

文章编号: 1000-8055(2023)10-2430-11

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220010

基于 MAC 方法的膏体推进剂管道流动特性

单新有, 李映坤, 武 炎, 陈 雄, 何 勇

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要: 针对膏体推进剂管道内流动与挤出胀大问题, 开发了基于标志网格(MAC)法和压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE)的非牛顿不可压流体求解器, 膏体推进剂本构方程采用剪切稀化幂率(power-law)模型。通过膏体推进剂管道出口挤出形态数值仿真结果与实验结果的对比, 验证了数值计算方法的可靠性和准确性。在此基础上, 对膏体推进剂在管道内的流动与挤出过程进行数值计算, 详细分析了不同时刻下膏体推进剂的流动过程与挤出胀大形态, 研究了入口速度和管道直径对膏体推进剂管道流动特性的影响。结果表明: 膏体推进剂在挤出过程中, 自由表面随时间变化, 稳定阶段呈半球形, 在管道出口存在明显的挤出胀大现象, 当管道长度和直径不变时, 压降和挤出胀大比都随入口速度的增加而增大; 当入口速度相同时, 压降和挤出胀大比随管径的增加而减小。

关 键 词: 膏体推进剂; 计算流体力学; 非牛顿流体; 管道流动; 挤出胀大

中图分类号: V513

文献标志码: A

Pipe flow characteristics of pasty propellant based on MAC method

SHAN Xinyou, LI Yingkun, WU Yan, CHEN Xiong, HE Yong

(School of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Targeting the problem of the pasty propellant flow in the pipe and extrusion swell, a non-Newtonian incompressible fluid solver based on the mark and cell(MAC) method and the semi-implicit method for pressure-linked equation (SIMPLE) was developed. Shear-thinning power-law model was used in the constitutive equation of the pasty propellant. The reliability and accuracy of the numerical method were verified by comparing the numerical result of the extrusion morphology of the pasty propellant at the pipe outlet with the experimental result. On this basis, the flow process and extrusion swell of the pasty propellant were numerically calculated and analyzed in detail. The influences of inlet velocity and pipe diameter on the flow characteristics of the pasty propellant were investigated. Results showed that the free surface of the pasty propellant changed with time during the extrusion process. In the stable stage, the free surface of the propellant was hemispherical, and there was obvious extrusion swelling at the outlet of the pipe. When the pipe length and diameter were constant, the pressure drop and the extrusion swell ratio both increased with the increase of the inlet velocity. However, when the inlet velocity was constant, the pressure drop and extrusion expansion ratio decreased with the increase of pipe diameter.

Keywords: pasty propellant; computational fluid dynamics; non-Newtonian fluid; pipe flow; extrusion swells

收稿日期: 2022-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(52006099); 中央高校基本科研业务费专项资金(30920021102)

作者简介: 单新有(1990—), 男, 博士生, 主要从事膏体火箭发动机技术研究。E-mail: sxynjust@163.com

通信作者: 陈雄(1977—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事火箭发动机总体技术研究。E-mail: chenxiongjust@njus.edu.cn

引用格式: 单新有, 李映坤, 武炎, 等. 基于 MAC 方法的膏体推进剂管道流动特性[J]. 航空动力学报, 2023, 38(10): 2430-2440. SHAN Xinyou, LI Yingkun, WU Yan, et al. Pipe flow characteristics of pasty propellant based on MAC method[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(10): 2430-2440.

膏体推进剂是将固体推进剂膏体化, 静止状态类似于牙膏的推进剂, 具有优异的稳定性和安全使用性。将膏体推进剂置于储箱中, 在多次点火和熄火系统的配合使用下膏体推进剂火箭发动机可实现多次启动与推力自由调节^[1-4]。膏体推进系统应用广泛, 在军事领域, 可作为战略导弹制导的姿态发动机和终端制导校正发动机, 以及动能武器弹头发动机; 在民用领域, 可作为火箭推进系统内部气体伺服系统以及小型航天器姿态调整推力器等^[5]。

目前, 针对膏体推进剂火箭发动机技术, 国内外学者从理论分析、数值仿真、结构设计、实验验证等方面展开了大量研究。Kukushkin 等^[6]设计了一种多次启动的膏体火箭发动机, 该发动机共用一个推进剂储箱, 膏体推进剂管道内流动采用液压驱动, 利用热格栅余热实现发动机的重复启动, 并通过实验验证了发动机的整体性能。张明信等^[7]通过实验对一种膏体推进剂点火和燃烧性能进行了研究, 结果表明该推进剂适合于多次启动的发动机。张家仙等^[8]采用数值计算的方法研究了膏体推进剂喷嘴型面对发动机内弹道特性的影响, 喷嘴型面的变化对膏体火箭发动机的平衡压强和点火时间影响不大, 而对平衡时间有很大影响。刘成浩等^[5]研究了基于气源供给方式的流量可调膏体燃气发生器启动特性, 探索了黑火药点火和热流挂管余热重复启动方案的可行性及其对内弹道特性的影响。罗叶刚等^[9]对固-膏体燃气发生器工作后膏体储存室的温度分布情况进行了数值模拟研究, 结果表明传入膏体储存室的热量大部分来自于挤压室内的高温燃气, 且整体热量的传导主要在轴向进行。

膏体推进剂管道内流动特性是膏体火箭发动机设计过程中的重要研究方向之一。张家仙等^[10]根据非牛顿流体幂律模型建立了膏体推进剂模拟液直圆管流动的理论及数值计算模型, 研究得到了膏体推进剂模拟液在直圆管中流动的压降随管径及入口速度变化的情况。张蒙正等^[11]对直管、弯管和收缩/膨胀管中凝胶推进剂模拟流体的流动进行了实验和数值模拟, 结果显示几何参数对流动损失具有显著影响。曹琪等^[12]、夏学礼等^[13]分析了收缩角、体积流速和凝胶含量等因素对锥形喷射器中凝胶推进剂流动特性的影响, 数值研究表明收缩角是黏度变化的重要因素。邓寒玉等^[14-15]通过数值模拟的方法研究了锥形喷射器内

凝胶推进剂的流变特性, 结果表明锥形喷射器可有效加剧凝胶推进剂的剪切“稀化”作用; 并通过实验研究了射流自由长度对凝胶推进剂撞击雾化膜的影响, 结果表明低速时射流自由长度对撞击液膜的喷雾形态会有较大影响, 而高速条件下雾化形态基本一致。然而, 膏体推进剂是一种非牛顿流体, 膏体推进剂离开管道出口后会发生胀大现象, 即挤出的膏体推进剂直径大于管道直径, 这一现象会直接影响膏体火箭发动机初始阶段的工作特性。此外, 膏体推进剂通过管道挤出到火箭发动机燃烧室中进行燃烧, 管道结构和挤出速度直接影响膏体火箭发动机的内弹道特性。但是目前尚鲜有关于膏体推进剂流动动态过程以及挤出胀大特性实验和仿真研究的公开报道。

