

尺度效应下大功率伺服电机再生冷却通道 超临界态甲烷传热特性研究*

高智刚¹, 白俊华², 王天虎¹, 王超然¹, 李朋¹

(1. 西北工业大学 精确制导与控制研究所, 陕西 西安 710072;
2. 西安石油大学 石油工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对飞行器电动执行机构的大功率伺服电机强化散热问题, 建立了不同尺度的电机缠绕式螺旋管再生冷却通道数值模型, 对超临界态甲烷在尺度效应影响下的传热特性和机理进行研究, 探讨了不同尺度冷却通道中超临界态甲烷所受重力浮升力和离心浮升力对传热性能的影响。结果表明, 离心浮升力及重力浮升力均受到超临界态甲烷热物性剧烈变化的影响; 在相同热质比下, 尺度效应对流体温度影响较小, 但壁面温度存在明显差别, 小尺度冷却通道的传热强化效果更为显著; 小尺度时热物性引起的重力浮升力相比于离心浮升力对传热影响较大, 大尺度冷却通道的重力浮升力及离心浮升力对传热影响均显著增强; 此外, 小尺度下大比热区后流动加速更为明显。

关键词: 超临界态甲烷; 大功率伺服电机; 再生冷却; 传热特性; 浮升力; 尺度效应

中图分类号: V448.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 05-200700-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200700

Heat Transfer Investigation of Supercritical Methane in Regenerative Cooling Channel of High-Power Servo Motor under Scale Effect

GAO Zhi-gang¹, BAI Jun-hua², WANG Tian-hu¹, WANG Chao-ran¹, LI Peng¹

(1. Institute of Precision Guidance and Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The numerical model of supercritical methane in regenerative cooling channel of high-power servo motor in flight vehicle actuator is built for the problem of heat dissipation, the thermal performance and heat transfer mechanism of supercritical methane in helically coiled tube are investigated, and the scale effect on heat transfer is explored by evaluating the domination of gravitational buoyancy force and centrifugal buoyancy force. The simulation results reveal that both the two buoyancy forces are affected by the thermophysical properties of supercritical methane significantly. Under the constant thermal mass ratio, the gap of bulk temperature is not obvious, while the dramatic difference exists between the inner wall temperature, and the superiority of small-scale tube on heat transfer is revealed. The important role of thermophysical properties contributed to the gravitational

* 收稿日期: 2020-09-10; 修订日期: 2021-03-15。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61973254); 国家自然科学基金青年项目 (52106112; 52007153); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2022-JM185)。

通讯作者: 高智刚, 博士, 副教授, 研究领域为飞行器高性能电动伺服技术。

引用格式: 高智刚, 白俊华, 王天虎, 等. 尺度效应下大功率伺服电机再生冷却通道超临界态甲烷传热特性研究[J]. 推进技术, 2022, 43(5):200700. (GAO Zhi-gang, BAI Jun-hua, WANG Tian-hu, et al. Heat Transfer Investigation of Supercritical Methane in Regenerative Cooling Channel of High-Power Servo Motor under Scale Effect [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5):200700.)

buoyancy force on heat transfer is illustrated, while the effect of centrifugal buoyancy force is not dramatical. Meanwhile, both the two buoyancy forces affect the heat transfer of supercritical methane remarkably under large scale tube. Moreover, the flow acceleration is obvious after the large specific heat region under small scale tube.

