

文章编号: 1006-9941(2009)02-0137-06

## 凝胶推进剂管道流动特性影响因素数值分析

强洪夫, 夏学礼

(西安市第二炮兵工程学院 201 室, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 为讨论管道收敛角、体积流率、胶凝剂类型与含量等三因素对凝胶推进剂管道流动特性的影响, 用SIMPLEC算法、二阶迎风格式离散柱坐标系下 N-S 方程, 对凝胶推进剂在圆管中的流动进行了二维数值模拟, 计算结果表明: (1) 体积流率增大, 粘度减小, 含量增大, 粘度增大, 它们的改变引起粘度变化不显著; (2) 收敛角增大, 出、入口截面平均表观粘度降低幅度不断增大, 出口截面平均表观粘度不断减小至近牛顿粘度水平  $\eta_{\infty}$ , 当角度改变到一定值后, 其引起粘度的变化将不再明显。结果说明: 流经管道的体积流率和胶凝剂类型与含量的改变是引起管道流动粘度变化的非显著因素, 而管道收敛角是引起粘度变化的重要因素, 且在粘度变化与压降需求之间存在最佳结合点。

**关键词:** 流体力学; 凝胶推进剂; 流动特性; 影响因素; 数值分析

中图分类号: TJ55; O35

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.003

### 1 引言

凝胶推进剂始于 20 世纪 40 年代的“添加固相颗粒的液体燃料”概念研究, 其大规模研究始于 20 世纪 50 年代美国航空咨询委员会<sup>[1]</sup>对烃类燃料含硼和含镁浆料的研究。由于凝胶推进剂既可以像固体推进剂一样不易泄漏、易贮存和运输, 实现预包装, 又可以像液体推进剂一样, 不用考虑预包装中裂纹的影响, 可以对流率进行控制, 实现多次启动, 并防止意外点火的发生, 使得各航天大国针对不同的目的, 进行了大量的研究, 取得了许多研究成果<sup>[2-3]</sup>。

在推进剂供应系统中, 凝胶推进剂通常需要流过直圆管、弯管、分支管、三通以及喷注器等管路组件, 考察推进剂在这类管路中的流动状态, 是推进剂输送系统研究、保障火箭飞行的重要内容。而凝胶推进剂中由于胶凝剂和金属添加剂的存在, 其流变属性发生了显著变化<sup>[4]</sup>, 属非牛顿流体范畴, 要描述非牛顿流体, 往往需要两个或更多的流动参数, 从而增加了非牛顿流体研究的难度。

Rahimi 和 Natan<sup>[5]</sup>初步计算了凝胶推进剂在收缩喷注器中的速度与粘度分布, 认为推进剂平均表观粘度在喷注器出口明显减小; Skelland 等人<sup>[6]</sup>对等截面圆管中幂率流体的稳定流动进行了解析分析; Karagiannis

等人<sup>[7]</sup>运用有限元方法对幂率流体管流流动压降与流率的关系进行了研究; 邱霖等人<sup>[8]</sup>对三维锥形血管内的血液脉动流动进行了数值模拟; Li Tieqiang 等人<sup>[9]</sup>使用核磁共振成像技术研究了含水高聚物溶液在直圆管中的流动特性, 测量了在各种体积流量下管中的轴向速度剖面; Escudier 等人<sup>[10]</sup>观测了具有屈服应力和剪薄能力流体的过渡管流中不对称的管流行为; 杨伟东和张蒙正<sup>[11]</sup>对凝胶推进剂模拟液在直圆管中的流动特性进行了理论分析和试验研究, 考察了管长、管径对流阻的影响, 讨论了流阻系数与雷诺数的关系。

本文针对凝胶推进剂, 对其在渐缩型圆管中流动特性进行了稳定、不可压、等温、层流计算, 讨论了管道收敛角与压降的关系, 对管道收敛角、体积流率、胶凝剂类型与含量等三个因素对粘度的影响进行了数值分析。

### 2 数学模型

#### 2.1 模型简化

考虑圆管的轴对称性, 对其进行二维简化, 取经过中轴线截面的一半作为计算域, 其示意图见图 1。流体以一定的体积流率从左边流进, 右边流出, 斜边为管壁,  $z$  轴为对称轴。

