

# 基于燃料特性实时修正的煤气锅炉 热效率在线监测方法

叶亚兰<sup>1</sup>, 司凤琪<sup>2</sup>, 徐治皋<sup>2</sup>, 江文豪<sup>2</sup>

(1. 江苏海事职业技术学院, 江苏 南京 211170; 2. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 对煤气锅炉热效率计算模型进行分析, 在此基础上提出了一种基于燃料特性实时修正的煤气锅炉热效率在线监测方法, 通过锅炉实时运行数据对定期化验的煤气特性进行修正, 得到实时煤气特性, 并将其用于煤气锅炉热效率计算, 进而实现锅炉热效率的在线监测。以某 220 t/h 煤气锅炉为研究对象进行实例验证, 结果表明, 在测试工况下, 采用传统方法得到的锅炉在线热效率的平均相对误差值达到 0.36%, 而采用本研究得到的锅炉在线热效率的平均相对误差值仅为 0.09%, 说明本研究提出的模型是有效的, 能够减小煤气特性波动给锅炉热效率计算带来的不利影响, 从而提高了锅炉效率在线监测结果的准确性和可靠性。

**关键词:** 煤气锅炉; 热效率; 在线监测; 燃料特性

中图分类号: TK229.8 文献标识码: A

## 引言

作为钢铁企业煤气平衡的最大缓冲用户, 煤气发电机组在钢铁企业得到了大量应用。近年来, 随着钢铁企业节能降耗工作的积极开展, 以及电厂在计算机热工控制、实时数据处理和管理系统等方面的不断改进和完善, 煤气发电机组运行性能的实时监测得到了局部推广和应用。作为衡量机组运行经济性的重要指标, 煤气锅炉热效率的在线监测也成为相关技术人员比较关注的课题。

煤气锅炉实时效率的精确计算需要有完整的入炉煤气特性实时数据(包括煤气成分和煤气热值), 但是由于在线测量设备存在价格昂贵、长期运行时测量精度降低等问题, 目前大多钢铁企业自备电厂都未配备入炉煤气特性在线分析仪, 电厂对于入炉煤气特性的监测主要采用离线化验结果。电厂会定期对入炉煤气进行取样化验获得分析数据, 并将该数据作为下一周期的入炉煤气特性。由于煤气成分

难免出现一定范围的波动, 况且取样分析时存在取样代表性、取样误差等问题, 因此采用定期化验数据不能真实反映入炉煤气特性, 用于锅炉热效率实时计算时必然造成结果的失真。

对煤气锅炉效率计算模型进行分析, 并在此基础上提出了一种基于燃料特性实时修正的煤气锅炉热效率在线监测方法。采用该方法进行锅炉效率监测, 不需要额外增加昂贵的在线分析仪, 充分利用电厂现有的热工仪表配置条件即可实现, 具有良好的可实施性。最后, 以某 220 t/h 煤气锅炉为例, 验证了本方法的合理有效性。

## 1 煤气锅炉热效率计算模型

### 1.1 燃料燃烧计算模型

燃料燃烧计算是锅炉热效率计算的首要工作, 主要包括燃烧所需空气量、燃烧产生烟气体量和烟气成分等。工程上进行煤气燃烧计算时, 一般以  $1 \text{ m}^3$  干煤气为基准, 对含有  $1 \text{ m}^3$  干煤气及  $d_g$  (kg) 水蒸气的湿煤气进行计算, 这样做的好处在于计算中所用的干煤气成分不会随湿含量的变化而变化。

#### 1.1.1 理论干空气量

根据煤气的特性, 煤气成分可用式(1)表示:

$$\varphi(\text{CO}) + \varphi(\text{H}_2) + \sum \varphi(\text{C}_m\text{H}_n) + \varphi(\text{O}_2) + \varphi(\text{N}_2) + \varphi(\text{CO}_2) = 100 \quad (1)$$

式中:  $\varphi(\text{CO})$ 、 $\varphi(\text{H}_2)$ 、 $\varphi(\text{C}_m\text{H}_n)$ 、 $\varphi(\text{O}_2)$ 、 $\varphi(\text{N}_2)$ 、 $\varphi(\text{CO}_2)$ —煤气中各组分的容积含量百分率, %。

