

改性 TiO₂ 及其纳米流体的核沸腾传热特性

张泽玉, 郎中敏*, 吴刚强, 高向阳, 康英杰

(内蒙古科技大学化学与化工学院, 内蒙古自治区煤化工与煤炭综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要:采用全氟癸基三甲氧基硅烷对纳米 TiO₂ 进行改性, 有效改善了纳米粒子的团聚性能。利用两步法分别制备相同浓度范围的改性前/后 TiO₂ 纳米流体, 考察了 2 组纳米流体的热导率、静态接触角对核沸腾传热特性的影响。结果表明, 在质量分数为 0.05% 时, 未改性纳米流体沸腾传热系数较去离子水最大提高 16.3%, 改性纳米流体传热系数可提高 28.57%, 且改性纳米流体临界热通量较未改性纳米流体降低 11.68%。热导率和接触角是影响不同润湿性纳米流体具有不同沸腾传热特性的主要因素, 润湿性较差纳米流体易提前起沸和形成核化点, 但随热通量的增加会造成气泡合并、恶化传热。

关键词: 二氧化钛; 疏水改性; 纳米流体; 强化传热; 沸腾传热

中图分类号: TK124; TB64

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)01-0116-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.01.021

Hydrophobic modification of TiO₂ and study on nucleation boiling heat transfer properties of modified TiO₂ based nanofluid

ZHANG Ze-yu, LANG Zhong-min*, WU Gang-qiang, GAO Xiang-yang, KANG Ying-jie

(Inner Mongolia Key Laboratory of Coal Chemical and Coal Comprehensive Utilization, School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Nano TiO₂ is modified by perfluorodecyltrimethoxysilane to effectively enhance the aggregation properties of nanoparticles. TiO₂ nanofluids with the same concentration range before and after modification are prepared by a two-step method, and the effects of thermal conductivity and static contact angle of the two groups of nanofluids on the nuclear boiling heat transfer characteristics are investigated. The results demonstrate that at a mass fraction of 0.05%, the boiling heat transfer coefficient of unmodified TiO₂ nanofluid is up to 16.3% higher than that of deionized water, but that of modified TiO₂ nanofluid is 28.57% higher than that of deionized water. Furthermore, the critical heat flux of modified TiO₂ nanofluid is 11.68% lower than that of unmodified TiO₂ nanofluid. Thermal conductivity and contact angle are the main factors affecting the boiling heat transfer characteristics of nanofluids with different wettability. The nanofluids with poor wettability tend to start boiling in advance and form nucleation points, but the increase in heat flux causes bubbles to merge and deteriorate heat transfer.

Key words: titanium dioxide; hydrophobic modification; nanofluid; enhanced heat transfer; boiling heat transfer

目前, 传统的传热介质(包括水、醇、油等)因传热系数较低受到应用限制。麦克斯韦^[1]首次发现固液混合物具有更高的热导率, 但由于固体的微尺寸效应使其存在沉降快、管道和设备腐蚀、流道堵塞、压降增大等问题。为解决这一问题, Chio 等^[2]提出纳米流体新概念, 即含有金属、氧化物、碳化物或碳纳米结构等纳米粒子的悬浮液。近年来, 众多学者认为纳米粒子主要通过改善工作流体的热导率、流动性能以及接触角等热物性参数强化传热。

目前纳米流体研究主要侧重于热导率、纳米颗粒沉积、浓度及粒径等方面因素对传热性能的影响^[3]。Mehralizadeh 等^[4]研究了沸腾表面改性对 TiO₂-SiO₂ 复合纳米流体池沸腾传热特性的影响, 认为纳米流体热物理性质的提高显著改善了池沸腾

传热特性, 并且改变沸腾表面的形貌可显著提高其沸腾传热系数。Özbey Arzu 等^[5]从气泡动力学角度分析了 TiO₂ 纳米流体强化沸腾的传热机理, 认为气泡成核位点、表面张力、纳米粒子沉积在气泡动力学和池沸腾过程中起重要作用。Norouzipour 等^[6]研究了不同粒径大小的 SiO₂ 水基纳米流体的沸腾传热性能, 在低浓度范围内逐渐加入纳米颗粒可显著增强池沸腾传热性能, 同时纳米颗粒粒径的增大会进一步强化传热性能。另外, 还报道了 TiO₂ 纳米颗粒在制冷剂中的传热特性^[7-8], 结果表明其性能优于纯制冷剂工质。综上所述, 纳米流体热物性对沸腾传热具有重要影响, 其中表面张力(接触角)对沸腾传热过程的起沸、导热及临界热通量等均存在一定影响^[9-10]。TiO₂ 纳米流体成本低、稳定性高、耐

