

基于格子 Boltzmann 方法的微通道受热表面析晶污垢模拟

程 成,段钟弟,薛鸿祥,唐文勇

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

摘 要:针对现有的污垢析晶沉积模型不能有效模拟真实污垢生长的问题,建立了一种引入析晶沉积动力学模型的多物理场耦合数值模型。模型基于格子 Boltzmann 方法和有限差分方法,模拟了微通道非等温热表面上近壁面处的沉积物溶质质量浓度分布和污垢生长过程,研究了流速、壁温和沉积物溶质质量浓度对微通道热表面污垢析晶沉积的影响。结果表明:沉积初始时刻流速和壁温对近壁面沉积物溶质质量浓度分布具有不同程度的影响,随着污垢不断生长,污垢-流体界面处的析晶沉积速率减小;相比于流速,沉积物溶质质量浓度对污垢热阻的影响更为显著。

关 键 词:微通道;污垢;析晶沉积;格子 Boltzmann 方法;数值模型

中图分类号:TK172.4,TK268⁺.2 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.08.012

[引用本文格式]程 成,段钟弟,薛鸿祥,等.基于格子 Boltzmann 方法的微通道受热表面析晶污垢模拟[J].热能动力工程,2022,37(8):91-99. CHENG Cheng, DUAN Zhong-di, XUE Hong-xiang, et al. Lattice Boltzmann simulation of crystallization fouling on microchannel heated surface[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 91-99.

Lattice Boltzmann Simulation of Crystallization Fouling on Microchannel Heated Surface

CHENG Cheng, DUAN Zhong-di, XUE Hong-xiang, TANG Wen-yong

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: Aiming at the problem that the existing fouling crystallization deposition model cannot effectively simulate the real fouling growth, a mathematical model coupling with multi-physical fields that embedded the crystallization deposition dynamics model was established. Based on lattice Boltzmann method and finite difference method, the near-wall mass concentration distribution of the deposition solute and fouling growth process on the non-isothermal heated surface of microchannel were simulated. The effects of flow velocity, wall temperature and mass concentration of the deposition solute on fouling crystallization deposition on microchannel heated surface were studied. The results show that the flow velocity and wall temperature have different effects on the mass concentration distribution of the deposition solute near the wall at the initial deposition time. As the fouling keeps growing, the crystallization deposition rate on the fouling-fluid interface decreases gradually. The effect of mass concentration of the deposition solute on fouling thermal resistance is more significant than flow rate.

Key words: microchannel, fouling, crystallization deposition, lattice Boltzmann method, numerical model

收稿日期:2021-09-08;修订日期:2021-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助(52001207);中核集团“青年英才”科研项目(CNNC-YT-2021);中核集团“领创科研”项目(CNNC-LC-2020)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(52001207); Young Talent Project of China Natonar Nuclear Corporation(CNNC-YT-2021); Ling Chuang Research Project of China Natonar Nuclear Corporation(CNNC-LC-2020)

作者简介:程 成(1994-),男,湖北荆州人,上海交通大学硕士研究生

通讯作者:段钟弟(1991-),男,湖北荆州人,上海交通大学助理研究员。

引 言

析晶污垢普遍存在于工业热交换器中,是一种沉积在换热表面的有害结晶。热表面上污垢析晶沉积是由溶质在表面上过饱和析出形成的,典型的负溶解度盐 CaCO_3 具有溶解度随温度升高而降低的特点,极易在热表面上结垢。附着在热表面上的污垢一方面会增加流动工质与换热表面之间的热阻、降低设备的传热性能,另一方面会引起管道表面的粗糙度增加以及流道的缩窄,增加流动阻力^[1]。因此,研究热表面上污垢析晶沉积规律对抑制换热器表面结垢有重要意义。

国内外学者对换热器内的污垢沉积采用实验和数值模拟的方法进行了一系列的研究^[2-10]。大多数的数值计算方法只是通过计算热表面沉积速率得到污垢的沉积质量,并未考虑污垢生长引起的垢层表面上沉积速率的变化。为了解决这个问题,虚拟污垢法^[6]通过将计算得到的垢层厚度实时引入迭代真实流速来考虑垢层厚度增长的影响;伪动态法^[7]通过计算在连续变化的几何流体域中的顺序稳态过程来考虑动态污垢生长对模拟的耦合影响。这两种方法考虑了污垢生长对沉积速率的影响,但对微尺度下污垢析晶生长和流场演化的耦合非稳态过程仍无法模拟计算。

不同于上述两种方法,格子玻尔兹曼方法(LBM, Lattice Boltzmann method)是一种可以模拟多物理场的介观方法^[11],广泛应用于多孔介质^[12]、渗流^[13]和储能^[14]等研究。由于其适用于介观下的动力学机理研究,结合天然瞬态和并行性高等特点,与计算热表面的多物理场耦合、模拟污垢动态生长等场景十分契合。因此,本文建立一种结合污垢沉积动力学模型的混合格子 Boltzmann 数值模型,来模拟微通道受热表面上的污垢析晶沉积。阐述了数值模型的基本思想,验证了模型的有效性,研究了微通道受热表面近壁面处的沉积物溶质质量浓度分布,并结合像素体积法(VOP)模拟研究污垢在生长过程中的析晶沉积速率变化规律,探究各因素对污垢层热阻的影响。

1 数值模型

1.1 控制方程

微通道尺度下的受热表面污垢析晶由流体流

动、传热传质和析晶结垢过程主导,在流动、传质和换热模型的建立中,工质溶液的密度、动量和沉积物溶质质量浓度由以下 4 个方程控制:

