

小通道内高参数火箭煤油流动传热特性研究

高中华¹, 兰海平², 潘辉¹, 韩伟², 封凡¹, 毕勤成¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安航天动力试验技术研究所, 710100, 西安)

摘要: 为探究火箭煤油在实际工程应用中的流动传热特性,在直径为 2 mm、壁厚为 0.5 mm 的水平圆形小通道内进行了实验研究,实验参数为压力 25 MPa、热流密度 $2\sim 35\text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 、质量流速 $8\,000\sim 48\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。根据实验结果,讨论了质量流速、工质入口温度和热流密度对火箭煤油流动传热特性的影响,拟合得到了高参数火箭煤油的对流传热关联式,并引入概率密度函数(PDF)来减缓超临界煤油热物性随温度的剧烈变化。结果表明:超临界压力下煤油传热类似单相液体强制对流传热,传热系数沿流向递增;质量流速、入口油温和热流密度的增大均可带来传热强化。低雷诺数下,质量流速越大,入口油温越低,流阻越大;雷诺数大于 10^5 时,摩擦阻力系数主要取决于管壁相对粗糙度,与雷诺数无关。新的拟合传热式考虑了各物性参数的影响,可将平均预测偏差降至 7.3%;同时,基于 PDF 的传热模型可以平滑拐点温度附近热物性的不连续快速变化,在 $388\sim 430\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内有效降低预测误差。

关键词: 高参数;火箭煤油;流动传热;热物性;概率密度函数

中图分类号: V511 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)01-0108-08

Investigation on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Rocket Kerosene in Small Channel with High Parameter

GAO Zhonghua¹, LAN Haiping², PAN Hui¹, HAN Wei², FENG Fan¹, BI Qincheng¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: To explore the flow and heat transfer characteristics of rocket kerosene in practical engineering applications, an experimental study was carried out in a $\Phi 2\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ horizontal circular channel. The experimental parameters are as follows: pressure 25 MPa, heat flux from 2 to 35 $\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$, mass flow rate from 8 000 to 48 000 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. According to the experimental results, the effects of mass flow rate, inlet temperature and heat flux were discussed, and a convective heat transfer correlation for rocket kerosene with high parameters was developed. Meanwhile, the temperature probability density function (PDF) was introduced to slow down the drastic change of predicted thermal properties of supercritical kerosene with temperature. The results revealed that the heat transfer of kerosene at supercritical pressure is similar to the forced convection heat transfer of single-phase liquid, that the heat transfer coefficient increases along the flow direction, and that the increase of mass flow rate, inlet

temperature and heat flux all can enhance heat transfer. At low Reynolds number, the increase of mass flow rate and the decrease of inlet temperature may lead to an increase of flow resistance. However, in high Reynolds number conditions, the friction coefficient is independent of Reynolds number and mainly depends on the relative roughness of the tube wall. The influences of various physical parameters were considered in the new fitted heat transfer correlation, which can reduce the average deviation to 7.3%. Meanwhile, the PDF-based heat transfer model can smooth the discontinuous rapid change of thermal properties near the inflection point temperature, and effectively reduce the prediction error in the temperature range of 388-430 °C.

Keywords: high parameter; rocket kerosene; flow and heat transfer; thermophysical properties; probability density function

火箭煤油是由烷烃、芳烃和环烃等组成的高沸点烃类混合物,临界压力为 2.2 MPa 左右,临界温度约为 400 °C,常被作为液体火箭发动机的燃料和主动再生冷却系统的冷却剂^[1]。煤油在火箭发动机主动再生冷却系统中的工作压力多处于 20~25 MPa,流速可达 40~60 m/s,是典型的高压、高热负荷、高流速流动换热问题。而且,由于煤油组分的复杂性,它的密度、黏度等热物性变化与传统的超临界流体如水、二氧化碳等具有显著差异^[2-3]。

近年来,由于再生主动冷却热防护技术在火箭发动机中的广泛应用,火箭煤油在高压、高热流主动热防护通道内的传热流动特性也得到了大量的研究。例如:胡志宏等通过实验探究了超临界压力、高热流密度条件下煤油在水平圆管中的传热特性,发现了拟沸腾及传热强化现象,并拟合出煤油单相强制对流传热关联式^[4-5];Linne 等通过电热管实验研究了超临界态 JP-7 火箭煤油在高热流条件下的传热能力和碳沉积特性^[6];李中洲等对 RP-3 航空煤油在不同内径小圆管内的流动阻力及摩擦压降进行了研究,发现层流摩擦阻力系数随雷诺数增大而减小^[7];刘朝晖等对火箭煤油在近临界压力下的对流传热及压降特性进行了研究,测得了摩擦阻力系数,并观察到拟沸腾区的流动不稳定性^[8]。