#### 2.2 控制方程

在柱坐标系下, 对于二维、轴对称、稳态、不可压等温层流流动 ( $\partial/\partial t = 0, \partial/\partial \theta = 0, v_{\theta} = 0, \rho = \text{const}$ ), 其控制方程如下<sup>[12]</sup>。

连续性方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \hat{v}_r) + \frac{\partial \hat{v}_z}{\partial z} = 0$$

收稿日期: 2008-06-18; 修回日期: 2008-09-17

作者简介: 强洪夫 (1965 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事材料与结构的失效行为与高性能数值模拟研究。e-mail: qiang@263.com

通讯联系人: 夏学礼 (1975 -), 男, 讲师, 在读博士研究生, 主要从事凝胶推进剂性能研究。e-mail: aronkin@sina.com

$r$  方向动量方程:

$$\hat{\rho}(\hat{v}_r \frac{\partial \hat{v}_r}{\partial r} + \hat{v}_z \frac{\partial \hat{v}_r}{\partial z}) = \frac{1}{r} \frac{\partial(r\hat{\tau}_{rr})}{\partial r} + \frac{\partial \hat{\tau}_{rz}}{\partial z} - \frac{\hat{\tau}_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \hat{p}}{\partial r}$$

同理, $z$  方向动量方程:

$$\hat{\rho}(\hat{v}_r \frac{\partial \hat{v}_z}{\partial r} + \hat{v}_z \frac{\partial \hat{v}_z}{\partial z}) = \frac{1}{r} \frac{\partial(r\hat{\tau}_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial \hat{\tau}_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \hat{p}}{\partial z}$$

定义无量纲化量为:

$$v_i = \frac{\hat{v}_i}{\hat{v}_0}, \quad p = \frac{\hat{p}L}{\hat{\eta}_0 \hat{v}_0}, \quad \tau_{ij} = \frac{\hat{\tau}_{ij}L}{\hat{\eta}_0 \hat{v}_0}, \quad R_e = \frac{\hat{\rho} \hat{v}_0 L}{\hat{\eta}_0}$$

则有:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$R_e(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}) = -[\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r}] - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2)$$

$$R_e(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}) = -[\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}] - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

式中, $r, z, \theta$  为坐标方向, $\rho, v_i, p, \tau_{ij}$  分别为流体的密度、速度分量、压力和切应力分量, $v_0, L, \eta_0, R_e$  分别为入口平均速度、管长、入口平均粘度和雷诺数,有 $\hat{\phantom{x}}$ 符号和无 $\hat{\phantom{x}}$ 符号分别对应为无量纲化前后相应物理量。

### 2.3 边界条件

(1) 入口边界

在入口处,沿轴向施加一速度,沿径向速度分量为零:

$$v_z|_{inlet} = V_0[1 - (\frac{r}{R_0})^{\frac{n+1}{n}}]; \quad v_r|_{inlet} = 0$$

式中,角标 0 表征为入口, $n$  为凝胶推进剂 P-L 模型的流动指数, $R_0$  为入口半径, $V_0$  为入口处的最大速度<sup>[13]</sup>,由下式描述:  $V_0 = \frac{\dot{Q}}{\pi R_0^2} \frac{1+3n}{1+n}$

式中, $\dot{Q}$  为流经管道的体积流率。

(2) 出口边界

出口为充分发展的不可压缩流:

$$\frac{\dot{Q}|_{outlet}}{\dot{Q}|_{inlet}} = 1$$

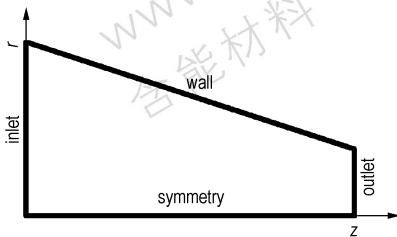


图 1 渐缩型圆管二维示意图

Fig.1 Physical domain

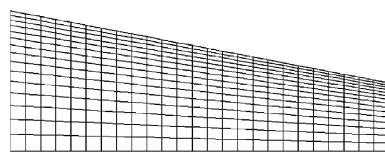


图 2 计算域网格剖分示意图

Fig.2 Computational domain mesh

(3) 墙边界

设墙面为无滑移、绝热固壁边界,有: $v_z|_{wall} = 0$ ,

$$v_r|_{wall} = 0, T|_{wall} = const$$

(4) 轴边界

在中心轴处,具有零法向速度以及任意方向上的速度梯度为零:

$$v_r|_{symmetry} = 0, \quad \frac{\partial v_r}{\partial z}|_{symmetry} = 0, \quad \frac{\partial v_z}{\partial r}|_{symmetry} = 0$$

