,气体状态方程中的高压气体的初始压力不断变化。令 $p_{0e} = p_0 - p_{0l}$ 为等效初始压力,其值等于高压气体的初始压力 p_0 减去弹丸移动 l 距离时泄漏的高压气体在高压气体初始体积 V_0 下所具有的分压 p_{0l} 。则气体状态方程为

$$p_{0e} V_0^\gamma = p(V_0 + Sl)^\gamma \quad (5)$$

假设高压气体在弹丸与身管的间隙处的漏气现象简化为气体在厚壁孔口的自由流出,则高压气体间隙处的流量公式为

$$q = C_v A_f \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_g}} \quad (6)$$

式中: q 为高压气体间隙处的泄漏的气体的体积流量; C_v 为流量系数,本文中取 0.6^[16]; A_f 为间隙面积; Δp 为弹底高压气体压力和弹头处气体压力的差值(假设弹头处的气体压力为大气压 p_a); ρ_g 为泄露后的高压气体的密度。

由气体流量的定义可得:

$$\frac{dV_l}{dt} = q \quad (7)$$

式中: V_l 为弹丸移动 l 距离时泄漏的气体的体积。

弹丸速度为

$$\frac{dl}{dt}=v$$

(8)

由理想气体状态方程可得弹丸移动 l 距离时泄漏的高压气体,在高压气体初始体积 V_0 下所具有的分压:

$$p_{0l}=\frac{m_l}{m_q}p_0$$

(9)

泄露后的高压气体的密度:

$$\rho_g=\frac{m_q-m_l}{V_0+Sl}$$

(10)

式中: m_q 为高压气体初始质量; m_l 为弹丸移动 l 距离时泄漏的气体的质量。

由密度计算公式:

$$\frac{dm_l}{dV_l}=\rho_g=\frac{m_q-m_l}{V_0+Sl}$$

(11)

联立式(6)可得:

$$\frac{dm_l}{dt}=\frac{q(m_q-m_l)}{V_0+Sl}$$

(12)

式(4)~式(12)即为漏气时气体炮内弹道方程组。

1.2 仿真模型及其参数

等径身管的轴对称仿真模型结构如图 1 所示,将模型进行简化,高压气体直接填充至弹丸底部。填充的高压气体的长度为 l_0 ,弹丸长度为 l_b ,弹丸半径为 R_b ,弹丸行程为 L ,弹丸与身管之间的间隙为 δ 。

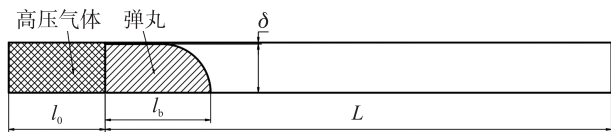


图 1 轴对称仿真模型结构图

Fig. 1 Structural diagram of the axisymmetric simulation model

Audodyn 中理想气体的状态方程为^[17]

$$p=(\gamma-1)\rho_g e$$

(13)

式中: e 为气体的内能,其计算公式如下:

$$e=c_v T$$

(14)

式中: c_v 为定容比热(Autodyn 取 $717.6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T 为气体的温度。

故 Audodyn 中的气体压力仅仅与气体的密度和内能有关。同时,内能仅与温度相关,因此 Audodyn 中的压缩气体的压力仅与气体的密度和温度有关。

根据仿真模型,需要的压缩气体呈圆柱形,其半径 $R_0=R_b+\delta$,长度为 l_0 ,压缩气体初始压力为 p_0 。假设该气体由温度为 $T=288.2\text{ K}$ 、压力为 $p_{b0}=$

$0.101\ 325\text{ MPa}$ 、密度为 $\rho_{b0}=0.001\ 225\text{ g/cm}^3$ 的初始气体定温压缩而成。

压缩气体的初始体积为 $V_0=\pi R_0^2 l_0$,由下面的理想气体状态方程可以计算出压缩之前需要的气体体积 $V_{b0}=p_0 V_0/p_{b0}$,因此压缩后的气体密度 $\rho_0=V_{b0}\rho_{b0}/V_0$,压缩气体的质量 $m_q=\rho_0 V_0$ 。

$$pV=nRT$$

(15)

若以 $\delta=0\text{ mm}$, $R_0=32\text{ mm}$, $l_0=64\text{ mm}$, $V_0=2.058\ 9\times 10^{-4}\text{ m}^3$ 为基准,则在保证弹底填充高压气体体积及压力不变的情况下, $\delta=1\text{ mm}$ 时对应的仿真模型的各参数如表 1 所示。

表 1 $\delta=1\text{ mm}$ 的仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters with $\delta=1\text{ mm}$

l_0/mm	l_b/m	R_b/m	l/m	δ/m
60.180 7	0.07	0.032	0.336	0.001
p_0/MPa	v_0/m^3	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	m_q/g	
100	$2.059\ 8\times 10^{-4}$	1.208 981	248.917 1	

1.3 理论与仿真计算结果

1.3.1 理论计算结果

根据仿真模型的参数,理论计算所需要的各参数如表 2 所示。

表 2 理论计算参数

Table 2 Theoretical calculation parameters

φ	m/kg	S_b/m^2	S/m^2	γ
1.155 5	1.494 6	$3.217\ 0\times 10^{-3}$	$3.421\ 2\times 10^{-3}$	1.4
p_0/MPa	V_0/m^3	L/m	C_v	
100	$2.052\ 7\times 10^{-4}$	0.336	0.6	

