

基于锥形喷注器的凝胶推进剂流变特性数值研究^{*}

邓寒玉¹, 封 锋¹, 武晓松¹, 曹 琪¹, 付春雨²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘 要: 为探讨锥形喷注器内凝胶推进剂的流变特性, 开发了基于同步重叠相加 (SOLA) 交错网格算法的非牛顿不可压流体求解器, 粘性本构方程采用剪切稀化幂率模型, 并采用 Sicilian-Hirt 部分网格法处理固壁边界, 开展了凝胶推进剂流变特性历变过程的数值模拟。结果表明: 构造的数值模型和处理方法是适用的, 数值解与理论值有较高的吻合度, 误差仅在 10% 以内; 锥形喷注器可有效加剧凝胶推进剂的剪切“稀化”作用, 平均表观粘性可降低近 70%; 细圆管段的存在会不利于“稀化”; 随着收敛角度的增大, 喷注器出口截面的平均表观粘度会随之降低, 50° 时出口平均表观粘性仅为 10° 时的 50%, 但也会增加喷注器中的压力损失。

关键词: 凝胶推进剂; 锥形喷注器; 流变特性; 表观粘度

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4055 (2014) 11-1551-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.11.017

Numerical Studies on Rheological Characteristics of Gel Propellant with Regard to Tapered Injectors

DENG Han-yu¹, FENG Feng¹, WU Xiao-song¹, CAO Qi¹, FU Chun-yu²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Beijing Precision Electromechanical Control Equipment Research Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: For the sake of rheological characteristics of gel propellant with regard to tapered injectors, an incompressible fluid solver, in which shear-thinning Power-Law model was used in the viscosity constitutive equation, was developed based on synchronous overlap-add (SOLA) staggered mesh. Sicilian-Hirt partial cell treatment was applied to deal with the solid wall boundary. A series of simulations for the rheological process of gel propellant were implemented. Numerical results indicate that numerical model and methods are applicable, having good agreement between numerical solution and analytical solution in which relative errors are within 10%. Tapered injectors can strongly promote the shear-thinning behavior of the gel propellant, in which mean apparent viscosity can reduce by nearly 70%. On the contrary, the slim tube stage goes against the shear-thinning behavior. The mean apparent viscosity at the exits of the injectors, which at 50° is only 50% in accordance with 10°, decreases with increasing the convergent semi-angle, unexpectedly resulting in much more pressure loss of the injectors.

Key words: Gel propellant; Tapered injectors; Rheological characteristics; Apparent viscosity

^{*} 收稿日期: 2013-11-18; 修订日期: 2013-12-17。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金 (30920140112001); 航天科技创新基金 (CASC03-02)。

作者简介: 邓寒玉 (1988—), 男, 博士生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。E-mail: dhy19890120@163.com

1 引 言

凝胶推进剂是用少量凝胶剂将液体组元凝胶化,形成具有一定结构和特性并能长期保持稳定的凝胶体系^[1,2],它有固体推进剂的高安全性、易储藏和不易泄漏等优点;添加含能粒子又有液体推进剂的高比冲性;剪切稀化特性又可使其流动可控,易实现多次启动。设计一个性能优良的喷注器是利用凝胶推进剂上述优点的前提。美国、德国、以色列在这方面开展了大量研究工作。

Madlener^[3,4]对凝胶推进剂屈服应力和极限表观粘度进行了测量,得到了相关流变参数,对流变特性表征有重要意义;Rahimi^[5]开展了凝胶推进剂收敛管道流动的数值计算,表明表观粘度分布受收敛角影响较大;Jayaprokash^[6]对凝胶推进剂雾化特性参数进行了测量,得到了雾化特性与喷注器出口表观粘度分布有着重要关系的结论;张蒙正^[7]对凝胶推进剂管道流动特性进行了研究,得到了“柱塞”流动相关参数及结论。

