

研究论文

内壁填充环状金属泡沫的管内流动凝结换热

徐会金¹, 屈治国¹, 杜艳平¹, 何雅玲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, 陕西 西安 710049;

² 西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 通过采用在圆管内壁填充环状金属泡沫的方法强化管内对流凝结换热, 实验研究了制冷剂 R134a 在内壁填充环状金属泡沫管内的流动凝结的压降和换热, 克服了完全填充金属泡沫管流动阻力大的缺点。用于计算传热系数的管壁温度通过热电偶测量得到。综合分析了质量流速和两相流体干度对流动凝结压降及传热系数的影响。研究结果表明内壁填充环状金属泡沫管压降远大于光管, 压降随质量流速和干度的增加而迅速增大且呈非线性。通过壁面温度分布和温度波动对内壁填充环状金属泡沫管内的两相流型进行判别, 发现影响该类强化管凝结换热的两种主要流型: 分层流和环状流。内壁填充环状金属泡沫管的凝结传热系数大于光管, 且随着质量流速和干度的增加传热系数增大, 该类强化管流动凝结传热系数是光管的 2 倍左右。

关键词: 金属泡沫; 流动凝结; 压降; 流型; 换热

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2011.05.010

中图分类号: TQ 051.6

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157(2011)05-1246-06

Flow condensation in tube filled with annular metal foam

XU Huijin¹, QU Zhiguo¹, DU Yanping¹, HE Yaling¹, TAO Wenquan¹, LU Tianjian²

¹ State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering; ² MOE Key Laboratory of Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: The tube with internally sintered annular metal foam layer is used to enhance the flow condensation heat transfer. The pressure drop and heat transfer of flow condensation for refrigerant R134a in the tube partially filled with annular metal foam are experimentally investigated to overcome the disadvantage of large pressure drop for tubes fully filled with metal foam. The tube wall temperatures are measured with thermal couples to determine the heat transfer coefficient. The effects of mass flux and vapor quality of two-phase fluid on the pressure drop and heat transfer coefficient are analyzed accordingly. It is found that the pressure drop of tubes partially filled with metal-foam is much higher than that of smooth tubes and the pressure drop increases non-linearly and greatly as the mass flux and vapor quality increase. The flow regime is predicted by monitoring the distribution and fluctuation of cross-section temperatures, from which the stratified wavy flow and annular flow are detected. It is also revealed

2010-07-30 收到初稿, 2011-01-22 收到修改稿。

联系人: 屈治国。第一作者: 徐会金 (1984-), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50806057); 国家重点基础研究发展计划项目 (2011CB610306); 全国百篇优秀博士论文作者专项基金项目 (210141); 教育部新教师基金项目 (200806981013); 教育部新世纪人才计划项目 (NCET-10-0640)。

Received date: 2010-07-30.

Corresponding author: QU Zhiguo, associate professor, zgqu@mail.xjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50806057), the National Basic Research Program of China (2011CB610306), the National Excellent Doctoral Dissertation Foundation of China (210141), the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (200806981013) and the Program for New Century Excellent Talents in University of China (NCET-10-0640).

that the flow condensation heat transfer coefficient for tubes partially filled with annular metal foam is about 2 times that of smooth tube and can be improved as mass flux or vapor quality increases.

Key words: metal foam; flow condensation; pressure drop; flow pattern; heat transfer