根据表中的数据进行计算,弹丸速度和弹底压力与弹丸行程的曲线如图 2 所示,弹丸炮口初速为 159 m/s 、漏气质量为 57.11 g 。

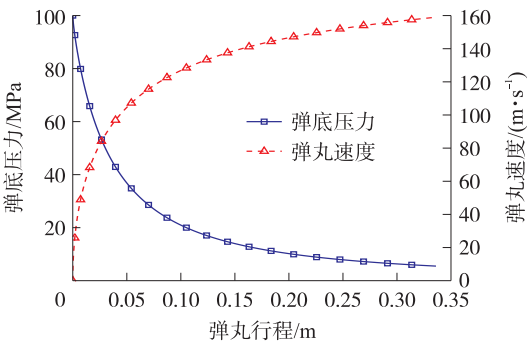


图 2 理论计算结果

Fig. 2 Results of theoretical calculation

1.3.2 仿真计算结果

根据图 1 结构建立 Audodyn 二维轴对称模型。模型中的弹丸采用材料库中的 Steel4340 模型,压缩空气的气体密度设为 $1.208\ 981\text{ g/cm}^3$ 。使用欧拉网

格建立空气域,并在空气域内使用拉格朗日网格建立弹丸部件填充材料。由于欧拉网格边界默认为刚性边界,因此身管部件无需建立。将弹底之后的空气域填充高压气体,空气域其他部分不填充。流出边界设置在空气域末端(炮口处)来模拟空气流出状态。在拉格朗日-欧拉耦合下,设定耦合方式为 Automatic 自动耦合方式,以模拟压缩空气与弹丸间的流固耦合。

输出弹丸速度及加速度数据,通过中位值平均滤波法计算弹丸速度及弹底压力与弹丸行程的曲线。

1.3.3 结果对比

将理论计算结果与仿真计算结果进行比较,其弹丸速度和弹底压力与弹丸行程的曲线如图 3 所示。由图可知,仿真计算的弹丸速度略高于理论计算结果,仿真计算较于理论计算的炮口初速的误差为 5.19%,说明 Autodyn 在计算气体泄露时的发射过程与理论计算吻合良好。

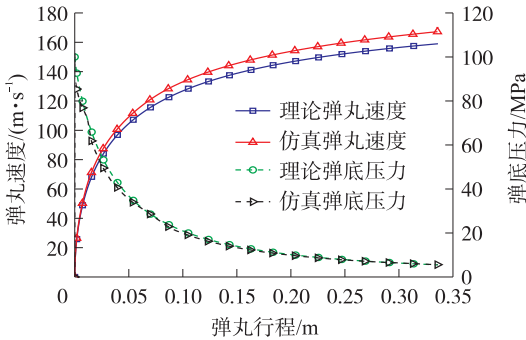


图 3 理论计算与仿真计算结果对比

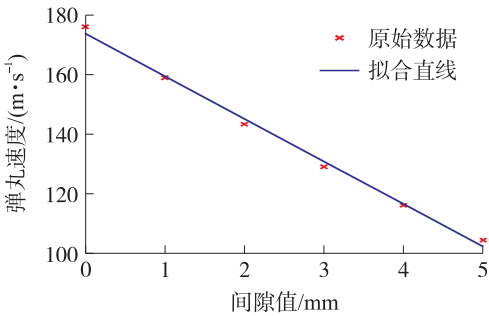
Fig. 3 Comparison of theoretical calculation and simulation calculation results

2 间隙漏气对发射过程的影响

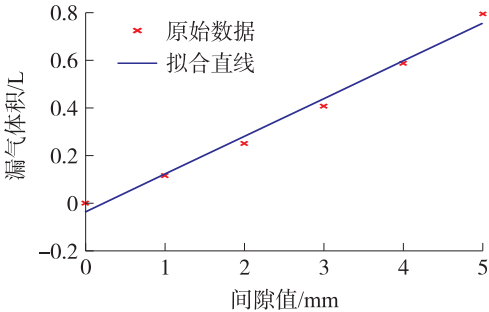
为研究弹丸与身管之间间隙对弹丸初速的影响,取弹丸与身管之间的间隙分别为 0 mm、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm 进行仿真。为保持弹底压力一致,则高压气体体积保持不变,由于间隙发生变化,仿真模型中填充的高压气体的半径也产生变化。根据圆柱体积计算公式,可以计算不同间隙对应的高压气体填充长度分别为 64 mm、60.180 7 mm、56.692 8 mm、53.499 4 mm、50.568 5 mm 和 47.872 0 mm。

各间隙对应理论计算的弹丸炮口初速、漏气体积和漏气质量如图 4 所示。可以看出,炮口初速、漏气体积、漏气质量与间隙大小基本呈线性关系。利用最小二乘法进行直线拟合,得到三者的斜率分别为 $k_1 =$

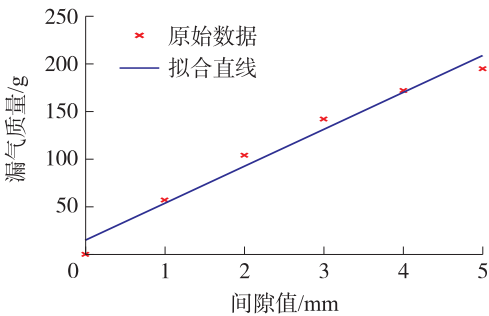
$-14.312\ 5, k_2 = 0.158\ 8, k_3 = 38.801\ 1。$



