

# 浮点型涡流发生器 $\text{CaSO}_4$ 析晶污垢沉积的模拟研究

张一龙<sup>1</sup>, 刘坐东<sup>1</sup>, 徐志明<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206;

2. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘 要:** 采用污垢析晶污垢模型, 对布置有浮点的涡流发生器的矩形通道进行了污垢沉积数值模拟。研究表明: 单位面积污垢沉积量随着浮点尺寸的增大而减小, 随着浮点排列间距的增加而增大。但当半径一定且浮点间距值小于两倍的浮点直径值时, 间距变小不会减少污垢沉积量。将所得模拟结果与相关实验对比, 验证了所采用模型的准确性。

**关 键 词:** 涡流发生器; 析晶污垢;  $\text{CaSO}_4$ ; 数值模拟

中图分类号: TK224 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2014.06.023

## 引 言

析晶污垢是指在流动条件下呈过饱和的流动溶液中溶解的无机盐淀析在换热面上的结晶体<sup>[1]</sup>。目前, 析晶污垢的模型大都以文献[1]提出的微分方程为基础。文献[2]在研究  $\text{CaCO}_3$  结垢问题时, 将结晶学中描述关于晶体生长的经典离子扩散理论引入污垢研究, 提出了经典的离子扩散模型, 该模型忽略了脱除过程, 将污垢沉积过程简化两个阶段: 离子扩散和表面反应; 文献[3]在 Kern - Seaton 基本框架下, 以冷却塔用水为研究对象, 发现在常态流速下, 表面反应在污垢沉积过程中具有主要作用, 扩散则居次要地位。并据此提出污垢沉积和剥蚀速率计算模型, 进一步通过实验数据拟合, 得到了污垢热阻计算公式。文献[4]将 Hasson 的离子扩散模型的思想进一步推广, 针对换热面上析晶污垢结晶过程的预测问题, 提出了两步法析晶污垢生长模型, 对于  $\text{CaSO}_4$  析晶污垢, 其表面反应阶数为 2。

$\text{CaSO}_4$  污垢是换热表面常见一种析晶污垢,  $\text{CaSO}_4$  在溶液中的存在形态呈现多样化, 影响污垢沉积过程的因素很多, 如流体性质、壁温、流体流速、壁面状况、流体与壁面的温度梯度、湍流强度、流体与固体壁面的剪切应力等。浮点型涡流发生器是柱形涡流发生器的一种, 流体流过涡流发生器后产生

纵向涡起到强化换热的作用<sup>[5-6]</sup>, 其结构也会对污垢沉积过程产生影响。

本研究采用文献[7]的析晶污垢模型对  $\text{CaSO}_4$  污垢形成过程进行模拟, 并对装有涡流发生器后近壁涡流强度、壁面所受流体剪切力以及壁面附近速度场等相关量与光通道进行了分析对比, 以期更进一步深化  $\text{CaSO}_4$  污垢沉积机理的研究。

## 1 涡流发生器的数学模型

### 1.1 基本方程的建立及边界条件

采用商用软件 Fluent 6.3 进行数值计算, 湍流模型采用标准  $k - \varepsilon$  模型, 压力与速度解耦采用 SIMPLE 算法。动量和能量方程的离散采用二阶迎风格式。通过计算, 旨在得出相关计算区域的速度场、浓度场、污垢沉积率等。故需要联立以下方程进行求解。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

X 方向:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \eta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Y 方向:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \eta \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Z 方向:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \eta \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

收稿日期: 2014 - 03 - 14; 修订日期: 2014 - 03 - 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076025)。

作者简介: 张一龙(1983 -), 男, 黑龙江哈尔滨人, 华北电力大学博士研究生。

能量方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

传质方程:

$$\frac{\partial c_f}{\partial \tau} + u \frac{\partial c_f}{\partial x} + v \frac{\partial c_f}{\partial y} + w \frac{\partial c_f}{\partial z} = D \left[ \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_f}{\partial z^2} \right] - \frac{h_m}{\delta_T} (c_f - c_F) \quad (6)$$

