

通孔金属泡沫中的空气自然对流传热实验研究

屈治国¹, 徐治国¹, 陶文铨¹, 卢天健²

(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. 西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 对水平面上通孔铜金属泡沫中的空气自然对流进行了实验研究, 研究了金属泡沫孔隙率和孔密度对总传热热阻的影响. 研究表明: 与光表面相比, 金属多孔表面有效地强化了自然对流散热, 使总热阻至少减小 20% 左右. 金属泡沫传热面积和自然对流流动阻力均受孔隙率和孔密度的影响. 在较小的孔隙率($\epsilon=0.9$)下, 对所研究的两个孔密度(400 m^{-1} 和 $1\,600\text{ m}^{-1}$), 格拉晓夫数 Gr 存在一个转折点, 当 Gr 小于该转折点值时, 孔密度较大的金属泡沫自然对流热阻较小, 而当 Gr 大于该转折点值时, 孔密度较小的金属泡沫热阻较小. 在较大孔隙率($\epsilon=0.95$)及实验所测的 Gr 范围内, 孔密度较大的金属泡沫热阻一直较小. 在所研究的两个典型孔密度(800 m^{-1} 和 $1\,600\text{ m}^{-1}$)下, 孔隙率较小的金属泡沫热阻较小, 但是在 $1\,600\text{ m}^{-1}$ 时, 其热阻减小量要明显大于 800 m^{-1} 时对应的减小量.

关键词: 通孔金属泡沫; 自然对流; 孔密度; 孔隙率; 热阻

中图分类号: TK214 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0001-04

Experimental Study of Natural Convective Heat Transfer in Horizontally-Positioned Cellular Metal Foams with Open Cells

QU Zhiguo¹, XU Zhiguo¹, TAO Wenquan¹, LU Tianjian²

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

2. MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Experimental study of air natural convective heat transfer in horizontally-positioned copper metallic foams with open cells was conducted. The effects of porosity and pore density on the total thermal resistance of the foam sample were quantified. It is found that the porous surface can enhance the natural convection and reduce the thermal resistance by about 20% in comparison with a smooth surface. The surface area density and mass flow rate in natural convection are affected by porosity and pore density simultaneously. When the porosity is relative small ($\epsilon = 0.9$), there exists a critical value of the Gr number (turning point) for two pore densities (400 m^{-1} and $1\,600\text{ m}^{-1}$). When the Gr number is less than this critical value, the foam with a higher pore density has the lower total thermal resistance, whereas when the Gr number exceeds the turning point value, the opposite holds. If the porosity is increased to $\epsilon = 0.95$, the foam with a higher pore density has the lower thermal resistance in the whole experimental range. For the two pore densities studied (800 m^{-1} and $1\,600\text{ m}^{-1}$), the foam with a lower porosity (from 0.95 to 0.9) has the lower thermal resistance and the decrease is more obvious for the case of $1\,600\text{ m}^{-1}$ than the case of 800 m^{-1} .

Keywords: metal foam; natural convection; porosity; pore density; thermal resistance

近些年来,金属泡沫这一新型多孔低密度材料的问世引起了力学及工程热物理学界的极大兴趣.金属泡沫分为开口和闭口两种,前者主要用于航空、建筑等结构夹芯材料,后者具有强化传热、降噪等多功能应用前景.对开口金属泡沫,根据不同需求,泡沫孔径(孔洞大小)可被制成从几十微米到几毫米,该材料具有很大的比表面积(可达 $2\,000\sim 10\,000\text{ m}^{-1}$)及低密度(固体材料的 $2\%\sim 10\%$)等特性,且任意金属材料均可加工制成,金属泡沫可烧接到管道的内外表面上,所以在热流体工程(新型高效紧凑式换热器)方面,该材料显示出了极大的潜在应用价值^[1-2].另外,该材料还可应用于内燃机和燃气轮机中,以改进燃烧稳定性,在电动汽车的燃料电池中也正在显示出巨大的应用前景^[3].在强制对流研究方面, Kim 等^[4]对铝泡沫金属中的空气冷却效果与传统翅片式换热器进行了对比,发现铝泡沫金属的传热效果明显优于后者. Calmidi 等^[5]对铝合金泡沫的常温导热系数进行了测定,并对空气为冷却介质的单相对流换热进行了实验及数值研究.赵长颖等^[6]首次测定了在真空状态下金属泡沫的当量导热系数随温度(由低温到高温)的变化规律,总体上确定了高温下热辐射在金属泡沫热传递中的作用.赵长颖等^[7-8]对金属泡沫套管式换热器进行了理论分析,得出了影响换热性能的归一化参数,结果表明金属泡沫换热器的换热性能明显优于传统翅片换热器.多孔介质内的自然对流研究主要针对自然条件下生成的类似堆积床或颗粒状多孔介质,这些介质的孔隙率在 $0.3\sim 0.6$ 之间,例如 Malashetty 等^[9]应用局部热不平衡假设对饱和稀疏堆积层的自然对流的稳定性问题进行了理论研究.对通孔金属泡沫中的自然对流研究目前较少, Phanikumar 等^[10]对空气中不同孔隙率和不同孔密度的铝泡沫进行了自然对流换热实验和数值模拟研究.现有的研究未涉及铜金属泡沫,而金属骨架的导热系数对自然对流性能有着重要的影响,本文开展了铜通孔金属泡沫中空气自然对流的研究,在以自然对流散热为基础的电子器件领域具有潜在的应用前景.

