

过冷度对低液位池沸腾影响的实验研究

崔文彬*, 王茂州, 苏凤民, 吴桂涛
(大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:以铜片为基板,采用两步电镀法制备出具有超疏水和疏水特性的微纳结构 A、B 2 个表面,与常规铜表面一并应用于低液位过冷池沸腾,过冷度分别保持在 0、20℃ 和 40℃。实验结果表明,与饱和沸腾不同,液位降低并未明显提高沸腾传热系数,3 个表面的传热系数在 40℃ 过冷度情况下还出现了降低的情况。主要原因是过冷情况下液位降低虽然会形成超大气泡,在高功率时抑制气泡脱离或在低功率时增加气泡扰动,同时导致流体的温度梯度减小,单相对流换热效果减弱,致使沸腾传热系数降低。受超疏水润湿性和较大汽化核心密度的影响,液位降低时 A 表面饱和沸腾传热系数提升效果最佳,过冷沸腾传热系数也未严重恶化。

关键词:过冷度;微纳结构;液位;池沸腾;传热系数

中图分类号:TK1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)05-0125-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.05.026

Experimental study on effect of subcooling degree on pool boiling at low liquid level

CUI Wen-bin*, WANG Mao-zhou, SU Feng-min, WU Gui-tao

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: By using copper sheet as substrate, a two-step electrodeposition method is applied to fabricate two micro/nano-structured copper surfaces (A and B) with super-hydrophobic and hydrophobic features, respectively. These two surfaces and a conventional copper surface are applied in subcooled pool boiling at low liquid level. Subcooling degrees remain at 0°C, 20°C and 40°C, respectively. Experimental results show that heat transfer coefficients of subcooled boiling in shallow water for the surfaces do not increase with the dropping liquid level, which is different from saturated boiling in shallow water. On the contrary, heat transfer coefficients of three surfaces all deteriorated due to dropped liquid level when the subcooled degree is at 40°C. Reducing liquid level can result in the decreasing single phase convection by reducing the temperature gradient, although super big bubble will form when the liquid level dropped enough, which can depress bubble departure frequency and enhance bubble turbulence. Due to its super-hydrophobicity and larger nucleation site density, surface A performs the best among these three surfaces.

Key words: subcooling degree; micro/nano-structure; liquid level; pool boiling; heat transfer coefficient

沸腾换热系数较大,广泛应用于设备冷却^[1-5]。影响沸腾换热效果的因素较多,如换热表面的微纳结构^[6-8]、换热表面的润湿性^[9-12]、流体物性^[13-15]以及液位高度^[16-17]等。其中液位高度的影响主要表现为,液位降低至一定高度后,气液界面会阻碍气泡脱离、提高相变换热时间,进而提高沸腾换热系数^[16];另一方面,液位降低还可导致液体扰动加大、沸腾传热系数提高^[17]。因此,液位降低对于沸腾换热有一定的促进作用。但现有研究主要以饱和沸腾为主,过冷度对于气泡脱离尺寸影响较大,而以上研究所涉及的气泡脱离时间和液体扰动又与气泡尺寸有关^[16-17],因此仍需要做一定的研究以分析过冷度对于低液位沸腾的影响。为细致研究过冷度对低液位沸腾的影响,鉴于表面润湿性对气泡尺寸影响较大,将联合使用超疏水铜表面 A 和疏水铜表

面 B,以对比分析的方式总结过冷度的影响。

1 微纳结构铜表面 A 和 B 的制备

两步电镀法用于制备微纳结构铜表面,方法简单、成本低廉、可重复性高,通过改变电流大小和溶液配比可以制备出多样化的微纳结构^[1,18]。使用 1 mol/L CuSO₄、0.5 mol/L H₂SO₄ 和 50 mmol/L HCl 混合溶液作为电镀溶液,电镀相关参数如表 1 所示,电镀实验系统如图 1 所示,其中阴阳极皆为铜板,详细操作流程参见文献^[19]。

表 1 电镀参数列表

表面	第 1 步电流密度/ 时长/		第 2 步电流密度/ 时长/	
	(A·cm ⁻²)	s	(A·cm ⁻²)	s
A	1.10	15	0.05	4800
B	1.00	15	0.05	4800

收稿日期:2020-07-01;修回日期:2021-03-08

基金项目:国家自然科学基金(51876019);辽宁省自然科学基金(201602069);中央高校基本科研业务费专项资金(3132019331)