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\partial_t (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

$$\partial_t C + \nabla \cdot (C \mathbf{u}) = \nabla \cdot (D_s \nabla C) \quad (3)$$

$$\partial_t T + \nabla \cdot (T \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla T \right) \quad (4)$$

式中: ρ —密度, kg/m^3 ; $\mathbf{u}$ —速度, m/s ; p —压力, Pa ; $\boldsymbol{\sigma}$ —粘性应力张量, Pa ; C —沉积物溶质质量浓度, kg/m^3 ; D_s —扩散系数, m^2/s ; T —温度, K ; λ —导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c_p —比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

图 1 为污垢析晶沉积模型的总体框架。受热表面给定热边界条件,一方面在污垢域中对传热方程求解,求解过程中流固界面的温度变化直接影响沉积物的饱和溶解度;另一方面在流体域中求解上述 4 个方程,求解过程中流体域传热与传质的变化也将影响沉积物在流固界面的表面反应。

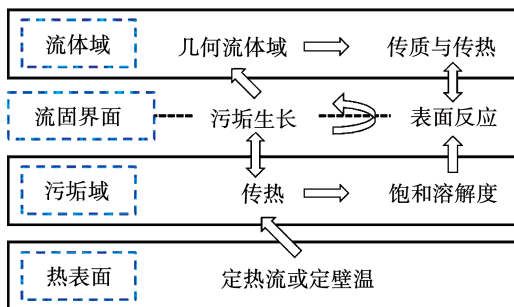


图 1 污垢沉积模型总体框架

Fig. 1 General framework of fouling deposition model

1.2 双分布格子 Boltzmann 模型

格子 Boltzmann 方法常被应用于介观场景。应用格子 Boltzmann 方法模拟微通道内部的流动与传质问题,可以覆盖污垢析晶沉积过程的控制方程(1)~(3)。本文在微通道尺度下,使用双分布格子 Boltzmann 方法建立了流动和传质模型,流动和传质的详细信息分别用密度场和浓度场进行描述。

在流体域中,密度场采用单弛豫时间(single-relaxation-time, SRT)格子 Boltzmann 方法进行求解,密度分布函数演化方程为:

$$f_i(\mathbf{r} + \Delta t \mathbf{e}_i, t + \Delta t) - f_i(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{\tau_i} [f_i(\mathbf{r}, t) - f_i^{\text{eq}}(\mathbf{r}, t)] \quad (5)$$

式中: f_i —密度分布函数; $f_i(\mathbf{r}, t)$ 是 t 时刻位于位置 $\mathbf{r}$ 处的速度为 $\mathbf{e}_i$ 的粒子分布函数; f_i^{eq} —相对应的密

度平衡分布函数; τ_f —密度分布函数的无量纲弛豫时间,通常设定为 1。 Δt —格子时间步长被设定为 1。

采用 D2Q9 的格子 Boltzmann 模型对速度离散,密度平衡分布函数为:

$$f_i^{\text{eq}}(\mathbf{r}, t) = \rho w_i \left[1 + \frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{\mathbf{u}^2}{2c_s^2} \right] \quad (6)$$

式中: w_i —权重因子, $w_0 = 4/9$, $w_{1-4} = 1/9$, $w_{5-8} = 1/36$; c_s —声速,设定为 $1/\sqrt{3}$; $\mathbf{e}_i$ —离散速度,表示为:

$$\mathbf{e}_i = \begin{cases} (0, 0), i = 0 \\ (\pm 1, 0)c, (0, \pm 1)c, i = 1 \sim 4 \\ (\pm 1, \pm 1)c, i = 5 \sim 8 \end{cases} \quad (7)$$

式中: c —格子速度,取值为 1。

密度分布函数演化方程中的弛豫时间 τ_f 与运动粘度 ν_f 关系为:

$$\nu_f = c_s^2 (\tau_f - 0.5) \Delta t \quad (8)$$

宏观物理量密度、速度分别为:

$$\rho = \sum_i f_i \quad (9)$$

$$\rho \mathbf{u} = \sum_i f_i \mathbf{e}_i \quad (10)$$

与密度场相对应的,流体域中的浓度场也采用格子 Boltzmann 方程求解,浓度分布函数演化方程为:

$$g_i(\mathbf{r} + \Delta t \mathbf{e}_i, t + \Delta t) - g_i(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{\tau_g} [g_i(\mathbf{r}, t) - g_i^{\text{eq}}(\mathbf{r}, t)] \quad (11)$$

式中: g_i —浓度分布函数; g_i^{eq} —相对应的浓度平衡分布函数; τ_g —浓度分布函数的无量纲弛豫时间。

根据式(8)可知,用于模拟密度场的弛豫时间 τ_f 与 ν_f 相关,在浓度场中 τ_g 与 D_s 相关。析晶沉积大多数溶质的扩散系数 D_s 远小于运动粘度 ν_f ,其数量级相差 1 000 倍以上。因此,若采用格子 Boltzmann 方法在同时间步下模拟浓度场和速度场,会导致浓度场的弛豫时间 τ_g 趋近于 0.5,造成较大的计算误差^[15]。为了减小误差带来的影响,采用浓度平衡分布函数,表达式为:

$$g_i^{\text{eq}}(\mathbf{r}, t) = C \left[J_i + \frac{1}{2} \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u} \right] \quad (12)$$

式中: J_i —调节函数, J_i 的引入改进了一般的 D2Q5 模型,使得浓度场格子 Boltzmann 模型适用于大佩克莱数 Pe 传质过程的模拟。 J_i 函数表示为:

$$J_i = \begin{cases} J_0, i = 0 \\ (1 - J_0)/4, i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (13)$$

