

燃煤锅炉炉膛灰污染 监测的炉膛出口烟温增量方法

徐啸虎, 周克毅, 韦红旗, 胥建群

(东南大学能源与环境学院, 江苏省南京市 210096)

Increment of Furnance Exit Gas Temperature for Monitoring Ash Fouling in the Furnace of Coal-fired Boilers

XU Xiaohu, ZHOU Keyi, WEI Hongqi, XU Jianqun

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

ABSTRACT: By Applying nonlinear incremental analysis methods, the extent of ash fouling in furnace was represented by the increment of furnace exit gas temperature (I-FEGT) between two states: actual running state and designing state. And the mathematical model for I-FEGT was also established. For validating in respect of accuracy, some calculations were carried on in simulation mode. Using the real time data of a coal-fired utility boiler in 600 MW power plant, I-FEGT was calculated for on-line monitoring the varieties of ash fouling in furnace. The results indicate that, I-FEGT correctly reflects the extent and varieties of ash fouling in furnace, can be used for furnace ash fouling monitoring, real-time guidance or checking effect for soot-blowing.

KEY WORDS: slagging and fouling; on-line monitoring; furnace; mathematic model; utility boiler

摘要: 应用非线性化的增量分析方法, 将锅炉运行状态与设计状态下的炉膛出口烟温(furnance exit gas temperature, FEGT)增量作为表征炉膛灰污染程度的参数, 建立了I-FEGT的计算模型; 在经过仿真计算验证模型正确性的基础上, 结合某台600 MW机组燃煤锅炉实时采集的数据, 利用所建模型对炉膛灰污染状况进行了实时监测, 结果表明: I-FEGT能正确反映炉膛灰污染程度及其变化。可用于电站锅炉炉膛受热面灰污染实时监测、实时指导吹灰或检验吹灰效果。

关键词: 结渣积灰; 在线监测; 炉膛; 数学模型; 电站锅炉

0 引言

燃煤电站锅炉受热面结焦积灰影响锅炉安全性和经济性, 一直受到广泛关注。在有效监测指导

下对受热面吹灰则是减少灰污染及其不利影响的有效途径。因此电站锅炉灰污染监测一直是研究的热点^[1-7]。结合炉膛受热面结构和热交换特点, 十多年来发展了许多表征炉膛灰污染程度的方法。如炉内热有效系数法^[8]、热流计(热流探针)法^[9-10]、背火鳍温度法^[11-12]、神经网络和模糊理论法^[13-16]以及数值方法^[17]等, 取得了较好的研究成果。但较少对炉膛灰污染影响进行定量分析。

本文从灰污染变化引起锅炉运行参数变动的角度出发, 将锅炉运行状态与设计状态下的炉膛出口烟温(furnance exit gas temperature, FEGT)增量作为表征炉膛受热面灰污染程度的参数, 依据传热方程和能量守恒原理推导, 建立了炉膛出口烟温增量(increment, I)计算模型 I-FEGT。所采用的增量分析方法不包含线性化的数学处理, 不存在一般线性化方法中所固有的截差问题, 在灰污染程度偏离设计状态较大时也可保证计算结果能较好的反映炉内灰污染状况。针对某台600 MW机组燃煤锅炉, 在经过仿真计算验证模型正确性的基础上, 利用所建模型进行了连续24 h的锅炉试验, 并对试验结果进行了分析。

1 建模原理

1.1 I-FEGT 计算模型

增量分析方法需预先设定一基准状态。因锅炉运行状态是时变的, 实时监测时用作对比的基准状态不能固定, 应由运行状态确定。具体而言, 建模

中设定的基准状态为：1) 炉膛灰污染程度取用设计值，其余受热面灰污染程度与运行状态一致；2) 燃料特性、环境温度、进出锅炉的汽水参数、过剩空气系数等也与运行状态一致，以下称之为设计状态。这样设定也是为了保证炉膛灰污染变化的唯一性，避免燃料特性、负荷等因素影响炉膛出口烟温增量的计算。

运行状态下灰污染变化必然引起传热量变化，即增量。锅炉系统作为一个整体而言，各受热面传热量变化存在相互影响的特性，因而炉膛灰污染程度变化，必然引起整个锅炉系统传热量的重新分配，炉膛出口烟温增量也必然与系统中其他受热面传热量增量相关。文中首先建立炉膛出口烟温增量与传热量增量的关系式，再由另外的传热量增量计算式建立与炉膛灰污染程度变化间的联系，最终实现炉膛出口烟温增量的计算。