### 2.4 计算方法和网格

数值计算采用 SIMPLEC 算法,计算网格如图 2 所示,在  $z$  轴方向上的数值传递尽量垂直,平行于  $z$  轴的网格剖分线尽量与流线相似,在墙边界处进行了局部加密,方程离散采用二阶迎风格式。

考虑到计算域的大小不同,对文中各个算例,在网格剖分时尽量使其剖分密度相近,计算节点数从几千到三万多不等。

## 3 计算结果及讨论

### 3.1 管道收敛角影响因素

为了考察管道收敛角的影响,分三类情况讨论,每类情况保持管长和体积流率不变,推进剂属性(含铝粉的煤油凝胶(RP-1/Al)( $K=13.5, n=0.47$ )<sup>[5]</sup>)也不发生变化:(1) 维持入口直径不变,收敛角变化因而压降和出口直径发生变化;(2) 维持压降不变,收敛角变化因而出口直径发生变化;(3) 维持出口直径不变,收敛角变化引起压降和入口直径发生变化。

#### 3.1.1 管长、体积流率和入口直径不变

对在  $1^\circ$  和  $5^\circ$  两种收敛角圆管中的流动情况进行数值计算,圆管入口直径为  $D_0 = 6.35 \text{ mm}$ ,管长为  $L = 10 \text{ mm}$ ,体积流率  $\dot{Q} = 50 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,计算结果如图 3 和图 4。图 3、图 4 分别为  $1^\circ$  和  $5^\circ$  收敛角时在入口截面( $z=0$ )、管长的  $1/2$  截面( $z=1/2$ )以及出口截面( $z=1$ )上的轴向速度分布曲线。

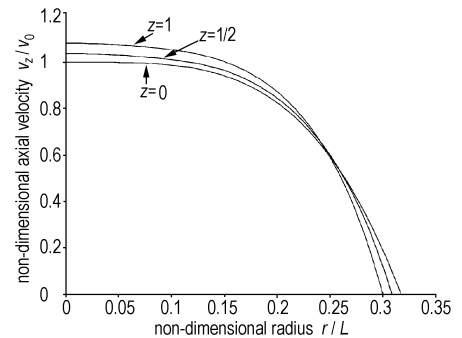


图 3  $1^\circ$  收敛角渐缩型圆管截面轴向速度分布

Fig.3 Axial velocity profile in a  $1^\circ$  cone semi-angle tapered round pipe

从图 3 和图 4 中可以看出, 轴向速度沿流动方向增大, 且随收敛角的增大而增大, 并且, 速度沿流动方向的增大必然导致表观粘度的减小。另外, 对比图 3 和图 4 还可以看出, 沿流动方向, 近壁处的速度梯度逐步增大, 且随着收敛角的增大, 近壁区达到中心速度的厚度越薄, 这说明凝胶推进剂管道流动在近壁处其非牛顿粘度很快剪薄为近似牛顿粘度, 中心轴处流体成柱状沿流动方向向前推进, 且截面速度剖面线较牛顿流体钝, 且收敛角越大, 近壁区越薄, 达到近壁区的入口段越短, 这与非牛顿流体直圆管流近似。

### 3.1.2 管长、体积流率和压降不变

为考察粘度变化, 对在三种尺寸渐缩型圆管中的流动过程进行了数值计算, 流经渐缩型圆管的体积流率  $\dot{Q} = 200 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  维持不变, 管长均为 8 cm, 三种渐缩型圆管的具体尺寸见表 1, 计算结果如图 5、图 6、图 7。

表 1 渐缩型圆管的几何尺寸  
Table 1 Geometry size of tapered round pipe

| No. | cone semi-angle<br>$\alpha / (^{\circ})$ | inlet radius<br>$R_0 / \text{mm}$ | outlet radius<br>$R_L / \text{mm}$ |
|-----|--|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1   | 2°                                       | 0.68                              | 0.4                                |
| 2   | 5°                                       | 1.12                              | 0.42                               |
| 3   | 8°                                       | 1.549                             | 0.425                              |

