

凝胶推进剂直圆管流动特性探讨

张蒙正, 杨伟东, 孙彦堂, 王 玫
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 分析了非牛顿流体的类型, 认为在液体火箭发动机中有应用前景的凝胶推进剂类型应是有屈服应力的牛顿流体或者幂律流体, 关键在于胶凝剂。研究了直圆管中凝胶推进剂的流动特性, 依据剪切速率可以将凝胶推进剂在直圆管中的流动分为三个区域。在第二流动区中, 可以用幂律流体推导的流阻方程计算管路流阻; 在第三流动区, 可以近似用牛顿流体流阻方程计算流阻。

关键词: 凝胶推进剂; 流动模型; 流动特性; 直圆管

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: (2007) 05-0001-06

Discussion on gelled propellant fluid characteristics in straight round pipe

Zhang Mengzheng, Yang Weidong, Sun Yantang, Wang Mei
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The rheological characteristics and classification of non-newtonian fluid were discussed. The newtonian fluid with yield stress and power-law model fluid have application potential in liquid rocket engines. The key to produce the applicable gelled propellant is the gellant. On the basis of gelled propellant fluid property research, the gelled propellant fluid in straight round pipe can be regarded as composition of three areas by different shear rates. The pressure loss of pipe within the second fluid area can be calculated by the equation deduced from power law model. The loss in the third fluid area can be calculated approximately by the newtonian fluid pressure loss equation.

Key words: gelled propellant; fluid model; fluid characteristic; straight round pipe

收稿日期: 2007-03-05; 修回日期: 2007-06-10。基金项目: 国防基础科技项目。

作者简介: 张蒙正 (1964—), 男, 研究员, 研究领域为喷雾燃烧。

1 引言

高能能源一直是火箭发动机、航空发动机、冲压发动机和鱼雷发动机等各类动力装置始终如一的目标。含金属颗粒并凝胶化是提高液体推进剂性能最重要的途径,也是化学推进剂的发展方向之一。就流体行为而言,凝胶推进剂属于非牛顿流体,其物理和化学性质与牛顿型流体有较大的差异。凝胶推进剂的流变和流动特性是其在动力装置应用中必须研究的关键问题,它影响到雾化、混合和燃烧特性,涉及到动力装置的设计理念。本文简述凝胶推进剂的特性及动力装置应用研究方面应关注的问题,介绍了模拟液直圆管流动特性实验研究的初步结果,并进行了讨论。

2 凝胶推进剂特性及应关注的主要问题

凝胶推进剂是液体推进剂中均匀混入固体颗粒(金属或非金属),再添胶凝剂使固体粒子悬浮于其中而生成的混合物。就目前已有的凝胶体系结构而言,大致可以分为四类:

(1) 通过静电和范德华力等较弱的相互作用形成的,包括胶凝剂在内的,规则并有序排列的层状凝胶体系;

(2) 通过共价键结合,胶凝剂呈无序结构的化学凝胶体系;

(3) 通过物理堆积形成的、局部有序的高分子物理凝胶体系;

(4) 以微纳米颗粒堆积而形成的物理凝胶体系。

迄今为止,人们研究过的凝胶推进剂主要集中在第三、第四类型。这两类凝胶推进剂均属于非牛顿流体。依据在简单剪切流中非牛顿流体的粘度函数是否和剪切持续时间相关,可以把非牛顿流体分为非时变性非牛顿流体和时变性非牛顿流体^[1]。前者的剪切应力仅与剪切变形速度(剪切速率)有关,即粘度函数仅与剪切应力有关,包括有屈服点的剪切变稀流体(Herschel-Bulkley

流体)、有屈服点的牛顿流体(Bingham 流体)及剪切变稠流体等。时变性非牛顿流体的粘度函数不仅与剪切速率有关,而且与剪切持续时间有关,可分为触变性(在稳定的剪切速率作用下粘性减小)、震凝性(在稳定的剪切速率作用下粘性增加)以及粘弹性流体。如果依据流变学特性,可以简单将牛顿流体和非牛顿流体划分,如图1^[2]所示。

