

# 电站煤粉锅炉飞灰浓度模型

宣益民, 冯长青, 李 强

(南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 根据锅炉热平衡基本原理和燃烧理论, 建立了基于在线监测参数的飞灰浓度计算模型, 模型的计算值与实测值比较接近。模型对于在线测量飞灰含碳量有一定的工程实用性。

**关 键 词:** 煤粉锅炉; 飞灰含碳量; 飞灰浓度; 热效率

中图分类号: TK229.6 文献标识码: A

## 1 引 言

飞灰含碳量是电厂燃煤锅炉的主要运行经济指标和技术指标之一, 实时监测飞灰含碳量有利于调整风煤比, 提高锅炉燃烧控制水平, 降低发电成本, 提高机组运行的经济性。

飞灰含碳量的在线测量, 目前国内外应用较多的是单点采样型微波测试方法, 在电厂实际使用中, 这种方法存在飞灰采样缺乏代表性、样品管堵灰和附加设备复杂等缺点。

解决方法之一就是不用取样, 直接利用烟道中流动飞灰进行实时在线测量。烟道式飞灰含碳量测量系统就是基于这个思路提出的。

测量系统的信号对应烟道内测量空间碳的总量。锅炉调整运行工况或煤质变化时, 飞灰含碳量和飞灰浓度将变化, 从而引起碳的总量变化, 故需要实时确定飞灰浓度。

飞灰和烟气的稀相混合物中飞灰浓度小, 尚无精确的测试方法对其实施在线测量。本文建立飞灰浓度模型, 将飞灰浓度表示为锅炉各在线参数和飞灰含碳量的函数。从锅炉热平衡出发, 将煤种特性与锅炉热效率相结合用于实际电站锅炉的飞灰浓度计算。根据测量信号, 利用飞灰浓度模型, 可实时测量飞灰含碳量。

## 2 数学模型

飞灰浓度与煤种和锅炉运行工况都有关系, 飞

灰浓度表示如下:

$$I_{th} = f(\text{煤种特性, 运行工况}) \quad (1)$$

本模型的目的是为在线实时测量飞灰含碳量和预测锅炉效率提供辅助数据, 由于影响飞灰浓度的因素太多, 考虑所有因素是不现实的, 所以模型分析各变量对飞灰浓度的影响程度, 将影响程度小的变量取为常见的数值。最后经过化简, 将飞灰浓度表示为仅有的几个在线测量量的函数, 便于实时计算。

煤种特性主要考虑煤质中的水分和氢; 锅炉运行工况包括过热蒸汽温度、压力, 给水温度、压力, 蒸发量、耗煤量、排烟处的过量空气系数及排烟温度等。下面从煤种特性和锅炉热平衡角度来推导飞灰浓度。由煤种特性, 统计得到煤干燥无灰基高位发热值基本恒定。计算锅炉热平衡需要知道各项热损失, 尤其是排烟热损失。为此计算燃烧产物焓, 求出排烟热损失, 并求解热平衡方程。

### 2.1 锅炉热效率方程与燃料特性方程

煤粉锅炉总热损失或表述为:

$$\Sigma q = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad (2)$$

式中:  $q_2$ —排烟热损失, %;  $q_3$ —气体未完全燃烧热损失, %;  $q_4$ —固体未完全燃烧热损失, %;  $q_5$ —散热损失, %;  $q_6$ —灰渣物理热损失, %。其中排烟热损失公式<sup>[4]</sup>:

$$q_2 = \frac{(I_{py} - \alpha_{py} I_k^0) \times (100 - q_4)}{Q_r} \quad (3)$$

式中:  $I_{py}$ —排烟焓,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;  $I_k^0$ —理论空气焓,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;  $\alpha_{py}$ —排烟处过量空气系数;  $Q_r$ —锅炉输入热量,  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。

图 1 为 11 种烟煤的排烟热损失。排烟温度为  $157.6^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{py}$  为 1.4。依次为井径、峰峰、观音堂、天府、广旺、淮北、汾西、陶枣、开滦、北票、鹤岗煤田烟煤。可见, 当排烟温度、过量空气系数相同时, 排烟热损失波动幅度很小, 可近似视为排烟温度和过量空

