

# 腐蚀对微结构金属试样表面沸腾换热特性的影响研究

欧阳琨<sup>1</sup> 许巍<sup>1</sup> 刘晓晶<sup>1</sup> 何晓强<sup>2</sup>

1(上海交通大学核科学与工程学院 上海 200240)

2(中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室 成都 610213)

**摘要** 大量现有研究表明,使用合适的表面改性方法能够强化沸腾换热效果,使其在压水堆内有着广阔的潜在应用前景。但对于堆内高温高压碱性环境,这种强化换热效果能否长时间维持却鲜有研究。使用激光加工的方式,在不锈钢板状试样表面分别加工微槽、微孔、微柱三种微结构,将试样置于模拟实际堆内工况的高温高压反应釜中开展长达200 d的腐蚀实验,并对腐蚀前后试样进行池式沸腾实验与可视化研究。结果表明:三种微结构试样表面临界热流密度(Critical Heat Flux, CHF)均随腐蚀时间的增加先升高后降低,其中微孔试样在核态沸腾起始有着最大的气泡生成速率,微槽试样有着最高的CHF。

**关键词** 腐蚀, 表面改性, 沸腾换热, 微结构, 可视化

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060606

## Effect of corrosion on boiling heat transfer characteristics of metal specimens with micro-structure surface

OUYANG Kun<sup>1</sup> XU Wei<sup>1</sup> LIU Xiaojing<sup>1</sup> HE Xiaoqiang<sup>2</sup>

1(School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

2(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract** [Background] Many existing studies have shown that the use of suitable surface modification methods can enhance the boiling heat transfer effect of metal components, making it have a broad potential application prospect in the pressurized water reactor. However, for the weak alkaline environment of high temperature and high pressure in the reactor, little literature is reported on whether this enhanced effect can be maintained for a long time. [Purpose] This study aims to explore the effect of corrosion on boiling heat transfer characteristics of metal specimens with micro-structure surface. [Methods] First of all, three micro-structures of micro-groove, micro-porous and micro-columns were processed on the surface of stainless steel plate specimens by laser processing. Then the specimens were placed in the high-temperature and high-pressure environment simulating the actual reactor conditions to carry out corrosion experiments for up to 200 d. Finally, the pool boiling experiment and visualization study of the specimens before and after corrosion were carried out for comparison. [Results] The results show that the surface critical heat flux (CHF) of the three micro-structured metal specimens increases and then decreases with

核反应堆系统设计技术重点实验室、国家自然科学基金青年基金(No.12005133)资助

第一作者: 欧阳琨, 男, 1999年出生, 2020年毕业于上海交通大学, 现为硕士研究生, 研究领域为板状燃料元件反应堆事故安全分析

通信作者: 刘晓晶, E-mail: xiaojingliu@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-11-04, 修回日期: 2022-12-03

Supported by Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, National Natural Science Foundation of China Youth Fund (No.12005133)

First author: OUYANG Kun, male, born in 1999, graduated from Shanghai Jiao Tong University in 2020, master student, focusing on safety analysis of plate fuel element reactor accidents

Corresponding author: LIU Xiaojing, E-mail: xiaojingliu@sjtu.edu.cn

Received date: 2022-11-04, revised date: 2022-12-03

the increase of corrosion time, among which the micro-pores specimens have the largest bubble generation rate at the beginning of nuclear boiling, and the micro-groove specimens have the highest CHF. **[Conclusions]** The influence law and mechanism of long-term corrosion in pressurized water reactor on the enhanced heat transfer effect of different micro-structure surfaces are partially revealed by this study.