由炉内传热方程，以 1 kg 计算燃料为基准的炉膛内烟气放热量 Q_{lt} (kJ/kg)^[18] 可表示为

$$Q_{lt} = \varphi(Q_1 - I_1'') \quad (1)$$

式中： $Q_1 = Q_r + \beta'' I_{rk}^0 + \Delta\alpha_{1,zf} \cdot I_{rk}^0$ ； φ 为保热系数； Q_1 为 1 kg 计算燃料为基准的燃料在炉内有效放热量，kJ/kg； I_1'' 为炉膛出口烟气焓，kJ/kg； Q_r 为 1 kg 计算燃料带入炉内的有效热量，kJ/kg； β'' 为空预器热风出口处的过剩空气系数； $\Delta\alpha_{1,zf}$ 为炉膛和制粉系统总的漏风系数； I_{rk}^0 、 I_{lk}^0 分别为理论热空气和冷空气的焓，kJ/kg。

用带有符号~的变量表示设计状态下参数，无该符号表示运行状态下参数，忽略锅炉效率变化影响，则相对于设计状态，任一时刻炉膛传热量增量为

$$\Delta Q_{lt} = Q_{lt} - \tilde{Q}_{lt} = \varphi(\Delta Q_1 - \Delta I_1'') = \varphi\beta'' \cdot \Delta I_{rk}^0 - \varphi \cdot \Delta I_1'' \quad (2)$$

式中： $\Delta I_{rk}^0 = I_{rk}^0 - \tilde{I}_{rk}^0$ ； $\Delta I_1'' = I_1'' - \tilde{I}_1''$ 。

由空预器传热计算式^[18-19]，可得到

$$\Delta Q_{ky} = Q_{ky} - \tilde{Q}_{ky} = (\beta'' + \frac{\Delta\alpha_{ky}}{2}) \Delta I_{rk}^0 \quad (3)$$

式中： Q_{ky} 为 1 kg 计算燃料为基准的空预器传热量，kJ/kg； $\Delta\alpha_{ky}$ 为空预器漏风系数。将式(3)代入式(2)，可得到炉膛出口烟气焓增量的计算式：

$$\Delta I_1'' = \frac{\beta''}{\beta'' + \Delta\alpha_{ky}/2} \cdot \Delta Q_{ky} - \frac{1}{\varphi} \cdot \Delta Q_{lt} \quad (4)$$

结合运行状态下炉膛出口烟气焓的已知值，可计算

得到炉膛出口烟温增量。忽略烟气物性变化的影响，炉膛出口烟温增量的计算式可表示为

$$\Delta T_1'' = \frac{\beta''}{(\beta'' + \Delta\alpha_{ky}/2) \cdot C_1''} \cdot \Delta Q_{ky} - \frac{1}{\varphi C_1''} \cdot \Delta Q_{lt} \quad (5)$$

式中： T_1'' 为炉膛出口烟温，℃； C_1'' 为烟气热容，kJ/(kg·℃)，由 T_1'' 确定。 ΔQ_{lt} 和 ΔQ_{ky} 的系数项由运行状态下数据计算，只需求得 ΔQ_{lt} 和 ΔQ_{ky} ， $\Delta T_1''$ 便可确定。

1.2 传热量增量的计算模型

根据锅炉原理^[18]，设计状态下炉膛传热量可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{lt} &= \varphi \tilde{Q}_1 (1 - \tilde{\theta}_1) = \varphi (Q_1 - \Delta Q_1) (1 - \tilde{\theta}_1) = \\ &\varphi \left(Q_1 - \frac{\beta''}{\beta'' + \Delta\alpha_{ky}/2} \cdot \Delta Q_{ky} \right) (1 - \tilde{\theta}_1) \quad (6) \\ \theta_1 &= \frac{T_1'' + 273}{T_a} = \frac{1}{M \left(\frac{\sigma_0 a_1 \psi F T_a^3}{\varphi B_j \overline{V} C_p} \right)^{0.6} + 1} \end{aligned}$$

