

铜泡沫冲击射流换热及流动可视化研究

邝九杰^{1,2} 冯上升^{2,3} 金东范² 卢天健^{2,3}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049;
2. 多功能材料和结构教育部重点实验室, 西安 710049;
3. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

摘要 本文实验研究了圆管冲击射流下通孔金属泡沫的流动换热特性, 测量了 10 PPI 和 30 PPI 铜泡沫的平均努塞尔数 Nu_{avg} , 同时采用烟线法得到冲击射流下铜泡沫的流场可视化图像。结果表明: 在较高雷诺数下, 存在最优冲击距离使铜泡沫的换热性能最优; 在低雷诺数下, 通孔铜泡沫的换热性能受冲击距离的影响较小。孔密度为 10 PPI 的铜泡沫较 30 PPI 铜泡沫的换热性能提高了约 30%。通过流动可视化解释了铜泡沫的换热性能随冲击距离和 PPI 变化现象。

关键词 金属泡沫; 圆管冲击射流; 烟线法; 换热; 流场可视化

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2015)09-2014-04

Heat Transfer and Flow Visualization Experiments of Copper Foam Under Impinging Jet

KUANG Jiu-Jie^{1,2} FENG Shang-Sheng^{2,3} JIN Tong-Fan² LU Tian-Jian^{2,3}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. MOE Key Laboratory for Multifunctional Materials and Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract This paper presents an experimental study on open-celled copper foam under circular impinging jet. Thermal performance of 10 PPI and 30 PPI copper foam were measured in terms of the average Nusselt number. The smoke wire technique was employed to obtain the impinging flow characteristics over metal foam. Experimental results showed that, under a higher Reynolds number an optimum impinging distance exists to provide the best heat transfer performance, while under a lower Reynolds number the effects of impinging distance on the heat transfer performance can be neglected. 10 PPI copper foam displays 30% higher thermal performance than that of the 30 PPI foam. The flow images can be used to explain the heat transfer behavior of metal foam.

Key words metal foam; circular impinging jet; smoke wire technique; heat transfer; flow visualization

0 前 言

冲击射流具有高效的换热效率, 被广泛应用于金属薄板退火、纺织品或纸张干燥、燃气轮机叶片冷却、电子器件冷却等需要快速干燥/冷却的工业过程中。现有研究表明, 喷嘴-冲击面间距、喷嘴出口形状、冲击面形状以及是否受限等因素直接影响冲击射流的换热效果^[1-3]。

通孔金属泡沫具有独特的综合性能, 已发展成为很有潜力的散热材料^[4-6], 其作为扩展表面与冲击射流结合的换热和流动特性研究也得到重

视^[7-13]。Kuang 等^[7]实验研究了通孔铜泡沫热沉在轴流风扇冲击射流下的换热特性, 显示存在最优的泡沫高度使对应的换热性能最优。Shih 等^[8,9]实验研究了泡沫高度对金属泡沫在圆形冲击射流下换热性能的影响, 发现在固定流量下存在最优泡沫高度, 另外发现减小孔隙率和孔密度均可提高热沉的换热性能。Kim 等^[10]实验研究了铝泡沫在圆管冲击射流下的换热特性, 结果显示其换热性能受冲击距离的影响较大, 且孔密度为 20 PPI 的铝泡

收稿日期: 2015-02-15; **修订日期:** 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51206128); 国家重点基础研究发展规划资助项目 (No.2011CB610305); 国家“111”引智计划资助项目 (No.B06024); 中国博士后基金资助项目 (No.2012M521766); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 陕西省博士后科研项目

作者简介: 邝九杰 (1986-), 女, 河南项城人, 博士, 主要从事金属泡沫在冲击射流下的流动换热研究工作。 **通信作者:** 冯上升, shangshengf@gmail.com

