

# 电站锅炉受热面灰污剥离模型

潘亚娣, 司风琪, 徐治皋

(东南大学能源与环境学院, 江苏省南京市 210096)

## Removal Model of Fouling on Coal-fired Utility Boilers' Heating Surface

PAN Ya-di, SI Feng-qi, XU Zhi-gao

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Based on transmission characteristics of inter-particle force in granular medium and the force conditions of deposition particle, the removal mechanism of pre-deposited particles on boiler's tube surface was studied. On the basis of the inertial collision transport mechanism in boiler flue, a new particle-granules inertial collision removal model was proposed with the definition of a critical removal velocity. Such that, a new comprehensive fouling growth model for boiler's heating surface was obtained by integrating with a deposition model. A case study of the impact for copper particle with pre-deposited medium was also given, whose results were basically consistent with experiment data. A computation fluid dynamics simulation of fouling deposition on economizer's tube surface was implemented to demonstrate the validity of proposed comprehensive model. In this simulation, the distribution state and growth characteristics of fouling deposition were accurately reconstructed and the great influence of particle velocity on fouling growth cycle was also revealed.

**KEY WORDS:** coal-fired utility boiler; removal; fouling monitoring; critical velocity; granular material

**摘要:** 基于散体内力的传递特性和沉积颗粒的受力分析, 研究了沉积颗粒的剥离机制。根据烟道内飞灰颗粒的惯性输运沉积特性, 建立了颗粒与沉积散体间的惯性碰撞剥离模型, 并提出了沉积颗粒的临界剥离速度准则。结合灰污沉积模型, 获得了受热面灰污增长综合模型。以铜粒子惯性碰撞沉积为对象进行算例分析, 模型预测结果与实验数据基本相符。采用该模型完成了某电厂省煤器换热管积灰的计算流体动力学(computation fluid dynamics, CFD)模拟仿真, 仿真结果验证了此灰污增长综合模型的有效性。该模型能准确反应实际受热面灰污的分布和增长特征, 同时揭示了颗粒速度对灰污增长周期有较大的影响。

**关键词:** 燃煤锅炉; 剥离; 灰污监测; 临界速度; 散体

## 0 引言

燃煤电站锅炉受热面积灰结渣将引起传热效

率下降、烟气流堵塞、管壁腐蚀等, 对锅炉的安全经济运行具有重要影响<sup>[1]</sup>。锅炉受热面积灰受管子壁温、烟气流速等多种因素的影响: 文献[2]通过实验研究了受热面无积灰的临界烟气流速, 其值随颗粒形状、粒径等因素的变化而变化; Rodriguez 等<sup>[3]</sup>研究了无积灰管子壁温与烟气流速之间的关系。由于锅炉受热面总是或多或少地存在积灰现象, 因此基于无积灰管壁的研究成果不能直接应用到锅炉实际运行中, 本文从积灰机制的角度研究灰污的形成和去除规律, 对锅炉的经济运行和吹灰优化操作具有重要理论指导意义。

基于 Kern-Seaton 理论, 灰污剥离是受热面积灰过程中的一个重要环节, 相关机制的研究也一直是受热面积灰方面的热点问题, 研究表明灰污的剥离率取决于流体的速度<sup>[3-4]</sup>; Polley<sup>[5]</sup>和 Rodriguez 等<sup>[3]</sup>认为灰污的剥离率正比于雷诺数的 0.8 次方; Bouris 等<sup>[6-7]</sup>指出了灰污的剥离与流体的剪切流相关。电站锅炉烟道内飞灰颗粒输运沉积的主要机制是惯性力的作用<sup>[8]</sup>, 对于锅炉受热面积灰剥离机制的研究也要建立在灰污惯性碰撞沉积的基础上。

根据沉积颗粒的起动原理, 颗粒的起动形式分为接触力起动和非接触力起动。接触力起动又分为冲击起动、振动起动和斜面飞升; 非接触力起动分为风压起动、升力起动、压差起动、涡旋起动和猝发起动等。电站锅炉烟道内, 沉积颗粒所受的气动力较小, 颗粒的起动以冲击起动为主, 灰污剥离的动力主要为流道内悬浮颗粒的惯性碰撞。本文根据颗粒与沉积体之间的碰撞特征和沉积体内颗粒间力的传播方式, 提出了颗粒与沉积体之间的惯性碰撞剥离模型, 结合颗粒的沉积模型, 获得了对流受热面因飞灰颗粒的惯性碰撞而形成的灰污增长综