收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-10-30

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: 张泽玉(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为纳米流体传热, 2467778155@qq.com; 郎中敏(1980-), 女, 硕士, 教授, 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。

高温,且在液态介质中具有良好的分散性^[11-12]。

笔者对 TiO₂ 纳米颗粒进行疏水改性,并运用“两步法”分别制备了 TiO₂/H₂O 和疏水改性 TiO₂/H₂O 纳米流体,对相同浓度范围内的 2 组纳米流体进行池沸腾传热性能测试,从热导率、表面接触角以及沸腾传热系数方面考察了 2 种纳米流体的沸腾性能,并从气泡动力学角度对 2 种纳米流体的沸腾性能进行了剖析。

1 实验材料与方法

1.1 实验试剂

TiO₂ (15 nm, 99.9%), 杭州智钛净化科技有限公司生产;全氟癸基三甲氧基硅烷 (95%)、乙醇 (≥99.8%), 国药集团有限公司生产;去离子水, 自制。

1.2 疏水 TiO₂ 纳米粉体的制备

将全氟癸基三甲氧基硅烷 (FS1710)、乙醇、去离子水按体积比 1:49:50 混合搅拌 6 h, 待其充分水解后, 将 TiO₂ 纳米粉体充分浸入到水解的 FS1710 溶液中, 反应 5 h 后放入烘箱, 120℃ 干燥 90 min, 得到疏水 TiO₂ 纳米粉体。

1.3 亲/疏水纳米 TiO₂ 及纳米流体热物性表征

利用 WQF-520 型傅里叶变换红外光谱仪对改性前后纳米二氧化钛和全氟癸基三甲氧基硅烷进行分析; 利用 JEOL100CX 型透射电镜对改性前后 TiO₂ 形貌与粒径表征; 利用瞬态热线法测量纳米流体的热导率; 利用 OCA20 型视频光学接触角测量仪对去离子水及不同质量分数改性前/后纳米 TiO₂ 纳米流体在沸腾表面接触角进行测量。

1.4 实验装置

沸腾测试装置系统如图 1 所示, 该系统主要由加热系统、冷却回流系统、数据采集系统、CCD 高速相机和记录系统组成。其中加热系统由耐压石英玻璃缸体、温度测试、压力传感器 (精确度范围 ±0.5% FSO) 和冷凝管等组成。较高精度的直流电源 (WYJ-200V10A) 连接加热棒插入铜棒 (实验工件) 底部作为电源, 以铜棒上表面 (加热面在实验前均用 1 000~3 000# 砂纸打磨光滑) 为基准, 依次向下插入 3 支高精度的热电偶 (误差范围 ±0.2 K) 测量实验温度, 热电偶分布在工作流体内, 用于测试液体温度。整个测试系统具有良好的隔热性能, 保证热损失小于 5%。利用 CCD 高速摄像机和记录系统 (Photron FASTCAM-SA-X2 Viewer) 观察和记录气泡的动力学特征。测量的电流和电压输入数据采集