作者简介:崔文彬(1981-),男,博士,副教授,研究方向为微纳尺度相变换热,通讯联系人,cuiwenbin@dlmu.edu.cn。

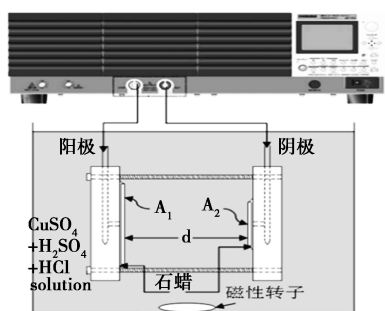
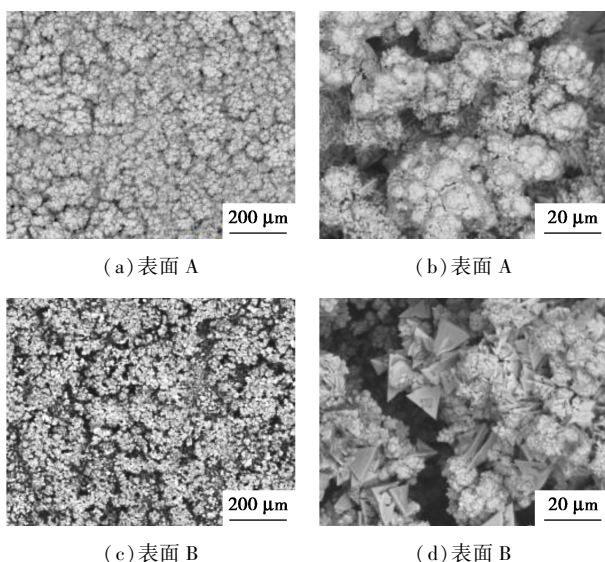


图 1 电镀实验系统

电镀制备的微纳结构经电镜扫描后如图 2 所示。由图 2 中可以看出,表面 A 的结构为菜花状,表面 B 的结构为菜花状和三角状的结合,表面 A 具有较大的汽化核心密度。利用 KRÜSS DSA30 接



(a) 表面 A (b) 表面 A
(c) 表面 B (d) 表面 B

图 2 电镀铜表面微结构

角测量仪进行表面润湿性测量,结果如图 3 所示。由图 3 中可以看出,与铜表面的亲水性(接触角为 84°)相比, A 表面具有超疏水特性(接触角为 155°),而 B 表面具有疏水特性(接触角为 118°)。

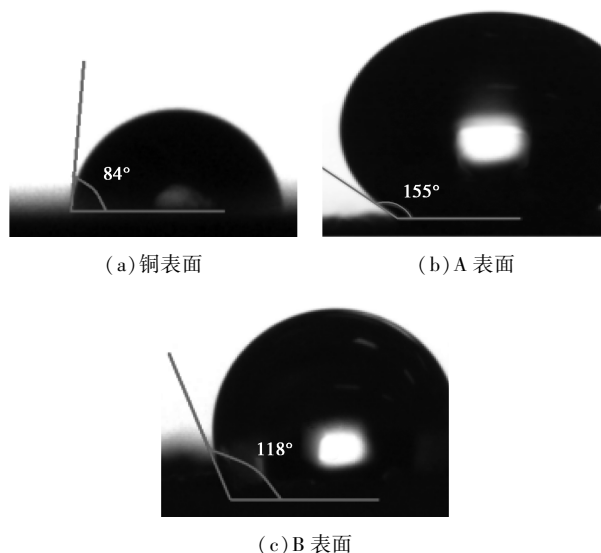


图 3 表面润湿性的测量

2 低液位池沸腾实验

2.1 沸腾实验台及实验操作

池沸腾实验台如图 4 所示,包含了主加热器和辅加热器,主加热器用于测试沸腾换热效果,辅加热器用于维持液体恒温,装置内还装有冷却盘管和透气口,用于液体回收和维持腔室内压力,腔室内液位高度采用蠕动泵进行控制,实验台详细尺寸参见文献[19]。

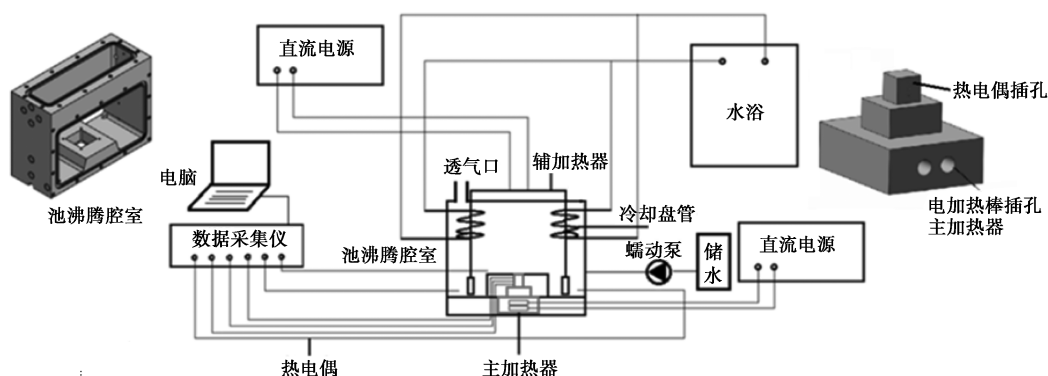


图 4 池沸腾实验台简图

换热表面分别为铜表面、微纳结构铜表面 A(简称 A 表面)和微纳结构铜表面 B(简称 B 表面);过冷度分别为 0、20℃和 40℃;液位高度 h 分别控制在 10、5、4、3、2 mm 和 1 mm;加热功率分别为 3.2、16.5