式中： θ_1 为无因次火焰平均温度，按准则方程计算^[18]； T_a 为理论燃烧温度，K； M 为反映炉内火焰最高温度相对位置的参数； σ_0 为波尔茨曼常数，kW/(m²·K⁴)； a_1 为炉膛综合黑度^[19]； ψ 为热有效系数，其大小反映了受热面灰污染程度； F 为传热面积，m²； B_j 为计算燃煤量，kg/s； $\overline{V} C_p$ 为炉内烟气平均热容，kJ/(kg·K)。将式(1)、(6)代入 ΔQ_{lt} 的增量关系式，可推导得到

$$\Delta Q_{lt} - \frac{\varphi\beta''(1-\tilde{\theta}_1)}{\beta'' + \Delta\alpha_{ky}/2} \cdot \Delta Q_{ky} = \varphi Q_1 \tilde{\theta}_1 - \varphi I_1'' \quad (7)$$

式中 ΔQ_{lt} 、 ΔQ_{ky} 为待求量，除 $\tilde{\theta}_1$ 外，其余各项均由运行状态下参数计算得到。计算 $\tilde{\theta}_1$ 时， \tilde{M} 、 $\tilde{\psi}$ 为输入量，参数 \tilde{a}_1 、 \tilde{T}_a 及 $\overline{\tilde{V} C_p}$ ，可通过运行状态下的烟气温度先行计算后迭代求解。 $\tilde{\psi}$ 与 ψ 间的差异反映了灰污染程度的变化，是导致产生炉膛传热量增量及出口烟温增量的根本原因，而运行状态下炉膛灰污染程度及其影响已包含在运行参数中，无需额外确定 ψ 的大小。因准则方程本身可能存在误差，实际应用时还需通过现场数据或试验预先对其修正。

对于其他受热面，由微元能量守恒关系推导出以 1 kg 计算燃料为基准的传热量增量 ΔQ (kJ/kg) 的计算式^[7,20-21]：

$$\Delta Q = (T-t)' \Delta \lambda + \hat{\lambda} \Delta (T-t)' \quad (8)$$

式中 $\lambda = \frac{1 - e^{-\frac{k\mu F}{B_j}}}{\mu}$, $\Delta\lambda = \lambda - \tilde{\lambda}$; $\mu = \mu_G \pm \mu_D$ (顺流

取+); $\mu_G = \frac{1}{\varphi(1 - X_{fs})C_y}$, $\mu_D = \frac{B_j}{(1 - X_{fs})C_s D}$; $(T -$

$t)' = \begin{cases} T' - t' & (\text{顺流}) \\ T' - t'' & (\text{逆流}) \end{cases}$; $\Delta(T - t)' = \begin{cases} \Delta T' - \Delta t' & (\text{顺流}) \\ \Delta T' - \Delta t'' & (\text{逆流}) \end{cases}$ 。

其中, T 、 t 分别为烟气和工质温度, $^{\circ}\text{C}$; k 为传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; F 为传热面积, m^2 ; C_y 为烟气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; D 为工质流量, kg/s ; C_s 为工质比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; B_j 为计算燃煤量, kg/s ; X_{fs} 、 X_{fj} 分别为考虑辐射和附加受热面传热量的系数, 传热方式中无此项时, 则设为零; 上标 “'”、“''” 分别表示进口和出口; $(T - t)'$ 为受热面进口温度端差, $^{\circ}\text{C}$ 。由于除炉膛外, 2 种状态下受热面灰污染程度一致, 忽略锅炉效率变化的影响, $\Delta\lambda$ 仅取决于受温度影响的物性和工质流量, 因设计状态下的温度和流量参数均预先不知道, 也需迭代求解。

对于 $\Delta(T - t)'$, 可利用受热面间的连接关系表达成传热量增量的形式。以炉膛出口处顺流布置的屏式过热器为例, 其进口的烟温增量即为式(5), 进口工质温度增量与低温过热器有关, 若用下标 p 、 dg 和 jw 分别表示屏式过热器、低温过热器和减温水的相关参数, 根据能量守恒原理由类似的非线性化方法可推导得到计算式:

$$\Delta t'_p = \Delta\left(\frac{D_{dg} C_{sdg}}{D_p C_{sp}} \cdot t''_{dg}\right) + \Delta\left(\frac{D_{jw} C_{jw}}{D_p C_{sp}} \cdot t_{jw}\right) = \frac{\tilde{D}_{dg} \tilde{C}_{sdg}}{\tilde{D}_p \tilde{C}_{sp}} \cdot \Delta t''_{dg} + t''_{dg} \cdot \Delta\left(\frac{D_{dg} C_{sdg}}{D_p C_{sp}}\right) + \Delta\left(\frac{D_{jw} C_{jw}}{D_p C_{sp}}\right) \cdot t_{jw} \quad (9)$$