系统进行保存。

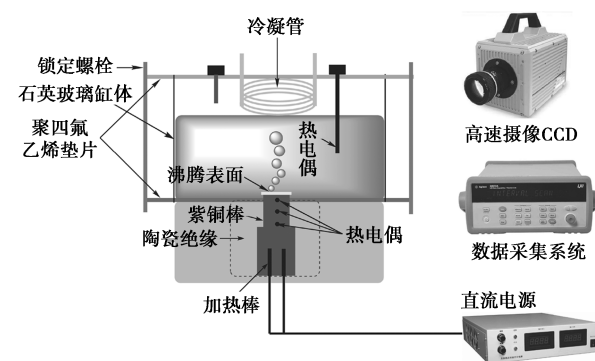


图 1 沸腾测试装置

本实验加热面积误差小于 2.5%; 壁面过热度的误差为 ±2%; 整个实验沸腾传热系数 h 的误差为 ±9.1%。

2 改性前后 TiO₂ 纳米颗粒的表征

2.1 TiO₂ 纳米颗粒疏水改性机理

测量水在改性前后 TiO₂ 纳米颗粒压片表面的接触角分别为 27.4° 及 136.9°, TiO₂ 纳米颗粒疏水改性效果明显。

TiO₂ 纳米颗粒疏水改性机理如图 2 所示。由图 2 中可以看出, 全氟癸基三甲氧基硅烷的 Si—O 键发生水解并与 TiO₂ 表面的羟基发生反应, 在其表面形成新的化学键。

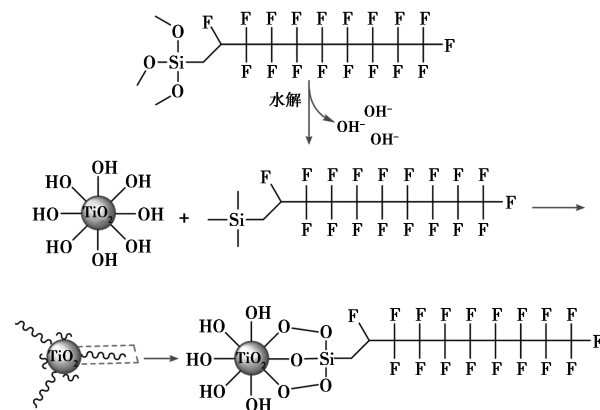
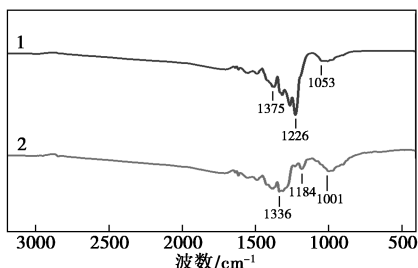


图 2 TiO₂ 纳米颗粒疏水改性机理

2.2 改性前后纳米二氧化钛红外光谱

改性前后纳米 TiO₂ 的红外光谱如图 3 所示。由图 3 中可以看出, 在 1 226 cm⁻¹ 和 1 184 cm⁻¹ 处均存在吸附在表面的水分子的 O—H 特征吸收峰^[13], 改性后的 TiO₂ 表面的 —OH 被 FS1710 取代, 所以峰强明显变弱, 同时在改性后 TiO₂ 的图谱中, 1 001 cm⁻¹ 处出现 —CF₂— 的伸缩振动峰, 表明 TiO₂

表面存在 FS1710。另外,1 336 cm^{-1} 处出现新的吸收峰,表明 FS1710 中的 Si—O 键发生水解并与 TiO_2 表面的羟基发生反应,在表面形成 Ti—O—Si 化学键。由此可知,FS1710 成功接枝到 TiO_2 纳米颗粒表面,实现疏水改性。

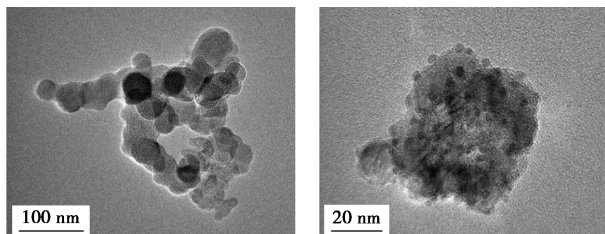


1—改性前;2—改性后

图 3 改性前后纳米二氧化钛红外光谱图

2.3 改性前后 TiO_2 纳米粒子 TEM 表征

改性前后 TiO_2 纳米粒子 TEM 图如图 4 所示。由图 4 中可以看出,疏水改性可以显著改善纳米粒子的团聚,改性后纳米粒子具有良好分散性,纳米 TiO_2 存在大量亲水基团(—OH),表面活性高,稳定性差,容易使颗粒相互团聚。全氟癸基三甲氧基硅烷的水解基团与颗粒表面的羟基反应,在颗粒表面形成有机吸附层,另外,长链 F 基团的引入增加了粒子间的距离和稳定性,从而表现出优异的疏水性和分散性。



