

金属泡沫管内强制对流换热的数值模拟

李盈海^{1,2}, 陶文铨¹, 孙东亮¹, 赵长颖¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 天华化工机械及自动化研究设计院, 730060, 兰州)

摘要: 对空气在金属泡沫管内的强制对流换热进行了二维数值模拟. 动量方程采用 Brinkman-Forchheimer 扩展达西模型, 能量方程采用考虑流体和固体局部不平衡的二方程模型, 并用金属泡沫方形通道的试验数据验证了程序的正确性. 模拟结果表明: 金属泡沫管的努塞尔数随孔隙率的减小或孔密度的增加而增大, 且随流体和固体导热系数比值的减小而增大; 金属泡沫管的强化换热效果十分明显, 但其压降远大于光管. 数值模拟结果与相关文献的结果符合较好.

关键词: 强制对流; 强化换热; 金属泡沫管; 数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0261-04

Numerical Simulation of Convective Heat Transfer in Metal Foam Filled Pipes

LI Yinghai^{1,2}, TAO Wenquan¹, SUN Dongliang¹, ZHAO Changying¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Tianhua Institute of Chemical Machinery & Automation, Lanzhou 730060, China)

Abstract: 2D convective heat transfer enhancement in metal foam filled pipe is numerically simulated. The momentum equation is formulated based on the Brinkman-Forchheimer extended Darcy model, and the energy equations for both solid and fluid are established following the two-equation non-equilibrium model. The computational code is validated by the experimental data from metal foam filled channel. The numerical results show that the Nusselt number increases when porosity decreases or pore density increases, the Nusselt number also rises with the decreasing thermal conductivity ratio of fluid to solid. Metal foam filled pipe enables to enhance the heat transfer greatly but with a more remarkable pressure drop. The numerical result agrees well with the published literatures.

Keywords: forced convection; heat transfer enhancement; metal foam filled pipe; numerical simulation

金属泡沫管是指采用烧结等工艺将金属泡沫与金属管壁紧密结合而形成的新型强化换热管. 金属泡沫是一种高孔隙率的特殊多孔介质, 其中固体(如铜、铝)和流体(如空气或水)的导热系数常常相差很大, 对其进行模拟时必须采用二方程模型. 近年来, 不少学者致力于多孔金属泡沫中流动和换热机理的研究: Calmidi 等人^[1]对方形金属泡沫通道内的强制对流换热进行了数值模拟和试验研究, 进口速度分布采用了充分发展的精确解, 通道底部采用了恒热

流边界, 但边界的温度分布是从试验获得的; Zhao 等人^[2]对金属泡沫方形通道内空气的强制对流换热进行了试验研究和数值模拟; Lu 等人^[3]获得了金属泡沫管内强制对流换热的一维简化分析解(其中忽略了阻力二次项和轴向导热的影响).

目前, 针对金属泡沫管的研究文献较少, 未见采用数值模拟对其进行研究的文献. 对金属泡沫管中的流动和传热进行数值模拟可以进一步了解其强化换热机理, 促进工业化应用. 本文拟采用 Brinkman-

Forchheimer 扩展达西模型^[4]和局部不平衡二方程模型^[1],对空气在金属泡沫管内的强制对流换热进行二维数值模拟,分析几何和物理参数对流动和换热的影响,并将数值模拟的结果与试验结果^[2]和分析解^[3]进行对比以验证其正确性.

1 数值模拟

1.1 计算区域及控制方程

计算区域及边界条件如图 1 所示.计算中采用如下简化假设:金属泡沫是均匀且各向同性的;忽略金属泡沫和管壁之间的接触热阻;忽略流体和固体物性随温度的变化;忽略自然对流和辐射换热;流体不发生相变.在二维轴对称圆柱坐标下的体积平均控制方程^[1]如下:

连续性方程

$$\frac{\partial(\rho_f u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho_f v)}{\partial r} = 0$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho_f u^2)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho_f u v)}{\partial r} = -\epsilon^2 \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_f \epsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_f \epsilon \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\mu_f \epsilon^2}{K} u - \rho_f \epsilon^2 F_1 (u^2 + v^2)^{1/2} u$$

$$\frac{\partial(\rho_f u v)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho_f v^2)}{\partial r} = -\epsilon^2 \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_f \epsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_f \epsilon \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{\mu_f \epsilon^2}{K} v - \rho_f \epsilon^2 F_1 (u^2 + v^2)^{1/2} v$$

固体能量方程

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{sc} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ (k_{fe} + k_d) \frac{\partial T_s}{\partial r} \right\} - h_{sf} a_{sf} (T_s - T_f)$$

流体能量方程

$$\frac{\partial(\rho_f u T_f)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho_f v T_f)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_{fe} + k_d}{C_f} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k_{fe} + k_d}{C_f} \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + \frac{h_{sf} a_{sf}}{C_f} (T_s - T_f)$$

式中: u, v 分别为 x 和 r 方向的速度; ρ_f 为流体的密度; μ_f 为流体的动力黏度; C_f 为流体的比热容; ϵ 为

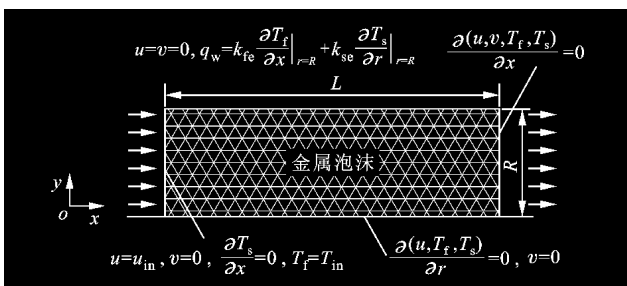


图1 计算区域及边界条件示意图

孔隙率; K 为渗透率; F_1 为形状系数; k_d 为热弥散系数; k_{fe}, k_{se} 分别为流体和固体的有效导热系数; h_{sf} 和 a_{sf} 分别为流体-固体的间隙换热系数和比表面积;下标 f, s 和 e 分别代表流体、固体及有效.

1.2 数值方法及程序验证

数值算法采用基于有限体积法的 SIMPLE 算法^[5].对流项的离散采用 SGSD 格式^[6],扩散项采用中心差分格式.经网格独立性考核后,数值计算采用的网格均为 $142(x) \times 38(r)$.迭代收敛的判据为相隔 20 次迭代的平均阻力系数和努塞尔数的相对偏差小于 1.0×10^{-5} .目前,文献中未见泡沫管内强制对流的试验结果,但对于方形泡沫通道内的强制对流有一些试验数据.用本文的程序对方形泡沫通道进行计算的结果与试验数据^[2]基本一致,说明本文的计算程序是正确的.

2 结果及分析

2.1 速度分布

图 2 为金属泡沫管出口截面的归一化速度分布曲线,其中 u_m 为截面平均速度.由图 2 可见,金属泡沫管内的速度分布很均匀,这与光管内的抛物线分布不同.金属泡沫的存在使边界层大大减薄,边界层的厚度随着泡沫孔径与泡沫管半径之比 d_p/R 的减小而减薄.对于 d_p/R 相同的泡沫管,孔隙率越小,边界层就越薄.

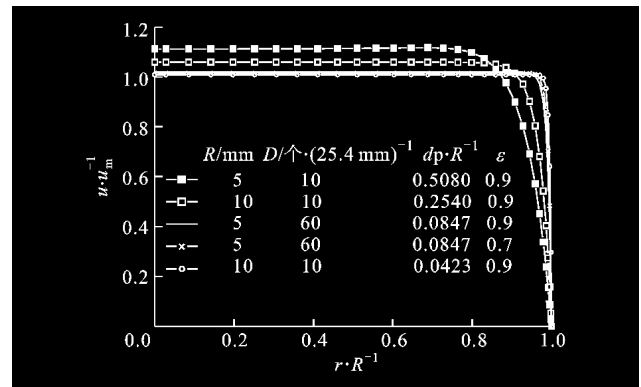


图2 归一化速度分布

2.2 压降

从图 3 可见,金属泡沫管单位管长的压降 Δp 随孔密度 D 的增加呈指数增长,不同管径、相同孔密度的泡沫管压降基本相同(2 组曲线对应于 2 种来流速度 u_m).这说明,金属泡沫管的压降主要取决于金属泡沫的结构而不是管壁的摩擦.通过比较可见,数值模拟的结果和分析解^[3]十分接近,说明数值模拟的结果是正确的.图 4 是金属泡沫管单位管长