1 实验系统

实验系统主要由如图 1 所示的实验段、测试段和铜泡沫试件 3 部分组成.图 2 是加热部分的示意图,实验采用电加热膜加热,为使热流密度均匀,用固化导热胶在薄膜加热片上粘接一块尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的薄铜板,并在此铜板上布

置了热电偶,不同的实验试件则通过导热胶置于铜片之上.所测试铜泡沫试件的正背面分布如图 3 所示.本文共选用 7 种铜泡沫试件,相应的孔密度(每米孔的个数)、孔隙率(ϵ)和尺寸列于表 1 中.

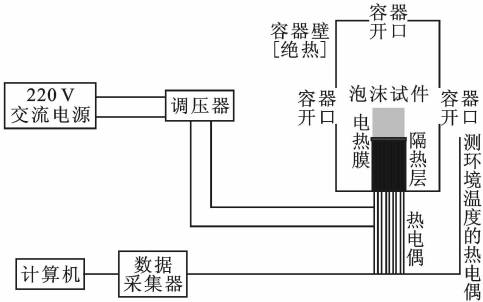


图 1 实验系统组成示意图

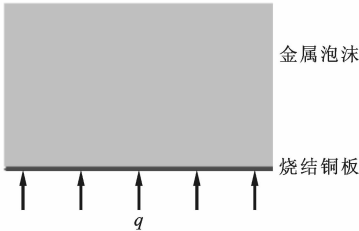
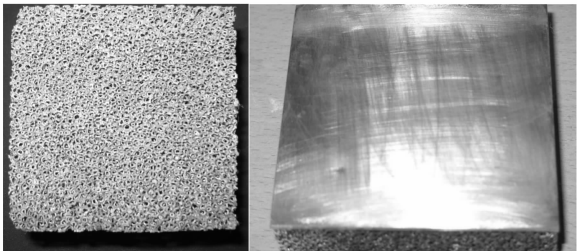


图 2 加热部分示意图



(a)试件的正面 (b)试件的背面

图 3 铜泡沫试件

表 1 铜泡沫试件尺寸表

试件编号	孔密度/ m^{-1}	ϵ	长/ $\text{mm}\times$ 宽/ $\text{mm}\times$ 高/ mm
1	400	0.90	$100\times 100\times 80$
2	400	0.95	$100\times 100\times 80$
3	800	0.90	$100\times 100\times 80$
4	800	0.95	$100\times 100\times 80$
5	1 600	0.90	$100\times 100\times 80$
6	1 600	0.95	$100\times 100\times 80$
7	1 600	0.90	$100\times 100\times 30$

2 实验结果分析

为了表示通孔金属泡沫的自然对流性能,本文

给出格拉晓夫数 Gr 和换热热阻的关系如下

$$Gr = g\alpha_v \Delta t l^3 / \nu^2 \quad (1)$$

$$l = A_p / P \quad (2)$$

式中: A_p 为底板的面积, m^2 ; P 为底板的周长, m . 自然对流总热阻的定义为

$$R = (T_w - T_s) / \Phi \quad (3)$$

式中: Φ 为加热功率, W ; T_w 表示底面平均温度, K ; T_s 为周围环境温度, K . 为了研究金属泡沫对自然对流的影响, 图4示出了烧结有铜金属泡沫和相同总体尺寸的光水平表面的热阻的对比, 可以看出由于金属骨架增加了自然对流的面积, 使其总热阻为光表面热阻的80%左右, 这说明多孔表面是强化自然对流的有效措施.