W/cm^2 和 $31.9 W/cm^2$,其中 $3.2 W/cm^2$ 仅用于饱和和沸腾。

2.2 实验误差分析

沸腾腔室水平面积是换热面的 160 倍,且装有

冷凝管路及蠕动泵补液,液位误差可控制在 ±0.1 mm 以内。使用辅助加热器补偿沸腾腔室的散热量,流体温度误差控制在 ±0.5℃。利用傅里叶导热定律计算测试表面的热流密度:

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

其中: q'' 为测试表面的热流密度; k_{Cu} 为铜的导热系数,等于 400 W/m·k; dT/dx 为主加热器上方的温度梯度,温度梯度计算为:

$$dT/dx = (3T_3 - 4T_2 + T_1)/2\Delta x \quad (2)$$

其中: T_1 、 T_2 和 T_3 分别为底部、中部和顶部的热电偶测量得的读数; Δx 为 2 个热电偶之间的距离,等于 0.5 cm。测试表面温度的计算式为:

$$T_{wall} = T_3 + (dT/dx) \cdot \Delta x_1 \quad (3)$$

其中: Δx_1 为最高的热电偶和测试表面之间的距离,等于 0.3 cm。计算热流密度时产生的误差主要产生在加热器铜块中的纵向传递上,利用 Kline 和 McClintock^[20]的方法估算加热器垂直方向的热量的实验不确定性:

$$w_{q''}/q'' = \{ (w_{k_{Cu}}/k_{Cu})^2 + [w_{T_1}/(3T_3 - 4T_2 + T_1)]^2 + [w_{T_2}/(3T_3 - 4T_2 + T_1)]^2 + [w_{T_3}/(3T_3 - 4T_2 + T_1)]^2 + (w_{\Delta x}/\Delta x)^2 \}^{1/2} \quad (4)$$

式中:导热系数的误差估算为 1%;热电偶精度误差为 0.1℃;热电偶间距误差为 100 μm;随着主加热器功率的改变,误差大小如图 5 所示。沸腾传热系数计算式为:

$$\alpha = q''/(T_{wall} - T_{fluid}) \quad (5)$$

其中: T_{fluid} 为液体的温度。

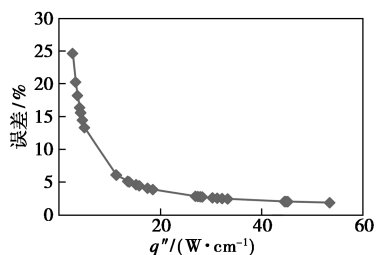
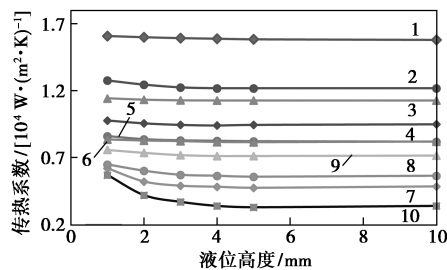


图 5 热流密度误差分析

3 结果与讨论

沸腾传热系数及提升比例按照过冷度的不同分别如图 6~图 11 所示,其中提升比例 $ER = (\alpha_h - \alpha_{10})/\alpha_{10} \times 100\%$, h 为液位高度。从图 6 中可以看出,童明伟^[11]所得的沸腾曲线和本次实验中 3.2 W/cm² 加热功率的沸腾曲线都呈明显上升趋势,最高升幅分别为 68% 和 28% (升幅明显,未在

图 7 中显示),但加热功率为 16.5 W/cm² 和 31.9 W/cm² 时,3 个表面的传热系数在液位下降时虽有上扬趋势但升幅相对较弱,其中 A 表面升幅最高却仅为 5%,甚至在 16.5 W/cm² 加热功率情况下,铜表面和 B 表面在液位下降过程中出现先下降后上升的趋势,如图 7 所示。由图 8~图 11 可以看出,当过冷沸腾时,沸腾曲线并未出现明显的上升趋势,甚至出现下降趋势。在过冷度为 20℃ 时,铜表面和 B 表面已经出现下降趋势,A 表面还能维持微弱上升趋势。在过冷度为 40℃ 时,3 个表面都出现了下降趋势。因此,在过冷情况下液位降低对沸腾传热系数有一定抑制作用,为解释原因特对沸腾过程进行了可视化拍摄。需要强调的是,铜表面传热



1—铜表面 31.9 W/cm²; 2—A 表面 31.9 W/cm²; 3—B 表面 31.9 W/cm²; 4—铜表面 16.5 W/cm²; 5—A 表面 16.5 W/cm²; 6—B 表面 16.5 W/cm²; 7—铜表面 3.2 W/cm²; 8—A 表面 3.2 W/cm²; 9—B 表面 3.2 W/cm²; 10—童明伟^[16] 2.8 W/cm² (下同)

