DOI:10.19666/j.rlfd.202605106

超临界换热器管内颗粒沉积行为的研究

曾子轮，刘寒，朱忠亮，张乃强，徐鸿
（华北电力大学电站能量传递转化与系统教育部重点实验室，北京 102206）

［摘 要］【目的】超临界锅炉换热器管内的颗粒沉积是影响机组宽负荷调峰运行的重要因素之一。本文旨在利用超临界水管内沉积试验系统开展相关实验和模拟研究。【方法】实验通过壁温监测与微观表征观察颗粒的微观形貌与沉积行为，模拟重点考虑离子氧化成核对沉积分布的影响。分析离子氧化成核以及壁面粗糙度对颗粒沉积规律的影响。【结果】结果表明：颗粒主要为微米级的球形 Fe_3O_4 颗粒团簇，团簇直径中位数为 5.832 μm，沉积层厚度随着时间发展将趋于动态平衡；构建的离子氧化成核模型具有良好的适用性；离子氧化成核对沉积分布的影响表现为：在亚临界区，流体流动是影响颗粒沉积的主要因素，在超临界区，粒径越大，成核温度越高，流体对颗粒的影响越小；壁面粗糙度的增长对颗粒沉积的影响具有自限性，超临界区域内粗糙度对颗粒沉积的影响较小。【结论】对明确超临界换热器管内的离子初期氧化成核沉积行为，提高机组宽负荷调峰稳定性具有重要意义。

［关 键 词］超临界；宽负荷；颗粒沉积；离子氧化；壁面粗糙度

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电，年，卷(期)：起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation，年，卷(期)：起始页码-终止页码.

Study on particle deposition behaviors inside a supercritical heat exchanger

Zeng Zilun, Liu Han, Zhu Zhongliang, Zhang Naiqiang, Xu Hong
(Key Laboratory of Power Station Energy Transfer conversion and System, Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Objective] Particle deposition within the tubes of supercritical boiler heat exchangers is one of the key factors affecting the unit's ability to operate across a wide range of loads. Clarifying the initial nucleation and deposition behavior of particles within the tubes is crucial for improving the stability of the unit's wide load range operation. This paper aims to conduct relevant experimental and simulation studies by using a supercritical water tube deposition test system. [Methods] The experiments monitored changes in the outer wall temperature in real-time during the process and examined samples from the experimental section after offline removal to observe the deposition behavior of particles and the microscopic morphology. By sectioning the experimental samples, the microstructure of the particle deposition layer on the inner tube wall was examined, and particle samples collected via high-pressure filters were analyzed to determine particle composition, particle size, and other characteristics. The simulations focused on the influence of particle oxidation and nucleation on the distribution of deposits. First, experimental data were used to select an appropriate turbulence model. A particle nucleation model based on classical nucleation theory was established and combined with the Euler-Lagrange method. A random walk model was incorporated to improve the accuracy of wall surface predictions. The axial deposition distribution of particles was simulated, and the effects of particle nucleation and roughness factors on the patterns of particle deposition were analyzed. [Results] The results indicate that the particles are primarily micron-sized spherical Fe_3O_4 clusters with a median cluster diameter of 5.832 μm, and the thickness of the deposition layer tends toward a dynamic equilibrium over time; A comparison of the simulation results with experimental data from multiple centers revealed that the constructed ionic oxidation nucleation model demonstrates good applicability; the influence of particle nucleation on deposition distribution is related to multiple factors, specifically: in the subcritical region, where fluid density and viscosity are high, fluid flow is the primary factor affecting particle deposition, while in the supercritical

收 稿 日 期：2026-05-28 修 回 日 期：2026-06-30 接 受 日 期：2026-07-07 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：煤炭重大专项（2025ZD1701200）
Supported by：Coal-Major Project (2025ZD1701200)
第一作者简介：曾子轮（1997），男，博士研究生，主要研究方向为电站系统安全，zengzilun01@ncepu.edu.cn。
通信作者简介：朱忠亮（1987），男，博士，副教授，主要研究方向为电站系统安全，zhzl@ncepu.edu.cn。

region, the larger the particle size and the higher the nucleation temperature, the smaller the influence of the fluid on the particles; the impact of increasing wall roughness on particle deposition exhibits self-limiting behavior; when the average wall roughness exceeds five times the particle diameter, changes in roughness have no significant impact on the particle deposition distribution; within the supercritical region, the influence of roughness on particle deposition is relatively small. [Conclusion] This study is of great significance for elucidating the initial nucleation and deposition behavior of particles within supercritical heat exchanger tubes and for improving the wide-load peaking stability of power generation units.
Key words: supercritical; wide load; particle deposition; ion oxidation; roughness

随着新能源装机占比的不断提升，火电机组的角色从提供基础电能的“压舱石”转变为提供调峰电能的“调节器”，角色的转变对火电机组的可靠性和动态经济性提出了新的要求[1]。超临界火电机组中，以 Fe^{2+}离子为主要来源形式[2]形成的含 Fe 颗粒物[3]，在超临界工况换热器的汽水侧，随流体迁徙并在重力和湍流的作用下发生沉积，导致污垢热阻增加，引起局部超温。颗粒沉积层疏松多孔，其热学性质与母材存在差异，在频繁且深度的调峰中，颗粒沉积层的稳定性进一步下降，剥离的颗粒将被流体输运至远端，导致通流面积减少，机械结构卡涩[4]等一系列问题，影响机组的可靠性与经济性[5]。因此，明确超临界水环境中离子的初期成核沉积行为，对提高超临界机组宽负荷调峰稳定性具有重要意义。

机组参数的提升对工质中离子含量提出了更高的要求，以往亚临界锅炉中存在的钙、镁、铜、硅等各项离子在超临界锅炉中显著减少。然而，不同于外源性输入的各项离子，铁离子的主要来源与流动加速腐蚀（flow accelerated corrosion，FAC）有关[2]，流动的工质通过冲刷剥离管内壁的氧化膜，同时基体也在此过程中发生持续的电化学反应释放金属离子。由于 FAC 在 150~170 ℃是反应高峰，且材料铬含量越低对 FAC 越敏感[6]。因此超临界电站工质中溶解氧较少的情况下，FAC 主要在加热器中发生，从铁基中析出的 Fe^{2+}离子随工质输运，并在超临界换热器内发生氧化反应，形成颗粒并沉积于壁面。

