

# 基于 EKF 技术的 CFB 锅炉残碳量估计

高明明<sup>1</sup>, 刘吉臻<sup>1</sup>, 牛玉广<sup>1</sup>, 吴玉平<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 工业过程测控新技术与系统北京市重点实验室 新能源电力

系统国家重点实验室 北京 102206; 2. 四川白马循环流化床示范电站有限责任公司 四川 内江 641000)

**摘 要:** 针对循环流化床锅炉残碳量无法直接测量的问题, 提出了利用容易测量的风量和煤量信息, 间接测量残碳量的方法。首先通过机理分析, 建立残碳量动态机理模型, 能够实时反映炉膛内的燃烧状况, 然后基于广义卡尔曼滤波 (EKF) 理论建立了信息融合算法, 通过给煤量、总风量等信息准确估算出炉膛内的残碳量。最后通过对某电厂 300 MW 机组进行实验论证, 根据残碳量计算的热量、床温、氧量和实际值对比验证, 负荷在 95% ~ 65% 的范围内变化时, 误差不超过 2%, 证明循环流化床锅炉中残碳量可以通过广义卡尔曼滤波信息融合方法准确预测。

**关 键 词:** 循环流化床锅炉; 广义卡尔曼滤波; 残碳量; 机理模型; 热量

中图分类号: TK223 文献标识码: A

## 引 言

循环流化床锅炉原煤经过两级破碎变成 0 ~ 10 mm 的宽筛分煤颗粒, 直接投入炉膛, 煤颗粒从着火燃烧到变成细灰飞出炉膛或者成为底渣排出要经历漫长的过程, 这一过程长达几分钟到几十分钟。循环流化床燃烧过程体现的正是残碳量的蓄积与消耗的动态过程, 这也是循环流化床燃烧系统大惯性的产生来源。锅炉燃烧区域如图 1 所示, 在炉膛的内部充满灼热的物料, 是一个稳定的着火热源, 贮存着大量热量的热库。当前残碳的存量是一个无法用仪器测量的变量, 这给循环流化床燃烧系统的调节和控制带来了难度, 大部分因为燃烧系统不稳定而引起的停炉事故都是因为床温或者床压无法稳定, 而残碳的燃烧是床温的决定性因素, 因此准确地估算炉内残碳的量对于控制系统和提高燃烧效率是非常重要的。

针对某电厂 1 × 300 MW 循环流化床锅炉, 将主

要影响残碳量的给煤量、总风量等易测量数据作为模型的输入, 建立循环流化床锅炉残碳量的非线性机理模型, 由于模型的非线性, 且需要在线实时测量, 广义卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filter) 具有所需计算数据存储量小, 算法简洁明了的优点, 非常适用于在线工作, 所以选用 EKF 来解决状态估计的问题, 在线给出残碳量参数。最后通过模型计算的床温、氧量以及通过残碳量计算的热量信号和实际的床温、氧量、热量值的对比, 验证所得残碳量的合理性。残碳量的准确测量可以改善大型循环流化床锅炉控制系统和燃烧系统的性能, 具有重要的实际意义。

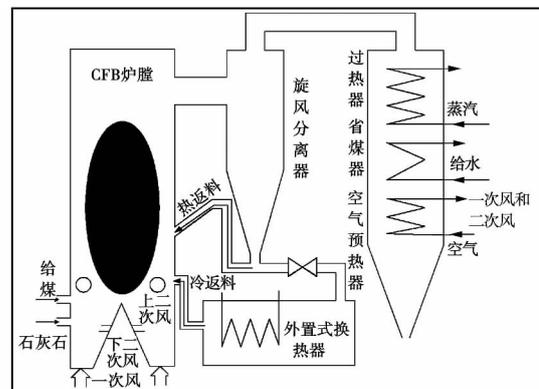


图 1 大型循环流化床锅炉燃烧区域示意图  
Fig. 1 Schematic drawing of the combustion zone of a large - sized circulating fluidized bed boiler

