

氧化石墨烯表面的气泡动力学及传热实验

国乐心¹, 李超杰², 李红海^{1*}

(1. 青岛科技大学化工学院, 山东 青岛 266000; 2. 青岛科技大学环境与安全工程学院, 山东 青岛 266000)

摘要:采用氧化石墨烯(GO)纳米片沸腾自组装法制备 GO 纳米涂层表面,考察表面改性对传热性能、近壁面流场行为和气泡动力学参数的影响。结果表明,GO 纳米涂层表面的强化换热效果明显,临界热流密度(CHF)达到 211.2 W/cm²,换热系数(HTC)达到 8.12 W/(cm²·K),与光滑铜表面相比,分别提高了 89.7%和 75.9%,GO 纳米涂层表面上的气泡脱离直径小,脱离频率高,成核位点多,近壁面的流场更复杂,对流传热更明显。

关键词:纳米结构;池沸腾;传热;气泡;流场

中图分类号:TQ021.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)S2-0173-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S2.034

Bubble dynamics and heat transfer experiments on graphene oxide surface

GUO Le-xin¹, LI Chao-jie², LI Hong-hai^{1*}

(1. College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, China;

2. College of Environment and Safety Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: Graphene oxide (GO) nanocoated surface is prepared through boiling self-assembly of graphene oxide nanosheets. The impact of surface modification on the heat transfer performance, near-wall flow field behavior and bubble kinetic parameters are examined. The experimental results show that GO nano-coated surface has an obvious enhanced heat transfer effect, and its critical heat flow density (CHF) and heat transfer coefficient (HTC) can reach 211.2 W·cm⁻² and 8.12 W·cm⁻²·K⁻¹, respectively, which are 89.7% and 75.9% higher than the smooth copper surface. It is found that the bubbles on GO nano-coated surface have small detachment diameter, high detachment frequency, and many nucleation sites. The convective heat transfer is more pronounced as the flow field near the wall on the GO nanocoated surface is more complex.

Key words: nanostructure; pool boiling; heat transfer; bubble; flow field

池沸腾传热被公认为是最有效的换热方式之一,广泛应用于热交换器和核反应堆等各种工程领域^[1],为了加强传热效果,自上个世纪以来,科学学者对池沸腾换热开展了大量研究^[2]。利用表面改性来提高池沸腾性能具有传热效率高、操作简单、结构稳定等优点。如 Nazari 等^[3]在铝基板上开发了用于池沸腾的氧化铝纳米涂层表面,与光滑铜表面相比,改性表面的临界热流密度(CHF)和换热系数(HTC)显著上升。Das 等^[4]对铜表面上使用的二氧化硅(SiO₂)纳米材料进行表面改性,发现改性得到 SiO₂ 纳米涂层表面的 HTC 增加了 80%,并且 HTC 随着 SiO₂ 涂层厚度的增加而增加。

近些年来的研究发现,氧化石墨烯(GO)具有远优于金属材料的热导率、化学性能和机械强度等

特性,受到强化换热领域的科研人员的广泛关注^[5]。Kim 等^[6]将不同浓度的 GO 胶体悬浮液,沉积在镍铬合金丝表面,研究了对镍铬合金丝表面进行改性后池沸腾传热性能的变化。结果发现,GO 层的热导率抑制了局部热点的形成,从而防止了干区的形成并延迟了 CHF。此外,GO 胶体的热还原导致其热导率和热活性的进一步增加,从而进一步增强了 CHF。毛兰等^[7]利用 GO 纳米片沸腾自组装法制备了 GO 纳米涂层表面,并对其进行了饱和池沸腾换热实验研究。结果表明,大大降低了 GO 纳米涂层的过热度,CHF 为 208 W/cm²,换热系数 HTC 为 7.25 W/(cm²·K),相比于光滑铜平面,分别提高了 66.4%和 86.9%。

综上所述,研究主要集中在对改性表面的沸腾

收稿日期:2023-03-13;修回日期:2023-06-28

基金项目:山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2021QB144)

