

凝胶推进剂直圆管中剪切速率 与表观粘性实验研究

左 博, 张蒙正

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 分析了直圆管中凝胶推进剂剪切速率和表观粘性及相关参数的关系, 研究了直圆管中凝胶推进剂剪切速率和表观粘性的实验研究方法, 利用物料管路测试系统进行了某型凝胶推进剂直圆管剪切速率与表观粘性实验研究。结果表明: 管路实验可以得到较大范围内凝胶推进剂剪切速率与表观粘性关系; 而且当剪切速率在 10^4 量级时表观粘度随剪切速率的增加基本不再变化。

关键词: 凝胶推进剂; 表观粘性; 剪切速率

中图分类号: V51

文献标识码: A

文章编号: (2007) 04-0012-04

Experimental investigation of the apparent viscosity and the shear rate of gelled propellant in straight round pipe

Zuo Bo, Zhang Mengzheng

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

Abstract: The relationship between the apparent viscosity/shear rate and the related experiment parameters was investigated. This experiment research focused on a special gelled propellant. The test results show the relationship between the apparent viscosity and shear rate could be obtained in large-scale parameter range. The results also indicate that the apparent viscosity decreases sharply as the shear rate increase. When the shear rate adds to 10^4 order of magnitude, the apparent viscosity does not change.

Key words: gelled propellant; apparent viscosity; shear rate

收稿日期: 2007-01-26; 修回日期: 2007-02-10。

作者简介: 左博 (1982—), 男, 硕士研究生, 研究领域为燃烧装置。

1 引言

凝胶推进剂属于非牛顿流体, 其在直圆管中的流动状态随着剪切速率的增加而呈现出剪切变稀的特点。对于牛顿流体, 剪应力与剪切速率成线性关系, 本构方程由动力粘度一项就可以确定; 而对于凝胶推进剂这样的非牛顿流体, 由于其物质结构的复杂性, 则需要 2-4 个物性参数来表示。

通常, 凝胶推进剂的流变特性采用流变仪测量^[1]。由于常用的流变仪测量的剪切速率低于 $1400(\text{s}^{-1})$, 而凝胶推进剂在液体火箭发动机管路中流动时的剪切速率大约在 $10^4 (\text{s}^{-1})$ 。同时, 流变仪测量的是静态粘性, 而在管路流动条件下, 粘性是动态的。因此, 需要在大范围剪切速率条件下进行凝胶推进剂剪切速率与表观粘性关系的深入研究。

2 实验原理

2.1 非牛顿流体管内流动的基本公式

文献[2]进行了凝胶推进剂管路流动特性的初步研究, 获得了剪切速率和表观粘性的关系以及流阻方程。设凝胶推进剂在管内流动满足下列条件: (1)粘性层流区; (2)恒定流动; (3)无壁面滑移。由粘性流体圆管层流的基本方程^[3]可得, 管壁剪应力和压降的关系:

$$\tau_w = \frac{\Delta PD}{4L} \quad (1)$$

该式适用于所有流体。

牛顿流体的管壁剪切速率:

$$\dot{\gamma}_{Rw} = \frac{8\nu}{D} = \frac{4q_v}{\pi R^3} \quad (2)$$

又, 粘性流体都适用的平均流速式:

$$\nu = \frac{R}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} f(\tau) \tau^2 d\tau \quad (3)$$

将上式改写为:

$$\frac{8\nu}{D} = \frac{4}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} f(\tau) \tau^2 d\tau \quad (4)$$

该式表明, 不论 $f(\tau)$ 取什么形式, 在管径和流量一定时, τ_w 就一定, 剪切应力的分布也一定, 这样, 公式 (4) 右侧仅为 τ_w 的函数, 即:

$$\frac{8\nu}{D} = F(\tau_w) \quad (5)$$

对于非时变粘性流体, 层流条件下, 在 $\Delta PD/4L$ 和 $8\nu/D$ 的坐标系中, 对同一种流体, 实点将落在同一条曲线上^[4]。

将 (4) 式两侧对 τ_w 求导, 并进行变换可得:

$$\dot{\gamma}_w = f(\tau_w) = \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \times \frac{d \ln(\frac{8\nu}{D})}{d \ln(\tau_w)} \right] \left(\frac{8\nu}{D} \right) \quad (6)$$