气系数的函数, 而与具体煤种无关。一般地, 可用典型烟煤计算。

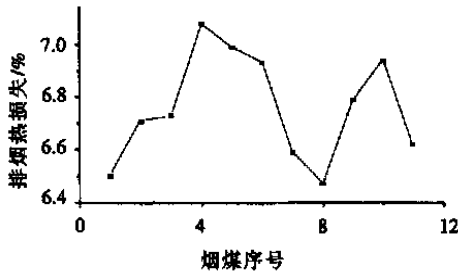


图 1 各种烟煤排烟热损失

本文根据开滦烟煤拟合排烟热损失公式为:

$$q_2 = f(\alpha_{py}, t_{py}) = 0.00438 \times (-12.97 + 1.1 t_{py} - 248.23 \alpha_{py} + 8.04 \alpha_{py} t_{py}) \quad (4)$$

其中:  $t_{py} = 100 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

锅炉效率为:

$$\eta_{gl} = 100 - \Sigma q = f_2(\alpha_{py}, t_{py}) - \frac{32866 A_{ar}}{Q} \times \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} \quad (5)$$

式中:  $f_2(\alpha_{py}, t_{py}) = 99.4 - q_2$ ;

$A_{ar}$  — 煤的收到基灰分, %;

$C_{fh}$  — 飞灰含碳量, %。

锅炉有效利用热为:

$$Q_{yz} = D(i_{gr}^y - i_{gs})$$

式中:  $D$  — 锅炉蒸发量, kg/s;

$i_{gr}^y$  — 过热蒸汽焓, kJ/kg;

$i_{gs}$  — 给水焓, kJ/kg。

因此燃料耗量  $B$  为:

$$B = \frac{Q_{yz}}{\eta_{gl} Q_r} \times 100 = f_1 / \{ f_2 Q_{net, v, ar} - 32866 A_{ar} \times C_{fh} / 100 - C_{fh} \} \quad (7)$$

式中:  $Q_{net, v, ar}$  — 收到基低位热值, kJ/kg;

$f_1 = 100 \times Q_{yz}$ ,  $Q_r \approx Q_{net, v, ar}$

由式(7)推得:

$$f_2 Q_{net, v, ar} - 32866 A_{ar} \times \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} = \frac{f_1}{B} \quad (8)$$

统计得到煤种高位发热值基本恒定, 通过高位和低位发热值的关系换算, 得到:

$$Q_{net, v, ar} \approx \text{const} = C = \frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}} Q_{gr, v, ar} = \frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}} [ Q_{net, v, ar} + 25.1(9H_{ar} + M_{ar}) ] \quad (9)$$

式中:  $Q_{gr, v, ar}$  — 收到基高位发热值, kJ/kg;

$Q_{gr, v, ar}$  — 干燥无灰基高位发热值, kJ/kg;

$C$  — 统计得到的常数;

$M_{ar}$  — 收到基水分, %;

$H_{ar}$  — 收到基氢, %。

由式(8)和式(9)得热值和灰分表达式:

$$Q_{gr, v, ar} = \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} \times \left\{ \frac{f_1}{B} + 32866 [ 100 - M_{ar} - \frac{2.510}{C} \times (9H_{ar} + M_{ar}) ] \right\} / \left\{ f_2 + \frac{100}{C} \times 32866 \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} \right\} \quad (10)$$

$$A_{ar} = \left\{ f_2 \left[ C - \frac{C}{100} M_{ar} - 25.1(9H_{ar} + M_{ar}) - \frac{f_1}{B} \right] / \left\{ 32866 \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} + \frac{C f_2}{100} \right\} \right\} \quad (11)$$

至此, 热值和灰分都表示为在线测量量、水分、氢和飞灰含碳量的函数。分析各输入参数, 就可以在线求出灰分和热值, 进而求出飞灰浓度, 为实时测量飞灰含量提供帮助。

模型的实质是一个虚拟灰分仪, 将煤种的灰分和热值通过在线参数求出, 而无须借助化学分析方法。故模型适用于煤种的变化。

由经验公式得锅炉实际烟气体积<sup>[3]</sup>:

$$V_y = V_y^0 + 1.0161(\alpha - 1)V^0 = \left( \frac{1}{3890} \alpha - \frac{1}{115294} \right) Q_{net, v, ar} + 0.2825 \alpha + 0.4875 \quad (12)$$

式中:  $V_y^0$  — 理论烟气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $V^0$  — 理论干空气量,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $\alpha$  — 过量空气系数。

