

# 300 MW 循环流化床锅炉动态特性的试验研究

李鹏飞<sup>1</sup>, 赵 明<sup>2</sup>, 赛俊聪<sup>2</sup>, 丁常富<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003;

2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 云南 昆明 650217;)

**摘 要:** 采取 300 MW 循环流化床锅炉现场试验, 研究循环流化床锅炉床温、床压随一次风量、二次风量、给煤量及回料阀开度的阶跃响应和锅炉负荷的阶跃响应。利用粒子群优化算法智能辨识, 构建了床温、床压和锅炉负荷在不同工况下的阶跃响应模型。分析结果与前期学者仿真理论研究保持一致, 并为 300 MW 循环流化床锅炉燃烧系统控制策略和不同负荷工况运行提供了优化参考依据。

**关 键 词:** 循环流化床锅炉; 床温; 床压; 动态特性

中图分类号: TK223.7 文献标识码: A

## 引 言

循环流化床锅炉所特有的炉内流化状态, 燃料在流化状态下燃烧的形式, 使其自身控制对象具有大延迟、非线性和参数耦合关系性强的特点, 形成机组自动控制的难题<sup>[1]</sup>, 所以对循环床锅炉动态特性的研究具有重要的时效意义。

床温、床压稳定控制是循环流化床锅炉在运行中两个难点<sup>[2]</sup>, 直接影响到锅炉的安全运行、脱硫效率和 NO<sub>x</sub> 的排放量。另一方面, 循环流化床锅炉负荷响应的滞后性, 是其自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC) 负荷响应能力是否可以满足电网要求的关键, 所以进行锅炉负荷动态响应研究以期减小滞后性对 AGC 指标的影响。

床温和床压的影响因素包括一次风量、二次风量、给煤量、排渣量及返料量等<sup>[3-5]</sup>。由运行人员的经验、前期学者的相关研究和现场试验数据得出排渣量的大小对于床温、床压的影响程度相对微小, 所以排渣量阶跃试验不再论述。

前期学者的相关研究取得了一定的成果<sup>[3-5]</sup>, 本研究针对性进行现场动态特性试验, 数据更为准确和全面, 并根据实验数据构建了床温、床压在 100% 负荷时与一次风量、二次风量、给煤量及返料

量的动态特性响应模型和 171 MW - 307 MW 负荷时锅炉负荷动态特性响应模型, 弥补了前期学者研究的欠缺。

## 1 动态响应试验

试验机组为云南国电开远发电有限公司 2 × 300 MW 循环流化床锅炉机组。该锅炉是由上海锅炉厂制造, 引进法国 Alstom 技术国产化的 SG - 1025/17.4 - M801 型锅炉。锅炉燃烧侧主要由裤衩形双水冷布风板结构的炉膛、4 个直径 8.25 米的高温绝热旋风分离器、非机械型单路自平衡式回料阀、对称布置的 4 台外置式换热器、尾部对流烟道、四分仓回转式空预器、冷渣器等 7 部分组成。入炉煤热值为 10 520 kJ/kg, 表 1 为 100% 负荷试验时锅炉参数及煤质分析。

表 1 100% 负荷时锅炉和煤质参数  
Tab. 1 Main parameters of the boiler and coal quality at 100% load

锅炉参数	数值	煤质分析	数值
主汽压力/MPa	16.72	水分/%	26.7
主汽温度/°C	537.69	灰分/%	18.78
左一次风量/km <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	142.12	挥发份/%	31.53
左二次风量/km <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	252.39	固定碳/%	22.99
总一次/总二次风量比例	1/2	Q <sub>gw</sub> /J·g <sup>-1</sup>	13 700
给煤流量/t·h <sup>-1</sup>	242.13	Q <sub>dw</sub> /J·g <sup>-1</sup>	12 600

