

超临界压力下浮升力对航空煤油流动换热影响

肖 磊¹, 粟 银², 秦 昂¹, 杨纪明¹, 刘圣平¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 空军工程大学基础部, 西安, 710051)

摘要 通过 RNG 两方程模型结合增强壁面处理法的数值方法,研究了不同重力加速度下,浮升力对超临界压力下水平圆管内 RP-3 煤油流动换热的影响。建立、验证了计算模型;分析了 RP-3 煤油在拟临界区热物性变化,并对流动换热受浮升力影响判别准则的适用性进行了比较分析。结果表明:在拟临界温度附近煤油热物性的剧烈变化导致的浮升力作用下,水平圆管内产生较强的二次流动;二次流动减弱上壁对流换热,增强下壁对流换热,增大下壁摩擦阻力,减小上壁摩擦阻力,流动压力损失略有增大;随着重力加速度的增大,浮升力对换热和流动的影响更加显著;最后分析得出 Protopopov 准则能较好地描述浮升力对超临界压力煤油换热的影响规律和程度。

关键词 超临界压力;重力加速度;浮升力;RP-3 煤油;二次流;流动换热;判别准则

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.06.003

中图分类号 V312 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)06-0015-07

Buoyancy Influence on Flow and Heat Transfer Characteristics of Aviation Kerosene under Condition of Super-Critical Pressure

XIAO Lei¹, SU Yin², QIN Ang¹, YANG Jiming¹, LIU Shengping¹

(1. Aeronautics engineering college, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: This paper studies the influence of buoyancy on the heat transfer of the super-critical pressure level under different gravitational acceleration by the method of enhanced wall treatment combined with the RNG two equations, establishes and verifies a calculation model, and analyzes the thermal physical property of RP-3 aviation kerosene within the pseudo-critical temperature. The applicability of the discriminate criterion of convective heat transfer is also analyzed. The results indicate that the drastic change of the thermal properties of kerosene within the pseudo-critical temperature will cause a stronger secondary flow in the horizontal circular tube because of the effect of buoyancy lift. In the secondary flow, the convective heat transfer of the upper wall decreases, the convective heat transfer of the lower wall enhances, the friction resistance of the lower wall increases and the friction resistance of the upper wall reduces, and at last the loss of flow pressure increases. With the acceleration of gravity increases, the influence of floating lift on heat transfer and flow is more significant. From simulation it can be seen that the laws of the influence of floating lift force on heat exchange of the super-critical pressure coal oil can be described by Protopopov criterion.

收稿日期: 2017-11-21

作者简介: 肖 磊(1995—),男,湖南隆回人,硕士生,主要从事航空发动机状态监控与故障检测。E-mail:15675917776@163.com

引用格式: 肖磊,粟银,秦昂,等.超临界压力下浮升力对航空煤油流动换热影响[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(6):15-21.
XIAO Lei, SU Yin, QIN Ang, et al. Buoyancy Influence on Flow and Heat Transfer Characteristics of Aviation Kerosene under Condition of Super-Critical Pressure[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(6): 15-21.

Key words: super-critical pressure; acceleration of gravity; buoyancy; RP-3 kerosene; secondary flow; flow and heat transfer; criterion

碳氢燃料凭借体积热值和热沉高、易于携带等优势在核工业、航天等领域得到广泛应用^[1]。通常运用于超燃冲压发动机再生冷却,既可提升发动机冷却品质,又能提升燃料自身燃烧效率;为保持燃料的输运特性及喷射特性,再生冷却系统压力往往高于其临界压力^[2]。超临界压力下,碳氢燃料在水平圆管内的流动换热现象与常规流体存在显著不同,超临界态的碳氢燃料,热物性的剧变可能导致浮升力效应增强,引起较强的二次流动,一方面二次流与主流叠加使流体在流动通道内相互掺杂混合加强,提高换热效率,另一方面二次流会引起压力损失从而降低流动效率^[3]。