对于管道内强制对流传热性能的预测,应用最广泛的是 D-B 公式^[9],目前很多超临界流体的对流传热关联式也是在 D-B 公式基础上进行修正。例如:Jackson 等考虑密度和黏度梯度的影响提出了适用于超临界水和二氧化碳的经验预测关联式^[10];Hu 等提出了适用于内壁温低于拟临界温度的超临界煤油传热关联式^[11];颜建国通过建立传热叠加模型来拟合高热流煤油传热关联式,提出总传热系数由单相强制对流传热系数和拟相变传热系数叠加组成^[12];Li 等研究了超临界 CO₂ 在加热和冷却两种

模式下的强迫对流传热特性,考虑了超临界流体热物性在时空维度上的剧烈变化,引入概率密度函数(PDF)作为基函数对热物性进行平滑处理,在一定热流密度范围内对超临界 CO₂ 非线性湍流传热性能的预测效果进行了较好的改善,但高热流条件下的适用性仍需进一步扩展^[13];Zhao 等通过引入温度的 PDF 对黏度和导热系数进行了修正,通过选择合适的标准差,可有效地降低高壁温下超临界煤油的传热预测误差,但并未考虑比热容剧烈变化带来的影响^[14]。

目前,针对超临界态煤油传热流动机理的研究很多,但对火箭发动机实际工程应用条件下的流动传热特性缺乏深入的探讨。本文采用小通道、电加热来模拟火箭发动机主动再生冷却通道内高压、高热流、高流速的工作环境,对高参数下火箭煤油的流动传热特性进行研究,通过引入热物性修正和 PDF 模型来探讨火箭煤油的对流传热规律。

1 实验装置与测量方法

1.1 实验系统

实验系统在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室碳氢燃料流动与传热实验台上搭建完成,如图 1 所示。实验工质从燃料箱经过滤器过滤进入高压柱塞泵升压,然后分两路进入系统,一路用于旁路调节流量,另一路经针阀调节进入实验主回路。在实验主回路系统中,燃料经主调节阀、节流阀、质量流量计,流入预热段和实验段进行电加热,随后高温燃料进入高温过滤器、换热器过滤冷却,最后经背压阀流入废液箱。在整个实验过程中,流量通过预热段前的质量流量计测量;进出口燃油温度和压力通过在实验段进出口布置压力传感器和铠装热电偶进行监测。

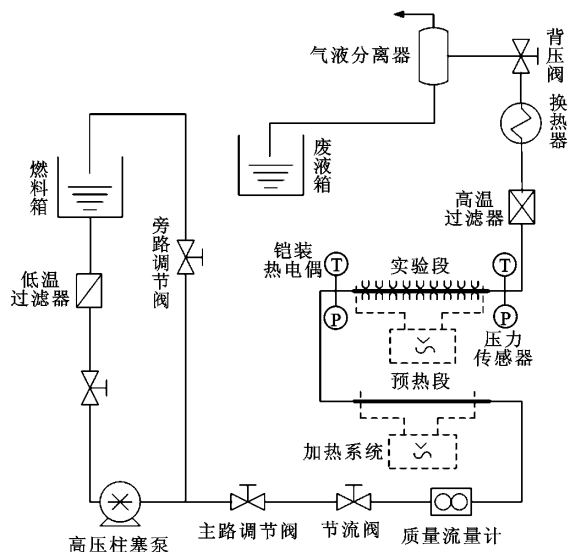


图1 实验系统图

1.2 实验段与工质

实验段为直径 2 mm、壁厚 0.5 mm 的 GH3128 高温合金钢管,水平安装,总长度为 200 mm,有效加热长度为 180 mm,采取低电压、大电流的电加热方式,利用管件自身电阻获得焦耳热。实验段上下壁面等距焊接 9 对热电偶以测量外壁面温度,测温点间隔为 20 mm。实验段前装设直径为 6 mm、壁厚为 1 mm 的预热段,有效加热长度为 2 m。实验段和预热段均包裹保温棉以减小散热损失。

实验工质为火箭煤油。实验参数为:压力 25 MPa;质量流速 8 000、32 000、48 000 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;对应冷态流速 10、40、60 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;入口油温 50、100、200 $^{\circ}\text{C}$;热流密度 0~35 $\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

1.3 数据处理

1.3.1 传热系数计算 实验段热流密度通过所测加热电流、电压得到

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

式中: U 、 I 分别为实验段加热电压与电流; d_i 为实验段内径; L 为实验段长度。

忽略轴向导热,水平均匀电加热圆管通道的内壁温可参照文献[15]计算得到

$$T_{w,i} = T_{w,o} + \frac{\dot{q}}{16\lambda}(d_o^2 - d_i^2) + \frac{\dot{q}d_o^2}{8\lambda} \ln\left(\frac{d_i}{d_o}\right) \quad (2)$$

