



燃气挡板对筒底流场及内弹道影响的仿真研究

石擎三, 卢丙举, 王 珩, 张文涛, 李朋涛

(中国船舶集团有限公司第七一三研究所, 河南 郑州 450015; 河南省水下智能装备重点实验室, 河南 郑州 450015;
水下发射学科与技术中心, 河南 郑州 450015)

摘要:使用计算流体力学的方法对发射装置筒底流场规律进行了研究, 首先对比分析了主流区域有、无燃气挡板对筒底流场分布及内弹道参数的影响, 随后对比分析了燃气主流区域增加不同结构燃气挡板对筒底流场分布及内弹道参数的影响。研究表明, 在燃气主流区域增加燃气导流挡板可以有效降低负载底部中心区域的压力载荷, 有利于降低发射过程中对于负载的冲击作用, 但是对负载速度等内弹道参数的影响较小。不同结构的燃气挡板对流场形态分布有较大影响, 筒底流场在不同结构挡板的作用下呈现出不同的流场形态, 从而影响燃气流场的局部压力。斜面圆锥结构挡板、凹弧面锥形挡板和凸弧面锥形挡板结构均可以有效降低发射过程中负载底部最大压力。相同时刻下凹弧面锥形挡板对于减小负载底部最大压力的效果最为显著, 可降低负载底部最大压力约 44%, 该结构下负载的出筒速度也会降低约 0.6%, 在燃气挡板结构设计时应综合考虑。研究结果为发射装置筒底导流结构设计提供理论依据。

关键词:内弹道; 筒底流场; 燃气挡板; 计算流体力学

中图分类号: TJ385 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-499X(2026)03-0070-09

Simulation Study of Influence of Gas Baffle on the Bottom Flow Field and Interior Ballistics

SHI Qingsan, LU Bingju, WANG Heng, ZHANG Wentao, LI Pengtao

(713th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China;

Henan Key Laboratory of Underwater Intelligence Equipment, Zhengzhou 450015, China;

Underwater Launch Science and Technology Center, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: The flow field law of bottom of the launch tube was studied by the method of computational fluid dynamics. Firstly, the comparative analysis was conducted on the influence of the presence or absence of a gas baffle in the mainstream region on the flow field distribution at the tube bottom and interior ballistic parameters. Secondly, the influence of adding gas baffles with different structures in the mainstream region on the flow field distribution and interior ballistic parameters was analyzed. The results indicate that adding a gas flow baffle in the mainstream region can effectively reduce the pressure load in the central region of the payload's bottom, which is beneficial for reducing the impact on the payload during launch, but it has little effect on interior ballistic parameters such as the load velocity. Different baffle structures significantly influence the flow field morphology. The flow field at the tube bottom exhibits distinct patterns under different baffle structures, having a significant influence on the local pressure of the gas flow field. The inclined cone structure, concave arc cone structure, and convex arc cone structure can all effectively reduce the maximum pressure on the load. At the same moment, the concave arc cone structure demonstrates the most significant effect in reducing the maximum pressure on the bottom of load, with a decrease of approximately 44%. The muzzle velocity of the load also decreases by about 0.6% under this structure,

which should be comprehensively considered in design of the gas baffle structure. The research results provide a theoretical basis for the design of the bottom guide structure of the launcher.

Key words: interior ballistics; bottom flow field; gas baffle; computational fluid dynamics

燃气式弹射动力系统由于具有结构简单、性能稳定等特点被广泛应用于各类发射装置中^[1],其主要工作原理是由燃气发生器产生高温高压燃气,进入筒底后迅速建立压力,在短时间内推动负载快速出筒。而对于采用燃气式动力系统的发射装置,往往由于空间等方面的限制,高温燃气会直接对发射负载产生冲击作用,导致负载面临较恶劣的力学环境,如何设计合理的筒底燃气导流装置以有效降低载荷,直接影响到发射过程的稳定性,对于提高发射装置的通用化及实战化至关重要。

近年来,计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 取得了飞速发展,并且越来越多地被应用于发射流场的数值计算。王伟等^[2]利用数值模拟技术对倾斜发射导弹的燃气流场进行了研究,通过应用域动分层法和局部网格重构法,精确地获取了发射过程中流场压力和温度的分布及其变化规律;张代国^[3]对舰载导弹垂直发射装置的燃气流场进行了数值模拟,深入分析了燃气射流、压力室底板燃气冲击区,以及排烟道内的流场分布特性及其变化规律;李静^[4]对箱式垂直热发射系统的燃气流场特性进行了数值仿真,研究了燃气舵等多种结构对燃气流场与结构相容性的影响。王鸿丽等^[5]运用计算流体力学方法对发射系统流场与固体壁面间的热-流耦合进行了计算,成功得到了发射过程中能量利用系数。

学者们通过数值模拟的方式对燃气导流的结构和流场进行了多方位的研究,陶倩楠^[6]建立了基于三维发射试验平台有导流器的流场模型,研究了发射流场的动态过程、燃气流与地面沙石的流固耦合作用,以及导流器型面与燃气流场特性之间的关系;程洪杰等^[7]研究了导流锥结构参数对燃气弹射筒压力冲击平滑效果的影响,结果表明导流锥的结构直接决定燃气飞溅现象的产生和流场结构的紊乱程度,结构优化后的导流锥较大程度地缓解了冲击现象,获得了较好的压力平滑效果;赵若男等^[8]研究了箱式热发射中不同导流型面对燃气流场的影响,研究结果表明圆弧型导流器相比于斜平面导流器降低了燃气流冲击下的压强和温度,弹体结构受到的热冲击更低;赵谢等^[9]采用数值分析的方法研究了

