

超临界压力航空煤油 RP-3 在竖直微细管内的 对流换热实验

赵 伟, 闻 洁, 付衍琛, 张 楠, 黄浩然

(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: 以实验方式对超临界压力 RP-3 在内径为 1.09 mm 微细管内的对流换热进行了研究, 剖析了系统压力、加热热流密度、流动方向及浮升力这些因素对对流换热的影响。实验中热流密度控制为 $180 \sim 460 \text{ kW/m}^2$, 系统进口压力变化范围为 $3 \sim 5 \text{ MPa}$, 进口雷诺数在 $3200 \sim 10200$ 范围内变化。结果表明: 对于向下流动, 在实验段入口处浮升力对换热产生了恶化作用, 热流密度越大, 恶化作用越强; 系统压力主要是通过影响流体热物性对对流换热产生影响; 不同流动方向对对流换热的影响十分显著, 整体上向下流动换热得到强化, 向上流动换热得到恶化。

关 键 词: 超临界; 航空煤油; 微细管; 对流换热; 浮升力

中图分类号: V312

文献标志码: A

Experiment on convective heat transfer of aviation kerosene RP-3 in vertical micro-tube at supercritical pressure

ZHAO Wei, WEN Jie, FU Yanchen, ZHANG Nan, HUANG Haoran

(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: Convective heat transfer of supercritical China aviation fuel RP-3 in vertical micro-tube (inner diameter of 1.09 mm) was experimentally investigated. Influences of system pressure, heat flux, flow direction and buoyancy on heat transfer were analyzed. Wall heat fluxes ($180 - 460 \text{ kW/m}^2$), system import pressure ($3 - 5 \text{ MPa}$) and inlet Reynolds number ($3200 - 10200$) were maintained in experiments. The result showed that the buoyancy force deteriorated the heat transfer of downward flow in the entrance of test section; system pressure affected the convective heat transfer mainly by the impact of fluid thermal properties; effects of different flow directions on convection heat transfer were very significant. Overall heat transfer was strengthened for downward flow and decreased for upward flow.

Key words: supercritical; aviation kerosene; micro-tube; convective heat transfer; buoyancy

收稿日期: 2016-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(51606179)

作者简介: 赵伟(1990—), 男, 硕士生, 主要从事超临界流体换热及发动机热防护研究。

引用格式: 赵伟, 闻洁, 付衍琛, 等. 超临界压力航空煤油 RP-3 在竖直微细管内的对流换热实验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(3): 620-627. ZHAO Wei, WEN Jie, FU Yanchen, et al. Experiment on convective heat transfer of aviation kerosene RP-3 in vertical micro-tube at supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 620-627.

从工程热力学的角度看,提高发动机涡轮前温度和在此基础上提高压气机增压比可以提高航空发动机的性能。但是,这两方面技术参数的提高面临着日益严峻的高温热负荷挑战。一方面,涡轮前温度逐步升高,超过了同期材料的耐温极限。另一方面,随着压气机增压比的提高,压气机出口的气流温度也有所提高,使用于冷却高温部件的气体温度大幅度地上升,导致了其冷却能力的下降。

针对上述航空发动机冷却热负荷的问题,学界提出了适用于高性能航空发动机热端涡轮部件冷却的 CCA(cooled cooling air)冷却技术。所谓 CCA 技术是指在航空发动机上安装换热器,用飞行器自带的碳氢燃料作为冷源预先将用于冷却涡轮等高温部件的冷却空气进行降温冷却,以达到提高冷却空气冷却品质的目的^[1]。先进行航空发动机及高超声速飞行器的燃料系统压力约为 5 MPa,超过了航空煤油的临界压力(2.39 MPa^[2]),属超临界压力系统,燃料在作为冷源吸收热量时,其温度会升高并超过自身的临界温度,其状态由超临界液态转变为超临界状态。在这一过程中,流体表现出一系列的特殊性质,最显著的是流体物性的剧烈变化,这些变化将会引起一系列的流动与换热问题,从而呈现出特殊的流动与换热规律。

