

添加减阻剂的火箭煤油流阻与传热特性研究

罗玉宏, 游岳, 蒋榕培, 孙海云, 方涛, 刘朝阳

(北京航天试验技术研究所 航天绿色推进剂研究与应用北京市重点实验室, 北京 100074)

摘要:针对液氧/煤油发动机性能提升时管路流阻大的问题,采用电传热试验系统研究了高分子减阻剂对模拟管路中高流速火箭煤油的流阻与传热特性的作用效能,并采用分析仪器考察了高分子减阻剂的添加对火箭煤油理化性能的影响。研究表明,含有0.05%减阻剂的火箭煤油的理化性能满足《液体火箭发动机用煤油规范》关键技术指标要求;减阻剂的添加对火箭煤油产生一定的减阻效果,在流速20~60 m/s,温度50~200℃范围内,JZ-1的减阻率达60.3%~76.4%,JZ-2的减阻率为33.1%~48.4%;而减阻剂的添加降低了火箭煤油的传热性能,且减阻剂分子量越大传热性能降低越明显,在流速50 m/s,温度175℃时,添加JZ-1,JZ-2后火箭煤油传热系数分别下降32.8%,8.3%。从减阻剂在改变流动阻力和传热两方面评价,JZ-2对火箭煤油具有较佳的综合性能。

关键词:火箭煤油;减阻剂;流阻;传热特性

中图分类号:V312-34 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2018)05-0066-05

Study on flow resistance and heat transfer characteristics of rocket kerosene adding drag reducer

LUO Yuhong, YOU Yue, JIANG Rongpei, SUN Haiyun, FANG Tao, LIU Zhaoyang

(Beijing Key Laboratory of Research and Application for Aerospace Green Propellants,

Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: According to the problem that the flow resistance in kerosene pipeline of LOX/kerosene rocket engine was higher when its performance improved, the electric heat transfer experimental system was used to investigate the effect of macromolecule drag-reduction additives on flow resistance and heat transfer characteristics of rocket kerosene in simulative pipeline. In addition, the influence of the additives on physical-chemical properties of rocket kerosene were also analyzed. The results show that the physical-chemical properties of rocket kerosene containing 0.05% drag-reduction additives can satisfy the requirement of key technical specification for kerosene of liquid rocket engine. The addition of drag reducer into rocket kerosene have a certain drag reduction effect. The drag reduction efficiency of JZ-1 and JZ-2 can reach up to 60.3%~76.4% and 33.1%~48.4% respectively when velocity is 20~60 m/s and temperature is 50~200℃. However, the addition of drag reducer into rocket kerosene decreases the heat

收稿日期:2017-01-03;修回日期:2017-03-20

作者简介:罗玉宏(1990—),男,硕士,研究领域为液体火箭推进剂技术

transfer performance of kerosene, and the larger the molecular weight of the drag reducer added into the kerosene is, the more obviously the heat transfer performance reduces. The heat transfer coefficients of kerosene with JZ-1 and JZ-2 are decreased by 32.8% and 8.3% respectively when velocity is 50 m/s and temperature is 175 °C. JZ-2 has better overall performance in changing flow resistance and convective heat transfer.

Keywords: rocket kerosene; drag reducer; flow resistance; heat transfer characteristic

0 引言

液氧/煤油发动机作为新一代大推力运载火箭的主动力,具有密度大、比冲高、成本低、绿色环保等优势。大推力液氧/煤油发动机和重型运载火箭是未来的技术发展方向,但由于推进剂的流量增大,不可避免地带来了从涡轮泵到燃烧室管路流阻大幅增加和泵后负载大的问题,这给发动机整体参数平衡带来了新的难度。因此,降低高压高速流动时的火箭煤油管路流阻对于发动机和总体设计具有重要意义。