合模型。完成了与实验结果比较和本模型的计算流体动力学(CFD)仿真。

## 1 剥离模型

### 1.1 颗粒与沉积散体的碰撞接触力学性能

根据空气动力学原理,关于平面上单个滞留颗粒的起动分离机制的研究比较早,已有成熟的模型提出,并广泛运用于气力或水力输运、风沙岩土学等领域,但此模型不适合锅炉积灰的剥离特征。Ramadan 等<sup>[9]</sup>指出当气流中存在悬浮颗粒时,除了气动力之外,悬浮颗粒与沉积颗粒的碰撞对颗粒的初始运动影响很大,尤其是在悬浮颗粒的尺寸与沉积颗粒尺寸相当的情况下。

当颗粒因惯性力作用而碰撞沉积散体时,根据接触力学,颗粒与沉积散体之间的法向接触力为

$$F_{in} = \frac{4}{3} E^* R^{*1/2} \delta^{3/2} \quad (1)$$

式中:  $R^*$  为有效接触半径;  $E^*$  为碰撞体之间的有效弹性模量;  $\delta$  为碰撞法向接触位移; 根据 Hertz 碰撞理论,最大法向接触位移与颗粒法向冲击速度  $w_{in}$  之间的关系为

$$\delta_{max} = \left( \frac{15m^* w_{in}^2}{16E^* R^{*0.5}} \right)^{0.4} \quad (2)$$

其中  $m^*$  为有效碰撞质量, 定义为

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_p} + \frac{1}{m_g} \quad (3)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_g} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-u_p^2}{E_p} + \frac{1-u_g^2}{E_g} \quad (5)$$

式中:  $u$  为泊松比; 下标  $p$ 、 $g$  分别代表冲击颗粒和沉积体。

根据散体力学理论,当沉积散体受到  $F_{in}$  的碰撞接触力时,力在散体内的传播与扩散受散体颗粒的形状尺寸、散体堆积特征、孔隙率、力链分布等多种因素的影响。当散体颗粒为球形颗粒,并按如图 1 所示六边形堆积时,力在散体内的传播与分布具有搭拱效应,并且沿着互成  $60^\circ$  角的 2 个方向形成双峰<sup>[10-11]</sup>。图 1 中粗线表示峰值应力的分布位置。

当飞灰颗粒 1 与沉积体内的目标颗粒 2 发生碰撞时,通过散体内的力链,颗粒 2 将碰撞冲击力传递给与之相邻的颗粒 3 和颗粒 4,接着,颗粒 3 和颗粒 4 又将冲击力继续在散体内传递下去。目标颗

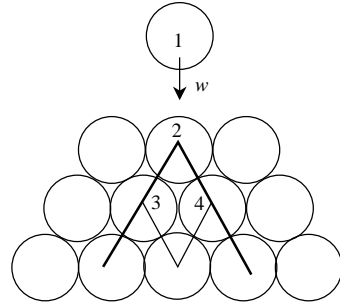


图 1 颗粒冲击沉积散体示意图

Fig. 1 Diagram of the impact between particle and granular medium

粒 2 在冲击力  $F_{in}$ 、颗粒 3 和颗粒 4 反作用力下的总法向分力可表示为

$$F_n = k_{Fn} F_{in} \quad (6)$$

其中系数  $k_{Fn}$  取决于颗粒堆积方式和力在散体内的传递特征。

### 1.2 散体颗粒的剥离机制

散体内的目标颗粒除了受到碰撞冲击力之外,还受到流场的其他作用力,其受力情况如图 2<sup>[12]</sup>所示。图中:  $F_n$  表示颗粒被碰撞冲击后所受的总法向作用力;  $F_g$  表示颗粒的重力;  $F_b$  表示烟气对颗粒的浮力,相对于颗粒的密度,烟气气流的密度要小得多,一般情况下,颗粒所受的浮力可忽略不计;  $F_{lv}$  表示由流体沿颗粒尺度方向的速度差产生的升力;  $F_{adh}$  为颗粒与相邻接触面之间的黏附作用力;  $F_d$  为烟气流对颗粒的拖曳力;  $F_f$  为颗粒与相邻接触面之间的摩擦力。