**Key words** Corrosion, Surface modification, Boiling heat exchange, Micro-structure, Visualization

在轻水型反应堆中,通过表面改性强化换热能够带来诸多好处,例如:强化换热可降低燃料包壳等部件温度,提高装置的安全性;此外,强化换热可增强系统单位体积的输出功率,减小相关系统设备的体积、重量,有助于优化反应堆系统设计。常用的诸如阳极氧化<sup>[1-3]</sup>、冷喷涂技术<sup>[4]</sup>,或激光加工<sup>[5-8]</sup>的方式,在试样表面加工各种微结构的表面改性方法都受到大量学者关注。

其中,对于金属材料而言,由于激光加工微结构的方式具有加工尺度小、精度高,且加工出来的微结构不易破坏等优点,得到了研究者的广泛应用。Liu等<sup>[5]</sup>研究了飞秒激光加工的微结构表面微柱尺寸对传热性能的影响,并考虑了毛细芯吸作用的影响,对现有模型进行了修正。Long等<sup>[6]</sup>使用了激光加工的方式在铜表面加工了不同尺寸的微槽结构,池式沸腾实验结果表明,其临界热流密度最大提高了40%。Cao等<sup>[7]</sup>研究了激光加工的铜试样表面,由空气中挥发性有机物吸附引起的试样表面自发性的润湿性转变对换热特性的影响。Ferjančić等<sup>[8]</sup>将激光加工与疏水涂层相结合,分别对饱和与过冷条件下,表面改性后试样表面换热性能开展了实验研究。上述文献中给出的结论大多表示使用激光在试样表面加工微槽、微孔、微柱等微结构的方法,能够有效地强化沸腾换热,但对于这种强化换热效果在堆内实际使用时能否长时间保持却少有研究。事实上,在压水反应堆内典型水质环境下的长期运行过程中,换热设备可能出现腐蚀现象,可能会对表面改性的强化换热效果带来影响。

因此,本文以激光加工有三种不同微结构的不锈钢板状试样作为研究对象,通过池式沸腾实验与可视化结果,重点探究了腐蚀对三种微结构表面强化换热效果的影响规律。本文的研究不仅有助于回答表面改性强化换热潜在在应用场景的实际问题,对后续研究者确定采用何种表面改性结构也有一定参考价值。

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置

实验装置如图1所示,主要包括:加热平台、不

锈钢水箱、直流电源、高速摄像机以及数据采集系统等。

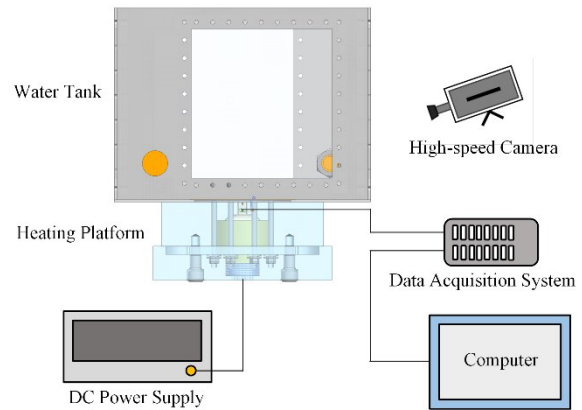


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

锈钢水箱固定于加热平台顶部,图2为加热平台截面示意图。加热平台内部共设有9根加热棒,与外部可调直流电源相连,通过紫铜传热段对试样表面进行加热,最大加热总功率为1.05 kW;紫铜传热段外部设有两层绝热保护层,内层为耐高温的玻纤板,外层材料为易加工且绝热性能好的聚醚醚酮;紫铜传热段下方还设有弹性系数适宜的金属弹簧以及与之相配的滚珠铜套,用以解决加热实验时实验装置内外材料热膨胀系数不同导致的传热段顶部与试样之间不能紧密接触的问题;在紫铜传热段顶部靠近试样位置设有两根直径为0.5 mm的K-型热电偶,与外部的数据采集系统以及计算机相连,用来采集并记录实验过程中的温度变化。

不锈钢水箱与加热平台顶部相连,四面设有有机玻璃视窗,方便实验过程中随时进行观测,以及使用高速摄像仪记录试样表面池式沸腾实验过程中的可视化结果。水箱内设有两根加热功率1.5 kW的加热棒,以保证实验过程中水箱内去离子水始终维持饱和温度。

