



碳酸钙于换热表面结垢的传热与传质模型

全贞花*, 陈永昌, 马重芳

北京工业大学环境与能源工程学院, 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100022

* E-mail: quanzh@bjut.edu.cn

收稿日期: 2007-02-02; 接受日期: 2007-05-09

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(编号: G2000026304)和北京市优秀人才培养(编号: 20061D0501500186)资助项目

摘要 建立了碳酸钙于换热表面结垢的传热传质模型. 模型中不仅考虑了换热表面的析晶污垢, 同时也考虑了由于过饱和在溶液中成核而形成的颗粒垢. 对混合污垢的沉积与脱除分别予以表达, 并将结垢过程的溶液及污垢特性应用其中. 另外, 模型还根据换热器中垢层传热的特点综合考虑了结垢与温度场的耦合作用, 得到了换热表面污垢热阻随时间变化的数值. 模型预测与实验数据吻合得很好, 偏差大部分小于 15%, 说明预测模型是正确可靠的.

关键词

结垢
碳酸钙
传热
传质
模型

由于换热设备结垢问题的严重性, 人们在换热设备设计中不得不考虑污垢的影响, 而传统上只是给出一个与时间无关的经验性污垢系数, 这远远满足不了实际运行的需要. 因为污垢热阻是随运行条件和时间的变化而变化的, 为了确定适宜的清洗周期, 必须准确把握换热表面污垢的动态. 如何预测在给定操作条件下换热表面的结垢过程便成为人们普遍感兴趣的理论课题^[1]. 所以, 一些简化的、可以估计污垢对换热设备性能影响的实用模型便应运而生. 而以往模型大多数只能得出初始结垢速率, 有的即使得出污垢热阻随时间变化, 但也都没有考虑结垢过程和温度场的耦合问题. 由于人们所关心的往往是长期的结垢行为, 而结垢热阻又恰恰是传热过程的控制热阻, 所以垢层表面温度和溶液温度与洁净状态时必然不同. 因此, 要正确描述结垢行为, 必须考虑结垢过程与温度场的耦合. 尽管有篇文献考虑了恒壁温条件下的温度场对结垢过程的影响^[2], 但其恒壁温的前提和流体温度为常数的假设难以应用到换热器的结垢过程中. 据此本文将在大量结垢实验研究的基础上, 根据换热器中垢层传热的特点提出综合考虑结垢过程与温度场耦合作用的传热传质模型, 同时将结垢实验中得出的溶液及污垢特性参数应用到模型当中, 以期对换热表面结垢给出更为合理的理论预测.

1 结垢实验装置与原理

换热表面的污垢特性是多种参数的函数, 而这些参数还要随时间和运行条件的变化而变

化, 所以污垢热阻的动态模拟与监测对于污垢特性的研究是很必要的. 由此, 我们建立了污垢动态监测实验装置, 如图 1 所示. 实验装置由传热实验段、热水系统、冷水系统、制冷系统和测控装置组成. 实验段由两个同心管组成逆流式热交换器, 内管为光滑表面的紫铜管, 外管为卫生级不锈钢管. 热水(纯净水)走管侧, 模拟硬水走壳侧, 污垢沉积在内管的外表面. 热水系统及冷水系统由水箱、不锈钢泵、流量计、过滤器、阀门及卫生级不锈钢管路组成. 热水箱的最大加热功率为 15 kW, 冷水箱的加热功率为 3 kW. 制冷系统最大制冷量为 15 kW, 其循环冷冻水由地源热泵机组提供. 实验装置采用了数据的自动采集和参数的自动控制系统, 从而保证了实验段的进口流量和温度的稳定与可靠. 由电动调节阀自动调节冷冻水的流量来实现实验段冷水入口要求的温度, 温度变化在 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 内. 由可控硅调功柜来实现热水入口的要求温度, 温度变化在 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 内. 实验段外套管在中间部分采用透明玻璃管, 实现了结垢过程的可视化. 实验装置的对流换热性能测试结果表明, 该实验系统运行稳定, 其测试结果准确可靠 [3].