$\Delta t''_{dg}$ 也可依据能量守恒关系推导得到:

$$\Delta t''_{dg} = \Delta(Q_{dg} \mu_{Ddg}) = \tilde{\mu}_{Ddg} \Delta Q_{dg} + Q_{dg} \Delta \mu_{Ddg} \quad (10)$$

将式(5)、式(9)和式(10)代入式(8), 整理后可得

$$a_{p1} \Delta Q_{it} + a_{p2} \Delta Q_p + a_{p3} \Delta Q_{dg} + a_{p4} \Delta Q_{ky} = S_p \quad (11)$$

式中 $a_{p1} = \frac{\tilde{\lambda}_p}{\varphi C_1}$, $a_{p2} = 1$; $a_{p3} = \frac{\tilde{\lambda}_p \tilde{D}_{dg} \tilde{C}_{sdg} \tilde{\mu}_{Ddg}}{\tilde{D}_p \tilde{C}_{sp}}$;

$a_{p4} = -\frac{\tilde{\lambda}_p \beta''}{(\beta'' + \Delta\alpha_{ky} / 2) \cdot C_1}$; S_p 由不含传热量变化的

剩余项构成。利用上述方法, 可对锅炉系统各受热面分别建立如式(11)的计算式后联立求解。最终利用式(4)或式(5)计算得到炉膛出口烟温增量。

2 仿真实验

以某电厂 600 MW 机组配备的 2000 t/h 亚临界压力燃煤锅炉为研究对象, 按照锅炉热力计算标准方法建立其仿真计算程序。在完成设计计算的基础上, 通过调整热有效系数 ψ 的大小达到模拟炉膛灰污染程度变化的工况。

只考虑排烟热损失、不同灰污染程度下, 炉膛出口烟温增量 $\Delta T_1''$ 、锅炉效率变化 $\Delta\eta$ 、燃料量变化 ΔB_j 以及取用灰污染程度增大后的锅炉效率和燃料量时的炉膛出口烟温增量 $\Delta T_1''^*$ 的计算结果如表 1 所示(TRL 为汽轮机额定工况(turbine rating load))。由计算结果可以看出, 随着热有效系数的降低, 炉膛出口烟温增量逐渐增大, 但对锅炉效率和燃煤量的影响却很小。这是因为炉膛受热面离锅炉排烟处最远, 即使灰污染程度增加引起较大的炉膛出口烟温变化, 在被多个受热面逐级“补偿”后最终对排烟热损失及锅炉效率的影响已很小。因此在炉膛出口烟温增量的计算中, 忽略锅炉效率和燃料量变化的影响, 即直接取用运行状态下的锅炉效率和燃料量进行计算是完全可行的。

3 种典型工况下的 I-FEGT 模型计算结果与仿真计算结果对比列于表 2。从计算结果也可看出 I-FEGT 模型的计算误差较小, 尤其对于工程计算, 已足够准确。

表 1 不同灰污染程度的仿真计算结果(100%TRL)

Tab. 1 Simulation results of different ash fouling in furnace (100%TRL)

$\Delta\psi$	$\Delta T_1'' / ^{\circ}\text{C}$	$\Delta\eta / \%$	$\Delta B_j / (\text{kg}/\text{s})$	$\Delta T_1''^* / ^{\circ}\text{C}$	$(\Delta T_1''^* - \Delta T_1'') / ^{\circ}\text{C}$
-0.1236	48.23	-0.036 4	0.025 7	48.05	-0.19
-0.2397	101.12	-0.100 0	0.070 6	100.76	-0.35
-0.3385	153.51	-0.179 3	0.126 7	152.73	-0.78
-0.3888	183.82	-0.238 0	0.168 2	182.80	-1.02

表 2 I-FEGT 模型与仿真计算结果

Tab. 2 Calculation results of I-FEGT and simulation $^{\circ}\text{C}$

运行状态	模型计算结果	仿真计算结果	绝对误差
100%TRL	76.80	75.29	1.51
80%TRL	74.99	75.75	-0.76
50%TRL	70.71	73.23	-2.52

