

腐蚀颗粒沉积下水平管池式沸腾临界热流密度试验研究

王小文¹ 刘茂龙² 丛腾龙¹ 肖 瑶¹ 顾汉洋¹

1(上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240)

2(复旦大学 现代物理研究所 上海 200433)

摘要 在核反应堆运行过程中,燃料包壳表面沉积的腐蚀颗粒会显著改变其表面特性,进而影响临界热流密度(Critical Heat Flux, CHF)。然而,由于缺乏沉积层的结构参数,现有研究难以从理论上阐明沉积层对沸腾临界的影响机理。本研究通过开展不同颗粒浓度和直径的池沸腾沉积试验,首次系统获得了污垢沉积层的多尺度特性参数(粗糙度2~10 μm ,接触角20°~38°,孔隙率0.4~0.6),揭示了颗粒沉积对CHF的作用机制。试验结果表明,沉积后表面平均CHF达到1 419 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$,较光棒(1 240 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$)提升了14.4%,表面润湿性增强起主要作用。本研究首次定量表征了自然沉积污垢的多尺度特征及其对CHF的协同作用机制,弥补了现有研究主要针对人工改性表面的不足;同时验证了Kandlikar模型对污垢沉积表面的适用性(预测误差<8%),为反应堆安全分析提供了可靠工具,更为反应堆安全评估提供了重要的理论依据。

关键词 池沸腾, 颗粒沉积, 临界热流密度, 表面特性

中图分类号 TL375.6

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250263

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250263

Pool boiling experimental study on the impact of deposition on the critical heat flux of horizontally-placed tubes

WANG Xiaowen¹ LIU Maolong² CONG Tenlong¹ XIAO Yao¹ GU Hanyang¹

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

2(Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract [Background] During nuclear reactor operation, the deposition of corrosion particles on fuel cladding alters its surface characteristics, thereby affecting the critical heat flux. However, the lack of structural parameters of the deposited layer has hindered theoretical analysis of its influence on boiling crisis. [Purpose] This study aims to investigate the effect of deposition on the critical heat flux by experimental exploration. [Methods] The experiments were performed in a pool boiling facility using Inconel-625 alloy test sections. First, the baseline critical heat flux (CHF) of smooth rods was measured. Then, Fe/Ni oxide particle suspensions were introduced to form deposition layers under controlled conditions. After 72 h of operation, the CHF of deposited surfaces was measured and compared with baseline values. Finally, surface characterization including contact angle measurements and Scanning

上海市自然科学基金项目(No.24ZR1405500)、国家自然科学基金(No.12322510)资助

第一作者: 王小文, 男, 1998年出生, 2020年毕业于华北电力大学, 现为博士研究生, 研究领域为反应堆热工水力

通信作者: 刘茂龙, E-mail: maolongliu@fudan.edu.cn

收稿日期: 2025-06-29, 修回日期: 2025-10-19

Supported by Shanghai Natural Science Foundation (No.24ZR1405500), National Natural Science Foundation of China (No.12322510)

First author: WANG Xiaowen, male, born in 1998, graduated from North China Electric Power University in 2020, doctoral student, focusing on nuclear reactor thermal-hydraulics

Corresponding author: LIU Maolong, E-mail: maolongliu@fudan.edu.cn

Received date: 2025-06-29, revised date: 2025-10-19

Electron Microscope (SEM) analysis was conducted to examine the deposited layers' properties. **[Results]** The experimental results show that the deposited surface exhibits a roughness range of 2~10 μm , a static contact angle of 20°~38°, and a porosity of 0.4~0.6. The average CHF of the smooth rod before deposition is 1 240 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$, while that of the deposited rod increases to 1 419 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$, representing a 14.4% enhancement. Furthermore, comparison of the experimental data with that of existing CHF models account for surface characteristics. The Kandlikar model demonstrates acceptable accuracy in predicting CHF for deposited rods, with errors within 8%. **[Conclusions]** The experimental results of this study indicate that deposition has an enhancing effect on the critical heat flux, and these findings provide important insights for assessing the impact of corrosion particle deposition on reactor safety.

Key words Pool boiling experiment, Particle deposition, Critical heat flux, Surface characteristics

压水堆运行过程中,冷却剂对镍合金和不锈钢的腐蚀会产生镍、铁离子,当镍、铁离子浓度达到饱和时,会形成以 NiFe_2O_4 和 NiO 为主的腐蚀产物^[1],这些腐蚀颗粒大部分会沉积在燃料包壳表面^[2]。其沉积行为受反应堆功率、腐蚀产物浓度^[3]、流速^[4]、pH值^[5]、壁面粗糙度等^[6]多种因素影响。值得注意的是,这些沉积层会显著改变传热表面的粗糙度、亲水性和孔隙率等关键特性,进而影响临界热流密度(Critical Heat Flux, CHF)这一决定反应堆安全运行的重要参数^[7]。因此,深入研究污垢沉积对CHF的影响机制对于确保压水堆安全运行至关重要。

关于表面粗糙度对CHF的影响,现有研究呈现相互矛盾的结论。经典研究如O'Hanley等^[8]、Berenson^[9]、Lyon^[10]、Ramilison和Lienhard^[11]以及Nishio和Chandratilleke^[12]通过系统的实验证实,在常规粗糙度范围内CHF对表面粗糙度变化并不敏感。然而,近年来的研究发现,当表面粗糙度达到微米级时,其对CHF的影响开始显现。Guan等^[13]通过精确控制表面形貌,证实5 μm 的表面粗糙度可使CHF提升15%,这一发现突破了传统认知。特别值得注意的是,Hu等^[14]在核用Zr-4合金表面构建3 μm 厚的 SiO_2 沉积层后,在特定流动工况下实现了高达118.99%的CHF提升,这一显著效果可能与沉积层独特的微观结构特征有关。这些研究结果表明,粗糙度对CHF的影响可能存在临界尺度效应,当超过某一阈值时会产生显著作用,但这一阈值的具体数值和影响因素仍需进一步研究确证。

