

# 黏性对高压空气弹射装置内弹道性能的影响

邵亚军<sup>1</sup>, 张 炜<sup>1</sup>, 高钦和<sup>2</sup>, 杨正伟<sup>1</sup>, 管文良<sup>2</sup>

(1. 火箭军工程大学 动力工程系, 西安 710025;

2. 火箭军工程大学 发射工程系, 西安 710025)

**摘 要:** 针对高压空气弹射装置中, 气体黏性流动造成的内耗散和沿程损失对内弹道性能的影响, 结合高压下空气黏度公式, 重点考虑低压室内的黏性流动, 得到了未充分发展黏性流体在非定常状态下的能量损失计算方法。基于高压空气真实气体效应分析, 建立了考虑气体摩擦的高压空气弹射内弹道数学模型, 进行了数值求解。对比结果表明: 气体摩擦效应对快速、瞬时过程造成的干扰量较小, 对象宏观特性变化不大, 低精度系统中可忽略不计。通过对结果的规律性进行探究, 发现摩擦效应降低了有用功的转化率, 减缓了气体膨胀速率, 造成低压室压力的非均匀分布、高压室到低压室的质量流量波动和弹体初始时刻的碰撞。

**关 键 词:** 高压空气; 黏性; 弹射系统; 内弹道模型; 摩擦损失

**中图分类号:** V411

**文献标志码:** A

## Influence of viscosity on interior ballistics of high-pressure air ejection device

SHAO Yajun<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, GAO Qinhe<sup>2</sup>,

YANG Zhengwei<sup>1</sup>, GUAN Wenliang<sup>2</sup>

(1. Department of Power Engineering,

Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Department of Launch Engineering,

Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** The gas viscous flow in the high-pressure air ejection device causes energy dissipation and pressure loss, and may change the performance of the interior ballistics. An energy loss calculation method was obtained for the non-fully developed unsteady flow. An interior ballistic model was established on the basis of the real gas effects for the high-pressure air ejection device under the gas friction effects. The numerical experiments were performed. The results show that the gas friction effects cause little errors for the quick gas expansion, and the performance of the missile changes not too much. The gas friction effects can be ignored in the low precision system. However, the law curves show that the gas friction effects reduce the energy quality, and slow down the gas expansion rate. Besides, the gas friction effects make the pressure in the low pressure chamber unequal, and generate the mass flowrate fluctuation from high pressure chamber to low pressure chamber. The missile collision occurs because of the gas friction.

**收稿日期:** 2016-03-21

**基金项目:** 国家自然科学基金(51475462, 51575516, 51305447)

**作者简介:** 邵亚军(1989—), 男, 博士生, 主要从事动力系统及其应用研究。

**引用格式:** 邵亚军, 张炜, 高钦和, 等. 黏性对高压空气弹射装置内弹道性能的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8): 1933-1942.  
SHAO Yajun, ZHANG Wei, GAO Qinhe, et al. Influence of viscosity on interior ballistics of high-pressure air ejection device[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1933-1942.

**Key words:** high-pressure air; viscosity; ejection system; interior ballistic model; friction loss

高压空气作为一种新型能源,较其它动力源有明显的优势,在航空航天领域及武器装备中得到越来越广泛地应用<sup>[1]</sup>。高压空气弹射可极大减少进程中的高特征信号,有效提升导弹及阵地的生存能力。但由于较低的能量密度,弹射过程气体消耗量大,造成储能设备庞大,降低了发射过程的机动性;且高压空气在快速释放时产生的极端工况,使热力性质参数与理想气体之间存在较大偏差,造成能量品质及利用效率降低;传统的基于理想气体状态方程的分析方法无法获取真实的气动效率。维里方程考虑了气体分子间的相互作用,提高了高压工质气体效应的真实性,Chueh等<sup>[2]</sup>对第二维里系数、第三维里系数进行了修正,刘朝等<sup>[3-4]</sup>分析了高温高压湿空气的维里系数及维里方程,杨风波等<sup>[5]</sup>将对应态原理与维里方程相结合,给出了包含多影响因素的对应态维里方程。上述研究均基于无黏流气体,而空气在管路中流动,空气与内壁之间、空气分子之间均存在黏性摩擦,会产生内耗散和沿程损失。赵俊利等<sup>[6]</sup>引入次要功计算系数来考虑气体炮内弹道能量损失和摩擦损失,于勇等<sup>[7]</sup>在分析发射装置附加弹射力时将气体摩擦力视为固定平均值,何太平、甄建斌等<sup>[8-9]</sup>利用摩擦和散热之间的雷诺比关系模拟管内气流的真实流动,蔡茂林和香川利春<sup>[10]</sup>提出气动功率概念,侧重分析导致气动功率损失的因素,讨论气动系统能量损失情况。武丹等<sup>[11]</sup>分析了黏性及热传导对爆轰波的影响,发现两者均为微扰动,对爆轰波基本不产生影响。但是对于使用精度和安全性要求较高的导弹武器装备,气源黏性特征对内弹道性能的影响仍需深入分析。

本文通过研究气体黏性与压力及散热之间的相互作用,推导出了高压空气弹射装置中气体摩擦效应造成的能量损失,并将黏性因素考虑在内,建立了基于真实气体效应的某导弹内弹道数学模型,分析了摩擦效应对气体热物性和内弹道性能的影响,为高压空气在导弹武器装备中更广泛的应用提供参考。

## 1 高压空气热物性质参数

### 1.1 空气黏度

空气黏性是由分子不规则运动和分子间吸引力引起的,其中主要是分子的不规则运动,Suth-

erland同时考虑了两者的作用<sup>[12]</sup>,给出了低压下黏度 $\eta$ 与温度 $T$ 的定量关系,Sutherland关系式只适用于压强不太大的场合,压强对气体黏度的影响几乎可以忽略;而对于高压气体,黏度受压强影响较大,其计算过程也较为复杂。标准空气模型的组成为氮气、氧气和氩气,对应的体积分数为78.12%,20.96%,0.92%,在推断空气黏度过程中,将空气视为一种纯质气体。高压气体黏度 $\eta$ 的推算方法很多,综合考虑准确性与简便性,本文以Lucas方法<sup>[13]</sup>为基础,分析了高压空气的黏度随温度、压强的变化关系。