考虑到烟气体积随温度变化, 以及燃烧生成的灰中还包含煤粉中未燃尽的碳, 本文中飞灰浓度按下式计算确定:

$$\mu_{fh} = \frac{M_A}{[ (273 + t_{py}) / 273 ] V_y B_j} = \frac{\alpha_{fh} / (100 - C_{fh})}{\frac{273 + t_{py}}{273} \left[ \frac{1}{A_{ar}} - \frac{328.66}{Q_{net, v, ar}} \times \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} \right]} \times \frac{1}{\left[ \left( \frac{1}{3890} \alpha - \frac{1}{115294} \right) Q_{net, v, ar} + 0.2825 \alpha + 0.4875 \right]} \quad (13)$$

式中:  $M_A$  — 灰分质量流量, kg/s;  $B_j$  — 计算燃料耗量, kg/s。

## 2.2 飞灰浓度模型的敏感度分析

经过以上步骤, 飞灰浓度最终表示为:

$$\mu_{fh} = f(\alpha, D, B, C_{fh}, t_{gs}, p_{gs}, t_{gr}, p_{gr}, t_{py}) \quad (14)$$

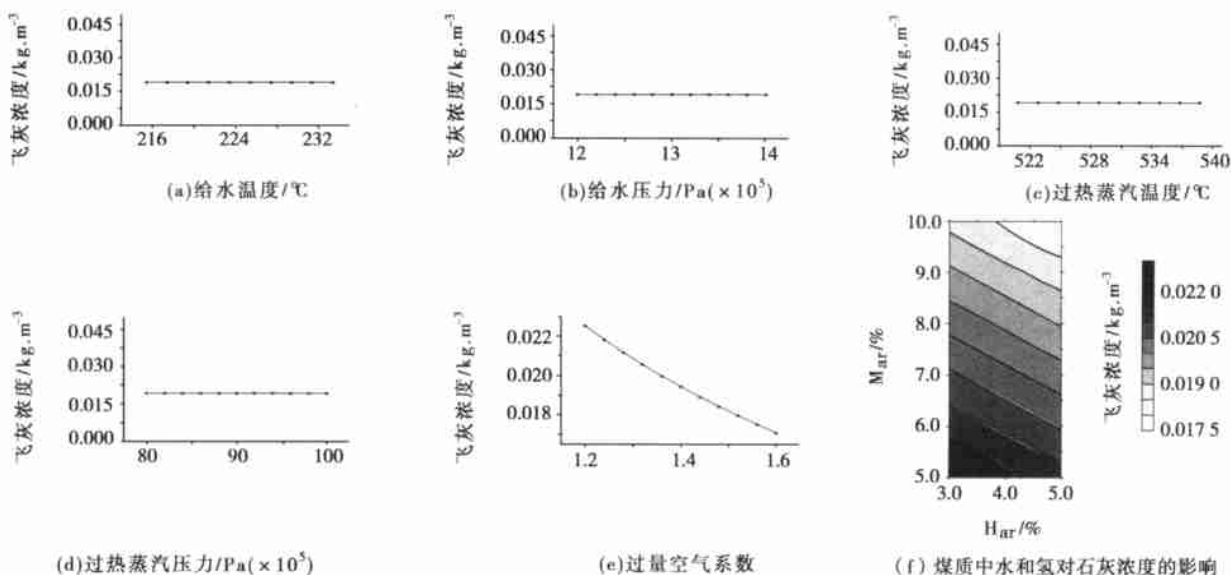


图 2 各在线参数和煤质变化对飞灰浓度的影响

式中:  $t_{gs}$ — 给水温度;  $p_{gs}$ — 给水压力;  $t_{gr}$ — 过热蒸汽温度;  $p_{gr}$ — 过热蒸汽压力。

飞灰浓度的全微分为:

$$d\mu_{fh} = \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial\alpha}\Delta\alpha + \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial D}\Delta D + \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial B}\Delta B + \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial C_{fh}}\Delta C_{fh} + \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial t_{gs}}\Delta t_{gs} + \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial p_{gs}}\Delta p_{gs} + \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial t_{gr}}\Delta t_{gr} + \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial p_{gr}}\Delta p_{gr} + \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial t_{py}}\Delta t_{py} \quad (15)$$

各个偏导数组成的向量为:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial\alpha}, \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial D}, \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial B}, \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial C_{fh}}, \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial t_{gs}}, \\ \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial p_{gs}}, \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial t_{gr}}, \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial p_{gr}}, \frac{\partial\mu_{fh}}{\partial t_{py}} \end{pmatrix}^T \quad (16)$$