沫与 10 PPI 和 40 PPI 的铝泡沫相比换热性能最低。Jeng 和 Tzeng^[11,12] 实验研究了铝泡沫在冲击射流下的换热特性, 发现冲击距离和孔密度对换热的影响可忽略不计。针对金属泡沫在冲击射流下的流动特性, Fleischer 等^[13] 开展了可视化研究, 结果发现改变冲击距离对热沉的流动有很大影响, 但未开展相应的换热研究。综上可知, 目前国内外没有公开文献报道从流动可视化的角度研究通孔金属泡沫的冲击射流换热特性。

本文实验测试了通孔铜泡沫热沉在圆形冲击射流冷却下的换热和流动特性, 采用烟线法测量得到可视化流场, 着重分析冲击距离和孔密度对铜泡沫热沉热流特性的影响, 并通过可视化流场解释了金属泡沫的换热特性。

1 通孔铜泡沫热沉

实验测试了孔隙率为 0.94, 孔密度为 10 PPI 和 30 PPI 的通孔铜泡沫在圆管冲击射流下的流动换热特性。铜泡沫热沉由直径为 68 mm, 高度为 30 mm 的铜泡沫块黏接在 1.5 mm 厚铜基板上组成。图 1 为实验中采用的通孔铜泡沫热沉。表 1 给出了铜泡沫的物性参数, 其中 PPI 为泡沫孔密度, ϵ 为泡沫孔隙率, d_f 为杆径, K 为渗透率, C_E 为惯性系数, a_{sf} 为比表面积。

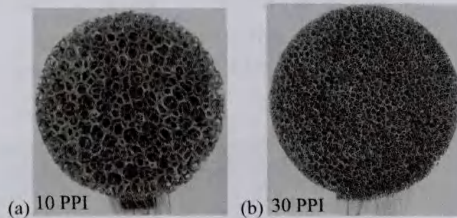


图 1 铜泡沫热沉 ($\epsilon = 0.94$): (a) 10 PPI; (b) 30 PPI

Fig. 1 Cu foam samples ($\epsilon = 0.94$): (a) 10 PPI; (b) 30 PPI

表 1 通孔铜泡沫物性参数

Table 1 Properties of Cu foam

PPI	ϵ	d_f/mm	K/m^2	C_E	a_{sf}
10	0.94	0.7	3.71×10^{-7}	0.11	2286
30	0.94	0.26	7.28×10^{-8}	0.0922	8009

2 冲击射流换热实验

2.1 实验装置

本文采用的圆管冲击射流换热实验装置如图 2 所示。冷却空气由鼓风机提供, 空气流量由变频器改变电机转速进行调节。空气离开风机后进入空气

换热器, 使射流出口空气温度与环境温度一致。射流管上游的立方体设定腔可使射流出口流动均匀稳定。圆形射流管采用有机玻璃制成, 内径 (D_j) 10 mm, 长 300 mm。射流管出口与泡沫顶端的冲击距离 (C) 可调节。热沉基板采用 Kapton 电加热膜恒定热流密度进行加热, 加热膜由直流电源供电。热沉背面采用隔热材料以阻止热量向环境散失。

热沉基板上开设有 6 个横截面尺寸为 0.8 mm \times 1 mm 的凹槽, 各凹槽内埋设有 T 型热电偶 (Ω OmegaTM, 单丝直径 0.127 mm), 6 个热电偶测得的平均温度即为基板温度 (T_w)。同时在射流口上游的管中心布置 1 个 T 型热电偶测量射流温度 (T_{in})。所有热电偶连接到数据采集设备 34970A (AgilentTM)。射流管出口流速 V_{in} 采用皮托管测量, 皮托管测量的压力信号连接到压力变送器 DSA3217 (ScanivalveTM)。

