

Experimental Investigation of Natural Convection in Metal Foam-Water

Zhao Peng, Yang Pan*, Weiyang Qian

School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi
Email: 714991749@qq.com, *hdjdpn@sina.com

Received: Mar. 6th, 2016; accepted: Mar. 28th, 2016; published: Mar. 31st, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, an experiment apparatus filled with metal foam-water is set up to investigate the problem of natural convection about porous medium. A mechanism of natural convection of metal foam-water is investigated by experiments. Influences of heating power and angle of inclination on natural convection in the cavity filled with metal foam-water are discussed. It is found that the Nusselt number increases with heating power and decreases with the angle of inclination and pore density PPI of metal foam. A correlation of Nusselt number and Raleigh number is obtained when the cavity is horizontal with 5 PPI and 10 PPI.

Keywords

Metal Foam-Water, Natural Convection, Difference of Temperature, Pore Density

金属泡沫 - 水的自然对流换热实验研究

彭 招, 潘 阳*, 钱维扬

华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌
Email: 714991749@qq.com, *hdjdpn@sina.com

收稿日期: 2016年3月6日; 录用日期: 2016年3月28日; 发布日期: 2016年3月31日

摘 要

本文针对多孔介质材料中的自然对流换热问题, 通过搭建充满金属泡沫 - 水的实验装置, 探究了金属泡沫

*通讯作者。

文章引用: 彭招, 潘阳, 钱维扬. 金属泡沫 - 水的自然对流换热实验研究[J]. 渗流力学进展, 2016, 6(1): 1-8.
<http://dx.doi.org/10.12677/apf.2016.61001>

沫-水自然对流换热机理,讨论了加热功率、箱体倾斜角度对方腔内金属泡沫-水两相自然对流换热的影响,实验发现努谢尔数 Nu 随加热功率的增加而变大,随着倾斜角度的增大而变小,随着金属泡沫孔密度PPI的增大而减小。最终得到了箱体水平放置时5 PPI和10 PPI努谢尔数 Nu 随瑞利数 Ra 的变化规律。

关键词

金属泡沫-水,自然对流,温差,孔密度

1. 引言

金属泡沫是近三十年发展起来的一种新型材料,是一种具有高扩展表面积、高孔隙率、分布杂乱无规则的多孔介质。金属泡沫一般是由具有高导热系数的金属材料制成,例如铜、铝、镍或者这些金属的合金。由于金属泡沫的高导热性和高表面积,是换热器强化传热选择的理想材料。在用于表面强化换热时,金属泡沫在蓄热槽、热交换机中应用广泛。

R. Dyga a、S. Witczak [1]探究了泡沫铝分别充满空气、水的有效导热系数,有效导热系数跟孔隙率、泡沫金属材料、流体物性有关。自然对流发生在孔隙中,这种现象对水填充泡沫的影响大于空气填充泡沫的影响。Zhao 等人[2] [3]对金属泡沫铝的自然对流传热进行了实验研究,探究了温度与有效导热系数的依赖关系,指出在大孔隙率($\varepsilon \geq 90$)的金属泡沫内,自然对流占总体换热的比重超过 50%。同时还研究了达西数 Da 和 Ra_m 对金属泡沫传热的影响。Kathare、Davidson 等[4] [5]实验研究了金属泡沫铜充满水的导热系数、渗透率、Forchheimer 系数,得到了 Nu_m 与 Ra_m 的关联式: $Nu = (0.007 \pm 0.005) Ra_m^{0.54 \pm 0.08} Pr_p^{0.48 \pm 0.10}$,他们同时研究了泡沫厚度、位置、传热导热比、泡沫参数(孔密度和丝径结构)的影响,实验表明在边界上有泡沫能大幅提高总的换热。当泡沫占据整个空间时,传热加强的主要原因是导热系数的增加,对流是很小的。金属泡沫的物理参数对 Nu 数均有影响。Dukhan 等[6] [7]和 Ghosh [8] [9]分别实验和理论研究了空气流过泡沫铝的传热。徐治国等[10]实验研究了水平面上金属泡沫铜与空气的自然对流,结果显示孔隙率和孔密度均对总传热热阻有影响。杨坤和 Vafai [11]-[13]利用了热不平衡能量公式,对流体流过充满多孔介质的通道模型,分析了多孔介质的热流分支,获得了恒温边界边界条件下的流体和骨架温度分布。目前对于金属泡沫填充水的自然对流实验研究还是比较少见的,而骨架与流体的温度分布只是在理论分析中得到,鲜有通过对金属泡沫骨架与水的温差分布来证实多孔介质复合体的局部热不平衡性。

