

垂直上升圆管内超临界航空煤油的传热恶化数值研究^{*}

王彦红, 李素芬, 东 明

(大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型结合增强壁面处理的方法以及 10 组分替代模型对 RP-3 航空煤油在垂直上升圆管内的超临界对流换热进行了数值研究。详细分析了超临界条件下航空煤油的传热恶化机理, 并将数值计算结果与常用经验换热公式值进行了比较, 以考察这些经验关系式的适用性。计算结果表明: 在较高的热流密度下, 热物性的剧烈变化使径向流场产生异变, 引发了复杂的传热恶化现象。其中, 低主流焓值区的传热恶化是由热加速作用导致的, 高主流焓值区的传热恶化是由径向速度波动造成的。Bae-Kim 关系式能较好地反映垂直上升圆管中航空煤油的超临界传热情况, 预测值与模拟值的相对误差均在 20% 以内; 而 Bishop 等给出的经验公式则不再适用。

关键词: 超临界压力; 航空煤油; 传热恶化; 数值研究

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2015) 01-0097-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2015.01.014

Numerical Study on Heat Transfer Deterioration of Supercritical Aviation Kerosene in Vertical Upward Circular Tubes

WANG Yan-hong, LI Su-fen, Dong Ming

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Numerical study on supercritical convective heat transfer of RP-3 aviation kerosene in vertical upward circular tubes has been carried out, based on the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model with enhanced wall treatment, and a 10-species kerosene surrogate model. The heat transfer deterioration mechanisms of aviation kerosene under supercritical conditions were analyzed in detail. Moreover, the numerical results have been compared with several conventional empirical heat transfer formulae to investigate the applicability of these expressions. Results indicate that under relatively high heat fluxes, the abrupt thermophysical properties variations significantly modify the radial flow fields, leading further to complex heat transfer deterioration phenomena. The heat transfer deterioration in the low bulk enthalpy region is caused by thermal acceleration, whereas the heat transfer deterioration in the high bulk enthalpy region is due to the radial velocity oscillation. The Bae-Kim formula can be better used for supercritical heat transfer predictions of aviation kerosene in vertical upward circular tubes. The relative errors between the predicted values and numerical results are generally within 20%, while the empirical expression proposed by Bishop et al. is no longer applicable.

Key words: Supercritical pressure; Aviation kerosene; Heat transfer deterioration; Numerical study

^{*} 收稿日期: 2013-10-14; 修订日期: 2014-02-16。

作者简介: 王彦红 (1983—), 男, 博士生, 研究领域为超临界压力碳氢燃料对流换热。E-mail: wangyh.526@163.com

通讯作者: 李素芬 (1955—), 女, 硕士, 教授, 研究领域为超临界介质传热与压降特性。E-mail: lisuf@dlut.edu.cn

1 引言

通过在航空发动机上安装空-油换热器,利用高热沉的航空煤油预先将用来冷却高温部件的空气进行冷却,不仅可以满足航空发动机涡轮前温度和增压比持续提高带来的日益突出的冷却问题,又有利于燃料的雾化和燃烧^[1]。由于航空燃料系统压力通常高于航空煤油的临界压力($\sim 2\text{MPa}$),在受热升温过程中,煤油将由过压液态向超临界态转化^[2]。在超临界压力下,航空煤油的热物性随温度发生较大变化,特别是在拟临界温度附近,这种变化会更加剧烈^[3],从而导致了复杂的流动和传热现象,将对航空发动机燃油系统的安全运行带来影响。

以往对超临界流体对流换热的研究主要是针对水和二氧化碳等无机物质,并且在传热恶化方面取得了较好的研究成果^[4-7]。Koshizuka等^[4]、Zhang等^[5]对竖直圆管内超临界水的对流换热进行了数值研究,发现传热恶化的机理与质量流速大小密切相关。其中,低质量流速下的传热恶化均是由强浮升力使近壁区湍动能受到抑制引起的。对于高质量流速下的传热恶化,前者认为是由近壁区局部粘度的增大使普朗特数减小和粘性底层增厚导致的,后者则认为是由热加速和近壁区流体导热能力下降的共同作用造成的。超临界二氧化碳的传热恶化主要是由浮升力和热加速造成的, Kim等^[6]、李志辉等^[7]详细地分析了二者对流动传热过程的影响,认为传热恶化主要发生在上升流动中,是由浮升力导致的;在小管径圆管内,浮升力的作用微弱,热加速是引起传热恶化的主要原因。