(a) 不同间隙的弹丸炮口初速



(b) 不同间隙的漏气体积



(c) 不同间隙的漏气质量

图 4 不同间隙对应的理论计算结果

Fig. 4 Theoretical calculation results with different gaps

理论与仿真计算的炮口初速与间隙大小的关系如图 5 所示。

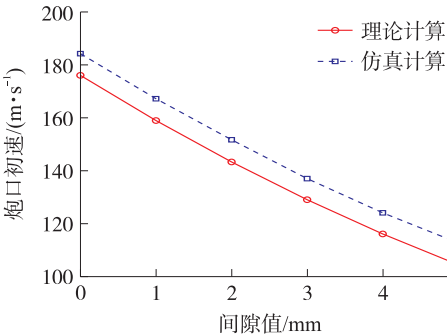


图 5 炮口初速与间隙的关系

Fig. 5 Relationship between the initial velocity of the muzzle and the gap

从图 5 中可以看出,随着间隙值的增大,理论计算与仿真计算的炮口初速均下降,且下降趋势一致,利用最小二乘法对两组数据进行直线拟合,得到两条直线的斜率分别为-14.741 3 和-14.337 9,两者基本相等。

3 闭气环闭气机理分析

3.1 闭气环结构设计

以锥面和带尾裙闭气环为例,研究两种不同结构的闭气环在弹丸与身管间的间隙为 1 mm 时的闭气效果。

锥面闭气环结构及参数如图 6 所示,根据表 3 提供的各参数计算填充的高压气体的长度 l_1 约为 52.3 mm。

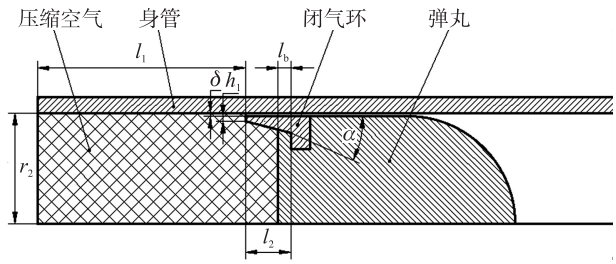


图 6 锥面闭气环结构及参数

Fig. 6 Structure and parameters of the conical obturator ring

表 3 锥面闭气环仿真参数

Table 3 Simulation parameters of conical obturator ring							
V_0/m^3	r_2/mm	δ/mm	h_1/mm	l_2/mm	l_b/mm	$\alpha/(\circ)$	
2.0588×10^{-4}	33	1	1.5	14	4	14.04	

带尾裙闭气环结构及参数如图 7 所示,根据表 4 提供的各参数计算填充的高压气体的长度约为 51.8 mm。

表 4 带尾裙闭气环仿真参数

Table 5 Simulation parameters of skirt obturator ring							
V_0/m^3	r_2/mm	δ/mm	h_1/mm	l_2/mm	l_3/mm	l_b/mm	$\alpha/(\circ)$
2.0588×10^{-4}	33	1	1.5	6	8	4	23.63

Aulodyn 仿真模型与上文相同,但是在弹丸底部及外侧距离 1 mm 处增加一闭气环与身管,材料为 Steel1006。由于仅关注闭气环的作用,可将身管视作刚体,并限制其轴向和径向的位移。在拉格朗日-拉格朗日耦合条件下,闭气环与身管和弹丸之间主要为间隙接触方式,并设定摩擦系数为 0.15,以模拟闭气环与身管和弹丸之间的摩擦力。在拉格朗日-欧拉耦合下,设定耦合方式为 Automatic 自动耦合方式,以模拟压缩空气与弹丸和闭气环间的流固耦合。

使用锥面闭气环和带尾裙闭气环与不使用闭气环的弹丸速度与行程间的对比如图 8 所示。

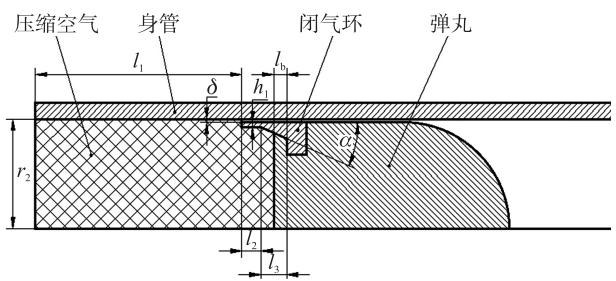


图 7 带尾裙闭气环结构及参数

Fig. 7 Structure and parameters of the skirt obturator ring

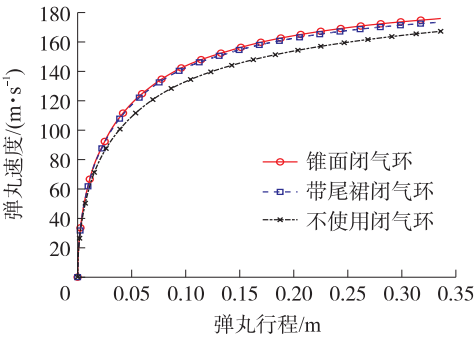


图 8 弹丸速度对比图

Fig. 8 Comparison chart of projectile velocity

使用锥面闭气环的气体炮的炮口初速为 176.01 m/s,带尾裙闭气环的气体炮的炮口初速为 173.62 m/s,不使用闭气环时气体的炮口初速为 167.26 m/s。相较于不使用闭气环的情况,使用锥面闭气环和带尾裙闭气环分别使得气体炮炮口初速提升了 5.23% 和 3.80%。闭气环弹丸的炮口初速有明显提升作用,且锥面闭气环的闭气效果优于带尾裙闭气环。

