

微结构表面微重力下沸腾换热及临界机理研究

孔新¹ 张永海² 魏进家^{2,3} 赵建福^{4,5}

(1. 西北大学化工学院, 西安 710069;

2. 西安交通大学化工学院化工过程机械系, 西安 710049;

3. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;

4. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190;

5. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 本文研究了微重力下新型复合微结构表面在 FC-72 溶液中的池沸腾换热性能, 测试了三种不同热流密度下该表面的温度变化趋势及气泡动力学行为, 重点分析了高热流密度下沸腾临界现象。实验结果表明: 复合微结构表面在中低热流密度下壁面温度和沸腾换热系数与常重力工况基本保持一致无明显恶化; 在高热流密度下进入微重力后壁面温度仍能维持短时间稳定, 直到整个换热面被气泡覆盖后壁面温度才开始上升直至临界发生。复合微结构表面独特的微结构阵列及沟槽结构增加了换热表面的毛细芯吸力, 可有效提升沸腾过程中工质的补液速率从而提高临界热流密度。

关键词 微重力; 池沸腾; 临界热流密度

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2023)06-1587-07

Investigation of Boiling Heat Transfer Performance and Mechanism of Critical Heat Flux for Micro-structured Surface Under Microgravity

KONG Xin¹ ZHANG Yonghai² WEI Jinjia^{2,3} ZHAO Jianfu^{4,5}

(1. School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

4. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

5. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract The pool boiling heat transfer performance of bistructured surface based on micro-pin-finned structure was experimentally studied in FC-72 under microgravity. The changing trend of wall temperature and bubble dynamic of three different heat fluxes were detected, and the boiling phenomenon at boiling crisis was also analyzed. The experimental results show that at mid-low heat fluxes the wall temperatures and heat transfer coefficients are the same as under normal gravity. At high heat flux the wall temperature can maintain stable while entering microgravity until the heating surface is totally covered by a huge bubble. The bistructured surface has a strong capillary wick effect owing to its special microstructures and grooves, which can efficiently improve the velocity of liquid supply and enhance the CHF(Critical Heat Flux).

Key words microgravity; pool boiling heat transfer; critical heat flux

0 引言

气液两相间的传热传质广泛存在于常重力与微重力的换热管理系统中, 研究微重力条件下的沸腾换热不仅能优化微重力工作条件下航空航天换热器的设计, 同时可有效揭示被常重力下浮力所掩盖的其他换热现象以及规律, 因此微重力下沸腾换热相关实验具有十分重要的研究意义与价值。目前, 已

开展的微重力实验重点研究了微重力环境对换热的影响, 主要包括沸腾换热系数、沸腾起始点、临界热流密度等基础性课题^[1-5]。

除了关注沸腾换热性能本身, 微重力下沸腾现象的研究也逐渐成为热点。Warrier 等^[6]在国际空间站进行了平板池沸腾实验, 利用铝表面的 5 个微

收稿日期: 2022-07-13; 修订日期: 2023-05-23

基金项目: 中欧载人航天合作空间应用合作项目 (No.TGMTYY00-RW-05-1.00); 陕西省教育厅青年项目 (No.19JK0843); 陕西省自然科学基金青年项目 (No.2020JQ-596)

作者简介: 孔新 (1988-), 女, 讲师, 博士, 主要从事电子器件高效冷却研究。通信作者: 魏进家, 教授, Email: jjwei@mail.xjtu.edu.cn。

米级别的凹槽作为气化核心。进入核态沸腾阶段后气泡经过几次合并形成一个大气泡并黏附在加热面中心位置,气核仍不断产生小气泡直至大气泡脱离,微重力下的对流与部分核态沸腾阶段的换热性能较常重力有明显恶化。在饱和沸腾工况下气泡同样会出现垂直方向上的运动^[7],该现象相对过冷工况下频率有所降低。当气泡被“抬升”时新鲜液体重新润湿换热面,同时气化核心不断有新的小气泡生成从而使得换热发生强化。刘鹏等^[8]利用实践 10 号返回式卫星提供的微重力条件测试得到微重力下过冷核态沸腾单个气泡的生长周期、尺寸等相关结果。通过分析气泡生长规律得到以下结论:根据气泡动力学形态可将其生长过程分为成核激发、稳定黏滞生长以及位置相对滑移三个阶段;稳定黏滞生长阶段下,气泡直径与时间呈指数关系,且指数 n 随着时间推移逐渐缩小并趋近于 0;气泡底部开始收缩时,直径出现一定程度增长,直到过冷工质完全充满气泡底部后开始脱离换热面,并在上升过程中被过冷工质冷却体积减小。

