

DOI: 10.7652/xjtuxb201901017

低流阻火箭煤油的超临界压力流动与换热特性

张赞坚, 刘朝晖, 潘辉, 陈彦伯, 毕勤成
(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为探索超临界压力下减阻剂对高温火箭煤油的减阻效果,在压力为 15 MPa、质量流速为 17 000~50 000 kg·m⁻²·s⁻¹(对应常温流速约 20~60 m·s⁻¹)、流体温度从常温至 360 ℃和热流密度为 2.5~30 MW·m⁻²的试验条件下,对火箭煤油和添加减阻剂的低流阻火箭煤油在直径 2 mm×0.5 mm 的高温合金钢管内的流动与换热特性进行了研究。研究发现:在本文研究条件下,煤油传热机理为超临界压力单相类液态强制对流换热;减阻剂对火箭煤油的减阻效果明显,减阻率最高可达 60%;随着流体温度升高,雷诺数增大,减阻剂的减阻效果降低,减阻率最低下降至约 20%;添加减阻剂后,煤油传热性能显著弱化,但高雷诺数下减阻煤油的换热性能基本维持不变,减阻煤油与火箭煤油的努塞尔数之比约为 0.5;雷诺数小于 63 000 时减阻效果大于传热弱化效果,大于 63 000 时结果相反。

关键词: 火箭煤油;减阻剂;超临界;流阻;换热弱化

中图分类号: V511 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)01-0129-06

Flow and Heat Transfer Characteristics of Low-Flow Resistance Rocket Kerosene under Supercritical Pressure

ZHANG Zanjian, LIU Zhao-hui, PAN Hui, CHEN Yanbo, BI Qincheng
(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To explore the drag reduction effect of drag reducer on rocket kerosene under supercritical pressure and high temperature conditions, flow and heat transfer characteristics of rocket kerosene M and low-flow resistance rocket kerosene M-3 with drag reducer were investigated in a Φ2 mm×0.5 mm high-temperature alloy steel tube as active cooling channels. Experiments were conducted at pressure of 15 MPa, mass flow rates of 17 000-50 000 kg/(m²·s) (corresponding to the normal temperature flow rates of about 20-60 m/s), and heat flux range of 2.5-30 MW/m². It indicated that: ① The heat transfer mechanism of the rocket kerosene under the test conditions was supercritical liquid-like forced convection heat transfer; ② The drag reducing effect of drag reducer on rocket kerosene was obvious, the maximum drag reducing rate reached up to 60%, and with the increase of fluid temperature, the Reynolds number increased, the drag reduction effect decreased, and the minimum drag reducing rate approached 20%; ③ For the rocket kerosene with drag reducing agents, the heat transfer reduction occurred significantly, however, the heat transfer performance of kerosene M-3 hardly changed in high Reynolds number conditions, and the Nusselt number ratio of M-3 to M kept at about 0.5; and ④ When the

Reynolds number was below 63 000, the drag reduction was greater than the heat transfer reduction, while when the Reynolds number was greater than 63 000, the results reversed.

Keywords: rocket kerosene; drag reducer; supercritical; flow resistance; heat transfer reduction

火箭煤油具有推力大、沸点高、易储存、绿色环保等特点^[1-2],在运载火箭的主推级大多采用液氧/火箭煤油作为推进剂。近年来,临近空间吸气式高超声速飞行器在全世界范围内得到广泛研究,煤油在再生冷却发动机中同时作为推进剂和冷却剂。在高马赫数火箭飞行器中,燃烧室壁面热流密度达到每平米几十兆瓦,常采用再生冷却^[3]对壁面进行热防护。再生冷却过程中,燃料流过燃烧室壁面的微小冷却通道,通过强制对流冷却燃烧室后注入燃烧室燃烧^[4]。火箭煤油主要由烷烃、环烷烃和芳香烃等有机物组成,临界压力约为 2~2.5 MPa,临界温度约为 400 °C^[5]。火箭燃烧室的压力范围一般处于 15~25 MPa,故冷却通道内火箭煤油处于超临界压力状态。