实验对象为板状试样,材料为不锈钢,外部尺寸为20 mm×20 mm×0.8 mm。采用皮秒激光加工的方式在不锈钢板状试样表面分别加工出了微孔、微槽、微柱三种微结构,如图3所示。三种微结构的宽度设计值均为20 μm,深度均为30 μm,两相邻微结构间距均为20 μm。将三种微结构表面试样与无微结

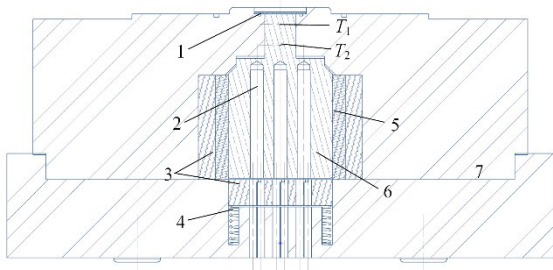


图2 加热平台截面示意图

1-试样, 2-加热棒, 3-耐高温绝热层, 4-弹簧, 5-铜套, 6-紫铜传热段, 7-外部保温层

Fig.2 Schematic cross-section diagram of the heating platform

1-Specimen, 2-Heating rod, 3-High temperature resistant insulation layer, 4-Spring, 5-Copper sleeve, 6-Copper heat transfer section, 7-External insulation

构的光表面试样放入模拟反应堆中一回路实际工况的高温高压反应釜中进行长时间腐蚀, 其中, 高温高压反应釜内使用氢氧化锂溶液模拟压水堆内弱碱性环境, 并通过外部加热装置使得反应釜内部维持 310 °C、10 MPa 的高温高压工况。

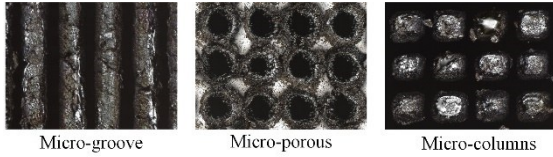


图3 三种微结构试样显微镜照片

Fig.3 Microscopic photograph of three micro-structure test specimens

## 1.2 实验步骤

将腐蚀 50 d、100 d、200 d 的试样分别取出, 与未腐蚀试样一起开展池式沸腾实验。首先, 将试样固定在加热平台顶部, 在水箱中装入去离子水, 并用加热棒加热至饱和温度, 维持 30 min 以去除去离子水中的不凝结气体; 然后, 调节直流电源给定功率对试样开始加热, 待热电偶所示温度稳定 (1 min 内温度波动小于 0.1 °C) 后提高功率继续对试样表面进行加热, 重复此步骤直到试样表面温度飞升, 即试样表面达到临界热流密度 (Critical Heat Flux, CHF) 后, 关闭电源, 停止加热。待实验装置冷却后排掉去离子水并回收试样。本实验中, 待试样表面温度稳定后每次增加的加热功率梯度为 10 W·cm<sup>-2</sup>, 接近 CHF 时每次增加的功率梯度为 5 W·cm<sup>-2</sup>。实验过程中, 通过热电偶与数据采集系统实时观察并记录紫铜传热段顶部温度变化结果, 通过高速摄像机记录试样表面在池式沸腾实验中不同加热功率下的可视化结果。

## 1.3 数据处理

由于加热平台内紫铜传热段除了顶部与试样底

部相连外, 其余部分全部由绝热层包裹, 因此, 可以将柱状传热段到试样表面的热量传递视为一维导热。由实验过程中记录的两根热电偶温度结果, 采用如式(1)所示傅里叶定律可以计算得到试样表面热流密度  $q$ :

$$q = k_{Cu} \frac{T_2 - T_1}{d} \quad (1)$$

式中:  $q$  为试样表面热流密度;  $k_{Cu}$  为紫铜热导率;  $T_1$  与  $T_2$  分别为两根热电偶所测温度;  $d$  为两根热电偶间距。再利用求得的  $q$  可以通过式(2)得到试样表面温度:

$$T_s = T_1 - q \frac{d_{Cu}}{k_{Cu}} - q \frac{d_{grease}}{k_{grease}} - q \frac{d_{SS}}{k_{SS}} \quad (2)$$

