

压力对水平管内超临界碳氢燃料流动 换热影响实验

朱 锟¹, 徐国强², 贾洲侠², 张启军¹

(1. 中国航空工业集团公司 中航空天发动机研究院有限公司, 北京 101304;

2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 通过实验装置研究了系统压力对水平管内超临界碳氢燃料 RP-3 流动换热特性的影响规律, 并对管内燃油径向热物性变化、浮升力以及热加速对流动换热特性的作用机理进行了分析。结果表明: 管内燃油表面传热系数随主流温度升高而增大, 不同系统压力下, 燃油在相同无量纲温度点热物性变化速率的不同导致了表面传热系数和 Nu_x 峰值的差异; 燃油主流温度与内壁温度之间的差异而导致的热物性差别是造成管内换热规律变化的主要原因, 浮升力和热加速作用对换热特性的影响可以忽略; 无量纲参数 Gr_q/Gr_{th} 可以更好地反映超临界压力碳氢燃料 RP-3 在水平管内的沿程流动换热特性变化规律。

关 键 词: 超临界; 系统压力; 航空煤油 RP-3; 水平圆管; 对流换热

中图分类号: V312⁺.1

文献标志码: A

Pressure effect on the heat transfer characteristics of hydrocarbon fuel in the horizontal circular tube at supercritical pressures

ZHU Kun¹, XU Guo-qiang², JIA Zhou-xia², ZHANG Qi-jun¹

(1. Academy of Aeronautic Propulsion Technology,

Aviation Industry Corporation of China, Beijing 101304, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on

Aero-Engine Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Experiments were performed to investigate the pressure effect on the heat transfer characteristic of hydrocarbon fuel RP-3 in the horizontal circular tube at supercritical pressures. The mechanisms of heat transfer variation due to the radial thermal property, buoyancy and acceleration effects were discussed as well. The results showed that the heat transfer coefficient increased with the rising fuel bulk temperature. Under different pressures, the fuel thermal property variation's gradient led to the discrepancies of heat transfer and Nu_x peak points at the same dimensionless bulk temperature. The main reason of the heat transfer distribution was attributable to the radial thermal property gradient due to the temperature discrepancy between the tube inner wall and bulk fuel. However, the buoyancy and acceleration effect were limited in the experiment region. It showed that the dimensionless parameter Gr_q/Gr_{th} precisely reflected the heat transfer characteristic variation of the supercritical hydrocarbon in the horizontal circular tube.

收稿日期: 2015-11-14

基金项目: 航空科学基金(2015ZBN3011)

作者简介: 朱锟(1985—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 工程师, 博士, 主要从事航空发动机热管理系统相关研究。

Key words: supercritical; system pressure; aviation kerosene RP-3;
horizontal circular tube; heat transfer

高超声速空天飞行器以其突出的突防和高速特性引起了各军事大国的强烈关注,但同时也带来了许多技术难题,使其研制面临巨大技术挑战,亟需在空气动力、传热、材料、结构和推进技术等方面开展大量的研究工作.在涡轮基组合动力循环(TBCC)中,随着飞行器速度的提高,发动机来流温度不断升高,一方面造成动力系统热负荷大幅增大,另一方面也使得高温部件的冷却气体温度随之升高,冷却效果下降.从传热学角度来看,虽然可以通过增加冷却流体用量、改善冷却结构和提高材料耐温极限来实现空天飞行器动力系统高温部件的热防护,但过量的冷却空气用量会造成涡轮基发动机性能的损失,材料的耐温极限在短时间内很难实现巨大突破,同时冷却结构的改变对冷却效果提高的幅度十分有限.因此,从传热学本质出发,另寻发动机有效冷源,或通过有效措施降低高温部件冷却流体温度,提高冷却流体的冷却品质,进而实现高热负荷部件的有效冷却.

超声速空天飞行器通常采用涡轮基组合动力循环来实现飞行器的地面起飞、高载质量和高超声速巡航,其动力系统质量是影响飞行器综合性能的一项重要评价指标,而额外冷却介质的引入势必会增加飞行器质量,大幅降低飞行器的可携带质量.因此,在不改变发动机原有结构布局的基础上,通过加装换热器,利用其自带燃料作为冷源对高温来流进行直接冷却,或对高温部件冷却空气进行预冷,除了可以避免除燃油、滑油外的第3流体引入,最大程度降低了换热器系统对整体收益的影响外,还具有巨大的技术潜能^[1].

