

文章编号: 1672-9897(2013)01-0072-07

凝胶推进剂管道输送系统流阻特性实验和数值研究

王 枫¹, 张贵田¹, 孙志强²

(1. 西北工业大学, 西安 710072; 2. 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘要:为研究凝胶推进剂的流变特性,建立了两种不同结构的凝胶推进剂管道输送系统模型。在直管流变特性实验基础上,确定了凝胶推进剂的流变参数,采用凝胶推进剂和水对整个凝胶推进剂管道输送系统流动进行了数值模拟,并将结果与输送系统流阻实验的实验值进行了对比分析。结果显示数值计算结果与实验结果吻合较好。

关键词:凝胶推进剂;管道输送系统;流变特性;数值模拟

中图分类号:V513

文献标识码:A

Experimental and numerical simulation on the rheological characteristics of gelled propellants transportation pipelines

WANG Feng¹, ZHANG Gui-tian¹, SUN Zhi-qiang²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Two models of gelled propellant transportation pipelines with different structures were built to study the rheological property of the gelled propellants. Based on rheological property experiments for the straight pipe, the rheological parameters of gelled propellants were gained. The gelled propellant and water flow in gelled propellant transportation pipelines was numerically simulated, and the results were compared with that of experiments. It was shown that the numerical results agreed well with experiments results.

Key words: gelled propellant; transportation pipeline; rheological property; numerical simulation

0 引 言

凝胶推进剂兼具液体推进剂和固体推进剂的特性,具有易存贮、低敏度、高安全性等优点,是未来液体推进剂的重要发展方向^[1]。凝胶推进剂属于非牛顿流体,粘度与剪切变形速率有关,流动情况复杂。输送凝胶推进剂的管道一般直径小压强大,传感器安装和接口密封困难,实验测量难度较大。而且一般推进剂都有毒性且价格昂贵,实验代价较高。同时,采用实验的方法往往得不到具体直观的流动情况。对凝胶推进剂的输送管道系统进行数值模拟是解决这些矛盾较为有效的方法。

国外对于凝胶推进剂的研究已经达到了实用化阶段,美国曾先后将凝胶推进剂应用于战区导弹防御系统杀伤部分推进系统^[2]和小型反坦克导弹的推进

系统^[3]。前苏联则很早就宇宙飞船的姿态控制发动机上使用了凝胶推进剂^[4-5]。以色列也在其“箭”式拦截导弹上采用了 HNO₃-20s/UDMH 双组元凝胶推进剂^[6]。国内对凝胶推进剂的研究还处于起步阶段,目前主要进行配方、流变特性和燃烧机理方面的研究。比较有代表性的研究包括 2006 年符全军、杜宗罡等对偏二甲肼和四氧化二氮双组元凝胶推进剂的制备和流变特性的研究^[7];2008 年左博、张蒙正等对 3 种凝胶模拟液在第二、第三流动区内管路流阻的计算值和实验值的对比分析^[8];2009 年韩伟、单世雄等针对红烟硝酸/偏二甲肼的化学性质,结合流变性能测试进行了发动机头部液流实验和地面热试车等研究^[9]。由于凝胶粘度随剪切变形速率变化,计算误差较大,国内对于凝胶的研究多采用实验的方法,数值模拟研究较少。

收稿日期: 2011-08-05;修订日期: 2012-06-28

笔者建立了两种凝胶推进剂管道输送系统的模型,结合直管流变特性实验,确定了凝胶推进剂的稠度指数、幂律指数和屈服粘度,在此基础上采用凝胶模拟液和水对整个凝胶推进剂管道输送系统进行了数值模拟,并将数值模拟结果与输送系统流阻实验的压降值进行了对比分析。数值模拟结果显示:在直管流变特性实验得到准确本构方程的基础上,利用数值模拟方法对复杂凝胶管道输送系统进行计算,结果与实验值吻合良好,可在一定程度上补充或替代实验方法。

1 实验装置与实验方法

1.1 实验装置

常见的旋转式流变仪只能测量剪切速率小于 1200s^{-1} 时凝胶的流变特性,而凝胶推进剂在发动机管路组件、控制阀、喷注器等流动时管壁的剪切速率远大于此值。另外,凝胶推进剂在流变仪套筒内处于被剪切的相对静止状态,可见流变仪测量出的是静态粘性,而在管路流动条件下,凝胶推进剂处于不断被扰动、剪切又不断恢复的循环过程,测量出的是动态粘性。鉴于管路实验条件下测量得到的流变特性与流变仪测量的流变特性有一定的差异,采用管路流变仪测量凝胶推进剂的流变特性。