Key words: Supercritical methane; High-power servo motor; Regenerative cooling; Heat transfer characteristics; Buoyancy force; Scale effect

1 引言

液氧/甲烷发动机因其高性能、高可靠性及低投入、易于重复使用等特点已经得到了广泛应用。采用发动机液体燃料作为冷却剂的主动再生冷却技术是目前最有效的冷却方式之一,在飞行器冷却中起着非常重要的作用^[1-4]。液态甲烷作为低温推进剂,在再生冷却方面的一项重要应用就是作为飞行器大功率电动执行机构的再生冷却介质^[5]。而根据系统运行需要,液态甲烷通常以超临界态运行,但超临界态流体在拟临界点附近会发生热物性剧烈变化,致使其在再生冷却通道中的传热过程更加复杂难以预测,许多研究也因此展开。

研究发现,在拟临界点附近区域,剧烈变化的热物性引起了速度和温度的非均匀分布,螺旋管流动外侧区域的速度值较大,而温度分布却与之相反^[6]。与恒定物性的流体相比,超临界态流体的离心力在壁面附近呈下降趋势而在中心区域较大,导致了强烈二次流的产生,而拟临界点附近温度分布的非均匀性得到了明显抑制^[7]。由于浮升力和离心力的共同作用,采用 $Gr/Re^{2.7}$ 无法预测螺旋管中的浮升效应,且湍流 Pr 数对传热系数的影响不大^[8]。

对于超临界态流体而言,在热物性、浮升力和离心力的耦合作用下,弯管的传热性能优于直管^[9]。此时超临界态流体的传热同时受浮升力和流动加速影响,而浮升力被证实起主要作用^[10]。环流涡心向管壁偏移可使边界层减薄从而强化传热,环流涡心向轴线偏移则使边界层增厚、发生温度分层,在其靠近壁面处的拟临界温度附近部分区域定压比热容处于极大值而热导率处于极小值,加热侧内壁面近壁流体的流动加速使该区域形成低质量流速的热绝缘层,从而发生传热恶化^[11-13]。

这种情况下,由于超临界态流体流动与传热的复杂性,尤其是在浮升力及离心力引起的二次流和流动加速共同作用下,导致因流动通道尺寸不同引起的尺度效应会对其传热特性造成显著影响,而此方面相关研究尚未见报道。

本文针对大功率电动执行机构的散热需求,以

超临界态甲烷为冷却工质,开展不同尺度螺旋管式再生冷却通道的传热特性数值研究,探索尺度效应下重力浮升力及离心浮升力在二次流中主导关系、主流区流动加速等因素对其传热性能的影响,从而为大功率电动执行机构再生冷却系统设计提供理论参考。

2 模型及计算方法

2.1 物理模型

本文根据大功率电动执行机构中伺服电机的散热需求,采用缠绕式螺旋管构型作为冷却通道,如图1所示。选取4种不同尺度的冷却通道内径,分别设计为8,6,4,2mm,螺距为10mm,螺旋中径为74mm。

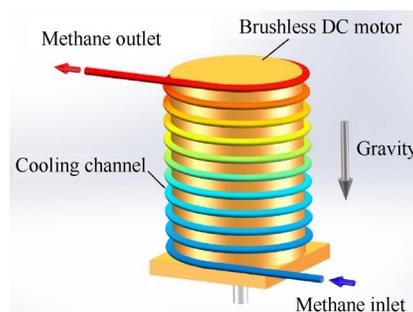


Fig. 1 Schematic diagram of regenerative channel on the electromechanical actuator

沿圆周方向设置了四个均布观测面(0° , 90° , 180° , 270°)来获取计算数据,采用流体截面的平均值作为流体参数值,内壁面环形截面的平均值作为流固耦合壁面参数值。以质量流率入口及压力出口分别作为进口与出口边界条件,将大功率电机因发热损耗产生的热量换算成热流作为壁面边界条件。

使用 NIST Standard Reference Database 23 (REFPROP) Version 9.0^[14]获取 5MPa 下超临界态甲烷的热物性参数,包括比热 c_p , 密度 ρ , 导热系数 λ 以及动力粘度 μ , 如图2所示。

不同尺度通道的沿程压降图如图3所示,横坐标采用对数坐标,故不等距,后文有些图类似。可以看出,对于水力直径较大的 8mm 冷却通道,沿程压降为 0.6kPa,即使在小直径的 2mm 冷却通道中,沿程压降

