

多影响因素作用下碳氢燃料跨临界过程 换热恶化的数值研究

李良伟, 王 畅, 朱剑琴, 胡希卓

(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科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 为深入理解多影响因素作用下碳氢燃料跨临界过程换热恶化的特性, 基于开源计算软件 OpenFOAM 对超临界 RP-3 的流动换热过程进行数值模拟。采用广义对应状态法则对碳氢燃料替代模型的物性进行计算, 湍流模型选用 SST(shear stress transport) $k-\omega$ 湍流模型。与实验数据比较, 热流密度为 $300\sim 400\text{ kW/m}^2$ 内的计算壁温平均误差小于 3%。研究分析了换热恶化机理, 讨论压力、进口温度、热流密度与质量流量之比对 RP-3 换热特性的影响。结果表明: 拟临界温度附近 RP-3 热物性的剧烈变化是强制对流下发生换热恶化的主要原因; 提高压力、降低热流密度与质量流量之比或减小进口温度是避免流体在拟临界温度附近发生换热恶化的有效措施; 提出了换热恶化预测关联式, 为主动再生冷却技术提供参考。

关 键 词: 碳氢燃料 RP-3; 软件 OpenFOAM; 超临界; 换热特性; 换热恶化

中图分类号: V511⁺.1 **文献标志码:** A

Numerical study on heat transfer deterioration of hydrocarbon fuel in transcritical process under influence of multiple influencing factors

LI Liangwei, WANG Chang, ZHU Jianqin, HU Xizhuo

(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: In order to deeply understand the heat transfer characteristics of supercritical hydrocarbon fuel in the process of active regeneration cooling, the heat transfer characteristics of supercritical RP-3 were numerically calculated based on the open source software OpenFOAM. The SST (shear stress transport) $k-\omega$ turbulence model was used and the physical properties of aviation kerosene alternative fuels were calculated by the generalized corresponding state law. Comparative analyses between numerical and experimental results were used to evaluate the reliability of calculation method, the average error of wall temperature was less than 3% with the heat flux ranging from 300 kW/m^2 to 400 kW/m^2 . The mechanism of heat transfer deterioration was analyzed, the effects of pressure, inlet temperature and the ratio of heat flux and mass flow rate on the flow and heat transfer were discussed. It

收稿日期: 2018-03-30
作者简介: 李良伟(1993—), 男, 硕士生, 主要研究方向为超临界碳氢燃料流动换热。

引用格式: 李良伟, 王畅, 朱剑琴, 等. 多影响因素作用下碳氢燃料跨临界过程换热恶化的数值研究[J]. 航空动力学报, 2019, 34(2): 387-395. LI Liangwei, WANG Chang, ZHU Jianqin, et al. Numerical study on heat transfer deterioration of hydrocarbon fuel in transcritical process under influence of multiple influencing factors[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(2): 387-395.

indicated that the dramatic changes of hydrocarbon fuel physical properties near the pseudo critical temperature were the main cause of heat transfer deterioration under forced convection. Improving the pressure and the ratio of heat flux and mass flow rate or decreasing the inlet temperature were effective measures to avoid the heat transfer deterioration near the pseudo critical temperature. The predictive correlation formula of heat transfer deterioration had been proposed, providing a reference for the regeneration cooling technology.

Key words: hydrocarbon fuel RP-3; software OpenFOAM; supercritical; heat transfer characteristics; heat transfer deterioration

超燃冲压发动机是众多高精尖技术的集成,涉及到气动、传热、材料等多个学科,本文研究重点在于超燃冲压发动机的热防护问题,而采用碳氢燃料流经发动机高温外壁的再生冷却技术是解决热防护问题的有效方法。碳氢燃料在流经发动机高温燃烧室外壁面内的冷却通道时处于超临界压力下,随着温度的不断升高,碳氢燃料可能发生裂解反应。裂解反应是一种吸热反应,该过程不仅有效地避免发动机的高温热破坏,而且提高了燃料的燃烧性能。但这一过程中燃料的热物性参数随温度和压力的改变会发生较大变化,使得碳氢燃料在冷却通道内的流动换热规律变得复杂^[1]。因此,研究超临界碳氢燃料的流动换热特性对掌握再生冷却技术具有重要意义。

在较高壁面热流密度下,超临界流动换热过程可能会出现换热恶化现象,此时表面传热系数较小且壁温升高,可能会导致材料失效,故应避免换热恶化的发生^[2]。目前对超临界流体换热规律的研究大多数针对的工质主要是水和二氧化碳^[3-6],对碳氢燃料换热规律的研究相对较少。

ZHONG Fengquan 等^[7]通过实验研究了超临界条件下碳氢燃料的换热特性,发现在拟临界温度附近,换热恶化的主要原因是燃料物性的急剧变化。LIU Bo 等^[8]对超临界正癸烷在竖直细圆管中的对流换热特性进行了实验研究,当入口雷诺数较高时浮升力和热加速对传热影响不明显;当入口雷诺数较低时浮升力会降低向上流动的传热系数。Jackson 等^[9]和赵陈儒等^[10]研究了浮升力对超临界流体对流换热的影响,发现在竖直管道轴向方向存在密度梯度和压力梯度,引起流体流动加速,进而导致换热恶化的发生,并提出浮力数 B^* 用于判断浮升力影响的大小,当浮升力满足 $6 \times 10^{-7} < B^* < 1.2 \times 10^{-6}$ 时,浮升力的影响不可忽略。DANG Guoxin 等^[11]研究了超临界航空煤油 RP-3 的对流换热,发现超过临界压