管路流变仪测试系统的原理如图 1 所示,整个实验装置由增压装置、热水清洗装置、推进剂转注装置、推进剂供应装置、以及测量和控制装置等组成,凝胶推进剂流量采用科氏力质量流量计(KROHNE 1081 K+F)测量,压强采用麦克压力传感器测量,数据采集和处理由电脑自动控制并绘制成曲线。

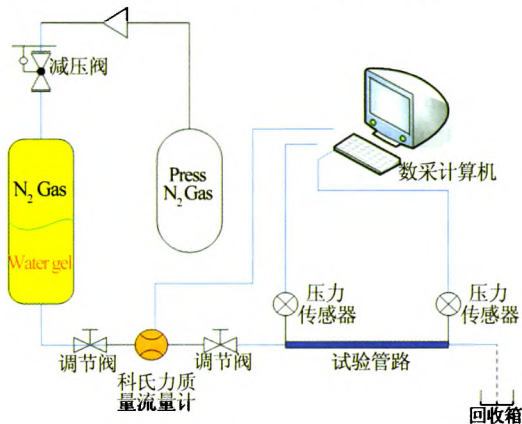


图 1 管路流变仪测试系统原理图
Fig. 1 The sketch of pipeline rheometer system

输送系统流阻实验则是在管路流变仪测试系统基础上,将直管段换成两种凝胶推进剂输送系统管道,并在管路上不同位置设置压力传感器采集压强数

据。

1.2 实验方法

假设凝胶推进剂为非时变、剪切变稀和纯粘性非弹性流体。在柱坐标系 (r, θ, z) 下研究凝胶推进剂的流动和流变情况。其中: r 为管径方向, z 为直圆管轴线方向。直圆管中凝胶推进剂一维、定常、稳定流动的动量方程简化式为:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_r) + \rho g_z \quad (1)$$

其中: τ_r 为半径 r 处的剪应力; g_z 为 z 轴方向的重力加速度。忽略重力影响,对(1)式积分,可得管壁剪应力和压降的关系:

$$\tau_w = \frac{\Delta p d}{4l} \quad (2)$$

对于常粘度流体,牛顿剪切速率为:

$$\dot{\gamma}_{RW} = \frac{8\bar{u}}{d} = \frac{4q_v}{\pi R^3} \quad (3)$$

其中: \bar{u} 为平均流速。质量流量与体积分量的关系为:

$$q_m = \rho q_v \quad (4)$$

定义表观粘度为:

$$\eta_e = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_{RW}} = \frac{\Delta p d / 4l}{8\bar{u} / d} \quad (5)$$

直圆管中凝胶推进剂平均流速与管壁剪应力的关系为^[10]:

$$\bar{u} = \frac{R}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \dot{\gamma}(\tau) \tau^2 d\tau \quad (6)$$

其中: $\dot{\gamma}$ 为剪切速率,单位 s^{-1} 。将(6)式改写为:

$$\frac{8\bar{u}}{d} = \frac{4}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \dot{\gamma}(\tau) \tau^2 d\tau \quad (7)$$

(7)式表明,当管径和质量流量一定时, τ_w 就一定,剪应力的分布也一定,这样,式(7)的右边仅为 τ_w 的函数:

$$\frac{8\bar{u}}{d} = F(\tau_w) \quad (8)$$

在层流条件下,对于非时变粘性流体,在 $\Delta p d / 4l$ 和 $8\bar{u} / d$ 的坐标系中,对同一种流体,实点将落在同一条曲线上。将(7)式两侧对 τ_w 求导,可得管壁剪切速率为

$$\dot{\gamma}_w = \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln \left(\frac{8\bar{u}}{d} \right)}{d \ln (\tau_w)} \right] \left(\frac{8\bar{u}}{d} \right) \quad (9)$$

令:

$$n' = \frac{d \ln (\tau_w)}{d \ln \left(\frac{8\bar{u}}{d} \right)} \quad (10)$$

将(3)式和(10)式代入(9)式可得:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3n' + 1}{4n'} \dot{\gamma}_{RW} \quad (11)$$