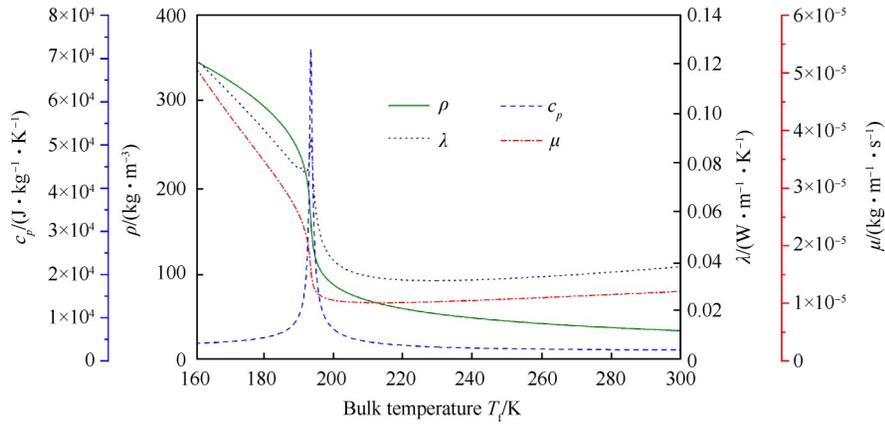


Fig. 2 Thermophysical properties of supercritical methane at 5MPa

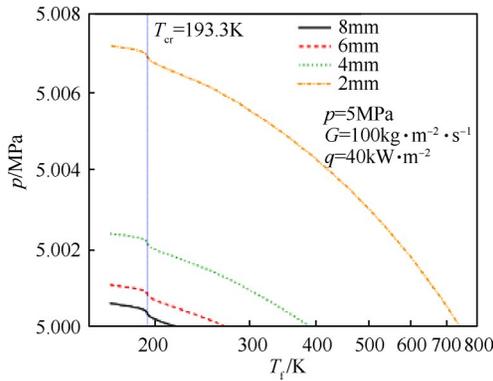


Fig. 3 Pressure drop under scale effect

也只有 7kPa, 沿程压力损失相对于本工况超临界运行压力(5MPa)占比 $\leq 0.14\%$ 。可知由于超临界态流体的“气相”流动特性, 沿程压力损失较小, 故忽略由于沿程压降导致的热物性变化。

2.2 控制方程

在流体域求解连续、动量、能量守恒及湍流控制方程, 具体方程分别如下:

连续方程

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_j u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u_j u_i)}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial (\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j})}{\partial x_j} \quad (3)$$

湍流模型选用考虑了浮升力产生湍流动能作用的 RNG $k-\varepsilon$ 模型,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (5)$$

2.3 数值模型及验证

计算网格由 ICEM 划分, 为了准确捕捉内壁面附近流动结构和传热的细小变化, y^+ 值控制在 1 以内。经网格无关性验证后, 选取网格数为 504 万的构型进行计算。选择 SIMPLE 算法求解压力速度耦合方程, 各方程残差设定为 10^{-5} , 出口处流体温度不变则认为计算收敛。

使用经典的超临界态流体传热实验数据^[15]对所使用数值计算方法进行验证, 对比结果如图 4 所示, 计算数据与实验数据表现出较好的一致性, 上下母线温度的最大误差分别控制在 0.81% 及 0.99% 以内, 如表 1 所示。由此可以验证文中数值模型及计算方法具备较高的计算精度。

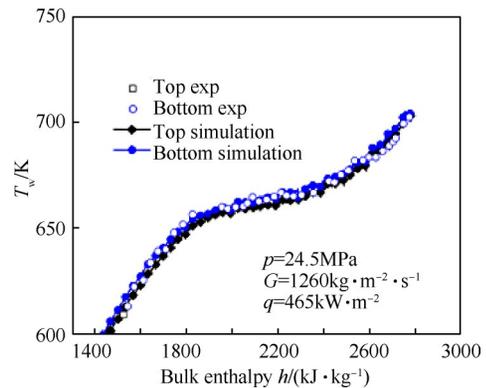


Fig. 4 Comparison of calculated and experimental data^[15]

