

基于数据融合的机组燃煤可磨性在线检测

赵 征¹, 刘 伟², 张振岩², 田 亮¹

(1. 华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071003; 2. 新疆天富热电股份有限公司, 新疆 石河子 832000)

摘 要: 火电机组普遍面临煤质多变的问题, 煤质的波动不但影响风/煤静态优化配比关系, 对于中速磨正压直吹式制粉系统, 煤质的改变影响制粉惯性的改变, 从而影响风/煤在动态过程中的优化配比关系。针对 MPS 型中速磨正压直吹式制粉系统, 制粉惯性受煤质和制粉系统运行状况影响而变化的问题, 提出了广义可磨性的概念 K_g 。通过统计和机理分析, 给出了广义可磨性 K_g 和判断基准 K_j 的表达式, 二者对比可以判断可磨性的变化。与电厂煤质分析报告中主要指标在不同月份的变化趋势也进行对比分析, 结果显示, 广义可磨性与实际煤质可磨性的变化趋势吻合, 验证了广义可磨性描述的正确性和合理性。

关 键 词: 燃煤可磨性; 数据融合; 在线检测; 制粉系统

中图分类号: TK223.25 文献标识码: A

引 言

目前, 国内火电厂用煤来源和成分复杂多变, 煤质的波动对锅炉的安全、经济运行构成了严重威胁。现在电厂对入炉煤质的检测基本上还停留在人工取样、制样和化验的水平, 存在着严重的采样、制样误差和时间滞后。然而, 机组燃烧优化的核心问题是风与煤的精确配比, 如何在线检测煤质的变化情况, 利用燃煤成分这一重要特性来实时指导锅炉运行及配煤, 是燃烧优化控制的重点和难点, 许多学者针对该问题做了大量研究。煤的成分及其影响燃烧过程的机理都非常复杂, 但其特征会集中体现在燃煤发热量和可磨性这两项指标上, 例如: 燃煤发热量影响风与煤的静态配比关系, 可磨性影响制粉惯性时间, 从而影响风与煤在动态过程中的配比关系^[1]。在线检测出这两个关键参量, 对燃烧状态检测和控制系统优化都很有意义。文献[2]对燃煤发热量在线检测进行了论述, 本研究主要就如何在线检测煤质可磨性, 以修正对制粉惯性的影响, 达到优化控制的目的等方面进行分析。

测定可磨性指数的方法有哈氏法和 BIN 法。由

于测定仪和实际磨的差异, 虽然存在各种修正方法, 但要准确修正原煤可磨性指数也是很困难的。同时, 由于测量设备笨重, 操作繁琐, 所需试样量大, 即使在实验室测定燃煤可磨性指数, 实现起来都有一定难度。文献[3]利用燃煤的工业分析结果, 采用人工神经网络技术预测燃煤可磨性, 神经网络的输入为空气干燥基的水分、灰分、挥发分和固定碳含量, 输出为哈氏可磨性指数。国内电厂每天只进行 3~4 次煤质工业分析, 不足以代表整个时间段的煤质情况, 在煤质多变的情况下, 无法实现在线指导功能。

随着厂级监控信息系统 SIS (Supervisory Information System) 在火电厂中安装应用, 运行数据的获取变得非常容易, 大量的监测数据提供了丰富的信息。火电厂许多数据存在相关性, 利用数据融合技术通过对相关数据的分析来判断事物的本质特征是一种有效的方法。本研究通过对机理分析, 并采用数据融合技术对多源信息进行综合利用, 表征可磨性的变化情况, 为制粉动态的准确表达奠定基础。

1 制粉系统动态模型分析

火电机组制粉系统可分为直吹式和中储式两种, 中储式制粉系统不直接参与锅炉的调节, 其动态特性和运行工况与机组整体系统的特性和工况没有直接联系; 而直吹式制粉系统的运行工况直接影响着锅炉的运行, 成为被控对象的重要组成部分。

