

【航空科学与工程研究】

环形多孔介质再生冷却通道内超临界正癸烷换热数值研究

王彦红, 李雨健

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要:针对航空发动机再生冷却热防护问题,设计了环形多孔介质通道,探究了多孔介质材料、孔隙率和环形厚度对再生冷却通道内超临界正癸烷换热的影响机制。考察了通道截面流体温度、流线和湍动能的分布情况,通过综合换热系数对流动换热性能进行综合评判,选取最优多孔介质材料为紫铜。考虑孔隙率和环形厚度影响,建立了以紫铜为环形多孔介质材料条件下超临界正癸烷的换热关联式。数值结果表明,环形多孔介质破坏了热边界层,增强了湍流强度,其热弥散效应也起到了良好的强化换热作用。紫铜的孔隙率小、环形厚度大时,通道综合换热性能更好。最佳的孔隙率为0.3~0.5,环形厚度为0.2~0.4 mm。

关键词:多孔介质;再生冷却;超临界燃料;传热;环形厚度;孔隙率;介质材料

中图分类号: V 235.1 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2024.02.001

0 引言

再生冷却技术可以有效地实现航空发动机燃烧室的热防护^[1-2],高热流环境下传统再生冷却通道的冷却性能仍有限^[3],对冷却通道进行结构优化以促进换热是前沿的技术问题。填充多孔介质的冷却通道能够提高冷却剂换热强度,对燃烧室热防护起到积极作用^[4]。再生冷却通道内冷却剂为超临界压力碳氢燃料,热物性随压力和温度急剧改变,多孔介质结构和冷却剂热物性耦合将导致复杂的换热机制。

目前,再生冷却通道内超临界碳氢燃料的换热研究集中于通道无多孔介质的情况。Wang等^[5]、陈尊敬等^[6]探究了不同高宽比矩形通道中超临界甲烷的湍流换热机制,研究发现,提高热流密度导致固壁热传导传递到侧壁的热流比例增加,合适的高宽比起到强化换热并减小摩擦阻力的双重作用。Hu等^[7]考察了体积热源加热下方形通道中RP-3煤油的换热机制,研究表明,顶壁面温度高于底壁面,热流密度的变化则相反,浮升力造成了换热的周向不均问题。Sun等^[8]和张卓远等^[9]比较了顶壁面、侧壁面、底壁面三种加热方式下重力对换热的影响,加热方式和重力方向的夹角决定浮升力的大小和方向,产生不同的二次流涡结构,出现换热不均和热流再分配,顶壁面加热时通道的综合换热效果系数最大。上述研究发现,通道无多孔介质时,换热性能主要依靠超临界压力碳氢燃料的大比热容区,大比热容有利于碳氢燃料吸收通道热量,但冷却性能有限;通道填充多孔介质材料可以进一步提升换热性能。多孔介质通道内超临界流体换热的研究表明,多孔介质与流体变热物性耦合产生强化换热机制,颗粒直径越大,换热越好^[10-12]。目前

收稿日期:2023-11-24

基金项目:吉林省教育厅科技项目(JJKH20220100KJ)

第一作者简介:王彦红(1983—),男,河北张家口人,副教授,博士,主要从事超临界碳氢燃料传热传质研究。

E-mail:wangyh.526@163.com

的多孔介质通道大多为流体域全部添加多孔介质材料,鉴于通道流体域全部添加多孔介质材料显著提高了流动阻力,对冷却不利,可以采用环形多孔介质通道^[13-14],而超临界碳氢燃料在该类型通道内的换热研究还需要补充。

基于强化换热和减小流阻的双重目的,本文对环形多孔介质再生冷却通道内超临界正癸烷的换热进行研究,探究多孔介质材料、孔隙率、环形厚度对换热的影响机制,通过流场和温度场分布情况揭示换热机制,得到了紫铜为环形多孔材料的换热关联式,可为再生冷却通道的优化设计提供参考。

1 数值模型

1.1 环形多孔介质通道

图 1 给出了再生冷却通道及网格图。通道水平放置,方形截面,外边长 3 mm,内边长 2 mm,两端绝热段均为 150 mm,加热段为 600 mm,顶壁面外侧施加均匀热流。进口为质量流速边界,设定质量流速和进口温度,出口设为静压边界。进口和出口的环形壁面为绝热壁面。通道内壁面设置一层环形多孔介质,环形多孔介质区域和内部流体区域共同组成了流体域,多孔介质区域外侧为固体域,材料为不锈钢。多孔介质材料可选紫铜(cooper)、不锈钢(steel)、镍铬合金(nickel)和钛合金(titanium),孔隙率 ϵ 为 0.3~0.9,环形厚度 ϕ 为 0.1~0.4 mm。冷却剂为正癸烷。通过网格无关性分析确定通道截面网格,网格方案为 2800×900,网格总量为 252 万。

