

析湿工况下泡沫金属内湿空气传热传质特性的实验研究

许旭东, 胡海涛*, 杨怀毅, 翁晓敏, 庄大伟, 丁国良

(上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

[摘 要] 实验研究了湿空气在泡沫金属内流动析湿过程的传热传质特性, 得出了不同因素的影响规律。研究结果表明, 随着入口空气相对湿度、温度和速度的增加, 总换热量增加, 且空气温度的影响比较明显; 当入口空气温度由 25 °C 增大到 35 °C 时, 换热量最大可增加 82%; 随着冷却水温度升高, 潜热和显热换热量均减小, 且潜热换热量降低幅度更大。与同体积的开窗翅片管式换热器相比, 析湿工况下泡沫金属换热器强化湿空气换热 40%~112%。

[关键词] 泡沫金属; 湿空气; 析湿; 换热; 压降

Experimental Investigation of Heat and Mass Transfer Characteristics of Moist Air in Metal Foam under Dehumidifying Conditions

XU Xu-dong, HU Hai-tao*, YANG Huai-yi, WENG Xiao-min, ZHUANG Da-wei, DING Guo-liang

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[Abstract] The heat transfer characteristics of moist air in metal foam during flow and dehumidification processes were investigated experimentally, and the influence principles of different factors were obtained. The results show that, the total heat transfer rate increases with the increasing inlet air relative humidity, temperature and velocity, and the influence of air temperature is more noticeable than that of the other factors; as the air temperature increases from 25 °C to 35 °C, the total heat transfer increases by 82%; the latent and sensible heat transfer rates decrease with the increasing water temperature, and the latent heat transfer has much greater deterioration. Compared to louvered fin and tube heat exchanger, copper foam heat exchanger with the same volume can enhance heat transfer capacity by 40%~112% under the dehumidifying conditions.

[Keywords] Copper foam; Moist air; Dehumidifying condition; Heat transfer; Pressure drop

0 引言

泡沫金属是一种高孔隙率的多孔介质(图1), 具有高热导率、复杂扰流空间结构等优点, 将其嵌入流道内, 可以提高单相流体的换热性能^[1-4]。将泡沫金属应用于换热器代替传统的翅片, 可以强化空气侧的换热特性、提高换热器性能^[5]。但泡沫金属用于析湿工况时, 由于泡沫金属纤维弯曲、倾斜且相互连接, 析湿产生的凝结水附着在泡沫金属纤维上, 会出现凝结液滴在泡沫金属内累积的现象^[6], 从而影响换热器的换热和压降。因此, 为了对泡沫

金属换热器进行优化设计, 湿空气在泡沫金属内流动析湿过程的换热与压降特性。

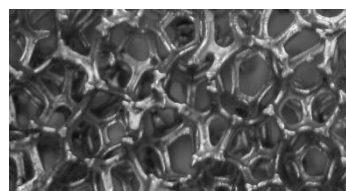


图1 泡沫金属照片

已有文献研究了干空气在泡沫金属内流动过程的换热特性, 研究结果表明泡沫金属的强化传热效果明显优于翅片^[7-10], 泡沫金属换热器的换热系数最

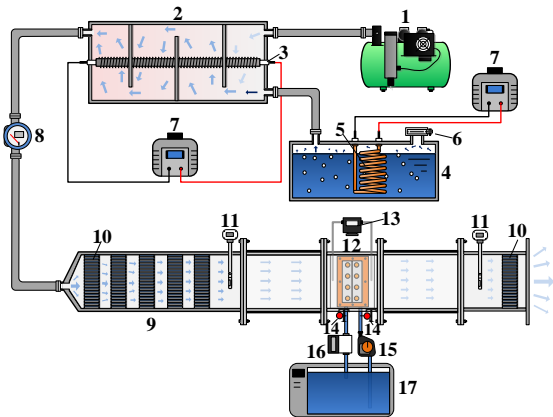
*胡海涛(1978-), 男, 助理研究员, 博士。研究方向: 制冷系统内多相流动与强化传热。联系地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学机电学院A楼435室, 邮编: 200240。联系电话: 021-34206295。E-mail: huhaitao2001@sjtu.edu.cn。基金项目: 上海市自然科学基金(No. 15ZR1422000)。