3.2 结果对比与分析

在两个闭气环上设置如图 9 所示的观测点,上侧设置序号为 1~10 的 10 个观测点,观测点之间的间距为 2 mm;左侧设置序号为 11 的观测点,通过观测点记录仿真数据。

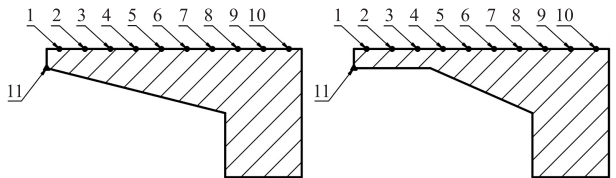


图 9 观测点分布

Fig. 9 Distribution of monitors

锥面闭气环与带尾裙闭气环前 0.1 ms 的等效

应力图如图 10 所示。从该图可以看出,闭气环受到高压气体作用后,其尾部迅速抬起,然后闭气环沿轴

线方向不断抬起,直至完全贴紧身管,之后始终保持贴紧姿态,保证膛内密闭性。

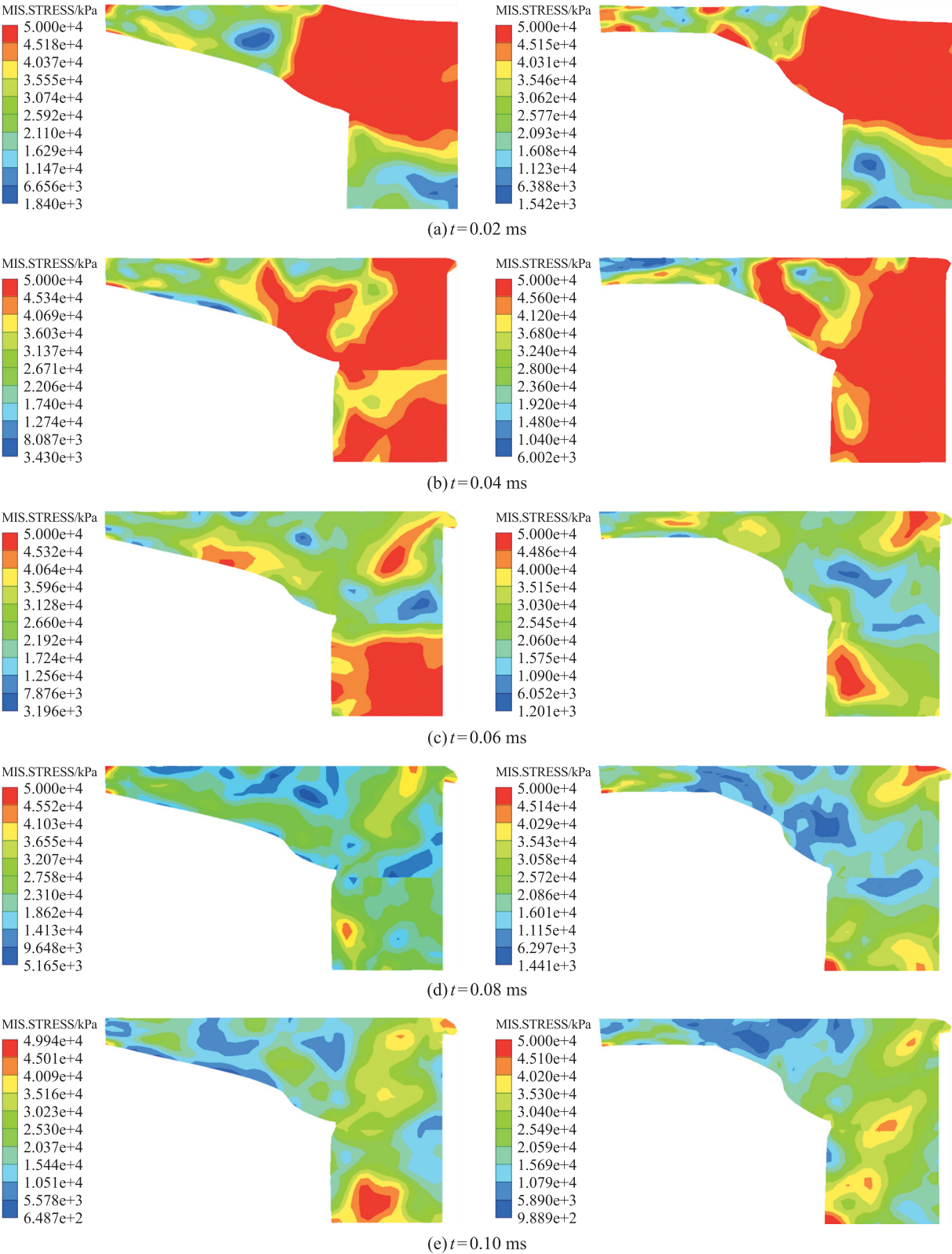


图 10 两种闭气环等效应力图

Fig. 10 Stress of two different obturator rings

锥面闭气环上侧观测点与左侧观测点的压力对比如图 11 所示,带尾裙闭气环上侧观测点与左侧观测点的压力对比如图 12 所示。闭气环左侧观测点 11 记录的数据为高压气体与闭气环间的压力,闭气环上侧观测点记录的数据为身管与闭气环间的压力。而从图中可以看出,锥面闭气环上侧观测点 3、4、5、7、8 的压力均明显大于左侧观测点 11 的压力,带尾裙闭气环上侧观测点 1、2、4、5、7、8、9 的压力均明显大于左侧观测点 11 的压力;说明无论锥面闭气环还是带尾裙闭气环,其上侧半数以上区域与身管间的压力大于闭气环左侧的高压气体的压力,因此高压气体无法挤开贴紧后的身管与闭气环,闭气环始终与身管贴紧,达到闭气效果。