关于表面润湿性对CHF影响的研究已形成较系统的认识。Jo等^[15]通过实验研究证实,亲水表面能够通过促进干斑区域的再润湿过程来延迟CHF的发生,而疏水表面则会削弱这一机制导致CHF降低。Hsu和Chen^[16]进一步研究发现,超亲水表面上生成的气泡尺寸显著小于疏水表面(接触角约150°),后者易形成大尺寸停滞气泡,从而阻碍热量传递。O'Hanley等^[8]通过精密的对照实验系统揭示了在多孔结构中润湿性的主导作用:当接触角小于

5°时,CHF可获得50%~60%的提升;而接触角超过110°则会导致CHF骤降97%。值得注意的是,他们的研究同时表明,在光滑无孔表面上,润湿性对CHF的影响几乎可以忽略不计,这一发现为理解表面特性与CHF的相互作用机制提供了重要依据。欧阳琨等^[17]发现无微结构试样腐蚀后表面疏水性增强,CHF降低。这些研究成果共同表明,润湿性对CHF的影响与表面结构特征密切相关,特别是在多孔结构中表现出更为显著的作用。

在CHF预测模型研究方面,学者已建立多个考虑表面特性的理论模型。Kandlikar^[18]在Zuber经典模型基础上,首次引入接触角、表面倾角和过冷度等参数,显著提升了不同润湿性表面CHF的预测精度。Liao等^[19]通过实验拟合提出了考虑接触角和倾角效应的半经验关联式。Hsu和Chen^[16]则基于气泡动力学分析,建立了润湿性与气泡行为的定量关系模型。特别具有突破性的是,Liter和Kaviani^[20]针对多孔涂层表面提出了双重液体阻塞理论,通过引入涂层调制波长参数,同时考虑了流体动力限制和黏滞阻力机制,其修正的Zuber模型与实验结果高度吻合。Ramilison等^[21]开发的模型则进一步整合了粗糙度和润湿性参数的影响。虽然这些模型为理解表面特性与CHF的关系提供了重要工具,但均基于理想人工改性表面,尚未有针对核反应堆燃料包壳污垢特性的专门模型。考虑到污垢特性同样通过粗糙度、孔隙率和接触角等参数表征,这些现有模型为开发适用于污垢表面的CHF预测方法提供了重要参考。

综上所述,表面特性对CHF的影响虽已有较多研究,但针对核反应堆燃料包壳表面污垢沉积这一特殊工况的研究仍存在显著空白。区别于现有研究中采用的人工改性表面,污垢沉积层具有独特的微观形貌特征和动态演变特性,其对CHF的影响机制尚不明确。本研究通过系统考察污垢沉积层的多尺度特性(包括粗糙度、润湿性和孔隙率的协同作用),创新性地系统评价了现有考虑表面特性的CHF模

型在污垢表面的预测精度。研究成果不仅填补了污垢沉积表面CHF研究的理论空白,更显著提升了核反应堆安全分析的准确性,为系统性分析污垢沉积对反应堆热工水力特性的影响提供了理论支撑。

1 实验系统和方法

1.1 池沸腾试验装置及试验段

池沸腾装置示意图如图1所示,不锈钢水池的尺寸为400 mm×400 mm×600 mm,在水池不同高度布置有热电偶测量水温,水池中安装有水平放置的试验棒,浸泡在去离子水中进行核态沸腾实验。实

验段如图2所示,为了方便试验段和水池之间密封,用内径等于Inconel-625加热管内径的铜棒钎焊制备试验棒。试验段参数如表1所示。试验装置还有几个关键部件:

1)直流电源,最大功率为25 kW。

2)冷凝器,安装在水池顶盖上,将水池中的蒸气冷却回液态水回到水池中。

3)加热带,水池外壁面贴有功率可调节的加热带,实验前可以将水池中的水加热至饱和温度,实验中可以平衡实验装置对环境的热损失。

4)滑移热电偶装置,可测量不同轴向位置的周向温度分布。

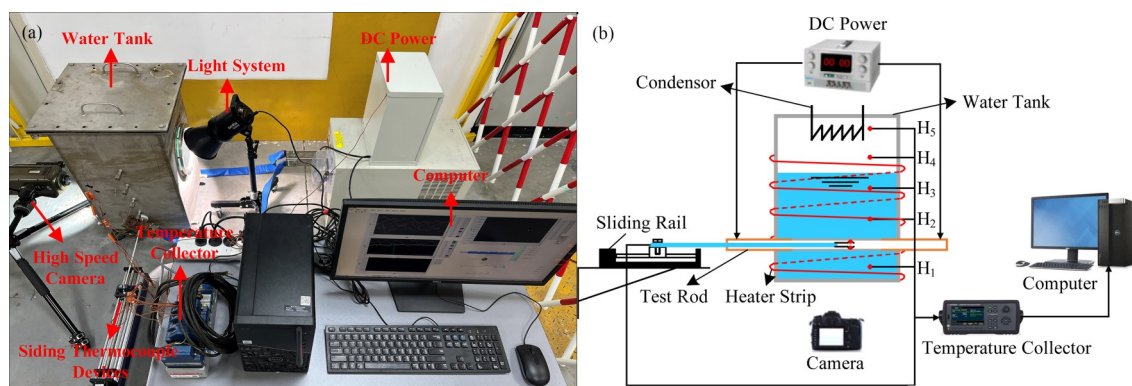


图1 池沸腾装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of pool boiling apparatus