降低流阻主要有两种途径:一是改善与流体接触的管道边界,减少边壁对流动的阻力^[1-2];二是向液体中加入少量的添加剂(称为减阻剂),使其影响流体湍流流动的内部结构来减小阻力^[3-5]。鉴于第二种途径方便,有较大的可行性,现在已成为国内外研究的重点问题。目前油溶性减阻剂主要为聚异丁烯、烯烃聚合物等高分子聚合物,有效地解决了管道输送的减阻问题^[6-10]。但到目前为止减阻剂的研究应用仅限于原油或成品油的管道长距离低流速输送,将减阻剂应用于液体火箭发动机煤油高流速输送系统,国内研究尚处于空白,国外研究未见公开报道。

本文模拟液氧/煤油火箭发动机中煤油在管路中高温高流速的实际工况,开展流速在 10~60 m/s、温度 20~200 °C 条件下火箭煤油减阻特性研究,并分析减阻剂的添加对火箭煤油理化性能和传热性能的影响规律,为未来煤油减阻剂在火箭发动机中的应用提供技术支持。

1 实验部分

1.1 原料及仪器

原料:火箭煤油减阻剂(JZ-1, JZ-2, JZ-3, 分子量 JZ-1 > JZ-2 > JZ-3)由北京航天试验技

术研究所制备。

仪器:SVM3000 全自动密度粘度测定仪;FPA-70Xi 自动冰点测定仪。

1.2 性能测试

1.2.1 理化性能测定

参照《液体火箭发动机用煤油规范》,采用分析仪器测试添加减阻剂的火箭煤油的基本理化性能,研究减阻剂对火箭煤油密度、粘度及结晶点等理化性能的影响,减阻剂的添加量为 0.05%。

1.2.2 减阻性能测定

采用高流速管道减阻系统测量减阻剂的减阻率,见图 1。

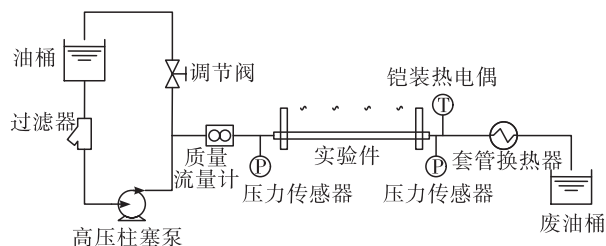


图 1 减阻实验系统图

Fig. 1 Schematic of drag reduction experimental system

实验样品经油箱、过滤器后进入高压柱塞泵,泵回路分为主路和旁路系统,旁路装有调节阀,通过调节阀门开度来控制进入主路实验段的流量,进入主路的煤油经过质量流量计后进入实验段,实验段进出口装有压力传感器,进出口压力传感器测量值之差即是实验件阻力,实验件采用 $\Phi 3 \times 0.5$ mm 的 316 不锈钢管,总长度为 103.5 cm。实验件出口装有 K 型铠装热电偶,测量出口处流体温度。管壁上焊接 K 型热电偶,每隔 5 cm 焊接一个测温点。从实验件出来的煤油经过套管换热器冷却后进入废油桶。按(1)式计算火箭煤油减阻剂的减阻率:

$$D_R = \frac{(\Delta P_0 - \Delta P_1)}{\Delta P_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： D_R 为减阻率； ΔP_0 为基础条件下管段摩阻压降； ΔP_1 为减阻条件下管段摩阻压降。

1.2.3 传热性能测定

实验加热长度为 95.5 cm 实验件水平布置,壁面下部焊有 20 个 K 型热电偶,热电偶的布置如图 2 所示。

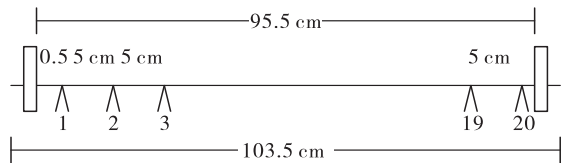


图 2 实验件热电偶的分布
Fig. 2 Distribution of thermocouples of test sample

按(2)式计算火箭煤油传热系数:

