

凝胶推进剂模拟液直圆管压降 计算及误差分析

左 博, 张蒙正, 张 玫

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了建立凝胶推进剂管路流动模型, 分析了凝胶推进剂模拟液在直圆管内的流动特性, 并对 3 种模拟液在第二和第三流动区内管路流阻的计算值与试验值进行了对比分析, 结果表明: 在第二流动区, 用幂律流变方程推导的压降公式计算值与试验值有较好的一致性; 在第三流动区, 可以近似用牛顿流体压降公式计算管路流阻。此外还分析了压降的误差传播系数, 结果表明流变指数和管径的误差传播系数最大。

关键词: 凝胶推进剂; 直圆管; 压降; 误差分析

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2008) 01-0026-04

Calculation and error analysis of pressure drop of gelled propellant simulants in the pipe

Zuo Bo, Zhang Mengzheng, Zhang Mei

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

Abstract: In order to set up the fluid model of the gelled propellants, the fluid characteristics of gelled propellant in the straight pipe were analyzed. The calculated pressure drop results of 3 type gelled propellant simulants were compared through experiments. The comparison indicates: the pressure drop within the second fluid region can be calculated by the equation deduced from power law rheological equation of state. The loss in the third fluid region can be calculated approximately by the Newtonian fluid pressure loss equation. The error diffusing coefficient was analyzed, the error diffusing coefficient of power law index and pipe diameter have the most important effect on pressure drop calculating value.

Key words: gelled propellants; straight pipe; pressure drop; error analyzing

收稿日期: 2007-09-26; 修回日期: 2007-12-05。

作者简介: 左博 (1980—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机系统设计。

1 引言

由于凝胶推进剂兼具了液体推进剂和固体推进剂的优点, 因此受到国内外研究机构的广泛关注^[1-4]。但是, 凝胶推进剂具有的剪切变稀、粘弹性、触变性等复杂的流变特性, 增加了凝胶推进剂流动特性研究的难度。

管路是液体火箭发动机的基本构件, 深入分析凝胶推进剂在管路中流动的压力损失与相关因素的关系, 对于建立准确的凝胶推进剂管路流动模型至关重要。大多数凝胶推进剂属于剪切变稀的幂律流体^[5], 在管内流动时, 压降和流量除与管径、管长、介质密度等结构和物性参数有关外, 还与凝胶推进剂的流变特性参数 (如: 流变指数、稠度系数、极限剪切粘度等) 密切相关。

2 计算方法

文献 [5] 分析了凝胶推进剂的流变特性, 提出依据凝胶推进剂的剪切速率将流变图 (表观粘度随剪切速率变化关系图) 依次划分为第一流动区、第二流动区和第三流动区; 并且提出在第二流动区内可以用幂律性本构方程推导出的流阻方程计算管路压降, 在第三流动区采用牛顿流体的流阻方程计算管路压降。文献 [6] 对幂律性凝胶推进剂管内流动时的流阻方程进行了详细的推导, 其式如下:

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

在第三流动区内, 凝胶推进剂的表现粘度近似为常数, 其压降可采用牛顿流体的流阻方程:

$$\Delta p = 8q_v \mu l / \pi R^4 \quad (2)$$

上式为 Hagen-Poiseuille 方程的变换形式, 其中动力粘度 μ 可采用第三流动区的极限剪切粘度 (也称为极限牛顿粘度) η_∞ 进行压降计算。

而质量流量 q_m 为:

$$q_m = \rho q_v \quad (3)$$

其中, q_v 为体积流量, m^3/s ; n 为流变指数; k 为

稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; η_∞ 为极限剪切粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; d 为直圆管管径, mm ; l 为管长, mm 。

3 计算值与试验测量值对比

凝胶推进剂模拟液直圆管液流试验系统见文献 [7], d 为 2、4、6、8mm, l 为 500、1000、1500、2000mm, 选择 3 种凝胶推进剂模拟液进行液流试验, 同时测量了管路的压降、流量和凝胶推进剂模拟液的密度等参数。此外还采用流变仪测量了 3 种模拟液剪切速率与剪切粘度的关系, 测量的剪切速率范围为 $1 \sim 1400 \text{s}^{-1}$ 。依据文献 [7] 所提的研究方法, 通过管路试验获得剪切速率在 $1200 \sim 60000 \text{s}^{-1}$ 范围内剪切速率与表观粘度的关系, 通过分析分别得到 3 种模拟液的三个流动区的范围, 第二流动区向第三流动区过渡的转折剪切速率 $\dot{\gamma}_c$ 以及凝胶推进剂模拟液的其它的物性参数见表 1。

表 1 凝胶推进剂模拟液的流变特性参数
Tab.1 The rheological characteristic parameter of gelled propellant stimulants

