

# 紫铜纤维多孔材料的孔结构对池沸腾换热性能的影响

支 浩, 汤慧萍, 朱纪磊, 王建忠, 敖庆波, 马 军, 李爱军, 许忠国

(西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016)

**摘 要:** 分别以 30、50、100 和 160  $\mu\text{m}$  4 种直径的紫铜纤维毡与紫铜基板构成的多孔材料为研究对象, 针对紫铜纤维毡孔隙度分别为 90%、80% 和 75% 下, 4 种直径的纤维多孔材料池沸腾换热性能进行了检测, 并与紫铜基板池沸腾换热性能进行对比。研究表明: 紫铜纤维多孔材料具有良好的强化池沸腾换热性能, 当过热度  $\Delta T < 20$   $^{\circ}\text{C}$  时, 紫铜纤维多孔材料换热性能是紫铜基板换热性能的 2~5 倍; 当紫铜纤维毡孔隙度为 90% 时, 多孔材料的换热性能随着纤维直径的减小而增强; 当纤维直径为 160  $\mu\text{m}$  时, 多孔材料的换热性能随着纤维毡孔隙度的减小而增强。紫铜纤维多孔材料池沸腾换热性能受多孔材料内部汽化核心数目、气泡溢出阻力和毛细吸力等多种因素的影响。因此, 在不同的工作条件下, 纤维多孔材料具有不同的最佳孔结构参数。

**关键词:** 金属多孔表面; 池沸腾; 强化换热;

**中图分类号:** TG125.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)02-0667-05

随着航天、航空技术的发展, 电子器件和系统组装密度的提高, 局部的有效散热成为亟需解决的问题<sup>[1-5]</sup>。池沸腾换热通过相变潜热来增强换热能力, 需要辅助设备少, 是高热流设备的一种理想的散热方式, 因此强化池沸腾换热已成为各国学者研究的热点之一。强化池沸腾换热常用技术包括在工作介质中加入纳米颗粒, 改变换热表面的宏观形貌和微观形貌等<sup>[6-11]</sup>。

烧结金属多孔表面就是通过改变换热表面的宏观形貌, 增大换热比表面积及增加汽化核心数目, 从而达到强化池沸腾换热的目的。烧结金属多孔表面分为: 烧结金属粉末多孔表面、烧结金属泡沫多孔表面和烧结金属纤维多孔表面。烧结金属纤维多孔表面具有高热导率、低毛细半径和全通孔等特点, 在增加换热比表面积的同时, 能够提供较多的汽化核心数目和较强的毛细吸力, 进而降低起始沸腾温度, 提高从核态沸腾向膜态沸腾的转变温度<sup>[5,12-15]</sup>。Wojcik<sup>[16]</sup>研究了烧结紫铜纤维多孔水平表面的沸腾滞后现象, 同时验证了金属纤维对池沸腾的强化效果。西安交通大学的黄金印等<sup>[17]</sup>研究了紫铜纤维多孔表面池沸腾现象, 结果表明, 在纤维直径相同时, 沸腾表面气泡的脱离直径随着孔隙度的增加而降低。本课题组前期研究了纤维直径在 8~20  $\mu\text{m}$  范围内不锈钢纤维多孔材料池沸腾换热

性能, 研究表明<sup>[18]</sup>: 当不锈钢纤维毡孔隙度为 85% 和 90% 时, 纤维直径越粗, 多孔材料池沸腾换热性能越好。本实验针对纤维直径为 30~160  $\mu\text{m}$  的紫铜纤维多孔材料进行了研究, 并分析了紫铜纤维多孔材料孔结构参数对池沸腾换热性能的影响。

## 1 实 验

紫铜纤维多孔材料由紫铜基板和紫铜纤维毡组成。实验选取直径为 30、50、100 和 160  $\mu\text{m}$  的紫铜纤维为原料, 根据实验设定的紫铜纤维毡 3 种孔隙度 90%、80%、75%, 称取不同质量的紫铜纤维, 并将其铺设在用金相砂纸打磨处理后的紫铜基板上, 在氢气气氛下以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的升温速度升温至 950~1030  $^{\circ}\text{C}$ , 保温 2 h 后随炉冷却。

