

# 凝胶推进剂模拟液直圆管流动特性初步研究

杨伟东, 张蒙正

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 对某型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, 得到模拟液在直圆管中的速度分布, 定义了表观粘性和平均粘性, 进行了流阻分析并定义了非牛顿流体雷诺数。通过试验考察了管长、管径对流阻的影响, 得到流阻系数与雷诺数和无量纲速度比与雷诺数的关系, 并对影响因素进行了分析。

**关键词:** 凝胶模拟液; 直圆管; 流动特性

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2006)03-0012-07

## Investigation of flow characteristics in straight round pipe of gelled propellant simulants

Yang Weidong, Zhang Mengzheng

(Shaanxi Power Machine Design and Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** This paper presents theoretical analysis and experimental investigation of the flow characteristics of gelled propellant simulants in straight round pipe. Velocity distribution, absolute viscosity and mean apparent viscosity were determined. Flow resistance was analyzed and non-newtonian Reynolds number was defined. Research on effects of pipe length and diameter on flow resistance were studied, and the relationships of drag coefficient and non-dimensional velocity with Reynolds number were obtained. Some influencing factors were also analyzed.

**Key words:** gel simulants; straight round pipe; flow characteristics

### 1 引言

在推进剂的供应过程中, 凝胶推进剂是通过管路最终被喷射进入燃烧室的, 而凝胶推进剂是

一种非牛顿流体, 在理论方面和试验方面尚不成熟。描述非牛顿流体, 流动参数需要两个或者更多 (如描述幂律流体的流动需要稠度系数  $k$  和流动指数  $n$ ), 这就增加了非牛顿流体研究的难度。凝胶推进剂的流变学特性如剪切变稀等会影响其

收稿日期: 2005-07-01; 修回日期: 2005-12-29。

作者简介: 杨伟东 (1979—), 男, 硕士研究生, 研究领域为推进剂雾化研究。



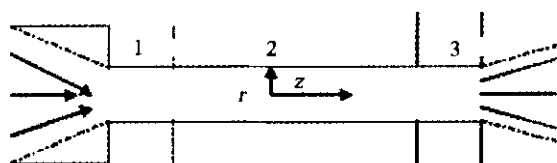
在管路中的流动特性。管路是供应系统的一个重要组件,认识凝胶推进剂在管路中的流动特性,对于凝胶推进系统中管路的选择和设计都具有非常重要的意义。

有关凝胶推进剂管流特性的研究文献,公开发表的还不是很多。但是具有剪切变稀的非牛顿流体的管流特性,国内外都做了很多的有重要意义的研究工作。Kraynik A M<sup>[1]</sup>等人研究了凝胶推进剂的流动,主要研究了幂律流体在收敛的平面槽中的层流流动理论。Li Tieqiang<sup>[2]</sup>等人使用核磁共振成像研究了含水的高聚物溶液在管径为26.2mm的直圆管中的流动特性,在各种体积流量下测量了稀释的高聚物溶液在直圆管中的轴向平均速度剖面,观察了在管路中层流流动向不稳定紊流的过渡。M P Escudier<sup>[3]</sup>等人观测了具有屈服应力和剪切变稀流体的过渡管流中不对称的管流行为。主要测量了宽域的剪切变稀流体和牛顿流体在充分发展的管流中的平均速度剖面,数据的测量采用的是激光多普勒测速仪。本文对某型凝胶推进剂模拟液在直圆管中的层流流动特性进行了理论分析和试验研究。

## 2 直圆管中流动的解析分析

### 2.1 管内流动理论

凝胶推进剂在直圆管中的流动是十分复杂的。本文将直圆管内的流动分为如图1所示三个区域。



1—入口段区域; 2—测粘流区域; 3—出口段区域

图1 直圆管内流动的三个区域

Fig.1 Three flow regions in straight round pipe

研究将限于测粘流动区域,对管内流动做如下假设:(1)流动为轴对称的不可压缩,层流和等温定常稳定流动,没有体力作用于流体;(2)凝胶推进剂模拟液采用幂定律模型(PL model);

(3)在流动过程中的能量损失忽略不计。采用柱坐标系 $(r, \theta, z)$ ,其中 $z$ 轴与管轴方向重合, $r$ 为管径方向,原点取在测粘区开始端的管轴上, $R$ 为管半径, $L$ 为管长。

假设流体在直圆管内的流动为一维、定常流动,则 $v_r=0, v_\theta=0, \partial/\partial t=0, \partial/\partial r=0, \partial/\partial \theta=0$ 对控制方程进行简化可得