图 6 饱和和低液位池沸腾曲线

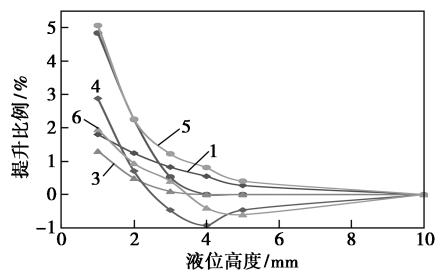


图 7 饱和沸腾传热系数变化情况

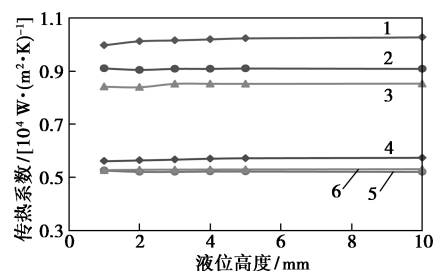


图 8 过冷度为 20℃ 时低液位池沸腾曲线

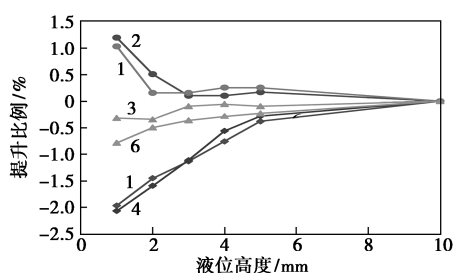


图 9 过冷度为 20℃ 时传热系数变化情况

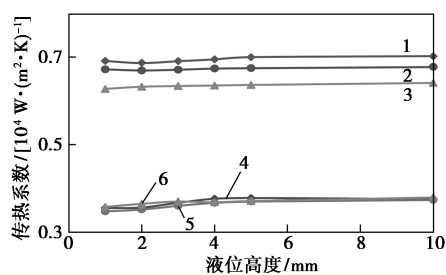


图 10 过冷度为 40℃ 时低液位池沸腾曲线

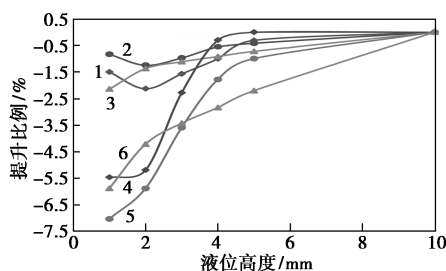


图 11 过冷度为 40℃ 时传热系数变化情况

能力要优于微纳结构表面,由于本文中仅关注液位影响,因此未对此分析。

加热功率为 16.5 W/cm^2 的饱和沸腾现象如图 12 所示。由图 12 中可以看出,液位为 10 mm 时,铜表面、A 表面和 B 表面上的气泡脱离直径分别约为 3.8、5.7 mm 和 6.1 mm,脱离频率分别约为 111、62 个/s 和 55 个/s。液位降低后气液界面(空气与水的分界面)上出现超大气泡,对应的液位分别为 3、5 mm 和 5 mm。童明伟^[11]曾指出,液位降低能够提升沸腾传热系数的主要原因是气泡脱离受到抑制,提高了相变换热时间。超大气泡的形成会形成新的气液界面(蒸汽和水的分界面),3 个表面的气泡脱离频率被抑制至 90、50 个/s 和 50 个/s,气泡脱离频率下降引起传热系数增加^[11,20],如图 7 所示。铜表面和 B 表面的传热系数出现先下降后升高的现象,下降原因为液位降低引起温度梯度降低,而且 B 表面在 5 mm 液位时气泡脱离前聚合较为严重[如图 12(c)所示],进一步降低了沸腾传

