

## 窄矩形通道污垢沉积数值仿真

谭佳琦, 刘达霖, 刘晓晶

### Numerical Simulation of Fouling Deposition in Narrow Rectangular Channel

Tan Jiaqi, Liu Dalin, and Liu Xiaojing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.05.0076>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 矩形窄缝通道底部再淹没实验研究

Experimental Study of Bottom Reflooding in a Narrow Rectangular Channel

核动力工程. 2021, 42(6): 17–23

#### 窄矩形通道两相流动实验回路设计研究

Study and Design of Two-Phase Flow Experiment Loop in a Rectangular Mini-Channel

核动力工程. 2019, 40(6): 35–39

#### 竖直矩形窄缝通道内过冷沸腾传热特性的实验研究

Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Subcooled Flow Boiling in a Narrow Vertical Rectangular Channel

核动力工程. 2021, 42(1): 35–41

#### 垂直向上窄间隙矩形通道内单相流动特性实验研究

Experimental Study of Single-Phase Flow Characteristics in a Narrow Rectangular Channel with Vertical upward Flow

核动力工程. 2021, 42(2): 88–92

#### 矩形窄通道内气泡行为的图像自动识别与分析

Automatic Image Recognition and Analysis of Bubble Behavior in Rectangular Narrow Channel

核动力工程. 2020, 41(2): 6–10

#### 窄缝通道内过冷条件下单蒸汽泡尾流特性实验研究

Experimental Study on Wake of Single Vapor Bubble under Subcooling Condition in a Narrow Channel

核动力工程. 2020, 41(4): 76–78



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)05-0076-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.05.0076

# 窄矩形通道污垢沉积数值仿真

谭佳琦, 刘达霖, 刘晓晶

上海交通大学核科学与工程学院, 上海, 200240

**摘要:** 为研究窄矩形通道内  $\text{CaSO}_4$  溶液由于析晶沉积产生的污垢及对换热的影响, 本研究基于合理的污垢沉积、污垢剥蚀与污垢热阻模型, 利用 FLUENT 软件结合用户自定义函数 (UDF) 对一定热流密度、入口流速、入口温度和流体浓度的流体进行了析晶沉积模拟计算。研究结果表明了此工质的污垢产生情况和对换热的影响, 同时得到热流密度、入口流速和流体浓度 3 种影响因素对污垢沉积的影响: 污垢热阻随热流密度增大而增大, 随入口流速增大而减小, 随流体浓度增大而增大。本研究可用于模拟板状燃料元件窄矩形通道由于析晶导致的污垢沉积过程。

**关键词:** 窄矩形通道; 析晶沉积; FLUENT; 污垢沉积; 污垢剥蚀; 污垢热阻

**中图分类号:** TL334 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation of Fouling Deposition in Narrow Rectangular Channel

Tan Jiaqi, Liu Dalin, Liu Xiaojing

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

**Abstract:** In order to study the fouling caused by the crystallization deposition of  $\text{CaSO}_4$  solution in the narrow rectangular channel and its effect on heat transfer, based on the reasonable fouling deposition, fouling erosion and fouling thermal resistance models, the crystallization deposition simulation calculation of fluids with certain heat flux, inlet velocity, inlet temperature and fluid concentration is carried out by using FLUENT software and user-defined function (UDF). The research results show the fouling generation of this working medium and its influence on heat transfer, and the influence of three factors, namely heat flux, inlet velocity and fluid concentration, on fouling deposition is obtained: the fouling resistance increases with the increase of heat flux, decreases with the increase of inlet velocity, and increases with the increase of fluid concentration. This study can be used to simulate the fouling deposition process in the narrow rectangular channel of plate-shaped fuel elements due to crystallization.

**Key words:** Narrow rectangular channel, Crystallization deposition, FLUENT, Fouling deposition, Fouling erosion, Fouling resistance

## 0 引言

反应堆堆芯燃料元件表面的结垢现象会导致换热效率下降, 腐蚀堆内元件, 造成巨大经济损失。在核电厂发生大破口失水事故时, 经过一系列堆芯冷却系统动作后, 最终进入长期冷却阶段。

由于冷却时间长、冷却水质变差, 且  $\text{CaSO}_4$  具有负溶解度特性, 冷却水中的钙离子和硫酸根离子在燃料棒表面可能由于过饱和结合析出产生析晶沉淀, 导致污垢沉积现象。此外, 在此事故工况下, 由于管道破裂、高能喷射等原因, 堆芯污垢