式中: $T_{w,o}$ 为热电偶测点所测管外壁温; $T_{w,i}$ 为对应内壁温。

对流传热系数由下式计算

$$h = \frac{q}{T_{w,i} - T_f} \quad (3)$$

式中 T_f 为测温节点处燃料中心温度,通过有效吸热

量和燃料热沉插值得到。燃料热物性依据文献[4]中拟合的火箭煤油热物性公式计算。

1.3.2 摩擦阻力系数计算 火箭煤油管内流动压降包含进出口局部压降、沿程摩擦压降、加速压降和重力压降。由于实验段为水平放置的等截面直圆管,重力压降可忽略,因此总压降可表示如下

$$dp = dp_f + dp_c + dp_a \quad (4)$$

式中: dp_f 为摩擦压降; dp_c 为进出口局部压降; dp_a 为加速压降。

dp_c 由实验段进口收缩压降 $dp_{c,i}$ 和出口膨胀压降 $dp_{c,o}$ 组成,而且 $dp_{c,i}$ 占主导,出口截面附近存在压力恢复,因此 $dp_{c,o}$ 是负值。局部压降受流动结构影响较大,通常通过实验获取,但存在一定难度。本文参考 Hall-Mudawar 和 Hewitt 推荐的经验关联式^[16-17],将进口收缩压降定义如下

$$dp_{c,i} = \frac{G^2}{2\rho} \left[1 - \left(\frac{d_i}{D_i} \right)^2 + \left(\frac{1}{\kappa_{c,i}} - 1 \right)^2 \right] \quad (5)$$

出口膨胀压降定义为

$$dp_{c,o} = \frac{G^2}{2\rho} \left[\kappa_{c,o} - 1 + \left(\frac{d_i}{D_i} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中: G 为质量流速; D_i 为实验段前后衔接管内径,取值 4 mm; $\kappa_{c,i}$ 和 $\kappa_{c,o}$ 为中间变量,定义如下

$$\kappa_{c,i} = \frac{1}{1 + 0.639(1 - d_i/D_i)^{0.5}} \quad (7)$$

$$\kappa_{c,o} = 1 - 2\left(\frac{d_i}{D_i}\right) + \left(\frac{d_i}{D_i}\right)^2 \quad (8)$$

煤油吸热温度升高,密度、黏度减小,实际流速增加,从而产生加速压降

$$dp_a = G(v_o - v_i) \quad (9)$$

式中: v_i 为实验段入口流速; v_o 为实验段出口流速。

沿程摩擦压降 dp_f 由煤油与壁面之间的黏性摩擦引起,主要以剪切应力的形式存在,但剪切应力很难在实验中测得,本文将其转化为压降进行计算

$$dp_f = dp - dp_c - dp_a \quad (10)$$

摩擦阻力系数根据达西公式计算得到

$$f = \frac{2dp_f d_i}{L\rho v^2} \quad (11)$$

2 实验结果与分析

2.1 高参数火箭煤油的传热性能

图 2 给出了实验压力为 25 MPa、质量流速为 8 000 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、入口油温为 50 $^{\circ}\text{C}$ 时火箭煤油传热性能参数沿轴向的分布。由图可知:管内壁温在入口段下降趋势明显,而后沿流向壁温差别逐渐减小。根据已有文献,在管内湍流流动、均匀恒热流

边界条件下,受入口效应影响,流体换热效果在 $0 < x/d < 60$ 的范围内有所弱化,导致入口段内壁温相对偏高^[9,18]。恒定热流密度条件下,换热温差沿流向逐渐减小,局部传热系数 h_{loc} 逐渐增大。这是因为沿流向主流温度上升,动力黏度 μ 、导热系数 λ 、普朗特数 Pr 都将减小,其中轴向黏度变化影响占主导地位,黏度减小使得雷诺数增大,湍流度增加,参考 D-B 公式中流体热物性对对流传热过程的影响^[9],煤油传热系数与其黏度的 0.4 次幂成反比,努塞尔数 Nu 增大,传热强化。