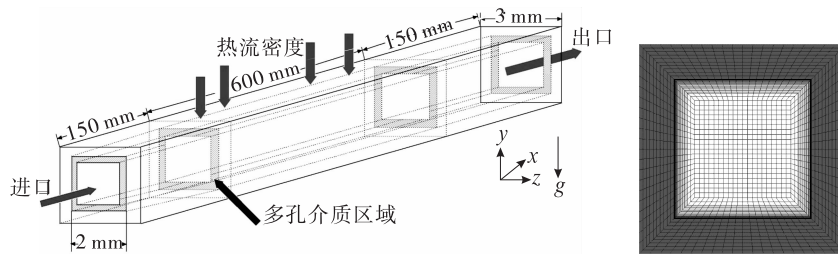


图 1 再生冷却通道及网格图

1.2 计算模型

本文对流固耦合传热问题进行分析,包含固体域的热传导过程和固体域与流体域之间的对流传热过程。流体域求解连续性方程、动量方程、能量方程以及 RNG $k-\epsilon$ 湍流方程,固体域求解热传导方程。

质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程分别为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i,$$

$$\frac{\partial(\rho u_i c_p T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_e \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right].$$

RNG $k-\epsilon$ 湍流模型:

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon, \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_\epsilon \mu_e \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) \frac{\epsilon}{k} - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon.$$

热传导方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0.$$

式中: u 为流速, T 为温度, k 为湍动能, ϵ 为耗散率,其他变量的定义见文献[15]。

超临界压力下正癸烷密度 ρ 、比热容 c_p 、热导率 λ 和动力黏度 μ 取值于文献[16],4 个参数通过分段线性加入 Fluent;通道固壁的热导率为 20 W·m⁻¹·K⁻¹。多孔介质材料主要设置密度、比热容和热导率,RNG $k-\epsilon$ 湍流模型计算时结合增强壁面处理,控制方程的求解与文献[17]相同。

1.3 模型验证

因为缺乏环形多孔介质通道中超临界流体换热的实验数据,通过文献[18]竖直圆管内多孔介质中超临界二氧化碳换热实验数据间接验证数值模型的有效性,综合考虑超临界流体变热物性和多孔介质的双重影响。图 2 给出了管内壁温度 T_{wi} 和主流温度 T_b 的轴向(l 为局部加热长度)变化情况。通道加热长度为 50 mm,外径为 6 mm,内径为 4 mm,竖直布置,流体向下流动。多孔介质材料为紫铜,孔隙率为 0.4。进口温度为 300 K,热流密度为 $22 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,质量流速为 $11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,压力为 9.5 MPa。由图可以看到,数值计算得到 T_{wi} 和 T_b 的变化特征符合实验结果,相对偏差落在 $\pm 4.0\%$ 的范围,说明 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型预测结果满足数值计算精度。

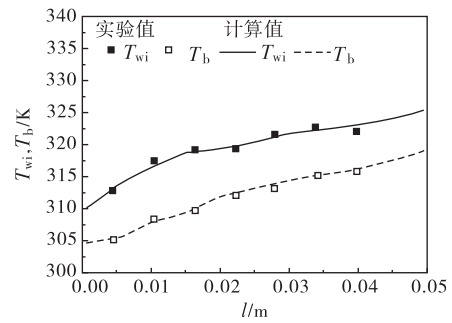


图 2 T_{wi} 和 T_b 的轴向变化情况

2 计算结果与分析

2.1 多孔介质材料的影响

本节讨论多孔介质材料对换热的影响,选取 4 种金属作为多孔介质材料,环形厚度为 0.2 mm,多孔介质孔隙率为 0.5。质量流速为 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,进口温度为 400 K,热流密度为 $2 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$,压力为 3 MPa。图 3 给出多孔介质材料对换热参数轴向分布的影响。通过图 3 可以看到,加热侧管壁温度从低到高依次为紫铜、镍铬合金、不锈钢和钛合金,换热系数依次减小,主流温度沿轴向线性增大,说明多孔介质材料对换热具有显著影响。多孔介质材料热导率越高,热弥散作用越强,对换热的促进作用越强烈。

