

超临界态煤油圆管湍流的流阻特性研究

党国鑫, 仲峰泉, 陈立红, 张新宇

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190

摘要 本文采用雷诺平均方法结合煤油的 10 组分替代模型研究了国产 RP-3 航空煤油的圆管湍流流动。湍流模拟采用 RNG k- ϵ 两方程模型以及增强壁面处理方法, 煤油热物性和运输参数的确定基于 10 组分替代模型, 并采用广义状态对应法则(ECS)结合考虑真实气体效应的 Benedict-Webb-Rubin 方程计算。首先通过数值结果与煤油加热圆管实验数据的比较验证了数值方法的可靠性。本文的研究表明, 当管壁温度接近拟临界温度时, 煤油发生传热恶化现象, 同时传热恶化程度随着热流密度的降低而减弱。传热恶化发生前经典雷诺相似原理成立, 当传热发生恶化后雷诺相似的准确度有所降低。

关键词 煤油, 超临界, 流阻, 雷诺相似, 数值研究

引言

超临界态是一种既非液态, 又非气态的特殊状态, 其特性本质上来源于分子间的相互作用和特有的分子簇结构。超临界态同时具有气、液态的某些特征, 比如类似于液体的高密度、类似于气体的输运特性、具有较强的可压缩性、零潜热以及物性参数在临界点附近的奇特分布等^[1,2]。可以预见, 超临界流体的流动与传热特性将与常规流体有显著不同。

国内外有关超临界态流体的研究集中在对流传热方面, 主要考察传热在临界点附近可能出现的强化或恶化现象^[3,4]。关于简单物质(如水、二氧化碳)的超临界态特性研究在上个世纪 80 年代已经很充分。由于碳氢化合物及碳氢燃料在火箭发动机、冲压发动机领域的广泛应用^[5], 其超临界传热特性研究正逐渐得到重视^[6,7]。相比于传热研究, 对于超临界碳氢燃料流动特性的研究很少。就笔者而言, 国内外尚未看到有关航空煤油超临界流动的系统报道。因此, 本文研究了煤油的超临界态湍流流动特性, 主要考察了壁面摩阻特性, 初步探讨了雷诺相似原理对于超临界流体的适用性。

本文采用雷诺平均方法结合煤油 10 组分替代模型^[7]对国产 RP-3 航空煤油在水平圆管中的湍流流动进行了数值研究。湍流模拟采用 RNG k- ϵ 两方程模型以及增强壁面处理方法。煤油的

热物性和输运特性采用 10 组分替代模型、广义状态对应法则^[8](ECS)和考虑真实气体效应的 Benedict-Webb-Rubin 方程确定。本文研究了不同壁面热流条件下煤油圆管流动的流动规律, 对其机理进行了初步探讨。

1 计算方法

1.1 计算域和边界条件

本文研究了煤油在轴对称平直加热圆管中的湍流流动。圆管几何参数如下: 直径 2mm, 管长分别为 800mm、1200mm 和 2100mm, 对应不同的算例。为保证圆管湍流的充分发展, 圆管入口 100mm 为流动发展段。传热段加载轴对称恒定热流密度。由于管流的实际格拉晓夫数 Gr_q 与临界格拉晓夫数 Gr_{th} 的比值小于 5×10^{-4} , 故忽略重力效应。图 1 所示为 800mm 长圆管的模型示意图。

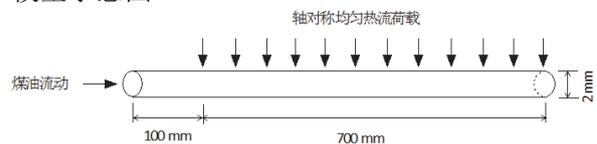


图 1 加热圆管示意图

本文总共研究了三个算例, 具体参数如下:

- (1) 煤油入口压力 3MPa, 入口油温 350K;
- (2) 质量流量 6g/s, 对应质量通量 G 为 $1.9 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 入口雷诺数为 6600;