根据换热性能检测设备的要求, 用线切割将制备的大块纤维多孔材料剪裁成尺寸为 25 mm×25 mm×2 mm 的测试试样。

用于池沸腾换热性能检测的紫铜基板, 采用与紫铜纤维多孔材料铜基板相同的处理工艺。

选用扫描电子显微镜 (JEOL JSM—6460, 日本) 观测样品的微观形貌。采用直接称重体积法计算紫铜纤维毡实际孔隙度  $\varepsilon$ :

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家青年科学基金 (51201139); 陕西省科技统筹创新工程计划 (2012KTZB03-01-04)

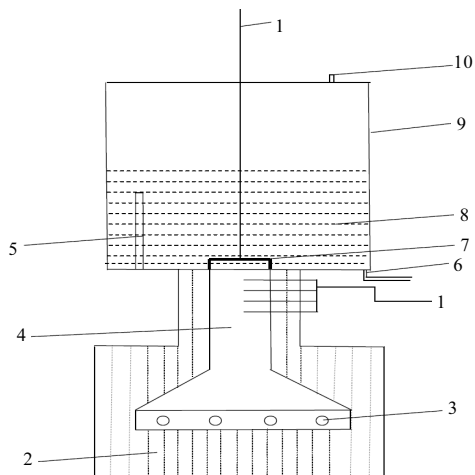
作者简介: 支 浩, 男, 1983 年生, 硕士, 西北有色金属研究院金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231095, E-mail: zhihao1983@163.com

$$\varepsilon = 1 - \frac{M}{V\rho_s} \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon$  表示实际孔隙度,  $M$  为紫铜纤维毡质量,  $V$  为紫铜纤维毡体积,  $\rho_s$  为紫铜纤维密度。

换热性能测试实验所用的测试装置如图 1 所示, 测试装置主要包括 3 个部分: 加热系统, 数据采集系统和沸腾池。

换热性能实验在常压下进行, 工作介质为去离子水。实验开始前用锡焊法将测试样品固定在加热体表面(锡焊丝长度均为 45 cm), 然后在沸腾池中加入高度 200 mm 的去离子水, 利用辅助加热器将去离子水加热至沸腾。为避免在测试过程中不凝结气体对多孔材料传热性能的影响, 保持沸腾状态 1 h, 使水中的不凝结气体充分排出。待去离子水中的气体充分排除后, 调节控温系统, 保持去离子水在饱和沸腾状态(温度波动控制在  $\pm 0.5$  °C 内)。根据实验设计, 从低到高依次调节功率计的输出功率, 每次待 4 个热电偶采集的温度全部趋于稳定后, 记录数据, 并根据稳定热传导下傅里叶定律计算出紫铜纤维多孔材料的下表面温度和输出热流密度<sup>[18]</sup>。上表面沸腾温度由热电偶直接测量得出, 上、下表面的温度差即为过热度, 定义为  $\Delta T$ 。主加热器在热量输出过程中, 由于本身的散热会损失部分热量。经测试在输出功率相同的情况下, 散热损失基本相同, 误差小于 5%; 在高输出功率的情况下, 散热损失之间的误差小于 2%, 因此在分析过程中对热损失可忽略不计。



1 thermocouple, 2 adiabatic asbestos, 3 resistance wire, 4 main heater, 5 auxiliary heater, 6 drain outlet, 7 sample, 8 working medium, 9 glass cover, 10 medium complement

图 1 换热性能测试装置

Fig.1 Testing equipment for the performance of heat transfer

## 2 结果与分析

### 2.1 微观孔结构分析

实验设计的 3 种紫铜纤维毡孔隙度为 90%、80% 和 75%, 依据式(1)计算出纤维毡的真实孔隙度, 其孔隙度设计值、实测值及误差范围均列于表 1 中。由表 1 可知, 纤维毡的实测孔隙度与设计孔隙度误差在  $-1.8\% \sim +1.6\%$  之间。

图 2 是具有相同孔隙度、不同直径的紫铜纤维毡的 SEM 照片。由图 2 可知, 无论纤维直径粗细, 纤维毡内部孔均为贯通孔, 呈无序状态, 并且由纤维构成的孔径大小不一, 形状各异。放大倍数相同时(图 2a 和 2b), 在紫铜纤维毡孔隙度相同的情况下, 纤维直径越粗, 纤维毡单位体积内纤维杆的数量越少, 孔密度越小, 平均孔径越大。