式中:  $T_s$  为试样表面温度;  $d_{Cu}$  为热电偶  $T_1$  与传热段顶部距离;  $d_{grease}$  与  $k_{grease}$  分别为不锈钢试样与紫铜传热段顶部之间导热硅脂的厚度与热导率;  $d_{SS}$  与  $k_{SS}$  分别为不锈钢试样的厚度与热导率。其中导热硅脂厚度  $d_{grease}$  难以直接测量, 本文通过热阻测量辅助实验测得试样与传热段顶部接触热阻与 3.9 mm 铜的热阻相当。

本实验所测 CHF 值误差主要来自于温度测量的不确定度以及试样厚度的尺寸误差。所使用的 K-型热电偶不确定度为 ( $\pm 0.5$ ) °C, 而试样的加工精度为 0.03 mm, 由误差传递函数公式(3)可知, 因此本实验所得 CHF 值的不确定度为 3.8%。

$$\frac{\delta q''}{q''} = \left[ \left( \frac{\delta T_1}{T_1} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_2}{T_2} \right)^2 + \left( \frac{\delta d}{d} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

## 2 实验结果与分析

### 2.1 铜试样池式沸腾实验结果与分析

在对腐蚀后微结构试样开展池式沸腾实验研究之前, 本文预先对经过最小粒径 6.5 μm 砂纸磨抛处理后的光滑表面铜试样进行了如图 1 中所述池式沸腾验证实验。实验测得光滑铜试样表面 CHF 值为 (93.1±3.5) W·cm<sup>-2</sup>, 将实验得到的沸腾曲线与 Rohsenow 沸腾换热模型<sup>[9]</sup>及现有光滑铜试样池式沸腾实验结果<sup>[10-13]</sup>进行对比, 并将 CHF 值与经典的 Zuber 模型<sup>[14]</sup>预测值进行对比, 结果如图 4 所示。

其中沸腾曲线与现有文献中光滑铜试样实验结果能够很好吻合。与式(4)所示 Rohsenow 模型相差较小, 均方根误差为 14.4%, 其中,  $C_{sf}$  与  $n$  值分别取 0.012 与 1。

$$\frac{c_{pl} \Delta T}{h_{lv}} = C_{sf} \left\{ \frac{q''}{\mu_l h_{lv}} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{0.5} \right\}^{0.33} Pr_l^n \quad (4)$$



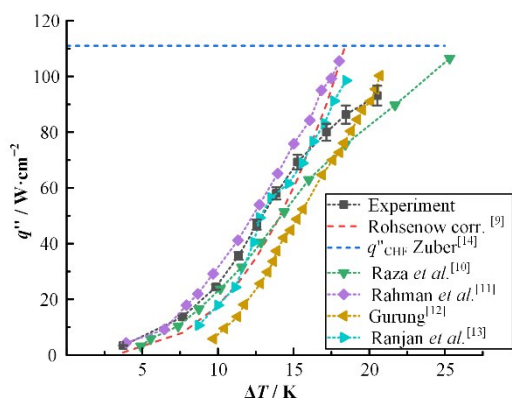


图4 光滑表面铜试样池式沸腾实验结果及不同模型预测值  
Fig.4 Results of the pool boiling experiment of copper specimens compared with models

式中:下角标 $l$ 代表液体, $v$ 代表水蒸气; $c_p$ 、 $\sigma$ 、 $\rho$ 、 $\mu$ 、 $g$ 分别为比热容、表面张力、密度、黏和重力加速度; $h_v$ 为汽化潜热; $Pr$ 为普朗特数; $C_{sf}$ 与 $n$ 为与壁面状况及液体相关经验系数。