典型航空发动机燃油系统压力约为34~68 atm^[2](3.45~6.89 MPa),高于航空煤油的临界压力.随着燃油冷却热负荷的不断提高,燃油温度不断上升,燃油将经历超临界压力液态和超临界态两种不同的工作状态.当燃油温度超过当前压力下燃油的拟临界温度时,燃油由超临界压力液态转变为超临界态,在拟临界温度点(压力高于临界压力时,比热达到峰值时的温度点)附近热物性发生剧烈变化,进而呈现出特殊的流动阻力(飞升或突降)与传热(强化或恶化)特性,影响发动机的可靠稳定运转.

针对近60年来的研究成果,Pioro, Duffey, Kurganov等^[3-6]学者,分别在不同阶段对超临界

流体的流动换热特性进行了综述.其中,Silin^[7]对超临界二氧化碳流经内径为2.05, 4.28 mm的竖直和水平管内对流换热进行了研究,研究中发现当燃油温度 $T_b \leq T_{pc}$ (拟临界温度),并且壁面温度 $T_w \geq T_{pc}$ 时,管内会出现换热强化现象.Liao, JIANG Peixue, LI Zhihui等^[8-11]则将管内换热现象的剧烈变化归结于超临界流体热物性强烈变化而引起的浮升力、热加速影响,并且给出了竖直流向管内浮升力影响判别关系式 $\overline{Gr}_b / Re_b^{2.7} > 10^{-5}$.随后Jackson等^[12]在研究中又对浮升力影响提出了进一步修正,并提出了浮升力对换热影响的无量纲准则数 Bo^* .

Petukhov等^[13]认为不同流动方式下,浮升力作用对流动换热特性的影响也存在一定差异,并基于水平圆管中超临界流体换热实验给出了水平圆管内判定浮升力影响的无量纲关系式,即当 $Gr_q < Gr_{th}$ 时,水平管中浮升力的影响可以忽略不计.Bazargan、李勋锋等^[14-15]等分别在其实验和数值模拟研究中发现Petukhov等^[13]关系式可以更好地反应水平管内超临界流体传热现象受浮升力影响的变化规律.

超临界压力流体在流动换热过程中除了受到浮升力影响之外,还会受到流动加速影响,导致传热恶化的发生,其恶化机理同浮升力有所不同^[14].Mceligot等^[16]基于气体在管内的流动和换热实验结果,提出了判定流动热加速影响的无量纲热加速影响因子 K_v ,并基于实验数据的总结,认为当 $K_v \geq 3 \times 10^{-6}$ 时,流体热加速作用会造成湍流层流化,明显影响换热效果,从而导致局部换热恶化.Murphy等^[17]认为,当 $K_v \leq 9.5 \times 10^{-8}$ 时,热加速影响可以忽略,但是当大于这一数值时,热加速作用开始影响湍流的产生,使得换热效果开始下降;当 $K_v \geq 4 \times 10^{-6}$ 时热加速作用将明显影响换热效果,使得湍流层流化,即在湍流流动状态下,出现和层流一个量级的换热效果.

北京航空航天大学近年来针对超临界压力国产航空煤油RP-3高温高压条件下热物性参数^[18-22]以及流经竖直细圆管内对流换热特性^[1, 23-26]等方面开展了一系列实验研究工作,取得了丰富的研究成果.

本文通过实验研究,着重分析了系统压力对水平细圆管内超临界碳氢燃料流动换热特性的影

响规律,给出了不同系统压力下 Nu_x 和浮升力影响因子 Bo^* , Gr_q/Gr_{th} 以及热加速影响因子 K 。随燃油温度变化的规律,进而对浮升力、热加速等影响传热变化的机理进行了分析,为高超声速飞行器热管理系统设计提供重要支撑。

1 实验系统

1.1 实验装置

本实验在北京航空航天大学超临界碳氢燃料流动与换热实验台完成,实验系统及燃油流路在相关文献[25]中有详细介绍,在此不做赘述。

实验段(图1)中标称内径为 1.9 mm、厚度为 0.15 mm 的不锈钢光滑细圆管,采用冷拉方式加

工而成,实验管两端与测温取压接头之间卡套连接。实验段总长为 800 mm,加热段长度为 500 mm ($L/d_{in}=277.8$),为了保证实验段进出口流场的充分发展,在加热段进出口处均有 150 mm ($L/d_{in}=83.3$)绝热段。在实验加热段外壁上表面均布了 15 根 K 型 I 级精度热电偶用于测量加热段外壁温。实验中利用稳压交流电源,通过银焊在加热段两端的铜电极对实验段进行加热。