火箭煤油冷却流量大,加上湍流和极端热流的影响,使得管路流动阻力高,对泵产生高负载,直接影响发动机工作可靠性,故火箭煤油减阻技术的研究具有重要意义。Toms 首次报道了在液体湍流中添加少量的高分子聚合物(具有柔性分子长链结构)会使湍流阻力大幅度降低,此添加物即为减阻剂^[6]。自发现湍流减阻现象以来,经过半个多世纪研究,人们对于减阻剂的特点、湍流减阻原理、湍流减阻发生时的换热机理和减阻剂开发具有较深的认识^[7-8]。Virk 根据管流速度分布测量结果,提出弹性缓冲层的流动模式,认为减阻剂的加入在管壁的层流底层和湍流核心之间生成了弹性缓冲层,致湍流核心部分速度加大而发生减阻,同时认为添加剂添加浓度影响着管道内流动的弹性底层厚度,浓度越大,弹性底层越厚,减阻效果越好^[9]。另有学者发现,对于一定浓度的减阻剂溶液流动存在临界雷诺数,在该雷诺数下减阻效果最佳,再增大雷诺数,减阻效果开始不断减弱^[10]。根据对添加剂湍流减阻流动与换热特性的研究,我国许多学者发现,具有湍流减阻效果的减阻剂溶液一般具有黏弹性这种流变学物性,黏弹性流体由于要考虑其黏性与弹性两方面的影响,所以表现出来的流动换热特性与牛顿流体有较大区别,学者们还提出黏弹性作用会降低流体的换热性能^[11-13]。

减阻剂在石油运输工业、军事和其他领域中广泛应用^[14-16]。在原油或成品油管道运输中,减阻剂

的应用已十分成熟,但对于减阻剂在火箭煤油上的应用,相关报道较少。俄罗斯在 20 世纪 80 年代开始对火箭煤油减阻技术进行研究,并取得较大进展,研究内容包括对煤油减阻剂种类进行筛选、煤油添加减阻剂后对喷嘴雾化效果的影响等^[17]。我国西安航天动力试验技术研究所对添加不同减阻剂的火箭煤油在管路中的常温流阻特性进行试验研究,得出一定流速条件下添加减阻剂 JZM-7 的火箭煤油在直径为 4 mm 的直管中的减阻率达 75%^[18]。

本文模拟液体火箭发动机工程应用的实际热环境,在电加热主动冷却小通道内研究低流阻火箭煤油的流动和换热特性,来评估减阻剂在超临界压力和高热流密度条件下的高温减阻效果。

1 试验系统和数据处理

1.1 试验系统

试验在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室超临界煤油流动传热台上完成。试验系统如图 1 所示,燃料箱中的燃料经过滤器进入柱塞泵,之后分两路:旁路燃料直接回到油箱,起到调节主路燃料流量的作用;主路燃料经质量流量计后进入预热段,加热到所需温度后进入试验段。燃料在试验段内进一步加热升温,经绝热段、高温过滤器后进入换热器冷却,经背压阀后进入废液箱。试验系统的压力通过背压阀进行调节,流量由泵和流量调节阀进行调节。在试验段进出口装有 K 型铠装热电偶和压力传感器,分别用于测量进出口流体温度和压力。根据进出口压力可以求得试验段压差。

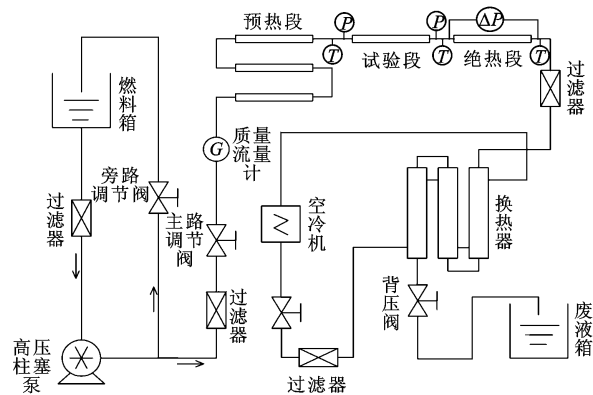


图 1 试验系统图

预热段为直径 6 mm×1 mm 的不锈钢管,总长度 2 m,有效加热长度 1.9 m。试验段为直径 2 mm×0.5 mm 的高温合金钢管 GH3128,长 200 mm,有效加热长度 200 mm。试验段上下壁面 9 个截面等距点焊有 18 个热电偶,用于测量外壁面温度,每个截面间隔 20 mm。

本文试验工况如下:压力 15 MPa,质量流速 17 000~50 000 kg·m⁻²·s⁻¹(对应常温流速约 20~60 m·s⁻¹),热流密度 2.5~30 MW·m⁻²,试验段入口温度为常温、100℃和 150℃。试验工质为火箭煤油 M 和添加减阻剂的低流阻火箭煤油 M-3。