连续方程为

$$v_z = v_z(r) \quad (1)$$

运动方程为

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \tau_{rz}) \quad (2)$$

流动为稳定流动,则 $\partial \tau_{zz}/\partial z=0$ , (2)式可写为

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \tau_{rz}) \quad (3)$$

可知(3)式右端是 $r$ 的函数,而左边是对 $z$ 的导数。

在测粘流区,压力梯度 $\frac{\partial p}{\partial z}$ 应当是常数,由(3)式有

$$\tau_{rz} = \frac{r}{2} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

为简单起见,将 $\tau_{rz}$ 表示为 $\tau$ ,  $v_z = v_z(r) = u$ 。管壁上

$$\tau_w = \tau_{rz}(R) = \frac{R}{2} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{R}{2} \frac{\Delta p}{l} \quad (5)$$

由(4)(5)式可得

$$\frac{\tau}{\tau_w} = \frac{r}{R} \quad (6)$$

体积流量可写为

$$Q = 2\pi \int_0^R u r dr \quad (7)$$

对(7)式进行分部积分

$$Q = -\int_0^R \pi r^2 \frac{\partial u}{\partial r} dr = -\int_0^R \pi r^2 \dot{\gamma} dr \quad (8)$$

式中,  $\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial r}$ , 将(6)式代入(8)式即得

$$Q = -\frac{\pi R^3}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau = -\int_0^R \pi r^2 \dot{\gamma} dr \quad (9)$$

(9)式对 $\tau_w$ 求导数得

$$\dot{\gamma}(\tau_w) = -\frac{1}{\pi R^3 \tau_w^2} \frac{\partial}{\partial \tau_w}(\tau_w^3 Q) \quad (10)$$

因此就可以从应力梯度和体积流量计算切应



力与切应变速率之间的关系。

实验测定压力梯度和体积流量, 就可由 (5) 式确定  $\tau_w$ , 代入 (10) 式计算壁面剪切速率  $\dot{\gamma}_w$ 。

(10) 式又可变为

$$\dot{\gamma}(\tau_w) = -\frac{Q}{\pi R^3} \left( 3 + \frac{d \ln Q}{d \ln \tau_w} \right) \quad (11)$$

对所研究的凝胶模拟液选用工程上应用最广的幂定律模型

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (12a)$$

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (12b)$$

式中,  $\tau$  为剪切力, Pa;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $s^{-1}$ ;  $k$  为稠度系数,  $Pa \cdot s^n$ ;  $n$  为流动指数;  $\tau_0$  为屈服应力, Pa (一般对于凝胶推进剂很小, 可以忽略)。

可知确定的幂律流体的粘性只取决于剪切速率, 剪切速率变化则粘性就会不同。因此可定义一表观粘性  $\eta_\alpha$ , 由壁面处的剪切力与剪切速率的比值确定。

$$\eta_\alpha = \frac{R \Delta p / 2l}{\dot{\gamma}_w} \quad (13)$$

取幂律流体本构方程

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} = k \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^{n-1} \quad (14)$$

由 (3) 式可知

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^n \right] \quad (15)$$

上式对  $r$  进行两次积分, 并应用边界条件可得

$$u = -\frac{n}{n+1} R^{(n+1)/n} \left[ \frac{1}{2k} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right) \right]^{1/n} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right] \quad (16)$$

在管中心处  $r=0$  时, 速度最大, 最大速度用  $u_{\max}$  表示

$$u_{\max} = -\frac{n}{n+1} R^{(n+1)/n} \left[ \frac{1}{2k} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right) \right]^{1/n} \quad (17)$$

(式中负号表示流体流向压力降低的方向)。

因此, 管内截面上的速度分布可以写成无量纲形式

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (18)$$

(表明: 用  $u_{\max}$  表示的幂律流体相对速度分布仅与流动指数  $n$  有关, 而与稠度系数  $k$  无关) 平均速度  $u_m$  的表达式为

$$u_m = \frac{Q}{A} = \left( \frac{\Delta p}{2kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+3n} R^{\frac{n+1}{n}} \quad (19)$$

则平均速度与最大速度之比为

$$\frac{u_m}{u_{\max}} = \frac{1+n}{1+3n} \quad (20)$$

可定义平均粘性

$$\bar{\eta} = 2k \frac{1}{R^2} \int_0^R \dot{\gamma}^{n-1} r dr \quad (21)$$

$$\text{即 } \bar{\eta} = 2k \frac{n}{3n-1} \left( \frac{1+3n}{n} \right)^{n-1} \pi^{1-n} \frac{1}{Q^{1-n}} R^{3(1-n)} \quad (22)$$