模拟液	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	n	$k/(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	$\dot{\gamma}_c/\text{s}^{-1}$	$\eta_\infty/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
1# 凝胶	15	0.2240	41.65	31000	0.010
2# 凝胶	15	0.1976	47.73	24000	0.019
3# 凝胶	19	0.1744	91.19	29000	0.011

对三种模拟液, 分别在其对应的第二和第三流动区内按幂律模型和牛顿流体模型分别进行压降计算, 结果表明, 除个别异常试验点外, 3 种模拟液在各自的第二流动区内以各自的物性参数按公式 (1) 计算的压降值均与试验值有很好的的一致性, 试验测量值和计算结果相对误差在 5% 之内; 在各自的第三流动区按公式 (2) 计算的流阻也与试验值有较好的一致性, 试验和计算结果相对误差范围为 5%~10%。其中, 长管的误差小于短管的误差, 这与试验测量结果有关。1# 号模拟液在第二流动区和第三流动区内部分直圆管的 Δp 计算值和试验测量值对比见图 1 和 2 所示。

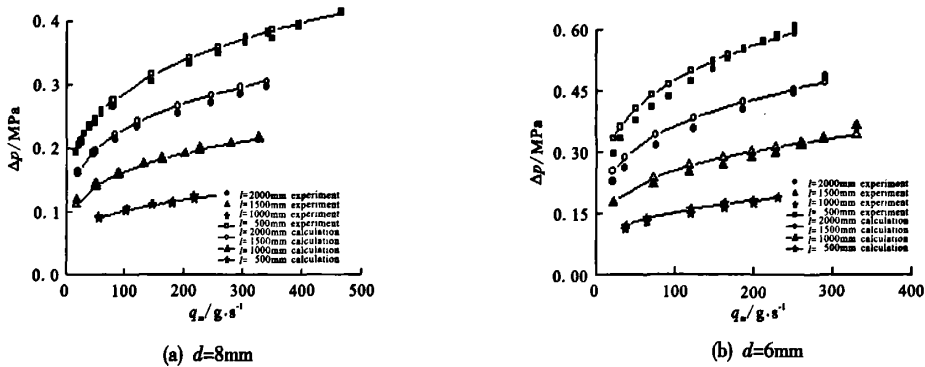


图1 第二流动区内计算值与试验测量值的对比
Fig.1 The experimental and calculation values comparison of the second fluid region

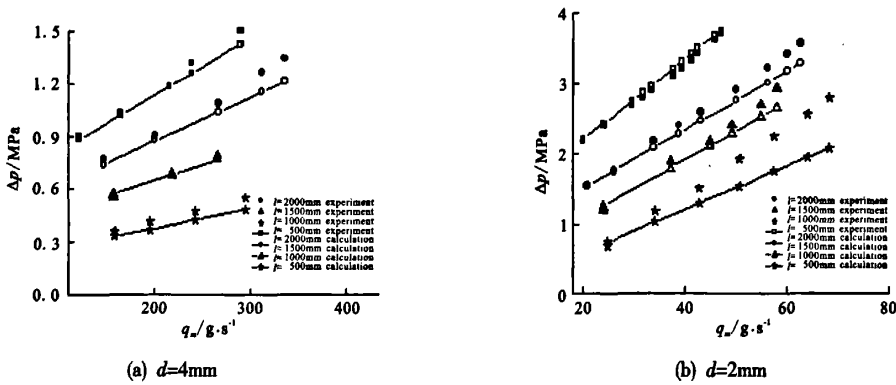


图2 第三流动区内计算值与试验测量值的对比
Fig.2 The experimental and calculation values comparison of the third fluid region

值得一提的是，通过流量计算幂律性凝胶推进剂模拟液压降的方法（公式（1））也可以反过来使用，即通过试验测量压降计算流量。试验中，同时测量了管路的流量和压降，但试验和计算发现，通过压降计算流量的误差要大于通过流量计算压降的误差，原因有待进一步深入分析。

4 误差分析

鉴于凝胶推进剂沿直圆管流动的 Δp 不仅与 d 、 l 等结构参数有关，还与 n 和 k 有密切关系，所以需分两部分对 Δp 计算值的误差来源及传递关系进行详细分析。

(1) 假设 n 和 k 准确，考察 d 、 l 和 q_v 的测量误差对 Δp 计算值的影响。

将公式（1）两侧取自然对数：

$$\ln \Delta p = \ln \left[2^{3n+2} k \pi^n \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \right] + \ln l + n \ln q_v - (3n+1) \ln d \quad (4)$$