收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金 (11922505)

作者简介: 谭佳琦 (1997—), 女, 硕士研究生, 现主要从事反应堆热工水力分析工作, E-mail: tanjiaqi@sjtu.edu.cn

产生的碎片喷射出堆芯还将造成安全隐患。研究堆芯燃料元件的表面结垢现象，对于反应堆的换热效率以及反应堆安全性的提升具有重要意义。近年来，张兹瑜等<sup>[1]</sup>用实验研究了高温高压水环境中锆合金燃料包壳的污垢沉积行为，并在试验结束后利用扫描电镜（SEM）、透射电镜（TEM）、二次离子质谱仪（SIMS）等对污垢表面及截面形貌进行分析。薛超超等<sup>[2]</sup>利用自行研发的模拟压水堆核电站一回路高温高压水污垢沉积试验装置，研究了锆合金燃料包壳表面的污垢沉积行为。谭智雄等<sup>[3]</sup>针对百万千瓦级压水堆安全壳地坑滤网堵塞时，燃料包壳表面的污垢沉积现象建立包壳外流体通道一维流动与传热的微分方程，采用显示差分格式求解得到流场参数和包壳温度随时间变化，同时用计算流体动力学（CFD）方法计算通道内的流动与传热，验证计算模型和算法。文强等<sup>[4]</sup>对传热管结垢机理进行研究，建立了钠冷快堆直流式蒸汽发生器传热管结垢模型，并用 Fortran 语言编写了传热管结垢模拟程序。但当前缺乏板状燃料元件窄矩形通道由于析晶沉积导致污垢沉积的研究。

本研究利用 FLUENT 软件结合用户自定义函数（UDF）对窄矩形通道析晶污垢的沉积情况进行了数值模拟，并探究其沉积的影响因素。

## 1 物理模型

本文的研究对象是尺寸为 2 mm×60 mm×600 mm 的窄矩形通道，流体从一侧流入，另一侧流出，侧壁面进行单侧壁面加热。在 MESH 软件中对二维几何模型进行网格划分，共 61 万网格，对壁面进行近壁面网格加密处理。含有过饱和 CaSO<sub>4</sub> 的水溶液从入口处流入，从出口处流出，同时对加热侧壁面进行定热流密度加热，由于 CaSO<sub>4</sub> 具有负溶解度的特性，在壁面加热过程中，由于过饱和 CaSO<sub>4</sub> 会在壁面上析出并产生沉积。

## 2 数学模型

CaSO<sub>4</sub> 的析晶沉积是一个沉积作用与剥蚀作用共同作用的结果。随着时间的推移，最终沉积作用与剥蚀作用将达到一个动态平衡的过程，即污垢的渐进阶段。污垢沉积模型、污垢剥蚀模型、污垢热阻模型将在下文中进行描述。

### 2.1 污垢沉积模型

污垢沉积模型可以用以下数学公式进行描述和推导：

$$\dot{m}_d = \beta(c_f - c_i) \quad (1)$$

$$\dot{m}_d = k_r(c_f - c_s)^2 \quad (2)$$

式中， $\dot{m}_d$  为沉积率； $\beta$  为对流传质系数； $c_f$  为热边界层浓度； $c_i$  为主流浓度； $k_r$  为表面反应速率常数； $c_s$  为饱和浓度。以上各物理量均采用国际标准单位，详细计算及表达式见文献 [5-7]。

将上述 2 个公式进行联立求解，可得到用于编写 UDF 和计算的污垢沉积率计算式为：

$$\dot{m}_d = \beta \left\{ \frac{1}{2} \frac{\beta}{k_r} + \Delta c - \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{\beta}{k_r} \right)^2 + \frac{\beta}{k_r} \Delta c \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3)$$

式中， $k_r$  为表面反应速率常数； $\Delta c$  为流体浓度和饱和浓度的浓度差。以上各物理量均采用国际标准单位，详细计算及表达式见文献 [8]。

### 2.2 污垢剥蚀模型

用下式对污垢剥蚀的过程进行描述和计算：

$$\dot{m}_t = \frac{K}{P} \rho_f (1 + \delta \Delta T) d_p (\rho^2 \eta g)^{\frac{1}{2}} x_f w^2 \quad (4)$$