微重力下沸腾换热工作受关注程度较高,为克服微重力环境浮力缺失而导致的换热恶化问题,学者们提出了强化换热的加工表面^[9,10],而强化表面在高热流密度以及接近临界时的沸腾现象以及 CHF 发生的机理研究并不充分。为探究微重力下沸腾换热效果尤其是沸腾临界发生机理,本实验测试了新型复合微结构强化换热表面的性能。通过控制加热电压方法,在北京中科院国家微重力重点实验室落塔中进行了持续 3.6 s 有效微重力时间的过冷池沸腾实验研究,通过分析所得结果提出合理的临界产生机理。

1 实验系统

1.1 实验装置

实验所需的为重力环境通过隶属于中科院力学所的国家微重力实验室内落塔装置所提供,落塔有效落高 60 m,微重力水平 ($10^{-2} \sim 10^{-3}$) g_0 ,微重力时间 3.6 s。根据池沸腾实验要求,本装置需具备温度、电压等信号数据采集与可视化图像的自动触发和独立储存等功能。实验核心装置由液池、测试段、数采接口、图像接口、光源接口、电控加热接口组成,如图 1 所示。液池内部盛放约 1.5 L 的沸腾工质,为了保证容器内部为一个大气压,其顶部与橡皮袋相连。在液池内部布置的两根 T 型热电偶分别测量芯片壁温 (T_1) 和工质温度 (T_2)。测试芯片为边长为 10 mm,厚度为 0.5 mm 的正方形掺磷 N 型硅片,芯片有效换热面积 A 为其上表面,在芯片的两

条对边用超声波焊锡固定有 0.25 mm 粗的铜导线,直流电源连接铜导线加压后实现芯片的加热,芯片产生的热量可由流经芯片的电流 I 及加载在芯片上电压 U 得到。芯片的热流密度 q 以及换热系数 h 可根据式 (1)、(2) 推算得出:

$$q = \frac{I \cdot U}{A} \quad (1)$$

$$h = \frac{q}{(T_1 - T_2)} \quad (2)$$

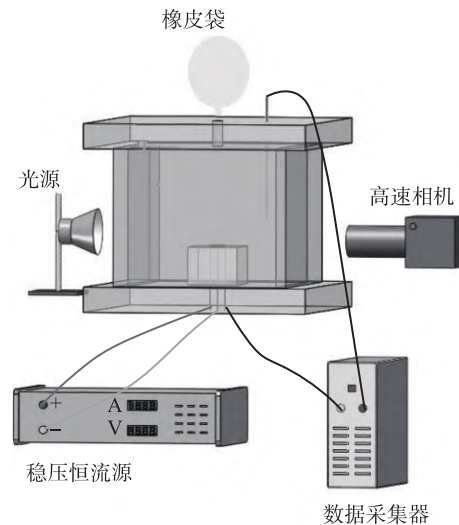


图 1 实验装置示意图

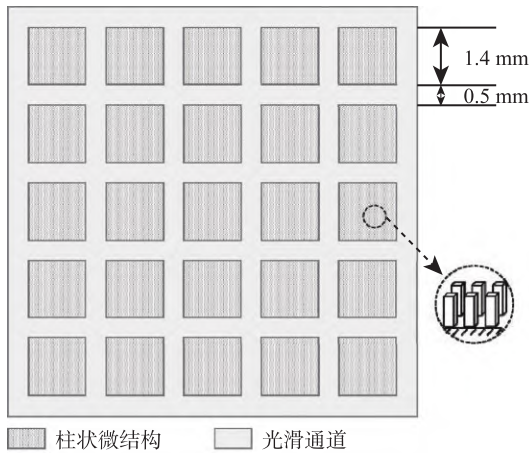
Fig. 1 Experimental apparatus of pool boiling

本实验由热电偶测量温度引起的不确定度估计小于 0.3 K。其中芯片壁面温度的不确定度主要由铂电阻温度计标定引起的 (0.03 K)、温度关联式拟合引起 (0.2 K)、温度不稳定性引起 (0.1 K) 和热电偶分辨率引起 (< 0.1 K)。主流液体温度的不确定度由于铂电阻温度计标定引起 (0.03 K)、温度不稳定性引起 (0.2 K) 和热电偶分辨率引起 (< 0.1 K)。芯片热流不确定度由恒流稳压电源引起的 (0.11%) 包括电流引起的 (0.014%) 和电压 (0.1%)。