超临界水是一种特殊的状态，如氢键断裂，分子极性改变，自身氧化性等。超临界水中的 Fe^{2+}离子在缺氧的环境中将会发生水解和脱水反应，最终被氧化形成 Fe_3O_4 颗粒[7-9]，如式(1)—(2)。

$$Fe^{2+}+H_2O=Fe(OH)_2+2H^+ \quad (1)$$

$$3Fe(OH)_2=Fe_3O_4+H_2+H_2O \quad (2)$$

另一方面，在恒定压力下，随着温度的升高，流体的密度将迅速降低，流体进入伪沸腾状态，其对应温度为伪沸腾温度（T_{pc}）。此时，热物性参数的剧烈变化导致超临界水湍流的数学描述较为复杂。近年来大量基于雷诺平均的跨临界区湍流模拟的研究被展开[10]。董新雨等[11]模拟了超临界 CO_2 的湍流换热并与实验对照，取得了较好的吻合度。王超等[12]利用 SST *k-ω* 模型研究了超临界水跨临界流域的黏性底层厚度变化，认为在跨临界区黏性底层并非单调变化。Zeng 等人[13]利用 SST *k-ω* 模型研究了超临界水的传热恶化。Zhao 等人[14]利用 SST *k-ω* 模型研究了燃料堆芯等复杂几何结构的传热和流动问题。Mao 等人[15]对比研究了 RNG *k-ε* 模型和 SST *k-ω* 模型对超临界水湍流换热模拟的适用性，认为 SST *k-ω* 模型更加适用。

由于湍流换热的影响，流体跨越伪沸腾点并达到超临界态的过程往往发生在一个相对较为广泛的跨临界区内。在这一区域中，近壁面流体优先达到超临界态。离子将在这一区域范围内，发生氧化成核反应。此时，湍流扩散、布朗扩散、重力沉降、热泳、表面粗糙度等多种因素影响颗粒在流体中的运动与在壁面的沉积。另外，颗粒的沉积行为与颗粒自身质量有密切关系，小颗粒自身质量小，更易受外力影响，大颗粒更多由惯性决定。Tian 等人[16]利用 Fluent 软件分析了颗粒沉积行为中湍流的作用，发现湍流瞬时波动引起的颗粒湍流扩散是颗粒沉积的重要控制因素，因此模型近壁面网格处理对模拟结果影响较大，同时推荐使用离散随机游走模型（discrete random walk model，DRW）以提高精度。该模型强调颗粒与流体涡的连续作用。超临界水物性参数的剧烈变化，颗粒运动的复杂影响因素以及颗粒结晶动力学的参与，使得超临界水中颗粒沉积分布的预测变得非常不明确。

以往颗粒沉积行为的研究主要在水文、沙漠以及城市污染物控制等领域展开，能源行业对颗粒的主要关注点亦在核电机组压水堆的积垢（chalk river unidentified deposit，CRUD）。关于超临界水中的颗

粒沉积实验尚属起步阶段。Karakama 等人[17]开展了 23.7 MPa 的离子氧化沉积实验，Zhou 等人[18]针对超临界水中预制 Fe_3O_4 颗粒的沉积分布进行了研究。Zeng 等人[8]开展了超临界水中的 Fe^{2+}离子氧化沉积实验，相似的实验分析了不同材料的抗 CRUD 颗粒沉积性质[19]。然而由于超临界环境取样的困难性，上述实验研究均无法深入分析离子氧化成核反应进程对沉积分布的影响。

由于超临界水环境中的实验开展与结果获取均存在一定难度，因此这一领域的研究尚属单一学科的探索。为了研究跨临界区颗粒沉积的分布规律，本文开展了超临界水环境的 Fe^{2+}离子氧化沉积实验与模拟，实验分析了颗粒形貌与组分，以及颗粒沉积对外壁温的影响。并基于经典成核理论构建了适用于超临界水环境的离子无量纲氧化成核模型，将模拟结果与实验结果对比验证。分析了离子氧化成核以及壁面粗糙度对沉积分布规律的影响。

