

# 凝胶模拟液直圆管流动特性数值模拟

左 博, 张蒙正

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 采用 POLYFLOW 软件, 对幂律型凝胶模拟液在直圆管内的流动和流变特性进行了数值模拟研究。结果表明: 在流速和管径不变时, 压降随管长的增加成线性增加; 在流速和管长不变时, 压降随管径的增大急剧减小; 随着流变指数的减小, 直圆管轴线附近出现明显的柱塞流动区, 在此区域内, 速度和剪切速率变化较小, 剪切粘度值趋于最大; 在管壁附近, 速度和剪切速率变化较大, 剪切粘度降低明显。

**关键词:** 凝胶模拟液; 直圆管; 数值模拟

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: (2008) 05-0027-04

## Numerical simulation of tube flow characteristics for gel simulation

Zuo Bo, Zhang Mengzheng

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The flow and rheological characteristics of gel simulation in the pipe were simulated by using POLYFLOW software. The result shows: the pressure loss linearity increase with tube length when velocity and diameter are invariable. The pressure loss reduces rapidly with diameter increase when velocity and pipe length are invariable. The plug flow area is existed obviously at axes area along with power law index increase. In this area, the change of velocity and shear rate is smaller, and the shear viscosity is the biggest. In the area of pipe wall, the changes of velocity and shear rate are tempestuousness, and the shear viscosity decreased obviously.

**Key words:** gel simulation; straight round pipe; numerical simulation

收稿日期: 2008-05-26; 修回日期: 2008-07-06。

作者简介: 左博 (1982—), 男, 硕士, 研究领域为火箭发动机系统设计。

0 引言

凝胶推进剂是用少量的胶凝剂将液体组分(燃料或氧化剂)凝胶化,使之形成具有一定结构和特性,并能长期保持稳定的物理凝胶体系<sup>[1]</sup>。凝胶推进剂具有密度比冲高、敏感度低、使用安全和可调节性好等优点是高性能、高安全性化学推进剂的发展方向之一,引起了国内外研究机构的广泛关注<sup>[2-6]</sup>。

由于凝胶推进剂与凝胶模拟液流动和流变特性类似,因此实际中常采用研究凝胶模拟液的流动和流变特性来了解凝胶推进剂的流动特性。凝胶模拟液的流动和流变特性研究主要基于试验和数值模拟两种方法。试验研究测量并分析的是凝胶模拟液的宏观参数,如压降、流量等,无法对凝胶模拟液流动过程中管路内部的速度分布、剪切速率分布及剪切粘度分布等流动和流变特性细节作详细的考察。借助 POLYFLOW 软件,对五种凝胶在直圆管内的流动、流变及流阻特性进行分析,并与水进行对比。

1 计算方法

1.1 数学模型

假设凝胶模拟液在直圆管内流动时为不可压、稳态、等温且无壁面滑移。下面为流动的基本微分方程。

连续方程:

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{1}$$

式中,  $v$  为速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

运动方程:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} - \nabla p + \nabla \cdot \tau + f \tag{2}$$

式中,  $p$  为压力,  $\text{Pa}$ ;  $\tau$  为剪应力,  $\text{Pa}$ ;  $f$  为流体体积力,  $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ 。连续方程和运动方程是流体运动共同遵守的普遍规律,决定流动的方式与流体性质无关,而决定流体性质的是本构方程,其通用表达式为:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \tag{3}$$

式中,  $\eta$  为剪切粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\dot{\gamma}$  为剪切速度,  $\text{s}^{-1}$ 。本构方程能够反映非牛顿流体的流变特性。不同类型的非牛顿流体有不同的本构方程形式。参考文献[7]分析了不带屈服应力的非时间依赖非牛顿流体本构方程形式,以及带屈服应力的非时间依赖非牛顿流体本构方程形式。

幂律型凝胶模拟液的本构方程形式为:

$$\tau = k\dot{\gamma}^{n-1} \tag{4}$$

式中,  $n$  为流变指数,是流动特性指标,反映凝胶模拟液偏离牛顿流体的程度,无因次量;  $k$  为稠度系数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ 。

1.2 流变特性参数

仿真计算中采用的凝胶模拟液流变特性参数如表 1 所示。

表 1 凝胶模拟液流变特性参数

Tab.1 The rheological parameter of gelled propellant

流体名称	$n$	$k/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	胶凝剂浓度/(w/%)	编号
水凝胶	0.3797	13.96	0.3	1 <sup>#</sup>
	0.3632	22.8	0.5	2 <sup>#</sup>
	0.3567	30.61	0.75	3 <sup>#</sup>
凝胶模拟液	0.2240	41.65	1	4 <sup>#</sup>
	0.1746	90.68	2	5 <sup>#</sup>
水	1	0.001	-	-