(11)式为非时变粘性流体管壁剪切速率的一般表达式。若 n' 为确定值,将(10)式积分后可得

$$\ln(\tau_w) = n' \ln(\dot{\gamma}_{RW}) + \ln k' \quad (12)$$

其中: n' 为待定常数; k' 为积分常数的变换形式。将(12)式变换可得:

$$\tau_w = k' (\dot{\gamma}_{RW})^{n'} \quad (13)$$

同理,可以得出表观粘度与牛顿剪切速率的关系为:

$$\eta_w = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_{RW}} = k' (\dot{\gamma}_{RW})^{n'-1} \quad (14)$$

对(14)式两边取对数得:

$$\ln(\eta_w) = (n' - 1) \ln(\dot{\gamma}_{RW}) + \ln k' \quad (15)$$

从(9)式到(15)式就是直圆管流变测量的主要方程。

将(11)式变形后代入(13)式有:

$$\tau_w = k' \left(\frac{4n'}{1+3n'} \right)^{n'} (\dot{\gamma}_w)^{n'} \quad (16)$$

在直圆管中,幂律型凝胶推进剂的本构方程为:

$$\tau_w = k (\dot{\gamma}_w)^n \quad (17)$$

其中: n 为流变指数,表示凝胶推进剂偏离牛顿流体的程度; k 为稠度系数,单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ 。由(16)和(17)式相等可得:

$$n = n' \quad (18)$$

$$k = k' \left(\frac{4n'}{1+3n'} \right)^{n'} \quad (19)$$

同时,可以得出管壁剪切粘度与管壁剪切速率的关系:

$$\eta_w = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} = k (\dot{\gamma}_w)^{n-1} \quad (20)$$

由(2)、(11)和(20)式可见,对于给定管长和管径的直圆管,只要测量出质量流量和压降,就可以计算出管路中凝胶推进剂流动时的管壁剪切速率、管壁剪应力和管壁剪切粘度。

因此,直圆管中幂律型凝胶推进剂的流变测量步骤如下:

(1) 实测通过管路的凝胶推进剂质量流量和压降;

(2) 按照(2)、(3)和(5)式分别求管壁剪应力 τ_w 、牛顿剪切速率 $\dot{\gamma}_{RW}$ 及表观粘度 η_w ;

(3) 绘制管壁剪应力与牛顿剪切速率的双对数曲线 $\ln(\tau_w) \sim \ln(\dot{\gamma}_{RW})$,或表观粘度与牛顿剪切速率的双对数曲线 $\ln(\eta_w) \sim \ln(\dot{\gamma}_{RW})$,如图2、3所示;

(4) 由(12)和(15)式可得,图2上直线的斜率即为 n' 值,截距即为 $\ln k'$,图3上直线的斜率为 $n'-1$,截距为 $\ln k'$;

(5) 流变指数 n 和稠度系数 k 由(18)和(19)式确定;

(6) 按照(11)式计算管壁剪切速率 $\dot{\gamma}_w$,按照(20)式计算管壁剪切粘度 η_w ,则可确定凝胶推进剂管内流动时的管壁剪切粘度随管壁剪切速率的变化曲线 $\eta_w \sim \dot{\gamma}_w$ 。

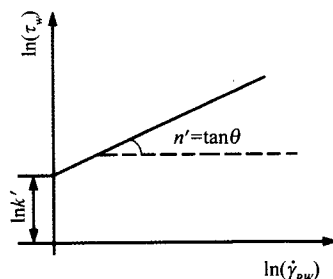


图2 $\ln(\tau_w)$ 随 $\ln(\dot{\gamma}_{RW})$ 变化曲线
Fig. 2 $\ln(\tau_w)$ varying with $\ln(\dot{\gamma}_{RW})$

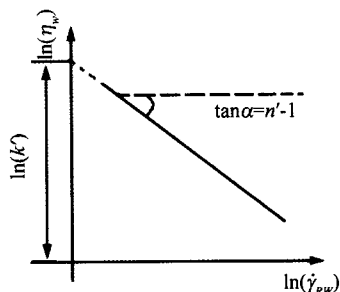


图3 $\ln(\eta_w)$ 随 $\ln(\dot{\gamma}_{RW})$ 变化曲线
Fig. 3 $\ln(\eta_w)$ varying with $\ln(\dot{\gamma}_{RW})$

2 物理模型与计算方法

2.1 物理模型

笔者研究的凝胶推进剂管道输送系统包括系统A和系统B两种形式。如图4所示,在系统A中,AB段为内径10mm的直圆管,长度为1210mm;BC段为节流板,长度为165mm,其中节流板厚度为1mm,节流孔直径为3mm;CD段为突缩管道,粗管内径为10mm,细管内径为4mm;DE段为内径为4mm的直圆管,长度1230mm;EF段为内径为4mm的圆弧弯管,弯管半径为800mm,弧长为1480mm;FG段为内径为4mm的直角弯管,边长为100mm。