1 实验系统与方法

搭建了适用于超临界水环境的离子氧化成核沉积实验系统，如**错误!未找到引用源。**所示。

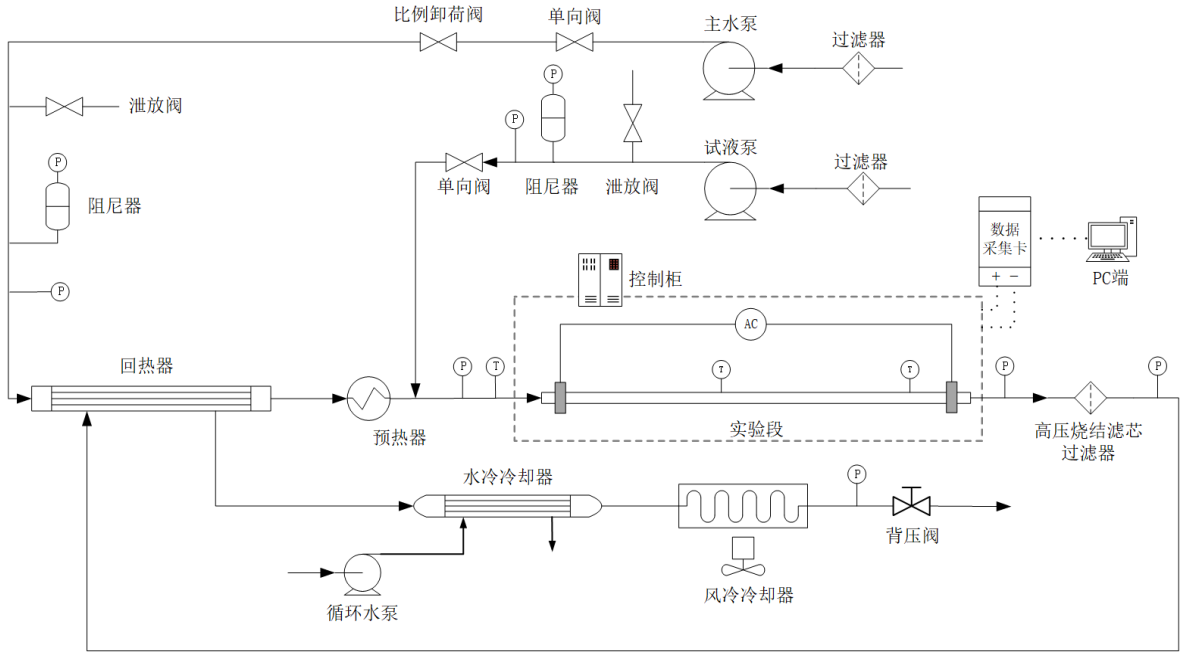


图 1 实验系统示意

Fig.1 Diagram of the Experimental System

实验开始前，启动主水泵和试液泵，25 ℃、0.1 MPa 的除氧超纯水通过高压计量泵升压，并通过单向阀、比例卸荷阀、泄放阀、阻尼器等一系列流动控制阀组和梯级安全阀组，回热器利用实验系统废热进行初步加热，再经由预热器加热至指定温度。此时主水泵流体和试液泵流体经长度 40 倍径的混合器充分混合，进入实验段。在实验段进一步加热，完成亚临界向超临界的转变。实验段入口和出口安装热电偶，以测量入口和出口温度。高温高压的超临界流体从实验段出口流向回热器，与 25 ℃的高压流体进行热量交换，在水冷冷却器和风冷冷却器的多级降温下，降低至 50 ℃以下，最终经背压阀降压排放。当实验段进出口温度稳定 15 min 后，试液泵从超纯水切换至现配的 $FeCl_2$ 标准液，混合后的离子溶液将在实验段内发生离子的氧化成核，并在湍流和重力的作用下沉积于壁面。实验段出口附近设置的高压烧结滤芯用于捕获从实验段逃逸的含铁颗粒物。实验结束后，关闭系统加热，并将试液泵从离子溶液切换回除氧超纯水，直至系统温度降低至 100 ℃以下，再自然冷却降压，至 50 ℃、0.1 MPa。实验段出入口流体温度控制通过实验段控制柜的电加热功率控制实现，压力通过背压阀控制，实验段外壁温通过数据采集卡采集。系统冷却后，以实验段轴向 350、550、750、835、1 050、1 300、1 600 mm 的位置为中心，切割长度为 50 mm 的实验样品管，并将样品管和烧结滤芯分别置于无水乙醇中超声振动 30 min，充分剥离颗粒物，烘干后用分析天平（梅特勒 MA204E）称重获取质量。并通过 X 射线衍射（XDR，布鲁克 D8 ADVANCE）与激光粒径分析（马尔文，Mastersizer 3 000）分析颗

粒组分与粒径，实验段沉积的颗粒物用于绘制轴向质量分布曲线。同时截取轴向位置 1 600 mm 的实验段样品，利用线切割方式暴露管内壁沉积层并尽可能减少机械加工中震动对颗粒沉积层的影响，通过扫描电镜（SEM）观察沉积层形貌。实验 T1 的参数见**错误!未找到引用源。**。

表 1 实验参数
Tab.1 Experimental parameters

参数	T1	T2[17]
内径 d_{in}/mm	3.05	1.75
长度 L/mm	1 650	1 800
压力 p/MPa	25	23.7
入口温度 T_{in}/℃	360	350
出口温度 T_{out}/℃	400	400
流量 G/(kg·(m²·s)⁻¹)	403	403
伪沸腾温度 T_{pc}/℃	385	380
热流密度 h/(kW·m⁻²)	213	103
离子浓度 M/(mmol·L⁻¹)	5	5
粒径中位数 d_{50}/μm	5.832	1
实验时长 t/s	2 600	2 500

2 模型与算法

2.1 几何模型

本文以实验段和相似实验[17]为基础建立几何模型，具体参数见**错误!未找到引用源。**。在模型入口段的前端加长，使流体充分发展，以避免入口效应对流体湍流和颗粒运动的影响，计算方法见式(3)。冷拔无缝管内壁面粗糙度默认 R_a=1.6，不锈钢导热系数为 16.7 W/(m•K)。

$$L^* \approx 4.4d_{in}(\mathrm{Re})^{1/6} = 4.4d_{in}\left(\frac{Gd_{in}}{\mu}\right)^{1/6} \tag{3}$$

2.2 湍流模型

利用相似条件进行的超临界水实验结果[17]验证湍流传热模型的适用性，结果如图 2 所示。

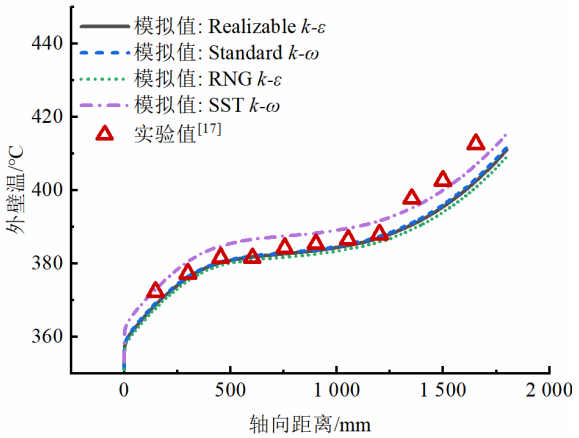


图 2 湍流模型验证
Fig.2 Turbulence model validation

由**错误!未找到引用源。**可以得出，除 SST k-ω 模型外，其他模型均表现出欠预测的情况，模拟值低于实验值，管内湍流强度的模拟结果低于实际，导致壁温偏低。SST k-ω 模型的预测值与实验结果对照较好，模型适用性较好。主要原因是 SST k-ω 模型在边界层范围和主流区采用不同的计算模型，对于描述超临界水的湍流换热具有更优异的适用性。因此后续两相流中连续相的湍流计算将以 SST k-ω 模型为基础。

2.3 颗粒氧化成核模型

目前，主要的成核理论有两种：经典成核理论和两步成核理论，其中经典成核理论以 Arrhenius 公式为基础构建。在过去的几十年中，学者们成功运用经典成核理论解释了一系列问题。

基于经典成核理论构建模型：

$$k = B\exp\left(\frac{-\Delta E^*}{k_B T}\right) \tag{4}$$

颗粒平衡临界半径R^*：

$$R^* = \frac{2\gamma}{k_B T \ln S}\nu_S \tag{5}$$

活化能ΔE^*:

$$\Delta E^* = \frac{4\pi\gamma R^{*2}}{3} \tag{6}$$

合并式(4)—(6)得：

$$k = B\exp\left(\frac{-16\pi\gamma^3\upsilon_S^2}{3k_B^3 T^3 \ln^2 S}\right) \tag{7}$$