力较多时煤油换热性能良好;在接近临界压力时,由于近壁区湍动能降低,当壁温在拟临界温度附近时会出现换热恶化现象。朱锟等^[12]通过实验,研究了水平管内系统压力对超临界条件下碳氢燃料流动换热过程的影响规律,发现燃料流体温度与内壁温度的差异导致了物性的差异,这是管内换热规律发生变化的主要原因,而浮升力和热加速作用对换热过程的影响不大。ZHOU Weixing 等^[13]研究了超临界丙烷的流动换热规律,发现当丙烷温度处在拟临界温度附近时,壁面的温度迅速增加且传热系数急剧减小,发生换热恶化现象。王彦红等^[14]对超临界碳氢燃料 RP-3 在水平圆管内的流动换热特性进行了数值研究,讨论了质量流量及热流密度对二次流和壁温分布的影响规律。结果表明,二次流的演变规律能合理地解释水平圆管超临界 RP-3 的非均匀传热机理。ZHU Jianqin 等^[15]对超临界压力下 RP-3 的流阻特性和换热特性进行了数值模拟研究,研究结果表明,当 RP-3 温度低于临界温度时,不同压力下的压降特性几乎一致;而当 RP-3 温度高于临界温度时,不同压力下的压降特性开始出现差异,传热恶化转折点随着壁面热流密度的增加而提前。

为深入研究碳氢燃料的换热特性,本文基于 OpenFOAM 对超临界 RP-3 在细圆管内的换热特性展开了数值模拟研究。考察了压力、进口温度、热流密度与质量流量之比对碳氢燃料流动换热特性的影响规律,深入分析换热恶化机理,提出换热恶化预测关联式,并给出了出现换热恶化的压力温度等条件,为再生冷却系统的设计和优化提供参考。

1 计算方法

1.1 物理模型

图 1 为物理模型剖面图。本文研究对象为一细长圆管,总长为 450 mm,为消除进出口效应以

保证流体充分发展,管道进出口分别设置长为 90 mm 和 60 mm 的绝热段,中间 300 mm 长的管道为加热段,内直径取为 1.8 mm。

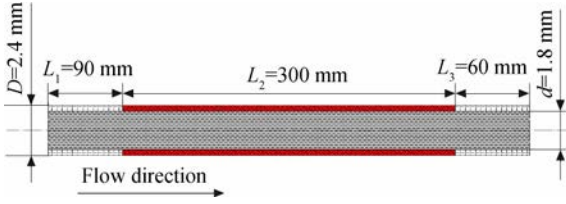


图 1 物理模型简图

Fig. 1 Schematic diagram of physical model

1.2 控制方程

在碳氢燃料流动的冷却通道内求解的连续方程、动量方程、能量方程等控制方程如下所示:

连续方程

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

式中 ρ 为密度, u_i 为速度, x_i 为坐标。

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

式中 μ 为黏度, p 为压力, δ_{ij} 为克罗内克符号。由 Boussinesq 假设, 雷诺应力表达式如下:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

式中 k 为湍动能, μ_t 为湍流黏度。

由于冷却通道的水力直径很小, 通常小于 2 mm, 管道入口处碳氢燃料流速自约 1~10 m/s 逐渐增大, 通道内格拉晓夫数和雷诺数平方的比值 Gr/Re^2 的量级约为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$, 表明重力对流动换热的影响很小, 因此本文忽略重力影响, 动量方程中忽略了重力项^[16]。能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \cdot \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \dot{Q} + \phi \quad (5)$$

其中湍流热流量基于 Boussinesq 假设模化, Pr_t 为湍流的普朗特数, 取值为 0.85。 $\dot{Q}$ 为内热源, H 为比焓, ϕ 为耗散函数。

不考虑高温时发生化学反应, 则变物性流动能量方程中的压力项和耗散项可忽略^[17], 能量方

程可以简化为如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \cdot \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

表面传热系数 h 为

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_b} \quad (7)$$

式中 q_w 为壁面热流密度, T_w 为壁面温度, T_b 为流体截面平均温度。

1.3 计算网格

本文研究的基础模型为轴对称模型, 考虑边界条件具有对称性, 可以减少总计算量。对二维计算域进行结构化网格划分, 并对加热段和壁面处网格进行加密, 获得典型网格无关解。

考虑温度和表面传热系数两个变量进行网格无关解的计算, 结果运算如图 2 所示。当网格数为 28000 时, 两个参数的变化率都小于 1%, 已达到网格无关解的要求。计算中控制第 1 层网格高度 $y^+ < 1$, 以确保精确计算黏性底层。

