

凝胶 DT-3 推力器的初步探索

葛明和, 李 慧

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 研究了凝胶 DT-3 的流变特性、流量特性, 利用凝胶 DT-3 推力器试验件进行了热试车。结果表明, 凝胶 DT-3 在试验温度范围内表现出剪切稀化的非牛顿流体特性; 温度、压降和几何结构对凝胶 DT-3 的流变特性有明显影响; 适当增加毛细管喷注器直径有利于凝胶 DT-3 的流动及雾化; 试验件点火工作正常, 室压稳定, 比冲性能为液体 DT-3 的 90%。

关键词: 非牛顿流体; 凝胶推力器; 流变特性

中图分类号: V433

文献标识码: A

文章编号: (2010) 02-0010-06

Investigation of gelled DT-3 thruster

Ge Minghe, Li Hui

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: Rheological and flowing characteristics of gelled monopropellant DT-3 have been investigated. According to the hot tests results, gelled monopropellant DT-3 is a kind of shear thinning non-Newtonian fluid in the range of the experimental temperatures. Temperature, pressure drop and geometric structure have effects on the rheological characteristics of gelled monopropellant DT-3. Properly increasing of injector diameter can get better flowing and spray characteristics for the gelled monopropellant. Hot tests show that specific impulse of experimental thrusters is lower than that of liquid DT-3.

Key words: non-Newtonian fluid; gelled propellant thruster; rheological characteristics

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2010-01-20。

作者简介: 葛明和 (1976—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机推力室设计。

0 引言

由于凝胶推进剂兼具固体推进剂和液体推进剂的优点,既能像固体推进剂一样贮存,又具有液体推进剂一样的冲量特性,因此国内外众多研究人员对凝胶推进剂进行过多方面研究。单组元凝胶推进剂将氧化剂和燃料结合于同一体系(以分子间和分子内两种结合方式),避免了双组元凝胶需分别贮存的缺点。美国大西洋公司申请了阿科凝胶专利,该单组元凝胶推进剂经小发动机试车取得很好效果;后来的研究人员研究过用于水下推进系统、宇宙飞船动力等多用途的单组元凝胶的配方^[1]。俄罗斯研制成功了粘度为200Pa·s的凝胶推进剂,成功进行了可变推的单组元凝胶推进剂发动机试车,现已进入试飞阶段^[2]。国内有关研究人员也对凝胶推进剂各方面进行了研究,包括凝胶剂的选择、凝胶制备工艺、贮存、流动、流变特性及热试车等^[3-7]。

DT-3 是我国研制的单组元液体推进剂,其冰点高于无水肼,环境适应性好,在单组元轨、姿控发动机方面应用较广,将 DT-3 凝胶化,可以提高其安全性并方便贮存。

本文在总结国内外单组元凝胶推进剂研究成果的基础上,初步探索了凝胶 DT-3 的流变特性及影响因素,并用推力器试验件进行了热试车研究。

1 凝胶 DT-3 流变特性初步研究

以色列 Natan 等人在凝胶推进剂流变特性及影响因素方面做了许多工作,探索了适合于凝胶雾化的喷注器结构形式,结果表明锥形流道有利于降低凝胶的平均表观粘度,但未对温度的影响进行介绍^[8];本文综合考虑了温度、压降及几何结构参数的变化对凝胶 DT-3 流变特性的影响。

1.1 温度的影响

火箭发动机用凝胶推进剂属于剪切稀化的非牛顿流体,其流变特性的本构方程可采用幂率函数近似表示,如式(1)、(2)所示。

$$\eta=K\dot{\gamma}^{n-1} \tag{1}$$

$$\tau=K\dot{\gamma}^n \tag{2}$$

式中,η为平均表观粘度;τ为剪切应力;K为粘度系数;n为幂率指数;γ̇为剪切速率。文献^[9]介绍了一定温度范围内凝胶 DT-3 的剪切应力和表观粘度随剪切速率的变化情况:相同剪切速率下,温度越高,剪切应力越低,平均表观粘度也越低;随着剪切速率的增加,剪切应力增大,凝胶 DT-3 的平均表观粘度逐渐下降,这与文献^[10]中UDMH 凝胶的流变特性类似。其原因是凝胶 DT-3 和凝胶 UDMH 同属胍类凝胶,且采用同类凝胶剂,因此表现出相似的流变特性。