作者简介:国乐心(1997-),女,硕士生,研究方向为多相流体流动与分离,a17865997839@163.com;李红海(1972-),女,博士,副教授,研究方向为多相流体流动与分离,通讯联系人,lihonghai@qust.edu.cn。

性能进行增强,对改性表面上气泡动力学参数及流场行为的研究尚有不足。本文对 GO 纳米涂层表面上的气泡动力学参数及流场行为进行了实验研究。

1 实验

1.1 实验系统

在常压下,先采用 GO 纳米片沸腾自组装法制备出具有 GO 纳米涂层的表面,再以蒸馏水为液体工质进行了池沸腾实验的研究。

池沸腾装置如图 1 所示。立体沸腾容器由 4 块 40 mm×40 mm×100 mm 的石英玻璃焊接而成,借助辅助加热器控制液体温度,通过 K 型热电偶采集实验数据,由一维稳态导热傅里叶定律来计算样品表面的温度以及加热热流密度,借助 CCD 相机对气泡进行拍摄,采用激光粒子测速法(PIV)^[8]分析其流场,并在铜元件周围用保温棉进行紧密包裹。

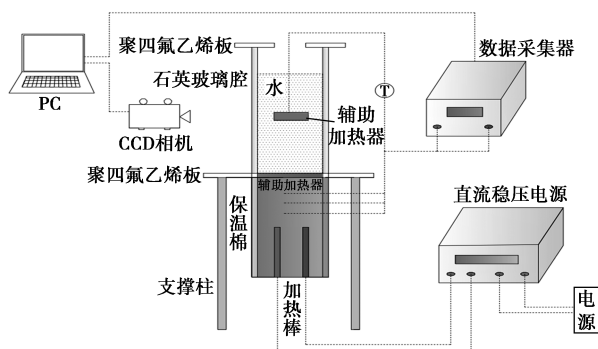


图 1 池沸腾装置示意图

1.2 数据处理

热通量、壁面温度、等效直径^[9-10]计算公式如下:

$$q = -k_{Cu}(dT/dx) \quad (1)$$

$$h = q''/(T_w - T_{sat}) \quad (2)$$

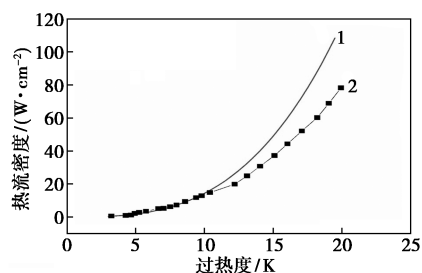
$$T_w = T_1 - q(L/k_{Cu}) \quad (3)$$

$$d_{be} = \sqrt[3]{d_b^2 h_b} \quad (4)$$

式中: q 为热流密度, W/m^2 ; k_{Cu} 为紫铜的热导率, $W/(m \cdot K)$; dT/dx 为温度梯度, K/m ; h 为热通量, $W/(cm^2 \cdot K)$; T_w 为壁面温度, K ; T_{sat} 为液体工质的饱和温度, K ; T_1 为液体的温度, K ; d_{be} 为气泡直径, mm ; d_b 为气泡在不同成长时刻的最大横向直径, mm ; h_b 为气泡高度, mm 。

为了保证实验的一致性和准确性,将光滑铜平面的沸腾曲线与 Rohsenow 相关式进行了比较,如图 2 所示。过热度实验测量值和理论值的相对误差为 0.12%~25.46%,平均相对误差为 6.22%,实验

