

# 燃煤锅炉对流受热面污染沉积对传热熵产的影响

朱予东, 阎维平, 高正阳, 张 婷, 李太兴

(华北电力大学能源与动力工程学院, 河北省 保定市 071003)

## Influence of Ash Deposition on the Heat Transfer Entropy Generation of Convective Heating Surfaces for Coal Fired Utility Boiler

ZHU Yu-dong, YAN Wei-ping, GAO Zheng-yang, ZHANG Ting, LI Tai-xing

(School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** For coal fired utility boilers, the ash deposition on heating surfaces can lead to increase entropy generation in heat transfer process with result of heat energy loss both in quantity and quality. The analyzing model of heat transfer entropy generation for convective heating surfaces was established. Using the real time data of a utility boiler, the heat transfer entropy generation of different convective heating surfaces under different ash deposition (before and after soot-blowing) was calculated. The influence of ash deposition on heat transfer entropy generation was analyzed. The calculating and analyzing results indicate that, comparing with the other convective heating surfaces of the boiler, more entropy generation decrements for both economizer and low temperature super heater are observed after soot-blowing.

**KEY WORDS:** entropy generation; soot-blowing optimization; convective heat transfer surfaces; utility boiler

**摘要:** 火电站燃煤锅炉运行中受热面污染沉积使传热过程不可逆程度增大, 熵产增加, 能量品质下降。文中建立了锅炉对流受热面传热熵产计算模型, 并针对一台大型电站锅炉, 结合现场采集的实时运行数据, 利用建立的熵产模型计算了各对流受热面在不同污染状态下(吹灰操作前后)的传热熵产, 分析了不同受热面污染对熵产的影响规律。计算与分析表明, 对于所计算的锅炉, 与其他受热面相比, 吹灰操作对降低省煤器和低温过热器传热熵产的效果最为显著。

**关键词:** 熵产; 优化吹灰; 对流受热面; 电站锅炉

## 0 引言

火电站燃煤锅炉是大型燃烧换热设备, 对于一台在役锅炉, 受热面的污染状态是运行中影响传热特性的主要因素<sup>[1-7]</sup>, 直接决定了传热过程中热能的

品质损失。研究污染状态对传热过程热能品质损失的影响特性, 追求锅炉运行过程中热能品质的最大利用, 具有重要意义。

本文利用熵产来描述不同对流受热面在传热过程中能量品质的损失。首先建立锅炉受热面的传热熵产计算模型, 进而利用开发的电站锅炉受热面污染监测系统对一台大型电站锅炉的不同受热面实时运行数据进行采集, 对吹灰导致的受热面污染特性变化和传热熵产变化进行计算, 得到不同受热面在不同污染状态下的传热熵产计算结果, 并分析得出吹灰对不同对流受热面传热熵产的影响规律。

## 1 受热面传热熵产与污染状态的计算模型

### 1.1 传热熵产计算模型

电站锅炉内, 除炉膛、空气预热器外, 其余受热面多属于间壁式换热器。受热面的传热熵产是由于在冷、热流体的换热过程中热能从高温热源向低温热源传递而导致的。对于炉内各对流受热面, 若不考虑换热过程中散热损失, 则有<sup>[8-9]</sup>:

$$dQ = k(T_h - T_c)dA = -(GC)_h dT_h = (GC)_c dT_c \quad (1)$$

换热器的熵产为

$$dS = dQ/T = -dQ/T_h + dQ/T_c = (GC)_h dT_h/T_h + (GC)_c dT_c/T_c \quad (2)$$

根据 $\varepsilon$ -NTU法<sup>[10-12]</sup>, 定义换热器热容比为

$$C^* = (GC)_{\min} / (GC)_{\max} \quad (3)$$

效能为

$$\varepsilon = Q/Q_{\max} \quad (4)$$

式中:  $k$ 为传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $G$ 为工质质量流量,

kg/s;  $C$ 为工质比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $T$ 为工质温度,  $\text{K}$ ;  $Q$ 及 $Q_{\max}$ 分别为换热器的实际传热量和最大可能传热量,  $\text{kJ}$ 。 $Q$ 及 $Q_{\max}$ 的计算公式分别为