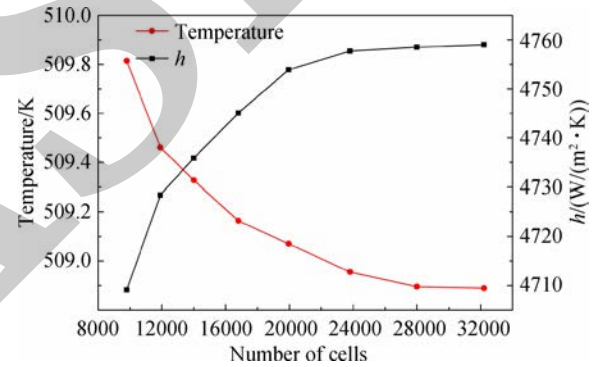


图 2 温度和导热系数随网格数的变化

Fig. 2 Variation of temperature and heat transfer coefficient with mesh numbers

2 替代模型

2.1 湍流模型

湍流模型是超临界湍流流动换热数值模拟的关键, 然而目前尚鲜有专门用于模拟超临界流动换热的湍流模型。大多数国内外研究人员采用各类已有的湍流模型对超临界换热恶化和换热强化现象进行数值研究, 发现不同湍流模型对超临界换热的预测表现不一。Menter^[18]提出的剪切压力传输(SST) $k-\omega$ 湍流模型有效结合了标准 $k-\epsilon$ 湍流模型及 $k-\omega$ 湍流模型, 并对涡黏性进行修正, 可用于不同的湍流区域。赵国柱等^[16]采用 SST $k-\omega$ 湍流模型对超临界压力正癸烷流动换热进行了数值模拟, 因此, 本文采用 SST $k-\omega$ 模型进行

湍流传热模拟。

湍动能输运方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (8)$$

比耗散率输运方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_k \quad (9)$$

式中 Γ 为有效扩散系数; G 、 Y 分别为相关的生成项和耗散项; D_ω 为交叉扩散项; S 为源项。

2.2 碳氢燃料特性及数值方法

基于压力求解器求解离散化,采用相应的控制方程,同时利用求解压力耦合的半隐(semi-implicit method for pressure-linked equation, SIMPLE)方法来求解压力速度耦合方程,采用 2 阶迎风格式计算动量方程和能量方程中的对流项以增加精度,采用 1 阶迎风格式计算湍流方程中的对流项来保持鲁棒性。判断收敛的准则^[19]为全部控制方程的残差小于 10^{-6} 。

物质有 3 种基本相态,随温度和压力的改变而相互转变。当压力升高到某一特定值时,对液相工质持续加热,气液分界面消失,此压力称为临界压力。在超临界压力下,流体的比定压热容会呈现一个峰值,这一峰值点所对应的温度为拟临界温度。

本文采用碳氢燃料 RP-3 作为研究的工质,程泽源等^[20]采用广义对应状态法则对碳氢燃料替代模型的输运特性和热力学特性进行了数值模拟研究,给出了较为合理的物性计算方法和实验数据验证方法。在拟临界温度附近,碳氢燃料的密度、黏度以及导热系数迅速减小,其热物性的剧烈变化使其流动换热特性与亚临界状态时相比有很大差异,进而使得碳氢燃料的流动换热过程变得更加复杂。

计算所得的碳氢燃料的临界温度为 643.5 K,临界压力为 2.43 MPa,而实验测得 RP-3 的临界温度和临界压力分别为 645.04 K 和 2.33 MPa^[21],证明了所用物性模型的准确性。

流动过程中压差相对于绝对压力很小,将碳氢燃料的热物性参数计算得到关于温度的函数,同时嵌入到 OpenFOAM 中。计算中利用质量流量入口、压力出口是进出口的边界条件,管道对称轴采用轴对称边界条件,因此,网格内的任意变量都必须满足如下方程:

$$\frac{\partial \omega}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (10)$$

式中 r 表示管壁到管道中心的距离。

2.3 物性计算

采用色谱联用仪对碳氢燃料进行分析,结果表明其成分超过 300 种,可见碳氢燃料成分复杂,所以需要采用合适的组分替代模型进行分析。本文采用的是四组分替代模型,其质量分数构成为:19.1%正十烷,36.5%正十二烷,14.5%甲基环己烷,29.9%正丁基苯,该替代组分与实际航空燃料具有相似的临界特性,在预测碳氢燃料物性上具有一定的准确性。

由于超临界碳氢燃料特殊的物性变化规律,准确模拟其物性变化是求解碳氢燃料超临界传热的关键因素。开源计算软件 OpenFOAM 可以模拟复杂流体流动、化学反应、湍流流动、换热分析以及结构动力学分析等,用户可以最大程度地扩展程序本身的功能和处理能力以实现用户自定义功能。因此,本文基于 OpenFOAM 中的传热求解器(buoyantSimpleFoam)对 RP-3 的换热特性展开数值研究。

本文首先在该求解器源程序的基础上进行修改,通过添加用于输出热物性参数计算结果的子程序(write.H)对该求解器进行二次开发。考虑到 RP-3 热物性参数随温度的变化情况,本文采用的热物理模型是基于密度的普通热物理模型(heRhoThermo),相应的各热物性参数的模型均采用多项式的形式。该类多项式是通过温度 T 从可以指定任意阶数的函数进行热物性参数的计算,各个多项式的系数通过算例目录下的字典文件(thermophysicalProperties)进行指定。