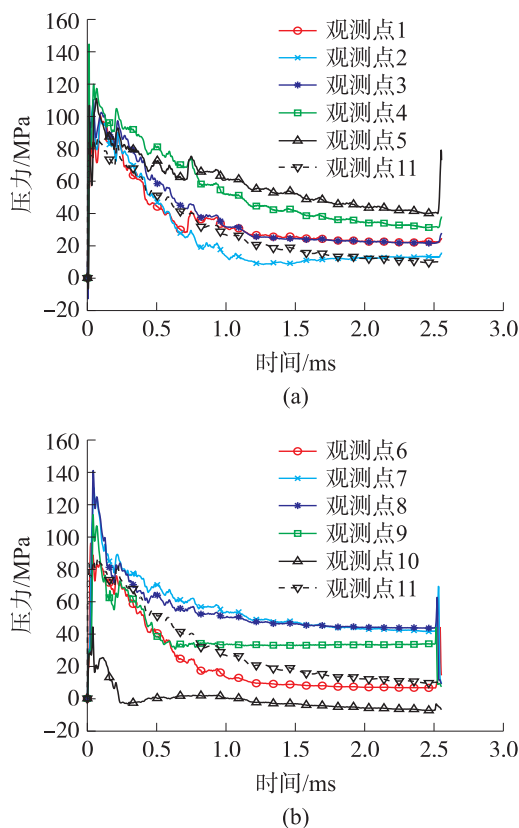


图 11 锥面闭气环观测点压力对比

Fig. 11 Pressure comparison between monitors of the conical obturator ring

两种闭气环上侧径向位移如图 13 所示,从图中可以看出,锥面闭气环与带尾裙闭气环均迅速径向向外移直至贴紧身管内壁,并且除观测点 10 外其余观测点在弹丸膛内移动过程中一直贴紧身管。0.05 ms 内观测点的径向位移如图 14 所示,带尾裙闭气环在观测点 1、2、3、4、5、6 处响应速度(贴紧身管的速度)较快,而锥面闭气环在观测点 7、8、9、10

处响应速度较快,即带尾裙闭气环的尾裙部分能够更快贴紧身管内壁。

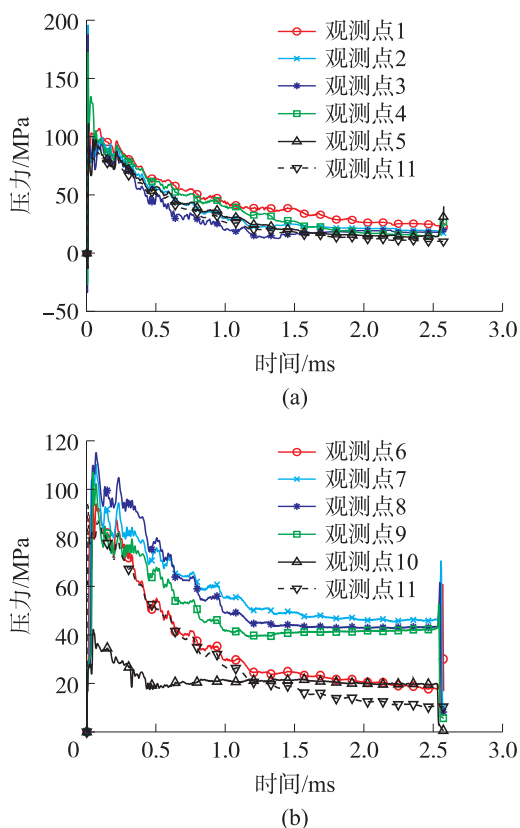


图 12 带尾裙闭气环观测点压力对比

Fig. 12 Pressure comparison between monitors of the skirt obturator ring

两闭气环上侧的各观测点的径向力对比如图 15 所示。由图可知,带尾裙闭气环观测点 1、2、6、7、8、9、10 处的径向力大于锥面闭气环的径向力。因此,带尾裙闭气环的径向力大于锥面闭气环的径向力的观测点数目更多,即带尾裙闭气环与身管贴紧的更加紧密的部分更多,闭气效果更好。

从上述分析中可知:带尾裙闭气环能够更快贴紧身管,并且能够更加紧密贴紧身管,说明带尾裙闭气环的闭气效果更好,但是锥面闭气环对应的炮口初速更大。这是因为带尾裙闭气环与身管间的径向力更大,与使用锥面闭气环相比,虽然可以保证有更大的弹后压力,但其与身管的摩擦阻力也更大。故当使用带尾裙闭气环后弹后压力的增值与摩擦阻力之间的差值小于使用锥面闭气环后的该差值时,带尾裙闭气环的实际作用效果便不如锥面闭气环。因此在选择闭气环时还应当考虑闭气环与身管的摩擦作用。