$$Q = (GC)_h \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = (GC)_c \cdot (T_{c2} - T_{c1}) = \varepsilon Q_{\max} \quad (5)$$

$$Q_{\max} = (GC)_{\min} \cdot (T_{h1} - T_{c1}) \quad (6)$$

式中: 下标h表示该参数为热流体参数; 下标c表示该参数为冷流体参数; 下标1表示流体入口参数; 下标2表示流体出口参数。

电站锅炉炉内对流受热面(过热器、再热器、省煤器等)多为无相变换热过程, 对于无相变换热过程, 传热熵产计算式为

$$\Delta S_{g,\Delta T} = (GC)_c \cdot \ln(T_{c2}/T_{c1}) + (GC)_h \cdot \ln(T_{h2}/T_{h1}) \quad (7)$$

当 $(GC)_{\min} = (GC)_c$ 时

$$\Delta S_{g,\Delta T} = (GC)_c \{ \ln[1 + \varepsilon(1/\theta - 1)] + (1/C^*) \ln[1 + \varepsilon C^*(\theta - 1)] \} \quad (8)$$

式中:  $\theta = T_{c1}/T_{h1}$ , 为冷热流体入口温度之比;  $C^* = (GC)_c/(GC)_h$ ;  $\varepsilon = (T_{c2} - T_{c1})/(T_{h1} - T_{c1})$ 。

当 $(GC)_{\min} = (GC)_h$ 时

$$\Delta S_{g,\Delta T} = (GC)_h \{ \ln[1 + \varepsilon(\theta - 1)] + (1/C^*) \ln[1 + \varepsilon C^*(1/\theta - 1)] \} \quad (9)$$

式中:  $C^* = (GC)_h/(GC)_c$ ;  $\varepsilon = (T_{h1} - T_{h2})/(T_{h1} - T_{c1})$ 。

### 1.2 受热面污染状态计算模型

本文采用污染率 $F_f$ 表征受热面的污染状态<sup>[5]</sup>:

$$F_f = (k_{lx} - k_{sj})/k_{lx} \quad (10)$$

式中的 $k_{lx}$ 、 $k_{sj}$ 为根据在线热力数据和锅炉热力计算标准而求出的各受热面的理想传热系数和实际传热系数。污染率 $F_f$ 为大于0小于1的无量纲数,  $F_f$ 越接近1则表明受热面的污染越严重。

## 2 实施对象

以山东邹县电厂一台 600 MW 锅炉机组为研究对象, 其主要特性为: 炉膛前后墙各布置 12 只燃烧器, 分 3 层布置, 每层 4 只, 旋流, 主汽压力 18.07 MPa 左右, 再热汽压 4.01 MPa 左右, 主汽温度 540 °C 左右, 再热汽温 540 °C 左右。锅炉运行中投入了 48 只长吹灰器, 30 只短吹灰器, 2 只空预器吹灰器, 并且为提高对炉内各受热面运行状态监测的准确度, 结合已有的测点, 对该机组还进行了测点补充。本文采集的实时运行数据为 600 MW 稳定负荷(负荷变化不超过 3%/min<sup>[13]</sup>)。其吹灰器布置如图 1 所示。