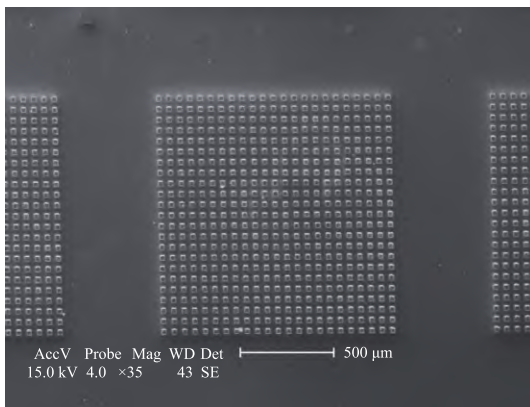
1.2 测试芯片

本实验采用的测试芯片通过微机械加工手段实现表面微结构成型,这种新型复合微结构表面 PF30-60LP 是一种既保持柱状微结构表面 PF30-60(柱状微结构高度为 60 μm ,边长及间距为 30 μm) 特性,又增加宏观尺度光滑凹槽的表面。如图 2(a) 所示微结构阵列块为边长 1.4 mm 的正方形,光滑凹槽通道宽度为 0.5 mm,图 2(b) 为该表面的局部电镜放大图。通过前期地面常重力池沸腾实验证实,该表面既可保证换热面高气化核心密度的优点,加速气泡间的相互作用促进气泡脱离,又保证高热流

密度下新鲜液体的快速补给, 因此具有较高的换热系数和临界热流密度 [11]。



(a) 表面设计图
(a) Plan graph of the surface



(b) 表面局部电镜图
(b) Local-map of SEM

图 2 测试芯片表面
Fig. 2 Surface of test chip

1.3 实验条件

表 1 为三组实验的压力、过冷度、加热电压、电流以及热流密度, 其中芯片加热选择恒电压方式, 因此电流和热流密度会随着换热工况的改变而产生一定程度的波动, 表中数据为落塔释放前沸腾初始条件下电流、电压以及液体过冷度。图 3 为落塔实验前进行的单点地面实验与落塔释放前实验点的对比, 从图中可以看出落塔释放前的单点实验数据与地面沸腾曲线基本重合, 验证了本实验的准确性与重复性。微重力实验沸腾工质为 FC-72(沸点 56°C), 沸腾过冷度控制在 40 K 左右。由于微重力下气泡体积增大周期变长, 使用正常倍数的镜头即可观测到清晰完整的沸腾过程。高速摄像机拍摄速度 500 帧/秒, 拍摄总长度设置 8 s , 包括下落前 1.2 s 常

重力沸腾现象、微重力过程的 3.6 s 和收网超重过程的 3.2 s 的沸腾现象。在常重力下气泡生长周期、脱离半径相比微重力工况下量级相差较大, 影响时间短、气泡尺寸小, 因此落塔释放前产生的气泡对微重力实验基本可以忽略。

表 1 PF30-60LP 表面微重力实验条件
Table 1 Experimental conditions of PF30-60LP

Run	过冷度 $\Delta T_{\text{sub}}/\text{K}$	电压 U/V	电流 I/A	热流密度 $q/\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
1	39.7	28	0.46	12.9
2	37.4	34	0.55	18.7
3	40.0	40	0.65	26