床温、床压动态响应试验: 工况选择在 100% 负荷状态下进行, 保证机组正常运行的同时, 运行方式选择投手动方式, 减温水可投自动。试验中分别测试当左(右)侧一次风量、左(右)侧上二次风量(试验过程中下二次风各支路不参与调节)、给煤量、回

收稿日期: 2014 - 05 - 08; 修订日期: 2014 - 06 - 03

作者简介: 李鹏飞(1987 -), 男, 河北廊坊人, 华北电力大学硕士研究生。

料量分别各自阶跃变化而其它量保持不变时, 记录燃烧系统床温床压的数据及响应曲线。

锅炉负荷动态响应试验: 将锅炉主控和汽轮机主控设置为手动方式, 由运行人员给定负荷指令阶跃信号, 并记录有关试验数据。

## 2 床温、床压的动态响应特性

利用粒子群优化算法智能辨识床温、床压和锅炉负荷动态响应特性步骤:

(1) 分别对不同负荷、不同影响因素的原始动态响应试验数据利用最小二乘法拟合。

(2) 根据拟合后的数据曲线, 选定相应的传递

函数模型结构。

(3) 在 MATLAB 中, 利用粒子群优化算法辨识程序得出模型结构中系数的最优解<sup>[6]</sup>。

### 2.1 一次风输入下的阶跃响应

图 1 分别为 100% 负荷时, 一次风量 ( $Q_{air1}$ ) 阶跃变化下床温 ( $T_b$ )、床压 ( $P_b$ ) 的动态响应曲线。图 1 显示: 床温和床压由于一次风量的阶跃增大, 都有较明显的变化。床温先小幅度升高后降低, 是因为当一次风量增加时, 密相区含氧量升高, 燃料燃烧更充分, 床温先升高, 同时燃料量不变, 一次风作为炉内的冷却介质, 床温最终降低且比原始低。由于一次风量的增加, 炉内流场速度加快, 密相区燃料浓度降低, 床压下降。

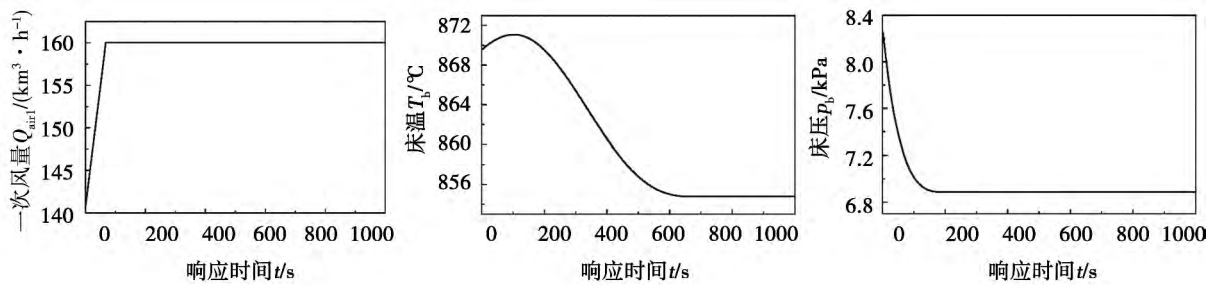


图 1 100% 负荷时一次风输入下的阶跃响应  
Fig. 1 Stepped responses to the primary air input at 100% load.

由图 1 得床温 - 一次风量传递函数:

$$G(s) = \frac{0.41}{1 + 326s} - \frac{1.20}{(1 + 95s)^3} e^{-50s} \quad (1)$$

由图 1 得床压 - 一次风量传递函数:

$$G(s) = -\frac{0.065}{(1 + 3s)^3} \quad (2)$$

### 2.2 上二次风量输入下的阶跃响应

图 2 为 100% 负荷时, 上二次风量 ( $Q_{air2}$ ) 阶跃变化下床温 ( $T_b$ )、床压 ( $P_b$ ) 的动态响应曲线。图 2 显示: 当上二次风量减少时, 床温先升高, 之后小幅回落; 炉膛上部的燃料浓度降低, 密相区出口的灰量减少, 床压先降低后有小幅回升。