1.2 数据处理和测量不确定度

水平均匀加热短管试验段的内壁温度计算按照一维电加热管内壁温度计算方法,采用 4 阶龙格库塔法求出^[19]。M 和 M-3 的物性均采用文献[5]中给出的火箭煤油物性关系式确定。

试验段热流密度由加热功率确定

$$q = \frac{UI}{\pi dl} \quad (1)$$

式中: U 为加热电压; I 为加热电流; d 、 l 为试验段内径、长度。

采用一维圆柱稳态导热方程计算试验段内壁温,控制方程为

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dr} \left(\frac{dT}{dr} \right)^2 + \frac{\phi}{\lambda} = 0 \quad (2)$$

其中 ϕ 为单位内热源

$$\phi = \frac{4UI}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (3)$$

换热系数 h 的计算公式如下

$$h = \frac{q}{T_i - T_b} \quad (4)$$

式中: T_i 、 T_b 分别为热电偶对应位置的管内壁温和管内流体温度,其中 T_b 根据燃料热沉确定。

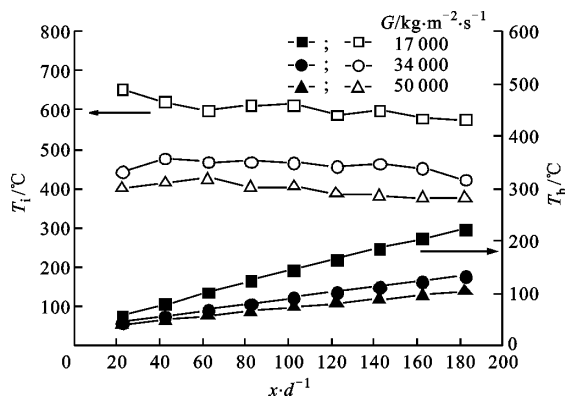
试验使用 RoseMount3051 压力变送器进行压力和压差的测量,标准不确定度分别为 0.23% 和 0.61%;流量测量使用 Emerson 质量流量计,标准不确定度为 2.04%;流体温度的测量使用 K 型 Omega 铠装热电偶,在 0~400℃ 温度范围内,测量不确定度为 ±1℃;壁面温度测量采用直接点焊于壁面的 K 型热电偶丝,在 0~400℃ 及 500~800℃ 温度范围内,测量不确定度分别达到 ±2℃ 和 ±5℃。

2 结果与讨论

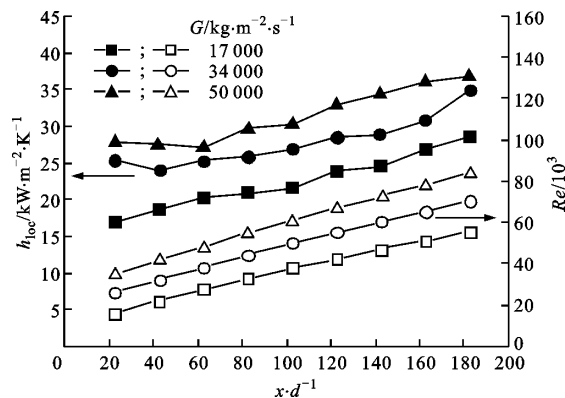
2.1 低流阻火箭煤油的传热特性

图 2 给出了在压力为 15 MPa、热流密度为 10

MW·m⁻²、工质进口温度为常温的工况下,不同质量流速下 M-3 的换热性能沿轴向 $x \cdot d^{-1}$ 的变化曲线。由图可知:在相同的轴向位置,同一热流密度下随质量流速增大,管内流体温度和管内壁温下降,且传热温差降低,局部传热系数 h_{loc} 有所增加,从而使得质量流速增加,起到了强化换热的作用,质量流速为 50 000 kg·m⁻²·s⁻¹ 的平均传热系数约为 17 000 kg·m⁻²·s⁻¹ 的 1.4 倍;随质量流速增大,同一热流密度下流体温度降低导致流体黏度增大,由于质量流速的增加幅度大于黏度的增加幅度,质量流速起主导作用,导致雷诺数增大,起到了强化换热的作用。