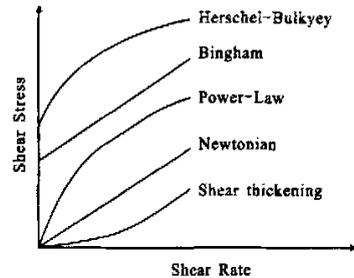


图1 流体的剪切应力与剪切速率关系

Fig.1 Shear stress-shear rate behavior of fluids

在非牛顿流体的流动特性分析中,不同的流体是用不同控制方程表示的。已经提出的不考虑流体的屈服应力,非时间依赖的非牛顿流体、本构方程及其主要物性参数列在表1^[2]中;考虑屈服应力,具有非时间依赖的流体、本构方程及其主要物性参数列在表2^[2]中。

就表1和表2所列的本构方程而言,不难看出,从形式上看,Herschel-Bulkley流体和Ponslinki流体可以分别认为是幂定律流体和Carreau-Yasuda流体考虑屈服应力的型式;Lapasin-Oriol-Esposito流体是Cross流体考虑屈服应力的型式相似;Bingham流体可以看作是附加屈服应力的牛顿流体。另一方面,Cross流体、Carreau-Yasuda流体、Bingham流体、Lapasin-Oriol-Esposito流体和Ponslinki流体也可以看成是牛顿流体的修正表示。

本构方程是非牛顿流体的流变特性的反映,通过本构方程,可以获得流体内部结构的信息;将本构方程与流动方程联立,可以研究凝胶推进剂的动量、热量和质量传递等一系列问题。表1和表2所列的本构方程中分别含有 η_0 ($\dot{\gamma}=0$ 时的粘

度)、 η_∞ ($\dot{\gamma}=\infty$ 时的粘度)、 τ_0 (屈服应力)、 λ (特征时间)、 k (稠度系数) 及 n (流动指数) 等物性参数。牛顿流体的本构方程是牛顿粘性定律, 参数单一, 且为线性方程。非牛顿流体没有

一个统一的本构关系, 参数多且为非线性。这将导致凝胶推进剂液体动力系统中管路、阀门及泵等组件中的流动特性计算和分析比液体推进剂要困难的多。

表 1 不考虑屈服应力的非时间依赖非牛顿流体

Tab.1 Constitutive equations of time-independent non-newton fluids without yield stress

| 流体 | 本构方程 | 物性参数 |
|--------------------------------------|--|--|
| Ostwald-de Waele 流体 (power-law)流体 | $\tau=k\dot{\gamma}^n$ | k, n |
| Cross 流体 | $\tau=\eta_\infty \dot{\gamma} + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty) \dot{\gamma}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}}$ | η_0 ($\dot{\gamma}=0$ 时的粘度) η_∞ ($\dot{\gamma}=\infty$ 时的粘度) λ (特征时间) |
| Carreau-Yasuda 流体 | $\tau=\eta_\infty \dot{\gamma} + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty) \dot{\gamma}}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(1-n)/2}}$ | $\eta_0, \eta_\infty, \lambda$ |

表 2 考虑屈服应力的非时间依赖流体非牛顿流体

Tab.2 Constitutive equations of time-independent non-newton fluids with yield stress

| 流体 | 本构方程 | 物性参数 |
|----------------------------|---|--|
| Herschel-Bulkley 流体 | $\tau=\tau_0 + k\dot{\gamma}^n$ | τ_0 (屈服应力), k, n |
| Bingham 流体 | $\tau=\tau_0 + \eta_\infty \dot{\gamma}$ | τ_0 (屈服应力), η_∞ |
| Casson 流体 | $\tau = \tau_0^{1/2} + \eta_\infty^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}$ | τ_0 (屈服应力), η_∞ |
| Lapasin-Oricri-Esposito 流体 | $\tau=\tau_0 + \eta_\infty \dot{\gamma} + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty) \dot{\gamma}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^n}$ | τ_0 (屈服应力), $\eta_0, \eta_\infty, \lambda$ |
| Ponslinski 流体 | $\tau=\tau_0 + \eta_\infty \dot{\gamma} + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty) \dot{\gamma}}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(1-n)/2}}$ | τ_0 (屈服应力), $\eta_0, \eta_\infty, \lambda, n$ |