热效果。

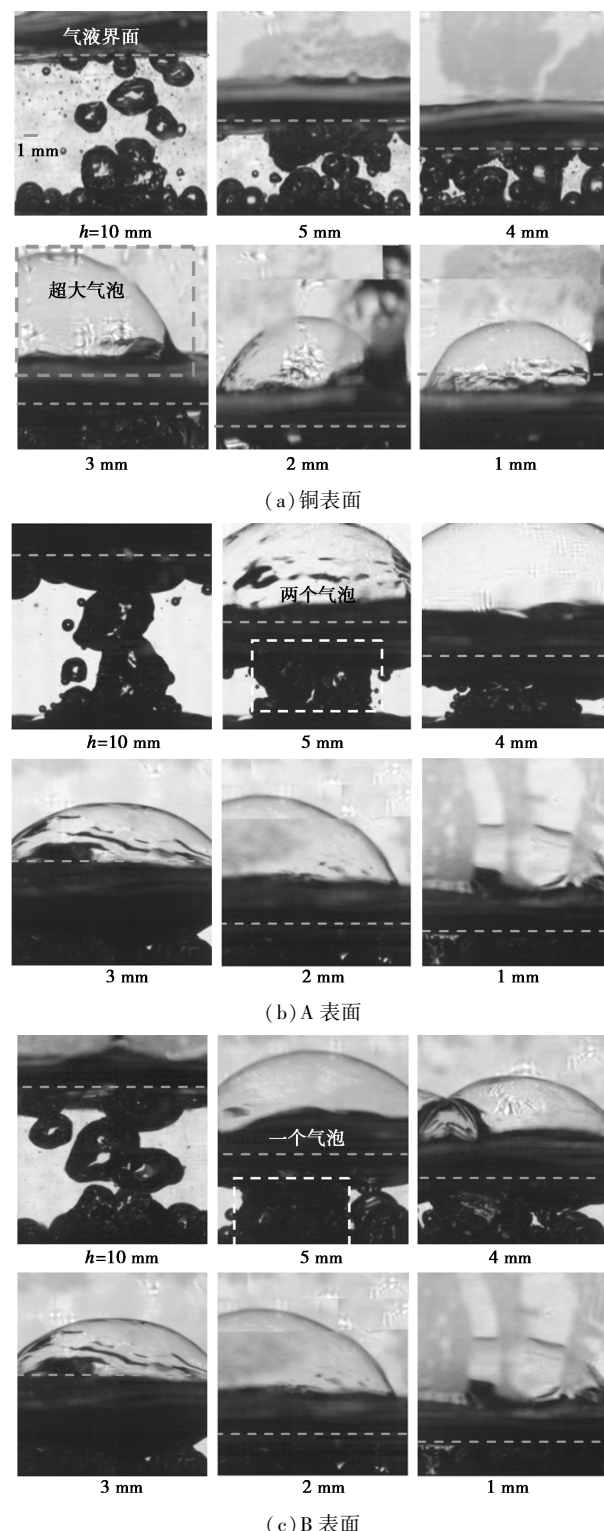


图 12 加热功率为 16.5 W/cm^2 时饱和低液位沸腾

当加热功率升至 31.9 W/cm^2 ,气泡脱离直径有所增加,如图 13 所示,脱离频率有所降低,对应 3 个表面分别为 4.2 mm(41 个/s)、8.4 mm(40 个/s)以及 10.3 mm(40 个/s)。超大气泡提前形成,液位分

别为 4、10 mm 和 10 mm。由于气泡尺寸(A、B 表面)大于(铜表面)或约等于 1/2 液位高度,液位从 10 mm 降至 1 mm 过程中都会抑制气泡脱离,因此传热系数虽有提高,但升幅最高仅为 5%。

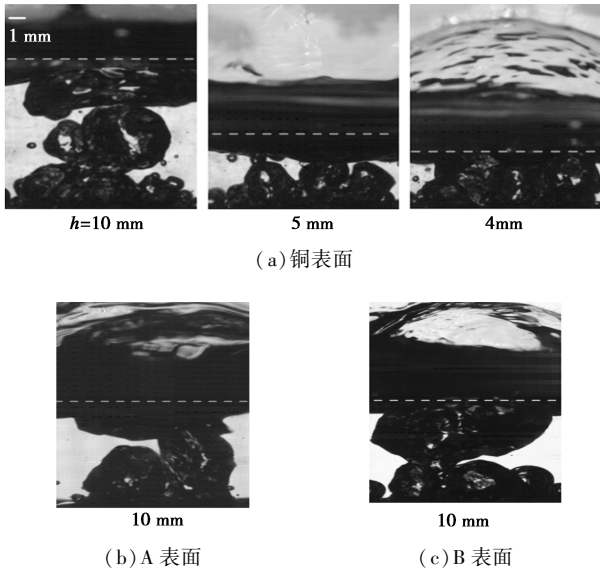


图 13 加热功率为 31.9 W/cm² 时饱和沸腾现象

不同加热功率和过冷度时的沸腾现象如图 14~图 17 所示。与饱和沸腾不同,过冷沸腾传热系数随液位降低出现下降趋势。由图 14 中可以看出,水中不再出现明显的气泡,取而代之的是微小气泡(直径小于 0.1 mm)和热流。虽然液位降低可提高气泡扰动效果,但对于过冷沸腾而言,还可降低液体温度梯度,削弱单相对流换热效果,因此传热系数未见明显增加,铜表面和 B 表面甚至出现了下降趋势(见图 9)。