(a) 内壁和流体温度



(b) 传热系数和雷诺数

图 2 低流阻火箭煤油的换热性能沿轴向的变化

在恒定热流密度条件下,火箭煤油的传热系数沿着轴向逐渐增加的原因是,沿轴向流体温度的升高导致黏度减小,而质量流速不变,导致雷诺数增大,故换热得到强化。

图 3 给出了在压力为 15 MPa、工质进口温度为常温、质量流速为 17 000~50 000 kg·m⁻²·s⁻¹(对应常温流速约 20~60 m·s⁻¹)的工况下,试验段平均内壁温 $T_{i,ave}$ 和 M-3 的平均传热系数 h_{ave} 随热流密度 q 的变化曲线。图 3 表明,M-3 的传热系数

随热流密度线性增加,管内壁温随热流密度单调上升。实际上,煤油在近超临界压力下容易发生拟沸腾传热,当内壁温高于拟临界温度,常会出现类似于亚临界压力下核态沸腾的传热强化现象^[20-21],内壁温保持不变,传热系数迅速上升,或者出现传热恶化,内壁温迅速上升。本试验的系统压力远大于临界压力,火箭煤油在 15 MPa 压力下对应的拟临界温度约达到 700 °C,故整个传热过程煤油处于超临界类液态,属于超临界压力下的正常单相液态强制对流换热。

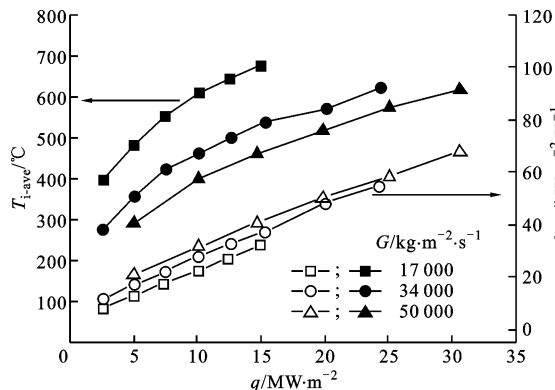


图3 低流阻火箭煤油换热性能随热流密度的变化

平均换热系数随着热流密度线性递增,是因为在热流密度增大的同时换热温差增大,但热流密度占主导作用,从而使换热得到强化。分析认为,热流密度对煤油换热的影响来自两个方面:①热流密度升高导致流体温度升高,平均黏度降低,雷诺数增大,管内流体湍流度增强,强化了换热;②在高热流密度小通道换热过程中,近壁面流体与中心流体的温度梯度、密度梯度和黏度梯度都较大,造成近壁面流体与中心流体的剧烈掺混,从而增强了湍流度,强化了换热。

入口效应对煤油换热的影响如图4所示。不同入口温度条件下流体受入口效应影响,在 $0 < x \cdot d^{-1}$

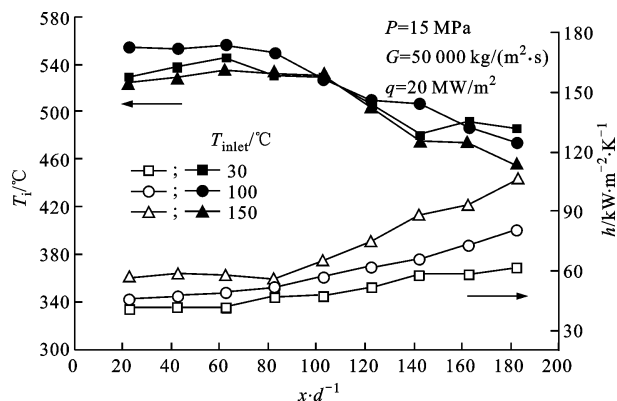


图4 入口温度对低流阻火箭煤油换热性能的影响

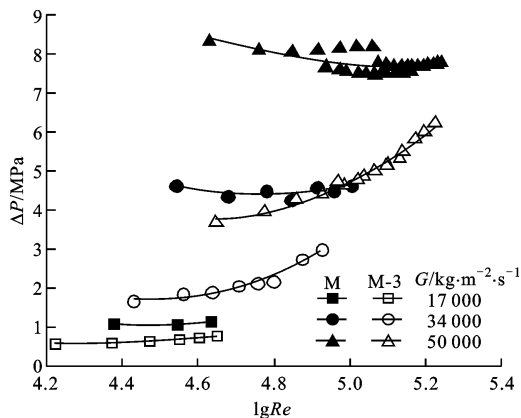
$d^{-1} < 60$ 的范围内,管内对流换热系数变化缓慢,壁面温度基本不变; $x \cdot d^{-1} > 60$ 的区域为正常对流换热区,如前所述,传热系数因雷诺数增大而沿轴向缓慢增加。