结果表明,在常温状态下,压缩空气的黏度与压力近似线性关系,但在压力较小的情况下,黏度基本保持不变。因此,在压力较小的工况下(小于几百千帕),可忽略压力对黏度的影响,但在高压工况下,为了提高黏度对压缩空气释放过程的影响精度,需要考虑其与压力之间的关系。

通过分析高压空气在不同温度下黏性与压力之间的关系发现,在压力小于15 MPa下,空气黏度随着温度的增高而增大,但低温下的增长速率较大,当压力大于15 MPa以后,低温状态下的黏度反而大于温度较高的状态。这是因为,温度较低时,尤其接近临界温度时,随着压力的增大,压缩空气有可能出现液化现象,显然,液体的黏度要大于气体。此时,气体黏度规律将不再适用。

### 1.2 气体摩擦损失

高压空气弹射系统主要由供气装置和弹射装置组成,即高压室、低压室两部分。由于高压室体积保持恒定,忽略高压室内气体流动造成的沿程损失;压缩空气从高压室到低压室的阀门也存在较大的局部阻力,且影响因素复杂,将在后续研究中进行深入探讨,本文重点考虑低压室内气体的黏性流动造成的沿程损失对内弹道特性的影响,忽略阀门结构因素,假定其仅起到开关功能。

在空气动力学的所有实际问题中,流体都可以被看成牛顿流体<sup>[14]</sup>。层流状态下,空气在管道内的流动速度服从抛物线分布规律,且随着时间变化不断增加;湍流流动速度分布较复杂,通常由半经验公式归纳<sup>[15]</sup>。气体在低压室内的流动压强并不能保持恒定,密度可变,即为可压缩流动。因此,可将低压室内气体的流动视为黏性可压缩流体的一维非定常流动。高压空气弹射系统所需

出筒速度一般较大,气体的流动通常经历层流和湍流两个阶段,可由雷诺数( $Re$ )规则判定。

在弹体出筒之前,低压室气体速度不断增加,体积不断增大。参考文献[15]中对管内速度分布的分析,依据黏性流体的伯努利方程,可得出气流微元  $dl$  在层流状态下沿程损失

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{4\eta dl v_{\max}}{\rho g r_0^2} + \frac{a dl}{g} \quad (1)$$

式中  $\Delta p$  为沿程压力损失,  $\rho$  为气体密度,  $r_0$  为筒的半径,  $a$  为气流宏观加速度。实际弹射过程中,弹体与筒壁通过适配器联接,达到密封与固定作用的目的,致使两者之间存有一定间隙,而当气体在筒内流动时,缝隙处的流速略大于弹体运动速度( $v_{\max}$ ),由于黏性作用,边缘气流对中间气流有正向切应力,综合考虑筒壁处的负向切应力,在计算体积流量时,视流速均匀分布,取  $v_{\max}$ ,则通过微元的体积流量

$$q_V = \int_0^{r_0} v_{\max} \cdot 2\pi r dr = \pi r_0^2 v_{\max} \quad (2)$$

由于湍流区气体流动的复杂性<sup>[16-17]</sup>,无法严格理论推导出速度规律,本文依据尼古拉兹对沿程损失因数  $\lambda$  的相关研究,得出湍流层微元流动的沿程损失

$$h_f = \begin{cases} 0.0025 Re^{1/3} \frac{dl}{2r_0} \frac{\bar{v}^2}{2g} + \frac{a dl}{g} & 2320 < Re \leq 4000 \\ \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \frac{dl}{2r_0} \frac{\bar{v}^2}{2g} + \frac{a dl}{g} & 4000 < Re \leq 10^5 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\bar{v}$  为气流平均速度。由上述分析,首先计算出实际过程的雷诺数变化范围:  $0 < Re < 113\,000$ ,考虑实际管道光滑度较高,且弹体在管道内运动时间较短(0.77 s),为简化计算,将流动过程分为层流区、过渡区、光滑管区,其中层流区和过渡区的时间极短,流动主要集中在光滑管区。对应的能量损失分别为  $Q_1, Q_2, Q_3$ 。由压力损失的传递特性,总压力损失等于各微元压力损失之和。

初始阶段的短时间内,气体处于层流状态,将弹体随气流运动的整个过程近似为加速度  $a$  恒定,依据雷诺数判定规则和运动方程可得气体流过某微元的时间段为  $\left[\sqrt{\frac{2L}{a}}, \frac{2320\eta}{a\rho d}\right]$ ,  $L$  为气流微元距起始段的长度,  $d$  为筒径。整个层流过程的行程区间为  $\left[0, \frac{1}{2a}\left(\frac{2320\eta}{\rho d}\right)^2\right]$ 。由  $dQ = N \cdot dt$ ,  $N$

为沿程损失功率,可得层流区能量损失

$$Q_1 = \int_0^{\frac{1}{2a}\left(\frac{2320\eta}{\rho d}\right)^2} \int_{\sqrt{\frac{2L}{a}}}^{\frac{2320\eta}{a\rho d}} [4\pi\eta(t)v_{\max}^2 + \pi\rho ar_0^2 v_{\max}] dt dl \quad (4)$$

当气流处于过渡区状态时,处于  $\left[0, \frac{1}{2a}\left(\frac{2320\eta}{\rho d}\right)^2\right]$  行程区内的气体已充分发展。沿程损失功率公式同样适用于湍流状态,湍流流动的平均速度需运用统计理论计算,结合参考文献[15]中关于速度分布的描述以及实际雷诺数的变化,取  $\bar{v} = 0.817 v_{\max}$ ,考虑到湍流质点参混剧烈、速度分布更加均匀,计算体积流量时,流速取  $v_{\max}$ 。