1.1 制粉系统动态模型

对于电厂中广泛使用的 MPS 中速磨, 文献[1]对制粉动态的描述分为延迟和惯性两部分, 可以描述为:

$$\frac{r_B}{u_B} = \frac{1}{1 + K_f s} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: u_B —燃料指令; r_B —磨输出的煤粉量; K_f —制粉惯性系数; τ —延迟时间, 主要取决于系统结构。

制粉系统惯性可描述为:

收稿日期: 2009-07-20; 修订日期: 2009-08-27

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2007AA04Z163)

作者简介: 赵 征(1978—), 女, 河北保定人, 华北电力大学讲师, 清华大学在站博士后。

$$K_f = \frac{1}{k_B f_H f_w f_R} \quad (2)$$

式中: k_B —磨的基本出力系数; f_H —煤可磨性修正系数; f_w —煤水分修正系数; f_R —煤粉细度修正系数。

文献[1]以式(1)和式(2)的形式给出制粉系统动态模型,建模过程虽然考虑了煤质情况对制粉惯性的影响,但制粉惯性参数的求取仍然采用的是文献[4]中通过实验构造热量信号,通过辨识求取制粉动态模型的参数。这种求取方法,对于煤质基本不变的情况是有效的。

1.2 影响制粉惯性的因素

由上面机理模型的建立过程发现,制粉惯性时间是一个时变参数,煤质情况对其影响很大。另外,该模型未考虑设备运行状况对制粉惯性的影响。对于MPS型中速磨磨辊的磨损情况对制粉惯性同样有影响。

在影响制粉惯性系数的因素中,由于煤粉分离器的调整作用,煤粉细度不会有太大变化,可认为煤粉细度修正系数为常数。主要考虑煤质变化情况,其中影响最大的就是煤的可磨性。煤质变差,煤变得难磨,需要多磨几次才能达到要求;对相同煤质的煤,磨煤机磨损增大,同样需要多磨几次才能达到煤粉细度的要求。这两种因素对制粉动态的影响都体现在惯性时间常数的变化上。

2 广义可磨性的描述

煤质变差和磨煤机磨损对制粉惯性的影响表现形式一样,都是造成循环倍率的增加,即相同给煤量下磨内存煤量变多,效果不易区分。另一方面,煤质变差和磨煤机磨损对制粉动态造成的结果是一样的,都是增大惯性时间常数。

磨煤机内循环倍率的增加,最终表现为其内存煤量的增加。MPS中速磨的磨煤机内存煤量无法直接测量,但是火力发电厂煤粉制备系统设计和计算方法的规定给出了轮式(MPS类型)磨煤机内存煤量的计算公式。

2.1 磨煤机内存煤量的计算

由火力发电厂煤粉制备系统设计和计算方法的规定中,可知轮式(MPS类型)磨煤机内存煤量 B_{M1} (t/h)确定为:

$$B_{M1} = (K_c + 1) \frac{100 - M_f}{100} B_M \quad (3)$$

式中: K_c —循环倍率; M_f —煤的外在水分, $M_f = 100(M_{ar} - M_{ad}) / (100 - M_{ad})$, %; B_M —磨煤机出力, t/h。

由于式(3)是系统设计公式,所以对于循环倍率 K_c 只考虑了煤种对其的影响,如对烟贫煤取 $K_c = 7$ 。在实际运行中,磨的运行状态对循环倍率也有影响,如磨中后期的磨损。且同一种类型的煤可磨性也会有所变化,在实际运行中循环倍率不会保持为常数。在相同给煤量的情况下,循环倍率的增大意味着需要多磨几次才能达到煤粉细度的要求,造成制粉惯性的增大。将所有造成循环倍率变化的因素统称为广义的可磨性,以便于修正制粉惯性时间。