其中, J_0 取值范围为 0 ~ 1。

浓度分布函数演化方程中的弛豫时间 τ_g 与扩散系数 D_s 的关系为:

$$D_s = \frac{1}{2} (1 - J_0) (\tau_g - 0.5) \quad (14)$$

宏观物理量浓度为:

$$C = \sum_i g_i \quad (15)$$

1.3 流固耦合传热模型

污垢在受热表面上的析晶沉积特性与表面温度密切相关,可以通过建立一种流固耦合传热模型来描述受热表面—污垢—流体间的温度场。

温度场采用四阶龙格库塔的有限差分法,对受热表面设置定壁温边界条件,其他边界给定零通量边界条件。对于计算域中的流体和固体节点,分别赋予不同的导热系数 λ 和密度 ρ 进行迭代计算。计算方程如下:

$$\partial_t T = -\mathbf{u} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \equiv K(T) \quad (16)$$

$$T^{\kappa+1} = T^{\kappa} + \frac{\delta_t}{6} (h_1 + 2h_2 + 2h_3 + h_4) \quad (17)$$

$$h_1 = K(T^{\kappa}) \quad (18)$$

$$h_2 = K\left(T^{\kappa} + \frac{\delta_t}{2} h_1\right) \quad (19)$$

$$h_3 = K\left(T^{\kappa} + \frac{\delta_t}{2} h_2\right) \quad (20)$$

$$h_4 = K(T^{\kappa} + \delta_t h_3) \quad (21)$$

式中: δ_t —迭代的时间步长; $h_1 \sim h_4$ —待定系数; κ —迭代时间步; $K(T)$ —关于温度 T 的迭代函数。

当热扩散系数的值大到一定程度时,应用 $\delta_t = \Delta t$ 会导致传热过程发散,有效措施是在一个时间步 Δt 内完成 k 次传热模型的迭代计算,使得:

$$\delta_t = \frac{1}{k} \Delta t \quad (22)$$

1.4 析晶沉积动力学模型

析晶沉积机理过程如图 2 所示。这一过程包含离子扩散至流固界面的传质过程(a)和溶质在流固界面因过饱和析出的表面反应过程(b)。这两个过程共同决定了析晶沉积过程主因^[9]。沉积物溶质质量浓度和温度的分布主流区与近壁面区不同,分别用角标 f 和 i 表示流体和污垢—流体表面,用角标 s 和 w 表示受热面—污垢表面和受热面内部。

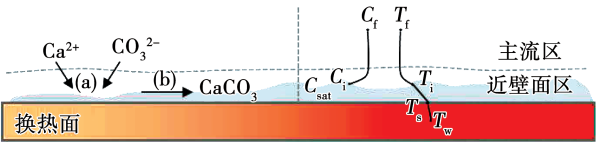


图 2 析晶沉积机理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of crystallization fouling mechanisms

流体域中的传热传质过程应用 1.2 节中的混合格子 Boltzmann 模型求解,而在代表受热表面流固界面的边界节点上,沉积物溶质质量浓度 C_i 是未知的,其一方面受近壁面处沉积物溶质质量浓度分布的影响,另一方面也受流固界面上的析晶沉积速率的影响。因此,对于表面反应过程,构建第 3 类边界条件:

$$D_s \frac{\partial C_i}{\partial n} = m_d \tag{23}$$

式中: n —垂直于流固界面指向流体域的单位向量; m_d —污垢沉积速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

式(23)左边采用一阶差分,由所处固体格子节点 (α, β) 的表面沉积物溶质质量浓度 $C_i(\alpha, \beta)$ 与在表面法线方向上的邻近流体格子节点的沉积物溶质质量浓度 $C_i(\alpha, \beta + 1)$ 差分得到:

$$\frac{\partial C_i}{\partial n} = \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{C_i(\alpha, \beta + 1) - C_i(\alpha, \beta)}{\Delta y} \tag{24}$$

$$C_i = \begin{cases} C_{\text{sat}} - \frac{D_s}{2k_0 e^{-E_a/RT_i}} + \sqrt{\left(\frac{D_s}{2k_0 e^{-E_a/RT_i}}\right)^2 + \frac{D_s}{k_0 e^{-E_a/RT_i}}(-C_{\text{sat}})}, & C_i(\alpha, \beta + 1) > C_{\text{sat}} \\ C_i(\alpha, \beta + 1), & C_i(\alpha, \beta + 1) \leq C_{\text{sat}} \end{cases} \tag{28}$$

对于受热表面上发生的负溶解度盐碳酸钙的析晶过程,当表面温度 T_i 越高,饱和碳酸钙溶解度 C_{sat} 越低,满足^[9]:

$$C_{\text{sat}} = -3.97 \times 10^{-10} T_i^3 + 1.28 \times 10^{-7} T_i^2 - 1.67 \times 10^{-5} T_i + 1.22 \times 10^{-3} \tag{29}$$

表 1 所示为给定模型中的常量值。

1.5 边界条件

对于二维的换热通道,需要对多物理场设定相应的边界条件。密度场应用 Zou-He 边界条件^[17]进行设置,入口处设定入口流速为 u_0 ;浓度场的边界条件设定基于方程^[18]:

$$\sum_i g_i e_i = Cu - D_s \nabla C \tag{30}$$

当边界为非表面反应的壁面边界时,速度 u 为零;当边界为零通量边界时,沉积物溶质质量浓度梯

不同于一般的析晶盐,在不考虑剥蚀率的条件下,碳酸钙的污垢沉积速率是关于析晶表面处沉积物溶质质量浓度与饱和溶解度之差的二阶函数^[8],沉积速率 m_d 表示为:

$$m_d = k_r (C_i - C_{\text{sat}})^2 \tag{25}$$

式中: k_r —受热表面析晶速率常数, $\text{m}^4/(\text{kg} \cdot \text{s})$; C_{sat} —溶质饱和溶解度, kg/m^3 。