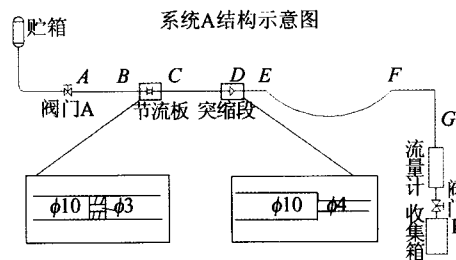


图4 凝胶推进剂管道输送系统A几何外形示意图
Fig. 4 The schematic diagram of system A

如图5所示,在系统B中,AB段为内径10mm

的直圆管,长度为 1000mm;BC 段为节流板,节流板厚度为 1mm,节流孔直径为 1mm;CD 段为突缩管,粗管内径为 10mm,细管内径为 4mm;DE 段为内径为 4mm 的直圆管,长度为 1000mm;EF 段为内径 4mm 的直角弯管,转弯半径为 20mm;FG 段为直角弯管,边长为 23mm。

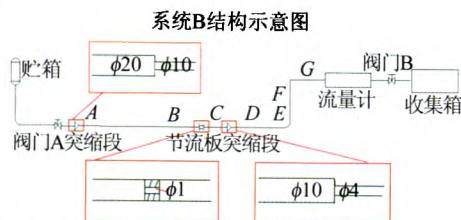


图 5 凝胶推进剂管道输送系统 B 几何外形示意图
Fig. 5 The schematic diagram of system B

由于整个管道系统较长,为了在控制网格总数的同时保证网格质量,外层使用结构化网格、内层采用六面体非结构网格,并通过设置对称边界采用半模计算。如图 6 和 7 分别为系统 A 和系统 B 的网格划分示意图。系统 A 网格总数 84 万,系统 B 网格总数 57 万。

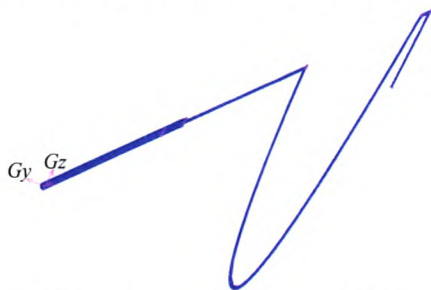


图 6 凝胶推进剂管道输送系统 A 网格划分示意图
Fig. 6 Mesh generation of system A



图 7 凝胶推进剂管道输送系统 B 网格划分示意图
Fig. 7 Mesh generation of system B

2.2 流场计算方法

流场计算采用 N-S 方程。由于凝胶推进剂常态下为固体,经过挤压流动后变为流体,即凝胶流体具有屈服应力,因此凝胶流体的粘度模型选用带有屈服应力的 Herschel-Bulkley 模型。此模型用来模拟在剪切应变为零时剪切应力不为零的流体粘度,这个模型对粘度的定义为:

$$\eta = \frac{\tau_0 + k[\dot{\gamma}^n - (\tau_0/\mu_0)^n]}{\dot{\gamma}} \quad (21)$$

其中: τ_0 为屈服应力阈值, μ_0 为屈服粘度。根据直管流变特性实验结果,取 $k=0.4$, $n=0.57$,根据实

验结果,屈服应力阈值取为 200Pa。设置进口边界条件为流量进口,按系统流阻实验值分别取进口流量为 20.6、30.2、40.1、50、61.1、69.5、81.4 和 90.1g/s。出口设置为压力出口,按实验值出口压强分别对应为 1.65、1.51、1.4、1.28、1.15、1.04、0.9 和 0.78MPa。

根据幂律型非牛顿流体雷诺数经验公式^[10]:

$$Re_c = \frac{6464n}{(1+3n^2)(\frac{1}{2+n})^{(\frac{2+n}{1+n})}} \quad (22)$$

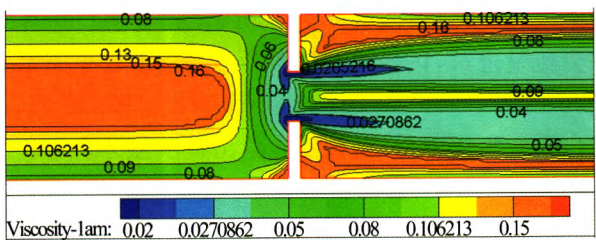
根据公式计算,当 n 取 0.57 时临界雷诺数约为 2350。对于系统 A,即使将凝胶粘度取为较小的 $0.02\text{Pa}\cdot\text{s}$,在最大流量状态下凝胶输送系统各个位置的雷诺数仍小于 2350,因此在流场计算时采用了层流模型。当采用水作为介质时,即使在最小的 20.6g/s 流量状态,节流孔处流速约为 2.6m/s,雷诺数仍达到 8000 左右,远大于 2300,为湍流状态。计算水流场时采用了 $k-\epsilon$ 湍流模型。