## 2.2 流阻分析

若管内流体的流动状态为层流状态, 则由力平衡关系有

$$\pi r^2 p_1 = 2\pi r l \tau + \pi r^2 p_2 \quad (23)$$

$$\text{即, } (p_1 - p_2)r = 2\tau l \quad (24)$$

$$\text{取幂律流体本构方程 } \tau = k \left( \frac{du}{dr} \right)^n \quad (25)$$

$$\text{则有 } \Delta p \cdot r = 2kl \left( \frac{du}{dr} \right)^n \quad (26)$$

即

$$\Delta p = 2^{3n+2} \cdot k \cdot \pi^{-n} \cdot \left( \frac{1+3n}{n} \right)^n \cdot l \cdot Q^n \cdot \frac{1}{d^{3n+1}} \quad (27)$$

$$\text{压头损失 } H_f' = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (28)$$

即

$$H_f' = 8 \cdot \left( \frac{2+6n}{n} \right)^n \cdot \frac{1}{d^n u_m^{2-n} \rho} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u_m^2}{2g} \quad (29)$$

类比牛顿流体可以定义幂律流体的雷诺数

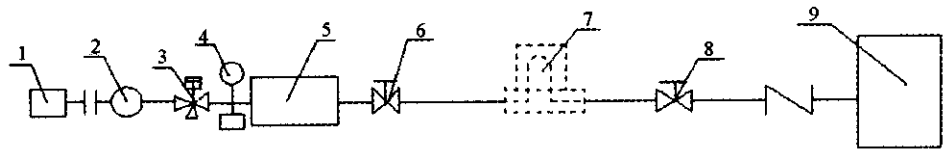
$$Re_p = \frac{\rho u_m^{2-n} d^n}{k} \quad (30)$$



3 模拟液在直圆管中的实验研究

实验系统如图 2 所示，模拟液采用空气挤压供应，质量流量应用科氏力质量流量计测量，实验在常温下进行。

3.1 实验系统



1—气源；2—控制箱；3—调节阀；4—压力表；5—模拟液储箱；6—调节阀；  
7—科氏力流量计；8—调节阀；9—试验件装卡台

图 2 实验系统示意图

Fig.2 Schematic of experimental system

3.2 实验方案

实验选择的管径、管长如表 1 所示。  
实验主要在不同管径和管长时通过改变质量流量测量对应压降的变化，以及改变管路入口压力来考察对流动的影响。试验的流量范围为

60g/s~260g/s。用实验确定了阻力系数，通过实测得管段长度  $L$ ，管径  $D$ ，压降  $\Delta p$  和流量  $Q$ 。由 Hagen-Poiseuille 公式： $\lambda = \frac{\pi^2 D^5 \Delta p}{8\rho l Q^2}$ ，求得沿程阻力系数  $\lambda$ 。

表 1 实验选用的管径、管长

Tab.1 Diameters and lengths of experimental pipes

管径 /mm	管长 /mm	管径 /mm	管长 /mm	管径 /mm	管长 /mm	管径 /mm	管长 /mm	管径 /mm	管长 /mm	管径 /mm	管长 /mm
10	400	12	400	14	400	16	400	18	400	20	400
	600		600		600		600		600		600
	800		800		800		800		800		800
	1000		1000		1000		1000		1000		1000
	1200		1200		1200		1200		1200		1200
					1400		1400		1400		1400
							1600		1600		1600

备注：表中管长为圆管长，不包含接头长度在内。

3.3 实验结果分析

3.3.1 流变特性试验结果

本文通过流变仪测量了某型凝胶推进剂模拟液的相关参数，主要考察了温度对粘性的影响。图 3、图 4 给出了在不同温度下，流动指数  $n$  与稠度系数  $k$  的变化曲线。从图中我们可以看到随着温度的升高，流动指数  $n$  增大，稠度系数  $k$  减小。 $n$  越接近于 1 说明它的流动性越好，而越接近于 0，其塑性增强，流动性降低。图 3 给出了流动指数  $n$

随温度的变化曲线，可以明显看到在不同温度区域，流动指数  $n$  的变化：在 -30℃ 到 -10℃ 时，流动指数  $n$  的变化在 0.375 左右，变化比较平缓，而温度从零下到零度这个范围时，流动指数  $n$  迅速增大，流动性增强；在零度到 40℃ 这个范围内，流动指数  $n$  在 0.575 左右，变化也是比较平缓的，从 40℃ 以后流动指数  $n$  又开始增大。这就说明在某一温度范围内，某型凝胶推进剂模拟液的流动指数可以认为是一个定值，这就为研究带来了方便。