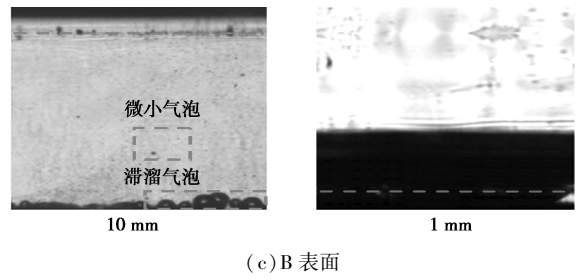
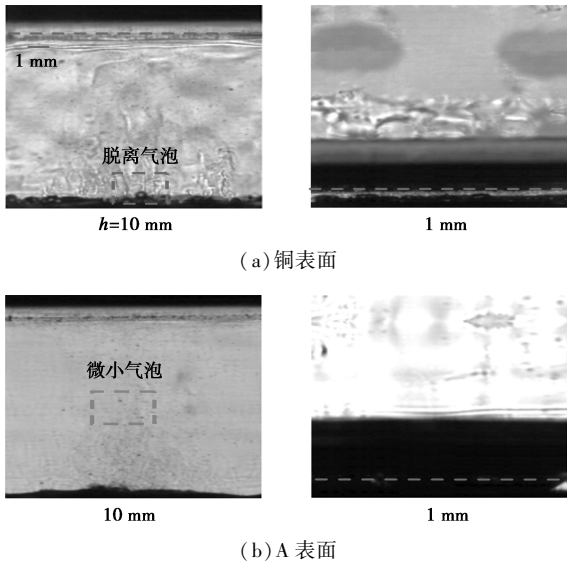


图 14 加热功率为 16.5 W/cm²、过冷度为 20℃ 的沸腾现象

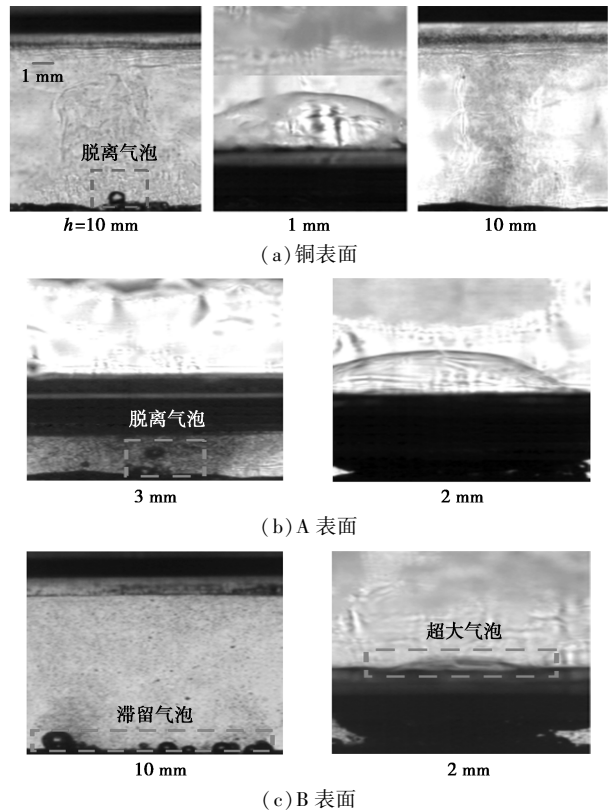
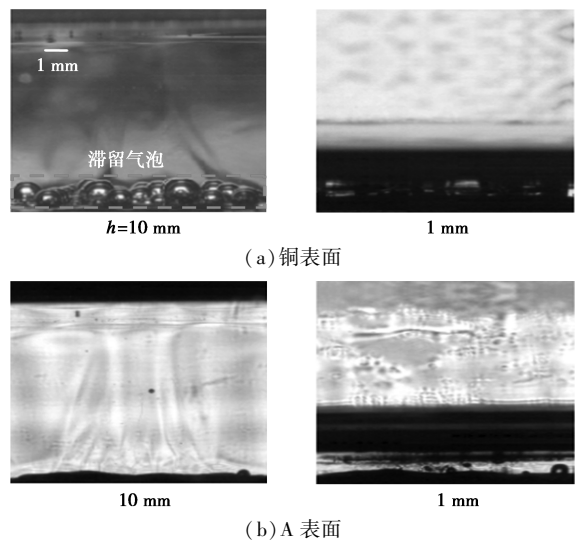