测试结果相对理论值的偏差在合理的范围之内,可以认为该实验测试系统可靠、结果可信。



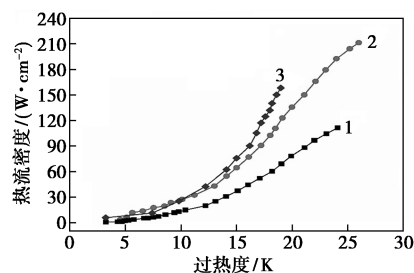
1—光滑铜平面;2—Rohsenow 模型

图 2 实验系统验证光滑铜平面沸腾曲线与 Rohsenow 模型对比

2 结果与讨论

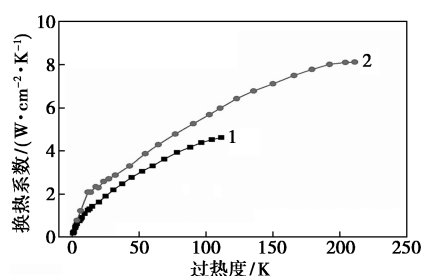
2.1 沸腾换热性能

为了分析纳米粒子涂层对核池沸腾的影响,在常压下对蒸馏水进行了池沸腾实验。沸腾曲线和 HTC 随热通量的变化分别如图 3(a)、3(b)所示。



1—光滑铜表面;2—GO 纳米涂层表面;3—石墨烯镀层

(a) 沸腾曲线



1—光滑铜表面;2—GO 纳米涂层表面

(b) HTC 随热通量的变化

图 3 光滑铜表面和 GO 纳米涂层表面的沸腾换热性能

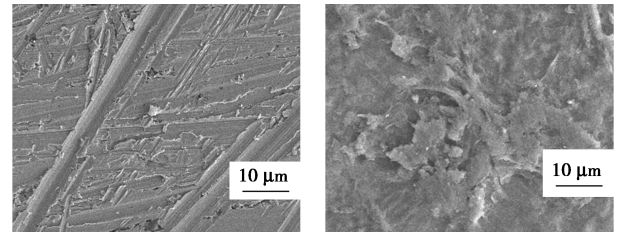
光滑铜表面的 CHF 为 $111.4 W/cm^2$, HTC 为 $4.62 W/(cm^2 \cdot K)$; GO 纳米涂层表面的 CHF 为 $211.2 W/cm^2$, HTC 为 $8.12 W/(cm^2 \cdot K)$,与光滑铜表面相比,分别提高了 89.7%和 75.9%,强化换热效果明显。在相同的壁面过热度下,GO 纳米涂层表面的 CHF 远高于光滑铜表面,在相同的 CHF 下,

GO 纳米涂层表面具有更低的壁面过热度,说明在实际应用中,GO 纳米涂层表面适用于更高的 CHF,且有利于保证设备的寿命和安全。此外,还将 GO 纳米涂层表面与 Jaikumar 等^[11]制备的单层、多层的石墨烯镀层表面的沸腾曲线进行了对比,结果也表明 GO 纳米涂层表面的沸腾换热性能优良。

2.2 表面形态的影响

加热面的表面形貌对气泡动力学及传热性能具有重要的影响,光滑铜表面和 GO 纳米涂层表面的 SEM 图像如图 4 所示。

图 4(a)中光滑铜表面上除了一些划痕外,其他微米和纳米结构很少,整体呈现光滑形态。图 4(b)中可以清楚地看到 GO 纳米涂层表面坑洼,存在着许多微孔结构,与前人研究结果相同^[12-13]。