图 4 是稠度系数  $k$  随温度的变化曲线, 图中可以看出, 稠度系数  $k$  和温度是近似的幂函数关系。

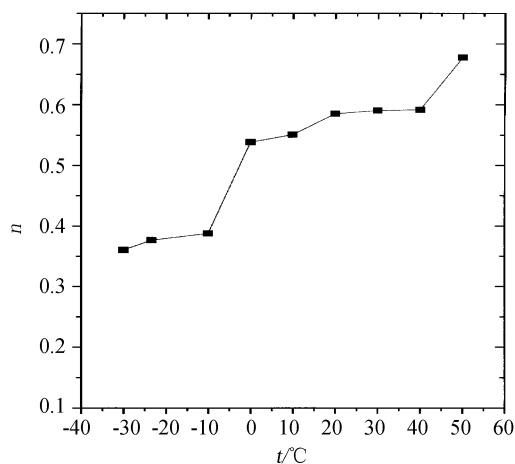


图 3 流动指数  $n$  随温度的变化曲线

Fig.3 Flow index( $n$ ) vs temperature

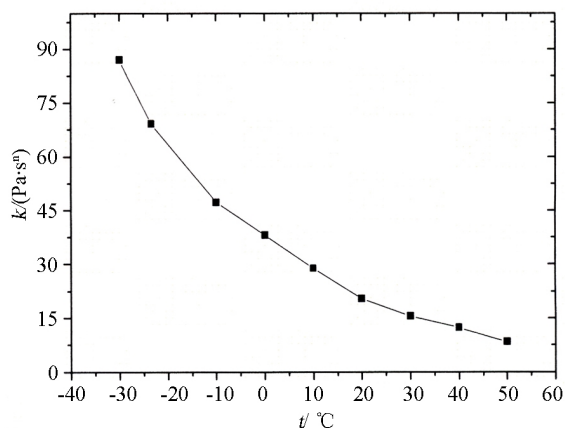


图 4 稠度系数  $k$  随温度的变化曲线

Fig.4 Consistency coefficient( $k$ ) vs temperature

### 3.3.2 流动特性试验结果

在试验中, 通过用科氏力流量计对凝胶推进剂模拟液的密度进行了跟踪测量, 发现模拟液的密度变化很小, 可以认为假设凝胶模拟液为不可压缩流体是可行的, 模拟液密度为常数。

图 5 给出了不同管径下管长与压降的曲线关系, 保证管径和流量不变, 管长和压降成线性关系, 与牛顿流体的流动情况相似。

图 6 是在不同的管路入口压力下, 模拟液和水的压降随流量的变化曲线以及对比。可以看到入口压力改变对流动的影响不大, 可以忽略。在

相同流量时, 模拟液的压降要比水大得多, 主要是因为模拟液的粘性大, 造成的粘性损失大。

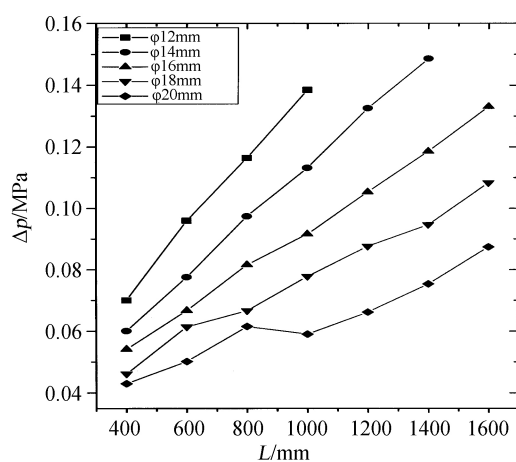


图 5 不同管径下压降与管长的关系曲线

Fig.5 Pressure drop vs pipe length  
for various pipe diameters

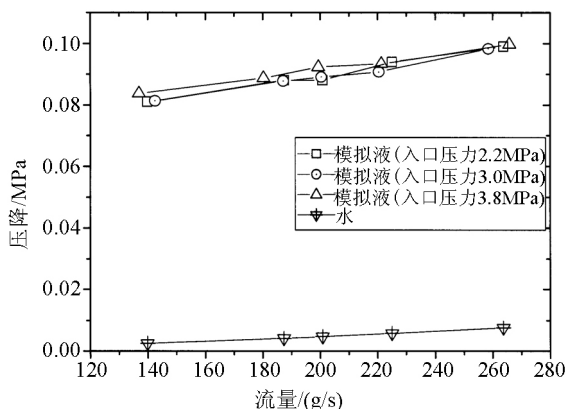


图 6 不同入口压力模拟液和水的压降与流量的关系

Fig.6 Pressure drop vs flow rate of simulants and water  
for various inlet pressures

