

内循环流化床锅炉燃烧机理 及有关热工参数的确定

王怀彬 董勇 全文涛

(哈尔滨工业大学)

[摘要] 本文针对内循环流化床燃烧锅炉特有的燃烧方式,分析了燃料颗粒的燃烧机理,同时给出了热力计算中几个重要热工参数的确定方法。

关键词 流化床 内循环 燃烧机理 热力计算 热工参数

分类号 TK229.66

0 引言

在内循环流化床燃烧锅炉中,绝大多数燃料颗粒在炉内周而复始地进行着分离循环、燃烧和传热过程^[1,2,3]。为了合理正确地进行内循环流化床锅炉的设计,就必须了解燃烧颗粒的燃烧机理。同时在这种特殊的燃烧方式下,如何正确确定锅炉热力计算中稀相区入炉热量、稀相区出口烟气焓、下一级受热面入口烟气焓、烟气温度,如何正确定义循环倍率、分离效率,并找出其相互关系,以及如何正确计算床内平均含碳量和飞灰浓度,这是人们普遍关注的问题。本文就上述一系列问题进行了分析论证,在阐明基本概念的同时,提出了具体实用的计算公式,这些公式可直接用于内循环流化床锅炉的设计计算。

1 单颗粒焦炭的燃烧速率方程^[4]

在内循环流化床中颗粒的燃烧经历了干燥和加热过程、挥发分析出及燃烧过程以及焦炭燃烧过程。其中焦炭燃烧过程中的质量、动量和能量方程可分别由以下诸式表示:

质量平衡方程:

$$\frac{dm_c}{dt} = -qA - K_a(U_c - U_p) \frac{m_c}{dc} \quad (1)$$

式中 m_c 、 q 、 A 、 K_a 、 U_c 、 U_p 分别是焦炭颗粒质量、按焦炭外表面计算的比燃烧速率、焦炭颗粒外表面积、磨损系数、颗粒速度和床料的平均速度。

动量平衡方程

$$\rho_c \frac{dV_c}{dt} = -\rho_c g + F_{d_g} + F_{d_a} \quad (2)$$

式中, ρ_c 、 F_{d_g} 、 F_{d_a} 分别是焦炭密度、单位体积颗粒所受阻力和颗粒作用力。

能量平衡方程:

$$\frac{m_c \rho_c}{A} \frac{dT_s}{dt} + \Omega q HHV = \frac{Nu K_g (T_s - T_b)}{dc} \quad (3)$$

式中, T_s 、 Ω 、 HHV 、 K_g 、 T_b 分别是焦炭颗粒的表面温度、燃烧产生热量中到达焦炭表面的

份额、焦炭发热量、气体导热系数和床温。努谢尔特准则 Nu 由下式确定:

$$Nu = 0.33Re^{0.62}(dv/dP)^{0.1} + k_g \epsilon_p \sigma \times (T_b^4 - T_s^4) / [dv(T_b - T_s)] \quad (4)$$

该公式的适用范围为: $5 < dv < 12 \text{ mm}$, $900 < Re < 2500$

对以上诸式作数值解,就可以求得焦炭的燃烧速率。图 1 给出了不同焦炭初始颗粒度求解上述微分方程得到的数值,可看出燃烧速率随粒度的增大而增加。

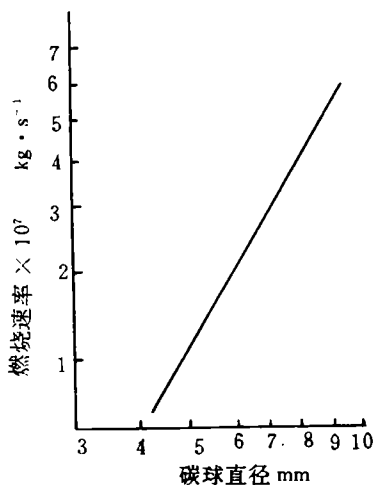


图 1 炭球燃烧速率

2 热力计算中几个热工参数的确定

2.1 稀相区入炉热量

在稀相区的传热计算中,为了计算稀相区入口处的折算烟温,必须先计算出稀相区入炉热量。如图 2 所示,从表面上看,带入稀相区的热量只有燃料带入热量 Q_f 和空气带入热量 Q_a ,该入炉热量可用下式表示:

$$Q'_{xt} = \frac{100 - q_{af}}{100 - q_4} I'_{ft} + \frac{Q_f}{100 - q_4} (1 - \delta)$$