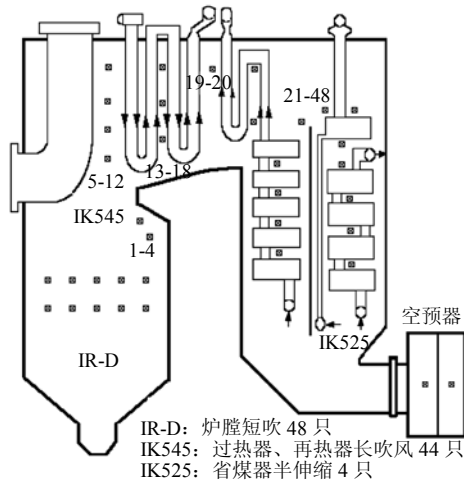


图 1 吹灰器布置示意图

Fig. 1 Arrangement diagrammatic sketch of sootblower

## 3 计算结果及分析

### 3.1 污染状态变化对传热熵产的影响特性

根据实时数据进行计算并得出了特性曲线。图 2~6 分别为机组运行过程中炉内各对流受热面污染状态与传热熵产的变化曲线。为揭示受热面污染沉积对传热熵产的影响规律, 本文选取受热面吹灰前后时间段进行计算。从图中曲线可以看出: 各受热面进行吹灰操作前, 随着污染沉积的增加, 污染率 $F_f$ 不断增加, 传热熵产也不断增加; 受热面进行吹灰过程中, 污染率显著下降, 传热熵产也同步下降; 吹灰结束后, 随着机组的运行, 受热面积灰再次增加,  $F_f$ 逐渐上升, 传热熵产也随之增加。可见, 对于同一受热面, 传热熵产的变化趋势是一致的, 这是因为传热过程传热熵产的发生源于热能从高温处传向低温处, 在相同的冷、热流体进口温度和流量下, 受热面污染减轻会使总的传热热阻减小<sup>[14]</sup>, 从而使得冷、热流体间传热效果增强, 换热量增加, 冷流体出口温度提高, 其平均温度也提高, 而热流体平均温度降低, 从而使冷、热流体温差减小, 传热熵产随之减小。反之, 若受热面污染

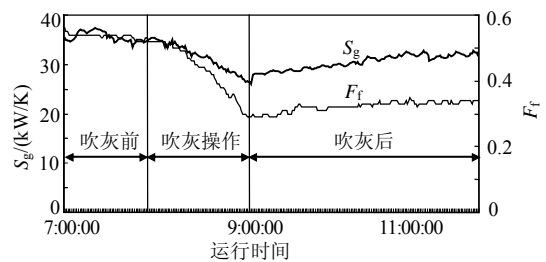


图 2 吹灰对省煤器传热熵产的影响曲线

Fig. 2 Influence curve of heat transfer entropy generation on economizer due to sootblowing

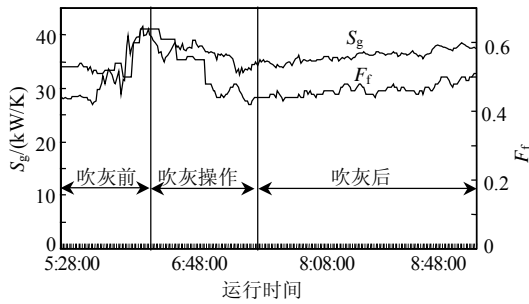


图 3 吹灰对低温过热器传热熵产的影响曲线

Fig. 3 Influence curve of heat transfer entropy generation on low temp. superheater due to sootblowing

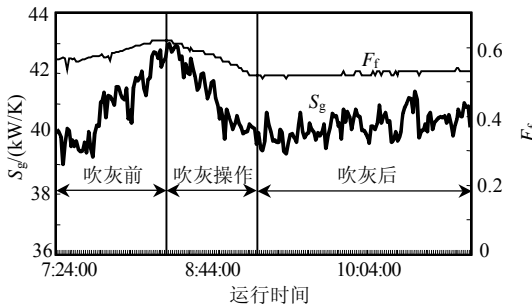


图 4 吹灰对低温再热器传热熵产的影响曲线

Fig. 4 Influence curve of heat transfer entropy generation on low temp. reheater due to sootblowing

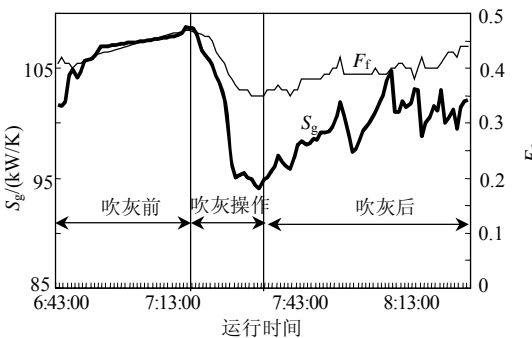


图 5 吹灰对高温过热器传热熵产的影响曲线

Fig. 5 Influence curve of heat transfer entropy generation on high temp. superheater due to sootblowing