Jackson 等^[3-4]以综合叙述的方式对竖直管内超临界压力流体层流和湍流的混合对流进行了研究。胡志宏等^[5]以实验方式对煤油在超临界压力下的传热特性进行了研究,发现在超临界压力下煤油有二次传热强化现象,在内壁温达到拟临界温度时,煤油热物性的变化引起了第 1 次传热强化,而煤油在高温高压下发生化学变化则引起第 2 次传热强化。姜培学、李志辉等^[6-9]以实验和数值模拟计算的方式对超临界 CO₂ 在内径为 2 mm 细圆管内的对流换热进行了研究,发现浮升力和热加速对换热的影响在低进口雷诺数下都很大,而在高进口雷诺数下,热加速的影响可以忽略不计,但浮升力的影响依旧显著。Liao 和 Zhao^[10-11]对超临界压力 CO₂ 在内径为 0.5、0.7、1.4、2.16 mm 微细管中的对流换热实验中发现了不同于常规尺度中超临界压力流体换热规律的现象:向下流动时,在拟临界温度点前浮升力使对流换热出现恶化现象,而向上流动中,浮升力则使对流换热出现强化现象。而且当雷诺数大于 10⁵ 时,浮升力对换热的影响依然显著。此外,还有很多国内外学者^[12-18]对超临界流体对流换热进行了相关研

究。而目前对超临界压力航空煤油 RP-3 在内径为 1.86 mm 以下微细管内流动换热的实验研究还相对较少,数据还不够丰富,对这一相对空白的区域进行研究既可以填充数据库又可以探究新规律,具有十分必要的意义。

基于研究目的,通过市场调研,本文选取了市场现有的内径为 1.09 mm 不锈钢管对超临界压力航空煤油 RP-3 对流换热进行了实验研究。作为 CCA 技术的理论基础,开展相关换热机理的研究具有重要的意义。

1 实验系统

图 1 所示为超临界压力碳氢燃料流动与换热实验系统简图,图中 PT 为压力传感器,TC 为热电偶。供油箱中的航空煤油流量由上海三为计量泵 SP6015(15 MPa;0.01~600 mL/min)调节输出并稳压。航空煤油的质量流量由科里奥利质量流量计(DMF-1-1)测量。实验段前安装有两级预热段,既可以保证每级预热段出口温度不会超过接口法兰的耐温极限,又可以确保在所需质量流量下实验段进口航空煤油温度被加热到 600 K,每级预热段均由一个功率为 20 kW 的稳压电源单独进行控制。从实验段出来的高温航空煤油通过管壳式换热器水冷后其温度可降低到 300 K 以内,冷却后的航空煤油通过一个背压阀后压力可降低至常压并被收集到废油箱。

本文所用实验段为公称外径为 2.0 mm 不锈钢细圆管,材料为不锈钢 321(1Cr18Ni9Ti),通过北京航空航天大学材料科学与工程学院 Cam-Scan 3400 型电镜扫描仪测得实验管内径为 1.09 mm,扫描结果如图 2 所示。

实验管竖直安装并采用一种纳米绝热材料 Aspen(厚度为 5 mm,导热系数为 0.012 W/m·K)包裹进行有效绝热。实验段总长为 1 m,其中加热段为 0.8 m,等间距布置 20 支直径 0.1 mm 的镍铬-镍硅热电偶用于测量实验过程中实验管的外壁温度。加热段前后各留 0.1 m 绝热段,为内径的 91.7 倍,足以保证流动状态充分发展。实验过程中给实验管两端加以直流电,利用实验管自身的电阻产生的热量加热管内的航空煤油。由加热电流和加热电压计算得出加热功率。经标定计算后,相对于加热功率实验段的热损失相对值低于 3%。通过数据采集模块对所有的测量数据进行实时测量并保存,最终的数据处理由计算机完成。