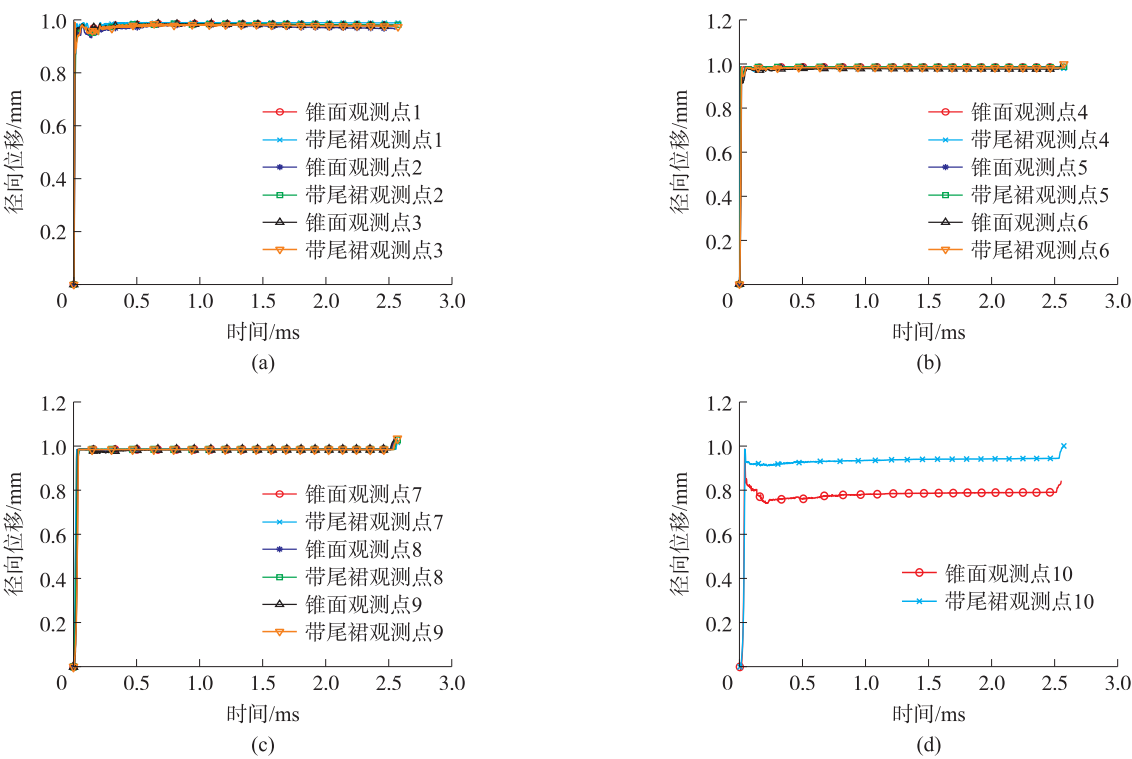


图 13 两种闭气环上侧观测点的径向位移

Fig. 13 Radial displacements of the monitors on the upper side of two obturator rings

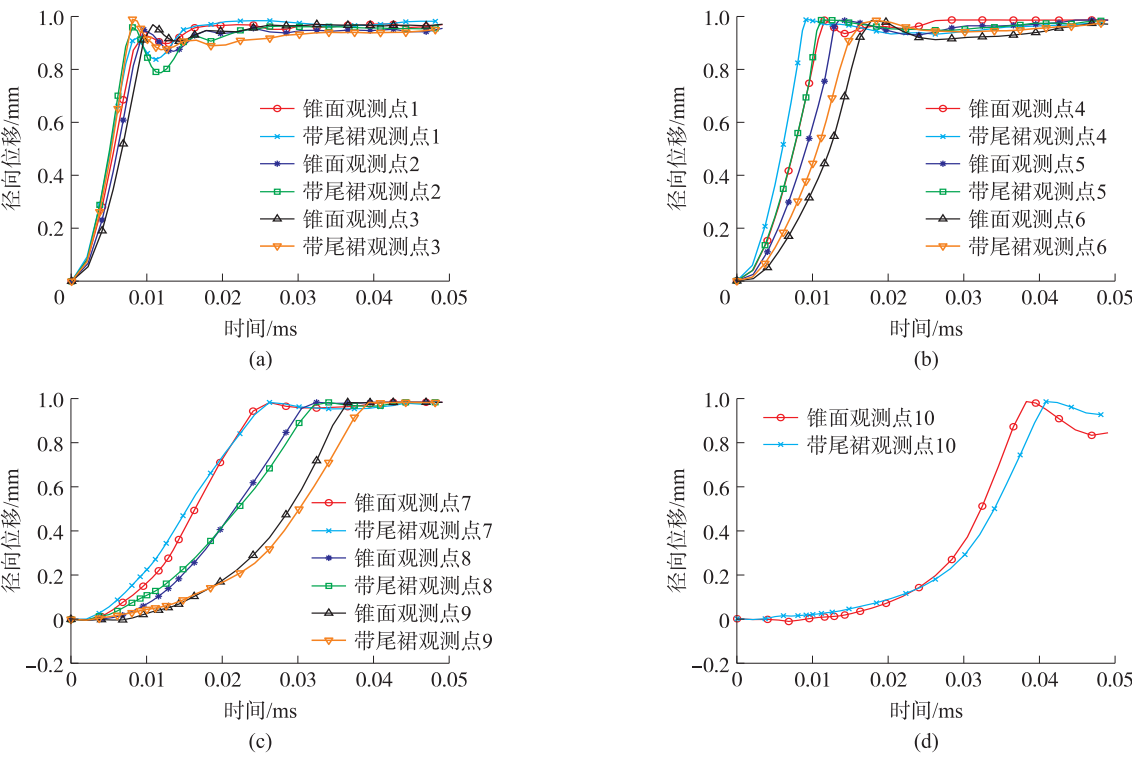


图 14 两种闭气环上侧观测点的径向位移($t=0.05$ ms)