$$K = \frac{Q}{A \times \Delta T_m} \tag{2}$$

式中： K 为传热系数； Q 为传热速率； A 为传热面积； ΔT_m 为平均温度差。

2 结果与讨论

2.1 添加减阻剂对火箭煤油理化性能的影响

火箭煤油是由低分子量烃类组成,而减阻剂为高分子量烃类,添加减阻剂是否对火箭煤油品质产生影响,需对添加减阻剂火箭煤油理化性能进行评价,测试结果如表 1 所示。

表 1 减阻剂对火箭煤油理化性能的影响(20 ℃)
Tab. 1 Effect of drag reducer on physical – chemical properties of rocket kerosene at 20 ℃

体系	密度/ (g · cm ⁻³)	运动粘度/ (mm ² · s ⁻¹)	结晶点/ ℃
(GJB5425 技术指标)	0.830 ~ 0.836	≥2.4	≤ -60
火箭煤油	0.833	2.45	< -60
火箭煤油 + JZ - 1	0.833	3.19	< -60
火箭煤油 + JZ - 2	0.833	2.72	< -60
火箭煤油 + JZ - 3	0.833	2.57	< -60

从测试结果来看,与火箭煤油相比,添加减阻剂的火箭煤油的密度和结晶点未发生明显改变,而粘度增大;添加减阻剂的火箭煤油的密度、粘度和

结晶点均满足《液体火箭发动机用煤油规范》的关键技术指标要求。这表明,0.05% 添加量的减阻剂对火箭煤油的质量没有产生不利影响。

另外,分析了不同温度下减阻剂对火箭煤油密度和粘度的影响规律,结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同温度下减阻剂对火箭煤油密度的影响
Tab. 2 Effect of drag reducer on density of rocket kerosene at different temperatures

密度/ (g · cm ⁻³)	温度/℃				
	20	40	60	80	100
火箭煤油	0.833	0.818	0.804	0.789	0.774
火箭煤油 + JZ - 1	0.833	0.818	0.804	0.789	0.744
火箭煤油 + JZ - 2	0.833	0.818	0.804	0.789	0.774
火箭煤油 + JZ - 3	0.833	0.818	0.804	0.789	0.774

根据表 2,随着煤油温度的升高,4 种火箭煤油体系的密度均逐渐降低。与同温度下纯火箭煤油相比,添加减阻剂的火箭煤油密度不变。这表明,不同温度下减阻剂的添加对火箭煤油的密度不产生影响。

表 3 不同温度下减阻剂对火箭煤油黏度的影响
Tab. 3 Effect of drag reducer on viscosity of rocket kerosene at different temperatures

运动粘度/ (mm ² · s ⁻¹)	温度/℃				
	20	40	60	80	100
火箭煤油	2.45	1.69	1.25	0.90	0.82
火箭煤油 + JZ - 1	3.19	2.25	1.69	1.33	1.12
火箭煤油 + JZ - 2	2.72	1.91	1.44	1.12	0.91
火箭煤油 + JZ - 3	2.57	1.81	1.36	1.06	0.88

根据表 3,不同温度下,与纯火箭煤油相比,添加减阻剂的火箭煤油的粘度有所增加,但随着温度的升高,粘度增加量降低。这表明,减阻剂的添加在高温下对火箭煤油的粘度影响不大。