1.2 压降的影响

文献^[9]中研究结果显示,在流动过程中,凝胶的平均表观粘度随压降的增加而降低。由于文献^[9]研究的是锥角很小的锥形流道,近似于等径直流孔。据此初步推断,在等径直流孔内凝胶的平均表观粘度也应随压降的增加而降低。为了验证这一点,本文利用 Fluent 软件对文献^[9]中的 PR-1/Al 凝胶和凝胶 DT-3 流过等径直流孔的平均表观粘度随压降的变化进行了数值模拟。假设凝胶的流动为稳态、恒温、层流流动,本构方程采用式 (1)、式 (2)。计算用流变特性参数如表 1 所示。

表 1 计算用凝胶流变特性参数
Tab.1 Rheological parameters of gelled propellants

凝胶类型	RP-1 凝胶	凝胶 DT-3	
粘度系数 $K/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	13.5	33.4	12.1
幂率指数 n	0.47	0.316	0.719
孔径 d/mm	0.8	0.8	0.8
孔长度 L/mm	8	8	8
备 注	恒温	10℃	30℃

凝胶在等径直流孔出口截面的平均表观粘度随压降的变化如图 1 所示。

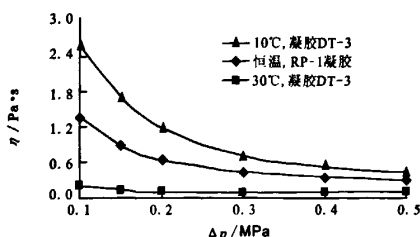


图1 $d=0.8\text{mm}$ 、 $L=8\text{mm}$ 的直流孔出口截面凝胶平均表观粘度随压降的变化

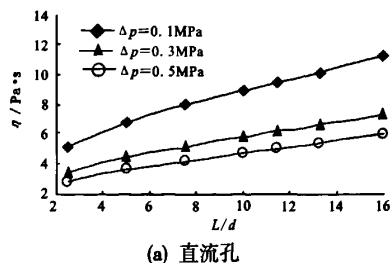
Fig.1 Apparent viscosity of gelled propellants vs. pressure drop for the orifice ($d=0.8\text{mm}$, $L=8\text{mm}$)

如图1所示, 直流孔出口平均表观粘度随压降的增大逐渐降低。其原因是压降增大, 剪切应力增大, 导致剪切速率增大(流速增大), 平均表观粘度下降, 当凝胶的平均表观粘度下降至接近液体粘度时, 凝胶将表现出牛顿流体特性, 即凝胶“液化”。

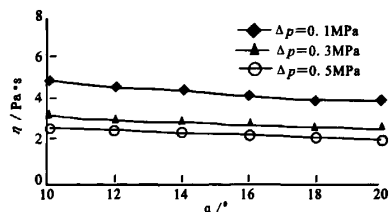
1.3 几何结构的影响

利用 Fluent 软件模拟了凝胶 DT-3 的平均表观粘度随直流孔结构参数的变化。图2为30°C时, 凝胶 DT-3 的平均表观粘度随长径比及锥角的变化情况。图2(a)显示, 直流孔出口平均表观粘度随长径比的增大而增大, 原因是随长径比增加, 粘性损失导致有效剪切应力减小, 剪切速率降低, 导致出口平均表观粘度增大。图2(b)显示锥角越大, 喷孔出口平均表观粘度越低。其原因在于锥形流道中, 沿轴向凝胶受到的剪切应力逐渐大, 剪切速率也增大, 导致表观粘度降低, 在出口处达最低。

利用 Fluent 软件模拟了凝胶 DT-3 的平均表观粘度在直流孔和锥孔内的变化情况(图3)。图3(a)显示, 在整个轴向, 轴线附近有一个高粘度区域, 文献[10]称之为“塞状流”, 其原因是中心区域凝胶受剪切不充分, 粘度相对较高, 越接近壁面受到的剪切越充分, 故而粘度越低。图3(b)显示锥形孔内平均表观粘度沿轴向的变化与直流孔截然不同, 锥形孔内, 凝胶平均表观粘度沿轴向逐渐下降, 到出口截面降至最低, 说明锥形孔流道有利于降低凝胶的表观粘度。