本文针对锥形喷注器的几何构型,开发了基于SOLA交错网格算法的不可压流体求解器,进行了锥形喷注器内凝胶推进剂流变特性的数值计算,分析了细管段长径比、收敛角度对喷注器内速度场、粘度场及压力损失的影响,得到了一些结论,可为后续凝胶推进剂喷注系统的设计提供指导。

2 物理模型和计算方法

典型喷注器结构如图1所示,分别由前等直段、收敛段和细圆管段组成,其中细圆管段并非必须的,相关结构尺寸见图,不再详述。

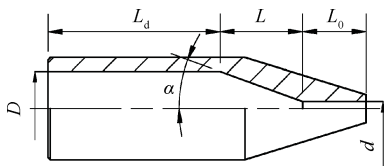


Fig. 1 Drawing of the injector

锥形喷注器结构尺寸: $L_d=20\text{mm}$, $d=1\text{mm}$, $D=4\text{mm}$,有关 L 和 L_0 的确定,取决于收敛半角 α 和细圆管长径比。

2.1 计算模型

考虑到图1所示锥形喷注器为轴对称结构,为减小计算工作量,仅取如图2所示计算域进行数值求

解。从图2可以看出,在压力源驱动下,凝胶推进剂以一定速率从入口边界流入,经壁面作用从出口边界流出。

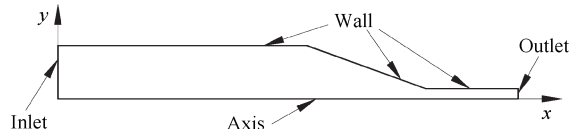


Fig. 2 Computational domain and boundary condition

2.2 控制方程组

在锥形喷注器内,假定凝胶推进剂表现为不可压缩、等温、无体力及层流流动,以 x 为对称轴, y 为径向坐标,其连续方程^[8]

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

式中 $\varepsilon=0$ 为平面问题; $\varepsilon=1$ 为轴对称问题。

动量方程为

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

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

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; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ 分别为各应力张量分量, $\tau_{\theta\theta}$ 为轴对称应力源项。

2.3 流变本构方程

凝胶推进剂多呈现非牛顿流体特性,剪切稀化的Power-Law(幂率)本构方程在流变特性分析中有好的适用性和有效性。因此,本文采用Power-Law本构方程^[5]

$$\tau_{ij} = -\eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma}_{ij} \quad (4)$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = K(\dot{\gamma})^{n-1} = K\Delta^{(n-1)/2} \quad (5)$$

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

式中 $\tau_{ij}, \dot{\gamma}_{ij}$ 分别为应力张量和应变率张量; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; K, n 为幂率流体指前系数和指数。剪切速率趋向于0时,表观粘性趋向无穷大,在计算时需要表观粘性的上界加以限制。

2.4 网格及处理方法

采用计算模型网格如图3所示,径向上网格数150,轴向上随长度不同作相应调整处理,由白色到黑色过渡区采用Sicilian和Hirt提出的部分网格方法处理,纯黑色区为非流动区域。

考虑到喷注器存在锥形壁面,正交网格中壁面

处网格有部分侵入壁面中,采用如图4所示部分网格法处理^[9], $AC_{i,j}$, $AR_{i+1/2,j}$, $AB_{i,j-1/2}$ 表示网格中流体占网格体积的分数,壁面附近网格内可能全是流体或者固体壁面,也可能仅有部分有流体通过。

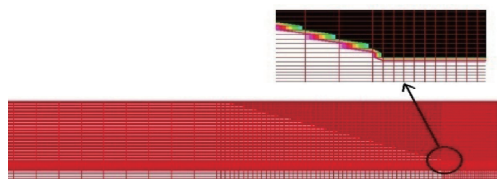


Fig. 3 Computational mesh

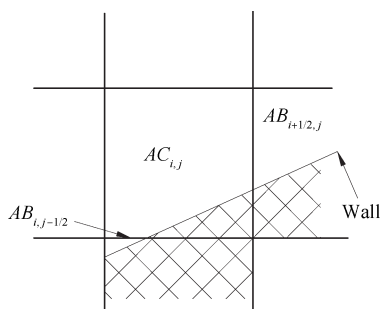


Fig. 4 Definition of partial cell

从图4中可以看出,网格右边界和下边界有流体通过网格线长度占各自网格边长的比例,即

(1)当 $AC_{i,j} = 0$ 时,表明网格中无流体,这部分网格不在求解范围之内;