本实验研究的目的是揭示方腔内充满金属泡沫-水的自然对流换热的机理。研究加热功率、倾斜角度对方腔内充满金属泡沫-水的自然对流换热的影响,以及局部非热平衡对强化传热的影响,最后讨论水平放置时 Ra 数对 Nu 数的影响规律。

2. 实验系统

实验系统原理图见图 1,该系统主要包含 4 个部分,第一部分是实验主体:厚度为 10 mm 的有机玻璃箱体(内部空间尺寸:长 × 宽 × 高 100×100×35 mm)、上下 10 mm 厚的铜板(100×100 mm),金属泡沫(长 × 宽 × 高 100×100×30 mm),去离子水,25 mm 厚的橡塑保温。第二部分是电源系统:加热板、稳压直流电源、电压表、电流表。电源是给实验装置提供能量的,电压表与电流表可测量系统输入的能量。第三部分是冷却系统:水箱、水泵、调节阀、流量计、冷却盘管。第四部分是数据采集系统:电脑、Fluke 数据采集仪、T 型热电偶。

实验箱体在侧边开了一个截面为 5×10 mm 的方孔,有利于维持箱体内压力的恒定,同时也有助于吸收水体积的膨胀和作为热电偶线的通道。

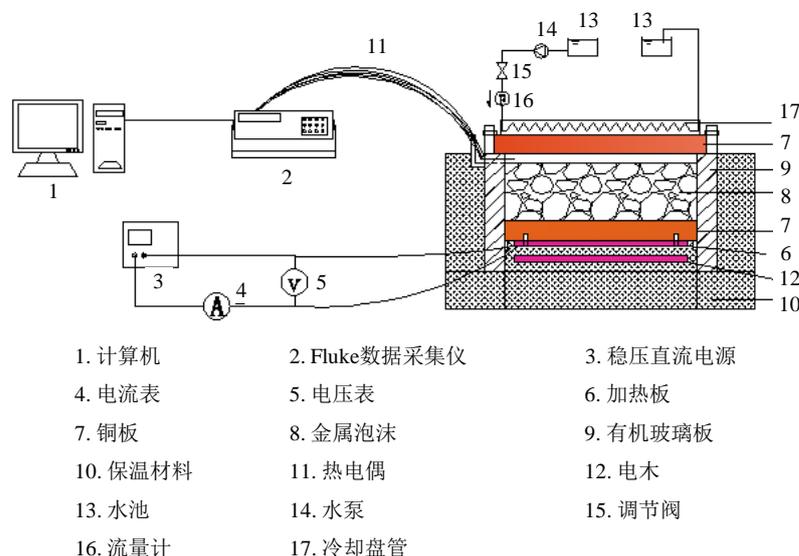


Figure 1. Schematic diagram of experimental system

图 1. 实验系统示意图

实验采用的是 5PPI 和 15PPI (PPI 是指单位长度 1 英寸内的孔隙个数)的铜金属泡沫, 参数见表 1。泡沫铜位于箱体中, 为了减少接触热阻, 铜金属泡沫与底部铜板之间用 1 mm 厚的导热胶进行粘接, 导热胶的导热系数为 $1.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。加热板与铜板之间涂上导热硅脂以减少接触热阻, 导热硅脂的导热系数大于 $9.65 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 加热功率分别为 60、80、100、120、140 W。实验按加热面与水平面不同的倾角放置, 分别为: 0 度(水平布置)、30 度、45 度、60 度和 90 度(竖直布置)。

