

基于接触判断方法的尾喷管堵盖分离运动分析

赵明阳, 王革, 韩万之, 张琦

(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要:为研究堵盖在初始分离及后续过程中与燃气的相互作用,应用CFD和动网格技术,结合接触判断及多孔介质模型,建立了堵盖接触分离及后续运动的物理模型。研究表明,堵盖与高压燃气的相互作用,使堵盖获得较高的冲击动能;同时相较于非接触式预留缝隙的处理方法,接触判断耦合多孔介质模型的方法,更准确的模拟出堵盖的分离延迟效应。

关键词:尾喷管堵盖;接触分离运动;接触判断;多孔介质

本文引用格式:赵明阳,王革,韩万之,等.基于接触判断方法的尾喷管堵盖分离运动分析[J].兵器装备工程学报,2017(12):207-210,252.

Citation format:ZHAO Mingyang, WANG Ge, HAN Wanzhi, et al. Analysis of Separation Movement of Nozzle Closure Based on Contact Detection Method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(12):207-210,252.

中图分类号:V435;TJ768

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)12-0207-04

Analysis of Separation Movement of Nozzle Closure Based on Contact Detection Method

ZHAO Mingyang, WANG Ge, HAN Wanzhi, ZHANG Qi

(College of Architecture and Aerospace Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to study the interaction between the closure and the gas in the initial separation from the nozzle and subsequent process, a simulation model is established by using a numerical method combined with the Contact Detection and Porous Media model, in which a dynamic mesh technique is used to update the meshes of flow field. The research results show that the closure obtains a high impact kinetic energy from the high-pressure gas. And compared with the practice of reserved gap, Contact Detection and Porous Media model can simulate the delayed effect of the Separation.

Key words: nozzle closure; separation movement; contact detection; porous media

超压破盖技术应用广泛,且日趋完善。点火过程中经由尾喷管堵盖的阻塞作用,实现高压燃气的快速建立,从而获得对预设承压标准的堵盖的开启。过程中的压力匹配问题,高冲击动能的堵盖运动问题等,都是采用尾喷管超压破盖技术亟待解决的问题。堵盖打开过程是整个运动过程的开始阶段,对堵盖的初始运动影响明显,因此有必要对打开过程做一个合适的处理。

尾喷管超压破盖技术的研究,国外起步较早,并有一些

成熟的应用,但大多集中于贮运发射箱的破盖过程。国内对此的研究相对滞后,分析过程以实验与工程经验为主,尤其对于破盖过程中的压力匹配,缺乏定量的分析,严重影响了设置的精度。同时,对于堵盖打开过程大都采用预留缝隙加约束力的粗狂处理方式,也影响了计算的精度。

本文通过数值计算,分别模拟了非接触式预留缝隙方法及接触判断处理方法作用下尾喷管堵盖受燃气作用的打开及飞出过程,通过检测堵盖前的压力变化研究打开过程中冲

收稿日期:2017-09-28;修回日期:2017-10-19

作者简介:赵明阳(1992—),男,硕士研究生,主要从事火箭发动机燃烧、流动及多物理场计算研究。

通讯作者:王革(1966—),男,博士,教授,主要从事火箭发动机燃烧、流动及内弹道计算研究。

击波的作用,同时由堵盖的运动规律,获得其不同时刻的冲击动能,为堵盖的撞击强度分析提供依据。

1 相关理论

1.1 流动控制方程

燃气流动控制方程采用二维非定常方程组,湍流方程采用标准 $k-\varepsilon$ 方程,考虑燃气与空气的混合,添加组分输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

式中: R_i 为化学反应带来的组分 i 净增量, S_i 为源项。

在动网格计算区域内,在任意控制体 V 中任意标量的积分形式的控制方程可以表示为:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (u - u_g) \cdot dA = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (2)$$