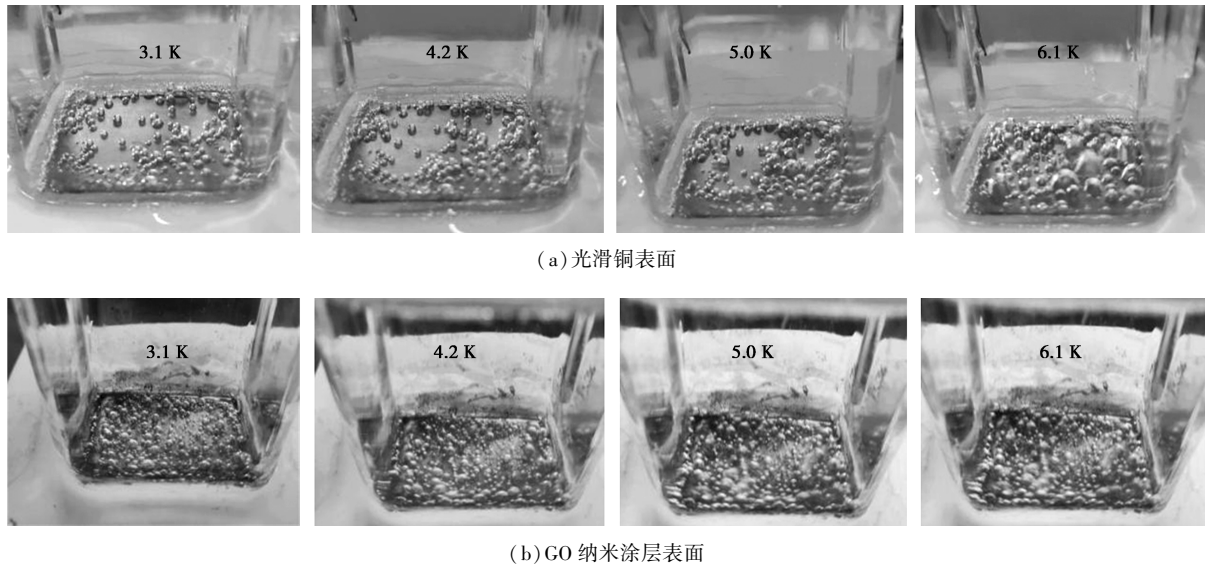
(a)光滑铜表面

(b)GO 纳米涂层表面

图 4 不同表面的扫描电子显微镜(SEM)图像

2.3 气泡可视化

对气泡产生和离开过程的分析有利于研究 GO 纳米涂层表面的强化传热性能。采用 CCD 相机对气泡形态进行拍摄,最大分辨率为 $2\ 456 \times 2\ 056$,采集速率为 16 fps。不同壁面过热度下光滑铜表面和 GO 纳米涂层表面的气泡形态如图 5 所示。



(a)光滑铜表面

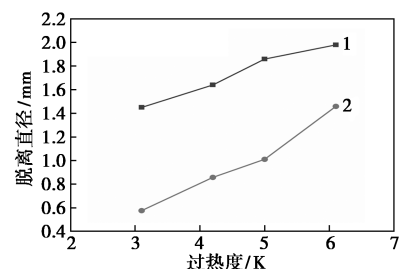
(b)GO 纳米涂层表面

图 5 测试表面上不同壁面过热度下的气泡可视化

当壁面过热度为 3.1 K 时,在两个表面上都产生了许多孤立的气泡,随着壁面过热度的增加,更多的活性成核位点被激活,加热表面上的气泡密度不断增加。当壁面过热度为 6.1 K 时,光滑铜表面上的气泡开始水平聚并,形成大气泡,并开始从加热壁上脱离,GO 纳米涂层表面中只有少量气泡聚并,形成的气泡尺寸偏小。光滑铜表面上气泡的大量聚并,容易在加热面上产生蒸汽膜,蒸汽膜会造成局部热点的产生而出现 CHF 现象,最终导致壁面温度急剧升高,使加热设备损坏。

不同壁面过热度下的气泡脱离直径和频率(为确保准确性,绘制的气泡离开直径和频率至少是 10 个气泡的平均值)结果如图 6(a)、6(b)所示。结果表明,在相同的壁面过热度下,GO 纳米涂层表面的

气泡脱离直径比光滑铜表面小,气泡脱离频率大。可能是由于 GO 纳米涂层表面具有较高的内部导热性,增强了纳米涂层的热传导和相变传热界面,并加速成核过程,使气泡生长力降低,气泡脱离直径减小,脱离频率增加,这种情况可以防止过早出现 CHF 点。



1—光滑铜表面;2—GO 纳米涂层表面

(a)气泡脱离直径随壁面过热度的变化

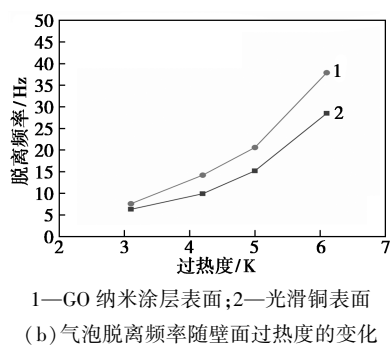


图 6 光滑铜表面和 GO 纳米涂层表面的气泡脱离参数

光滑铜表面和 GO 纳米涂层表面的成核位点密度与壁面过热度的关系如图 7 所示。在相同的壁面过热度下,GO 纳米涂层表面上的成核位点密度比光滑铜表面上的成核位点密度多 30%,这是因为 GO 颗粒的沉积使加热面上产生了更多的成核位点,且 GO 纳米涂层表面上的成核位点密度随着壁面过热度的增加而增加,而在光滑铜表面,当壁面过热度为 6.1 K 时,由于相邻气泡的大量聚并使得部分成核位点被覆盖,没有被激活而产生气泡,导致了光滑铜表面上成核位点密度明显减少。GO 纳米涂层表面上存在的大量成核位点有利于把壁面的热量带到液体中而达到增强传热的目的。