(a) 改性前 TiO_2 的 TEM 图 (b) 改性后 TiO_2 的 TEM 图

图 4 改性前后纳米 TiO_2 的 TEM 表征结果

3 结果与分析

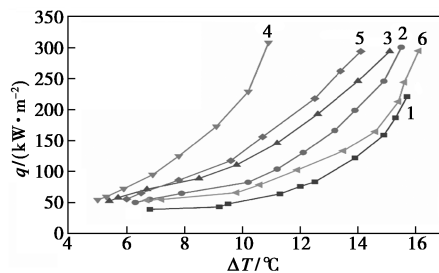
3.1 沸腾曲线分析

不同质量分数改性前 TiO_2 纳米流体的沸腾传热特性曲线如图 5(a)、图 5(b) 所示。由图 5(a) 可知,在质量分数为 0.01%、0.03%、0.05% 时,纳米流体的沸腾性能均随质量分数的增加而提高,质量分数为 0.05% 时,纳米流体起沸点由去离子水 7℃ 降低至 5℃。由图 5(b) 可知,所有纳米流体的传热系数均随热通量的增加而增大。在相同热通量下,质量分数为 0.01%~0.05% 纳米流体传热系数随质量

分数的增大而增大,临界热通量(CHF)也随质量分数的增大而增大,质量分数为 0.05% 纳米流体的传热系数提高 16.3%,其 CHF 值最大较去离子水提高 39.65%,当质量分数继续增大,传热系数开始降低,同时 CHF 降低,传热开始恶化。

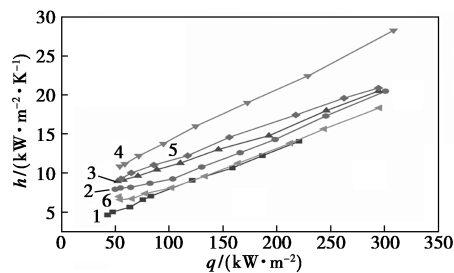
不同质量分数改性后 TiO_2 纳米流体的沸腾传热特性曲线如图 5(c)、图 5(d) 所示。由图 5(c) 可知,质量分数为 0.01%~0.05% 时,纳米流体的起沸过热度随质量分数的增加而降低,其起沸点由去离子水 7℃ 降低到 4℃。由图 5(d) 可知,所有纳米流体传热系数随热通量的增大而增大,且在相同热通量下,质量分数为 0.01%~0.05% 时纳米流体传热系数和 CHF 均随质量分数的增大而增大,其传热系数和 CHF 较去离子水分别提高 28.57%、26.25%。当质量分数达到 0.07% 时,其传热系数和 CHF 均开始降低,传热开始恶化。

质量分数 0.01%~0.05% 改性前/后 TiO_2 纳米流体的沸腾特性曲线对比图如图 5(e)、图 5(f) 所示。由图 5(e) 可知,相同质量分数下改性纳米流体的沸腾曲线较改性前纳米流体偏左,CHF 值有所降低,其过热度由改性前 5℃ 降低到改性后 4℃。从图 5(f) 中可以看出,对比质量分数为 0.01%、0.03% 改性前/后纳米流体,在相同热通量下,改性纳米流体传热系数较未改性纳米流体增大,最大可提高 16.5%。当质量分数为 0.05% 时,随着热通量的增加,改性纳米流体的沸腾曲线右移,传热系数降低,



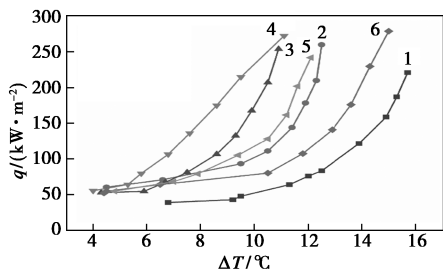
1—纯水;2—0.01%;3—0.03%;4—0.05%;5—0.07%;6—0.10%