(2)当 $AC_{i,j} = 1$ 时,表明网格中全为流体;

(3)当 $0 < AC_{i,j} < 1$ 时,表明部分网格是浸入到壁面内的,该类网格即为部分网格;

(4) $AR_{i+1/2,j}$ 和 $AB_{i,j-1/2}$ 含义相似,不再详述。

基于以上参数,假设壁面不随时间变化,动量方程无需变换,但其连续方程需变换如下

$$\left(\frac{\partial (AR \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial (AB \cdot v)}{\partial y} + \varepsilon \frac{(AR \cdot v)}{y} \right) / AC = 0 \quad (7)$$

2.5 边界条件

对给定喷注器的粘性流体,一定的压力差只能维持特定的流量^[10],本文选择边界条件如下

(1)入口条件

$$p = p_{in}, \quad \frac{\partial u}{\partial x}|_{inlet} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x}|_{inlet} = 0$$

式中 p_{in} 为给定入口压力,本文取2MPa作为所有算例入口压力;入口速度外推可以让喷注器内部流动充分发展。

(2)固壁边界

假设固壁为无滑移的,有

$$u|_{wall} = 0, \quad v|_{wall} = 0$$

(3)轴对称边界

$$v|_{symmetry} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial y}|_{symmetry} = 0$$

(4)出口条件

出口为大气环境,则

$$p = p_{out}, \quad \frac{\partial u}{\partial x}|_{out} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x}|_{out} = 0$$

式中 p_{out} 为环境压力($p_{out} = 101325 \text{ Pa}$)。

3 数值算例验证

本文采用基于交错网格的SOLA算法^[11],压力和F值存储于格心处,速度值存于网格线上,压力相和粘性相均采用中心差分格式,对流项采用不完全迎风差分格式,即迎风格式与中心差分格式的线性组合,线性系数取0.5^[12]。为进一步校验本数值方法的有效性和适用性,选取如图5所示的充分发展等截面直圆管流作为验证算例^[13]。

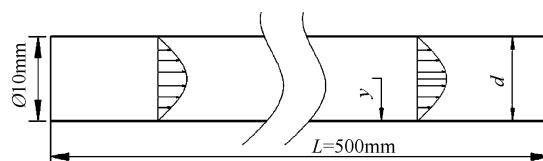


Fig. 5 Sketch of verified pipe flow

对于Power-Law幂率型非牛顿流体,充分发展后 u/u_{max} 沿径向分布存在解析解,即

$$\frac{u}{u_{max}} = 1 - \left| \frac{y - d/2}{d/2} \right|^{(n+1)/n} \quad (8)$$

式中 u , u_{max} 为圆管截面径向速度和最大径向速度; y , d 为截面某点到下边界距离和圆管内径。

根据凝胶推进剂幂率型的本构方程,设定系数 K 为25,当流变指数 n 取1和0.5时,即为牛顿流体和非牛顿流体。图6给出了两种流体直圆管出口截面 u/u_{max} 径向变化及与理论值间的对比。

从图6可以看出,理论解与数值解有较好的吻合度和一致性,最大误差为10%,比较结果进一步表明本文所采用数值方法的有效性和可靠性。

4 计算结果与分析

4.1 有无细圆管段比较与分析

为深入研究细圆管段对喷注器内流场的影响,选取幂率型煤油凝胶($K = 13.5$, $n = 0.4$)^[14],保持喷注器前等直段、收敛段尺寸不变,如表1所示4个不同