式中:  $\rho$ —流体密度;  $u, v, w$ —主流速度沿直角坐标系 3 个方向的分速度;  $\nu$ —动力粘度;  $a$ —热扩散率;  $T$ —温度;  $\tau$ —时间;  $D$ —质扩散系数;  $h_m$ —传质系数;  $c_f$ —CaSO<sub>4</sub> 流体浓度;  $c_F$ —热边界层内溶液的浓度;  $\delta_T$ —热边界层厚度,  $\delta_T = \delta$ , 这里  $\delta$  为速度边界层厚度。

初始与边界条件的设置:  $\tau = 0$  时, 主流  $u_0 = 0.1$  m/s, 流体中 CaSO<sub>4</sub> 浓度  $c_f = 2100$  mg/L, 流体温度  $T = 323$  K, 壁面条件为绝热, 即忽略流体与实验段壁面换热, 考虑到污垢层  $\delta_f$  的增长会使的矩形通道的通流面积减小, 主流速度也发生变化, 所以  $\tau > 0$  时, 主流速度:

$$u = \frac{u_0 d_h^2}{4 \left( \frac{1}{2} d_h - \delta_f \right)^2} \quad (7)$$

式中:  $d_h$ —矩形通道的当量直径, 计算得  $d_h = 0.024$  m。



图 1 计算区域网格划分

Fig. 1 Grid division in the computational area

### 1.2 计算区域的离散

计算区域选取相关实验台实验段尺寸, 为 80 mm × 10 mm × 25 mm 的长方体。涡流发生器的形状为浮点型和楞型, 直径有 4.5 和 6 mm 3 种, 排列间距有 10、15 和 20 mm 3 种。由于在矩形通道内加装浮点型涡流发生器后, 反应面结构变复杂, 因此对

反应面采用非结构化网格进行划分。在 Fluent 后处理中使用网格自适应实现计算结果的网格独立性, 结果表明网格数量保持在 55 万以上时计算结果基本不再发生变化。计算区域网格划分如图 1 所示。

## 2 污垢沉积模型的建立

CaSO<sub>4</sub>在换热面的沉积的过程可以表示为:



由于壁面附近的离子减少, 在浓度差的驱使下, 主流中更多的离子向壁面运输, 为简化问题, 假设近壁热边界层内流体的统一浓度为  $c_f$  以区别于主流浓度  $c_F$ 。则 CaSO<sub>4</sub>在热边界层内沉积率可表示为:

$$\dot{m}_d = h_m (c_f - c_F) \quad (9)$$

CaSO<sub>4</sub>的沉积率还可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$\dot{m}_d = k_R (c_f - c_s)^2 \quad (10)$$

式中:  $\dot{m}_d$ —污垢沉积率;  $c_f$ —流体浓度;  $c_s$ —CaSO<sub>4</sub>饱和浓度, 是温度  $T$  的函数, 可以通过溶解度曲线<sup>[9]</sup>的拟合公式得到:

$$c_s = 1.46 \times 10^{-4} T^2 - 0.127 T + 26.60 \quad (11)$$

其中  $k_R$  是表面反应速率常数, 可以通过阿累尼乌斯定律<sup>[10]</sup>计算得到:

$$k_R = k_{R0} \exp \left( - \frac{E}{RT_F} \right) \quad (12)$$

式中:  $k_{R0} = 7.07 \text{ m}^4 / (\text{kg} \cdot \text{s})$ ;  $R$ —通用气体常数;  $E = 37143 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T_F$ —表面垢层温度。

结合式(9) - 式(12)式, 可得到 CaSO<sub>4</sub>污垢的沉积率:

$$\dot{m} = h_m \left\{ \frac{1}{2} \frac{h_m}{k_R} + \Delta c - \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{h_m}{k_R} \right)^2 + \frac{h_m}{k_R} \Delta c \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (13)$$