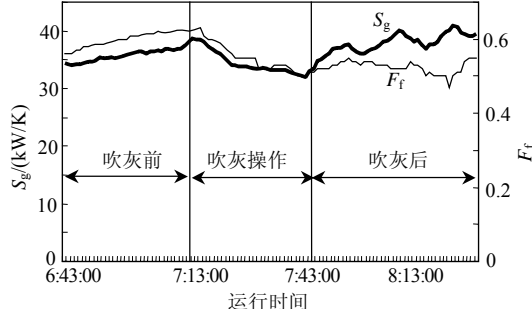


图 6 吹灰对高温再热器传热熵产的影响曲线

Fig. 6 Influence curve of heat transfer entropy generation on high temp. reheater due to sootblowing

增加，则总的传热热阻增大，冷、热流体温差增加，传热熵产随之增加。

### 3.2 不同受热面传热熵产变化特性

表1为不同受热面吹灰前后熵产的计算结果及

变化情况，其中：熵产绝对变化=吹灰前熵产-吹灰后熵产，熵产相对变化=(吹灰前熵产-吹灰后熵产)/吹灰前熵产。由表1中数据可以看出：在所计算的对流受热面中，省煤器、低温过热器吹灰前后熵产的相对变化较大，而低温再热器、高温过热器变化相对较小。这是由于锅炉内不同受热面处冷、热流体温度水平、受热面的面积、污染沉积状态以及所布置吹灰器对管壁污染的清除特性不同导致的<sup>[15-18]</sup>。虽然省煤器、低温过热器在吹灰前后熵产绝对变化不是很大，但由于其吹灰前熵产相对于其他受热面较小，所以其相对熵产变化较大。在计算的各受热面中，省煤器的熵产相对变化是最大的，即吹灰对省煤器换热效果的影响是最显著的。对此可以从两方面进行解释：一是省煤器处污染沉积相对严重，但由于该处烟气温度相对较低，形成的污染沉积比较容易吹灰蒸汽清除，吹灰前后受热面污染状态相差较大。二是该处吹灰器布置合理，数量充足，吹灰蒸汽参数完全能够满足清除此处污染的要求。

表 1 不同受热面吹灰前后熵产计算结果及变化表

Tab. 1 Result and variation table of entropy generation before and after sootblowing around the heating surface

受热面	吹灰前/(kW/K)	吹灰后/(kW/K)	绝对变化/(kW/K)	相对变化/%
高过	108.70	94.12	14.58	13.41
高再	38.69	32.03	6.66	17.21
低过	41.54	32.59	8.95	21.55
低再	42.95	39.32	3.63	8.45
省煤器	34.97	26.79	8.18	23.39

### 3.3 基于传热熵产的吹灰模式分析

由于受热面污染率和传热熵产变化趋势是一致的，因此这两个参数均可用于表征受热面的传热性能。污染率是直接描述受热面污染状态的参数，可以反应吹灰前后受热面污染状态的改变程度，但这一参数无法反映污染变化所带来的运行性能的变化。由于锅炉内不同的受热面管排结构不同，工质温度也不同，理论上可以推断，在吹灰导致的污染状态变化相同的情况下，面积大的受热面得到的吹灰受益要比面积小的受热面大的多。而在实际运行中各受热面吹灰后，不同受热面污染状态变化往往是不同的，所以不能仅仅据此就认为污染率变化大的受热面应该进行更多的吹灰，也就是说根据污染状态来确定吹灰模式，并不一定合理。

传热熵产则是一个运行性能参数，这个参数与受热面污染状态同步变化，因此它可以实时反应受热面污染状态。传热熵产又直接反应了吹灰前后受热面运行性能变化的大小，所以完全可以根据计算

得到的传热熵产变化规律,判断出应对吹灰后熵产变化大的受热面进行更多的吹灰,即根据传热熵产来确定如何吹灰,理论上可以得到更为优化的吹灰模式。根据计算数据,对于本文研究的锅炉,应进一步加强对省煤器和低温过热器的吹灰,减少低温再热器和高温过热器的吹灰。