实验测得 CHF 值与式(5)所示 Zuber 模型预测值误差为 16.1%,与图4中现有光滑铜试样 CHF 实验值结果 98.6~106.3 W·cm<sup>-2</sup>相比也略微偏小,可能是由于本文所采用池式沸腾实验装置在加热面周围设有压盖,对加热面的液体供给有所阻碍,导致最终测得的 CHF 值偏小。

$$\frac{q''_{CHF}}{\rho_v h_v \left[ \sigma g (\rho_l - \rho_v) / \rho_v^2 \right]^{0.25}} = 0.131 \quad (5)$$

## 2.2 不锈钢试样池式沸腾实验结果与分析

通过铜试样的验证实验结果证实了本文所述实验方法的可靠后,对腐蚀前后三种微结构的不锈钢试样开展了池式沸腾实验,得到了腐蚀时间对不同微结构表面不锈钢试样临界热流密度影响结果,如图5所示。

由图5可知,对于没有微结构的不锈钢试样,临

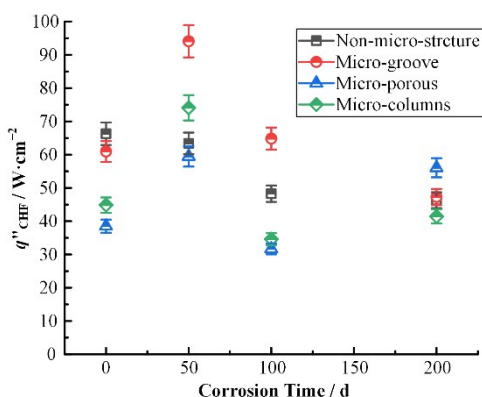


图5 不同微结构表面试样 CHF 随腐蚀时间变化结果  
Fig.5 CHF results of different micro-structure surface samples varies with corrosion time

界热流密度随腐蚀时间的增加而降低。用显微镜观察腐蚀前后试样表面并测量试样表面接触角,如图6所示,腐蚀使得原本光滑的不锈钢试样表面生成了大量氧化物颗粒,导致试样表面接触角由腐蚀前的 93.4° 逐渐增大为腐蚀 200 d 后的 122.7°。也就是说,没有微结构的不锈钢试样表面随着腐蚀时间的增加,疏水性越来越强,从而导致了图5所示的临界热流密度随腐蚀时间增加而逐渐降低的结果。

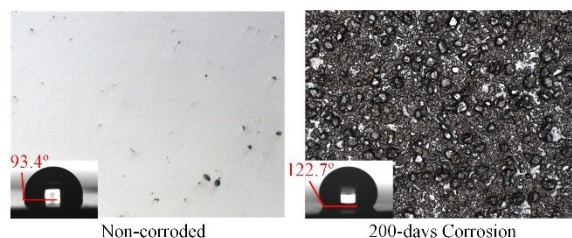


图6 光滑不锈钢试样腐蚀前后表面特性  
Fig.6 Surface characteristics of smooth SS specimen before and after corrosion

对于分别具有微槽、微柱、微孔三种微结构表面试样,其临界热流密度随腐蚀天数的增加整体均呈现先增加后降低的趋势。当腐蚀时间较短(50 d)时,微结构试样表面换热得到强化,这可能是由于腐蚀在微结构表面生成了大量颗粒状氧化物(图6),使试样表面原激光加工得到的单层微结构变成了复合双层微结构,在原有微结构的基础上,这些氧化物颗粒能够在池式沸腾实验过程中为表面额外提供大量活跃的成核位点,大大提高汽泡脱离频率,从而使表面换热得到强化;当腐蚀时间进一步增加,腐蚀生成的氧化物颗粒随之变多,氧化物颗粒粒径也不断增大,汇聚成较为完整的氧化层,逐渐将原有激光加工形成的微孔以及相邻微槽、微柱之间的通道堵塞,如图7所示,原有微结构被破坏,导致长时间腐蚀后三种微结构试样表面换热能力出现恶化,临界密度均有所下降;当腐蚀时间足够长,腐蚀生成的氧化物颗粒甚至能够将微结构完全填满,此时原有微结构表面变得平缓,与腐蚀后的无微结构表面趋于一致,导致了图5中腐蚀 200 d 四种不同表面不锈钢试样临界热流密度逐渐接近的结果。