为了最大限度捕捉到不同压力、相同热流密度下各温度区间内燃油在管内换热情况的变化规律,在实验过程中,实验段热流密度保持不变,通过改变预热段加热功率,从而提高实验段入口燃油温度(起始温度为 373~723 K)。

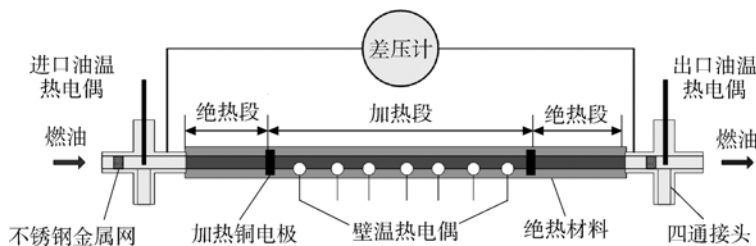


图1 实验段示意图

Fig. 1 Schematic of the test section

1.2 实验工质

本文所采用的碳氢燃料为中国航油集团北京分公司的国产 RP-3 航空煤油,其成分通过天津大学质谱色谱联用仪分析得到,其中链烷烃占 52.44%,烯烃占 7.64%,苯类化合物占 18.53%,环烷烃占 15.54%,萘类化合物占 4.39%,还有其他化合物占 1.46%。数据处理过程中所用航空煤油 RP-3 比定压热容、动力黏度、密度、导热系数等热物性参数均为实验测量^[18-22],燃油 RP-3 热物性参数,随温度的变化如图2所示,具体测量方法在此不做赘述。

2 数据处理

管内局部对流传热系数 h_x 的定义为

$$h_x = \frac{q_x}{T_{w,x} - T_{b,x}} \quad (1)$$

式中 q_x 为有效壁面热流密度, $T_{b,x}$ 为实验管轴向 x 处的燃油主流温度。不锈钢金属管在受热过程中,其管电阻会随温度的不同而发生变化,进而影响实际加热热流密度,因此,在计算过程中,需要考虑电阻率随壁面温度的变化,同时扣除加热实验段向外界的散热,由式(2)计算

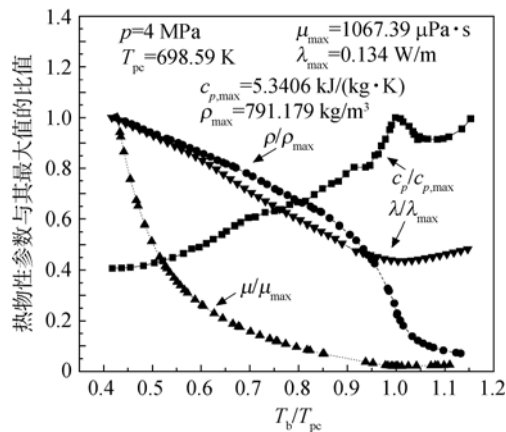


图2 燃油 RP-3 热物性参数随温度的变化

Fig. 2 Temperature depended thermal properties variation of fuel RP-3

$$q_x = q_{0,x} - q_{loss,x} = \frac{I^2 \rho(T) / [\pi (d_{out}^2 - d_{in}^2) / 4]}{\pi d_{in}} - q_{loss,x} \quad (2)$$

式中 $q_{0,x}$ 为总加热热流密度, I 为流经加热不锈钢管中的电流, $q_{loss,x}$ 为热损失热流密度^[23], $\rho(T)$ 为不锈钢的电阻率。

实验段外壁面温度 $T_{w,x,out}$ 通过均布在实验管外壁的热电偶测得,而实验段内壁温则通过具有

内热源的一维圆筒壁导热方程来计算,即

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \dot{\Phi} = 0 \quad (3)$$

其中内热源热流强度

$$\dot{\Phi} = \frac{I^2 \rho(T)}{\pi^2 (r_{\text{out}}^2 - r_{\text{in}}^2)^2} \quad (4)$$