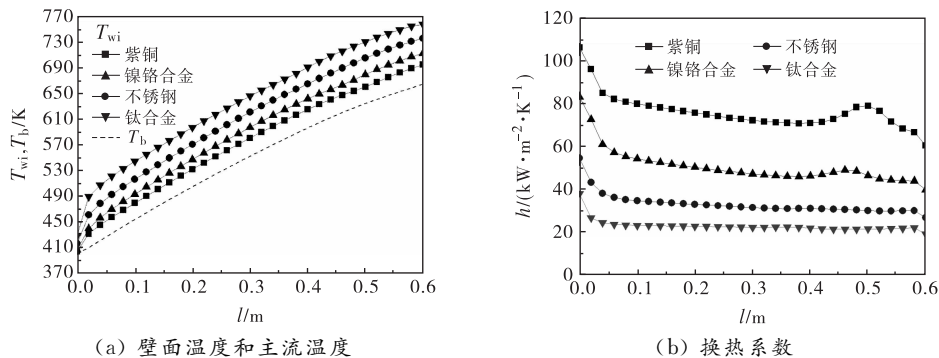


图 3 多孔介质材料对换热参数轴向分布的影响

图 4 给出了多孔介质材料对综合换热系数 PEC 轴向分布的影响^[5]。 $PEC = (Nu \cdot Nu_0^{-1}) / (f \cdot f_0^{-1})^{1/3}$, Nu 为努塞尔数, f 为摩擦阻力系数,下标 0 表示无环形多孔介质的数值。由图可以看到,换热性能好的材料综合换热性能也好,综合换热系数按照钛合金、不锈钢、镍铬合金、紫铜依次提高。从增强换热的角度,钛合金和不锈钢的性能不佳,不建议作为环形多孔介质的材料。紫铜的综合换热系数最高,环形多孔介质材料选择紫铜较为合适。图 5 给出不同材料时流体温度、流线和湍动能的分布情况,取 $l = 0.3 \text{ m}$ 。通过该图可以看到,热导率较高的钛合金材料流体截面温度梯度较高,温度分层现象更为突出,二次流也更显著。同时,钛合金材料加热侧近壁面流体湍动能较小,故换热性能较差。另外 3 种材料流体截面温度梯度较小,二次流较弱,加热