(a) 未改性 TiO_2 纳米流体热通量与过热度关系曲线

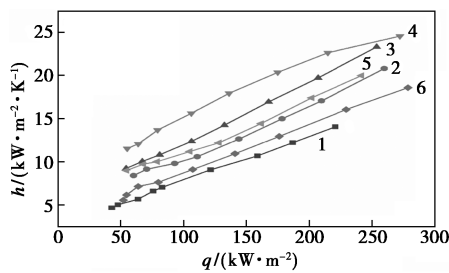


1—纯水;2—0.01%;3—0.03%;4—0.05%;5—0.07%;6—0.10%

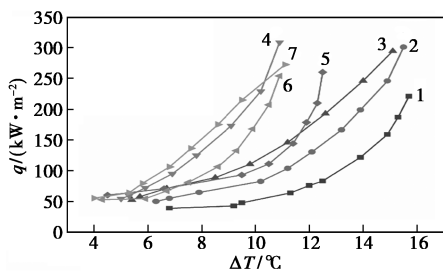
(b) 未改性 TiO_2 纳米流体传热系数与热通量关系曲线



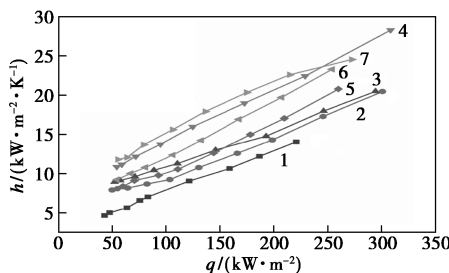
1—纯水;2—0.01%;3—0.03%;4—0.05%;5—0.07%;6—0.10%

(c) 改性 TiO₂ 纳米流体热通量与过热度关系曲线

1—纯水;2—0.01%;3—0.03%;4—0.05%;5—0.07%;6—0.10%

(d) 改性 TiO₂ 纳米流体传热系数与热通量关系曲线1—纯水;2—0.01%;3—0.03%;4—0.05%;5—改性 0.01%;
6—改性 0.03%;7—改性 0.05%

(e) 0.01%~0.05% 两组纳米流体热通量与过热度关系曲线

1—纯水;2—0.01%;3—0.03%;4—0.05%;5—改性 0.01%;
6—改性 0.03%;7—改性 0.05%

(f) 0.01%~0.05% 两组纳米流体传热系数与热通量关系曲线

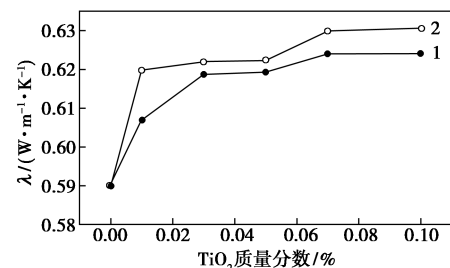
图5 TiO₂ 纳米流体沸腾传热性能曲线

传热开始恶化, CHF 值较改性前降低 11.68%。Karimzadehkhoei 等^[14] 研究发现, 质量分数为 0.001%~0.2% TiO₂ 水基纳米流体传热系数较去离子水最大可提高 15%。韩晓雪^[15] 认为疏水型纳米颗粒可降低流体的表面张力[关系式为 $\cos \theta = (\gamma_{s-g} - \gamma_{l-s}) / \gamma_{l-g}$], 降低界面阻力, 促使纳米流体提前起沸。

相同类型纳米粒子的沸腾传热性能可依赖于纳米颗粒的润湿性。

3.2 热导率分析

改性前后 TiO₂ 纳米流体的热导率随质量分数变化趋势如图 6 所示。由图 6 可知, 所有纳米流体的热导率均随质量分数的增加而增大, 在相同质量分数下, 改性 TiO₂ 纳米流体的热导率较高。分析原因为疏水改性后的 TiO₂ 纳米粒子具有优异的分散性, 其均匀分布的纳米粒子链通过布朗运动引起基液的微对流, 提供有效的传热通道, 以提高纳米流体的有效导热性。

1—亲水 TiO₂ 纳米流体;2—疏水 TiO₂ 纳米流体图6 热导率随 TiO₂ 纳米流体质量分数的变化情况

3.3 纳米流体表面接触角

表面润湿性是相变传热过程中重要影响因素^[16-17]。Ming Hui 等^[18] 提出受热壁面上生成气泡所需自由焓与表面接触角的关系式:

$$f(\theta) = (2 + 3 \cos \theta - \cos^3 \theta) / 4 \quad (1)$$

$$\Delta H = [(4/3) \pi r^3 \rho_v (\varphi_v - \varphi_l) + 4 \pi r^2 \sigma] f(\theta) \quad (2)$$