联立方程(23)和(25)求解受热表面沉积物溶质质量浓度 C_i :

$$C_i = C_{\text{sat}} - \frac{D_s}{2k_r} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{D_s}{k_r}\right)^2 + \frac{4D_s}{k_r}(C_i(\alpha, \beta + 1) - C_{\text{sat}})} \tag{26}$$

受热表面析晶速率常数 k_r 满足:

$$k_r = k_0 e^{-E_a/RT_i} \tag{27}$$

式中: k_0 —析晶常数, $\text{m}^4/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$; E_a —活化能, kJ/mol ; R —气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T_i —流固界面温度, K 。

根据式(26),当邻近格点沉积物溶质质量浓度 $C_i(\alpha, \beta + 1)$ 大于表面饱和溶解度 C_{sat} 时,发生表面反应,为表面反应边界,方程解取为正值。而当邻近格点沉积物溶质质量浓度 $C_i(\alpha, \beta + 1)$ 小于或等于表面饱和溶解度 C_{sat} 时,不发生表面反应,为非表面反应边界。因此,建立的表面反应边界的求解模型为:

度 ∇C 为零。表面反应的边界条件为第 3 类边界条件,其方程如式(28)。图 3 为浓度场边界条件示意图。

表 1 数值模型的常量设置

Tab. 1 Constant settings for numerical models

参数	数值	文献
溶液运动粘度 $\nu_f/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	1×10^{-6}	
溶质扩散系数 $D_s/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	0.79×10^{-9}	[16]
析晶常数 $k_0/\text{m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	1.65×10^{22}	[9]
活化能 $E_a/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	179	[9]
气体常数 $R/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	8.314	
溶液密度 $\rho_l/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	971	[9]
溶质密度 $\rho_{\text{CaCO}_3}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 870	[9]
溶液导热系数 $\lambda_l/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.66	[9]
溶质导热系数 $\lambda_{\text{CaCO}_3}/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	5.09	[9]

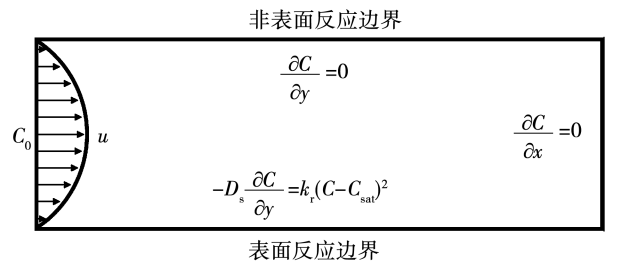


图 3 浓度场边界条件设置

Fig. 3 Concentration field boundary condition setting

温度场入口处设定入口流体温度,受热表面设定恒定壁温。模型的全部边界条件如表 2 所示。

表 2 边界条件的应用

物理场	密度场	浓度场	温度场
入口边界(左)	定速度	定浓度	定温
出口边界(右)	定压	零通量	零通量
非表面反应边界(上)	反弹格式	零通量	零通量
表面反应边界(下)	反弹格式	反应边界	定温

Tab. 2 Application of boundary conditions

1.6 析晶生长模型

污垢的生长会改变微通道内流体域的几何结构,为了实现实时的析晶生长模拟,采用 VOP 方法^[19]转化流固相格子节点,并更新流固界面所处的格子节点。当污垢在流固界面上析晶生长,流体域的几何边界逐步改变,进一步地影响到流体域中传热与传质的求解。

对于计算域中的固相格子节点,初始时刻给定一个原始的沉积质量 m_{thr} ,则某一时刻的沉积质量为:

$$m(t) = m_{thr} + \Delta x \int_0^t m_d(\tau) d\tau \tag{31}$$

图 4 为流固界面处析晶生长模型的示意图。某一流固界面固相节点的沉积质量达到阈值 $2 m_{thr}$ 时,识别该节点周围 4 个离散速度方向的节点,随机取其中的一个流体格子节点转化为固相格子节点并更新沉积质量为 m_{thr} ,原先固相格子节点的沉积质量重置为 m_{thr} 。图中, R 节点沉积质量达到阈值后,最近的 F 流体节点更新为固相格子节点。反应表面将随着析晶污垢的生长而变化,下表面边界条件的作用域也将随之变更。

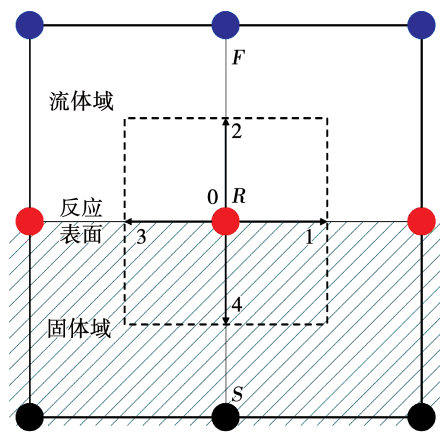


图 4 基于 VOP 方法的流固相更新示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fluid-solid phase updating based on VOP method