引言

开孔金属泡沫具有相对密度小, 比表面积大、流体混合能力强、热导率高、力学性能好等优点, 在紧凑式换热器中可作为一种理想的传热表面。金属泡沫内单相对流换热已有大量研究^[1-7], 研究者们对其换热机理基本形成统一的认识, 然而金属泡沫内的两相流换热机理非常复杂, 涉及强制对流和两相流相变在金属泡沫多孔结构中的耦合换热, 而且金属泡沫的存在使流型判别更加困难, 相关的研究有限, 且集中在金属泡沫内的两相流动及沸腾换热的研究。Zhao 等^[8]对完全填充金属泡沫水平管内的沸腾换热进行了实验研究, 发现压降随干度和质量流速增长呈非线性增长, 而随着干度增加, 换热在高干度和低干度条件下呈现不同的变化趋势。Chen 等^[9]对去离子水在多孔通道内的两相流流动和沸腾换热进行了实验研究并发现多孔材料内的沸腾换热具有高效的散热特性。Odile 等^[2]对饱和水在矩形通道内的两相流动进行了实验研究并分析了饱和度对渗透率的影响。Topin 等^[10]以水为工质对金属泡沫通道内的流动沸腾现象进行了实验研究, 但是却仅仅研究了入口流速对沸腾换热的影响。Kim^[11]对水和 FC-72 在金属泡沫矩形通道内的流动沸腾换热进行了实验研究, 发现传热系数最高可达 $10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。Lu 等^[12]对水平金属泡沫管内的流动沸腾换热进行了基于流型的数值预测, 得出了相对合理的结果, 但流型判别基于光管关联式, 且没有考虑气液相界面上的质量传递, 但金属泡沫内表面的流动凝结换热尚未见报道。

凝结是一个液膜逐渐增厚的过程, 目前广泛采用微肋管来扩展表面并减薄液膜达到提高凝结换热效率的目的, 微肋管的换热效率和压降明显高于光管。与微肋片相比, 金属泡沫能提供高达 $10^3 \sim 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ 的扩展表面积且可以通过提高液膜有效热导率来减小液膜的热阻, 在强化凝结方面具备特有的潜力。Lu 等^[3]和 Zhao 等^[4]的研究表明完全填充金属泡沫管能极大地增强换热, 但其压降显著增加, 甚至超过工程所接受的范围, 因此部分填充金

属泡沫通道在保持强化传热性能的同时, 可减小金属泡沫管内的阻力。对于内壁填充环状金属泡沫管, 由于中心有一个阻力很小的空心区域, 故中心流速很高; 烧结在管壁上的环状金属泡沫层由于具有金属骨架这类阻碍物以及存在壁面效应, 因此其内部流体流速较小, 但湍动度高。金属泡沫骨架可以提供大量扩展的冷却表面, 且金属泡沫骨架具有强烈的流体混合能力, 但是开放区和泡沫区的分界面上存在很多中断的金属骨架, 能将两相流中的大个气泡粉碎为细小气泡, 这有利于凝结的进行。

本文对内壁填充环状金属泡沫管内的流动凝结换热进行了实验研究, 通过壁面温度波动对管内流型进行了预测, 并分析了干度和质量流速对流动凝结压降和传热系数的影响, 得出了对工程应用具有指导意义的结论。

1 实验装置及数据处理

图 1(a) 为实验系统流程图, 磁力泵作为整个系统的动力源将工质 R134a 从储液罐抽出后, 经过过冷器冷却后经过质量流量计, 然后进入预加热器后变成具有一定干度的两相流体, R134a 两相流体流经实验段时被冷水冷却从而进行流动凝结换热过程, 出口两相流体经过气液分离器后分为液体和气体, 液体直接流回储液罐, 气体经过冷凝装置变为液体后返回储液罐。实验段如图 1(b) 所示, 采用套管水冷凝的逆流方式进行 R134a 两相流体的凝结换热, 在内管 (内径 18 mm) 的内壁烧结厚度为 4 mm 的金属泡沫层, 进出口 R134a 温度通过 Pt-100 铂电阻测得, 实验段入口压力及压降分别通过压力传感器和压差传感器得到。如图 1(b) 所示, 长度为 1 m 的实验管外壁分 8 个截面刻有 32 个宽度和深度为 0.5 mm 的槽道, 32 对测量误差为 0.5℃ 的铜康铜热电偶通过锡焊的方式分别掩埋在对应的槽道内, 沿截面四周按 0°、45°、90° 和 180° 排列, 管内壁的温度可通过一维热传导方程得到。实验系统用橡塑海绵管包裹, 绝热良好。