到目前为止,对超临界有机工质传热恶化现象和机理的相关报道还较少^[8-12]。Kelbaliev等^[8]研究了超临界压力下甲苯在垂直管中的正常传热、强化传热和传热恶化等3种换热模式,并提出了浮升力对传热恶化影响能否可忽略的判别准则。Linne等^[9]通过实验考察了竖直微管内超临界JP-7航空煤油的传热和热稳定性,发现燃料温度较低时的换热与Dittus-Boelter关系式预测值能较好地吻合;高油温情况下,由于热物性的剧烈变化换热沿管程方向得到显著强化,此时Dittus-Boelter公式计算值明显低于实验结果,已不再适用;随着热流密度升高,在管壁温度高于对应的拟临界温度后出现了传热恶化现象。Hitch等^[10]也做了类似的实验研究,发现超临界JP-7航空煤油的传热恶化主要发生在相对压力(p/p_c)低于1.5的近临界压力运行条件下;Liu等^[11]对其它类型煤油

的超临界对流换热实验研究中也得到了相似的结论。另外,Liu等的研究中还发现在煤油传热恶化过程中伴随着明显的压降减小和流动不稳定现象。屈云凤等^[12]对超临界压力下戊烷的传热恶化进行了数值分析,认为壁温处于拟临界点附近时会出现传热恶化现象,并得到了压力和质量流速作用下传热恶化发生的临界热流密度关系式。虽然对超临界碳氢燃料的传热恶化研究已取得了一定的成果,但仍然存在不少的欠缺,特别是对传热恶化的机理解释,尚待做进一步完善。

本文对中国大庆RP-3航空煤油在垂直上升圆管内的对流换热进行了数值模拟研究,重点考察了其在超临界压力下的传热恶化现象及机理,并对一些经典传热经验关系式的适用性做了验证,以期对超临界碳氢燃料的传热进行深入地了解,并为空-油换热器的设计及应用提供一些有益的指导。

2 模型和数值计算方法

2.1 数理模型

对超临界压力下RP-3航空煤油在垂直上升圆管内的流动和传热特性进行数值模拟研究,物理模型和边界条件如图1所示。管道内径为2mm,入口0.12m长度不加热,用以保证流动的充分发展;加热段管壁面施加均匀的热负荷,长度 l 依据热流密度的大小分别取为4.2m($q=200\text{kW/m}^2$), 2.1m($q=400\text{kW/m}^2$)和1.3m($q=600\text{kW/m}^2$)。其它计算参数的设置如下:

(1)质量流速进口:温度 $T_{in}=340\text{K}$,质量流速 $G=1200\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

(2)静压出口:压力 $p=3\text{MPa}$ 。

考虑RP-3航空煤油在温度超过850K后会发生明显的热裂解现象^[13],在本文分析换热特性时采用了壁温低于850K管段内的计算数据。同时,为进一步避免进口和出口效应对数值计算的影响,在加热段两端各保留了一定长度的稳流段,只分析了主流温度(管横截面流体平均温度)为430~785K(对应的主流焓值约为290~1460kJ/kg)范围内的数据。

本文的数值计算基于质量守恒、动量守恒、能量守恒等一系列控制方程,如下所示。

质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}[\mu_e(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3}\mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k}] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho u g_i \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i C_p T) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(K_k \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \frac{\partial u_i}{\partial x_i}[\mu_e(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3}\mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k}] \delta_{ij} \quad (3)$$

湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型,并结合了增强壁面处理的方法,即对近壁面的计算网格,求解适用于低雷诺数的一方程 Wolfstein 湍流模型。RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}(a_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_i}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(a_\varepsilon \mu_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} + C_{3\varepsilon} G_b \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (5)$$