目前国内外关于超临界压力下浮升力对碳氢燃料流动换热影响的研究取得了一些成果。文献[4]对变热流密度水平受热管内超临界 RP-3 航空煤油传热的研究认为,浮升力使得水平管下表面的湍流强度和对流换热增强,上表面的湍流强度和对流换热减弱;文献[5]对超临界压力下热流密度和进口温度对碳氢燃料在竖直向上管和竖直向下管的换热特性的影响进行了研究,并认为当燃料温度接近其临界温度时,换热显著增强;当温度超过拟临界温度之后,换热出现恶化趋势。受限于目前超燃冲压发动机较低的推阻比,其加速度 g 一般小于 9.8 m/s^2 ,随着超燃冲压发动机加速性能增加,针对超燃冲压发动机重力加速度变化复杂条件下,浮升力对超临界压力下碳氢燃料流动换热影响的将变得十分重要。

1 数值方法

1.1 物理模型

图 1 给出了三维圆管模型及边界条件示意图。为保证湍流在加热段充分发展,入口段 500 mm 内不加热。圆管直径 d 和长 l 分别为 10 mm、5 m。

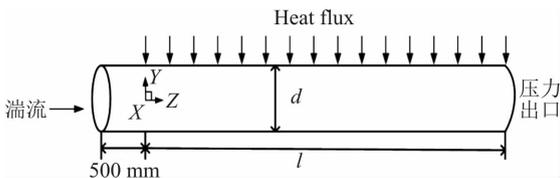


图 1 三维圆管模型

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional circular tube model

1.2 计算方法

湍流模型采用对模拟变物性流动具有较高精度的 RNG $k-\epsilon$ 两方程模型,近壁面采用适用于低雷诺数流动的增强壁面处理法。通过有限容积法离散三维的 Navier-Stokes 方程,运用算法求解压力-速度耦合方程,动量和能量方程均采用二阶迎风格式。

需要在流体域求解如下控制方程。

质量方程,即连续性方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

式中: P 是静压; τ_{ij} 是应力张量; g_i 为 i 方向上的重力体积力。应力张量 τ_{ij} 的表达式如下:

$$\tau_{ij} = \mu_e \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_e \frac{\partial \mu_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C_p T) = \frac{\partial}{\partial x} (K_e \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j (\tau_{ij})_e) \quad (4)$$

式中: K_e 是有效热传导系数,方程左边为对流项,即通过流体的流动带来的热量传递,右边两项分别为热传导和粘性耗散带来的热量输运。

RNG $k-\epsilon$ 湍流方程。

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} (a_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_i}) + G_k + G_b - p\epsilon \quad (5)$$

湍动能耗散率 ϵ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} (a_\epsilon \mu_e \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} + C_{3\epsilon} G_b \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (6)$$

式中: $\mu_e = \mu \left(1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\mu}} \frac{k}{\sqrt{\epsilon}} \right)^2$; G_k 和 G_b 分别为由层流速度梯度和浮升力导致的湍动能产生项; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为湍流模型常量,分别为 1.42、1.68、0.084 5。 a_k 、 a_ϵ 分别是 k 方程和 ϵ 方程的湍流普朗特数,通过下式求得:

$$\left| \frac{a-1.3929}{a_0-1.3929} \right|^{0.6321} \cdot \left| \frac{a+2.3929}{a_0+2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu}{\mu_e} \quad (7)$$

计算 a_k 、 a_ϵ 时,对应的 a_0 分别取值为 1.0、1.3。式(7)考虑了热物性变化的影响,对 Pr 取值在 $10^{-2} \sim 10^3$ 范围时具有较好的适用性。RNG $k-\epsilon$ 湍流方程中, R_ϵ 是区别于标准 $k-\epsilon$ 的项,反映了主流时均

变率。

1.3 煤油热物性模型

冷却剂选用国产 RP-3 航空煤油,由于煤油难以直接获得热物性数据,因此采用文献[3]提出的 RP-3 航空煤油的 10 组分替代模型,在 NIST SUPERTRAPP 程序中对热物性进行计算,计算所得煤油的临界温度约为 660 K,临界压力为 2.3 MPa,与实验结果($T_c = 645$ K, $P_c = 2.3$ MPa)较为吻合^[6],说明本文采用的物性计算方法具有较高的精度。