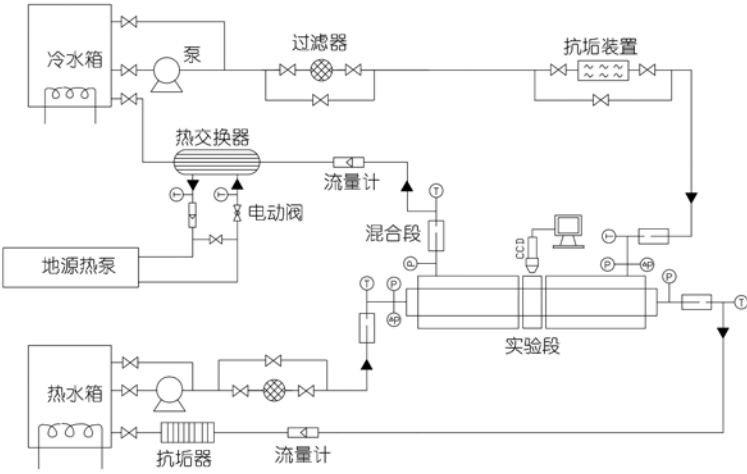


图 1 污垢动态监测实验装置示意图

2 碳酸钙于换热表面结垢的预测模型

碳酸钙是循环水系统中换热表面污垢的主要形式之一. 换热表面的碳酸钙污垢不仅包括析晶污垢, 同时还包括由于过饱和而在溶液中成核而形成的颗粒垢 [4,5]. 在原水硬度较高的情况下, 有时颗粒垢比析晶垢还多. 所以本文污垢的预测模型中考虑了碳酸钙析晶污垢与颗粒污垢的混合污垢, 以Kern-Seaton模型 [6]为基础, 对污垢的沉积率和脱除率分别予以表达, 同时考虑结垢过程与温度场的耦合作用.

首先作如下假设:

- 1) 污垢的成分沿换热及垢层厚度方向均匀分布;
- 2) 污垢表面粗糙度的影响可以忽略;
- 3) 不考虑结垢过程的诱导期;

4) 析晶垢与颗粒垢的沉积速率可以分别计算, 合在一起作为总沉积速率.

2.1 析晶垢的沉积速率

Hasson 等人 [7] 将 CaCO_3 结晶的研究结果与传递理论相结合, 导出了预测 CaCO_3 析晶速率的离子扩散模型, 沉积速率可表示为

$$\dot{m}_c = \frac{k_d [\text{Ca}^{2+}]}{2a} \left(-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right), \quad (1)$$

其中

$$a = 1 - \frac{4k'_2 k_r}{K'_1 k_d} [\text{Ca}^{2+}], \quad (2)$$

$$b = \frac{4K'_2 k_r}{K'_1 k_d} [\text{HCO}_3^-] + \frac{K'_{spi} k_r}{k_d} \frac{1}{[\text{Ca}^{2+}]} + \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{Ca}^{2+}]}, \quad (3)$$

$$c = \frac{K'_{spi} k_r}{k_d} \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{Ca}^{2+}]^2} - \frac{K'_2 k_r}{K'_1 k_d} \frac{[\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{Ca}^{2+}]}, \quad (4)$$

其中, $\dot{m}_c$ 为单位面积壁面上单位时间内的碳酸钙析晶速率, 单位 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; K'_1 和 K'_2 分别为碳酸的一级、二级电离常数, 单位 mol^2/L^2 ; K'_{spi} 为在界面温度下碳酸钙的溶度积, 单位 mol^2/L^2 ; k_d 为传质系数, 可表示成

$$k_d = 0.023 \nu \text{Re}^{-0.17} \text{Sc}^{-\frac{2}{3}}, \quad (5)$$

式中, ν 为流体的流速, m/s ; Re 为雷诺(Reynolds)准数; Sc 为施密特数(Schmidt)准数, 表达式为

$$\text{Sc} = \frac{\nu}{D}, \quad (6)$$

式中, ν 为流体的运动黏度, 单位 m^2/s ; D 为分子扩散系数, 单位 m^2/s .

对于 CaCO_3 稀溶液在 298 K 时, $D \approx 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$. 其他温度下, D 值以下式确定:

$$D = 3.07 \times 10^{-15} \frac{T_b}{\mu}, \quad (7)$$

式中, T_b 为流体温度, 单位 K; μ 为流体的动力黏度, 单位 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$.

k_r 为析晶速率常数, 由下式计算:

$$\ln k_r = 41.04 - \frac{10417.7}{T_i}, \quad (8)$$

其中, T_i 为结垢表面温度, 单位 K.