导流锥锥型对燃气弹射内弹道的影响,对直线锥、抛物线锥、双曲线锥和椭圆锥结构下初容室流场、内弹道载荷进行了对比,结果表明曲面锥能够很好地提高出筒速度,缩短出筒时间。王惠方等^[10]研究了导流结构对火箭炮冲击载荷的影响,提出了一种结合栅格与楔形的导流结构,可大幅降低燃气射流对火箭炮的冲击力。

前人的筒底流场研究主要集中在不同结构导流器对负载载荷和内弹道的影响,对于发射负载受到直接冲击载荷时导流结构影响的研究较少。本文采用计算流体力学的方法,仿真研究了发射负载受燃气直接冲击结构下有、无燃气挡板导流结构对筒底流场的影响,分析了不同燃气导流结构对发射装置筒底流场和内弹道参数的影响,为发射装置导流结构设计提供参考。

1 仿真分析

1.1 基本假设

本文对发射装置筒底流场进行仿真计算,发射装置筒底结构如图 1 所示。发射动力安装在发射筒底部,燃气挡板通过支撑架体安装在燃气流出口位置。对发射装置筒底流场结构进行了适当的简化,假定筒底结构为二维轴对称结构,计算区域从燃气发生器喷管入口到发射负载底部。发射筒底二维轴对称结构如图 2 所示,燃气导流挡板为三角锥形结构,位置为燃气喷管出口主气流位置。燃气为高温高压流体,假设为理想气体,设为冻结流,并且进入筒底后不发生二次化学反应。发射过程中发射筒壁面为绝热壁面,与外界无热量交换。负载底部假设为平面,与外界无热量交换。

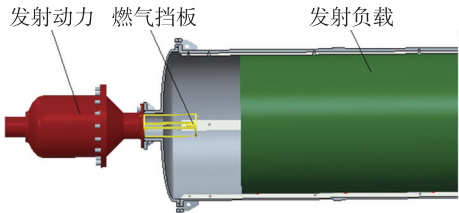


图 1 发射装置筒底结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the bottom structure of the launcher

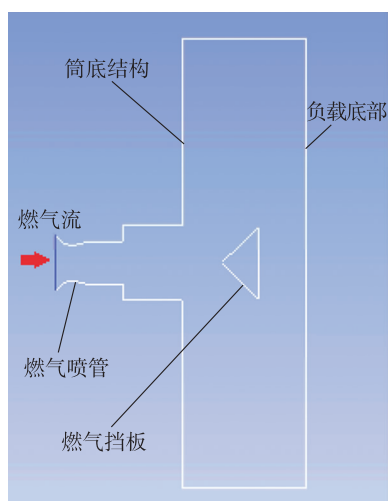


图 2 发射装置简化筒底结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the simplified bottom structure of the launcher

1.2 控制方程

控制方程如下^[11]。

①连续性方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

②动量守恒方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

③能量守恒方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

式中： ρ 为密度； E 为单位体积内能； t 为时间； k_{eff} 为有效热导率； p 为静压； T 为温度； $\mathbf{F}$ 为体积力； S_h 为内热源项。

采用二阶迎风格式对控制方程进行离散,采用 SIMPLE 算法耦合压力场和速度场,湍流模型采用文献[9]推荐的更适合高雷诺数湍流计算的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,控制方程及参数见 FLUENT 帮助手册。

1.3 网格划分

使用 ANSYS ICEM 软件对二维轴对称模型进行网格划分,网格类型为四边形结构化网格,网格总数为 10 138,最小网格尺寸 0.6 mm,如图 3 和图 4 所示。

1.4 边界条件设置

仿真采用非稳态计算方式,仿真计算气体成分为燃气,设置为理想气体。燃气从喷管进入计算区

域,入口的边界条件设定为压力入口,压力为燃气发生器头部压力,如图 5 所示,使用自定义函数 UDF 加载至入口边界条件上,温度为推进剂定压燃温。负载底部设置为壁面边界条件,运动阻力等参数使用 UDF 加载到运动方程中,动网格采用 layer 铺层结构。仿真计算由 ANSYS Fluent 软件完成。

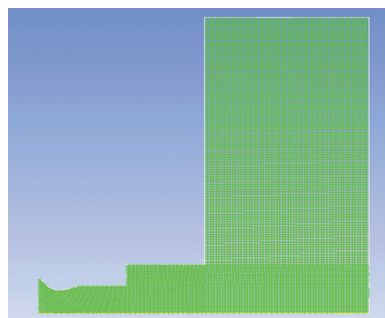


图 3 无燃气挡板结构网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of grid division without the gas baffle

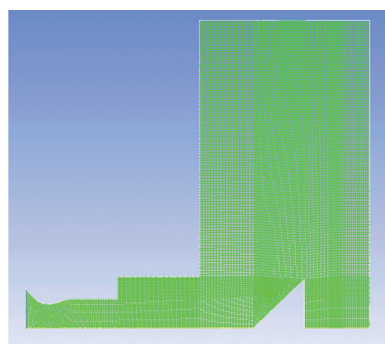


图 4 有燃气挡板结构网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grid division with the gas baffle