2.2 流速对减阻率的影响

首先,在不加热条件下,对添加减阻剂的火箭煤油进行减阻实验测试,测试结果如图 3 所示。

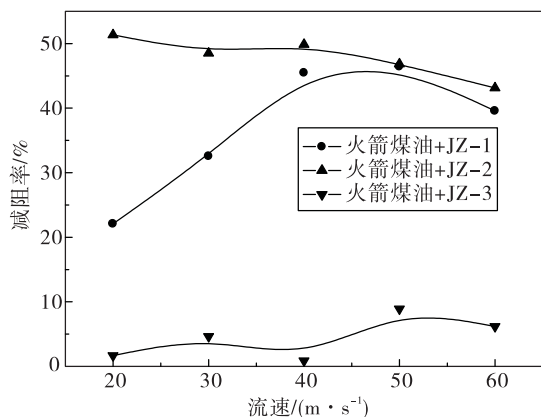


图3 在15 °C条件下减阻率与流速的关系

Fig. 3 Relationship between drag reduction efficiency and flow velocity when temperature is 15 °C

根据图3所示,3种添加减阻剂的减阻率变化趋势不同,其中JZ-1的减阻率先增大后降低,JZ-2的减阻率逐渐降低,JZ-3的减阻率很低且变化不大。这是因为JZ-1的分子链很长,分子链之间易相互缠绕卷曲,在15 °C条件下其分子链未完全伸展开,随着高流速剪切力的增大,其分子链逐渐伸展至完全伸展开,减阻率逐渐增大至最大,随着高流速剪切力的继续增大,其分子链发生剪切断裂,减阻率逐渐降低;JZ-2的分子链较短,在15 °C条件下其分子链已完全伸展开,随着高流速剪切力的增大,其分子链发生剪切断裂,减阻率逐渐降低;JZ-3的分子链最短,在15 °C条件下其分子链虽然已完全伸展开,但其分子量低而减阻效果不明显^[11],随着高流速剪切力的增大,其分子链本身短而不易发生剪切断裂至更短,所以其减阻率随着流速的增大而变化不大。

室温条件下,流速在20~60 m/s范围时,相比纯火箭煤油,添加减阻剂的火箭煤油的压降均降低,降低幅度为JZ-2 > JZ-1 > JZ-3,即减阻率大小为JZ-2 > JZ-1 > JZ-3,其中添加JZ-1后压差降低了0.8~9.1 MPa,减阻率达22.1%~46.5%;添加JZ-2后压差降低了1.9~10.0 MPa,减阻率达43.1%~51.3%。实验表明在室温高流速条件下,JZ-1和JZ-2对火箭煤油具有很好的减阻效果。

视火箭煤油为不可压缩流体,忽略压力对其密度的影响,即 ρ 为常数。假设在不同压力条件下,煤油的黏度不发生变化,即 μ 为常数。根据式(3)和

式(4)计算了4种煤油体系15 °C下摩擦系数随雷诺数的变化关系:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (3)$$

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (4)$$

其结果如图4所示。根据图4可知,随着雷诺数的增大,添加减阻剂的火箭煤油体系的摩擦系数先降低后趋于稳定,其中添加JZ-1或JZ-2的作用比较明显。

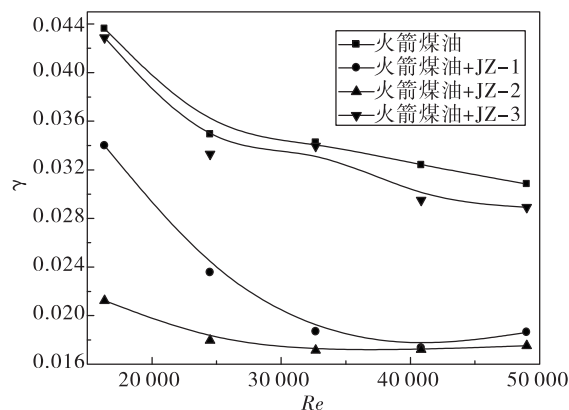


图4 在15 °C条件下4种煤油体系摩擦系数与雷诺数的关系

Fig. 4 Relationship between friction coefficient and Reynolds number of four kinds of kerosene when temperature is 15 °C

2.3 温度对减阻率的影响

由于火箭煤油需要对发动机进行冷却,其使用温度在180 °C左右,所以有必要对减阻剂在加热条件下进行减阻实验,测试结果如图5所示,图中加热温度以管路出口煤油温度为准,管路进口煤油温度为15 °C。