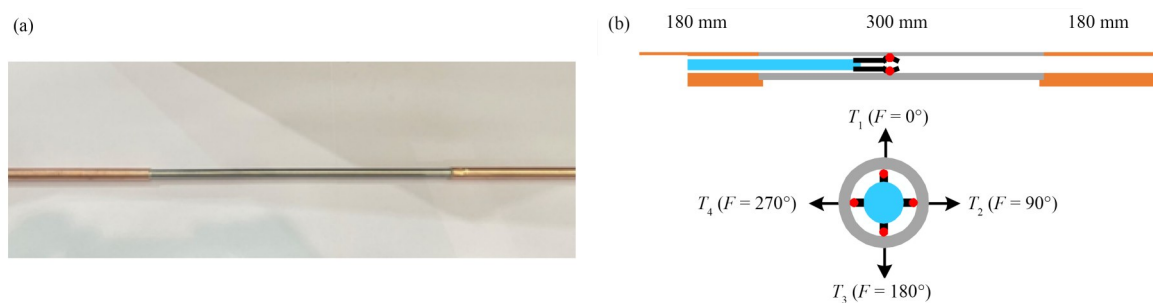


图2 试验棒示意图
Fig.2 Schematic diagram of test rod

表1 试验段参数
Table 1 Test tube parameters

材料 Materials	长度 Length / mm	外径 Outer diameter / mm	内径 Inner diameter / mm
因科镍625 Inconel-625	320.00	9.50	8.30
紫铜 Copper	180.00	12.00	8.30

1.2 试验步骤

试验步骤如下:

1)通过试验水池外部的加热带将水池水温加热至饱和温度,根据饱和温度对热电偶进行校验。

2)逐步增加试验段功率,得到光滑水平棒的临界热流密度。

3)将试验段功率调整到稳态运行所需的功率水平。将制备的铁镍混合液加入到水池中。运行一定时间,形成一定厚度的沉积层。

4)在试验运行结束时,获得沉积后水平棒的临界热流密度。

5)关闭加热棒电源供应,然后迅速排出水池中

的水,以保护试验段表面的污垢层。

6)打开不锈钢水池,仔细拆卸试验段的加热棒,测量沉积表面的接触角,并利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)拍摄沉积表面的微观形貌。

1.3 试验工况

试验工况如表2所示,目前开展了8个工况。

表2 试验工况
Table 2 Experimental conditions

工况编号 Test No.	沉积热流 Deposition heat flux / $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	沉积时间 Deposited time / h	NiO 浓度 NiO concentration / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Fe_3O_4 浓度 Fe_3O_4 concentration / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NiO 直径 NiO diameter / μm	Fe_3O_4 直径 Fe_3O_4 diameter / μm
Test 0	—	—	—	—	—	—
Test 1	230.00	72	50	100	5	1
Test 2	230.00	72	30	60	5	1
Test 3	230.00	72	10	20	5	1
Test 4	230.00	72	—	90	—	0.02
Test 5	230.00	72	—	90	—	0.05
Test 6	230.00	72	—	90	—	0.2
Test 7	230.00	72	—	90	—	1

2 数据分析

2.1 数据处理

加热棒的功率可通过式(1)计算得出:

$$Q = UI \quad (1)$$

式中: U 和 I 分别为实验段的电压和电流。实验管表面热通量可通过式(2)计算:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{UI}{\pi \times L \times d_o} \quad (2)$$

$$A = \pi \times L \times d_o \quad (3)$$

式中: L 和 d_o 分别为实验段的长度和管外径。实验过程中,采用逐步升功率法确定临界热流密度。具体实施过程中,以0.5 V为步长逐步提高加热功率,每级电压维持3 min,以确保达到热平衡状态。临界热流密度的判定基于温度骤变现象和可视化观测结果综合判断:当监测到相邻时间的壁面温度变化幅度超过30 °C,或任一测点温度超过400 °C时;同时通过耐高温观测窗观察到加热管表面出现局部或整体烧红现象,两者同时满足则确认CHF发生。最终CHF值取触发瞬态的加热功率(q_n)与前一级稳定状态热通量(q_{n-1})的算术平均值。计算方法如下所示:

$$q_{\text{CHF}} = \frac{q_n + q_{n-1}}{2} \quad (4)$$

式中: q_n 为温度跃变点处的热通量; q_{n-1} 为前一步稳

Test 0 为无颗粒沉积试验,工质为去离子水,以便与沉积试验进行比较。Test 1、Test 2、Test 3 探究不同沉积颗粒浓度沉积对临界热流密度的影响。Test 4、Test 5、Test 6、Test 7 探究不同沉积颗粒直径沉积对临界热流密度的影响。试验选用NiO和 Fe_3O_4 作为沉积颗粒,是因为这两种氧化物与典型压水堆一回路系统中实际污垢的主要化学成分完全一致,能够反映实际反应堆运行条件下的污垢沉积特性。

定状态下的热通量。

2.2 不确定性分析

对于直接测量量(X),例如热电偶测量的温度或电压表测量的电压,其不确定度由测量仪器直接给出。对于实验段的几何尺寸(如管的外径和内径),其不确定度通过多次测量取平均来确定。池沸腾实验中直接测量量的不确定度汇总于表3。

对于间接测量量(Y),这些量由多个直接测量量根据式(4)计算得出,其不确定度使用式(5)^[22]提供的误差传递方程来确定。相对不确定度的详细计算见式(6)。表3同时列出了间接测量量的最大相对不确定度。

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (5)$$

$$\delta_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \sigma_{X_i} \right)^2} \quad (6)$$

$$R_Y = \frac{\delta_Y}{Y} \quad (7)$$

3 污垢表面特征参数

3.1 表面粗糙度

利用材料型正置激光共聚焦显微镜获得沉积前后棒表面的三维形貌,获得沉积前后表面粗糙度相关参数,各个参数的定义见表4。

表3 参数的不确定度
Table 3 Uncertainty of the parameters

参数 Parameters	最大不确定度 Maximum uncertainties
管外径 Tube outer diameter d_o / mm	± 0.02
管内径 Tube inner diameter d_i / mm	± 0.02
长度 Tube length L / mm	± 0.02
温度 Temperature T / $^{\circ}\text{C}$	± 0.5
电流 Current I	1%
电压 Voltage U	1%
热流密度 Heat flux q	1.4%

表4 粗糙度相关参数的定义
Table 4 The definitions of roughness parameters

粗糙参数 Roughness parameters	数学定义 Mathematical description
算术平均高度 Arithmetical mean height R_a	$R_a = \frac{1}{A} \iint_A z(x, y) dx dy$
均方根高度 Root mean square height R_q	$R_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$
最大谷深度 Maximum valley depth R_v	$R_v = \min z(x, y) $
最大峰高度 Maximum peak height R_p	$R_p = \max z(x, y) $