式中: ϕ 为通量变量; u_g 为网格移动速度; Γ 为耗散系数。

1.2 运动控制方程

物体的运动主要是由其初速度和加速度决定的,而加速度是由物体的受力决定的。对于所要研究的运动体有:

$$\vec{F} = \iint_S \rho d\vec{A} \quad (3)$$

$$\vec{a}^n = \vec{F}^n / m \quad (4)$$

$$\vec{V}^{n+1} = \vec{V}^n + \vec{a}^n \Delta t \quad (5)$$

式中: \vec{F}^n 为在 $n\Delta t$ 时刻的受力,主要考虑压力,忽略粘性力; \vec{a}^n 为在 $n\Delta t$ 时刻的加速度, m 为堵盖的质量, \vec{V}^n 和 \vec{V}^{n+1} 分别为在 $n\Delta t$ 和 $(n+1)\Delta t$ 时刻的运动速度。

1.3 接触判断与多孔介质模型

为了解决此类问题常规做法(预留缝隙)中的弊端,在此使用接触判断与多孔介质模型相结合的方法实现计算域中运动体与固壁缝隙处流动状态的转换。

假设多孔介质是各向同性的,则多孔介质模型的应用可以表达为在动量方程中添加了如下源项:

$$S_i = -D\mu v_i - C \frac{1}{2} \rho |\vec{V}| v_i \quad (6)$$

式中, D 和 C 分别为黏性阻力系数和惯性阻力系数。

通过添加人工的粘性阻力和惯性阻力,可以使流体速度接近为零,作为近似的固体区域。

在实现计算的过程中,需要分别实现以下三个方面:

1) 采用接触判断的方法,以运动体与固壁的距离作为缝隙处流动状态转换的判据,即:

$$d \leq d_{\text{con}} \quad (7)$$

其中, d 为堵盖壁面与喷管壁面的最小距离; d_{con} 为预设的接触距离。

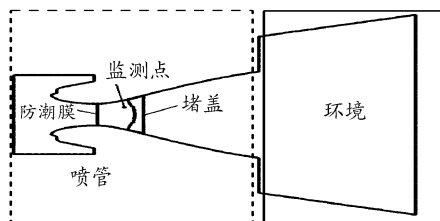
2) 满足判据条件,将缝隙区域处理为固体区,即令 D 、 C 为一无穷大数;

3) 判据条件失效,将缝隙区域处理为流体区,不再施加源项。

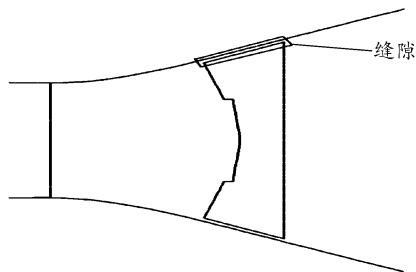
2 仿真计算

2.1 计算模型

计算模拟燃气破膜后打开堵盖及推动其飞出喷管的整个过程,关注堵盖飞出后的冲击特性,计算模型包括发动机尾喷管,堵盖以及足够堵盖运动的环境区域($2\text{ m} \times 20\text{ m}$),如图1所示。根据堵盖的设计外形,将其简化为带凹坑的圆台,并按质量均匀分布来处理。由于堵盖运动的时间短,速度大,将其运动简化为单方向的平动。考虑模型的对称性,采用二维轴对称模型来减少计算量。



(a) 计算模型示意图



(b) 堵盖位置放大图

图1 仿真计算物理模型

模型网格划分如图2所示,采用结构化网格,在喷管区域进行加密处理,缝隙处预留距离为4 mm,网格总数13万。

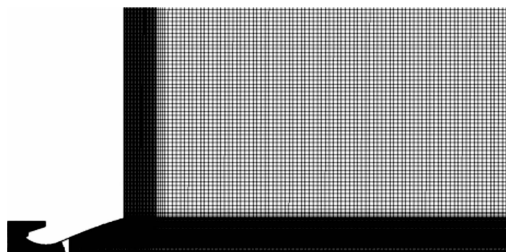


图2 仿真计算网格模型

2.2 计算条件

对实验所测得的发动机压力变化曲线进行数值离散拟合出计算模型入口的总压变化曲线如图3所示,其它燃气参数见表1。环境边界采用压力远场边界,温度293 K,压强为0.101 325 MPa。

