

# THE UNIVERSITY OF WARWICK

**Original citation:**

Tian, Yuan, Zhao, Chang-Ying, Li, Zeng-Yao and Qu, Zhi-Guo. (2008) Flow and heat transfer in metal foam filled pipes under two extended Darcy models. *Journal of Engineering Thermophysics*, Vol.29 (No.8). pp. 1380-1382.

**Permanent WRAP url:**

<http://wrap.warwick.ac.uk/52396>

**Copyright and reuse:**

The Warwick Research Archive Portal (WRAP) makes the work of researchers of the University of Warwick available open access under the following conditions. Copyright © and all moral rights to the version of the paper presented here belong to the individual author(s) and/or other copyright owners. To the extent reasonable and practicable the material made available in WRAP has been checked for eligibility before being made available.

Copies of full items can be used for personal research or study, educational, or not-for-profit purposes without prior permission or charge. Provided that the authors, title and full bibliographic details are credited, a hyperlink and/or URL is given for the original metadata page and the content is not changed in any way.

**A note on versions:**

The version presented here may differ from the published version or, version of record, if you wish to cite this item you are advised to consult the publisher's version. Please see the 'permanent WRAP url' above for details on accessing the published version and note that access may require a subscription.

For more information, please contact the WRAP Team at: [wrap@warwick.ac.uk](mailto:wrap@warwick.ac.uk)

warwick**publications**wrap  
  
highlight your research

<http://go.warwick.ac.uk/lib-publications>

# 两种拓展达西模型对金属泡沫填充管中 流动与传热的影响

田原 赵长颖 李增耀 屈治国

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要** 本文就恒热流条件下金属泡沫填充管中的流动与传热进行了数值模拟, 其中采用局部非热平衡的两方程模型作为能量方程, 分别采用 Brinkman 拓展达西模型和 Brinkman-Forchheimer 拓展达西模型作为动量方程, 并把两者进行比较和分析。数值模拟结果表明: 在两种拓展达西模型下解得的速度场不同, 但是解得的温度场差异不大, 因而其  $Nu$  数差异也很小。金属泡沫填充管的  $Nu$  数高达数百甚至数千, 表明其换热性能很强, 但同时却有着较高的压降。

**关键词** 多孔金属泡沫; 拓展达西模型; 局部非热平衡两方程模型; 数值模拟  
**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2008)08-1380-03

## FLOW AND HEAT TRANSFER IN METAL FOAM FILLED PIPES UNDER TWO EXTENDED DARCY MODELS

TIAN Yuan ZHAO Chang-Ying LI Zeng-Yao QU Zhi-Guo

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

**Abstract** The flow and heat transfer in pipes filled with metal foams were studied numerically. In this study, the two-equation model based on LNTE (Local Non-Thermal equilibrium) was employed as energy equations, furthermore the flow models extended by Brinkman and Brinkman-Forchheimer were employed as momentum equations respectively, and a comparison between these two models was made and analysed. The numerical results indicate that the velocity profiles under two models are different, but their temperature profiles are almost the same as each other, consequently, there are barely differences between the  $Nu$  numbers under two models. According to numerical results, the  $Nu$  number of metal-foam filled pipes is of the order of magnitude of  $10^2 \sim 10^3$ , which is much bigger than that of bare pipes and conventional heat exchangers. The metal-foam filled pipes exhibit excellent heat transfer performance, however high pressure drop is produced at the same time. By using the program for heat transfer calculation of metal foam that is developed by us, someone can make optimization of heat transfer and pressure drop in practical applications.

**Key words** porous metal foam; Brinkman/Forchheimer extended Darcy model; LNTE; numerical simulation

## 0 引言

金属泡沫由于其金属骨架导热能力强, 其内部复杂的孔道能加强流体扰动, 而且它的比表面积也非常大, 这些特点都为传热带来了很大优势。

金属泡沫填充的圆管如图 1 所示, 流体强制对流流过金属泡沫的通孔, 通过与金属骨架间的换热从而吸收从管外加热的热量, 管壁处为恒定热流。金属泡沫材料的孔隙率为 0.9, 孔密度的变化范围