Fig. 14 Radial displacements of the monitors on the upper side of two obturator rings($t=0.05$ ms)

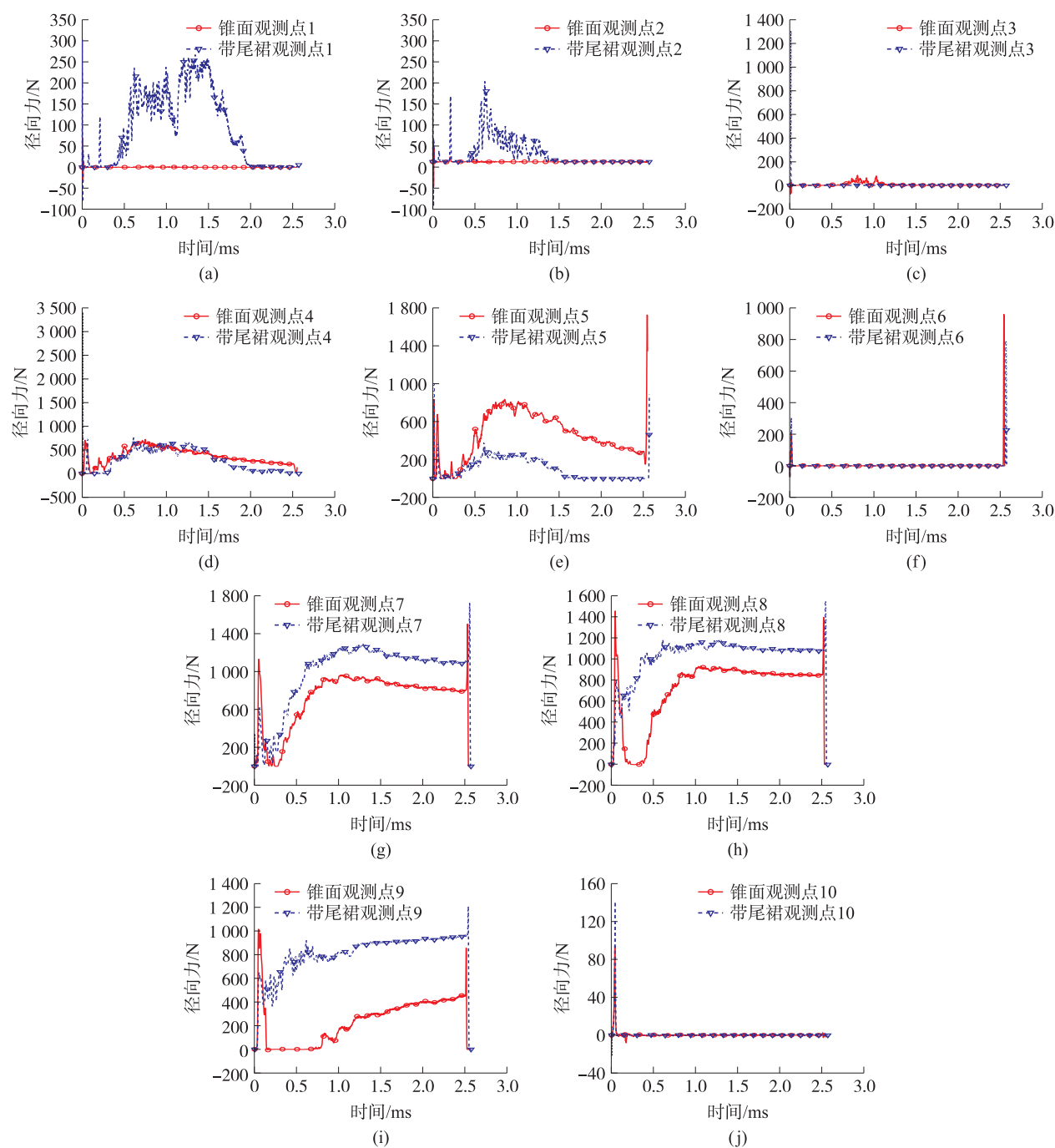


图 15 两种闭气环上侧观测点径向力对比

Fig. 15 Radial force of the monitors on the upper side of two obturator rings

4 结论

①建立了考虑气体泄漏的气体炮内弹道模型,并以此验证 Autodyn 气体炮仿真模型,两者结果吻合良好,表明可以通过 Autodyn 软件来模拟气体炮的发射过程。

②通过计算与模拟气体炮在不同身管与弹丸间隙条件下的发射过程,发现气体泄漏量、弹丸炮口初

速与弹丸与身管间隙之间基本呈线性关系,即随着身管与弹丸之间间隙的不断增大,气体泄漏量逐渐增大,弹丸炮口初速逐渐减小。

③通过 Autodyn 模拟气体炮在带尾裙闭气环和锥面闭气环作用下的发射过程,两种闭气环均可以提高弹丸炮口初速。虽然带尾裙闭气环与身管的贴紧力更大,闭气效果更好,但是其与身管的摩擦也相应增大,导致使用锥面闭气环的弹丸炮口初速更大。