2 结果和分析

2.1 计算过程及结果验证

选取一段宽 0.2 mm、高 0.2 mm、长 1 mm 的矩形微通道,下表面为受热表面,壁面温度以 60 ~ 100 ℃呈线性递增,入口流体温度给定为 60 ℃。表 3 给出了计算工况的参数设定范围。应用本文提出的模型对二维矩形微通道进行了析晶沉积模拟计算,计算域为 500 × 100 格子,计算域格子离散图如图 5 所示。

表 3 计算工况参数范围

参数	数值
通道尺寸/mm ²	0.2
入口流速 $u_{in}/m \cdot s^{-1}$	0.01 ~ 0.5
壁面温度 $\theta_w/^\circ C$	60 ~ 100
入口浓度 $C_{in}/kg \cdot m^{-3}$	0.1 ~ 0.4

Tab. 3 Parameter range of numerical cases

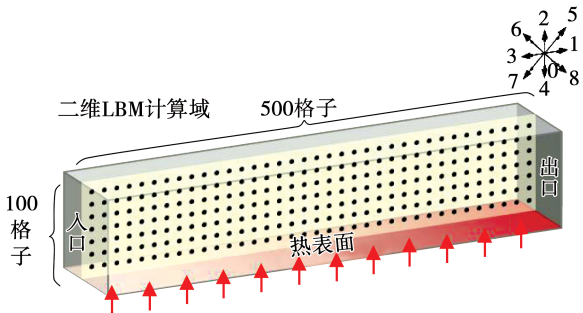


图 5 计算域格子离散示意图

Fig. 5 Schematic diagram of computational domain lattice discretization

模型求解过程如图 6 所示。经过严格的单位转化,设置初始格子参数和求解时间,应用 MATLAB 软件自编程求解。

为验证模型的有效性,选择入口流速 0.1 m/s ,入口沉积物溶质质量浓度 0.4 kg/m^3 的初始参数进行求解。在浓度场达到稳态后,获取受热表面上的析晶沉积速率 m_d 。文献[9]提出了两种一维析晶沉积理论模型,其中理论模型 1 不考虑传质过程,而理论模型 2 则兼顾表面反应过程和传质过程。设定格子 Boltzmann 模型中的析晶常数 k_0 和活化能 E_a 与理论模型 1 一致,其设定值见表 2。将本模型的计算结果与文献[9]中的两种理论模型计算结果进行对比,结果如图 7 所示。

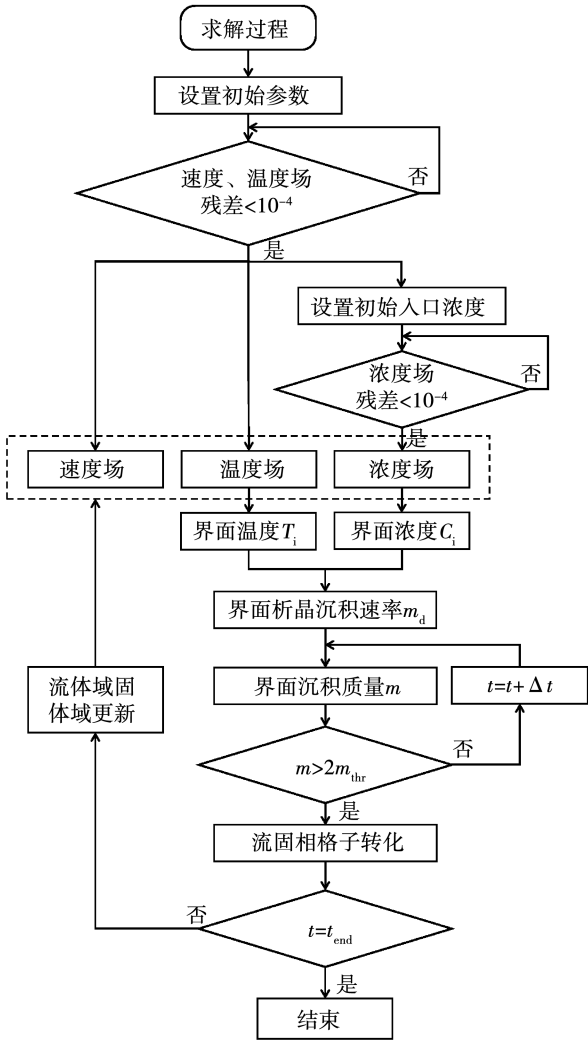


图 6 析晶沉积模拟的求解步骤

Fig.6 Explanation of the calculation steps for the simulation of the crystallization fouling

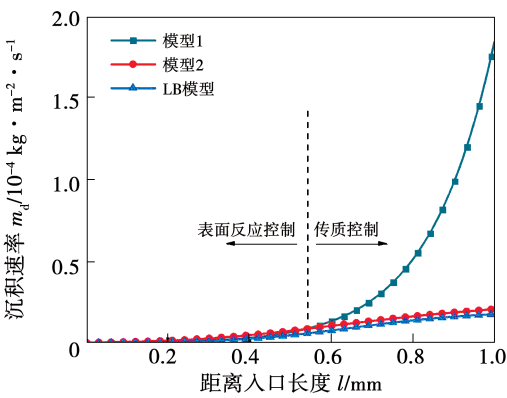


图 7 理论模型与格子 Boltzmann 模型解的对比
Fig.7 The results comparison between the theoretical model and LB model

对比格子 Boltzmann 模型与一维理论模型的解,在微通道的前半段,格子 Boltzmann 模型解与理论模型 1 的解基本一致;在微通道后半段,格子 Boltzmann 模型上析晶沉积速率沿微通道长度方向上的变化趋势与理论模型 2 基本吻合。这说明,二维格子 Boltzmann 模型求解传质过程和表面反应过程与理论模型一致,验证了本文提出的混合格子 Boltzmann 模型的有效性。