为 10~60 ppi,  $Re = 500 \sim 5000$ 。

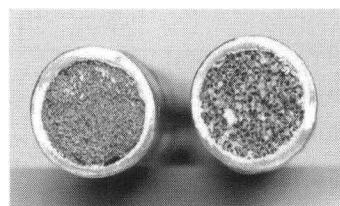


图 1 金属泡沫圆管换热器实物图

Fig.1 Heat exchangers with metal foam inserted in pipes

收稿日期: 2008-01-17; 修订日期: 2008-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50576069); 国家基础研究 973 资助项目 (No.2006CB601203); 国家自然科学基金重点资助项目 (No.50636050)

作者简介: 田原 (1984-), 男, 陕西富平人, 博士研究生, 从事传热传质方面的研究。

## 1 物理模型及数学描写

由于当基于渗透率  $K$  的  $Re_K$  大于 10 时, 达西定律不能准确描述多孔介质内的流动, 而要作一定的修正, 常用的为 Brinkman 拓展达西模型<sup>[1]</sup>(各图中简称为 B Model) 和 Brinkman-Forchheimer 拓展达西模型<sup>[2]</sup>(各图中简称为 BF Model)。本文分别采用这两个模型作为动量方程, 从而进行比较并分析。

考虑到流体(空气)与泡沫骨架的导热系数相比差得很大(4 个数量级), 局部热平衡的一方程模型就不能较好地反映泡沫骨架和流体间的传热, 所以在本文中能量方程采用两方程模型<sup>[3,4]</sup>, 充分考虑了流体与泡沫骨架间的温度差异。关于热物性如有效导热系数, 我们采用 Boomsma 等建立的 tetrakaidecahedron 三维结构热阻合成模型<sup>[5]</sup>来求得。

本文中假设: 金属泡沫材料是各向同性的; 流动和换热均达到充分发展(数值模拟结果表明入口段极短, 可以忽略); 常物性; 忽略自然对流和辐射换热。在以上假设下, 取圆柱轴对称坐标, 则两个不同模型的动量方程<sup>[4,6]</sup>和无量纲的能量方程<sup>[3,6]</sup>可分别化为:

$$0 = -\frac{dp}{dz} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\mu_f}{K} u \quad (1)$$

$$0 = -\frac{dp}{dz} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\mu_f}{K} u - \frac{\rho_f}{\sqrt{K}} u^2 \quad (2)$$

$$0 = R^2 \left( \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s}{\partial r} \right) - \frac{h_{sf} a_{sf} R^2}{k_{se}} (\theta_s - \theta_f) \quad (3)$$

$$2U = \frac{k_{fe} R^2}{k_{se}} \left( \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_f}{\partial r} \right) + \frac{h_{sf} a_{sf} R^2}{k_{se}} (\theta_s - \theta_f) \quad (4)$$

边界条件:

$$\text{当 } r = R \text{ 时, } u = \theta_s = \theta_f = 0$$

$$\text{当 } r = 0 \text{ 时, } \frac{du}{dr} = \frac{d\theta_s}{dr} = \frac{d\theta_f}{dr} = 0 \quad (5)$$

由于速度场与温度场不耦合, 先由式(1)或式(2)求出流场, 能量方程中的  $h_{sf}$  可由求得的速度场显式得到, 然后联立式(2)和式(3)可求出无量纲温度  $\theta_s$  和  $\theta_f$ , 在得到  $\theta_f$  后再求出截面平均无量纲温度  $\theta_{f,b}$ , 进而再由式(6)算出  $Nu$ :

$$Nu \frac{\bar{h}}{k_f} 2R = \frac{2Rq_w}{k_f (T_w - T_{f,b})} = -\frac{2k_{se}}{k_f \theta_{f,b}} \quad (6)$$

## 2 数值模拟

先编写 Brinkman 模型的程序, 调试通过后运行并和分析解<sup>[6]</sup>(采用 Brinkman 模型, 没有考虑二次项的影响, 其它都一样)比较, 验证了程序的正确性。

然后再在源项中加入二次项影响, 编制 Brinkman-Forchheimer 模型的程序并把两者进行比较。程序采用圆柱轴对称坐标, 网格为 40(轴向)×300(径向), 进一步增密网格时  $Nu$  数变化小于 1/1000, 所以可认为已得到网格独立解。孔密度从 10~60 ppi,  $Re$  从 500~5000 以 500 为步进, 对两模型分别做了 32 和 40 个不同工况, 从而进行比较。另外还做了不同介质下(R134a 过热蒸气)的模拟, 结果与实验吻合, 验证了程序的正确。