3 计算结果与讨论

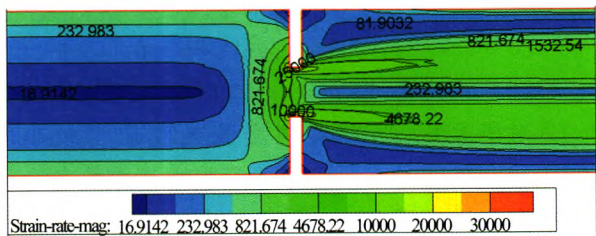
由于系统 A、B 管道较长,仅取管道的部分典型区域进行分析。图 8、9 所示为流量 40.1g/s 时系统 A 节流孔和节流孔下游突缩管道附近的有效粘度和剪切变形速率等值线图。在凝胶流体通过节流孔前,管道内的流体呈现“柱塞”式流动,即管壁附近由于剪切变形速率较大,流体粘度变小,而流体中心区域粘度仍然很高,各层流体之间相互滑动很不明显,流体如同一个固态的圆柱在管道内向前推进。凝胶流体通过节流孔时,流速增加,同时流体与节流孔壁面剧烈剪切,流体粘度急剧降低到约 $0.026\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。通过节流孔后,流体大致分为两层流动,通过节流孔的流体形成内层“柱塞”,流速较高,在这层流体的带动下,外层流体也开始流动,行成了一个外层“环形柱塞”。经过一段时间的掺混,内层“柱塞”流体与外层“环形柱塞”流体完全融合,形成新的“柱塞”式流动。在管道突缩处,流体迅速加速,剪切速率增大,细管壁面处粘性降低到约 $0.03\text{Pa}\cdot\text{s}$,同时在细管内形成新的“柱塞”。细管内粘度分布与 Changjin Yoon 等的计算结果类似^[11]。

系统 B 管道内的凝胶流动情况与系统 A 类似,但由于系统 B 的 B-C 段节流板孔径更小,系统 B 的流动损失主要集中在 B-C 段。

表 1 为输送系统流阻实验系统 A 各测压点的实测压强值,实验中每一点的压强取值 150 个,表中的压强值为其平均值。

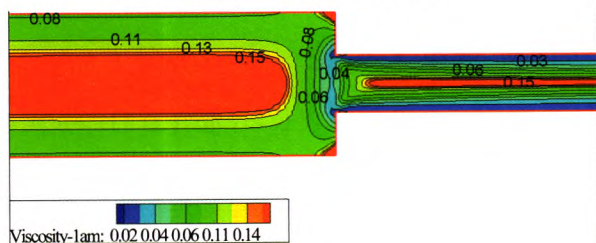


(a) 有效粘度/(Pa·s)

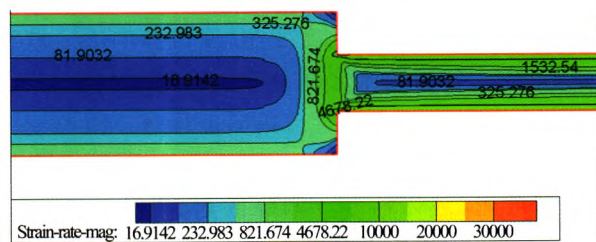


(b) 剪切变形速率/s⁻¹

图 8 系统 A 节流孔附近的有效粘度和剪切变形速率等值线图(流量 40.1g/s)
Fig. 8 Effective viscosity and strain rate isoline of system A at throttle part (flow rate 40.1g/s)



(a) 有效粘度/(Pa·s)



(b) 剪切变形速率/s⁻¹

图 9 系统 A 节流孔下游突缩管道的有效粘度和剪切变形速率等值线图(流量 40.1g/s)
Fig. 9 Effective viscosity and strain rate isoline of system A behind throttle part (flow rate 40.1g/s)