整个过渡区的时间区间为  $\left[\frac{2320\eta}{a\rho d}, \frac{4000\eta}{a\rho d}\right]$ ,已充分发展的流体历经整个时间段,该区间的能量损失只需对功率进行时间积分,即

$$Q_{21} = \frac{1}{2a}\left(\frac{2320\eta}{\rho d}\right)^2 \cdot \int_{\frac{2320\eta}{a\rho d}}^{\frac{4000\eta}{a\rho d}} \left(0.0025 Re^{1/3} \frac{\rho \bar{v}^2}{2d} + \rho a\right) \pi^2 r_0 v_{\max} dt \quad (5)$$

而在  $\left[\frac{1}{2a}\left(\frac{2320\eta}{\rho d}\right)^2, \frac{1}{2a}\left(\frac{4000\eta}{\rho d}\right)^2\right]$  行程区间内的流动,可视为未充分发展,其中  $\frac{1}{2a}\left(\frac{4000\eta}{\rho d}\right)^2$  为过渡区流动的最大行程。未充分发展区气流流过微元的时间段为  $\left[\sqrt{\frac{2L}{a}}, \frac{4000\eta}{a\rho d}\right]$ ,求解能量损失时,需要对损失功率进行时间和行程双重积分,即

$$Q_{22} = \int_{\frac{1}{2a}\left(\frac{2320\eta}{\rho d}\right)^2}^{\frac{1}{2a}\left(\frac{4000\eta}{\rho d}\right)^2} \int_{\sqrt{\frac{2L}{a}}}^{\frac{4000\eta}{a\rho d}} \left(0.0025 Re^{1/3} \frac{\rho \bar{v}^2}{2d} + \rho a\right) \cdot \pi r_0^2 v_{\max} dt dl \quad (6)$$

则过渡区总的能量损失为

$$Q_2 = Q_{21} + Q_{22} \quad (7)$$

同理,可分析出气流处于光滑管区时的能量损失

$$Q_3 = \frac{1}{2a}\left(\frac{4000\eta}{\rho d}\right)^2 \int_{\frac{4000\eta}{a\rho d}}^{\sqrt{\frac{2L_0}{a}}} \left(\frac{0.3164}{Re^{0.25}} \frac{\rho \bar{v}^2}{2d} + \rho a\right) \cdot \pi r_0^2 v_{\max} dt + \int_{\frac{1}{2a}\left(\frac{4000\eta}{\rho d}\right)^2}^{L_0} \int_{\sqrt{\frac{2L}{a}}}^{\sqrt{\frac{2L_0}{a}}} \left(\frac{0.3164}{Re^{0.25}} \frac{\rho \bar{v}^2}{2d} + \rho a\right) \cdot \pi r_0^2 v_{\max} dt dl \quad (8)$$

式中  $L_0$  为导向段长度,第 1 项表示距离在

$\left[0, \frac{1}{2a} \left( \frac{4000\eta}{\rho d} \right)^2 \right]$  内已充分发展的流动损失的能量,第2项表示区间  $\left[ \frac{1}{2a} \left( \frac{4000\eta}{\rho d} \right)^2, L_0 \right]$  内未充分发展的流动损失。整个弹射过程中,由于流体的黏性造成的总能量损失为

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (9)$$

## 2 空气弹射装置内弹道数学模型

本文提出的简易弹射系统主要由高压室、低压室、阀控机构等部件组成,高、低压室为核心部件,弹射模型如图1所示。

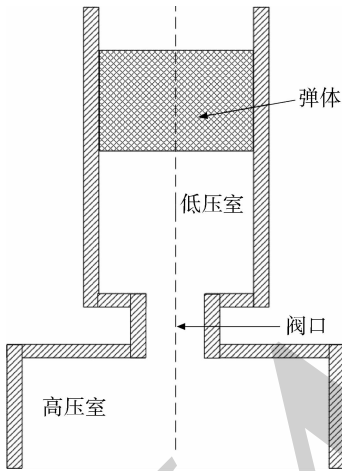


图1 气动弹射系统简图

Fig.1 Schematic diagram of pneumatic ejection system

弹射过程,阀门打开,高压气体迅速进入低压室,膨胀做功,推动弹体运动,直至出筒。建立内弹道数学模型时,作如下假设:

1) 系统密封良好,忽略弹射过程气体泄漏。

$$B = \frac{RT_c}{p_c} \left[ 0.13356 - \frac{0.30252T_c}{T} - \frac{0.15668T_c^2}{T^2} - \frac{0.00724T_c^3}{T^3} - \frac{0.00022T_c^8}{T^8} + \omega \left( 0.17404 - \frac{0.15581T_c}{T} + \frac{0.38183T_c^2}{T^2} - \frac{0.44044T_c^3}{T^3} - \frac{0.00541T_c^8}{T^8} \right) \right] \quad (12)$$

$$C = \frac{(RT_c)^2}{p_c^2} \left[ 0.014 + \frac{0.02432T_c^{2.8}}{T^{2.8}} - \frac{0.00313T_c^{10.5}}{T^{10.5}} + \omega \left( -0.0268 + \frac{0.0177T_c^{2.8}}{T^{2.8}} + \frac{0.04T_c^3}{T^3} - \frac{0.003T_c^6}{T^6} - \frac{0.0023T_c^{10.5}}{T^{10.5}} \right) \right] \quad (13)$$

式中  $T_c, p_c$  为气体临界温度、临界压强;  $\omega$  为偏心因子,干空气取 0.03。

由麦克斯韦关系式、热力学能和焓的普遍关系式,参考文献[5],可得高压空气的比热力学能和比焓分别为

2) 弹射时间较短,忽略系统与外界热交换,此过程视为绝热等熵过程。

3) 垂直弹射,倾斜角为  $0^\circ$ ,忽略气体重力作用。

参考文献[18]中质量流量方程,依据弹射系统的质量守恒、能量守恒及运动方程,可建立弹射过程高、低压室的动力学模型

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{dt} = -q_m \\ \frac{dm_1 u_1}{dt} = -q_m h_1 \\ \frac{dm_2}{dt} = q_m \\ \frac{d(m_2 u_2)}{dt} = q_m h_1 - p_2 S v \\ m_d \frac{dv}{dt} = (p_2 - \Delta p - p_0) S - 1.2 m_d g \end{cases} \quad (10)$$