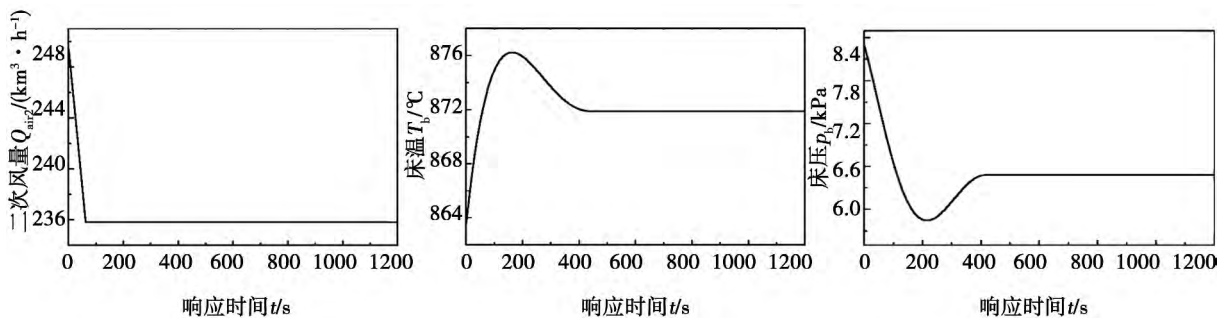


图 2 100% 负荷时二次风输入下的阶跃响应  
Fig. 2 Stepped responses to the secondary air input at 100% load.

由图 2 得床温 - 上二次风量传递函数:

$$G(s) = \frac{0.37}{(1 + 76s)^3} e^{-25s} - \frac{0.96}{1 + 24s} \quad (3)$$

由图 2 得床压 - 上二次风量传递函数:

$$G(s) = \frac{0.18}{(1 + 12s)^2} e^{-25s} - \frac{0.044}{(1 + 69s)^4} e^{-24s} \quad (4)$$

### 2.3 给煤量输入下的阶跃响应

图 3 为 100% 负荷时,给煤量  $B$  阶跃变化下床温  $T_b$ 、床压  $P_b$  的动态响应曲线。图 3 显示:当给煤量阶跃减少时,床温呈现小幅度升高后又降低。一

次风量维持不变,燃料燃烧充分,床温升高,由于一次风为炉内的冷却介质,床温最终会下降,而床层燃料浓度的下降,床压也降低。

由图 3 得床温 - 给煤量传递函数:

$$G(s) = \frac{0.73}{(1 + 111s)^4} - \frac{0.32}{(1 + 61s)^2} \quad (5)$$

由图 3 得床压 - 给煤量传递函数:

$$G(s) = \frac{0.0103}{(1 + 86s)^3} \quad (6)$$

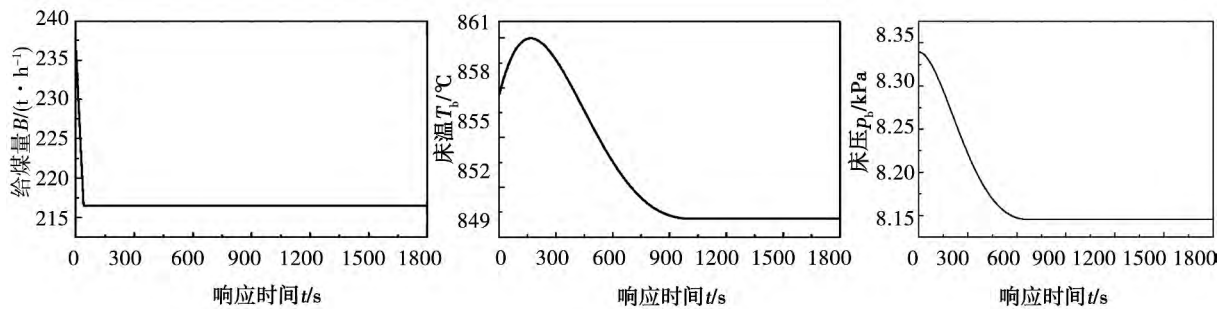


图 3 100% 负荷时给煤量输入下的阶跃响应

Fig. 3 Stepped responses to the fuel feed input at 100% load.