本研究中换热管的材料为紫铜, 管内金属泡沫的材料也是紫铜, 特征参数为孔隙率 0.9, 孔密度

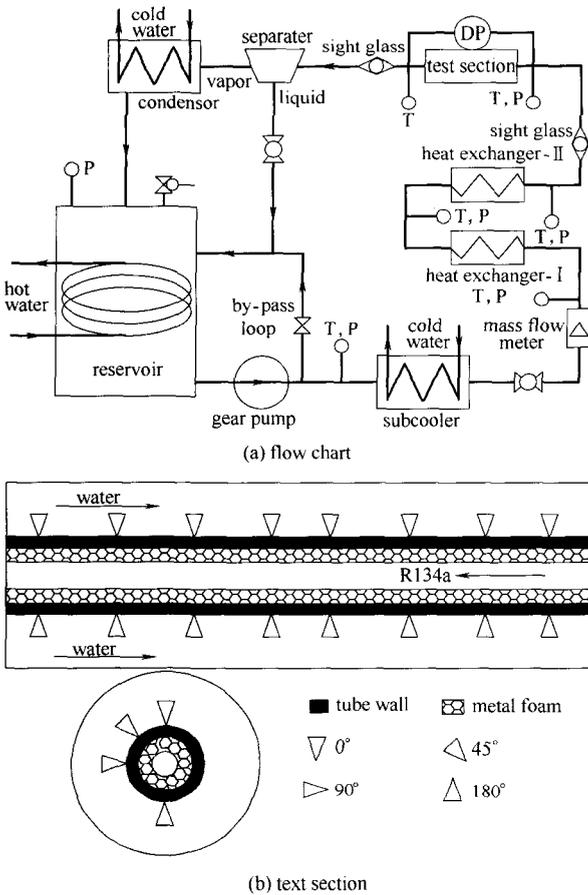


图 1 实验系统
Fig. 1 Experiment system

40PPI, 在 $p_s = 700$ kPa 饱和压力下进行实验。R134a 和冷凝水物性分别采用 REFPROP-7.0^[13] 和 PROPATH^[14] 程序进行计算, 通过 Keithley 2700 数据采集系统采集数据。工质 R134a 的质量流量通过质量流量计 (KROHNE) 测量, 实验段入口压力和压降通过压力变送器和压差变送器 (ROSEMOUNT) 测量, 实验段入口和出口干度及平均干度由式(1)~式(3) 给出。

$$x_{in} = (Q_{ph} - \Delta h) / (m \Delta h_{lv}) \quad (1)$$

$$x_{out} = x_{in} - Q_w / (m \Delta h_{lv}) \quad (2)$$

$$x = (x_{in} + x_{out}) / 2 \quad (3)$$

式中 Q_{ph} 为预热器的加热量, Q_w 为冷却水提供的冷却热流量, Δh 为预热器入口欠焓, m 为 R134a 质量流量, Δh_{lv} 为汽化潜热。本文采用测量壁面温度的方法计算流动凝结传热系数, 定义如下