图 2 给出了 3 MPa 压力下煤油的密度、定压比热、粘度、热导率随温度的变化规律。从图中看到,在临界温度附近,密度迅速下降,定压比热迅速增大,在 691 K 达到峰值,即 3 MPa 压力下煤油的拟临界温度约为 691 K。在图中给出的温度区间内,煤油的热物性发生了较大的变化,因此可以预见,煤油的换热与流动特性的复杂程度。

通过分段多项式拟合,可获得煤油的各项物性参数与温度的函数关系式。

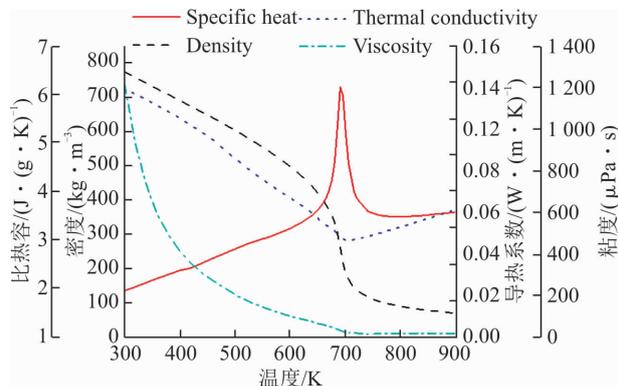


图 2 3 MPa 压力下航空煤油的热物性

Fig. 2 The thermal properties of RP-3 aviation kerosene under the pressure of 3 MPa

1.4 计算条件

根据实验结果可知^[7],RP-3 航空煤油在温度高于 850 K 后会明显发生热裂解反应,因此本文设计的计算条件使不同算例的出口煤油温度低于 850 K,忽略煤油的热裂解对计算的影响。

边界条件设置如下:

- 1) 壁面,热流密度 500 kW/m^2 ;
- 2) 进口,质量流量 40 g/s ,温度 300 K ;
- 3) 出口,压力 3 MPa 。

针对高超声速飞行过程中重力加速度变化情况复杂的特点,本文在 4 组重力加速度环境下: $g' = 0, 0.5, 1, 2g$,其中 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,方向沿 y 轴负向,研究浮升力作用对水平圆管内煤油流动换热影响。

1.5 网格划分

为提高网格质量,本文采用 O-grid 创建结构化网格,在划分粘性影响区网格时,控制第一层网格到壁面的距离,确保 $y^+ \leq 1$,并对粘性影响区($Re_y < 200$)的网格进行细化,划分 10 层以上网格,以保证对流场物理量的精确计算,图 3 给出了圆管截面网格划分结果。轴向网格则采取均匀划分的方式。经过网格的无关性分析比较后,选取 2008×800 的网格进行计算。

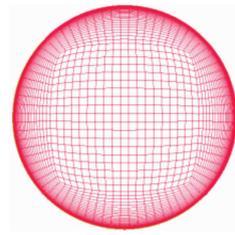


图 3 三维圆管截面网格划分结果

Fig. 3 The mesh partition of three-dimensional circular tube

2 数值方法验证

模型和数值方法的可靠性验证结果见图 4。

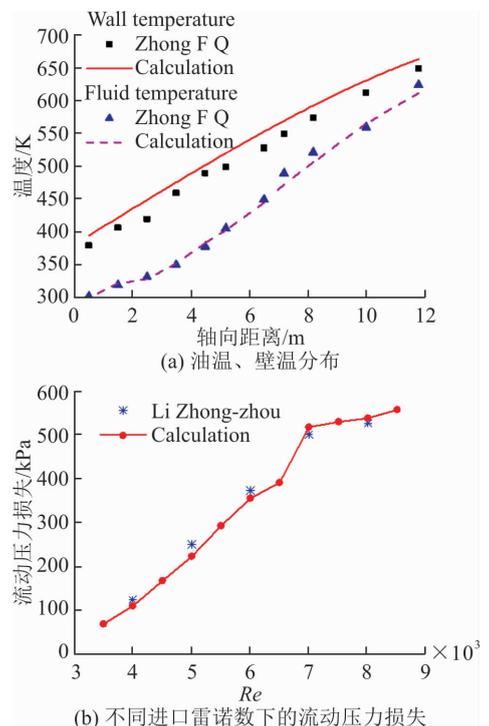


图 4 模型和数值方法验证结果

Fig. 4 The validation results of model and numerical method

本文分别对具有典型性的文献[8]在内径为 12 mm 的二级加热圆管内进行的煤油传热特性实验(图 4 中以 Zhong F Q 曲线表示);文献[9]在内径为 1 mm、长度为 575 mm 的微小圆管内进行的煤油流阻特性实验(图 4 中以 Li Z Z 曲线表示)进行数