2.2 火箭煤油和减阻煤油的流动和换热性能对比

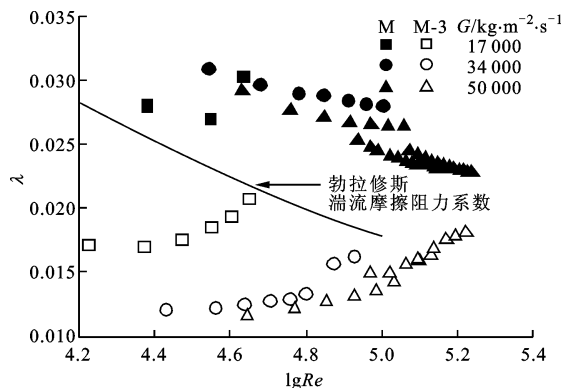
M 和 M-3 的流动性能对比如图5所示。相同质量流速下,不同雷诺数的数据点代表不同热流密度或者不同入口温度。图中表明:M-3 在3种质量流速下的压力降和摩擦阻力系数 λ 均低于 M 的,减阻剂的减阻效果显著。

图5b给出了 M 和 M-3 的摩擦阻力系数,并与采用勃拉修斯公式 $\lambda = 0.316 5 Re^{-0.25}$ 计算的水力学光滑管的摩擦阻力系数曲线进行了比较。由图5b可知:减阻剂的减阻效果在高雷诺数下明显弱化,未添加减阻剂时,随雷诺数增大煤油的摩擦阻力系数呈下降趋势,添加减阻剂后,低雷诺数下的减阻效果明显;随着雷诺数增大,减阻煤油的摩擦阻力系数呈上升趋势,与火箭煤油的摩擦阻力系数靠近,减阻效果弱化。

减阻剂减阻效果弱化的主要原因有:①从定性



(a) 压力降



(b) 摩擦阻力系数

图5 火箭煤油和减阻煤油的流阻性能对比

上是由于减阻剂溶液而导致湍流减阻发生的内部微观结构随流动中剪切率变化的动态过程所致,较低雷诺数条件下,减阻剂溶液内部的微观结构在湍流中微小剪切力的作用下会发生回旋、缠绕、拉伸、变形等运动,与湍流涡之间的相互作用改变了湍流结构的强度,使湍流减阻现象发生,减阻效果良好,但在高雷诺数下,流动内部过大的剪切力使减阻剂溶液开始被局部撕裂,自身特有的长链结构被破坏,湍流减阻效果减弱;②高雷诺数下对应的热流密度和流体温度较高,温度的升高容易对减阻剂溶液自身的长链结构造成破坏,使湍流减阻效果减弱。

图 6 对比了 M 和 M-3 的传热性能,M-3 的努塞尔数 Nu 低于 M 的,传热性能较差。火箭煤油在低雷诺数下的换热性能与 D-B 公式^[22] 预测值接近,在高雷诺数下优于其预测值。M 和 M-3 的换热性能均优于文献^[23] 公式的预测值。

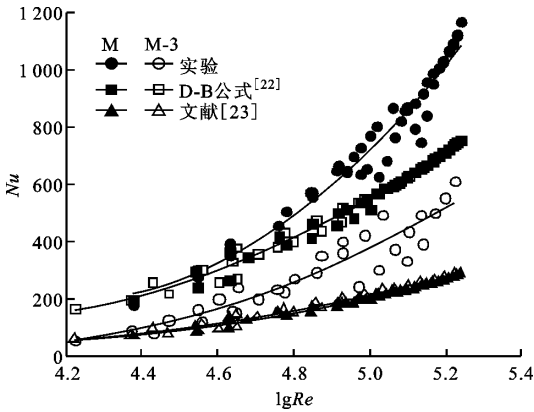
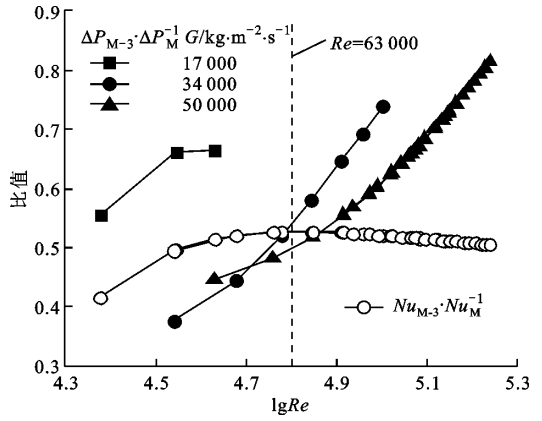