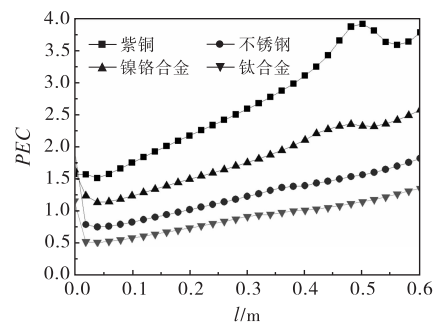


图 4 多孔介质材料对 PEC 轴向分布的影响

侧近壁面流体湍动能较大,强化换热效果随着材料热导率增大而增强。

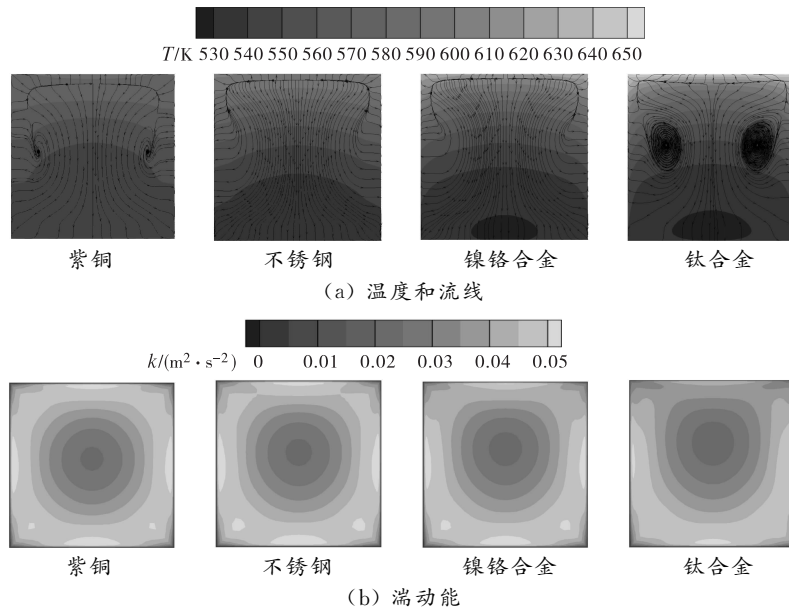


图 5 不同材料时流体温度、流线和湍动能的分布情况

2.2 多孔介质孔隙率的影响

本节讨论多孔介质孔隙率对换热的影响,运行参数与 2.1 节相同。环形多孔介质材料为紫铜, $\phi=0.2\text{ mm}$ 。图 6 给出孔隙率对换热参数沿轴向分布的影响,可以看到,沿流动方向壁温近似线性上升,且孔隙率越大壁温越高。换热系数沿流动方向先平缓下降随后出现峰值,随着孔隙率增大,换热系数下降。这是因为孔隙率越小,多孔介质颗粒越多,热弥散效应越强,冷却剂换热面积越大,对换热越有利。

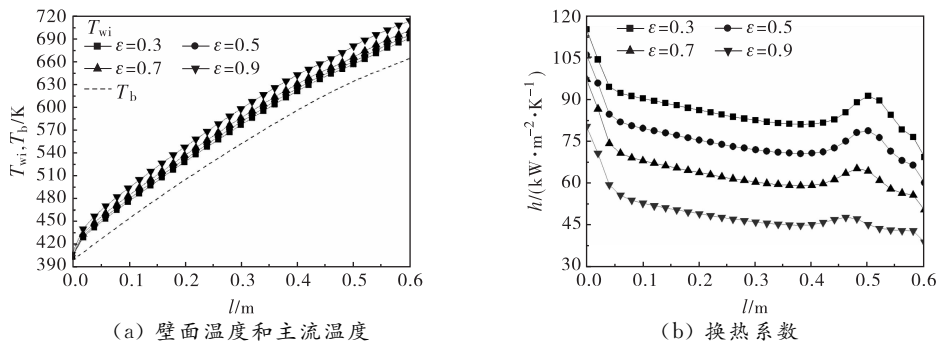


图 6 孔隙率对换热参数轴向分布的影响

图 7 给出孔隙率对 PEC 轴向分布的影响。由图可以看到, PEC 值处于 1.2~4.8,说明环形多孔介质通道对综合换热性能具有明显的提升作用。添加多孔介质表现为强化换热机制,一方面源于多孔介质的热弥散作用;另一方面,环形多孔介质重构热边界层,致使热边界层减薄,壁面附近流体温度梯度减小,热阻减小,起到强化换热作用。图 8 给出不同孔隙率下流体温度、流线和湍动能的分布情况,取 $l=0.3\text{ m}$ 。可以看到,流体温度在重力方向出现分层,加热侧出现局部高温区。孔隙率越大,局部高温区范围越大,温度分层越明显,说明小孔隙率有利于抑制自然对流。温度分层导致密度分层,流体截面产生二次流。加热侧壁面附近,流线指向壁面,起到强化换热

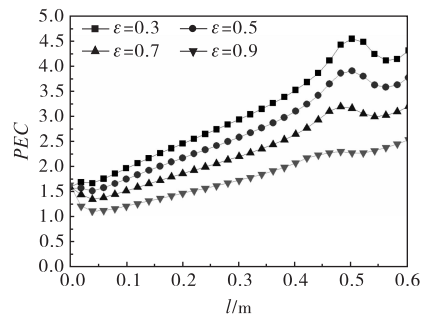


图 7 孔隙率对 PEC 轴向分布的影响

作用。其余部分流线指向侧壁面和底壁面,有利于吸收传递到侧壁面和底壁面的热量。湍动能呈环状分布特征,高湍动能出现在近壁面。孔隙率为 0.3~0.7 时,湍动能分布相近,而孔隙率增至 0.9 时,加热侧高湍动能分布范围压缩。为了取得较好的换热效果,建议合理的孔隙率为 0.3~0.5。