2.4 参数定义

传热系数 α 定义为

Table 1 The maximum deviations at top and bottom generatrix

Enthalpy/(kJ·kg ⁻¹)	Absolute error/K	Relative error/%
1802	5.26	0.81
1544	6.09	0.99

$$\alpha = \frac{q_w}{T_w - T_f} \quad (6)$$

式中 q_w 为局部热流, 壁面温度 T_w 定义为圆周平均值, 流体温度 T_f 为观测面平均值。

$$q_w = \frac{\int_{A_\phi} q_w dA_\phi}{A_\phi} \quad (7)$$

$$T_w = \frac{\int_{A_\phi} T_w dA_\phi}{A_\phi} \quad (8)$$

$$T_f = \frac{\int_A u\rho T dA}{\int_A u\rho dA} \quad (9)$$

式中 A_ϕ 和 A 为通道圆周截面和观测截面。

Richardson 数被用来量化重力浮升力和离心浮升力在传热中的重要性^[16-17]。定义重力浮升力和离心浮升力的 Richardson 数 (Ri_g 及 Ri_c) 来探讨二者对传热的支配关系

$$Ri_g = \frac{Gr_g}{Re^2} \quad (10)$$

$$Ri_c = \frac{Gr_c}{Re^2} \quad (11)$$

$$Gr_g = -g_z \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_b} \frac{r^3}{v_b^2} \quad (12)$$

$$Gr_c = \frac{\delta}{4} \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_b} Re^2 \quad (13)$$

同时, Ri_c 与 Ri_g 的比值 Φ 可预示二者之间的相对关系, 即

$$\Phi = \frac{Ri_c}{Ri_g} \quad (14)$$

为了评估流动加速对传热的不确定影响, 流动加速系数 Ac 定义如下^[10]

$$Ac = \frac{q_w \beta}{Gc_{p,b} Re_b^{0.7}} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{-0.5} \quad (15)$$

3 计算结果与分析

本文采用缠绕式螺旋管作为大功率伺服电机再生冷却通道, 通过设计不同尺度的冷却通道 ($d=8, 6, 4, 2\text{mm}$), 从而探究在相同热质比 ($G/q=\text{constant}$, 即质量流速 G 与热流 q 的比值为定值) 下, 尺度效应对冷