式中， $\dot{m}_t$  为剥蚀率； $K$  为垢层中缺点数目的表征参数； $P$  为晶体间粘附力； $\rho_f$  为污垢密度； $(1 + \delta \Delta T)$  为垢层内热应力； $\delta$  为线性膨胀系数； $\Delta T$  为垢层内温度差； $d_p$  为析出晶粒半径； $\eta$  为流体动力粘度系数； $x_f$  为垢层厚度； $w$  为流体速度； $\rho$  为流体密度。以上各物理量均采用国际标准单位，详细计算及表达式见文献 [9-10]。

### 2.3 污垢热阻模型

某时刻单位面积的污垢总沉积量（ $m$ ）为：

$$m = m_i + \dot{m}_d \Delta t = m_i + (\dot{m}_d - \dot{m}_t) \Delta t \quad (5)$$

式中， $m_i$  为  $t$  时刻的污垢沉积质量； $\Delta t$  为沉积量为  $m$  的上一时刻到这一时刻的时间间隔。

由此，该时刻该位置的污垢厚度计算式为：

$$x_f = m / \rho_f \quad (6)$$

以上各物理量均采用国际标准单位，详细计算及表达式见文献 [11]。

则该时刻该位置的污垢热阻的计算式为：

$$R_f = x_f / \lambda_f \quad (7)$$

式中， $R_f$  为污垢热阻； $\lambda_f$  为垢层导热系数。以上各物理量均采用国际标准单位，详细计算及其表达式见文献 [12]。

### 3 计算设置

本研究用 FLUENT 软件通过接入 UDF 实现对污垢沉积的计算, 选用编译型 UDF 进行编写。通过在 UDF 中编写污垢沉积、污垢剥蚀、污垢热阻和污垢厚度模型, 并用用户定义内存 (UDM) 定义所需储存及计算的相关参量, 在 UDF 中对入口温度、热流密度及入口速度进行定义与修正, 最终将 UDF 接入 FLUENT 软件实现污垢沉积的相关计算。将最初入口速度带入 FLUENT 软件进行迭代计算, 得到速度场和温度场, 将所需参量调入设定好的 UDM 中进行运算, 得到沉积率、剥蚀率, 进而计算得到净沉积率和污垢热阻, 在计算时间未达设定时长情况下, 根据污垢生长进行入口速度修正, 修正后的入口速度作为新一轮计算的入口速度, 输入 FLUENT 软件进行计算, 直至达到设计污垢沉积时间, 运算停止。

湍流模型采用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型, 对壁面作标准壁面函数处理。由于析晶沉积是一个比较缓慢的过程, 每种工况均按照 340 h 进行计算。

以热流密度 ( $q$ ) 为  $46 \text{ kW/m}^2$ 、入口温度 ( $T_m$ ) 为  $315 \text{ K}$ 、入口流速 ( $w_m$ ) 为  $0.03 \text{ m/s}$ 、流体浓度 ( $c_m$ ) 为  $2.42 \text{ kg/m}^3$  的计算条件为基础工况, 为研究  $q$ 、 $w_m$  和  $c_m$  对  $\text{CaSO}_4$  污垢沉积的影响, 共设计 7 个计算工况 (表 1)。

表 1 计算工况表

Tab. 1 Calculation Condition Table

工况编号	$q/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$	$T_m/\text{K}$	$w_m/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$c_m/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
1	46	315	0.03	2.42
2	42	315	0.03	2.42
3	50	315	0.03	2.42
4	46	315	0.05	2.42
5	46	315	0.07	2.42
6	46	315	0.03	2.22
7	46	315	0.03	2.62

## 4 污垢沉积计算结果

### 4.1 基础工况计算结果

对基础工况进行仿真计算, 得到如下结果:

(1) 垢层厚度不会随时间无限制地增长。垢层厚度随时间增长, 在一定时长 (基础工况下大

约 150 h) 后, 垢层厚度基本不再随时间变化, 即达到一个渐近的状态。

(2) 污垢热阻的增长存在一个渐近的过程, 随时间推移污垢热阻在未到达渐近状态前一直以一个逐渐变缓的速度在增长, 达到渐进状态后, 污垢热阻达到一个稳定的状态, 对传热的影响也达到一个稳定的状态, 不会无限制地增长。

(3) 污垢沉积率变化随时间推移是一个先增长而后缓缓变慢的过程。流速的增加可能使流体对流传质增加, 而壁面温度的改变则通过影响  $\text{CaSO}_4$  在垢层附近的过饱和度从而影响该处浓度差。这两种因素的共同作用使沉积率呈现如上文描述的变化规律。而污垢剥蚀率则随着时间推移在一段时间内不断增长, 这是由于污垢生长使得流道不断变窄, 流速增大, 则由于对流传质、剪切应力增大, 垢层表面的流体对污垢的剥蚀作用增强。另一方面污垢生长导致垢层内部热应力加剧, 加剧污垢剥蚀。同时也正是由于污垢沉积率和剥蚀率具有截然相反的变化趋势, 污垢生长才能在模拟计算进行足够长时间后达到一种渐近的动态平衡和稳定的状态。