注:表中水凝胶流变特性参数来源于参考文献[8],凝胶模拟液的流变特性参数为试验测量值,水的  $n$  和  $k$  为 25℃ 下的参数值。另外,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 配方相同,4<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 配方相同。

2 数值计算结果

考虑到凝胶模拟液的剪切变稀特性,在管壁处进行了网格加密处理。

2.1 流阻特性

在平均流速 3m/s 条件下,直圆管仿真计算得到的压降随管长和管径的变化曲线如图 1 和图 2 所示。

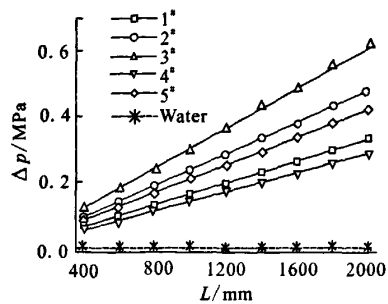


图 1 压降随管长的变化关系 ( $d=8\text{mm}$ )

Fig.1 The relation of pressure loss vs pipe length ( $d=8\text{mm}$ )

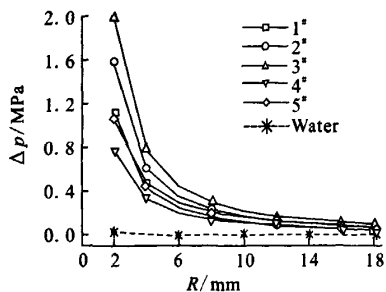


图 2 压降随管径的变化关系 ( $L=1000\text{mm}$ )

Fig.2 The relation of pressure loss vs diameter ( $L=1000\text{mm}$ )

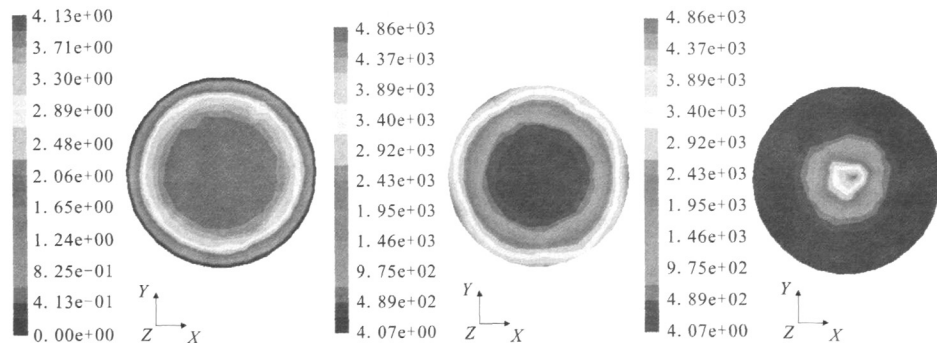


图 3 4# 凝胶模拟液仿真计算剖面 ( $v=3\text{m/s}$ ,  $d=8\text{mm}$ ,  $L=1000\text{mm}$ )

Fig.3 The numerical simulation result section of 4# gel simulation ( $v=3\text{m/s}$ ,  $d=8\text{mm}$ ,  $L=1000\text{mm}$ )

图 4 给出了平均流速为  $2.5\text{m/s}$  时, 五种凝胶直圆管内流动时的速度、剪切速率及剪切粘度径向分布曲线, 并与水作对比。

从速度分布图 4 (a)可以看出, 1#、2# 及 3# 水凝胶的速度分布曲线比较接近, 4# 和 5# 凝胶模拟

从图 1 可以看出: (1)压降随管长增加成线性变化关系; (2)在管径、管长和配方不变的条件下, 随着胶凝剂浓度的增加, 压降逐渐增加; (3) 4# 凝胶模拟液的压降损失最小; (4)在相同管径和管长条件下, 五种凝胶的压降损失远大于水的压降损失。

由图 2 可知, 当管长恒定时, 压降随管径的增加急剧减小。另外, 在管径不变时, 对于同一种凝胶, 随着胶凝剂浓度的增加, 压降增大。

### 2.2 流变特性

参考文献 [9]分析了凝胶模拟液流变特性与流动和雾化特性的关系, 认为流变特性显著影响着凝胶模拟液的输送和雾化过程。运用仿真计算软件考察凝胶模拟液在直圆管内流动时的流变特性, 其中 4# 凝胶模拟液仿真计算得出的速度、剪切速率及剪切粘度径向分布云图如图 3 所示。