汽化核心数目越多、汽泡溢出阻力越小、毛细吸力越大, 则纤维多孔材料池沸腾换热性能越高。当紫铜纤维毡孔隙度一定时, 减小纤维直径, 可有效增加多孔材料内部汽化核心数目和毛细吸力, 但同时也增大了汽泡溢出阻力。另根据式(2)<sup>[19]</sup>:

$$V_p = \frac{4\sigma \cos\theta}{d_c}, \quad d_c = \frac{0.0243\varepsilon}{1-\varepsilon} \sqrt{\frac{d_0^2}{150\eta}} \quad (2)$$

式中,  $V_p$  为毛细芯所能提供的毛细吸力,  $\theta$  为工质液体与毛细芯材料之间的接触角,  $\sigma$  为工质液体表面张力,  $d_c$  为毛细芯有效孔径,  $d_0$  为金属纤维直径,  $\eta$  为流体动力粘滞系数,  $\varepsilon$  为毛细芯孔隙度。

由式(2)可知, 紫铜纤维毡孔隙度越小, 纤维直径越细, 则内部毛细吸力  $V_p$  就越大, 液体回流速度越快; 而纤维毡内部有效孔径  $d_c$  越小, 汽泡溢出阻力越大。因此, 单独改变纤维直径或纤维毡孔隙度, 并不能获得具有最佳池沸腾换热性能的纤维多孔材料, 需选择合适的纤维多孔材料孔结构参数, 综合考虑影响

表 1 样品孔隙度

Table 1 Porosity of the specimens

Diameter/ $\mu\text{m}$	Design porosity/%	Real porosity/%	Error/%
30	90	90.2	0.20
30	80	80.6	0.60
30	75	74.1	-0.90
50	90	89.2	-0.80
50	80	80.5	0.50
50	75	74.8	-0.20
100	90	88.7	-1.30
100	80	79.2	-0.80
100	75	75.6	0.60
160	90	88.4	-1.60
160	80	81.3	1.30
160	75	75.9	0.90

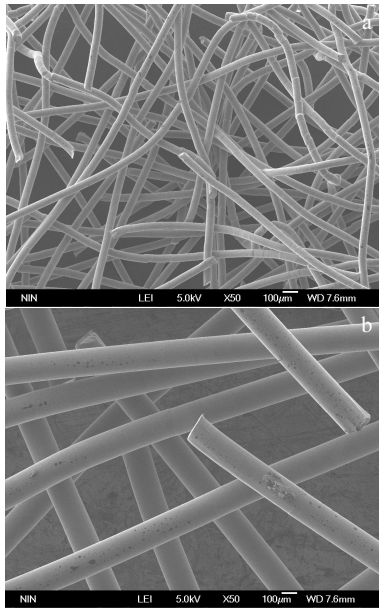


图 2 孔隙度 80%，不同直径紫铜纤维毡的 SEM 照片  
 Fig.2 SEM images of Cu fiber felt with porosity of 80% fabricated by fibers with different diameters: (a) 50 μm and (b) 160 μm

传热性能的 3 个因素：汽化核心数目、汽泡溢出阻力和毛细吸力。

2.2 紫铜纤维毡孔隙度对换热性能影响

图 3 是在纤维直径一定时，紫铜纤维毡孔隙度的变化对紫铜纤维多孔材料池沸腾换热性能与过热度曲线的变化影响。由图 3 可知，与紫铜基板相比，紫铜纤维多孔材料具有良好的池沸腾换热性能；在  $\Delta T < 20\text{ }^\circ\text{C}$  的过热度范围内，紫铜纤维多孔材料池沸腾换热性能是紫铜基板池沸腾换热性能的 2~5 倍。图 3a, 3b 和 3c 分别是纤维直径分别为 30、50 和 100 μm 的紫铜纤维多孔材料热流密度  $q$  与过热度  $\Delta T$  的关系曲线。表明，当  $\Delta T < 8\text{ }^\circ\text{C}$ ，紫铜纤维毡孔隙度为 90% 时，紫铜纤维多孔材料的池沸腾换热性能最低；当  $\Delta T > 8\text{ }^\circ\text{C}$ ，纤维毡孔隙度高的紫铜纤维多孔材料池沸腾换热能力开始增强，并有逐渐高于低孔隙度的紫铜纤维多孔材料的趋势。在图 3d 中，紫铜纤维直径为 160 μm，在测试过热度范围内 ( $\Delta T < 20\text{ }^\circ\text{C}$ )，紫铜纤维多孔材料的池沸腾换热性能随着纤维毡孔隙度的降低而增强。