值模拟。对前者模拟的计算工况为:入口雷诺数为7 000,入口温度为300 K,壁面平均热流密度为23 kW/m²,出口压力为4 000 kPa;对后者的模拟的计算工况为:进口雷诺数为4 000、5 000、6 000、7 000、8 000,进口温度为300 K,壁面热流密度为0,出口压力为4 000 kPa。两者的计算结果与实验结果的比较分别如图4(a)、(b)所示。图4(a)中,壁温、油温计算结果与实验值最大误差仅为4.7%,图4(b)中,流动压力损失计算结果与实验值最大误差仅为8.2%,由此说明本文采用的模型和数值方法是可靠的。

3 结果分析

3.1 浮升力对流动换热的影响

为了定量地分析二次流的影响,引入了二次流速度和摩擦阻力系数2个参数。

二次流速度的定义为:

$$u_{\text{sec}} = (u_x^2 + u_y^2)^{0.5} \quad (8)$$

摩擦阻力系数的定义为:

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{A} \int_A \frac{1}{8} \rho v^2 dA} \quad (9)$$

图5给出了圆管 $z=3$ m处截面二次流动矢量图。由于煤油的密度受温度影响,导致同一截面上壁面附近的流体温度高、密度小,中心区域温度低、密度大,受重力的影响,中心区域的流体向下运动,壁面附近的流体被迫沿两侧向上流动。

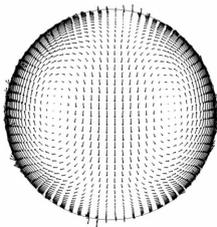


图5 $z=3$ m处截面二次流矢量图

Fig. 5 The vector diagram of the second flow at $z=3$ m

图6给出了不同重力加速度下圆管上、下母线的温差和对流换热系数沿轴向的分布(图中Top-粗曲线分布于 $g'=0$ 曲线下方;Bottom-细曲线分布于 $g'=0$ 曲线上方)。图6(a)中,当 $g' \neq 0$ 时加热段圆管上、下母线的温差沿轴向主要经历了3个模态的变化:逐渐增大、迅速增大、迅速减小,这说明了浮升力对超临界压力下煤油管内换热影响的复杂性;还可看到,随着 g' 的增大,上、下母线的温差增大。图6(b)中,上母线的对流换热系数小于下母线,不同 g' 下加热段圆管内

上、下母线的对流换热系数依次经历了增大、减小、增大3个模态的变化,随着 g' 的增大,上母线的对流换热系数减小,传热恶化的位置前移,下母线的对流换热系数增大,传热恶化位置后移甚至在管内消失。

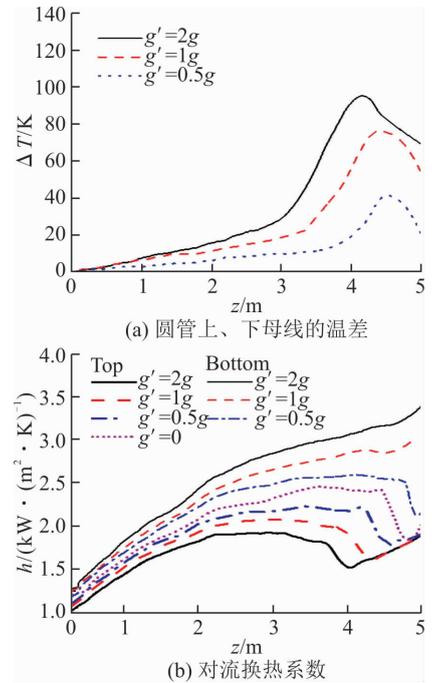


图6 上、下母线的温差和对流换热系数沿轴向的分布
Fig. 6 The distribution of temperature difference and convective heat transfer coefficient along the axial direction of the circular tube with different gravity acceleration