其中，k为平均成核速度；B为指前因子；k_B为玻尔兹曼常数；γ为固液界面表面张力，N/m；ν_S为总体Fe_3O_4分子体积，由离子浓度和颗粒粒径计算获得，m³；S 为过饱和度；T 为绝对温度，K。

固液表面张力γ随着密度的变化而变化，超临界流体中的固液表面张力极低，但尚无确切数据。因此基于流体密度的变化，修正表面张力为：

$$\gamma = \gamma_0\frac{\rho^{2/3}}{\rho_{pc}^{2/3}} \tag{8}$$

其中，ρ 为流体环境密度，ρ_{pc}为伪沸腾点流体密度。γ_0为固液表面张力系数。

指前因子 B 是一个由实验测定的经验常数，式(7)的结果与之存在较大关联。因此修正式(7)为无量纲成核速率 k/B。铁离子在超临界水中饱和度尚无实验室测量数据，但可通过近临界区 Fe-H_2O 二元系统的 Pourbiax 图的理论分析，当浓度从 10^{-6} 逐步降至 10^{-10} 时，Fe^{2+}离子区出现，因此近似取 10^{-10}[20]。

根据 Arrhenius 公式，试算不同的 γ_0，得到在不同温度下离子氧化成核速率，并以此为依据在不同主流体温度的轴向位置上进行颗粒释放。此时仅考

虑颗粒沿流向的速度，颗粒的温度速度与成核位置主流体的温度速度一致。

以 T2 为例，计算γ_0=6×10^{-7} 至 9×10^{-7}，此时水的伪沸腾温度为 380 ℃。图 3 结果表明，不同工况下无量纲成核速率呈现差异化的三阶段演变规律。温度升高时，亚临界范围内成核速率小幅提升，在临界区出现快速跃升，超临界区的增长幅度明显回落。γ_0增大后，曲线整体位置下移，且在亚临界区，成核速率的变化愈发平缓，超临界区的增长态势则逐步增强。

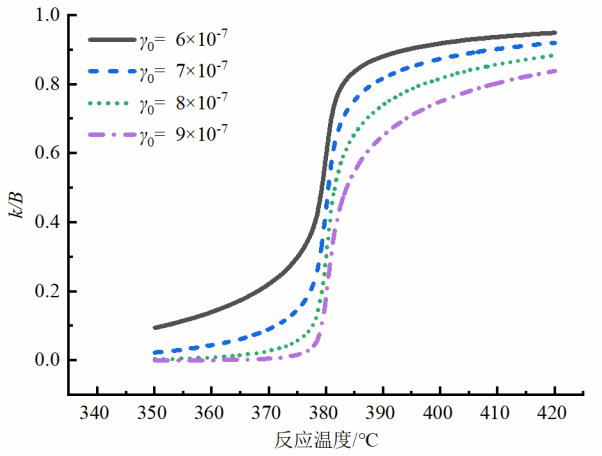


图 3 不同特征表面张力的无量纲成核速率
Fig.3 Nondimensional nucleation rate for different surface tensions

2.4 其他边界条件

颗粒在壁面的沉积行为，从微观上可以认为是颗粒在湍流与重力的作用下，与壁面发生多次碰撞，造成能量损失后，颗粒所携带的动能小于以范德华力和双电层力矢量相加为代表的黏附力的影响并从边界层逃逸所需的动能，颗粒被黏附力捕获，并最终发生沉积。颗粒与壁面的能量损耗以动能形式计算，颗粒的质量与形貌不发生改变。能量损失系数表示为：

$$e=\frac{v_{n+1}}{v_n} \tag{9}$$

考虑粒径为 d_p 的颗粒所受到的热泳力：

$$F_T=-\frac{9\pi\mu\upsilon d_p\nabla T}{2T_0}\left(\frac{k_g}{k_p+2k_g}\right) \tag{10}$$

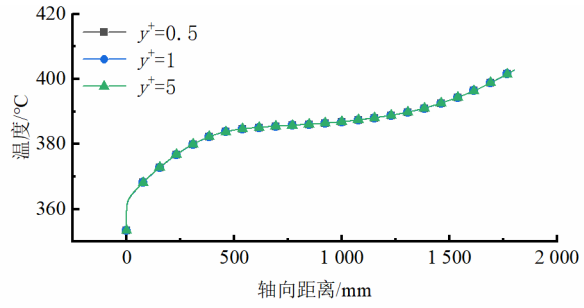
同理，考虑颗粒所受到的 Saffman 升力：

$$F_s=1.61d_p^2(\rho\mu)^{\frac{1}{2}}(v-v_p)\left|\frac{dv}{dy}\right|^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

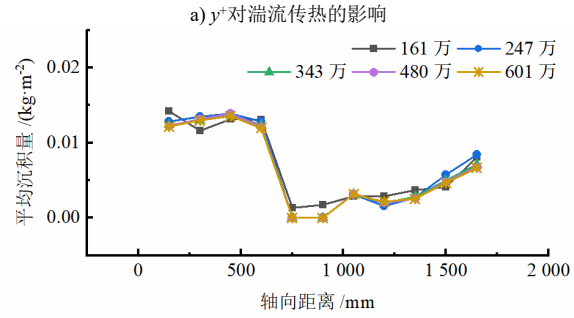
颗粒为球形，尺寸均一。Fe_3O_4 颗粒密度为 5180 kg/m^3，比热为 900 kJ/(kg·K)。忽略颗粒沉积层孔隙率差异对颗粒沉积行为的影响。考虑 DRW 模型，不考虑随机涡寿命（Random eddy lifetime），采用双向耦合计算。不考虑颗粒旋转，黏附力对颗粒的作用基于库伦摩擦力方程确定，e=0.7。

2.5 网格无关性验证

由于超临界流体在跨临界区物性参数的剧烈变化，流体模拟本身对边界层网格质量较为敏感，因此优先计算 y^+对湍流换热的影响，如图 4a)所示。由于模型的特征直径尺寸较小，重力对流体流动的影响较小，因此 y^+≤5 时，网格尺寸对湍流传热的影响不显著。另外，DPM 模型计算需保证网格尺寸大于颗粒尺寸。图 4b)所示当网格数量加密至 343 万时，网格尺寸变化对颗粒沉积分布结果影响较小。



a) y^+对湍流传热的影响



b) 网格数量对颗粒沉积分布的影响

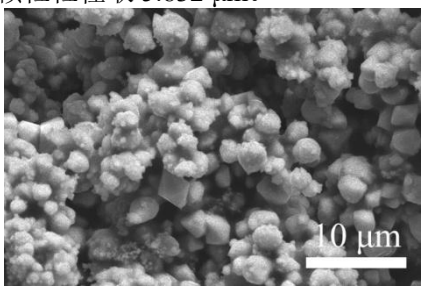
图 4 网格无关性验证
Fig.4 Verification of grid independence