$$\bar{h} = Q_w / [\pi DL (T_s - T_{w,in})] \quad (4)$$

式中 Q_w 为水冷却量, T_s 为饱和温度, $T_{w,in}$ 为管内壁面温度, D 和 L 分别为实验管内径和长度。

根据 Moffat^[15] 的误差传递方法可以完成本实验不确定度的计算, 压降不确定度最大为 7.8%, 换热不确定度最大为 15.3%。

2 实验结果及分析

2.1 压降

内壁填充环状泡沫管是一类复合换热管, 既能够借助管内烧结的金属泡沫提供可观的扩展表面, 流动阻力比完全烧结泡沫管小很多, 其换热研究很有意义。

R134a 工质在内壁填充环状泡沫管和光管内的流动凝结的压降实验数据对比如图 2、图 3 所示。图 2 为质量流速为 $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时压降随干度的变化关系, 从图中可知内壁填充环状泡沫管比光管压降大得多, 随着干度增加, 内壁填充环状泡沫管压降急剧增长且呈非线性。这是由于干度增加导致气相的速度和质量分数显著增加导致的。图 3 为干度为 $x=0.1$ 时压降随质量流速的变化关系, 该图同样地说明内壁填充环状泡沫管压降高于光管, 且内壁填充环状泡沫管的压降随质量流速增加而增大。图 2、图 3 说明由于同时具有金属泡沫和空心开放区域, 两相流体泡沫区和开放区分界面上发生复杂的速度变化和气液组分的变化, 气泡运动到分界面时容易受到泡沫骨架的拖曳而变形或者破碎, 宏观上表现为内壁填充环状泡沫管的阻力远大于光管。

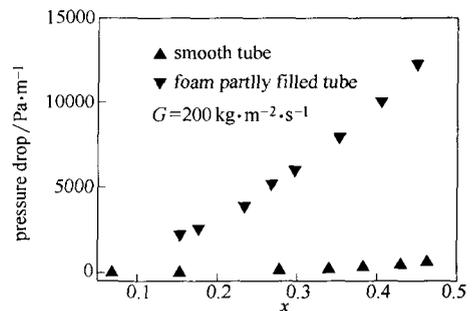


图 2 内壁填充环状泡沫管和光管压降随干度变化
Fig. 2 Pressure drop variation with quality of metal-foam partly filled tube and smooth tube

图 4 为不同质量流速下内壁填充环状泡沫管内流动凝结压降随干度的变化关系, 从图中可看到干度越大压降越大, 流量越大压降也越大, 而且随干度增大压降梯度明显增大。图 5 为不同干度下压降随质量流速的变化关系, 随着质量流速的增加, 压降呈现非线性增长, 其增长形式类似于图 4。图 4、

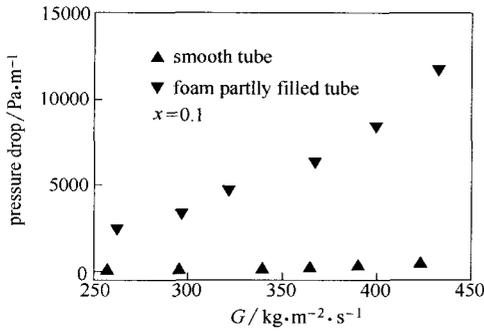


图 3 内壁填充环状泡沫管和光管压降随质量流速变化
Fig. 3 Pressure drop variation with mass flux of metal-foam partially filled tube and smooth tube

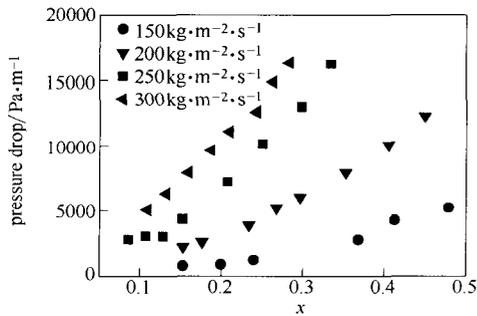


图 4 内壁填充环状泡沫管压降随干度的变化
Fig. 4 Pressure drop variation with quality for metal-foam partially filled tube

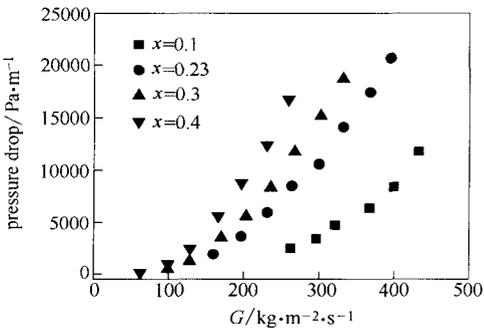


图 5 内壁填充环状泡沫管压降随质量流速的变化
Fig. 5 Pressure drop variation with mass flux for metal-foam partially filled tube

层流、间歇流和环状流。分层流为液相在下气相在上的流型，间歇流为大块气蛋或气柱间歇性地流过某一截面的流型，而环状流为气相在中心液相在四周的流型，通过截面温度可判别分层流和环状流。