边界条件

$$r = r_{\text{out}} \text{ 时 } \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q_{\text{loss},x}, \text{ 且 } T = T_{w,x,\text{out}}$$

对微分方程(3)从 r_{in} 到 r_{out} 进行积分,可得管内壁温度计算公式

$$T_{w,x,\text{in}} = T_{w,x,\text{out}} - \left[\left(\frac{\dot{\Phi} r_{\text{out}}^2}{2} - q_{\text{loss},x} r_{\text{out}} \right) \ln \frac{r_{\text{out}}}{r_{\text{in}}} - \frac{\dot{\Phi}}{4} (r_{\text{out}}^2 - r_{\text{in}}^2) \right] / \lambda_x \quad (5)$$

式中 $T_{w,x,\text{in}}$ 、 $T_{w,x,\text{out}}$ 分别为实验段的管内壁温度、管外壁温度(单位为 K); r_{in} 、 r_{out} 分别为实验段的管内半径、管外半径(单位为 m); $\dot{\Phi}$ 表示单位体积管电阻产生的发热功率(单位为 W/m^3); λ_x 为不锈钢的局部导热系数(单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

管内油温分布可根据管壁有效加热功率及实验测得的 RP-3 焓差曲线推算得到. 实验管截面处流体质量平均温度计算方程式如下:

$$T_{b,x} = H^{-1} \left[\frac{Q_x}{\dot{m}} + H(T_{\text{in}}) \right] \quad (6)$$

式中 $\dot{m}$ 为 RP-3 质量流量(单位为 kg/s); T_{in} 为实验段进口燃油温度(单位为 K); $H(T_{\text{in}})$ 为实验段燃油进口温度下的焓值(单位为 J/kg).

加热段进口到 x 截面处的加热功率

$$Q_x = I^2 \int_0^x \left[\rho(T) \frac{x}{A} \right] dx - \pi d_{\text{out}} \int_0^x q_{\text{loss},x} dx \quad (7)$$

管内局部 Nu_x 数可由式(8)求得

$$Nu_x = \frac{h_x d_{\text{in}}}{\lambda_x} \quad (8)$$

其中 λ_x 为当地燃油导热系数(单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

Jackson 等^[12]浮升力影响因子

$$Bo^* = Gr^* / (Re^{3.425} Pr^{0.8}) \quad (9)$$

其中

$$Gr^* = \frac{\beta g q_w d^4}{\lambda_b \nu_b^2} \quad (10)$$

Petukhov 等^[13]热加速影响准则关系式

$$Gr_q = \frac{g \beta q'' d^4}{\nu_b^2 \lambda_b} \quad (11)$$

$$Gr_{\text{th}} = 3 \times 10^{-5} Re_b^{2.75} \overline{Pr}^{0.5} \cdot [1 + 2.4 Re_b^{-1/8} (\overline{Pr}^{2/3} - 1)] \quad (12)$$

$$\overline{Pr} = \frac{H(T_w) - H(T_b)}{T_w - T_b} \cdot \frac{\mu_b}{\lambda_b} \quad (13)$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{\rho_{\text{film}}} \cdot \frac{\rho_b - \rho_w}{T_w - T_b} \quad (14)$$

McEligot 等^[16]提出的热加速影响因子

$$K_v = \frac{4 q_w d \beta_p}{Re^2 \mu c_p} \quad (15)$$

3 误差分析

本文实验测量参数及其精度如表 1 所示.

表 1 实验测量参数及其精度

Table 1 Instruments and precision

参数	仪器	精度
实验管径	SEM 电镜扫描	$\pm 0.005 \text{ mm}$
燃油温度	I 级 K 型铠装热电偶	$\pm 0.5 \text{ K}$
外壁温度	I 级 K 型热电偶	$\pm 0.5 \text{ K}$
电流值	带变送输出的电流表	$\pm 0.2\%$
电压值	带变送输出的电压表	$\pm 0.2\%$

根据误差传递公式,可得到局部表面传热系数及 Nu_x 的误差分别为 7.3% 、 7.9% .