3 结果与讨论

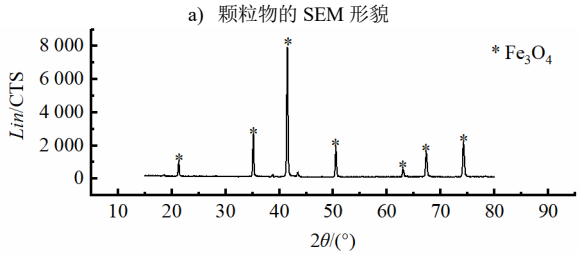
3.1 实验结果

颗粒在壁面的沉积形貌如图 5a)所示，SEM 表征发现沉积层以微米级颗粒为主，多数颗粒呈现球形结构，可见尖晶石结构颗粒。颗粒存在明显团簇特征，亚微米级小颗粒附着在微米级大颗粒表面，形成颗粒团簇。XRD 结果如图 5b)，粉末的主要峰与 Fe_3O_4 的反应峰重合，这一结果与文献[8, 17]相似。由于颗粒尺寸以微米级为主，颗粒间的团簇行为不可忽略，湍流中的运动往往以团簇颗粒为主体，单一颗粒的粒径不能代表湍流中的团簇颗粒的尺寸。图 5c)为团簇颗粒的粒径分布结果，颗粒分布主要

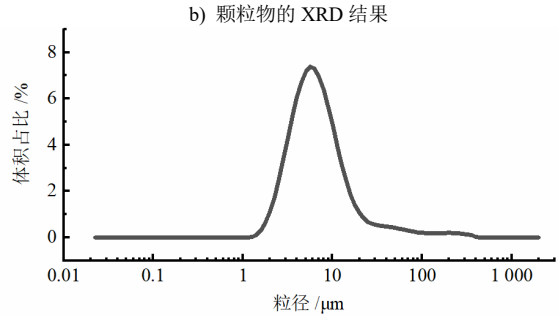
集中于 1-20 μm，粒径分布的体积分数累计至 50%时的颗粒粒径 d_{50} 为 5.832 μm，表面积平均粒径为 5.161 μm，颗粒一致性为 1.45。在 T1 实验的模型验证中，颗粒粒径取 5.832 μm。



a) 颗粒物的 SEM 形貌



b) 颗粒物的 XRD 结果



c) Fe_3O_4 颗粒的粒径分布

图 5 颗粒物的形貌，组分和粒径分析
Fig.5 Morphology, composition, and particle size of the particulate matters

实验过程中，实验段轴向位置 760、1 540 mm 处的外壁面温度变化，如图 6 所示。

当外壁面温度稳定 900 s 后，试液泵从除氧超纯水切换为现配的离子标准液，实验开始。由于实验段为恒功加热，实验段主流体温度恒定。随着离子盐的注入，Fe^{2+}离子迅速被超临界水氧化，并逐渐成核形成 Fe_3O_4 颗粒沉积于壁面。随着颗粒沉积层的增厚，管内壁的污垢热阻不断增加。流体与壁面的传热系数下降，热势差增加，外壁面温度上升。此时，流体对于颗粒的剪切力增加，当颗粒所受到的来自于流体的剪切力大于颗粒间相互作用的黏附力时，颗粒团簇表现出再悬浮行为，沉积层减薄。内壁污垢热阻减小，流体与壁面的换热增加，外壁面温度下降。再悬浮的颗粒随流体输运，并在湍流和重力的作用下，再次沉积于壁面。随着实验的进行，颗粒在壁面的沉积与再悬浮行为将最终动态平衡，外壁温将逐渐趋近于恒定。由于颗粒与壁面的黏附力始终大于颗粒间的黏附力，因此初期沉积于壁面的颗粒层将较为稳固，外壁面温度下降有限，仍高于实验前温度。

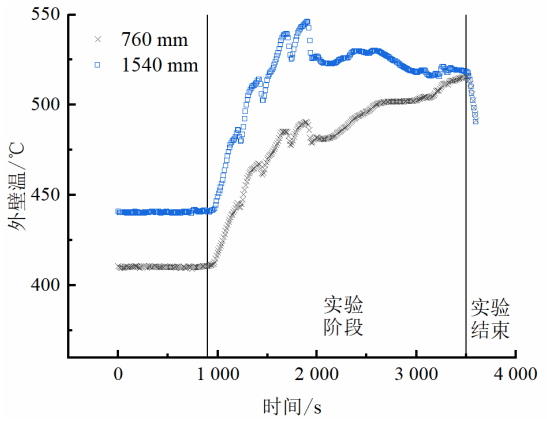
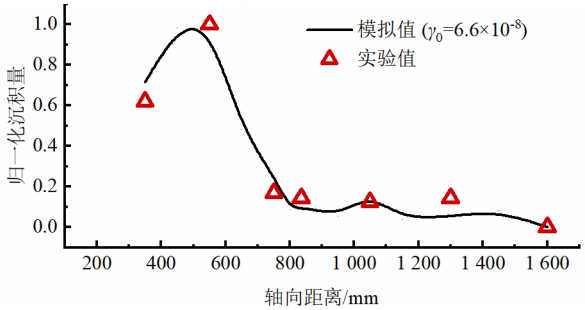


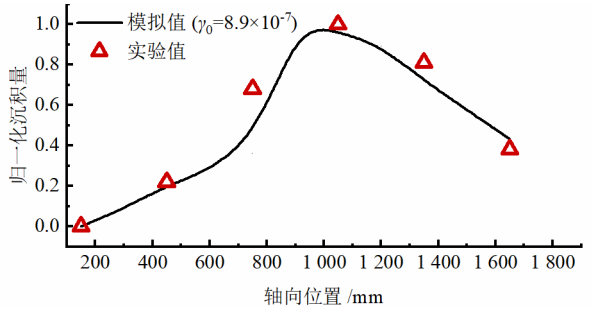
图 6 外壁温随时间的变化
Fig.6 Outer wall temperature over time