高为翅片管换热器的 3~4 倍^[5,11-12]。到目前为止，还没有关于析湿工况下泡沫金属内空气流动换热与压降特性的研究报道，本文将针对析湿工况下泡沫金属内湿空气传热传质特性开展研究。

1 实验装置与测试对象

实验系统包括空气侧系统，冷却水系统，测量数据采集系统。泡沫金属换热器空气侧特性研究实验系统的原理如图 1 所示。测试对象为泡沫铜样件，其孔密度为 15PPI，孔隙率为 85%，通过铜基焊料在真空高温炉内与铜板焊接，如图 2 所示。实验过程中，空压机出来的具有一定压力的空气与加热水箱中产生的蒸汽通过调节阀门，在混合腔内混合，保证在测试段入口处达到所需的空气温度、湿度以及空气流量。从恒温水箱流出的冷却水，通过微型水泵被输送到泡沫金属的铜板一侧，以冷却铜板；铜板将冷量传递给泡沫金属，从而使湿空气在泡沫金属内流动过程中出现析湿现象。通过温湿度传感器、流量计、压差计、热电偶，对测件进出口的温度/湿度、空气流量、样件前后的压差、进出口水温进行测量，并通过数据采集仪对各参数进行记录和数据输出。

本实验所采用的测量仪器测量精度如表 1 所示，由 Moffat^[13]方法分析得实验台的误差，换热量的误差小于 $\pm 14.1\%$ 。



1-空压机，2-空气加热器，3-空气加热管，4-加热水箱，5-水加热管，6-加水口，7-功率调节器，8-气体流量计，9-空气整流腔，10-蜂窝整流板，11-温湿度传感器，12-测试段，13-压差传感器，14-热电偶，15-微型水泵，16-液体流量，17-恒温水箱

图 1 系统原理图

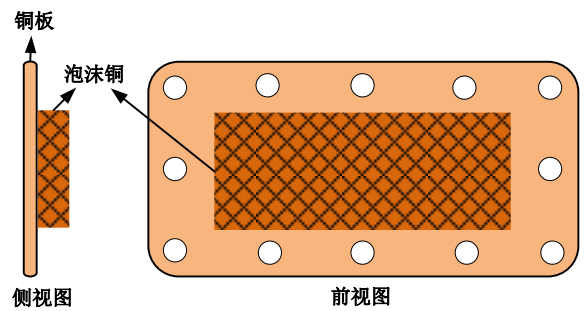


图 2 泡沫金属测试样件示意图

表 1 实验仪器误差分析表

测量参数	测量仪器	测量误差
空气干球温度	温湿度传感器	$\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
空气相对湿度	温湿度传感器	$\pm 0.8\text{ RH}$
进出口水温	T 型热电偶	$\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
换热器两端压降	压差传感器	$\pm 0.3\text{ Pa}$
冷却水体积流量	水流量计	$\pm 0.15\text{ L/min}$
空气体积流量	浮子流量计	$\pm 0.2\text{ L/min}$

2 湿空气速度、温度及相对湿度对泡沫金属内传热传质特性的影响分析

图 3 给出了入口空气相对湿度对泡沫金属内湿空气换热特性影响的变化规律。从图中可以看出，随着相对湿度的增加，显热换热逐渐减小。这是由于湿度小于一定值时析湿量小，凝结的水少，对显热换热的影响不大。入口相对湿度在 60% 左右时，凝结水在泡沫金属纤维表面聚集，对显热换热有一定的抑制作用，但是此时潜热换热量急剧增大；当入口相对湿度大于 75% 时，潜热换热高于显热换热。显热与潜热换热量的叠加，导致总换热量随着入口相对湿度的升高逐渐增大，且增长的速度逐渐减小。结果表明，随着入口相对湿度的增大，尽管有凝结液滴在泡沫金属表面积聚，总换热量仍然逐渐增加。