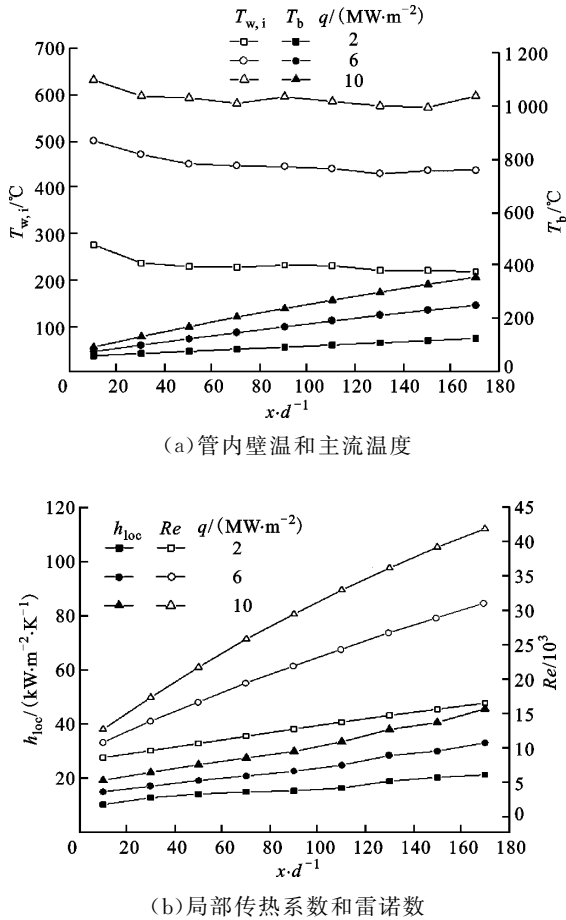


图 2 火箭煤油传热性能参数沿轴向的分布

图 3 给出了在实验压力为 25 MPa,入口油温为 50 $^{\circ}\text{C}$,不同质量流速 8 000、32 000、48 000 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下火箭煤油的传热性能。如图所示,在相同热流密度下,随着流速增加,管内壁温降低,平均传热系数 h_{ave} 升高。这是因为在 25 MPa 高压下煤油换热过程大多未达到拟沸腾态^[5,19],传热的主导因素是单相液体强制对流传热,此时流速越大,中心主流与近壁流体的掺混愈加剧烈,导致雷诺数增大,而且相同的时间内流体能带走更多的热量,传热性能得以强化。

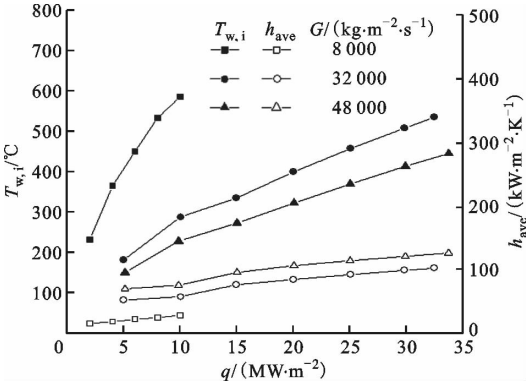


图 3 不同质量流速下火箭煤油的传热性能

图 4 是质量流速为 32 000 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、实验压力为 25 MPa、不同热流密度 5~20 $\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和不同入口油温 50~200 $^{\circ}\text{C}$ 下管内壁温沿轴向的分布情况。由图可知:各局部截面内壁温随热流密度增大而升高,受入口效应影响^[20],热流密度较低时,管内壁温沿轴向降低,且在实验段前 1/3 范围内相对偏高,但入口油温和热流密度的增加会一定程度减缓这种传热弱化现象;入口油温为 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,入口段主流与近壁面流体温差较大,煤油热边界层发展较慢,入口效应明显,具体表现为前 3 个测温点的内壁温相对偏高;随着入口温度升高,热边界层发展较快,入口油温为 200 $^{\circ}\text{C}$ 时,入口传热弱化现象不明显;当热流密度增加到一定程度时,入口效应已基本消除,入口油温对入口传热弱化的影响很小,且随着热流密度增大,管内壁温沿轴向有所升高,尤其是入口油温高时越明显。

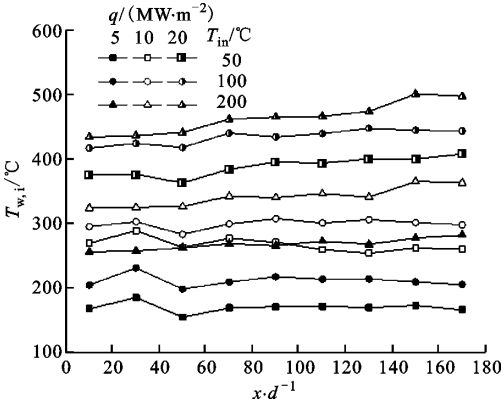


图 4 不同热流密度和入口油温下管内壁温沿轴向的分布

不同入口油温下火箭煤油的传热性能如图 5 所示,结果表明平均传热系数随着入口油温升高而增大。这是因为温度越高,燃料比定压热容越大,吸热能力增强,且动力黏度越小,雷诺数越大,流体湍动愈加剧烈,平均温差降低,从而带来传热强化。

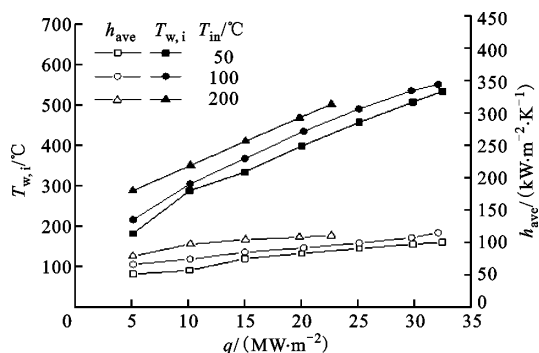


图5 不同入口油温下火箭煤油的传热性能

2.2 高参数火箭煤油的流动性能

火箭煤油的流动性能可根据图6和图7进行分析,其中同一曲线上不同的雷诺数代表不同的热流密度。如图6所示,质量流速增加,摩擦阻力系数增加,压降近似按平方增加。这是因为摩擦阻力和局部阻力都与流速的平方成正比,但在高雷诺数下,质量流速对摩擦阻力系数的影响程度有所减弱,摩擦阻力系数相互靠拢且逐渐趋于平稳。分析发现,本文所用无缝不锈钢管在雷诺数达到 10^5 时,流动处于阻力平方区,此时摩擦阻力系数与雷诺数无关,主要取决于管壁状况。