表 1 系统 A 各测压点不同流量下的实测压强平均值

Table1 Average pressure at each pressure testing point of system A at different flow rates

流量/ (g·s ⁻¹)	p1/ MPa	p2/ MPa	p3/ MPa	p4/ MPa	p5/ MPa	p6/ MPa	p7/ MPa
20.6	2.0663	2.0591	2.0382	2.0073	1.8913	1.6868	1.6514
30.2	2.0369	2.0267	1.9996	1.9623	1.8142	1.557	1.5146
40.1	2.0251	2.0125	1.9762	1.9304	1.7564	1.4504	1.3978
50.0	2.0142	1.9985	1.9514	1.8982	1.7014	1.3502	1.2862
61.1	2.0011	1.9827	1.9201	1.8574	1.6374	1.2335	1.1554
69.5	1.9831	1.9623	1.8863	1.8153	1.5797	1.1344	1.0453
81.4	1.9688	1.9452	1.8484	1.7651	1.5084	1.0056	0.8987
90.1	1.949	1.9235	1.8104	1.7171	1.446	0.9023	0.7798

图 10、11 所示分别为系统 A 和系统 B 各个测压点处的压强曲线,不同的颜色区分不同的流量状态,实线为 CFD 计算值,虚线为 EXP 实验值。从图 10 可见,各个测压点计算值与实验值基本一致,各个流量下 D-F 段管路沿程损失造成的压降平均占系统 A 总压降的 75%左右,各处的压降基本与管道长度成正比。而从图 11 可见,系统 B 的压降主要由节流孔造成,B-C 段流阻占整个系统流阻的 90%以上,计算结果显示进口压强 $1.5\times10^7\text{Pa}$ 时才能达到 90.1g/s 的流量,实验中也发现由于贮箱的压强限制,系统 B 达不到要求的流量而只能使用数值模拟方法进行研究。

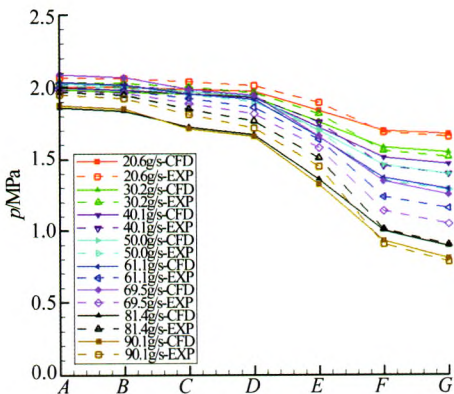


图 10 系统 A 各个测压点的压强曲线计算值和实验值的对比
Fig. 10 Comparison of computation and experiment pressure results at each pressure testing point of system A

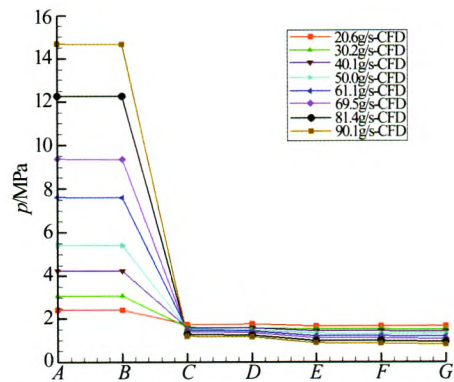
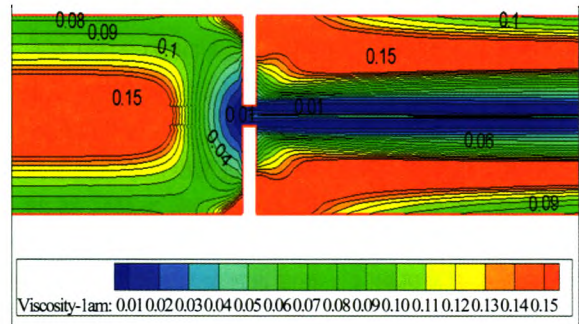


图 11 系统 B 各个测压点的压强曲线
Fig. 11 Computation pressure results at each pressure testing point of system B