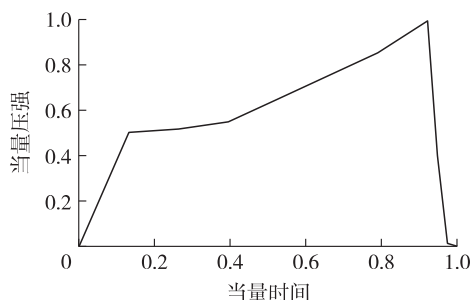


图 5 压力入口压力曲线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of pressure curve of the pressure-inlet

1.5 仿真结果

1.5.1 无燃气导流挡板下不同时刻流场分布

本文针对有/无燃气导流挡板筒底结构下发射

流场状态分布进行了仿真计算,不同时刻流线图、 X 和 Y 方向速度分布、压力分布如图 6~图 9 所示。

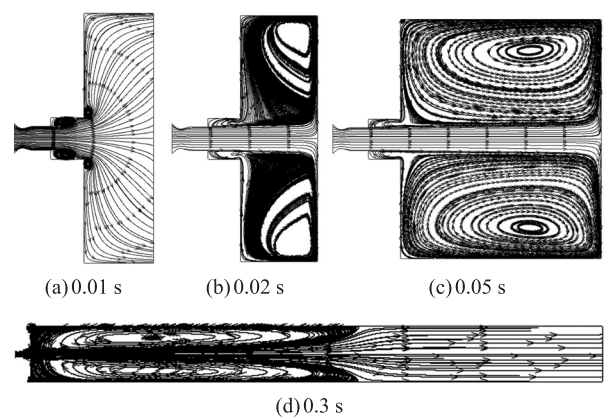


图 6 无导流挡板结构筒底流线示意图
Fig. 6 Schematic diagram of streamline at the bottom of the cylinder without the gas baffle

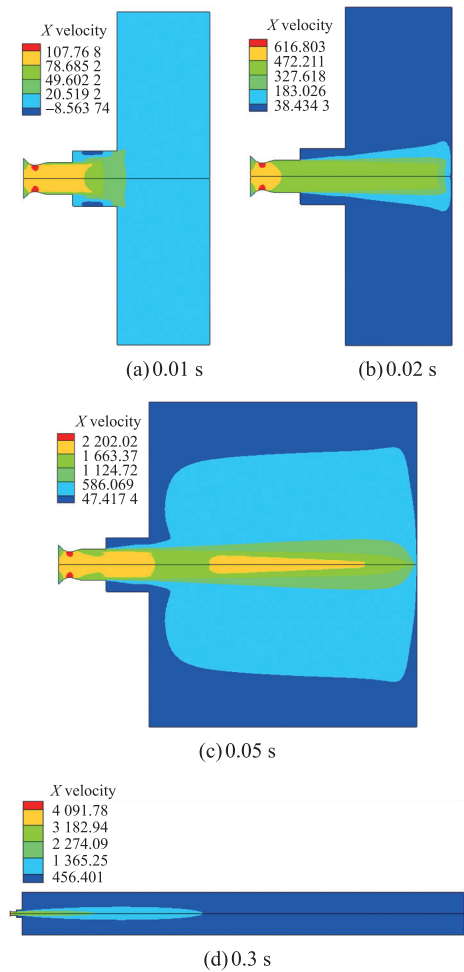


图 7 无导流挡板结构 X 方向速度分布示意图(单位:m/s)
Fig. 7 Schematic diagram of X -direction velocity distribution at the bottom of the cylinder without the gas baffle(unit:m/s)

图 6 为无导流挡板筒底结构在 0.01 s、0.02 s、0.05 s、0.3 s 时筒底流场流线分布示意图。从图中可以看出,燃气经过喉径后加速进入筒底,在筒底形成较为明显的射流区,随着时间的增加,筒底会形成较为明显的回流区,负载不断向前运动,底部空间逐渐增大,回流区也会不断增大。当回流区达到一定大小后,继续向前流动的气流会脱离回流区,随着负载一起向前运动。

图 7 和图 8 分别为无导流挡板结构在不同时刻筒底 X 方向(平行负载运动方向)、 Y 方向(垂直负载运动方向)的速度分布示意图。从图中也可以看出,高速气流主要集中在中心区域,随着时间的增大,核心区域气流的速度也在不断地增大。 Y 方向速度较大的区域主要集中在负载底部回流区域边界,其中正值代表流速方向向上,负值代表流速方向向下。

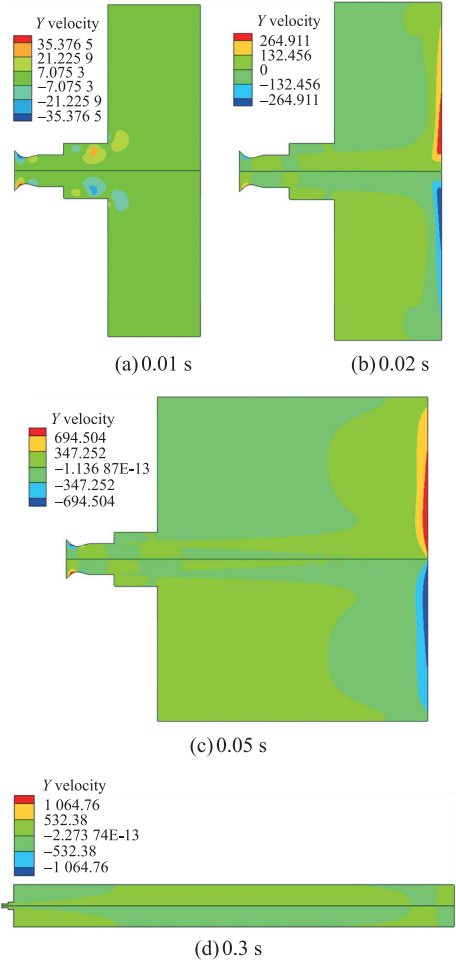


图 8 无导流挡板结构 Y 方向速度分布示意图(单位:m/s)
Fig. 8 Schematic diagram of Y -direction velocity distribution at the bottom of the cylinder without the gas baffle(unit:m/s)