长径比为例,其中 L_0/d 为0代表无细圆管段。

表1中4种不同长径比喷注器内的铝粉煤油凝胶推进剂表观粘性分布云图如图7所示。

从图7可以看出,前等直段表观粘度在远离壁面

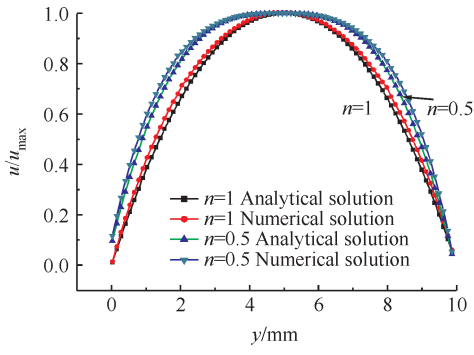


Fig. 6 Comparison between numerical and analytical solution of the radial velocity

Table 1 Geometry of injector at different L_0/d ratios

Case	D/mm	L_0/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	d/mm	L_0/d
1	4	20	20	1	0
2					1
3					3
4					5

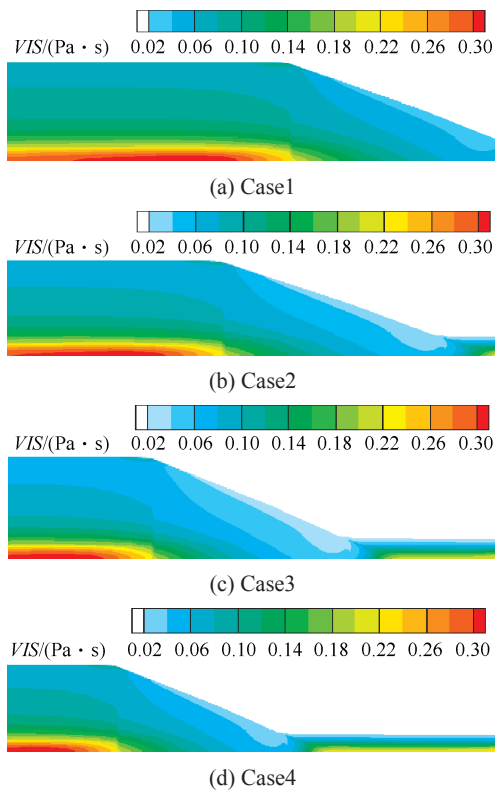


Fig. 7 Viscosity field of different length-diameter ratios

方向逐渐增大,因为壁面附近流体剪切速率大,铝粉煤油凝胶有剪切变稀特性,故其表观粘度有相应减小趋势;此外,收敛段前出现了“柱塞”现象,即图7红色区域,因为收敛段使得非牛顿流体流线发生偏转迫使流场中的剪切速率增大,前等直段轴线附近表观粘性较高区域将不能维持下去,故在收敛段入口终止而形成了“柱塞”。

细圆管长径比对喷注器前等直段和收敛段的表观粘度分布影响较小,流体进入细圆管段后很快建立管流状态,其表观粘度与前等直段径向分布规律相同,不过其数值相对较小,因为在流量一定条件下,细圆管段内速度增大,剪切速率变大,从而导致表观粘度减小;此外,细圆管段内表观粘度比收敛段出口大,增大了煤油凝胶的表观粘度。

为评估锥形喷注器结构对煤油凝胶表观粘度的影响,定义喷注器各截面平均表观粘度^[5]

$$\bar{\eta} = \frac{\int 2\eta r dr}{R^2} \quad (9)$$

喷注器收敛段截面平均表观粘度的轴向分布规律如图8所示。

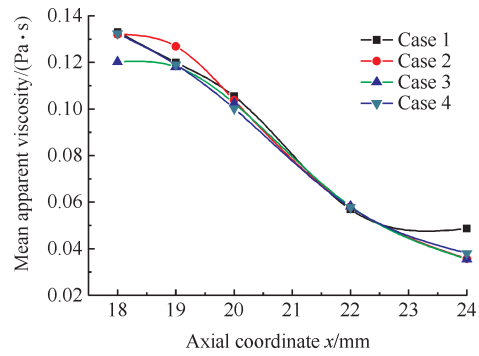


Fig. 8 Mean apparent viscosity profiles of different length-diameter ratios at the convergent stage