### 4.2 热流密度对污垢沉积的影响

在基础工况的基础上, 为研究热流密度对污垢沉积影响, 另设置 2 组热流密度分别为  $42 \text{ kW/m}^2$  和  $50 \text{ kW/m}^2$  的工况进行计算, 根据这 3 组工况计算结果分析热流密度对污垢沉积的影响规律。

由图 1 可知, 随着热流密度的增大, 污垢热阻也随之增大, 但在一定时间 (大约 100 h) 后, 污垢热阻随时间的变化不再因热流密度呈现明显差异。由图 2 可知, 随热流密度增加, 污垢的剥蚀率呈现明显变化。这是因为热流密度增加使得垢层内热应力增大, 同时垢层厚度的增加也影响污垢剥蚀。故呈现上述剥蚀率随热流密度增大而增大的情况。由图 3 可以直观得到垢层厚度随热流密度变化规律: 垢层厚度随热流密度增加而增加, 但在渐近状态下差异值减小并趋于一致。

### 4.3 入口流速对污垢沉积的影响

在基础工况的基础上, 为研究入口流速对污垢沉积影响, 另设置 2 组入口流速分别为  $0.05 \text{ m/s}$  和  $0.07 \text{ m/s}$  的工况进行计算, 由这 3 组工况计算结果得到入口流速对污垢沉积的影响规律。

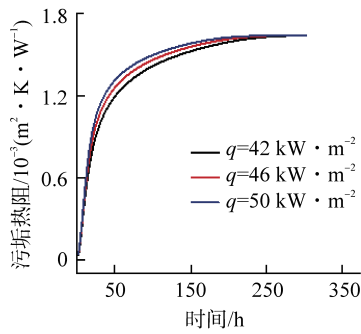


图 1 3 种不同热流密度下的污垢热阻  
Fig. 1 Fouling Thermal Resistance under Three Different Heat Fluxes

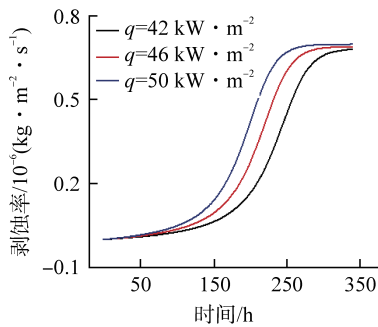


图 2 3 种不同热流密度下的污垢剥蚀率  
Fig. 2 Fouling Erosion Rate under Three Different Heat Fluxes

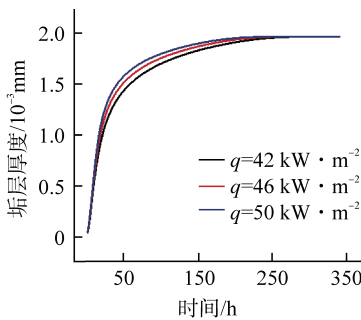


图 3 3 种不同热流密度下的垢层厚度  
Fig. 3 Fouling Thickness under Three Different Heat Fluxes

由图 4 可知，入口流速越大，污垢热阻值越小，且入口流速越大，污垢热阻值随时间减小的速度越快。由图 5 可知，流速越大，污垢沉积率越低。这是由于随入口流速增大，污垢表面对流换热的效果增强，导致污垢层表面温度降低，导致其附近流体浓度与饱和浓度差降低，降低了结垢动力，从而导致沉积率降低。由图 6 可知，随流速增加，污垢剥蚀率降低。污垢剥蚀是入口流速（改变流体对污垢层的冲刷作用）与垢层厚度

（析晶污垢自身性质与垢层内热应力）共同作用的结果，这两种因素共同作用导致垢层剥蚀率随入口流速增大而降低。由图 7 可得到垢层厚度随入口流速的变化规律：随入口流速增大，污垢厚度减小，且污垢的渐近厚度也随流速增大而减小。