表5给出了沉积前后棒的粗糙度参数。从表5中可以发现,颗粒沉积使壁面变得更粗糙,沉积表面的粗糙度(算术平均值)在10 μm 以内,该值可为分析沉积对压降及换热的影响提供依据。

3.2 沉积层厚度及孔隙率

实验结束后,将试验管切割成段并用树脂进行保护。经过抛光处理后,使用扫描电子显微镜观察其横截面形貌,以获取沉积层的厚度和孔隙率,样品如图3所示。

图4为不同角度下沉积层的扫描电镜图。如图4(a)所示,从下向上可以看到包壳、氧化层、沉积层



图3 扫描电镜样品照片
Fig.3 Snapshot of some samples for scanning electron microscope

和树脂。利用沉积层的截面图可以获得其厚度,同时利用图像处理软件,对图像进行灰度化、二值化处理,将孔隙区域与基体区域分离,获得沉积层的孔隙率。表6汇总了典型实际压水堆的污垢特性参数,并给出了试验中不同工况、不同角度条件下的沉积层厚度与孔隙率数据,分析试验数据发现,试验条件下测得的污垢参数与典型压水堆的污垢特征表现出显著相似性。

3.3 静态接触角

为分析沉积对表面润湿性的影响,采用接触角测量仪分别测量了沉积前后管材表面的静态接触角。不同工况下的测量结果如表7所示。可以看出,光滑棒的接触角约为80°。沉积后,对每根管材表面随机选取三个点进行测量,每点重复测量三次,取平均值作为沉积表面的静态接触角。表中给出了平均值和标准差等数据,便于后续模型开发的验证工作。图5展示了Test 5样品的测量结果。从测量结果可以看出,沉积后表面润湿性显著提高,静态接

表5 沉积前后试验棒粗糙度参数
Table 5 The surface roughness parameters of the tubes before and after deposition

不同状态 Different conditions	沉积前 Before deposition				沉积后 After deposition			
粗糙参数 Roughness parameters	R_a / μm	R_q / μm	R_v / μm	R_p / μm	R_a / μm	R_q / μm	R_v / μm	R_p / μm
工况1 Test 1	0.32	0.42	3.94	3.24	8.15	11.08	42.29	39.26
工况2 Test 2	0.35	0.47	3.63	3.40	2.37	4.07	8.76	33.63
工况3 Test 3	0.30	0.40	3.24	2.98	2.08	3.26	11.13	33.75
工况4 Test 4	0.30	0.39	2.91	5.74	8.03	11.67	36.98	46.12
工况5 Test 5	0.36	0.48	4.27	3.14	2.67	4.84	10.68	40.88
工况6 Test 6	0.31	0.41	3.38	3.01	4.79	6.16	16.96	25.13
工况7 Test 7	0.32	0.42	3.63	2.77	5.78	7.18	21.71	25.21

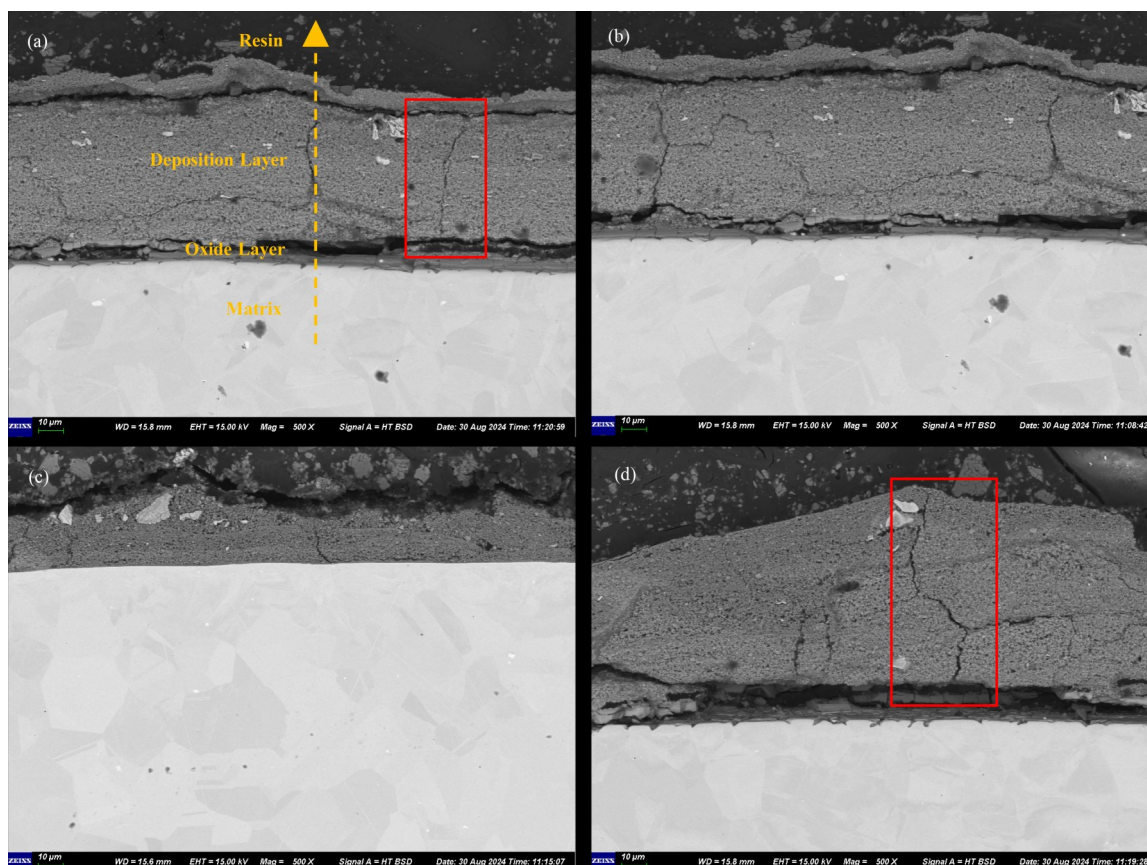


图4 不同角度下沉积层横截面的扫描电镜观测结果 (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°, (d) 270°