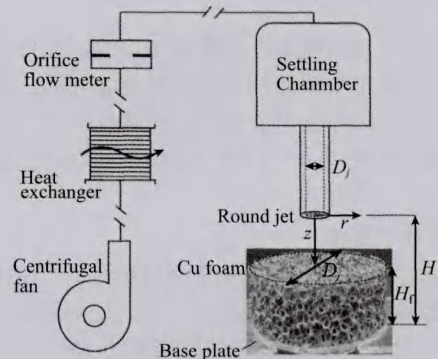


图 2 圆管冲击射流实验装置示意图

Fig. 2 Experiment setup of circular impingement

2.2 实验结果处理

雷诺数基于射流管出口流速 V_{in} 和射流管内径 D_j 定义:

$$Re_j = \frac{\rho_f V_{in} D_j}{\mu_f} \quad (1)$$

表征铜泡沫热沉换热性能的努塞尔 (Nu_{avg}) 数定义如下:

$$Nu_{avg} = \left(\frac{UI}{A_b(T_w - T_{in})} \right) \frac{D_f}{k_f} \quad (2)$$

其中, U 和 I 分别为加热片的输入电压和电流, D_f 为铜泡沫热沉直径, A_b 为热沉基板面积, T_w 为基板平均温度, T_{in} 为射流温度。

2.3 误差分析

热电偶测量误差估计为 0.2°C , 压力测量误差为 1 Pa, 实验过程中控制基板温度较射流温度高出约 20°C , Re 数和 Nu 数测量误差则采用 Coleman

和 Steele^[14] 建议的微分传递方法估算得到, 分别为 1.3% 和 3.6%。

3 烟线法流场可视化

烟线法是通过在金属电阻丝表面均匀涂上发烟油, 当电阻丝通电加热时, 发烟油受热汽化而形成油蒸汽, 蒸汽随气流离开电阻丝, 在常温气流中被迅速冷却凝结成为微细雾滴, 随后雾微粒跟随气流流动形成与流场一致的白色烟线。

本文在射流管出口处横置一根与流动方向垂直的金属电阻丝, 电阻丝由 3 根直径为 0.1 mm 的镍络丝均匀缠绕, 以增加发烟量并延长发烟时间。电阻丝采用直流电源加热。实验中采用的发烟油为甘油, 其被电阻丝加热后可形成白色的烟线。在暗室状态下, 采用聚光灯照射被测区域, 同时采用相机拍摄流场图片。

4 实验结果讨论

本文实验测量了孔密度为 10 PPI 和 30 PPI 的铜泡沫在冲击射流冷却下的换热努塞尔数, 并采用烟线法得到了冲击射流流场的可视化图片, 实验变量包括雷诺数 $Re_j = 1800, 7500, 15000$ 以及冲击距离 $C/D_j = 0 \sim 30$ 。

4.1 流场可视化

图 3 为孔密度 30 PPI 的铜泡沫在不同冲击距离下的流动图片, 其中图 3(a)~(d) 对应的雷诺数 $Re_j = 1800$, 图 3(e)~(h) 对应的雷诺数为 $Re = 7500$ 。可以看出, 当冲击距离较小 ($C/D_j = 1$ 和 $C/D_j = 4$) 时, 射流流体 (空气) 在泡沫上表面发生滞止, 大部分流体在泡沫顶端偏转而未进入到泡沫内部。随着冲击距离增大, 如 $C/D_j = 12$ 时, 更多的射流流体能够渗入到泡沫内部。当冲击距离继续增加至 $C/D_j = 20$ 时, 射流流体的径向横截面积大于热沉上表面, 部分射流流体绕开热沉而不会渗入热沉。从图 3(a)~(d) 可以看出, 对于雷诺数较小的工况, 大部分空气在泡沫顶部被偏转, 抵达加热面附近的空气流量很少。

图 4 为孔密度为 10 PPI 和 30 PPI 的铜泡沫热沉在 $Re_j = 7500$ 下的流场可视化图片, 其中图 4(a)~(d) 对应 10 PPI 泡沫, 图 4(e)~(h) 对应 30 PPI 泡沫。可以看出, 由于 10 PPI 孔密度泡沫的流阻更小, 流体更易进入到泡沫内部, 使得抵达热沉基板表面的空气流量更多而有利于换热。