分析上述现象的原因,主要是浮升力引起的二次流动导致温度低、换热能力强的流体汇聚在圆管底部,温度高、换热能力差的流体汇聚在圆管顶部,下表面的换热增强,而上表面的换热减弱,上母线的壁温更早达到拟临界温度并发生传热恶化,导致上、下母线的温差迅速增大,当上母线传热强化或下母线传热恶化发生时,温差又迅速减小;随着 g' 的增大,浮升力效应增强,流体分层越明显,故上下母线差异增大。

图7为 $g'=1g$ 时在 $z=2,3,4,5$ m 4个截面上的二次流速度和温度的等值线。图7(a)显示,二次流在两侧壁面附近速度较大,并且二次流速度沿流动方向是不断增大的。图7(b)显示,温度等值线形状沿流动方向不断向下偏移,顶部的温度梯度小于底部,这与对流换热系数的大小关系对应一致。

图8为 $g'=1g$ 时在 $z=2,3,4,5$ m位置处煤油轴向速度沿重力方向的分布, $y/r=-1$ 对应上壁面, $y/r=1$ 对应下壁面。受浮升力的作用,速度沿重力

方向呈非对称分布, 底部的速度明显高于顶部, 而且

随着轴向距离的增大, 非对称现象更加明显。

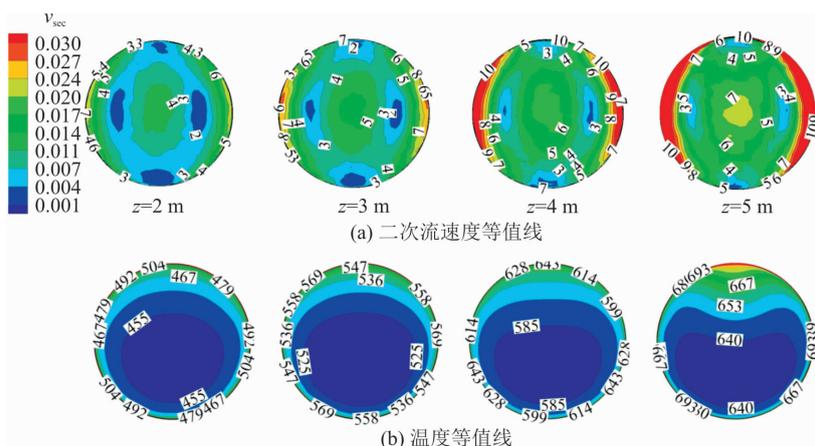


图 7 $g' = 1g$ 时不同截面上二次流速和温度的等值线

Fig. 7 The contour of the second flow velocity and temperature in different sections when $g' = 1g$

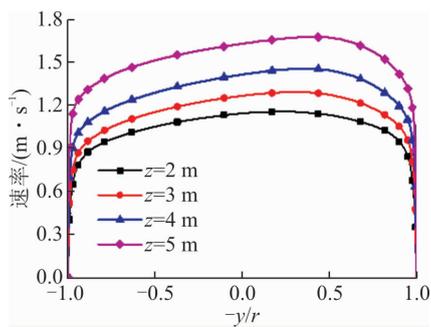


图 8 $g' = 1g$ 时不同轴向位置处沿重力方向煤油速度的分布

Fig. 8 The distribution of coal oil velocity along the gravity direction of the different coaxial position when $g' = 1g$

图 9(a) 中, g' 较大的通道流动压力损失较小, 但与 g' 较小的通道差异不大, $g' = 2g$ 与 $g' = 0$ 之间流动压力损失大小相差仅为 6.48%。但在图 9(b) 中, 浮升力对圆管上、下母线的摩擦阻力系数的作用效果非常明显。由于浮升力的作用, 圆管底部的温度低于顶部, 因此粘度大于顶部, 而且圆管底部的速度及速度梯度大于顶部, 故通过公式(9)计算所得底部的摩擦阻力系数大于顶部; 摩擦阻力系数在加热段不断下降, 在某一位置处迅速减小, 而且随着 g' 的增大, 浮升力作用增强, 上母线的摩擦阻力系数迅速下降的位置提前, 下母线则相反。