根据气体燃烧反应方程式, 煤气燃烧所需理论干空气量为:

$$V_{\text{gk}}^0 = \frac{1}{21} [0.5\varphi(\text{H}_2) + 0.5\varphi(\text{CO}) + \sum (m +$$

收稿日期: 2014-01-07; 修订日期: 2014-02-21

作者简介: 叶亚兰(1986-), 女, 江苏南京人, 江苏海事职业技术学院讲师。

$$\frac{n}{4} \varphi(C_m H_n) - \varphi(O_2) ] \quad (2)$$

式中:  $V_{gk}^0$  —理论干空气需要量,  $m^3/m^3$ 。

### 1.1.2 实际干空气量

实际供给的干空气量可按下式计算:

$$V_{gk} = \alpha V_{gk}^0 \quad (3)$$

式中:  $V_{gk}$  —实际干空气量,  $m^3/m^3$ ;  $\alpha$  —过量空气系数。

对于过量空气系数  $\alpha$ , 工程上一般根据 GB/T10184-1988 《电站锅炉性能试验规程》按照式(4)进行计算<sup>[1]</sup>:

$$\alpha = \frac{21}{21 - [ \varphi'(O_2) - 0.5\varphi'(CO) - 2\varphi'(CH_4) - 0.5\varphi'(H_2) ]} \quad (4)$$

式中:  $\varphi'$  —干烟气中的各组分的容积含量百分率, %。

然而, 式(4)是假定燃料含 N 量很少并且理论干空气量与理论干烟气体积很接近时(烟气中含 N 量接近 79%) 的简化公式, 对于钢铁企业煤气锅炉并不适用。钢铁厂副产品煤气含 N 量往往较高, 尤其是高炉煤气, 约 50% - 60%, 用式(4)计算  $\alpha$  必然带来较大误差, 此时过量空气系数应该按照式(5)进行计算:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{\varphi'(O_2) - 0.5\varphi'(CO) - 2\varphi'(CH_4) - 0.5\varphi'(H_2)}{\varphi'(N_2) - \frac{\varphi(N_2)}{V_{gy}}} } \quad (5)$$

上式可结合气体燃烧的基本原理推导得到, 此处略。

煤气不完全燃烧产物中,  $CH_4$  和  $H_2$  的含量比 CO 要少得多, 基本上处于测量不到的水平, 因此在线计算时仅将 CO 视为该烟气中的不完全燃烧产物, 从而使得式(5)简化为:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{\varphi'(O_2) - 0.5\varphi'(CO)}{\varphi'(N_2) - \frac{\varphi(N_2)}{V_{gy}}} } \quad (6)$$

### 1.1.3 实际干烟气体积

在常规计算方法中, 实际干烟气体积一般通过理论干烟气体积和过量空气量计算得到:

$$V_{gy} = V_{gy}^0 + (\alpha - 1)V_{gk}^0 \quad (7)$$

式中:  $V_{gy}$  —实际干烟气体积,  $m^3/m^3$  (干煤气);  $V_{gy}^0$  —

理论干烟气体积,  $m^3/m^3$  (干煤气)。

可见, 采用常规方法计算干烟气体积时需要先求解过量空气系数  $\alpha$ , 而式(6)所示的适用于煤气锅炉的过量空气系数计算公式中又含有干烟气体积  $V_{gy}$ , 因此必须经过迭代计算才能求出  $V_{gy}$ , 这无疑会增加求解工作量。

事实上, 煤气燃烧产生的实际干烟气体积可根据煤气成分和烟气成分按式(8)计算:

$$V_{gy} = \frac{\varphi(CO_2) + \varphi(CO) + \sum m\varphi(C_m H_n)}{\varphi'(CO_2) + \varphi'(CO)} \quad (8)$$

上式可结合气体燃烧的基本原理推导得到, 此处略。

由式(8)可见, 采用此方法计算煤气锅炉的干烟气体积非常方便, 无须迭代计算, 根据煤气和烟气成分数据就可准确计算出干烟气体积。

### 1.1.4 烟气中水蒸气量

烟气中水蒸气主要来源包括煤气中氢的燃烧产生的水蒸气、随煤气带入的水分、以及随空气带入的水蒸气 3 部分, 可按式(9)计算:

$$V_{H_2O} = \frac{1}{100} \left[ \varphi(H_2) + \sum \frac{n}{2} \varphi(C_m H_n) \right] + 1.2(d_g + 1.293\alpha V_{gk}^0 d_k) \quad (9)$$