从表 1 可以看出, 每一种渐缩型圆管的入口和出口几何尺寸均不相同, 这是为了在保持三种状态的体积流率不变的条件下, 维持渐缩型圆管入口与出口截面上的压力差不变, 这也就造成入口截面的最大轴向速度及速度分布不同, 势必得出三种状态下入口截面的平均表观粘度不同。

图 5 表征了三种不同尺寸下沿流动方向渐缩型圆管不同截面平均表观粘度的分布规律, 图 6 表征了沿流动方向渐缩型圆管轴线上表观粘度在三种不同尺寸圆管的分布。从图 5 和图 6 中容易得出, 沿流动方向粘度逐渐减小, 在出口截面上粘度得到显著减小。

图 7 给出了角度与出、入口截面平均表观粘度变化幅度的关系, 在 2° 收敛角时, 平均表观粘度减小约 48.44%, 到 5° 时, 减小约 81.86%, 到 8° 时, 减小约 89.77%, 随着收敛角的增大, 粘度减小越显著。收敛角的改变引起平均表观粘度的变化对管流设计具有参考的意义。

### 3.1.3 管长、体积流率和出口直径不变

为了表征粘度变化与渐缩型圆管收敛角的变化之间的关系, 进行了多种收敛角条件下的计算, 凝胶推进剂流经渐缩型圆管长  $L = 6 \text{ mm}$ , 出口半径  $R_L = 1 \text{ mm}$ ,

流经的体积流率  $\dot{Q} = 50 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 计算的收敛角分别为: 0.5°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45° 等 10 种情况, 计算结果如图 8、图 9、图 10、图 11。

图 8 给出了在管长与出口半径一定, 流经圆管的体积流率也不变的条件下, 渐缩型圆管不同截面的平均表观粘度与收敛角的分布规律, 从图 8 中可看出, 粘度沿流动方向逐步减小, 且角度越大, 减小的幅度也愈大。由于入口半径的不同, 入口的轴向速度和粘度将不同, 为更好表征粘度的变化规律, 图 9 给出了角度与渐缩型圆管出、入口截面上的平均表观粘度减小幅度百分数之间的关系, 从图 9 更易看出, 随着角度的增大, 出、入口平均表观粘度减小的幅度也越大, 但当角度变化到 20° 以后, 粘度的减小幅度将不再明显。

图 10 给出了渐缩型圆管出口截面上平均表观粘度与角度的关系, 从图 10 中可得出, 角度越大, 出口粘度越低, 这就意味着在出口截面上粘度剪切到更接近于牛顿粘度, 而且, 随着角度的增大, 出口截面粘度变化也越小, 趋近于某一常值  $\eta_{\infty}$ 。

图 11 给出了渐缩型圆管出、入口截面压力差与角度的函数关系, 从前面的分析可知, 随着角度的增大, 粘度的减小幅度也越大, 但是从图 11 中可以看出, 角度越大, 压力差也越大, 据此, 粘度的降低是以增大压降需求为前提的, 因此, 在进行管道设计时应予以综合考虑, 合理选择收敛角。

### 3.2 体积流率影响因素

为了考察体积流率的影响, 对含铝粉的煤油凝胶 (RP-1/Al) ( $K = 13.5, n = 0.47$ )<sup>[5]</sup> 进行了多种体积流率下的计算, 凝胶推进剂流经的渐缩型圆管长  $L = 6 \text{ mm}$ , 出口半径  $R_L = 1 \text{ mm}$ , 收敛角为 3°, 流经的体积流率  $\dot{Q}$  分别为 50, 100, 200, 400  $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  等 4 种情况, 计算结果如图 12 和图 13。

图 12 给出了在管长与出口半径一定, 收敛角一定, 不同截面平均表观粘度与体积流率的关系, 从图 12 可看出, 粘度沿流动方向逐步减小, 且随着体积流率的增加, 粘度越小。

由于体积流率的不同, 入口的轴向速度和粘度将不同, 为更好表征粘度的变化规律, 图 13 给出了体积流率与渐缩型圆管出、入口截面上的平均表观粘度减小幅度百分数之间的关系, 从图 13 可看出, 随着体积流率的增大, 出入口平均表观粘度减小的幅度变化不大 (减小了大约 23%), 体积流率对粘度的影响不显著。