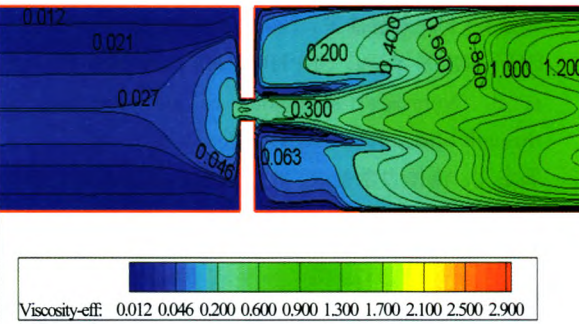
为了对比普通牛顿流体与凝胶流体的流动特性,采用水为介质对系统 A 和系统 B 进行了数值模拟。图 12 所示为流量 40.1g/s 时系统 B 节流孔附近凝胶与水的有效粘度分布等值线图,其中水的有效粘度包括运动粘度和湍流粘度。由图可见相对于凝胶流体的“柱塞”式流动,水的流动显得混乱无序,在掺混较剧烈的地方有效粘度较大。

图 13 和 14 分别为系统 A 和系统 B 在测压点 A-G 间压降与流量曲线,其中 CFD 为计算值;EXP 为

实验值;CFD-water 为采用水介质的计算值。由图 13 可见,系统 A 流阻随流量的变化基本为线性变化,计算值与实验规律相同,曲线基本平行。若流阻取 MPa 为单位,流量取 g/s 为单位,其斜率大致为 0.01,即 $\Delta p \approx (qm/100) + 0.2$ 。而水的流阻随流量的变化曲线类似抛物线,随流量增加流阻上升很快。由图 14 可见,系统 B 的流阻随流量的变化曲线可以看作抛物线,若流阻取 MPa 为单位,流量取 g/s 为单位,则 $\Delta p \approx 0.00185qm^2 - 0.016qm + 0.298$ 。由于系统 B 节流板孔径很小,B-C 段流阻占整个系统流阻的



(a) 凝胶有效粘度/(Pa·s)



(b) 水有效粘度/(Pa·s)

图 12 系统 B 节流孔附近凝胶与水的有效粘度分布等值线图(流量 40.1g/s)

Fig. 12 Gelled propellant and water effective viscosity isoline of system B at throttle part(flow rate 40.1g/s)

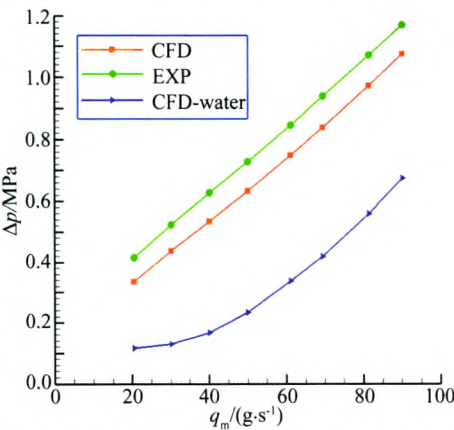


图 13 系统 A 压降与流量曲线(CFD:计算值;EXP:实验值;CFD-water:采用水介质的计算值)

Fig. 13 Pressure drop varying with flow rate of system A (CFD: computation results; EXP: experiment results; CFD-water: computation results with water)

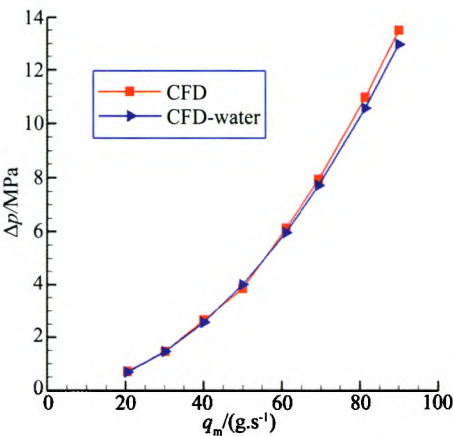


图 14 系统 B 压降与流量曲线(CFD:计算值; CFD-water:采用水介质的计算值)

Fig. 14 Pressure drop varying with flow rate of system B (CFD: computation results; CFD-water: computation results with water)

90%以上,节流孔处局部损失主要是由于流体间及流体与壁面的碰撞造成的,磨擦损失所占的比例很小。根据经验公式^[12]:

$$\Delta p = \zeta \frac{V^2}{2} \rho$$

(23)

其中 ζ 为局部损失系数,是管道直径和节流孔直径比值的函数。由于所选取的凝胶流体密度与水相当,所以在节流孔处的流阻也接近;系统 A 在流量为 90g/s 时,计算凝胶得到的系统压降比水高约 0.4MPa,系统 B 则约为 0.5MPa。在流量 20g/s 时,系统 A 和系统 B 计算凝胶得到的系统压降比水高约 0.2MPa。凝胶与水的系统压降差值主要是由于凝胶与水的粘度不同造成的,系统 A 与系统 B 管路系统长度相差不大,管径也相同,主要差别在于节流孔直径不同。当取相同的流量进行计算时,系统 A 和系统 B 除节流孔处以外其他部分介质流速大体相同,因此两系统各个流量下凝胶与水的系统压降差值也大致相当。