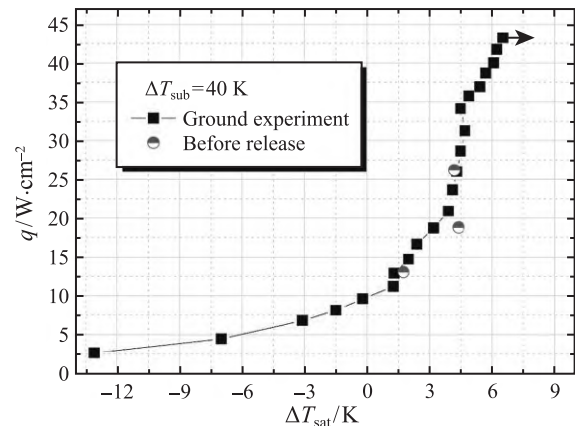


图 3 测试点重复性对比
Fig. 3 Experimental replications of test points

2 实验结果与讨论

2.1 微重力沸腾现象

图 4 为 PF30-60LP 表面在加热电压 $U = 28\text{ V}$ 工况下不同时刻沸腾对应的气泡动力学行为, 图 5 为相对应的芯片表面温度 T_w 、工质温度 T_f 、热流密度 q 以及重力水平 g/g_0 随时间的变化曲线。进入微重力后在 $t = 0.132\text{ s}$ 时各个微结构区域已形成较大且直径均一的气泡, $t = 0.240\text{ s}$ 时刻两个等直径量级的气泡发生了合并, 形成换热面的“主气泡”。主气泡不断生长如图 5(e) 所示, 在 $t = 1.880\text{ s}$ 时根部出现颈缩现象并伴有脱离换热表面迹象。随后气泡主体慢慢向上移动在 1.980 s 脱离表面, 同时换热面又形成新一轮较大均一直径的气泡群。由于微重力下气泡脱离速度较慢, 此时换热面上部已脱离的气泡与表面主气泡发生合并, 直至 $t = 2.088\text{ s}$ 完全脱离经历了微重力环境下一个完整的气泡生长与脱离的过程。

虽然微重力环境下气泡周期明显减缓, 气泡脱离直径相应增大, 但是根据图 4 可知壁面温度在进入微重力后壁面温度无明显波动, 沸腾换热仍可

持续稳定进行。微重力下气泡行为活跃度较低，微结构阵列排布限定了气泡的生长范围，而不同区域范围内气泡间的合并能有效增加换热表面上部过冷液体的扰动从而强化传热传质过程。同时，毛细特征长度与重力条件成反比关系，常重力下换热效果较好的柱状微结构在微重力下的毛细泵吸会逐渐减小，而复合表面光滑通道能有效弥补表面均一微结构芯片在微重力状态下毛细力削弱的特性。

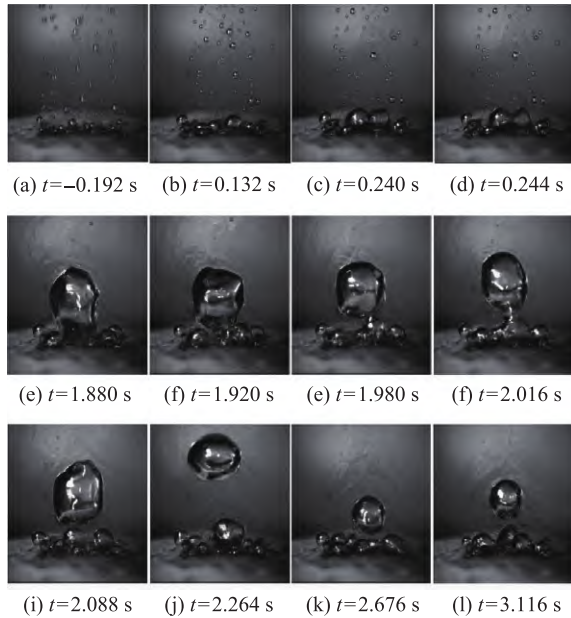


图 4 $U = 28 \text{ V}$ 微重力下气泡行为

Fig. 4 Bubble dynamic in microgravity ($U = 28 \text{ V}$)

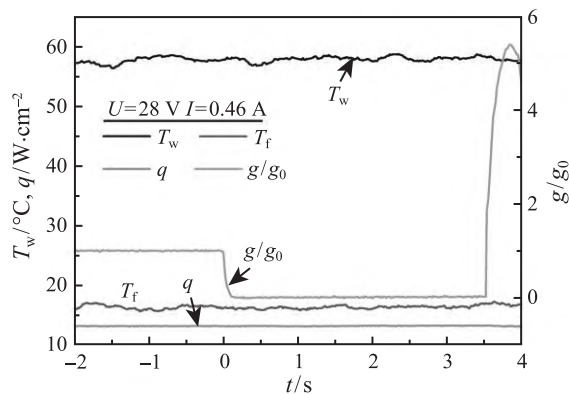


图 5 $U = 28 \text{ V}$ 壁温、热流密度等参数随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of wall temperature, heat flux ($U = 28 \text{ V}$)