(3)壁面热流密度 q_w 分别为 1.2MW/m^2 (算例 1)、 0.8MW/m^2 (算例 2) 和 0.5MW/m^2 (算例 3), 对应的圆管长度分别为 800mm 、 1200mm 和 2100mm 。

1.2 数值方法

本文采用有限体积法对 Navier-Stokes 方程进行离散求解, 对流项采用二阶迎风格式, 粘性项采用二阶中心差分格式; 压力-速度耦合求解使用 SIMPLE 算法, 时间推进采用隐式 Gauss-Seidel 方法。由于入口雷诺数远大于圆管湍流的最低值 (约 2300), 因此管流为湍流。湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型^[9]; 同时, 由于壁面附近流动雷诺数较低, 因此壁面附近采用了适用于低雷诺数流动的 Wolfstein 一方方程模型^[10]。

由于模型为圆管, 而且管壁热流密度为轴对称分布, 因此, 计算简化为二维轴对称流动。考虑到航空煤油在温度高于 $800\text{K}-850\text{K}$ 时, 热裂解效应开始显著^[11], 本文分析煤油换热和流动特性时均采用了壁温低于 800K 的管道区域的计算数据。

本文首先进行了网格无关性的研究。以算例 3 为例, 共设计了三组网格, 径向网格数分别为 50、60 和 80, 轴向网格数分别为 2000、2500 和 3000, 计算结果表明三组网格给出的对流换热系数分布的最大差异仅为 1%, 可以认为计算结果与网格无关, 因此选择 60×2500 的网格进行计算。这里需要指出的是, 计算中必须控制第一层网格到壁面的距离, 以确保 $y^+ \leq 1$, 另外, 近壁的粘性影响层内 (即 $y^+ \leq 11$) 至少要划分 10 层网格。考虑到煤油在临界温度附近热物性参数的突变, 本文首先采用沿流向均匀分布的网格计算, 确定煤油达到临界温度的流向位置。然后采用基于密度梯度的自适应网格技术在密度梯度较大区域对网格进行加密, 以确保计算精度。因此, 最终采用的网格数为 19.2 万。

对于煤油热物性及输运参数的确定, 本文采用了文献[7]提出的 10 组分替代模型。表 1 给出了替代模型组分及摩尔比例。该模型确定的煤油密度、定压比热、粘性系数均与已有的实验数据吻合得较好。通过广义状态对应法则^[8]并结合考虑真实气效应的 Benedict-Webb-Rubin

状态方程获得煤油物性参数随温度、压力的变化。图 2 给出了超临界压力下 ($P=3\text{MPa}$), RP-3 煤油密度及定压比热随温度的变化。如图所示, 在临界温度 ($T_c \sim 645\text{K}$) 附近煤油密度急剧下降; 而在拟临界温度 ($T_{pc} \sim 695\text{K}$) 点, 定压比热出现峰值。这些变化是常规流体所没有的。因此, 可以预见, 煤油超临界流动与传热会出现很多特性。

表 1.10 组分替代模型

替代模型组分		摩尔比%
烷烃	正辛烷	6
	正癸烷	10
	正十二烷	20
	正十三烷	8
	正十四烷	10
	正十六烷	10
	甲基环己烷	20
环烷烃	反式 1,3 二甲基环己烷	8
苯类	丙基苯	5
萘	1-甲基萘	3