实验中热电偶的布置共有三处, 第一处布置在上下铜板的表面, 在上铜板的内表面和下铜板的上表面的中心位置分别均匀布置三个热电偶。第二处布置在金属泡沫铜内, 这些热电偶布置在金属泡沫内部, 需将金属泡沫从中间刨开, 按图 2 的方式进行布置。第三处布置在保温材料上, 包括底部电木的上下表面和侧面橡塑保温的内外面。所有用于计算的数据都是在箱体内部的传热达到稳态时采集, 当上下铜板的温度半小时内温度波动不超过 0.1 度时认为箱体内部传热已经达到稳态[4]。

3. 数据处理和不确定度分析

在自然对流条件下, 方腔内的换热形式共有三种: ① 导热: 金属骨架与骨架间的导热, 流体之间的导热、骨架与流体间的导热; ② 对流: 骨架与流体之间的对流换热; ③ 辐射: 泡沫骨架与流体之间的辐射换热, 但因为实验温度不高, 故辐射换热可忽略。而在实验的传热过程中, 金属泡沫骨架间的导热、流体间的导热、骨架与流体间的导热、金属泡沫骨架与流体的对流换热是非常复杂的, 难以将其依次求出。故本文将这些传热用一个传热系数 h 表示。定义箱体内部的基于光板的传热系数 h [14]为:

$$h = \frac{\Phi_1}{A \cdot \Delta T} \quad (1)$$

式中: A ——铜板的表面积;

ΔT ——上下冷热铜板平均温度的温差, $\Delta T = T_h - T_c$, T_h 为热面铜板上表面的温度, T_c 为冷面铜板下表面的温度;

Φ_1 ——输入到实验箱体内部的热量, $\Phi_1 = \Phi_0 - \Phi_2$, Φ_0 是指总输入到实验装置中的能量, Φ_2 指从箱体四周和底部散失的热量。实验中, 箱体的损失约为总输入能量的 3%。

Table 1. The parameters of foam copper
表 1. 泡沫铜参数

参数	孔密度	孔隙率	孔径
泡沫铜	5 ppi	94.338	0.80
	10 ppi	94.009	0.50

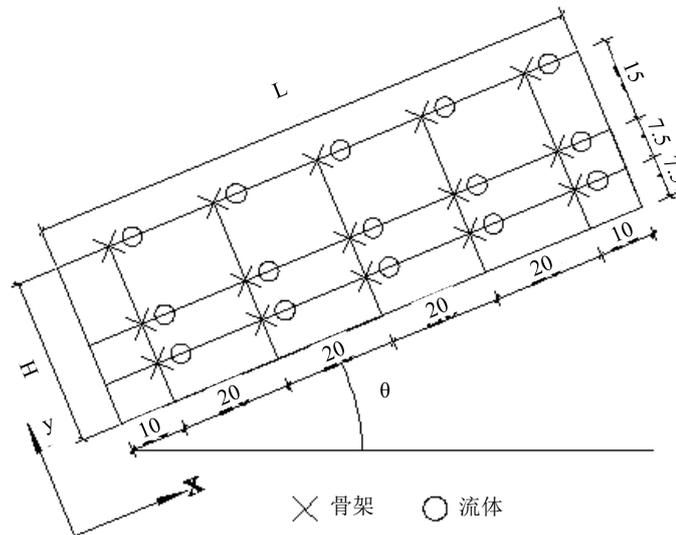


Figure 2. Installation site of thermocouple in copper and metal foam copper
图 2. 热电偶在铜板和金属泡沫铜上的布置位置