Fig.4 SEM scanning results of cross-sections of deposition layer at different angle (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°, (d) 270°

表6 不同角度沉积层厚度及孔隙率

Table 6 The thickness and porosity of the deposition layer at different angles

工况编号 Test No.	厚度 Thickness / μm					孔隙率 Porosity				
	0°	90°	180°	270°	平均值 Average	0°	90°	180°	270°	平均值 Average
Typical ^[23]	0~130					0.4~0.78				
Test 1	88.2	57.1	39.7	79.4	66.1	0.46	0.45	0.48	0.47	0.46
Test 2	48.8	28.5	26.2	36.8	35.1	0.44	0.43	0.44	0.48	0.45
Test 3	30.3	29.4	30.1	31.2	30.3	0.41	0.43	0.40	0.48	0.43
Test 4	38.9	36.3	31.4	36.3	35.8	0.58	0.54	0.50	0.54	0.54
Test 5	47.2	34.7	29.1	41.4	38.1	0.54	0.59	0.57	0.55	0.56
Test 6	59.4	55.3	30.0	44.1	47.2	0.52	0.57	0.57	0.56	0.55
Test 7	49.6	38.4	33.5	44.1	41.4	0.57	0.54	0.59	0.56	0.56

触角在17°~38°。

4 试验结果

试验采用阶梯升压方式,以0.5 V为增量逐步提升试验段电压,当监测到相邻时间的壁面温度变化幅度超过30 °C,或任一测点温度超过400 °C时,即判定达到CHF。图6展示了CHF发生时壁温的典型骤升过程。与此同时,通过可视化窗口可清晰观察到加热管表面出现局部红热现象,如图7所示,为CHF的判定提供了直观的视觉证据。通过温度骤升

特征和管壁红热现象的双重验证,确保了CHF判定结果的准确性。

图8为光棒临界结果与现有模型对比,光棒的平均临界热流密度为1 240 kW·m⁻²,与现有模型的误差在10%以内。

图9为沉积棒与光棒临界结果对比,沉积棒平均临界热流密度为1 419 kW·m⁻²,与光棒相比提升了14.4%。

根据所有工况的CHF结果,图10展示了CHF与表面特性(包括粗糙度(2 μm < Ra <10 μm)、润湿性

表7 沉积前后棒表面的静态接触角
Table 7 The static contact angle of tube before and after deposition

工况编号 Test No.	光滑棒 Smooth tube	沉积棒 Deposited tube			平均值 Average value
		测点 1 Point 1	测点 2 Point 2	测点 3 Point 3	
Test 1	80.6°	7.2°	32.4°	19.6°	19.7°±10.3°
Test 2	81.0°	19.0°	18.6°	26.8°	21.5°±3.8°
Test 3	80.0°	17.6°	16.7°	19.2°	17.8°±1.0°
Test 4	79.6°	18.5°	18.1°	28.3°	21.6°±4.7°
Test 5	82.0°	19.6°	23.8°	19.9°	21.1°±1.9°
Test 6	81.6°	25.9°	27.1°	49.4°	34.1°±10.8°
Test 7	80.2°	36.5°	45.8°	30.1°	37.4°±6.4°

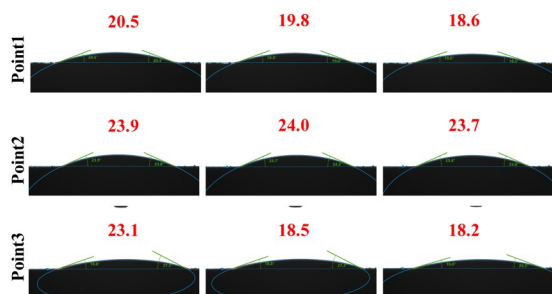


图5 沉积棒表面接触角展示(Test 5)
Fig.5 Illustration of surface static contact angles of deposition tube (Test 5)

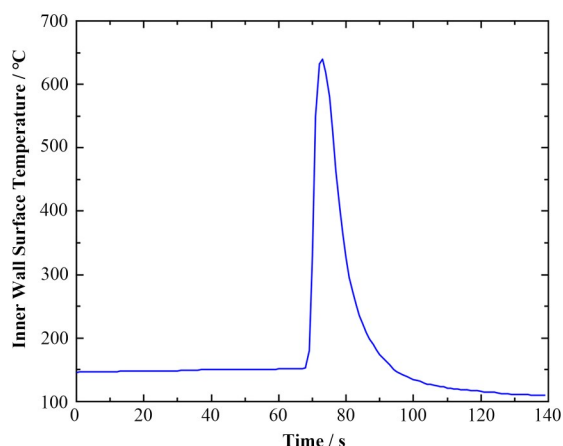


图6 发生CHF时的壁温变化
Fig.6 Variation of wall temperature with time during CHF occurrence

(接触角 $5^{\circ}<\theta<40^{\circ}$)及孔隙率($0.4<\phi<0.6$))之间的关联规律。

图10(a)表明:当表面粗糙度 Ra 超过 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,CHF值不再受粗糙度影响。该结果与Kim等^[24]的研究结论一致,其研究曾指出当 $Ra>0.35\text{ }\mu\text{m}$ 时粗糙度的影响可忽略不计。图10(b)显示,CHF随接触角减小而显著增大,证实了表面润湿性增强可提升CHF性能。图10(c)展示了CHF随孔隙率的变化关系,实验数据表明,在测试范围内($0.4<\phi<0.6$),CHF



图7 CHF发生时加热管表面红热现象(彩图见网络版)
Fig.7 Red-hot phenomenon on heating tube surface at CHF occurrence (color online)