$$\times (100 - q_3 - q_4) + \Delta\alpha_{xt} I'_{fk} \quad (5)$$

式中, Q'_{xt} 、 $\Delta\alpha_{xt}$ 分别为稀相区的入炉热量及漏风系数; q_3 、 q_4 、 q_{af} 分别为锅炉的化学未完全燃烧热损失、固体未完全燃烧热损失及密相层固体未完全燃烧热损失; Q_f 、 δ 、 I'_{ft} 、 I'_{fk} 分别为锅炉输入热量、密相层中燃料的燃烧份额、密相层出口烟气焓和理论冷空气焓。如果用式(5)计算,将导致全炉热量不平衡。实际上,如果将炉膛抽象地分解为分离区(I)和炉膛部分(II),则可明显地看到,进入稀相区的热量应由 Q_1 、 Q_k 和循环灰物理热 Q_{sh} 三部分组成。之所以把循环灰物理热 Q_{sh} 加进来,是因为内循环的作用源不断地把飞送回炉膛,同时也把飞灰的物理热带入炉膛。那么, Q_{sh} 源于何处呢?在稳定运行状态下,循环灰并非来源于燃料的燃烧,它既不吸热,也不放热,而是靠本身固有的热量维持稀相区的温度稳定。循环灰固有热量的形成主要是启动过程。在此过程中,燃料燃烧产生的飞灰部分留在稀相区作飞灰内循环,直到飞灰循环量达到某一数据为止,此时进入稀相区的飞灰量应等于稀相区出口的飞灰量。而循环灰的温度也从开始启动逐渐接近稀相区的温度,达到平衡状态以后,这部分灰的物质和能量就再也不来源于燃料的燃烧了。循环灰虽不参与换热,但对维持炉膛内的温度却有重要作用,因此在计算稀相区入炉热量时,就应把该部分循环灰物理热加进去。内循环流化床燃烧锅炉稀相区的入炉热量应由下式求得:

$$Q'_{xt} = \frac{100 - q_{af}}{100 - q_4} I'_{ft} + \frac{Q_f}{100 - q_4} (1 - \delta) \times (100 - q_3 - q_4) + \Delta\alpha_{xt} I'_{fk} + \frac{A^y}{100} a_{sh} \times (Cv)_{sh} \times \frac{100}{100 - C_{sh}} \cdot \frac{100}{100 - q_4} \quad (6)$$

式中, A^y 、 a_{sh} 、 $(Cv)_{sh}$ 、 C_{sh} 分别为燃料的应用基灰份、循环灰份额、循环灰焓和循环灰含碳量,其它符号与式(5)相同。

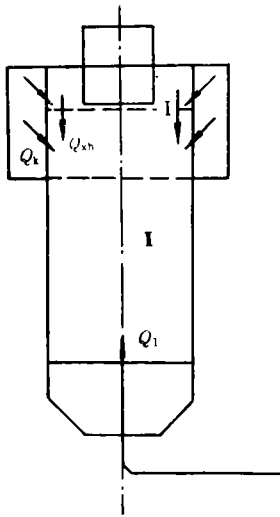


图 2 内循环流化床热量平衡图

2.2 稀相区出口及下一级对流受热面入口烟气焓和烟气温度

几乎对所有的锅炉,其炉膛出口烟气焓应等于下一级对流受热面入口烟气焓,数值上是连续的。但对于内循环流化床锅炉,在此处两者的数值是不连续的。由于内循环的作用,使稀相区的循环灰及自密相层带出的飞灰以最大值浓集于稀相区出口,即所谓炉膛出口。它们对维持炉膛出口烟温起着决定性的作用。因此,计算炉膛出口烟气焓时,应同时计及循环灰份额 a_{sh} 和密相层带出飞灰份额 a_m 的贡献。其计算公式为:

$$I'_{y,xt} = I'_y + (a'_i - 1)V^o(Cv)_k + \frac{A_y}{100}(a_{sh} + a_m)(Cv)_n \times \frac{100}{100 - C_m} \times \frac{100}{100 - q_4} \quad (7)$$