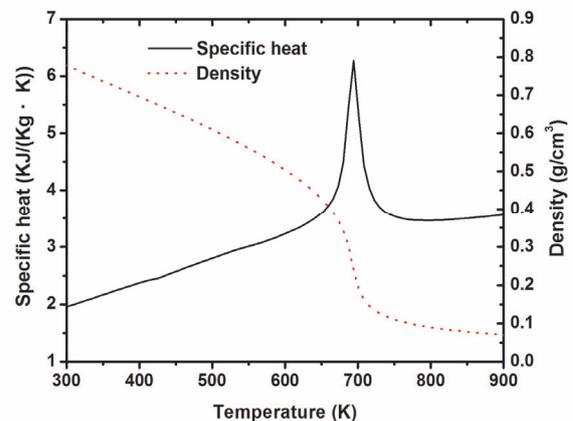


图 2 压力为 3MPa 时 RP-3 煤油密度及定压比热随温度的分布

1.3 数值方法验证

首先将数值计算结果与文献[7]给出的煤油圆管传热实验数据进行比较, 验证数值方法。计算条件为: 煤油入口压力 4.1MPa , 入口温度 300K , 质量通量 G 为 $0.7 \times 10^3 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 入口雷诺数为 7000, 壁面平均热流密度为 23kW/m^2 。

图 3 为数值模拟得到的圆管壁温、油温沿程分布与实验数据的对比。从图中可以看出，数值结果和实验数据总体上符合良好，壁温最大误差为 7%，油温最大误差为 6%，表明数值计算能够描述煤油在超临界条件下的对流传热现象，具有较好的精度。

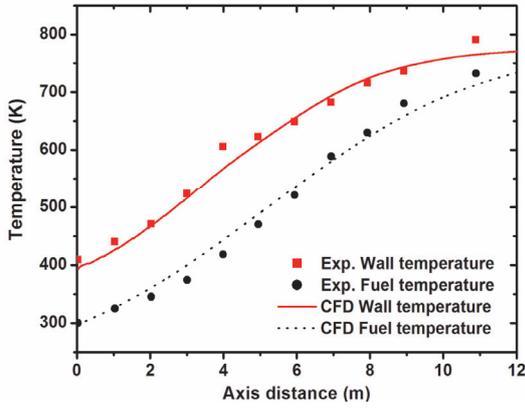


图 3 计算给出的油温、壁温分布与实验数据比较

2 结果和讨论

图 4 为三个算例对流换热系数随圆管轴向距离的分布。对流传热系数定义为

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

其中 q_w 为壁面热流密度， T_w 为壁面温度， T_f 为平均油温，定义为

$$T_f = \frac{\int_A \rho u C_p T dA}{\int_A \rho u C_p dA} \quad (8)$$

式中 ρ 为煤油密度， u 为速度， C_p 为定压比热， T 为温度， A 为截面面积。

如图 4 所示，当圆管壁面热流较低时 ($q_w=0.5\text{MW/m}^2$ ，算例 3)，对流换热系数沿流动方向逐渐增大，这是由于煤油吸热升温，其粘性系数降低，导致雷诺数增大（煤油出口雷诺数增加到 90000）、湍流显著增强，因此对流传热系数沿流动方向增大。当热流密度为 1.2MW/m^2 （算例 1）和 0.8MW/m^2 （算例 2）时，对流传热系数不再单调增加，而是分别在流向位置 $x=0.4\text{m}-0.5\text{m}$ （算例 1）和 $x=0.9\text{m}-1.0\text{m}$ （算例 2）的区域内（即图 4 (a) 中 A1、A2 点所示）明显降低，即发生了传热恶化现象，而后传热将再次恢复。比较三个算例可以得出：随着壁面热流的降低，传热恶化的幅度逐渐减弱；当

壁面热流为 0.5MW/m^2 时，对流传热系数基本上未降低。这说明，随着管壁热流密度的降低，传热恶化程度将会减弱。以往对水、甲烷、正庚烷等简单化合物的超临界传热研究中^[12]也有类似结论。