式中  $q_m$  为质量流量;  $m_1, m_2$  为高、低压室气体质量;  $h_1$  为高压室比焓;  $u_1, u_2$  分别为高、低压室比内能;  $m_d$  为弹射质量;  $S$  为筒横截面积;  $p_0$  为大气压力;  $p_2$  为低压室压力;  $v$  为弹射速度,即气流最大速度,  $v = v_{\max}$ 。

截断到第三维里系数体积级数形式的对应态维里方程为

$$\begin{cases} p_1 = \frac{RT_1}{V_{m1}} \left( 1 + \frac{B_1}{V_{m1}} + \frac{C_1}{V_{m1}^2} \right) \\ p_2 = \frac{RT_2}{V_{m2}} \left( 1 + \frac{B_2}{V_{m2}} + \frac{C_2}{V_{m2}^2} \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中  $p_1$  为低压室压力;  $V_m$  为摩尔体积,  $V_m = VM/m$ ;  $V$  为体积;  $R$  为摩尔气体常数;  $B, C$  为第二维里系数、第三维里系数。

根据气体热力学性质,参考文献[2,19]对维里系数的相关修正可得到  $B, C$  的表达式

$$\begin{cases} u = c_{vi} T + T^2 \int_{\infty}^V \frac{\partial(p/T)}{\partial T} dV \\ h = u + pV \end{cases} \quad (14)$$

式中  $c_{vi}$  为理想气体的比定容热容,依据式(11)~式(13),对式(14)进行求解,可得  $u$  和  $h$  的具体解

析式。

令  $X_1=m_1, X_2=T_1, X_3=m_2, X_4=T_2, X_5=l, X_6=v, l$  为弹射位移, 将上述流量方程、热力学公式及维里方程带入内弹道数学模型式(10)中,

并进行运算, 可建立关于气体物性参数和内弹道性能参数的封闭状态方程, 如式(15)所示。式中  $H_1^1, H_2^2, L_1^1, L_2^2$  分别对应为  $H_1^1, H_2^1, L_1^1, L_2^1$  的导函数。

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -q_m \\ \dot{X}_2 = \frac{-q_m \left( \frac{2R_gRT_c}{p_cV_{m1}}H_1^1 + \frac{1.5R_gR^2T_c^2}{p_c^2V_{m1}^2}H_2^1 - C_{Vi}X_2 \right) - q_mh_1}{X_1 \left( C_{Vi} - \frac{R_gRT_c}{p_cV_{m1}}H_1^2 - \frac{0.5R_gR^2T_c^2}{p_c^2V_{m1}^2}H_2^2 \right)} \\ \dot{X}_3 = q_m \\ \dot{X}_4 = \left[ q_m \left( C_{Vi}X_4 - \frac{2R_gRT_c}{p_cV_{m2}}L_1^1 - \frac{1.5R_gR^2T_c^2}{p_c^2V_{m1}^2}L_2^1 - h_1 \right) + S \cdot p_2X_6 + \frac{R_gRT_cX_3S \cdot X_6}{p_cV_{m2}V_2}L_1^1 + \frac{R_gR^2T_c^2X_3S \cdot X_6}{p_c^2V_{m2}^2V_2}L_2^1 \right] / \left( -X_3C_{Vi} + \frac{X_3R_gRT_c}{p_cV_{m2}}L_1^2 + \frac{0.5X_3R_gR^2T_c^2}{p_c^2V_{m2}^2}L_2^2 \right) \\ \dot{X}_5 = X_6 \\ \dot{X}_6 = \begin{cases} \frac{[p_2 - 4X_6 \cdot \eta(9.0395 + X_5)/0.0338 - p_a] \cdot S - 1.2m_dg}{m_d} & p_2 \geq 4X_6 \cdot \eta(9.0395 + X_5)/0.0338 + p_a + 1.2m_dg/S \\ 0 & p_2 < 4X_6 \cdot \eta(9.0395 + X_5)/0.0338 + p_a + 1.2m_dg/S \end{cases} \\ H_1^1 = 0.30252T_c + \frac{0.31336T_c^2}{X_2} + \frac{0.02172T_c^3}{X_2^2} + \frac{0.00176T_c^8}{X_2^7} + \omega \cdot \left( 0.15581T_c - \frac{0.763662T_c^2}{X_2} + \frac{1.32132T_c^3}{X_2^2} + \frac{0.04328T_c^8}{X_2^7} \right) \\ H_2^1 = -\frac{0.068096T_c^{2.8}}{X_2^{1.8}} + \frac{0.032865T_c^{10.5}}{X_2^{9.5}} + \omega \left( -\frac{0.04956T_c^{2.8}}{X_2^{1.8}} - \frac{0.12T_c^3}{X_2^2} + \frac{0.018T_c^6}{X_2^5} + \frac{0.02394T_c^{10.5}}{X_2^{9.5}} \right) \\ L_1^1 = 0.30252T_c + \frac{0.31336T_c^2}{X_4} + \frac{0.02172T_c^3}{X_4^2} + \frac{0.00176T_c^8}{X_4^7} + \omega \cdot \left( 0.15581T_c - \frac{0.763662T_c^2}{X_4} + \frac{1.32132T_c^3}{X_4^2} + \frac{0.04328T_c^8}{X_4^7} \right) \\ L_2^1 = -\frac{0.068096T_c^{2.8}}{X_4^{1.8}} + \frac{0.032865T_c^{10.5}}{X_4^{9.5}} + \omega \left( -\frac{0.04956T_c^{2.8}}{X_4^{1.8}} - \frac{0.12T_c^3}{X_4^2} + \frac{0.018T_c^6}{X_4^5} + \frac{0.02394T_c^{10.5}}{X_4^{9.5}} \right) \end{cases} \quad (15)$$