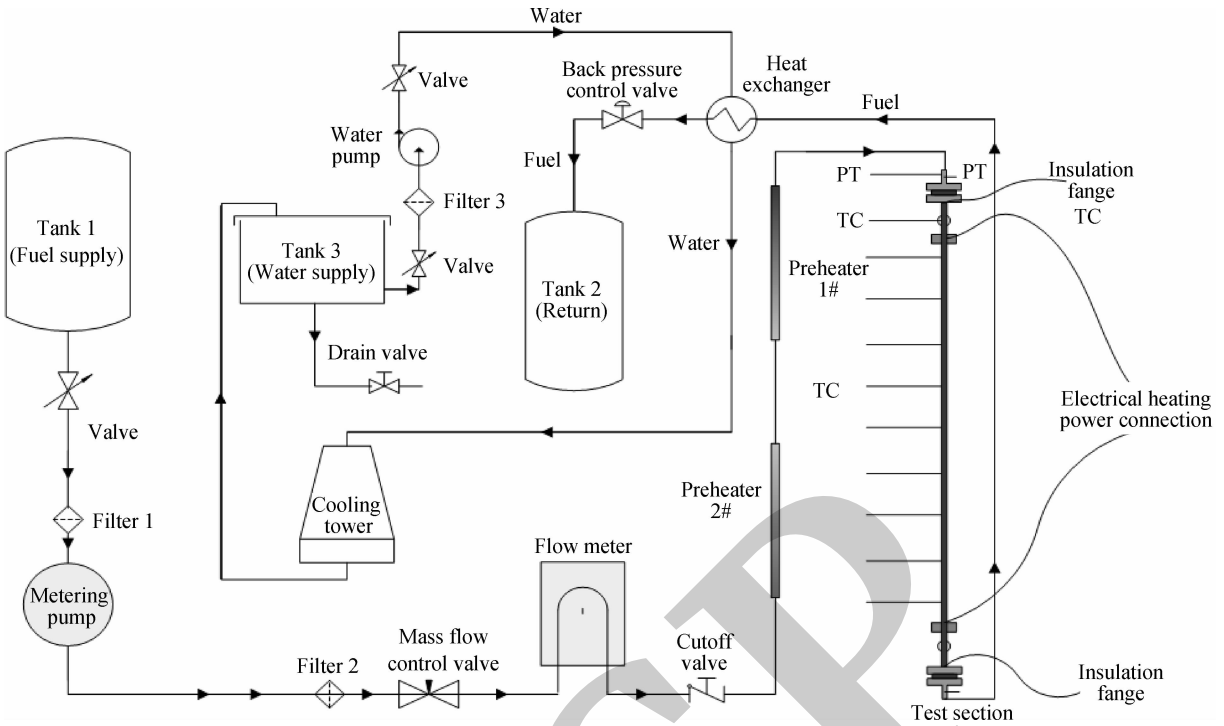


图 1 超临界压力碳氢燃料流动与换热实验系统

Fig. 1 Schematic of supercritical pressure hydrocarbon fuel heat transfer system

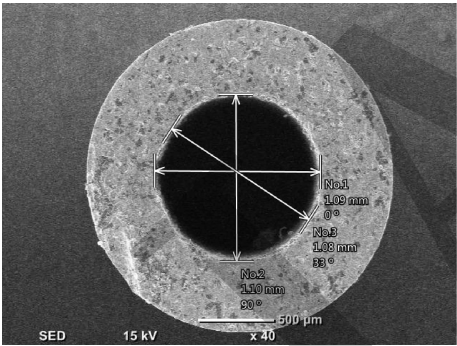


图 2 实验管横截面电镜扫描图

Fig. 2 Scanning electron microscope of experimental pipe cross-section

2 数据处理方法

2.1 热损失标定

本实验采用电加热的方式,实验过程中热电偶焊接在微细圆管的外表面,测量的是微细圆管的外壁温度,由于实验管壁导热的存在,外壁温度要高于内壁温度。为了计算根据外壁温确定内外壁的温度关系,需要进行热损失的标定。

热损失的标定是在正式实验之前完成的。通过实验数据分析发现,热损失的大小与实验段的外壁温和环境温度的差值存在函数关系,即

$$q_{\text{loss}} = f(\Delta T) \quad (1)$$

通过能量守恒定理,可知热损失的计算公式为

$$q_{\text{loss}} = \frac{U'I'}{\pi d_{\text{out}} L} \quad (2)$$

式中 q_{loss} 为实验中的热损失; U' 、 I' 分别为加热电压和电流; d_{out} 为微细管的外径; L 为微细管实际加热段的长度。

2.2 内壁温计算

按照具有内热源的一维稳态圆管壁导热公式对微细管内壁温度进行计算,把由实验管管壁电阻产生的热量看做内热源,微分方程为

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

式中 r 为微细圆管的半径; $\dot{\Phi}$ 为由微细圆管电阻产生的功率,即内热源,其计算公式为

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

边界条件为 $r = r_{\text{out}}$ 时, $T = T_{\text{wo}}$ 且 $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q_{\text{loss}}(i)$,对微分方程从 r_{in} 到 r_{out} 进行积分,得到微细圆管内壁温度的计算公式为

