

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

黄志锋 刘伟 杨昆

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 本文运用数值计算的方法, 以空气为流动介质, 研究了圆管内插入环状多孔介质在充分发展的层流区的换热及流动综合性能, 并进行了场协同分析。结果表明, 在圆管内插入环状多孔介质可以有效提高换热与流动的综合性能, 其 PEC 值随 Re 数的增大呈现缓慢增大的趋势。多孔材料的孔隙率对综合性能的影响最为明显, 孔隙率越高, 综合性能越好。

关键词 多孔介质; 强化换热; 场协同

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2009)05-0844-03

STUDY ON HEAT TRANSFER PERFORMANCE FOR TUBE INSERTED WITH RING POROUS AND ITS FIELD SYNERGY ANALYSIS

HUANG Zhi-Feng LIU Wei YANG Kun

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The flow and heat transfer integrated performance for the fully developed laminar air flow in a tube inserted with the ring porous media was studied numerically. Its mechanisms of enhancing heat transfer were also analyzed using the principle of field synergy. The results showed that the tube inserted with the ring porous media can effectively improve the flow and heat transfer performance, the value of the PEC had increased slowly with the increasing Reynolds number. The porosity of the porous had the most obvious impact on the integrated performance. The higher the porosity, the better the performance.

Key words porous; heat transfer enhancement; principle of field synergy

0 引言

在管内插入金属多孔介质可以强化传热已经被很多学者所证实^[1~4], 其主要原因是金属多孔骨架的引入可以增加管内流体的有效导热系数及比热容。除此以外, 多孔介质还可以使流体的径向温度分布均匀化, 尤其是对于充分发展的层流流动, 其径向的温度分布呈现近似的抛物线型, 所以多孔介质的引入对其径向温度的均匀化将会有明显的效果。从这个角度出发, 我们考虑在管内插入环状多孔介质来强化传热。因为对于管内充分发展的层流流动, 越靠近管中心处的温度越均匀, 即多孔介质对温度的均匀化作用越微弱, 结合环状多孔介质中空的特点, 就可以在不损失换热性能的前提下进一步减少流动阻力, 提高换热效能。本文以空气作为流动介质, 对管内充分发展的层流在插入环状多孔介质时的传热特性进行了研究。

1 物理及数学模型

如图 1 所示, 空气在填充了环状多孔介质的圆管内流动。管长 $L=2500$ mm, 以使空气在管内达到流动和热充分发展。管内半径 $R=9$ mm, 环状多孔介质的外半径 $R_o=8.5$ mm, 内半径取四种不同的值, 分别为: $R_i=0.5$ mm, 1.0 mm, 1.5 mm 和 2 mm。孔隙率取三种, 分别为: $\varepsilon=0.85, 0.90, 0.95$ 。空气的入口温度和入口速度均匀分布, 圆管壁面采用定热流的加热方式。且作如下假设: (1) 多孔介质均匀且各向同性。(2) 满足局部热平衡。(3) 忽略多孔介质内部的惯性阻力。(4) 流动是稳定的层流。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z}(r \rho v) = 0 \quad (1)$$

动量方程 (多孔区域):

收稿日期: 2008-12-12; **修订日期:** 2009-04-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No.2007CB206903); 国家自然科学基金资助项目 (No.50721005)

作者简介: 黄志锋 (1981-), 男, 广东顺德人, 博士: 研究生, 主要从事强化传热研究。

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial}{\partial z} (\rho u u) + \frac{1}{r \varepsilon^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\mu u}{k}$$

$$\frac{\rho u F}{\sqrt{k}} \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r \varepsilon} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (2a)$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial}{\partial z} (\rho u v) + \frac{1}{r \varepsilon^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{\mu v}{k} - \frac{\mu}{\varepsilon}$$

$$\frac{v}{r^2} - \frac{\rho v F}{\sqrt{k}} \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r \varepsilon} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (2b)$$

式中, k 和 ε 分别为多孔材料的渗透率和孔隙率; F 为无量纲阻力系数。

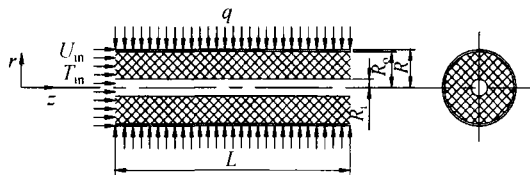


图 1 空气流过插入了环状多孔介质的圆管
Fig. 1 Air flow through a tube inserted with ring porous

动量方程 (非多孔区域):

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial z} +$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (3a)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial r} +$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \mu \frac{v}{r^2} \quad (3b)$$

能量方程 (多孔区域):