2.2 广义可磨性的描述

采用什么监测数据来判断循环倍率的变化很重要。由可磨度的定义可知,为比较不同的可磨度,常取一种非常坚硬难磨的无烟煤作为标准煤,用标准实验设备将其一定量的试样从一定初始粒度磨细成一定细度的煤粉所消耗的能量与同样量、同样粒度的另一种煤磨成同一细度的煤粉所消耗的能量之比值,称之为所测煤种的可磨度。由煤的可磨度定义可知,磨电耗是反映可磨度一个很好的信号。由于磨电压的稳定性,其反映在与磨相关的检测信号上就是磨煤机电流的变化。由此,定义在线监测可磨性变化情况的指标 K_e 为:

$$K_e = I / \left[\frac{100 - M_f}{100} B_M \right] \quad (4)$$

在稳定工况下,磨煤机保持质量平衡,输出等于输入,所以 B_M 等于输入煤量。文献[5]介绍了一种电站锅炉入炉水分实时监测的方法,即根据磨的能量平衡和质量平衡原理,进行水分的在线测量。由于磨内存煤量的改变,就会引起磨电耗的增加,由于磨电压的稳定性,其反映在煤的检测信号上就是磨煤机电流的变化。同时,由于磨的磨损造成的循环倍率的增加,同样反映在电流的变化上。循环倍率反映的是磨出力时间常数的变化情况,由电流的变化情况可以反映其变化状况。

3 实际验证计算

3.1 给煤量与磨煤电耗的关系

由于电压稳定,给煤量与电耗的关系最终可以表现为给煤量与磨煤机电流的关系。某电厂一年中1~8月份的数据统计B磨给煤量与电流的关系如图1所示。图中点为给煤量对应的实际磨电流,线为给煤量与磨电流的一元回归统计关系,其表达式为:

$$I = P_1 \cdot B_{BW} + P_2 \quad (5)$$

由图1可见,磨煤机的电流随给煤量的增大而增大,但在相同给煤量的情况下,电流也呈很大的分散

性, 即电流(电耗)除受给煤量的影响, 其它因素也对电耗有影响, 其中最大的就是煤的可磨性的改变。所以由电流的变化情况可以初步判断可磨性的变化。

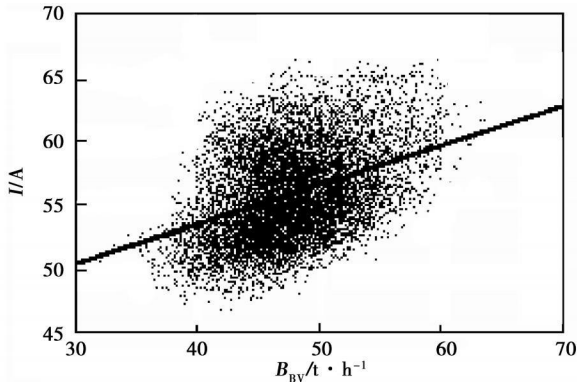


图 1 1~8 月 B 磨给煤量与电流的关系

分别对 1~8 月每个月的数据进行式(5)的统计, 统计关系的系数如表 1 所示, σ^2 为统计方差。

表 1 1~8 月式(5)的系数和方差统计

月份	P_1	P_2	σ^2
1	0.303	38.261	146.67
2	0.299	39.314	151.16
3	0.256	41.518	154.64
4	0.268	41.564	173.62
5	0.244	44.272	190.29
6	0.206	47.817	191.39
7	0.118	53.369	211.25
8	0.068	56.810	212.59

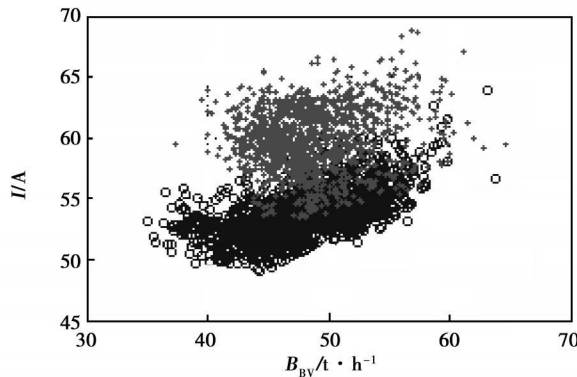


图 2 3 月与 8 月 B 磨给煤量与电流关系对比

图 2 为 3 月与 8 月 B 磨给煤量与电流关系对比, ‘o’ 为 3 月份的数据, ‘+’ 为 8 月份的数据。由图 2 可见, 随着时间的增长, 相同给煤量下, 其所耗电耗越高, 分离性也越大。造成这种情况有两点主要原因: (1) 煤质逐渐变差; (2) 磨的磨损随时间日益严重。