式中:  $\Delta c = c_f - c_s$ 。

传质系数可以用下列准则数计算<sup>[11]</sup>:

$$h_m = \frac{Sh \cdot D}{d_h} \quad (14)$$

对于层流传质问题:

$$Sh = 0.332 \cdot Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (15)$$

对于湍流传质问题<sup>[12]</sup>:

$$Sh = 0.034 Re^{0.875} Sc^{1/3} \quad (16)$$

式中: 雷诺数  $Re = u d_h / \nu$ ;  $Sc = \nu / D$ ;  $\nu$ —运动粘度。

质扩散系数  $D$  由流体力学理论推导可得到:

$$D = \frac{K_B T_f}{6 \pi r_f \mu} \quad (17)$$

式中:  $K_B$ —Boltzman 常数;  $T_f$ —流体的平均温度;  $r_d$  为溶质半径。

将式(12)、式(14)、式(15)或式(16)代入式(13),可得到  $CaSO_4$ 在壁面沉积速率模型以及建立在模型基础上的整个计算区域的浓度场。

### 3 模拟方法的实验验证

为说明模拟方法的可行性,现选取一组模拟数据与实验数据进行对比。根据两组数据的对比结果,对其模拟方法的可行性进行验证。

图2显示的是直径5 mm,列间距15 mm浮点涡流发生器实验结果和模拟结果对比以及误差分布。二者在生长规律以及生长趋势上符合的较好,通过与实验结果对比可以看到,模拟结果在结垢初始阶段与实验结果相比存在着较大的差异,随着时间的增长,80%模拟结果相对实验结果的误差基本落在15%以内,表明模型是可靠的。

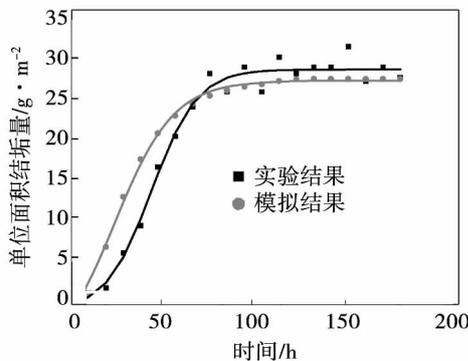


图2 实验和模拟数据对比

Fig. 2 Contrast between the test data and the simulation ones

由于当前计算模型所考虑影响污垢生长因素比实验中考虑的因素少,且未考虑诱导期给污垢生长规律带来的变化,加之实验过程中污垢生长的复杂性,个别测点可能因污垢生长分布不均匀而未能如实反映表面污垢生长实际过程,故而前期误差较大。

### 4 计算结果与分析

模拟过程中,取值的时间步长取  $\Delta t = 3\ 600\ s$ ,选择装有涡流发生器的壁面为检测面,第一个时间步长内即  $t = 0 - 3\ 600\ s$ 内,监视面污垢总沉积质量

$m = m_d \cdot \Delta t$ ,每个时刻的  $m_d$ 已经通过计算得到,随着时间的进一步增长,可以得到通道表面污垢生长曲线。

#### 4.1 浮点直径对污垢沉积的影响

图3-图5分别显示的是列间距为10、15和20 mm时,不同浮点直径的涡流发生器  $CaSO_4$ 析晶污垢单位面积污垢沉积量。在以上3组曲线中可以看出,单位面积沉积量均随着浮点半径的增大而减少。其原因是,浮点直径的增大会使得通道截面上有效通流面积发生减小,流体流过涡流发生器受到的阻力增大,加之速度变化趋于剧烈,流过涡流发生器后产生的纵向涡强度有所增大,有效抑制了壁面污垢生长渐近值,故表面单位面积污垢生长量随着浮点直径的增大呈减小趋势。

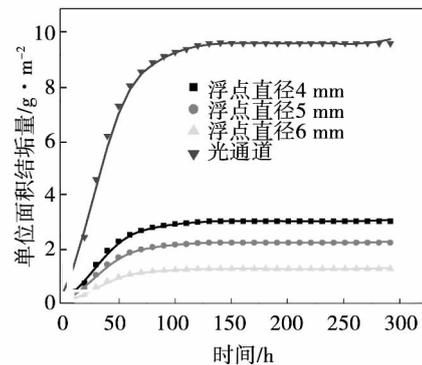


图3 列间距10 mm不同直径单位面积结垢量

Fig. 3 Unit area fouling quantity at various diameters with the spacing between the columns being 10 mm