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

式中 $T_{\text{w},\text{in}}$ 、 $T_{\text{w},\text{out}}$ 分别为微细圆管位置 x 处的内壁温和外壁温(单位为 K); r_{in} 、 r_{out} 分别为微细圆

管的内半径和外半径(单位为 m); κ_x 为微细管材料的导热系数(单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。

2.3 管内局部油温计算

按照管壁加热功率及实验测得的 RP-3 焓差曲线推算得出管内航空煤油局部油温^[14],微细圆管位置 x 处燃油的平均油温计算公式为

$$T_b(x) = H^{-1} \left[\frac{Q_x}{\dot{m}} + h(T_{in}) \right] \tag{6}$$

微细圆管从入口到位置 x 处的热流

$$Q_x = I^2 \int_0^x \left(R(T) \frac{x}{A} \right) dx - \pi d_{out} \int_0^x q_{loss} dx \tag{7}$$

微细圆管的横截面积

$$A = \frac{\pi(d_{out}^2 - d_{in}^2)}{4} \tag{8}$$

式中 $\dot{m}$ 为航空煤油 RP-3 的质量流量。

2.4 局部表面传热系数的计算

管内局部表面传热系数的计算公式为

$$h_x = \frac{q_x}{T_{wx,in} - T_{bx}} \tag{9}$$

式中 h_x 为管内局部表面传热系数; q_x 为微细圆管实际加热的热流密度; $T_{wx,in}$ 、 T_{bx} 分别为位置 x 处的微细管内壁温和主流温度。

q_x 的计算公式为

$$q_x = \frac{I^2 R(T) / [\pi(d_{out}^2 - d_{in}^2) / 4]}{\pi d_{in}} - q_{loss,x} \tag{10}$$

式中 d_{out} 、 d_{in} 分别为微细管的外径和内径。

管内局部 Nusselt 数的计算公式为

$$Nu_x = \frac{h_x d_{in}}{\kappa_x} \tag{11}$$

式中 κ_x 为当地 RP-3 导热系数。

3 不确定度分析

实验系统中需要测量的物理量分别为实验管径、流量、温度、电压及电流,测量仪器名称和精度如表 1 所示。

表 1 实验测量参数及精度
Table 1 Instruments and precision

测量参数	测试仪器	仪器精度
实验管径	SEM 电镜	$\pm 0.0005 \text{ mm}$
流量	科里奥利质量流量计	$\pm 0.15\%$
燃油温度	K 型铠装热电偶	$\pm 0.5 \text{ K}$
外壁温度	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	$\pm 0.2\%$

根据相应的误差传递公式,得到局部表面传热系数 h_x 和 Nu_x 的相对不确定度分别为 4.7% 和 5.6%,可以判定本实验中所得的测量数据和计算结果是精确可靠的。

4 实验结果与分析

4.1 热流密度的影响

图 3 和图 4 分别给出了进口压力(简称压力 p)为 4 MPa,进口温度为 473 K,进口雷诺数为 7100 时 RP-3 在内径为 1.09 mm 管中不同热流密度(q_w)下向下流动时内壁温、主流温度和表面传热系数沿流动方向的分布。虚线表示主流温度,符号表示内壁温度。沿整个流向,表面传热系数出现了“倒转”现象。这与内径为 1.86 mm 的管向上流动存在“倒转”现象刚好相反。在实验段起始段,随着热流密度的增大表面传热系数减小,热流密度越大,表面传热系数越小。从图 3 可以看出,在通道径向方向上实验段起始段内壁温和主

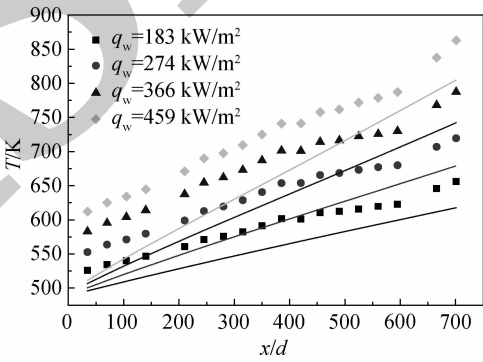


图 3 温度在不同热流密度下沿流向的分布
Fig. 3 Temperature distribution along the pipe at different heat fluxes

