

梯度多孔材料部分填充圆管强化换热的研究

王柏村¹, 王鹏飞¹, Yifeng Hong², 许忠斌¹

(1. 浙江大学 化学工程与生物工程学院 浙江 杭州 310027; 2. School of Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA)

摘要: 基于 GPM(梯度多孔材料)的优良特性, 本工作设计了 GPM 部分填充圆管强化换热的结构。当 R_p (多孔材料填充率)为 0.8 时, 结合管内充分发展段的速度分布图、管内流动阻力系数和平均 Nu 数, 分别研究了 d_p (填充梯度孔径)多孔材料、 ε (梯度孔隙率)多孔材料对于管内流体流动以及传热特性的影响规律, 并将其与 HPM(均匀多孔材料)填充圆管时的结果做了对比分析。在此基础上, 比较了各种多孔材料填充结构的换热与流动综合评价性能(简称 PEC)。结果表明, 通过合理设计 GPM 的结构, 能够在强化换热的基础上, 有效地降低圆管流动阻力, 从而得到较好的综合评价性能(PEC)。

关键词: 梯度多孔材料; 流体流动; 强化传热; 数值模拟

中图分类号: TK124 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.08.003

引言

作为一种性能优良的管内强化传热插入物, 近年来, 多孔材料填充圆管强化换热受到了国内外学者的关注。Mohamad 及 Pavel 等结合实验和数值模拟结果^[1~2], 研究了恒定壁温以及恒定热流条件下圆管部分及全部填充多孔材料时的换热特性。其研究表明, 高孔隙率的多孔介质材料能较大的提高圆管的换热性能, 同时管内阻力系数也有所提高。近年来, 其他学者也进一步研究了部分或全部填充圆管对于强化换热和管内流动的影响规律^[3~5]; 杨卫卫等数值研究了多孔材料填充圆管强化对流换热^[6], 其结果表明: 在实际应用中, 应该采用部分填充的方式, 并提出了最佳的填充厚度, 使得强化换热的同时也有效地控制了压力损失。为了研究管内多孔材料的结构对于强化换热的影响, 刘伟和汪利先等研究了管内中心分层填充多孔材料时对于传热和

阻力特性的影响^[7~8], 其结果表明: 通过合理组合不同孔隙率的多孔材料填充, 可以得到较高的综合性能指标。

然而, 上述研究都集中在 HPM(均匀多孔材料)填充时的情形, 并未研究填充的多孔材料孔径以及孔隙率连续变化时对于圆管强化换热的影响。而作为一种新型的功能材料, GPM(梯度多孔材料)已被广泛地加工^[9~12], GPM 从结构上分为梯度孔径 GPM 以及梯度孔隙率 GPM。目前已有的 GPM 制备加工方法包括重力沉降、离心成形、压滤成形以及高分子热压成形等^[11, 13~15], 这些加工方法为 GPM 应用在强化换热中提供了良好的基础。

本课题组最近提出了 GPM 填充圆管强化换热这一概念^[16], 并研究了多孔材料填充率为 0.6 和 1.0 时管内流动与换热性能, 结果表明: 在两种填充率时, 均存在优化的 GPM 结构来提高其流动与换热性能。在此基础上, 本文基于 CFD 软件的 UDF 语言建立梯度多孔材料填充圆管的数值模型, 研究管内多孔材料填充率为 0.8 时, 梯度孔径以及梯度孔隙率多孔材料填充对于管内流体流动以及换热特性的影响规律, 并分析了不同结构梯度多孔材料填充下的换热与流动的综合性能, 进而得出 $R_p = 0.8$ 时管内填充 GPM 的优化结构。

1 模型及模拟方法

1.1 物理模型

图 1(a) 给出了 GPM 填充圆管的物理模型, 流体从入口以恒温匀速进入管内, 由于圆管外壁的温度远高于流体进入时的温度, 流体在填充有多孔材

收稿日期: 2015-09-06; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51373153); 中国博士后科学基金资助项目(2014M560483); 国家留学基金资助项目(201406320096)