3.2 广义可磨性计算的可行性分析

广义可磨性在线检测的实际计算要在磨煤机稳定负荷状态下进行, 不包括故障状态下的数据。对于系统运行故障, 可采用文献[6]中的基于 $D-S$ 证据理论的制粉系统故障诊断方法进行判断。

以 B 磨为例进行广义可磨性的实际计算。图 3 为 3 月份与 8 月份 B 磨给煤量与广义可磨性 K_e 之间关系的对比图; 图 4 为这两个月 B 磨给煤量与磨进出口差压 P_d 之间的关系, 其中 ‘o’ 为 3 月份的数据, ‘+’ 为 8 月份的数据。图 4 中, 差压信号与给煤量之间的关系变化不大, 说明磨控制没有变。由图 3 可见, 在不同负荷下 K_e 的大小不同, 同时随着月份的增加和煤质状况的变差, K_e 随之变大, 且两个月的数据有明显的分离性。

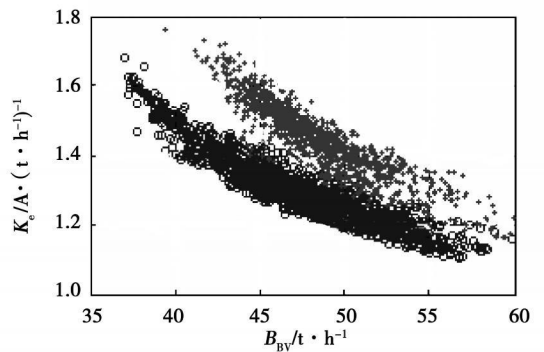


图 3 3 月与 8 月 B 磨给煤量与 K_e 之间关系

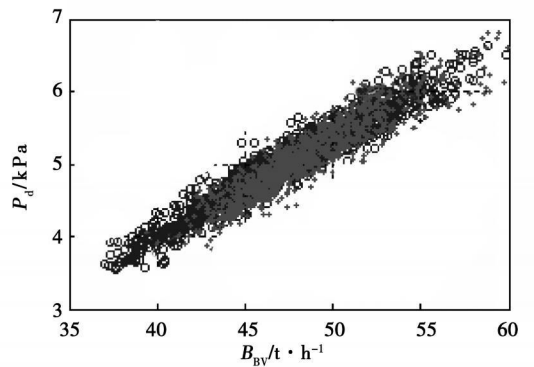


图 4 3 月与 8 月 B 磨给煤量与 P_d 之间关系

由于燃煤可磨性没有准确的实测数据来进行正确性对比, 所以对该方法的可行性和准确性的验证存在困难。我们将采用间接验证的方法进行趋势性的验证。表 2 的数据是 3、4 和 8 月的入炉煤质分析报告的统计数据。虽然单次的煤质分析不能够代表全部入炉煤质的情况, 但是每天 3 次的入炉煤质分析, 整月的测量结果的平均值能够反映该月入炉煤质的基本情况, 由 3、4 和 8 月的平均统计能够反映

该时间段的煤质情况变化趋势。

表 2 3、4 和 8 月的入炉煤质分析数据月均值

月份	全水分/%	干燥基灰分/%	低位发热量/MJ·kg ⁻¹
3	9.7385	17.848 8	23.329 6
4	9.622 7	18.588 6	22.930 5
8	22.930 5	19.24	22.582 6

由表 2 的统计数据可见,随着月份的增加,其干燥基灰分在增加,水分也略有增加,低位发热量平均值在下降。其变化趋势表明煤质在逐渐变差,8 月份的煤质与 3 月份的有较大不同。表 2 中煤质的变化情况与同时期国内的煤质量变化趋势相同,即随着煤价上涨,煤中掺杂物增多,质量逐步下降。同时,8 月份磨的损耗大于 3 月份的,所以图 3 在大趋势上是对的,能够反映广义可磨性的变化情况。