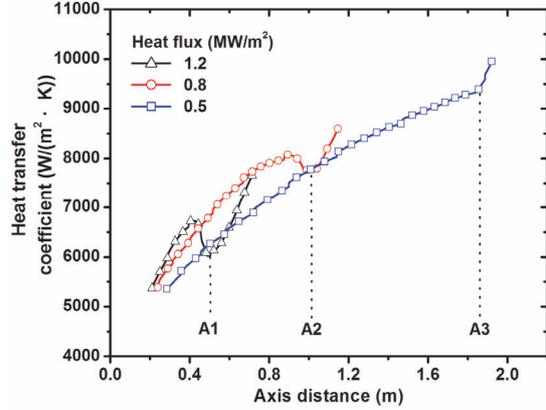


图 4 不同热流密度下对流换热系数随轴向距离的分布

图 5 (a)、(b) 分别为三个算例煤油压降和摩擦系数 C_f 随圆管轴向距离的分布（煤油入口条件相同）。摩擦系数 C_f 的定义为

$$C_f = \frac{\tau_s}{\frac{1}{2}\rho u^2} \quad (9)$$

式中 τ_s 为壁面剪切应力，定义为

$$\tau_s = \frac{r}{2} \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad (10)$$

其中 r 为圆管半径。

如图 5 (a) 所示，煤油压降沿流向以相近的速率单调增大。从图 5 (b) 可以看出，壁面热流对摩擦系数 C_f 有很大的影响，热流越高，摩擦系数越小。由于三个算例压力沿程分布相似，由式 (9)、(10) 可知，摩擦系数的这种差异源于算例之间煤油的密度和速度的差别。考虑到三个算例最主要的差别是壁面热流不同，因而流动的径向效应存在强弱差异。另外，摩擦系数沿管轴向距离的分布存在一个迅速降低的阶段，将图 5 (b) 和图 4 比较可以看到，摩擦系数迅速降低的位置对应着煤油传热恶化发生的区域。由于传热恶化发生在拟临界温度附近，即煤油从液态转变为超临界态的过程中，由煤油物性图（图 2）可知，其物性在临界点附近变化剧烈，这意味着流动受到横截面内的物性参数径向变化的影响。

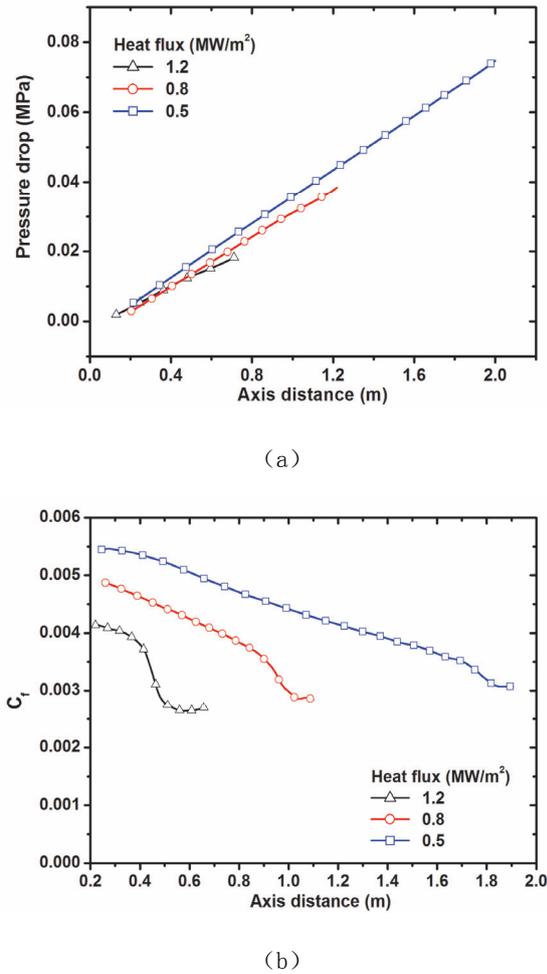


图 5 煤油压降和摩阻系数随圆管轴向距离的分布

为了对流动特性有更深入的认识，图 6 给出了计算得到的 Nu_{CFD} 和由雷诺比拟得到的 Nu_{theory} 之间的比较结果，图中对角线表示二者相等。雷诺比拟原理^[13]可用下式表示