2.2 近壁面沉积物溶质质量浓度分布

微通道壁面温度为 $70, 80, 90$ 和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 4 个横截面上的溶质质量浓度分布曲线如图 8 所示。横坐标为距离热壁面的无量纲长度,纵坐标为无量纲浓度。壁面温度升高,近壁面的沉积物溶质质量浓度梯度增大,壁面处沉积物溶质质量浓度减小。这说明反应表面上温度的升高会加速表面处的沉积物溶质质量浓度下降,使得浓度梯度急剧增大。

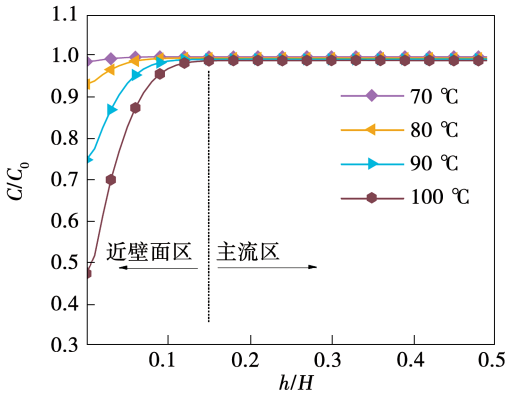


图 8 不同壁温处溶质质量浓度分布

Fig.8 Mass concentration distribution at different wall temperatures

图 9 为微通道壁温为 90 ℃ 的横截面上在不同入口流速下沉积物溶质质量浓度分布曲线,横、纵坐标与图 8 一致。随着入口流速的增大,主流区的沉积物溶质质量浓度值逐渐减小,而近壁面区的浓度梯度在不同流速下均一致。0.01 ~ 0.2 m/s 的速度范围内流速增大使得沉积物溶质质量浓度分布发生变化的区间缩窄,壁面处沉积物溶质质量浓度增大;而 0.2 ~ 0.5 m/s 速度范围内流速的改变不再影响近壁面处的沉积物溶质质量浓度分布,这说明流速只能在一定范围内影响近壁面处的传质过程。

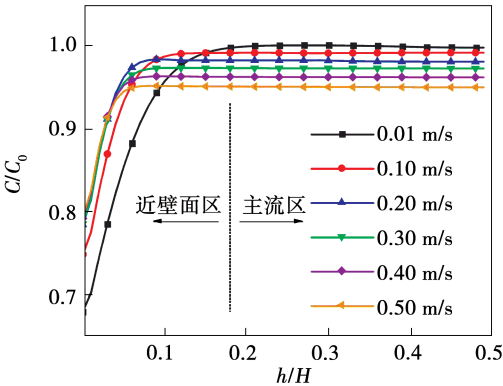


图 9 不同流速下浓度分布

Fig. 9 Concentration distribution at different flow rates

2.3 受热表面析晶生长

2.3.1 析晶生长模拟计算

图 10 为微通道在入口流速为 0.1 m/s,入口沉积物溶质质量浓度为 0.2 kg/m³的速度矢量和浓度云图,横纵坐标为格子数,云图为非等值显示,并取最大质量浓度的值为 C₀进行归一化。初始时刻速度场为泊肃叶流分布,各个通道横截面上的速度分布一致,受热表面附近沉积物溶质质量浓度值显著变化。沉积时间 200 min 后,微通道受热表面生长出污垢,流固界面的抬高导致流道缩窄,流速和溶质质量浓度分布均发生变化。

图 11 表示该工况下的温度分布变化。污垢的存在增大了壁面与流固界面之间的传热温差,随着污垢的生长,流固界面的温度逐渐下降。

图 12 为该工况下微通道流固界面上在初始时刻、100 和 200 min 沉积时间下的沉积速率分布曲线。对于污垢迎风面的高壁温区域,100 min 时沉积速率较 0 时刻无明显变化,而 200 min 时显著减小。

垢层厚度的抬高会造成流速增大且流固界面温度降低。上节结论显示,速度增大引起传质过程强化直至趋于稳定,而流固界面温度降低引起表面反应过程的减缓。污垢沉积初期垢层厚度较小,传质过程的加强与表面反应过程的减缓使得沉积速率变化不显著,但随着垢层厚度进一步增加,速度的增大不再继续引起传质过程的加强,沉积速率则随着表面反应过程的减缓而减小。