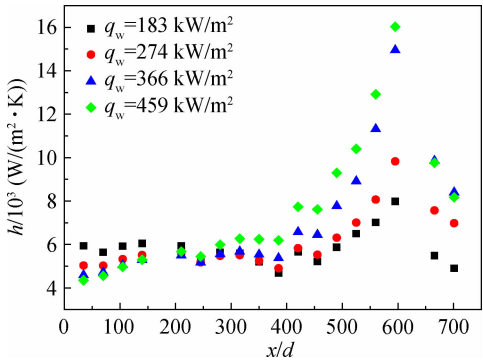


图 4 表面传热系数在不同热流密度下沿流向的分布
Fig. 4 Heat transfer coefficient distribution along the pipe at different heat fluxes

流温度的差值最大,这一差值沿流向逐渐减小。热流密度越高,内壁温度和主流温度的差值越大,即温度梯度越大,受其影响密度梯度也越大,由此产生的浮升力改变了截面径向平均速度的分布,使截面流体的剪应力发生了变化,抑制了湍动能的发生,使换热出现了恶化。内壁温度和主流温度沿流向平缓上升,受热物性的影响表面传热系数也逐渐增大,在拟临界温度点附近,比定压热容出现峰值,表面传热系数也在此处达到最大值。

4.2 系统压力的影响

图 5 和图 6 分别给出了不同进口压力下,进口雷诺数为 7100,进口温度为 473 K,加热热流密度为 366 kW/m² 时 RP-3 在内径为 1.09 mm 管中向上流动时内壁温、主流温度和表面传热系数沿流动方向的分布。可以看到,实验段前段,不同压力下的 RP-3 表面传热系数几乎一致,而在实验段后半段则出现了差异。这是因为在实验段前段流体内壁温度和主流温度较低,压力对流体的物

性影响较小,而随着流体温度逐渐升高,不同压力下流体温度先后接近并超过拟临界温度,压力对流体物性的影响则体现了出来。具体而言,温度升高时流体比定压热容增大,黏度和导热系数减小,且比定压热容对对流换热的影响占主导地位,在拟临界温度点附近 3 MPa 相比 4 MPa 更接近 RP-3 的临界温度(2.39 MPa)系统压力越接近临界压力,3 MPa 对应的比定压热容峰值大于 4 MPa 对应的比定压热容峰值,压力越大,物性随温度的变化越平缓,所以在实验段后段在较大压力下流体换热能力较弱,因而表面传热系数较低。

4.3 流动方向的影响

图 7 和图 8 分别给出了不同流动方向下,压力为 4 MPa,进口雷诺数为 7100,进口温度为 473 K,加热热流密度为 459 kW/m² 时 RP-3 在内径为 1.09 mm 管中内壁温、主流温度和表面传热系数沿流动方向的分布。总体上,沿整个流向向下流动的表面传热系数高于向上流动的表面传热系数,这是浮升力对向下流动起强化作用而对向上流动起恶化作用的结果。当内壁温超过拟临界温度后,向下流动的表面传热系数迅速增大,而向上流动的换热系数缓慢增大,说明流动方向对换热具有显著影响,具体而言是浮升力对换热具有显著影响。管道径向方向存在着密度梯度,因而产生了浮升力,当加热实验管的热流密度较高时,浮升力改变了管内航空煤油截面径向的平均速度分布,使截面径向的航空煤油切应力发生了变化,促进或抑制了航空煤油湍动能的发生,使换热发生了强化或恶化。对于向下流动,浮升力使换热强化,对于向上流动,浮升力使换热恶化。