本文基于标志网格(MAC)法和压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE)对膏体推进剂管道流动过程进行数值模拟。分析了膏体推进剂的管道流动特性, 开展管道直径和入口速度变化对膏体推进剂流动压降和挤出胀大的影响研究, 为优化膏体火箭推进剂供给系统设计和发动机燃烧室安全计算提供一定的理论基础。

1 控制方程与计算方法

1.1 流动控制方程

假设管道内膏体推进剂的流动为二维轴对称不可压缩、等温、无体力及层流流动, 以 x 为轴向坐标, y 为径向坐标, 其连续方程和动量方程分别为^[14]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{v}{y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\tau_{xy}}{y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\tau_{yy} - \tau_{\theta\theta}}{y} \right) \quad (3)$$

式中 u 、 v 分别为沿 x 、 y 方向速度分量值; ρ 、 p 分别为流体密度和压力; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} 、 $\tau_{\theta\theta}$ 分别为各应力张量分量。

1.2 膏体流变本构方程

膏体推进剂属于非牛顿流体, 剪切稀化的幂率(power-law)本构方程在流变特性分析中有好的适用性和有效性。本文采用幂率本构模型^[14]

$$\tau = -\eta \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (5)$$

$$\dot{\gamma}^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中 τ 、 $\dot{\gamma}$ 分别为切应力和剪切速率, η 为膏体推进剂表观黏度, n 是流动幂律指数, K 是稠度系数。

1.3 标志网格法(MAC)

膏体推进剂管道内流动为典型的气液两相流动问题,膏体推进剂流入管道后占据气体空间,使得气体被排出,数值仿真需要连续捕捉两相之间交界面的变化。本文膏体推进剂流动过程中采用 MAC 法^[16-17]捕捉膏体推进剂与空气之间的界面,其本质是在网格中虚拟标记流体,每个时间步每个单元根据其相对流体的位置进行分类。图 1 给出了网格标记示例,并标有每种流体的分类,固壁被标记为边界(B)格;如果网格充满了膏体推进剂,完全在推进剂包围内的网格被归类为推进剂(P)网格;而完全在空气中的网格则是空气(A)网格。具有至少一个 A 相邻网格且含有标记推进剂的网格定义为自由表面(S)网格。计算过程中,每个时间步根据计算得到的网格中心速度来确定网格中所标记流体在下一个时间步所处的新坐标,以此来重新计算网格分类,由于这些标记网格受 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)条件限制,界面在每个时间步最多移动一个网格,因此可以通过计算表界面附近的网格分类来减小计算量。

B	B	B	B	B	B	B	B
P	P	P	S	A	A	A	A
P	P	P	P	S	A	A	A
P	P	P	P	P	S	A	A
P	P	P	P	P	S	A	A
P	P	P	P	P	P	S	A
P	P	P	P	P	P	S	A

图 1 多种流体标记示例:推进剂和空气的分类

Fig. 1 Multi-fluid cell marked example: classification for propellant and air

1.4 数值计算方法

数值模拟给膏体推进剂流动特性研究带来了很大的方便,对于膏体推进剂的流动可以采用

SIMPLE 算法^[12](压力修正法),控制方程组采用交错网格进行离散。先给出流场中节点的初始猜测值 $(p^*)^n$ 、 $(u^*)^n$ 、 $(v^*)^n$,然后计算出 $n+1$ 时间的速度和表观黏度值 $(u^*)^{n+1}$ 、 $(v^*)^{n+1}$ 、 $(\eta^*)^{n+1}$,再求解压力修正量 $(p')^n$,对压力场和速度场进行修正,如此循环得出收敛解。使用 MAC 方法对膏体推进剂流动过程中不同流体进行标记,计算膏体推进剂流动过程。

1.5 计算模型和网格

针对膏体推进剂从管道内流动进入燃烧室的过程,在管道内膏体推进剂表观黏度较大,有管道束缚,重力对推进剂表面形态影响较小,而在推进剂离开管道后,推进剂很快被点燃,重力作用时间较短,因此本文计算过程中不考虑重力对膏体推进剂流动的影响。考虑到流动管道的对称性,采用二维轴对称网格模型,网格划分如图所示,计算模型和网格如图 2 所示,管道的长度为 50 mm,直径分别为 4、6、8、10 mm 和 12 mm。空气的密度为 1.225 kg/m^3 ,黏度为 $1.789 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

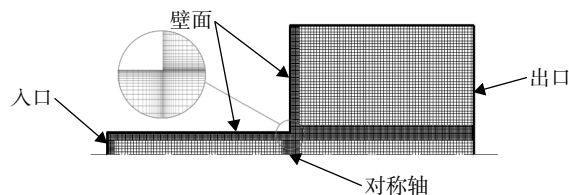


图 2 计算模型和网格

Fig. 2 Calculational model and grids

考虑到膏体推进剂的剪切稀化特性,壁面处网格进行加密处理,壁面附近网格设置为 $1 \times 10^{-5} \text{ m}$,以确保计算精度,并根据 BGL(bi-geometric law)网格定律以 1.2 的比例构建远离墙壁的网格,计算域总网格数为 37 603。计算入口采用速度入口边界条件,给定轴向速度,径向速度为 0 m/s ,方向沿 x 轴;出口采用压力出口边界,压力设置为 $101\,325 \text{ Pa}$;固壁采用绝热无滑移边界条件,中心线设置为轴对称边界条件。计算初始条件为计算域内充满静止空气,压力为 $101\,325 \text{ Pa}$;计算时间步为 10^{-6} s ,计算时间根据入口速度不同设置为 $0.06 \sim 0.16 \text{ s}$,以保证膏体推进剂流出管道出口并且有足够的长度分析其挤出胀大特性。

入口速度 u_m 和输运管道直径 d 会对膏体推进剂的管道流动特性产生影响,针对膏体火箭发动机推进剂进给系统的几种典型工作状态,表 1 给出了本文的计算工况。

表 1 计算工况
Table 1 Calculation cases

变量	工况	d/mm	$u_{\text{in}}/(\text{m/s})$
入口速度	1	6.00	0.50
	2	6.00	0.75
	3	6.00	1.00
	4	6.00	1.25
	5	6.00	1.50
管道直径	6	4.00	1.00
	7	6.00	1.00
	8	8.00	1.00
	9	10.0	1.00
	10	12.0	1.00