图 9 为无导流挡板结构下不同时刻筒底压力的示意图。从图中可以看出,在负载初始运动时,由于受到中心气流的高速冲击,负载中心区域压力明显较大,这对于增大负载局部的载荷,对于发射过程是较为不利的。

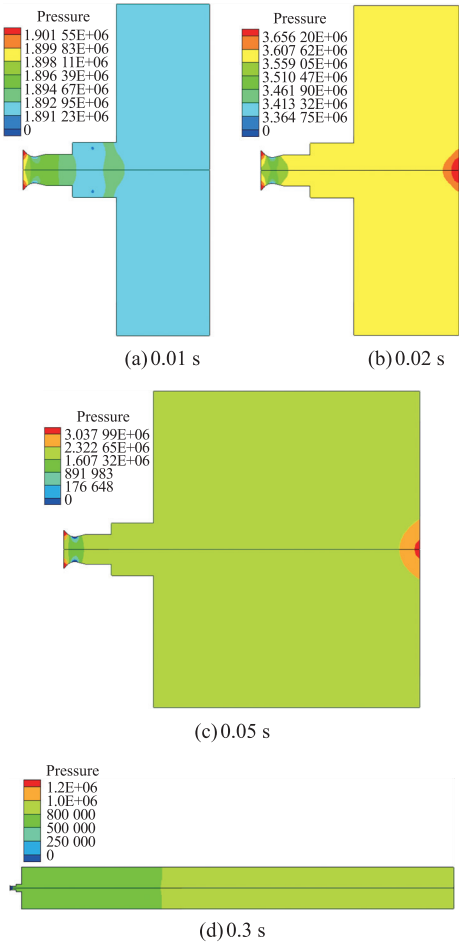


图 9 无导流挡板结构筒底压力分布示意图(单位:Pa)
Fig. 9 Schematic diagram of pressure distribution at the bottom of the cylinder without the gas baffle(unit:Pa)

1.5.2 有燃气导流挡板下不同时刻流场分布

有燃气导流挡板结构下筒底流场在不同时刻的分布如图 10~图 13 所示。图 10 为有燃气挡板筒底结构在 0.01 s、0.02 s、0.05 s、0.3 s 的流线分布示意图。从图中可以看出,燃气在导流挡板的作用下,在侧壁面方向形成两个回流区域。随着负载逐渐运动,挡板底部回流区域逐渐增大,之后回流区便不再增大,气流随着负载一起向前运动。与无导流挡板结构相比,燃气出口区域筒底回流区较小,大部分区域燃气随着负载向前运动。

图 11 和图 12 为有燃气导流挡板筒底结构下不同时刻 X 方向和 Y 方向的流场速度分布示意图。

从图中可以看出,燃气在导流挡板的作用下向侧壁面分流,气流速度越大,分流效果越明显。

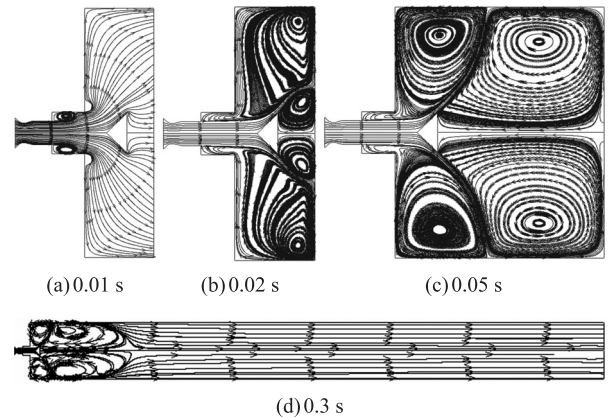


图 10 有导流挡板结构筒底流线分布示意图
Fig. 10 Schematic diagram of streamline distribution at the bottom of the cylinder with the gas baffle

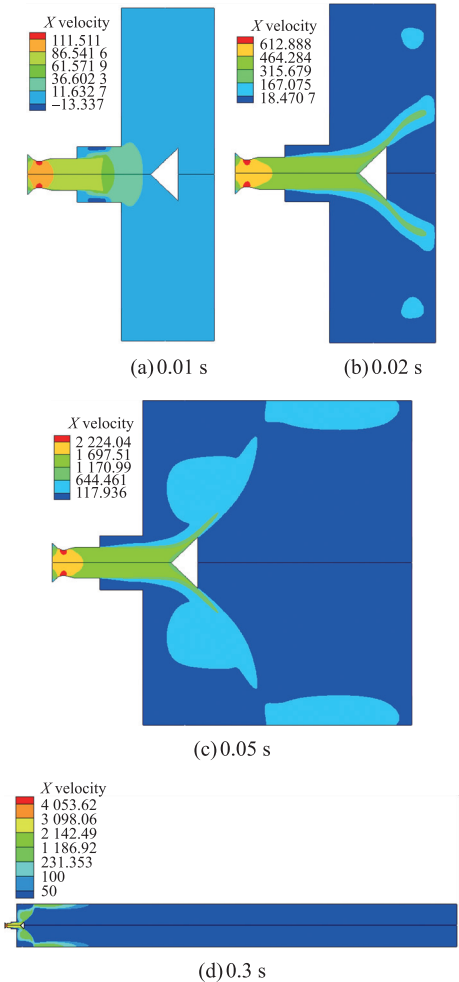


图 11 有导流挡板结构筒底 X 方向速度分布示意图(单位:Pa)
Fig. 11 Schematic diagram of X-direction velocity distribution at the bottom of the cylinder with the gas baffle(unit:Pa)