分析对飞灰浓度影响大的偏导数, 实际上由于表达式很复杂, 只能用数值方法求出各变量对飞灰浓度的影响。对影响程度小的输入参数精度可降低要求, 甚至作为常数处理。

图 2(a) ~ (d) 分别为给水温度、给水压力、过热蒸汽温度、过热蒸汽压力的变化对飞灰浓度的影响。在锅炉通常运行范围内, 它们的变化对飞灰浓度基本没有影响, 所以可以用锅炉标定热效率时的工况代入模型计算。图 2(e) 为过量空气系数对飞灰浓度的影响。飞灰浓度随着过量空气系数的变化而变化较大。另外, 排烟温度的变化对飞灰浓度影响较小。图 2(f) 为煤质中水和氢对飞灰浓度的影响。水分和氢有一定影响, 由于水分和氢不易在线监测, 为了在线计算飞灰浓度, 故在误差允许范围内, 本模型取常用煤种的水分和氢。实际上, 电厂常用煤种的水分和

氢都有分析数据, 运行时可以选择输入。锅炉负荷和燃料量会影响热效率, 所以模型需要在线提供过量空气系数、锅炉负荷和燃料量。

模型分析影响因素, 最后将飞灰浓度仅表示为几个在线测量量和飞灰含碳量的函数:

$$\mu_{fh} = f(\alpha, D, B, C_{fh}) \quad (17)$$

从而将测量信号仅表示为飞灰含碳量的函数。该模型为实时测量飞灰含碳量和预测锅炉效率提供了支撑。

### 2.3 模型的验证

前面提到, 模型实际上是一个虚拟灰分仪, 可以通过在线参数计算煤种的灰分 and 热值, 如果灰分和热值的计算值与实测值很接近, 则验证了模型的正确性。

为此, 将某电厂 5 号和 6 号机组的实测数据与模型计算数据作对比分析。

在锅炉通常运行范围内, 由于过热蒸汽温度、压力和给水温度、压力变化的影响可忽略, 故运行工况取某电厂 5 号炉热效率测定数据(见表 1)。

表 1 某电厂锅炉所用煤种特性参数的计算值与实测值的比较

机 组	收到基灰分计算值	收到基灰分实测值	收到基低位热值计算值	收到基低位热值实测值
5 号	26.89	24.33	22143	22100
6 号	29.33	27.44	21288	21270

注: 收到基灰分, %; 收到基低位热值, kJ/kg。

$$t_{gr} = 532.9 \text{ } ^\circ\text{C}, p_{gr} = 90 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$t_{gs} = 208 \text{ }^{\circ}\text{C}, p_{gs} = 13.8 \times 10^5 \text{ Pa}$$

表 2 某电厂锅炉飞灰浓度的比较

机 组	飞灰浓度 计算值	飞灰浓度 实测值	相对误差
5 号	0.0210	0.019 1	6.7%
6 号	0.0208	0.019 5	9.9%

注: 飞灰浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

可见, 煤种灰分与热值的计算值和实测值比较接近, 计算出的飞灰浓度误差也不大。

### 3 结 论

本文建立了飞灰浓度的数学模型, 模型的计算值与实测值比较接近。通过锅炉运行在线监测量, 如给煤量、锅炉负荷和排烟处的过量空气系数, 可求

出锅炉尾部烟道内的飞灰浓度, 用于烟道式飞灰含碳量测量系统实时测量飞灰含碳量。

### 参考文献:

- [1] 吴曙笛. 微波飞灰测碳仪现存问题与改进途径[J]. 西北电力技术, 2000, 28(4): 37-41.
- [2] 林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [3] 金定安, 曹子栋, 愈建洪. 工业锅炉原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- [4] 林宗虎. 锅炉手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [5] 庞麓鸣, 陈军健. 水和水蒸气热力性质图和简表[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982.
- [6] 常弘哲, 张永康, 沈际群. 燃料及燃烧[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1993.