式中:  $V_{H_2O}$  —烟气中所含水蒸气容积,  $m^3/m^3$  (干煤气);  $d_g$  —煤气含湿量,  $kg/m^3$  (干煤气);  $d_k$  —空气的绝对湿度,  $kg/kg$  (干空气) 在线计算时可按季节取: 在冬季取 0.002  $kg/kg$ , 夏季取 0.02  $kg/kg$ , 春季与秋季取 0.01  $kg/kg$ <sup>[2]</sup>。

## 1.2 锅炉热效率计算模型

锅炉热效率一般采用反平衡法, 根据各项热损失计算:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (10)$$

式中:  $\eta$  —锅炉热效率, %;  $q_2$  —排烟热损失, %;  $q_3$  —可燃气体未完全燃烧热损失, %;  $q_4$  —固体未完全燃烧热损失, %;  $q_5$  —锅炉散热损失, %;  $q_6$  —灰渣物理热损失, %。

对于煤气锅炉, 不存在机械不完全燃烧热损失  $q_4$  和灰渣物理热损失  $q_6$ , 故这两项损失均为零。因此, 只需要计算出排烟热损失  $q_2$ 、化学不完全燃烧热损失  $q_3$  以及散热损失  $q_5$ , 即可得到煤气锅炉的热效率, 具体公式可参考 GB/T10184-1988 《电站锅炉性能试验规程》。

## 2 基于煤气特性实时修正的锅炉热效率在线监测实现方案

由于目前电厂对煤气特性的监测主要通过定期取样化验分析得到, 将该数据用于锅炉热效率的实时计算时必然造成结果的失真。因此应对其进行修正计算, 以减小煤气成分波动给热效率计算带来的不利影响。

锅炉热效率在线监测方案如图 1 所示。

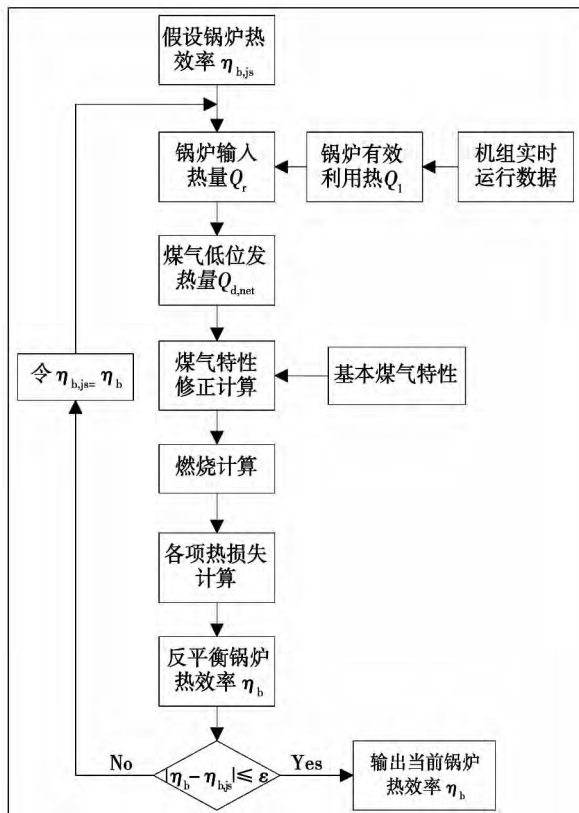


图 1 煤气锅炉热效率在线监测流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the flow path for on-line monitoring the thermal efficiency of a coal gas-fired boiler

### 2.1 锅炉输入热量 $Q_r$ 计算

假设一个初始的煤气锅炉热效率  $\eta_{b,js}$  (%) 根据机组实时采集的运行数据计算得到锅炉有效利用热  $Q_1$  (kJ/h) 根据  $\eta_{b,js}$ 、 $Q_1$  以及实测煤气量计算得到锅炉输入热量  $Q_r$  :

$$Q_r = k \frac{Q_1}{B_g \eta_{b,js}} \times 100 \quad (11)$$

式中:  $B_g$ —煤气量,  $\text{m}^3/\text{h}$ , 采用实时采集数据;  $k$ —

热量换算系数,  $k = (0.833 + d_g) / 0.833$ 。

入炉煤气中的水分一般以饱和水蒸气形式存在, 因此煤气含水量  $d_g$  可直接根据炉前煤气总管上的实测煤气温度和煤气压力监测值计算得到。

### 2.2 煤气特性修正计算

根据锅炉输入热量  $Q_r$  计算得到煤气干燥基低位发热量  $Q_{d,net}$  :

$$Q_{d,net} = Q_{ar,net} + 2257d_g = Q_r + 2257d_g \quad (12)$$

式中:  $Q_{d,net}$ —煤气干燥基低位发热量  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;  $Q_{ar,net}$ —煤气收到基低位发热量  $\text{kJ}/\text{m}^3$ 。