的压降随孔隙率的变化曲线.可见,对同一孔密度的泡沫管,压降随孔隙率的增加而减小,这也与解析解^[3]十分一致.

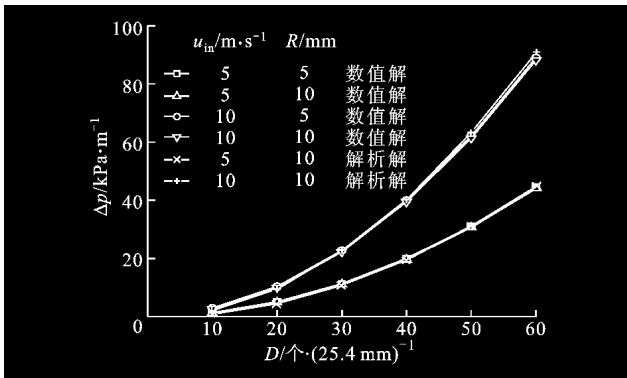


图3 单位管长压降随孔密度的变化(ε=0.9)

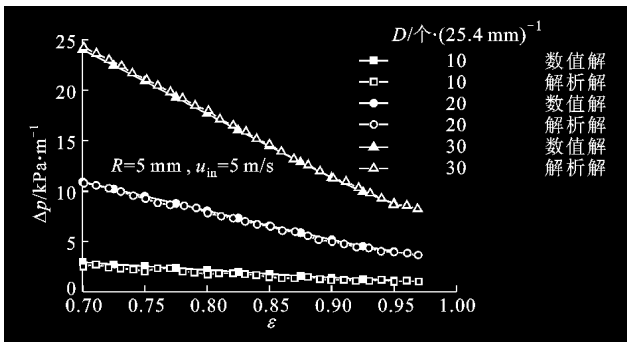


图4 单位管长压降随孔隙率的变化

2.3 温度分布

影响泡沫管内流-固归一化温度分布的因素较多,图5所示为给定孔隙率条件下的归一化温度分布曲线.其他因素的影响将在后面换热系数部分进行分析.

由图5可见,流体和固体温度均随离开壁面距离的增大而迅速降低,但流体和固体之间的温差随离开壁面距离的增大而逐渐增大.另外,孔密度对流体温度的影响大于对固体温度的影响.这是由于在壁面附近流体和固体温度相等,且速度梯度很大,对流起主导作用,所以流-固间的温差较小,在离开壁面很短的距离之后,由于金属泡沫的作用,管子截面上的速度很快趋于均匀,热传导起主导作用,从而导致流-固间的温差加大.

2.4 泡沫管内换热的影响因素

金属泡沫管内平均努塞尔数的计算公式为 $\overline{Nu} = \bar{h}(2R)/k_f = 2Rq_w/[k_f(T_w - T_{f,b})]$ ^[7],其中 \bar{h} 为平均换热系数,下标 w 表示壁面, $T_{f,b}$ 为流体的截面平均温度.影响换热的因素有管径 R、孔隙率 ε、孔密度 D、雷诺数 Re 和流体、固体导热系数之比 k_f/k_s 等,