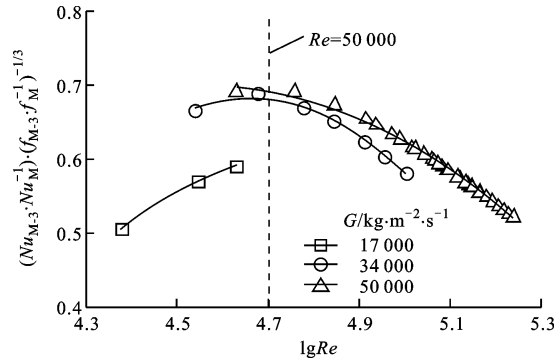
图 6 火箭煤油和减阻煤油的换热性能对比

图 7a 比较了两种煤油的流动和换热性能。由图可知:①整体而言,减阻剂的减阻效果明显,但随着流体温度升高,雷诺数增大,减阻效果弱化,低流阻煤油与火箭煤油流动阻力之比从 0.4 增加到 0.8;②添加减阻剂后火箭煤油的换热性能弱化,随着雷诺数增大,换热性能有所增强,高雷诺数下减阻煤油与火箭煤油的 Nu 之比约为 0.5;③雷诺数小于 63 000 时流动强化效果大于换热弱化效果,大于 63 000 时结果相反。

为了更准确地反映减阻煤油的流动强化性能,这里借鉴强化传热的评价指标,图 7b 采用 $(Nu_{M-3} \cdot Nu_M^{-1}) / (f_{M-3} \cdot f_M^{-1})^{-1/3}$ 来描述减阻煤油的流动强化性能。研究发现:①在本文研究条件下,该指标值均小于 1,表明添加减阻剂后传热弱化效果大于流动强化效果;②雷诺数存在一极大值点 $10^{4.7}$ (约 50 000),此处对应的减阻煤油综合换热性能最佳,



(a) 流动性能比值和换热性能比值



(b) 流动强化性能分析

图 7 火箭煤油和减阻煤油的流动和换热性能综合比较

当雷诺数大于或者小于极值点,综合换热性能降低。

2.3 传热关联式拟合

对于管道内的常规流体($Pr > 0.6$ 的流体)单相强制对流换热性能,可采用 D-B 关联式^[22] 来预测

$$Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4} \tag{5}$$

本试验管内壁温低于工质拟临界温度, $Re > 10\,000$ 时热流密度大,煤油主流温度与壁温最高相差 400 ℃。强加热条件下,近壁面流体和中心流体密度梯度和黏度梯度较大,仅依靠 Pr 的差别不能充分反映物性变化的影响,文献^[23] 采用黏度的无量纲数 μ_b/μ_{wi} 来修正

$$Nu_b = 0.003\,15Re_b^{0.873} Pr_b^{0.451} (\mu_{wi}/\mu_b)^{-0.052} \tag{6}$$

因此本文也引入考虑黏度的无量纲数 μ_b/μ_{wi} 来修正。图 8 给出了减阻煤油试验值与关联式预测值的比较,可以看出,两种煤油的 Nu 试验值与式(5)和式(6)的预测值偏差都较大。

本文考虑黏性项的影响,拟合得到超临界压力强热流密度下低流阻火箭煤油的传热关联式

$$Nu_b = 0.012Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4} \left(\frac{\mu_b}{\mu_{wi}} \right)^{0.0945} \tag{7}$$