### 3.3 胶凝剂类型与含量影响因素

已有的研究表明<sup>[4-5]</sup>: 对于稳定的凝胶, 如果用

幂率本构模型来描述凝胶的流动行为,类型与含量的改变影响着  $K, n$  两个参数。

为了考察胶凝剂类型与含量的影响,下面以含量的影响为例,让凝胶推进剂流经的渐缩型圆管长  $L = 6 \text{ mm}$ , 出口半径  $R_L = 1 \text{ mm}$ , 收敛角为  $5^\circ$ , 流经的体积流率  $\dot{Q}$  为  $50 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 分别对胶凝剂含量  $0.3\%$ 、 $0.5\%$ 、 $0.75\%$  [5] 等三种情况下的水凝胶管道流动情况

进行了计算,表 2 给出了三种凝胶的相关参数,图 14 和图 15 为计算结果。

表 2 不同胶凝剂含量水凝胶 P-L 模型数据

Table 2 Power-Law data of various water gels

| gels type                | $k$  | $n$  |
|--------------------------|------|------|
| water gel, 0.3% gallant  | 14.0 | 0.38 |
| water gel, 0.5% gallant  | 22.9 | 0.36 |
| water gel, 0.75% gallant | 30.6 | 0.36 |

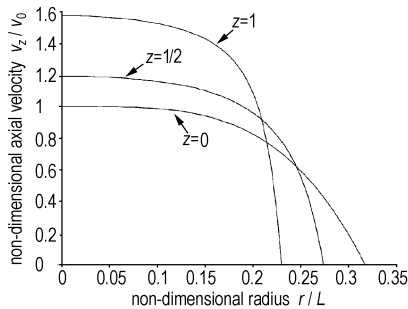


图 4 5°收敛角渐缩型圆管截面轴向速度分布

Fig. 4 Axial velocity profile in a 5° cone semi-angle tapered round pipe

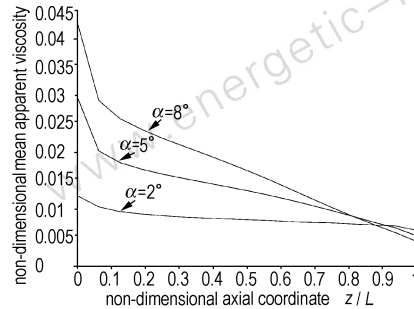


图 5 不同收敛角渐缩型圆管截面平均表观粘度分布

Fig. 5 Mean apparent viscosity profiles of various cone semi-angle tapered round pipe with the same flow rate and pressure drop

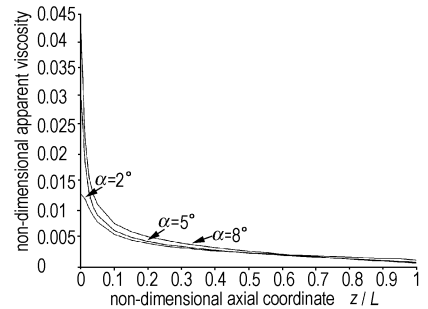


图 6 不同收敛角渐缩型圆管中心轴处表观粘度分布

Fig. 6 Axial apparent viscosity profiles of various cone semi-angle tapered round pipe with the same flow rate and pressure drop

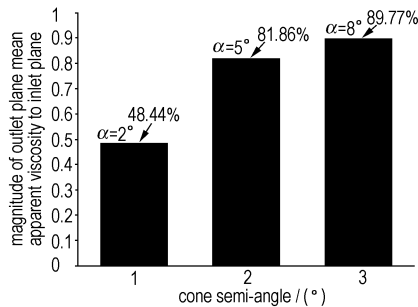


图 7 出入口截面平均表观粘度变化幅度与角度的关系

Fig. 7 Magnitude of the outlet plane viscosity to the inlet plane vs cone semi-angle

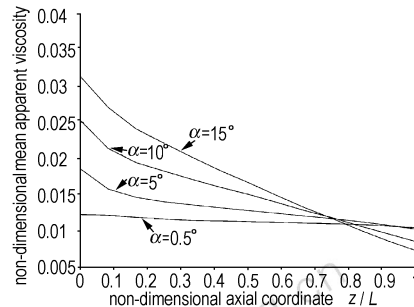


图 8 不同收敛角渐缩型圆管截面平均表观粘度分布

Fig. 8 Mean apparent viscosity profiles of various cone semi-angle tapered round pipe with the same flow rate and geometry size

