

纳米 TiO₂ 复合泡沫铜表面强化沸腾传热 实验研究

高向阳, 郎中敏*, 康英杰

(内蒙古科技大学化学化工学院, 内蒙古 包头 014000)

摘要:将纳米 TiO₂ 按照质量分数 2% 分散在乙醇溶液中, 通过沉积法将 TiO₂ 沉积在泡沫铜骨架上, 制备出纳米 TiO₂ 复合泡沫铜表面。通过环境扫描电镜 (SEM) 观察其沉积情况, 发现随着 TiO₂ 沉积量的增加, 泡沫铜骨架被覆盖的部分逐渐增加, 其中沉积量为 2.5 mL TiO₂ 的泡沫铜表面覆盖效果最好, 其骨架完全被 TiO₂ 颗粒覆盖且泡沫铜的孔隙没有被堵塞。以水为工质对复合表面进行沸腾性能测试, 发现沉积 TiO₂ 乙醇分散液体积为 2.5 mL 时表面传热性能最佳, 传热系数是未沉积有 TiO₂ 的泡沫铜表面的 1.5 倍, 热通量增加了 170 kW/m²。通过沸腾可视化图像可看出, TiO₂ 沉积量为 2.5 mL 的泡沫铜表面产生的气泡数量多, 且不易合并, 说明沉积的纳米 TiO₂ 增加了表面的核化点, 且提高了表面的毛细吸力, 加速了液体回流。

关键词: 纳米 TiO₂; 沉积法; 泡沫铜; 沸腾传热

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)S2-0142-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.S2.030

Study on enhanced boiling heat transfer by nano-TiO₂ composite copper foam surface

GAO Xiang-yang, LANG Zhong-min*, KANG Ying-jie

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology,
Baotou 014000, China)

Abstract: Nano-TiO₂ is dispersed in ethanol solution at a 2% mass fraction, and deposited on a copper foam skeleton via the deposition method to prepare nano-TiO₂ composite copper foam surface. The deposition situation is observed by means of scanning electron microscopy. It is found that the covered portion of copper foam skeleton increases gradually with the increase of the deposited TiO₂ content. The surface coverage of copper foam with 2.5 mL of TiO₂ deposited reaches the best, and the skeleton has been completely covered by TiO₂ particles while the pores of copper foam are not blocked. Boiling performance of composite surface is tested with water as the working medium, and it is indicated that the composite surface prepared with 2.5 mL of TiO₂ ethanol dispersion solution exhibits the best heat transfer performance, its heat transfer coefficient is 1.5 times that of the copper foam surface without TiO₂ deposition, and its heat flux is 170 kW·m⁻² higher. It can be seen from the boiling visualization images that the composite surface prepared with 2.5 mL of TiO₂ ethanol dispersion solution produces a large number of bubbles that do not merge easily, indicating that the deposited titanium dioxide nanoparticles increases the nucleation sites on the surface, improves the capillary suction on the surface and accelerates the liquid reflux.

Key words: nano-TiO₂; deposition method; copper foam; boiling heat transfer

近年来,随着科技的进步,各种设备以及电子元器件朝着高频、高集成及大功率方向发展,这导致其热流密度越来越大^[1-5],而如果不能解决这些产品的散热问题,将会严重影响产品的效率和使用寿命,并且会限制产品的发展。相变传热是一种被广泛使用的传热方法,在火力发电及工业生产等领域都有重要应用,被认为是在较小的冷却空间内散热和解决散热问题的高效机制之一^[6-7],未来可能是解决这些问题的有效方法。

改善沸腾传热的方法有很多,其中最主要的是改善沸腾传热表面^[8-10]和改善工作流体^[11-13],改善沸腾表面是最常用的方法,因为改善沸腾表面效率更高,对临界热流密度 (CHF) 和传热系数 (HTC) 的增强效果更加显著,而改善工作流体在实际应用中存在各种限制。

冉令鸿等^[14]通过烧结法制备出微纳双尺度多孔表面,以乙醇为工质测试其沸腾传热性能,发现其起沸点比单尺度表面降低 1.5℃,传热系数是其 1.4

收稿日期:2022-03-04;修回日期:2022-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(21868022);内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0043)

作者简介:高向阳(1996-),男,硕士生,研究方向为多孔介质表面相变传热,497013462@qq.com;郎中敏(1980-),女,硕士,教授,硕士生导师,研究方向为多孔介质表面相变传热、纳米流体传热,通讯联系人,langzhongmin226@163.com。