作者简介: 王柏村(1990-), 男, 安徽太湖人, 浙江大学博士研究生。

通讯作者: 许忠斌(1969-), 男, 浙江宁波人, 浙江大学教授。

料的圆管内进行换热,然后从出口流出。由于其中心对称结构,选择采用2D模型,并取1/2结构。圆管的半径 r_0 为0.1 m,圆管长度为1 m,本文建立的模型 R_p (多孔材料填充率)均为0.8,即 r_p (多孔材料填充半径)为0.08 m。计算坐标系选在进口处对应的轴线高度处, Z 轴沿着流体流动方向, R 轴沿着管径方向。图1(b)~图1(c)分别为径向梯度孔径多孔材料及轴向梯度孔径多孔材料的示意图。为了简化计算,做如下假设:忽略重力、热辐射的影响,流体与固体的物性为常数。多孔材料填充区域与流体区域为无速度滑移、无温度跳跃的流、固耦合界面。

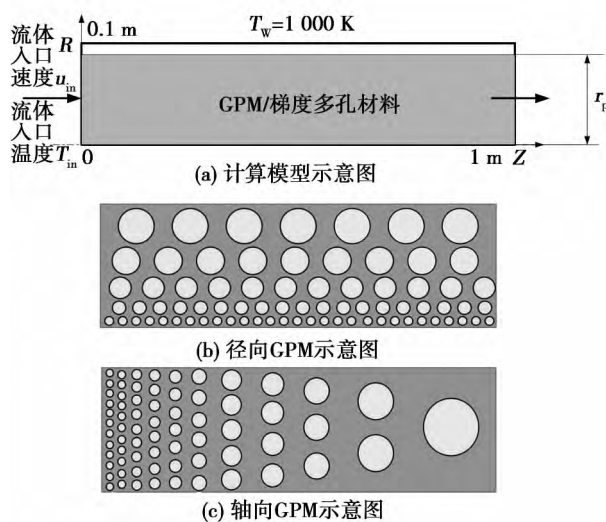


图1 物理模型及梯度多孔材料示意图

Fig. 1 GPM structure and physical model

1.2 数值计算模型

为了描述多孔区域内流体的能量传递,本文采用基于局部热平衡假设的能量方程。因此质量守恒、动量守恒以及能量守恒方程如下^[1]。

质量守恒方程:

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

式中: r —径向坐标值,m; z —轴向坐标值,m; ρ —流体密度, kg/m^3 ; v — R 方向速度分值, m/s ; u — Z 方向速度分值, m/s 。

Z 方向动量守恒方程:

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

R 方向动量守恒方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(u_e \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r u_e \frac{\partial v}{\partial r}\right) - f \frac{\rho F}{\sqrt{K}} |u| v - f \frac{\mu v}{K} \quad (3)$$

式中: f 在多孔介质区域为实数,在无多孔介质区域为零。 u_e — Z 方向的有效速度分值, m/s ; $|u|$ —实际速度大小; F —惯性系数; K —多孔材料的渗透率,定义为:

$$K = \frac{d_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (4)$$

式中: d_p —多孔材料的孔径,m; ε —多孔材料的孔隙率。

能量守恒方程:

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

式中: c —比热容值, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T —温度,K; k_e —有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。定义如下:

$$k_e = (1-\varepsilon) k_s + \varepsilon k_f \quad (6)$$

式中: k_f 和 k_s —流体以及多孔材料固体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

1.3 流动与传热计算

梯度多孔材料条件设置通过使用 ANSYS FLUENT 软件中的 UDF 语言编译实现。通过多孔材料的孔隙率 ε 、粘性阻力系数 C_1 以及惯性阻力系数 C_2 来设置梯度多孔材料的内部结构。根据 Ergun 模型^[1~2], C_1 以及 C_2 定义如下:

$$C_1 = \frac{1}{K} = \frac{150}{d_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{d_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (8)$$

例如,当设置沿着径向孔隙率0.8递增至1.0的多孔结构时,需要根据式(7)~式(8)编译 C_1 和 C_2 的UDF语言,通过FLUENT软件中的Define-User Defined-Functions导入 C_1 和 C_2 。然后在对Porous Zone进行设置时,选择相应的UDF参数,从而实现径向梯度孔隙率的多孔结构。为了分析管内阻力和换热特性,雷诺数 Re 和阻力系数 f 定义为:

$$Re = \frac{\rho D u_{in}}{\mu} \quad (9)$$

式中: D —圆管内径,m; u_{in} —流体入口速度, m/s ;