因此在设计闭气环时应综合考虑闭气效果与摩擦阻力。

参考文献

- [1] 赵俊利,高跃飞. 气体炮实用内弹道技术研究[J]. 太原理工大学学报,2003,34(3):288-290.
ZHAO Junli,GAO Yuefei. Study on the interior ballistics of the gas gun[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(3):288-290. (in Chinese)
- [2] 赵俊利,曹锋. 气体炮实用内弹道方程及应用[J]. 火炮发射与控制学报,2003,(3):48-51.
ZHAO Junli,CAO Feng. Practical interior ballistic equation of the gas-gun and its application[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2003,(3):48-51. (in Chinese)
- [3] 赵希欣,高元楼. 一种气体炮的建模与分析[J]. 液压气动与密封,2012,32:43-44.
ZHAO Xixin,GAO Yuanlou. Modeling and analysis of a gas gun[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, 32: 43 - 44. (in Chinese)
- [4] 李锋,拜云山,冯晓伟. 一级气体炮内弹道方程修正及验证[J]. 弹道学报,2016,28(1):14-18.
LI Feng, BAI Yunshan, FENG Xiaowei. Modification and validation of interior ballistic equation for one-stage gas gun[J]. Journal of Ballistics,2016,28(1):14-18. (in Chinese)
- [5] 刘刚,张瑜莹,景凤理. 轴向冷气弹射系统建模及仿真分析[J]. 弹道学报,2024,36(3):25-31.
LIU Gang,ZHANG Yuying,JING Fengli. Modeling and simulation analysis of axial cold ejection system[J]. Journal of Ballistics, 2024,36(3):25-31. (in Chinese)
- [6] 赫雷,尚兴超,周克栋,等. 一种压缩空气驱动的武器发射过程动力学分析[J]. 振动与冲击,2014,33(21):202-206.
HE Lei,SHANG Xingchao,ZHOU Kedong,et al. Dynamic analysis for launching process of a compressed air-driving weapon[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33 (21): 202 - 206. (in Chinese)
- [7] 廖欢欢,张海波,熊勇,等. 高低压室发射弹丸内弹道仿真与试验研究[J]. 弹道学报,2022,34(4):45-51.
LIAO Huanhuan,ZHANG Haibo,XIONG Yong,et al. Simulation and experimental study on interior ballistics of projectiles launched with high-low pressure chamber[J]. Journal of Ballistics, 2022, 34(4):45-51. (in Chinese)
- [8] 仲伟君,赵晓利,齐杏林. 气体炮内弹道建模与发射环境模拟研究[J]. 动力学与控制学报,2005,3(1):62-66.
ZHONG Weijun,ZHAO Xiaoli,QI Xinglin. Study on the modeling of the internal ballistic of a gas gun and launching environment simulation[J]. Journal of Dynamics and Control,2005,3(1):62-66. (in Chinese)
- [9] 范奥博,苏智剑. 一种气动发射装置仿真研究[J]. 机械与电子,2019,37:15-19.
FAN Aobo, SU Zhijian. Simulation research of a pneumatic launching device[J]. Machinery & Electronics,2019,37:15-19. (in Chinese)
- [10] 丛龙腾,姜超,鲁霄光,等. 基于 AUTODYN 的压缩空气弹射内弹道研究[J]. 航空兵器,2014(5):46-49.
CONG Longteng, JIANG Chao, LU Xiaoguang, et al. Interior ballistic research of compressed air launcher based on Autodyn software[J]. Aero Weaponry,2014(5):46-49. (in Chinese)
- [11] 雒智林,茹致贤,卢婷,等. 高压压楔式炮闩闭气形式分析[J]. 火炮发射与控制学报,2006,27(2):21-24.
LUO Zhilin, RU Zhixian, LU Ting, et al. Obturation pattern analysis of high pressure wedge breechblock[J]. Journal of Gun Launch & Control,2006,27(2):21-24. (in Chinese)
- [12] 阮伟靖,薛百文,吴臣,等. 某转膛式武器闭气环的结构及动力特性分析[J]. 火炮发射与控制学报,2017,38(3):20-24.
RUAN Weijing, XUE Baiwen, WU Chen, et al. Analysis of structure and dynamic characteristic of a revolver weapon's obturator ring[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2017, 38(3):20-24. (in Chinese)
- [13] 刘朋科,史婉荣,刘源远,等. 橡胶紧塞垫闭气机构的有限元分析[J]. 中北大学学报(自然科学版),2014,35(2):101-105.
LIU Pengke, SHI Wanrong, LIU Yuanyuan, et al. The finite element analysis of rubber obturator structure[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2014,35(2):101-105. (in Chinese)
- [14] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.
ZHANG Xiaobing. Interior ballistics of guns[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2014. (in Chinese)
- [15] 王金贵. 气体炮原理及技术[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
WANG Jingui. Principle and technology of gas gun[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2001. (in Chinese)
- [16] 蔡增基,龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
CAI Zengji, LONG Tianyu. Fluid mechanics pumps and fans[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,1999. (in Chinese)
- [17] 门建兵,蒋建伟,王树有. 爆炸冲击数值模拟技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2015.
MEN Jianbing, JIANG Jianwei, WANG Shuyou. Fundamentals of numerical simulation for explosion and shock problems[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2015. (in Chinese)