3.2 模型验证

超临界水中热物性参数剧烈变化，同时伴随着离子氧化的化学反应，边界条件复杂且非线性，为验证模型设置的合理性，需对比模拟结果和实验的差异。T1 实验结果为沉积质量(mg)，颗粒粒径根据实验结果选择 5.832 μm，T2 多中心实验为 Karakama 等人[17]开展的实验，其报告的实验结果为归一化厚度[17]，颗粒粒径为 1 μm，因此将模拟结果与实验数据进行归一化后对比分析，如图 7 所示。在 T1 和 T2 的模拟中，γ_0分别为 6.6×10^{-8} 和 8.9×10^{-7}。除个别实验的离散点外，模拟结果均表现出与实验结果较好的拟合度，表明模型具有一定的普适性。



a) T1 实验与模拟结果的对比



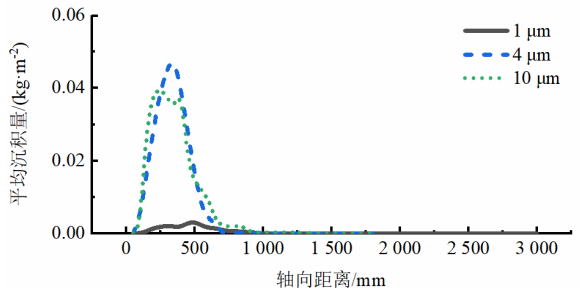
b) T2 实验与模拟结果的对比

图 7 实验与模拟结果对比

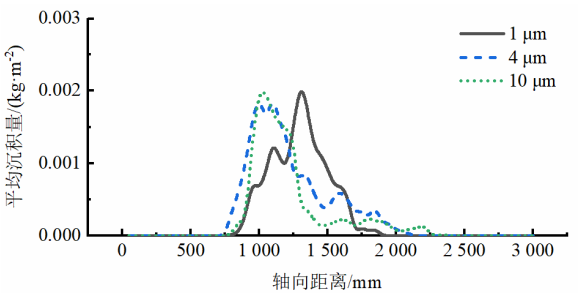
Fig.7 Comparison between the experimental and simulation results

3.3 离子氧化成核对沉积分布的影响

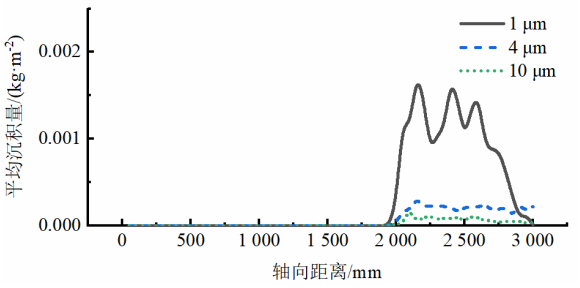
离子氧化成核对颗粒的沉积分布的影响可以分为 2 个部分：粒径与成核温度。直径较小的颗粒，质量较小，在相同温度的主流体中成核时所携带的初始内能较小。同时，颗粒尺寸还通过影响外力作用间接影响颗粒沉积分布。成核温度是另一个影响因素，相同尺寸的颗粒，在不同位置的主流体中成核，拥有不同的初始温度和速度。不同的成核温度还决定了后续的流体状态对颗粒的累积影响。主流体温度越高，离子氧化成核温度越高，流体湍动能更强，但流体黏度、密度的降低，导致流体对颗粒的影响下降。不同汽水和离子化学条件对颗粒粒径均存在影响，因此通过分别模拟大中小粒径颗粒(1、4、10 μm) 在不同特征成核温度（350、380、400 ℃）下的沉积分布，分析离子氧化成核对沉积分布的影响，结果如**错误!未找到引用源。**所示。其中平均沉积量是指在颗粒在单位面积上的平均沉积质量。



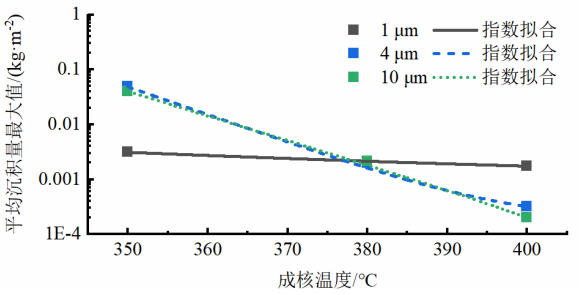
a) 350 ℃成核的不同粒径颗粒的沉积分布



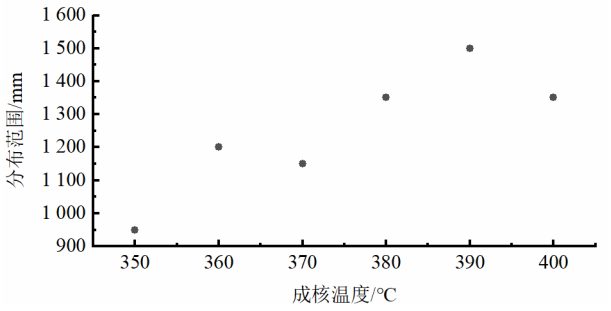
b) 380 ℃成核的不同粒径颗粒的沉积分布



c) 400 ℃成核的不同粒径颗粒的沉积分布



d) 不同粒径颗粒的平均沉积量最大值与成核温度的关系



e) 不同成核温度对颗粒沉积分布范围的影响（4 μm 颗粒）

图 8 颗粒成核对沉积分布的影响

Fig.8 Effect of particle size on deposition distribution

错误!未找到引用源。a)中在亚临界成核的颗粒，其分布曲线相较**错误!未找到引用源。**b)和 c)更为平顺，4 μm 和 10 μm 颗粒的集中分布区位置相近，与 1 μm 颗粒存在一定差异，但颗粒分布范围差异不显著。此时，流体密度较高，黏度较大，流体流动是影响颗粒分布的主要控制因素。**错误!未找到引用源。**b)、c)中，颗粒的分布曲线差异进一步扩大，且颗粒分布范围差异开始显著。在跨临界与超

临界流域运动的颗粒，随着粒径的增大，颗粒沉积分布的范围增大。随着颗粒粒径增大，颗粒的惯性作用逐渐占据主导，外力难以改变其运动状态，轨迹稳定性提升，最终沉积范围更大。此时，粒径通过改变质量成为影响颗粒沉积分布的主要控制因素。