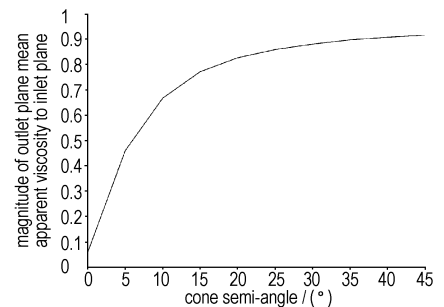


图 9 出入口截面平均表观粘度变化幅度与角度的函数

Fig. 9 Magnitude of the outlet plane viscosity to the inlet plane vs cone semi-angle

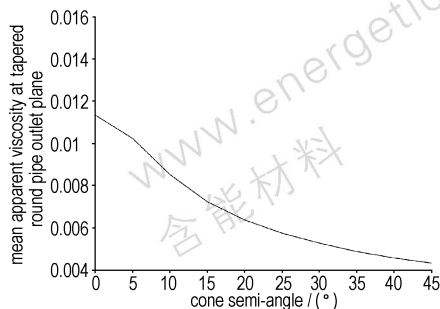


图 10 渐缩型圆管出口截面平均表观粘度与角度的函数

Fig. 10 Mean apparent viscosity at the tapered round pipe outlet plane vs cone semi-angle

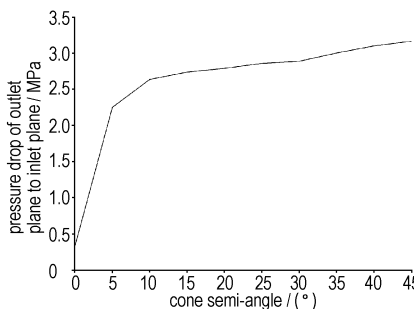


图 11 渐缩型圆管出入口截面压力差与角度的函数

Fig. 11 Pressure drop of the outlet plane to the inlet plane vs cone semi-angle

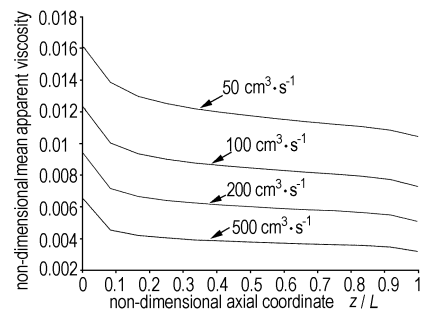


图 12 不同体积流率渐缩型圆管截面平均表观粘度分布

Fig. 12 Mean apparent viscosity profiles of various gel flow rates with the same geometry size

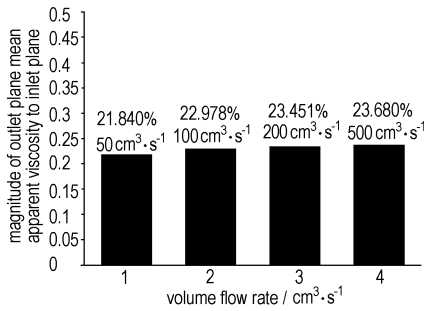


图 13 出入口截面平均表观粘度变化幅度与体积流率的函数  
Fig. 13 Magnitude of the outlet plane viscosity to the inlet plane vs gel flow rates

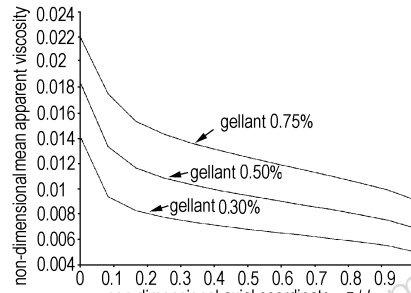


图 14 不同胶凝剂含量渐缩型圆管截面平均表观粘度分布  
Fig. 14 Mean apparent viscosity profiles of various gellant contents in the fluid