## 1 机理模型

### 1.1 残碳量和热量模型

在循环流化床锅炉燃烧过程中, 送入炉膛的燃

收稿日期: 2012 - 09 - 12; 修订日期: 2012 - 10 - 29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (13MS15); 国家科技支撑计划基金资助项目 (2011BAA04B03); 国家自然科学基金资助项目 (51036002); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 基金资助项目; (2012CB215203); 四川省重大科技成果转化项目资助 (11CGZH0025)

作者简介: 高明明 (1979 -), 男, 山西吕梁人, 华北电力大学博士。

料,一部分通过燃烧释放热量,一部分累计在炉膛内未燃烧<sup>[1]</sup>。根据质量守恒可以得到炉膛内的残碳量  $B(t)$ :

$$\frac{dB(t)}{dt} = F(t) - \frac{Q_i(t)}{Q_f} \quad (1)$$

式中:  $B(t)$ —炉膛内的残碳量, kg;  $F(t)$ —从炉膛入口进入锅炉的给煤量, kg/s;  $Q_i(t)$ — $t$  时刻燃烧释放的总热量, MJ;  $Q_f$ —燃料的单位发热量, MJ/kg。

循环流化床循环倍率是指单位时间内由物料分离器分离下来后返回炉膛的物料量  $W(t)$  与给煤量  $F(t)$  的比值。 $\beta$  的计算式为:

$$\beta = W(t) / F(t) \quad (2)$$

循环流化床锅炉燃烧过程释放的热量, 与参与燃烧的燃料量成正比, 参与燃烧的燃料量与碳颗粒的燃烧速度  $R_c$  相关。残碳的燃烧速度是流化床锅炉内残碳的总质量、碳表面温度、炉膛内氧气浓度的函数<sup>[2~3]</sup>:

$$R_c = \frac{6M_c k_c C_{O_2} B(t)}{d_c \rho_c} \quad (3)$$

式中:  $M_c$ —碳的摩尔质量, kg/kmol;  $k_c$ —颗粒的燃烧速率常数;  $C_{O_2}$ —氧气浓度, kmol/m<sup>3</sup>;  $d_c$ —颗粒平均直径, m;  $\rho_c$ —碳颗粒的密度, kg/m<sup>3</sup>。经过 La Nauze 实践总结, CFB 锅炉颗粒的燃烧速率常数  $k_c$  为<sup>[4]</sup>:

$$k_c = 0.513 T_f \exp(-9160/T_f) \quad (4)$$

式中:  $T_f$ —残碳颗粒表面温度, K。由于循环流化床锅炉内温度严格控制在 850~900 °C 上下范围, 颗粒表面燃烧温度变化范围相对于总风量和残碳的变化范围比率很小, 同时相对于残碳量和总风量对燃烧发热量的影响较小, 在控制系统中可以近似为常数。氧气浓度由总风量  $PM(t)$  决定, 其关系式为:

$$C_{O_2} = k_{O_2} PM(t) \quad (5)$$

式中:  $PM(t)$ —总风量, m<sup>3</sup>/s;  $k_{O_2}$ —总风量  $PM(t)$  与氧气浓度的相关系数。综合上述可得燃烧过程释放的热量  $Q_i(t)$  表达式:

$$\begin{aligned} Q_i(t) &= R_c H = \frac{6M_c H k_c k_{O_2} B(t)}{d_c \rho_c} \times PM(t) \\ &= K( PM(t) ) B(t) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $K$ —模型总系数。

燃料在锅炉炉膛中燃烧后形成高温烟气, 通过对流传热和辐射传热将热量传递给水和水蒸气。这个过程中燃料释放的热量  $Q_i(t)$  传递到水蒸气的延迟时间为  $\tau$ <sup>[1]</sup>, 可得:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} ( Q_i(t) - Q(t) ) \quad (7)$$

式中:  $\tau$ —热传递延迟时间, s;  $Q(t)$ — $t$  时刻蒸汽吸收的热量, MJ;