4.2 换热特性

图 5 给出了铜泡沫热沉的换热 Nu 数与冲击距离 C/D_j 的关系。从图 5(a) 可知, 在高雷诺数

下 ($Re_j = 15000/7500$), 30 PPI 铜泡沫热沉的换热 Nu_{avg} 数首先随冲击距离的增加而增大, 这是因为冲击距离增大时更多的空气可以渗入到泡沫内部, 与图 3(e)~(g) 的流场结果一致。当冲击距离 C/D_j 大于 12 时, Nu_{avg} 数随着 C/D_j 的增大而减小, 这是因为冲击距离增加到一定程度时射流流体的径向横截面积大于热沉上表面, 进入泡沫内的流体总量减小, 从而降低泡沫的换热性能。当雷诺数较小时 ($Re_j = 1800$), 冲击距离对热沉换热性能的影响可以忽略, 原因是增加 C/D_j 虽然可以增加流体的渗入量, 但

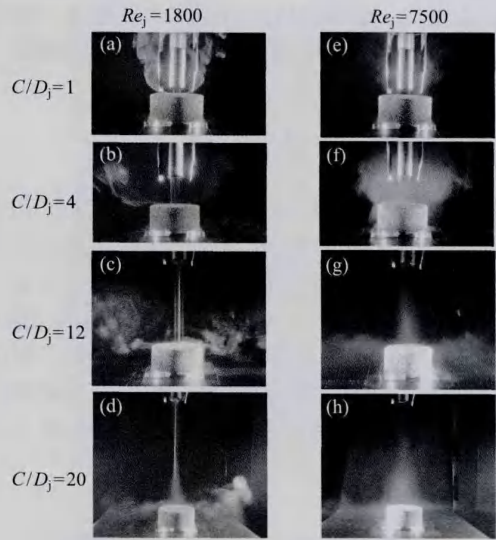


图 3 30 PPI 铜泡沫的流动可视化图片
Fig. 3 Visualization of 30 PPI Cu foam under circular jet

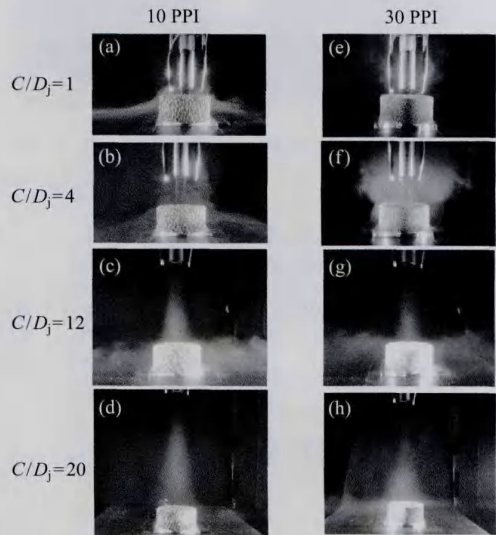


图 4 $Re_j = 7500$ 时铜泡沫的流动可视化图片
Fig. 4 Visualization of Cu foam under circular jet at $Re_j = 7500$

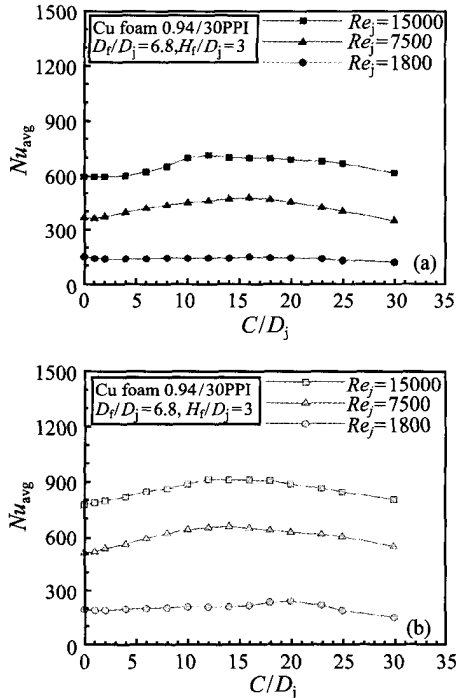


图 5 铜泡沫的 Nu_{avg} 与 C/D_j 之间关系: (a) 30 PPI; (b) 10 PPI

Fig. 5 Variation of the Nu_{avg} with C/D_j for of Cu foams under round jet impingement: (a) 30 PPI; (b) 10 PPI