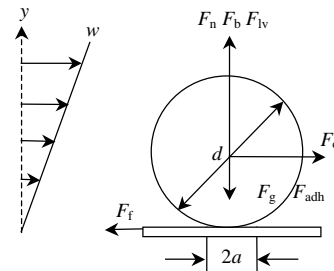


图 2 散体内目标颗粒的受力分析

Fig. 2 Forces diagram of target particle in granular medium

根据牛顿第一定律,颗粒在垂直方向上的力平衡方程为:

$$F_n + F_b + F_{lv} - F_g - F_a = 0 \quad (7)$$

$$F_{lv} = 1.625 \rho_f d_p^2 \sqrt{v_f} w_r \sqrt{\partial u / \partial y} \quad (8)$$

式中:  $\nu_f$  为流体的黏度;  $w_r$  为颗粒与流体的相对速度,由于飞灰颗粒的粒径比较小,在颗粒粒径范围内,烟气速度沿  $y$  方向的梯度很小,因此,颗粒所受的升力通常可忽略不计<sup>[12-13]</sup>;  $F_a$  表示颗粒脱离沉

积体所需克服的内应力，它源于颗粒与相邻接触面之间的黏附作用：

$$F_a = 3k_a \pi R_p \Gamma \quad (9)$$

式中： $\Gamma$ 为接触体间的表面能； $R_p$ 为颗粒的半径； $k_a$ 为黏附力系数，取决于所处沉积散体的孔隙率 $p$ 、配位数 $\bar{m}$ 等堆积特征<sup>[14]</sup>。

锅炉尾部烟道内的飞灰颗粒粒径一般都比较小，属于微米级粉末颗粒，对于粒径小于 100  $\mu\text{m}$  的颗粒，接触面黏附力的数量级是重力数量级的 1000 倍<sup>[11,15]</sup>，因此，相对于黏附力，粉末颗粒的重力对剥离的影响很小，可忽略不计。

由式(7)可见，目标颗粒 2 主要受到来流颗粒惯性碰撞引起的接触力  $F_n$  和内应力  $F_a$  的作用，前者称为沉积颗粒的剥离动力，后者称为剥离阻力。当目标颗粒 2 受到向上的剥离动力大于向下的剥离阻力时，颗粒就跳离沉积体，进入烟气流通道<sup>[16-17]</sup>，此时，来流颗粒的冲击速度称为临界剥离速度，综合以上各式可导出临界剥离速度的表达式：

$$w_{mn\_cri} = 0.812 \ 6 \left( \frac{F_a^5}{R^5 E^* m^* k_{Fn}^5} \right)^{1/6} \quad (10)$$

基于此颗粒惯性碰撞剥离模型，结合惯性碰撞沉积模型，便组成了完整的锅炉受热面灰污增长综合模型。当烟道内的颗粒与沉积散体发生惯性碰撞时，在临界黏附角之外，受热面上没有积灰；在临界黏附角以内，若颗粒的冲击速度小于临界反弹速度，颗粒便黏附沉积于受热面，灰污沉积量增加；若颗粒的冲击速度大于临界反弹速度而小于临界剥离速度，颗粒与沉积体发生碰撞之后便弹离沉积表面，灰污沉积量保持不变；若颗粒的冲击速度大于临界剥离速度，冲击颗粒弹离沉积表面的同时，还将诱发沉积体内的颗粒跳离沉积体，灰污沉积量减小。

## 2 实例验证和 CFD 模拟

### 2.1 实例验证

对于给定的流场和沉积散体，根据本文提出的受热面灰污增长综合模型，可以获取确切的颗粒黏附/反弹/剥离准则。为便于比较，根据文献[18]选取模型参数，冲击颗粒和沉积散体颗粒均选用粒径为 50  $\mu\text{m}$  的铜粒子，当散体孔隙率为 0.42 时，颗粒的临界反弹速度和临界剥离速度如表 1 所示。