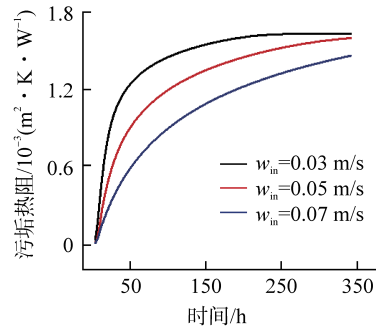


图 4 3 种不同入口流速下的污垢热阻  
Fig. 4 Fouling Thermal Resistance at Three Different Inlet Velocities

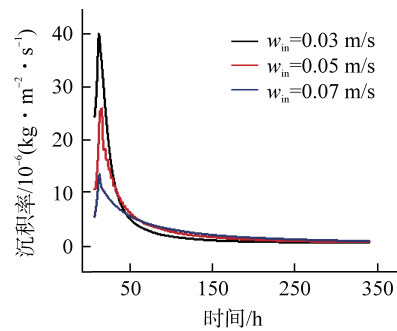


图 5 3 种不同入口流速下的污垢沉积率计算结果  
Fig. 5 Calculation Results of Fouling Deposition Rate at Three Different Inlet Velocities

#### 4.4 流体浓度对污垢沉积的影响

在基础工况的基础上，为研究流体浓度对污垢沉积影响，另设置 2 组流体浓度分别为 2.22 kg/m<sup>3</sup> 和 2.62 kg/m<sup>3</sup> 的工况进行计算，由这 3 组工况计算结果得到流体浓度对污垢沉积的影响规律。

由图 8 可知，随着流体浓度的增大，污垢热阻也随之增大，且这个因素对污垢热阻值造成的影响较明显。由图 9 可知，随流体浓度的增大，污垢沉积率显著增大。流体浓度的增大使得垢层表面附近 CaSO<sub>4</sub> 的过饱和度增大，结垢动力增强，污垢沉积率增大。由图 10 可知，随流体浓度增加，污垢剥蚀率增大，这是垢层厚度增大导致垢

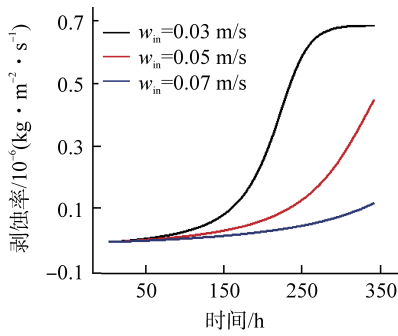


图 6 3 种不同入口流速下的污垢剥蚀率计算结果  
Fig. 6 Calculation Results of Fouling Erosion Rate at Three Different Inlet Velocities

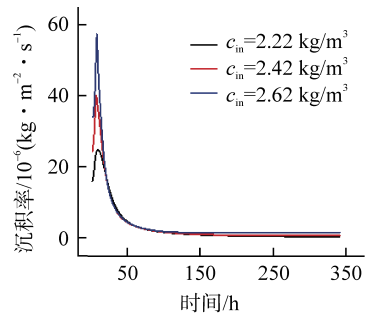


图 9 3 种不同流体浓度下的污垢沉积率计算结果  
Fig. 9 Calculation Results of Fouling Deposition Rate at Three Different Fluid Concentrations

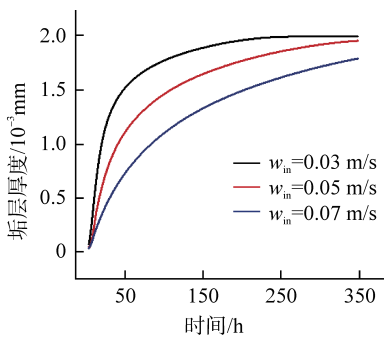


图 7 3 种不同入口流速下的污垢厚度计算结果  
Fig. 7 Calculation Results of Fouling Thickness at Three Different Inlet Velocities

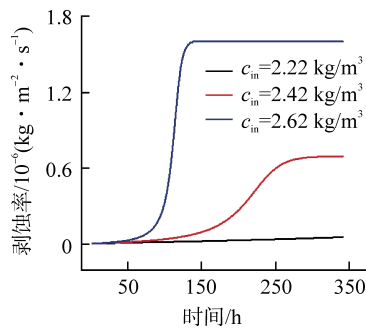


图 10 3 种不同流体浓度下的污垢剥蚀率计算结果  
Fig. 10 Calculation Results of Fouling Erosion Rate at Three Different Fluid Concentrations