3.2 浮升力影响判别准则

浮升力对换热的影响在进口雷诺数很大或壁面与流体温差很小等情况下这种影响又可以忽略不计^[10], 因此需要制定一个能够判定这种影响程度的准则。目前学术界尚未提出一个统一的对浮升力影响超临界煤油对流换热的判别准则, 为此本文研究了 3 种经典的判别准则对解决这一问题的适用性。

Petukhov 等人^[10]基于超临界流体在水平管内换热实验给出的实际格拉晓夫数 Gr_q 和临界格拉晓夫数 Gr_{th} 的计算方法, 认为当 $Gr_q > Gr_{th}$ 时, 必须考虑浮升力效应。

$$\begin{cases} Gr_q = g\beta qd^4 / \nu_b^2 \lambda_b \\ Gr_{th} = 3 \times 10^{-5} Re_b^{2.75} \overline{Pr}^{0.5} \times [1 + 2.4 Re_b^{-1/8} (\overline{Pr}^{2/3} - 1)] \\ \overline{Pr} = \frac{H_w - H_b}{T_w - T_b} \cdot \frac{\mu_b}{\lambda_b} \end{cases} \quad (10)$$

式中: β 为体积膨胀系数, 单位 K ; ν 为运动粘度, 单位为 m^2/s ; H 为焓值, 单位为 J/kg ; w 和 b 分别表示壁面和主流位置; Re 表示雷诺数; Pr 表示普朗特数; μ 为动力粘性系数, 单位为 $N \cdot s/m^2$; ρ 为密度, 单位为 g/cm^3 。

图 9 给出了不同重力加速度下通道内流动压力损失与上、下母线摩擦阻力系数沿轴向的分布。

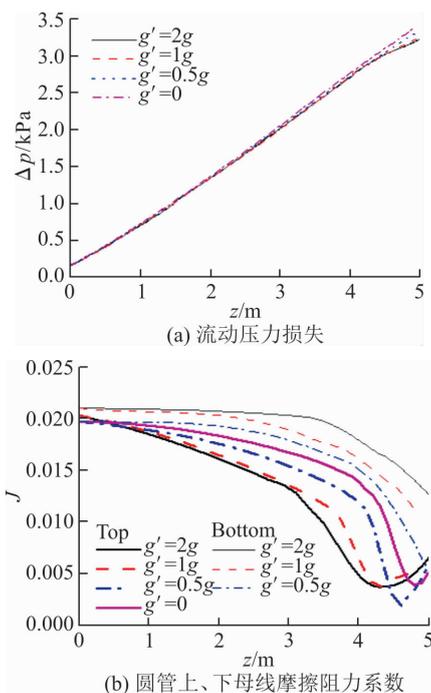


图 9 流动压力损失与摩擦阻力系数分布

Fig. 9 The flow pressure loss and the frictional drag coefficient distributed

Jackson 和 Hall 等人^[12]提出当浮升力影响因子 $Bo^* > 5.6 \times 10^{-7}$ 时,浮升力的影响不可忽略,其中 Bo^* 的定义为:

$$Bo^* = Gr^* / (Re^{3.425} Pr^{0.8}) \quad (11)$$

式中: Gr^* 为壁面位置格拉晓夫数; Pr 为普朗特数。

Protopopov^[13]提出用 K^* 来表征浮升力对换热的影响,认为当 $K^* > 10^{-2}$ 时,浮升力的影响不可忽略,其中 K^* 的定义为:

$$\begin{cases} K^* = (1 - \rho_w / \rho_b) Gr_q / Re^2 \\ Gr_q = g(\rho_b - \rho_w) d^3 / \rho_b \nu_b^2 \end{cases} \quad (12)$$