倍。曹洸等^[15]对微纳结构的多孔表面沸腾传热进行分析,发现双尺度表面能够有效加强表面的气泡成核并提高脱离频率。泡沫铜由于有极高的孔隙率及特殊孔的结构,在沸腾传热的过程中能够提供大量的核化点并增大了传热面积,是一种非常优秀的传热材料,因此受到众多研究者的青睐。程云等^[16]以水为工质,对泡沫铜进行池沸腾性能测试,结果表明泡沫铜的传热能力是光滑表面的 1.7~2.6 倍。

上述分析说明,微纳双尺度结构与泡沫铜结构都能有效强化沸腾传热,因此本文通过沉积法将纳米 TiO₂ 沉积在泡沫铜骨架上,将两种结构加以结合。与单一结构的表面相比,结合后的表面具有更多的核化点、更大的毛细吸力,沸腾传热性能更优。

1 样品制备及测试

1.1 实验试剂

去离子水(自制),乙醇(AR,国药化学试剂有限公司),纳米 TiO₂(高纯,肯纳金属有限公司),泡沫铜(苏州佳士德泡沫金属有限公司)。

1.2 泡沫铜参数

本文使用的泡沫铜孔隙率为 94%,ppi 值为 130,孔径约为 200 μm,孔形状为五边形或者六边形,泡沫铜骨架直径约为 50 μm,泡沫铜厚度为 1 mm。

1.3 样品制备过程

采用沉积法制备纳米 TiO₂ 复合泡沫铜表面。TiO₂ 的粒径为 20~50 nm,按照质量分数为 2% 将其分散在乙醇溶液中。将泡沫铜裁剪为直径 20 mm 的圆形,置于一个内径为 23 mm 的圆形容器中,分别加入 1、1.5、2.0、2.5 和 3.0 mL 的 TiO₂ 乙醇分散液,将容器放入超声波清洗机中,设置温度为 50℃,超声至液体完全干燥,样品制作完成。

1.4 测试装置及方法

测试装置如图 1 所示,主要由加热部分、测试部分和数据采集部分组成。加热部分的核心是加热铜柱,铜柱中有 3 个小孔用于插入热电偶进行测温,下部插入 4 根功率为 200 W 的加热棒,其功率的大小由直流电源(WYJ-200V10A)进行控制。测试部分由开口的方形石英管作为沸腾池的池壁,上下两部分通过聚四氟乙烯板封闭,且上部有一个环形铜柱,起到冷凝和稳定沸腾池压力的作用,另有一根热电偶由上板插入测试工质中,测量其温度。数据采集部分由热电偶、数据采集仪、高速摄像机组成,收集测试得到的数据。

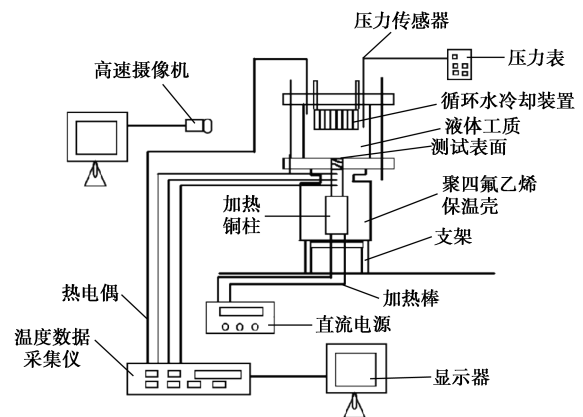


图 1 沸腾测试装置示意图

测试开始时,热通量由 10 kW/m² 开始,当插入加热铜柱中的热电偶显示温度在 5 min 内变化幅度小于 0.1℃时,记录此时的各项数据,并将功率增加 15~20 kW/m² 左右,重复上述内容,直至达到膜沸腾为止。

沸腾测试以水为工质,测试压力为常压。沸腾表面的热流密度计算如下:

$$q'' = (U \times I) / A \quad (1)$$

其中: U 、 I 分别为由直流电源提供给加热棒的电压和电流, A 为沸腾表面的面积。由于铜柱的 3 根热电偶的温度变化为线性变化,因此铜柱上表面的温度可以通过一维线性关系进行计算,计算公式如下:

$$T_{\text{ave}} = T_1 - (T_3 - T_2) \quad (2)$$

式中: T_{ave} 是铜柱上表面温度, T_1 、 T_2 、 T_3 分别为 3 根热电偶由上到下测得的铜柱的温度。

沸腾表面的温度通过下式计算:

$$T_w = T_{\text{ave}} - q''(l_1/k_c - l_2/k_s) \quad (3)$$

其中: T_w 是样品表面温度, l_1 、 l_2 分别为样品厚度和粘结剂的厚度, k_c 、 k_s 分别为样品和粘结剂的导热系数。

因此样品的过热度可以如下式计算:

$$\Delta T = T_w - T_{\text{sat}} \quad (4)$$

其中: T_{sat} 为工质的饱和温度。

样品的传热系数计算为:

$$h = q'' / (T_w - T_{\text{sat}}) \quad (5)$$

本实验的不确定度来自于热电偶精度(本实验采用 t 型热电偶,精度为 ±0.1 K,最大测量不确定度为 0.2 K)、样品厚度和焊料层厚度(最大不确定度不超过 0.01 mm)、有效加热面积(不确定度不超过 0.03%),直流电源不确定度小于 0.03 W。因此,本实验热通量和传热系数的最大不确定度分别为 5.3% 和 8.6%。

2 实验结果与分析

2.1 纳米 TiO₂ 复合泡沫铜表面形貌表征分析

本文采用沉积法制备出纳米 TiO₂ 复合泡沫铜表面,通过环境扫描电镜(日本 JSM-IT800)对复合表面进行观察,电镜照片如图 2 所示。图 2(a)~2(e) 分别对应 TiO₂ 沉积量为 0、1.0、2.0、2.5 和 3.0 mL 时泡沫铜电镜图片,可以看出,随着 TiO₂ 沉积量的增加,泡沫铜骨架逐渐被 TiO₂ 包裹,当沉积 TiO₂ 的量为 2.5 mL 时已完全覆盖泡沫铜骨架且开始出现覆盖泡沫铜孔隙的现象,在沉积量为 3.0 mL 时 TiO₂ 将泡沫铜大部分孔隙堵塞。图 2(f) 为纳米 TiO₂ 的扫描电镜图像,可以看出 TiO₂ 为直径 20~50 nm 的小颗粒聚集在一起,颗粒之间存在大量 10 nm 左右的孔隙。图 2 说明 TiO₂ 均匀沉积在泡沫铜表面。

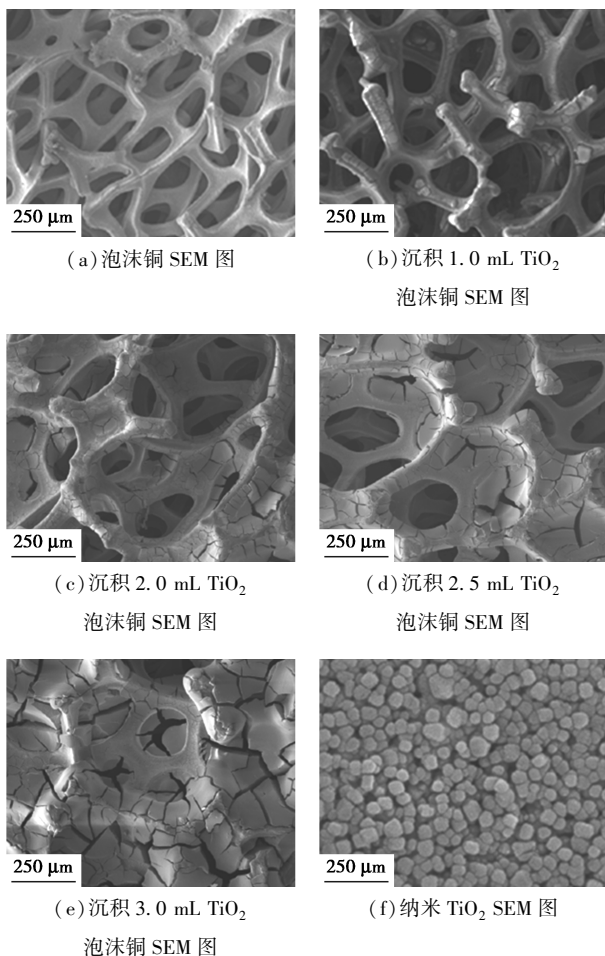
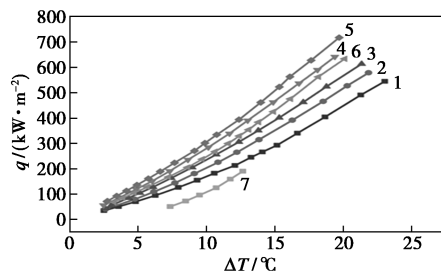