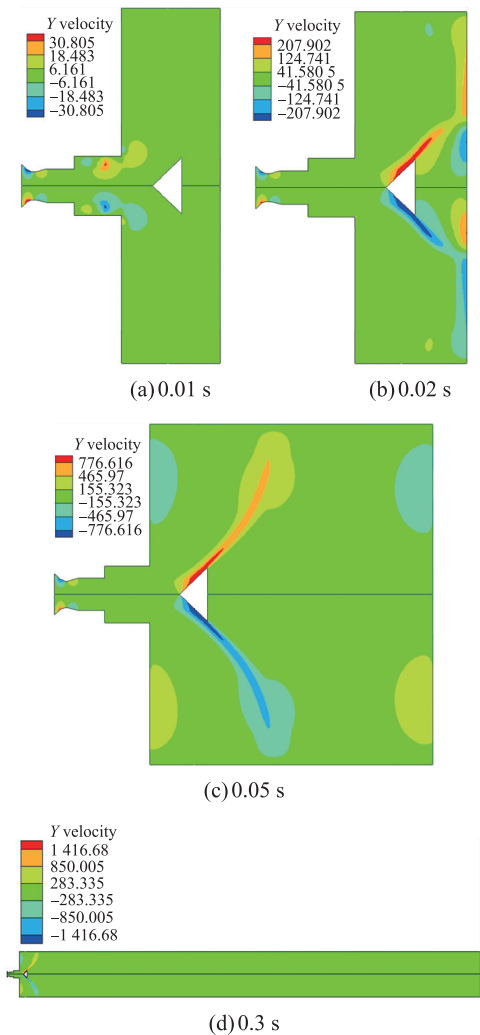


图 12 有挡板结构筒底 Y 方向速度分布示意图 (单位:m/s)
Fig. 12 Schematic diagram of Y-direction velocity distribution at the bottom of the cylinder with the gas baffle(unit:m/s)

图 13 为有燃气导流挡板筒底结构下不同时刻的流场压力分布示意图。从图中可以看出,导流挡板迎流区域压力较大,而负载底部压力则较为均匀,燃气导流挡板有效地减小了负载底部局部压力载荷。

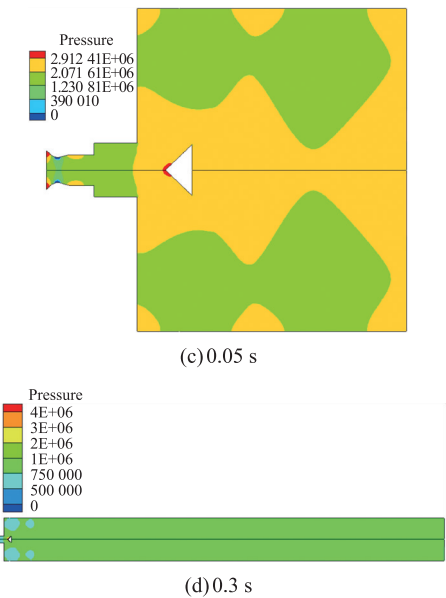
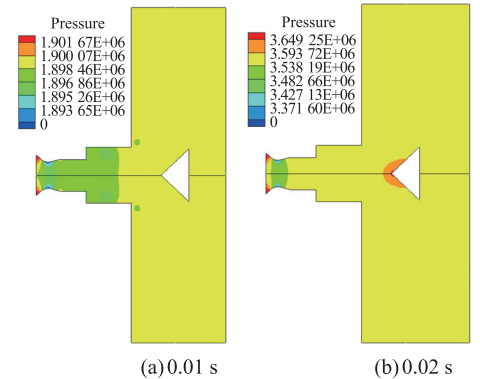


图 13 有挡板结构压力分布示意图 (单位:Pa)
Fig. 13 Schematic diagram of pressure distribution at the bottom of the cylinder with the gas baffle(unit:Pa)