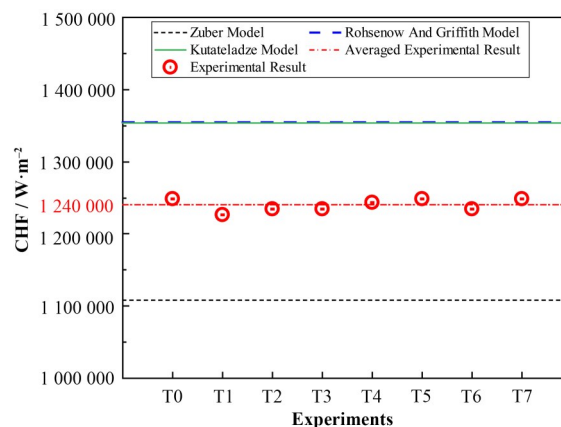


图8 光棒临界结果与现有模型对比
Fig.8 Comparison of experimental CHF data with available existing models

与孔隙率未呈现显著相关性。

基于沉积棒表面实验获得的CHF数据,本研究系统评价了现有考虑表面特性的CHF预测模型。Kandlikar^[18]、Liao等^[19]、Chang和Snyder^[25]开发的模型主要考虑表面润湿性对CHF的影响,而Ramilison等^[21]模型额外包含了润湿性与粗糙度的双重影响。表8汇总了各模型的数学表达式,通过预测精度的对比分析,为未来CHF模型的优化提供了重要理论依据。

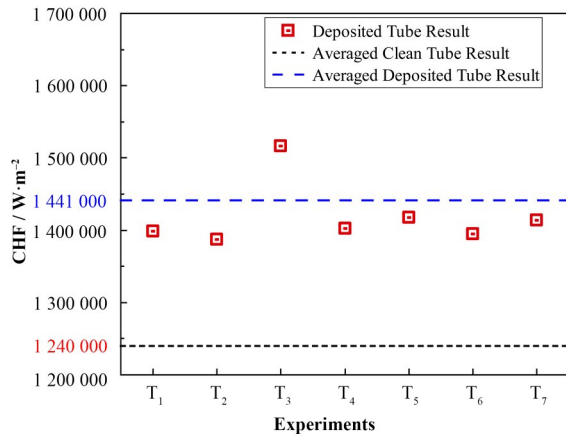


图9 沉积棒与光棒临界结果对比
Fig.9 Comparison of critical heat flux results between deposited rod and clean rod

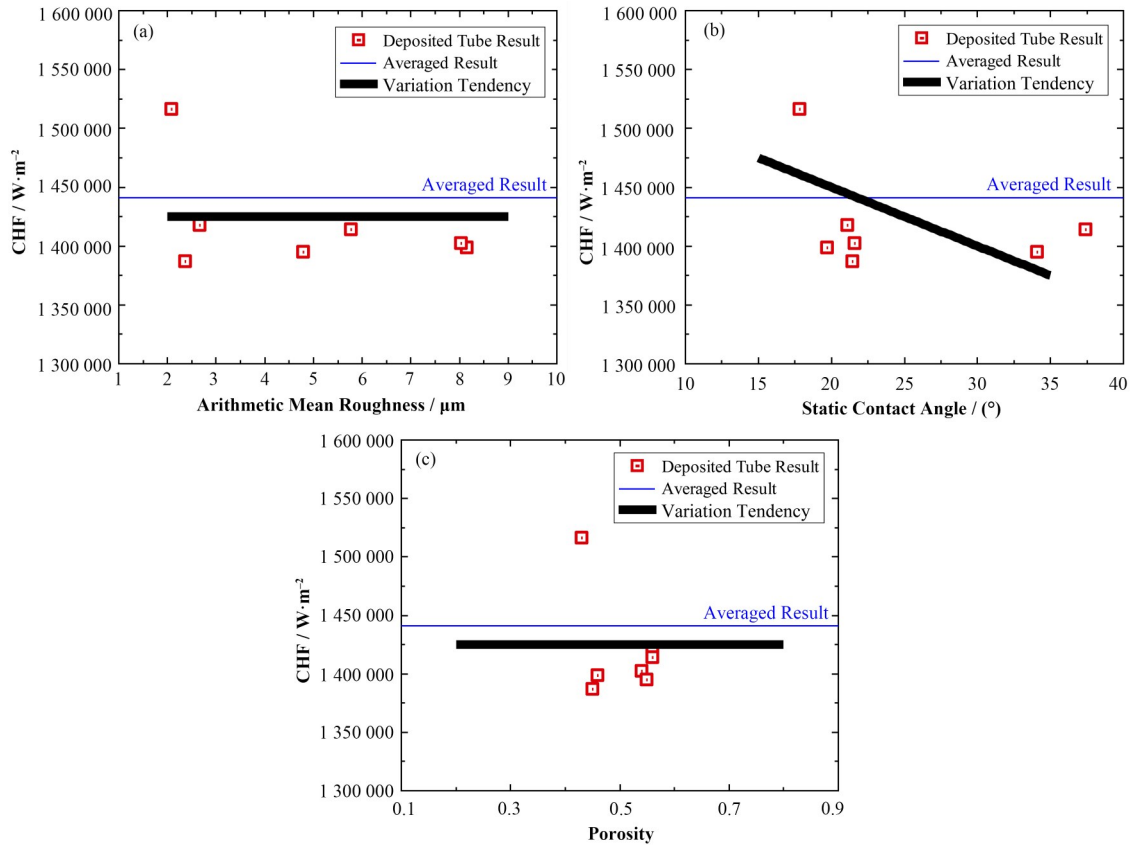


图10 临界热流密度随表面特性的变化(彩图见网络版) (a) 表面粗糙度, (b) 接触角, (c) 孔隙率
Fig.10 Variation of CHF with surface characteristics (color online) (a) Surface roughness, (b) Contact angle, (c) Porosity

5 结语

本研究通过开展不同颗粒浓度和直径的池沸腾沉积试验,首次系统获得了污垢沉积层的多尺度特性参数,揭示了颗粒沉积对CHF的作用机制,主要结论如下:

实验工质的热物性参数通过REFPROP10^[26]获取。如图11所示,将实验数据与模型预测值进行对比(Kandlikar模型中采用静态接触角替代动态后退接触角)。结果表明:Kandlikar^[18]和Liao等^[19]的模型能准确预测CHF随接触角的变化规律;Chang和Snyder^[25]模型则呈现与实验相反的变化趋势。

图12对比了各模型的预测误差。Kandlikar模型表现出最优的预测性能,最大误差小于8%;Liao等模型同样具有较好的可靠性,最大误差低于15%。其余模型预测效果较差,Chang和Snyder模型的误差均超过30%,即使同时考虑润湿性和粗糙度的Ramilison等^[21]模型也出现较大偏差。这些结果表明,现有模型在预测沉积表面CHF时仍需改进。后续研究应深入探究表面特性与CHF的作用机理,以建立适用于复杂表面条件的精确预测模型。

1)首次定量表征了核反应堆燃料包壳表面自然沉积污垢的多尺度特性(粗糙度2~10 μm,接触角5°~30°,孔隙率0.4~0.6),发现其可使CHF提升14.4%(从1 240 kW·m⁻²增至1 419 kW·m⁻²)。

2)表面特性影响机制研究表明,CHF性能主要受表面润湿性主导,CHF值随接触角增大(20°~38°)

表8 CHF模型的数学表达式
Table 8 Mathematical expressions of CHF models

作者 Authors	模型 Models
Kandlikar ^[18]	$q_{CHF}'' = \frac{1 + \cos \alpha}{16} \left[\frac{2}{\pi} + \frac{\pi}{4} (1 + \cos \alpha) \cos \theta \right]^{1/2} \times \rho_g h_{fg} [\sigma g (\rho_f - \rho_g) / \rho_g^2]^{1/4}$
Liao 等 ^[19]	$q_{CHF}'' = 0.131 \left[-0.73 + \frac{1.73}{1 + 10^{-0.021 \times (185.4 - \theta)}} \right] \left[1 + \frac{55 - \alpha}{100} (0.56 - 0.0013\theta) \right] \times \rho_g h_{fg} [\sigma g (\rho_f - \rho_g) / \rho_g^2]^{1/4}$
Ramilison 等 ^[21]	$q_{CHF}'' = 0.0044 (\pi - \alpha)^3 R_a^{0.125} \times \rho_g h_{fg} [\sigma g (\rho_f - \rho_g) / \rho_g^2]^{1/4}$
Chang 和 Snyder ^[25]	$q_{CHF}'' = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{6} \right)^{5/6} (0.0119\alpha)^{1/2} \times \rho_g h_{fg} [2\sigma g (\rho_f - \rho_g) / \rho_g^2]^{1/4}$

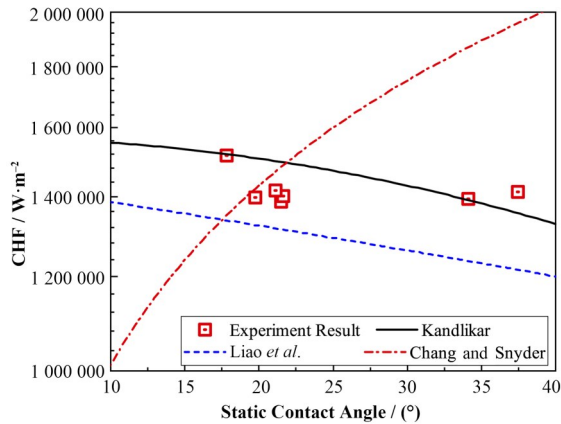


图11 CHF实验数据与模型预测的比较(彩图见网络版)
Fig.11 Comparison of experimental CHF data and model predictions (color online)

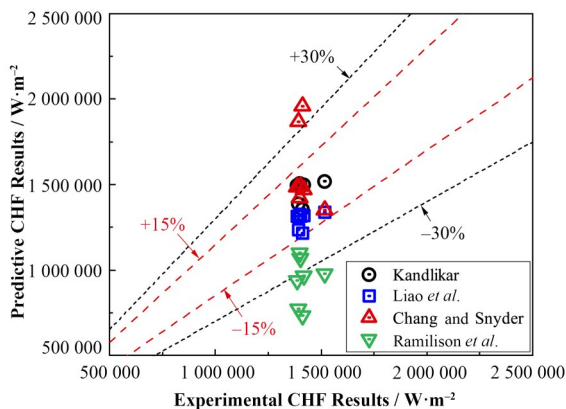


图12 几种CHF模型的预测误差(彩图见网络版)
Fig.12 Prediction error of several CHF models on deposited surfaces (color online)

呈现线性降低趋势；当表面粗糙度超过 $2 \mu\text{m}$ 后，其对CHF的促进作用趋于饱和；孔隙率(0.4~0.6)对CHF的影响可忽略不计。该量化研究结果为建立考虑污垢沉积特性的CHF预测模型提供了关键参数依据。

3)模型验证研究表明：在现有CHF预测模型中，Kandlikar模型对污垢沉积表面的预测误差最优(<8%)，Liao模型次之(<15%)，其余模型误差均超过30%。该发现不仅为核反应堆安全分析提供了可

靠的工具，更为反应堆安全评估提供了重要的理论依据。

作者贡献声明 王小文负责实验设计和开展、数据整理和论文撰写；刘茂龙负责腐蚀实验的指导、开展以及初稿的校对；丛腾龙负责实验的指导 and 开展；肖瑶负责实验的指导 and 开展；顾汉洋提供资金和方法论。