### 2.4 返料量输入下的阶跃响应

图 4 为 100% 负荷时,回料阀开度阶跃变化下床温  $T_b$ 、床压  $P_b$  的动态响应曲线。图 4 显示:返料

量阶跃减小,密相区浓度减小,床压则呈现小幅降低的趋势,床温由于通过外置床进入炉膛的冷灰量减少,而迅速升高。

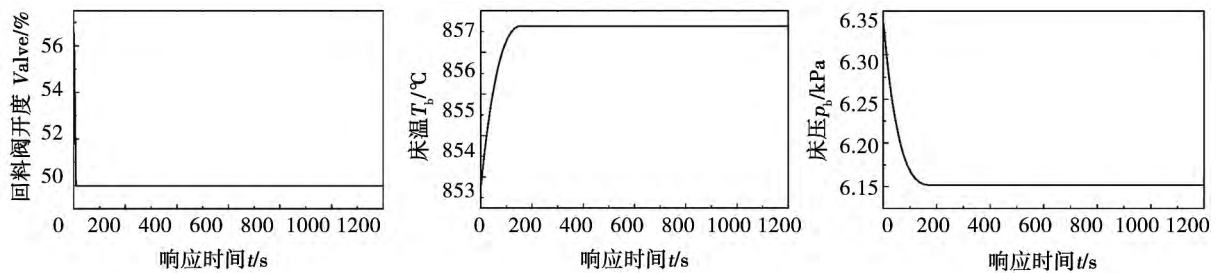


图 4 100% 负荷时回料阀开度输入下的阶跃响应

Fig. 4 Stepped responses to the opening of the material returning valve at 100% load.

由图 4 得床温 - 回料阀开度传递函数:

$$G(s) = -\frac{0.72}{(1 + 11s)^4} \quad (7)$$

由图 4(c) 得床压 - 回料阀开度传递函数:

$$G(s) = \frac{0.048}{(1 + 6s)^3} \quad (8)$$

## 3 负荷动态响应特性

### 3.1 锅炉主控指令输入下的阶跃响应

图 5、图 6 和图 7 分别为 307 MW、225 MW 和 171 MW 负荷时,锅炉主控指令阶跃变化下,主蒸汽压力( $p_0$ )和实发功率( $P$ )的动态响应特性。此时锅

炉主控指令的变化表现在给煤量( $B$ )的改变。

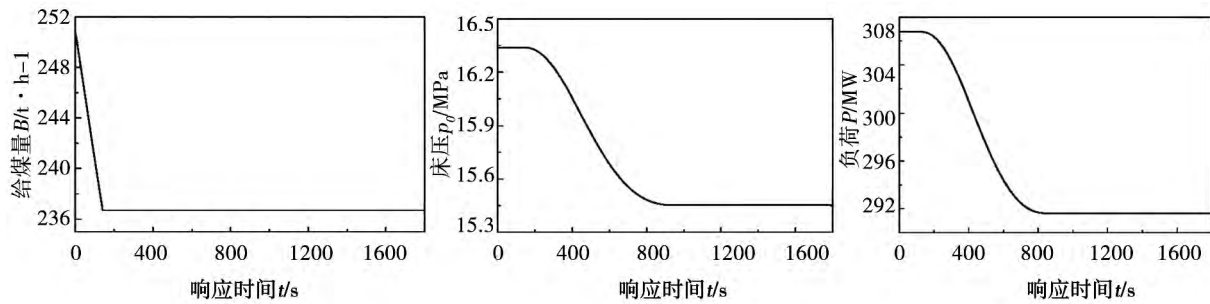


图 5 307 MW 负荷时锅炉主控指令输入下的阶跃响应

Fig. 5 Stepped responses to the main control command input of the boiler at the load of 307 MW.