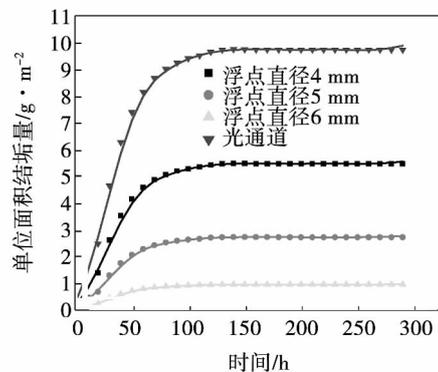


图4 列间距15 mm不同直径单位面积结垢量

Fig. 4 Unit area fouling quantity at various diameters with the spacing between the columns being 15 mm

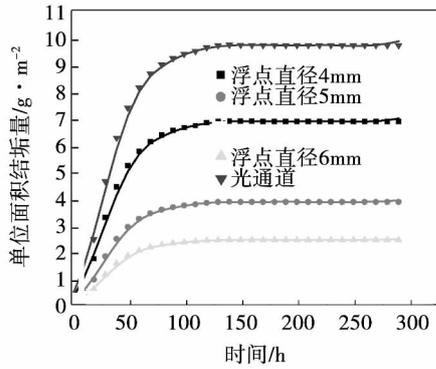


图 5 列间距 20 mm 不同直径单位面积结垢量  
Fig. 5 Unit area fouling quantity at various diameters with the spacing between the columns being 20 mm

#### 4.2 浮点间距对污垢沉积的影响

图 6 – 图 8 分别显示的是直径为 4、5 和 6 mm 时, 不同排列间距浮点型涡流发生器  $\text{CaSO}_4$  析晶污垢单位面积污垢沉积量。在给定浮点半径的情况下, 在直径为 4 和 5 mm 时, 表面单位面积沉积量随着列间距的增大而逐渐增加。分析其原因, 随着列间距的增大, 流体流过涡流发生器产生的纵向涡强度以及纵向涡叠加区域均减小, 壁面受到流体冲刷剥蚀作用也相应降低。漩涡与剪切力的叠加作用伴随间距减小而加强, 故而单位面积污垢沉积量呈现逐渐增大的趋势。

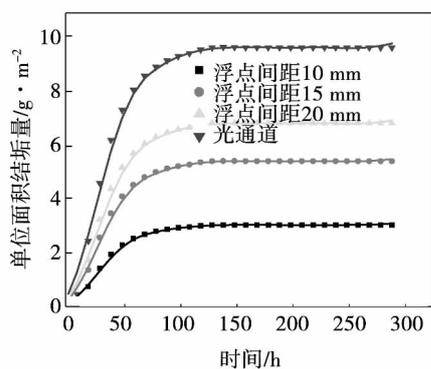


图 6 直径 4 mm 不同间距单位面积结垢量比较  
Fig. 6 Comparison of the fouling quantity at the diameter of 4 mm at various spacings between columns

直径为 6 mm 时, 列间距 15 mm 的沉积率最小, 其次为 10 mm, 最后为 20 mm, 产生这种现象的原因: 排列间距存在一个最佳值, 使得前侧的浮点与后

侧浮点产生的漩涡与剪切力的叠加作用最好<sup>[13]</sup>。从以上数据中发现, 在浮点间距值大于或等于两倍的浮点直径值时, 间距与沉积率呈现同相变化。但是在浮点间距值小于两倍的浮点直径值时, 漩涡与剪切力的叠加作用, 不能够继续强化其抑垢效果, 因此图 8 情况出现。

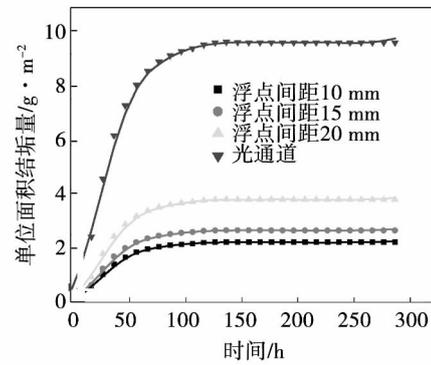


图 7 直径 5 mm 不同间距单位面积结垢量比较  
Fig. 7 Comparison of the fouling quantity at the diameter of 5 mm at various spacings between columns