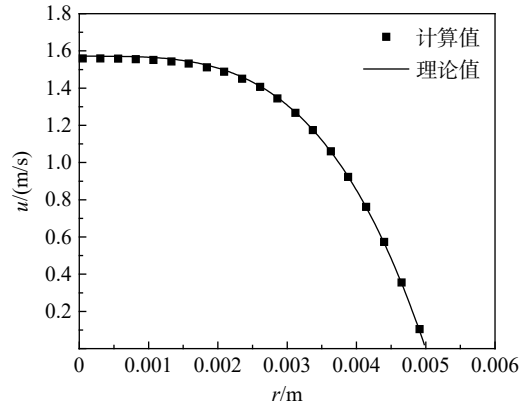


图 3 膏体推进剂管道流动 x 方向速度数值解和解析解
Fig. 3 Numerical and theoretical velocity in x -direction of the pasty propellant flow in pipeline

2 计算方法验证与计算模型

2.1 膏体流动速度对比算例验证

为了验证上述计算方法的准确性,对直径 100 mm 管道中膏体推进剂的流动过程进行数值模拟,入口速度 $u_{\text{in}}=1.00 \text{ m/s}$ 。文献 [18] 给出了对于幂律流体完全发展的稳态层流,等面积圆管的轴向速度分布为

$$\frac{u}{u_{\text{in}}} = \frac{3n+1}{n+1} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (7)$$

式中 u 为推进剂在管道内流动速度, R 为管道半径, r 是到轴线的距离。图 3 给出了膏体推进剂轴向流动速度数值解和解析解,从图 3 中可以看出,解析解与数值解之间的误差非常小($<3\%$),验证了本文算法计算膏体推进剂管道流动的准确性。

2.2 膏体推进剂挤出胀大实验验证

为进一步验证本文计算方法的可靠性,设计膏体推进剂管道内挤出胀大实验装置,通过实验观察膏体推进剂流出管道的形态,将其与数值计算结果进行对比。实验系统如图 4 所示,该装置

主要由液压驱动系统、膏体推进剂储箱和输运管道等组成,其中液压缸与活塞相连接。当液压缸工作时,活塞推动储箱内的膏体推进剂向前运动,并通过管道流出,使用高速摄像机和坐标纸来记录膏体推进剂从管道流出时的状态。实验中膏体推进剂的主要组分如表 2 所示,其密度为 1760 kg/m^3 ,通过旋转流变仪(MCR101)测得其本构模型中的流动幂律指数 $n=0.4$,稠度系数 $K=443 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ 。

图 5 给出了管道直径为 12 mm、入口速度为 1 m/s 工况下膏体推进剂挤出状态实验和仿真对比结果,由图可见,本文数值计算方法可以获得实验中观察到的膏体推进剂挤出胀大特性。图 5(b) 中膏体推进剂由于重力的作用出现一定的向下偏斜现象,而在实际膏体火箭发动机点火工作过程中,膏体推进剂在燃烧室内很快被点燃,所以在计算中没有考虑重力的影响。图 6 所示是膏体推进剂挤出胀大后形态位置的对比,取 $x=10 \text{ mm}$ 处膏体推进剂直径对比,计算结果与实验结果误差值小于 3%,数值计算得到的结果与实验结果符合良好,表明本文所采用数值方法的准确性和可靠性。

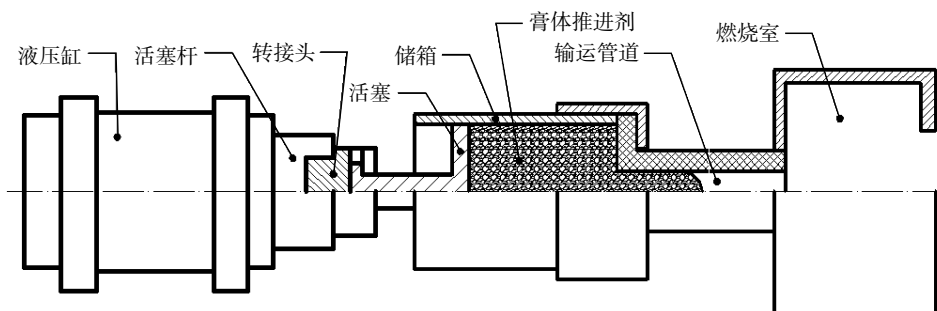


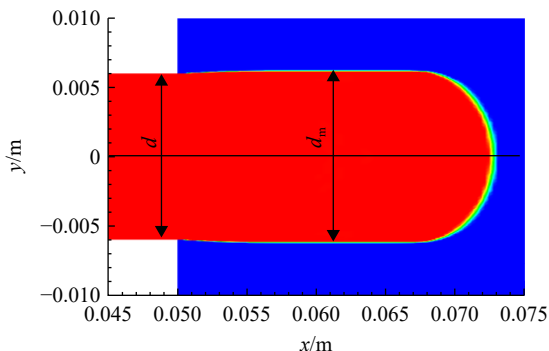
图 4 膏体推进剂挤出实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the horizontal pasty propellant extrusion experiment platform

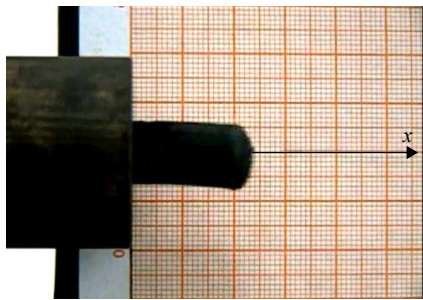
表 2 膏体推进剂的一般成分

Table 2 General components of the pasty propellant

组分	类型	质量分数/%
AP	氧化剂	70.0
HTPB	黏结剂	10.0
金属颗粒	金属添加剂	5.0
其他	固化剂、黏合剂等	15.0



(a) 计算结果



(b) 实验结果

图 5 膏体推进剂挤出管道的计算结果与实验结果

Fig. 5 Calculated and experimental results of pasty propellant extruded from the pipe

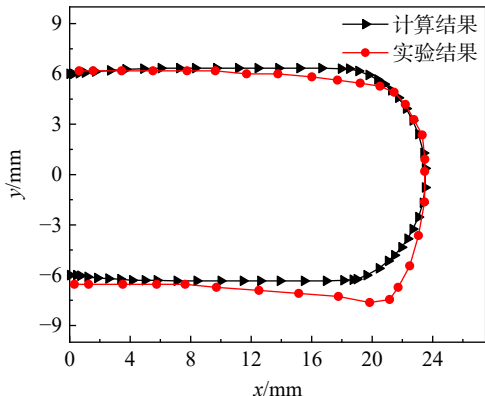


图 6 膏体推进剂挤出状态的实验和计算结果

Fig. 6 Experimental and calculation results of the pasty propellant extrusion state