令:

$$n' = \frac{d \ln(\tau_w)}{d \ln(\frac{8\nu}{D})} \quad (7)$$

将 (7) 式代入 (6) 式可得:

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{d\nu}{d\tau} \right)_w = \frac{1+3n'}{4n'} \frac{8\nu}{D} \quad (8)$$

上式是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 (7) 式积分后可得:

$$\tau_w = k' \left(\frac{8\nu}{D} \right)^{n'} \quad (9)$$

再将 (8) 式代入 (9) 式可有:

$$\tau_w = k' \left(\frac{4n'}{1+3n'} \right)^{n'} (\dot{\gamma}_w)^{n'} \quad (10)$$

如果凝胶推进剂属于幂率流体, 并假设其本构方程为:

$$\tau_w = k(\dot{\gamma}_w)^n \quad (11)$$

比较 (10) 式和 (11) 式可得出:

$$n = n' \quad (12)$$

$$k = k' \left(\frac{4n'}{1+3n'} \right)^{n'} \quad (13)$$

式中, n 为流变指数; k 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ 。

2.2 凝胶推进剂物性的管路测量方法

由 (1) 和 (2) 式可见, 对于给定管长和管径的直圆管, 如果确定了管路中的流量和压降, 就可以计算出管路中的凝胶推进剂的剪切速率和表

观粘性。

直圆管中凝胶推进剂物性实验的步骤如下：

(1) 实测通过管路的凝胶推进剂流量 q_m 和相应的压降 ΔP ；

(2) 按照 (1) 式和 (2) 分别求出剪切应力 $\Delta PD/4L$ 和剪切速率 $8v/D$ ；

(3) 绘制双对数曲线 $\ln(\Delta PD/4L) \sim \ln(8v/D)$ (如图 1 所示)；

(4) 图 1 上直线的斜率即为 n' 值，再按照 (8) 式计算该点的壁面剪切速率 $\dot{\gamma}_w$ ；

(5) 由已得到的 $\tau_w = \Delta PD/4L$ ，按照 $\eta_w = \tau_w / \dot{\gamma}_w$ ，则可确定凝胶模拟液管内流动时的物性变化 $\eta_w \sim \dot{\gamma}_w$ ；

(6) 凝胶推进剂的流变指数 n 和稠度系数 k 可由 (12) 式和 (13) 式确定。

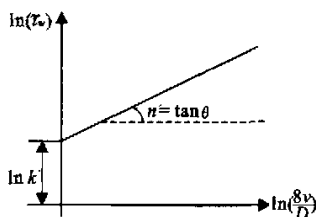
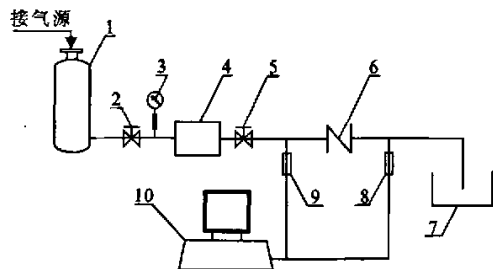


图 1 $\ln(\tau_w) \sim \ln(8v/D)$ 曲线

Fig.1 The curve of $\ln(\tau_w) \sim \ln(8v/D)$

2.3 实验系统-物料管路测试系统

实验系统及其组成如图 2 所示。



- 1-凝胶贮箱；2-截止阀；3-压力表；4-流量计；
5-截止阀；6-实验管路；7-接料箱；
8、9-压力传感器；10-数据采集系统

图 2 管路测试系统

Fig.2 The testing system of pipeline

3 实验结果及分析

使用图 2 所示系统，进行了某型凝胶推进剂直圆管流动特性研究。实验环境温度 16°C ，管径分别为 2mm、4mm 和 6mm 管长分别为 500 mm、1000 mm、1500 mm 和 2000 mm。实验中的被测管路水平置于两接头之间，通过压力传感器测压并输出该点压力值，采用非牛顿流体流量计测量凝胶推进剂的质量流量。实验考虑了凝胶推进剂的恢复时间问题，并在稳态流动时间段内进行测量。