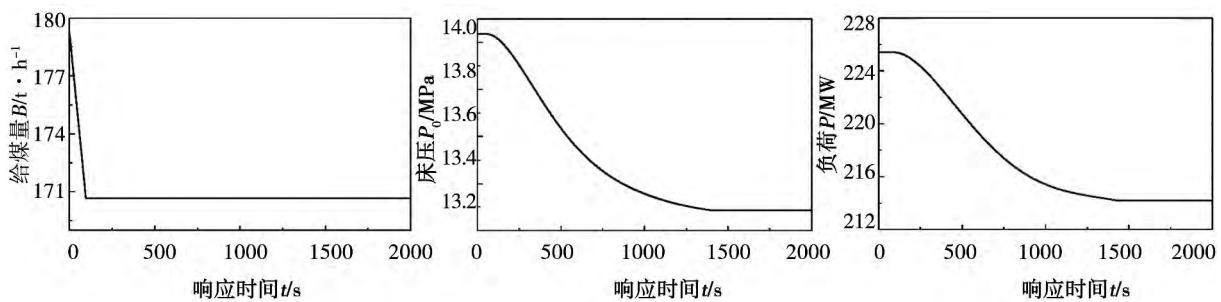


图 6 225 MW 负荷时锅炉主控指令输入下的阶跃响应

Fig. 6 Stepped responses to the main control command input of the boiler at the load of 225 MW

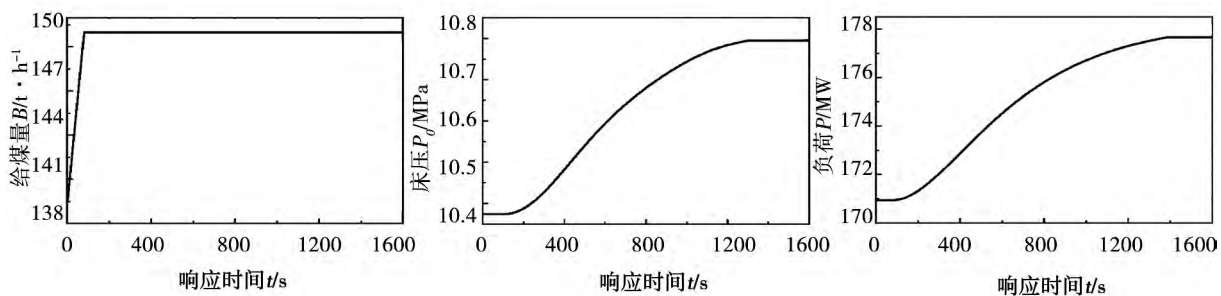


图 7 171 MW 负荷时锅炉主控指令输入下的阶跃响应

Fig. 7 Stepped responses to the main control command input of the boiler at the load of 171 MW.

图 5 得主蒸汽压力 - 锅炉主控传递函数:

$$G(s) = \frac{0.064}{(1 + 94s)^3} e^{-151s} \quad (9)$$

图 5 得实发功率 - 锅炉主控传递函数:

$$G(s) = \frac{1.10}{(1 + 119s)^2} e^{-164s} \quad (10)$$

图 6 得主蒸汽压力 - 锅炉主控传递函数:

$$G(s) = \frac{0.089}{(1 + 161s)^3} \quad (11)$$

图 6 得实发功率 - 锅炉主控传递函数:

$$G(s) = \frac{1.35}{(1 + 192s)^3} \quad (12)$$

图 7 得主蒸汽压力 - 锅炉主控传递函数:

$$G(s) = \frac{0.039}{(1 + 263s)^2} e^{-113s} \quad (13)$$

图 7 得实发功率 - 锅炉主控传递函数:

$$G(s) = \frac{0.62}{(1 + 285s)^2} e^{-70s} \quad (14)$$

3.2 汽轮机主控指令输入下的阶跃响应

图 8、图 9 和图 10 分别为 294 MW、209 MW 和 178 MW 负荷下,当汽轮机主控指令(MC)阶跃变化时,主蒸汽压力( $p_0$ )和实发功率( $P$ )的动态响应特性。