此外,从图 5 的实验图像和仿真结果中可以看出(蓝色表示空气相,红色表示膏体推进剂相),

图中 x 和 y 分别表示轴向和径向坐标。膏体推进剂从管道中挤出后,挤出的表面是类似于半球面的形状,并且在一段时间后,膏体推进剂的直径膨胀到最大值,为便于分析,本文定义膏体推进剂挤出胀大比为 ε ,即

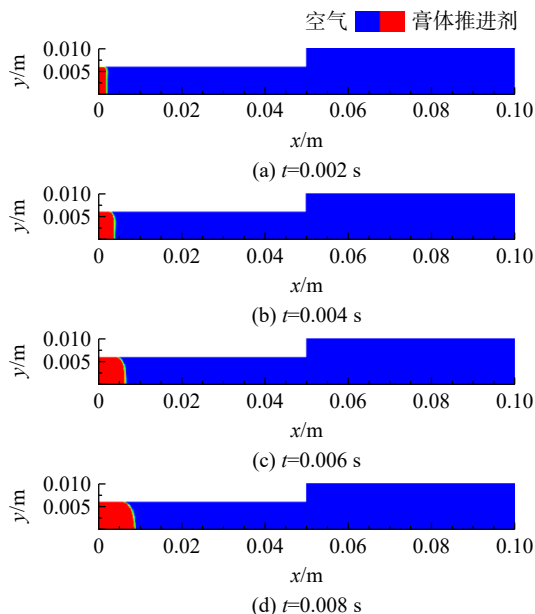
$$\varepsilon = \frac{d_m}{d} \quad (8)$$

式中 d 为管道直径, d_m 为膏体推进剂离开管道出口后胀大的最大直径。膏体推进剂特殊挤出胀大现象改变了膏状火箭发动机在点火时的初始燃烧表面,同样会影响火箭发动机的初始压力峰值的变化,因此在膏体火箭发动机设计时有必要考虑膏体推进剂的挤出胀大现象。

3 计算结果与分析

3.1 膏体推进剂的流动形态分析

图 7 给出了工况 10(管道直径为 12 mm,入口速度为 1.00 m/s)条件下膏体推进剂进入管道后不同时刻流动过程中自由表面形态的变化。从图中可以看出,膏体推进剂以一定的速度进入管道,壁面附近膏体推进剂的速度逐渐下降; $t=0.002$ s 时,膏体推进剂的型面基本保持一个平面形状,仅在壁面附近有弯曲;而随着膏体推进剂的向前流动,管道壁面附近的弯曲越来越大; $t=0.014$ s 时刻膏体推进剂管道内流动自由表面呈现出类似于半球形,并且该形态在膏体推进剂的后续流动过程中基本保持不变。



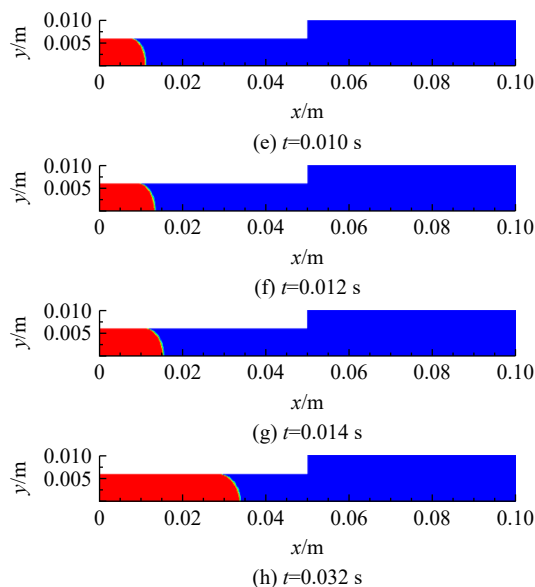


图 7 膏体推进剂进入管道不同时刻流动自由表面的形态

Fig. 7 Free surface morphology of the pasty propellant flowing into the pipeline at different times

膏体推进剂管道外部的流动过程如图 8 所示。由图 8 可见, 膏体推进剂离开管道出口后, 其自由表面形态继续保持半球形, 膏体推进剂直径大于约束管道直径, 出现挤出胀大现象。当膏体推进剂的直径胀大到最大值后, 这部分膏体推进剂就以固定的形态继续向前运动, 而出口处的推进剂同样从管道直径逐渐胀大到最大直径, 此时膏体推进剂的管道外流动达到一个稳定的过程, 两端形态保持不变, 中间部分长度不断增加, 如图 8 中 $t=0.060\sim 0.064$ s 所示。

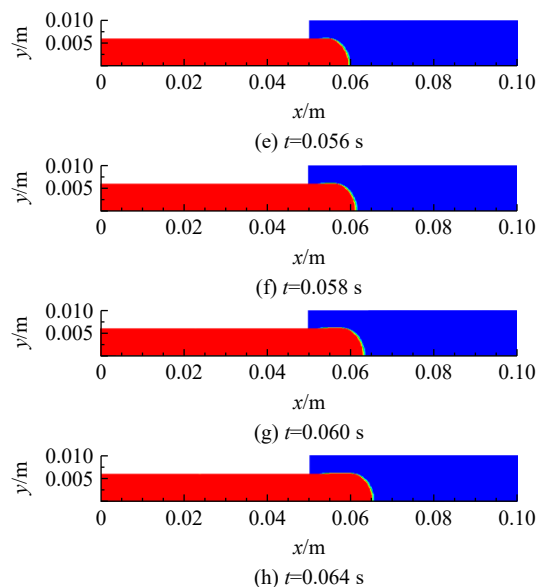
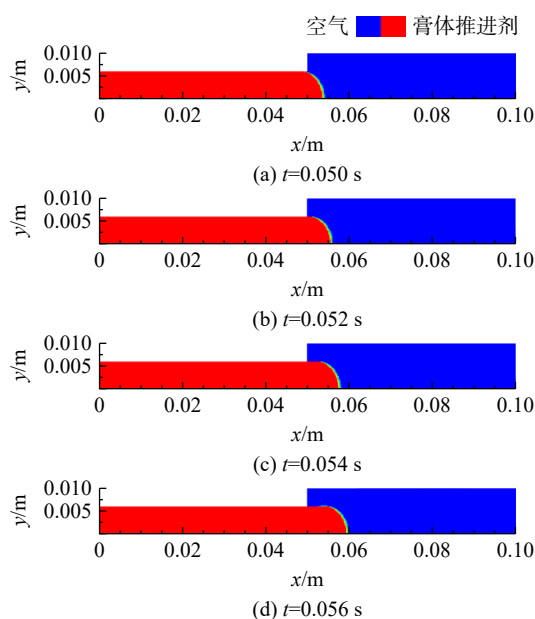


图 8 膏体推进剂管道外部不同时刻流动自由表面的形态

Fig. 8 Free surface morphology of the pasty propellant leaves the pipeline at different times