且气泡生成所需自由焓与能量因子成正比:

$$\Delta E_f(R^*, \theta) = [(4 \pi R^{*2}) / 3] \sigma \times f(\theta) \quad (3)$$

不同质量分数改性前后纳米流体在光滑铜表面的接触角变化情况如表 1 所示。由表 1 可知, 去离子水与光滑铜表面的接触角为 56.4°, 所有纳米流体的接触角随质量分数的增大而增大, 且在相同质量分数下, 疏水 TiO₂ 纳米流体的接触角 (66~108.9°) 高于未改性 TiO₂ 纳米流体 (62.7~84.4°)。当质量分数为 0.10% 时, 亲水性纳米流体接触角增大至 84.4°, 与去离子水相比增大 28°, 代入式 (1), $f(\theta)$ 降低 0.299 7, 由式 (2)、式 (3) 可得, 未改性 TiO₂ 纳米流体生成气泡所需自由焓及能量因子较去离子水降低 34.34%, 而疏水性纳米流体接触角比去离子水增大 52.5°, $f(\theta)$ 降低 0.607 1°, 其生成气泡所需自由焓及能量因子较去离子水降低 69.57%。分析认为, 接触角增大可降低气泡生成所需要的自由焓, 降低壁面成核过热度。在沸腾初期,

疏水性纳米流体表面微层蒸发形成气泡所需能量因子较小,是疏水纳米流体具有较低起沸点的主要原因。纳米粒子沉积形成微纳多孔结构,可改变表面润湿性,但疏水表面会导致临界热流密度显著降低,并恶化传热。因此接触角对 TiO₂ 纳米流体传热性能存在较大影响。

表 1 TiO₂ 纳米流体及去离子水接触角测量

改性前亲水 TiO ₂						
纳米流体质量分数%	0	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1
静态接触角/(°)						
	56.4	62.7	66.0	70.0	78.2	84.4
改性后疏水 TiO ₂						
纳米流体质量分数%	0	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1
静态接触角/(°)						
	56.4	66.0	74.6	82.5	90.0	108.9

4 沸腾可视化分析

采用高速摄像系统拍摄沸腾过程,对纳米流体的沸腾过程进行更深入的研究。从图 5(a)、图 5(c)可知,2 组纳米流体在质量分数为 0.05% 均达到最佳沸腾传热性能,故选取 2 组纳米流体在质量分数为 0.05% 时的沸腾状态图像进行研究。

去离子水和质量分数为 0.05% 的亲疏水 TiO₂ 纳米流体在不同热通量下的沸腾状态如图 7 所示。由图 7 可知,在沸腾初期,与改性前纳米流体及去离子水相比,改性后纳米流体具有较大的气泡密度。这是因为改性纳米流体接触角的增大使工质表面张力降低,提高气液对流的稳定性^[18],降低气泡生成所需自由焓,使气泡更易生成,同时,改性 TiO₂ 纳米颗粒的高效布朗运动及其纳米流体导热系数的增大,3 种因素的共同作用使疏水性纳米流体的起沸点明显降低。随着热通量的增加,疏水性 TiO₂ 纳米流体更易激活核化点,增大气泡密度,因此其核态沸腾传热性能较改性前 TiO₂ 纳米流体增加。