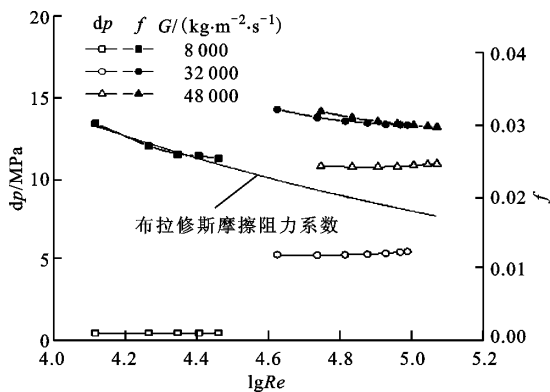


图6 质量流速对火箭煤油流动性能的影响

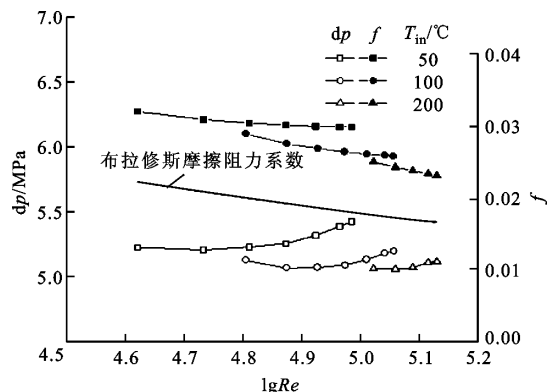


图7 入口油温对火箭煤油流动性能的影响

入口油温对火箭煤油流动性能的影响在水力学光滑管区主要取决于煤油物性和传热模式。如图7所示:入口油温越低,煤油黏度越大,压降越大;随着入口油温升高,近壁面流体与主流的密度差越小,浮升力也越小,流体相互掺混程度低,压降相对较小,但对于同一入口油温,在热流密度和壁温较高时,压降呈现出一定的增大。分析发现,该变化主要由流体温度升高、密度减小、流速变快引起,入口油温为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,密度降低 9.7% ,压降对应升高约 9.7% 。当雷诺数达到 10^5 、流动处于阻力平方区时,摩擦阻力系数则主要取决于管壁相对粗糙度。

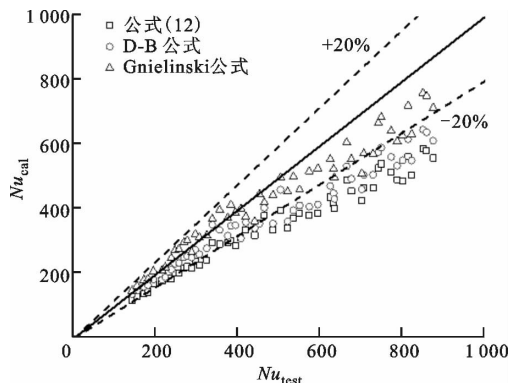
图6和图7中还给出了采用布拉修斯公式计算的水力学光滑管的摩擦阻力系数曲线,对比实验结果发现,在 $\lg Re < 4.5$ 时,布拉修斯公式计算值与实验值吻合较好,但在高雷诺数下,两者偏差逐渐增大。

2.3 传热关联式拟合

胡志宏拟合的火箭煤油传热准则式^[4]为

$$Nu_f = 0.02 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (12)$$

本文实验结果与式(12)、D-B公式和 Gnielinski公式等经典传热式预测结果的对比如图8所示。由图8可以看出:在流体温度和壁面温度不高时,管内流体为单相强制对流传热,此时式(12)和D-B公式预测性能良好,具体表现在 Nu 较小时两者与实验值吻合较好,但 Nu 越大,预测值与实验值偏差越大,最高可达 38% ,且式(12)预测值整体偏小;Gnielinski关联式则考虑了阻力的影响,精度略高,适用于热物性变化不大的常规流体管内湍流强制对流传热。

图8 Nu 实验值与经典传热公式预测值的比较

在高压高热流密度条件下,煤油从液态过渡到超临界态,径向温度差异较大,热物性会产生剧烈变化,管内流体的瞬时湍流传热特性在时空维度上具有很强的非线性关系,但此时经典传热公式主要考虑 Pr 的差别,而忽略了近壁区与主流区温度的差