Jackson 和 Hall^[3] 提出用 *Bo* 来表征浮升力

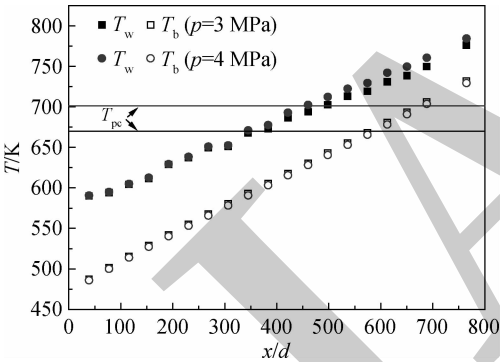


图 5 温度在不同系统压力下沿流向的分布
Fig. 5 Temperature distribution along the pipe at different system pressures

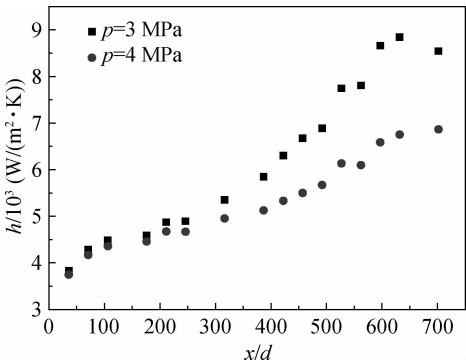


图 6 表面传热系数在不同系统压力下沿流向的分布
Fig. 6 Heat transfer coefficient distribution along the pipe at different system pressures

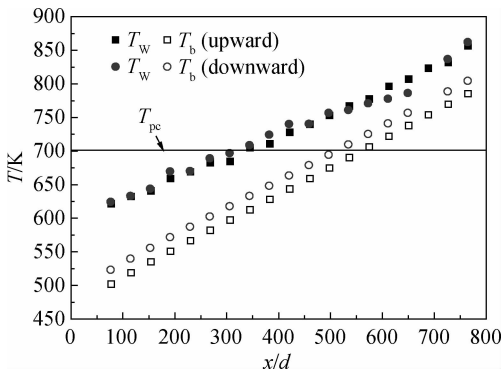


图 7 温度在不同流动方向下沿流向的分布
Fig. 7 Temperature distribution along the pipe at different flow directions

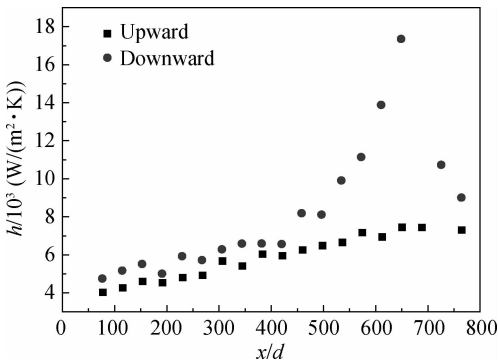


图 8 表面传热系数在不同流动方向下沿流向的分布
Fig. 8 Heat transfer coefficient distribution along the pipe at different flow directions

对超临界压力流体对流换热的影响,其表达式如下:

$$Bo = \frac{Gr}{Re^{3.425} Pr^{0.8}} \tag{12}$$

式中 Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数, Gr 为格拉晓夫数,其表达式如下:

$$Gr = \frac{\beta g d^4 q_w}{\kappa \nu^2} \tag{13}$$

图 9 所示为图 3 图 4 及图 7 图 8 工况点所对应的 Bo 分布。从图中可以看出 Bo 的分布小于 Jackson 等^[19]提出的 $Bo < 6 \times 10^{-7}$ 时浮升力影响可以忽略的范围,但是从图 8 对比向上流动和向下流动表面传热系数的数据来看浮升力在加热热流密度较大时对换热确实产生了明显的影响。因此可以得出结论:Jackson 等提出的判别式没有准确地反映出浮升力对超临界压力航空煤油对流换热的影响。

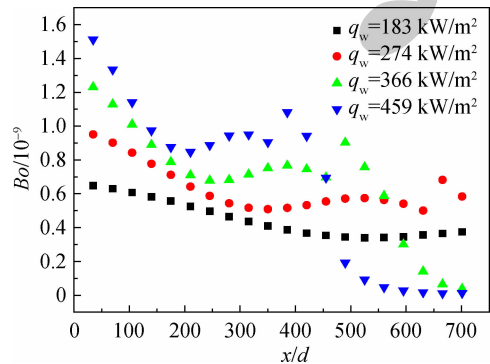


图 9 Bo 在不同热流密度下沿流向的分布
Fig. 9 Bo distribution along the pipe at different heat fluxes