$1.5 \times 10^4 \leq Re \leq 2 \times 10^5$

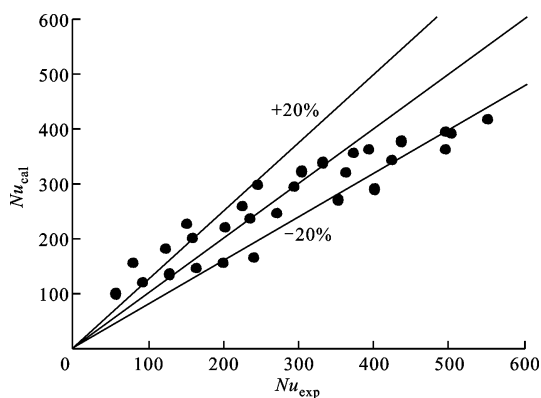


图8 减阻煤油试验值与关联式预测值的比较

式中下标 b 表示以中心流体温度为特征值计算出的中心流体相关参数值,下标 wi 表示以管道内壁温度为特征值计算出的近壁面流体相关参数值。由图 8 可见,式(7)预测值与试验值偏差 20%,吻合良好。

3 结 论

本文在火箭煤油再生冷却工程应用热环境条件下,研究了减阻剂在高温高压火箭煤油中的减阻效果,得到以下结论。

(1)在本文研究条件下,煤油传热机理为超临界压力单相类液态强制对流换热;质量流速增大,煤油传热性能提升;局部传热系数沿轴向缓慢递增;总传热系数随热流密度线性增加。

(2)减阻剂的减阻效果明显,但随着流体温度升高,雷诺数增大,减阻效果弱化。添加减阻剂后,火箭煤油的换热性能弱化。当雷诺数小于 63 000 时,减阻效果大于传热弱化效果,大于 63 000 时结果相反。

(3)将火箭煤油和低流阻火箭煤油的换热性能与式(5)和式(6)的预测值进行对比,发现火箭煤油换热性能较好,均大于式(5)和式(6)的预测值。低流阻火箭煤油的传热性能小于式(5)预测值,但仍大于式(6)的预测值。本文拟合了低流阻煤油的换热关联式,计算值与试验值吻合良好。

参考文献:

- [1] LUX J, HADIN O. Flame stabilization in high pressure liquid oxygen/methane rocket engine combustion [J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2009, 25(1): 15-23.
- [2] HUANG Z W, HE G Q, QIN F, et al. Combustion oscillation study in a kerosene fueled rocket-based combined-cycle engine combustor [J]. *Acta Astronautica*,

2016, 129: 260-270.

- [3] PIZZARELLI M, NASUTI F, ONOFRI M. Analysis of curved-cooling-channel flow and heat transfer in rocket engines [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(5): 1045-1053.
- [4] QIN J, ZHANG S, BAO W, et al. Experimental study on the performance of recooling cycle of hydrocarbon fueled scramjet engine [J]. *Fuel*, 2013, 108: 334-340.
- [5] 胡志宏. 火箭发动机特种煤油传热特性的试验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1996: 15-45.
- [6] TOMS B A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers [C] // *Proceedings of the First International Congress on Rheology*. Berlin, Germany: Springer, 1948: 135-138.
- [7] 焦利芳, 李凤臣. 添加减阻剂湍流减阻流动与换热研究综述 [J]. *力学进展*, 2008, 38(3): 340-357.
- JIAO Lifang, LI Fengchen. A review of turbulence-reducing flow and heat transfer of adding drag reducers [J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 38(3): 340-357.
- [8] OHLENDORF D, INTERTHAL W, HOFFMANN H. Surfactant systems for drag reduction: physical-chemical properties and rheological behavior [J]. *Rheologica Acta*, 1986, 25: 468-486.
- [9] VIRK P S. Drag reduction fundamentals [J]. *AIChE Journal*, 1975, 21(4): 625-656.
- [10] SHAO X, LIN J, WU T, LI Y. Experimental research on drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2002, 80(2): 293-298.
- [11] 蔡国琰. 流体黏弹性对湍流流动与传热的影响 [J]. *山东工业大学学报*, 1987(4): 44-49.
- CAI Guoyan. Effects of fluid viscoelasticity on turbulent flow and heat transfer [J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 1987(4): 44-49.
- [12] 马祥瑞, 陶进. 表面活性剂管道减阻及传热特性的研究 [J]. *水动力学研究与进展*, 1993(b12): 636-642.
- MA Xiangguan, TAO Jin. Study on resistance reduction and heat transfer characteristics of surfactant pipeline [J]. *Hydrodynamics Research and Progress*, 1993 (b12): 636-642.
- [13] LI F C, WANG D Z, KAWAGUCHI Y, et al. Simultaneous measurements of velocity and temperature fluctuations in thermal boundary layer in a drag-reducing surfactant solution flow [J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 36(1): 131-140.

(下转第 156 页)