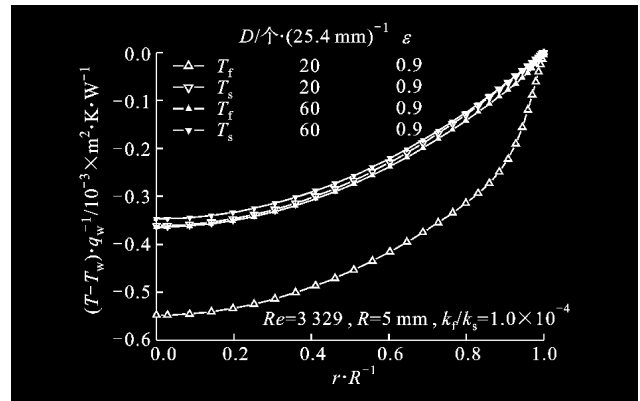


图5 截面温度分布曲线

下面分别分析其对换热的影响.

2.4.1 孔隙率和 d_p/R 的影响 图6所示为孔隙率 ε 和归一化几何尺寸 d_p/R 对 Nu 的影响.在其他参数一定的情况下, Nu 均随着孔隙率和 d_p/R 的减小而增大.这是因为孔隙率减小意味着固体骨架增多,导热增强,而 d_p/R 的减小意味着孔径相对于管径减小,流体和固体界面之间的比表面积增大,从而使换热增强.

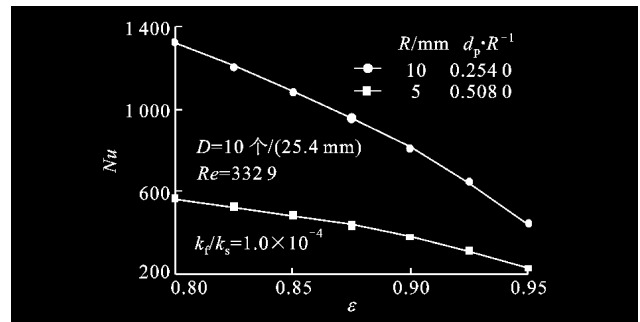


图6 孔隙率 ε 和 d_p/R 对 Nu 的影响

2.4.2 孔密度的影响 图7显示了孔密度 D 对 Nu 的影响.在其他参数一定的情况下, Nu 随着孔密度的增大而增大.这是因为孔密度的增大意味着孔径的减小,在孔隙率一定的情况下,金属泡沫固体骨架的直径相应减小,引起流体和固体界面之间的比表面积增加,从而强化了流体和固体之间的换热.

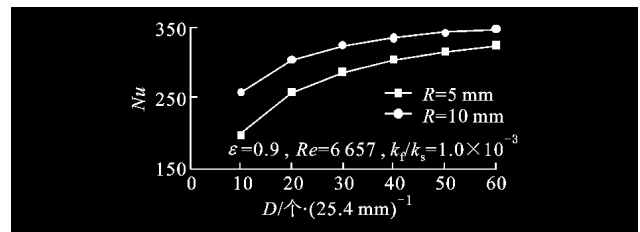


图7 孔密度对 Nu 的影响

2.4.3 雷诺数的影响 在不同的孔密度下, Nu 随 Re 的变化曲线如图8所示,可见随着 Re 的增大,

Nu 也逐渐增大,而且在不同孔密度情况下的变化趋势相同.