在模拟液流动速度相同的情况下, 对不同管径和管长情况下的压降进行了测量, 得到了大量的数据, 图 7 为其中之一, 即管径  $D$  不变时, 管长  $L$  变化, 压降与管径比  $L/D$  的关系。由图中我们可以看到压降与管径比  $L/D$  成线性关系。因此可认为模拟液的压降也可由下式来近似计算

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2}$$



阻力系数  $\lambda$  的确定, 在层流流动状态时, 经过理论推导可知  $\lambda = 8 \cdot \left( \frac{2+6n}{n} \right)^n \cdot \frac{1}{Re_p}$ ,  $Re_p$  为

牛顿流体的雷诺数。图 8 给出了阻力系数与雷诺数的关系曲线。试验的结果也证实了理论推导的结果。由试验工况可知, 在管径为 10mm, 流量达到 260g/s 时, 以表观粘性计算的雷诺数不超过 40, 可以认为在我们目前所试验的工况下流动是层流流动状态, 很难达到紊流状态。

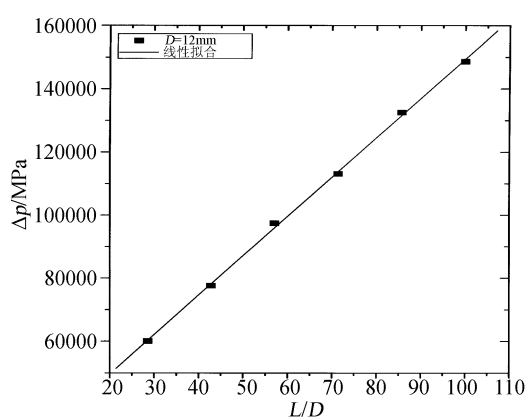


图7 压降与  $L/D$  的变化曲线

Fig.7 Pressure drop vs  $L/D$

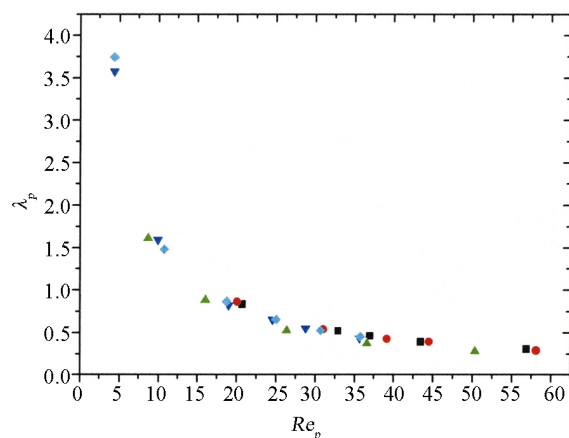


图8 阻力系数与雷诺数的关系曲线

Fig.8 Drag coefficient vs Reynolds number

图 9 显示了模拟液层流时  $u_m/u_{\max}$  与  $Re_p$  的曲线关系, 可看出  $u_m/u_{\max}$  基本上不随  $Re_p$  变化, 由式 (20) 可知,  $n$  没有变化。由于测量的误差, 可认为  $n$  在某一值上下波动。而  $n$  又是温度的函数,

这在流变分析中已知, 但据文献[2]报道, 流动指数  $n$  不是一个分子常量, 在紊流状态下还依赖于平均流速。因此我们可进一步认为在我们试验所进行的工况内, 流动状态为层流流动状态。