异,故无法充分反映热物性变化的影响,尤其是在大温差、大 Nu 下偏差较大。为此,本文考虑动力黏度、导热系数和比定压热容的影响,对实验数据进行非线性拟合,得到高参数火箭煤油的传热关联式如下

$$Nu_f = 0.024 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.35} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.2} \left(\frac{\lambda_f}{\lambda_w} \right)^{-0.15} \left(\frac{c_{p_f}}{c_{p_w}} \right)^{0.4} \quad (13)$$

$$1.2 \times 10^4 \leq Re \leq 1.3 \times 10^5$$

式中:下标 f 代表以燃料中心温度 T_f 为特征温度计算得到的参数值,下标 w 代表以管道内壁温 $T_{w,i}$ 为特征温度计算得到的参数值。

图 9 对比了 Gnielinski 公式和拟合式(13)的预测效果,可以得出,式(13)可将整体偏差从 11.5% 降低到 7.3%,显著提高了 Nu 的预测性能,尤其是当 Nu 较大时,与实验值吻合良好。

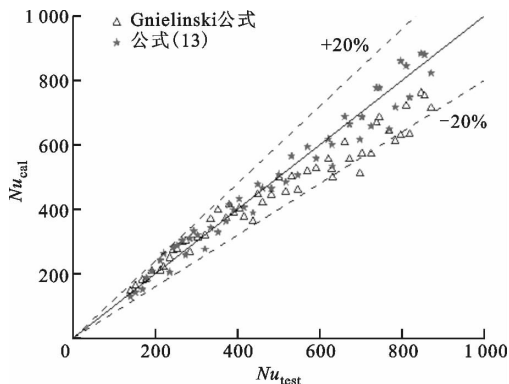


图 9 Gnielinski 公式和公式(13)预测效果对比

2.4 基于 PDF 的热物性时均修正

本文 25 MPa 压力下所用火箭煤油热物性计算公式是依据胡志宏公式^[4]插值拟合得到的分段式,物性为温度的状态参数。虽然拟合式(13)已经考虑了超临界煤油热物性的空间差异性,但由于煤油湍流流动瞬时温度的随机性,热物性随温度变化较大,尤其是在拐点温度附近的不连续变化不容忽视。

概率与统计中,PDF 常用于描述瞬时温度的随机分布,而正态分布被用来描述随机变量在其平均值附近波动的分布概率。本文选取拐点温度作为平均温度,以 PDF 为基函数来平滑热物性在拐点附近的剧烈变化,最终得到了修正后的物性时均值。温度的正态分布型 PDF 表示如下

$$\phi(T) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(T-\bar{T})^2/2\sigma^2} \quad (14)$$

式中: T 是瞬时温度; $\bar{T}$ 是平均温度; $\phi(T)$ 的值介于 0 和 1 之间; σ 是描述瞬时值偏离均值程度的标准

差,可看作湍流温度波动强度的度量。

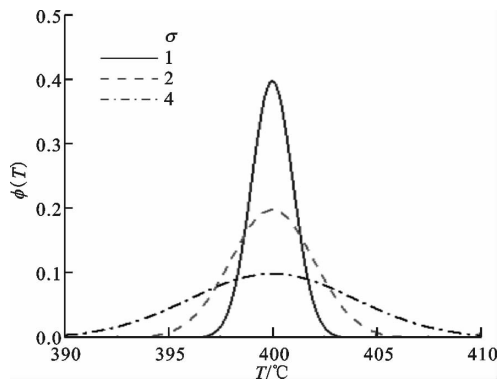


图 10 不同 σ 下的 $\phi(T)$ 分布

图 10 选取分段式拐点温度 $T_{cp1} = 400^\circ\text{C}$ 作为平均值,给出不同 σ 下的 $\phi(T)$ 分布。 $\phi(T)$ 在均值处达到峰值,说明瞬时温度达到平均温度的概率最高,而当温度偏离平均温度越多,发生概率越小。一旦确定了 σ , $\phi(T)$ 可作为计算物性时均值的基函数,以导热系数为例,公式表示如下

$$\lambda_{PDF} = \bar{\lambda}(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda(T) \phi(T) dT \quad (15)$$

图 11 以黏度、导热系数和比定压热容为例,给出了压力为 25 MPa、不同 σ 下基于 PDF 修正的火箭煤油热物性时均值。相较原始物性在拐点温度 $T_{cp1} = 400^\circ\text{C}$ 、 $T_{cp2} = 417^\circ\text{C}$ 附近的不连续快速变化,PDF 模型可使物性呈现出较平滑的变化趋势,且随着 σ 增大,热物性局部峰值的平滑效果越明显。