3.2 膏体推进剂的流动特性分析

图 9 给出了工况 10 条件下流场中不同时刻膏体推进剂的表观黏度分布。膏体推进剂刚进入管道时, 剪切速率较小, 因此管道中心表观黏度较大, 如图 9(a) 所示; 随着时间的推移, 膏体推进剂剪切变稀的现象明显, 如图 9(b) 所示, 在管道入口, 膏体推进剂剪切速率增大, 表观黏度明显减小。在 $t=0.014$ s 时, 膏体推进剂建立管流状态, 推进剂在管道入口处的表观黏度基本不变, 而在管道中部表观黏度在远离壁面方向逐渐增大, 因为膏体推进剂的剪切变稀特性, 剪切速率沿着远离壁面的方向逐渐减小, 表观黏度逐步恢复到膏体状态, 如图 9(c) 所示。当膏体推进剂到达管道出口时, 管道中心处推进剂的剪切速率增大, 表观黏度迅速减小, 而靠近壁面处的表观黏度增大, 这与推进剂在管道内流动自由表面处的表观黏度分布基本一致, 如图 9(d)、图 9(e) 所示。随着时间的推移, 膏体推进剂流出管道, 失去壁面的约束, 膏体推进剂的剪切速率逐渐减小, 表观黏度逐渐增大并逐步恢复到膏体状态, 如图 9(f)、图 9(g) 所示。

图 10 给出了工况 10 条件下膏体推进剂在管道内外不同时刻的轴向速度分布。 $t=0.002$ s 时刻, 膏体流动速度与管道内空气流动速度相差不大; 随着膏体推进剂持续流动, 在切应力作用下, 推

进剂靠近壁面切应力越大,剪切速率越大,表观黏度越低;越靠近轴线位置,切应力越小,剪切速率也变小,表观黏度相对变大。膏体推进剂的流动速度在管道内呈现明显的抛物线型分布,管道内空气速度逐渐增加,最大速度位于膏体与空气交界面处;当膏体流出管道后,空气在远离出口一定距离后达到最大值,如图9(d)所示。图11给出了不同时刻流场轴线处 x 方向的速度分布。随着时间的推移,膏体推进剂在轴线处的速度逐渐增大并达到一个稳定值1.53 m/s,同时轴线处空气的速度也逐渐增大;当膏体推进剂流动至管道出口后,其速度迅速降低,而此时空气速度继续增大,出现一个明显的峰值,达到1.88 m/s,如图9(d)所示。

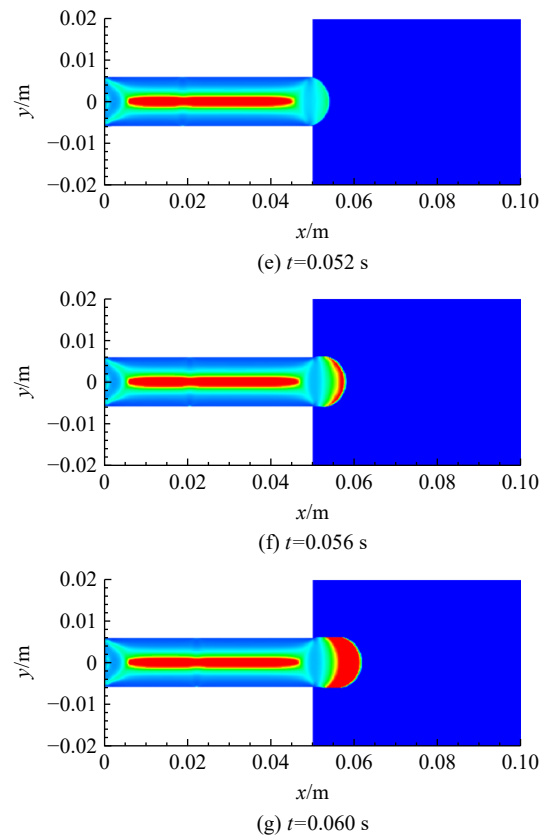
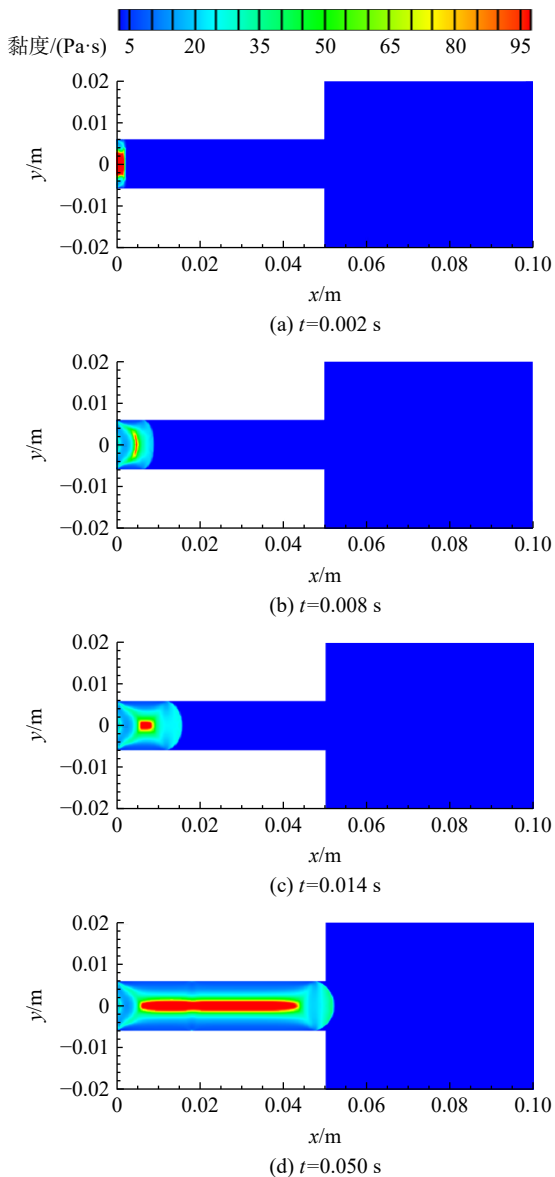


图9 工况10条件下不同时刻流场黏度分布

Fig. 9 Viscosity distribution of flow field under case 10 condition at different times