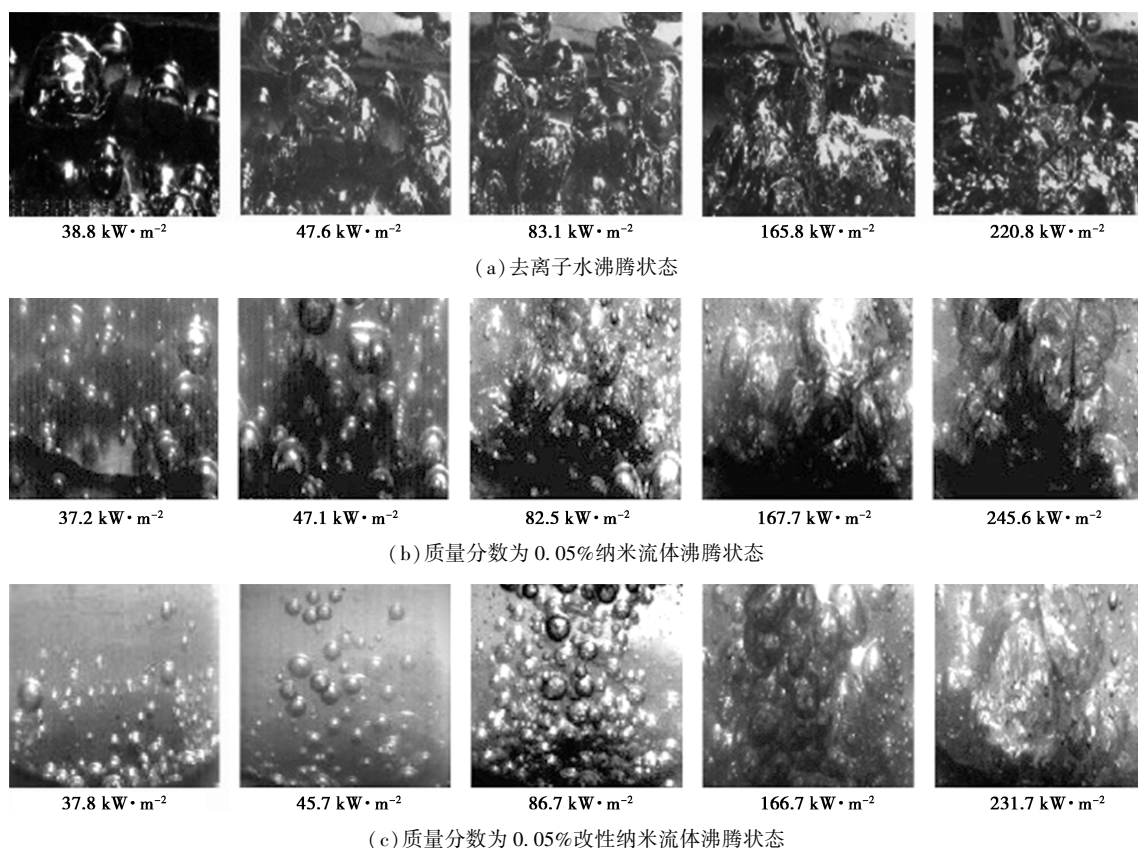


图 7 质量分数为 0.05% 改性前后 TiO₂ 纳米流体及去离子水在不同热通量下的沸腾状态

随着热通量继续增加,沸腾加剧,气泡开始出现合并,改性后纳米流体气泡脱离直径较改性前纳米流体大,造成气泡合并。原因是纳米颗粒与加热

表面不断碰撞,致使部分纳米颗粒开始沉积,因此,改性前 TiO₂ 纳米流体加热表面的核化点密度增大,且其沉积层形成吸液芯结构,促进液体回流,进而促

进气泡生长。液体回流主要受毛细力驱动^[19]:

$$P_1 = (2\gamma\cos\theta)/R \quad (4)$$

式中: γ 为表面张力; R 为毛细管半径; θ 为液体在毛细管壁的接触角。因此其纳米颗粒形成的沉积层促进毛细力增大,提高液体回流速率,气泡合并较弱,临界热通量增大。改性后 TiO₂ 纳米流体具有较强疏水性能、空间位阻效应以及较优异的稳定性,其纳米颗粒沉积层较薄,接触角增大会导致气泡脱离频率降低,另外,由于表面张力的降低,使其作用在气泡向上的反作用力降低,气泡脱离直径增大,导致大量气泡聚集合并,恶化传热,随后达到膜沸腾状态。综合以上分析,疏水性较强的纳米流体可促进气泡核化,在沸腾初期具有显著强化沸腾作用;但随着热通量增大,气泡脱离直径增大导致气泡横向合并,降低临界热通量;纳米流体沉积层形成多孔吸液芯结构,加速液体回流,强化沸腾传热。