在求解 Gr_{th} 时,焓值 H_w 和 H_b 通过 NIST SUPERTRAPP 对 10 组分替代模型的计算获取。图 10 给出了 3 MPa 压力下煤油的焓值与温度的关系数据,2 组数据分别由 NIST SUPERTRAPP 对 10 组分替代模型的计算所得和张春本等^[14]人实验测得(规定煤油在 323 K 时焓值为 0),可见 2 组数据吻合程度较高,因此认为计算所得焓值可靠。图 11 给出了不同重力加速度下 Gr_q / Gr_{th} 随轴向距离的变化。3 组 g' 下 Gr_q / Gr_{th} 的值在管内均大于 1,且随着轴向距离的增大而不断增大,在传热恶化区域略有波动。可以看到,无论是数值大小还是变化规律上, Petukhov 准则均未能精确判断浮升力的局部影响程度,因此 Petukhov 准则并不适用于判断超临界压力下浮升力对 RP-3 航空煤油流动换热的影响。

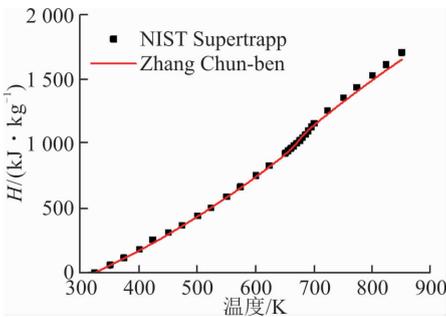


图 10 在 3 MPa 压力下煤油的焓值与温度的关系

Fig. 10 The relationship between enthalpy and temperature of kerosene under 3 MPa

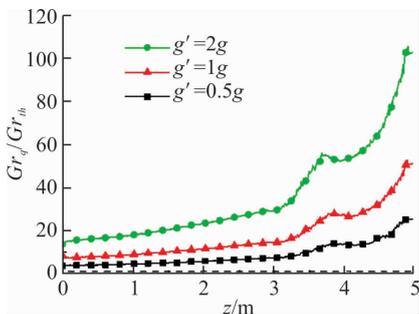


图 11 不同重力加速度下 Gr_q / Gr_{th} 随轴向距离变化

Fig. 11 Gr_q / Gr_{th} change of axial distance with different gravity acceleration

离的变化,图中显示, Bo^* 随着 g' 的增大而增大, Bo^* 在加热初始段较高,大于 5.6×10^{-7} ,扩大了低主流温度区的浮升力作用,且在加热段前段 Bo^* 沿轴向的逐渐减小,意味着浮升力作用的减弱,这与实际不符,故 Jackson 和 Hall 准则不能准确判断浮升力对水平管内 RP-3 航空煤油换热的影响,这与贾洲侠等^[14]通过实验得出的结论一致。图 13 为不同重力加速度下 K^* 随轴向距离的变化, K^* 随着 g' 的增大而增大, $g' = 0.5g$ 时的加热段前段 ($z < 3.6$ m) 和 $g' = 1g$ 时的加热段前段 ($z < 3.2$) K^* 的值小于 10^{-2} ,后段超过了 10^{-2} , $g' = 2g$ 时加热段的 K^* 基本上都大于 10^{-2} ,3 组 g' 下 K^* 在加热段前段沿轴向的变化很小,之后迅速增大,在末段又迅速减小,这与图 6 中上、下母线温差的变化趋势非常相似,可见,Protopopov 准则能较好地描述浮升力作用对换热的影响规律和影响程度。

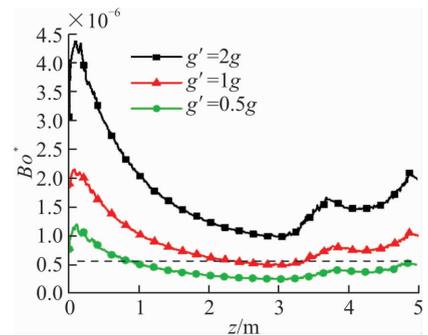


图 12 不同重力加速度下 Bo^* 随轴向距离的变化

Fig. 12 Bo^* change of axial distance with different gravity acceleration

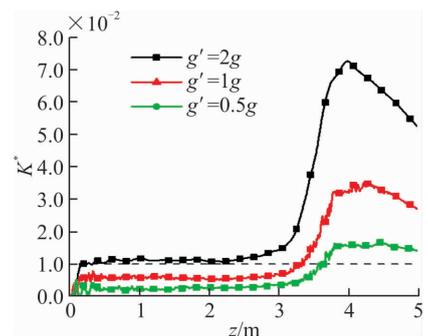


图 13 不同重力加速度下 K^* 随轴向距离的变化

Fig. 13 K^* change of axial distance with different gravity acceleration

4 结论

1) 拟临界温度附近煤油热物性的剧烈变化将导致浮升力作用下的水平圆管内产生较强的二次流动;