从文献研究结果^[3-5]可以推断, 胶凝剂的成分、含量以及胶凝工艺决定了凝胶推进剂的凝胶体系结构, 影响着凝胶推进剂的物理和化学性质, 决定了其本构方程, 也影响到生成的凝胶推进剂在液体动力系统中的应用前景。就液体动力系统而言, 最理想的凝胶推进剂应是有屈服应力的牛顿流体 (Bingham 流体), 或者是 Herschel-Bulkley

流体。它们的共性在于没有施加屈服应力时, 推进剂是处于凝固的胶体状态 (“静凝”), 当施加一定的屈服应力后, 推进剂粘性随剪切速率迅速减小, 并像液体推进剂一样流动 (“动不胶”)。这种特性有利于改善动力装置的贮存、使用及安全性 (“易管理”)。同时, 本构方程简洁, 而且剪切速率的应用范围比较宽。

3 直圆管中流动特性实验结果及讨论

鉴于实际推进剂雾化和流动实验带来的安全、污染及实验代价等一系列问题,与牛顿型流体流动与雾化研究相似,大量的凝胶推进剂的流动和雾化研究也是用模拟液进行的,而水凝胶模拟液是最普遍的一种。不同研究者实验的水凝胶的物性参数见表3^[2]。

表3 凝胶推进剂流变特性参数

| 模拟液 | 稠度系数 Pa·s ⁿ | 流动指数 | 剪切速率/s ⁻¹ |
|-----|---------------------------|-----------|----------------------|
| 水凝胶 | 4.33 | 0.49 | 100~50000 |
| 水凝胶 | 20~130 | 0.27~0.42 | 0.001~2000 |
| 水凝胶 | 17~19 | 0.41 | 1~300 |

与牛顿型流体不同的在于,模拟液的流变学特性是非常讲究的,模拟液的研制有严格要求。模拟液与实际凝胶推进剂应属于同一流体,粘性随剪切速率的变化关系接近(即 n 和 k 值接近),表面张力和密度相近。即使如此,实验得到的结果仍需要用实际推进剂进行修正。

3.1 流阻方程及物性测量

在流动为轴对称、不可压缩流、层流、等温定常稳定流动、没有体力作用于流体、不考虑壁面滑移、忽略流动过程中的能量损失和幂定律模型等条件下,文献[6]推导出的直圆管中非牛顿流体的流阻方程为:

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

或者,压头损失:

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

式中, Δp 为压降; L 为管长; D 为管径; Q 为体积流量; u_m 为平均流速; ρ 为密度。

本构方程中的 n 和 k 值直接影响到其在管路

中的流阻和流速分布。获得凝胶推进剂的本构方程 n 和 k 常用的方法是通过流变仪测量。但流变仪测量的范围有限,一般情况下,测量的剪切速率小于 1400s^{-1} 。液体动力系统中,流动的剪切速率通常均远大 1400s^{-1} 。文献[7]提出了直圆管中凝胶推进剂模拟液表观粘性与剪切速率的实验研究方法和步骤。通过测量直圆管中凝胶推进剂的流量、压降,分别采用公式(3)和公式(4)计算管壁处的剪应力和剪切速率,进而求出物性参数 n 和 k 。

$$\tau_w = \frac{\Delta p D}{4L} \quad (3)$$

$$\gamma_w = \frac{8v}{D} = \frac{4q_m}{\pi R^3} \quad (4)$$

式中, τ_w 为管壁处的剪切应力; γ_w 为管壁处的剪切速率; R 为直圆管半径; q_m 为质量流量。

表观粘性 η_a 定义为壁面处的剪切力与剪切速率的比值,并由下式决定:

$$\eta_a = \frac{R\Delta p/2L}{\gamma_w} \quad (5)$$

而直圆管中凝胶推进剂的流动速度分布为:

$$\frac{u}{u_m} = \frac{1+3n}{1+n} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (6)$$

3.2 模拟液实验结果及讨论

针对某型氧化剂和某型燃料,综合考虑密度和粘性特性,研制了三种水凝胶模拟液,并分别进行了直圆管流动实验。水凝胶模拟液的密度范围为 $700\sim 1300\text{kg/m}^3$, n 和 k 值与表3所列的接近。实验系统见参考文献[7],实验件的管径为 $2\sim 10\text{mm}$,管长 $500\sim 2000\text{mm}$ 。采用压力传感器测压,采用非牛顿流体流量计测量凝胶模拟液质量流量。实验考虑了模拟液的恢复时间和实验件的管长修正,并在稳态流动时间段内进行测量。三种模拟液的测量结果相似,其中一种模拟液的测量结果见图2。实验发现,对于相同模拟液,流变仪的测量结果与直圆管实验结果均有一定差异。作为参考,流变仪测量的结果也标在图2中。