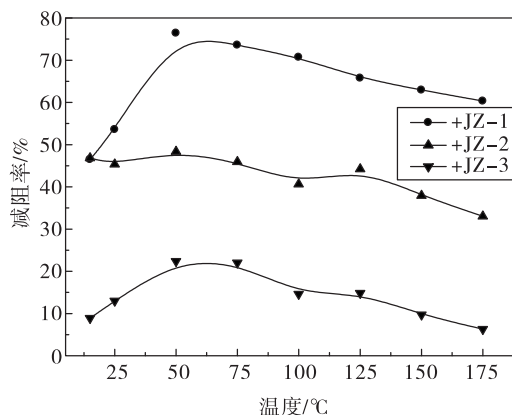


图5 在流速为50 m/s时减阻率与出口温度的关系

Fig. 5 Relationship between drag reduction efficiency and outlet temperature when flow velocity is 50 m/s

根据图5可知,随着管路出口火箭煤油温度的增大,3种添加减阻剂的煤油体系的减阻率先升高后降低,其中减阻率最高的煤油温度在50℃附近。这是由于随着温度的升高至50℃,减阻剂分子链之间相互作用加强,减阻率增加,随着温度的继续升高,减阻剂分子长链受温度的影响可能发生断裂,减阻率降低^[12]。即使如此,在流速50 m/s,温度175℃时,JZ-1和JZ-2的对火箭煤油仍具有较高的减阻效果,其中JZ-1的减阻率高达60.3%,JZ-2的减阻率达33.1%。

在高温高流速条件下,JZ-1和JZ-2的对火箭煤油具有很好的减阻性能。流速50 m/s,温度在50~175℃范围内,减阻效果为JZ-1>JZ-2>JZ-3,其中添加JZ-1后压差降低10.1~14.1 MPa、减阻率高达60.3%~76.4%。这是由于在高温条件下3种减阻剂的分子链都完全伸展开,分子量越大,减阻效果就越明显^[11]。

2.4 添加减阻剂对火箭煤油传热性能的影响

减阻剂为高分子链状烃,火箭煤油在流经发动机燃烧室换热通道时会历经高温环境,在高温环境下高分子链状烃有可能影响火箭煤油的传热性能。本文对添加减阻剂的火箭煤油进行传热研究,确定减阻剂对火箭煤油传热性能的影响程度,结果如图6所示,图6中加热温度以管路出口煤油温度为准,管路进口煤油温度为15℃。

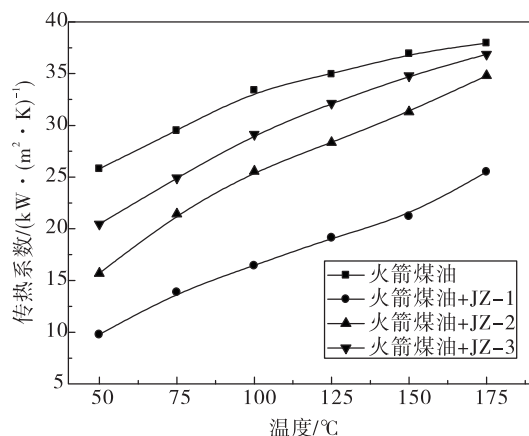


图6 四种煤油体系流速为50 m/s时传热系数随温度的变化

Fig. 6 Variation of heat transfer coefficient with outlet temperature when flow velocity of four kinds of kerosene is 50 m/s

根据图6可知,减阻剂的添加降低了火箭煤油的传热系数,降低幅度为JZ-1>JZ-2>JZ-3;随着温度的升高,减阻剂对火箭煤油传热系数降低幅度逐渐减小。在流速50 m/s、温度50~175℃范围内,添加JZ-1,JZ-2和JZ-3后火箭煤油传热系数分别下降32.8%~62.1%,8.3%~39.1%和2.9%~20.8%。这说明,高分子减阻剂的添加降低了火箭煤油的传热性能,且减阻剂分子量越大,传热性能降低幅度越明显。这可能是高分子减阻剂的添加抑制了涡流的生成,增加了层流底层厚度,导致火箭煤油的传热性能降低^[13-15]。