5 结论

利用全氟癸基三甲氧基硅烷对 TiO₂ 纳米颗粒进行疏水改性,有效改善了 TiO₂ 纳米粒子的团聚性能。改性前/后 TiO₂ 纳米流体热导率、表面接触角、纳米流体热导率和接触角均随浓度增大而增大,且疏水改性后 TiO₂ 纳米流体具有更高热导率;疏水改性后 TiO₂ 纳米流体接触角明显增大。沸腾可视化图像显示,沸腾初期,疏水性较强的纳米流体可促进气泡核化,其沉积层形成多孔吸液芯结构可加速液体回流而强化沸腾;随着热通量增大,气泡脱离直径增大,气泡合并现象严重,致使 CHF 略有降低。

参考文献

- [1] Maxwell J. A treatise on electricity and magnetism [J]. Nature, 1873, 7(182): 478-480.
- [2] Choi S, Eastman J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [J]. Asme Fed, 1995, 66: 99-105.
- [3] 刘海洪, 李先宁, 蔡杰. 浅水湖泊升流循环复氧装置的研制与性能 [J]. 化工学报, 2014, 65(2): 718-723.
- [4] Mehralizadeh A, Shabani S R, Bakeri G. Experimental and modeling study of heat transfer enhancement of TiO₂/SiO₂ hybrid nanofluids on modified surfaces in pool boiling process [J]. European Physical Journal Plus, 2020, 135(10): 796-825.
- [5] Özbey, Arzu, Özbey A, Karimzadehkhoei M, et al. Changing bubble dynamics in subcooled boiling with TiO₂ nanoparticles on a platinum wire [J]. Journal of Molecular Liquids, 2017, 242: 456-470.
- [6] Norouzipour A, Abdollahi A, Afrand M, et al. Experimental study of the optimum size of silica nanoparticles on the pool boiling heat transfer coefficient of silicon oxide/deionized water nanofluid [J]. Powder Technology, 2019, 345: 728-738.
- [7] 张沁源, 龙晓波, 范兴祥, 等. TiO₂-R123 纳米制冷剂管内流动沸腾传热特性 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3959-3969.
- [8] Chen R H, Chang T B. Heat transfer enhancement of pool boiling for a horizontal U-tube using TiO₂-R141b nanofluid [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2014, 28(12): 5197-5204.
- [9] Sidik N A C, Adamu I M, Jamil M M, et al. Recent progress on hybrid nanofluids in heat transfer applications: A comprehensive review [J]. International Communications in Heat & Mass Transfer A Rapid Communications Journal, 2016, 78: 68-79.
- [10] Kamatchi R, Venkatachalapathy S, Nithya C. Experimental investigation and mechanism of critical heat flux enhancement in pool boiling heat transfer with nanofluids [J]. Heat & Mass Transfer, 2016, 52(11): 2357-2366.
- [11] Chen H, Ding Y, He Y, et al. Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids [J]. Chemical Physics Letters, 2007, 444(4-6): 333-337.
- [12] Padmanabhan V, Palanisamy S. The use of TiO₂ nanoparticles to reduce refrigerator irreversibility [J]. Energy Conversion & Management, 2012, 59(none): 122-132.
- [13] Ghadimi A, Metselaar I H. The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid [J]. Experiment Thermal And Fluid Science, 2013, 51: 1-9.
- [14] Karimzadehkhoei M, Shojaean M, Kürsat Sendur, et al. The effect of nanoparticle type and nanoparticle mass fraction on heat transfer enhancement in pool boiling [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2017, 109: 157-166.
- [15] 韩晓雪. 纳米 TiO₂ 表面性质与表面活性剂对纳米流体物性的影响 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- [16] 柴永志, 张伟, 亚东. 润湿性对微纳复合结构表面池沸腾换热的影响 [J]. 高校化学工程学报, 2017, 31(4): 984-990.
- [17] 陈宏霞, 黄林滨, 宫逸飞. 多孔结构及表面浸润性对池沸腾传热影响的研究进展 [J]. 化工进展, 2017, 36(8): 2798-2808.
- [18] Chang M H, Liu H S, Tai C Y. Preparation of copper oxide nanoparticle sand its application in nanofluid [J]. Powder Technology, 2011, 207(1-3): 378-386.
- [19] 庄大伟, 杨艺菲, 胡海涛, 等. 竖直翅片间液桥体积计算模型 [J]. 化工学报, 2016, 67(10): 4080-4085. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。