由于式(1)中的炉膛内未燃烧的残碳量模型和式(7)中的热量模型是非线性模型, 需要进行线性化处理, 将式(6)代入式(1)与(7)可得:

$$\frac{dB(t)}{dt} = F(t) - \frac{1}{Q_f} ( K( PM(t) ) B(t) ) \quad (8)$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} ( K( PM(t) ) B(t) - Q(t) ) \quad (9)$$

## 1.2 氧量模型

炉膛内参与燃烧的氧气正比于燃烧产生的热量, 氧量模型为:

$$(21 - Y_{O_2}(t)) PM(t) = K_1 Q_i(t) \quad (10)$$

式中:  $Y_{O_2}$ —排烟氧含量, %;  $K_1$ —模型系数。

## 1.3 床温模型

炉膛内炉床温度的模型为:

$$c_s M_s \frac{dT(t)}{dt} = K( PM(t) ) B(t) - Q_a(t) - Q_{pz}(t) \quad (11)$$

式中:  $c_s M_s$ —床料固体热容量, MJ/(kg·K);  $T$ —床料温度, K;  $Q_a(t)$ —烟气在床体内流动带出的热量, MJ;  $Q_{pz}(t)$ —排渣带出热量, MJ。床温一般指炉膛底部密相区床料的温度, 在控制系统中采样间隔很短的时间内, 可以忽略物料量的变化, 近似认为炉膛内的密相区床料量  $M_s$  是稳定的。300 MW CFB 锅炉炉膛内密相区为了减少磨损, 一般密相区内不布置受热面, 所以床温模型可以简化为上述形式。

## 2 EKF 的信息融合模型

### 2.1 EKF 的状态观测模型

由式(8)~式(11)可得标准化的状态方程式(12)和观测方程式(13):

$$x(t) = f(x(t), \mu(t), \nu(t)) \quad (12)$$

$$y(t) = h(x(t), \mu(t), \nu(t)) \quad (13)$$

式中:  $x(t)$ —状态量  $x(t) = ( B(t), Q(t), O_2(t), T(t) )^T$ ;  $y(t)$ —观测量  $y(t) = ( O_2(t), T(t) )^T$ ;  $u(t)$ —模型输入  $u(t) = ( F(t), PM(t), M(t) )^T$ ;  $w(t)$ —过程噪声序列;  $v(t)$ —测量噪声序列;  $M(t)$ —排渣量, kg/s。考虑到高阶线性化将使算法变得复杂, 用一阶 Taylor 级数展开将模型线性化。

### 2.2 模型线性化及滤波算法

式(8)右边为非线性方程, 在第  $t_0$  时刻, 设给煤量为  $F_{t_0}$ , 总风量为  $PM_{t_0}$ , 炉膛内未燃烧残碳量为  $B_{t_0}$ , 采样时间为  $T_s$ ; 第  $t_k$  时刻的残碳量为  $B(t_k)$ , 总

风量为  $PM(t_k)$  给煤量为  $F(t_k)$ ; 第  $t_{k+1}$  时刻的残碳量为  $B(t_{k+1})$ 。将式(8)在  $F_{t_0}$ 、 $PM_{t_0}$ 、 $B_{t_0}$  进行一阶泰勒展开,忽略高阶分量,可得:

$$B(t_{k+1}) = \left( \frac{H - Ts \times KPM_{t_0}}{Q_f} \right) B(t_k) - \frac{Ts \times KB_{t_0}}{Q_f} \times PM(t_k) + Ts \times F(t_k) + \frac{Ts \times K}{Q_f} B_{t_0} PM_{t_0} \quad (14)$$

令:  $X_1(t_{k+1}) = B(t_{k+1})$ ,  $G_1 = \frac{Q_f - Ts \times KPM_{t_0}}{Q_f}$ ,

$$U_1(t_k) = [PM(t_k) F(t_k)]^T H_1 \left[ -\frac{Ts \times KB_{t_0}}{Q_f} \quad Ts \right]$$