从图8可以看出,在收敛截面的作用下,收敛段出口截面处的平均表观粘度沿轴线逐渐减小,相对入口处降低70%左右;4组喷注器收敛截面平均表观粘度的变化趋势基本一致,无细圆管段的收敛出口截面平均表观粘度稍大于有细圆管段的3组喷注器,其原因是细圆管段轴线方向的速度进一步增大,平均剪切速率增大,故其平均表观粘度减小;此外,另3组喷注器(含细圆管段)收敛段出口截面的平均表观粘度几乎重合,表明与细圆管段长比无关,与文献^[13]结论一致。

喷注器出口截面的表观粘度分布是煤油凝胶有

效雾化的重要因素之一,该截面表观粘度的径向分布如图9所示。

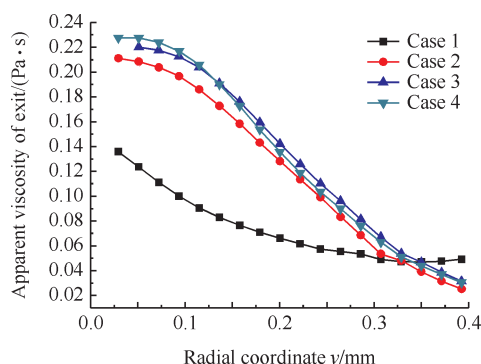


Fig. 9 Radial apparent viscosity profiles of the exits

从图9可以看出,4组喷注器出口截面表观粘度均沿径向变化逐渐减小,长径比为1,3和5的出口截面径向表观粘度分布基本一致,与细圆管长径比关系不大;长径比为0(无细圆管段)的出口截面表观粘度径向变化梯度逐渐减小,在近壁处表观粘度变化不大,且在大部分区域明显低于另3组喷注器,但在壁面处却相对大一些。

细圆管段虽可以降低壁面附近的表观粘度,但也将增加轴线附近的表观粘度,与无细圆管段相比,细圆管段增加了喷注器出口截面的平均表观粘性,这不利于煤油凝胶的有效雾化。

4.2 收敛角影响与分析

对于高粘稠煤油凝胶,利用收敛段的高速剪切作用,可使煤油凝胶达到牛顿流体的雾化效果^[15]。

喷注器速度场分布会对煤油凝胶雾化产生的重要影响,喷注器收敛段中心截面和出口截面轴向速度分布如图10所示。从图10(a)可以看出,在喷注器收敛段中心截面,收敛角越大凝胶的速度发展越饱

满,越接近牛顿流体的速度型;在喷注器近壁处,凝胶速度梯度随收敛角的增加而减小;收敛截面对凝胶表观粘度作用更多体现在上游段。

从图10(b)可以看出,在10°,30°和50°收敛角条件下,喷注器出口截面轴向速度发展十分相似,即在研究收敛角范围内,出口截面轴向速度变化不大;轴向速度随流动方向逐渐增大,但角度变化会影响轴向速度的发展趋势。

喷注器收敛段截面平均表观粘度和轴向表观粘度的分布如图11所示,其中 x, L 分别为截面到收敛段入口距离和收敛段长度。

从图11可以看出,收敛段截面平均表观粘度和轴向表观粘度沿流动方向逐渐减小;轴向表观粘度梯度变化随收敛角度增大而减小,而截面平均表观粘度梯度变化不大,主要是受截面径向表观粘度差异所致;收敛段入口粘度(起点值)受收敛角度影响较大,即随角度增大而减小,故“柱塞现象”将随角度增加而更早被截断。

以喷注器出入口平均表观粘度降幅为参考值,收敛角10°时,降幅为49.3%,30°时为36.1%,50°为27.9%,表明随收敛角度增大平均表观粘度降幅逐渐减少,其增强了对流体阻碍作用,相当于收敛起点向喷注器入口移动,收敛角度减小。出口平均表观粘度随收敛角度变化如图12所示,从图中可以看出,50°时表观粘性仅为10°时的50%,收敛角度越大越利于煤油凝胶的“稀化”,即易于有效雾化。