图12给出了 $t=0.068$ s时刻流场内不同位置的轴向速度曲线。从图中可以看出,膏体推进剂在管道内达到稳定管流状态,壁面处速度小而剪切速率较大,表观黏度越低;轴线处剪切速率小,切应力较小,表观黏度相对较大而速度较大。速度总体呈现中心高壁面低的抛物线型分布特点,最大速度达到1.55 m/s。当膏体推进剂流出管道出口后,剪切速率减小,切应力逐渐减小,表观黏度增大,逐渐恢复膏体化,速度值迅速衰减,当达到最大胀大直径后,呈现等速分布特点,与管道内膏体流动速度分布差异较大,最大速度为0.94 m/s,小于管道内膏体流动速度。这是由于膏体流出管道后挤出胀大现象引起的,膏体推进剂流出管道后壁面约束解除,导致流速降低。

图13给出了膏体推进剂在管道出口处的径向速度分布。膏体推进剂在管道出口处,切应力较大,剪切速率增大而表观黏度降低;随着膏体推进剂流出管道,切应力逐渐减小,剪切速率减小,表观黏度迅速增大。正是因为膏体推进剂剪切变稀的流变特性和较大的切应力,膏体推进剂

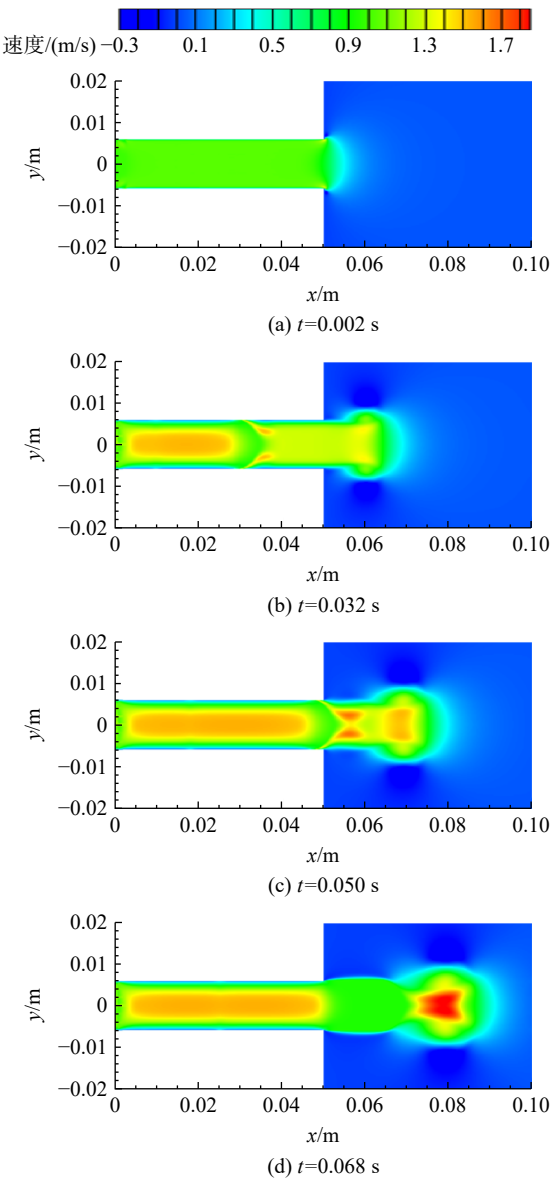


图 10 工况 10 不同时刻流场内 x 方向速度分布
Fig. 10 x -velocity distribution of flow field under case 10 condition

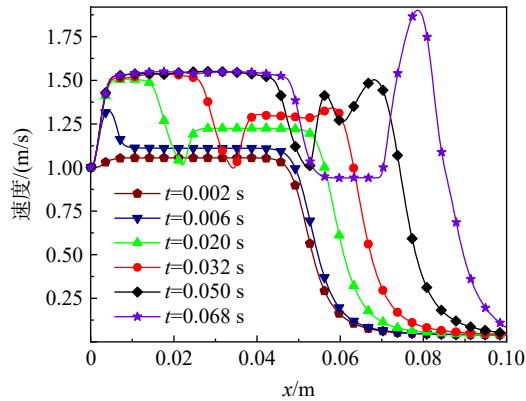


图 11 工况 10 不同时刻轴线处 x 方向速度分布
Fig. 11 x -direction velocity distribution on the axis at different times under case 10

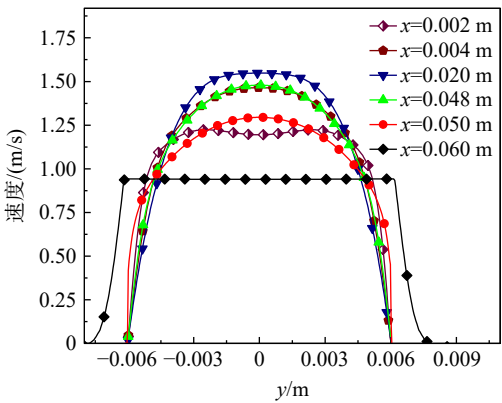


图 12 $t=0.068\text{ s}$ 时刻不同位置 x 方向速度分布
Fig. 12 Velocity distribution in x -direction at different positions when $t=0.068\text{ s}$

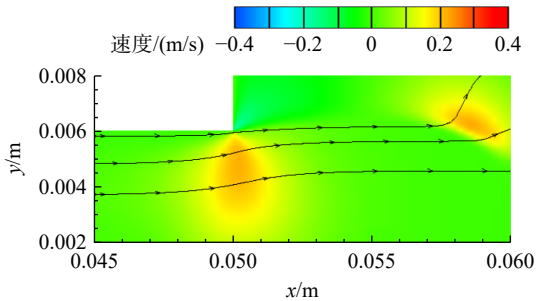


图 13 膏体推进剂在管道出口径向速度
Fig. 13 Radial velocity of the pasty propellant at the outlet of the pipe

在管道出口会出现径向运动速度从而出现挤出胀大现象。在 $t=0.060\text{ s}$ 时刻, 径向速度减小到 0 m/s , 管道外部膏体推进剂直径保持不变, 推进剂挤出胀大达到最大值, 随后膏体推进剂会以该稳定状态继续向前运动。取膏体推进剂刚达到最大直径时为临界时刻, 可以计算出此时膏体推进剂在管道外的表面积为 $S=463.40\text{ mm}^2$ 。膏体推进剂在燃烧室内的形态和初始燃烧表面积对发动机的点火过程和初始压力峰值都有一定的影响。

3.3 入口速度对膏体推进剂管道流动的影响
不同入口速度对管道中膏体推进剂流动压力损失和挤出胀大的影响见表 3。表 3 中 u_{in} 为推进

表 3 工况 1~工况 5 的计算结果
Table 3 Calculation results of case 1 to case 5

工况	$u_{in}/(\text{m/s})$	d_m/mm	$\Delta p/\text{kPa}$	ε	S/mm^2
1	0.50	6.362	228.16	1.060	167.38
2	0.75	6.378	273.75	1.063	167.83
3	1.00	6.396	306.20	1.066	168.35
4	1.25	6.408	334.06	1.068	168.69
5	1.50	6.414	358.15	1.069	168.86