3 数值分析

基于上述对高压空气的热力性质分析及弹射内弹道模型, 在 MATLAB R2012a 环境下, 分别编写了忽略气体摩擦效应和考虑气体摩擦效应的内弹道模型主程序, 调用 Ode45 求解器对主程序方程进行解算, 求解时间设置为 0.77 s, 初值  $X^0 = [420 \ 293.15 \ 33.7 \ 293.15 \ 0 \ 0]$ ; 获取两种状态下的 6 个自变量的数值解之后, 通过编写的数据分析程序对两种状态下的内弹道特性进行对比, 并对高压状态下的弹道参数变化进行探究。求解过程部分系统参数如表 1 所示。

通过比较考虑摩擦和未考虑摩擦两种状态下的高压空气热物性质, 发现摩擦效应对系统造成

表 1 系统参数  
Table 1 System parameters

| 参数                                                | 数值     |
|---------------------------------------------------|--------|
| 干空气气体常数 $R/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$ | 287.0  |
| 弹射质量 $m_t/\text{kg}$                              | 31200  |
| 高压室体积 $V_h/\text{kg}$                             | 2.4    |
| 高压室初始温度 $T_h/\text{K}$                            | 293.15 |
| 泄流阀口截面积 $A_t/\text{m}^2$                          | 0.0236 |
| 筒内有效推力面积 $A_m/\text{m}^2$                         | 0.1062 |
| 初容室体积 $V_1/\text{m}^3$                            | 0.96   |
| 初容室温度 $T_1/\text{K}$                              | 293.15 |
| 初容室气体质量 $m_2/\text{kg}$                           | 33.7   |
| 等熵指数 $\kappa$                                     | 1.4    |
| 摩尔质量 $M/(\text{g}/\text{mol})$                    | 28.96  |

的扰动量非常微小,并未对宏观运动造成过大的改变,为深入研究考虑摩擦时的系统变化趋势,将曲线进行清晰化处理,图 2 所示为两种状态下(考虑摩擦、未考虑摩擦)高压室压力变化曲线,图中未考虑摩擦的曲线是将原始数据整体向下平移 1 MPa 所得。

是考虑摩擦与未考虑摩擦时的差值)。由于忽略了该过程中系统与外界的热量交换,损失的能量将直接传递给低压室内气体,转换为气体内能中的不可用能,使得低压室内气体温度升高,如图 5 中曲线所示。图 6 为考虑摩擦时低压室温度曲线。

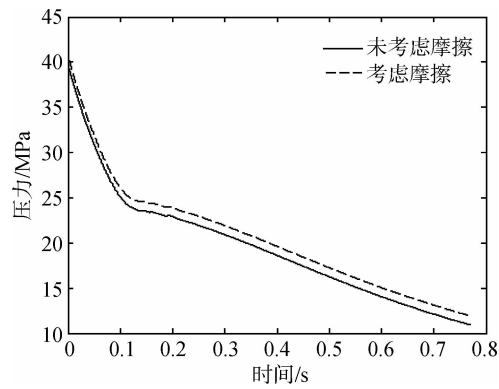


图 2 高压室压力曲线

Fig. 2 Pressure curves of high-pressure chamber

由图 2 可知,两种状态下的高压室压力曲线走势基本一致,两者差值也极为微小,但从直观上却可以发现其并不是固定值,而是随着时间变化。两者差值随时间的变化规律如图 3 所示。

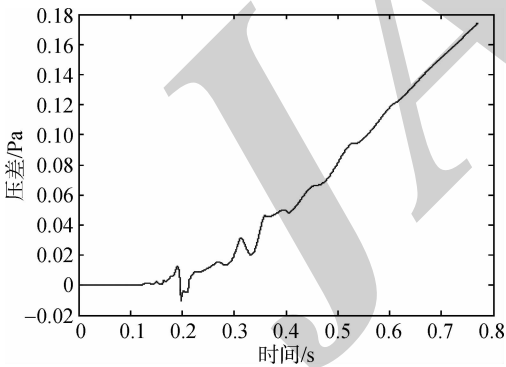
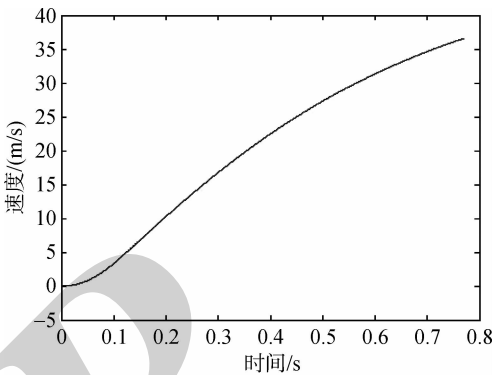


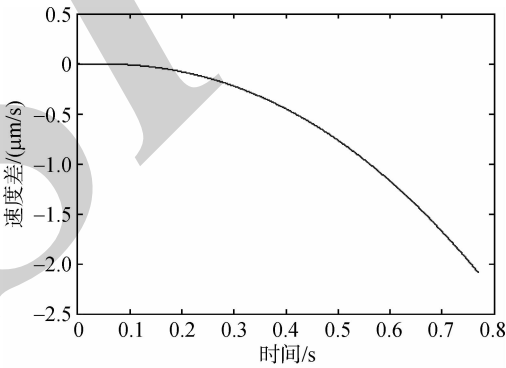
图 3 两种状态高压室压力差值变化曲线

Fig. 3 Differential pressure curve of high-pressure chamber under friction and non-friction conditions

结合图 2 和图 3,初始阶段,考虑摩擦和未考虑摩擦两种状态下的高压室压力基本没有差别;而在 0.2 s 之后,考虑摩擦状态下高压室压力下降相对缓慢,对应时刻的压力值大于未考虑摩擦时的压力值。究其原因,在初始阶段,高压气体膨胀缓慢,位移较小,造成的压力损失也相对较小,而随着膨胀的加剧,低压室内沿程压力损失增加,弹射推力减小,速度随之减小,这与图 4 得到的结果相一致(本文将两种状态下对应参量作比较,均