图 2 复合表面扫描电镜图

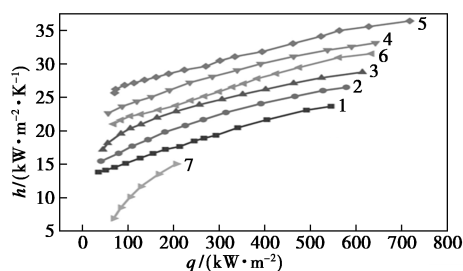
2.2 沸腾曲线分析

在常压下去离子水为工质,对泡沫铜复合纳米 TiO₂ 表面进行沸腾传热性能测试,得到沸腾传热

性能曲线,如图 3 所示。



(a) 复合表面热通量随过热度变化曲线



(b) 表面传热系数与热通量关系曲线

1—0 mL;2—1.0 mL;3—1.5 mL;4—2.0 mL;5—2.5 mL;
6—3.0 mL;7—光滑表面

图 3 不同纳米 TiO₂ 沉积量的泡沫铜表面沸腾曲线

图 3(a) 为热通量随过热度的变化曲线,可以看出,所有样品的沸腾传热性能都优于光滑表面 (plain surface),光滑表面的过热度约为 7°C,而泡沫铜表面的过热度约为 3°C,比光滑表面降低了 4°C;沉积有纳米 TiO₂ 的表面热通量随着 TiO₂ 沉积量的增加而增加,在沉积量达到 2.5 mL 时热通量达到最高,为 717 kW/m²,当沉积量为 3.0 mL 时可以看出其表面的热通量有所下降,为 633 kW/m²,比 2.5 mL 时降低了 84 kW/m²。

图 3(b) 为泡沫铜复合纳米 TiO₂ 表面传热系数随热通量的变化曲线,可以看出,各个沉积了纳米 TiO₂ 的泡沫铜表面的传热系数都随着热通量的增大而增大,且在热通量相同的情况下,随着纳米 TiO₂ 沉积量的增加而增大,具体而言,在泡沫铜表面沉积的纳米 TiO₂ 的量由 0 mL 增加至 2.5 mL 时,表面的传热系数逐渐增大,而当纳米 TiO₂ 沉积量为 3 mL 时泡沫铜表面的传热系数则有所下降。

在本实验范围中,纳米 TiO₂ 的沉积量为 2.5 mL 时的泡沫铜表面传热系数最高,为 36 kW/(m²·K),大约是没有沉积纳米 TiO₂ 的泡沫铜表面的 1.5 倍以上。这是因为沉积有纳米 TiO₂ 的泡沫铜表面存在大量的纳米孔隙,这种纳米孔隙能够有效增强泡沫铜表面的毛细力,增加其吸液能力,强化表面的沸

腾传热性能,使传热系数提高。而根据 Young-Laplace 方程^[17]:

$$P_c = (2\sigma \cos \beta) / R \quad (6)$$

其中, σ 为水的表面张力, P_c 为毛细吸力, R 为孔隙半径, β 为接触角。说明孔隙直径越小,毛细吸力就越大,这与前面结论一致。而复合表面除了有纳米 TiO₂ 沉积所产生的纳米孔隙,还有泡沫铜本身所具有的微米级孔隙,纳米级的孔隙能够增大吸液能力、加速液体回流,而微米级孔隙能够提供气泡产生的核化点并且加速气相流动。微米级孔隙与纳米级孔隙相结合,能够有效强化气泡成核、生长和溢出,并

且能加速液体回流,达到强化沸腾传热的目的。

2.3 沸腾可视化分析

为了能对复合表面的沸腾过程进行更深入的了解,本实验使用 Photron FASTCAM-SA-X2 Viewer 高速摄像机对沸腾过程进行拍摄。

图 4 显示了不同 TiO₂ 沉积量的泡沫铜表面在不同热通量下的沸腾现象。图 4(a)~4(f) 为光滑表面和纳米 TiO₂ 沉积量分别为 0、1.5、2.0、2.5、3.0 mL 时在不同热通量情况下的沸腾状态。可以看出,在沸腾初始阶段,光滑表面产生的气泡直径最大,而沉积有纳米 TiO₂ 的泡沫铜表面产生的气泡较