μ —流体粘度 $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}$;

$$f = 2 \frac{\Delta p D}{L \rho u_{\text{in}}^2} \quad (10)$$

式中: Δp —计算模型进出口的压降, Pa; L —圆管长度, m。

平均换热系数 h_m 和平均 Nu_m 数定义为:

$$h_m = \frac{q}{T_w - T_m} \quad (11)$$

$$Nu_m = \frac{h_m D}{k_f} \quad (12)$$

式中: q —壁面对流体的对流换热量, W; T_w —管壁的温度, K; T_m —流体的平均温度, K。换热与阻力的综合性能评价系数 PEC 定义如下^[5]:

$$\text{PEC} = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (13)$$

式中: Nu 和 f —填充多孔材料下圆管对应的努赛尔数和阻力系数; Nu_0 与 f_0 —无填充时光管的努赛尔数和阻力系数。

边界条件: 圆管入口设置温度为 300 K 的均匀速度分布进口边界条件, 圆管出口为压力出口边界条件, 圆管外壁设置为 $T_w = 1\,000\text{ K}$ 的恒温边界, $R=0$ 处施加轴对称边界条件。在数值计算过程中, 可以求取进出口压力差 ΔP 和出口流体平均温度 T_{out} 。计算时采用层流模型, 为提高计算精度, 压力与速度的耦合采用 SIMPLE 方法, 并采用二阶迎风差分格式, 同时考虑了网格独立性, 采用均匀直角坐标网格, 节点数取 $670(Z) \times 67(R)$, 如图 2 所示。

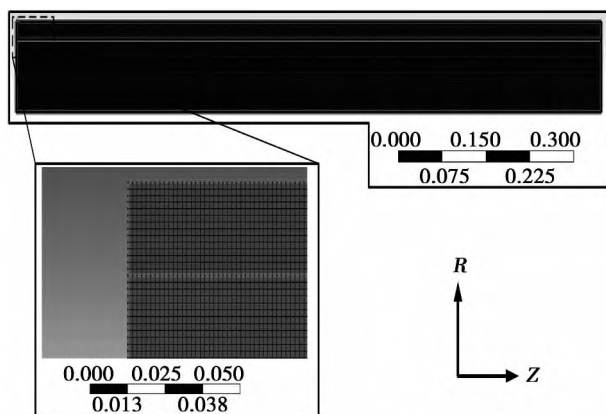


图 2 模型网格示意图(mm)

Fig. 2 Meshing grid of the model(mm)

2 结果与讨论

2.1 填充梯度孔隙率 GPM

$R_p = 0.8$ 时, 不同梯度孔隙率的 GPM 对于轴向充分发展的管内速度分布的影响如图 3 所示(其中 R 无量纲半径, $R = r/r_0$, $|U|$ 为无量纲速度值, $|U| = u/u_{\text{in}}$)。当填充 GPM 的孔隙率沿轴向递增或递减时, 多孔材料区域的流体速度均比较小, 且在径向方向分布较均匀。当填充的 GPM 的孔隙率沿着径向递增或递减时, 多孔材料区域的流体速度均呈现出明显的梯度。孔隙率沿径向递减时, 多孔材料区域的流体速度沿着径向递减, 纯流动区域的流速增加, 并且在 $0.8 < R < 1.0$ 之间存在一个速度峰值。孔隙率沿径向递增时, 多孔材料区域的流体速度沿着径向递增, 在 $R = 0.8$ 左右存在一个速度峰值。造成这一结果的主要原因在于: 径向梯度孔隙率导致了粘性阻力以及惯性阻力沿径向的梯度分布。

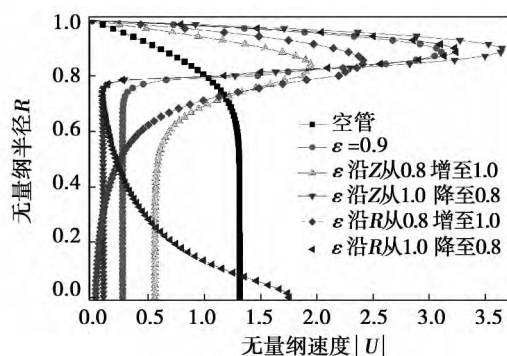
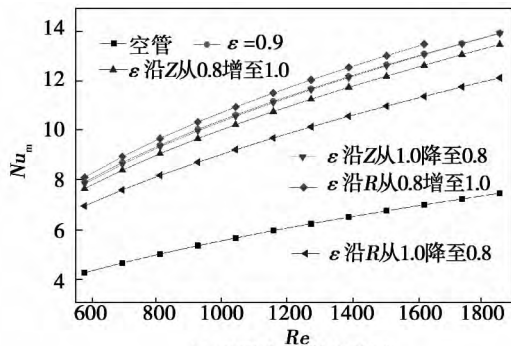
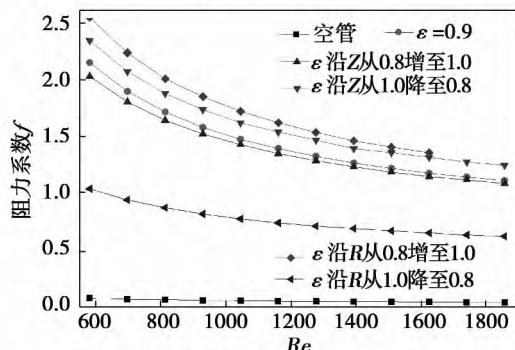