1.5.3 燃气挡板对内弹道参数的影响

图 14~图 18 分别为有、无燃气导流挡板筒底结构下负载发射的当量行程、当量速度、当量加速度、负载底部平均压力当量值和负载底部最大压力当量值的对比。

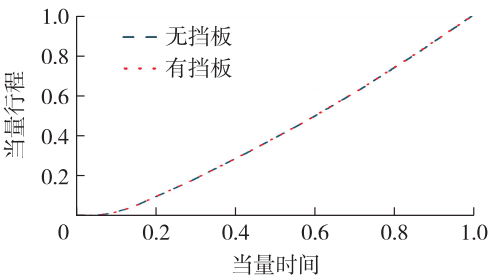


图 14 负载当量行程对比
Fig. 14 Comparison of the load equivalent distance

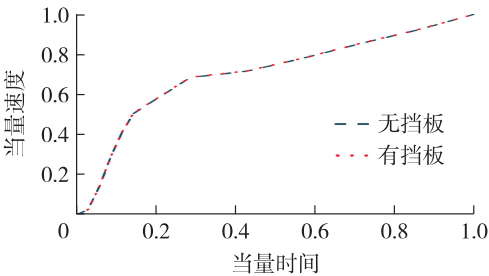


图 15 负载当量速度对比
Fig. 15 Comparison of the load equivalent velocity

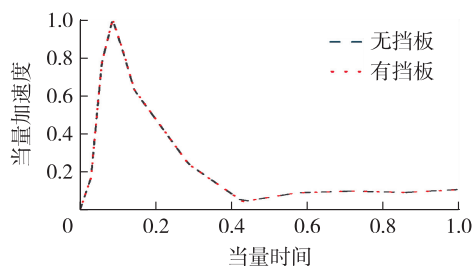


图 16 负载当量加速度对比

Fig. 16 Comparison of the load equivalent acceleration

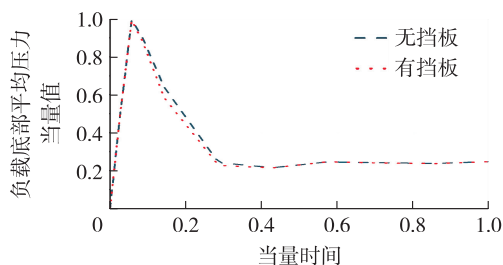


图 17 负载底部平均压力当量值对比

Fig. 17 Comparison of equivalent average pressure at the bottom of load

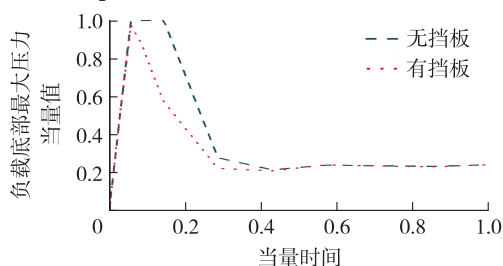


图 18 负载底部最大压力当量值对比

Fig. 18 Comparison of equivalent maximum pressure at the bottom of load

从图中可以看出,有、无燃气导流挡板对于负载的行程、速度、加速度等内弹道参数影响较小,两者基本一致。而对于负载底部平均压力和最大压力,有燃气导流挡板结构均能一定程度地降低压力值,特别是在负载刚开始运动时,当量时间在 0.08~0.28 的范围内降低载荷的作用最为显著,相同时刻负载底部平均压力最大降幅达 8.7%,负载底部最大压力值降幅最多达 43%。因此,有燃气导流挡板结构对于降低发射负载载荷方面具有较为明显的效果。

1.5.4 不同挡板结构对筒底流场的影响

导流挡板的结构对燃气流场也会有影响,为了研究不同导流挡板结构对流场和内弹道参数的影响,分别对斜面圆锥形挡板、凸弧面锥形挡板、凹弧面锥形挡板的筒底流场进行了仿真计算,3 种结构如图 19 所示。

不同结构下负载运动 0.05 s 时筒底流线、X 方

向速度、压力分布示意图如图 20~图 22 所示。从图 20 可以看出,斜面圆锥形挡板、凹弧面锥形挡板的流线分布较为接近,均在筒底形成 2 个大的回流区,而凸弧面锥形挡板结构则只形成一个回流区,与无挡板结构类似。

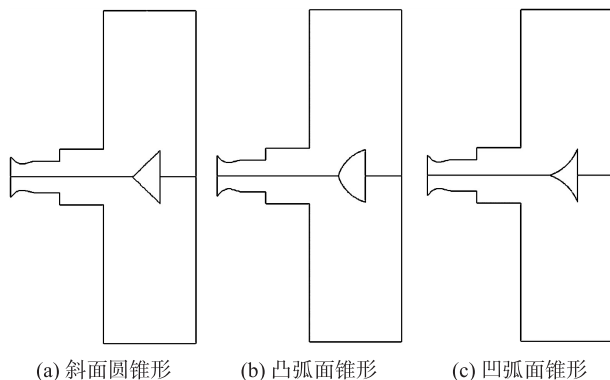


图 19 挡板结构示意图

Fig. 19 Schematic diagram of baffle structure

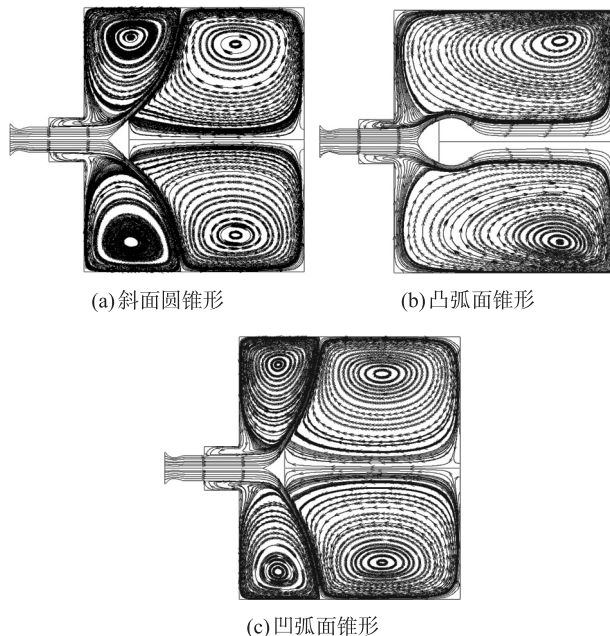
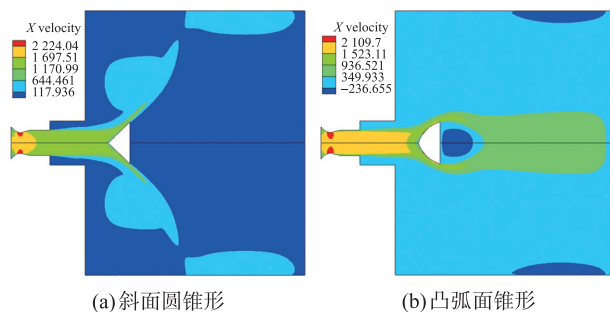


