

# 垃圾焚烧电站焚烧炉-余热锅炉效率及其不确定性研究

徐凯, 钟平, 宋金时, 孟桂祥

(西安热工研究院有限公司苏州分公司, 江苏苏州 215153)

**摘要:**根据德国标准以及不确定性分析原理,采用焚烧炉-余热锅炉效率计算方法,构建焚烧炉-余热锅炉效率不确定性计算模型。以某垃圾处理量为935 t/d的焚烧炉-余热锅炉为研究对象,分析焚烧炉-余热锅炉毛效率及燃料效率,并对焚烧炉-余热锅炉效率测试的不确定度进行了评定。结果表明:在进行垃圾焚烧电站锅炉设计及性能试验时,建议采用焚烧炉-余热锅炉毛效率作为设计及评定依据;省煤器出口烟气体积流量、炉渣热灼减率、过热蒸汽流量、湿炉渣量占垃圾处理量百分比和省煤器出口烟气温度5个参数的测量不确定度所占焚烧炉-余热锅炉效率不确定度权重值为98.4%,对试验不确定度影响较小的参数,可以降低测试精度要求,以提高测试效率。

**关键词:**焚烧炉-余热锅炉;毛效率;燃料效率;不确定性分析

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.12.002

[引用本文格式]徐凯,钟平,宋金时,等.垃圾焚烧电站焚烧炉-余热锅炉效率及其不确定性研究[J].热能动力工程,2021,36(12):8-13. XU Kai, ZHONG Ping, SONG Jin-shi, et al. Study on furnace-boiler efficiency and uncertainty in municipal solid waste incineration power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12): 8-13.

## Study on Furnace-boiler Efficiency and Uncertainty in Municipal Solid Waste Incineration Power Plant

XU Kai, ZHONG Ping, SONG Jin-shi, MENG Gui-xiang

(Suzhou Branch of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou, China, Post Code: 215153)

**Abstract:** According to the German FDBR standard and the principle of uncertainty analysis, the calculation method of furnace-boiler efficiency was introduced, and the calculation model of furnace-boiler efficiency uncertainty was constructed. Taking a certain furnace-boiler with 935 t/d waste treatment capacity as the research object, the gross efficiency and fuel efficiency of furnace-boiler were analyzed, and the uncertainty of efficiency test of furnace-boiler was evaluated. The results show that the gross efficiency of furnace-boiler should be used as the basis of the design and evaluation in the boiler design and performance test of municipal solid waste (MSW) incineration power plant. The measurement uncertainty of flue gas volume flow at economizer outlet, loss of ignition (LOI) of slag, superheated steam flow, percentage of wet furnace slag in garbage treatment capacity and flue gas temperature at economizer outlet accounts for 98.4% of the uncertainty weight value of furnace-boiler efficiency. The parameters that have little influence on the uncertainty of the test can reduce the testing accuracy requirements and improve the testing efficiency.

**Key words:** furnace-boiler, gross efficiency, fuel efficiency, uncertainty analysis

## 引 言

焚烧炉-余热锅炉效率作为评价垃圾焚烧电站锅炉运行状态的重要指标,同时也是燃烧优化、经济性评价的主要判断依据,分析焚烧炉-余热锅炉效率以及计算其测量不确定度至关重要<sup>[1]</sup>。目前,在焚烧炉-余热锅炉性能试验过程中,大多数采用 FDBR Guideline RL 7-2013 标准<sup>[2]</sup> (“FDBR 标准”)或 ASME PTC 34-2017 标准<sup>[3]</sup> (“ASME 标准”),但在计算焚烧炉-余热锅炉效率时,FDBR 标准计算的是毛效率,ASME 标准计算的是燃料效率。

用统计学方法对试验结果的精确性和有效性进行量化评价,称为试验结果的不确定度分析<sup>[4-6]</sup>。不确定度作为定量表达试验结果精确度的一种方法,可综合反映测试水平、测试结果的质量以及使用价值<sup>[5]</sup>。

目前,尚无文献对垃圾焚烧电站焚烧炉-余热锅炉效率进行不确定度分析,本文以 FDBR 标准和 JJF 1059.1<sup>[6]</sup> 为准则,结合某垃圾处理量为 935 t/d 的垃圾焚烧发电机组焚烧炉-余热锅炉性能试验,计算焚烧炉-余热锅炉效率及其不确定度,并定量分析各因素测量不确定度对焚烧炉-余热锅炉效率测试质量的影响。