图 3 填充梯度孔隙率 GPM 对于管内速度分布的影响($d_p = 0.004\text{ m}$)

Fig. 3 Velocity profile in pipes filled with gradient-porosity GPMs($d_p = 0.004\text{ m}$)

填充梯度孔隙率 GPM 对管内 Nu_m 和阻力系数 f 的影响如图 4 所示。由图可知, 当填充梯度孔隙率 GPM 时, 其和空管及 HPM 填充圆管时类似, Nu_m 也随着 Re 的增加而增加, 阻力系数也随着 Re 的递增而下降。当填充 GPM 的孔隙率沿轴向递增或递减时, 在相同的 Re 下, 其 Nu_m 小于 HPM 填充时的 Nu_m 。并且在填充的 GPM 孔隙率沿轴向递增时, 其阻力系数超过了 HPM 填充时的阻力系数。填充 GPM 的孔隙率沿径向递减时, 在相同的 Re 下, 其

Nu_m 大于 HPM 填充时的 Nu_m , 此时的阻力系数也相应提高了。填充 GPM 的孔隙率沿径向递增时, 在相同的 Re 下, 其 Nu_m 远小于 HPM 填充时的 Nu_m , 此时阻力系数也相应减小了, 其原因主要是, 孔隙率沿径向递增时, 其对应的有效导热系数沿径向逐渐减小, 从而大大降低了靠近管壁处的换热。

(a) 对平均 Nu 数的影响

(b) 对阻力系数的影响

图 4 填充梯度孔隙率 GPM 对管内流体流动及换热影响 ($d_p = 0.004 \text{ m}$)

Fig. 4 Averaged Nusselt number and friction factor of pipes filled with gradient-porosity GPMs ($d_p = 0.004 \text{ m}$)

2.2 填充梯度孔径 GPM

管内填充梯度孔径 GPM 对管内流动和换热性能的影响规律如图 5 所示。当填充 GPM 的孔径沿轴向递增或递减时, 多孔材料区域的流体速度均比较小, 且在径向方向分布较均匀。填充的 GPM 的孔径沿着径向递增或递减时, 多孔材料区域的流体速度呈现明显的梯度。孔径沿径向递减时, 多孔材料区域的流体速度也沿着径向递减, 纯流动区域的流速增加, 并在 $0.8 < R < 1.0$ 之间存在一个速度峰值。孔径沿径向递增时, 多孔材料区域的流体速度沿着径向递增, 在 $0.8 < R < 1.0$ 之间存在一个速度峰值, 其速度峰值要远小于孔径沿径向递减时纯流