与紫铜基板相比，紫铜纤维多孔材料具有良好的强化池沸腾换热能力。这是因为在增大换热面积的同时，可有效增加汽化核心数目。纤维的毛细吸力效应在凹穴处产生的汽泡溢出后，其周围的去离子水在毛细吸力的作用下迅速回流，在凹穴处生成新的汽泡，进而强化池沸腾换热性能。

紫铜纤维毡孔隙度是影响紫铜纤维多孔材料池沸腾换热性能的重要参数。当纤维直径为 160 μm 时，根据式(2)可知，紫铜纤维毡内部有效孔径  $d_c$  较大，汽泡

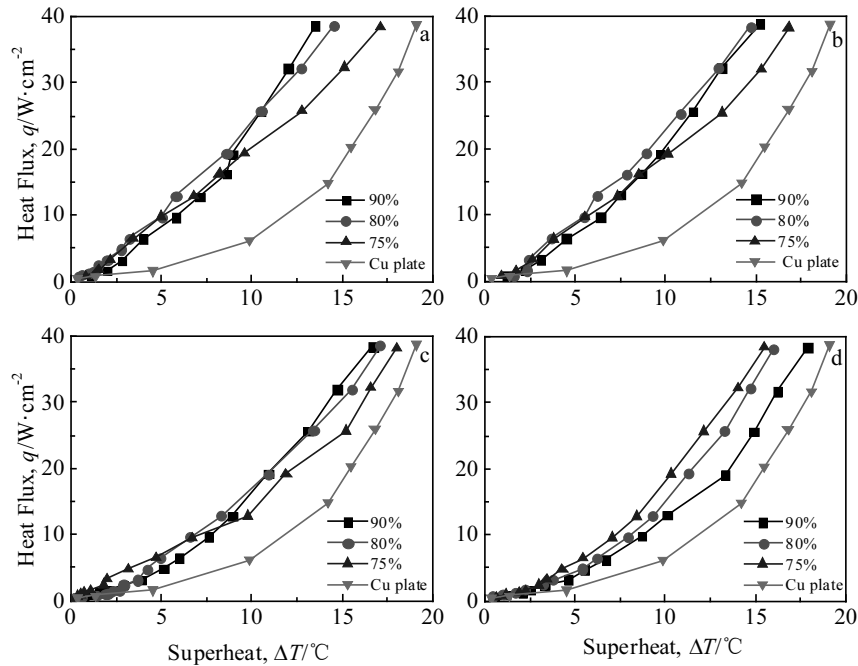


图 3 纤维直径一定时，不同孔隙度的纤维多孔材料热流密度与过热度的关系

Fig.3 Heat flux as a function of superheat of the fiber porous materials with different porosities fabricated from the fiber with 30 μm (a), 50 μm (b), 100 μm (c), and 160 μm (d) in diameter

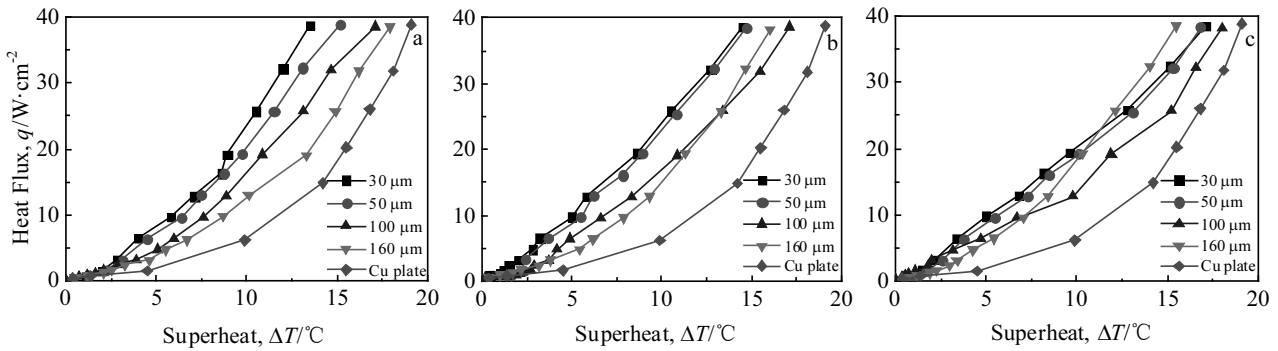


图 4 纤维毡孔隙度一定时, 不同纤维直径的纤维多孔材料热流密度与过热度的关系

Fig.4 Heat flux as a function of superheat of the fiber porous materials fabricated from different diameters fiber with the fiber felt porosity of 90% (a), 80% (b) and 75% (c)