根据实验测得的破膜压力为3.058 2 MPa,经积分面积得到的堵盖受力为68 000 N。因此仿真计算中初始时刻将防潮膜前定义为燃气区,膜后定义为空气区,并将堵盖受力达到68 000 N的时刻设置为堵盖运动的初始时刻。

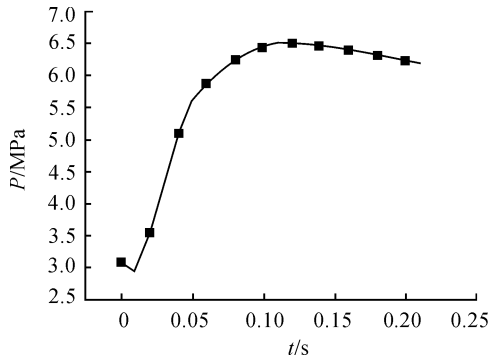


图3 入口总压变化曲线

表1 燃气参数

项目	单位	数值
燃气比热比	—	1.161 88
燃气定压比热	J/(kg·K)	1 954.34
燃气气体常数	J/(kg·K)	272.32
燃气相对分子质量	kg/kmol	30.53
燃气总温	K	3 486

3 计算结果分析

3.1 破盖过程结果分析

图4所示为非接触式预留缝隙方法与接触判断方法作用下,尾喷管堵盖启动前的压力云图。从图中可以明显的看出,非接触式预留缝隙方法对于接触缝隙的处理,使得燃气在堵盖启动前已发生泄漏;而接触判断方法则避免了这一情况。

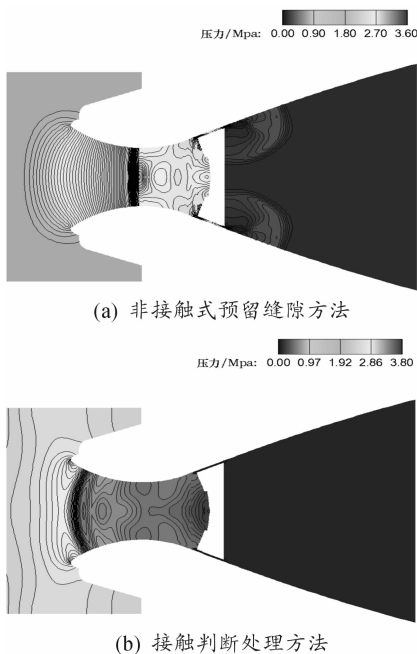


图4 堵盖启动前压力云图

图5所示为两种方法下尾喷管堵盖运动前的受力变化。从图中可以清晰地看到两种方法的受力变化趋势一致,但接触判断方法的引入,使得破盖时间加长,并且同时刻的受力明显下降。