动区域的峰值。上述结果的主要原因: 梯度孔径 GPM 沿径向变化时, 会显著改变多孔材料区域粘性阻力及惯性阻力沿径向的分布。

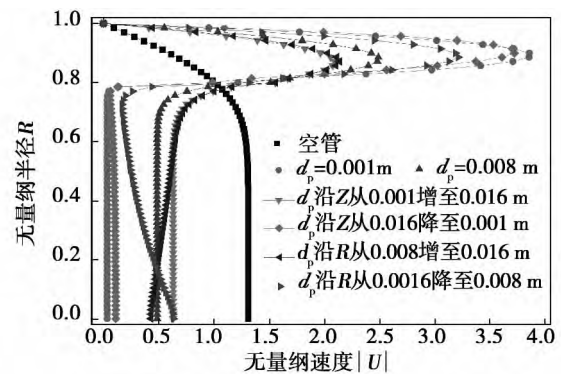
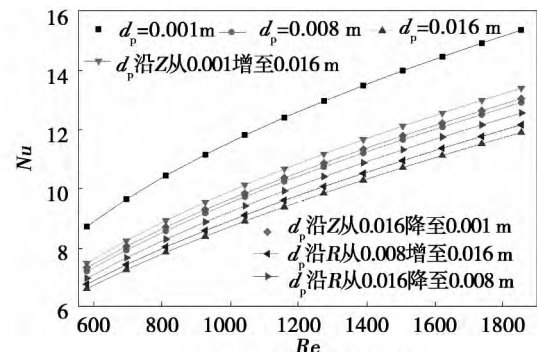
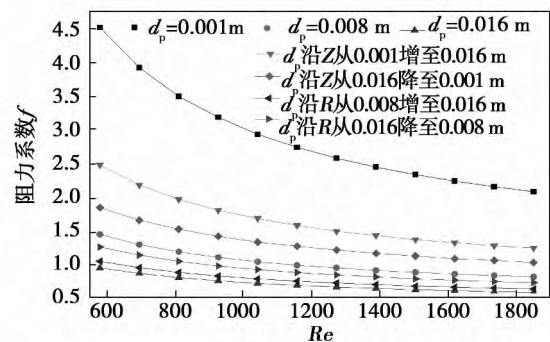


图 5 填充梯度孔径 GPM 对于管内速度分布的影响 ($\varepsilon = 0.9$)

Fig. 5 Velocity profile in pipe filled with gradient pore-size GPMs

填充梯度孔径 GPM 对管内 Nu_m 和阻力系数 f 的影响如图 6 所示。

(a) 对平均 Nu 数的影响

(b) 对阻力系数的影响

图 6 填充梯度孔径 GPM 对管内流体流动及换热影响 ($\varepsilon = 0.9$)

Fig. 6 Averaged Nusselt number and friction factor of pipes filled with gradient pore-size GPMs ($\varepsilon = 0.9$)

如图 6 所示,当填充梯度孔径 GPM 时,与空管及 HPM 填充圆管时类似, Nu_m 随着 Re 的增加而增加,阻力系数随着 Re 递增而下降。当填充 GPM 的孔径沿轴向递增或递减时,在相同的 Re 下,其 Nu_m 均大于 HPM 填充时的 Nu_m 。在填充的 GPM 孔径沿轴向递增或递减时,其阻力系数也超过了 HPM 填充时的阻力系数。在相同的 Re 下,填充 GPM 的孔径沿径向递减时,其 Nu_m 大于孔径沿径向递增时的 Nu_m ,此时的阻力系数也相应增加了,其原因主要是, GPM 的孔径沿径向递减时,其纯流动区域的流速要明显大于孔径沿径向递增时的值,从而强化了靠近管壁处的换热。上述结果表明不同的 GPM 对于管内 Nu_m 和阻力系数 f 的影响均不同,可根据实际应用设计合理的 GPM。