以电厂定期化验分析得到的煤气特性(包括煤气成分和发热量, 其中发热量可以通过煤气成分计算得到)为基础, 根据煤气干燥基低位发热量  $Q_{d,net}$  对其进行修正。对于  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  以及各碳氢化合物  $\text{C}_m\text{H}_n$  等可燃组分, 修正公式为:

$$\begin{cases} \varphi(\text{CO}) = k_1 \varphi_0(\text{CO}) \\ \varphi(\text{H}_2) = k_1 \varphi_0(\text{H}_2) \\ \varphi(\text{C}_m\text{H}_n) = k_1 \varphi_0(\text{C}_m\text{H}_n) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\varphi(\text{CO})$ 、 $\varphi(\text{H}_2)$ 、 $\varphi(\text{C}_m\text{H}_n)$ —煤气中各可燃组分的容积成分修正值, %;  $\varphi_0(\text{CO})$ 、 $\varphi_0(\text{H}_2)$ 、 $\varphi_0(\text{C}_m\text{H}_n)$ —煤气中各可燃组分的容积成分基本值, %;  $k_1$ —可燃组分修正系数,  $k_1 = Q_{d,net} / Q_{d,net}^0$ ;  $Q_{d,net}^0$ —煤气干燥基低位发热量基本值  $\text{kJ}/\text{m}^3$  (干煤气)。

对于  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$  等不可燃组分, 修正公式如下:

$$\begin{cases} \varphi(\text{CO}_2) = k_2 \varphi_0(\text{CO}_2) \\ \varphi(\text{N}_2) = k_2 \varphi_0(\text{N}_2) \\ \varphi(\text{O}_2) = k_2 \varphi_0(\text{O}_2) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\varphi(\text{CO}_2)$ 、 $\varphi(\text{N}_2)$ 、 $\varphi(\text{O}_2)$ —煤气中各不可燃组分的容积成分修正值, %;  $\varphi_0(\text{CO}_2)$ 、 $\varphi_0(\text{N}_2)$ 、 $\varphi_0(\text{O}_2)$ —煤气中各不可燃组分的容积成分基本值, %;  $k_2$ —不可燃组分修正系数,  $k_2 =$

$$\frac{100 - \varphi(\text{CO}) - \varphi(\text{H}_2) - \sum \varphi(\text{C}_m\text{H}_n)}{\varphi_0(\text{CO}_2) + \varphi_0(\text{N}_2) + \varphi_0(\text{O}_2)}$$

### 2.3 燃烧计算

根据获得的煤气特性数据, 按图 2 所示流程进行燃烧计算, 包括烟气成分、干烟气体积以及烟气中水蒸气含量的计算。

#### 2.3.1 烟气成分计算

烟气成分包含  $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$ , 其中  $\text{O}_2$  含量

可取空气预热器出口处的排烟氧量实时监测数据, 而其余 3 个参数 CO、CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 则一直是煤气锅炉烟气成分实时计算的一道难题。近年来, 随着工业煤气相关安全规范执行力度的逐渐加大, 尾部烟道

CO 含量在线监测仪在钢铁企业煤气锅炉中得到广泛应用, 从而为烟气成分的实时计算提供了现实条件。

首先, 根据煤气成分计算得到燃料特性系数 β:

$$\beta = \frac{0.395[\varphi(\text{H}_2) + \varphi(\text{CO}_2)] + 0.79 \sum \left[ \left( m + \frac{n}{4} \right) \varphi(\text{C}_m\text{H}_n) \right] - 0.79\varphi(\text{O}_2) + 0.21\varphi(\text{N}_2)}{\varphi(\text{CO}) + \sum m\varphi(\text{C}_m\text{H}_n) + \varphi(\text{CO}_2)} - 0.79 \quad (15)$$