若已知 Re , T_b , T_i , 溶液硬度 $[\text{Ca}^{2+}]$, 碱度 TA 及 pH 值, 则可求得换热表面 CaCO_3 析晶垢的沉积率 $\dot{m}_c$.

2.2 颗粒垢的沉积速率

在 Hasson 模型中并没有考虑溶液中析晶而生成的颗粒污垢, 而这种现象在过饱和溶液中不可避免会发生. 而且溶液中析晶后在换热表面沉积的颗粒垢有时要比析晶垢还要多, 所以要想准确预测换热表面结垢特性, 必须要考虑在溶液中析晶的 CaCO_3 颗粒沉积形成的颗粒垢. 溶液中的 CaCO_3 颗粒是以均相成核方式形成晶核并进而在初始晶核基础上长大的. 其析晶及增长速度与溶液初始浓度及溶液温度有关. 但在动态实验当中, 通过测量发现溶液中 CaCO_3 颗粒的浓度随结垢的进行变化不大, 为了简化模型, 这里我们假设一定运行条件下的 CaCO_3 颗粒的浓度为定值, 可以描述为与溶液的过饱和度相关的函数:

$$C_p = -16.467 + 1.667 \times S_b, \quad (9)$$

其中, C_p 为溶液中颗粒的浓度, 单位 kg/m^3 . S_b 为溶液的过饱和度.

溶液的过饱和度 S_b , 用下式表示:

$$S_b = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]}{K'_{spb}}, \quad (10)$$

K'_{spb} 为溶液温度所对应碳酸钙的溶度积.

溶液中 CaCO_3 晶粒尺寸分布可以通过激光粒度仪进行分析, 取不同实验时间样品测定分析, 发现实验前后 CaCO_3 晶粒的尺寸分布变化不大. 为简化计算, 我们假定溶液中 CaCO_3 晶粒尺寸 d_p 为定值, 取实验中的平均值.

晶粒的输运与附着机制取决于晶粒的无因次驰豫时间 t_p^+ :

$$t_p^+ = \frac{d_p^2 \rho_p (V^*)^2}{18\mu \nu}, \quad (11)$$

式中, d_p 为晶粒直径, 单位 m ; ρ_p 为晶粒密度, 单位 kg/m^3 ; V^* 为流体在固体壁面摩擦速度, 单位 m/s .

参考 Cleaver 和 Yates^[8] 及 Turner^[9] 提出的微粒输运和附着机制, 并结合 Papavergos 和 Hedley^[10] 给出的计算颗粒污垢沉积的经验公式, 本文溶液中粒子的输运和附着的无因次沉积速度按下式计算:

$$V_d^+ = \begin{cases} 0.07 \text{Sc}^{-2/3}, & t_p^+ < 0.02 (\text{扩散机制}), \\ 3.5 \times 10^{-4} (t_p^+)^2, & 0.02 < t_p^+ < 20 (\text{扩散-惯性机制}), \\ 0.18, & t_p^+ > 20 (\text{惯性机制}), \end{cases} \quad (12)$$

式中, V_d^+ 为晶粒的无因次沉积速度, 表达式为

$$V_d^+ = \frac{V_d}{V^*}, \quad (13)$$

式中, V_d 为晶粒的沉积速度, 单位 m/s .

则溶液中碳酸钙晶粒的沉积速率^[11]为

$$\dot{m}_p = C_p V_d, \quad (14)$$

式中, $\dot{m}_p$ 为碳酸钙晶粒在单位面积壁面上单位时间内的沉积速度, 单位 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

我们将污垢的沉积速率表示为析晶垢沉积率和颗粒垢沉积率之和:

$$\dot{m}_d = \dot{m}_c + \dot{m}_p, \quad (15)$$

$\dot{m}_d$ 为单位面积壁面上单位时间内碳酸钙总的沉积速率, 单位 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

2.3 污垢的脱除速率

污垢的脱除速率^[12]描述为

$$\dot{m}_r = c_r \rho_f \delta_f^n, \quad (16)$$

式中, $\dot{m}_r$ 为单位面积壁面上单位时间内碳酸钙的脱除速率, 单位 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $n=1.5$; ρ_f 为污垢的密度, 单位 kg/m^3 ; c_r 是脱除系数.