其次,本文对热物性模型的开发是在多项式源程序基础上进行的。通过在程序中嵌入物性库来代替程序读取的各个多项式系数,在减少工作量的同时提高了计算精度。程序改造的依据是在课题组现有的物性计算程序的基础上,通过线性插值计算得到 RP-3 不同温度下的物性参数,并将物性参数值返回到程序中用于计算,物性模型开发的步骤详见附录。最后,在完成物性模型开发的基础上,对超临界碳氢燃料的换热特性进行了数值计算研究。

3 计算结果与讨论

3.1 计算方法验证

张春本^[22]通过实验研究了超临界碳氢燃料流动换热特性,本文利用该实验数据对计算方法

进行验证,以确保计算方法的可靠性。实验工况:质量流量为 0.003 kg/s,进口温度为 373 K,工作压力为 5 MPa,壁面热流密度分别采用 $q_w=300$ 、 400 kW/m^2 ,采用前述计算方法对实验结果进行数值模拟,得到了加热段内壁温随无量纲长度 x/d 的变化规律,如图 3 所示,其中 d 为内径, x 为距加热段起始点的距离。

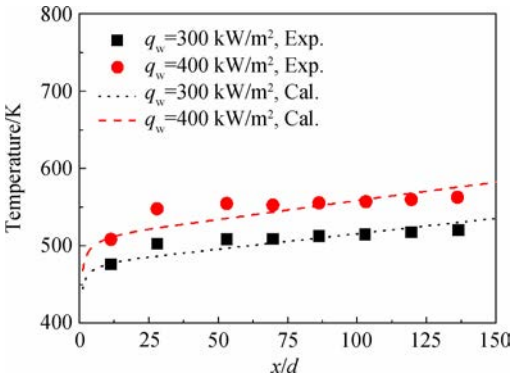


图 3 壁温计算结果与实验结果对比
Fig. 3 Comparison of wall temperature between calculation and experiment

由图 3 可知,当壁面热流密度为 300 kW/m^2 和 400 kW/m^2 时,计算结果与实验结果差别很小;当 x/d 取值在 25~75 之间时,误差较为明显,但平均误差小于 3%,处于误差允许范围之内,以上结果表明计算方法具有较高的精度。产生误差的原因是高热流密度时,壁温在拟临界温度附近时,该替代模型并不能十分精确预测碳氢燃料的真实物性变化情况,同时湍流模型也会带来部分误差。

3.2 换热恶化机理

图 4 显示在强制对流下壁温和表面传热系数 h 随加热段无量纲长度 x/d 的变化情况。计算工况为进口温度为 373 K,系统压力为 3 MPa,壁面热流密度 q_w 与质量流量 G 的比值 $q_w/G=0.916\text{ kJ/kg}$ 。

由图 4 可知,在加热段起始位置,壁温相对较低,并沿着流动方向逐渐升高,在 $x/d=107$ 处壁温达到最大值,然后开始逐渐下降;而在起始位置表面传热系数相对较高,沿着流动方向下降,并在 $x/d=107$ 处达到最低点,然后开始逐渐回升,此计算工况表明整个管长均存在换热恶化。

为研究在强制对流下换热恶化的机理,加热段管长内不同截面上的导热系数 κ 、湍动能、比定压热容 c_p 和密度 ρ 沿无量纲半径 r/R 的变化如图 5 所示,所选取截面分别是 $x/d=7$ 、57、107 和