图 6 与图 7 分别为 PF30-60LP 表面在加热电压 $U = 34 \text{ V}$ 下不同时刻对应的气泡动力学行为与 T_w 、工质温度 T_f 、 q 以及 g/g_0 随时间的变化曲线。从图 6(a) 中可观察到随着热流密度的升高，在落舱

释放前的常重力阶段大量直径 1 mm 左右气泡在换热面成核、生长、脱离，表明此时已经进入充分发展的核态沸腾阶段。当实验进入微重力工况后，气泡动力学行为随即发生较大变化。在进入微重力状态后的 $t = 0.064 \text{ s}$ 时刻，换热面的所有微结构阵列已经被等量级的气泡所覆盖， $t = 0.112 \text{ s}$ 时通过等量级气泡合并形成了第一个“主气泡”。主气泡快速生长、合并，随后在 $t = 0.896 \text{ s}$ 脱离完成一个完整的气泡生长、脱离周期。图 6(f) 展示了第一个主气泡脱离后在过冷液体的冷却下体积有所减小，同时换热表面第二个主气泡快速形成。随后第二主气泡与脱离后的第一主气泡发生融合，在 $t = 1.076 \text{ s}$ 时形成柱塞状长气泡并脱离换热表面，在表面张力作用下柱塞状长气泡重新形成圆球状并在过冷工质冷却下凝结，体积逐渐减小。在 $t = 1.616 \text{ s}$ 时刻第三个主气泡完成脱离，脱离直径相比前两个主气泡有所减小。随后换热表面气泡生长进入一个相对规律状态：主气泡生长脱离周期基本维持在 0.5 s ，气泡脱离直径约为 7 mm 同时气泡多呈现圆球形少有柱塞状不顾则长气泡。通过图 7 可以看出，芯片在进入微重力状态的瞬间温度经过 0.1 s 的小幅波动 (1.5°C 以内) 后维持在与常重力状态的相当温度范围内，表明中等热流密度下复合微结构芯片在微重力状态下稳定的沸腾换热仍可获得，这一方面得益于复合微结构表面的微结构阵列合理规划了气泡的产生区域，避免换热表面产生大面积干烧现象；另一方面光滑通道既增强了结构间毛细抽吸作用力同时也是新鲜液体补给的重要来源。

图 8、图 9 分别为 PF30-60LP 表面在加热电压 $U = 40 \text{ V}$ 热流密度下沸腾过程中气泡动力学行为与 T_w 、 T_f 、 q 以及 g/g_0 随时间的变化曲线。在该热流密度下常重力沸腾过程中表面存在大量气泡，同时气泡的生长、脱离周期较短，沸腾相对剧烈。进入微重力后 $t = 0.032 \text{ s}$ 时刻即形成了覆盖各微结构区域的气泡，由于气化速度明显加快，等直径量级的气泡快速合并成新的大气泡。与前所述不同的是，高热流密度下同时形成了 3 个大气泡而非一个“主气泡”如图 8(c) 所示，这些大气泡很快又合并为一个几乎覆盖整个换热表面的气泡，此时只有换热表面四边有小气泡产生并汇入大气泡。从图 8 中可以观察到 $0.380 \sim 0.512 \text{ s}$ 期间虽然仍有新的小气泡生成，但大气泡的体积基本无生长变大的趋势，这是因为气化的气体量与大气泡上部气体冷凝量相当。在 $t = 1.052 \text{ s}$ 时，换热表面已完全被大气泡覆盖无任何气化过程，芯片开始进入干烧状态，对比图 9 可以看出大约在进入沸腾 1 s 后芯片温度开始出现

持续上升的状态并进入沸腾危机。当换热进入危机状态后, 其表面由于完全被半球形气泡所覆盖, 在剩余的 2.6 s 微重力时间内, 壁面温度升高 15°C 左右可以认为已经达到临界状态。这种复合微结构表面在大部分换热面被覆盖趋近临界过程中, 壁面温度仍能保持稳定直至整个换热面被气泡所覆盖。因此我们猜测, 在该热流密度下微重力工况的前 1 s 内虽然换热面看似只有芯片四周有少量气泡维持壁面与液体之间的相变传热传质过程, 但是气泡底部在光滑通道与微结构阵列通过毛细泵吸作用下仍保持润湿且持续蒸发的状态, 因此壁面温度无上升趋势。直至整个芯片表面被气泡所覆盖, 液体供给被阻断造成了沸腾危机。