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho c u T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho c v T) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

式中, 有效导热系数 $\lambda_{\text{eff}} = (1 - \varepsilon) \lambda_s \varepsilon \lambda_a$, λ_s 、 λ_a 分别为多孔材料和空气的导热系数。

能量方程 (非多孔区域):

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho c u T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho c v T) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial z} \right) +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_a \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5)$$

边界条件

当 $z = 0$ 时: $u = u_{\text{in}}, v = 0, T = T_{\text{in}}$ (6a)

当 $z = L$ 时: $\partial u / \partial z = 0, v = 0, \partial T / \partial z = 0$ (6b)

当 $r = 0$ 时: $\partial u / \partial r = 0, v = 0, \partial T / \partial r = 0$ (6c)

当 $r = R$ 时: $u = 0, v = 0, -\lambda_a (\partial T / \partial r) = q$ (6d)

利用 SIMPLE 算法对式 (1)~(7) 构成的方程组进行求解, 可以得到管内流体的速度分布和温度分布, 从而计算 Nu 数和阻力系数。

2 结果分析

图 2 和图 3 分别给出了 $Re=500, \varepsilon=0.95$ 时管内充分发展的层流在径向的无量纲速度和无量纲温度的分布。其中无量纲温度定义为 $\theta = (T_w - T) / (T_w - T_m)$ 。从图中可以看到, 多孔区域的温度和速度分布非常均匀。与光管相比, 插入环状多孔介质可以在靠近管中心和靠近管壁面处形成两个明显的温度梯度, 增强换热效果。同时也会在两个非多孔区形成速度梯度, 增大流动阻力。

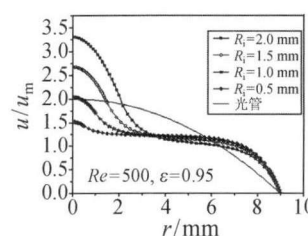


图 2 充分发展段的无量纲速度分布
Fig. 2 Non-dimensional speed distribution of the full developed flow

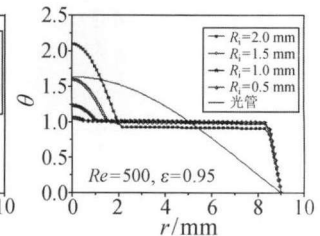


图 3 充分发展段的无量纲温度分布
Fig. 3 Non-dimensional temperature distribution of the full developed flow

图 4 显示了插入环状多孔介质后的强化换热效果, 下标 free 表示光管的数值。从图中可见, 除了少数低孔隙率低填充率 (由于 R_o 固定不变, 所以这里所说的填充率由 R_i 的取值反映, R_i 越小, 填充率越大, 下同) 的情况外, Nu 数基本上是随着 Re 数的增加呈现缓慢上升的趋势, 随着孔隙率 ε 的增大和填充率的提高, Nu 数越来越接近。

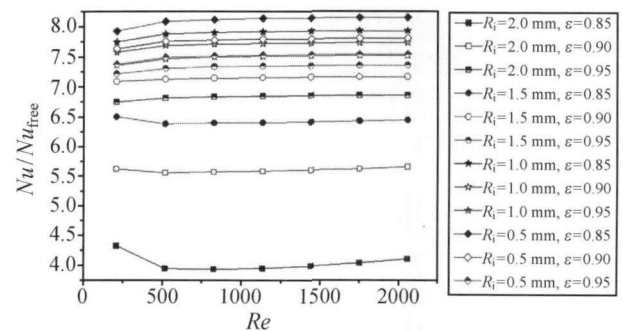


图 4 强化管的 Nu 数与光管 Nu 数的比值
Fig. 4 Ratio of Nusselt number for tube inserted with ring porous and smooth tube

从图 5 可以看到, 流动阻力系数 f 基本不随 Re 数的增大而变化; 孔隙率 ε 对阻力的影响非常明显,

提高 ε 值可以大大减小流动阻力; 为了评价圆管中插入环状多孔介质后换热与流动的综合性能, 引入性能评价指标 [5]: $PEC = (Nu/Nu_{free}) / (f/f_{free})^{1/3}$.