图6所示为两种方法下,图1监测点在相应破盖时间内的压力变化曲线。从图中可以看出,两种方法的压力变化趋势基本一致,但接触判断方法的引入,使得同时刻的压力有所升高。

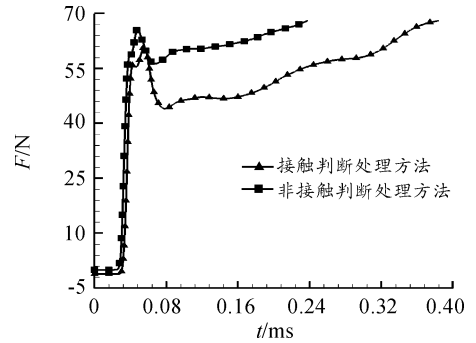


图5 堵盖运动前受力变化

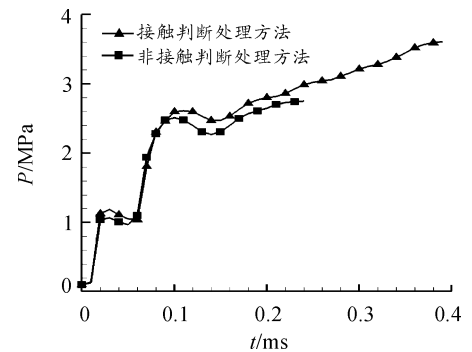


图6 堵盖运动前监测点压力变化

分析图4、图5及图6可知:接触判断方法的引入,克服了非接触式预留缝隙方法中,燃气泄漏先于堵盖运动的情况;通过构造人工阻力项的方法,抵消了堵盖侧壁所受燃气作用力的影响,这就造成了同时刻堵盖受力略小,需要更长的时间来实现超压破盖的过程。同时,由于人工阻力项的加入,阻碍了非接触式预留缝隙方法中堵盖与固壁缝隙处的流动,这也造成了同时刻堵盖前压力的增高。

3.2 堵盖飞出过程结果分析

图7,图8以及图9所示分别为两种处理方法下堵盖启动位置,2.5 m位置以及5 m位置处的马赫数及压力云图。从图中可以明显的看出,非接触式预留缝隙方法对于缝隙的处理,使得启动时刻的堵盖后方已经建立起一定尺度的压力;同时,两种处理方法在启动时刻带来的差异作用到后续结果中,表现为接触判断处理方法在喷管出口位置形成的激波串结构减弱,马赫盘基本消失。