(a) 直流孔



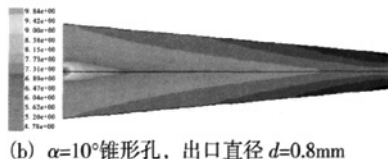
(b) $L=8\text{mm}$, 锥形孔出口直径 $d=0.8\text{mm}$

图2 30°C时平均表观粘度随结构参数的变化

Fig.2 Apparent viscosity vs geometric parameters at 30°C



(a) $d=0.8$ 直流孔



(b) $\alpha=10^\circ$ 锥形孔, 出口直径 $d=0.8\text{mm}$

图3 $L=8\text{mm}$ 喷孔内表观粘度沿轴向的变化

Fig.3 Orifice change of apparent viscosity along the axial orient ($L=8\text{mm}$)

1.4 凝胶 DT-3 的触变性

利用旋转流变仪测试了不同温度下凝胶 DT-3 的触变性, 结果如图4所示, 凝胶 DT-3 在30°C时触变性很弱, 触变环面积几乎为零; 10°C时触变性略明显, 触变环面积也很小。说明凝胶 DT-3 具有一定的触变性, 触变性随温度的升高而减弱。因此, 使用过程中应适当提高凝胶的温度, 使其触变性为零, 以利于凝胶推进系统的控制。

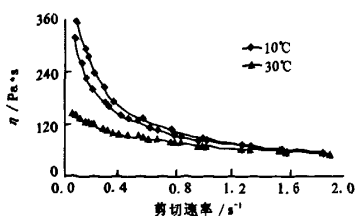


图 4 凝胶 DT-3 的触变性
Fig.4 Thixotropism of gelled DT-3

2 DT-3 凝胶流量特性试验

2.1 试验装置及参数

利用文献 [9] 中的液流试验台测量了毛细管喷注器的流量特性。毛细管喷注器几何结构及凝胶 DT-3 流变特性参数见表 2 所示。

表 2 液流试验毛细管喷注器结构及试验参数
Tab.2 Geometrical and experimental parameters

参 数	数 值
孔径 d/mm	1.2
长度 L/mm	40
流变特性参数(30°C)	$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ 12.1
	n 0.719
压降 $\Delta p/\text{MPa}$	0.6~1.2

2.2 试验结果及分析

对毛细管喷注器进行了凝胶 DT-3 和液体 DT-3 流量特性的对比试验, 结果如图 5 所示。

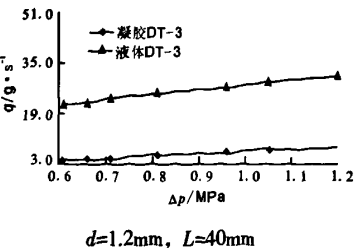


图 5 凝胶 DT-3 和液体 DT-3 的流量特性对比试验
Fig.5 Comparative tests of flow characteristics of gelled and liquid DT-3

如图 5 所示, 凝胶 DT-3 流量随压降的变化规律与液体 DT-3 相似; 相同压降下, 液体 DT-3

流量显著大于凝胶 DT-3 的流量, 这是因为凝胶 DT-3 的表观粘度明显高于液体 DT-3 的缘故。

3 凝胶 DT-3 热试车

3.1 试验件设计

为了摸索适合于凝胶推进剂喷注的结构形式, 考察凝胶 DT-3 的性能, 设计了 25N 凝胶 DT-3 推力器试验件。试验件为组合式, 由毛细管喷注器、分解室和喷管组成, 由法兰、螺栓连接, 材料为 1Cr18Ni9Ti, 凝胶 DT-3 的催化分解采用高铈催化剂。试验样机如图 6 所示。