2.3 换热与流动综合性能评价

图 7 为 $R_p = 0.8$ 情况下,不同 GPM 填充圆管时流动与换热综合性能的计算结果,同时也与 HPM 填充时的性能做了对比。

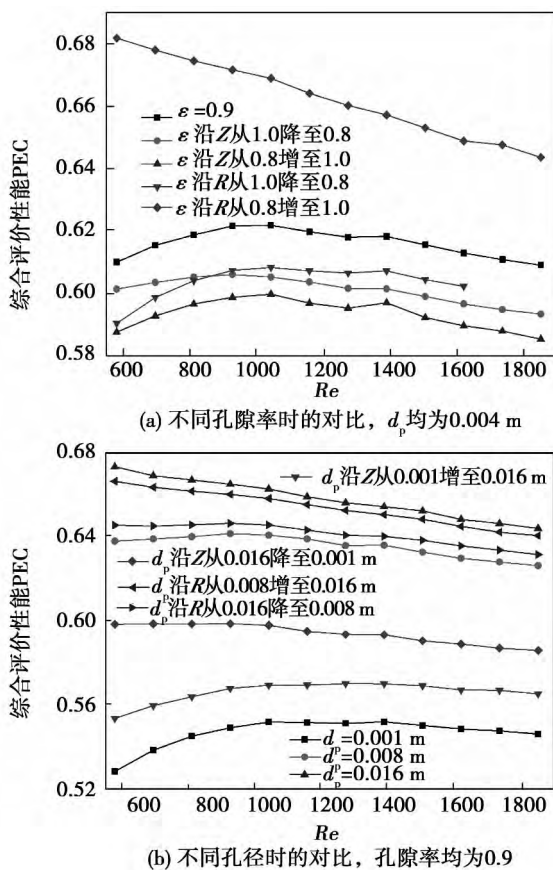


图 7 不同梯度多孔材料填充下圆管的 PEC 比较

Fig. 7 PEC of pipes filled with various porous materials

由图 7 可知, Re 相同时,在所有梯度孔隙率 GPM 设计中,孔隙率沿着径向递增时,其流动与换热综合性能评价最好(孔隙率沿径向从 0.8 递增到 1.0),有较好的工程应用价值。孔隙率沿轴向递增情况时,其流动与换热综合性能综合评价最差。在所有梯度孔径 GPM 设计中, Re 相同时,孔径沿着径向递增情况下,其流动与换热综合性能综合评价最好,孔径沿着轴向递增情况时,其流动与换热综合性能评价最差。

3 结 论

本文设计了梯度多孔材料部分填充圆管($R_p = 0.8$)的结构,通过数值模拟研究了部分填充 GPM 对于圆管强化换热的影响规律,主要结论如下:

(1) 管内填充轴向梯度孔隙率 GPM 时,对于管内强化换热影响不大,而填充径向递减孔隙率 GPM 时,能明显强化换热;

(2) 和相应的 HPM 结构相比,管内填充轴向梯度孔径 GPM 时,能明显强化换热;

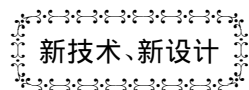
(3) 为提高圆管的换热与流动综合性能(PEC),可在管内部分填充径向递增孔隙率 GPM 或径向递增孔径 GPM。

参考文献:

- [1] MOHAMADA A. Heat transfer enhancements in heat exchangers filled with porous media Part I: constant wall temperature. International Journal of Thermal Sciences [J], 2003, 42(4): 385-395.
- [2] PAVELB I, MOHAMAD A A. An experimental and numerical study on heat transfer enhancement for gas heat exchangers filled with porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2004, 47(23): 4939-4952.
- [3] TEAMAHM A, EL-MAGHLANY W M, KHAIRAT DAWOOD M M. Numerical simulation of laminar forced convection in horizontal pipe partially or completely filled with porous material [J]. International Journal of Thermal Sciences 2011, 50(8): 1512-1522.
- [4] MAEREFATM, MAHMOUDI S Y, MAZAHARI K. Numerical simulation of forced convection enhancement in a pipe by porous inserts [J]. Heat Transfer Engineering 2011, 32(1): 45-56.
- [5] HUANGZ F, NAKAYAMA A, YANG K, et al. Enhancing heat transfer in the core flow by using porous medium insert in a tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(5): 1164-1174.
- [6] 杨卫卫, 何雅玲, 黄 竞, 等. 多孔材料强化管内对流换热的数

- 值研究 [J]. 工程热物理学报 2007 28(1): 104 - 106.
YANG Wei-wei ,HE Ya-ling ,HUANG Jing ,et al. Numerical simulation of heat transfer enhancement in porous medium filled pipe [J]. Journal of Engineering Thermophysics ,2007 ,28(1): 104 - 106.
- [7] 刘 伟 ,明廷臻. 管内核心流分层填充多孔介质的传热强化分析 [J]. 中国电机工程学报 2008 28(32): 66 - 71.
LIU Wei ,MING Ting-zhen. Analysis for heat transfer enhancement in the core flow of a tube filled with porous media at different layers [J]. Proceedings of CSEE 2008 28(32): 66 - 71.
- [8] 汪利先 ,明廷臻 ,刘 超 等. 管中心填充两层多孔介质强化传热研究 [J]. 水电能源科学 2009 27(6): 223 - 226.
WANG Li-xian ,MING Ting-zhen ,LIU Chao ,et al. Study on heat transfer enhancement by filling tube inner part with two layers of porous media [J]. Water Resources and Power ,2009 ,27(6): 223 - 226.
- [9] 杨保军 ,奚正平 ,汤慧萍 等. 梯度多孔金属材料制备及应用的研究进展 [J]. 粉末冶金工业 2008 18(2): 28 - 32.
YANG Bao-jun ,XI Zheng-ping ,TANG Hui-ping ,et al. research progress in preparation and application of gradient-porous metal [J]. Powder Metallurgy Industry 2008 18(2): 28 - 32.
- [10] KIEBACK B ,NEUBRAND A ,RIEDEL H. Processing techniques for functionally graded materials [J]. Materials Science and Engineering: A 2003 362(1): 81 - 106.
- [11] MACAK ,DOBSAK P ,BOCCACCINI A R. Fabrication of graded porous ceramics using alumina - carbon powder mixtures [J]. Ceramics International 2001 27 (5): 577 - 584.
- [12] 杨丽红 ,孙金祥 ,沈航明. 变密度多孔介质强化导热模型及实验研究 [J]. 热能动力工程 2014 29(5): 515 - 520.
YANG Li-hong ,SUN Jin-xiang ,SHEN Hang-ming. Model for the Enhancement Heat Conduction of a Variable Density Porous Medium and Its Experiment Study [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power 2014 29(5): 515 - 520.
- [13] YAOD ZHANG W ,ZHOU J. Controllable growth of gradient porous structures [J]. Biomacromolecules ,2009 ,10(5): 1282 - 1286.
- [14] HONGY ZHOU J ,YAO D. Porogen templating processes: An overview [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering , 2014 ,136(3): 1 - 17.
- [15] HONGY ,YAO D. Mechanical behavior of porous polysiloxane with micropores interconnected by microchannels [J]. Polymer Engineering & Science 2014 54(7): 1512 - 1522.
- [16] WANG B ,HONG Y ,HOU X ,et al. Numerical configuration design and investigation of heat transfer enhancement in pipes filled with gradient porous materials [J]. Energy Conversion and Management 2015 ,105: 206 - 215.