式(1)~(5)中相关变量的定义见文献[14]。

超临界压力下流体的热物性随着温度升高发生剧烈变化。本文选用 3MPa 的压力开展数值研究,采用 10 组分替代模型确定 RP-3 航空煤油的密度 ρ 、比热容 C_p 、热导率 λ 、动力黏度 μ 等热物性参数,见文献[15]。

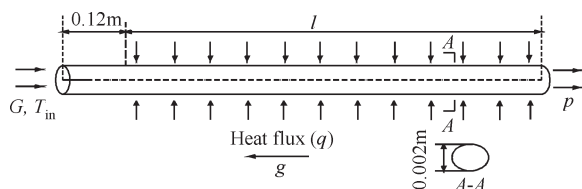


Fig. 1 Sketch map of the physical model and the applied boundary conditions

2.2 网格划分与数值方法

采用 ICFM CFD 对计算域进行结构化网格划分。为了获得满足精度的计算数据,对近壁面网格进行了加密,并保证无量纲距离 $y^+ \leq 1$ 。管横截面网格划分如图 2 所示。

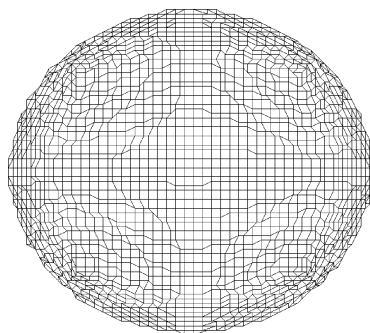


Fig. 2 Meshes of the cross section

通过有限容积法离散控制方程,对流项和扩散项的离散分别采用了二阶迎风差分格式和二阶中心差分格式。选用 SIMPLEC 算法处理压力和速度的耦合,隐性的 Gauss-Seidel 方法对控制方程进行迭代,并利用 Fluent 6.3 提供的双精度分离求解器进行计算。

在进行数值计算之前,首先进行了网格独立性分析。以总长为 1.42m 的管子为例,对 3060×400, 3060×520, 3060×600, 2640×520, 3470×520 (截面×轴向) 等五种网格划分方式的计算数据进行比较,结果表明采用 3060×520 的网格,壁温计算值与其它网格划分方式计算结果的最大偏差为 3%,意味着数值计算已经满足与网格的无关性。因此,采用此网格划分方式对该管进行计算。采用同样方法确定另外两个管道的网格方案分别为 3060×786 (2.22m) 和 3060×1486 (4.32m)。

2.3 模型与数值方法验证

本文首先将超临界 RP-3 航空煤油在竖直圆管内的对流换热计算结果与文献[16]中的实验数据做了比较,以验证模型和数值方法的可靠性。文献[16]采用的管道内径与本文相同,从中选择了两组典型的下降流动实验工况。计算条件为: $p=2.5\text{MPa}$, $G=885\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, q 为 $455\text{kW}/\text{m}^2$, $621\text{kW}/\text{m}^2$ 。需要说明的是,实验中内壁面热负荷是带有波动性的,这里取的是平均热流密度。图 3 给出了两种热流密度下管壁温度随主流温度的变化情况。对比图 3 中的壁温实验值与计算值,两者趋势符合良好,相对误差均在 6% 以内。特别是对高热流密度下的壁温波动现象也能较好地反映,证明本文采用的湍流模型和数值方法可靠,计算结果具有较好的精度。

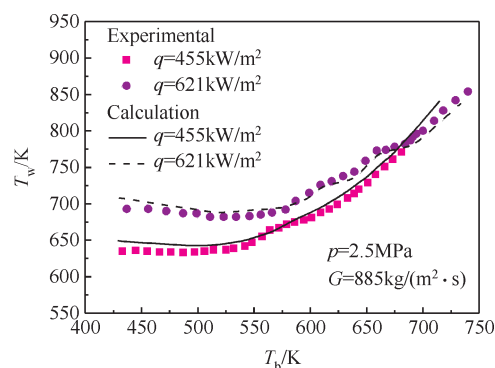


Fig. 3 Models and numerical methods validations

3 计算结果与分析

3.1 热流密度对传热过程的影响

图 4 给出了不同热流密度时换热系数随主流焓

值的变化。其中,换热系数的定义为

$$h = q / (T_w - T_b) \quad (6)$$

由图4可以看出,热流密度为200kW/m²时,换热系数沿流动方向的变化可以分为3个典型的阶段:

(1) $H_b \leq 880$ kJ/kg, 正常传热段;

(2) 880 kJ/kg $< H_b < 1200$ kJ/kg, 强化传热段, 由于主流比热容处于峰值附近, 这一换热阶段通常被称为拟临界区^[17] (Pseudo-critical region, PCR);

(3) $H_b \geq 1200$ kJ/kg, 稳定传热段。

文献[18]对这3个阶段的换热进行了详尽的机理解释。其中, 拟临界区的强化换热主要是由主流流体热物性的变化, 如密度和黏性系数急剧减小加速管内工质流动, 高比热容增强流体蓄热能力等造成的。热流密度提高到400kW/m², 拟临界区的换热系数不再单调增加, 而是在主流焓值处于1024~1162kJ/kg的范围内急剧减小, 即出现了传热恶化现象, 随后换热性能将再次恢复。热流密度进一步提高, 换热系数沿管程方向的变化规律更加复杂, 不仅较高主流焓值区的传热恶化加剧, 在低主流焓值换热区域也出现了较为显著的传热恶化现象。造成传热恶化的原因将以加热段壁面热流密度为600kW/m²的工况为例在下节中做详细地讨论。

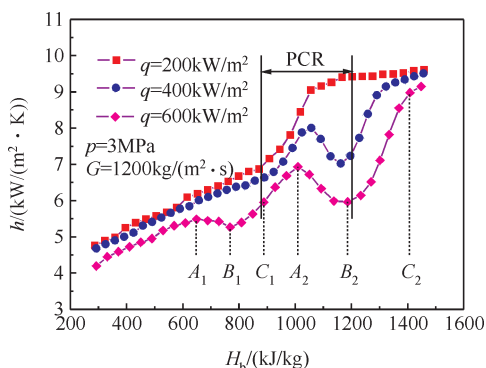


Fig. 4 Variations of the heat transfer coefficient with bulk enthalpy at different heat fluxes

孟华等^[19,20]对低温甲烷的超临界湍流传热研究表明, Bae-Kim^[21]和Bishop等^[22]给出的换热关系式可以较好地预测传热恶化现象。为了检验二者在超临界RP-3航空煤油传热中的适用性, 将数值计算得到的努塞尔数与经验关系式计算值在图5中进行了比较。图6为对应的相对误差情况。这两个经验公式的表达形式如下:

Bae-Kim 关系式

$$Nu = 0.021 Re_b^{0.82} Pr_b^{0.5} (\rho_w / \rho_b)^{0.3} (\bar{C}_p / C_{pb})^n \quad (7)$$

Bishop et al. 关系式

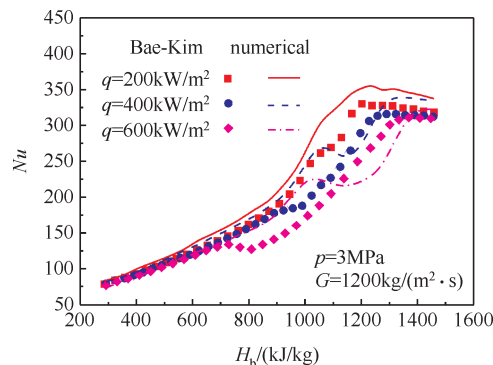
$$Nu = 0.0069 Re_b^{0.9} Pr_b^{0.66} (\rho_w / \rho_b)^{0.43} (\bar{C}_p / C_{pb})^{0.66} [1 + 2.4 d / L] \quad (8)$$