## 2.3 不同微结构可视化结果与分析

通过高速摄像机得到了不锈钢试样表面池式沸腾可视化结果,如图8所示,记录了7个不同试样从核态沸腾起始到 CHF 过程中,在相近热流密度下表面气泡行为差异。

由可视化结果可以看出,当热流密度较小时,如图8中第1列所示,试样表面开始进入核态沸腾阶段,此时可以看出,未腐蚀的微孔、微槽与微柱三种

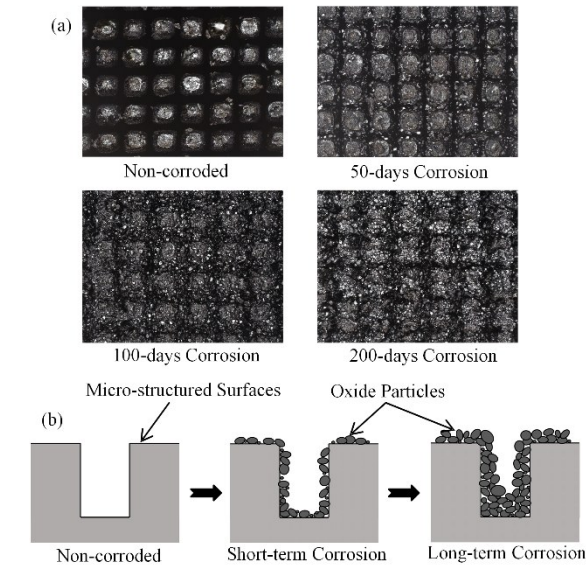


图7 腐蚀对不锈钢试样表面微结构破坏  
(a) 不同腐蚀时间微柱试样表面形貌, (b) 腐蚀对微结构试样表面破坏示意图

Fig.7 Corrosion damage to the surface micro-structure of SS specimens

(a) Surface morphology of micro-column specimens with different corrosion times, (b) Schematic diagram of corrosion damage to the surface of micro-structure specimens

微结构试样表面生成的气泡较多,其中微孔试样气泡生成速率最大,这是由于其试样表面的微孔结构为核态沸腾提供了大量的成核位点。而腐蚀100 d后的三种微结构试样表面气泡相对未腐蚀试样有所减少,可能是图7所示的长时间腐蚀对原有微结构破坏导致的结果。无微结构试样由于表面经过磨抛处理,成核点较少,因此表面气泡最少,且气泡脱离直径相对较大。

当热流密度逐渐增大,微结构试样表面生成的小气泡开始汇聚,形成数个较大的气泡后再分别脱离表面,而无微结构试样表面生成单个较大气泡后再脱离表面,如图8中第2列所示。继续增大热流密度,三种微结构表面的气泡行为开始出现差异,如图8中第3、4列,此时,腐蚀前后的微孔试样表面已经能够汇聚成一个与加热表面尺寸相当的大气泡,随后再脱离,大气泡脱离后表面又新生成众多小气泡,重新汇聚成大气泡后再度脱离。当这种大气泡的脱离与重新生成频率足够高,导致试样表面不间断地被大气泡覆盖,此时热电偶温度飞升,即可认为试样表面到达了CHF。而与之相比,腐蚀前后的微槽与微柱试样表面气泡行为有所不同。由于表面微槽或微柱结构的存在,在小气泡汇聚后微槽与微柱仍能够通过毛细作用为气泡下方的干点输送液体,因此在相近的热流密度下,这两种微结构表面还不足以