泡沫的高流阻使渗入流体多从热沉上半部流出。比较图 5(a) 和图 5(b) 可以看出, 尽管 30 PPI 泡沫的比表面积为 10 PPI 泡沫的近 3.5 倍, 后者的换热性能反较前者提高了近 30%, 其原因是低孔密度泡沫的流阻更小, 流体更易渗入泡沫, 与图 4 中的流场结果一致。

5 结 论

本文实验研究了通孔铜泡沫热沉在冲击射流下的换热及流动特性, 主要结论如下:

- 1) 在高雷诺数下, 冲击距离的增加有利于射流流体渗入泡沫, 使得热沉 Nu_{avg} 数先随着冲击距离的增加而增大; 当冲击距离大于一定距离后, 射流流体的径向横截面积大于热沉上表面, 部分射流流体未能进入泡沫内部, 因此换热性能在最优冲击距离后随着冲击距离的增大而降低。
- 2) 在低雷诺数下, 冲击距离对泡沫冲击换热的影响很小。
- 3) 相同冲击距离下, 孔密度小的泡沫有利于流

体渗入泡沫, 其换热性能优于孔密度大的泡沫。

参 考 文 献

- [1] Martin H. Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces [J]. Advances in Heat Transfer, 1977, 13: 1-60
- [2] Jambunathan K, Lai E, Moss M A, et al. A Review of Heat-Transfer Data for Single Circular Jet Impingement [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1992, 13: 106-115
- [3] Viskanta R. Heat-Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1993, 6: 111-134
- [4] 卢天健, 何德坪, 陈常青, 等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用 [J]. 力学进展, 2006, 36: 517-535
Lu T J, He D, Chen C, et al. The Multi-functionality of Ultra-light Porous Metals and their Applications [J]. Advance in Mechanics, 2006, 36: 517-535
- [5] Lu T J, Stone H A, Ashby M F. Heat Transfer in Open-Cell Metal Foams [J]. Acta Materialia, 1998, 46: 3619-3635
- [6] Calmidi V V, Mahajan R L. Forced Convection in High Porosity Metal Foams [J]. Journal of Heat Transfer, 2000, 122: 557-565
- [7] Kuang J J, Kim T, Xu M L, et al. Ultralightweight Compact Heat Sinks With Metal Foams Under Axial Fan Flow Impingement [J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33: 642-650
- [8] Kim S Y, Lee M H, Lee K S. Heat Removal by Aluminum-Foam Heat Sinks in a Multi-Air Jet Impingement [J]. Ieee Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28: 142-148
- [9] Hsieh W H, Wu J Y, Shih W H, et al. Experimental Investigation of Heat-Transfer Characteristics of Aluminum-Foam Heat Sinks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 5149-5157
- [10] Shih W H, Chiu W C, Hsieh W H. Height Effect on Heat-Transfer Characteristics of Aluminum-Foam Heat Sinks [J]. Journal of Heat Transfer, 2006, 128: 530-537
- [11] Jeng T M, Tzeng S C, Liu T C. Heat Transfer Behavior in a Rotating Aluminum Foam Heat Sink with a Circular Impinging Jet [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 1205-1215
- [12] Jeng T M, Tzeng S C, Su H M, et al. Heat Transfer Characteristics of a Rotating Al-Foam Cylinder Under the Confined/Unconfined Impinging Jet [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 66: 71-81
- [13] Fleischer A S, Yakkatelli R, Wu Q H. A Visualization Study of the Flow Dynamics of a Single Round Jet Impinging on Porous Media [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34: 1008-1015
- [14] Coleman H W, Steele W G. Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers [M]. 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc, 1999