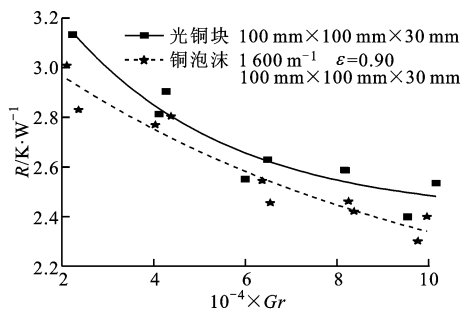
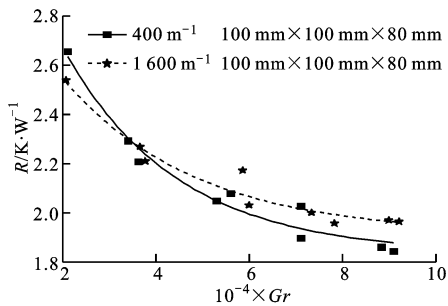


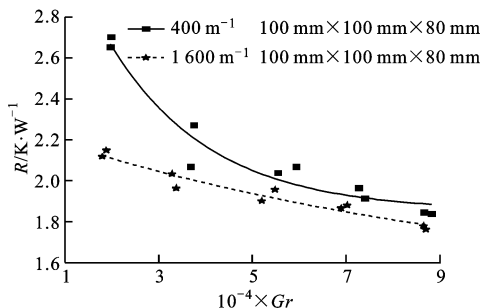
图4 相同尺寸光表面和铜泡沫的热阻比较

为了研究孔密度的影响, 图5a和图5b分别给出了孔隙率为0.90和0.95的两种开孔铜泡沫在所研究的两个对比孔密度(400 m^{-1} 和 1600 m^{-1})下换热热阻和 Gr 的关系. 从图中可以看出, 开孔铜泡沫的换热热阻随着 Gr 的增大而减小. 需要指出的是, 从图5a可以看出, 若孔隙率较小($\epsilon=0.90$), 则孔密度从 400 m^{-1} 增加到 1600 m^{-1} 时, 两种孔密度的开孔铜泡沫的换热曲线出现交点. 当 Gr 较小且小于交点处的转折 Gr 时, 1600 m^{-1} 的铜泡沫由于面积大而使其热阻较低; 当 Gr 大于转折点值时, 由于冷热壁面温差的增大使自然对流的驱动力增加, 孔隙率较小的铜泡沫骨架较密, 泡沫结构产生的对自然对流阻力的影响明显增加, 导致自然对流的流量减小, 使孔密度较大的铜泡沫热阻反而偏高. 从图5b可以看出, 孔隙率较大($\epsilon=0.95$)时, 两种孔密度的开孔铜泡沫的换热曲线没有交点, 孔密度较大的铜泡沫的换热热阻较小. 这是因为孔隙率较大的铜泡沫骨架较为稀疏, 流动阻力对自然对流流量的影响占次要地位, 孔密度较大的铜泡沫的比表面积较大, 其换热能力较强, 换热热阻较小.

图6a、图6b示出了孔密度分别为 800 m^{-1} 和



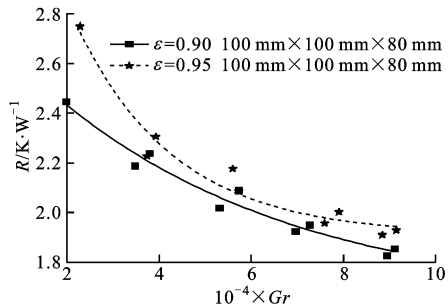
(a) $\epsilon=0.90$



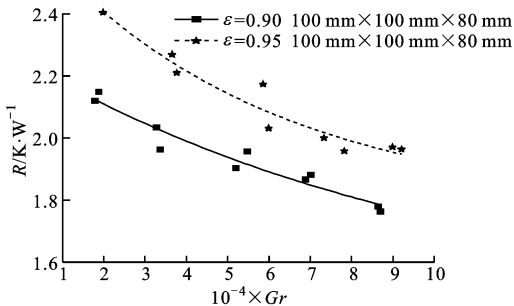
(b) $\epsilon=0.95$

图5 不同孔密度的铜泡沫的换热特性比较

1600 m^{-1} 时孔隙率对热阻的影响. 从图6a可以看出, 孔隙率较小($\epsilon=0.90$)的铜泡沫由于多孔面积大而使其热阻比孔隙率为0.95的小, 当孔密度为