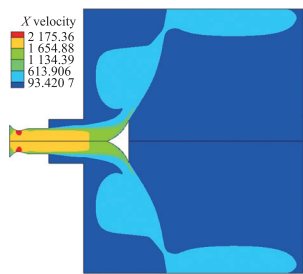
图 20 不同导流挡板结构筒底流线分布示意图

Fig. 20 Schematic diagram of streamline distribution in the flow field at the bottom of different gas-baffle cylinder



(a) 斜面圆锥形

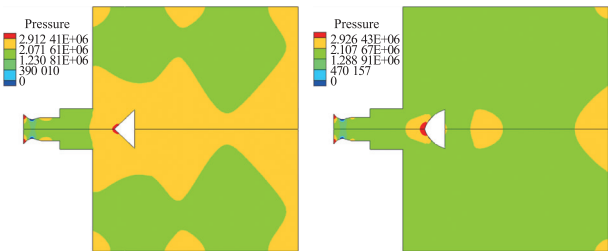
(b) 凸弧面锥形



(c)凹弧面锥形

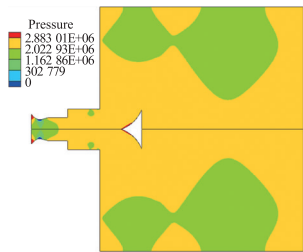
图 21 不同导流挡板结构筒底 X 方向速度分布示意图(单位:m/s)

Fig. 21 Schematic diagram of velocity distribution in the flow field at the bottom of different gas-baffle cylinder(unit:m/s)



(a)斜面圆锥形

(b)凸弧面锥形



(c)凹弧面锥形

图 22 不同导流挡板结构筒底压力分布示意图(单位:Pa)

Fig. 22 Schematic diagram of pressure distribution in the flow field at the bottom of different gas-baffle cylinder(unit:Pa)

由图 21 可以看出,斜面圆锥形挡板、凹弧面锥形挡板的流场速度分布也较为接近,高速燃气流均被引至筒壁面区域,而凸弧面锥形挡板结构下燃气流绕过挡板后继续向负载底部中心区域流动,流场形态与斜面锥形挡板、凹弧面锥形挡板结构下的流场形态呈现明显的差异。

由图 22 可以看出,斜面圆锥形挡板、凹弧面锥形挡板结构下负载底部压力分布较为均匀,而凸弧面锥形挡板结构下负载中心区域相对于非中心区域较高,负载底部的载荷较为不均匀。

1.5.5 不同挡板结构对内弹道参数的影响

不同挡板结构下当量行程、当量速度、当量加速度、负载底部平均压力当量值和负载底部最大压力

当量值的对比如图 23~图 27 所示。

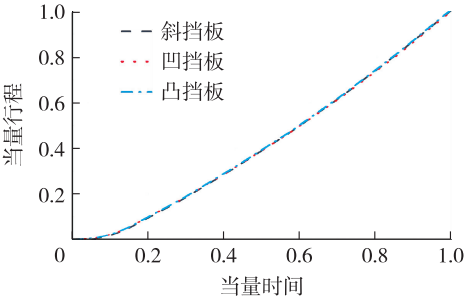


图 23 不同挡板结构下当量行程对比

Fig. 23 Comparison of equivalent distance for different baffle structures

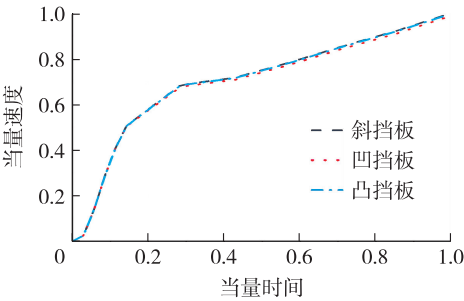


图 24 不同挡板结构下当量速度对比

Fig. 24 Comparison of equivalent velocity for different baffle structures

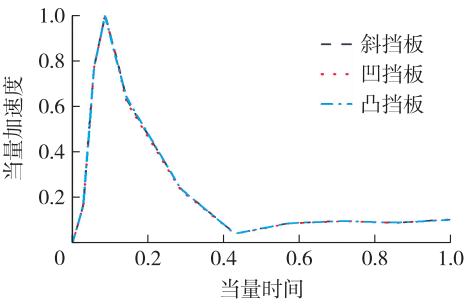


图 25 不同挡板结构下当量加速度对比

Fig. 25 Comparison of equivalent acceleration curves for different baffle structures