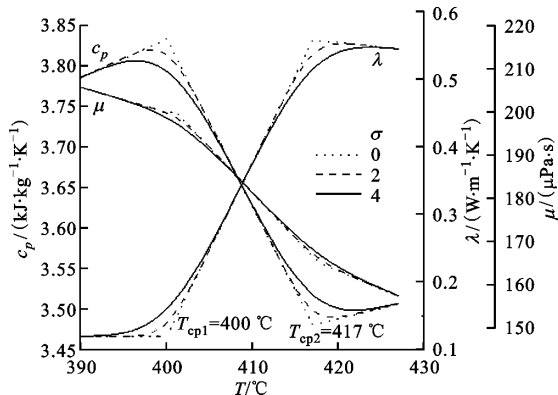
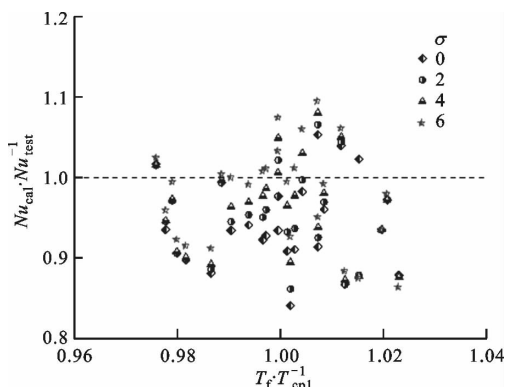


图 11 基于 PDF 的火箭煤油热物性时均修正

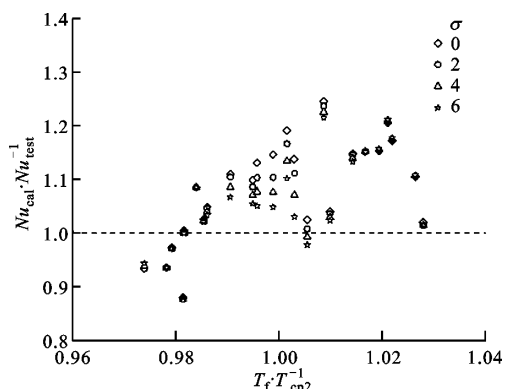
图 12 给出了压力为 25 MPa、质量流速为 $8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,火箭煤油温度处于拐点温度 T_{cp1} 、 T_{cp2} 附近时, Nu 原始预测值($\sigma = 0$)、基于 PDF 模型的时均修正值($\sigma = 2, 4, 6$)与实验值的对比。由图可得:PDF 修正模型可以很好地降低预测误差,使 Nu_{cal}/Nu_{test} 更接近 1,且越靠近拐点温度, σ 的修正效果越显著;越远离拐点温度,由于 PDF 模型对

热物性的平滑处理效果不明显, σ 对考虑热物性影响的传热公式预测精度的改善作用较小。本文热物性时均修正的适用温度范围为 $0.97T_{cp1} \sim 1.03T_{cp2}$, 即 $388 \sim 430^\circ\text{C}$ 。

如图 12a 所示, 当 $0.97T_{cp1} < T_{w,i} < 1.03T_{cp1}$ 时, 拟合式 (13) 预测值多被低估, $\sigma=0$ 时 Nu 的预测偏差为 6.9%, $\sigma=2, 4, 6$ 时分别为 6.0%、5.2%、4.7%, 可见 σ 可以有效提高预测值, 降低预测偏差, 但随着 σ 增大, 其对偏差的改善效果减弱, 即 σ 不是越大越好, 需要根据实际情况合理选择; 如图 12b 所示, 当 $0.97T_{cp2} < T_{w,i} < 1.03T_{cp2}$ 时, 预测值相对偏高, $\sigma=0$ 时 Nu 的预测偏差为 10.5%, $\sigma=2, 4, 6$ 时分别为 9.7%、8.9%、8.2%, 此时 σ 可以有效降低预测值, 使其更接近实验值。



(a) $0.97T_{cp1} < T_{w,i} < 1.03T_{cp1}$



(b) $0.97T_{cp2} < T_{w,i} < 1.03T_{cp2}$

图 12 拐点温度附近 Nu 预测值与实验值的比较

综上, 在热物性随温度剧烈变化的区间内, 基于 PDF 模型的热物性时均修正具有平滑剧烈变化的能力, σ 可看作平滑因子, 通过适当选择 σ , 预测值逐渐向实验值靠拢, 由热物性快速变化引起的预测性能的偏差可以得到较好的改善。当然, 后续需要更多的数据研究来支撑不同工况条件和不同传热公式

下 PDF 模型的改善效果。

3 结 论

本文模拟了火箭发动机实际运行条件下高压、高热流、高流速的工作环境, 评估了火箭煤油在高参数下的流动传热性能, 得出如下结论。

(1) 实验参数下, 火箭煤油传热类似于超临界压力下的单相液体强制对流传热, 管内壁温沿流向呈下降趋势, 传热系数逐渐增加; 质量流速、入口油温和热流密度的增大均可带来传热强化。

(2) 摩擦阻力系数的主导因素是雷诺数和管壁相对粗糙度。低雷诺数下, 摩擦阻力系数主要取决于煤油物性和传热模式, 质量流速越大, 入口油温越低, 流阻越大; 高雷诺数下, 摩擦阻力系数与 Re 无关, 主导因素是管壁相对粗糙度。