式中 L 为距加热段进口的轴向长度。 $\bar{C}_p$ 为平均比热容, 定义见文献[21]; n 的取值见文献[21]; 下标 w, b 分别表示取壁面和主流处的值。

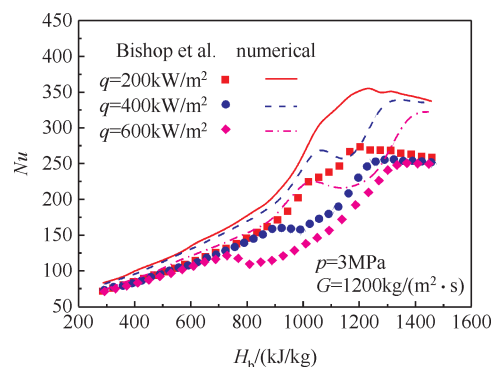
在数值计算中, 努塞尔数的定义为

$$Nu = hd / \lambda_b \quad (9)$$

式中 d 为管道内径; λ_b 为主流热导率。



(a) Comparison with the Bae-Kim expression



(b) Comparison with the Bishop et al. expression

Fig. 5 Comparisons of calculated Nusselt number with empirical formulae at different heat fluxes

从图5, 图6可以清楚地看到, 在低热流密度情况下, Bae-Kim 经验公式预测值与本文的计算值非常吻合, 相对误差基本都在10%以内。随着热流密度升高, Bae-Kim 关系式预测值与数值结果的偏差增大, 但相对误差仍满足小于20%的工程计算需求。而Bishop等给出的关系式计算值与数值结果出现了较大的偏差, 其中, 热流密度为400kW/m²和600kW/m²时的最大相对误差均超过了35%, 意味着该换热公式对于RP-3航空煤油的超临界传热计算已不再有效。需要注意的是, 二者预测的传热恶化起始位置基本相同, 但比本文数值结果要明显提前。因此, 为获得能够有效预测超临界航空煤油传热恶化的对流换热经验关系式, 还需要做进一步的工作。

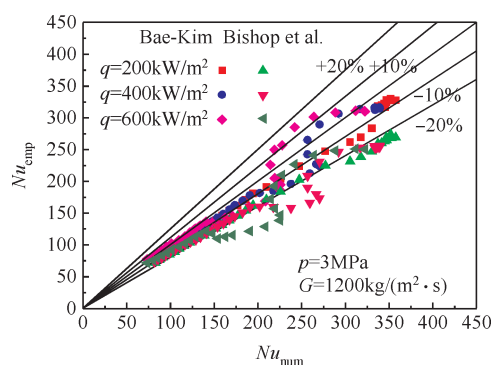


Fig. 6 Relative errors between calculated Nusselt number and empirical formulae at different heat fluxes

3.2 传热恶化机理

以往对垂直上升管内超临界流体对流换热的研究表明,传热恶化与高热流密度导致的强浮升力有着密切的联系^[23]。为了说明二者之间的关系,图7给出了考虑和不考虑浮升力时换热系数的比较。由图7的结果可以看出,考虑和不考虑浮升力时的换热系数几乎完全重合,这表明在本文较高的质量流速下浮升力对换热的影响可以忽略。

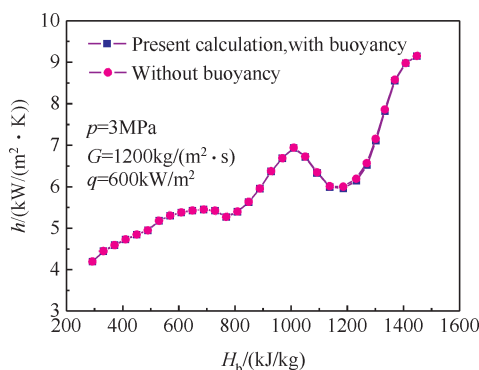
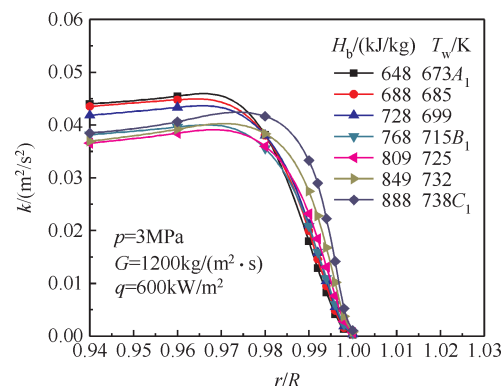