却通道中超临界态甲烷的传热性能、重力浮升力及离心浮升力在传热中主导关系、流动加速等因素的影响, 不同尺度冷却通道计算工况的雷诺数范围如表 2 所示。

Table 2 Reynold number range under scale effect

d/mm	Re
2	4405~8689
4	8694~27322
6	12979~53251
8	17263~78420

3.1 热性能分析

在相同热质比条件下, 得到不同尺度下超临界态甲烷及壁面的沿程温度曲线和沿程传热系数曲线分别如图 5~7 所示。

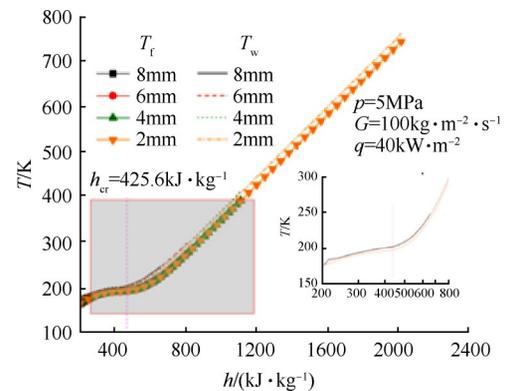


Fig. 5 Temperature of supercritical methane

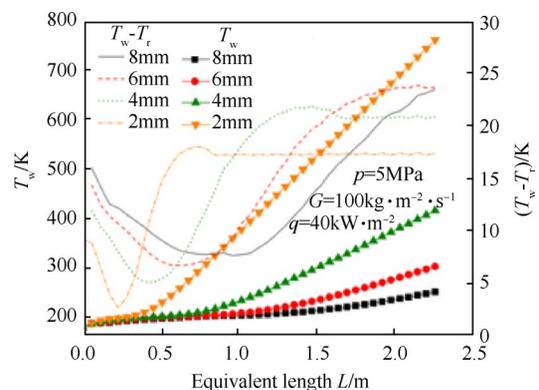


Fig. 6 Wall temperature and temperature gaps between wall and fluid

由图 5 和图 6 可见, 同热质比下, 尺度效应对超临界甲烷流体温度影响较小, 但不同尺度冷却通道的壁面温度存在明显差别, 在大尺度 $d=8\text{mm}$ 工况下壁面温度 T_w 较小, 随着管径减小, 壁面温度 T_w 增幅明显, 壁面温度与流体温度的差值在各自拟临界点附近达到最小值, 表明发生了传热强化。

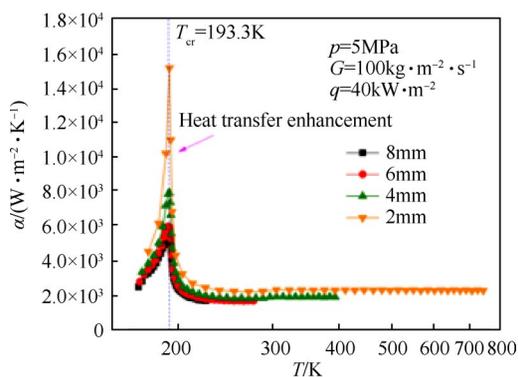


Fig. 7 Heat transfer coefficient of supercritical methane

传热系数 α 也呈现出相应规律,如图 7 所示 α 峰值出现在拟临界点附近,且随着管径的减小, α 的峰值呈显著增大趋势。其中,小尺度 $d=2\text{mm}$ 工况下, α 的峰值可达 $1.5 \times 10^4 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,传热强化效果明显,揭示了同热质比下,小尺度传热管更有利于传热性能强化。

3.2 传热机理分析

由图 8 和图 9 可知,在大比热区附近离心力影响区域存在着高温区(图 8 中各截面右上区域),表明在离心力作用下,形成了流体聚积导致流动分层,传热强度减弱,造成局部高温。二次环流同样也可预示此现象,在高温区附近,由于温度梯度较大,出现密度差从而生成了涡旋,增大了传热混乱度,进而削弱了传热强化,加剧了局部温升。同时,不同尺度下的涡心均出现在相同位置,预示了离心力对于传热及湍流结构的重构具有重要作用。