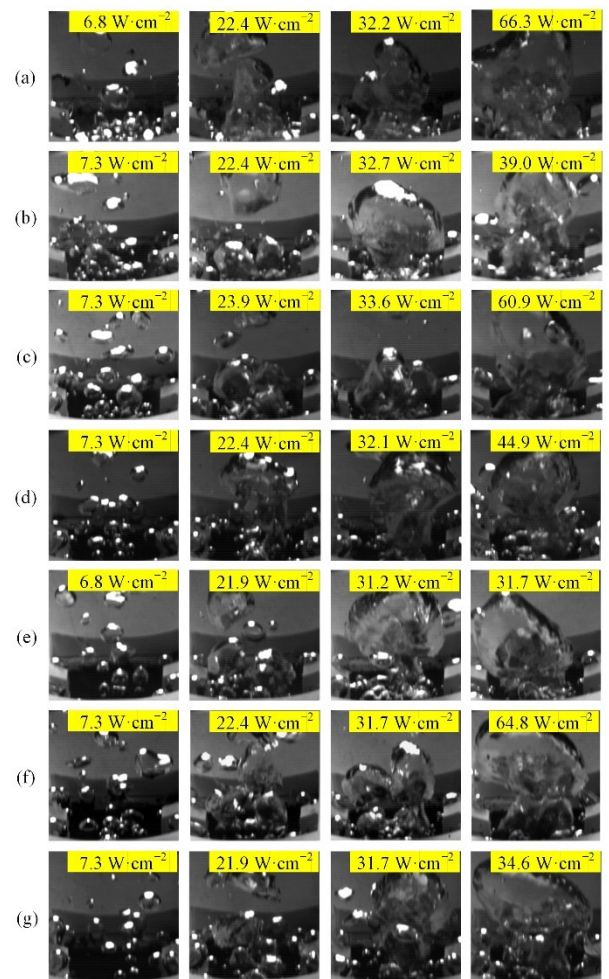


图8 不锈钢试样池式沸腾可视化结果  
(a) 未腐蚀无微结构试样, (b) 未腐蚀微孔试样, (c) 未腐蚀微槽试样, (d) 未腐蚀微柱试样, (e) 腐蚀100 d微孔试样, (f) 腐蚀100 d微槽试样, (g) 腐蚀100 d微柱试样

Fig.8 Visualization results of SS sample pool boiling experiment

(a) Non-corroded non-micro-structure specimen, (b) Non-corroded micro-porous specimen, (c) Non-corroded micro-groove specimen, (d) Non-corroded Micro-columns Specimen, (e) Corroded 100-d micro-porous specimen, (f) Corroded 100-d micro-groove specimen, (g) Corroded 100-d micro-columns specimen

生成足以覆盖整个加热面的大气泡,直至热流密度继续增大至CHF附近,才出现此现象。而当试样表面微结构向气泡下方输送液体的速度到达极限,难以继续延缓干点覆盖整个加热表面,此时微槽与微柱试样也达到了CHF,且由于微槽结构毛细作用输送液体能力强于微柱结构,因此微槽结构相较微柱结构表面试样更晚达到CHF,对应其在三种微结构中最大的临界热流密度。微孔试样与微槽、微柱试样的可视化结果差异主要来自于微结构本身,由于微孔表面孔与孔之间并不联通,难以延缓大气泡的生成,因此其临界热流密度相对较低。



### 3 结语

本文对激光加工有微结构的不锈钢试样开展模拟工况腐蚀,并通过腐蚀前后试样池式沸腾实验结果与可视化结果,重点研究了腐蚀对不同微结构表面换热效果的影响规律。主要得到了以下结论:

1)对于无微结构表面不锈钢试样,腐蚀会导致表面疏水程度不断加深,因此其CHF随腐蚀时间增加而逐渐降低;

2)对于微槽、微孔、微柱三种微结构表面试样,短时间的腐蚀生成的氧化物颗粒会为表面额外提供大量活跃成核位点,但长时间腐蚀后氧化物颗粒增多破坏了原有微结构,使微结构表面变得平缓。因此,其CHF均随腐蚀时间的增加先升高后降低,最后趋向于与无微结构试样相近;