脱离纤维毡时, 所遇阻力较小, 气泡溢出阻力对纤维多孔材料池沸腾换热性能的影响较小, 汽化核心数目和液体回流速度则成为影响其池沸腾换热性能的主要因素。纤维毡孔隙度越小, 多孔材料内部汽化核心数目越多<sup>[18]</sup>, 毛细吸力  $V_p$  越大 (即液体回流速度越快), 因此, 对于大孔径的紫铜纤维多孔材料, 纤维毡孔隙度越小, 纤维多孔材料的池沸腾换热性能越好。纤维直径为 30、50 和 100  $\mu\text{m}$  的紫铜纤维多孔材料, 紫铜纤维毡内部有效孔径  $d_c$  变小, 纤维杆数量增多, 气泡溢出阻力对纤维多孔材料池沸腾换热性能的影响较大, 尤其当过热度  $\Delta T > 8\text{ }^\circ\text{C}$ , 纤维毡内部生成大量气泡时, 气泡溢出阻力对紫铜纤维多孔材料池沸腾换热性能起主导作用, 因此, 对于细直径的纤维多孔材料, 当  $\Delta T > 8\text{ }^\circ\text{C}$  时, 随过热度的增大, 纤维毡孔隙度越大, 紫铜纤维多孔材料的池沸腾换热性能越好。

### 2.3 紫铜纤维直径对换热性能影响

图 4a, 4b 和 4c 是紫铜纤维毡孔隙度一定的条件下 (90%、80%和 75%), 紫铜纤维直径变化对池沸腾换热性能与过热度关系线的影响。图 4a 表明, 当紫铜纤维毡的孔隙度均为 90%时, 紫铜纤维直径越细, 多孔材料的池沸腾换热性能越好; 图 4b 和 4c 表明, 当紫铜纤维毡孔隙度分别为 80%和 75%时, 随着过热度的增大, 粗直径纤维多孔材料池沸腾换热性能的提升快于细直径纤维多孔材料池沸腾换热性能的提升。

当紫铜纤维毡孔隙度为 90%时, 纤维毡内部有效孔径  $d_c$  很大, 纤维多孔材料内部汽化核心数目和液体回流速度为影响紫铜纤维多孔材料池沸腾换热性能的主要因素。在纤维毡为 90%的高孔隙度时, 纤维直径越细, 纤维多孔材料内部汽化核心数目越多。根据式 (2), 纤维直径越细, 内部毛细吸力  $V_p$  越大, 汽化核心处生成的气泡溢出后, 周围液体回流速度越快, 汽

泡生成频率越快。因此, 当紫铜纤维毡的孔隙度为 90%时, 紫铜纤维直径越细, 多孔材料的池沸腾换热性能越好。当紫铜纤维毡孔隙度为 80%和 75%时, 随着纤维毡孔隙度的降低, 其纤维毡内部孔密度逐渐增大, 有效孔径  $d_c$  减小,  $d_c$  越小, 气泡溢出阻力对紫铜纤维多孔材料池沸腾换热性能的影响越大, 并随着过热度增大, 其影响度越高。在纤维毡为此低孔隙度时, 纤维直径越细, 气泡溢出阻力对紫铜纤维多孔材料池沸腾换热性能降低的作用越大, 因此, 紫铜纤维毡孔隙度为 80%和 75%时, 随着过热度的增大, 粗直径纤维多孔材料池沸腾换热性能的提升快于细直径纤维多孔材料池沸腾换热性能的提升。

## 3 结 论

1) 紫铜纤维多孔材料具有良好的强化池沸腾换热性能。在  $\Delta T < 20\text{ }^\circ\text{C}$  的过热度范围内, 纤维多孔材料的池沸腾换热性能是紫铜基板池沸腾换热性能的 2~5 倍。