可得滤波方程  $X_1(t_{k+1}) = G_1 X_1(t_k) + H_1 U_1(t_k)$ , 利用扩展 kalman 滤波算法完成残碳量估计。

同理,对于式(9)右边进行泰勒级数展开。在第  $t_0$  时刻,设残碳量为  $B_{t_0}$ ,总风量为  $PM_{t_0}$ ,蒸汽吸热量为  $Q_{t_0}$ 。第  $t_{k+1}$  时刻的吸热量为  $Q(t_{k+1})$ , MJ; 第  $t_k$  时刻的残碳量为  $B(t_k)$ ,总风量为  $PM(t_k)$ ,吸热量为  $Q(t_k)$ 。将上式在  $PM_{t_0}$ 、 $B_{t_0}$ 、 $Q_{t_0}$  进行一阶泰勒展开,可得:

$$Q(t_{k+1}) = \left( \frac{\tau - Ts}{\tau} \right) Q(t_k) + \frac{Ts \times KB_{t_0}}{\tau} PM(t_k) + \frac{Ts \times KPM_{t_0}}{\tau} B(t_k) - \frac{Ts \times K}{\tau} PM_{t_0} B_{t_0} \quad (15)$$

令:  $X_2(t_{k+1}) = Q(t_{k+1})$ ,  $G_2 = \frac{\tau - Ts}{\tau}$ ,  $U_2(t_k) =$

$$[PM(t_k) B(t_k)]^T H_2 = \left[ \frac{Ts \times KB_{t_0}}{\tau} \quad \frac{Ts \times KPM_{t_0}}{\tau} \right]$$

可得滤波方程  $X_2(t_{k+1}) = G_2 X_2(t_k) + H_2 U_2(t_k)$  利用扩展卡尔曼滤波算法进行计算。同样对氧量模型和床温模型进行类似的整理。

广义卡尔曼滤波信息融合算法框图如图 2 所示,在给定滤波计算的初值后,EKF 开始循环工作,实时估计系统状态,其中测量噪声协方差矩阵的定义为:  $R = E[v(t) \ v(t)^T]$ ,工业过程中传感器噪声特性可设定  $R = 10$ ,过程噪声协方差矩阵的定义为:  $Q = E[w(t) \ w(t)^T]$ ,权衡估计精度及融合算法收敛速度取  $Q = 0.001I$   $I$  为单位阵,状态向量的协方差矩阵  $P_0$  测试值为 0.1I,选择较小的  $P_0$  值可以在初始化状态执行滤波时靠近真实值<sup>[5]</sup>,如果  $P_0$  值偏大将会使收敛速率较慢。

### 2.3 K 值的在线校正

软测量模型投入运行后,随着时间的推移,模型

的精度会下降,出现模型“老化”现象,因此需要对模型参数  $K$  进行在线校正。模型经过计算得到可测量参数的估计值,与当前时刻的真实值进行偏差计算,然后基于该时刻的真实值和计算所得的偏差值进行加权求和得到当前的  $K$  值,作为模型新的系数。

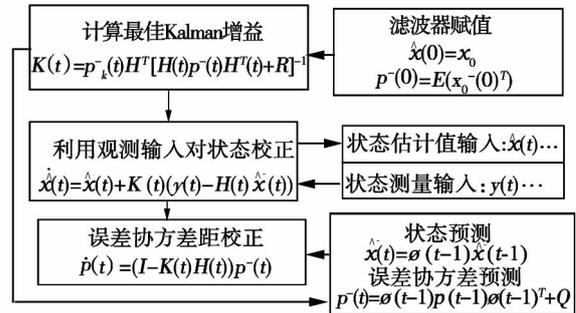


图 2 广义卡尔曼滤波算法图

Fig. 2 Chart showing the extended Kalman filtration algorithm

### 3 验证与分析

为了验证模型的正确性,在四川某电厂 1 × 300 MW CFB 示范电站机组上进行实验研究。机组在负荷工作点的运行数据、炉膛内床料温度、蒸汽流量以及热传递延迟值参考文献[6]。采集实验数据时间为 20 h,负荷随时间的变化范围为 285 ~ 200 MW,实验过程如图 3 所示。