图 4 给出了入口空气温度对泡沫金属内湿空气换热特性影响的变化规律。从图中可以看出，随着入口空气温度的增加，潜热换热量增大，显热换热量略微增大，总换热量逐渐增加。这是由于，随着入口温度的增加，潜热换热量逐渐增大，此时泡沫金属纤维表面附着凝结液滴，增加了泡沫金属与空气的接触热阻，从而导致显热换热量的增长幅度减小。当温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 35 $^{\circ}\text{C}$ 时，总换热量增长了 82%。

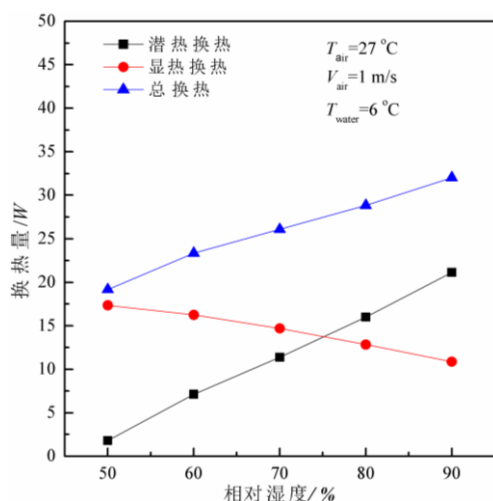


图 3 入口相对湿度对泡沫金属内换热特性的影响

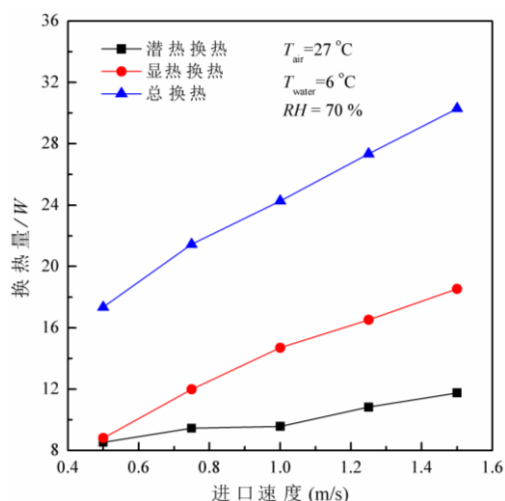


图 5 入口空气速度对泡沫金属内换热特性的影响

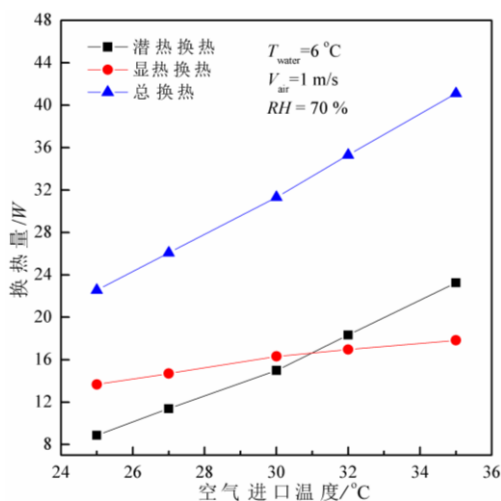


图 4 入口空气温度对泡沫金属内换热特性的影响

图 5 给出了相对湿度为 70% 时，空气速度对泡沫金属内湿空气换热与压降特性的影响规律。由图可知，随着空气速度的增大，对流换热的强度增加，尽管潜热量基本保持不变，但对于显热换热量和总换热量，它们随空气速度的增大而增加，这是由于雷诺数的增加使得对流换热系数增大。

3 冷却水温度对泡沫金属内湿空气换热特性的影响分析

图 6 给出了入口冷却水温度对泡沫金属内湿空气换热特性的影响规律。由图可知，随着冷却水温度升高，潜热和显热换热量均减小，且潜热换热量降低幅度更大，总换热量也呈现下降趋势。