3.3 可磨性的在线监测

判断可磨性变化的大小,首先要有一个评判的标准。由表 1 可见,1 月和 2 月给煤量与磨电流的关系变化不大,可认为 1 月和 2 月份煤种变化不大,同时磨的磨损很小,机组运行稳定。所以用该年 1 月和 2 月的 K_e 值统计曲线为基准曲线,如图 5 中的线所示,其中点为实际计算的不同给煤量下的 K_e 值,每 5 min 计算一个点。图中曲线采用指数形式来表示,其表达式为:

$$K_e = 22.8084 \times B_{BV}^{-0.7497} \quad (6)$$

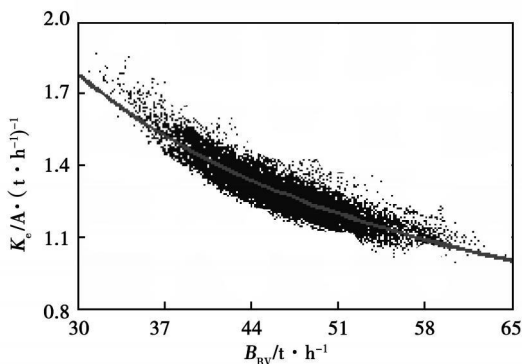


图 5 1 月和 2 月的 K_e 值统计曲线

以式(6)为基准,用式(4)实时计算 K_e 值,实时计算 K_e 值与基准值 K_e 相比,其差值在不同的区域维持一段时间,就可判断此时磨内煤的循环倍率发生变化,即其出力时间常数发生变化。

取该年 3 月 10 日 00:00~16:00 时间段内的相关数据,5 min 的均值为一个采样数,其 16 h 的计算结果如图 6 所示。线 1 为统计的标准 K_e ; 线 2 为实时计算的 K_e 值。由图 6 可见,线 2 比线 1 的数据呈

现一段时间总是高,经过一段比较吻合的中间过程,一段时间总是低。经过其它数据判断,控制没有问题,相同给煤量下,电耗的不同说明循环倍率发生了变化,即可判断煤质广义可磨性发生了变化。

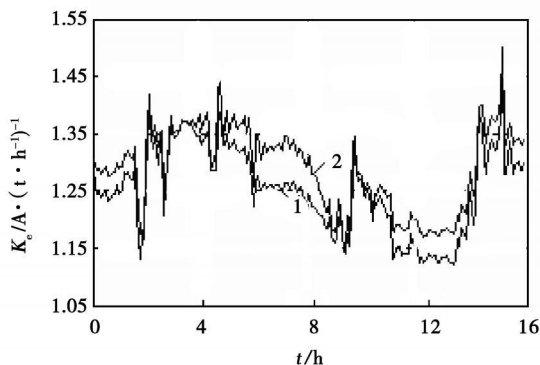


图 6 可磨性变化曲线

4 结 论

通过不同月份的统计分析,得出磨煤机电机电流不但与给煤量有关系,同时还受到煤质和本身磨损的影响,即磨煤机电机电流能够在一定程度上反映煤质可磨性的变化以及磨的磨损情况的变化。通过机理分析,发现煤质变差和磨煤机磨损给制粉动态造成的结果是一样的,都是增大惯性时间常数,因此提出广义可磨性的概念,即将造成磨煤机内循环倍率变化而使惯性时间常数变化的因素统称为广义的可磨性。利用磨煤机电机电流与磨内存煤量的关系给出了广义可磨性的表达方式和判断标准。根据广义可磨性指数 K_e 的计算结果进行惯性时间的在线修正优化动态风/煤配比关系,限于篇幅具体的修正关系将在后续的文章中进行阐述。

本文为华北电力大学博士基金资助项目(200812009)

参考文献:

- [1] 田 亮,曾德良,刘鑫屏,等. 500 MW 机组简化的非线性动态模型[J]. 动力工程, 2004, 24(4): 522-525
- [2] 赵 征,刘吉臻,田 亮. 基于数据融合的燃料量软测量及煤质发热量在线校正[J]. 热能动力工程, 2007, 22(1): 42-45.
- [3] 于敦喜,徐明厚,刘小伟,等. 燃煤可磨性指数的人工神经网络预测[J]. 煤炭技术, 2003, 22(9): 91-93.
- [4] 曾德良,赵 征,陈彦桥,等. 500 MW 机组锅炉模型及实验分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 149-452
- [5] 刘福国. 电站锅炉入炉煤水分实时监测的研究[J]. 锅炉技术, 2003, 34(6): 12-14.
- [6] 曾德良,崔泽朋,田 亮,等. 基于灰关联和 D-S 组合规则的电厂磨煤机故障诊断[J]. 动力工程, 2007, 27(2): 207-210.

(编辑 何静芳)

The distribution of the gas-liquid two-phase flow (especially the liquid phase) in various flat tubes of a parallel flow evaporator exercises a relatively big influence on its heat transfer performance. If the gas and liquid distribution in various flat tubes is not uniform, the above-mentioned performance will deteriorate remarkably. At different gas and liquid flow rates, the authors have experimentally studied the liquid flow distribution in six forms of branch pipes of a parallel flow evaporator. During the test, it has been determined that the annular flow pattern predominates. It has been found that for a vertical descending and ascending flow, the method of increasing the tube diameter can not improve the liquid flow distribution in various branch pipes, but the location of the gas and liquid inlet in the main pipe has a relatively big influence on the uniformity of the flow distribution. **Key words:** parallel flow evaporator, gas-liquid two-phase flow rate, flow pattern, uniformity, annular flow

增压锅炉燃烧监测试验研究 = **Experimental Study of the Combustion Monitoring of a Supercharged Boiler** [刊, 汉] / ZHOU Guo-yi (Marine and Power College, Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033), SUN Yi-peng, LOU Chun, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 766 ~ 769

Supercharged boilers are key equipment items in a marine steam power plant and it is necessary to conduct a real-time monitoring of the in-furnace combustion to secure their good reliability and high cost-effectiveness. During the test, the authors have first employed an image acquisition system to capture the flame images at various loads of the boiler and then used image processing technology to obtain the radiation temperature of the flame and the radiant energy magnitudes characterizing the in-furnace combustion intensity. It has been found that during a normal operation, the boiler flame temperature is approximately 1700 K, while at a high load, the temperature is about 1900 K. The radiation temperature is in relatively good agreement with the numerical simulation results. In the meantime, it has been found by monitoring and analyzing the boiler flame radiant energy signals at six operating loads that the radiant energy signals assume a basically same variation tendency as the superheated steam and flue gas temperature, facilitating the introduction of the radiant energy into the control system as a feedback signal and thereby optimizing the boiler control. **Key words:** supercharged boiler, combustion monitoring, image processing, radiation temperature, radiant energy signal

“W”型火焰锅炉二次风改造对燃烧影响的试验研究 = **Experimental Study of the Influence of the Secondary Air Modification of a “W” Type Flame Boiler on Combustion** [刊, 汉] / LEI Lin, DUAN Xue-nong (Experiment Research Institute, Hunan Provincial Electric Power Corporation, Changsha, China, Post Code: 410007), WANG Hua-jian (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), WANG Yi-gang (Datang Huayin Zhuzhou Thermal Power Generation Co. Ltd., Zhuzhou, China, Post Code: 412000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 770 ~ 772

In the light of the problems and deficiencies of a “W” type flame boiler of FW (Foster Wheeler) technology at high loads, the authors have reconstructed a 1 025 t/h boiler of the same type in a power plant by decreasing the incidence angle of F-layer secondary air downward by 25 degrees. The problem and deficiencies include: a high combustible content of fly-ash at high operating loads, difficulty in combustion air replenishment and susceptibility to screen type superheater overheating, etc. Through a data simulation and a cold and hot state contrast test, it has been found that the advantages resulting from the reconstruction are evident at boiler high loads. At the rated load, primary air path is effectively lengthened and the above-mentioned problems, such as the air replenishment difficulty and overheating of the screen type superheater, have been solved or eliminated. The desuperheating water requirement is cut by 20.9% and the solid incomplete combustion loss decreases by over 1.5%. **Key words:** “W” type flame boiler, secondary air, combustion, reconstruction