从图 3 可以看出: 在直圆管轴线附近, 速度变化很小, 流动呈现柱塞状流动, 在此柱塞流动区内, 剪切速率变化率较小, 剪切粘度值趋于最大。另外, 在管壁附近, 速度变化较大, 剪切速率值趋于最大, 同时剪切粘度趋于最小。

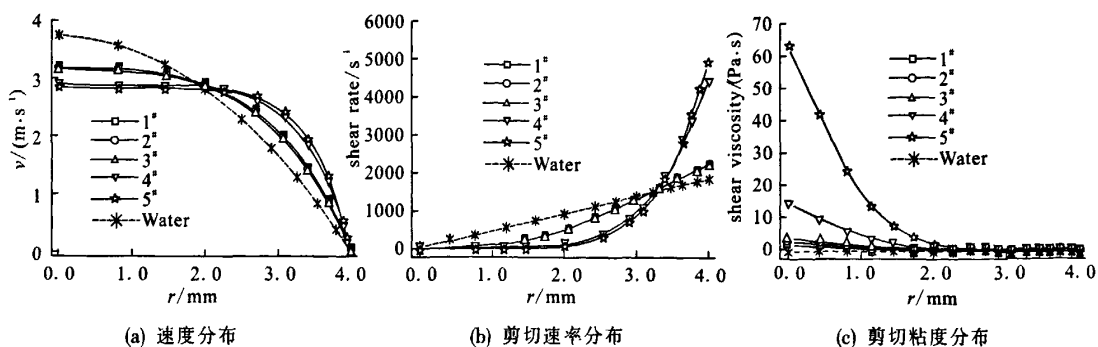


图4 速度、剪切速率及剪切粘度沿径向分布曲线 ( $v=2.5\text{m/s}$ ,  $d=8\text{mm}$ ,  $L=1000\text{mm}$ )

Fig.4 The radial direction distributing curve of velocity, shear rate and shear viscosity

( $v=2.5\text{m/s}$ ,  $d=8\text{mm}$ ,  $L=1000\text{mm}$ )

由剪切速率分布图4(b)可以看出:水的剪切速率沿径向呈线性分布,水凝胶和模拟液的径向剪切速率呈非线性分布。另外,在轴线附近,流变指数最小的5#凝胶模拟液剪切速率变化量很小;在管壁附近,5#凝胶模拟液剪切速率变化最为剧烈。

由剪切粘度分布图4(c)可已看出:(1)管壁附近剪切粘度最小,轴线附近剪切粘度最大;(2)随着稠度系数的增大,轴线附近的剪切粘度也跟着增大。

### 3 结论

通过对幂律型凝胶模拟液在直圆管内的流动和流变特性进行仿真研究,结果表明:

- (1) 压降随管长的增加成线性增加,随管径的增加急剧减小;
- (2) 轴线附近存在明显的柱塞流动区;柱塞流动区随流变指数的减小而增大;
- (3) 管壁附近,剪切速率变化比较剧烈,剪切粘度降低明显。

### 参考文献:

- [1] 刘凯强,屈育龙,王明珍,等.小分子有机胶凝剂和凝胶推进剂的研究进展[J].火炸药学报,2003,26(4):23-26.
- [2] Jens von Kampen, Klaus Madlener, Helmut K Ciezki. Characteristic Flow and Spray Properties of Gelled Fuels with Regard to the Impinging Jet Injector Type [R]. AIAA2006-4573.
- [3] Yair Solomon, Benveniste Natan, Yachin Cohen. Combustion of Gel Fuels based on Organic Gellants [R]. AIAA2006-4565.
- [4] Natan Benveniste, Rahimi Shai. The Status of Gel Propellants in Year 2000 [M]. Combustion of Energetic Materials, 2001.
- [5] 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.
- [6] 左博,张蒙正.凝胶推进剂直圆管中剪切速率与表观粘性实验研究[J].火箭推进,2007,33(4):12-15.
- [7] 张蒙正,杨伟东,孙彦堂,等.凝胶推进剂直圆管流动特性探讨[J].火箭推进,2007,33(5):1-5.
- [8] Shai Rahimi, Benveniste Natan. The Injection Process of Gel fuels[R]. AIAA1997-2973.

(编辑:马杰)