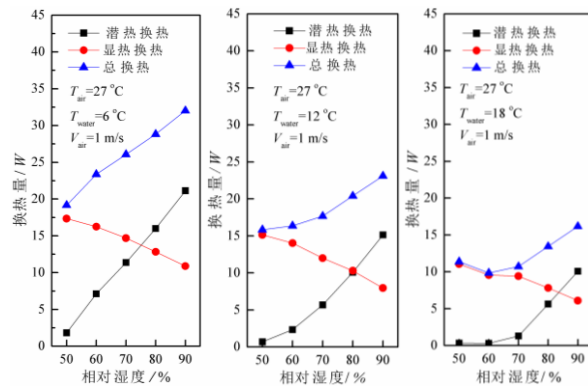


图 6 冷却水温度对泡沫金属内换热特性的影响

4 析湿工况下泡沫金属与翅片管换热器空气侧换热特性的对比分析

图 7 给出了湿空气流过同体积的泡沫金属与翅片管换热器时的换热性能对比。对比分析中的翅片管换热器翅片类型为窗片。由图可知，与同体积的开窗翅片管式换热器相比，泡沫金属换热器强化湿空气换热 40%~112%，在相对湿度较大的工况下换热量增加的更大。

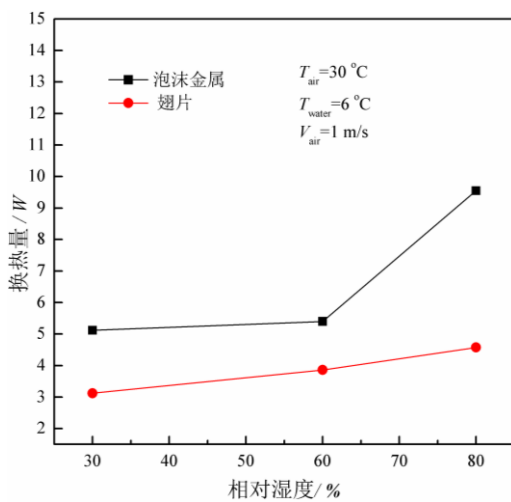


图 7 泡沫金属与开窗翅片管式换热器的性能对比

5 结论

1) 随着入口空气相对湿度增加,显热换热量逐渐减小,潜热换热量逐渐增大,总换热量增大;随着入口空气温度和流速的增加,潜热换热量、显热换热量及总换热量均增大,当温度从 25 °C 上升到 35 °C 时,总换热量增长了 82%。

2) 随着冷却水温度升高,潜热和显热换热量均减小,且潜热换热量降低幅度更大。

3) 与同体积的开窗翅片管式换热器相比,泡沫金属换热器强化湿空气换热 40%~112%。

参考文献:

[1] BHATTACHARYA A, CALMIDI V V, MAHAJAN R L. Thermophysical properties of high porosity metal foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(5): 1017-1031.

[2] CALMIDI V V, MAHAJAN R L. The effective thermal conductivity of high porosity fibrous metal foams[J]. Journal of Heat Transfer – Transactions of the ASME, 1999, 121(2): 466-471.

[3] CALMIDI V V, MAHAJAN R L. Forced convection in high porosity metal foams[J]. Journal of Heat Transfer – Transactions of the ASME, 2000, 122(3): 557-565.

[4] ZHAO C, KIM T, LU T, et al. Thermal transport in high porosity cellular metal foams[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2004, 18(3): 309-317.

[5] ZHAO C Y, LU W, TASSOU S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part II: Tube heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 2762-2770.

[6] 宋绍峰. 泡沫金属与针翅结构中对流换热研究[D]. 北京: 清华大学, 2007,.

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

[8] DAI Z, NAWAZ K, PARK Y, et al. A comparison of metal-foam heat exchangers to compact multilouver designs for air-side heat transfer applications[J]. Heat Transfer Engineering, 2011, 33(1): 21-30.

[9] Ejrali A., Hooman K, Gurgenci H. Application of high porosity metal foams as air-cooled heat exchangers to high heat load removal systems[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36: 674-679.

[10] 王晓鲁, 姜培学, 单彧垚. 泡沫金属与板翅结构强化换热研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(1): 121-123.

[11] ODABAE M, HOOMAN K. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a tube bank[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 36: 456-463.

[12] LIU S, ZHANG B M. Experimental research on heat transfer in a novel multi-functional structure[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(6): 1656-1660.

[13] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1998, 1(1): 3-17.