以上主要对热量从高温处传递到低温处导致的熵产进行了分析,将熵产最小作为吹灰优化目标,使热量传递过程中可用能损失减少<sup>[19]</sup>。但是各受热面处还会由于烟气及工质流动阻力、吹灰过程中吹灰电机消耗电能、以及具有较高温度和压力的吹灰蒸汽与烟气的掺混造成更多的熵产发生<sup>[20]</sup>,对于这些更为复杂的熵产进行分析,确定其熵产传递及变化规律,是进一步优化吹灰模式的重要基础。实现以熵产规律为基础的吹灰模式的优化,也还需建立新的优化理论。这些也正是本文下一步的研究工作。此外,对某受热面吹灰的加强或减少在实际运行中如何实现,及确定新的吹灰周期也还需要积累必要的工程运行经验。

## 4 结论

通过上述分析,本文得到以下结论:

(1) 受热面污染率和传热熵产变化趋势是一致的,这两个参数均可用于表征受热面的传热性能。但污染率只能反映受热面的污染状态,而传热熵产则能有效描述受热面的运行性能。

(2) 省煤器在吹灰前后熵产相对变化最大,低温过热器次之,低温再热器吹灰前后熵产绝对变化和熵产相对变化均比较小。

(3) 对于本文计算的锅炉,根据以上传热熵产得到的吹灰模式:应加强对省煤器和低温过热器的吹灰,减少低温再热器和高温过热器的吹灰。

(4) 实现以熵产规律为基础的吹灰模式的优化,还需建立新的优化理论。此外,对某受热面吹灰的加强或减少在实际运行中如何实现,及确定新的吹灰周期也还需要积累必要的工程运行经验。

## 参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 阎维平,梁秀俊,周健,等. 300MW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 300MW coal-fired utility boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 84-88(in Chinese).
- [4] 周俊虎,靳彦涛,岑可法,等. 电站锅炉吹灰优化的研究应用现状[J]. 热力发电, 2003, 32(4): 24-27.  
Zhou Junhu, Jin Yantao, Cen Kefa, et al. Research and application state of the boiler soot-blowing optimization system[J]. Thermal Power Generation, 2003, 32(4): 24-27(in Chinese).
- [5] 朱予东,阎维平,高正阳,等. 600MW机组锅炉对流受热面污染状况实验与吹灰优化[J]. 中国动力工程学报, 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 600MW set's boiler[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(2): 196-200(in Chinese).
- [6] 柳青,阎维平,朱予东,等. 邹县电厂330MW机组锅炉吹灰器改造及吹灰方式比较[J]. 热力发电, 2005, 34(12): 101, 105.  
Liu Qing, Yan Weiping, Zhu Yudong, et al. Comparing modification of sootblower with sootblowing way about 330MW boiler unit in Zouxian power plant[J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(12): 101, 105(in Chinese).
- [7] 祁智明,高文彦,郭勇,等. 用简单换热器模型开发的吹灰优化控制系统[J]. 热力发电, 2006, 35(3): 42-45.  
Qi Zhiming, Gao Wenyan, Guo Yong, et al. Control system of sootblowing optimization based on model of simple exchanger[J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(3): 42-45(in Chinese).
- [8] 徐百平,江楠,雷鸣. 强化传热效能的比熵产数工况评价方法[J]. 石油炼制与化工, 2000, 31(6): 46-49.  
Xu Baiping, Jiang Nan, Lei Ming. On-spot evaluation of entropy production ratio under heat transfer intensification[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2000, 31(6): 46-49(in Chinese).
- [9] 刘蔡月. 换热器中熵产数和yong分析的计算分析[J]. 内蒙古工业大学学报, 1994, 13(2): 47-57.  
Liu Caiyue. Calculation and analysis of the entropy generation number and the exergetic efficiency in heat exchangers[J]. Journal of Inner Mongolia Polytechnic University, 1994, 13(2): 47-57(in Chinese).
- [10] Jones J.A. Entropy generation minimization[M]. Florida: CRC Press, 1996.
- [11] 熊大曦,李志信,过增元. 换热器的效能与熵产分析[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(1): 90-94.  
Xiong Daxi, Li Zhixin, Guo Zengyuan. Analysis on effectiveness and entropy generation in heat exchangers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(1): 90-94(in Chinese).
- [12] 杨洪海. 利用 $\varepsilon$ -NTU法计算换热器的传热熵产生数[J]. 中国纺织大学学报, 2000, 26(2): 17-19.  
Yang Honghai. Calculation of entropy generation number in heat exchanger by means of  $\varepsilon$ -NTU method[J]. Journal of China Textile University, 2000, 26(2): 17-19(in Chinese).
- [13] 阎维平,朱予东,谭蓬,等. 变负荷工况下锅炉对流受热面污染的监测[J]. 动力工程, 2007, 27(1): 58-61, 129.  
Yan Weiping, Zhu Yudong, Tan Peng, et al. Ash fouling monitoring of boiler's convective heat-delivery surfaces during variable load