(姜雪梅 编辑)



GE 的燃气轮机用于世界最快的渡船

据《Motor Ship》2015 年 9 月刊报道 ,作为 10 年服务合同的一部分 ,GE Marines 提供它的 2 台 LM2500 燃气轮机 ,用于阿根廷 Buquebus 的 Francisco 号高速渡船。

属于该合同 ,GE 将提供这 2 台燃气轮机的计划检修和计划外检修 ,包括现场服务保障、部件的修理和更换、工程、技术和排除故障保障、发动机租借。这 2 台燃气轮机将驱动世界最快的商船。

GE 和 Buquebus 紧密合作 ,达成能满足这艘高速渡船特殊要求 ,并确保它可靠运行的燃气轮机维护协定。

航改型 LM2500 船舶燃气轮机的技术规范和额定性能:

推出 年份	ISO 连续额 定功率/kW	热耗率 /kJ · (kWh) ⁻¹	效率 /%	压比	质量流量 /kg · s ⁻¹	动力涡轮转速 /r · min ⁻¹	排气温度 /℃	大约的重量 /kg	大约的尺寸 L × W × H/m
1969	24 618	0.226	37.4	19.3	70.3	3 600	566	4 620	67 × 2.1 × 2.1

(吉桂明 摘译 ,徐立民 提供)

层流压气机叶片设计中的关键问题 = **The Key Problems in the Inverse Design of Laminar Flow Compressor Blade Profile** [刊 汉] SAI Qing-yi ,HUANG Dian-gui (University of Shanghai for Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8) . -1 ~5

Laminar flow compressor blades are type of blades that maintain laminar flow conditions in passages for a wide range of operating conditions. In this way ,the aerodynamic efficiency and off-design performance of compressor can then be considerably improved. This type of blade has several characteristic features ,including a slightly rearward maximum thickness location ,a relatively small leading edge radius and a flat suction side. Based on the review of mainly relevant literatures ,the key and basic problems for laminar compressor blade are summarized. A prospective stating that the aerodynamic performance is closely related to the continuous degree of first-order and second-order derivatives of blade profile is proposed. It is suggested to conduct study on the sensitivity of discontinuous degree for first-order and second-order derivative distributions under different values of Reynolds numbers ,Mach numbers (supersonic area ,transonic area and shock wave position) and pressure gradients (favorable pressure and adverse pressure areas) ,and then identify the objective laws. In this way ,the fundamental principle for the deviation of discrete line in the process of design ,manufacturing as well as performance prediction for laminar compressor blade is determined. **Key words:** axial compressor ,laminar flow ,inverse design ,blade profile ,transition

碳纤维换热器换热性能实验研究 = **Experimental Study on the Heat Transfer Performance of Carbon Fiber Heat Exchanger** [刊 汉] CAO Sheng-xian ,DUAN Jie ,WANG Gong ,ZHAO Buo(School of Automation Engineering ,Northeast Dianli University ,Jilin ,Jilin ,China ,Post Code: 132012) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8) . -6 ~11