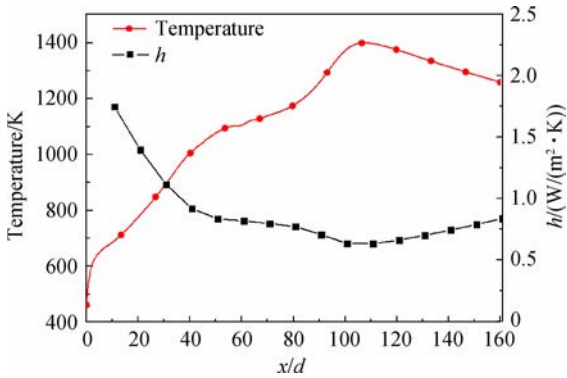
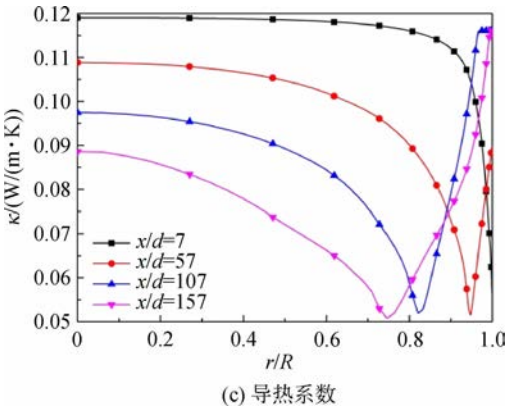
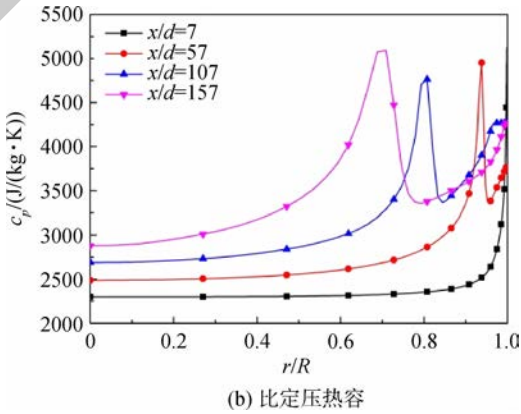
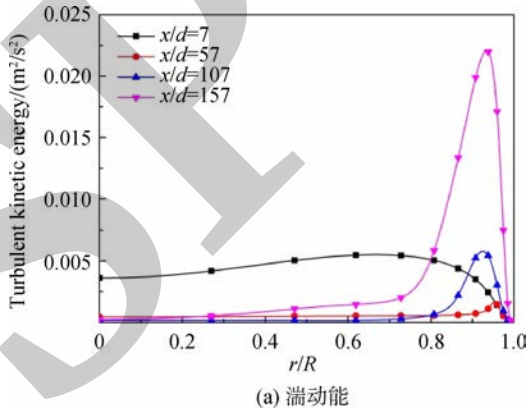


图 4 壁温和导热系数在无量纲长度下的变化
Fig. 4 Variation of wall temperature and heat transfer coefficient with dimensionless length



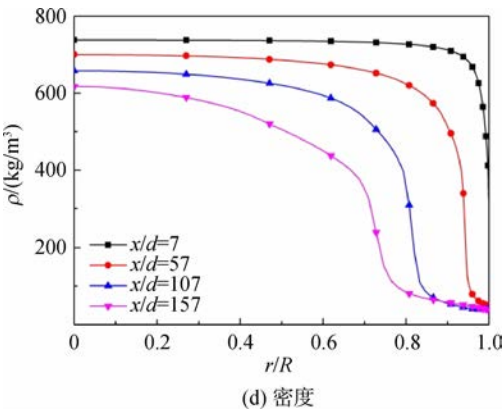


图 5 热物性质沿无量纲长度的变化
Fig. 5 Variation of thermophysical properties with dimensionless length

157, $x/d=7$ 对应换热恶化起始点, $x/d=57$ 对应换热恶化的发展阶段, $x/d=107$ 对应换热恶化的极大值点, $x/d=157$ 对应换热恢复阶段。

由图 5(a)可知, $x/d=7$ 和 57 处壁面附近的湍动能都处在较低水平;随着流动截面沿着管长推进,在壁面附近的湍动能明显增加,在 $x/d=157$ 壁面附近的湍动能是 $x/d=107$ 处湍动能的 3 倍以上,湍动能增加引起换热强化效应,这一强化效应大于物性变化导致的换热恶化效应,从而使得换热逐渐恢复。

由图 5(b)可知,在不同截面上,比定压热容变化规律较为一致,均从管道中心到管壁面先增加后减小,并在某一半径处出现峰值。在 $x/d=7$ 时,比定压热容峰值基本贴近壁面,壁面处的吸热能力显著增强,导致表面传热系数相对较高;在沿着流向方向,比定压热容的峰值开始向管道中心移动,使壁面处的吸热能力下降,导致表面传热系数逐渐降低。

由图 5(c)可知,在 $x/d=7$ 时,导热系数在壁面附近急剧下降,使得壁面温度急剧升高;沿流向,各截面的导热系数均先减小后增加,相应的壁温沿流向先升高后降低,在温度极值处发生换热恶化。

由图 5(d)可知,在 $x/d=7$ 壁面附近时,密度变化较为剧烈,随着流动截面推进的过程中,密度剧烈变化的区域由壁面向管道中心移动,同时范围逐渐变宽,温度升高,密度急剧降低是引起换热恶化的主要原因。

3.3 压力对换热特性的影响

本节通过数值计算详细研究了细圆管内 RP-3 处于不同压力下的换热特性,图 6 给出了不同

压力下计算得到的壁面温度沿无量纲长度的变化情况。计算工况:进口温度为 373 K,壁面热流密度与质量流量之比为 0.814 kJ/kg,系统压力分别为 4、4.5、5、5.5、6 MPa。