平均沉积量最大值是反应颗粒沉积分布集中度的一个指标，最大值越大，颗粒沉积越集中。由**错误!未找到引用源。**d)可知，不同粒径的颗粒沉积分布均表现出沉积分布的最大值与成核温度成指数关系。温度升高，沉积最大值降低，颗粒沉积分布集中度下降，颗粒沉积趋向于分散。随着流体温度升高，流体速度逐渐增加，刚成核的颗粒的速度与主流体速度一致，颗粒的初始动能增加，颗粒对抗重力、湍流等的耦合扰动的能力提升，颗粒曲线越平直，越难沉积于壁面。当颗粒粒径为 1 μm 时，此时重力效应对颗粒行为的影响不显著，颗粒运动主要受流体影响，颗粒在较大的范围内沉积，沉积分布集中度较低，对成核温度的变化不敏感。同时，**错误!未找到引用源。**d)的曲线在伪沸腾温度位置存在重合，说明在伪沸腾前与伪沸腾后影响颗粒沉积分布的主要控制因素发生改变。在超临界区，粒径通过影响质量成为主要控制因素；在亚临界区，流体流动是影响颗粒沉积分布的关键控制因素。**错误!未找到引用源。**e)反映了 4 μm 颗粒在不同主流温度成核时，对应的颗粒沉积分布范围。图中可以明显的看出随着成核温度的升高，颗粒的沉积分布范围越广，未观察到明显的随着流体状态的不同，而出现的分布范围剧烈变化的现象。这说明，成核温度增加所引起的颗粒的初始内能增加对沉积分布的影响近似于线性。

3.4 壁面粗糙度对沉积分布的影响

除了颗粒自身因素对于沉积分布的影响，流场是影响沉积分布的又一重要因素。目前，对于流速、热流密度等已有一定的研究[21]，但对于壁面粗糙度的研究较少。壁面粗糙度是影响颗粒在边界层内运动的关键因素之一，小粒径颗粒的运动更多受到近壁面湍流扩散作用的支配，流体近壁面效应对小颗粒与壁面的相互作用的影响较大。为了更好的分析壁面粗糙度对颗粒行为的影响，避免流体湍流扰动对沉积分布的耦合影响，本文在不同的流体状态下，模拟大粒径颗粒（10 μm）在粗糙度变化时的沉积分布差异。

图 9a)结果显示，在粗糙度 R_a 依次为 3.2 μm 和 6.3 μm 的边界条件下，250~750 mm 范围均出现局部沉积高峰，且粗糙度越大，集中沉积行为越不显著。同时结合图 9b)和 c)中 R_a=3.2 的沉积分布结果，不同温度成核的颗粒沉积分布也有一定差异。颗粒的初始参数，决定了粗糙度对沉积行为的作用强度，越高温度成核的颗粒，初始动能越高，使其更易抵抗范德华力和双电层力作用，穿梭于主流区和边界层之间，局部沉积高峰随之消退，整体沉积量同步减少。由图 9d)可知，颗粒的平均沉积量随着壁面粗糙度 R_a 的增大而减小，这是由于随着粗糙度的增大，流体更容易在凹凸不平的粗糙壁面上形成局部的涡旋，进一步削弱了颗粒与壁面的有效接触，导致净平均沉积量随着粗糙度的增大而降低。当粗糙度 R_a 达到粒径的 5 倍以上时，部分壁面实际的起伏结构相对颗粒而言较大，粗糙凹谷的进一步扩大对颗粒与壁面相互作用的影响较小，粗糙度对沉积分布的影响趋于饱和，表现出自限性。同时，成核温度越高，粗糙度的影响越弱，在超临界流场中，流体的密度和黏性显著降低，流体对颗粒的拖曳作用减弱，壁面粗糙结构诱导的湍流脉动对颗粒的影响不显著，壁面粗糙度不是影响颗粒沉积的关键因素。

4 结论

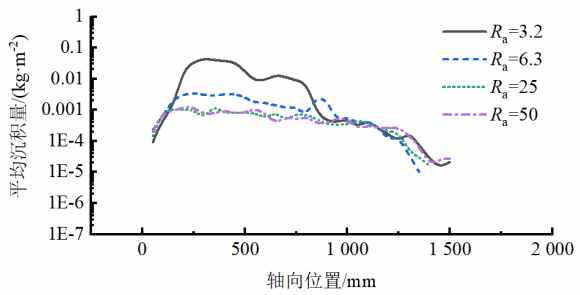
本文通过实验和模拟方法研究了超临界水中颗粒的沉积分布行为。实验提供了颗粒形态、组分以及沉积分布信息，利用欧拉-拉格朗日方法结合经典成核理论对相关物理和化学模型进行建模，分析了离子氧化成核以及壁面粗糙度对颗粒沉积分布的影响。具体结论如下：

1）亚铁离子在超临界水环境中主要形成微米级的球形 Fe_3O_4 颗粒，颗粒存在团簇行为，团簇粒径中位数为 5.832 μm。随着颗粒的沉积，沉积层的厚度将最终趋于稳定。

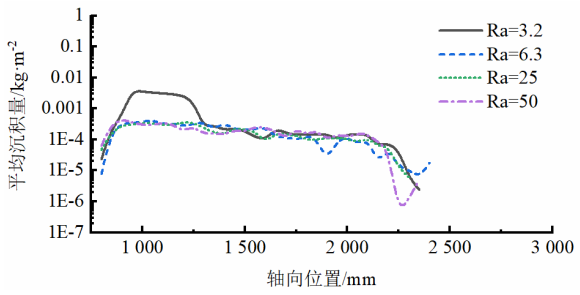
2）基于经典成核理论构建的超临界水离子氧化成核模型在模拟超临界流体的含 Fe 颗粒沉积分布中具有一定的多中心适用性。

3）离子氧化成核对沉积分布的影响与粒径和成核温度均有关，亚临界区，流体流动是影响颗粒行为的关键控制因素；超临界区，粒径越大成核温度越高，流体对颗粒行为的影响越小。

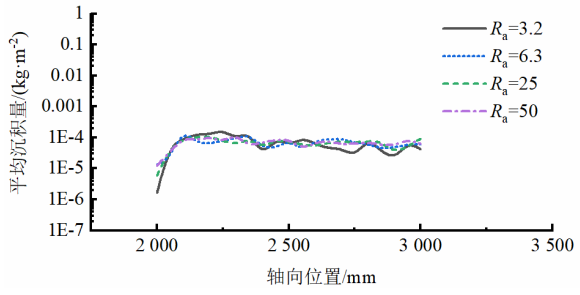
4）粗糙度 R_a 的增长对颗粒沉积分布的影响具有自限性，当 R_a 大于 5 倍粒径时，壁面粗糙度对颗粒沉积分布的影响不明显。在超临界态下，壁面粗糙度不是影响颗粒沉积的主要控制因素。