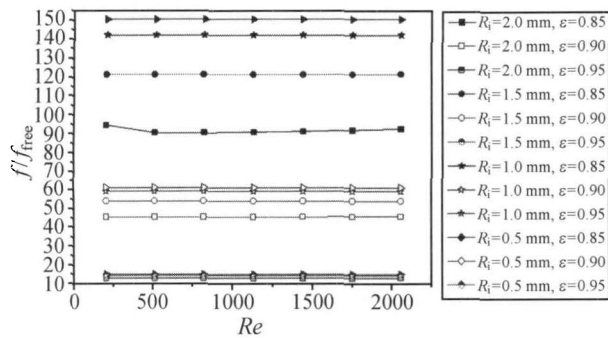


图 5 强化管阻力系数与光管阻力系数的比值

Fig. 5 Ratio of friction factor for tube inserted with ring porous and smooth tube

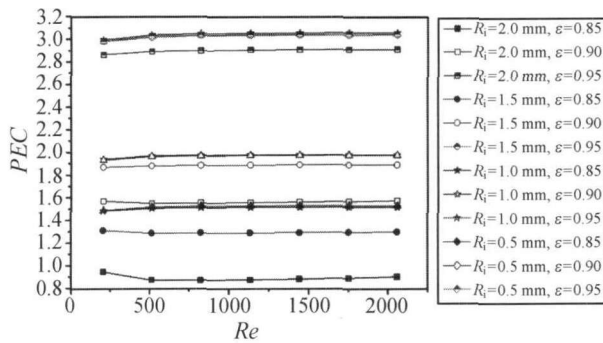


图 6 圆管内插入环状多孔介质的 PEC 值

Fig. 6 PEC of tube inserted with ring porous

如图 6 所示, PEC 值也是基本上随着 Re 数的增大呈现缓慢上升的趋势。绝大部分工况下 PEC 值都大于 1, 其中最大值在 3 左右, 说明管内插入环状多孔介质可以取得很好的换热与流动综合性能的提升。特别是在高孔隙率下, 对综合性能的提升尤为明显。值得注意的是, 随着孔隙率的提高, 增大填充率对综合性能的提高越来越小。说明在高孔隙率的情况下, 可以根据实际需要选择填充率。

3 场协同分析

通过对对流换热物理机制的研究, 过增元 [6] 提出了速度场和温度场的协同理论。通过减小速度矢量与温度梯度的夹角可以强化换热。从图 7 中可以看到, 与光管相比, 插入环状过孔介质后其多孔区域的协同角显著减小, 从而可以使全场平均协同角减小, 使换热得到强化。

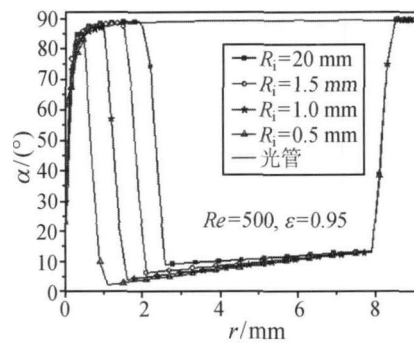


图 7 充分发展段的局部协同角与光管的比较

Fig. 7 Comparison of local synergy angle of fully developed laminar flow between tube inserted with ring porous and smooth tube

4 结论

在圆管内插入环状多孔介质可以在提高换热效果的前提下减小流动阻力, 研究表明, 在充分发展的层流域, 它能有效提高换热与流动的综合性能, 其 PEC 值随 Re 数的增大呈现缓慢增大的趋势。其中多孔材料的孔隙率对综合性能的影响最为明显, 孔隙率越大, 综合性能越好。在高孔隙率的条件下, 在相对较高的填充率范围内, 填充率对综合性能的影响很小。

参考文献

- [1] Pavel B I, Mohamad A A. An Experimental and Numerical Study on Heat Transfer Enhancement for Gas Heat Exchangers Fitted with Porous Media. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 4939-4952
- [2] 杨昆, 刘伟. 管内层流充分发展段等效热边界层的构造及其场协同分析. *工程热物理学报*, 2007, 28(2): 283-285
YANG Kun, LIU Wei. Forming an Equivalent Thermal Boundary Layer for Fully-Developed Laminar Tube Flow and its Field Synergy Analysis. *Int. J. of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(2): 283-285
- [3] Mohamad A A. Heat Transfer Enhancements in Heat Exchangers Fitted with Porous Media Part I: Constant Wall Temperature. *Int. J. of Thermal Science*, 2003, 42: 385-395
- [4] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用. 北京: 科学出版社, 2006. 369-376
LIU Wei, FAN Ai-Wu, HUANG Xiao-Ming. *Theory and Application of Porous Medium in Heat and Mass Transfer*. Beijing: Science Press, 2006. 369-376
- [5] WANG S, GUO Z Y, LI Z X. Heat Transfer Enhancement by Using Metallic Filament Insert in Channel Flow. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44: 1373-1378
- [6] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术. 北京: 中国电力出版社, 2004. 2-10
GUO Zeng-Yuan, HUANG Su-Yi. *Principles of Field Synergy and New Technologies of Heat Transfer Enhancement*. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 2-10