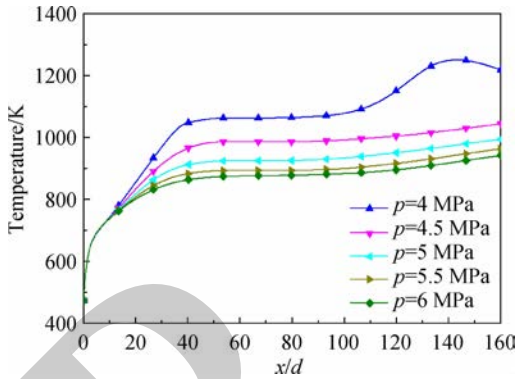
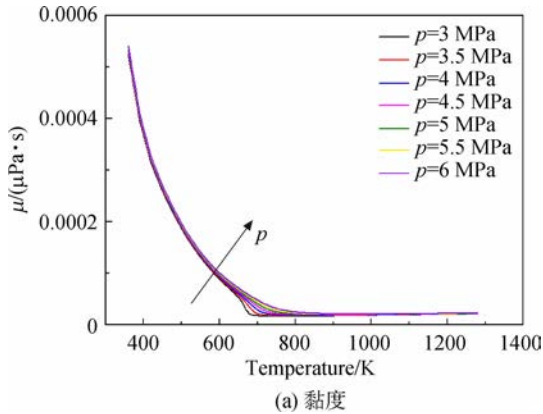


图 6 不同压力时壁温的变化
Fig. 6 Variation of wall temperature at different pressures

由图 6 可知,在湍流区内,当压力 $p>4$ MPa 时,壁温沿管长变化趋势基本一致;当压力 $p=4$ MPa 时,壁温在 $120<x/d<140$ 范围内突然升高。经分析可知,压力(4 MPa)已接近 RP-3 的临界压力,在壁面温度突然升高的范围内,RP-3 的平均温度处于拟临界温度附近。此区间对应的 RP-3 导热系数最小,壁面与流体之间传热效率低,因此壁温升高。

RP-3 物性变化对其流动换热的影响可以从图 7 中更加直观的说明,其中图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)、图 7(d)分别是不同压力下黏度 μ 、比定压热容 c_p 、导热系数 κ 和密度 ρ 的变化情况。由图可知,压力越小,物性变化越剧烈;压力升高,物性变化剧烈程度逐渐减弱。压力为 3 MPa 时,RP-3 密度在拟临界温度附近迅速减小,而此范围内 RP-3 的导热系数处于最小值,减少了流体与壁面之间的换热量,使壁温升高。随着压力的升高,拟临界



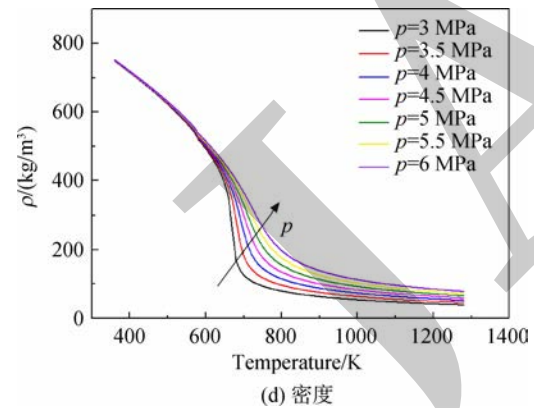
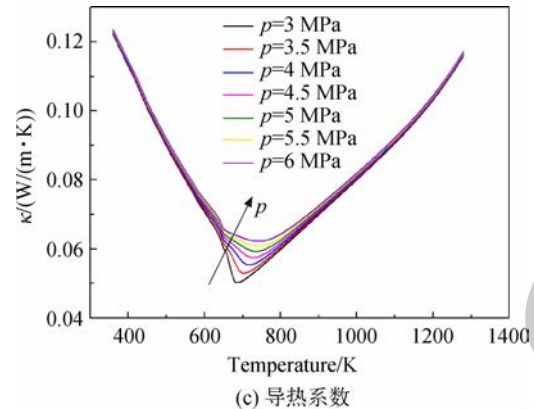
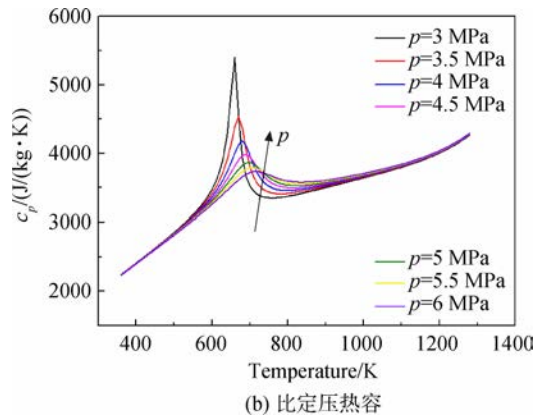


图 7 不同压力下热物性的变化

Fig. 7 Variation of thermophysical properties at different pressures

温度附近 RP-3 物性的变化程度逐渐减小,因此提高系统压力是避免主流在拟临界温度附近发生传热恶化的一种有效措施。

3.4 进口温度对换热特性的影响

图 8 给出了不同进口温度 T_{in} 下计算得到的壁面温度沿无量纲长度的变化情况。计算工况:系统压力为 3 MPa,壁面热流密度与质量流量之比为 0.713 kJ/kg,进口温度分别为 323、373、423、473、523 K。