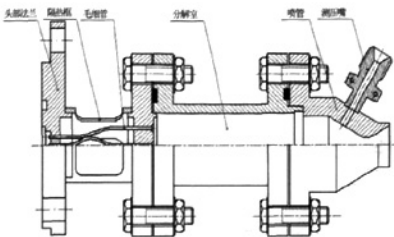


图 6 25N 推力器试验件
Fig.6 Schematic of 25N gelled DT-3 thruster

根据凝胶 DT-3 流变特性及毛细管流量特性研究结果, 为了降低喷注压降, 减少堵塞的可能性, 选取了 $d=1.2\text{mm}$ 的毛细管喷注器; 为便于和液体 DT-3 比较, 并考虑加工、焊接及装配等因素, 取毛细管长度为 $L=40\text{mm}$, 与使用液体 DT-3 的喷注器相当。

3.2 热试系统及试车工况

采用挤压式供应系统, 利于高压氮气将凝胶 DT-3 挤出, 流经管路系统 (管道内径为 $\Phi 8$, 尽量减少弯头和变径) 到电磁阀前, 电磁阀开启后, 凝胶 DT-3 经推力室头部喷注器喷入分解室。推力器试验件参数及凝胶 DT-3 流变特性参数见表 3。

3.3 结果分析及讨论

图 7~图 8 为 25N 的试验件稳态和脉冲工况室压曲线。从曲线可看出, 室压平稳, 粗糙度很小; 脉冲清晰、稳定; 证明了凝胶 DT-3 具有较好分解性能。

表 3 凝胶 DT-3 试验件主要参数
Tab.3 Parameters of experimental thruster

参 数	数值	
推力 F/N	25	
室压 p_c/MPa	1.5	
流量 $q/\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	12	
毛细管喷嘴器	数量 m (根)	1
	长度 L/mm	40
	直径 d/mm	1.2
凝胶 DT-3 温度 $T/^{\circ}\text{C}$	30	
流变特性参数	$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	12.1
	n	0.719

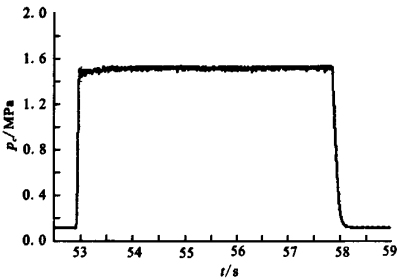


图 7 25N 推力器 5s 稳态室压曲线
Fig.7 Continuous firing 5s on

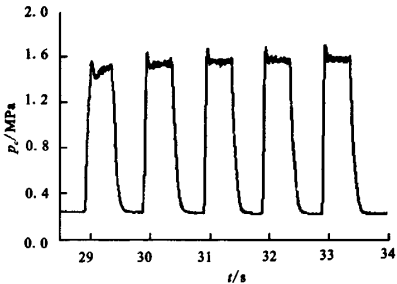


图 8 25N 推力器 0.5s 开/0.5s 关脉冲曲线
Fig.8 Multi-pulse firing with 5 cycles of 0.5s on/0.5s off

如图 7 所示, 在开始建压时, 室压略低, 约 0.05s 后上升到额定值, 整个试车过程中室压平稳; 图 8 为脉冲工况, 第一个脉冲也略低于额定室压, 其原因是首次冷启动时, 推力器试验件结构温度较低, 粘度较大, 影响了凝胶的催化分解效率, 导致启动之初室压偏低。随后由于结构温度升高, 流过的凝胶粘度有所下降, 易于流动,

其催化分解效率提高, 室压达到额定值。表 4 中为凝胶 DT-3 和液体 DT-3 试车的结果。

表 4 凝胶 DT-3 试验结果与液体 DT-3 试验结果
Tab.4 Hot test results of gelled and non-gelled DT-3

参 数		数值	
		凝胶 DT-3	液体 DT-3
设计推力 F/N		25	25
头部压降 $\Delta p/\text{MPa}$		1.27	0.2
P_c/MPa		1.4	1.4
响应时间	启动加速性 t_{90}	142	70
	/ms 关机减速性 T_{10}	208	95
分解效率/ %		0.9	0.96
比冲 I/s		204.1	223.6
实际推力 F/N		24.8	25.1