(a) 考虑摩擦时弹射速度



(b) 两种状态下速度差值

图 4 弹射速度曲线

Fig. 4 Missile velocity curves

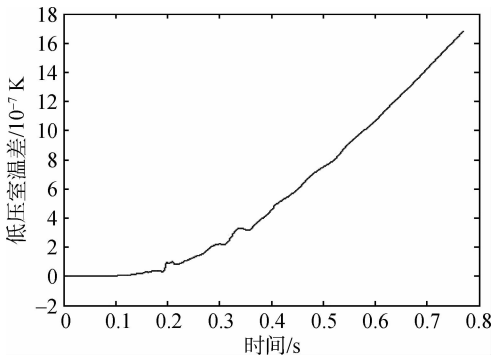


图 5 两种状态下低压室温度差值曲线

Fig. 5 Differential temperature curve of low-pressure chamber under friction and non-friction conditions

由图 6 可看出,在 0.1 s 之前,高压室压力不断流入低压室,低压室能量增加,温度也随之升高,0.1 s 之后,气体内能逐渐转换为弹射动能,气

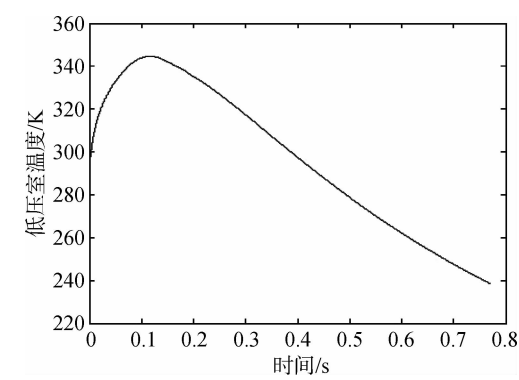
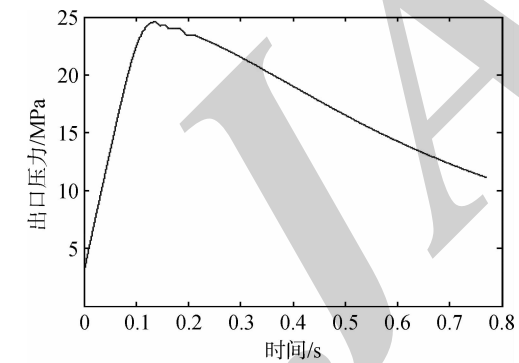


图 6 考虑摩擦时低压室温度曲线

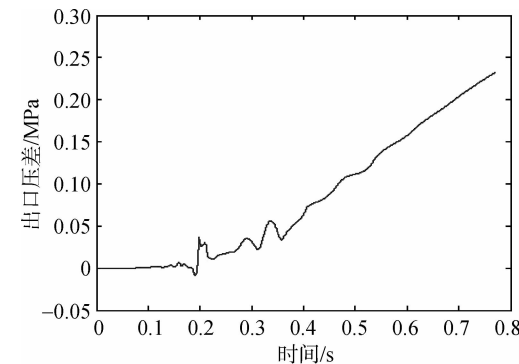
Fig. 6 Temperature curve of low-pressure chamber under friction condition

体温度降低,弹射速度增加,如图 4(a)所示。结合图 5,考虑摩擦时,低压室温度偏高,这将导致高压室出口压力相对较高,如图 7 所示,0.1 s 之后两种状态下的压力差值逐渐增大;进口与出口之间的压力差值较未考虑摩擦时则相对减小,致使从高压室到低压室的质量流量偏低,高压室气体能量减小速率降低,高压室温度和压力均相对较高,和图 3 曲线描述相一致。

图 8 为从高压室到低压室质量流量曲线。由图 8(a)可知,质量流量在 0.13 s 之前一直在减



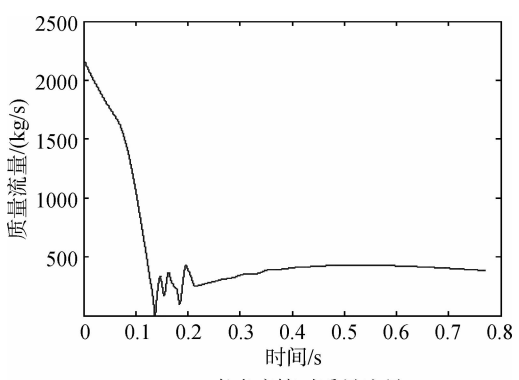
(a) 考虑摩擦时高压室出口压力值



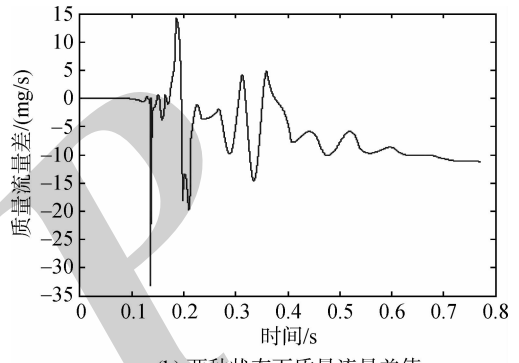
(b) 两种状态下出口压力差值

图 7 高压室出口压力曲线

Fig. 7 Outlet pressure curves of high-pressure chamber



(a) 考虑摩擦时质量流量



(b) 两种状态下质量流量差值

图 8 从高压室到低压室质量流量曲线

Fig. 8 Mass flow rate curves from high-pressure chamber to low-pressure chamber

小,这是因为初始阶段,进出口压差最大,质量流量也最大,随后逐渐减小,质量流量也随之减小,在 0.13 s 时,会出现短暂的零流量现象。究其原因,该时间段内进口压力与出口压力相等,高压室气体停止流向低压室,而随着位移的增加,低压室压力继续下降,质量流量有所增加,达到一定值后又开始下降,如此反复几个周期,当弹射速度较大时,高压室压力下降速率远小于低压室压力下降速率,质量流量平稳增加。

在 0.13~0.21 s 之间,质量流量的不稳定造成两种状态下的质量流量差值曲线出现震荡现象,如图 8(b)所示。而在 0.21 s 之后,质量流量差值曲线仍存在波动,但相对平缓,这是摩擦效应与弹射运动复合作用的结果,两者交替占据主导作用,最终,考虑摩擦时的质量流量要小于未考虑摩擦时的质量流量。