4 实验结果及分析

4.1 实验系统重复性及温差验证

本文首先对实验系统重复性进行了验证,图 3 给出了超临界压力航空煤油 RP-3 在相同工况下实验前后努塞尔数的变化. 鉴于碳氢燃料在受热流动过程中,会发生结焦反应而附着在流道内壁面,进而对其对流换热特性产生影响,因此,在每组实验开始之前和完成之后都会对实验管内的换热特性进行相同工况的验证,以确保实验数据

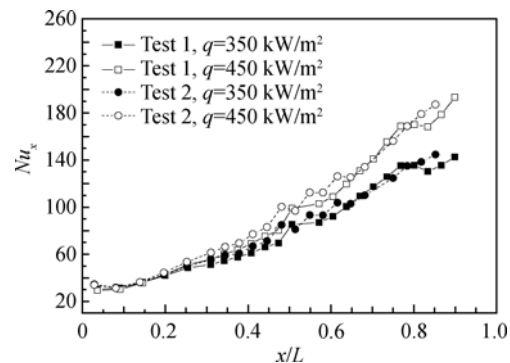


图 3 实验系统重复性验证

Fig. 3 Repeatability validation of the test system

的真实可靠.从图中可以看出,沿程各点的努塞尔数 Nu_x 实验前后相对变化均小于 5.2%,在实验测量误差之内,实验系统重复性良好.

同时,为了验证水平换热管上下表面温度差异,在部分相同轴向位置的上下表面进行了温度测量, E_{error} 为相同轴向位置上下表面温差与当地平均温度的比值,即

$$E_{\text{error}} = \frac{T_{w,x,\text{top}} - T_{w,x,\text{bottom}}}{0.5(T_{w,x,\text{top}} + T_{w,x,\text{bottom}}) - T_b} \times 100\% \quad (16)$$

实验结果表明,本文研究范围内实验管内径较小($d_{\text{in}}=1.9\text{ mm}$),上下表面温差而导致的当地过余温度差小于 2.5%,偏差较小.因此,本文管周向换热差异均予以忽略.

4.2 实验结果及分析

图 4 给出了质量流量为 3 g/s,进口燃油起始温度为 373 K,进口雷诺数为 4800,热流密度 $q=300\text{ kW/m}^2$ 时不同压力下航空煤油 RP-3 在水平管中的 Nu_x 随燃油无量纲油温的变化规律.

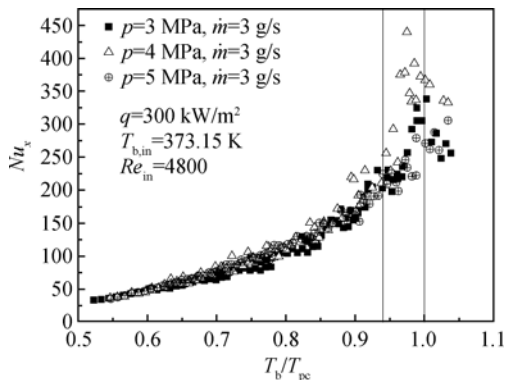


图 4 不同系统压力下 Nu_x 随无量纲油温的变化

Fig. 4 Variation of Nu_x with dimensionless fuel bulk temperature at different pressures

从图 4 中可以看出,当无量纲燃油温度低于 0.8 时,不同压力下燃油的 Nu_x 基本相同.随着燃油温度的升高 ($T_b/T_{pc} > 0.8$ 时),实验管内燃油温度不断接近不同压力下的拟临界温度点,在不同系统压力下实验数据均表现出了拟临界点附近的换热强化现象.

对比超临界压力下航空煤油 RP-3 比定压热容、动力黏度、密度等物性参数随温度和压力的变化规律可以看出(图 2),当燃油温度远低于不同压力下拟临界温度点时,燃油热物性受系统压力的影响较小,因此系统压力对管内燃油流动换热的的影响微弱,使得不同温度下的 Nu_x 较为一致.

而当无量纲燃油温度高于 0.8 时,不同超临界压力下 RP-3 的 Nu_x 出现了与相对低温区域所不同的变化规律,并且随着实验段进口温度的升高,水平管中燃油温度逐渐升高并接近不同压力下燃油拟临界温度点,这一区别则更加显著.燃油在管内加热过程中,近壁区油温高于主流温度,使得近壁区燃油温度先于主流温度到达拟临界点,其热物性参数出现强烈的变化,比定压热容突增,减小了管内壁与近壁区燃油之间的温差,导致了 Nu_x 的增大.而当内壁温度高于拟临界温度,同时主流温度接近拟临界温度时,主流区比定压热容数值增大,升温减缓,使得内壁温与近壁区油温之间的差异逐渐增大,导致了 Nu_x 的减小,从而出现了拟临界点附近的 Nu_x 峰值现象.