2) 二次流动将抑制上壁对流换热,增强下壁对

图 12 给出了不同重力加速度下 Bo^* 随轴向距

流换热,还将导致下壁摩擦阻力增大,上壁摩擦阻力减小,流动压力损失略有增大;

3) 随着重力加速度的增大,浮升力对换热和流动的影响更加显著;

4) 通过比较分析3种经典的浮升力影响换热判别准则,发现 Protopopov 准则能较好地描述浮升力对超临界压力煤油换热的影响规律和程度。

参考文献(References):

- [1] SOBEL D R, SPADACCINI L J. Hydrocarbon Fuel Cooling Technologies for Advanced Propulsion [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1997, 119(2): 344-351.
- [2] YOUN B, MILLS A F. Flow of Supercritical Hydrogen in A Uniformly Heated Circular Tube [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 1993, 24(1): 1-24.
- [3] 王丹. 通道内二次流强化传热特性的数值分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- WANG D. Numerical Analysis of the Heat Transfer Characteristics of Secondary Flow in the Channel [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] 李勋锋, 仲峰泉, 范学军, 等. 超临界压力下航空煤油圆管流动和传热的数值研究[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 467-472.
- LI X F, ZHONG F Q, FAN X J, et al. Numerical Study of Convective Heat Transfer of Aviation Kerosene Flows in Pipe at Supercritical Pressure [J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(4): 467-472. (in Chinese)
- [5] 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 B, ZHANG C B, DENG H W, 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)
- [6] LEE M L, MARKIDES K E. Chromatography with Supercritical Fluids [J]. Science, 1987, 235(4794): 1342-1347.
- [7] 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.
- [8] 李中洲, 朱惠人, 张霞. 微小圆管内煤油流动研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1728-1732.
- LI Z Z, ZHU H R, ZHANG X. Study on the Flow of the Kerosene in Micro Tube [J]. Journal of Aerospace

Power, 2010, 25(8): 1728-1732. (in Chinese)

- [9] 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(tc, pc)的测定[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(4): 466-470.
- SUN Q M, MI Z T, ZHANG X W. Determination of Critical Properties (tc, pc) of Endothermic Hydrocarbon Fuels RP-3 and Simulated JP-7 [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(4): 466-470. (in Chinese)
- [10] 刘波, 王夕, 祝银海, 等. 超临界压力下正癸烷在微细圆管内对流换热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(1): 114-118.
- LIU B, WANG X, ZHU Y H, et al. Experimental Investigation of Convection Heat Transfer of n-Decane at Supercritical Pressures in a Micro/Mini Vertical Tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(1): 114-118. (in Chinese)
- [11] PETUKHOV B S, POLYAKOV A F, KULESHOV V A, et al. Turbulent Flow and Heat Transfer in Horizontal Tubes with Substantial Influence of Thermo-Gravitational Forces [C] // Proceeding of Fifth International Heat Transfer Conference. Tokyo: ASME, 1974.
- [12] JACKSON J D, HALL W B. Forced Convection Heat Transfer to Fluids at Super-Critical Pressure [M] // Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles. New York: Hemisphere Publishing Company, 1979: 563-611.
- [13] PROTOPOPOV V S. Generalizing Relations for The Local Heat-Transfer Coefficients in Turbulent Flows of Water and Carbon Dioxide at Supercritical Pressure in A Uniformly Heated Circular Tube [J]. High Temperature, 1977, 15(4): 687-692.
- [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 C B, DENG H W, XU G Q, 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] 贾洲侠, 徐国强, 闻洁, 等. 超临界压力 RP-3 在竖直圆管内混合对流研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(1): 152-157.
- JIA Z X, XU G Q, WEN J, et al. Investigation of Mixed Convection of Supercritical Pressure RP-3 in Vertical Round Tube [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(1): 152-157. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)