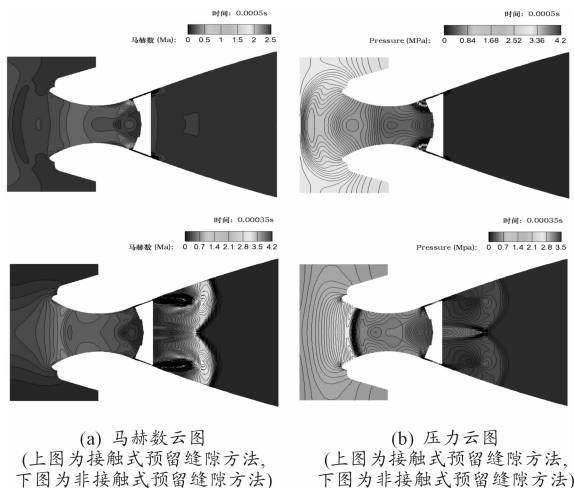


图7 堵盖启动位置的马赫数及压力云图

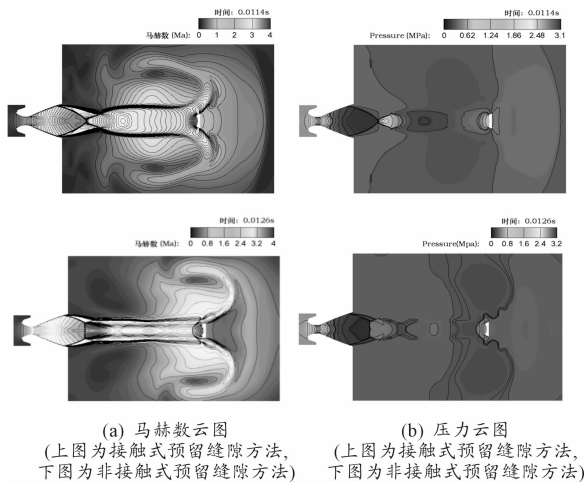


图8 2.5 m 位置的马赫数及压力云图

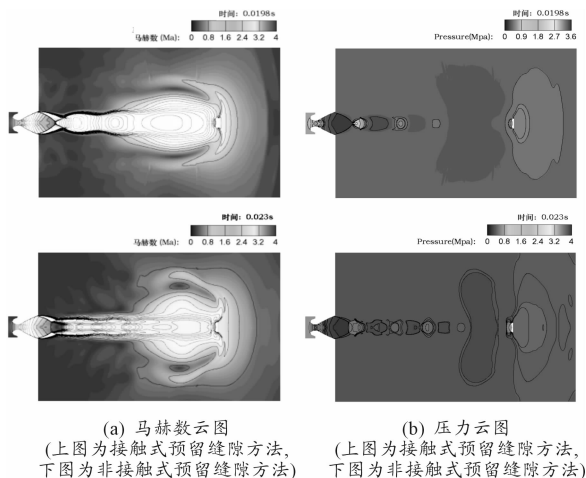


图9 9.5 m 位置处的马赫数及压力云图

图10,图11分别为堵盖运动后,前5 m的受力与速度变化曲线,从图中可以明显看出,两种处理方法对于堵盖在喷管内的运动影响较小;由于非接触式预留缝隙方法作用下激

波串结构的产生,使得堵盖在1.2 m以及2.2 m位置处分别产生了两次加速运动;接触判断处理方式作用下的堵盖运动,受力更为平稳,近似为一匀加速运动。

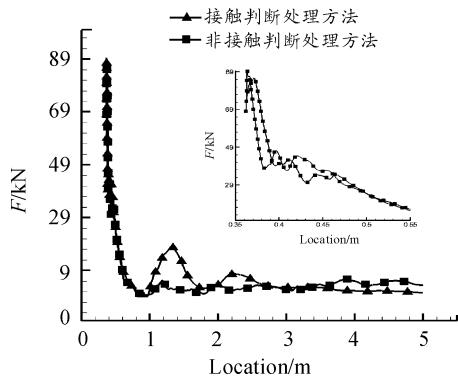


图10 堵盖的受力变化

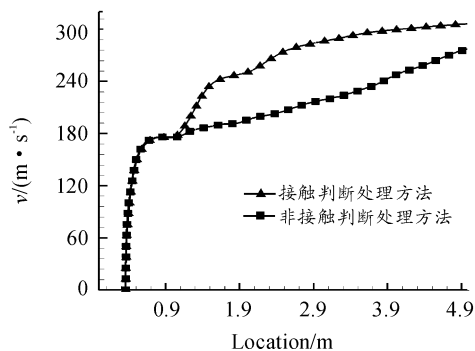


图11 堵盖运动的速度变化

分析堵盖启动后的运动数据可知:接触判断方法的引入,使得堵盖的启动状态发生变化,数值上表现为流场结构以及堵盖运动规律的差异。分析其成因,由于缝隙位置处理方式的不同,使得两种方法得到的启动时堵盖后方物理场不同;同时由于堵盖运动的延迟时间不同,使得堵盖运动耦合物理场的时间节点发生偏移。

4 结论

1) 燃气破膜形成撞击堵盖的激波,经堵盖的反射作用,快速的建立起燃气区启动压强;接触判断结合多孔介质模型的处理方法,避免了缝隙位置的燃气泄漏,更准确的模拟出堵盖的启动压强以及运动的延迟时间。

2) 堵盖启动后,伴随堵盖的运动,燃气经堵盖与喷管的缝隙流出并向外扩散;相较于非接触式预留缝隙的方法,建立在接触判断方法基础上的堵盖与燃气的耦合作用更为可信。

3) 堵盖在飞出过程中,受喷管内高压燃气的作用,速度急剧增加,当移动到喷管出口位置外,受力趋于稳定,速度变化趋稳,在计算区间内,未见明显减速。(下转第252页)

分析。双波束探测激光引信利用目标进入前后探测波束的时间差区分目标信号与海浪、海面杂波信号,通过对不同弹目速度、海况等级下目标进入前后探测波束延时量值时间的仿真分析表明该引信系统能够有效判别目标信号并抑制海浪及海面杂波的干扰。

参考文献:

- [1] 任森,刘晶晶,赵鸿燕.2015年国外空空导弹发展动态研究[J].航空兵器,2016(2):9-16.
- [2] 时宇若,赵琦,张强.基于超低空工作的无线电引信建模与仿真[J].现代防御技术,2015,43(2):203-209.
- [3] 高尔心,孙杰,余春明,等.基于频谱分析恒虚警脉冲多普勒引信[J].探测与控制学报,2007,29(6):32-35.
- [4] 刘跃龙,张艳.超低空引信技术综述[J].制导与引信,2010,31(2):1-6.