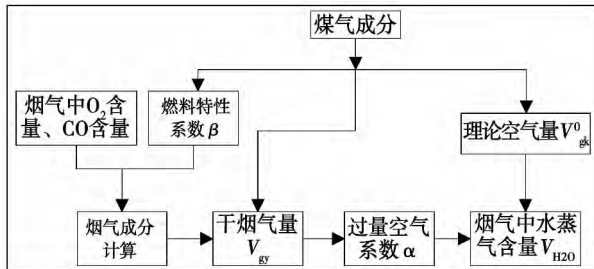


图 2 燃烧计算流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the combustion calculation flow path

然后, 根据排烟氧量实时监测值  $\varphi(\text{O}_2)$ 、CO 含量实时监测值  $\varphi(\text{CO})$  以及燃料特性系数 β 计算得到干烟气中 CO<sub>2</sub> 的容积成分  $\varphi(\text{CO}_2)$ :

$$\varphi(\text{CO}_2) = \frac{21 - \varphi(\text{O}_2) - \varphi(\text{CO})(0.605 + \beta)}{1 + \beta} \quad (16)$$

式中:  $\varphi(\text{CO}_2)$  — 干烟气中 CO<sub>2</sub> 的容积百分数 %。

根据烟气中 O<sub>2</sub>、CO 以及 CO<sub>2</sub> 的容积百分数可计算得到干烟气中 N<sub>2</sub> 的容积百分数  $\varphi(\text{N}_2)$ :

$$\varphi(\text{N}_2) = 100 - \varphi(\text{O}_2) - \varphi(\text{CO}) - \varphi(\text{CO}_2) \quad (17)$$

式中:  $\varphi(\text{N}_2)$  — 干烟气中 N<sub>2</sub> 的百分数 %。

### 2.3.2 干烟气量计算

与传统的通过理论干烟气量和过剩空气量计算干烟气量的方法不同, 本研究根据煤气成分和烟气成分按照式(8)计算得到实际干烟气量  $V_{gy}$ 。

### 2.3.3 过量空气系数计算

根据煤气成分、烟气成分和干烟气量按照式(6)计算得到过量空气系数 α。

### 2.3.4 烟气中水蒸气含量计算

先根据式(2)计算出理论空气量  $V_{gk}^0$ , 然后根据式(9)计算出烟气中水蒸气含量  $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 。

### 2.4 锅炉热效率计算

结合燃烧计算结果和锅炉实时运行数据进行各

项热损失计算, 分别得到排烟热损失  $q_2$ 、化学不完全燃烧热损失  $q_3$  以及散热损失  $q_5$ ; 根据所获得的各项热损失数据计算得到锅炉热效率  $\eta_b$ :

$$\eta_b = 100 - (q_2 + q_3 + q_5) \quad (18)$$

将锅炉热效率  $\eta_{b,js}$  和锅炉热效率  $\eta_b$  进行比较, 如果  $(\eta_{b,js} - \eta_b)$  的绝对值大于给定的微小量 ε, 则将当前的锅炉热效率  $\eta_b$  赋值给锅炉热效率  $\eta_{b,js}$ , 然后重新计算, 直到  $|\eta_{b,js} - \eta_b| \leq \varepsilon$ 。

最后, 输出当前锅炉热效率  $\eta_b$ 。

## 3 计算实例及分析

某钢铁企业自备电厂建有一台 220 t/h 自然循环煤气锅炉, 采用高温高压参数, 过热蒸汽温度 540 °C, 过热蒸汽压力 9.81 MPa。该锅炉纯燃高炉煤气, 采用旋流式燃烧器, 前后墙对冲燃烧方式。锅炉呈 Π 形露天布置、全钢架结构、平衡通风。

选取两个运行工况, 将本研究提出的在线计算方法应用于该锅炉的实时效率监测, 并通过现场实测数据进行对比验证。锅炉的煤气特性和主要运行数据分别如表 1 和如表 2 所示, 效率计算结果如表 3 所示。

表 1 煤气特性数据

Tab. 1 Characteristic data of the coal gas

煤气特性	工况 1		工况 2	
	基本值	实测值	基本值	实测值
$\varphi(\text{CO}) / \%$	22.57	21.20	21.25	20.82
$\varphi(\text{H}_2) / \%$	2.31	2.16	2.07	1.99
$\varphi(\text{CH}_4) / \%$	0.57	0.53	0.49	0.46
$\varphi(\text{CO}_2) / \%$	19.86	20.28	20.37	20.50
$\varphi(\text{N}_2) / \%$	54.69	55.83	55.82	56.23
$Q_{d,net} / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	3306	3102	3085	3011