(a) 孔密度为 800 m^{-1}



(b) 孔密度为 1600 m^{-1}

图6 不同孔隙率的铜泡沫的换热特性比较

1600 m^{-1} 时, 孔隙率较小($\epsilon=0.90$)的铜泡沫热阻比孔隙率较大($\epsilon=0.95$)的铜泡沫热阻减小的程度要大, 其原因是金属泡沫的表面积在不同孔密度下

受孔隙率变化的影响不同. 在孔隙率变化(0.90~0.95)相同的条件下, 随孔密度增加, 面积增加的程度变大, 从而导致图6b中两条热阻曲线间距较大.

3 实验测量不确定度分析

本文采用文献[11]提出的“二次幂法”进行不确定度分析. 所采用的热电偶采用二等标准的水银温度计进行标定, 其最小刻度为0.1℃, 按规定可以认为铜康铜热电偶的测温误差为0.2℃. 测量加热功率的功率表的等级是0.5级. 在不同加热功率下底面平均温度与周围环境温度的最小温差为5.0℃, 即所定义的自然对流热阻最大测量不确定度可以表示为

$$\left(\frac{\delta R}{R}\right)_{\max} = \left(\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta T)_{\max}}{(\Delta T)_{\min}}\right)^2\right)^{1/2} = \left((0.5\%)^2 + \left(\frac{0.2}{5.0}\right)^2\right)^{1/2} = 4.03\% \quad (4)$$

4 结 论

本文对置于水平面上的铜金属泡沫的自然对流的实验研究得出主要结论如下:

(1)金属多孔表面由于具有更高的比表面积, 可以有效地降低自然对流换热热阻;

(2)金属泡沫孔密度对自然对流的影响规律因孔隙率不同而异, 在孔隙率较小时, 由金属骨架的阻力引起的自然对流流量的影响在高 Gr 时表现较为突出;

(3)金属泡沫孔隙率对表面积的影响在高孔隙率下影响更为突出, 从而使通过降低孔隙率来减小热阻的作用更加明显.

参考文献:

[1] BOOMSMA K, POULIKAKOS D, ZWICK F. Metal foams as compact high performance heat exchangers [J]. *Mechanics of Materials*, 2003, 35: 1161-1176.

[2] TADRIST L, MISCEVIC M, RAHLI O, et al. About the use of fibrous materials in compact heat exchangers [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28: 193-199.

[3] KUMAR A, REDDY R G. Materials and design development for bipolar/end plates in fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 129: 62-67.

[4] Kim S Y, PAEK J W, KANG B H. Flow and heat transfer correlations for porous fin in a plate-fin heat exchanger [J]. *J of Heat Transfer*, 2000, 122: 572-578.

[5] CALMIDI V V, MAHAJAN R L. Forced convection in high porosity metal foams [J]. *J of Heat Transfer*, 2000, 122: 557-565.

[6] ZHAO C Y, LU T J, Hodson H P, et al. The temperature dependence of effective thermal conductivity of open-celled steel alloy foams [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 367 (1/2): 123-131.

[7] ZHAO C Y, LU W, TASSOU S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers, part II: tube heat exchangers [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2006, 49 (15): 2762-2770.

[8] LU W, ZHAO C Y, TASSOU S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers, part I: metal-foam filled pipes [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2006, 49 (15): 2751-2761.

[9] MALASHETTY M S, SHIVAKUMARA L S, SRIDHAR K. The onset of Lapwood-Brinkman convection using a thermal non-equilibrium model [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(6): 1155-1163.

[10] PHANIKUMAR M S, MAHAJAN R L. Non-Darcy natural convection in high porosity metal foams [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(18): 3781-3793.

[11] KLINE S J, MCLINTOCK F A. Describing uncertainties in single-sample experiments [J]. *Mechanical Engineering*, 1953, 75(7): 3-9.

(编辑 荆树蓉)