本文定义的 Ra 和 Nu [4]数如下:

$$Ra = \frac{g\beta(T_h - T_c)H^3}{(\alpha\nu)_f} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{hH}{\lambda_f} \quad (3)$$

式中, H ——特征长度, 为箱体空间高度;

g ——重力加速度;

β 、 α 、 ν ——在定性温度 $(T_h + T_c)/2$ 下水的物性参数。

实验中使用的温度探测器是直径为 0.127 mm 的 omega T 型热电偶, 采用 Fluke 数据采集仪采集温度, 经标定, 热电偶误差为 0.5℃。上下铜板的最小温差为 17.9℃。温差的最大相对误差为 4.8%, 净输入热流的最大相对误差为 2.1%, 铜板尺寸和箱体尺寸的加工精度为 0.1 mm。故复合传热系数 h 和努谢尔数 Nu 最大相对误差如下:

$$\left| \frac{\delta h}{h} \right| = \left| \frac{\delta Q_1}{Q_1} \right| + \left| \frac{\delta \Delta T}{\Delta T} \right| + \left| \frac{\delta A}{A} \right| = 2.1\% + 4.8\% + 2 \times \left| \frac{0.1}{100} \right| = 7.1\%$$

$$\left| \frac{\delta Nu}{Nu} \right| = \left| \frac{\delta h}{h} \right| + \left| \frac{\delta H}{H} \right| = 0.071 + \left| \frac{0.1}{35} \right| = 7.3\%$$

4. 实验结果与讨论

4.1. 局部热不平衡

金属泡沫铜的主要制作材料为铜，铜的导热系数为 $398 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ，而水的导热系数约为 $0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ，两者的导热系数相差很大，这种差异使得导热在金属泡沫 - 水的复合体中不均匀，致使骨架与其附近的水的温度不相同，出现了局部热不平衡，如图 3，在低功率加热初期(非稳态区)骨架与流体的温差不是很明显，因为在低加热功率下，热量很小，骨架的导热快，同时它的散热也很快，致使初期的温差不大。随着加热时间增长，箱体内的温度慢慢达到稳态。骨架与流体的温差就变得明显。并且在高加热功率下，这种温差更明显，说明高导热比的复合体在传热过程中确实存在局部非热平衡现象。

4.2. 箱体内金属泡沫骨架与流体的温差变化

图 4 所显示的是金属泡沫骨架平均温度与冷壁面处流体在方腔倾角为 0 度和 90 度时的温差，在低功率加热初期(非稳态)金属泡沫骨架平均温度与冷壁面处流体平均温度的温差随着时间逐渐增大，尤其在加热的前三分钟，温差基本不变，这可能是金属泡沫本身在蓄热造成的。随着加热时间增长，箱体内的温度慢慢达到稳态。这种温差也就趋于稳定。在稳态区域时，当加热功率为 60 W ，倾角为 0 度的温差在为 8°C 左右，倾角为 90 度的温差为 9°C ，根据公式(1)，当输入功率一定时，温差越大，换热系数 h 就越小，因此说明角度变大，箱体内部传热受到抑制。而在高功率 140 W 时， 0 度的温差为 14°C 左右， 90 度的温差为 18°C ，随着功率增大，这种抑制作用更加明显。

4.3. 倾角 θ 、加热功率对传热的影响

图 5 表示方腔内加入金属泡沫后在不同的加热功率下 Nu 数随着角度 θ 的变化，从图中可以看出，同一个角度时， Nu 随着加热功率的增大而增大。这是因为加热功率增大，下铜板表面温度升高，使得靠近上下铜板的流体温差增大，冷热流体的密度差增大，浮升力增大，致使自然对流换热增强。同一个加热功率下，随着角度的增大， Nu 数降低。但是随着角度降低的现象不是很明显。陶文铨等研究金属纤维板的大空间自然对流找到最优角 60 度左右，因为在大空间中对流不受空间的影响。而本实验研究的是在封闭方腔内的自然对流，当实验箱体倾斜时，在靠近热壁面的流体因浮升力而向上运动，靠近冷壁面的流体因冷却而向下运动，热量聚集在箱体的最高点，冷量汇集在箱体的底端，这样使得冷流体流过冷却表面不易把热量带走，从而抑制了换热。因此在有限空间中，倾斜角度会使得传热受到抑制。