图 4 沉积不同量 TiO₂ 的泡沫铜表面沸腾状态

小且密度较大。分析认为,这是由于复合表面具有大量的孔隙,这些孔隙使表面拥有更多的核化点,因此使气泡的密度增大。而随着热通量的升高,更多的核化点被激活,复合表面的沸腾传热性能增强,热通量继续提高,表面沸腾更加剧烈,此时部分气泡出现合并现象。而纳米 TiO₂ 沉积量为 2.5 mL 时表面大部分气泡仍保持相对孤立的脱离状态,合并现象很少,分析认为,这是由于此时表面的纳米级孔隙较多,毛细吸力大,液体回流速度较快,使气泡生长所需液体能够得到及时补充,因此气泡能够及时脱离,不会产生合并。但是当纳米 TiO₂ 沉积量过多时(沉积量为 3 mL 纳米 TiO₂),复合表面的热阻被增大,表面的孔隙遭到堵塞,使气泡的核化点减少且脱离频率降低,导致气泡合并。综上分析,纳米 TiO₂ 与泡沫铜相结合的表面使核化点数量极大增加,并且其纳米级孔隙强化了液体回流速度,这些因素使沸腾传热的性能得到强化。

3 结论

采用沉积法在泡沫铜骨架沉积了大量的纳米 TiO₂ 颗粒,制得 TiO₂ 复合泡沫铜表面。以水为工质对复合表面进行沸腾性能测试,发现沸腾传热性能最好的表面是沉积了 2.5 mL TiO₂ 乙醇溶液的复合表面,此时复合表面的热通量比泡沫铜表面高 170 kW/m²,传热系数比泡沫铜表面高 13 kW/(m²·K),是泡沫铜的 1.5 倍。通过高速摄像机对 TiO₂ 复合泡沫铜表面进行观察发现,与未沉积 TiO₂ 的表面相比,沉积后的表面核化点数量极大增加,沸腾时复合表面产生的气泡密度大、直径小。这说明 TiO₂ 纳米粒子沉积在泡沫铜表面后形成了大量的微孔,增加了表面的毛细吸力,使液体回流速度加快,强化了对流传热。

参考文献

- [1] Hosseinizadeh S F, Tan F L, Moosania S M. Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(17-18): 3827-3838.
- [2] Yeh L T. Review of heat transfer technologies in electronic equipment [J]. Journal of Electronic Packaging, 1995, 117(4): 333-339.
- [3] Bhavnani S, Narayanan V, Qu W, et al. Boiling augmentation with micro/nanostructured surfaces: Current status and research outlook [J]. Nanoscale & Microscale Thermophysical Engineering, 2014, 18(3): 197-222.
- [4] Wu J M, Zhao J Y. A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement—Research gap to engineering application [J]. Progress in Nuclear Energy, 2013, 66(7): 13-24.
- [5] 余莉, 韩玉, 曹业玲, 等. 电子设备散热用平板式热管的实验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(5): 5.
- [6] Ahn H S, Sathyamurthi V, Banerjee D. Pool boiling experiments on a nano-structured surface [J]. IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies, 2009, 32(1): 156-165.
- [7] Cho H J, Mizerak J P, Wang E N. Turning bubbles on and off during boiling using charged surfactants [J]. Nature Communications, 2015, 6: 8599.
- [8] Dong E K, Dong I Y, Dong W J, et al. Review of boiling heat transfer enhancement on micro/nanostructured surfaces [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 66: 173-196.
- [9] Patil C M, Kandlikar S G. Review of the manufacturing techniques for porous surfaces used in enhanced pool boiling [J]. Heat Transfer Engineering, 2014, 35(9-12): 887-902.
- [10] Tran N G, Chun D M. Green manufacturing of extreme wettability contrast surfaces with superhydrophilic and superhydrophobic patterns on aluminum [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297(29): 117245.
- [11] Das S K, Putra N, Roetzel W. Pool boiling characteristics of nanofluids [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2003, 46(5): 851-862.
- [12] Bang I C, Chang S H. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nano-fluids from a plain surface in a pool [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 48(12): 2407-2419.
- [13] Khanafer K, Vafai K. A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(19-20): 4410-4428.
- [14] 冉令鸿, 郎中敏, 吴刚强, 等. 微/纳双尺度复合多孔结构对沸腾传热性能的影响 [J/OL]. 中国电机工程学报, DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210472.
- [15] 曹泂, 杨辉, 吴学红, 等. 微纳结构沸腾表面构建及传热性能的研究进展 [J]. 微纳电子技术, 2020, 57(12): 10.
- [16] 程云, 李菊香, 莫光东. 水在开孔泡沫铜中的池沸腾传热特性 [J]. 化工学报, 2013, 64(4): 5.
- [17] 张茂林, 梅海燕, 李闽, 等. Young-Laplace 方程推导的新方法及应用 [J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(5): 43-45. ■