3 现场试验

基于所建模型在同台锅炉上进行了连续 24 h 的锅炉试验, 结果如图 1—3 所示。试验时, 数据

采集和模型计算的时间间隔均为 5 s。图 1 显示的是试验期间的负荷变化和吹灰用汽流量的实时监测结果。其中, 受热面吹灰开始时刻为流量大于 4 kg/s; 2 次吹灰过程中第 1 次为单独的炉膛受热面吹灰, 第 2 次则是炉膛及水平烟道受热面顺序吹灰。图 2 和图 3 分别为 I-FEGT 模型和炉膛出口烟温的实时计算结果。

从计算结果可以看出, 虽然 I-FEGT 计算值存在一定波动, 但仍然可看出其随时间的累积逐渐增大, 以及吹灰后迅速降低的变化过程, 且基本不受负荷变动的影响(如图 2)。尤其在 17 h 锅炉快速升负荷时, 炉膛出口烟温先是升高, 吹灰后又降低, 且降低幅度基本与 I-FEGT 计算结果一致。说明炉膛出口烟温增量确实反映了炉内灰污染程度及其变化。

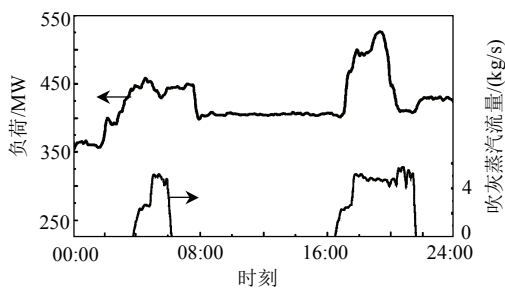


图 1 试验期间机组负荷及吹灰蒸汽流量

Fig. 1 Load and soot steam flow during the trial period

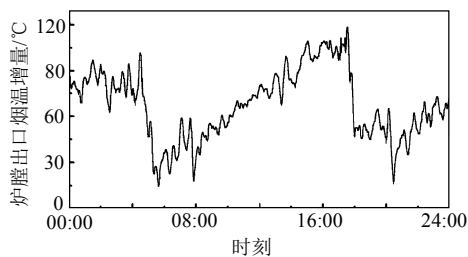


图 2 I-FEGT 实时计算结果

Fig. 2 Real-time calculations results of I-FEGT

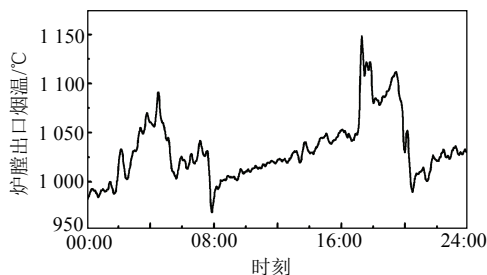


图 3 FEGT 实时计算结果

Fig. 3 Real-time calculations results of FEGT

4 结果分析

从仿真结果来看, 炉膛灰污染对锅炉效率和燃煤量的影响不大。随着灰污染程度增加, 锅炉效率增量也会进一步增大, 但由此引起的更大的炉膛出口烟温增量是没有实际意义的。具体计算中也可通过反复迭代方式获得效率增量和燃煤量增量, 但对模型计算准确度并无明显提升。相反, 直接取用运行状态下效率和煤耗的已知值却能保证计算准确度的同时大大减少计算时间, 提升计算的实时性。

就吹灰提高锅炉运行经济性方面而言, 炉膛受热面吹灰所获得的收益很小。但灰污染程度增大导致炉膛出口烟温升高, 不仅提高了炉内烟气平均温度, 也增大了炉膛出口处高温过热器传热温压, 将不利于锅炉设备安全运行。因此对于炉膛受热面可从安全性的角度来选择吹灰时间, 通过合理降低炉膛出口烟温, 防止水冷壁或高温对流受热面发生超温爆管事故。从现场试验结果来看, 在锅炉负荷较高或负荷快速上升时对炉膛受热面吹灰, 因此刻炉膛出口烟温已经较高, 适当降低其温度是有利于锅炉正常安全运行的。