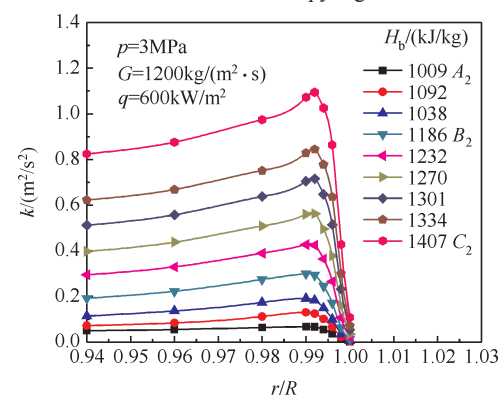
Fig. 7 Comparison of heat transfer coefficient with and without considering the effect of buoyancy force

图8给出了两类传热恶化和换热恢复过程中近壁处湍动能沿管径向的分布。其中, A_i , B_i , C_i ($i=1, 2$) 分别为图4(b)中传热恶化开始出现、换热系数最小值和换热性能完全恢复对应的管横截面。从图8(a)中可以看到, $A_1 - C_1$ 段的近壁处湍动能随流体焓值增大呈现先减小后增大的变化趋势,表明此换热过程中壁面边界层中的流动出现了层流化现象。这主要是因为在该换热过程中,近壁面流体温度处在拟临界温度($T_{pc}=695\text{K}$)附近,密度随温度升高急剧降低导致流体的膨胀加速(即热加速效应),部分湍动能转化为流动动能,从而造成了流体传热能力的降低。图8(b)的结果则显示了, $A_2 - C_2$ 段近壁处的湍动能沿流动方向不断增大,意味着该换热段壁面

边界层中的流动没有出现层流化现象,其传热恶化机理与低主流焓值区存在显著的差异。这主要是因为此时管壁温度已远高于拟临界温度,比热容峰值处于主流区域,近壁面流体密度的变化非常平缓。



(a) Low bulk enthalpy region



(b) High bulk enthalpy region

Fig. 8 Turbulent kinetic energy radial distribution near the wall corresponding to the heat transfer deterioration and heat transfer recovered

图9给出了 $A_2 \sim C_2$ 段不同管横截面内径向速度(取指向管壁面为正方向)的分布情况。图10为其中3种典型的径向速度矢量图。由图9可以发现一个有趣的现象,即在该换热过程中径向速度出现了较大

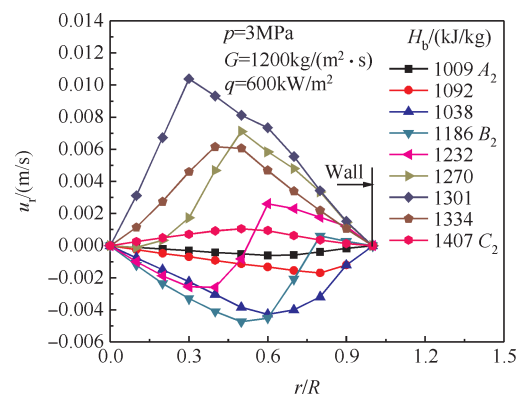


Fig. 9 Radial velocity distribution corresponding to the heat transfer deterioration and heat transfer recovered in the high bulk enthalpy region