图 15 加热功率为 31.9 W/cm²、过冷度为 20℃ 的沸腾现象



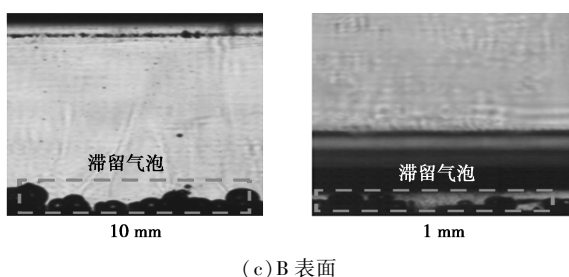


图 16 加热功率为 16.5 W/cm^2 、过冷度为 40°C 的沸腾现象

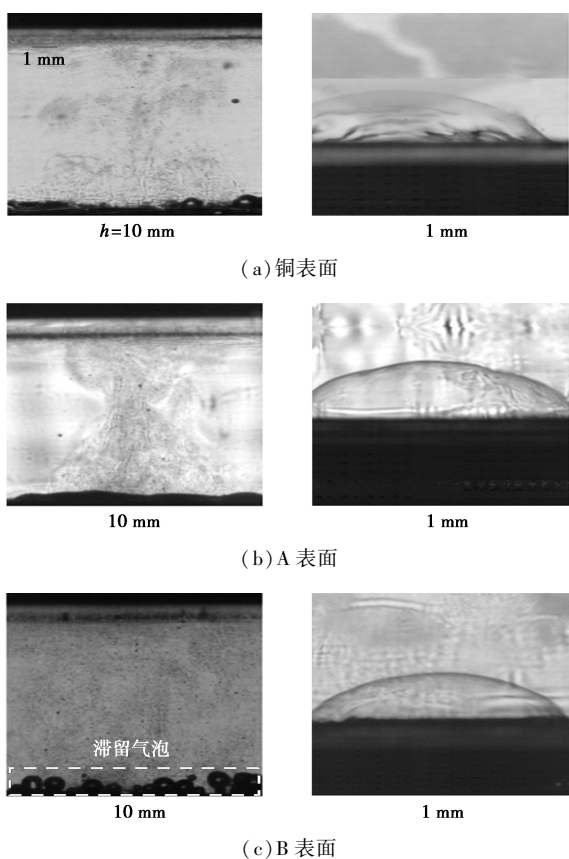


图 17 加热功率为 31.9 W/cm^2 、过冷度为 40°C 的沸腾现象

由图 14(a) 和图 15(a) 中可以看出,当加热功率增加至 31.9 W/cm^2 时,铜表面在 10 mm 液位时的气泡脱离尺寸明显增加;液位降低也可引起脱离尺寸增加,10 mm 液位 A 表面在 3 mm 液位时[图 15(b)所示]可见明显的脱离气泡。3 个表面分别在 1、2 mm 和 2 mm 出现了超大气泡,但由于过冷情况下气泡脱离尺寸仍然相对较小,超大气泡抑制气泡脱离的效果不明显,且又降低了气泡扰动空间,削弱了气泡扰动传热效果,加之降低了过冷流体的温度梯度,因此铜表面和 B 表面的传热系数有所下降,A 表面传热系数也仅增加约 1%(图 9 所示)。

由图 16 中可以看出,3 个表面在液位为 10 mm 时液体中基本以热流为主,液位降至 1 mm 时仍未见超大气泡,液位降低抑制了单相对流换热,导致 3 个表面的沸腾曲线都出现了明显的下降趋势,最高降幅为 7%(图 11 所示)。当加热功率增加至 31.9 W/cm^2 时,液体中可见很多微小气泡(如图 17 所示),液位降至 1 mm 时出现超大气泡。由图 18 中可以看出,铜表面气泡脱离尺寸较大,新的气液界面可抑制住气泡脱离;A 表面气泡脱离尺寸较小,将在壁面和气液界面间形成扰动;B 表面既有大气泡又有小气泡,大气泡不易脱离,抑制了小气泡的扰动。加之液位降低温度梯度减小,单相对流换热效果下降,因此整体看来铜表面和 A 表面在 1 mm 液位时虽然有上扬趋势,却未能超过 10 mm 时的传热系数,而 B 表面则持续下降(图 11 所示)。

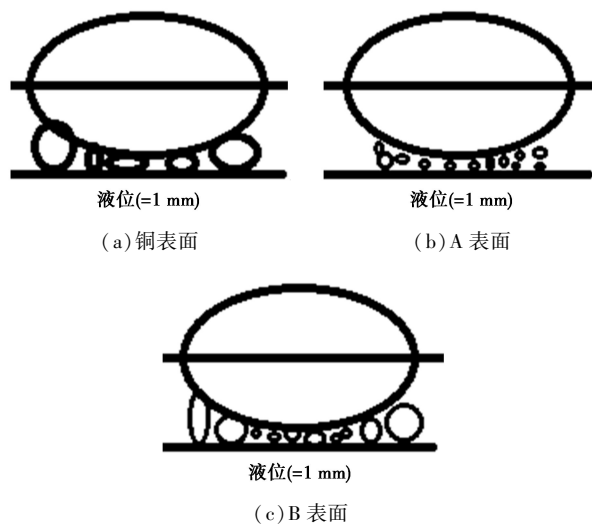


图 18 40°C 过冷度情况下超大气泡形成后的沸腾现象

对比 3 个表面可以看出,A 表面的传热系数随液位变化有一定优越性,包括饱和沸腾、 20°C 过冷沸腾及 31.9 W/cm^2 加热功率下的 40°C 过冷沸腾。原因在于 A 表面具有超疏水特性且汽化核心较大,液位降低抑制脱离频率效果明显,更容易提高传热系数。当过冷沸腾时,A 表面脱离气泡多而小,可在超大气泡与壁面之间扰动,因此在加热功率为 31.9 W/cm^2 、过冷度为 20°C 时,能够提高沸腾换热系数;在 31.9 W/cm^2 、过冷度 40°C 情况下沸腾换热系数下降也不明显。当超大气泡未能形成时(加热功率为 16.5 W/cm^2 、过冷度为 20°C),脱离气泡则在液位与壁面之间扰动,A 表面的扰动优势仍使其有上升趋势。