## 1 焚烧炉-余热锅炉效率测试

FDBR 标准和 ASME 标准分别介绍了焚烧炉-余热锅炉毛效率与燃料效率的计算方法及过程。其中,毛效率与燃料效率的关系为:

$$\eta_g = \frac{Q_N}{Q_Z + Q_{Z,B}} = \frac{Q_N/Q_{Z,B}}{1 + Q_Z/Q_{Z,B}} = \frac{\eta_{EF}}{1 + Q_Z/Q_{Z,B}} \quad (1)$$

式中: $\eta_g$ —焚烧炉-余热锅炉毛效率; $Q_N$ —有用输出热量; $Q_{Z,B}$ —燃料(垃圾)输入热量; $Q_Z$ —除燃料(垃圾)外其他输入热量; $\eta_{EF}$ —焚烧炉-余热锅炉燃料效率。

毛效率与燃料效率的差值取决于除燃料外其他输入热量与燃料输入热量的比值( $Q_Z/Q_{Z,B}$ )。蒸汽-空气预热器低压段热源取自于汽轮机抽汽的焚烧炉-余热锅炉系统,燃料效率 $\eta_{EF}$ 通常比毛效率

$\eta_g$  高 1.5%~5.0%。

依据 FDBR 标准,采用能量平衡方法计算焚烧炉-余热锅炉毛效率。

$$\eta_g = \frac{Q_N}{Q_{Z,ges}} = \frac{Q_N}{Q_N + Q_{V,ges}} \quad (2)$$

$$Q_N = m_D \cdot (h_D - h_{Sp}) + m_{D^*} \cdot (h_{D^*} - h_{Sp}) + m_{LV} \cdot (h_{Kond} - h_{Sp}) \quad (3)$$

$$Q_{V,ges} = Q_G + Q_{CO} + Q_{RA} + Q_{FA} + Q_{St} + Q_{Ku} \quad (4)$$

式中: $Q_{Z,ges}$ —总体热输入; $Q_{V,ges}$ —总体热损失; $m_D$ —过热蒸汽质量流量; $h_D$ —过热蒸汽焓; $h_{Sp}$ —给水焓; $m_{D^*}$ —输出系统边界的汽包抽汽质量流量(如加热 SCR 系统用汽包抽汽); $h_{D^*}$ —汽包抽汽焓; $m_{LV}$ —系统边界内去蒸汽-空气预热器的高压段蒸汽质量流量(来自汽包抽汽); $h_{Kond}$ —离开蒸汽-空气预热器的高压段凝结水焓; $Q_G$ —排烟热损失; $Q_{CO}$ —CO 未完全燃烧热损失; $Q_{RA}$ —炉渣显热及未完全燃烧热损失; $Q_{FA}$ —飞灰显热及未完全燃烧热损失; $Q_{St}$ —散热损失; $Q_{Ku}$ —炉排冷却热损失。

由于散热损失实际测量量较大,为简化分析,散热损失 $Q_{St}$ 采用锅炉散热损失设计值,并参考文献[1],忽略散热损失因素对锅炉效率不确定度的影响。

## 2 不确定度分析原理

### 2.1 不确定度分析模型

进行焚烧炉-余热锅炉效率不确定度分析,首先建立满足测量不确定度评定要求的数学模型,以确定输出量 $y$ 与输入量( $x_1, x_2, \dots, x_N$ )之间的函数关系<sup>[7]</sup>,即:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (5)$$

确定数学模型时,应做到数学模型包括影响测量结果的全部输入量,并且不遗漏、不重复任何影响测量结果的不确定度分量。

### 2.2 不确定度评定方法

#### 2.2.1 A 类不确定度

A 类不确定度评定采用对已测得的数据进行统计分析的方法,以实验标准偏差表示,通常包括单点



测量和多点测量<sup>[1]</sup>。单点测量,即在单一点随时间进程对某一定值参数进行多次测量,测量参数包括一次风流量、燃料(垃圾)质量流量、水冷炉排进水温度、水冷炉排回水温度及过热蒸汽参数(流量、压力和温度)等,网格其样本平均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

单个测量参数  $x_k$  的样本标准差  $s(x_k)$  为:

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

样本平均值标准偏差  $s(\bar{x})$  为:

$$s(\bar{x}) = s(x_k) / \sqrt{n} \quad (8)$$

式中:  $\bar{x}$ —样本平均值;  $n$ —单个测得值的测量次数;  $x_i$ —第  $i$  次测量数据。

为提高测量精度,部分参数需要按照网格法进行多点测量,此类参数包括一次风蒸汽-空气预热器高低压段间风温、一次风蒸汽-空气预热器出口风温、省煤器出口烟温和烟气体积流量等。网格样本平均值标准偏差  $S(\bar{X})$  为:

$$S(\bar{X}) = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{k=1}^m (s(\bar{x}_k))^2} \quad (9)$$

式中:  $S(\bar{X})$  为网格样本整体标准偏差;  $m$ —横截面网格中点的总数;  $s(\bar{x}_k)$ —网格中第  $k$  点样本平均值标准偏差。

### 2.2.2 B类不确定度

B类不确定度评定采用不同于A类不确定度的方法,以根据经验、资料以及假设的概率分布估计的标准差表示<sup>[1]</sup>。对于焚烧炉-余热锅炉性能试验,获得B类不确定度的途径包括:先前观测得出的数据、仪表校证书提供的数据和测试规范中给出的数据等。

### 2.2.3 合成不确定度

各测量参数的A类不确定度和B类不确定度均确定后,通过传递方程计算得出测试结果的不确定度。当各测量参数彼此独立或不相关时,输出量  $y$  的合成不确定度  $u_c(y)$  为:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (10)$$

式中:  $\partial f / \partial x_i$ —灵敏度系数,记为  $C_i$ ,本计算模型较为复杂,采用数值扰动法估算得出,即  $C_i = \delta f_i / \delta x_i$ ,  $\delta x_i$  为  $x_i$  的微小变化,取1%,  $\delta f_i$  为  $\delta x_i$  引起的函数变化量<sup>[8-9]</sup>;  $u(x_i)$ —输入量的标准不确定度;  $u_i(y)$ —对应于  $u(x_i)$  的输出量  $y$  的不确定度分量。

### 2.2.4 扩展不确定度

扩展不确定度  $U$  由合成不确定度  $u_c(y)$  和包含因子  $k$  得到,计算式为:

$$U = k u_c(y) \quad (11)$$

包含因子  $k$  在工程应用领域一般取2~3,对于焚烧炉-余热锅炉效率试验,总体试验结果自由度一般大于9,根据正态分布,  $k$  取  $2^{[10-11]}$ 。

## 3 焚烧炉-余热锅炉效率不确定度算例

### 3.1 机组概况

某焚烧炉型式为机械炉排炉,余热锅炉型式为中温、次高压自然循环锅炉,锅炉技术参数如表1所示。

表1 焚烧炉-余热锅炉技术参数

Tab.1 Technical parameters of furnace-boiler

参数	数值
垃圾处理量/ $t \cdot d^{-1}$	935
垃圾低位发热量设计值/ $kJ \cdot kg^{-1}$	8 792
额定蒸发量/ $t \cdot h^{-1}$	105.67
额定过热蒸汽压力/MPa	6.5
额定过热蒸汽温度/ $^{\circ}C$	440~455
汽包工作压力/MPa	7.44
锅炉给水压力/MPa	10.9
锅炉给水温度/ $^{\circ}C$	130
省煤器出口排烟温度/ $^{\circ}C$	180~200

### 3.2 测试方法及试验数据

焚烧炉-余热锅炉性能试验在最大连续额定负荷工况(maximum continuous rating, MCR)下进行。试验期间,汽水侧的压力及差压变送器的精度等级为0.075级,测量温度采用I级E型热电偶,烟气侧烟气成分采用精度等级为0.2%的烟气分析仪,一、二次风温度及省煤器出口烟气温度均按照网格法布置。飞灰采用连续等速进行取样,等时间间隔进行炉渣取样,通过IMP数据采集系统采集试验数据,