从不同压力来看,当系统压力为 3 MPa 时,系统压力接近其临界压力 $p_{cr}=2.33\text{ MPa}$,热物性参数变化更为剧烈,接近“两相流”中液体向气体转变的过程,从而使得这一工况下的表面传热系数和努塞尔数略低于相同温度下其他两个系统压力工况.随着系统压力远高于混合物在临界区内的最高压力时,燃油 RP-3 在拟临界点附近的物性变化相对于 3 MPa 工况较为缓和,换热情况恢复,使得 4 MPa 工况下的表面传热系数高于 3 MPa 实验工况.但是,随着系统压力的进一步升高至 5 MPa,热物性参数在拟临界点附近变化的趋势逐渐平缓,尤其是比定压热容曲线峰值点近乎消失,从而使得拟临界点处的换热强化峰值逐渐降低.

为了进一步分析系统压力对管内对流换热特性的影响,以及拟临界点附近 Nu_x 的变化机理, Jackson, Petukhov, McEligot 等^[12-13,16] 分别从不同角度提出了表征实验管内由浮升力与热加速作用所引起对流换热特性变化的判别准则数和标准.

图 4 和图 5 的对比中可以看出,当 Nu_x 变化速率开始增大时, Gr_q/Gr_{th} 也出现了明显的增大,并逐渐趋近 1,而当 Nu_x 到达峰值点时, Gr_q/Gr_{th} 同时出现了峰值点,并伴随着传热恶化而不断降低.这主要是由于当 Gr_q 大于 Gr_{th} 时,管内近壁区燃油温度高于拟临界温度点,而主流区燃油温度低于拟临界温度点,使得两区域间燃油热物性差别增大,导致 Nu_x 变化斜率明显增大,对流换热得到了强化;而当主流区温度不断升高至拟临界温度点后,近壁区燃油与主流区燃油间物性差别迅速降低,使得 Gr_q 小于 Gr_{th} ,同时伴随着明显的传热恶化.

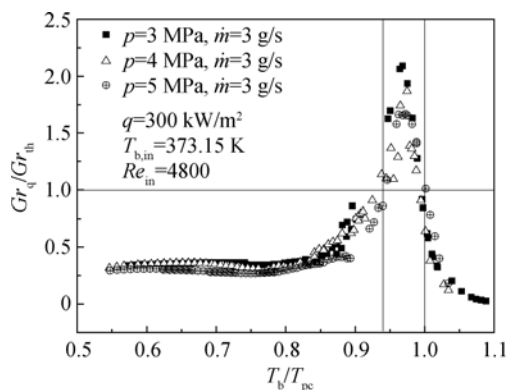


图5 不同系统压力下 Gr_q/Gr_{th} 随无量纲油温的变化
Fig. 5 Variation of Gr_q/Gr_{th} with dimensionless fuel bulk temperature at different pressures

图6给出了不同压力下浮升力判别关系式 Bo^* 随燃油温度变化的趋势,从图中可以看出,随着燃油温度逐渐升高, Bo^* 不断降低,并且在 Nu_x 发生强烈变化的区域出现了异动,但从 Bo^* 异动峰值点来看,换热恶化点处的 Bo^* 约为 2×10^{-8} ,明显低于 Jackson 等^[12]提出的 5.6×10^{-8} 判别标准.此外, Bazargan 等^[14]在对超临界压力水流经内径为 6.3 mm 水平不锈钢管的研究中发现,当换热管上下表面温度差别为 4 K 时,无量纲参数 $Gr_q/Gr_{th} \approx 5$,并且随着实验管径的减小而降低,这与管内浮升力对换热影响随着管径减小而降低相一致,由此进一步看出,本文实验工况中由浮升力作用而产生的实验管上下表面温差较小,且浮升力影响非常有限.