(何静芳 编辑)

## 新 技 术

# 燃用固体燃料的蒸燃联合装置的增压流化床锅炉

据《Тяжелое машиностроение》2002 年 6 月号报道, 近年来世界各国开发了一些蒸燃联合装置(ПГУ), 在这些装置中, 煤气—空气介质 1.2 ~ 1.6 MPa 压力下煤在具有流化床锅炉内燃烧。已经运行了几台由 ABB Carbon 公司建造的这种型式的装置。在这些装置中, 燃烧各种煤, 其中包括含硫量高达 4% 和质量次的便宜煤。这些 ПГУ 的效率达到 42% ~ 45%。

由于燃烧区域内温度较低(不大于 900  $^{\circ}\text{C}$ ), 通过分级供给空气来限制燃料的  $\text{NO}_x$  形成, 结果烟气中的  $\text{NO}_x$  浓度不超过 200  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

ПГУ 装置由布置在承力壳体内的带有旋风分离器的锅炉、燃气轮机和汽轮机组成。在燃气轮机后面安装有换热器, 其中通过加热凝水和给水使燃气冷却, 烟气在电力除尘器内净化后被排入大气。

在新型结构锅炉内, 受热面布置在与炉膛毗连的竖风道内, 这与受热面布置在流化床内的锅炉不同, 避免了管子的磨损, 简化了锅炉蒸发量的调节系统, 减少了氧化硫的形成, 并增加了低反应燃料的烧尽程度。

(吉桂明 供稿)

Industry Co., Tangshan, Hebei Province, China, Post Code: 063502) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 272 ~ 275

After the injection of a gaseous mixture of steam and gas into a turbine a change in turbocharger operating condition will take place. In this connection the authors have performed a thermodynamic analysis of the turbocharger after steam injection. It is concluded that the increase in steam-gas ratio will lead to an increase in turbocharger speed, compressor airflow rate and pressure ratio. The impact of injected steam temperature on compressor pressure ratio is relatively small. During part-load operating conditions the injection of steam will result in an increase in turbine corrected flow rate and expansion ratio. During high-load operating conditions the range of increase in expansion ratio and corrected flow rate diminishes. Different steam-gas ratios have a relatively small influence on turbine efficiency characteristics. **Key words:** turbocharger, steam injection, steam-gas ratio

电站煤粉锅炉飞灰浓度模型 = **Fly-ash Concentration Model for a Utility Pulverized Coal-fired Boiler** [刊, 汉] / XUAN Yi-min, FENG Chang-qing, LI Qiang (Power Engineering Institute under the Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 276 ~ 279

On the basis of the basic theory of boiler thermal balance and combustion theory set up is an online monitored parameters-based fly-ash concentration calculation model. The model has a definite practical engineering value for the online measurement of fly-ash carbon content. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, fly-ash carbon content, fly-ash concentration, thermal efficiency

基于小波变换的离心风机弱失速特征分析 = **Analysis of Weak Rotating-stall Characteristics of a Centrifugal Fan Based on Wavelet Transformation** [刊, 汉] / HOU Jun-hu, WANG Song-ling, WANG Qiang, et al (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, Hebei Province, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 280 ~ 284

A rotating-stall test was conducted of a lab 4-73 No. 8d fan with harmonic wavelet transformation being introduced into the study of rotating stall. Through a time-frequency analysis of fan-casing pressure signals during a weak rotating-stall stage determined were the rotating-stall energy intermittency, frequency characteristics and sensibility of regulation function at that stage. This indicates that the weak rotating-stall stage of the centrifugal fan is a major region worthy of close attention on the part of operational and maintenance personnel. In addition, the foregoing also has laid a firm basis for the further in-depth research of centrifugal fan rotating-stall. **Key words:** harmonic wavelet, centrifugal fan, rotating stall, weak rotating stall, analysis of characteristics

石门电厂 300 MW 机组引风机振动分析 = **An Investigation on Induced-draft Fan Vibrations in a 300MW Unit of Shimen Power Plant** [刊, 汉] / WANG Yun-min, XIAO Han-cai (Changsha Electric Power Institute, Changsha, Hunan Province, China, Post Code: 410077), ZHAO Shi-chang, et al (Hunan Shimen Power Plant, Shimen, Hunan Province, China, Post Code: 415300) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 285 ~ 288

The vibrations of an induced-draft fan installed at Shimen Power Plant are analyzed and tested. The cause of the excessive vibrations has been identified and proper measures were taken to alleviate them. The results of operation thereafter indicate that the vibration performance of the induced-draft fan has significantly improved, fundamentally resolving the problem of safe and economical operation of the power plant caused by the excessive vibrations of the fan. **Key words:** power plant, induced-draft fan, vibration