在大尺度下,二次环流及涡旋虽然更为明显,但离心力影响区域的湍流强度明显较弱,印证了如上推断,即此区域传热强度由于流体聚积分层被削弱,

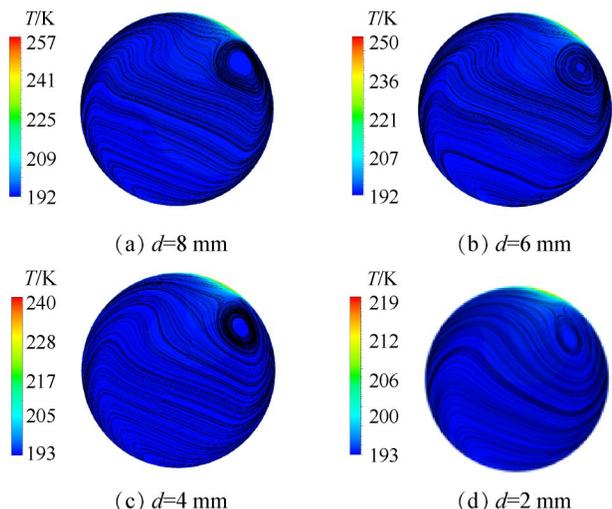


Fig. 8 Contours of secondary flow and temperature in large specific heat region

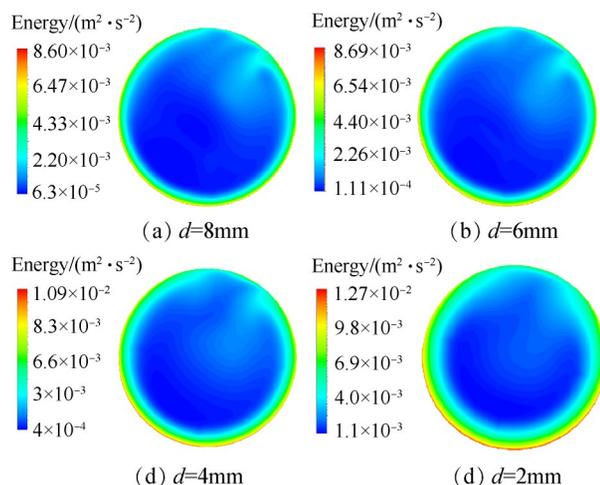


Fig. 9 Contours of turbulent intensity in large specific heat region

导致能量聚积使得流体温度较高。而在小尺度下,温度分布相对较为均匀,接近壁面处的局部高温相对较低,环壁面处的湍流强度较大且分布更为均匀,表明在小尺度下热物性引起的重力浮升力对超临界态流体传热的影响较为明显,离心浮升力作用相比大尺度下影响较弱。

3.3 浮升力影响分析

由于缠绕型螺旋冷却通道的结构特点,浮升力可表现为重力浮升力和离心浮升力两种形式。其中重力浮升力是由于密度差引起的重力变化导致的,离心浮升力则是由于流体在螺旋管内旋转流动造成的,可起到流体局部加速的作用^[16-17]。二者在不同尺度下的量化对比结果如图 10 和图 11 所示。

由图 10(a)可知, Ri_c 在拟临界点附近达到峰值,预示了离心浮升力对于超临界态流体热物性的依赖性,且在同热质比下,离心浮升力在大尺度传热中的作用更为明显。同时,由图 10(b)可对重力浮升力得到类似结论,表明无论是离心力或是重力导致的浮升力,均受热物性影响明显。在 $d=8, 6, 4\text{mm}$ 的较大尺度工况中, Ri_g 在大比热区附近均大于 0.01,表明此时重力浮升力在传热中的重要作用不可忽略,大比热区后 $Ri_g < 0.01$,说明此时传热由混合对流向强制对流转变。而在小尺度 ($d=2\text{mm}$) 下, Ri_g 的作用在全计算域内均可忽略,表明了小尺度时虽然重力浮升力导致内壁面附近的湍流强度较大,但重力浮升力对超临界流体传热不起主导作用。而大尺度下,两种浮升力对传热均具有显著影响。