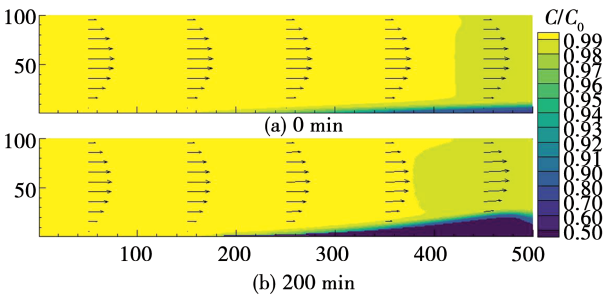


图 10 微通道流速与溶质质量浓度分布

Fig. 10 Flow velocity and mass concentration distribution of microchannel

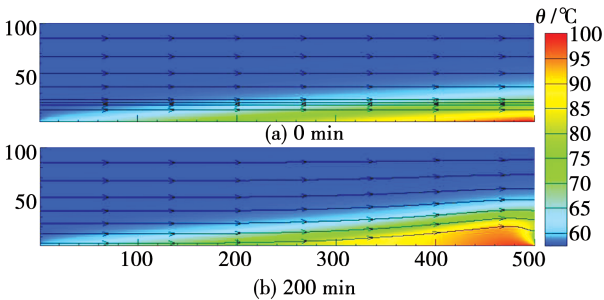


图 11 微通道温度分布

Fig. 11 Temperature distribution of microchannel

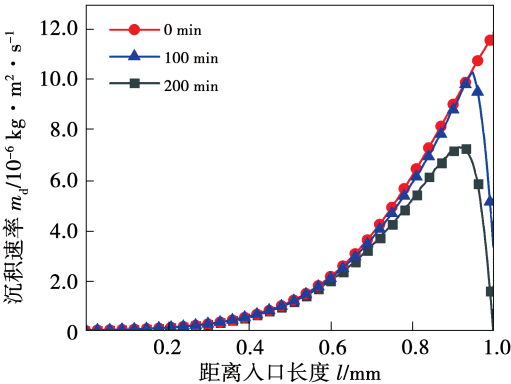


图 12 流固界面上的沉积速率分布

Fig. 12 Deposition rate distribution on the fluid-solid interface

短时间内的沉积不能反映污垢的渐进特性,本文模型假设中未考虑剥蚀效应,在该工况下模拟沉积时间为 15 h 的污垢生长过程。图 13 为微通道出口处最高污垢层厚度随沉积时间的变化曲线。污垢层厚度随着沉积时间不断增大,增长率逐渐减小,符合沉积速率不断减小的结论。

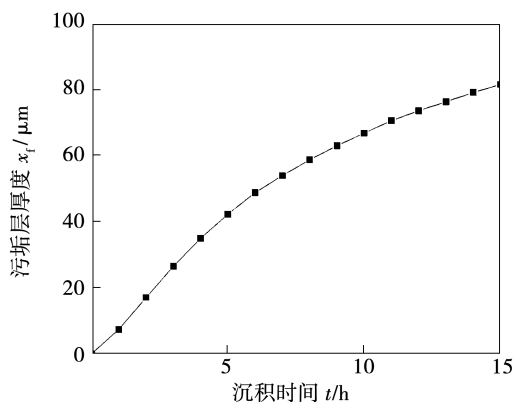


图 13 污垢层厚度随时间的变化

Fig. 13 Changes of fouling layer thickness with time

2.3.2 流速和沉积物溶质质量浓度对污垢层热阻的影响

污垢层热阻 R_f 可以表征受热表面的结垢程度,满足:

$$R_f = x_f / \lambda_f \quad (32)$$

式中: x_f —污垢层厚度, m; λ_f —污垢导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

图 14 为微通道平均污垢层热阻在不同流速下随时间的变化曲线,入口沉积物溶质质量浓度一致为 $0.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。由图 14 可以看出,随着污垢的生长,不同流速下污垢层热阻的增长速率相差不大。而流速的增大使得流固界面平均温度略微降低,即短时间带走流固界面上的热量更多,导致表面反应速率略有下降。因此,微通道在高流速下沉积一段时间后的平均污垢层热阻较低、流速略小一些。

图 15 为不同沉积物溶质质量浓度下污垢热阻随时间的变化曲线,入口流速统一为 $0.1 \text{ m}/\text{s}$ 。由图 15 可以看出,在污垢的生长过程中,污垢层热阻在较高质量浓度环境中的增长速率更大。因此,溶液中的沉积物溶质质量浓度对污垢层热阻随时间增长的影响更为显著。

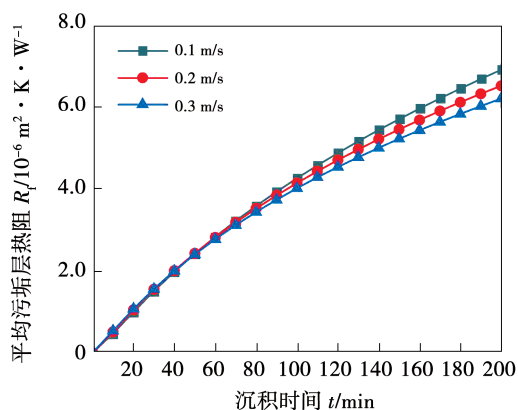


图 14 不同流速下污垢层热阻曲线

Fig. 14 Fouling thermal resistance curves at different flow rates

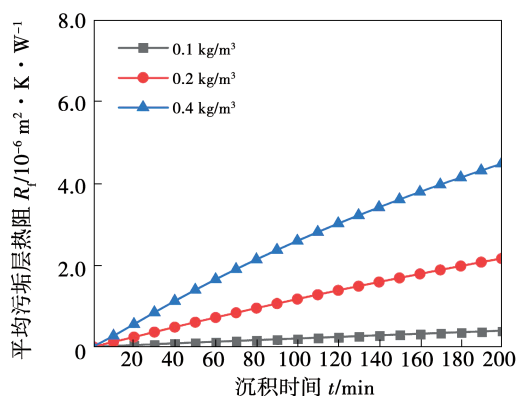


图 15 不同溶质质量浓度下污垢层热阻曲线

Fig. 15 Fouling thermal resistance curves at different mass concentrations

3 结 论

基于 LBM 和有限差分方法,考虑了密度、浓度及温度多物理场与析晶结垢过程的耦合,提出了一种模拟微通道受热表面污垢析晶生长过程的模型。模拟并分析了影响受热表面近壁面的浓度分布的因素,以及各因素在污垢生长过程中对污垢热阻的影响,得出结论:

(1) 提出的模型能有效模拟微通道受热表面流动-扩散-反应过程的析晶沉积与污垢生长,反应微通道污垢析晶沉积的微观特性;