图 8 得主蒸汽压力 - 汽轮机主控传递函数:

$$G(s) = -\frac{0.21}{(1 + 143s)^2} \quad (15)$$

图 8 得实发功率 - 汽轮机主控传递函数:

$$G(s) = \frac{1.70}{1 + 30s} - \frac{3.61}{(1 + 96s)^3} e^{-103s} \quad (16)$$

图 9 得主蒸汽压力 - 汽轮机主控传递函数:

$$G(s) = -\frac{0.35}{1 + 344s} \quad (17)$$

图 9 得实发功率 - 汽轮机主控传递函数:

$$G(s) = \frac{1.62}{1 + 10s} - \frac{2.84}{(1 + 111s)^3} e^{-119s} \quad (18)$$

图 10 得主蒸汽压力 - 汽轮机主控传递函数:

$$G(s) = -\frac{0.099}{1 + 228s} \quad (19)$$

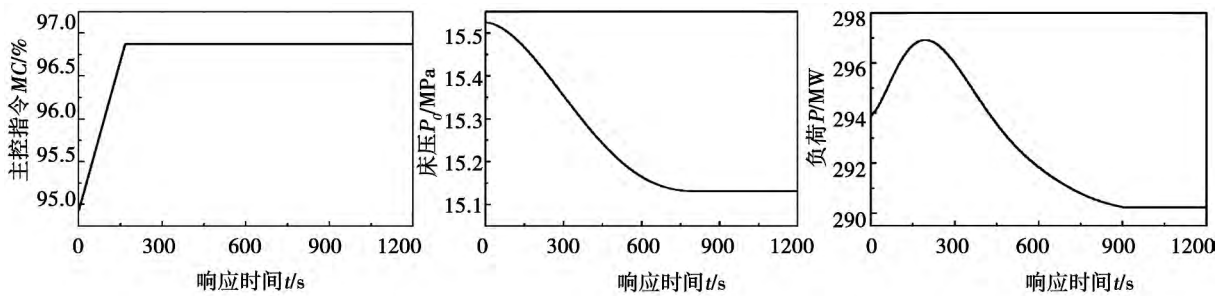


图 8 294 MW 负荷时汽轮机主控指令输入下的阶跃响应

Fig. 8 Stepped responses to the main control command input of the boiler at the load of 294 MW.

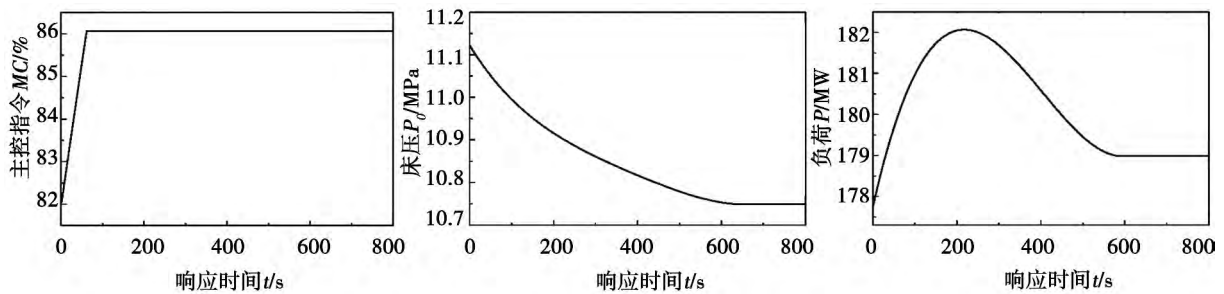


图 9 209 MW 负荷时汽轮机主控指令输入下的阶跃响应

Fig. 9 Stepped responses to the main control command input of the boiler at the load of 209 MW.