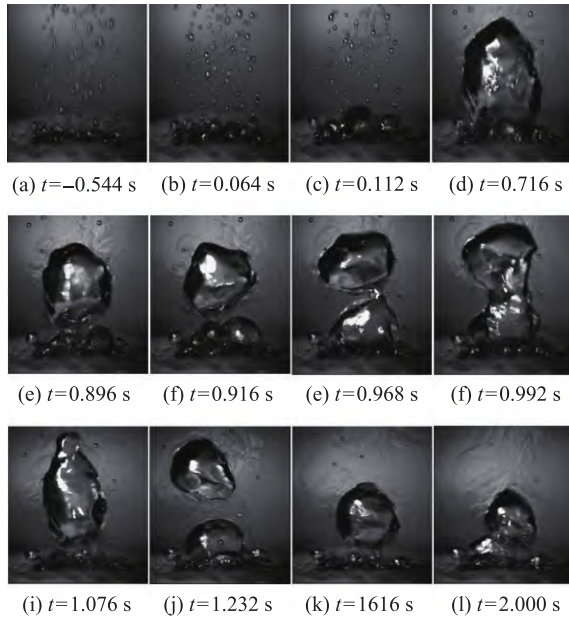


图 6 $U = 34 \text{ V}$ 微重力下气泡行为
Fig. 6 Bubble dynamic in microgravity ($U = 34 \text{ V}$)

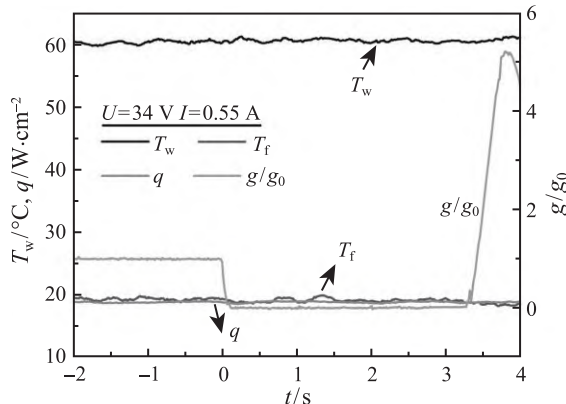


图 7 $U = 34 \text{ V}$ 壁温、热流密度等参数随时间变化曲线
Fig. 7 Curves of wall temperature, heat flux($U = 34 \text{ V}$)

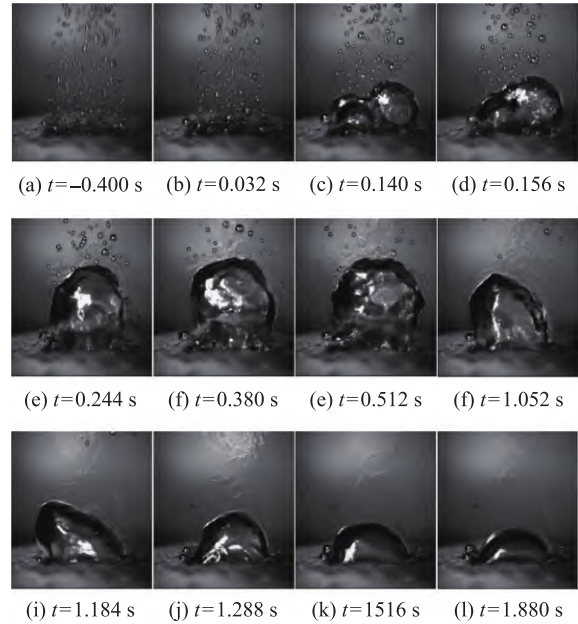


图 8 $U = 40 \text{ V}$ 微重力下气泡行为
Fig. 8 Bubble dynamic in microgravity ($U = 40 \text{ V}$)

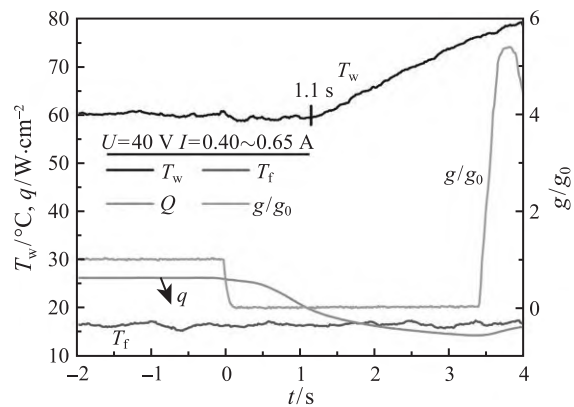


图 9 $U = 40 \text{ V}$ 壁温、热流密度等参数随时间变化曲线
Fig. 9 Curves of wall temperature, heat flux($U = 40 \text{ V}$)