表 1 中文献[18]的模拟结果是依据离散单元法模拟所得的灰污沉积准则获得的，该模型将受热面上的沉积体看成是一个个独立的颗粒体(即稠密相

表 1 颗粒反弹剥离准则  
Tab. 1 Criteria of rebound and removal

参数	文献[18]		本文
	模拟	实验	
临界反弹速度/(m/s)	0.10	0.18	0.13
临界剥离速度/(m/s)	0.50	0.60	0.54

颗粒)，根据牛顿第二定律，分析碰撞过程中来流颗粒和所有沉积颗粒之间的相互作用，以及各颗粒的力与位移之间的关系。由表 1 可知，由本文模型预测所得的颗粒临界反弹速度和临界剥离速度与文献[18]的研究结果基本相符，并且其值较文献[18]的模拟结果更接近实验结果，说明本模型是合理可靠的。文献[19]通过实验研究发现：当颗粒的冲击速度大于某一临界值时，冲击颗粒反弹的同时，还诱发沉积体内的一个颗粒跳离沉积体；继续增加冲击速度，可使沉积体内的多个颗粒跳离沉积体。对于诱发多个颗粒跳离沉积体的临界准则，还有待进一步研究。

### 2.2 CFD 模拟

本文借助 CFD 技术，采用灰污增长综合模型模拟实际燃煤电站锅炉换热管表面的灰污沉积过程。模拟参数采用某电厂省煤器的工作参数：烟气速度为 6 m/s，飞灰流率约 0.005 kg/s，管壁温度为 425  $^{\circ}\text{C}$ ，省煤器进口烟温为 547  $^{\circ}\text{C}$ 。

鉴于流场的对称性，为简化模型，以省煤器入口处换热管表面灰污增长过程为例。使用交错非结构网格划分流场<sup>[20]</sup>，通过 Fluent 软件，采用标准  $k-\epsilon$  模型和 SIMPLE 算法模拟流场特征<sup>[20-21]</sup>。基于本文提出的灰污增长综合理论模型，结合 Fluent 提供的预定义宏，编辑用户自定义函数 DEFINE\_DPM\_EROSION()，模拟流道内飞灰颗粒的沉积、反弹、剥离特征，并将此函数动态连接到 Fluent 的离散相模型求解器中。函数中反映受热面灰污增长特征的主要代码为：

```
DEFINE_DPM_EROSION(dpm_accr, p, t, f, normal,
alpha, Vmag, Mdot)
{
.....
if (alpha_a > angle_cri)
return; /*切向滑移*/
if (vn > vbcri_normal && vn < vmcri_normal)
return; /*反弹*/
if (vn < vbcri_normal) /*沉积*/
{.....
F_UDMI(f,t,0) += P_MASS(p);
```

```

F_UDMI(f, t, 1) = num_in_data + 1;
}
else if (vn > vmcri_normal) /*剥离*/
{
.....
F_UDMI(f, t, 0) = P_MASS(p);
F_UDMI(f, t, 1) = num_in_data - 1;
}
.....
}
    
```

省煤器换热管表面积灰分布与灰污增长的模拟结果如图3所示，其中  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  分别代表不同的时刻。

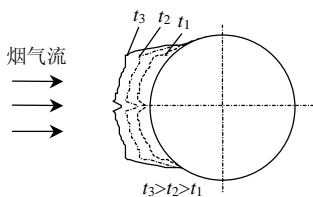


图3 受热面灰污分布状态  
Fig. 3 Distribution of fouling on heating surface

颗粒的惯性碰撞沉积主要发生在管子的迎风面，本模型着重研究颗粒的惯性碰撞沉积，并忽略管子背风面因颗粒绕流而发生的漩涡沉积。由图3可知，灰污沿换热管周向分布状态以及灰污增长随时间的变化与省煤器换热管实际积灰情况基本一致。根据传热理论，管式受热面的传热系数  $K$  可简化为多层平壁的传热系数进行计算，即

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\delta_t}{\lambda_t} + \frac{\delta_o}{\lambda_o} + \frac{1}{\alpha_o} \quad (11)$$

式中： $\alpha$ 表示流体对流传热系数，下标  $i$ 、 $o$  分别表示管内和管外； $\delta$ 、 $\lambda$ 表示厚度和导热系数，下标  $t$ 、 $i$ 、 $o$  分别表示换热管、管内污垢和管外积灰。锅炉稳态运行时，管内污垢很少，金属管壁的导热系数较大，而管外积灰的导热系数较小且积灰层不断加厚，故管外灰污热阻对总传热系数的影响最大。沿管子圆周受热面总传热系数随着积灰的增长而减小，管子周向传热系数变化量经归一化之后的分布如图4所示，图中曲线反映的是传热系数的减小量。