试验时间为 8 h,每 1 min 自动记录 1 组数据,焚烧炉-余热锅炉效率试验部分数据如表 2 所示。

表 2 焚烧炉-余热锅炉效率试验数据

Tab. 2 Test data of furnace-boiler efficiency

参 数	数 值
燃料质量流量 $m_B/t \cdot h^{-1}$	38.2
一次风体积流量 $Q_{PL}/m^3 \cdot h^{-1}$	91 100
一次风蒸汽-空气预热器高低压段间风温 $t_{PL1}/^{\circ}C$	169.2
一次风蒸汽-空气预热器出口风温 $t_{PL2}/^{\circ}C$	186.7
水冷炉排出口水温 $t_{in}/^{\circ}C$	42.8
水冷炉排进水压力 $p_{in}/MPa$	0.52
水冷炉排出口水温 $t_{out}/^{\circ}C$	48.9
水冷炉排进水量 $m_w/t \cdot h^{-1}$	10.90
省煤器出口烟温 $t_G/^{\circ}C$	184.7
省煤器出口 $O_2$ 体积分数(干基) $\varphi_{O_2}/\%$	5.4
省煤器出口 $CO_2$ 体积分数(干基) $\varphi_{CO_2}/\%$	13.3
省煤器出口 $CO$ 体积分数(干基) $\varphi_{CO}/\%$	0.000 2
省煤器出口 $H_2O$ 体积分数(干基) $\varphi_{H_2O}/\%$	21.1
省煤器出口烟气体积流量(标态) $Q_G/m^3 \cdot h^{-1}$	171 193
湿炉渣量占垃圾处理量百分比 $\varphi_{RA}/\%$	18.9
湿炉渣量含水率 $\varphi_{MO}$	0.17
炉渣热灼减率 $u_{RA}$	0.016
飞灰产生率 $\varphi_{FA}/\%$	2.6
飞灰可燃物质量分数 $u_{FA}$	0.016
过热蒸汽流量 $m_D/t \cdot h^{-1}$	105.46
过热蒸汽压力 $p_D/MPa$	6.50
过热蒸汽温度 $t_D/^{\circ}C$	442.7
供 SCR 汽包抽汽流量 $m_{SCR}/t \cdot h^{-1}$	8.08
蒸汽-空气预热器高压段疏水压力 $p_w/MPa$	1.22
省煤器进口给水压力 $p_{Sp}/MPa$	10.57
省煤器进口给水温度 $t_{Sp}/^{\circ}C$	130.7

### 3.3 计算结果及分析

表 3 为焚烧炉-余热锅炉效率计算数据。MCR 负荷工况下,机组焚烧炉-余热锅炉毛效率为 86.34%,燃料效率为 90.99%,比毛效率高 4.65%。不同于无暖风器的常规火电机组,垃圾焚烧电站一次风通常需要加热至 200~240  $^{\circ}C$ ,其中来自系统边界外的热量(如蒸汽-空气预热器低压段采用汽轮机抽汽)通常加热一次风至 160  $^{\circ}C$  左右,导致除燃

料(垃圾)外其他输入热量较大,燃料效率比毛效率高 1.5%~5.0%,毛效率更能反应垃圾焚烧电站焚烧炉-余热锅炉效率的真实运行情况。因此,在垃圾焚烧电站锅炉设计及性能试验时,建议采用毛效率作为设计及评定依据。

表 3 焚烧炉-余热锅炉效率计算数据

Tab. 3 Calculation data of furnace-boiler efficiency

参 数	数 值
有用输出热量 $Q_N/MW$	84.75
排烟热损失 $Q_C/MW$	10.64
CO 未完全燃烧热损失 $Q_{CO}/MW$	0
炉渣显热及未完全燃烧热损失 $Q_{RA}/MW$	1.33
飞灰显热及未完全燃烧热损失 $Q_{FA}/MW$	0.18
散热损失 $Q_{Si}/MW$	0.96
炉排冷却热损失 $Q_{ku}/MW$	0.31
毛效率 $\eta_g/\%$	86.34
除燃料(垃圾)外其他输入热量 $Q_Z/MW$	5.02
燃料输入热量 $Q_{Z,B}/MW$	93.15
燃料效率 $\eta_{EF}/\%$	90.99

### 3.4 各测量参数灵敏度及不确定度计算

各参数的不确定度由 A 类不确定度和 B 类不确定度合成求得。表 4 给出了焚烧炉-余热锅炉效率计算过程中所涉及的 26 个不确定度计算结果。

焚烧炉-余热锅炉效率合成不确定度  $u_c(\eta_g) = 0.33\%$ ,包含因子  $k = 2$ ,扩展不确定度  $U = 0.65\%$ ,相对扩展不确定度为 0.75%。