图 6(a)、(b) 分别为质量流速 $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时干度 $x=0.15$ 和 $x=0.48$ 的壁面温度分布。在低干度下，易于发生分层流，这类流动的典型特征是流动平缓，温度波动较小 [图 6(a)]。在高干度下，则容易产生环状流，其特征是流动剧烈，湍动度较强烈，温度波动较大 [图 6(b)]。与图 6(a) 相比，图 6(b) 中不仅壁面温度波动加剧，且底部温度相对于顶部温度上升，说明由图 6(a) 中顶部由蒸气占据的分层流转变为图 6(b) 中顶部由液膜占据的环状流。因此可以判断质量流速为 $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时， $x=0.15$ 对应分层流而 $x=0.48$ 对应环状流，这与观察镜观察的流型一致。

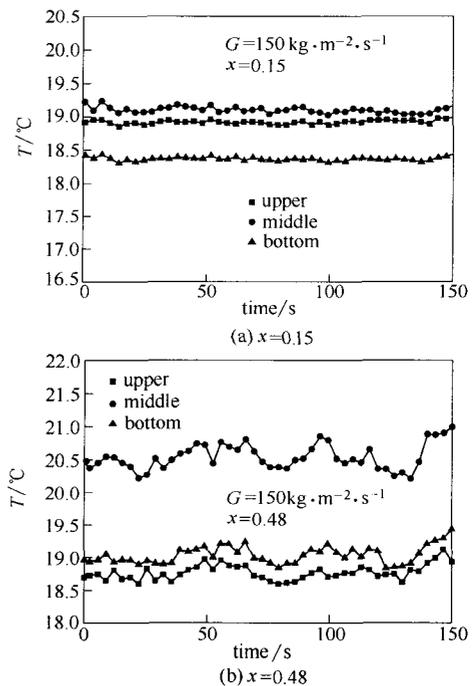


图 6 截面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution

图 5 说明在内壁填充环状泡沫管流动凝结过程中干度和质量流速依然是影响压降的两个重要因素。

2.2 流型预测

管内两相流换热严重依赖于流型，金属泡沫管内流型的研究是两相流研究的关键，但管内的金属泡沫阻碍了流型的观察。本文先通过图 1 中实验段前后两个观察镜观测流型，再结合截面温度分布和波动来确定流型。透过观察镜可看到三种流型：分

2.3 换热性能

图 7~图 10 分别给出了内壁填充环状泡沫管流动凝结换热与光管的对比以及质量流速和干度对内壁填充环状泡沫管内流动凝结换热的影响。图 7 为干度 $x=0.23$ 时 R134a 工质在内壁填充环状泡沫管与光管内流动凝结传热系数随质量流速的变化，从图中可看到随着质量流速的增加二者都呈上

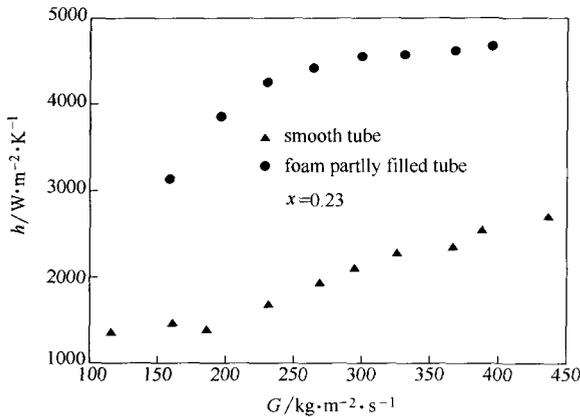


图 7 内壁填充环状泡沫管与光管传热系数随质量流速变化
Fig. 7 Heat transfer coefficient variation with mass flux for metal-foam partially filled tube and smooth tube