对于系统 B 来说,采用凝胶流体与采用水在压降与流量等宏观表现上差别不大,实验中可以用水来代替凝胶。这一结论建立在系统 B 节流孔直径很小,选用的凝胶流体 k 值、 n 值较小且密度与水相当的基础上,如果凝胶的 k 值、 n 值较高,或节流孔直径较大,导致沿程损失占整个系统流阻的主要部分,如系统 A,水和凝胶流体的宏观流阻特性就会有较大差异。

需要说明的是:凝胶流体具有“柱塞”式的流动方式,很难出现湍流流动。实际上若根据公式(22),系统 B 在节流孔处雷诺数已经超过了 2350,但笔者认为系统 B 内凝胶的流动仍是层流流动,即使在节流孔处局部出现湍流也会因为其后流速降低剪切变形

速率下降而迅速恢复层流流动。同时由于系统 A 采用层流计算的结果与实验值吻合良好,因此系统 B 在计算凝胶流动时也采用层流方式进行了计算。流态对局部阻力系数的影响,有可能造成系统 B 计算的误差,还需要搭建高压实验系统,做进一步的研究验证。

4 结 论

(1) 在通过直管流变特性实验得到凝胶流体准确本构方程的基础上,利用数值模拟方法对复杂凝胶管道输送系统进行计算,结果与实验值吻合良好;

(2) 凝胶流体在管道内流动呈现明显的“柱塞”式流动,管道内壁附近流体剪切变形速率大,粘性较低。管道中间的流体剪切变形速率很小,粘度很大;

(3) 凝胶流体通过节流孔后,流体大致分为两层流动,通过节流孔的流体形成内层“柱塞”,流速较高,在这层流体的带动下,外层流体也开始流动,形成了一个外层“环形柱塞”。经过一段时间的掺混,内层“柱塞”流体与外层“环形柱塞”流体完全融合,形成新的“柱塞”式流动;

(4) 如果凝胶输送系统内节流孔直径较大,或凝胶的 k 值、 n 值较高,沿程损失占整个系统流阻的主要部分,水和凝胶流体的宏观流阻特性就会有较大差异。如果系统内节流孔直径很小,局部损失占整个系统流阻的主要部分,且密度与水接近,则采用凝胶流体与采用水在压降与流量等宏观表现上差别不大,在输送系统流阻实验中可以用水来代替凝胶。

参考文献:

[1] 王宁飞,莫红军,樊学忠. 凝胶推进剂的发展及应用[J]. 含能材料,1998,6(3): 139-144.

- [2] YASUHARA W K, OLSON A M. Advanced gel propulsion controls for kill vehicles[R]. AIAA 93-2636.
- [3] HODGE K, CROFOOT T, NELSON S. Gelled propellants for tactical missile applications[R]. AIAA 99-2976.
- [4] KUKUSHIKIN V H. State and prospects of solid propellant rocket development[R]. AIAA 92-3872.
- [5] KUKUSHIKIN V H, IVANCHENKO A N. The pasty propellant rocket engine development[R]. AIAA 93-1754.
- [6] 刘梦威. 用于战术导弹的胶体推进剂[J]. 飞航导弹, 2002, (3): 49-53.
- [7] 符全军,杜宗昱,兰海平,等. UDMH/NTO 双组元凝胶推进剂的制备及性能研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 48-53.
- [8] 左博,张蒙正,张玫. 凝胶推进剂模拟液直圆管压降计算及误差分析[J]. 火箭推进, 2008, 34(1): 26-29.
- [9] 韩伟,单世雄,杜宗昱,等. 红烟硝酸/偏二甲肼凝胶双组元推进剂研制[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2009, 7(6): 38-41.
- [10] 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.
- [11] CHANGJIN Yoon, SEPHEN Heister, XIA Guo-ping, et al. Numerical simulation of gel propellant flow through orifices[R]. AIAA 2009-5045.
- [12] 邢宗文. 流体力学基础[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1991.

作者简介:



王 枫(1972-),男,在职博士研究生,高级工程师。研究方向:液体火箭发动机。通讯地址:西安市15号信箱11分箱(710100)。联系电话:029-85207062。E-mail: csc_6wangf@yahoo.com.cn