(2) 较高的表面温度会增大近壁面的沉积物溶质质量浓度梯度,并导致壁面上的沉积物溶质质量浓度降低;入口流速的增大不改变近壁面的沉积物溶质质量浓度梯度,但随着流速的增大,壁面上沉积

物溶质质量浓度先增大后趋于定值,流速只在一定范围内影响传质速率;

(3) 采用 VOP 方法可以有效地模拟污垢层生长演化过程,随着垢层厚度不断增加,污垢-流体界面的温度逐渐降低,污垢沉积速率随之减小;

(4) 微通道的污垢层热阻随着时间不断增大,入口流速的变化对微通道平均污垢层热阻的增长速率无显著影响,而溶液中沉积物溶质质量浓度的增大会导致平均污垢层热阻的增长速率显著增大。

参考文献:

[1] MAYER M, BUCKO J, BENZINGER W, et al. Crystallization fouling in experimental micro heat exchangers – optical and thermal investigations [J]. *Experimental Heat Transfer*, 2013, 26 (5): 487 – 502.

[2] 王彦坤,张 华,尤晓宽,等. 强化蒸发管形成碳酸钙污垢的特性研究[J]. *热能动力工程*, 2016, 31 (5): 34 – 39.

WANG Yan-kun, ZHANG Hua, YOU Xiao-kuan, et al. Study of the CaCO₃ foul characteristics of an intensified evaporation tube[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2016, 31 (5): 34 – 39.

[3] 徐志明,吴 翰,刘坐东,等. 矩形通道中低肋涡流发生器抑垢效果分析研究[J]. *热能动力工程*, 2017, 32 (6): 77 – 83.

XU Zhi-ming, WU Han, LIU Zuo-dong, et al. Study of inhibition scale effect on the rectangular channel with low fin vortex generators[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2017, 32 (6): 77 – 83.

[4] 赵 萍,盛 健,张 华. 平直斜翅管表面碳酸钙污垢初始阶段结垢特性[J]. *热能动力工程*, 2013, 28 (5): 523 – 528.

ZHAO Ping, SHENG Jian, ZHANG Hua. Fouling characteristics of the CaCO₃ foul on the surface of a straight and obliquely-finned tube in the initial stage[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2013, 28 (5): 523 – 528.

[5] DEUS J D, PINHEIRO R S. Fouling of heat transfer surfaces[J]. Hemisphere Publishing Corporation, 1986: 721 – 744.

[6] BRAHIM F, AUGUSTIN W, BOHNET M. Numerical simulation of the fouling process[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2003, 42 (3): 323 – 334.

[7] ZHANG F, XIAO J, CHEN X D. Towards predictive modeling of crystallization fouling: a pseudo-dynamic approach [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2015, 93: 188 – 196.

[8] HELALIZADEH A, MÜLLER-STEINHAGEN H, JAMIALAHMADI M. Mathematical modelling of mixed salt precipitation during convective heat transfer and subcooled flow boiling[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60 (18): 5078 – 5088.

[9] PÄÄKKÖNEN T M, RIIHIMÄKI M, SIMONSON C J, et al. Modeling CaCO₃ crystallization fouling on a heat exchanger surface-definition of fouling layer properties and model parameters [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 83: 84 – 98.

[10] NIKOO A H, MALAYERI M R. Incorporation of surface energy properties into general crystallization fouling model for heat transfer surfaces[J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 215: 115461.

[11] 赵 健,金 晶,侯封校,等. 基于格子 Boltzmann 方法的柴油机 SCR 脱硝模拟[J]. *热能动力工程*, 2021 (8): 48 – 55.

ZHAO Jian, JIN Jing, HOU Feng-xiao, et al. Simulation study on diesel engine SCR denitration by lattice Boltzmann method [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021 (8): 48 – 55.

[12] 陈宝明,蔡鹏飞,云和明,等. 基于 LBM 多孔介质复合腔体交界面热滑移效应的研究[J]. *热科学与技术*, 2015 (3): 189 – 195.

CHEN Bao-ming, CAI Peng-fei, YUN He-ming, et al. Study of heat slip effect on porous medium and fluid interface by lattice Boltzmann method[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2015 (3): 189 – 195.

[13] 李素芬,薛 福. 基于格子 Boltzmann 方法的饱和土壤渗流与传热数值模拟[J]. *热科学与技术*, 2015, 14 (6): 445 – 455.

LI Su-fen, XUE Fu. Numerical simulation of seepage and heat transfer in saturated soils based on lattice Boltzmann method[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2015, 14 (6): 445 – 455.

[14] XIA B Q, PAN Z H, YAN J, et al. Mesoscopic exploration on mass transfer in porous thermochemical heat storage materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 135: 52 – 61.

[15] SULLIVAN S P, SANI F M, JOHNS M L, et al. Simulation of packed bed reactors using lattice Boltzmann methods[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60 (12): 3405 – 3418.

[16] SEGEV R, HASSON D, SEMIAT R. Rigorous modeling of the kinetics of calcium carbonate deposit formation[J]. *Aiche Journal*, 2012, 58 (4): 1222 – 1229.

[17] ZOU Q, HE X. On pressure and velocity boundary conditions for the Lattice Boltzmann BGK model[J]. *Physics of Fluids*, 1996, 9 (6): 1591 – 1598.

[18] KANG Q, LICHTNER P C, ZHANG D. An improved lattice Boltzmann model for multicomponent reactive transport in porous media at the pore scale[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43 (12): 2578 – 2584.

[19] KANG Q, ZHANG D, CHEN S. Simulation of dissolution and precipitation in porous media[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108 (B10): 2505.