基于数据融合的机组燃煤可磨性在线检测 = **On-line Detection of Plant Fuel Coal Grindability Based on Data**

Fusion[刊, 汉] / ZHAO Zheng, TIAN Liang (Automation Department, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), LIU Wei, ZHANG Zhen-yan (Xinjiang Tianfu Thermal Power Generation Co. Ltd., Shihezi, China, Post Code: 832000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 773 ~ 776

Thermal power plants universally face an ever-changing coal quality problem and the fluctuation in coal quality may also influence air/coal static optimization matching relationship. For the positive-pressure direct-fired system of a race pulverizer, the change of coal quality may affect the change of milling inertia, thus influencing the optimization matching relationship of the air and coal during a dynamic process. In the light of the problem that the milling inertia of the above system of a MPS type race pulverizer is affected by the coal quality and the operating status of the milling system, a generalized grindability concept K_e was presented. On the basis of a statistical and mechanism analysis, expressions of the generalized grindability K_e and judgement criterion K_{e_c} were given. By comparing these two values, one can determine the grindability change. A contrast analysis of the variation tendency of the main indexes in various months of a power plant coal quality analysis report shows that the generalized grindability assumes a variation tendency identical with the actual coal quality grindability, verifying the correctness and rationality of the generalized grindability description. **Key words:** coal grindability, data fusion, on-line testing, milling system

空气深度分级对低挥发分煤燃烧过程影响的研究 = Study of the Influence of the Deep Air-staged Burning on a Low-volatile Coal Combustion Process[刊, 汉] / WANG Hua-jian, FANG Qing-yan, ZHOU Huai-chun, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 777 ~ 781

Through a numerical simulation, studied was the influence of the deep air-staged version and change of pulverized coal fineness on the pulverized coal burn-out process and the NO_x emissions under the condition of burning low-volatile coals in an one-dimensional combustion furnace. The distribution of temperature, oxygen concentration and NO_x along the furnace axial direction was obtained. The simulation results show that with the deep air-staged version, the oxygen amount will increase at a later stage of combustion, and the furnace temperature level will go up. Moreover, the enhancement of the pulverized coal fineness will make the above effect more conspicuous, thus improving combustion efficiency and reducing NO_x emissions. The numerical simulation results have been verified by actual combustion tests. It has been found that when burning low-volatile coals, the adoption of such measures as the deep air-staged technology and the increase of pulverized coal fineness can result in both efficiency enhancement and reduction of NO_x emissions. **Key words:** low-volatile coal, deep air staged combustion, pulverized coal fineness, high efficiency, low NO_x emissions, air-staged combustion

多股流换热器动态过程场协同分析 = Field Synergy Analysis of the Dynamic Process of a Multi-stream Heat Exchanger[刊, 汉] / ZHANG Qin, LI Zhi-xin, LIANG Xin-gang (Aeronautics and Astronautics College, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 782 ~ 786

The authors have established a dynamic mathematical model for a multi-stream plate-fin type heat exchanger. Through a step change of the heat exchanger inlet temperature and flow rate, simulated was the dynamic response of the temperature field in a transient process. By using a temperature difference field uniformity factor, evaluated were the dynamic characteristics of the transient process of the heat exchanger. Through an analysis of the synergy relationship between the inner temperature field and the speed one, the variation characteristics of the temperature difference field in the dynamic process were revealed. By combining the uniformity factor of the temperature field with the transition time, a self-organization ability coefficient was established, and the control quality of the heat exchanger, analyzed. When the heat exchanger undergoes a step change of flow rates, the temperature difference field uniformity factor will smoothly migrate. In the meantime, when the heat exchanger is subjected to a drastic step change of temperature and there exist extreme values, the bigger the self-organization coefficient of the heat exchanger, the easier the attainment of a new heat balance. **Key words:** field synergy,