This paper proposes a kind of carbon fiber heat exchanger aiming to solve the low temperature dew point corrosion in the waste heat utilization. Comparative experiments on the coefficient of thermal conductivity between carbon fiber heat exchanger tube and carbon steel heat exchanger tube have been done. The experiment on heat transfer performance is done by means of the monitoring system for heat exchange in air and gas system ,which can simulates the working environment of heat exchangers in power plant. The experimental results show that the thermal conductivity of carbon fiber heat exchanger tube is higher than that of carbon steel heat exchanger tube ,while the overall heat transfer performance of carbon fiber heat exchanger is relatively poor due to the resin coating ,which is utilized to prevent water percolation. **Key words:** carbon fiber ,heat exchanger ,thermal conductivity ,heat transfer performance

梯度多孔材料部分填充圆管强化换热的研究 = **Study on Heat Transfer Enhancement in Pipes Partially Filled with Gradient-porous Materials** [刊 汉] WANG Bai-cun ,WANG Peng-fei (College of Chemical and Biological Engineering ,Zhejiang University ,38 Zheda Street ,Hangzhou ,China ,Post Code: 310027) ,HONG Yi-feng (School of Materials Science and Engineering ,Georgia Institute of Technology ,Atlanta ,GA 30332 ,USA) ,XU Zhong-bin (College of Chemical and Biological Engineering ,Zhejiang University ,38 Zheda Street ,Hangzhou ,Chi-

na ,Post Code: 310027) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8). -12 ~ 17

Inspired by the unique properties of gradient porous material (GPM) ,the authors proposed a novel design to enhance the heat transfer in pipes by filling them with GPMs. When R_p (GPM filling ratio) is 0.8 ,the effects of gradient pore-size and gradient porosity on the flow and heat transfer performance were studied by examining velocity distribution ,friction factor and averaged Nusselt number. The flow and heat transfer performances of GPM filled pipes were also compared with the ones filled by homogeneous porous materials (HPM) . Moreover ,a tradeoff analysis between the GPM and HPM design on the thermal and flow properties was also conducted. The results showed that the pipes with GPM configuration can effectively enhance heat transfer and reduce the flow resistance in comparison with conventional HPM design. **Key words:** gradient-porous materials ,fluid flowing ,heat transfer enhancement ,numerical simulation

喷管内水蒸汽凝结相变的数值模拟研究 = **Numerical Study on the Condensation Phase Transformation of Water Vapor in Supersonic Nozzle** [刊 ,汉] HUA Feng ,LIAO Guo-jin (Faculty of Mechanical Engineering and Automation ,Liaoning University of Technology ,Jinzhou ,Liaoning ,China ,Post Code: 121001) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8). -18 ~ 23

With the real thermodynamic properties of water vapor and the consideration of the effects of the phase transformation and velocity slip ,a numerical model for the non-equilibrium supersonic water vapor condensation flow was established. This numerical model was first verified by the comparison with the experimental data. Then it was used to simulate the vapor flow in a supersonic nozzle. The “X-type” condensation shock was clearly captured ,and its morphology and formation causes were analyzed. In comparison with the simulation with ideal vapor ,it shows that the non-equilibrium steam condensation forms condensation shock ,leading to the sudden increase in flow field pressure and temperature ,and in turn ,abrupt decrease in flow velocity. The droplet radius ,droplet number ,growth trends and humidity after non-equilibrium condensation occurs ,were also calculated and analyzed. **Key words:** double-fluid model ,water vapor ,numerical simulation ,non-equilibrium condensation

压气机静叶栅流场畸变试验可行性探索及流场分析 = **Feasibility Research of Compressor Stator Cascade Test with Distorted Inlet and Flow Field Analysis** [刊 ,汉] XU Jia-hui ,SUN Peng ,TENG Li-zhi ,ZHONG Jing-jun (Marine Engineering College ,Dalian Maritime University ,Dalian ,China ,Post Code: 116026) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8). -24 ~ 30

In order to study the effects of total pressure distortion on compressor stator by cascade experiments ,a test method for a non-uniform stator inlet by changing the installation angle of some adjustable guide vanes (AGV) was presented in this paper. Numerical simulation was adopted to study the stator flow field with different inlet conditions. Study shows that it is feasible to achieve the goal of non-uniform inlet flow angle with the method of AGV. Inlet flow angle and flow density becomes non-uniform in circumference with the decrease of installation angle ,and the type of