图 9 为高压室温度曲线。图 10 为考虑摩擦时高压室进出口压力曲线。

以上分析表明,摩擦效应会对气体的热物性参数变化规律造成一定的扰动,且扰动存在一定的规律,但扰动量较小,对整个系统的稳定和弹体的运动造成的影响也较小,图 11 为考虑摩擦时弹

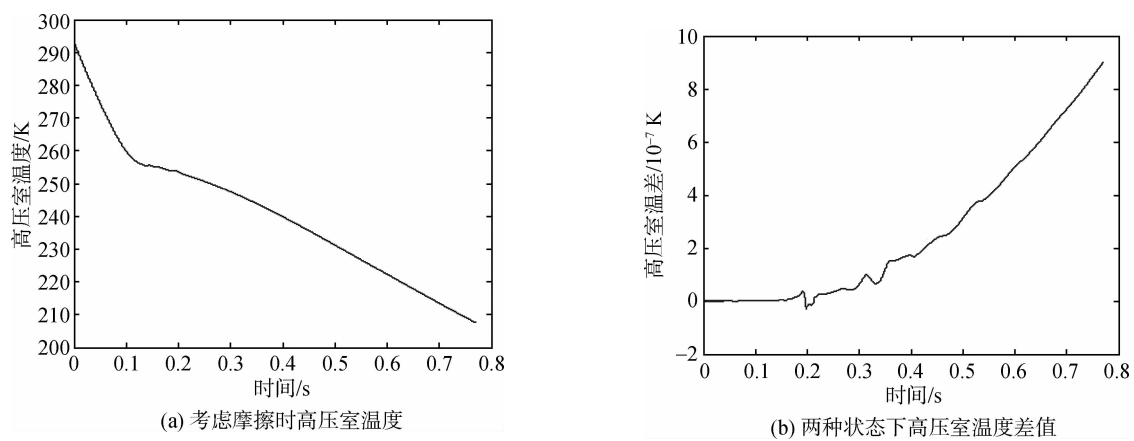


图 9 高压室温度曲线

Fig. 9 Temperature curves of high-pressure chamber

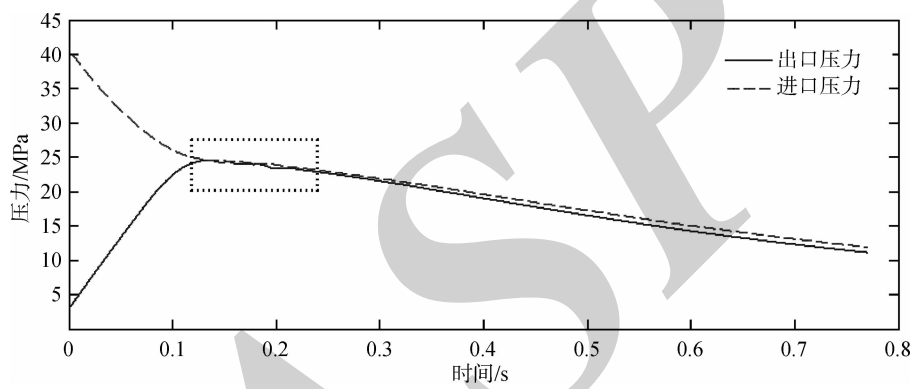


图 10 考虑摩擦时高压室进出口压力曲线

Fig. 10 Inlet and outlet pressure curves of high pressure chamber under friction condition

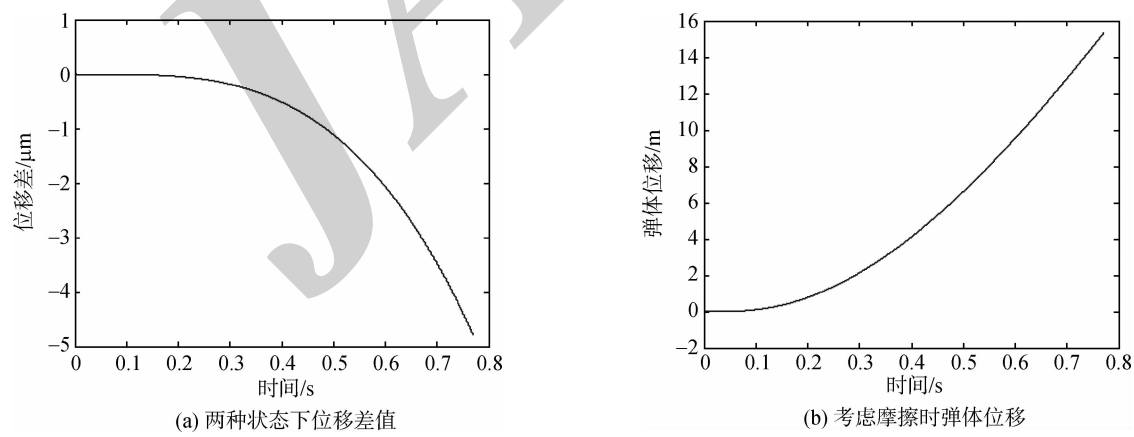


图 11 弹体位移曲线

Fig. 11 Missile stroke curves

体的位移曲线和两种状态下(考虑摩擦、未考虑摩擦)位移差值曲线。

从图 11(a)可看出,摩擦效应会减小弹体的位移,转化为弹体势能,的能量减少,结合上文图 4 中对弹体动能的分析,由能量守恒可知,弹体的机械能减少,气体内能相对增加,这与分析的开始相

吻合。通过对仿真数据分析,机械能的减少量等于气体内能的增加量  $\Delta U = \Delta E = \Delta E_p + \Delta E_k = 2.5312\text{J}$ ,而通过公式(9)计算所得能量损失为  $2.3817\text{J}$ ,误差为  $6.28\%$ 。从图 11(b)可直观看出,弹体在  $0.08\text{s}$  之前保持不动,当满足压力条件后才开始运动。但对位移离散数据进行分析时发