$$\frac{C_f}{2} = St Pr^{2/3} \quad (11)$$

式中 St 、 Pr 分别为斯坦顿数和普朗特数。考虑到斯坦顿数与普朗特数、努赛尔数之间的关系，有

$$St = \frac{Nu}{Re Pr} \quad (12)$$

由式 (11)、(12) 和 (13) 可得

$$Nu = \frac{1}{2} C_f Re Pr^{1/3} \quad (13)$$

为方便比较，计算得到 Nu 的和由雷诺比拟得到的 Nu 分别表示为 Nu_{CFD} 和 Nu_{theory} 。

图 6 (a) 横坐标为雷诺比拟原理给出的努赛尔数值，纵坐标为 CFD 计算的努赛尔数值，

当两者相同时，曲线将为对角线。如图所示，三个算例由数值计算得到的 Nu 有一个突变，对应着煤油的传热恶化现象。在此之前，数值结果和理论结果符合得很好，表明雷诺比拟关系成立。突变后的数值结果和理论有一定偏离，以算例 2 ($q_w=0.8\text{MW/m}^2$ ，图 6 (b)) 为例，最大误差为 9%。说明在超临界条件下，雷诺相似原理的适用性有所降低。

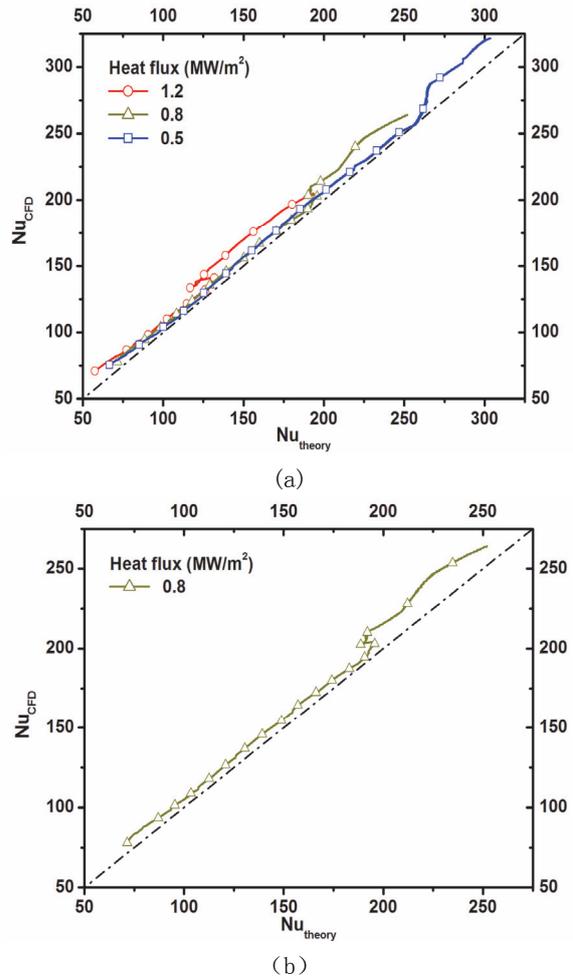


图 6 计算及雷诺相似原理给出的努赛尔数比较

3 总结

本文采用湍流模拟方法和煤油的 10 组分替代模型结合广义状态对应法则数值研究了超临界态煤油在水平圆管内的流阻和换热特性。首先通过网格无关性及与煤油加热圆管实验数据的比较验证了数值方法的有效性。在保证入口条件相同的条件下，研究了不同管壁热流密度下煤油的流阻和换热特性，讨论了摩阻系数的

变化规律，初步分析了雷诺相似原理的适用性。基于本文的研究，有如下主要结论：

1) 当壁温接近拟临界温度时，煤油将会发生传热恶化；传热恶化程度随着壁面热流的降低逐渐减弱，在低热流 (0.5MW/m^2) 时没有传热恶化现象发生。

2) 煤油的压降沿程增大，摩阻系数沿程减小，在发生传热恶化时摩阻系数的降低显著，其变化规律主要源于煤油流动的径向特征。

3) 在传热恶化发生前，即煤油完全处于液态，雷诺相似关系成立；当传热恶化发生后，数值计算与雷诺相似关系给出的努赛尔数有一定差异，这说明对于超临界态煤油流动，雷诺相似原理的适用性有所降低。

