

采用多孔介质和肋片复合传热强化的数值研究

杨 臣 杨 昆 刘 伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要 本文采用数值计算方法分析了圆管中填充多孔介质和肋片时在充分发展段的流动与传热特性。结果表明, 在管内部分填充多孔介质的情况下增加适量的不连续肋片能达到如下两个目的: (1) 不连续的肋片能在壁面上扰动流体来强化换热而阻力增加不大; (2) 不连续的肋片能在壁面上支撑多孔介质使其在径向固定。计算结果表明, 这种复合强化方法的 Nu 和 PEC 值比只在管内填充多孔介质时平均高出 54% 和 36%。

关键词 充分发展段; 多孔介质; 不连续肋片

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2009)06-1032-04

NUMERICAL STUDY OF COMPOUND HEAT TRANSFER ENHANCEMENT BY UTILIZING POROUS MEDIA AND RIBS

YANG Chen YANG Kun LIU Wei

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

Abstract The present study investigates numerically the flow and heat transfer characteristics for fully developed flow in a tube filled with porous media and ribs. The results indicate that the two purposes could be achieved by adding some non-continuous ribs in the inner wall surface of tube partially filled with porous media: (1) disturbing the fluid flow near the boundary to enhance heat transfer, and not increasing too much flow resistance; (2) supporting (non-continuous) the porous medium insert so that it can be fixed in the radial direction of tube. The numerical results show that the average of Nu value and PEC value are 54% and 36% higher by using the compound technique than that by using porous media, respectively.

Key words fully developed; porous media; non-continuous ribs

0 引 言

所谓的复合强化技术就是指同时使用两种或两种以上的无源或者有源技术来实现强化传热的方法, 被誉为当代最有前途的强化传热技术。迄今为止, 国内外一些学者对于复合强化传热技术进行了数值和实验研究。洪蒙纳^[1]等人对含间隔分置旋流片的缩放管复合强化传热进行了实验研究, 其结果表明当间隔比为 48.2, Reynolds 数为 3400~20000 时, 其传热效率指数随着 Reynolds 数的增加而增大, 且与光管和没有旋流片插入物的缩放管相比时, 其传热效率指数分别为 0.85~1.21 和 1.07~1.15。

本文提出的复合强化是在圆管内添加多孔介质和肋片。根据刘伟、杨昆等人^[2,3]对在管内充分发展段部分添加孔隙度为 0.92 多孔介质的计算结果可知, 当流体为空气时, 其性能评价系数 PEC 可接近 3。故本文在管内填充多孔介质的基础上添加一些不

连续的肋片到管的壁面, 一方面不连续的肋片可以通过在壁面扰动流体来强化换热, 并且阻力增加不大; 另一方面不连续的肋片可以在壁面上支撑多孔介质使其在径向固定。

1 理论模型

考虑空气流经一个填充多孔介质和肋片的圆管, 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加热, 其中肋片是每 90° 布置一排肋片, 每排肋片交错排列。做如下假设: (1) 多孔介质均匀且各向同性; (2) 满足局部热平衡条件; (3) 稳定的层流流动。本问题的控制方程如下^[4]:

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

收稿日期: 2008-12-12; 修订日期: 2009-05-19

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: 杨 臣 (1985-), 男, 湖北天门人, 博士研究生, 主要从事强化传热研究。

多孔区域:

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

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

式中, K 和 ε 为多孔材料的渗透率和孔隙率, F 为无量纲阻力系数。渗透率 K 可按下式计算:

$$K = d_p^2 \varepsilon^3 / [150 (1 - \varepsilon)^2]$$

非多孔区域:

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (3a)$$

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

能量方程

多孔区域:

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho c u T) + \frac{1}{r \varepsilon^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho c v T) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (4)$$

式中, 有效热导率 $k_{\text{eff}} = (1 - \varepsilon) k_s + \varepsilon k_a$, k_s 、 k_a 分别为多孔骨架和空气的导热系数。

非多孔区域:

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho c u T) + \frac{1}{r \varepsilon^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho c v T) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_a \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_a \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (5)$$

边界条件

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

$$\text{当 } z=L \text{ 时: } \partial u / \partial z = 0 \quad v = 0 \quad \partial T / \partial z = 0 \quad (6b)$$

$$\text{当 } r=0 \text{ 时: } \partial u / \partial r = 0 \quad v = 0 \quad \partial T / \partial r = 0 \quad (6c)$$

$$\text{当 } r=R \text{ 时: } u = 0 \quad v = 0 - k_a (\partial T / \partial r) = q \quad (6d)$$

方程组 (1)~(6) 可以采用 SIMPLE 算法进行求解, 为了减少计算网格, 进出口采用周期性边界条件。在求得速度和温度分布之后, 可计算出换热系数: $h = q / (T_w - T_m)$, 其中, T_w 为管壁温度, T_m 为空气平均温度, $T_m = \int_0^R u T r dr / \int_0^R u r dr$ 。 Nu 数和阻力系数的计算式为: $Nu = hR / k_a$, $f = 4R (dp/dz) / (\rho u_m^2)$, 式中, u_m 为计算截面空气平均速度: $u_m = \int_0^R 2\pi u r dr / (\pi R^2)$ 。

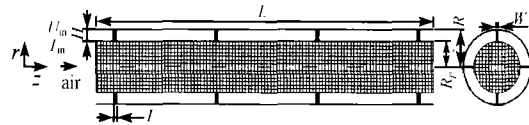


图 1 空气流过填充多孔介质和肋片的圆管
Fig. 1 Schematic structure of calculation model

2 数值模拟结果及分析

图 2 显示, 当雷诺数 $Re=500$ 时, 随着多孔介质填充率的增加, 复合强化管和多孔介质强化管的 Nu 数都有不同程度的增加, 但是复合强化管的 Nu 数要比多孔介质强化管的 Nu 数增加更多。这是因为复合强化管是在圆管中心部分填充多孔介质的基础上在壁面增加少量的不连续直肋, 正是由于这些肋片在壁面上扰动流体导致换热增强。