实际运行时存在多种因素影响到炉膛出口烟温升高, 而灰污染只是其中一种因素。炉膛出口烟温增量正是反映了因灰污染程度增大所引起的炉膛出口烟温升高的部分, 与煤质特性、负荷无关。对炉膛出口烟温增量的实时监测, 也可得到吹灰后炉膛出口烟温是否能降低以及能够降低的最大幅度的定量数据。而仅从受热面热流量或热有效系数变化出发是无法直观地获取这些信息的。

由于炉膛受热面积较大, 不同区域的灰污染程度并不一致。文中提出的炉膛灰污染监测方法也只是从整体上反映炉内总的灰污染程度及其影响。在缺乏有效方法确定炉内灰污染分布时, 综合文中仿真计算和现场试验结果以及兼顾易维护性、直观性、实时性和有效性方面, 该方法可以用于炉膛灰污染监测和实时吹灰指导。

5 结论

1) 基于 FEGT 增量的炉膛灰污染监测方法, 不仅能反映炉膛灰污染的变化, 也可以反映出炉膛灰污染偏离设计状态的程度; 结合现场的实时计算系统, 该方法可用于炉膛灰污染在线监测和检验吹

灰效果。

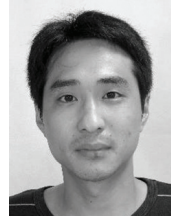
2) 模型的推导过程不包含任何线性化的数学处理, 仿真计算结果也表明模型的计算误差较小, 可适用于灰污染程度变化较大的工况。

3) 模型的驱动数据来自锅炉运行状态或设计值, 运行结果也表明模型对锅炉运行中各参数变动具有很好的适应性, 耗费的计算机时较短, 灰污染监测的实时性较高, 可用于电站锅炉实时指导吹灰。

参考文献

- [1] 朱予东, 阎维平, 高正阳, 等. 燃煤锅炉对流受热面污染沉积对传热熵产的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 23-27.
Zhu Yudong, Yan Weiping, Gao Zhengyang, et al. Influence of ash deposition on the heat transfer entropy generation of convective heating surfaces for coal fired utility boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 23-27(in Chinese).
- [2] Harding N S, O'Connor D C. Ash deposition impacts in the power industry[J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(11-12): 1082-1093.
- [3] 阎维平, 梁秀俊, 周健, 等. 300 MW 燃煤电厂锅炉积灰结渣计算机在线监测与优化吹灰[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 84-88.
Yan Weiping, Liang Xiujun, Zhou Jian, et al. Ash monitoring and sootblowing optimization of a 300 MW coal-fired utility boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 84-88(in Chinese).
- [4] 张洪, 须文波, 刘飞. 锅炉受热面积灰监测方法的研究[J]. 锅炉技术, 2006, 37(4): 28-30, 80.
Zhang Hong, Xu Wenbo, Liu Fei. The research on the on-line fouling monitoring of boiler heat surface[J]. Boiler Technology, 2006, 37(4): 28-30, 80(in Chinese).
- [5] 朱予东, 阎维平, 高正阳, 等. 600 MW 机组锅炉对流受热面污染状况实验与吹灰优化[J]. 动力工程, 2005, 25(2): 196-200.
Zhu Yudong, Yan Weiping, Gao Zhengyan, et al. Tests on fouling condition of the convection heating surfaces and soot-blowing optimization of a 600 MW set's boiler [J]. Power Engineering, 2005, 25(2): 196-200(in Chinese).
- [6] 赵清明, 孔令君, 郭蓓, 等. 锅炉智能吹灰优化系统研发与应用[J]. 中国电力, 2007, 40(2): 36-39.
Zhao Qingming, Kong Lingjun, Guo Bei, et al. R&D and application of the intelligent boiler soot-blowing optimization system[J]. Electric Power, 2007, 40(2): 36-39(in Chinese).
- [7] 徐啸虎, 周克毅, 胥建群. 锅炉吹灰优化系统的研究及开发[J]. 机电信息, 2004, 4(19): 11-14.
Xu Xiaohu, Zhou Keyi, Xu Jianqun. Research and development of the boiler soot-blowing optimization system[J]. Mechanical and Electrical Information, 2004, 4(19): 11-14(in Chinese).
- [8] 王军, 王硕. 锅炉炉膛结渣状态两种判别方法的研究[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(2): 34-36.
Wang Jun, Wang Shuo. Research on two distinguishing methods for slagging state of boiler furnace[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(2): 34-36(in Chinese).
- [9] 俞海淼, 曹欣玉, 李志, 等. 应用灰污热流计监测燃煤锅炉炉膛灰污结渣的动态过程[J]. 动力工程, 2005, 25(1): 88-91.
Yu Haimiao, Cao Xinyu, Li Zhi, et al. Research on the dynamic process of ash deposition in boilers with heat flux probes[J]. Power Engineering, 2005, 25(1): 88-91(in Chinese).
- [10] Paist A, Poobus A, Tiikma T. Probes for measuring heat transfer parameters and fouling intensity in boilers[J]. Fuel, 2002, 14(81): 1811-1818.
- [11] 王洪江, 孙保民, 田进步, 等. 汽包锅炉炉内局部结渣实时诊断研究[J]. 工程热物理论, 2008, 29(6): 1077-1079.
Wang Hongjiang, Sun Baomin, Tian Jinbu, et al. Realtime fault diagnosis of local slagging in furnace of drum boiler [j]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(6): 1077-1079(in Chinese).
- [12] 王民汉, 吴占松, 王斌忠, 等. 煤粉炉结渣实时诊断与监控模型[J]. 动力工程, 2003, 23(2): 2303-2307.
Wang Minhan, Wu Zhansong, Wang Binzhong, et al. Realtime fault diagnosis and monitor model of slagging for pulverized-coal fired boilers[J]. Power Engineering, 2003, 23(2): 2303-2307(in Chinese).
- [13] Luis M. Romeo, Raquel Garetá. Fouling control in biomass boilers[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(5): 854-861.
- [14] Sanyal A. Benchmarking software for slagging, fouling and other parameters to improve coal-fired power plant load factor, efficiency and emission[C]//ASME 2006 Power Conference, Atlanta, Georgia, USA. 2006.
- [15] 赵显桥, 曹欣玉, 兰泽全, 等. 燃煤锅炉结渣倾向性模糊预测分析[J]. 电站系统工程, 2003, 19(5): 9-11.
Zhao Xianqiao, Cao Xinyu, Lan Zequan, et al. Fuzzy forecasting analysis on slagging tendency of coal-fired boiler[J]. Power System Engineering, 2003, 19(5): 9-11(in Chinese).