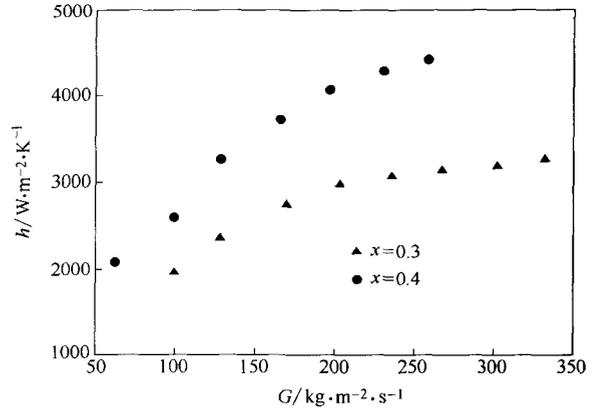


图 9 内壁填充环状泡沫管传热系数随质量流速的变化
Fig. 9 Heat transfer coefficient variation with mass flux for metal-foam partially filled tube

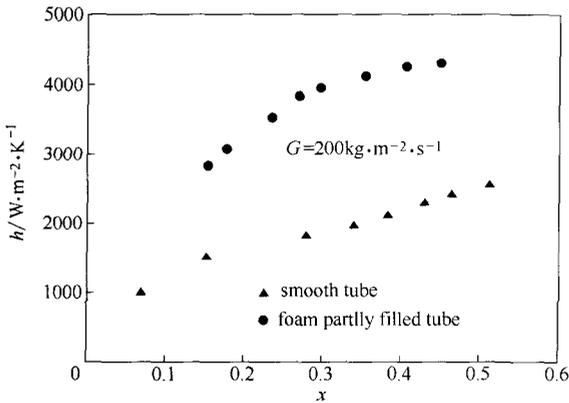


图 8 内壁填充环状泡沫管与光管传热系数随干度的变化
Fig. 8 Heat transfer coefficient variation with quality for metal-foam partially filled tube and smooth tube

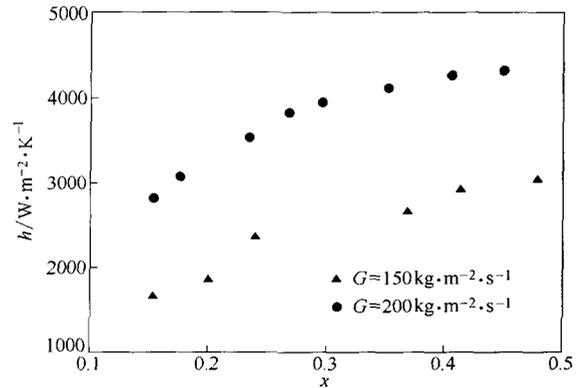


图 10 内壁填充环状泡沫管传热系数随干度的变化
Fig. 10 Heat transfer coefficient variation with quality for metal-foam partially filled tube and smooth tube

升趋势，内壁填充环状泡沫管传热系数比光管大得多。图 8 是质量流速 $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时内壁填充环状泡沫管和光管流动凝结传热系数随干度的变化关系，从图中可以得出与图 7 类似的结论。在低质量流速和低干度下最容易产生分层流或者波纹流，在高干度或者高流速下则易产生环状流。图 7、图 8 反映了管内流型从分层流向环状流变化过程，因此传热系数稳步上升。从图 7、图 8 中可看到，该类强化管的流动凝结传热系数约为光管的 2 倍。

图 9 给出了 $x=0.3$ 和 $x=0.4$ 两种情况下质量流速对内壁填充环状泡沫管内凝结换热的影响结果。可以看到，随着质量流速的增大，凝结传热系数有增大的趋势。这归因于在特定干度下质量流速越大，对流冲刷管内壁的作用越强烈，因此换热效

果越好。图 10 为 $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 两种质量流速下凝结传热系数受干度变化的影响。可见，传热系数随着干度的增大而呈现增加的趋势。这是由于特定质量流速下，干度增大使得气液两相的速度滑移比增大，气相相对于液相的质量分数和速度都增加，因此整个两相混合物的对流作用得到加强，同时干度增大导致气相体积增加，液膜减薄，气相容易接触到低温的金属骨架和冷壁面。