- [5] 胡玥.半导体激光引信光束准直整形技术研究[D].吉林长春:长春理工大学,2012:25.
- [6] 严文康,李传增,王树山等.基于FPGA的双波束激光引信目标识别算法研究[J].制导与引信,2011,32(4):20-24.
- [7] 侯素霞,罗积军,赵福宇等.激光引信探测技术研究[J].光学技术,2006,32(8):605-609.
- [8] 闫晓鹏,栗苹,陈慧敏等.伪随机码激光引信探测系统设计[J].光学技术,2008,34:292-296.
- [9] 王伟.基于伪随机码的激光引信探测技术[J].北京理工大学学报,2003(6):94-98.
- [10] 陈慧敏,贾晓东,蔡克荣.激光引信技术[M].北京:国防工业出版社,2016:1-3.

(责任编辑 杨继森)

(上接第200页)

- [2] 刘佩进,何国强.固体火箭发动机燃烧不稳定及控制技术[M].西安:西北工业大学出版社,2015.
- [3] 孙维中.固体火箭发动机不稳定燃烧[M].北京:北京工业学院出版社,1988.
- [4] SUMMERFIELD M, PRICE E W, LUCA L D. Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants[M]. 1971:601-641.
- [5] ZEL' DOVICH Y B. Theory of propellant combustion in a gas flow[J]. Combustion Explosion & Shock Waves, 1971, 7(4):399-408.

- [6] HANZAWA M. A theoretical study on depressurization induced extinction of solid propellant [C]// Propulsion Conference. 2006.
- [7] SHIMADA T, HANZAWA M, MORITA T, et al. Stability Analysis of Solid Rocket Motor Combustion by Computational Fluid Dynamics[J]. Aiaa Journal, 2015, 46(46):947-957.
- [8] CULICK F E C. A review of calculations for unsteady burning of a solid propellant. [J]. Aiaa Journal, 2012, 6(12):2241-2255.

(责任编辑 杨继森)

(上接第210页)

参考文献:

- [1] 徐强,李开明,张福祥.封闭式导弹发射箱内燃气流特性实验研究[J].弹道学报,1995,7(2):52-56.
- [2] 徐强,李军.燃气射流起始冲击波形成机理的实验研究[J].推进技术,2000,21(3):16-18.
- [3] 刘琦,傅德彬,姜毅.贮运发射箱内燃气射流的非定常冲击波流场数值模拟[J].弹箭与制导学报,2005,25(S4):382-384.
- [4] 傅德彬,姜毅.某导弹易碎盖的开启过程[J].固体火箭技术,2007,30(4):275-277.
- [5] 苗佩云,袁曾风.同心发射筒燃气开盖技术[J].北京理工大学学报,2004,24(4):283-285.

- [6] ARNAB C, ABDELLAH H. Numerical simulation of transient supersonic nozzle flows [C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Nashville, TN:AIAA,2012.
- [7] 于邵祯,姜毅,周笑飞,等.耦合尾喷管堵盖运动的发射箱内流场研究[J].兵工学报,2014,35(11):1806-1812.
- [8] 张玉东,纪楚群.多体分离非定常气动特性数值模拟[J].空气动力学学报,2006,24(1):1-4.
- [9] 刘君,白晓征,郭正,等.有相对运动多体动力学系统流动计算方法若干问题讨论[J].空气动力学学报,2008,26(1):14-19.
- [10] 王飞,朱立新,顾文彬.基于ALE算法的空气冲击波绕流数值模拟研究[J].工程爆破,2002,8(2):13-16.

(责任编辑 杨继森)