## 3 结果及讨论

### 3.1 无量纲流速 $U=u/u_m$

两模型下无量纲流速的对比如图 2 所示(10 ppi,  $Re = 500$ ,  $R = 5$  mm 时), 可以看出无论采用 Brinkman-Forchheimer 模型还是 Brinkman 模型, 金属泡沫填充管内的流动边界层都是比较薄的, 并且采用 Brinkman-Forchheimer 模型时得到的流速边界层要更薄。数值模拟发现, 当孔密度增大时这个薄层还会更薄, 如图 3 所示。流速在一个薄层中就达到了其最大值, 这为强化传热提供了前提。

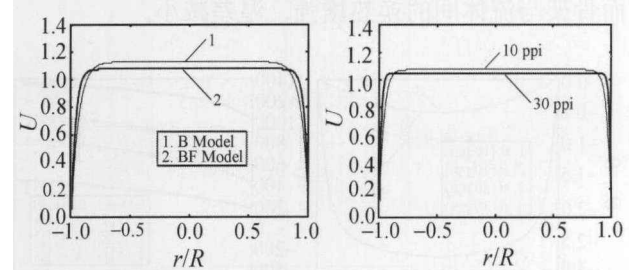


图 2 两不同模型下  $U$  的比较

图 3 孔密度对  $U$  的影响

Fig.2  $U$  under two models

Fig.3  $U \sim$  pore density

### 3.2 压降

当  $Re$  数较小时, 流动主要受线性的粘性力支配;  $Re$  数较大时, 流动主要受非线性的惯性力支配。图 4 反映了压降与截面平均流速的关系, 可以看出: 压降均随截面平均流速的增大而增大; 在流速较低时, 压降与流速近似成线性, 这是因为  $Re$  数较小时流动主要受线性的粘性力支配; 而当流速较高时, 占主导地位的非线性惯性力使压降偏离线性

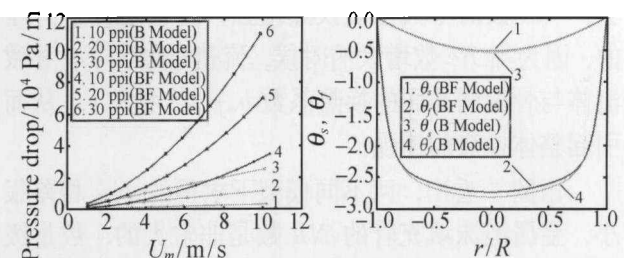


图 4 两不同模型下的压降

图 5 两不同模型下的无量纲温度

Fig.4 Pressure drop

Fig.5 Temperature profiles

关系,考虑了二次项的 Brinkman-Forchheimer 模型得到的压降较好地反映了非线性惯性力在  $Re$  数高时的主导作用。

由图 4, 如当  $U_m = 5.0$ , 采用 Brinkman 模型时, 10、20、30 ppi 分别对应的压降大约为 1550、5800、12700 Pa/m, 该结果与文献 [6] 的结果一致。另外, 由图还可看出: 在相同流速下, 增大孔密度会引起压降的增大。

### 3.3 流体与泡沫骨架无量纲温度 $\theta_s, \theta_f$

由图 5 看出流体和骨架间的温差较大, 不可忽略, 这也说明了采用两方程模型的必要性。

两种模型的不同反映在动量方程的不同, 从而得到的速度场不同, 但是由图 5 可以看出, 两不同模型下解得的温度场差异不大, 因而其  $Nu$  数差异也很小。

由图 6 看出, 当孔密度从 10 ppi 变为 30 ppi 时: 骨架无量纲温度略有增大, 但变化很小; 而流体无量纲温度增大较多, 说明当孔密度变大时流体温度更接近壁面温度; 骨架与流体间的温差显著减小, 这也反映了当孔密度增大时引起换热面积增大, 从而骨架与流体间的换热增强, 温差减小。