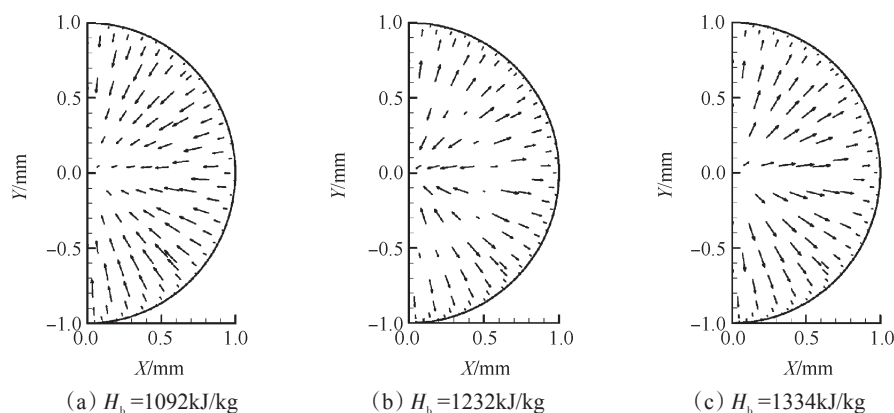


Fig.10 Radial velocity vectors at different tube cross-sections corresponding to the heat transfer deterioration and heat transfer recovered in the high bulk enthalpy region

的波动。文献[24]认为,径向速度的波动是由热物性的剧烈变化造成的,本文的数值结果也支持这一观点,因为此时的主流温度正处于拟临界温度附近($671\text{K} \leq T_b \leq 769\text{K}$)。另外,仔细观察可以发现,高主流焓值区的传热恶化和该径向速度波动是密切相关的。在 A_2-B_2 换热段,径向速度指向管横截面中心,管横截面内流体有流向管中心的趋势(图 10(a)),近壁区冷热流体的交混减弱,壁面得不到有效地冷却,换热沿管轴向迅速恶化。而在 B_2-C_2 换热段,径向速度开始转向,从近壁区逐渐延伸到整个径向范围(图 10(b)、10(c))。由此,近壁面流体的交混能力增强,换热沿流动方向缓慢恢复。径向速度的波动对近壁处质量流速的分布也有影响,图 11 的结果显示了,在高主流焓值的传热恶化和换热恢复段内,近壁处质量流速沿流动方向呈现了先减小后增大的变化,这表明径向速度的波动使管横截面上的流体向管中心汇聚,主流区质量流速增大;而近壁面则被流动性差的热流体所覆盖,阻碍了热量从壁面向主流体的传递。

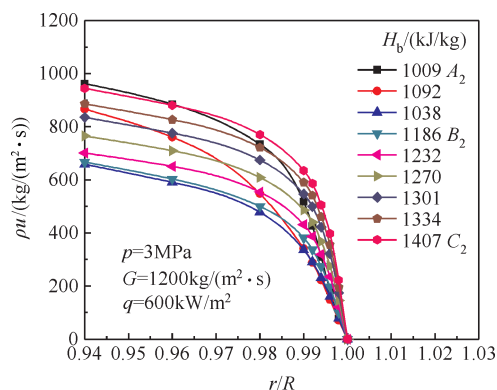


Fig. 11 Mass flux radial distribution corresponding to the heat transfer deterioration and heat transfer recovered in the high bulk enthalpy region

4 结 论

本文通过数值模拟计算,详细研究了超临界压力下 RP-3 航空煤油在垂直上升圆管内的传热恶化现象和机理,得到的主要结论为:

(1) 低热流密度时,换热系数沿流动方向持续增大;随着热流密度升高,先后在高主流焓值区和低主流焓值区分别出现了复杂的传热恶化现象。

(2) 垂直上升管内超临界航空煤油的传热恶化与径向流场的异变密切相关。通过对相应区域径向流场的分析发现,低主流焓值区和高主流焓值区的传热恶化分别是由热加速效应和径向速度场的不稳定引起的。

(3) 通过数值计算结果与经验公式值的对比发现,Bae-Kim 关系式可以较好地反映航空煤油的超临界对流换热特性。由该公式得到的努塞尔数与模拟值的相对误差均在 20% 以内,但其预测的传热恶化起始点比数值结果要明显提前。Bishop 等给出的经验公式对超临界 RP-3 航空煤油的换热预测已不再有效。

参考文献:

- [1] Lander H R, Nixon A C. Endothermic Fuels for High Mach Vehicles [J]. *American Chemical Society, Division of Petroleum Chemistry*, 1987, 32(2): 504-511.
- [2] 黄文, 邓宏武, 徐国强, 等. U 型管内超临界压力航空煤油压降特性[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(3): 582-587.
- [3] 范学军, 俞刚. 大庆 RP-3 航空煤油热物性分析[J]. *推进技术*, 2006, 27(2): 187-192. (FAN Xuejun, YU Gang. Analysis of Thermophysical Properties of Daqing RP-3 Aviation Kerosene[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(2): 187-192.)