备注: 基本值是指电厂定期取样化验的结果。

表 2 锅炉主要运行数据

Tab.2 Main operation data of the boiler

项目	工况 1	工况 2
主蒸汽流量 / t · h <sup>-1</sup>	212.5	183.7
主蒸汽压力 / MPa	9.8	9.8
主蒸汽温度 / °C	535.7	538.0
给水流量 / t · h <sup>-1</sup>	214.6	185.5
给水压力 / MPa	13.4	13.1
给水温度 / °C	215.2	214.8
排烟温度 / °C	142.7	145.5
排烟氧量 / %	2.64	2.89
排烟中 CO 含量 / %	0.13	0.14
送风机入口温度 / °C	27.6	28.5
煤气流量 / m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	209 214	187 632
煤气压力 / kPa	6.1	6.0
煤气温度 / °C	34.8	32.3

由表 3 可知, 工况 1 和工况 2 下, 采用传统方法计算得到的锅炉在线热效率的相对误差值分别为 0.51% 和 0.21%, 平均相对误差值达到 0.36%, 说明传统方法计算出的锅炉热效率已经大大偏离实际值, 不能反映锅炉的真实运行状况; 采用本研究方法计算得到的锅炉在线热效率的相对误差值分别为 0.11% 和 0.07%, 平均相对误差值仅为 0.09%, 说明本文方法是合理有效的, 能够提高锅炉效率在线监测结果的准确性和可靠性。

此外, 表 3 中本研究方法得到的煤气特性是修正计算后的结果, 通过对比可以发现, 与传统方法采用的定期化验数据相比, 修正后的煤气特性更加接近实测值。

表 3 锅炉效率计算结果

Tab.3 Calculation results of the boiler efficiency

	工况 1			工况 2			
	在线计算		实测数据 计算结果	在线计算		实测数据 计算结果	
	传统方法	本方法		传统方法	本方法		
煤气特性	$\varphi(\text{CO}) / \%$	22.57	21.48	21.20	21.25	20.89	20.82
	$\varphi(\text{H}_2) / \%$	2.31	2.20	2.16	2.07	2.04	1.99
	$\varphi(\text{CH}_4) / \%$	0.57	0.54	0.53	0.49	0.48	0.46
	$\varphi(\text{CO}_2) / \%$	19.86	20.19	20.28	20.37	20.48	20.50
	$\varphi(\text{N}_2) / \%$	54.69	55.59	55.83	55.82	56.11	56.23
	$Q_{d, \text{net}} / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	3306	3147	3102	3085	3033	3011
	$\varphi'(\text{O}_2) / \%$	2.64	2.64	2.64	2.89	2.89	2.89
	$\varphi'(\text{CO}) / \%$	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14
燃烧计算	$\varphi'(\text{CO}_2) / \%$	25.23	25.17	25.16	24.92	24.90	24.92
	$\varphi'(\text{N}_2) / \%$	72.00	72.06	72.07	72.05	72.07	72.05
	$V_{\text{gk}}^0 / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	0.647	0.616	0.607	0.602	0.592	0.587
	$V_{\text{gy}}^0 / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	1.488	1.464	1.458	1.455	1.447	1.444
	$\alpha$	1.322	1.333	1.337	1.376	1.380	1.383
	$V_{\text{gy}} / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	1.696	1.669	1.661	1.680	1.671	1.667
	$V_{\text{H}_2\text{O}} / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	0.115	0.114	0.112	0.106	0.104	0.104
	$Q_r / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	3207	3047	3003	2999	2947	2925
	$Q_{2\text{gy}}^0 / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	276.3	271.8	270.6	278.2	276.7	276.1
	$Q_2^{\text{H}_2\text{O}} / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	20.1	19.9	19.5	18.8	18.4	18.4
输入热量及 各项热损失	$q_2 / \%$	9.24	9.57	9.66	9.90	10.01	10.07
	$q_3 / \%$	0.87	0.90	0.91	0.99	1.00	1.01
	$q_5 / \%$	0.52	0.52	0.52	0.60	0.60	0.60
	$\eta / \%$	89.37	89.01	88.91	88.51	88.38	88.32
锅炉热效率	$ \Delta\eta  / \%$	0.46	0.10	—	0.18	0.06	—
	$ \delta\eta  / \%$	0.51	0.11	—	0.21	0.07	—