4 结论

对铜表面、微纳结构 A、B 表面进行了过冷度为 0、20℃ 和 40℃ 的低液位池沸腾实验研究,通过可视化图片及沸腾曲线可以得出:

(1) 饱和沸腾时,液位降低可抑制气泡脱离并提高相变换热时间和沸腾传热系数,但功率增大时气泡尺寸也随之增加,相应传热系数增幅减弱。

(2) 过冷沸腾时,沸腾气泡较小,虽然形成超大气泡,也不会对气泡脱离进行抑制,而且液位下降导致过冷流体温度梯度降低而削弱单相对流传热,因此过冷沸腾时,液位降低传热效果并未明显改善,还有下降趋势。

(3) A 表面由于具有超疏水特性和汽化核心较大的特点,饱和沸腾的气泡尺寸介于铜表面和 B 表面之间,既可提前形成超大气泡,又可降低气泡聚合的负面影响,饱和沸腾传热系数升幅最高;过冷沸腾气泡小而多,液位下降可有效提高气泡扰动,因此过冷沸腾传热系数未见明显恶化。

参考文献

- [1] Cui W, Mungai S K, Wilson C, *et al.* Subcooled flow boiling on a two-step electrodeposited copper porous surface[J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2016, 23(2): 91-107.
- [2] 崔文彬, 韩云翌, 崔新贵, 等. MWCNT 纳米结构表面对过冷流动沸腾的影响[J]. *大连海事大学学报*, 2016, 42(3): 89-94.
- [3] Tian Z, Gu B, Zhang Y, *et al.* Flow boiling heat transfer under marine motions: A comprehensive review[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 143: 107455.
- [4] Gajghate S S, Barathula S, Das S, *et al.* Experimental investigation and optimization of pool boiling heat transfer enhancement over graphene-coated copper surface[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 140(3): 1393-1411.
- [5] Kumar G U, Suresh S, Kumar C S S, *et al.* A review on the role of laser textured surfaces on boiling heat transfer[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 174: 115274.
- [6] Alvarino P F, Simon M L S, Guzella M D, *et al.* Experimental investigation of the CHF of HFE-7100 under pool boiling conditions on differently roughened surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 269-279.
- [7] 周杰, 辛明道. 表面微结构对流动沸腾中核沸腾抑制因子的影响[J]. *热科学与技术*, 2003, 2(3): 275-278.
- [8] 吴伟, 杜建华, 林旭平, 等. 多孔表面新型复杂结构优化沸腾传热的实验研究[J]. *热科学与技术*, 2003, 2(1): 55-57.
- [9] Može M, Senegačnik M, Gregorčič P, *et al.* Laser-engineered micro-cavity surfaces with a nanoscale superhydrophobic coating for extreme boiling performance[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 24419-24431.
- [10] Kim J, Cho J Y, Lee J S. Flow boiling enhancement by bubble mobility on heterogeneous wetting surface in microchannel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 153: 119631.
- [11] Zan W, Zhen C, Bengt S. Saturated pool boiling heat transfer of acetone and HFE-7200 on modified surfaces by electrophoretic and electrochemical deposition[J]. *Applied Energy*, 2019, 249: 286-299.
- [12] Nam Y, Wu J, Warriar G, *et al.* Experimental and numerical study of single bubble dynamics on a hydrophobic surface[J]. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 2009, 131(12): 121004.
- [13] 李雨晴, 包中华, 李科. 低体积分数水基 SiO₂ 纳米流体沸腾换热关键物性参数研究[J]. *热科学与技术*, 2019, 18(1): 59-65.
- [14] Salehi H, Hormozi F. Prediction of Al₂O₃-water nanofluids pool boiling heat transfer coefficient at low heat fluxes by using response surface methodology[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 137(3): 1069-1082.
- [15] 崔文彬, 程一伟, 陈伟南, 等. 不凝结气体对多壁碳纳米管传热表面池沸腾性能的影响[J]. *热科学与技术*, 2016, 15(4): 266-272.
- [16] 童明伟, 辛明道. 液膜沸腾的临界液位和传热[J]. *重庆大学学报*, 1984, (2): 49-58.
- [17] Ling K, Tao W. Numerical simulation of nucleate boiling in shallow liquid[J]. *Computers and Fluids*, 2018, 164: 35-40.
- [18] Patil C M, Santhanam K S V, Kandlikar S G. Development of a two-step electrodeposition process for enhancing pool boiling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 79: 989-1001.
- [19] 崔文彬, 王茂州, 欧阳志豪, 苏凤民, 吴桂涛. 微纳结构铜表面低液位池沸腾实验研究[J]. *热科学与技术*, 2021, 20(1): 14-21.
- [20] Kline S J, McClintock F A. Describing uncertainties in single sample experiments[J]. *Mech Eng*, 1953, 75(1): 3-8. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。