2.2 CHF 发生机理

复合微结构表面在高热流密度下进入微重力状态后, 小气泡在换热表面迅速生长为大气泡, 换热表面的一层小气泡不断融入大气泡。在进入微重力周的 $t = 0 \sim 1.1 \text{ s}$ 时间段内, 壁面温度保持常重力沸腾的壁面温度 60°C 左右的稳定状态且无大幅波动, 表明在该段时间内换热性能无明显变化与恶化迹象。随后在 1.052 s 时对应的沸腾现象可以看出芯片表面已完全被大气泡所覆盖, 此时壁面温度才开始缓慢上升。与其他芯片沸腾临界现象不同的是 [12], 复合微结构芯片在进入微重力后壁面温度仍能保持稳定不变, 直至换热面完全被气泡覆盖才发生恶化。通过对换热壁面热流密度进行积分可知,

在 0~1.1 s 时间段内总的电加热量为 26.63 J, 假设这些热量全部为主流过冷液体 (16°C) 加热至沸腾, 则此过程中至少有体积为 0.135 cm³ 的 FC-72 液体发生气化, 而复合微结构表面沟槽内可贮冷液体积仅为 0.0053 cm³, 因此可以断定在大气泡底部存在新鲜液体的供给的通路, 并且只有保证液体的供给量不少于常重力环境下的供给才能满足壁面温度维持在稳定的状态。复合微结构表面临界特有的现象与其表面形态特征有关, 临界热流密度受换热面液体供给速率影响:

$$q_{\text{CHF}} = \rho_l u_l h_{\text{fg}} \frac{A_1}{A} \quad (3)$$

式中, q_{CHF} 为临界热流密度, ρ_l 、 u_l 、 A_1 分别为液体工质密度、补液速度和换热表面液流面积, h_{fg} 为工质的气化潜热。而液体在固体表面的动力学行为除了液体本身物性有关, 同时受到固体表面的形态特征如粗糙度和孔隙率的影响。FC-72 这类低表面张力高润湿性能液体的液滴在微结构表面多保持为 Wenzel 状态即液滴滴在表面后会逐渐充满微结构的内部, 在毛细芯吸作用下液体在微结构内部空间存在向四周铺展的趋势, 图 10 为液滴在微结构表面扩散示意图。液体在微结构内以层流的形式扩散, 因此芯吸前端距液滴在微结构表面上边缘的长度即芯吸距离可按照充分发展流动进行计算, 同时考虑 Washburn 模型提出的芯吸作用力主要受到流动阻力与毛细压力的影响, 因此可以得到芯吸距离 x 随时间 t 的变化规律:

$$x = \left(\frac{2}{3\beta} \cdot \frac{\cos \theta^* - \cos \theta_c}{\cos \theta^*} \cdot \frac{\sigma}{\mu} t \right)^{0.5} \quad (4)$$

其中, β 为无量纲经验参数, σ 与 μ 分别为液体表面张力与动力黏度系数, θ^* 为液体在光滑平面上的表观接触角, 对于高润湿性液体工质 FC-72 其 $\cos \theta^*$ 近似为 1, θ_c 为 Wenzel 状态与 Cassie 状态的临界判据, 其表达式如下所示:

$$\cos \theta_c = (1 - \varphi)/(r - \varphi) \quad (5)$$

式中, φ 与 r 分别表示加工微结构表面的固体分数与粗糙系数, 由式 (4) 可知, 液体补给到距离为 $\lambda D/2$ 处即大气泡半径长度, 所需时间为:

$$t = \frac{\lambda D^2}{4W} \quad (6)$$

其中 W 为毛细芯吸系数:

$$W = \frac{2}{3\beta} \cdot \frac{\cos \theta^* - \cos \theta_c}{\cos \theta^*} \cdot \frac{\sigma}{\mu} \quad (7)$$