实验结果发现，对于不同管径，实验得到的 n 和 k 是有差异的。将所有实验点计算整理成 η_w 和 $\dot{\gamma}_w$ 的关系。

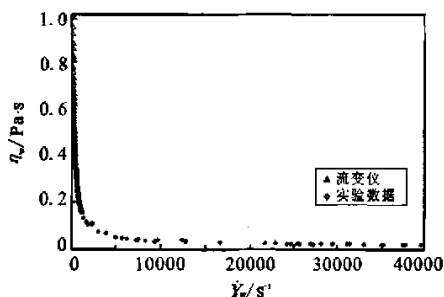


图 3 表观粘度与剪切速率关系

Fig.3 The relationship between the apparent viscosity and the shear rate

图 3 非常明显地展示了凝胶推进剂表观粘度的变化趋势：随着剪切速率的增加，表观粘度迅速减小。对于实验的凝胶推进剂，当剪切速率达到 $10^4 (\text{s}^{-1})$ 后，表观粘度几乎不再随剪切速率增加而减小，并趋向于一个恒定的值 $\eta_w \rightarrow \eta_\infty$ (η_∞ 称作极限牛顿粘度^[3])，从图 3 可得该型凝胶推进剂的极限牛顿粘度 $\eta_\infty \approx 0.021 (\text{Pa}\cdot\text{s})$ 。在温度 ($t = 16^\circ\text{C}$) 时，水的动力粘度 $\mu_{\text{水}} \approx 0.0012 (\text{Pa}\cdot\text{s})$ 、煤油的动力粘度 $\mu_{\text{煤油}} \approx 0.002 (\text{Pa}\cdot\text{s})$ ，该型凝胶推进剂的极限牛顿粘度为水动力粘度的 17 倍，为煤油动力粘度的 10 倍。

同样流量条件下，不同的管道直径中，凝胶

推进剂的流速不同, 剪切速率也不同 (见式 2)。实验得到的凝胶推进剂流变特性有助于研究凝胶推进剂在管内的流动状态, 并有助于管路和喷嘴的设计。

4 结束语

通过凝胶推进剂管路流动特性的理论分析, 研究了凝胶推进剂管路流动特性的实验研究方法, 进行了某型凝胶推进剂管路流动特性实验研究。通过实验发现:

(1) 凝胶推进剂的表观粘度随着剪切速率的增加而急剧减小;

(2) 对于本文研究的凝胶推进剂, 当剪切速率在 10^4 量级时出现了表观粘度随剪切速率增加基本不再变化, 并趋向于一个固定的极限牛顿粘度, 这一特点对于液体火箭发动机管路和喷注器的设计有所启示;

(3) 在低剪切速率段, 流变仪测得的剪切速率和表观粘度与管路得到的剪切速率和表观粘度是一致的 (如图 3 所示);

(4) 不同管径得到凝胶推进剂的流变指数 n 从 0.49 到 0.69, 稠度系数 k 为 $0.57 \sim 4.49 (\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$ 。

参考文献:

- [1] 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]. A-IAA2006-4573.
- [2] 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): 12-27.
- [3] 沈崇棠、刘鹤年. 非牛顿流体力学及应用[M]. 北京, 高等教育出版社, 1987.

(编辑: 王建喜)

(上接第 11 页)

参考文献:

- [1] 宋文艳. 超燃冲压发动机前体/进气道和隔离段气动设计[J]. 西北工业大学学报. 2004, 22(1): 96-99.
- [2] 韩兆林, 王强. 双模态冲压发动机进气道/隔离段流场的数值研究 [J]. 航空动力学报. 2006, 21(1): 31-35.
- [3] 肖隐利, 陈亮, 宋文艳. 超燃冲压发动机隔离段流场数值模拟[J]. 飞机设计. 2005, (3): 41-44.
- [4] 王成鹏. 带进气道的隔离段流场实验研究与数值模拟 [J]. 推进技术. 2004, 25 (1): 27-31.
- [5] 徐华舫. 空气动力学基础[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.

(编辑: 王建喜)