现,在初始阶段,弹体向上运动极短时间后,出现了负位移现象,这是由于高压室气体的流入造成压力增加值不足以弥补摩擦效应造成的压力损失,实际应用中,会对装备造成冲击损伤,因此,应尽量增大初始时刻质量流量。

4 结 论

- 1) 基于高压状态下干空气的黏度公式,分析了高压下,不同温度、不同压力对空气黏性特征的影响。
- 2) 分析了弹射系统中高压黏性空气的非定常流动特性,将其合理假定为一维非定常可压缩流体,考虑到流体在管道内的非充分发展性质,采用微元积分的方式,推导出了弹射过程中气体黏性造成的能量损失解析式。
- 3) 基于真实气体效应分析,建立了考虑气体摩擦效应的高压空气弹射内弹道数学模型,进行了数值求解。数值结果表明,摩擦效应会阻碍气体膨胀进程,减缓高压室压力和温度下降,降低有用功的转化效率,使低压室的压力非均匀分布,相对未考虑摩擦时,使低压室内能增加,温度有所升高,弹体动能有所减小;使高压室到低压室的质量流量出现波动现象。
- 4) 通过将摩擦效应造成的差值与原值进行对比,发现摩擦效应对系统造成的影响十分微小,在气体快速、短时释放过程中可忽略这些影响,但本文通过对离散数据的分析发现,摩擦效应会造成弹体与承载机构的冲击震荡。而摩擦效应对慢速气动执行机构的影响也是进一步研究的方向。

参考文献:

[ 1 ] 陈鹰,许宏,陶国良,等. 压缩空气动力汽车的研究与发展[J]. 机械工程学报,2002,38(11):7-11.  
CHEN Ying, XU Hong, TAO Guoliang, et al. Research and progress of the compressed air power vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(11): 7-11. (in Chinese)

[ 2 ] CHUEH P L, PRAUSNITZ J M. Third virial coefficients of nonpolar gases and their mixtures[J]. AIChE Journal, 1967, 13(5): 896-902.

[ 3 ] 刘朝,杨智勇. 高温高压湿空气的维里系数[J]. 中国电机工程学报,2006,26(7):36-39.  
LIU Zhao, YANG Zhiyong. The virial coefficients of moist air at hightemperature and pressure[J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engnieering, 2006, 26(7): 36-39. (in Chinese)

[ 4 ] 刘朝,万黎明,刘娟芳,等. 高温高压湿空气的维里方程[J]. 工程热物理学报,2006,27(6):920-922.  
LIU Zhao, WAN Liming, LIU Juanfang, et al. The virial state equation of moist air at high temperature and pressure[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(6): 920-922. (in Chinese)

[ 5 ] 杨风波,马大为,杨帆,等. 高压弹射装置内弹道建模与计算[J]. 兵工学报,2013,34(5):527-534.  
YANG Fengbo, MA Dawei, YANG Fan, et al. Interior ballistics modeling and calculation of high-pressure ejection device[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(5): 527-534. (in Chinese)

[ 6 ] 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)

[ 7 ] 于勇,母云涛. 同心筒式发射装置附加弹射力影响因素分析[J]. 航空动力学报,2014,29(4):980-986.  
YU Yong, MU Yutao. Influential factors analysis to additional ejection force in concentric canister launcher[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 980-986. (in Chinese)

[ 8 ] 何大平,廖振强,王涛,等. 抛放弹机构弹射——回收过程仿真[J]. 兵工学报,2004,25(4):454-457.  
HE Daping, LIAO Zhenqiang, WANG Tao, et al. Simulation of the ejection and restoration process of the ejection device with a blank cartridge[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4): 454-457. (in Chinese)

[ 9 ] 甄建斌,徐诚,王涛. 基于电磁阀控制的氮气弹射系统动态仿真及性能分析[J]. 弹道学报,2013,25(4):106-110.  
ZHEN Jianbin, XU Cheng, WANG Tao. Dynamic simulation and performance analysis of nitrogen ejection system controlled by solenoid valve[J]. Journal of Ballistics, 2013, 25(4): 106-110. (in Chinese)

[ 10 ] 蔡茂林,香川利春. 气动系统的能量消耗评价体系及能量损失分析[J]. 机械工程学报,2007,43(9):69-74.  
CAI Maolin, KAGAWA T. Energy consumption assessment and energy loss analysis in pneumatic system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 69-74. (in Chinese)

[ 11 ] 武丹,王健平. 粘性及热传导对于爆轰波的影响[J]. 应用力学学报,2012,29(6):630-635.  
WU Dan, WANG Jianping. Influences of viscosity and thermal conductivity on detonations waves[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(6): 630-635. (in Chinese)

[ 12 ] SUTHERLAND W. The viscosity of gases and molecular force[J]. Philosophical Magazine; Series 5, 1977, 36(223): 507-531.

[ 13 ] POLING B E, PRAUSNITZ J M, P O'CONNELL J. The properties of gases and liquids[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.

[14] ANDERSON J D. Computational fluid dynamics[M]. New York: McGraw-Hill, 1995.

[15] 王新月. 气体动力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.

[16] 王力, 谷良贤. 导弹助推器分离过程数值模拟研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 342-346.  
WANG Li, GU Liangxian. Numerical simulation and study of the separation process of missile booster[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 342-346. (in Chinese)

[17] 胡晓磊, 乐贵高, 马大为, 等. 水下燃气-蒸汽弹射气-液两相流场数值研究[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 164-172.

HU Xiaolei, LE Guigao, MA Dawei, et al. Numerical study of gas-steam ejection gas-liquid two-phase flow field under water[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1): 164-172. (in Chinese)

[18] RENN J C, HSIAO C H. Experimental and CFD study on the mass flow-rate characteristic of gas through orifice-type restrictor in aerostatic bearings[J]. Tribology International, 2004, 37(4): 309-315.

[19] MENG L, DUAN Y Y. Correlations for second and third virial coefficients of pure fluids[J]. Fluid Phase Equilibria, 2004, 226(1): 109-120.

(编辑: 叶 青)