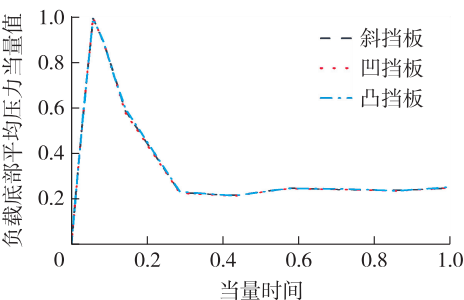


图 26 不同挡板结构下负载底部平均压力当量值对比

Fig. 26 Comparison of equivalent pressure curves for different baffle structures

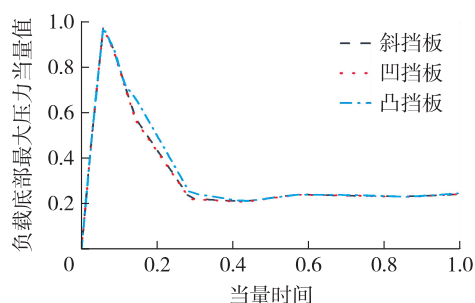


图 27 不同挡板结构下负载底部最大压力当量值对比

Fig. 27 Comparison of equivalent acceleration curves for different baffle structures

从图 23~图 25 可以看出,3 种结构下负载的当量速度、当量加速度、当量行程、负载底部平均压力等变化规律基本一致,差异较小,凹弧面锥形挡板结构下上述参数均略低,出筒速度相对于其余两种结构低约 0.6%。

由图 26 和图 27 可以看出,相较于凸弧面锥形挡板结构,斜面圆锥形挡板、凹弧面锥形挡板的最大压力在当量时间 0.11~0.4 范围内略低,最大相差幅度可达 14.7%,说明斜面圆锥形挡板和凹弧面锥形挡板结构对于负载载荷的降低效果更好。相对于无燃气导流挡板结构,同一时刻下凹弧面锥形挡板结构可降低负载底部最大压力 44%。

从仿真计算结果可以看出,不同结构挡板对内弹道参数影响较小,对于筒底压力分布形态影响较大,斜面圆锥形挡板和凹弧面锥形挡板结构均有利于降低负载发射过程的压力载荷。

3 结束语

本文使用计算流体力学方法对发射装置筒底流场规律进行了研究,对比分析了不同结构燃气导流挡板对筒底流场和内弹道参数的影响,得出以下结论:①在燃气主流区域增加燃气导流挡板可以降低负载中心区域的压力载荷,而对内弹道参数影响较小。②不同结构的燃气挡板对流场形态分布有较大影响,而对内弹道参数影响较小。斜面圆锥结构挡板、凹弧面锥形挡板和凸弧面锥形挡板结构均可以有效降低发射过程中负载底部最大压力。③相同时刻凹弧面锥形挡板结构下负载底部最大压力降幅最多可达 44%,同时也会降低负载的出筒速度约 0.6%。研究结果为发射装置筒底导流结构设计提供了理论依据。

参考文献

[1] 李威海,王俊杰. 潜地导弹发射动力系统[M]. 哈尔滨:哈尔滨

工程大学出版社,2000.

- [2] 王伟,王学智,刘少伟. 倾斜发射导弹燃气流场数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2013,33(4):127-130.
WANG Wei, WANG Xuezhi, LIU Shaowei. Numerical simulation of jet flow for incline-launched missile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(4): 127-130. (in Chinese)
- [3] 张代国. 舰载导弹垂直发射装置燃气流场数值模拟[J]. 舰船科学技术,2015,37(5):241-244.
WANG Daiguo. Numerical simulation of the exhausted gas flow fields about vertical launching system in warship[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(5): 241-244. (in Chinese)
- [4] 李静. 箱式垂直热发射燃气流场与结构相容性[D]. 北京:北京理工大学,2018.
LI Jing. Research on gas flow and compatibility of vertical launching system of container-launched missile[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] 王鸿丽,李鹏永,刘宗魁,等. 导弹发射系统发射内弹道热-流耦合仿真研究[J]. 弹道学报,2021,33(2):72-77.
WANG Hongli, LI Pengyong, LIU Zongkui, et al. Research on thermal-fluid coupled simulation for launching interior ballistics of missile launching system[J]. Journal of Ballistics, 2021, 33(2): 72-77. (in Chinese)
- [6] 陶倩楠. 发射燃气流场数值分析及导流器型面设计[D]. 北京:北京理工大学,2017.
TAO Qiannan. Numerical study of gas flow for launching progress and design of the deflector[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] 程洪杰,赵谢,赵媛,等. 导流锥结构参数对燃气弹射筒内压力冲击平滑效果影响研究[J]. 推进技术,2019,40(11):2444-2453.
CHENG Hongjie, ZHAO Xie, ZHAO Yuan, et al. Influence of structural parameters of diversion cone on smooth effect of gas ejection bottom pressure impact[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(11): 2444-2453. (in Chinese)
- [8] 赵若男,姜毅,李静,等. 不同导流型面对燃气流场的影响研究[J]. 固体火箭技术,2020,43(5):671-678.
ZHAO Ruonan, JIANG Yi, LI Jing, et al. Research on influence of different flow deflectors on jet flow field[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2020, 43(5): 671-678. (in Chinese)
- [9] 赵谢,程洪杰,赵媛,等. 导流锥型对燃气弹射内弹道的影响数值研究[J]. 固体火箭技术,2020,43(2):243-249.
ZHAO Xie, CHENG Hongjie, ZHAO Yuan, et al. Influence of diversion cone on gas-ejection internal ballistic[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2020, 43(2): 243-249. (in Chinese)
- [10] 王惠方,刘洋佐,乐贵高,等. 导流结构对火箭炮冲击载荷的影响[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(8):74-79,86.
WANG Huifang, LIU Yangzuo, LE Guigao, et al. Influence of deflector structure on rocket launcher impact loads[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(8): 74-79, 86. (in Chinese)
- [11] ANSYS, Inc. ANSYS fluent theory guide[CP]. Canonsburg: ANSYS Inc, 2017.