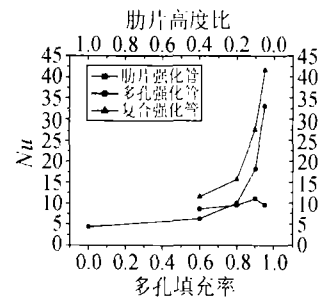


图 2 圆管充分发展段不同强化方式 Nu 比较
Fig. 2 Comparison of Nu for different enhancement patterns in the fully developed section of tube

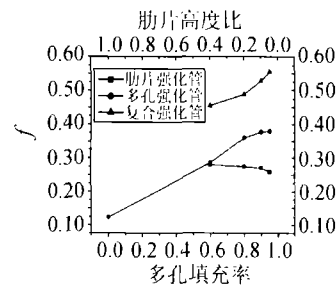


图 3 圆管充分发展段不同强化方式 f 比较
Fig. 3 Comparison of f for different enhancement patterns in the fully developed section of tube

本文中采用性能评价指标 PEC 来评价采用三种不同强化方式后换热与流动的综合性能^[5]:

$$PEC = (Nu/Nu_{free})/(f/f_{free})^{1/3}$$

其中 free 表示光管。

从图 4 中可看出雷诺数 $Re=500$ 时复合强化管的 PEC 比多孔介质强化管的 PEC 要高。这是因为在壁面上增加少量不连续的直肋后, 扰动流体导致阻力增加, 但与扰动流体所增加的换热相比要少。

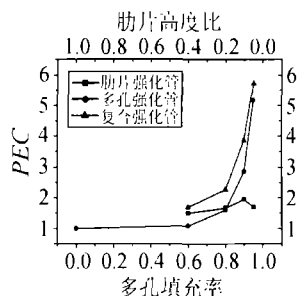


图 4 圆管充分发展段不同强化方式 PEC 比较
Fig. 4 Comparison of PEC for different enhancement patterns in the fully developed section of tube

图 5 显示, 随着孔隙率的减小和多孔介质填充率的增加, Nu 数增加。图 6 可见, 当多孔介质的填充率增加时, 流动阻力系数 f 也相应增加, 特别是当孔隙率较小是, f 增加相当显著。

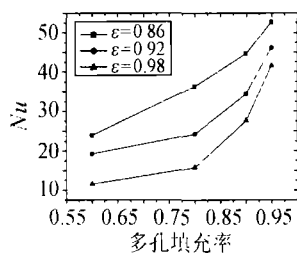


图 5 复合强化方式下不同孔隙率 Nu 比较
Fig. 5 Comparison of Nu for different porosity by using the compound technique

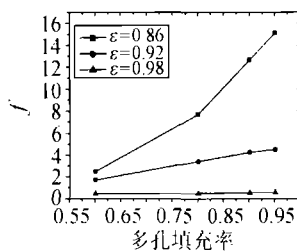


图 6 复合强化方式下不同孔隙率 f 比较
Fig. 6 Comparison of f for different porosity by using the compound technique

图 7 所示为 $Re=500$ 时, 对于相同的孔隙率随着多孔介质填充率的增加 PEC 也不断地增加, 而

且孔隙率越大其 PEC 增加幅度也越大。当多孔介质填充率大于 80% 时, 孔隙率越大其 PEC 也越大, 这是因为当填充率大于 80% 时, 低孔隙率的多孔介质阻力增加非常显著。

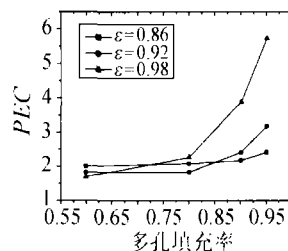


图 7 复合强化方式下不同孔隙率 PEC 比较
Fig. 7 Comparison of Nu for different porosity by using the compound technique

3 结 论

对在圆管内部填充多孔介质的情况下, 在壁面上增加少量不连续直肋的复合强化方式进行了数值模拟, 得出了以下结论:

(1) 当圆管内部填充多孔介质后, 在壁面上增加少量不连续直肋的复合强化方式 Nu 和 PEC 值比只在管内填充多孔介质时平均高出 54% 和 36%, 而阻力增加不大。

(2) 当采用在圆管内填充多孔介质和肋片的复合强化方式时, 必须要选择高孔隙率和高填充率的多孔介质材料才能得到比较高的 PEC 值。

参 考 文 献

- [1] Hong M N, Deng X H, Huang K, et al. Compound heat Transfer Enhancement of a Converging-Diverging Tube with Evenly Spaced Twisted-Tapes. Chin. J. Chem. Eng, 2007, 15(6): 814-820
- [2] 刘伟, 杨昆. 管内核心流强化传热的机理与数值分析. 中国科学 E, 2009, 39(4): 661-666
LIU Wei, YANG Kun. Mechanism and Numerical Analysis of Heat Transfer Enhancement in the Core Flow Along a Tube. Science in China Series E, 2009, 39(4): 661-666
- [3] 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. 工程热物理论, 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. J. of Engineering Thermophysics, 2007, 28(2): 283-285
- [4] 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(23): 4939-4952
- [5] Wang S, Guo Z Y, Li Z X. Heat Transfer Enhancements by Metallic Filament Insert in Channel Flow. Int. J. of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(7): 1373-1378