备注: 传统方法是指采用电厂定期取样化验得到的煤气特性进行锅炉热效率在线计算。

### 4 结 论

锅炉热效率的在线监测是机组性能实时监测的一项重要内容,通过锅炉实时运行数据对定期化验的煤气特性进行修正,得到实时煤气特性,并将其用于煤气锅炉热效率计算,进而实现锅炉热效率的在线监测。本方法具有如下特点:

(1) 减小了煤气成分波动给锅炉效率计算带来的不利影响,监测结果比采用定期化验数据计算得到的锅炉热效率更加准确。

(2) 现场不需要额外增加昂贵的在线分析仪,充分利用电厂现有的条件即可实现,具有良好的可实施性和可操作性。

(3) 能够较为准确地对煤气锅炉的热效率进行

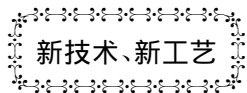
在线监测,实时分析锅炉的各项热损失,为锅炉的优化运行提供依据。

### 参考文献:

[1] 国家技术监督局. GB/T10184 - 1988. 电站锅炉性能试验规程[S]. 北京: 机械工业出版社, 1988.  
State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB 10184 - 88. Specification for performance test of utility boilers[S].

[2] 张小桃, 王培红. 一种新的锅炉效率的计算模型[J]. 电站系统工程, 1999, 15(4): 16 - 17.  
ZHANG Xiao-tao, WANG Pei-hong. New model for calculating the efficiency of a boiler[J]. Power Plant System Engineering, 1999, 15(4): 16 - 17.

( 陈 滨 编 辑 )



## 利用气体和液体燃料对动力锅炉进行现代化改造

《Теплоэнергетика》2012 年 3 月刊推出了 3 种低毒煤气重油燃烧器;在俄罗斯的一些电站中,把煤粉锅炉转换成燃烧天然气和重油时利用炉膛内抑制 NO<sub>x</sub> 形成的措施对煤气重油锅炉进行现代化改造,采用这种燃烧器。

在利用《中央锅炉涡轮机研究所》科研生产联合企业无限股份公司新一代结构的低毒燃烧器对蒸发量从 50 到 1 000 t/h 锅炉进行现代化改造时可制定并采取措施大幅提高锅炉的技术、经济和生态指标。

由于利用《中央锅炉涡轮机研究所》科研生产联合企业的燃烧器代替现有燃烧器,使向大气排放的 NO<sub>x</sub> 比改造前排放水平减少 20% - 25%。

在燃烧天然气并供给再循环烟气时,额定负荷下 NO<sub>x</sub> 排放不超过 125 mg/m<sup>3</sup> (折算 a = 1.4)。

应用新一代燃烧器保证了启动的可靠性、燃料在整个负荷变化范围内燃烧稳定。

燃烧器运行范围为 20% - 100% 热功率。

利用具有可调天然气分配部分的燃烧器不仅达到低 NO<sub>x</sub> 排放,而且也影响到过热蒸汽的温度、在燃烧区内的温度分布、火焰的排放特性。

应用新一代燃烧器可以使锅炉装置的效率提高约 1%。

( 吉 桂 明 摘 译 )

**ticles in a Parallel Dual-speed Dual Fluidized Bed** [刊, 汉] SHUANG Wei, LU Xiao-feng, HE Hong-hao, WANG Quan-hai ( Education Ministry Key Laboratory on Low Grade Energy Utilization Technologies and Systems, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(2). - 165 - 170

The authors put forward a parallel dual-speed dual fluidized bed technology and conducted an experimental study of the exchange characteristics of coarse and fine particles. The research results show that different operating and structural parameters can always bring about an influence on the exchange of particles in a definite direction but the extent of such an influence varies in various particle diameters. The air speed remarkably influences the exchange of particles in a diameter below 0.6 mm, maximally attaining 100% (total exchange). The difference of the partition wall height and the coarse bed height exists an optimum value and makes the exchange effectiveness of particles in a definite direction be optimum. When the fine bed height increases to a certain value, there will emerge a “reverse flow” phenomenon of the fine particles. Under various operating conditions, the average diameter of particles in the fine bed is only 0.55 mm maximally. **Key words:** circulation fluidized bed, parallel, dual speed, dual bed, particle exchange