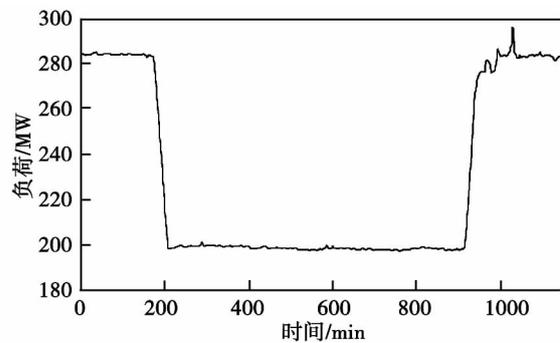


图 3 负荷随时间的变化范围

Fig. 3 Load running range along with time

图 4 所示为在实验过程中模型计算残碳量随时间的变化值。综合图 3 和图 4 可见,残碳量在负荷为 285 MW 运行时储存量约为 10 000 kg,在负荷为

200 MW 运行时约为 10 250 kg。锅炉床料量设计值约为 300 t,残碳量约占床料总量的 3.33% ~ 3.42%,计算结果与实际经验估计值(3% ~ 5%)相符。从图中看到在实验过程中残碳量的变化趋势比较稳定,在适当的风煤配比下,保持在一定的稳定范围内。

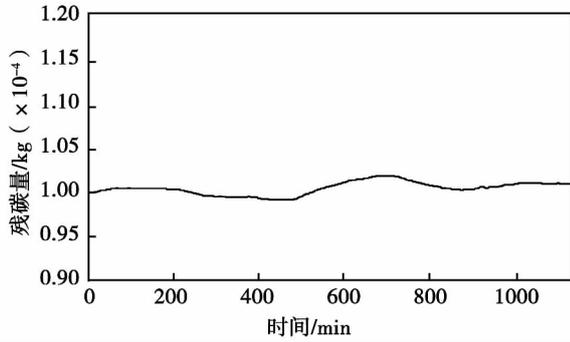


图 4 计算残碳量随时间变化值

Fig. 4 The calculated value of residual carbon

图 5 所示为在实验过程中热量模型计算值与文献 [7] 计算值的对比。模型计算值与文献计算值具有较好的吻合度和相同的变化趋势,作为控制系统的中间反馈信号,精度能够满足需求。

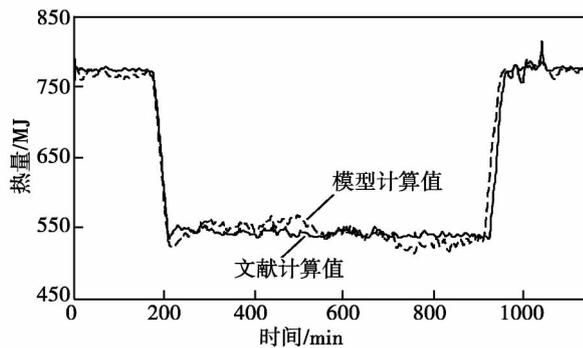


图 5 热量模型计算值与文献 [7] 计算值对比

Fig. 5 The contrast between model calculated heat release value and literature [7]

图 6 为在实验过程中氧量模型计算值和实测值的对比。从图中看到计算值和实测值变化趋势基本吻合,二者之间的偏差在合理的范围内,证明了所构造模型的有效性。

图 7 为在实验过程中床温的计算值和实测值随时间的对比。综合图 3 和图 7 可见,在稳定工况下模型计算值和实际测量值之间偏差较小,而动态过

程中二者的偏差较大。降负荷过程中,模型计算值比实际测量值下降的快,计算值比实测值小;升负荷过程中,模型计算值比实际测量值上升的快,计算值比实测值大,最大误差接近 15 °C。经过分析认为,在降负荷过程中,锅炉内耐磨材料和金属管壁存储的热量进行放热,使得床温下降缓慢,而模型计算中未考虑这部分热量,因此计算值比实际值小;在升负荷时,耐磨材料和金属管壁吸收燃烧释放的部分热量,使得床温上升缓慢,所以计算值比测量值大。因此二者的偏差在稳态过程中较小,在动态过程中升负荷时计算值比实测值大,降负荷时比实测值小。