3)微孔试样在核态沸腾起始阶段由于其微结构能够提供大量活跃成核位点,因此有着最高的气泡脱离速率。而微槽与微柱试样,由于其表面微结构能够通过毛细作用为气泡下方干点额外输送液体,延缓大气泡的生成,因此其CHF值相对微孔试样更高,其中微槽结构由于其毛细作用输送液体能力强于微柱结构,因此微槽试样有着三种微结构中最大的CHF值。

**作者贡献声明** 欧阳琨负责酝酿和设计实验,实施研究,采集分析数据,起草文章;许巍负责酝酿和设计实验,获取研究经费,对文章的知识性内容作批评性审阅;刘晓晶负责对文章的知识性内容作批评性审阅,指导研究;何晓强负责获取研究经费,行政、技术或材料支持。

### 参考文献

- Young Lee C, Hossain Bhuiya M M, Kim K J. Pool boiling heat transfer with nano-porous surface[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, **53** (19 - 20): 4274 - 4279. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.054](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.054).
- Hu H, Xu C, Zhao Y, *et al.* Boiling and quenching heat transfer advancement by nanoscale surface modification [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 6117. DOI: [10.1038/s41598-017-06050-0](https://doi.org/10.1038/s41598-017-06050-0).
- Saeidi D, Alemrajabi A A. Experimental investigation of pool boiling heat transfer and critical heat flux of nanostructured surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **60**: 440 - 449. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.016](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.016).
- MacNamara R J, Lupton T L, Lupoi R, *et al.* Enhanced nucleate pool boiling on copper-diamond textured surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **162**: 114145. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2019.114145](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114145).
- Liu B, Liu J, Zhang Y H, *et al.* Experimental and theoretical study of pool boiling heat transfer and its CHF mechanism on femtosecond laser processed surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **132**: 259 - 270. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.003).
- Long J Y, Liu Z Y, Lin H P, *et al.* Pool boiling heat transfer and bubble dynamics over V-shaped microchannels and micropyramids: does high aspect ratio always benefit boiling?[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, **201**: 117796. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2021.117796](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117796).
- Cao Z, Ouyang Z Q, Liu Z Y, *et al.* Effects of surface oxides and nanostructures on the spontaneous wettability transition of laser-textured copper surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2021, **560**: 150021. DOI: [10.1016/j.apsusc.2021.150021](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150021).
- Ferjančić K, Može M, Križan P, *et al.* Subcooled critical heat flux on laser-textured stainless-steel ribbon heaters in pool boiling of FC-72[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, **159**: 120090. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120090](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120090).
- Rohsenow W M. A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1952, **74**(6): 969 - 975. DOI: [10.1115/1.4015984](https://doi.org/10.1115/1.4015984).
- Raza M Q, Kumar N, Raj R. Wettability-independent critical heat flux during boiling crisis in foaming solutions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, **126**: 567 - 579. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.062](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.062).
- Rahman M M, Ölçeroğlu E, McCarthy M. Role of wickability on the critical heat flux of structured superhydrophilic surfaces[J]. *Langmuir*, 2014, **30**(37): 11225 - 11234. DOI: [10.1021/la5030923](https://doi.org/10.1021/la5030923).
- Gurung A. Enhancement of pool boiling and evaporative heat transfer using high temperature thermally conductive microporous coatings[M]. The University of Texas at Arlington, 2014.
- Ranjan A, Ahmad I, Gouda R K, *et al.* Enhancement of critical heat flux (CHF) in pool boiling with anodized copper surfaces[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, **172**: 107338. DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2021.107338](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107338).
- Zuber N. On the stability of boiling heat transfer[J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1958, **80**(3): 711 - 714. DOI: [10.1115/1.4012484](https://doi.org/10.1115/1.4012484).