进而可以得到在毛细芯吸作用下微结构表面额外增加的平均液体补给速率:

$$\Delta u_l = \frac{\lambda_D}{2} / t = \frac{2W}{\lambda_D} \quad (8)$$

微结构表面在高热流密度下液体的补给相对于光滑表面之处在于, 增加了主液区液体向下渗入微结构以及在毛细作用下微结构之间的补给。因此, 加工微结构表面在临界时液体的补给速率应为液体在光滑表面的初始补给速率与芯吸作用引起的补给速率之和:

$$u_l = u_{l,\text{smooth}} + \Delta u_l \quad (9)$$

将式 (9) 反代入式 (3) 即可得到复合微结构表面的临界热流密度, 同时揭示了微结构表面 CHF 提升的主要原因。

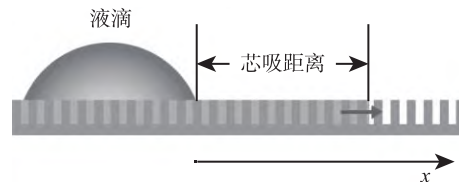


图 10 液滴在微结构表面的扩散
Fig. 10 CHF comparison of different chips

3 结论

本文研究了复合微结构表面在微重力下三组工况的沸腾换热性能, 并对该表面在高热流密度下的临界特有现象展开讨论, 得到以下结论:

1) 复合微结构表面在中低热流密度下壁面温度和沸腾换热系数与常重力工况相比基本保持一致, 大脱离半径增加了高热流密度下换热面被大气泡覆盖的概率, 因此可能导致沸腾危机较常重力的提前发生。

2) 复合微结构表面临界发生的机理是整个换热面被气泡覆盖导致的液体供给阻隔, 而非局部干烧并扩散所引起, 同时毛细芯吸作用力引起的补液速率的提升是微结构表面较光滑表面 CHF 提升的主要因素。

参考文献

- [1] Siegel R, Usiskin CM. A Photographic Study of Boiling in the Absence of Gravity [J]. Journal of Heat Transfer, 1959, 81(3): 245-250
- [2] 赵建福, 万士昕, 刘刚. 过冷池沸腾落塔短时微重力实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 98-100
Zhao Jianfu, Wan Shixin, Liu Gang. Experimental Study of Subcooled Pool Boiling under Short-term Micro-gravity

- [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(1): 98–100
- [3] Kim J, Mcquillen J. Subcooled Pool Boiling in Variable Gravity Environments [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2009, 131(9): 258–262
- [4] Colin C, Kannengieser O, Bergez W, et al. Nucleate Pool Boiling in Microgravity: Recent Progress and Future Prospects [J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2017, 345(1): 21–34
- [5] Yang Yanjie, Chen Xiaoqian, Huang Yiyong, et al. Experimental Study on Pool Boiling of Distilled Water and HFE7500 Fluid Under Microgravity [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 143: 362–371
- [6] Warriar G R, Dhir V K, Chao D F. Nucleate Pool Boiling eXperiment (NPBX) in microgravity: International Space Station [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2015, 83: 781–798
- [7] Forrest E, Williamson E, Buongiorno J, et al. Augmentation of Nucleate Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux Using Nanoparticle Thin-film Coatings [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2010, 53(1–3): 58–67
- [8] 刘鹏, 吴克, 杜王芳, 等. 微重力池沸腾中的气泡行为实验研究 [J]. *空间科学学报*, 2018, 38(2): 221–226
Liu Peng, Wu Ke, Du Wangfang, et al. Experimental Study on Bubble Behaviors in Microgravity Pool Boiling [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(2): 221–226
- [9] Colin C, Kannengieser O, Bergez W, et al. Nucleate Pool Boiling in Microgravity: Recent Progress and Future Prospects [J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2017, 345(1): 21–34
- [10] Shi J, Feng D, Chen Z. Experimental Investigation on Pool Boiling Heat Transfer on Untreated/super-hydrophilic Metal Foam Under Microgravity [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 151: 119289
- [11] Kong Xin, Zhang Yonghai, Wei Jinjia. Experimental Study of Pool Boiling Heat Transfer on Novel Bistructured Surfaces Based on Micro-pin-finned structure [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 91: 9–19
- [12] Zhang Yonghai, Zhao Jianfu, Wei Jinjia, et al. Nucleate Pool Boiling Heat Transfer on a Micro-Pin-Finned Surface in Short-Term Microgravity [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2016, 38(5-8): 594–610