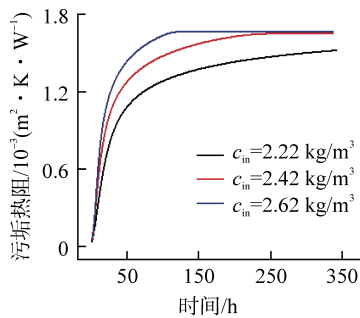


图 8 3 种不同流体浓度下的污垢热阻计算结果  
Fig. 8 Calculation Results of Fouling Thermal Resistance at Three Different Fluid Concentrations

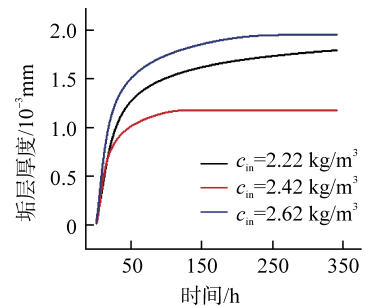


图 11 3 种不同流体浓度下的垢层厚度计算结果  
Fig. 11 Calculation Results of Fouling Thickness at Three Different Fluid Concentrations

层内热应力加剧与流体流速增大共同作用的结果。由图 11 可以直观得到垢层厚度随流体浓度变化规律：随流体浓度增加，生长阶段和渐近阶段的垢层厚度都增加。

### 5 结论

本研究基于污垢沉积、污垢剥蚀与污垢热阻的数学模型，利用 FLUENT 软件结合 UDF 对窄矩形通道中 CaSO<sub>4</sub> 溶液的析晶沉积过程进行了数

值仿真，得到了污垢热阻、污垢剥蚀率与污垢沉积率随时间变化趋势并分析了原因。同时，本研究还探究了热流密度、入口流速和流体浓度 3 种影响因素对于 CaSO<sub>4</sub> 析晶沉积作用的影响，分别得到了相应的变化规律并进行分析：受垢层热应力、垢层厚度、垢层表面附近流体浓度与饱和浓度差等因素影响，污垢热阻随热流密度增大而增大，随入口流速增大而减小，随流体浓度增大而增大。本研究对于窄矩形通道内由于水质存在盐

分导致析晶沉积产生污垢的问题有一定参考价值。未来会考虑通过进一步的实验完成模型的修正与进一步开发，并在下一阶段加深对污垢形成机制的研究。

#### 参考文献：

- [1] 张兹瑜, 薛超超, 吴欣强, 等. 核反应堆锆合金燃料包壳腐蚀产物沉积行为研究[C]//第十一届全国腐蚀与防护大会论文摘要集. 沈阳: 中国腐蚀与防护学会, 2021: 1.
- [2] 薛超超, 吴欣强, 谭季波, 等. 压水堆核电站锆合金燃料包壳污垢沉积行为研究[C]//第十一届全国腐蚀与防护大会论文摘要集. 沈阳: 中国腐蚀与防护学会, 2021: 1.
- [3] 谭智雄, 张小英, 尹盛晖, 等. 地坑滤网堵塞效应对应于堆芯燃料棒传热的影响研究[C]//第十四届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室2015年度学术年会论文集. 北京: 中国核学会核能动力分会反应堆热工流体专业委员会, 2015: 7.
- [4] 文强, 文青龙, 杨自强, 等. 钠冷快堆直流蒸汽发生器传热管结垢模型研究[C]//第十五届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室学术年会论文集. 荣成: 中国核学会, 2017: 8.
- [5] BRAHIM F, AUGUSTIN W, BOHNET M. Numerical simulation of the fouling process[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2003, 42(3): 323-334.
- [6] 孙卓辉. 换热面上结垢过程数值模拟[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008.
- [7] 鲍智江, 李建隆, 王伟文. 硫酸钙在调和液中的溶解度[J]. *化学工程*, 1995, 23(5): 21-25.
- [8] KRAUSE S. Fouling of heat-transfer surfaces by crystallization and sedimentation[J]. *International Chemical Engineering*, 1993, 33(3): 355-401.
- [9] BOHNET M. Fouling of heat transfer surfaces[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 1987, 10(1): 113-125.
- [10] 程浩明. CaCO<sub>3</sub>污垢生长过程的数值模拟[D]. 吉林: 东北电力大学, 2009.
- [11] 张蕊. 换热面CaSO<sub>4</sub>结垢过程的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [12] 姜鹏, 阎华, 关昌峰, 等. 内置转子圆管内CaCO<sub>3</sub>污垢形成过程的数值模拟[J]. *北京化工大学学报: 自然科学版*, 2013, 40(3): 1-5.

(责任编辑: 张祚豪)