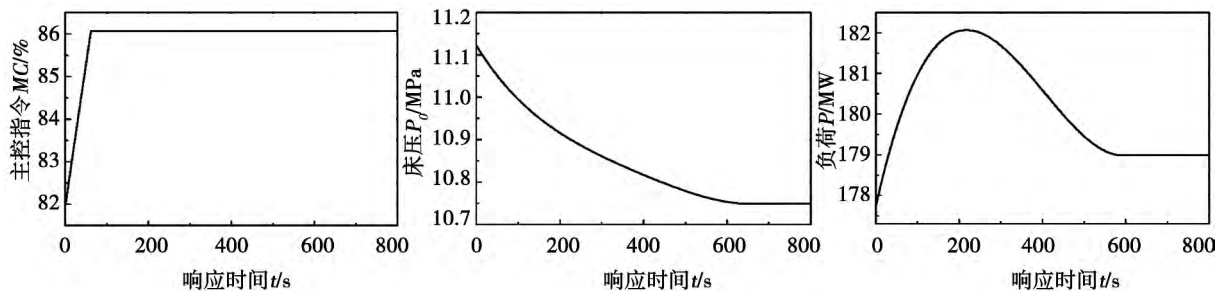


图 10 178 MW 负荷时汽轮机主控指令输入下的阶跃响应

Fig. 10 Stepped responses to the main control command input of the boiler at the load of 178 MW

图 10 得实发功率 - 汽轮机主控传递函数:

$$G(s) = \frac{1.01}{1 + 30s} - \frac{0.78}{(1 + 65s)^4} e^{-149s} \quad (20)$$

图 8、图 9、图 10 中, 由于试验后期背压解除自动, 造成汽轮机主控指令阶跃升高时, 实发功率先升高后降低。

通过多个不同工况下的锅炉负荷动态响应图 5 - 图 8 看出循环流化床锅炉常规协调控制方案的问题: 锅炉主控指令变化后, 主蒸汽压力和实发功率有 15 min 左右的滞后时间。为使该炉型适应变工况下的持续稳定运行, 需要设计较快负荷响应速度的 AGC 控制系统。

#### 4 结 论

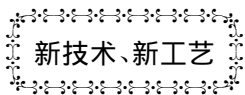
(1) 床温、床压在 100% 负荷时与一次风量、二次风量、给煤量、返料量和锅炉负荷阶跃响应试验和前期学者仿真试验研究的理论结果基本一致, 表明了现场试验数据的准确性。

(2) 构建的传递函数为 300 MW 循环流化床锅炉燃烧系统控制策略和不同负荷工况运行提供了优化参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 党黎军, 赵志丹, 王乐毕. 循环流化床机组控制与保护技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.  
DANG Li-jun, ZHAO Zhi-dan, WANG Le-bi. Control and protection technology for circulating fluidized bed units and its applications[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [2] 冯俊凯, 岳光溪, 吕俊复. 循环流化床燃烧锅炉[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
FENG Jun-kai, YUE Guang-xi, LU Jun-fu. Circulating fluidized bed combustion boilers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [3] 杨景祺, 赵伟杰, 郭 荣, 等. 循环流化床锅炉控制系统的分析与设计[J]. 动力工程, 2005, 25(4): 517-522.  
YANG Jing-qi, ZHAO Wei-jie, GUO Rong, et al. Analysis and design of the control system of a circulating fluidized bed boiler[J]. Power Engineering, 2005, 25(4): 517-522.
- [4] 赵伟杰, 张文震, 冯晓露. 循环流化床锅炉床温的控制特性[J]. 动力工程, 2007, 27(4): 545-610.  
ZHAO Wei-jie, ZHANG Wen-zhen, FENG Xiao-lu. Control characteristics of the bed temperature of a CFB boiler[J]. Power Engineering, 2007, 27(4): 545-610.
- [5] 马素霞, 杨献勇. 循环流化床锅炉燃烧系统的动态特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 1-6.  
MA Su-xia, YANG Xian-yong. Study of the dynamic characteristics of the combustion system of a circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2006, 26(9): 1-6.
- [6] 韩 璞. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012, 12.  
HAN Pu. Intelligent control theory and applications[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012, 12.