参考文献

- [1] Yang V. Modeling of supercritical vaporization, mixing and combustion processes in liquid-fueled propulsion system. *P Combust Inst*, 2000, 28 (1): 925~942
- [2] 范学军, 俞刚. 大庆 RP-3 航空煤油热物性分析. *推进技术*, 2006, 27(2): 187~192
- [3] Linne D L, Meyer M L. Evaluation of heat transfer and thermal stability of supercritical JP-7 fuel. *AIAA Paper* 1997~3041
- [4] Shiralkar, B.S. and Griffith, P. Deterioration in heat transfer to fluids at supercritical pressure and high heat flux. *ASME J Heat Transfer*, 1969, 91(1): 27~36
- [5] Sobel D R, Spadaccini L J. Hydrocarbon fuel cooling technologies for advanced propulsion. *J Eng Gas Turb Power*, 1997, 119(2): 344~351
- [6] Linne D L, Meyer M L. Evaluation of heat transfer and thermal stability of supercritical JP-7 fuel. *AIAA Paper* 1997-3041
- [7] Zhong F Q, Fan X J, Yu G, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions. *J. Thermophys Heat Transfer*, 2009, 23 (3): 543~550
- [8] Leach J W, Chappellear P S, Leland T W. Use of molecular shape factors in vapor-liquid equilibrium calculations with the corresponding states principle. *AICHE J*, 1968, 14(4): 568~576
- [9] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence: I. basic theory. *J Sci Comput*, 1986, 1(1): 1~51
- [10] Wolfstein M. The velocity and temperature distribution of one-dimensional flow with turbulence augmentation and pressure gradient. *Int J Heat Mass Transfer*, 1969, 12(2): 301~318
- [11] Zhong F Q, Fan X J, Yu G, et al. Thermal cracking of aviation kerosene for scramjet applications. *Sci China Ser E*, 2009, 52(9): 2644~2652
- [12] Hua Y X, Wang Y Z, Meng H. A numerical study of supercritical forced convective heat transfer of n-heptane inside a horizontal miniature tube. *J Supercrit Fluids*, 2010, 52(1): 36~46
- [13] Incropera F P, DeWitt D P, Bergman T L, Lavine A S. 著, 葛新石, 叶宏 译. *传热和传质基本原理*. 北京: 化学工业出版社, 2007

NUMERICAL INVESTIGATION OF TURBULENT FLOW AND RESISTANCE OF SUPERCRITICAL KEROSENE

DANG Guoxin, ZHONG Fengquani, CHEN Lihong, CHANG Xinyu

State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

Abstract Studies of turbulent flow of RP-3 aviation kerosene in straight circular pipe are made in the paper. Navier-Stokes equations were solved with RNG k- ϵ turbulence model with low Reynolds number correction. The thermophysical and transport properties of the China RP-3 kerosene are determined with a 10-species surrogate and the extended corresponding state method (ECS) combined with Benedict-Webb-Rubin equation. The independence of grids is first studied and the numerical results are compared with experimental data for validations. The results show that deterioration of heat transfer occurs when the wall temperature is close to the pseudo-critical temperature and the deterioration effect diminishes as the wall heat flux decreases. The friction coefficient decreases along the flow path especially where the heat transfer deterioration occurs, which attributes mainly to the cross-section effect. The validity of Reynolds analogy is examined by comparing the calculated Nusselt number with the theoretical value and it is found that when kerosene transfers from liquid state to supercritical state and the heat transfer deterioration occurs, the accuracy of Reynolds analogy is reduced.

Key words kerosene, supercritical, friction drag, Reynolds analogy, numerical study