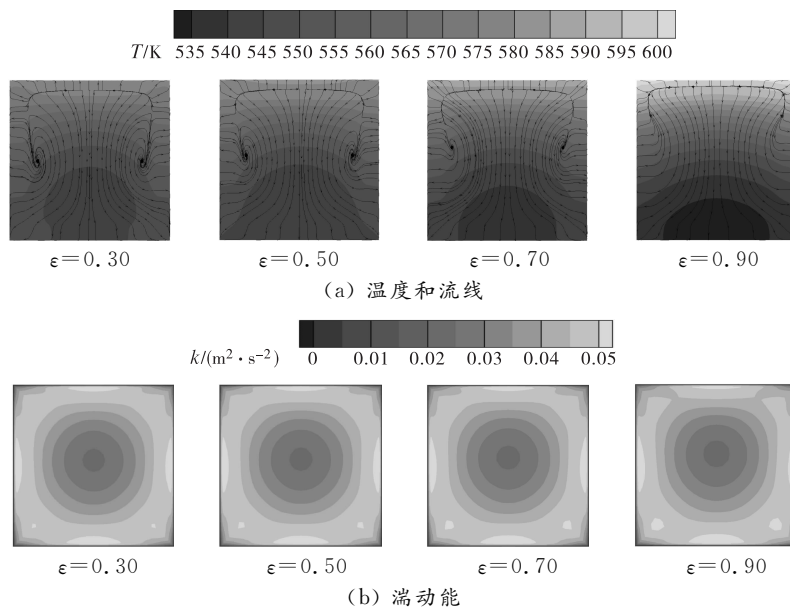


图 8 不同孔隙率下流体温度、流线及湍动能的分布情况

2.3 多孔介质环形厚度的影响

本节讨论环形多孔介质厚度对换热的影响,多孔介质材料为紫铜,孔隙率为 0.5,运行参数与 2.1 节相同。图 9 给出环形厚度对换热参数沿轴向分布的影响。

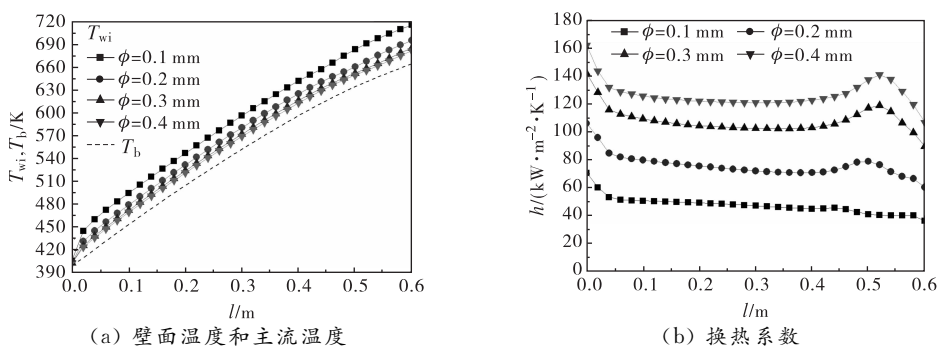


图 9 环形厚度对换热参数轴向分布的影响

由图 9 可以看到,随着多孔介质厚度增大,加热侧内壁面温度减小,换热系数增加,说明环形厚度增加有利于增强换热效果。这是因为环形厚度越大,多孔介质的热弥散效应越强,极大地扩展了正癸烷的换热面积,致使强化换热更加显著。因为高温下正癸烷容易产生热裂解结焦,环形厚度过大可能出现通道积碳堵塞,环形厚度与内截面半边长的比值限制在 10%~40% 的范围。

图 10 给出环形厚度对 PEC 的轴向分布的影响。由图可以看到,随着多孔介质厚度增加,PEC 增大,换热性能变好。说明环形厚度越大,多孔介质的填充面积越大,综合换热性能越好。

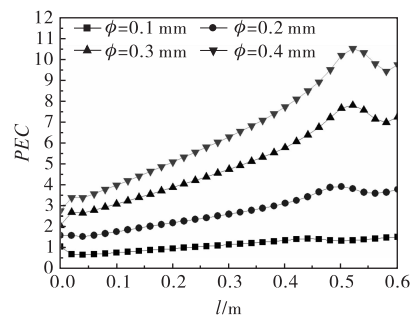


图 10 环形厚度对 PEC 轴向分布的影响

图 11 给出不同环形厚度下流体温度、流线和湍动能的分布情况,取 $l=0.3 \text{ m}$ 。通过图 11(a)可以看

到,随着环形厚度增加,流体截面局部高温区范围压缩,沿重力方向流体温度梯度减小,密度梯度减小,自然对流受到抑制。因此,二次流也受到削弱。环形厚度越大,涡越不显著。由图 11(b)可以看到,随着环形厚度增加,湍动能增大,起到增强换热的作用。说明多孔介质越厚,越有助于通道截面的湍流交混。为了保证较好的综合换热性能,建议设置环形厚度为 0.2~0.4。