(陈 滨 编辑)



## 宏观多相组织复合材料在汽轮机热力状态标准上的应用组织经验

据《Энергетика》2013 年 5-6 月刊报道, 白俄罗斯国立技术大学科技博士, 教授加里宁钦柯 AC 等学者分析了宏观全相组织复合材料应用于汽轮机的经验。

介绍了宏观多相组织复合材料应用在汽轮机热力状态标准化上的经验。已经表明, 借助于应用宏观多相组织复合材料, 所制定的修理工艺允许汽轮机在翻修后保证热力状态达到新装配机组的要求。

在汽轮机组热力状态标准化方面的工作实际上包括在白俄罗斯共和国应用的所有汽轮机。现有经验允许将所制定的工艺方法用于任何汽轮机翻修。

(吉桂明 摘译)

ation time of a carbon nano-tube pile-up bed within its temperature range ( 120K-370K) . The measurement data show that the heat conduction coefficient of the bed in question is extremely low. Its temperature rise in the low temperature section assumes a linear increase and that in the temperature range above the room temperature tends to be constant. During the measurement ,the carbon nano-tube bed indicated an evident heat transfer relaxation time , which was bigger than by a magnitude that of maximal carbon nano-tube bed reported by literatures currently available. On the basis of this datum and in combination with the classic Cattaneo-Vermotte ( CV) model ,the transient heat conduction and thermoelectric characteristics of a single carbon nano-tube in the contact node was analyzed. The research results show that by utilizing the heat conduction retarding characteristics of nano porous materials ,the transient thermoelectric conversion efficiency can be enhanced. **Key Words:** nano-composite material ,carbon nano-tube bed ,relaxation time ,heat conduction coefficient ,thermal power

300 MW 循环流化床锅炉动态特性的试验研究 = **Experimental Study of the Dynamic Characteristics of a 300 MW Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊 ,汉] LI Peng-fei ,Ding Chang-fu ( College of Energy Source and Mechanical Engineering ,North China University of Electric Power ,Baoding ,China ,Post Code: 071003) ,ZHAO Ming ,SAI Jun-cong ( Yunnan Electric Power Experiment Research Institute ( Group) Co. Ltd. ,Electric Power Academy ,Kunming ,China ,Post Code: 650217) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 ,29 ( 5) . -526 -531

On the basis of the on-the-spot test of a 300 MW circulating fluidized bed boiler ,studied were the stepped response to the bed temperature and pressure of the circulating fluidized bed boiler with primary air quantity ,secondary air quantity ,coal feeding quantity and the opening degree of the material returning valve as well as the stepped response to the load of the boiler. By utilizing the particle swarm optimization algorithm-based intelligent identification ,a model for stepped response to the bed temperature ,bed pressure and boiler load under various operating conditions was established. The analytic results were kept in agreement with the theoretical simulation results studied previously by scholars ,thus offering reference and an underlying basis for optimization of the control tactics for the combustion systems of 300 MW circulating fluidized bed boilers and their operation at various loads. **Key Words:** circulating fluidized bed boiler ,bed temperature ,bed pressure ,dynamic characteristics

滚筒冷渣机中的颗粒径向扩散运动研究 = **Study of the Radial Diffusion Movement of Particles in a Roller Type Slag Cooler** [刊 ,汉] LU Chun-wang ,TAN Pei-lai ,LIU Bai-qian ,ZHU Xiao-long ( College of Mechanical Engineering ,Beijing University of Science and Technology ,Beijing ,China ,Post Code: 100083) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 ,29( 5) . -532 -538