$$c_r = \frac{0.00212 \nu^2}{\lambda_f^{0.5} \psi}, \quad (17)$$

式中, ψ 为垢层强度系数, λ_f 为污垢的导热系数, 单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

结垢包括污垢的沉积与脱除两种过程^[6]. 若以污垢热阻来衡量结垢程度, 结垢速率可表示为

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{\dot{m}_d - \dot{m}_r}{\rho_f \lambda_f}, \quad (18)$$

式中, R_f 为污垢热阻, 单位 $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

2.4 结垢过程与温度场的耦合

结垢过程与温度场的耦合指的是, 一方面结垢过程会造成温度场的变化, 另一方面温度场的变化又给结垢过程带来影响. 温度场对结垢过程的影响主要是通过结垢表面与流体的温度变化而发生作用的, 具体体现在上述沉积及脱除模型中. 结垢过程对温度场的影响体现在下列传热方程之中.

$$Q = k \pi d_o L \Delta t_m, \quad (19)$$

$$Q = c_h \rho_h V_h (t_{h1} - t_{h2}), \quad (20)$$

$$Q = c_c \rho_c V_c (t_{c2} - t_{c1}), \quad (21)$$

$$\frac{h_h d_i}{\lambda_h} = 0.012 (Re_h^{0.87} - 280) Pr_h^{0.4} \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{Pr_h}{Pr_{wi}} \right)^{0.11}, \quad (22)$$

$$\frac{h_c d_c}{\lambda_c} = 0.012 (Re_c^{0.87} - 280) Pr_c^{0.4} \left[1 + \left(\frac{d_c}{L} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{Pr_c}{Pr_f} \right)^{0.11}, \quad (23)$$

$$Q = h_h \pi d_i L (t_h - t_{wi}), \quad (24)$$

$$Q = h_c \pi d_o L (t_f - t_c), \quad (25)$$

$$k = \frac{1}{\frac{d_o}{h_h d_i} + \frac{d_o}{2\lambda_{cu}} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_c} + \frac{d_o}{2\lambda_f} \ln \frac{d_f}{d_o}}, \quad (26)$$

$$d_f = d_o + 2\delta_f, \quad (27)$$

式中, Q 为传热量, 单位 W; Δt_m 为冷、热水对数平均温差, 单位 $^{\circ}\text{C}$; d_o 为传热管外径, 单位 m; k 为传热系数, 单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; L 为管长, 单位 m; t 为温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$; V 为体积流量, 单位 m^3/s ; ρ 为密度, 单位 kg/m^3 ; λ 为导热系数, 单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c 为比热容, 单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; h 为对流换热系数, 单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; Nu 为努谢尔特数; t_f 为污垢表面温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$; d_i 为传热管内径, 单位 m; d_c 为冷水侧(壳侧)当量直径, 单位 m; 脚标 h, c 分别表示热水及冷水; 脚标 wi 表示传热管内壁; d_f 为传热管结垢后的外径, 单位 m; d_i 为换热管的内径, 单位 m; δ_f 为垢层厚度, 单位 m; λ_{cu} 为铜管的导热系数, 单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

当实验段的冷水、热水的入口温度 t_{c1} , t_{h1} 及流量 V_c 和 V_h 一定时, 上述公式(19)~(25)这 7 个方程可组成含有 7 个未知数的方程组. 通过解非线性方程组可求出 7 个未知数, 分别为冷水、热水的出口温度 t_{c2} 和 t_{h2} , 对流换热系数 h_c 和 h_h , 传热管内表面的温度 t_{wi} 和垢层表面温度 t_f 及换热量 Q .

成垢溶液温度 T_b 取为冷水溶液进出实验段温度的平均值:

$$T_b = 273.15 + \frac{(tc1 + tc2)}{2}. \quad (28)$$

垢层表面的温度 T_i 为

$$T_i = 273.15 + t_f. \quad (29)$$

将结垢过程的成垢溶液温度 T_b 及垢层表面的温度 T_i 代入污垢沉积和脱除模型, 可得到相应温度场下的结垢速率及污垢热阻.

2.5 模型的计算

采用面向对象编程的方法, 对建立的污垢预测模型进行编程计算, 计算框图见图 2.