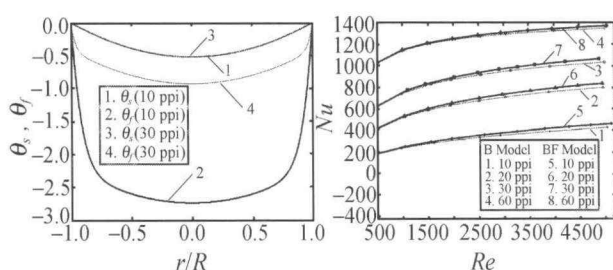


图 6 无量纲温度 ~ 孔密度 图 7 两不同模型下  $Nu \sim Re$   
Fig.6 Temperature profiles ~ pore density Fig.7  $Nu \sim Re$

### 3.4 $Nu$ 数

由图 7, 在固定孔隙率 (0.9) 的情况下, 孔密度 (ppi) 的增大导致传热增强, 这是合乎情理的, 因为当孔隙率一定时, 骨架与流体间的面密度与孔密度的平方成正比, 所以增大孔密度时, 骨架与流体间的换热面积按平方关系增长, 从而换热性能也增强了。  $Re$  数的增大也使换热增强, 这也是合乎情理的, 因为当  $Re$  数增大的时候, 流速也增大了, 导致流体与骨架间冲刷的换热系数  $h_{sf}$  [6,7] 增大了, 从而引起整体换热的增强。

由图 7 看出, 两不同模型下求得的  $Nu$  相差很小。金属泡沫填充管的  $Nu$  数是非常大的, 数量级为  $10^2 \sim 10^3$ , 相比同条件下光管 (层流, 壁面恒热流) 的  $Nu$  数仅为 4.36, 表明金属泡沫填充管的传

热性能是很强的。

但是金属泡沫填充管式换热器在具有高传热性能的同时, 它也有着较高的压降, 如: 10 ppi,  $Re = 500$  时, 金属泡沫填充管的  $Nu$  数为 181, 阻力系数  $C_f = 12.4$ ; 而对于同条件下光管的  $Nu$  数仅为 4.36, 但  $C_f = 64/Re = 0.13$ , 其阻力系数是非常小的。

## 4 结 论

(1) 考虑了二次项的 Brinkman-Forchheimer 模型得到的压降较好地反映了非线性惯性力在  $Re$  数高时的主导作用。另外: 压降随截面平均流速的增大而增大; 在相同流速下, 增大孔密度会引起压降增大。

(2) 流体与骨架间的温差较大, 不可忽略, 说明了采用两方程模型的必要性。两个模型下解得的温度场几乎一样, 因而其  $Nu$  数差异很小。

(3) 当孔密度增大时: 流体温度更接近壁面温度, 骨架与流体间的温差显著减小,  $Nu$  增大, 换热增强;  $Re$  数增大时,  $Nu$  数增大, 换热增强。

(4) 金属泡沫填充管的  $Nu$  数取决于  $Re$  数、孔密度等, 其数量级为  $10^2 \sim 10^3$ , 相比同条件下光管 (层流, 壁面恒热流) 的  $Nu$  数仅为 4.36, 表明金属泡沫填充管的换热性能很强, 但同时也有着较高的压降, 应用时应综合考虑换热性能和压降的匹配, 进行优化设计。

## 参 考 文 献

- [1] Nield D A, Bejan A. Convection in Porous Media. Second edition. New York: Springer, 1999
- [2] Bhattacharya A, Calmidi V V, Mahajan R L. Thermophysical Properties of High Porosity Metal Foams. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(5): 1017-1031
- [3] Calmidi V V. Transport Phenomena in High Porosity Fibrous Metal Foams: [Ph.D. Thesis]. Colorado: University of Colorado, 1998
- [4] Calmidi V V, Mahajan R L. Forced Convection in High Porosity Metal Foams. Journal of Heat Transfer, 2000, 122(2): 557-565
- [5] Boomsma K, Poulikakos D. On the Effective Thermal Conductivity of a Three-Dimensionally Structured Fluid-Saturated Metal Foam. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(3): 827-836
- [6] Lu W, Zhao C Y, Tassou S A. Thermal Analysis on Metal-Foam Filled Heat Exchangers. Part I: Metal-Foams Filled Pipes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(15-16): 2751-2761
- [7] Zukauskas A A. Convective Heat Transfer in Cross-Flow. Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer. New York: Wiley, 1987