(3) 与经典传热公式 (公式 (12)、D-B 公式、Gnielinski 公式) 相比, 高参数条件下, 考虑热物性影响的拟合传热式 (13) 可将预测偏差降低到 7.3%, 显著提高了预测精度, 尤其是在内壁温较高、 Nu 较大时, 与实验值吻合较好。

(4) 考虑超临界火箭煤油热物性在拐点温度附近的不连续快速变化, 采用基于 PDF 的传热模型进行平滑处理, 可以有效降低拟合公式的预测偏差, 在拐点温度范围 ($388 \sim 430^\circ\text{C}$) 内, 通过合理选择标准差, 偏差可降低 2%~3% 左右。

参考文献:

- [1] HUANG H, SPADACCINI L J, SOBEL D R. Fuel-cooled thermal management for advanced aero engines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2004, 126(2): 284-293.
- [2] SHIRALKAR B S, GRIFFITH P. The deterioration in heat transfer to fluids at supercritical pressure and high heat fluxes [J]. Journal of Heat Transfer, 1968, 91(1): 67.
- [3] HUAI X L, KOYAMA S, ZHAO T S. An experimental study of flow and heat transfer of supercritical carbon dioxide in multi-port mini channels under cooling conditions [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(12): 3337-3345.
- [4] 胡志宏. 火箭发动机特种煤油传热特性的实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1996: 15-45.
- [5] 胡志宏, 陈昕宽, 罗毓珊, 等. 高热流条件下超临界压力煤油流过小直径管的传热特性 [J]. 化工学报, 2002, 53(2): 134-138.

HU Zhihong, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al.

- H-heat transfer characteristics of supercritical pressure kerosene flowing through small diameter pipe under high heat flux [J]. *CIESC Journal*, 2002, 53(2): 134-138.
- [6] LINNE D, MEYER M, EDWARDS T, et al. Evaluation of heat transfer and thermal stability of supercritical JP-7 fuel [C] // 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit. Washington, DC, USA: AIAA, 1997: 3041.
- [7] 李中洲, 朱惠人. 小圆管内航空煤油流动阻力研究 [J]. *航空工程进展*, 2010(2): 164-168.
LI Zhongzhou, ZHU Hui ren. Study on the flow resistance of the aviation kerosene in small tube [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2010 (2): 164-168.
- [8] LIU Z, BI Q, GUO Y, et al. Convective heat transfer and pressure drop characteristics of near-critical-pressure hydrocarbon fuel in a minichannel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51(1/2): 1047-1054.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 246-247.
- [10] JACKSON J D, HALL W B. Forced convection heat transfer to fluids at supercritical pressure [M] // NATO Advanced Study Institute. *Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles*. New York, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1979: 563-611.
- [11] 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 超临界压力下煤油传热特性试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 1999, 33 (9): 62-65.
HU Zhihong, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1999, 33(9): 62-65.
- [12] 颜建国. 高热流密度主动冷却通道内的热工水力特性试验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2016: 158-175.
- [13] LI H, KRUIZENGA A, ANDERSON M, et al. Development of a new forced convection heat transfer correlation for CO₂ in both heating and cooling modes at supercritical pressures [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50(12): 2430-2442.
- [14] ZHAO W, SONG Z, LI H, et al. Research on heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure in circular tubes [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 96: 507-515.
- [15] 周强泰. 电加热厚壁管内壁温度的计算 [J]. *南京工学院学报*, 1985, 15(4): 38-43.
ZHOU Qiangtai. Calculation of inner wall temperature for a electrically heated thick-wall tube [J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology*, 1985, 15(4): 38-43.
- [16] HEWITT G F, BUTTERWORTH D. Two-phase flow and heat transfer [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1977: 58-89.
- [17] HALL D D, MUDAWAR I. Ultra-high critical heat flux (CHF) for subcooled water flow boiling: II High-CHF database and design equations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42 (8): 1429-1456.
- [18] 张赞坚, 刘朝晖, 潘辉, 等. 低流阻火箭煤油的超临界压力流动与换热特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(1): 129-134.
ZHANG Zanjian, LIU Zhaohui, PAN Hui, et al. Flow and heat transfer characteristics of low-flow resistance rocket kerosene under supercritical pressure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53 (1): 129-134.
- [19] 彭晓峰, 王补宣. 液体内部汽化的汽化空间与拟沸腾 [J]. *中国科学基金*, 1994(1): 11-16.
PENG Xiaofeng, WANG Buxuan. The evaporating space and the fictitious boiling for internal evaporation of liquid [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 1994(1): 11-16.
- [20] BARLETTA A, MAGYARI E. Thermal entrance heat transfer of an adiabatically prepared fluid with viscous dissipation in a tube with isothermal wall [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128(11): 1185-1193.

(编辑 荆树蓉)