剂入口速度, Δp 为管道入口到管道出口中心处的压差, S 表示膏体推进剂刚达到挤出胀大最大直径时在管道外部的自由表面积, 可以看出随着入口速度的增大, 挤出胀大比 ε 增大, 临界自由表面积也增大。图 14 显示了在不同入口速度条件下管道轴线入口到出口处的压力损失。膏体推进剂在管道流动中无壁面滑动, 流动阻力是压差形成原因, 与流量成指数关系, 与入口速度的 n 次方成正比。根据文献 [18], 可以得出理论的压差

$$\Delta p = \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \cdot \frac{2KL}{R^{1+n}} \cdot u^n \quad (9)$$

式中 L 为管道长度。

从图 14 可以看出, 计算出的压差略大于理论值。这主要是因为理论压差只是表示流体在一段管道内稳定流动时的压差, 没有入口和出口的特殊情况。图 15 给出了工况 3 条件下管道内压力 p 变化曲线, 可以看出管道入口压力下降较快, 而管道出口压力下降较慢, 入口的速度是固定值, 而壁面无滑移, 所以在入口处会有较大的剪切速

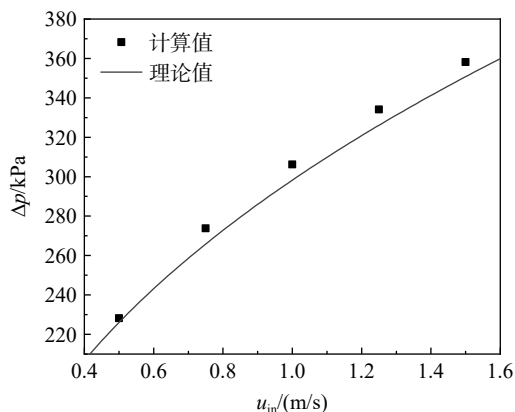


图 14 不同入口速度下的管道流动压降曲线

Fig. 14 Pressure drop of the pipe flow under different inlet velocities

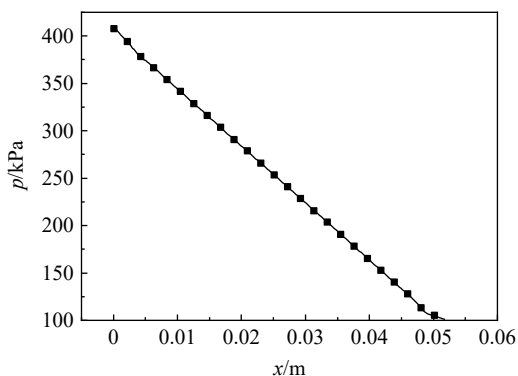


图 15 工况 6 条件下管道内压力变化曲线

Fig. 15 Pressure variation curve in the pipe under case 6

率, 从而产生较大的切应力, 压力需要克服切应力使推进剂向前流动, 所以会在入口处造成一定的压力损失。而出口处没有管道壁面的束缚, 剪切速率增大, 表观黏度减小, 膏体推进剂稀化, 流动需要的压力减小。综上所述, 在本文计算出的压差与理论压差有一定区别。

图 16 给出了膏体推进剂的挤出胀大比 ε 随入口速度的变化, 可以看出挤出胀大比随着入口速度的增加而增大。在本文计算工况下, 膏体推进剂入口速度越大, 在出口处剪切速率越大, 表观黏度降低, 但切应力增大导致流动径向速度增大, 所以挤出胀大比也因该径向速度而增大。

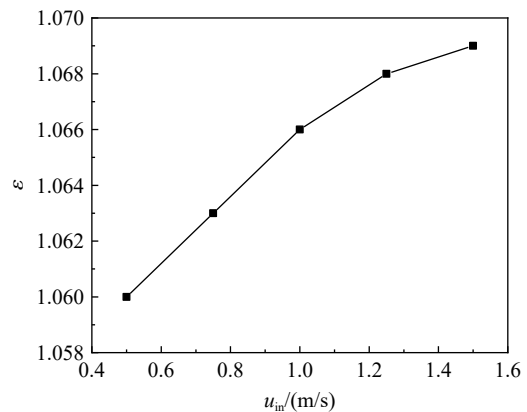


图 16 不同入口速度下的挤出胀大比

Fig. 16 Extrusion swell ratio under different inlet velocities

3.4 管道直径对膏体推进剂管道流动的影响

为研究管道直径对膏体推进剂流动的影响, 将膏体推进剂管道入口速度设置为 1.00 m/s, 管道直径取为 4~12 mm, 计算工况见表 4。

不同管道直径下入口和出口压差的数值计算结果和解析结果如图 17 所示。从图 17 中可以看出, 随着管道直径的增加, 压差逐渐减小, 计算结果与解析结果符合较好。图 18 给出了膏体推进剂的挤出胀大比与管道直径之间的关系。随着管道直径的增加, 挤出胀大比会缓慢降低。在本文

表 4 工况 6~工况 10 的计算结果

Table 4 Calculation results of case 6 to case 10

工况	d/mm	d_m/mm	$\Delta p/\text{kPa}$	ε	S/mm^2
6	4.000	4.268	730.67	1.067	98.05
7	6.000	6.396	306.20	1.066	168.35
8	8.000	8.520	164.55	1.065	252.73
9	10.00	10.640	102.88	1.064	351.10
10	12.00	12.756	70.56	1.063	463.40

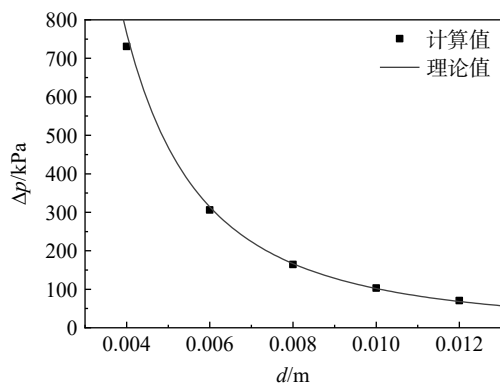


图 17 压降随管道直径的变化曲线

Fig. 17 Pressure drop variation curve with different pipe diameters

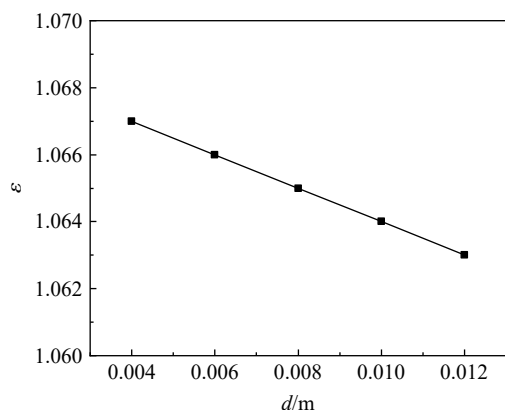


图 18 挤出胀大比随管道直径的变化曲线

Fig. 18 Extrusion swell ratio variation curve with different pipe diameters

计算工况下, 膏体推进剂入口速度一定, 管道直径越大, 在管道出口处剪切速率越小, 切应力越小, 使得膏体推进剂在出口处产生径向流动速度越小, 从而导致膏体推进剂挤出胀大比随着管道直径增加而减小。因此, 在膏体推进火箭发动机的设计过程中, 流量一定条件下, 尽可能增加单个流动管道直径, 能够减小膏体推进剂的挤出胀大比。