由图 11 可知,虽然重力浮升力和离心浮升力在不同尺度下的差别明显,但是其二者比值 Φ 的区别不大,在大比热区前由于热物性的变化较平缓且主

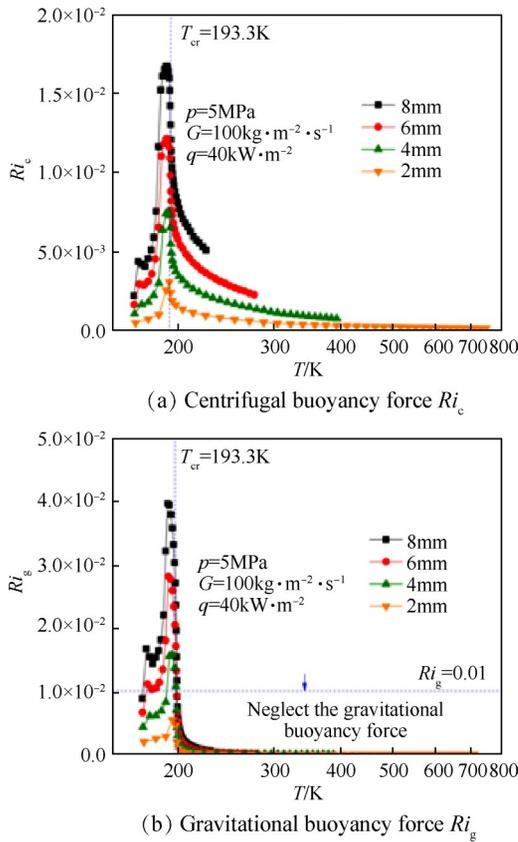


Fig. 10 Two buoyancy forces on way

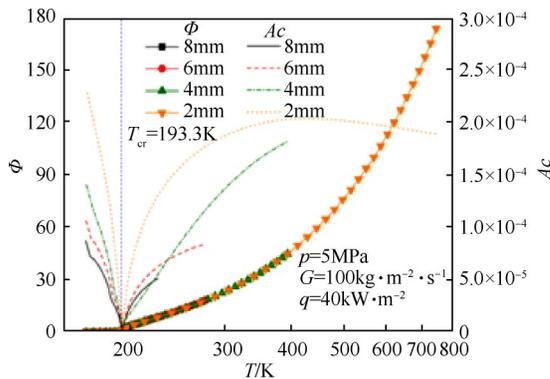


Fig. 11 Ratio of buoyancy forces Φ and flow acceleration coefficient Ac

流区流速较小, Φ 值基本稳定。大比热区后由于流速的增大及传热由混合对流向强制对流转变的影响, 导致重力浮升力相比于离心浮升力减小, Φ 呈增大趋势, 这与上文所述的 Ri_c 和 Ri_g 发展趋势一致。同时, 流动加速系数 Ac 也呈现出与大比热区相关的变化趋势, 大比热区前由于浮升力所导致的二次流对主流区流动加速的干扰作用, 致使 Ac 呈下降趋势, 大比热区后由于混合对流转变为强制对流, 二次环流强度下降且主流流速增加, 流动加速增大明显, 使得 Ac 呈现上升趋势, 且小尺度下的流动加速更为突出。

4 结论

本文通过研究, 得到如下结论:

(1) 相同热质比下, 尺度效应对超临界态甲烷的流体温度影响较小, 但壁面温度存在明显差别, 小尺度冷却通道的传热强化效果显著。

(2) 在大比热区附近的离心力影响区域形成了流体聚积, 导致流动分层, 传热强度减弱, 因此离心力对于传热及湍流结构的重构具有重要作用。小尺度下热物性引起的重力浮升力对超临界态流体传热影响较离心浮升力更为明显, 且其离心浮升力影响相比大尺度冷却通道减弱。

(3) 相同热质比下, 无论是离心力或是重力导致的浮升力, 均受热物性影响明显。在小尺度下虽然重力浮升力导致壁面附近的湍流强度较大, 但重力浮升力对传热不起主导作用。而大尺度下, 两种浮升力对传热均具有显著影响。

(4) 虽然重力浮升力和离心浮升力在不同尺度下的差别明显, 但是其二者比值 Φ 的区别不大, 均呈现出大比热区前基本稳定, 大比热区后逐渐增大的趋势。而对于流动加速系数 Ac 而言, 大比热区前由于浮升力所引起二次流对主流区流动加速的干扰作用致使 Ac 呈下降趋势, 大比热区后 Ac 开始增大, 且小尺度下的流动加速更为显著。

致谢: 感谢国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金青年项目和陕西省自然科学基金研究计划的资助; 感谢周军教授、郭建国教授在本研究工作中给予的支持。