5 换热经验关系式的修正

Jackson 等^[4]通过理论分析建立了考虑浮升力影响的半经验关系式

$$\frac{Nu}{Nu_f} = \left[1 \pm \frac{8 \times 10^4 Gr^*}{Re^{3.425} Pr^{0.8}} \left(\frac{Nu}{Nu_f} \right)^{-2} \right]^{0.46} \tag{14}$$

$$Nu_f = 0.0113 Re^{0.862} Pr_f^{0.4} \tag{15}$$

式中“+”为流体向下流动,“-”为流体向上流动。本文实验数据与公式(14)进行了对比,发现偏差较大,因此对该公式进行了修正,得到了超临界压力下航空煤油 RP-3 在竖直微细管内的换热经验关系式。该公式的适用范围为

$$d_m = 1.09 \text{ mm}, \quad 2.5 \text{ MPa} < p < 6 \text{ MPa} \tag{16}$$

向上流动

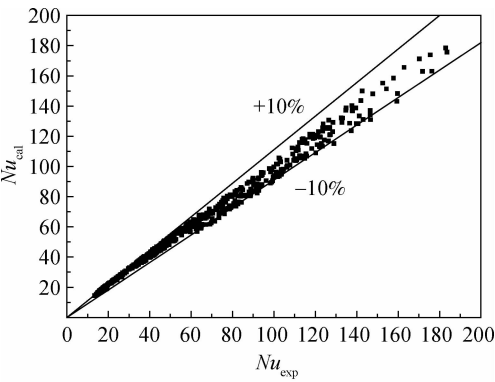
$$\frac{Nu}{Nu_f} = 0.178 (10^7 Bo^*)^{0.1} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.11} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.12} \cdot \left[1 + 7.12 \left(\frac{Nu}{Nu_f} \right)^{1.09} \right] \tag{17}$$

向下流动

$$\frac{Nu}{Nu_f} = 0.18 (10^7 Bo^*)^{0.1} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.08} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.1} \cdot \left[1 + 6.8 \left(\frac{Nu}{Nu_f} \right)^{1.12} \right] \tag{18}$$

式中 Nu_f 由公式(15)给出。

图 10 所示为向上和向下流动时超临界压力 RP-3 对流换热实验值和上述经验关系式计算结果之间的相对偏差,可以看出 94.7% 的向上流动实验数据和 94.1% 的向下流动实验数据偏差落在了 $\pm 10\%$ 的误差带内,这表明该经验关系式具有较高的拟合精度,能够较为精确地描述超临界压力 RP-3 在内径为 1.09 mm 竖直管内的对流换热规律。



(a) 向上

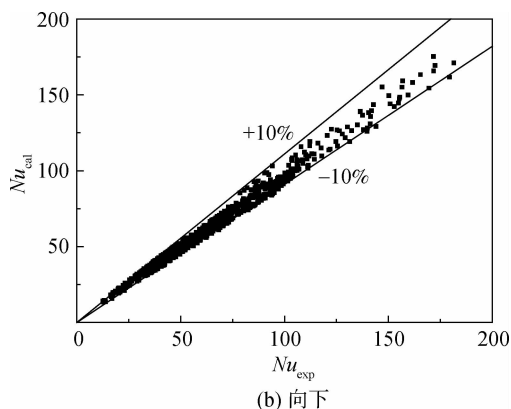


图10 实验数据与修正的经验关系式计算结果对比

Fig. 10 Comparison of experimental data with modified empirical relation calculation result

6 结 论

本文以实验方式对超临界压力 RP-3 在内径为 1.09 mm 管内的对流换热进行了研究,剖析了系统压力、加热热流密度、流动方向和浮升力这些因素对对流换热的影响。结论如下:

1) 对于向下流动,在实验段入口处浮升力对换热产生了恶化作用,热流密度越大,这种恶化作用越强,这与常规尺度内向下流动时浮升力对换热起强化作用不同。

2) 系统压力主要是通过影响流体热物性对对流换热产生影响的,在拟临界温度区域系统压力越接近流体的临界压力,其对换热的影响越显著。

3) 流动方向对对流换热的影响显著,尤其是在高热流密度下的拟临界温度区域附近,整体而言向下流动换热得到强化,向上流动换热得到恶化。

4) 浮升力对不同流动方向下流体的换热具有显著影响,尽管实验过程中无量纲数 Bo 远低于 Jackson 等提出的 6×10^{-7} 这一临界值,但浮升力的影响仍然存在不能忽略。

5) 基于实验数据和 Jackson 半经验关系式,修正提出了在一定范围内适用的超临界压力航空煤油 RP-3 对流换热经验关系式。

参考文献:

[1] BRUENING G B, CHANG W S. Cooled cooling air systems for turbine thermal management[R]. ASME Paper 1999-GT-14, 1999.