**增压锅炉大容量蒸汽机械雾化喷油器的设计及试验研究 = Design and Experimental Study of a Large-capacity Steam-mechanically-atomized Oil Sprayer in a Supercharged Boiler** [刊, 汉] ZHANG Hai-long, WU Guo-song, WANG Xuan (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078), LI Guo-bin (Naval Representative Office Resident in Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(2). - 171 - 174

A detailed investigation was made of the design of a large-capacity steam-mechanically-atomized oil sprayer in a marine supercharged boiler and a verification calculation was conducted of the oil sprayer by using several flow rate coefficient correction calculation methods. On this basis, the calculation results were analyzed and compared with the test results of the flow rate characteristics. It has been found that by using the flow rate coefficient  $\mu_{kj} = 0.405A_k^{-0.75}$  empirical formulae as the correction calculation method, the calculation results have a maximal error of 1.8% as compared with the test calibration results. The correction calculation method can be used in design and calculation of marine steam-mechanically-atomized oil sprayers. **Key words:** supercharged boiler, oil sprayer, correction calculation, flow rate characteristics

**基于燃料特性实时修正的煤气锅炉热效率在线监测方法 = Method for On-line Monitoring the Thermal Efficiency of a Coal-gas-fired Boiler Real-time Corrected Based on the Fuel Characteristics** [刊, 汉] YE Ya-lan

( Jiangsu Maritime Vocational College of Technology ,Nanjing ,China ,Post Code: 211170) ,SI Feng-qi ,XU Zhi-gao ,JIANG Wen-hao ( College of Energy Source and Environment ,Southeast University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210096) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29( 2) . -175 -180

Analyzed was a model for calculating the thermal efficiency of a coal-gas-fired boiler. On this basis ,a method for on-line monitoring the thermal efficiency of a coal-gas-fired boiler real-time corrected according to the fuel characteristics was put forward. By correcting the coal-gas characteristics periodically tested according to the real-time operating data of the boiler ,the real-time coal-gas characteristics were obtained and used for calculating the thermal efficiency of the boiler ,thus realizing an on-line monitoring of the thermal efficiency of the boiler. With a 220 t/h coal-gas-fired boiler serving as the object of study ,a case verification was performed. It has been found that under the testing condition ,if the traditional method is adopted ,the averaged relative error of the on-line thermal efficiency of the boiler can amount to 0.36% while it can be only 0.09% if the method under discussion is used ,indicating that the method in question is effective ,and can lessen the adverse effect on the calculation of the thermal efficiency of the boiler caused by the fluctuation in the coal-gas characteristics and enhance the accuracy and reliability in on-line monitoring the boiler efficiency. **Key words:** coal-gas-fired boiler ,thermal efficiency ,on-line monitoring ,fuel characteristics

**基于多变量权值自适应修正的电站锅炉稳态检测 = Steady-state Testing of a Utility Boiler Adaptively Corrected Based on the Multi-variable Weights** [刊 ,汉] CHEN Shi-he ,LUO Jia ,ZHANG Xi( Guangdong Power Grid Corporation ,Academy of Electric Power Sciences ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510080) ,ZHANG Shi-rong ( Automation Department ,Wuhan University ,Wuhan ,China ,Post Code: 430072) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29( 2) . -181 -186

The steady-state testing is an important link indispensable for modeling a utility boiler and performing steady-state optimization. A steady-state testing of a utility boiler was conducted by using the following six important operating variables: output power ,main steam pressure ,total coal quantity fed ,total air quantity ,water/coal ratio and intermediate temperature of a boiler unit. Firstly ,the changing speed and acceleration data of the variables were utilized respectively to calculate the steady-state indexes of the boiler and then the weights were added to these variables to obtain a comprehensive steady-state index for judging whether or not the boiler is in a steady state. To ensure that the steady-state testing algorithm has a proper response speed to any drastic change of variables ,a multi-variable weight adaptive correction algorithm was put forward to utilize in a comprehensive way the tendency and transient components of various variables to perform an adaptive correction of the weights. With the historic data of a 1000 MW unit to verify the algorithm in question ,it has been found that the algorithm under discussion can relatively ac-