3 碳酸钙于换热表面结垢的模型与实验的比较

我们做了大量的实验与预测模型的比较, 结果表明污垢热阻随时间的预测值与实验值吻合得很好, 偏差大部分小于 15%. 说明了本文污垢热阻预测模型比较合理. 图 3 给出其中两组实验的污垢热阻和理论模型的比较曲线.

4 结论

本文考虑了结垢过程与温度场耦合, 以 Kean-Seaton 模型为基础建立了碳酸钙于换热表面

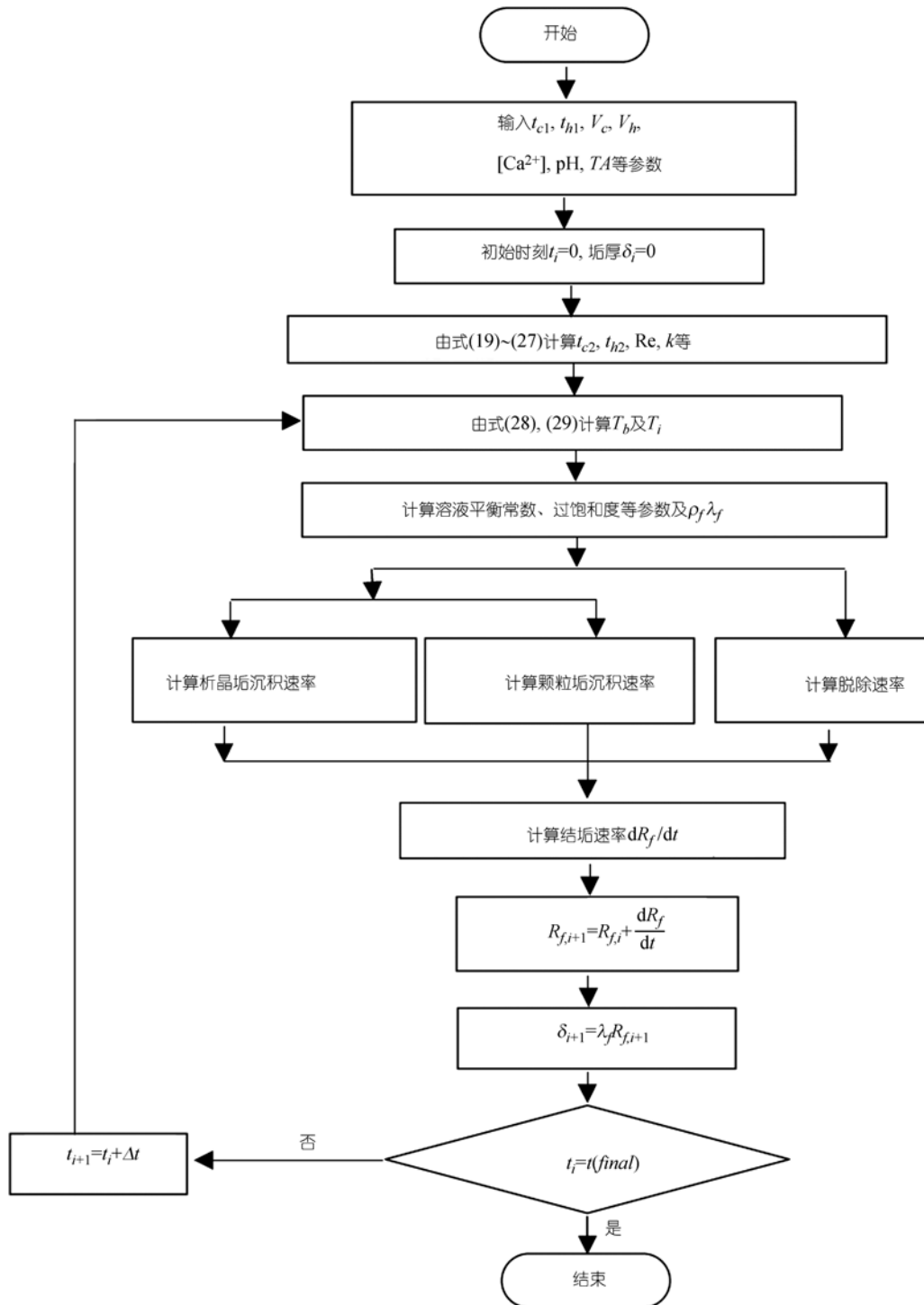


图 2 污垢预测模型计算框图

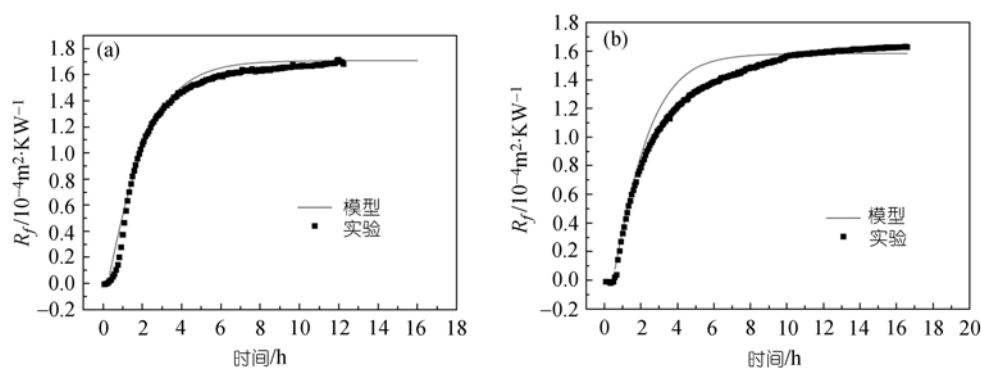


图3 模型计算与实验结果的比较

(a) $C=500 \text{ mg/L}$, $TA=500 \text{ mg/L}$, $t_{h1}=70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{c1}=22.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH}=7.95$, $V=1.2 \text{ m/s}$;(b) $C=300 \text{ mg/L}$, $TA=300 \text{ mg/L}$, $t_{h1}=70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{c1}=44.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH}=7.91$, $V=1.2 \text{ m/s}$

结垢的传热传质模型。模型中考虑了析晶污垢与颗粒污垢的沉积与脱除,而且将结垢过程的溶液及污垢特性应用其中。模型的计算结果表明污垢热阻随时间的预测值与实验值吻合得很好,偏差大部分小于15%,说明了本文污垢预测模型是正确可靠的。

参考文献

- 1 杨善让, 徐志明, 孙灵芳. 换热设备的污垢与对策. 第二版. 北京: 科学出版社, 2004. 3
- 2 刘中良, 施明恒, 戴锅生. 结晶垢结垢过程的传热传质模型. 化工学报, 1997, 48(4): 401—407
- 3 全贞花, 陈永昌, 王春明, 等. 污垢热阻动态监测装置及其传热计算方法的研究. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 322—324
- 4 Liu R. A study of fouling in a heat exchanger with an application of an electronic anti-fouling technology. Doctor Dissertation. Philadelphia: Drexel University, 1999. 41—63