### 3.5 不确定度分析

各参数对焚烧炉-余热锅炉效率不确定度的影响权重如图 1 所示。影响权重由大到小排序为  $q_C > u_{RA} > m_D > \varphi_{RA} > t_G > t_{out} > t_{in} > t_{Sp} > \varphi_{MO} > m_B > t_D > \varphi_{FA} > \varphi_{H_2O} > m_{SCR} > \varphi_{CO_2} > u_{FA} > p_D > t_{PL1} > m_w > t_{PL2} > \varphi_{O_2}$ 。其中,省煤器出口烟气体积流量测量不确定度分量所占焚烧炉-余热锅炉效率合成不确定度权重值最大,为 54.1%,其次是炉渣热灼减率测量不确定度分量,所占权重值为 35.0%。测量省煤器出口烟气体积流量、炉渣热灼减率、过热蒸汽流量、湿炉渣量占垃圾处理量百分比及省煤器出口烟温 5 个参数测量不确定度分量,所占焚烧炉-余热锅炉效率不确定度权重值为 98.4%。性能试验期间应着重



提高该参数的测量精度,以有效保证焚烧炉-余热锅炉效率的测试质量。

表 4 各参数测量不确定度计算汇总

Tab.4 Calculated results of measurement uncertainties of various factors

参 数	$C_i$	$u(x_i)$	$u_i(y)$
燃料质量流量 $m_B$	-0.035	0.382	0.013
一次风体积流量 $q_{PL}$	0	726.993	0
一次风蒸汽-空气预热器高低压段间风温 $t_{PL1}$	-0.001	1.801	0.001
一次风蒸汽-空气预热器出口风温 $t_{PL2}$	0.001	1.558	0.001
水冷炉排进口水温 $t_{in}$	0.041	0.475	0.019
水冷炉排进水压力 $p_{in}$	0	0.034	0
水冷炉排出口水温 $t_{out}$	-0.041	0.476	0.020
水冷炉排进水量 $m_w$	-0.007	0.135	0.001
省煤器出口烟温 $t_C$	-0.060	0.769	0.046
省煤器出口 $O_2$ 体积分数(干基) $\varphi_{O_2}$	-0.011	0.057	0.001
省煤器出口 $CO_2$ 体积分数(干基) $\varphi_{CO_2}$	-0.035	0.127	0.004
省煤器出口 $CO$ 体积分数(干基) $\varphi_{CO}$	0	0	0
省煤器出口 $H_2O$ 体积分数(干基) $\varphi_{H_2O}$	-0.011	0.472	0.005
省煤器出口烟气体积流量(标态) $q_C$	0	4 380.699	0.239
湿炉渣量占垃圾处理量百分比 $\varphi_{RA}$	-0.062	0.943	0.058
湿炉渣量含水率 $\varphi_{MO}$	1.407	0.011	0.016
炉渣热灼减率 $u_{RA}$	-48.253	0.004	0.192
飞灰产生率 $\varphi_{FA}$	-0.062	0.128	0.008
飞灰可燃物质量分数 $u_{FA}$	-7.859	0.000	0.003
过热蒸汽流量 $m_D$	0.104	0.626	0.065
过热蒸汽压力 $p_D$	-0.062	0.035	0.002
过热蒸汽温度 $t_D$	0.010	1.071	0.011
供 SCR 汽包抽汽流量 $m_{SCR}$	0.086	0.058	0.005
蒸汽-空气预热器高压段疏水压力 $p_w$	0.008	0.034	0
省煤器进口给水压力 $p_{Sp}$	-0.003	0.037	0
省煤器进口给水温度 $t_{Sp}$	-0.019	0.906	0.017

一次风体积流量、一次风蒸汽-空气预热器高低压段间风温及出口风温、水冷炉排进水压力、水冷炉排进水量、省煤器出口烟气成分( $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $H_2O$ )、飞灰产生率、飞灰可燃物质量分数、过热蒸汽压力、供 SCR 汽包抽汽流量、蒸汽-空气预热器高