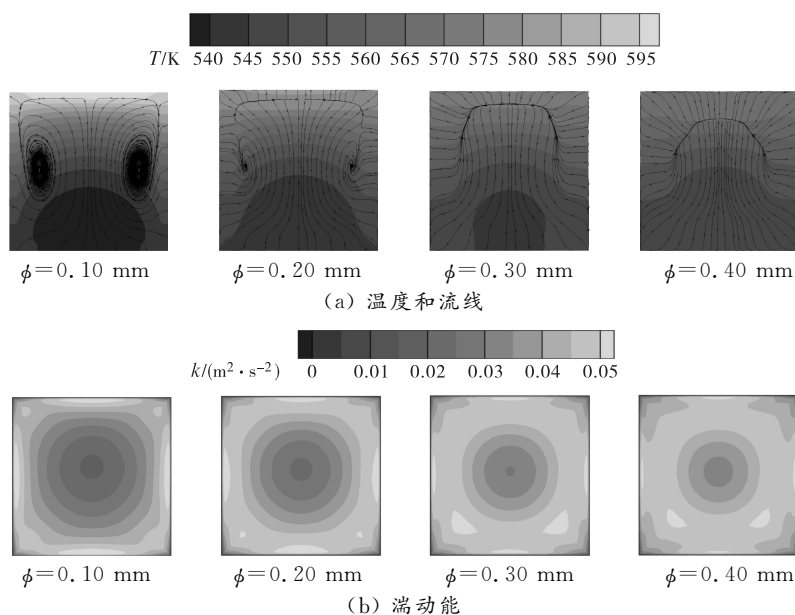


图 11 不同环形厚度下流体温度、流线及湍动能的分布情况

2.4 换热关联式

环形多孔介质通道内超临界压力流体的换热关联式对通道设计和换热性能分析极为重要。环形多孔介质选用紫铜,综合考虑孔隙率和环形厚度的影响,建立换热关联式

$$Nu = \frac{0.85}{\epsilon} Re^{0.4} Pr^{1/3} \left(1 + \frac{\phi}{d}\right)$$

式中: Re 为雷诺数, Pr 为普朗特数, d 为通道水力直径。

图 12 给出换热关联式计算努塞尔数与数值结果的比较情况。环形厚度和孔隙率范围与前述相同。运行参数范围: $G=1000\sim 4000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $q=2\sim 5 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由图可以发现,拟合的换热关联式具有较好的精度,数据点基本都处于 $\pm 15\%$ 的范围,可以较好用于环形紫铜多孔介质再生冷却通道的设计和应用。

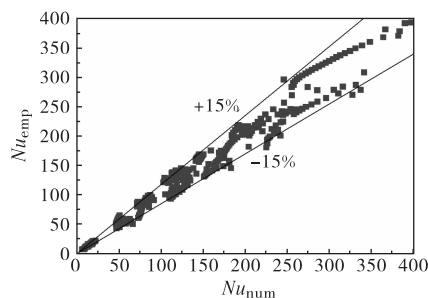


图 12 换热关联式计算努塞尔数与数值结果的比较情况

3 结 论

对环形多孔介质通道内超临界正癸烷的换热开展了数值研究,得到如下结论:(1)插入环形多孔介质通道相比常规通道可以显著提高换热系数,综合换热性能提高。(2)随着孔隙率减小或环形厚度增大,多孔介质热弥散效应增强, PEC 值增大,流动换热综合性能变好。相比无多孔介质情况,高流体温度梯度和强二次流,以及增强的湍动能是环形多孔材料换热强化的原因。(3)高热导率材料的综合换热性能更好,紫铜为最适合的介质材料,建议的环形厚度区间为 0.2~0.4,孔隙率范围为 0.3~0.5。(4)综合考虑环形厚度和孔隙率影响,得到了环形紫铜多孔介质通道中超临界正癸烷的换热关联式。

参考文献:

- [1] TAO Z, CHENG Z Y, ZHU J Q, et al. Large eddy simulation of supercritical heat transfer to hydrocarbon fuel[J]. International journal of heat and mass transfer, 2018, 121: 1251-1263.
- [2] HUANG D, LI W. Heat transfer deterioration of aviation kerosene flowing in mini tubes at supercritical pressures[J]. International journal of heat and mass transfer, 2017, 111: 266-278.
- [3] XU K K, SUN X, MENG H. Conjugate heat transfer, endothermic fuel pyrolysis and surface coking of aviation kerosene in ribbed tube at supercritical pressure[J]. International journal of thermal sciences, 2018, 132: 209-218.
- [4] 刘占一, 胡锦涛, 张魏静, 等. 多孔介质冷却通道在燃烧室中的应用[J]. 火箭推进, 2020, 46(4): 54-59.
- [5] WANG L L, CHEN Z J, MENG H. Numerical study of conjugate heat transfer of cryogenic methane in rectangular engine cooling channels at supercritical pressures[J]. Applied thermal engineering, 2013, 54: 237-246.
- [6] 陈尊敬, 王雷雷, 孟华. 考虑发动机冷却通道固壁内耦合导热影响的低温甲烷超临界压力传热研究[J]. 航空学报, 2013, 34(1): 8-18.
- [7] HU J Y, ZHOU J, WANG N, et al. Numerical study of buoyancy's effect on flow and heat transfer of kerosene in a tiny horizontal square tube at supercritical pressure[J]. Applied thermal engineering, 2018, 141: 1070-1079.
- [8] SUN X, MENG H, ZHENG Y. Asymmetric heating and buoyancy effects on heat transfer of hydrocarbon fuel in a horizontal square channel at supercritical pressures[J]. Aerospace science and technology, 2019, 93: 105358.
- [9] 张卓远, 黄世璋, 高效伟. 超临界压力下正癸烷在水平矩形冷却通道内的流动传热数值模拟[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 83-94.
- [10] 张乐, 王海波, 牛骏, 等. 超临界压力流体在多孔介质内对流换热研究进展[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 3808-3816.
- [11] 石润富, 姜培学, 张宇. 多孔介质中超临界压力 CO₂ 对流换热的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(11): 1254-1257.
- [12] 姜培学, 李勤, 徐轶君, 等. 多孔介质中超临界 CO₂ 对流换热数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(2): 200-202.
- [13] 明廷臻, 周程, 刘伟. 管内填充环状金属多孔介质强化传热优化分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(3): 62-66.
- [14] 黄志锋, 刘伟, 杨昆. 圆管内插入环状多孔介质的换热性能研究及其场协同分析[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(5): 844-846.
- [15] WANG Y H, LU Y N, LI S F, et al. Numerical study on non-uniform heat transfer deterioration of supercritical RP-3 aviation kerosene in a horizontal tube[J]. Chinese journal of chemical engineering, 2020, 28(6): 1542-1557.
- [16] LIU B, ZHU Y H, YAN J J, 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: 734-746.
- [17] 王彦红, 陆英楠, 李素芬, 等. U型圆管中超临界压力 RP-3 航空煤油换热数值研究[J]. 化工学报,

2021, 72(9): 4639-4648.

- [18] JIANG P X, SHI R F, ZHAO C R, et al. Experimental and numerical study of convection heat transfer of CO₂ at supercritical pressures in vertical porous tubes[J]. International journal of heat and mass transfer, 2008, 51(25/26): 6283-6293.

Numerical Research on Heat Transfer of Supercritical N-Decane in Annular Porous Media Regenerative Cooling Channels

WANG Yanhong, LI Yujian

(School of Energy and Power Engineering,
Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Based on the regenerative cooling thermal protection of aero-engine, an annular porous medium channel is proposed, and the influence mechanism of porous medium material, porosity, and annular thickness on supercritical heat transfer of n-decane in the regenerative cooling channel is studied. The distributions of fluid temperature, streamline and turbulent kinetic energy of channel section are investigated. The flow and heat transfer performances are comprehensively evaluated by the comprehensive heat transfer coefficient, and the optimal porous medium material is selected as copper. Considering the effects of porosity and annular thickness, the heat transfer correlation for supercritical n-decane is established under the condition of using copper as the annular porous medium material. The numerical results show that the annular porous medium destroys the thermal boundary layer, enhances the turbulent flow intensity, and the thermal dispersion effect also plays a good role in enhancing heat transfer. The porous media of copper with small porosity and large annular thickness have better comprehensive heat transfer performance. The optimal porosity is 0.3~0.5 mm, and the annular thickness is 0.2~0.4 mm.

Keywords: porous media; regenerative cooling; supercritical fuel; heat transfer; annular thickness; porosity; media material

(责任编辑:唐立平)