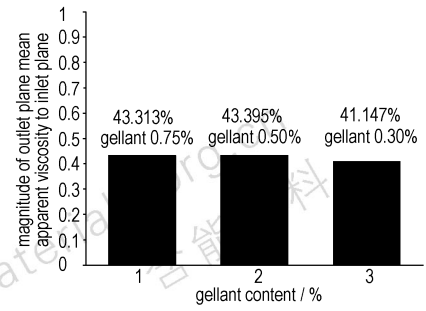


图 15 出入口截面平均表观粘度变化幅度与胶凝剂含量的函数  
Fig. 15 Magnitude of the outlet plane viscosity to the inlet plane vs gellant contents

图 14 给出了在管长与出口半径一定 ( $L = 6 \text{ mm}$ ,  $R_L = 1 \text{ mm}$ ), 收敛角一定 ( $5^\circ$ ), 渐缩型圆管不同截面的平均表观粘度沿轴线与胶凝剂含量的分布规律, 从图 14 可看出, 粘度沿流动方向逐步减小, 且随着胶凝剂含量的增加, 粘度增大。由于含量的不同, 入口处粘度将不同, 为更好表征粘度的变化规律, 图 15 给出了含量与渐缩型圆管出、入口截面上的平均表观粘度减小幅度百分数之间的关系。从图 15 可看出, 随着含量的增大, 出、入口平均表观粘度减小的幅度变化不大 (减小了大约 43%), 含量对粘度的影响不显著。

#### 4 结 论

(1) 增大圆管收敛角, 圆管出、入口截面平均表观粘度的变化幅度将增大, 出口截面处的平均表观粘度将逐步减小, 但是这种变化是有限度的, 增大角度达到一定值之后, 角度改变引起粘度的变化将不再明显, 改变圆管收敛角是影响粘度变化的一个重要因素。

(2) 角度的改变引起粘度的变化是以增加压降需求为前提的, 可以找到粘度变化与压降需求的最佳结合点, 这对管道设计有重要意义。

(3) 体积流率越大, 粘度越小; 含量越大, 粘度越大。但改变体积流率、胶凝剂类型与含量对引起粘度变化的影响不显著。

(4) 角度、体积流率、胶凝剂类型与含量是凝胶推进剂管道流动特性的影响因素, 但相对收敛角改变而言, 改变体积流率、胶凝剂类型与含量是影响流动特性的非显著因素, 三者变化对粘度的影响可用式  $\eta \cong (-K_\alpha \alpha^{n_\alpha}) (-K_\dot{\gamma} \dot{\gamma}^{n_\dot{\gamma}}) (K_{G,C} K^{n_k} n^{n_n}) = K \alpha^{n_\alpha} \dot{\gamma}^{n_\dot{\gamma}} K^{n_k} n^{n_n}$  ( $K > 0, 0 < n_\alpha < 1, n_\dot{\gamma}, n_k, n_n \approx 0$ ) 来表征。

#### 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): 38-46.  
YAN Da-qing, ZHOU Hong-min, SHAN Jian-sheng. Development status of gelled/paste propellant[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2003, 29(1): 38-46.
- [2] 代玉东, 魏敬. 美国凝胶推进剂研究[J]. 火箭推进, 2003, 29(6): 40-44.  
DAI Yu-dong, WEI Jing. Development of gelled propellant in the US[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2003, 29(6): 40-44.
- [3] 杨伟东, 张蒙正. 凝胶推进剂流变及雾化特性研究与进展[J]. 火箭推进, 2005, 31(5): 37-42.  
YANG Wei-dong, ZHANG Meng-zheng. Research and development of rheological and atomization characteristics of gelled propellants[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2005, 31(5): 37-42.
- [4] Benveniste Natan, Shai Rahimi. The status of gel propellants in year 2000[C] // Kenneth K Kuo and Luigi deLuca, Editors. *Combustion of Energetic Materials*. Begel House, Boca Raton, 2001: 172-194.
- [5] Rahimi S, Natan B. Flow of gel fuels in tapered injectors[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(3): 458-471.
- [6] A H P Skelland. *Non-newtonian Flow and Heat Transfer*[M]. John Wiley & Sons, New York, 1967.
- [7] Karagiannis A, Mavridis H. A finite element convergence study for shear-thinning flow problems[J]. *Int J for Num Methods in Fluids*, 1988, 8: 123-138.
- [8] 邱霖, 范毅方, 董兵超, 等. 锥形血管内血液脉动流的数值模拟[J]. 生物医学工程杂志, 2004, 21(4): 558-561.  
QIU Lin, FAN Yi-fang, DONG Bing-chao, et al. The numerical simulation of pulsatile flow in tapered blood vessel[J]. *J Biomed Eng*, 2004, 21(4): 558-561.
- [9] L Tieqiang. Pipe flow of aqueous polyacrylamide solutions studied by mean of nuclear magnetic resonance imaging[J]. *Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics*, 1995, 57: 155-175.
- [10] Escudier M P, Poole R J, Presti F, et al. Observations of asymmetrical flow behaviour in transitional pipe flow of yield-stress and other shear-thinning liquids[J]. *Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics*,