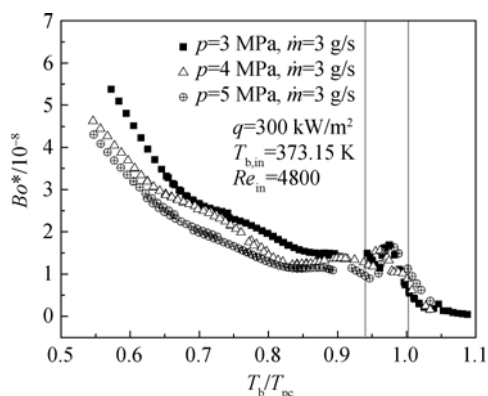


图6 不同系统压力下 Bo^* 随无量纲油温的变化
Fig. 6 Variation of Bo^* with dimensionless fuel bulk temperature at different pressures

图7给出了管内热加速影响因子 K_v 随主流燃油温度变化的趋势,值得注意的是,在 Nu_x 发生强烈变化的区域 ($0.94 < T_b/T_{pc} < 1.0$),管内 K_v 发生了异常变化,峰值点处的 K_v 约为 $8 \times$

10^{-8} ,远小于 Murphy 等^[17]提出的“湍流层流化”临界值 9.5×10^{-7} ,管内热加速影响可以忽略.从上述两点可以看出,靠近壁面流体与主流流体间由温度差而导致的物性差异是造成管内 Nu_x 变化的主要原因,而无量纲参数 Gr_q/Gr_{th} 可以更好地反映其变化趋势.

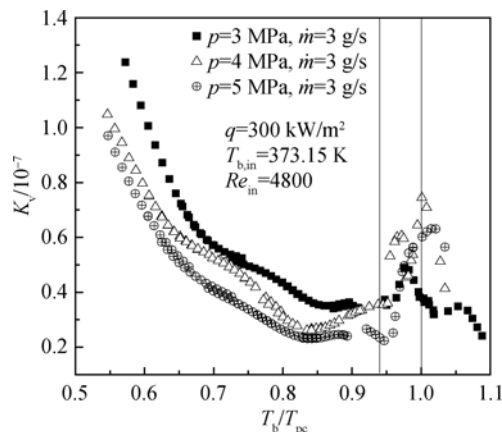


图7 不同系统压力下 K_v 随无量纲油温的变化
Fig. 7 Variation of K_v with dimensionless fuel bulk temperature at different pressures

5 结 论

本文采用实验方法对不同系统压力下超临界碳氢燃料 RP-3 在水平细圆管内的流动换热特性开展了研究工作,结论如下:

1) Nu_x 随燃油主流温度的升高而增大.受管内近壁区流体与主流流体间温差变化而导致的热物性差异影响,管内换热在内壁温度接近拟临界温度点时发生强化,并且在主流温度达到拟临界点时出现换热恶化.

2) 不同系统压力下,超临界碳氢燃料 RP-3 在相同无量纲温度点 (T_b/T_{pc}) 热物性变化速率的不同造成了表面传热系数和 Nu_x 峰值随系统压力的增大先升高后降低.

3) 实验管内燃油主流温度与实验管内壁温度之间的差异而导致的热物性差别是造成管内换热规律发生变化的主要原因,浮升力和热加速作用对换热特性的影响非常有限.

4) 在本文研究范围内,无量纲参数 Gr_q/Gr_{th} 可以更好地反映超临界压力碳氢燃料 RP-3 在水平管内的沿程流动换热特性变化规律.

参考文献:

- [1] 朱锟,邓宏武,王英杰,等.超临界压力下航空煤油结焦换

- 热综述及实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2472-2478.
- ZHU Kun, DENG Hongwu, WANG Yingjie, et al. Review and experimental study of the coke deposition and heat transfer characteristics of aviation kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2472-2478. (in Chinese)
- [2] Edwards T, Zabarnick S. Supercritical fuel deposition mechanisms[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1993, 32(12): 3117-3122.
- [3] Pioro I L, Khartabil H F, Duffey R B. Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels: empirical correlations (survey)[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230(1/2/3): 69-91.
- [4] Duffey R B, Pioro I L. Experimental heat transfer of supercritical carbon dioxide flowing inside channels (survey)[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(8): 913-924.
- [5] Kurganov V A, Zeigarnik Y A, Maslakova I V. Heat transfer and hydraulic resistance of supercritical pressure coolants: Part I specifics of thermophysical properties of supercritical pressure fluids and turbulent heat transfer under heating conditions in round tubes (state of the art)[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(11/12): 3061-3075.
- [6] Kurganov V A, Zeigarnik Y A, Maslakova I V. Heat transfer and hydraulic resistance of supercritical pressure coolants: Part II experimental data on hydraulic resistance and averaged turbulent flow structure of supercritical pressure fluids during heating in round tubes under normal and deteriorated heat transfer conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 56(1/2): 152-167.
- [7] Silin V A. Experimental investigation of deteriorated heat transfer regimes in turbulent flow of carbon dioxide of supercritical pressure[D]. Moscow Russia: Moscow Power Institute, 1973. (in Russian)
- [8] Liao S M, Zhao T S. An experimental investigation of convection heat transfer to supercritical carbon dioxide in miniature tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(25): 5025-5034.
- [9] Liao S M, Zhao T S. Measurements of heat transfer coefficients from supercritical carbon dioxide flowing in horizontal mini/micro channels[J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124(3): 413-420.
- [10] JIANG Peixue, ZHANG Yu, SHI Runfu. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer of CO₂ at supercritical pressures in a vertical mini-tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(11/12): 3052-3056.
- [11] LI Zhihui, JIANG Peixue, ZHAO Chenru, et al. Experimental investigation of convection heat transfer of CO₂ at supercritical pressures in a vertical circular tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1162-1171.
- [12] Jackson J D, Cotton M A, Axcell B P. Studies of mixed convection in vertical tubes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1989, 10(1): 2-15.
- [13] Petukhov B S, Polyakof A F, Kuleshov V A, et al. Turbulent flow and heat transfer in horizontal tubes with substantial influence of thermo-gravitational forces[R]. Tokyo: 5th International Heat Transfer Conference, 1974.
- [14] Bazargan M, Fraser D, Chatoorgan V. Effect of buoyancy on heat transfer in supercritical water flow in a horizontal round tube[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(8): 897-902.
- [15] 李勋锋, 仲峰泉, 范学军, 等. 超临界压力下航空煤油水平管内对流换热特性数值研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1690-1697.
- LI Xunfeng, ZHONG Fengquan, FAN Xuejun, et al. Numerical study of convective heat transfer characteristics of kerosene flowing in a horizontal pipe at supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1690-1697. (in Chinese)
- [16] McEligot D M, Coon C W, Perkins H C. Relaminarization in tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1970, 13(2): 431-433.
- [17] Murphy H D, Chambers F W, McEligot D M. Laterally converging flow: Part I mean flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 127(1): 379-401.
- [18] 张春本, 邓宏武, 徐国强, 等. 超临界压力下航空煤油 RP-3 焓值的测量及换热研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 331-335.
- ZHANG Chunben, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Enthalpy measurement and heat transfer investigation of RP-3 kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 331-335. (in Chinese)
- [19] DENG Hongwu, ZHANG Chunben, XU Guoqiang, et al. Density measurements of endothermic hydrocarbon fuel at sub- and supercritical conditions[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2011, 56(6): 2980-2986.
- [20] DENG Hongwu, ZHANG Chunben, XU Guoqiang, et al. Visualization experiments of a specific fuel flow through quartz-glass tubes under both sub- and supercritical conditions[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(3): 372-380.
- [21] DENG Hongwu, ZHANG Chunben, XU Guoqiang, et al. Viscosity measurements of endothermic hydrocarbon fuel from 298 to 788 K under supercritical pressure conditions [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2012, 57(2): 358-365.
- [22] DENG Hongwu, ZHU Kun, XU Guoqiang, et al. Isobaric specific heat capacity measurement for kerosene RP-3 in the near-critical and supercritical regions[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2012, 57(2): 263-268.
- [23] 张春本. 超临界压力下碳氢燃料的流动与换热特性研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.

- ZHANG Chunben. Investigation of flow and heat transfer characteristics of hydrocarbon fuel at supercritical pressures[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [24] DENG Hongwu, ZHU Kun, XU Guoqiang, et al. Heat transfer characteristics of RP-3 kerosene at supercritical pressure in a vertical circular tube[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2012, 19(5): 409-421.
- [25] ZHANG Chunben, XU Guoqiang, GAO Lin, et al. Experimental investigation on heat transfer of a specific fuel (RP-3) flows through downward tubes at supercritical pressure [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2012, 72(12): 90-99.
- [26] ZHU Kun, XU Guoqiang, TAO Zhi, et al. Flow frictional resistance characteristics of kerosene RP-3 in horizontal circular tube at supercritical pressure [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 44(1): 245-252.

(编辑:叶 青)