4.4. 孔密度 PPI 的影响

图 6 表示了水平放置条件下， 5PPI 、 15PPI 的金属泡沫和光面 Nu 随 Ra 的变化情况。无论是光面还是加入金属泡沫， Nu 都是随 Ra 增大而增大，符合传热原理。当加入金属泡沫后，箱体内部传热明显高于光面时候的传热，最大达到 1.26 倍。因为相比光面实验，加入金属泡沫增强了方腔内的传热面积，即增加了扩展表面，使得导热热和对流换热同时增强。不同的孔密度其强化传热的强度不相同，图 6 中显示 5PPI 的强化传热效果优于 15PPI 的强化效果。其原因可能是 15PPI 的孔径小于 5PPI ，自然对流的流动受阻，使得其传热弱于 5PPI 。最终，通过分析，得到了 5PPI 和 15PPI 金属泡沫 Nu 数与 Ra 的关联式为： $Nu = 0.34Ra^{0.238}$ (5PPI)； $Nu = 0.164Ra^{0.276}$ (15PPI) ($2.5 \times 10^7 < Ra < 7 \times 10^7$)，如图 6 所示。

5. 结论

对于方腔内自然对流换热实验，本文研究了金属泡沫内部骨架冷壁面流体的温差，骨架与其附近流体存在的局部热不平衡现象；探究了影响自然对流换热的影响因素，实验结果表明：腔体内加入金属泡

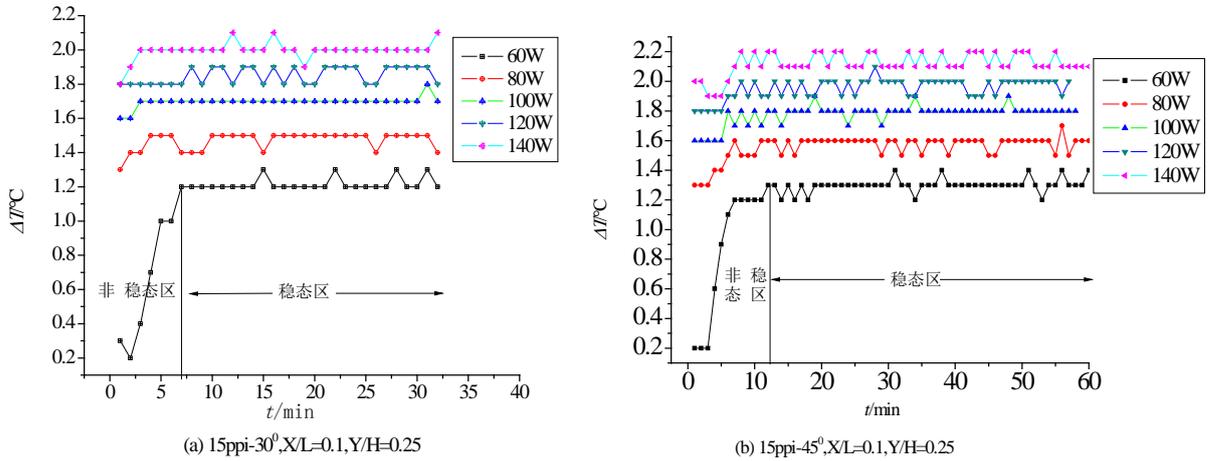


Figure 3. The temperature difference between the metal foam and the near fluid
 图 3. 金属泡沫骨架与其附近流体的温差