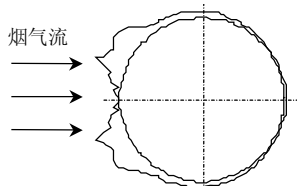


图4 归一化传热系数变化量沿管子圆周分布  
Fig. 4 Distribution of normalized heat transfer coefficient change along the circle of tube

经 Fluent 模拟，受热面灰污沉积量和平均传热系数随运行时间的变化如图5所示。

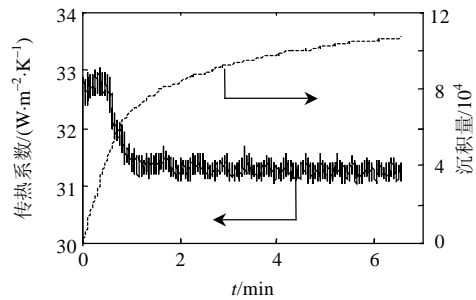


图5 沉积量和传热系数随时间的变化  
Fig. 5 Change of amount of deposition particles and mean heat transfer coefficient with operation time

图5表明，省煤器换热管表面飞灰颗粒的沉积量先快速增长，然后增长速度逐渐减缓，最后趋于稳定；平均传热系数随灰污增长变化而相应地减小，这与实际电厂监测的省煤器换热管表面灰污增长规律一致。由于该 CFD 模型仅模拟省煤器入口处包含单根换热管的对称流场，忽略了流场结构等因素的影响，因此沉积量趋于饱和的时间与实际情况相比略短。

### 2.3 模拟比较

保持烟气流道结构、烟气温度、飞灰浓度等参数不变，增加颗粒流速，CFD 模拟结果显示灰污的分布状态和增长趋势等基本保持不变，而灰污增长趋于饱和的时间即灰污增长周期有显著变化。图6为不同颗粒流速下的沉积量随运行时间的变化示意图。

受热面灰污的增长是飞灰颗粒沉积与剥离共同作用的结果，因此灰污增长率为沉积率与剥离率之差。在运行初始阶段，沉积率显著大于剥离率，受热面积灰量快速增加；随着灰污的增长，沉积率逐渐下降，剥离率逐渐增大，最终沉积率与剥离率相等，灰污增长趋于稳定。对于给定的流场和气固两相流，根据本文的灰污增长综合模型，可以获得确定的颗粒沉积准则和剥离准则，当颗粒流速增长

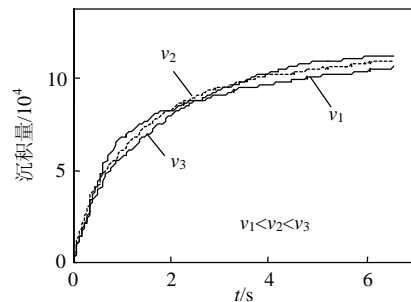


图6 流速对沉积量的影响  
Fig. 6 Influence of velocity on deposition

时, 法向冲击速度小于临界反弹速度的颗粒占颗粒总数的百分比下降, 即沉积率下降, 而冲击速度大于临界剥离速度的颗粒占颗粒总数的百分比增加, 即剥离率增大, 故灰污增长率减小, 灰污增长周期增大。图 6 所示的 CFD 模拟结果的比较也证实了颗粒流速对灰污增长量和增长周期有较大影响。

### 3 结论

本文基于颗粒与沉积散体间的惯性碰撞原理和沉积体内力的传播特征, 研究了颗粒与沉积体之间的惯性碰撞剥离机制, 提出了受热面积灰的临界剥离速度准则, 完成了受热面灰污增长综合模型的构建。经实验比较和 CFD 模拟验证, 此灰污综合增长模型是有效的, 可用于电厂锅炉灰污增长模拟和吹灰指导, 并且揭示了颗粒速度对灰污增长周期有较大的影响。