与光管相比，内壁填充环状泡沫管内流动凝结传热系数提高程度较低，仅为光管的 2 倍左右，其原因在于目前金属泡沫烧结技术不够成熟，金属泡沫和管壁的接触热阻较大，而且金属泡沫内部可能存在断裂或者凹坑等制造和加工缺陷，这些都会降低传热系数。虽然内壁填充环状泡沫管内流动凝结传热系数仅为光管的 2 倍，但是其压降却远小于完

全填充金属泡沫管, 随着泡沫烧结和制造技术的发展其传热系数可进一步提高。

3 结 论

本文对内壁填充环状金属泡沫管内流动凝结换热进行了实验研究, 得出如下结论。

(1) 内壁填充环状泡沫管的压降高于光管, 其内部的对流凝结压降高于光管, 且随着质量流速和干度的增加, 压降呈非线性增长。

(2) 通过壁面温度的波动对流动凝结的流型进行判别, 初步判断出分层流和环状流两种流型, 不同的流型决定了不同的换热性能。

(3) 针对所研究的换热管, 流动凝结传热系数大于光管, 约为光管的 2 倍, 且管内流动凝结传热系数随质量流速和干度的增加而增加。

References

- [1] Lu Wei (陆威), Zhao Changying (赵长颖), Qu Zhiguo (屈治国). Single phase convection in circular pipe with metal foams [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2008, **29**: 1895-1897
- [2] Odile G, Thibaut V, Alain M, Bruno B. Experimental characterization of single and two-phase flow through nickel foams [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2009, **64**: 4186-4195
- [3] Lu W, Zhao C Y, Tassou S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers (I): Metal-foam filled pipes [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2006, **49**: 2751-2761
- [4] Zhao C Y, Lu W, Tassou S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers (II): Tube heat exchangers [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2006, **49**: 2762-2770
- [5] Li Yinghai (李盈海), Tao Wenquan (陶文铨), Sun Dongliang (孙东亮), Zhao Changying (赵长颖). Numerical simulation of convective heat transfer in metal foam filled pipes [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 2008, **42**: 261-264
- [6] Tian Yuan (田原), Zhao Changying (赵长颖), Li Zengyao (李增耀), Qu Zhiguo (屈治国). Flow and heat transfer in metal foam filled pipes under two extended Darcy models [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2008, **29**: 1380-1382
- [7] Du Y P, Qu Z G, Zhao C Y, Tao W Q. Numerical study of conjugated heat transfer in metal-foam filled double-pipe [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2010, **53**: 4899-4907
- [8] Zhao C Y, Lu W, Tassou S A. Flow boiling heat transfer in horizontal metal-foam tubes [J]. *ASME J. Heat Transfer*, 2009, **131** (12): 121002.1- 121002.8
- [9] Chen Z Q, Cheng P, Zhao T S. An experimental study of two phase flow and boiling heat transfer in bi-dispersed porous channels [J]. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 2000, **27** (3): 293-302
- [10] Topin F, Bonnet J P, Madani B, Tadrist L. Experimental analysis of multiphase flow in metallic foam: flow laws, heat transfer and convective boiling [J]. *Adv. Eng. Mater.*, 2006, **8** (9): 890-899
- [11] Kim D W. Convection and flow boiling in microgaps and porous foam coolers [D]. Maryland: University of Maryland, 2007
- [12] Lu W, Zhao C Y. Numerical modeling of flow boiling heat transfer in horizontal metal-foam tubes [J]. *Adv. Eng. Mater.*, 2009, **11** (10): 832-836
- [13] NIST Standard Reference Database 23. Thermodynamics and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures, REFPROP-V7.0 [DB]. NIST (America), 2003
- [14] PROPATH Group. A program package for thermophysical properties of fluids. PROPATH-V11.1 [DB]. PROPATH, 1999
- [15] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. *Exp. Therm Fluid Sci.*, 1988, **1** (1): 3-17