- 5 邢晓凯. 碳酸钙于换热面上结垢与电磁抗垢的机理及实验研究. 博士学位论文. 北京: 北京工业大学, 2005. 48—56
- 6 Kern D Q, Seaton R E. A theoretical analysis of thermal surface fouling. British Chem Eng, 1959, 4(5): 258—262
- 7 Hasson D, Sherman H, Biton M. Prediction of calcium carbonate scaling rates. Proceedings 6th International Symposium Fresh Water from the Sea, 1978, 2: 193—199
- 8 Cleaver J W, Yates B. A sub-layer model for the deposition of particles from a turbulent flow. Chem Eng Sci, 1975, 31: 983—992
- 9 Turner C W. Rates of particle deposition from aqueous suspensions in turbulent flow: A comparison of theory with experiment. Chem Eng Sci, 1993, 48(12): 2189—2195 [\[DOI\]](#)
- 10 Papavergos P G, Hedley A B. Particle deposition behavior from turbulent flows. Chem Eng Res Des, 1984, 62: 275—295
- 11 Epstein N. Particles deposition and its mitigation. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Understanding Heat Exchanger Fouling and its Mitigation. Lucca, Italy, 1997. 11—16
- 12 Taborek J, Aoki T, Titter R B, et al. Predictive methods for fouling behavior. Chem Eng Prog, 1972, 68: 69—78