压段疏水压力以及省煤器进口给水压力的不确定度分量所占权重值不足 1%,对焚烧炉-余热锅炉效率测试结果的不确定度影响很小。

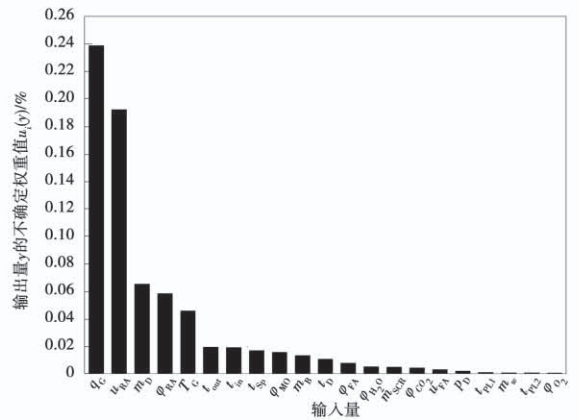


图 1 主要参数不确定度影响权重

Fig.1 The weightings affected by the uncertainties of main parameters

### 4 结 论

(1) 焚烧炉-余热锅炉毛效率更能反应效率的真实性,在垃圾焚烧电站锅炉设计及性能试验时,建议采用焚烧炉-余热锅炉毛效率。

(2) 各参数测量不确定度对焚烧炉-余热锅炉效率试验结果不确定度影响为  $q_C > u_{RA} > m_D > \varphi_{RA} > t_C > t_{out} > t_{in} > t_{Sp} > \varphi_{MO} > m_B > t_D > \varphi_{FA} > \varphi_{H_2O} > m_{SCR} > \varphi_{CO_2} > u_{FA} > p_D > t_{PL1} > m_w > t_{PL2} > \varphi_{O_2}$ 。

(3) 性能试验中应严格控制省煤器出口烟气体积流量、炉渣热灼减率、过热蒸汽流量、湿炉渣量占垃圾处理量百分比及省煤器出口烟温 5 个参数的测量精度,以提高焚烧炉-余热锅炉效率测试结果的精确度。

(4) 针对试验不确定度影响较小的参数,可以降低测点数量及采样频率,或采用表盘数据,以提高测试效率。

### 参考文献:

[1] 吕当振,段学农,陈一平,等.各因素测量不确定度对锅炉热效率测试质量的影响[J].热力发电,2014,43(5):54-58,64.  
 LYU Dang-zhen, DUAN Xue-nong, CHEN Yi-ping, et al. Effect of measurement uncertainty on test quality of boiler thermal efficiency

- [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(5): 54-58, 64.
- [2] FDBR-Guideline RL 7-2013: Acceptance Testing of Waste Incineration Plants with Grate Firing Systems[S].
- [3] ASME PTC 34-2017: Waste Combustors with Energy Recovery Performance Test Codes[S].
- [4] ASME PTC 19.1-2013: 试验不确定度[S].  
ASME PTC19.1-2013: Test Uncertainty[S].
- [5] 常经纬, 赵永坚, 田晓璇. 燃煤机组全厂净热耗率不确定度分析[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 80-86.  
CHANG Jing-wei, ZHAO Yong-jian, TIAN Xiao-xuan. Uncertainty analysis of total plant net heat rate of a coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 80-86.
- [6] JJF 1059.1-2012: 测量不确定度评定与表示[S].  
JJF 1059.1-2012: Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement[S].
- [7] 王志国, 马一太, 卢 苇. 不确定度分析原理在锅炉热效率测算中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005(3): 127-131.  
WANG Zhi-guo, MA Yi-tai, LU Wei. The application of uncertainty analysis theory in thermal efficiency testing for boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 127-131.
- [8] 卓迅佳, 刘京燕, 王江伟, 等. 锅炉反平衡热效率不确定度分析及应用[J]. 热力发电, 2012, 41(2): 32-36.  
ZHUO Xun-jia, LIU Jing-yan, WANG Jiang-wei, et al. Analysis and application of uncertainty in anti-balancing thermal efficiency of boilers[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(2): 32-36.
- [9] 华晓宇, 王睿坤, 裘立春, 等. 基于 ASME 和 GB 两种标准的混煤掺烧锅炉反平衡效率及其不确定度计算[J]. 热力发电, 2016, 45(3): 34-40.  
HUA Xiao-yu, WANG Rui-kun, QIU Li-chun, et al. Anti-balancing efficiency and its uncertainty analysis of boiler burning mixed coal according to ASME and GB standard[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(3): 34-40.
- [10] 任海锋, 阎维平, 吴 威. 不确定度原理在锅炉热效率测试中的应用[J]. 热力发电, 2013, 42(3): 8-10, 30.  
REN Hai-feng, YAN Wei-ping, WU Wei. Application of uncertainty principle in boiler thermal efficiency test[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(3): 8-10, 30.
- [11] 焦同帅, 阎维平, 曹 颖, 等. CFB 锅炉散热损失测算及估算对焚烧炉-余热锅炉效率的影响研究[J]. 热力发电, 2016, 45(12): 45-49.  
JIAO Tong-shuai, YAN Wei-ping, CAO Ying, et al. Influence of measurement and estimation of heat loss on efficiency of CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(12): 45-49.

(金圣迪 编辑)