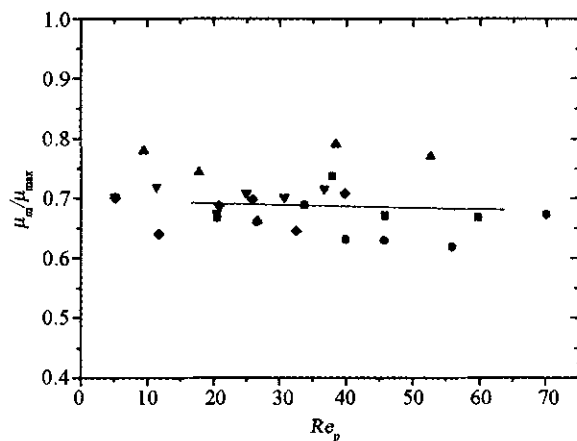


图9 层流时  $u_m/u_{\max}$  与  $Re_p$  的曲线关系

Fig.9 Non-dimensional  $u_m/u_{\max}$  vs  $Re_p$  for laminar flow

至于划分非牛顿流体层流与湍流的临界雷诺数, 目前尚无统一标准, 道奇 (Dodge) 和密兹纳 (Metzner) 提出临界雷诺数是随流动指数  $n$  而变化的。对用幂律方程来描述的非牛顿流体, 判断层流过渡到湍流的准则, 可用如下临界雷诺数公式判别

$$Re_c = \frac{6464n}{(1+3n)^2 \left( \frac{1}{2+n} \right)^{\left( \frac{2+n}{1+n} \right)}} \quad (31)$$

他们也用实验证实, 上式计算所得临界雷诺数与实测值是比较接近的。本文计算了实验所用的凝胶推进剂模拟液的临界雷诺数  $Re_c=2384$ , 而在实验研究工况内, 最大雷诺数  $Re=175$ , 远远小于临界雷诺数, 综合判定准则和实验分析, 可判断凝胶推进剂模拟液在直圆管内的流动为层流。

## 4 结论

通过对某型凝胶推进剂模拟液在直圆管中流动特性的理论分析和实验研究, 得到如下结论:

(下转第 23 页)



着滑阀位移的增加而减少,而圆形节流口的滑阀稳态液动力随着滑阀位移的增加先增加后减少;

(2) 滑阀的稳态液动力与滑阀节流口处流道的形状有很大的关系,在滑阀工作区域,节流口为圆形时的滑阀的稳态液动力大于相同节流面积下节流口为三角形时的滑阀,而壳体选择方案A时在位移较小处滑阀的稳态液动力大于相同节流面积下选择方案B时滑阀的稳态液动力,在位移较大时则有相反的结论;

(3) 滑阀的稳态液动力与滑阀刃边厚度有关,随着刃边厚度的增加而增加,且成近似的抛物线关系。

#### 参考文献:

- [1] А А Шемяков, В М Калнин. Теория Автоматического Управления Ракетными Двигателями[J]. Изд-во Машиностроение, 1978г.
- [2] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 清华大学出版社, 2004.
- [3] 王昕. 流量调节器动态特性分析[J]. 火箭推进, 2004(6).
- [4] 张慧兰. 液动力对滑阀使用的影响[J]. 南方冶金学院学报, 1996(6).

(编辑: 侯 早)

\*\*\*\*\*

(上接第 17 页)

(1) 保证模拟液的物性参数  $k$ ,  $n$  不变时,同一管径和流量,压降与管长成线性关系,压降与长径比  $L/D$  成线性关系,与牛顿流体相似;

(2) 在保持流量相同时,模拟液的压降与水进行比较,模拟液的压降远高于水,并且入口压力的变化对压降的影响可以忽略不计;

(3) 在本文研究的工况内,无量纲速度比  $u_m/u_{\max}$  随雷诺数的变化不大,说明模拟液的流态是层流流动状态,因此阻力系数  $\lambda$  的确定可按层流流动状态时理论推导的结果

$$\lambda = 8 \cdot \left( \frac{2+6n}{n} \right)^n \cdot \frac{1}{Re_p}$$

(4) 在本文所研究的工况内和模拟液性能相似的时,可按层流流动理论对管路进行设计,而温度会对管内流动产生较大影响。

**致谢:** 本试验在 11 所一室雾化实验室进行,对杨国华、王玫、孙璠和曹智程等所做的工作表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] Kraynik A M, Geller A S and Glick J H. Gelled propellant flow: boundary layer theory for power law fluids in a converging planar channel[R]. Sandia National Laboratories, SAND89-1720 UC-906.
- [2] Li Tieqiang. Pipe flow of aqueous polyacrylamide solutions studied by means of nuclear magnetic resonance imaging[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. (57)155-175, 1995
- [3] M P Escudier, R J Poole, F Presti, 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, (127)143-155, 2005.
- [4] 付强, 张春雨. 非牛顿流体非定常流动的解析法研究[M]. 四川科学技术出版社, 2002.
- [5] 曾贤启. 工程流体力学基础[M]. 航空工业出版社, 1993.
- [6] 阎大庆, 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(1).

(编辑: 侯 早)