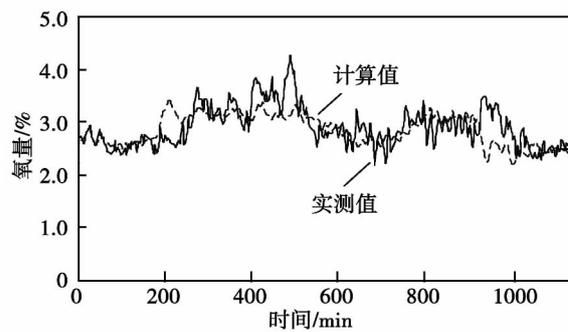


图 6 氧量模型计算值与实测值对比

Fig. 6 The contrast between oxygen model calculated value and measured value

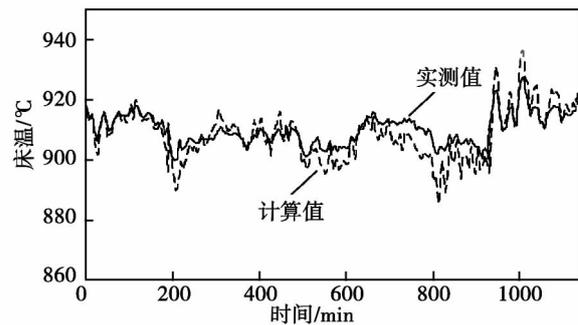


图 7 床温模型计算值与实测值对比

Fig. 7 The contrast between bed temperature model calculated value and measured value

在稳定工况下,残碳量释放的热量为定值,给煤量、总风量、炉膛内存储的残碳量保持不变,因此 K 值在稳定工况下为稳定值。根据实验计算,负荷为 285 MW 工况时 K 值为 3.25,负荷为 200 MW 工况时 K 值为 3.51,在实验过程中 K 值随时间的变化如图 8 所示。

在实验过程中,同时得到燃料特性的变化对残碳在炉膛内的存储量影响较大。在燃料热值较高的情况下,炉膛内燃烧速度快,残碳的存储量有一定的减少,燃烧释放热量,以满足负荷需求。因此,在燃料热值较高的情况下,炉膛内残碳量存储量较少。在燃料热值较低的情况,为了满足负荷的需求,提高燃烧速度,残碳的存储量有所增加。

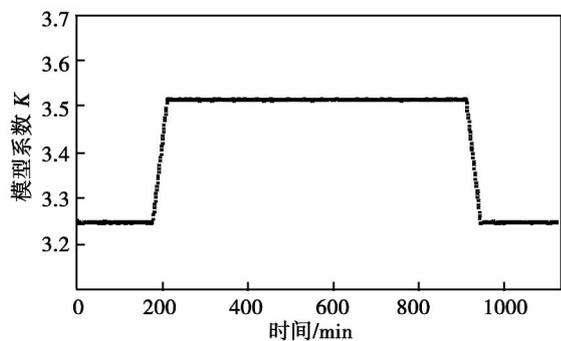


图 8 模型参数 K 随时间变化值

Fig. 8 The model parameter value K with the change of time

#### 4 结 论

研究了一种实时进行循环流化床锅炉残碳量的计算方法,通过机理分析构造模型,选择广义卡尔曼滤波理论作为信息融合技术的载体进行估算,通过理论分析和实验研究得到如下结论:

(1) 选择广义卡尔曼滤波理论应用到循环流化床锅炉残碳量软测量中,以容易测量的给煤量、总风量为输入对象,计算出残碳量、氧量和床温。经过实验,计算某 300 MW CFB 锅炉内残碳量为 10 000 ~ 10 250 kg,约占整个床料量的 3.33% ~ 3.42%,当负荷在 95% ~ 65% 范围内变化时,由残碳量构造的热量、氧量、床温计算值和实际测量值误差不超过 2%,证明了所构造模型的有效性。

(2) 在床温计算中,由于未考虑防磨材料和金属管壁的蓄热量,在动态过程中,计算值和实测值的最大误差有 15 °C。另外,在煤颗粒中含有少量的挥发份燃烧释放热量,如何在模型中考虑这部分热量需要进一步深入的研究。

#### 参考文献:

[1] 陈荻川. 循环流化床锅炉燃烧系统动态特性辨识与炉膛发热量的软测量[D]. 上海: 上海发电设备成套研究院, 2010.  
CHEN Di-chuan. Identification of the dynamic characteristic of the combustion system of a circulating fluidized bed boiler and soft measurement of the heat quantity generated in the furnace [D]. Shanghai: Shanghai Power Generation Equipment Complete Set Research Institute, 2010.

[2] 华玉龙. 循环流化床锅炉流动、传热和燃烧模型[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.  
HUA Yu-long. Flow, heat transfer and combustion model for circulating fluidized bed boilers [D]. Wuhan: Central China University of Science and Technology, 2005.

[3] 杨海瑞, 薛雷, 郭远熊, 等. 循环流化床锅炉燃煤着火特性[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(3): 236 - 240.  
YANG Hai-rui, XUE Lei, GUO Yuan-xiong, et al. Ignition characteristics of coal in a CFB boiler [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(3): 236 - 240.

[4] La Nauze R D. Mass transfer considerations in fluidized combustion with particular reference to the influence of system pressure [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1985, 64(4): 219 - 229.

[5] 宗长富, 潘钊, 胡丹, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的信息融合技术在车辆状态估计中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 272 - 277.  
ZONG Chang-fu, PAN Zhao, HU Dan, et al. Application of the extended Kalman filtration algorithm-based information fusion technology in the estimation of vehicle states [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 272 - 277.

[6] 四川白马 300 MW 循环流化床示范工程总结编委会. 四川白马 300 MW 循环流化床示范工程总结 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.  
Sichuan Baima 300 MW Circulating Fluidized Bed Demonstration Project Summarization Preparation Committee. Summing-up of sichuan baima 300 MW circulating fluidized Bed demonstration project [M]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 2007.

[7] 吴玉平, 王永龙. 机跟炉协调控制在 300MWCFB 锅炉煤质大幅波动时的应用[J]. 中国电力, 2008, 41(12): 42 - 45.  
WU Yu-ping, WANG Yong-long. Applications of the concerted control of a turbine based on the boiler control in a 300 MW CFB boiler when the coal quality fluctuates by a great margin [J]. China Electric Power, 2008, 41(12): 42 - 45.

(丛 敏 编辑)

impingement flow. Under the condition of a same material adding speed, a single nozzle material addition and dual nozzle material addition have no obvious influence on the overall heat and mass transfer effectiveness (drying performance) and to increase the spacing between nozzles can be favorable to the heat and mass transfer process inside the impingement flow. **Key words:** impingement flow, heat and mass transfer, intensified mechanism, temperature difference

高密度循环流化床出口结构对床内流动特性的影响 = **Influence of the Outlet Structure of a High Density Circulating Fluidized Bed on the Flow Characteristics Inside the Bed** [刊, 汉] FAN Bao-guo, ZHANG Jian-shuai, QIAO Xiao-lei et al (College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, China, Post Code: 030024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(5). - 487 ~ 491