本文研究的颗粒惯性碰撞剥离模型, 其剥离方式仅考虑了颗粒的法向跳离, 关于沉积颗粒的切向滑移、旋转剥离以及多颗粒剥离等还有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] Senior C L. Predicting removal of coal ash deposits in convective heat exchangers[J]. *Energy & Fuels*, 1997, 11(2): 416-420.
- [2] Abd-elhady M S, Rindt C C, Wijers J G, et al. Minimum gas speed in heat exchangers to avoid particulate fouling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(17-18): 3943-3955.
- [3] Rodriguez C, Smith R. Optimization of operating conditions for mitigating fouling in heat exchanger networks[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, 85(6): 839-851.
- [4] 陈宝康, 阎维平, 朱予东, 等. 燃煤电站锅炉对流受热面灰污层增长预测模型的研究[J]. *华北电力大学学报*, 2004, 31(2): 32-35. Chen Baokang, Yan Weiping, Zhu Yudong, et al. Prediction of ash fouling on heat transfer surface of coal fired utility boiler[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2004, 31(2): 32-35(in Chinese).
- [5] Polley G T, Wilson D I, Yeap B L, et al. Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery pre-heat trains[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(7): 777-788.
- [6] D Bouris G B. Numerical calculation of the effect of deposit formation on heat exchanger efficiency[J]. 1997, 40(17): 4073-4084.
- [7] Bergeles G, Bouris D, Yianneskis M, et al. Effects of fouling on the efficiency of heat exchangers in lignite utility boilers[J]. *Applied Thermal Engineering*. 1997, 17(8-10): 739-749.
- [8] Konstandopoulos A G, Rosner D E. Inertial effects on thermophoretic transport of small particles to walls with streamwise curvature—I. theory[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38(12): 2305-2315.
- [9] Ramadan A, Skalle P, Johansen S T. A mechanistic model to determine the critical flow velocity required to initiate the movement of spherical bed particles in inclined channels[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(10): 2153-2163.
- [10] Geng J, Reydellet G, Cl E, et al. Green's function measurements of force transmission in 2D granular materials[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2003, 182(3-4): 274-303.
- [11] Abd-elhady M S, Rindt C C, Van S A. Contact time of an incident particle hitting a 2D bed of particles[J]. *Powder Technology*, 2009, 191(3): 315-326.
- [12] Rabinovich E, Kalman H. Incipient motion of individual particles in horizontal particle-fluid systems: B. theoretical analysis[J]. *Powder Technology*, 2009, 192(3): 326-338.
- [13] Akhatov I S, Hoey J M, Swenson O F, et al. Aerosol focusing in micro-capillaries: theory and experiment[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2008, 39(8): 691-709.
- [14] Calvert G, Ghadiri M, Tweedie R. Aerodynamic dispersion of cohesive powders: a review of understanding and technology [J]. *Advanced Powder Technology*, 2009, 20(1): 4-16.
- [15] Anandarajah A. Multi-mechanism anisotropic model for granular materials[J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24(5): 804-846.
- [16] Descamps I, Harion J L, Baudoin B. Taking-off model of particles with a wide size distribution[J]. *Chemical Engineering and Processing Pneumatic Conveying and Handling of Particulate Solids*, 2005, 44(2): 159-166.
- [17] Ibrahim A H, Dunn P F, Qazi M F. Experiments and validation of a model for microparticle detachment from a surface by turbulent air flow[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2008, 39(8): 645-656.
- [18] Abd-elhady M S, Rindt C C, Wijers J G, et al. Modelling the impaction of a micron particle with a powdery layer[J]. *Powder Technology*, 2006, 168(3): 111-124.
- [19] Abd-elhady M S, Rindt C C, Wijers J G, et al. Particulate fouling in waste incinerators as influenced by the critical sticking velocity and layer porosity[J]. *Energy*, 2005, 30(8): 1469-1479.
- [20] Lee B E, Fletcher C A, Shin S H, et al. Computational study of fouling deposit due to surface-coated particles in coal-fired power utility boilers[J]. *Fuel*, 2002, 81(15): 2001-2008.
- [21] Tomczek J, Waclawiak K. Two-dimensional modelling of deposits formation on platen superheaters in pulverized coal boilers[J]. *Fuel*, 2009, 88(8): 1466-1471.



潘亚娣

收稿日期: 2009-06-18。

作者简介:

潘亚娣(1976—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电厂锅炉安全经济运行、性能诊断及优化技术等, panyd2005@163.com;

司凤琪(1973—), 男, 博士, 副教授, 从事大型火电机组运行特性、性能优化及故障诊断方面的教学和科研工作;

徐治皋(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事大型火电机组动态特性、性能监测及热工过程自动控制等方面的教学和科研工作。

(责任编辑 车德竞)