参考文献

- [1] Reuben S, Matthew M, Oleg S, et al. Integrated Modeling and Analysis for a LOX/Methane Expander Cycle Engine: Focusing on Regenerative Cooling Jacket Design [R]. AIAA 2006-4534.
- [2] Hideto K, Akinaga K, Takuo O, et al. Combustion and Regenerative Cooling Characteristics of LOX/Methane Engine [R]. AIAA 2008-4837.
- [3] 康玉东, 孙冰. 再生冷却通道跨临界甲烷流动传热研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2493-2497.
- [4] 章思龙, 秦江, 周伟星, 等. 高超声速推进再生冷却研究综述[J], 推进技术, 2018, 39(10): 2177-2189. (ZHANG Si-long, QIN Jiang, ZHOU Wei-xing, et al. Review on Regenerative Cooling Technology of Hypersonic Propulsion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(10): 2177-2190.)
- [5] Gao Z G, Bai J H, Zhou J, et al. Numerical Investiga-

- tion of Supercritical Methane in Helically Coiled Tube on Regenerative Cooling of Liquid Rocket Electromechanical Actuator[J]. *Cryogenics*, 2020, 106(10).
- [6] Xu J L, Yang C Y, Zhang W, et al. Turbulent Convective Heat Transfer of CO₂ in a Helical Tube at Near-Critical Pressure[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 80: 748-758.
- [7] Zhao H J, Li X W, Wu X X. Numerical Investigation of Supercritical Water Turbulent Flow and Heat Transfer Characteristics in Vertical Helical Tubes[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2017, 127: 48-61.
- [8] Wang K Z, Xu X X, Wu Y Y, et al. Numerical Investigation on Heat Transfer of Supercritical CO₂ in Heated Helically Coiled Tubes[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2015, 99: 112-120.
- [9] Xu R N, Luo F, Jiang P X. Experimental Research on the Turbulent Convection Heat Transfer of Supercritical Pressure CO₂ in a Serpentine Vertical Mini Tube[J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2015, 91: 552-561.
- [10] Liu G X, Huang Y P, Wang J F, et al. Effect of Buoyancy and Flow Acceleration on Heat Transfer of Supercritical CO₂ in Natural Circulation Loop [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 91: 640-646.
- [11] 杨帆, 王国付, 姜文全, 等. 超临界压力甲烷异常传热行为的机理研究[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(7): 298-308.
- [12] 张萌, 孙冰. 甲烷跨临界传热恶化影响因素分析[J]. *推进技术*, 2020, 41(2): 382-388. (ZHANG Meng, SUN Bing. Analysis of Influence Factors for Methane Transcritical Heat Transfer Deterioration [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(2): 382-389.)
- [13] 王彦红, 李素芬. 方形通道内超临界碳氢燃料传热恶化数值研究[J]. *推进技术*, 2016, 37(12): 2377-2384. (WANG Yan-hong, LI Su-fen. Numerical Study on Heat Transfer Deterioration of Supercritical Hydrocarbon Fuel in Square Channels [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(12): 2377-2384.)
- [14] Lemmon E W, Huber M L, McLinden M O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP. 9.0 [M]. Maryland: National Institute of Standard and Technology, 2010.
- [15] Yamagata K, Nishikawa K, Hasegawa S, et al. Forced Convective Heat Transfer to Supercritical Water Flowing in Tubes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1972, 15(12): 2575-2593.
- [16] Yang M. Numerical Study of the Heat Transfer to Carbon Dioxide in Horizontal Helically Coiled Tubes under Supercritical Pressure [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 109: 685-696.
- [17] Ciofalo M, Arini A, Liberto M Di. On the Influence of Gravitational and Centrifugal Buoyancy on Laminar Flow and Heat Transfer in Curved Pipes and Coils [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 82: 123-124.

(编辑:朱立影)