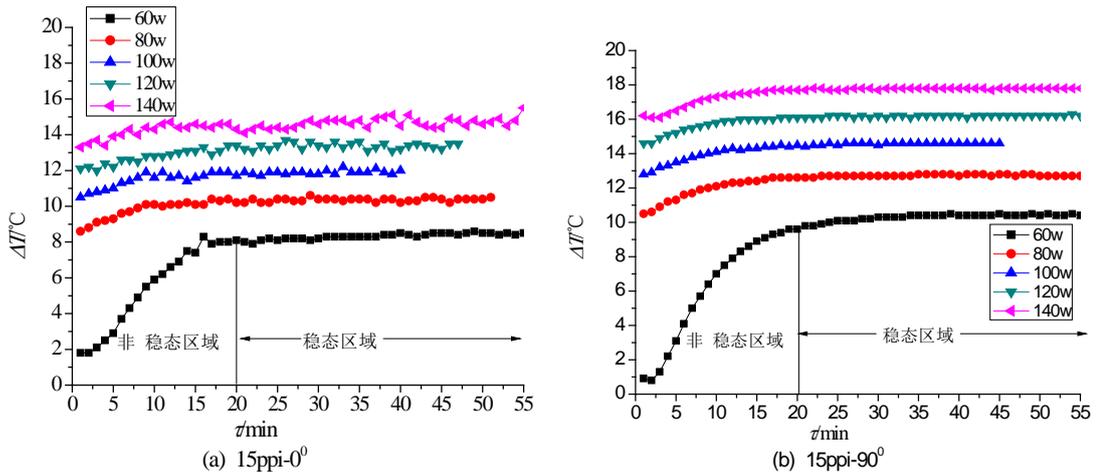


Figure 4. The temperature difference between the average temperature of metal foam and the average temperature of cold wall
 图 4. 金属泡沫骨架平均温度与冷壁面流体平均温度的温差

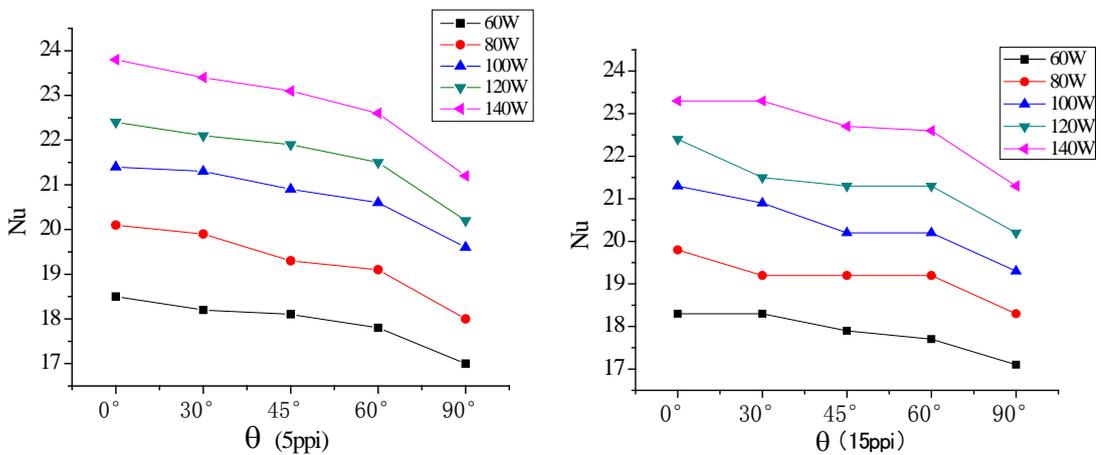


Figure 5. The relation of Nusselt number and angle of inclination
 图 5. Nu 数与角度 θ 的变化关系