由图 8 可以看出,进口温度为 323、373、423 K

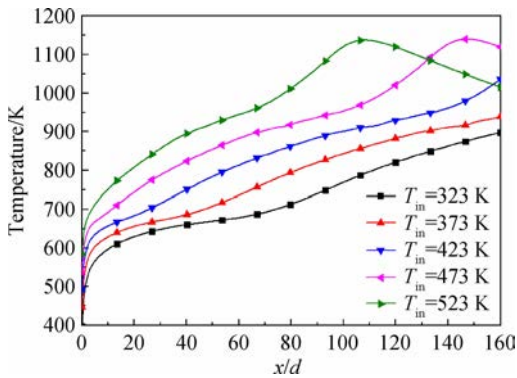


图 8 不同进口温度下壁温的变化

Fig. 8 Variation of wall temperature at different inlet temperatures

时,壁面温度沿无量纲长度基本呈线性升高趋势;而在进口温度为 473 K 和 523 K 时,壁面温度沿无量纲长度的变化均出现了较为剧烈的上升,这表明加热段内壁面出现了传热恶化现象。观察图 7 可以发现,RP-3 的各物性在 695 K 附近均发生剧烈变化,使加热管内出现复杂的流动换热以致发生换热恶化现象。因此,降低进口温度可以有效地避免主流拟临界温度附近换热恶化现象的发生。

3.5 q_w/G 对换热特性的影响

文献[23]中把 q_w/G 作为独立影响因素分析其对流体流动换热的影响,本文也将 q_w/G 作为独立影响因素进行分析。图 9 给出了不同 q_w/G 下计算得到的壁面温度沿无量纲长度的变化情况。计算工况:进口温度为 373 K,系统压力为 3 MPa,壁面热流密度与质量流量之比 q_w/G 分别为 0.509、0.611、0.713、0.763、0.814、0.916 kJ/kg。

由图 9 可知,当 $q_w/G \leq 0.763$ kJ/kg 时,壁温沿无量纲长度的变化趋势基本一致;随着 q_w/G 的进一步增加,加热段出口附近温度激增,壁面温

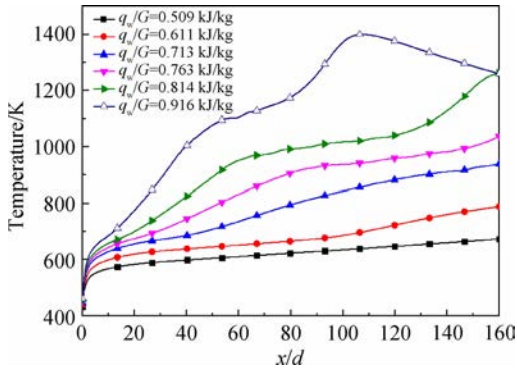


图 9 在不同的 q_w/G 值下壁温的变化

Fig. 9 Variation of wall temperature at different q_w/G

度呈现先增加后减小的现象,在某一半径处出现温度极值,发生换热恶化现象。随着 q_w/G 的增加,径向截面流体获得的热流量增加,焓值升高,径向截面流体温度极值增加的同时壁温也增加,使流体更早受到物性剧烈变化的影响,换热恶化起始位置提前。

3.6 换热恶化预测关联式

目前学术界针对碳氢燃料对流换热经验关联式的预测有很多研究^[24],但有关换热恶化关联式预测的研究相对较少。文中对国产 RP-3 航空煤油的换热恶化发生的边界进行相应的数值模拟研究。研究表明,当压力 $p>4$ MPa 时,没有明显的换热恶化现象,因此数据没有 $p=4.5\sim6$ MPa 的工况。为了预测换热恶化的发生,为实际再生冷却技术的设计和应用提供参考,数值模拟得到的发生换热恶化的工况如表 1 所示。

表 1 换热恶化的计算条件
Table 1 Calculation conditions of heat transfer deterioration

T_{in}/K	p/MPa	$(q_w/G)/(kJ/kg)$
323	3	0.846952
373	3	0.808801
373	3.5	0.928341
373	4	1.055511
423	3	0.750303
423	3.5	0.864756
423	4	0.991926
473	3	0.674001
473	3.5	0.801171
473	4	0.839322
523	3	0.592612
523	3.5	0.719782
523	4	0.818975
573	3	0.483246
573	3.5	0.584982
623	3	0.254340
623	3.5	0.330642
623	4	0.457812

应用 DataFit 9.0 软件对表 1 中的数据进行拟合,得到的关系式如下:

$$q_w/G = a + b \cdot T_{in} + c \cdot T_{in}^2 + d \cdot p \quad (11)$$

式中 $a=-0.4903, b=4.039 \times 10^{-3}, c=-6.562 \times 10^{-6}, d=0.2059$ 。 p (单位 MPa)、 T_{in} (单位 K)及 q_w/G (单位 kJ/kg)的取值范围为 $3 \leq p \leq 4, 323 \leq T_{in} \leq 623, 0.25 \leq q_w/G \leq 1.05$,复判定系数 $R^2=0.9839221085$,关联式与数据拟合结果较好。

随压力 p 增大,物性变化的程度趋向于平缓,不容易发生换热恶化,提高热流密度或者减小质量流量会导致换热恶化现象发生。当进口温度增加时,较小的热流密度就会发生换热恶化现象。分析得到的结论与经验关系式一致,证明该关系式符合实际情况。