4 结 论

本文基于标志网格(MAC)法研究了膏体推进剂的管道流动特性和挤出胀大现象, 在膏体推进剂挤出形态实验验证的基础上, 详细地分析了膏体推进剂的管道流动形态、速度和黏度分布, 并研究了入口速度和管道直径对膏体推进剂流动压力损失和挤出胀大比的影响, 得出如下结论:

1) 膏体推进剂在挤出过程中, 自由表面随时间变化, 稳定阶段呈半球形; 在管道内速度和黏

度都呈现出中心大壁面小的趋势, 在管道出口由于较大黏度作用出现挤出胀大现象, 速度明显降低, 黏度逐渐增大。

2) 在管道直径不变的情况下, 膏体推进剂管道两端的压差和挤出胀大比随着入口速度的增加而增大。

3) 在入口速度一定时, 膏体推进剂管道两端的压降和挤出胀大比随着管道直径的增大而减小。

在计算工况下, 膏体推进剂存在明显的挤出胀大现象, 挤出胀大比随推进剂入口速度和管道直径的变化而变化。因此可以利用这种关系来计算合理的膏体推进剂管道入口速度和管道直径, 为膏体火箭发动机的设计提供理论参考。

参考文献:

- [1] 鲍立荣, 陈永义, 陈苏杭, 等. 可控固体推进技术研究进展[J]. 推进技术, 2020, 41(5): 961-973.
BAO Lirong, CHEN Yongyi, CHEN Suhang, et al. Research progress on controllable solid propulsion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(5): 961-973. (in Chinese)
- [2] PADWAL M B, NATAN B, MISHRA D P. Gel propellants[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2021, 83: 100885.1-100885.150.
- [3] FRISBEE R. Advanced propulsion for the XXIst century[R]. AIAA 2003-2589, 2003.
- [4] 李越森, 王德升, 李歧海. 脉冲式膏体推进剂发动机实验研究[J]. 航空动力学报, 1998, 13(3): 310-314.
LI Yuesen, WANG Desheng, LI Qihai. An experimental research of pulse-gel propellant rocket motor[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(3): 310-314. (in Chinese)
- [5] 刘成浩, 封锋, 曹钦柳. 膏体燃气发生器启动特性研究[J]. 推进技术, 2018, 39(2): 374-379.
LIU Chenghao, FENG Feng, CAO Qinliu. Study on starts of pasty propellant gas generator[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(2): 374-379. (in Chinese)
- [6] KUKUSHKIN V I, IVANCHENKO A N. The pasty propellant rocket engine development[R]. AIAA-93-1754, 1993.
- [7] 张明信, 张胜勇. 膏体推进剂点火和燃烧特性的实验研究[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(2): 30-32.
ZHANG Mingxin, ZHANG Shengyong. An experimental study on the ignition and combustion characteristics of pasty propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2003, 26(2): 30-32. (in Chinese)
- [8] 张家仙, 郑亚, 鞠玉涛. 喷嘴型面对膏体火箭内弹道的影响[J]. 弹道学报, 2009, 21(4): 76-78, 83.
ZHANG Jiaxian, ZHENG Ya, JU Yutao. Influence of nozzle profile on interior ballistics of pasty propellant rocket motor[J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(4): 76-78, 83. (in Chinese)
- [9] 罗叶刚, 邢玉明, 刘鑫, 等. 固-膏体燃气发生器热结构分析和仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(8): 1772-1779.
LUO Yegang, XING Yuming, LIU Xin, et al. Thermal structure analysis and simulation of solid-gelled propellant gas generator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(8): 1772-1779. (in Chinese)

- [10] 张家仙, 鞠玉涛, 周超, 等. 膏体推进剂模拟液直圆管流动特性[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(4): 439-442.
ZHANG Jiaxian, JU Yutao, ZHOU Chao, et al. Pasty propellant simulacrum flow characteristics in straight round pipe[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(4): 439-442. (in Chinese)
- [11] 张蒙正, 左博. 幂律型凝胶推进剂管路中的流动特性[J]. 推进技术, 2009, 30(2): 246-250.
ZHANG Mengzheng, ZUO Bo. Flow behavior of power law model gelled propellant in the pipe[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(2): 246-250. (in Chinese)
- [12] 曹琪, 封锋, 武晓松, 等. 凝胶推进剂供给管流的压降数值研究[J]. 推进技术, 2014, 35(5): 701-707.
CAO Qi, FENG Feng, WU Xiaosong, et al. Numerical study on pressure loss for gel propellants supply pipeline[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(5): 701-707. (in Chinese)
- [13] 夏学礼, 强洪夫, 周志清. 凝胶推进剂弯管流动特性的数值实验研究[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(6): 739-744.
XIA Xueli, QIANG Hongfu, ZHOU Zhiqing. Numerical experiment research on flow property of gelled propellants in pipe-bending pipe[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(6): 739-744. (in Chinese)
- [14] 邓寒玉, 封锋. 射流自由长度对凝胶推进剂撞击雾化影响的实验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(1): 215-222.
DENG Hanyu, FENG Feng. Experiment on effect of free jet length on impinging atomization of gel propellant[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(1): 215-222. (in Chinese)
- [15] 邓寒玉, 封锋, 武晓松, 等. 基于锥形喷注器的凝胶推进剂流变特性数值研究[J]. 推进技术, 2014, 35(11): 1551-1557.
DENG Hanyu, FENG Feng, WU Xiaosong, et al. Numerical studies on rheological characteristics of gel propellant with regard to tapered injectors[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(11): 1551-1557. (in Chinese)
- [16] MCKEE S, TOMÉ M F, FERREIRA V G, et al. The MAC method[J]. Computers and Fluids, 2008, 37(8): 907-930.
- [17] TOMÉ M F, FILHO A C, CUMINATO J A, et al. GENSMAC3D: a numerical method for solving unsteady three-dimensional free surface flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2001, 37(7): 747-796.
- [18] 沈崇年, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.

(编辑: 王碧珺)