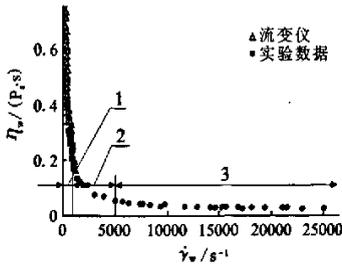


图 2 凝胶模拟液壁面表观粘度与剪切速率 ($\eta_w \sim \gamma_w$) 关系
Fig.2 Relationship between the apparent viscosity and the shear rate ($\eta_w \sim \gamma_w$)

三种模拟液的实验结果表明:

(1) 当剪切速率小于某一值时, 模拟液的表现粘度均随剪切速率的增加几乎呈线性急剧减小; 之后, 随着剪切速率的增大, 模拟液表现粘性继续减小, 两者的关系近似幂律关系; 当剪切速率增大到一定值后, 随着剪切速率的进一步增大, 表现粘性的减幅变得很小, 并趋于某一极限值。对于图 2 所示的模拟液, 当剪切速率达到 $5000s^{-1}$ 后, 表现粘度几乎均不再随剪切速率增加而减小, 趋于一个恒定值。

(2) 依据剪切速率和粘性的变化关系, 可以依据剪切速率将流动区域依次分为三个流动区 (如图 2 所示)。在第一流动区, 表现粘度与剪切速率几乎呈线性关系。在第二流动区, 表现粘度与剪切速率呈指数关系, 该区为非牛顿流区域。在第三流动区, 随着剪切速率的增加, 表现粘度几乎不再减小, 该区可以看成是牛顿流动区。

(3) 对实验数据进行分析, 结果表明, 在第二流动区内, 采用简单的幂律模型推导的流阻公式 (公式 1) 计算的流阻与实验结果有很好的一致性, 相对误差在 10% 以内。而在第三流动区, 采用牛顿型流体流阻公式计算的流阻与实验结果非常接近。

(4) 三种模拟液的 n 和 k 不同, 表现粘性极限值也不同。这说明不同的胶凝剂及其含量对模拟液物性的影响。进而也说明, 如果真正掌握规律, 符合需求的液体动力装置需求的凝胶推进剂是可以恰当工艺“生成”的。

模拟液的实验中同时又表明:

(1) 从公式 (4) 可见, 壁面剪切速率取决于流量和管径。同样流量条件下, 不同的管道直径, 凝胶推进剂的流速不同, 剪切速率不同, 于是推进剂的粘性就不同。这种特性在动力装置部件设计中如何有效应用?

(2) 参考文献 [7] 讨论的管路实验可以获得凝胶推进剂的壁面处的剪切速率与表观粘性之间的关系。实验发现, 不同的管径反算出的凝胶推进剂模拟液的 n 和 k 值是有差别的, 同时实验获得的表现粘性在多大程度上代表了凝胶推进剂的真实特性尚待深入研究。图 3 是理论计算的不同 n 值条件下凝胶推进剂在直圆管中流态分布。由图可见, n 值对管路中的流速分布影响是较大的。这样就导致一个问题, 对于实际的凝胶推进剂, 流变仪难以获得较大的剪切速率, 而管路实验得到的是平均的壁面处的剪切速率和表观粘性, 如何获得凝胶推进剂比较准确的物性参数?