喷注器压降主要用于克服煤油凝胶的沿程阻力和增加其动能,为进一步说明压力损失(即沿程阻力)随收敛角度的变化,计算喷注器压力损失随收敛角的变化,如图13所示。

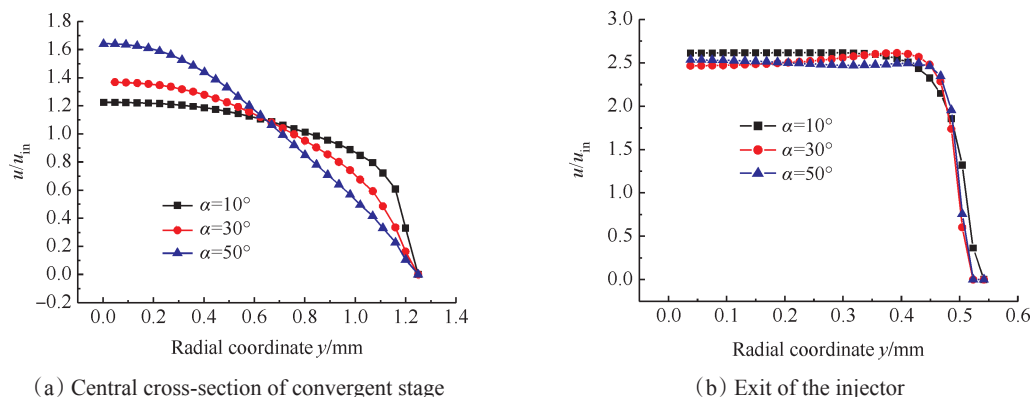
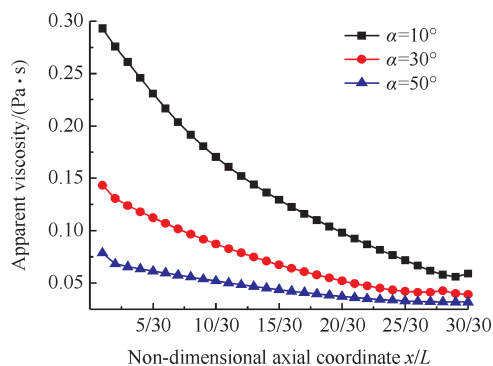


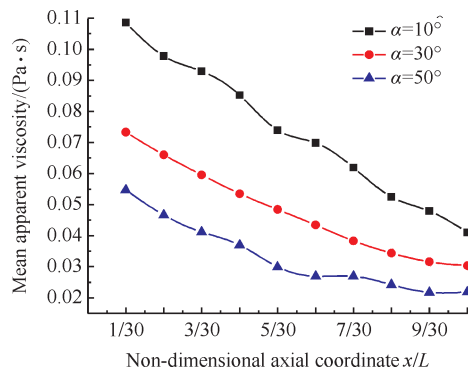
Fig. 10 Axial velocity of the central cross-section of the convergent stage and exit of the injector

从图13中可以看出,随着收敛角度的增大压力损失逐渐增大,若减小喷注器出口表观粘度,需适当增加收敛角度,但要承担压力损失为代价,即相同压

降流量的降低。因此,选择喷注器几何构型需综合考虑压力损失和粘度降幅因素。



(a) Central axial apparent



(b) Mean apparent viscosity

Fig. 11 Central axial apparent viscosity and mean apparent viscosity of different convergent semi-angles