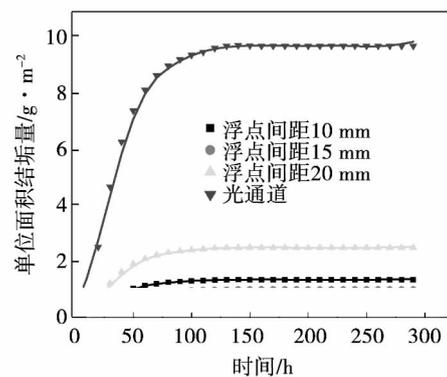


图 8 直径 6 mm 不同间距单位面积结垢量比较  
Fig. 8 Comparison of the fouling quantity at the diameter of 6 mm at various spacings between columns

## 5 结 论

采用析晶污垢数学模型, 对浮点型涡流发生器通道  $\text{CaSO}_4$  析晶污垢进行了数值模拟, 并将得出的表面单位面积污垢沉积量和实验数据进行了比较, 得出结论:

(1) 在给定浮点涡流发生器列间距的情形下, 表面单位面积污垢沉积量随着浮点直径的增大而减小;

(2) 在给定浮点直径的情形下, 且浮点间距值大于或等于两倍的浮点直径值时, 表面单位面积污垢沉积量随着浮点涡流发生器排列间距的增大而逐渐增加;

(3) 在给定浮点直径的情形下, 且浮点间距值小于两倍的浮点直径值时, 减小间距不能增强抑垢效果。

#### 参考文献:

- [1] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳. 换热设备污垢与对策. 第二版[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
YANG Shan-rang, XU Zhi-ming, SUN Ling-fang. Fouling on heat exchange equipment and countermeasures (Second Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] Hasson D, Avriel M, Resnick W. Calcium carbonate scale deposition on heat transfer surfaces [J]. Desalination. 1968, 5(1): 107 - 119.
- [3] Taborek J, Aoki T, Ritter R B, Palen J W. Predictive methods for fouling behavior [J]. Chemical Engineering Progress. 1972, 68(7): 69 - 78.
- [4] Bohnet M. Fouling of heat transfer surfaces [J]. Chem. Eng. Technol. 1985, 10: 113 - 125.
- [5] 田丽亭, 雷勇刚, 何雅玲. 纵向涡强化换热特性及机理分析 [J]. 工程热物理论, 2008, 29(12): 2128 - 2130.  
TIAN Li-ting, LEI Yong-gang, HE Ya-ling. Intensified heat exchange characteristics of longitudinal vortexes and their mechanism analysis [J]. Journal of Engineering Thermophysics. 2008, 29(12): 2128 - 2130.
- [6] 刘刚, 刘伟, 牟斌, 等. 涡流发生器数值计算方法研究 [J]. 空气动力学学报, 2007, 25(2): 241 - 244  
LIU Gang, LIU Wei, MU Bin, et al. Investigation of the methods for numerically calculating vortex generators [J]. ACTA AERODYNAMICA SINICA. 2007, 25(2): 241 - 244.
- [7] 徐志明, 张进朝. CaSO<sub>4</sub> 析晶污垢形成过程的数值模拟 [J]. 东北电力大学学报. 2008, 28(1): 8 - 11.  
XU Zhi-ming, ZHANG Jin-chao. Numerical simulation of the CaSO<sub>4</sub> crystal precipitation and fouling process [J]. Journal of Northeast University of Electric Power 2008, 28(1): 8 - 11.
- [8] 孙卓辉. 换热面上结垢过程数值模拟 [D]. 东营: 中国石油大学, 2008.  
SUN Zhuo-hui. Numerical simulation of the fouling process on the heat exchange surfaces [D]. Dongying: China University of Petroleum 2008.
- [9] 鲍智江, 李建隆, 王伟文. 硫酸钙在调和液中的溶解度. 化学工程 [J]. 1995, 23(5): 21 - 26.  
BAO Zhi-jiang, LI Jian-long, WANG Wei-wen. Solubility of calcium sulfate in ready-mixed solutions [J]. Chemical Engineering, 1995, 23(5): 21 - 26.
- [10] 平亚明, 孙奉仲, 高明. 结垢换热面流体流动特性对于污垢热阻的影响研究. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2004, 19(4): 459 - 462.  
PING Ya-ming, SUN Feng-zhong, GAO Ming. Study of the influence of the flow characteristics of fluids on the heat exchange surfaces being fouled on the heat resistance of fouling [J]. Journal of Research and Development of Hydrodynamics 2004, 19(4): 459 - 462.
- [11] 周萍, 周乃君, 蒋爱华, 陈红荣. 传递过程原理及其数值仿真 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.  
ZHOU Ping, ZHOU Nai-jun, JIANG Ai-hua, et al. Transfer process principles of and their numerical simulation [M]. Changsha: Central South University Press, 2006.
- [12] Brahim F, Augustin W, Bohnet M. Numerical simulation of the fouling process [J]. International Journal of Thermal Sciences. 2003, 42(3): 323 - 334.
- [13] 王维斌, 博宪辉, 李选友, 等. 脉动燃烧器不同形式风冷翅片传热与流动特性的数值模拟 [J]. 能源研究与利用, 2010, (1): 24 - 29.  
WANG Wei-bin, BO Xian-hui, LI Xuan-you, et al. Numerical simulation of the heat transfer and flow characteristics of the air cooled fins in various forms in a pulsation burner [J]. Energy Source Research and Utilization 2010, (1): 24 - 29.