然后就 Δp 与 l 、 q_v 和 d 的函数关系，对（4）两侧全微分得：

$$\frac{d\Delta p}{\Delta p} = a_l \frac{dl}{l} + a_{q_v} \frac{dq_v}{q_v} - a_d \frac{dd}{d} \quad (5)$$

式中， a_l 、 a_{q_v} 和 a_d 分别为 d 、 l 和 q_v 对 Δp 的误差传播系数。

$$a_l = 1 \quad (6)$$

$$a_{q_v} = n \quad (7)$$

$$a_d = 3n+1 \quad (8)$$

对于幂律流体，因 $0 < n < 1$ ，故 d 、 l 和 q_v 对 Δp 误差传播系数从大到小排列为：

$$a_d > a_l > a_{q_v} \quad (9)$$

由 (9) 式可见, d 的测量误差对沿程压降计算值的影响最大, l 次之, q_r 的测量误差对压降计算值的影响最小。 d 、 l 和 q_r 的误差传播系数随 n 的变化见表 2。

表 2 d 、 l 和 q_r 对 Δp 的误差传播系数

Tab.2 The error diffusing coefficient of d 、 l and q_r to Δp

模拟液	n	误差传播系数		
		a_d	a_l	a_{q_r}
1# 凝胶	0.2240	1.672	1.00	0.2240
2# 凝胶	0.1976	1.5928	1.00	0.1976
3# 凝胶	0.1744	1.5232	1.00	0.1744

由表 (2) 可见, d 的测量误差将会给 Δp 带来 1~2 倍的计算误差, d 的准确与否对 Δp 影响较大。

(2) 假设 d 、 l 和 q_r 准确, 考察 n 和 k 对 Δp 计算值的影响。

根据 Δp 与 n 和 k 的函数关系, 对公式 (1) 取对数再全微分得:

$$\frac{d(\Delta p)}{\Delta p} = a_n \frac{dn}{n} + a_k \frac{dk}{k} \tag{10}$$

$$a_n = n \ln \left(\frac{1+3n}{4n} \dot{\gamma}_{RW} \right) - \frac{n}{1+3n} \tag{11}$$

$$a_k = 1 \tag{12}$$

$$\dot{\gamma}_{RW} = 32q_r / \pi d^3 \tag{13}$$

其中, $\dot{\gamma}_{RW}$ 为牛顿剪切速率, s^{-1} ; a_n 和 a_k 分别为 n 和 k 对 Δp 的误差传播系数。在管路试验条件下, $\dot{\gamma}_{RW}$ 的变化范围为: $10^2 \sim 10^5 s^{-1}$, 与之相应的 n 的误差传播系数 a_n 的变化根据公式 (11) 确定, 结果见表 3 所示。

由表 3 可见, 随着 $\dot{\gamma}_{RW}$ 的增加, n 的误差传播系数 a_n 逐渐增大。在高牛顿剪切速率时, 当 n 出现微小的误差, 传递到沿程压降 Δp 处将被放大 2~3 倍左右。这就对高牛顿剪切速率时 n 的测量精度提出了更高的要求。另外, 从表 3 还可以看出, 随着 n 增大, a_n 也增大。

表 3 a_n 随 n 和 $\dot{\gamma}_{RW}$ 的关系

Tab.3 The changing relation of the a_n with n and $\dot{\gamma}_{RW}$

n	$\dot{\gamma}_{RW} / s^{-1}$					
	1×10^2	1×10^2	1×10^2	1×10^2	1×10^2	1×10^2
0.2240	0.52	1.04	1.91	2.07	2.43	2.58
0.1976	0.47	0.92	1.70	1.83	2.15	2.29
0.1744	0.42	0.82	1.51	1.63	1.91	2.03

5 结论

通过对 3 种模拟液在第二、三流动区内压降的测量值与计算值对比分析, 以及对管路流阻的误差传递分析, 结果表明: 在第二流动区采用幂律模型流变方程推导出的流阻公式可以获得比较理想的结果, 在第三流动区, 可以采用牛顿流体的流阻公式近似计算管路流阻; 流变指数和管径的误差对管路流阻影响较大, 计算管路流阻时, 流变指数和管径的准确测量非常重要。

参考文献:

[1] Jens von Kampen. Klaus Madlener and Helmut K Ciezki. Characteristic Flow and Spray Properties of Gelled Fuels with Regard to the Impinging Jet Injector Type [R]. A-IAA2006-4573.

[2] Yair Solomon, Benveniste Natan and Yachin Cohen. Combustion of Gel Fuels Based on Organic Gellants[R]. AIAA 2006-4565.

[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.

[4] 符全军, 林宗翌, 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.

[5] 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, 34(5): 1-6.

[6] 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): 12-18.

[7] 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.

(编辑: 侯 早)