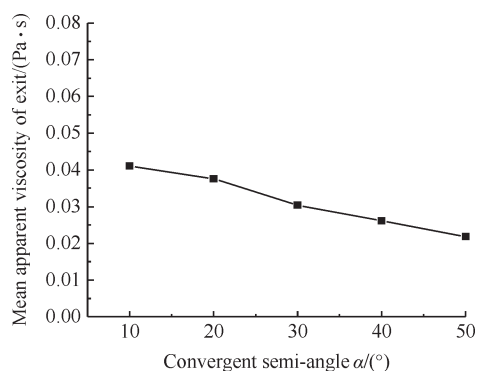


Fig. 12 Mean viscosity of the exit vs convergent semi-angle

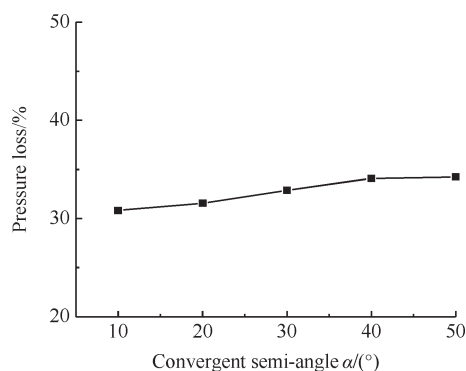


Fig. 13 Pressure loss of the injector vs convergent semi-angle

5 结 论

通过本文的数值研究,得到如下结论:

(1)本文所构造的数值模型和处理方法是适用的,其数值解与理论解析解吻合度较高,最大误差仅为10%。

(2)锥形喷注器可有效加剧煤油凝胶的剪切稀化作用,可使表观粘性降低近70%,在收敛段上游存在“柱塞”现象;同时,细圆管段会增加出口截面的平均表观粘度,但对喷注器的内部流动无显著影响。

(3)收敛角会显著影响喷注器内的速度分布,对出口截面速度分布影响不大;同时,随着收敛角度的增大,收敛段表观粘性相对降幅降低,10°降幅为49.3%,50°仅为27.9%。出口截面平均表观粘度随着

收敛角度增大逐渐降低,50°时出口平均表观粘性仅为10°时的50%,但同时也增加了流动中的压力损失。

参考文献:

- [1] 闫大庆,周宏民,单建胜. 凝胶膏状推进剂研究发展状况[J]. 火箭推进, 2003, 29(1):38-49.
- [2] 陈伟,张蒙正. 凝胶推进剂的现状与期待[C]. 大连:中国化学会第五届全国化学推进剂学术会议, 2011.
- [3] Klaus Madlener, Helmut K Ciezki. Some Aspects of Rheo-Logical and Flow Characteristics of Gel Fuel with Regard to Propulsion Application[R]. AIAA 2009-5240.
- [4] Klaus Madlener, Helmut K Ciezki. Characterization of Various Properties of Gel Fuel with Regard to Propulsion

- [R]. *AIAA* 2008-4870.
- [5] Shai Rahimi , Benveniste Natan. Numerical Solution of the Flow of Power-Law Gel Propellants in Converging Injectors [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2000, 25(4): 203-212.
- [6] Jayaprakash, Chakravarthy. Impingement Atomization of Gel Fuels[R]. *AIAA* 2003-316.
- [7] 张蒙正, 左 博. 幂率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 Meng-zheng, ZUO Bo. Flow Behavior of Power Law Model Gelled Propellant in the Pipe[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(2): 246-250.)
- [8] 张涵信, 陈坚强, 高树椿. H_2/O_2 燃烧的超声速非平衡流动的数值模拟[J]. 宇航学报, 1994, 15(2):14-23.
- [9] Ziping Dai. Nonlinear Free-Surface Flow Modeling Using Volume of Fluid Method[D]. *Houston: University of Houston*, 2003.
- [10] 沈仲棠, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 47-51.
- [11] 张德良. 计算流体力学教程[M]. 北京: 北京高等教育出版社, 2010: 367-374.
- [12] 任 冰, 李雪艳, 王国玉, 等. 基于贴体网格的VOF方法数模流场研究[J]. 计算力学学报. 2011, 28(6): 872-878.
- [13] Changjin Yoon, Heister. Numerical Simulations of Gel Propellant Flow Through Orifices [R]. *AIAA* 2009-5045.
- [14] 刘国庆, 蔡体敏, 等. 凝胶推进剂锥形管道流动特性数值分析[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(2):154-158.
- [15] Changjin Yoon. Injector Flow Characteristics for Gel Propellants[R]. *AIAA* 2011-5707.

(编辑: 朱立影)