- [4] Koshizuka S, Takano N, Oka Y. Numerical Analysis of Deterioration Phenomena in Heat Transfer to Supercritical Water[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38(16): 3077-3084.
- [5] Zhang G, Zhang H, Gu H Y, et al. Experimental and Numerical Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer Deterioration of Supercritical Water in Vertical Tube[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 248: 226-237.
- [6] Kim D K, Kim M H. Experimental Study of the Effects of Flow Acceleration and Buoyancy on Heat Transfer in a Supercritical Fluid Flow in a Circular Tube[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(10): 3336-3349.
- [7] 李志辉, 姜培学, 赵陈儒, 等. 超临界 CO₂ 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.
- [8] Kelbaliev R F. Deterioration of Heat Transfer at Supercritical Pressures of a Substance[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, 74(2): 416-420.
- [9] Linne D L, Meyer M L, Edwards T, et al. Evaluation of Heat Transfer and Thermal Stability of Supercritical JP-7 Fuel[R]. AIAA 97-3041.
- [10] Hitch B, Karpuk M. Experimental Investigation of Heat Transfer and Flow Instabilities in Supercritical Fuels[R]. AIAA 97-3043.
- [11] Liu Z H, Bi Q C, 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.
- [12] 屈云凤, 周伟星, 鲍文. 超临界压力下戊烷传热恶化的数值研究[C]. 上海: 中国工程热物理年会, 2010.
- [13] Fan X J, Yu G, Li J G, et al. Effects of Entry Conditions on Cracked Kerosene Fueled Supersonic Combustor Performance[J]. *Combustion Science and Technology*, 2007, 179(10): 2199-2217.
- [14] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [15] Zhong F Q, Fan X J, Yu G, et al. Heat Transfer of Aviation Kerosene at Supercritical Conditions[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, 23(3): 543-550.
- [16] 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[C]. 重庆: 中国工程热物理年会, 2013.
- [17] 闫晓, 臧金光, 曾小康, 等. 基于二级相变理论的超临界拟临界区划分方法[J]. 核动力工程, 2013, 34(1): 108-113.
- [18] Zhang C B, Xu G Q, Gao L, 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: 90-99.
- [19] 王亚洲, 华益新, 孟华. 超临界压力下低温甲烷的湍流传热数值研究[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 606-611. (WANG Ya-zhou, HUA Yi-xin, MENG Hua. Numerical Investigation of Turbulent Heat Transfer of Cryogenic-Propellant under Supercritical Pressures[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(4): 606-611.)
- [20] Ruan B, Meng H. Supercritical Heat Transfer of Cryogenic-Propellant Methane in Rectangular Engine Cooling Channels[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2012, 26(2): 313-321.
- [21] Bae Y Y, Kim H Y. Convective Heat Transfer to CO₂ at a Supercritical Pressure Flowing Vertically Upward in Tubes and an Annular Channel[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33(2): 329-339.
- [22] Cheng X, Kuang B, Yang Y H. Numerical Analysis of Heat Transfer in Supercritical Water Cooled Flow Channels[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237(3): 240-252.
- [23] Sharabi M, Ambrosini W. Discussion of Heat Transfer Phenomena in Fluids at Supercritical Pressure with the Aid of CFD Models[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2009, 36(1): 60-71.
- [24] 华益新, 王亚洲, 孟华. 超临界压力下正庚烷的湍流传热数值研究[J]. 航空学报, 2010, 31(7): 1324-1330.

(编辑: 朱立影)