On a  $\phi 0.205 \text{ m} \times 7 \text{ m}$  high density circulating fluidized bed cold-state test rig, studied was the influence of three types of outlet structure (C type smooth outlet, L type and T type abrupt change outlet) on the main bed axial particle concentration distribution under different circulating flow rates and apparent air speeds respectively. The high density circulation research work was mainly performed on the C type outlet with the maximum circulating flow rate  $G_s$  being  $220 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and the particle concentration in the area of the bottom below 3 m being greater than 0.1. The test results show that the C type outlet can make the particle concentration inside the bed assume an exponential attenuation law and the L and T type outlet can both exercise their influence on the axial particle concentration distribution in the whole bed height. The concentration enhancement effectiveness of the T type outlet is better than that of L type and a local concentration enhancement phenomenon emerges in the zone 2 meters away from the centerline of the outlet. **Key words:** high density circulating fluidized bed, circulating flow rate, outlet structure, particle concentration

基于 EKF 技术的 CFB 锅炉残碳量估计 = **Application of the Extended Kalman Filtering Technology in the Estimation of the Residual Carbon Content of a CFB Boiler** [刊, 汉] GAO Ming-ming, LIU Ji-zhen, NIU Yu-guang (Beijing City Key Laboratory on Industrial Process Measurement and Control Innovative Technologies and Systems, National Key Laboratory on New Energy Source Electric Power Systems, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206), WU Yu-ping (Sichuan Baima Circulating Fluidized Bed Demonstration Power Plant Co. Ltd., Neijiang, China, Post Code: 641000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(5). - 492 ~ 496

In the light of the problem that it has no way to directly measure the residual carbon content of a circulating fluidized bed boiler, presented was a method for indirectly measuring the residual carbon content by using the information about the air quantity and coal quantity which can be easily measured. First, through an analysis of the mechanism, established was a model governing the dynamic mechanism of the residual carbon content, capable of real-time reflecting the combustion conditions inside the furnace. Then, based on the generalized Kalman filtering theory, an information fusion algorithm was determined and the coal quantity and total air quantity fed were used to accurately calculate the residual carbon content inside the furnace. Finally, a test verification was performed on a 300 MW unit in a power plant and a contrast of the heat quantity, bed temperature and oxygen quantity thus calculated according to the residual carbon content with the real values showed that the error does not exceed 2% when the load changes in the range from 95% to 65%, proving that the residual carbon content in a circulating fluidized bed boiler can be accurately predicted by using the generalized Kalman information fusion method. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, generalized Kalman filtering, residual carbon content, mechanism model, heat quantity

带排烟余热回收的 CFB 锅炉节能分析 = **Energy-saving Analysis of a CFB boiler with the Waste Heat Recovered from the Exhaust Gases** [刊, 汉] ZHAO Bin, ZHANG Lu-tao (College of Metallurgy and Energy Source, Hebei United University, Tangshan, China, Post Code: 063009), LU Tai, YAN Chen-shuai (College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013, 28(5). -497 ~ 501

Presented was a CFB boiler system (referred to as RGCFB for short) for recovering the low temperature flue gas waste heat by utilizing a separation type heat pipe air preheater and established was a model for calculating the flue gas and air resistance, fan power consumption rate and net efficiency. On the basis of the operating parameters of No. 1 CFB boiler in Jingyu power plant, a contrast and analysis were performed of the thermal efficiency and net efficiency of the CFB and RGCFB boiler under four operating conditions. The research results show that the thermal efficiency of the RGCFB boiler is 1.28 to 2.23 percentagepoints higher than that of the CFB boiler and the net efficiency is 0.51 to 1.18 percentage points higher than that of the CFB boiler. Finally, the factors influencing the net efficiency of the RGCFB boiler were analyzed and the fact that to use the net efficiency as an index for evaluating the operation of a boiler can effectively guide the economic operation of the boiler was pointed out. **Key words:** CFB boiler, exhaust gas waste heat recovery, theoretical model, net efficiency, influencing factor

往复多孔介质加热炉半预混燃烧混合特性研究 = **Study of the Semi-premixed Combustion Mixed Charac-**