参考文献

- Henshaw J, McGurk J C, Sims H E, *et al.* A model of chemistry and thermal hydraulics in PWR fuel crud deposits[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2006, **353**(1 - 2): 1 - 11. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2005.01.028.
- Solomon Y, Roesmer J. Measurement of fuel element crud deposits in pressurized water reactors[J]. *Nuclear Technology*, 1976, **29**(2): 166 - 173. DOI: 10.13182/nt76-a31576.
- 廖家鹏, 叶杰, 金德升, 等. 堆芯功率变化对燃料包壳表面污垢沉积行为的影响研究[J]. *核技术*, 2022, **45**(8): 080605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.080605.
- LIAO Jiapeng, YE Jie, JIN Desheng, *et al.* Effect of core power variation on crud deposition behavior on fuel cladding surface[J]. *Nuclear Techniques*, 2022, **45**(8): 080605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.080605.
- Uchida S, Asakura Y, Ohsumi K, *et al.* Chemical composition of crud depositing on BWR fuel surfaces[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1987, **24**(5): 385 - 392. DOI: 10.3327/jnst.24.385.
- Song M C, Lee K J. The evaluation of radioactive corrosion product at PWR as change of primary coolant chemistry for long-term fuel cycle[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2003, **30**(12): 1231 - 1246. DOI: 10.1016/S0306-4549(03)00054-9.
- 董显敏, 田瑞峰, 林继铭, 等. 基于欧拉沉积模型的LBE介质边界层颗粒沉积特性研究[J]. *核技术*, 2025, **48**(7): 070026. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.250024.

- CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250024.
- DONG Xianmin, TIAN Ruifeng, LIN Jiming, *et al.* Study on the particle deposition characteristics in the boundary layer of LBE medium based on the Eulerian deposition model[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(7): 070026. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.250024. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250024.
- 7 Deshon J, Hussey D, Kendrick B, *et al.* Pressurized water reactor fuel crud and corrosion modeling[J]. JOM, 2011, **63**(8): 64 - 72. DOI: 10.1007/s11837-011-0141-z.
 - 8 O'Hanley H, Coyle C, Buongiorno J, *et al.* Separate effects of surface roughness, wettability, and porosity on the boiling critical heat flux[J]. Applied Physics Letters, 2013, **103**(2): 024102. DOI: 10.1063/1.4813450.
 - 9 Berenson P J. Experiments on pool-boiling heat transfer [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1962, **5**(10): 985 - 999. DOI: 10.1016/0017-9310(62)90079-0.
 - 10 Lyon D N. Peak nucleate-boiling heat fluxes and nucleate-boiling heat-transfer coefficients for liquid N₂, liquid O₂ and their mixtures in pool boiling at atmospheric pressure [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1964, **7**(10): 1097 - 1116. DOI: 10.1016/0017-9310(64)90033-X.
 - 11 Ramilison J M, Lienhard J H. Transition boiling heat transfer and the film transition regime[J]. Journal of Heat Transfer, 1987, **109**(3): 746 - 752. DOI: 10.1115/1.3248153.
 - 12 Nishio S, Chandratilleke G R. Steady-state pool boiling heat transfer to saturated liquid helium at atmospheric pressure[J]. JSME International Journal Ser 2, Fluids Engineering, Heat Transfer, Power, Combustion, Thermophysical Properties, 1989, **32**(4): 639 - 645. DOI: 10.1299/jsmeb1988.32.4_639.
 - 13 Guan C K, Bon B, Klausner J, *et al.* Comparison of CHF enhancement on microstructured surfaces with a predictive model[J]. Heat Transfer Engineering, 2014, **35**(5): 452 - 460. DOI: 10.1080/01457632.2013.833043.
 - 14 Hu Z P, Cai J J, Deng R N. Experimental investigation on flow boiling heat transfer of fuel cladding with chalk river unidentified deposits[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, **236**: 126371. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126371.
 - 15 Jo H, Ahn H S, Kang S, *et al.* A study of nucleate boiling heat transfer on hydrophilic, hydrophobic and heterogeneous wetting surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, **54**(25 - 26): 5643 - 5652. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06.001.
 - 16 Hsu C C, Chen P H. Surface wettability effects on critical heat flux of boiling heat transfer using nanoparticle coatings[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, **55**(13 - 14): 3713 - 3719. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.003.
 - 17 欧阳琨, 许巍, 刘晓晶, 等. 腐蚀对微结构金属试样表面沸腾换热特性的影响研究[J]. 核技术, 2023, **46**(6): 060606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060606.
 - OUYANG Kun, XU Wei, LIU Xiaojing, *et al.* Effect of corrosion on boiling heat transfer characteristics of metal specimens with micro-structure surface[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(6): 060606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060606.
 - 18 Kandlikar S G. A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation [J]. Journal of Heat Transfer, 2001, **123**(6): 1071 - 1079. DOI: 10.1115/1.1409265.
 - 19 Liao L, Bao R, Liu Z H. Compositive effects of orientation and contact angle on critical heat flux in pool boiling of water[J]. Heat and Mass Transfer, 2008, **44**(12): 1447 - 1453. DOI: 10.1007/s00231-008-0384-6.
 - 20 Liter S G, Kaviany M. Pool-boiling CHF enhancement by modulated porous-layer coating: theory and experiment [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, **44**(22): 4287 - 4311. DOI: 10.1016/S0017-9310(01)00084-9.
 - 21 Ramilison J M, Sadasivan P, Lienhard J H. Surface factors influencing burnout on flat heaters[J]. Journal of Heat Transfer, 1992, **114**(1): 287 - 290. DOI: 10.1115/1.2911261.
 - 22 Bevington P R, Robinson D K, Bunce G. Data reduction and error analysis for the physical sciences, 2nd ed[J]. American Journal of Physics, 1993, **61**(8): 766 - 767. DOI: 10.1119/1.17439.
 - 23 Yeo D Y, No H C. Modeling heat transfer through corrosion product deposits on fuel rods in pressurized water reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, **342**: 308 - 319. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2018.12.008.
 - 24 Kim J, Jun S, Lee J, *et al.* Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on a superhydrophilic aluminum surface[J]. Journal of Heat Transfer, 2017, **139**(10): 101501. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.124.
 - 25 Chang Y, Snyder N W. Heat transfer in saturated boiling

[J]. Symposium Ser. No. 30: Medium: X, 1960, **56**: 25
- 38.

reference fluid thermodynamic and transport properties
[R]. Version 8.0. Gaithersburg, USA, 2007.

26 Lemmon E W, Huber M L, McLinden M O. NIST