由于本文未考虑重力对流动换热的影响,因此上述关联式对浮升力效应显著工况的适应性还需要进一步验证,可作为换热恶化起始点的保守估计参考,同时关联式的更广泛的适应性仍需要实验验证。

4 结 论

本文基于开源 CFD 计算软件 OpenFOAM 对碳氢燃料跨临界过程的换热特性进行了数值计算,在完成物性模型开发以及计算方法可靠性得到验证的基础上,探讨了压力、进口温度和壁面热流密度和质量流量之比多影响因素对流动换热的影响,并拟合得出了换热恶化预测关联式,研究得到的结论如下:

- 1) 拟临界温度附近碳氢燃料物性的剧烈变化是导致在强制对流下发生换热恶化的主要原因。
- 2) 在超临界状态下,压力越小、进口温度过高或壁面热流密度与质量流量之比过大,会导致壁面处发生换热恶化;提高系统压力、降低流体进口温度以及减小壁面热流密度与质量流量比值是避免主流拟临界温度附近发生换热恶化的有效措施。
- 3) 根据数值模拟结果,拟合得到了一定范围内强制对流下碳氢燃料的换热恶化起始点预测关联式。

参考文献:

[1] 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. Thermal property analysis of Daqing RP-3 aviation kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology,2006,27(2):187-192. (in Chinese)

[2] SHIRALKAR B S, GRIFFITH P. Deterioration in heat transfer to fluids at supercritical pressure and high heat

- fluxes[J]. Journal of Heat Transfer, 1969, 91(1): 27-36.
- [3] BOURKE P J, PULLING D J, GILL L E, et al. Forced convective heat transfer to turbulent CO₂ in the supercritical region[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1970, 13(8): 1339-1348.
- [4] 张宇, 姜培学, 石润富, 等. 竖直圆管中超临界压力 CO₂ 在低 Re 下对流换热研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(1): 118-120.
- ZHANG Yu, JIANG Peixue, SHI Runfu, et al. Study on convective heat transfer of supercritical pressure CO₂ in vertical tubes at low Re [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(1): 118-120. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 饶政华, 廖胜明. 超临界 CO₂ 水平细微管内层流流动与换热的数值模拟[J]. 热科学与技术, 2005, 4(2): 113-117.
- RAO Zhenghua, MIU Shengming. Numerical simulation of laminar flow and heat transfer in microtubes with supercritical CO₂ level[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(2): 113-117. (in Chinese)
- [7] ZHONG Fengquan, FAN Xuejun, YU Gong, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(3): 543-550.
- [8] LIU Bo, ZHU Yin Hai, YAN Junjie, et al. Experimental investigation of convection heat transfer of n -decane at supercritical pressures in small vertical tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91(1): 734-746.
- [9] 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.
- [10] 赵陈儒. 超临界压力流体在圆管内流动与对流换热研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- ZHAO Chenru. Study on flow and convection heat transfer of supercritical pressure fluid in a circular tube[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [11] DANG Guoxin, ZHONG Fengquan, CHEN Lihong, et al. Numerical investigation on flow and convective heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(2): 416-422.
- [12] 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.
- [13] ZHOU Weixing, BAO Wen, QIN Jiang, et al. Deterioration in heat transfer of endothermal hydrocarbon fuel[J]. Journal of Thermal Science, 2011, 20(2): 173-180.
- [14] 王彦红, 李素芬, 东明. 浮升力对水平管内超临界航空煤油传热影响数值研究[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(6): 816-823.
- WANG Yanhong, LI Sufen, DONG Ming. Numerical study on the effect of floating force on heat transfer of supercritical aviation kerosene in horizontal pipe[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(6): 816-823. (in Chinese)
- [15] ZHU Jianqin, TAO Zhi, DENG Hongwu, et al. Numerical investigation of heat transfer characteristics and flow resistance of kerosene RP-3 under supercritical pressure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91(1): 330-341.
- [16] ZHAO Guozhu, SONG Wenyan, ZHANG Ruoling, et al. Numerical simulation on flow and heat transfer of n -decane under supercritical pressure[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(4): 537-543.
- [17] MOHSENI M, BAZARGAN M. The effect of the low Reynolds number $k-\epsilon$ turbulence models on simulation of the enhanced and deteriorated convective heat transfer to the supercritical fluid flows[J]. Heat and Mass Transfer, 2011, 47(5): 609-619.
- [18] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [19] ANSYS Incorporation. Fluent 14. 5 user guide[M]. Lebanon: Fluent Incorporation, 2013.
- [20] 程泽源, 朱剑琴, 金钊. 吸热型碳氢燃料 RP-3 替代模型研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(2): 391-398.
- CHENG Zeyuan, ZHU Jianqin, JIN Zhao. Study on the replacement model of endothermic hydrocarbon fuel RP-3[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(2): 391-398. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 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. Study on flow and heat transfer characteristics of hydrocarbon fuel under supercritical pressure[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [23] URBANO A, NASUTI F. On the onset of heat transfer deterioration in supercritical coolant flow channels[R]. AIAA-2012-2880, 2012.
- [24] 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 in vertical tube under supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 595-603. (in Chinese)