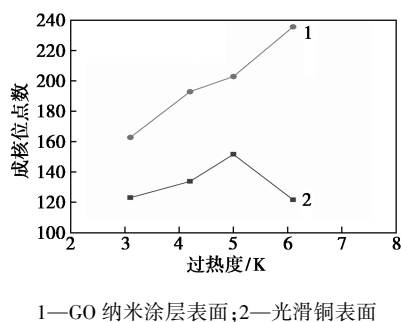


图 7 光滑铜表面和 GO 纳米涂层表面的成核位点密度与壁面过热度的关系

2.4 流场分析

为了研究表面改性前后壁面附近的流场行为,使用 PIV 进行了实验。结果表明,GO 纳米涂层表面附近的流场更紊乱,可能是 GO 纳米涂层表面上生成的气泡数量多,相对于气泡直径,众多气泡的生长过程对周围流体的影响更大。流场扰动剧烈,有利于对流传热过程。

3 结论

在相同的热流密度下,GO 纳米涂层表面具有

更低的壁面过热度。在相同壁面过热度下,GO 纳米涂层表面具有更多的成核位点,且随着壁面过热度的增加而增加,在壁面过热度为 3.1~6.1 K 时,GO 纳米涂层表面上的气泡脱离直径小,脱离频率高,成核位点多,附近流场更紊乱,说明 GO 纳米涂层表面不仅增强了壁面传热,还增强了对流传热。

参考文献

- [1] Kim J. Review of nucleate pool boiling bubble heat transfer mechanisms [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35(12): 1067-1076.
- [2] Mori S, Okuyama K. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35(10): 946-951.
- [3] Nazari A, Saedodin S. Critical heat flux enhancement of pool boiling using a porous nanostructured coating [J]. *Experimental Heat Transfer*, 2016, 30(4-6): 316-327.
- [4] Das S, Kumar D S, Bhaumik S. Experimental study of nucleate pool boiling heat transfer of water on silicon oxide nanoparticle coated copper heating surface [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 96: 555-567.
- [5] Jaikumar A, Gupta A, Kandlikar S G, et al. Scale effects of graphene and graphene oxide coatings on pool boiling enhancement mechanisms [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 109(6): 357-366.
- [6] Kim J M, Kim T J, Kim J Y, et al. Effect of a graphene oxide coating layer on critical heat flux enhancement under pool boiling [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 77(10): 919-927.
- [7] 毛兰, 周文斌, 胡学功, 等. 氧化石墨烯表面的饱和池沸腾强化传热实验 [J]. *化工进展*, 2019, 38(9): 4164-4173.
- [8] 朱春英, 马友光, 高习群. 气泡周围流场的 PIV 测定和浓度场研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2009, 23(3): 532-536.
- [9] Yabuki T, Nakabeppu O. Heat transfer mechanisms in isolated bubble boiling of water observed with MEMS sensor [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 76: 286-297.
- [10] Yabuki T, Nakabeppu O. Microscale wall heat transfer and bubble growth in single bubble subcooled boiling of water [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 100: 851-860.
- [11] Jaikumar A, Gupta A, Kandlikar S G, et al. Scale effects of graphene and graphene oxide coatings on pool boiling enhancement mechanisms [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 109(6): 357-366.
- [12] Kim S J, Bang I N, Buongiorno J, et al. Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(15): 153107.
- [13] Park S D, Lee S W, Kang S, et al. Effects of nanofluids containing graphene/graphene-oxide nanosheets on critical heat flux [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(2): 23103. ■