- 2005, 127: 143 - 155.
- [11] 杨伟东, 张蒙正. 凝胶推进剂模拟液直圆管流动特性初步研究 [J]. 火箭推进, 2006, 32(3): 12 - 17, 23.
- YANG Wei-dong, ZHANG Meng-zheng. Investigation of flow characteristics in straight round pipe of gelled propellant simulants [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2006, 32(3): 12 - 17, 23.
- [12] 林建中, 阮晓东, 陈邦国, 等. 流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 108 - 111.
- LIN Jian-zhong, RUAN Xiao-dong, CHEN Bang-guo, et al. *Fluid Mechanics* [M]. First Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 108 - 111.
- [13] 沈崇棠, 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: 84 - 86.
- SHEN Chong-tang, LIU He-nian. *Non-newtonian Fluid Mechanics and Its Application* [M]. First Edition. Beijing: High Education Publication, 1989: 84 - 86.

## Numerical Analysis of Factors Affecting Flow Property of Gel Propellants in Round Pipes

QIANG Hong-fu, XIA Xue-li

(No. 201 Staffroom, Faculty of Mechanical & Propulsion Engineering, Xi'an Hi-Tech Institute, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** To evaluate the effect of the tapered round pipe geometry, volumetric flow rate and gellant type or content on the pressure drop, the velocity and viscosity fields, the governing equations of the steady, incompressible, isothermal, laminar flow of a Power-Law, shear-thinning gel propellants in pipe were formulated, discretized and solved. A SIMPLEX numerical algorithm was applied for the solution of the flow field. Results show that the mean apparent viscosity decreases with increasing of the volumetric flow rate and increasing of the gellant content results in an increase in the viscosity. The results also show that the cone semi-angle can produce additional decrease in the mean apparent viscosity of the fluid. The mean apparent viscosity decreases significantly with increasing of the convergence angle of the pipe, and its value is limited by the Newtonian viscosity  $\eta_{\infty}$ . The effect of the cone semi-angle on the mean apparent viscosity is more significant than that of the volumetric flow rate and the gellant type or content on the mean apparent viscosity. Additional decreasing of the viscosity results in an increase in the pressure drop with the increasing of cone semi-angle. It is important to pipe design that the viscosity decreasing and the pressure drop increasing are taken into account together.

**Key words:** fluid mechanics; gel propellant; flow property; effecting factor; numerical analysis



### 俄罗斯专家来绵讲学

应中国工程物理研究院化工材料研究所邀请, 俄罗斯科学院有机化学研究所的 Tatiana S. Pivina 和 Nina N. Makhova 两位教授于 2009 年 3 月 18 日至 19 日来绵阳讲学。本次讲座共有交流报告 6 篇, 主题涉及含能材料理论模拟计算和合成两个方面, 来自化工材料研究所及西安近代化学研究所等单位的 60 余名科技人员参加了讲座交流。

从交流报告来看, 利用计算机模拟技术来研究含能材料的结构与性能以及合成含氮高能化合物已成为俄罗斯极有前景的发展方向。Tatiana S. Pivina 教授在含能材料理论模拟方面取得了相当大的进展, 实现了利用理论计算方法从大量有机化合物结构中筛选、确定具有优异物理化学性质(如生成焓、分子晶体密度、热安定性等)的含能化合物结构, 并能推测其结构与性能之间的关系, 进而研究含能化合物的一些反应机理。Nina N. Makhova 教授主要介绍了基于含氮高能化合物的合成, 其中着重于呋喃 furazan 和 furoxan 衍生物的合成与能量特性以及 diaziridines 的合成、反应、热化学和应用的特性。这次讲学达到了交流、沟通和共享的目的。

(化工材料研究所 陈瑾 供稿)