2) 当紫铜纤维毡的孔隙度为 90%时, 紫铜纤维多孔材料的换热性能随着纤维直径的减小而增强; 当纤维直径为 160  $\mu\text{m}$  时, 纤维多孔材料的池沸腾换热性能随着纤维毡孔隙度的减小而增强。

3) 当紫铜纤维毡内部孔径较小时, 随着过热度  $\Delta T$  的增加, 气泡溢出阻力对纤维多孔材料池沸腾换热性能的影响越来越大。因此, 当过热度较高时, 纤维毡孔隙度越高, 纤维直径越粗, 紫铜纤维多孔材料的池沸腾换热性能越好。

### 参考文献 References

[1] Kumar S, Mohanty B, Gupta S C. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2002, 45(18): 3857

- [2] Mohamad A A. *International Journal of Thermal Sciences*[J], 2003, 42(4): 385
- [3] Tang Huiping(汤慧萍), Tan Ping(谈萍), Xi Zhengping(奚正平) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(S2): 428
- [4] Zhao C, Gong M Q, Ding L et al. *International Journal of Refrigeration*[J], 2014, 41: 164
- [5] Xu Z G, Qu Z G, Zhao C Y et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2014, 77: 1169
- [6] Franco A, Latrofa E M, Yagov V V. *Experimental Thermal and Fluid Science*[J], 2006, 30(3): 263
- [7] Alam M S, Prasad L, Gupta S C et al. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*[J], 2008, 47(1): 159
- [8] Wang Hongzhi(王宏智), Liu Jinglei(刘京雷), Dai Yulin(戴玉林) et al. *Journal of North China Electric Power University, Nature Science Edition*(华北电力大学学报, 自然科学版)[J], 2010(1): 33
- [9] Pranoto I, Leong K C, Jin L W. *Applied Thermal Engineering* [J], 2012, 42: 163
- [10] Cheng L X, Liu L. *International Journal of Refrigeration*[J], 2013, 36(2): 421
- [11] Ji X B, Xu J L, Zhao Z W et al. *Experimental Thermal and Fluid Science*[J], 2013, 48: 198
- [12] Jiang Y Y, Wang W C, Wang D et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2004, 44(2): 443
- [13] Murthy S, Joshi Y, Gurrum S et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2006, 49(11-12): 1885
- [14] Utaka Y, Kashiwabara Y, Ozaki M et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2014, 68: 479
- [15] Roh H S. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2014, 68: 332
- [16] Wojcik T M. *Experimental Thermal and Fluid Science*[J], 2009, 33(3): 397
- [17] Huang Jinyin(黄金印), Qu Zhiguo(屈治国), Li Dingguo(李定国) et al. *Journal of Chemical Industry and Engineering* (化工学报)[J], 2011(S1): 26
- [18] Zhi Hao(支浩), Zhu Jilei(朱纪磊), Wang Jianzhong(王建忠) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2014, 18: 82
- [19] Qiu Keang(丘可昂). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 1989(3): 43

## Effect of Pore Structure of Cu Fiber Porous Materials on Pool Boiling Heat Transfer

Zhi Hao, Tang Huiping, Zhu Jilei, Wang Jianzhong, Ao Qingbo, Ma Jun, Li Aijun, Xu Zhongguo  
(State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The pool boiling heat transfer performances of copper fiber porous materials with four different fiber diameters (30, 50, 100 and 160  $\mu\text{m}$ ) and copper plane plate were investigated under the atmospheric pressure. The results show that the heat transfer performances of the copper fiber porous materials with the porosity of 90%, 80% and 75% are much better than that of the Cu plane plate when the superheat is below 20  $^{\circ}\text{C}$ . The heat transfer performance of the copper fiber porous materials is enhanced with decreasing the fiber diameter when the porosity of copper fiber felt is 90%. When the fiber diameter is 160  $\mu\text{m}$ , the heat transfer performance is enhanced with decreasing porosity of copper fiber felt. There are many factors which can affect the pool boiling heat transfer, such as the number of active evaporation core, the resistance of bubble overflow and the fiber capillary attraction. Therefore, there should be different optimal pore structures under different working conditions.

**Key words:** metal porous surface; pool boiling; heat transfer enhancement

Corresponding author: Zhi Hao, Master, State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231095, E-mail: zhihao1983@163.com