[2] 孙青梅,米镇涛,张香文. 吸热型碳氢燃料 RP-3 仿 JP-7 临界性质(t_c, p_c)的测定[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(4):

466-470.

SUN Qingmei, MI Zhentao, ZHANG Xiangwen. Determination of critical properties (t_c, p_c) of endothermic hydrocarbon fuels: RP-3 and simulated JP-7 [J]. Journal of Chemistry and Technology, 2006, 34(4): 466-470. (in Chinese)

- [3] JACKSON J D, HALL W B. Influence of buoyancy on heat transfer to fluids flowing in vertical tubes under turbulent conditions[C]// Proceedings of Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles. Washington: Hemisphere Publ Corp, 1979: 613-640.
- [4] 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.
- [5] 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 Tinkuan, LUO Yushan, et al. Heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(9): 62-65. (in Chinese)
- [6] JIANG P X, ZHANG Y, SHI R F. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer of CO_2 at supercritical pressures in a vertical mini-tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 51(11/12): 3052-3056.
- [7] JIANG P X, YU Z, ZHAO C R, et al. Convection heat transfer of CO_2 at supercritical pressures in a vertical mini tube at relatively low reynolds numbers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32(8): 1628-1637.
- [8] JIANG P X, SHI R F, ZHAO C R, et al. Experimental and numerical study of convection heat transfer of CO_2 at supercritical pressures in vertical porous tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25/26): 6283-6293.
- [9] 李志辉,姜培学,赵陈儒,等. 超临界 CO_2 在垂直圆管内对流换热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(3): 461-464.
- LI Zhihui, JIANG Peixue, ZHAO Chenru, et al. Experimental investigation of convection heat transfer of CO_2 at supertical pressures in vertical circular tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(3): 461-464. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] TANIMIZU K, SADR R. Experimental investigation of buoyancy effects on convection heat transfer of supercritical CO_2 flow in a horizontal tube [J]. Heat and Mass

Transfer,2015,52(4):1-14.

[13] DONG E K,KIM M H. Experimental investigation of heat transfer in vertical upward and downward supercritical CO₂ flow in a circular tube[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2011,32(1):176-191.

[14] 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)

[15] 王夕,刘波,祝银海,等. 超临界压力下 RP-3 在细圆管内对流换热实验研究[J]. 工程热物理学报,2015,36(2):360-365.

WANG Xi, LIU Bo, ZHU Yin Hai, et al. Experimental investigation on convection heat transfer of supercritical pressure RP-3 in a small pipe[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2015,36(2):360-365. (in Chinese)

[16] 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 Xueju, 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)

[17] 张斌,张春本,邓宏武,等. 超临界压力下碳氢燃料在竖直圆管内换热特性[J]. 航空动力学报,2012,27(3):595-603.

ZHANG Bin, ZHANG Chunben, DENG Hongwu, et al. Heat transfer characteristics of hydrocarbon fuel at supercritical pressure in vertical circular tubes[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(3):595-603. (in Chinese)

[18] 朱锟,徐国强,贾洲侠,等. 压力对水平管内超临界碳氢燃料流动换热影响实验[J]. 航空动力学报,2016,31(6):1289-1296.

ZHU Kun, XU Guoqiang, JIA Zhouxia, et al. Pressure effect on the heat transfer characteristics of hydrocarbon fuel in the horizontal circular tube at supercritical pressures[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(6):1289-1296. (in Chinese)

[19] JACKSON J D, EVAMS-LUTTERODT K O. Impairment of turbulent forced convection heat transfer to supercritical pressure CO₂ caused by buoyancy forces [D]. Manchest: University of Manchest,1968.

(编辑:叶 青)