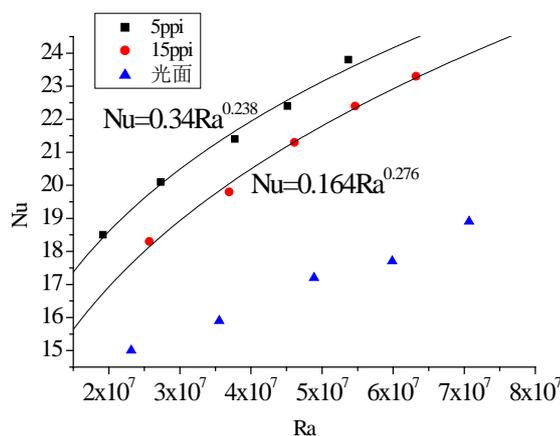


Figure 6. The relation of Nusselt number and Raleigh number

图 6. Nu 数随 Ra 数的变化

沫能强化换热，自然对流换热强度随着加热功率的增大而增大，随着腔体倾斜角度的增大而减小，随着孔密度 PPI 的增大而减小，通过实验数据的拟合分析，最后得到了 5PPI 和 15PPI 的 Nu 数与 Ra 的关联式：

$$Nu = 0.34Ra^{0.238} \quad (5PPI)$$

$$Nu = 0.164Ra^{0.276} \quad (15PPI) \quad (2.5 \times 10^7 < Ra < 7 \times 10^7)。$$

基金项目

国家自然科学基金：大孔隙率多孔介质中金属骨架导热与固液相变间复杂传热问题的研究(No. 51166003)。

参考文献 (References)

- [1] Dyga, R. and Witzak, S. (2012) Investigation of Effective Thermal Conductivity Aluminum Foams. *Procedia Engineering*, **42**, 1088-1099. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.500>
- [2] Zhao, C.Y., Lu, T.J., Hodson, H.P., et al. (2004) The Temperature Dependence of Effective Thermal Conductivity of Open-Celled Steel Alloy Foams. *Materials Science and Engineering*, **367**, 123-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.241>
- [3] Zhao, C.Y., Lu, T.J. and Hodson, H.P. (2005) Natural Convection in Metal Foams with Open Cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **48**, 2452-2463.
- [4] Kathare, V., Davidson, J.H., et al. (2008) Natural Convection in Water-Saturated Metal Foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **51**, 3794-3802. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.051>
- [5] Kathare, V., Davidson, J.H., et al. (2010) Buoyant Convection in Superposed Metal Foam and Water Layers. *Journal of Heat Transfer*, **132**, 014503-1-014503-4. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3194767>
- [6] Nihad, D., et al. (2006) Heat Transfer Analysis in Metal Foams with Low-Conductivity Fluids. *Journal of Heat Transfer*, **128**, 784-792. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2217750>
- [7] Nihad, D., et al. (2007) Heat Transfer Measurements in Metal Foam Subjected to Constant Heat Flux. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **32**, 624-631. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.08.004>
- [8] Indranil, G. (2008) Heat-Transfer Analysis of High Porosity Open-Cell Metal Foam. *Journal of Heat Transfer*, **130**, 034501-1-034501-4.
- [9] Indrani, G. (2009) Heat Transfer Correlation for High-Porosity Open-Cell Metal Foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, 1488-1494. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.07.047>
- [10] 屈治国, 徐治国, 陶文铨, 等. 通孔金属泡沫中的空气自然对流传热实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 1-4.

- [11] Yang, K. and Kambiz, V. (2010) Analysis of Temperature Gradient Bifurcation in Porous Media—An Exact Solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53**, 4316-4325.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.060>
- [12] Yang, K. and Kambiz, V. (2011) Analysis of Heat Flux Bifurcation inside Porous Media Incorporating Inertial and Disperion—An Exact Solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **54**, 5286-5297.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.014>
- [13] Yang, K. and Kambiz, V. (2011) Transient Aspects of Heat Flux Bifurcation in Porous Media—An Exact Solution. *Journal of Heat Transfer*, **133**, 052602-1-052602-12.
- [14] 汪天送, 屈治国, 陶文铨, 等. 烧结金属纤维板大空间自然对流实验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(4): 663-666.