- operation[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(1): 58-61, 129(in Chinese).
- [14] 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).
- [15] 阎维平. 锅炉高温对流受热面进出口烟温软测量方法[J]. 锅炉技术, 2002, 33(11): 1-3.  
Yan Weiping. Indirect measurement of inlet and outlet flue gas temperatures of boiler convective heat transfer banks[J]. Boiler Technology, 2002, 33(11): 1-3(in Chinese).
- [16] 侯斌, 吕子安, 武斌, 等. 电站锅炉对流受热面积灰状态的在线监测[J]. 中国电力, 2002, 35(3): 33-36.  
Hou Bin, Lü Zian, Wu Bin, et al. On-line monitoring of fouling on convective heating surface in utility boilers[J]. Electric Power, 2002, 35(3): 33-36(in Chinese).
- [17] 连晨舟, 吕子安, 侯斌, 等. 电站锅炉对流受热面积灰对系统的影响[J]. 热力发电, 2003, 32(12): 8-11.  
Lian Chenzhou, Lü Zian, Hou Bin, et al. Influence of system on fouling of convective heating surfaces for utility boiler[J]. Thermal Power Generation, 2003, 32(12): 8-11(in Chinese).
- [18] 陈宝康, 阎维平, 高正阳, 等. 电站锅炉炉膛污染和吹扫对对流受热面运行的影响分析[J]. 热力发电, 2004, 33(3): 27-30.  
Chen Baokang, Yan Weiping, Gao Zhengyang, et al. Influence analysis of convective heating surfaces on furnace fouling and sootblowing of utility boiler[J]. Thermal Power Generation, 2004, 33(3): 27-30(in Chinese).
- [19] 程新广, 孟继安, 过增元. 导热优化中的最小传递势容耗散与最小熵产[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(6): 1034-1036.  
Cheng Xinguang, Meng Jian, Guo Zengyuan. Potential capacity dissipation minimization and entropy generation minimization in heat conduction optimization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(6): 1034-1036(in Chinese).
- [20] 刘尔新, 王承阳. 锅炉的熵产及其环境影响分析[J]. 节能, 2006, 25(6): 11-13.  
Liu Erxin, Wang Chengyang. Entropy generation of boiler and analysis of environment effects[J]. Energy Conservation, 2006, 25(6): 11-13(in Chinese).

收稿日期: 2007-09-14。

作者简介:

朱予东(1964—), 男, 副教授, 主要从事高效低污染煤燃烧理论、新能源开发与利用、电站锅炉煤粉燃烧技术和锅炉安全经济运行方面的研究, ljzyd@sina.com;

阎维平(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高效低污染煤燃烧理论、新能源开发与利用、电站锅炉煤粉燃烧技术和锅炉安全经济运行方面的研究;

高正阳(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事煤粉清洁燃烧与环境污染控制方面的研究;

张婷(1981—), 女, 硕士研究生, 主要从事燃烧理论与污染控制方面的研究;

李太兴(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事火电机组经济性等方面的分析与研究。

(编辑 王庆霞)