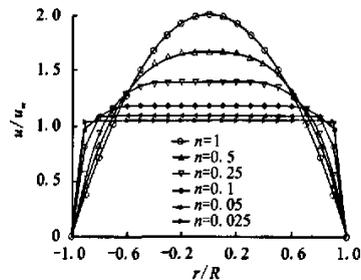


图 3 幂律流体相对速度随流动指数 n 的变化曲线
Fig.3 Relationship between n and the average velocity of power fluid

(3) 公式 (1) 是对一般非牛顿流体, 基于幂律模型推导推出的流阻方程。从方程推导的条件、过程及管路实验结果可见, 在不存在表面滑移问题时, 在第二流动区用公式 (1) 计算管路流阻在工程估算上是可以接受的。由图 3 所示, 由于凝胶推进剂存在比较厚的附面层, 故管路表面粗糙度对流阻的影响可能要小的多。但问题在于采用幂律模型, 如何界定模型的适用范围。或者说, 如果采用流变仪测量推进剂物性, 当流变仪测量的剪切速率范围位于第一流动区时, 得到的 n 和 k 值给流阻等其它参数计算会带来多大的影响。

(下转第 17 页)

继续增大涡轮泵转子偏心距对其分岔特征进行研究。由图 6 中 (e) 和 (f) 所示的偏心距为 0.5cm 时涡轮泵转子的分岔图可知, 当转子的转速为 0~1 krad/s 时, 转子的弯曲振动与扭转振动保持同步, 其耦合振动作用并不明显; 当转子的转速为 1~10krad/s 甚至更高时, 涡轮泵转子发生剧烈振动, 产生弯扭耦合共振现象。在速度变化的过程中, 涡轮泵转子经历了同步周期运动-概周期运动, 并有进入混沌状态的可能。由于涡轮泵转子的工作转速在弯扭耦合共振区内, 所以如果转子在此种状态下工作, 其稳定性将受到严重的影响甚至遭到破坏。

4 结论

本文根据实际涡轮泵转子建立模型, 通过对其进行弯扭耦合振动动力学特征的数值仿真与分岔特征研究得到如下结论: 涡轮泵转子的弯扭耦合振动相互影响, 表现出多个复杂的频率成分;

涡轮泵转子在工作转速下的运动为概周期运动, 有潜在的动力不稳定因素存在; 偏心距是涡轮泵转子弯扭耦合振动的重要因素, 偏心距越大, 转子的弯扭耦合振动越明显; 支撑对涡轮泵转子的振动有一定的抑制作用; 涡轮泵转子在工作转速下的振动趋势是平稳的, 即转子工作在一阶临界转速之下。

参考文献:

- [1] 雷世东, 袁小阳, 朱均, 等. 火箭发动机涡轮泵转子系统的动力学设计[J]. 振动工程学报. 2004, 17: 190-191.
- [2] 郑继坤, 吴建军. 氢氧火箭发动机高速氧涡轮泵转子动力学特性研究[J]. 导弹与航天运载技术. 2005, (5): 278-280.
- [3] 钟一涛, 何衍宗, 王正, 等. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.

(编辑: 王建喜)

(上接第 5 页)

4 结束语

动力系统中具有应用价值的凝胶推进剂体系应是 Bingham 流体或者有屈服点的剪切变稀型非牛顿流体。研究凝胶推进剂在管路中流动问题, 首先需要判定凝胶推进剂的类型, 并确定其本构方程; 其次, 在于获得本构方程的相关物性参数 (k 、 n 等)。对于实际推进剂, 最好应用较高剪切速率测量范围 (大于 $5000s^{-1}$) 的流变仪或者通过管路实验, 并确保测量范围已经进入到第二或者第三流动区。

凝胶推进剂模拟液管路实验提供了诸多相关的流变和流动信息, 也提出了更多的问题。如何利用管路实验呈现出的凝胶推进剂的流动特性? 如何准确确定凝胶推进剂的特性? 更重要的是如何“生成”需要的“静凝、动不胶和易管理”的凝胶推进剂?

参考文献:

- [1] 沈仲堂, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [2] Natan Benveniste, Rahimi Shai. The status of gel propellants in year 2000 [A]. Combustion of Energetic Materials [C]. 2001, 172-194.
- [3] Rahimi Shai, Hasan Dov, Peretz Arie, et al. Preparation and characterization of gel propellants and simulants[R]. AIAA 2001-3264.
- [4] 符全军, 林宗罡. UDMH/NTO 双组元凝胶推进剂的制备及其性能研究[J]. 火箭推进, 2006, (1): 48-53.
- [5] 刘凯强, 屈育龙. 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, 2006, 26(4): 23-26.
- [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试验研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(4): 12-15.

(编辑: 马杰)