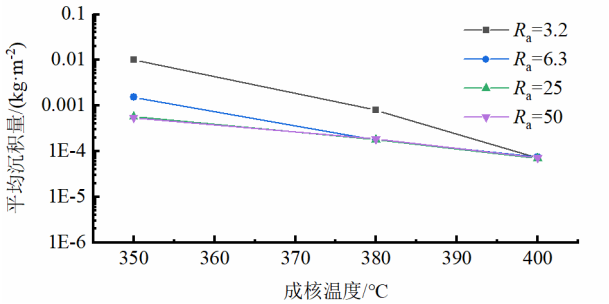
a) 壁面粗糙度对 350 ℃成核颗粒沉积分布的影响



b) 壁面粗糙度对 380 ℃成核颗粒沉积分布的影响



c) 壁面粗糙度对 400 ℃成核颗粒沉积分布的影响



d) 壁面粗糙度与成核颗粒的关系

图 9 壁面粗糙度对颗粒沉积分布的影响

Fig.9 Effect of wall surface roughness on the deposition distribution

[参 考 文 献]

[1] 周天羽, 张一农, 徐钢, 等. 考虑调峰辅助服务收益的耦合储热罐热电联产机组运行调度研究[J]. 热力发电, 2025, 54(5): 92.
Zhou T Y, Zhang Y N, Xu G, et al. Research on operation scheduling of cogeneration units coupled with heat storage tank considering peak shaving ancillary service income[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(5): 92.

[2] Wang C, Li H, Khan H I, et al. Deposition of iron oxides in supercritical water reactor: a review[J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2021, 31(6): 2262.

[3] Wang C, Li H, Chen C, et al. Modeling and analysis of iron mass transfer behaviors in supercritical boiler steam-water system[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2021, 143(8): 1.

[4] 肖卓楠, 宋其珉, 郭玮, 等. 超临界机组孔板下游FAC传质过程动力学分析[J]. 动力工程学报, 2025, 45(3): 347.
Xiao Z N, Song Q M, Guo W, et al. Kinetic study on mass transfer process with flow-accelerated corrosion downstream of orifice plates in supercritical units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(3): 347.

[5] 闫爱军, 乔越, 陈志, 等. 超临界电站锅炉末级过热器管屏汽固两相流动特性数值模拟研究[J]. 动力工程学报, 2025, 45(8): 1153.
Yan A J, Qiao Y, Chen Z, et al. Numerical simulation study on steam-particle two-phase flow characteristics of the final stage superheater tube screen in supercritical power plant boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(8): 1153.

[6] Jiang D, Xu H, Deng B, et al. Effect of oxygenated treatment on corrosion of the whole steam–water system in supercritical power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 1248.

[7] 曾子轮, 王超, 李鸿源, 等. 超临界受热面水侧颗粒沉积的数值模拟研究[J]. 动力工程学报, 2022, 42(9): 806.
Zeng Z L, Wang C, Li H Y, et al. Numerical simulation of particle deposition on supercritical heating surface[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(9): 806.

[8] Zeng Z, Li Y, Li H, et al. Experimental study on particle deposition of Fe_3O_4 in supercritical heat exchange tube[J]. Powder Technology, 2024, 433: 119198.

[9] Adschiri T, Kanazawa K, Arai K. Rapid and continuous hydrothermal crystallization of metal oxide particles in supercritical water[J]. Journal of the American Ceramic

Society, 1992, 75(4): 1019.
[10] 高思雨, 郝小红, 张森, 等. 垂直螺旋管内超临界 CO_2 传热特性的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(2): 475.
Gao S Y, Hao X H, Zhang S, et al. Numerical study of supercritical carbon dioxide heat transfer characteristics in a vertical spiral tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(2): 475.
[11] 董新宇, 张宇轩, 刘璐, 等. 加热条件下倾斜管中超临界 CO_2 流动与传热特性数值模拟[J]. 动力工程学报, 2024, 44(10): 1503.
Dong X Y, Zhang Y X, Liu L, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics of supercritical CO_2 in inclined tube under heating condition[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(10): 1503.
[12] 王超, 陈灿, 李鸿源, 等. 跨临界水湍流黏性底层数值模拟与分析[J]. 动力工程学报, 2021, 41(1): 51.
Wang C, Chen C, Li H Y, et al. Numerical simulation and analysis on viscous bottom layer of turbulent transcritical water flows[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(1): 51.
[13] Zeng Z, Wang C, Li Y, et al. Numerical investigation of heat transfer deterioration and the variation of Prandtl number in the main flow area under supercritical conditions[J]. Numerical Heat Transfer, Part a: Applications, 2022, 82(7): 389.
[14] Zhao P, Liu J, Ge Z, et al. CFD analysis of transverse flow in a wire-wrapped hexagonal seven-pin bundle[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 317: 146.
[15] Mao S, Zhou T, Wei D, et al. Numerical modeling on heat transfer of supercritical water in cooled horizontal circular tube[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2022, 191: 105769.
[16] Tian L, Ahmadi G. Particle deposition in turbulent duct flows—comparisons of different model predictions[J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38(4): 377.
[17] Karakama K, Rogak S N, Alfantazi A. Characterization of the deposition and transport of magnetite particles in supercritical water[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2012, 71: 11.
[18] Tao Z, Chen N, Hu C, et al. Experimental study on fine particle deposition in supercritical water natural circulation[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 141: 103981.
[19] Zeng Z, Liu H, Guo Z, et al. CRUD deposition behavior in supercritical water: investigation on the effect of materials and Fe/Ni ratios[J]. Journal of Nuclear Materials, 2026, 631: 156779.
[20] Cook W G, Olive R P. Pourbaix diagrams for the iron–water system extended to high-subcritical and low-supercritical conditions[J]. Corrosion Science, 2012, 55: 326.
[21] 肖卓楠, 卞博, 杨杰, 等. 超临界机组跨临界区域 Fe 系沉积动力学过程研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(7): 1010.
Xiao Z N, Bian B, Yang J, et al. Study on dynamics of Fe sedimentation in transcritical region of supercritical units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(7): 1010.

（责任编辑 XXX）