对比表 4 中凝胶 DT-3 和液体 DT-3 试车结果可以看出, 凝胶 DT-3 的比冲及响应性能低于液体 DT-3。由于推力室头部流道较复杂、毛细管的曲率、过滤网节流及凝胶 DT-3 流变特性等多种因素, 使头部喷注压降仍然较高, 达 1.2MPa, 远高于液体 DT-3。凝胶 DT-3 的响应性能、启动加速性及关机减速性都比液体 DT-3 差, 这是由于凝胶 DT-3 的粘度远高于液体 DT-3, 流速及雾化质量低于液体 DT-3, 因此建压时间比液体 DT-3 长, 此外凝胶剂的存在也对催化分解效率有一定影响。

本文仅对喷嘴器尺寸量级的凝胶 DT-3 的平均表观粘度随温度、压降和几何结构的变化进行了初步研究。关于凝胶 DT-3 的平均表观粘度随温度、压降及几何结构及其它因素的变化规律应进一步全面深入研究, 准确把握凝胶流变特性及其变化规律是正确进行凝胶发动机设计的前提。

4 结论

通过对单组元凝胶推进剂流变特性及发动机冷、热试初步研究, 可得出如下结论:

(下转第 47 页)

参考文献:

- [1] 潘锦珊. 气体动力学基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- [2] Toufik Zebbiche. SuperSonic Two-Dimensional Minimum Length Nozzle Design at High Temperature[J]. Application for Air. 2006, (3): 29-38.
- [3] 王新月, 杨振鹏. 化学非平衡流动对超燃冲压发动机尾喷管性能的影响[J]. 航空动力学报, 2009, 20(5): 1023-1027.
- [4] 李建平. 超燃冲压发动机尾喷管设计方法研究[J]. 长春理工大学学报, 2007, 30(1): 114-116.
- [5] 徐惊雷. 超燃冲压发动机非对称喷管非设计状态性能计算[J]. 推进技术, 2007, 28(3): 287-290.
- [6] 张艳惠. 超燃冲压发动机非对称喷管设计点性能[J]. 推进技术, 2007, 28(3): 282-286.
- [7] Nickerson G R. Optimized Supersonic Exhaust Nozzles for Hypersonic Propulsion[R]. AIAA 88-3161.
- [8] 王一白. 瓦状塞式喷管的设计和试验分析[J]. 火箭推进, 2008, 34(1): 1-6.

(编辑: 马 杰)

(上接第 14 页)

(1) 凝胶 DT-3 在试验温度范围内为剪切稀化的假塑性非牛顿流体, 其表观粘度随剪切速率的增加而下降, 其触变性随温度的升高而减弱。使用过程中应控制凝胶的温度, 使其触变性为零。

(2) 温度、压降及流道的几何结构等因素对凝胶流变特性有明显影响, 发动机设计时应充分利用凝胶的流变特性规律, 使凝胶在流动过程中平均表观粘度不断降低 (趋向于“液化”为最佳), 以利于凝胶的雾化、燃烧。

(3) 热试结果证明, 凝胶 DT-3 能稳定有效分解, 试验件工作性能稳定, 比冲约为液体 DT-3 的 90%。

参考文献:

- [1] 王宁飞, 莫红军. 凝胶推进剂的发展与应用 [J]. 含能材料, 1998, 6(3).
- [2] Kukushkin V, Ivanchenko A. The pasty Propellant Rocket Engines Development[R]. AIAA-paper 93-1754, 1993.
- [3] 禹天福. 胶体推进剂的研究与应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2004, (5).
- [4] 禹天福. 偏二甲胍胶体流变学研究 [J]. 火箭推进, 2004, 30(3).
- [5] 符全军, 杜宗罡. 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).
- [6] 张蒙正, 杨伟东. 凝胶推进剂直圆管流动特性探讨[J]. 火箭推进, 2007, 33(5).
- [7] 宋明德, 叶定友. 膏体推进剂脉冲火箭发动机新方案的理论和试验研究[J]. 推进技术, 1999, 20(1).
- [8] Shai Rahimi, Benveniste Natan. The Injection Process of Gel Fuels [C]. AIAA/ASME/SAE/ASEE 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle. 1997.
- [9] 葛明和, 李慧. 凝胶 DT-3 流变特性的数值模拟与试验 [J]. 航天推进与动力. 2008, (1).
- [10] 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]. AIAA 2006.

(编辑: 王建喜)