- Chinese).
- [16] Ma Zhanhua, Iman F, Lu P, et al. A comprehensive slagging and fouling prediction tool for coal-fired boilers and its validation application[J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(11-12): 1035-1043.
- [17] 朱予东, 阎维平, 王长征, 等. 燃煤锅炉炉内结渣对炉膛出口温度影响的研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(1): 71-75.
Zhu Yudong, Yan Weiping, Wang Changzheng, et al. Influence of slagging in PC boiler furnace on the temperature of furnace outlet[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(1): 71-75(in Chinese).
- [18] 范从振. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 171-175.
Fan Congzhen. Theory of boiler[M]. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2007: 171-175(in Chinese).
- [19] 周强泰, 周克毅, 冷伟, 等. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 167-176.
Zhou Qiangtai, Zhou Keyi, Leng Wei, et al. Theory of boiler[M]. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2009: 167-176(in Chinese).
- [20] 周克毅, 章臣樾. 电站锅炉性能分析模型[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(4): 7-14.
Zhou Keyi, Zhang Chenyue. Modeling for performance analysis of power boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(4): 7-14(in Chinese).
- [21] 徐啸虎. 燃煤锅炉吹灰优化的研究及系统开发[D]. 南京: 东南大学, 2003.
Xu Xiaohu. Coal-fired boiler soot-blowing optimization and its system development[D]. Nanjing: Southeast University, 2003(in Chinese).



徐啸虎

收稿日期: 2011-03-09。

作者简介:

徐啸虎(1974), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事电站锅炉性能监测、性能优化及其数学模型、仿真模型及仿真软件等方面的研究工作, xulaolao1206@seu.edu.cn;

周克毅(1955), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事大型火电机组系统特性、性能分析及其数学模型等方面的教学科研工作;

韦红旗(1966), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事热能动力设备的性能测试、诊断及优化运行;

胥建群(1959), 男, 博士, 教授, 长期从事电站性能分析、故障诊断、仿真建模等教学科研工作。

(责任编辑 王庆霞)