3 结论

本文模拟液体火箭发动机实际工况,在高温高流速条件下进行了火箭煤油减阻特性研究,并分析了减阻剂的添加对火箭煤油理化性能和传热性能的影响规律,得到了以下结论:

1)0.05%添加量的JZ-1,JZ-2,JZ-3对火箭煤油的质量影响较小,满足《液体火箭发动机用煤油规范》的关键技术指标要求。

2)减阻剂的添加对火箭煤油产生明显的减阻效果,在流速20~60 m/s,温度50~200℃范围内,JZ-1的减阻率高达60.3.1%~76.4%,JZ-2的减阻率达33.1%~48.4%;

3)JZ-1,JZ-2,JZ-3的添加抑制了涡流的生成,增加了层流底层的厚度,导致火箭煤油的传热阻力增大,传热性能下降,且分子量越大传热恶化越明显。后续需要通过纳米流体、发动机冷却通道优化设计等强化传热技术,提高添加减阻剂的火箭煤油体系的传热性能。

参考文献:

- [1] 崔超,刘忠胜,陈明.内减阻技术简述及涂层缺陷与对策[J].现代涂料与涂装,2007,10(7):50.
- [2] AJAYI O O, LLORENZO - MARTIN M D, FENSKE G R. Tribological synthesis method for producing low - friction surface film coating: US, 9476007 [P]. 2015 - 08 - 07.
- [3] HORN A F, WU C D, PRILUTSKI D J, et al. High viscosity crude drag reduction [J]. Oil & Gas journal, 1986, (6): 24 - 25.

(下转第87页)

- [4] 张华平. 减阻剂的研究现状与应用[J]. 化学工业与工程技术, 2011(6): 28-32.
- [5] 左艳梅. 油品减阻剂的研究进展[J]. 工程技术与应用, 2010, 7(1): 37-40.
- [6] MOTIER J F, CHOU L C, TONG C L. Process for homogenizing polyolefin drag reducing agents: US, 6894088 [P]. 2004-12-16.
- [7] 关中原, 税碧垣. 新型成品油减阻剂的研制及现场应用试验[J]. 油气储运, 2006, 25(9): 40-44.
- [8] WU F S, CAO H Z, CAI W H, et al. Review on the additive and the application of it in oil pipeline [J]. Energy conservation technology, 2010, 9(5): 440-445.
- [9] YANG Y Q, ZHENG W Y, LI X Z, et al. The research progress of poly- α -olefin drag reducing agent used in oil pipeline [J]. Information recording materials, 2012, 13(6): 26-31.
- [10] HALLIDAY W S, CLAPPER D K, BLAND R G. Drag reducing agents for oil - and synthetic - based fluids: US, 0158360 [P]. 2014-11-11.
- [11] 王春晓, 陆江银, 薄文敏. 高分子减阻剂减阻性能的影响因素研究[J]. 中国塑料, 2011, 25(6): 70-76.
- [12] 焦利芳, 李凤臣. 添加剂湍流减阻流动与换热研究综述[J]. 力学进展, 2008, 38(3): 339-357.
- [13] 苏卫科, 王高生. 高分子减阻剂溶液的热量传递[J]. 石油化工, 1991, 20(12): 841-844.
- [14] YU B, KAWAGUCHI Y. DNS of fully developed turbulent heat transfer of a viscoelastic drag-reducing flow[J]. International journal of heat and mass transfer, 2005, 48: 4569-4578.
- [15] 阳倦成. 黏弹性流体基铜纳米流体流动与传热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(2): 366-370.