(丛敏编辑)

hibits the quasi-dispersed flow characteristics. The role of further increasing the air consumption rate played in improving the gas-liquid dilution-mixing effectiveness is limited. The data of the flow rate obtained during the numerical calculation is in relatively good agreement with the test data. The relative error of the liquid flow rate is less than 5% and that of the gas flow rate is less than 10%. **Key Words:** standard Y type nozzle, air consumption rate, flow characteristics, two-phase flow, numerical simulation

浮点型涡流发生器  $\text{CaSO}_4$  析晶污垢沉积的模拟研究 = **Simulation Study of the  $\text{CaSO}_4$  Crystallization Foul Deposition in a Floating Point Type Vortex Generator** [刊, 汉] ZHANG Yi-long, LIU Zuo-dong ( College of Energy Source, Power and Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206), XU Zhi-ming ( College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29( 6). - 693 - 697

By using the model for crystallization fouls, numerically simulated was the deposition of foul in a rectangular channel equipped with a floating point type vortex generator. It has been found that the amount of foul deposited in a unit area will decrease with an increase of the floating point dimensions and increase with an increase of the spacing between the floating points arranged. However, when the radius of the floating point is definite and the spacing between the floating points is less than two times of the diameter of the floating point, to decrease the spacing cannot decrease the amount of foul deposited. A comparison of the simulation results with the relevant test results verifies that the model adopted is correct. **Key Words:** vortex generator, crystallized foul,  $\text{CaSO}_4$ , numerical simulation

超临界直流锅炉变工况实时运行中间点温度控制研究 = **Study of the Real Time Operation Intermediate Point Temperature Control of a Supercritical Once-through Boiler Under the Off-design Operating Conditions** [刊, 汉] YUAN Shu-juan, MA Li-xin, DAI Shu-guang ( College of Photoelectric Information and Computer Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), YUAN Shu-juan ( College of Electrical Engineering, Shanghai College of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29( 6). - 698 - 702

To set up a dynamic load response system for power generation equipment items is regarded as an effective method for enhancing the power source control efficiency. The output power of a thermal power generation unit depends on the feedwater and fuel quantity fed into its boilers. With a supercritical once through boiler serving as the object of study, the authors analyzed the relationship of the feedwater and fuel quantity with the intermediate point temperature of the boilers and on this basis, established a nonlinear discrete model for intermediate temperatures and de-