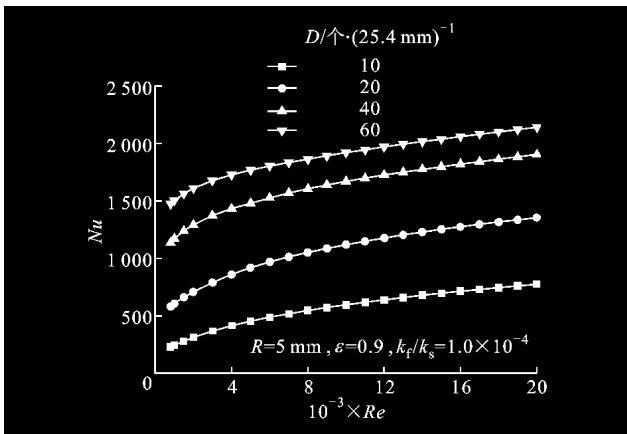


图8 Nu 随 Re 的变化曲线

2.4.4 导热系数比 k_f/k_s 的影响 图9显示了不同孔密度下流体和固体的导热系数之比 k_f/k_s 对 Nu 的影响.从图中可以看出:当流体的导热系数接近固体的导热系数时($k_f/k_s > 0.1$), k_f/k_s 几乎对 Nu 没有影响;当 $k_f/k_s < 0.1$ 时,随着 k_f/k_s 的减小, Nu 迅速增大.在不同 k_f/k_s 下, Nu 均随孔密度的提高而变大,当 $k_f/k_s < 0.001$ 时,孔密度的变化对 Nu 的影响较大,当 $k_f/k_s > 0.001$ 时,孔密度的变化对 Nu 的影响很小.这说明,当 $k_f/k_s < 0.001$ 时,流体的热阻是影响换热的主要因素.

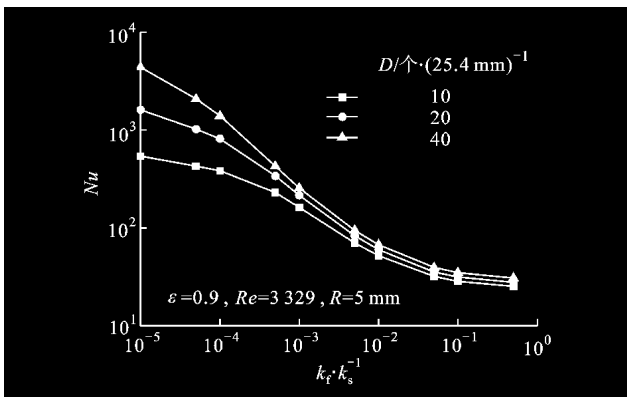


图9 Nu 随 k_f/k_s 的变化曲线

从以上的分析可以看出,金属泡沫管内的换热主要取决于金属骨架的导热和金属骨架与流体之间的对流换热(忽略辐射).金属骨架的导热与泡沫的孔隙率、管径以及骨架的导热系数有关,金属骨架与流体之间的对流换热主要与流体和固体界面之间的比表面积有关.孔隙率的减小和孔密度的增大都使得固体导热面积和对流换热面积增加,从而起到强化换热的作用.

3 结论

本文对恒热流边界条件下金属泡沫管内的强制对流换热进行了数值模拟,分析了孔隙率、孔密度、导热系数比和雷诺数等不同参数对流动和换热的影响,并将数值模拟结果与方形通道的试验数据进行了对比,验证了程序的正确性.模拟结果表明:金属泡沫大大减薄了边界层,使截面速度分布十分均匀,截面温差也很小.泡沫管的平均努塞尔数随孔隙率的减小或孔密度的提高而增大,且随流体和固体导热系数比 k_f/k_s 的减小而增大.当 $k_f/k_s > 0.001$ 时,采用低孔密度的金属泡沫既可以强化换热,同时也可以大大减小压降.总之,采用金属泡沫管可以大大强化传热,但同时阻力增加很多,实际应用时应权衡其利弊进行选择.

参考文献:

- [1] CALMIDI V V, MAHAJAN R L. Forced convection in high porosity metal foams [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2000, 122(3): 557-565.
- [2] ZHAO C Y, KIM T, LU T J, et al. Thermal transport in high porosity cellular metal foams [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2004, 18(3): 309-317.
- [3] LU W, ZHAO Changying, TASSOU S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers, part I: metal-foam filled pipes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(15/16): 2751-2761.
- [4] VAFAI K, TIEN C L. Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24(2): 195-203.
- [5] 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2002:207-231.
- [6] LI Z Y, TAO W Q. A new stability-guaranteed second-order difference scheme [J]. Numerical Heat Transfer: B, 2002, 42(4): 349-365.
- [7] KAYS W M, CRAWFORD M E, WEIGAND B. 对流传热与传质[M].陈熙,翟殿春,译.北京:科学出版社,1986:65,104.

(编辑 葛赵青)