由于循环灰不飞出炉膛外,只向炉内贡献物理热,因此计算下一级受热面入口烟气焓时,应扣除这部分循环灰物理热,这就形成了烟气焓时的不连续性。该级受热面入口烟气焓由下式确定:

$$I'_{y,gs} = I'_{y,xt} - \frac{A_y}{100}a_{sh}(cv)_n$$

$$\times \frac{100}{100 - C_m} \cdot \frac{100}{100 - q_4} \quad (8)$$

至于烟气温度,稀相区出口与下级受热面入口,应该相等,数值上连续。

2.3 燃料颗粒的燃烧效率模型

在进行内循环流化床锅炉设计时,燃烧效率是非常重要的参数,因为它直接影响锅炉运行的经济性。下面建立燃烧效率模型。

设 η_r 为燃烧效率, ΔC 为投入床内每单位燃料量的碳损失量, η 为分离效率, η_1 为一次经过稀相区和参与循环的含碳粒子的燃烧效率。

碳损失量的平衡方程为投入床内每单位燃料的碳损失量等于未被燃尽而飞出炉外粒子的总含碳量。

显然,投入床内每单位燃料的碳损失量可由燃烧效率直接求出,即

$$\Delta C = C^y(1 - \eta_r) \quad (9)$$

未被燃尽而飞出炉外粒子的含碳量与分离效率及一次经过稀相区和参与循环的含碳粒子的燃烧效率有关。投入 1 单位燃料,碳为 C^y ,一次燃烧后的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)$,经分离再进行循环燃烧的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)\eta$,飞出炉外的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)(1 - \eta)$;扣除飞出炉外的碳量,床内进行循环燃烧的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)\eta$,经一次循环燃烧被分离再进行循环燃烧的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)^2\eta^2$,飞出炉外的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)^2\eta(1 - \eta)$;再扣除飞出炉外的碳量,床内进行循环燃烧的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)^2\eta^2$,经一次循环燃烧被分离再进行循环燃烧的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)^3\eta^3$,飞出炉外的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)^3\eta^2(1 - \eta)$ 。

如此推算,床内进行循环燃烧的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)^{n-1}\eta^{n-1}$,经一次循环燃烧被分离再进行循环燃烧的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)^n\eta^n$,飞出炉外的碳量为 $C^y(1 - \eta_1)^n\eta^{n-1}(1 - \eta)$ 。

未被燃尽飞出炉外粒子的总含碳量应为每次飞出炉外粒子的含碳量之和,即

$$\begin{aligned} \sum C &= C^y(1 - \eta_1)(1 - \eta) + C^y(1 - \eta_1)^2\eta \\ &\quad \times (1 - \eta) + C^y(1 - \eta_1)^3\eta^2(1 - \eta) \\ &\quad + \dots + C^y(1 - \eta_1)^n\eta^{n-1}(1 - \eta) \\ &= (1 - \eta_1)(1 - \eta)[1 + \eta(1 - \eta_1) \\ &\quad + \eta^2(1 - \eta_1)^2 + \dots + \eta^{n-1} \\ &\quad \times (1 - \eta_1)^{n-1}]C^y \end{aligned}$$

由于 $\eta(1 - \eta_1) < 1$, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 上式可化简为:

$$\sum C = \frac{C^y(1 - \eta_1)(1 - \eta)}{1 - \eta(1 - \eta_1)} \quad (10)$$

公式(9)与式(10)相等, 即得到燃烧效率的计算公式:

$$\eta_r = 1 - \frac{(1 - \eta_1)(1 - \eta)}{1 - \eta(1 - \eta_1)} \quad (11)$$

因为分离效率 η 与循环倍率 N 有如下关系:

$$\eta = N/(N + 1)$$

所以燃烧效率 η_r 与循环倍率 N 有如下关系:

$$\eta_r = \frac{\eta_1(1 + N)}{1 + N\eta_1} \quad (12)$$

对于不同煤种 η_1 值大致的取值范围为: 褐煤 0.87 ~ 0.92; 烟煤 0.85 ~ 0.90; 贫煤 0.75 ~ 0.85; 无烟煤 0.70 ~ 0.80; 煤矸石 0.75 ~ 0.80。取内循环流化床稀相区粒子的分离效率 η 为 0.80, 由式(11)分别算出工业锅炉设计用五种代表性煤种的燃烧效率 η_r , 列入下表

序号	煤种类别	$\eta_1(\%)$	$\eta(\%)$	$\eta_r(\%)$
1	扎赉诺尔褐煤	87 ~ 92	80	97.1 ~ 98.3
2	山东良庄烟煤	85 ~ 90	80	96.6 ~ 97.8
3	四川芙蓉贫煤	75 ~ 85	80	93.8 ~ 96.6
4	京西安家滩无烟煤	70 ~ 80	80	92.1 ~ 95.2
5	安徽淮北煤矸石	75 ~ 80	80	93.8 ~ 95.2

作者在 1.4 MW 内循环流化床中燃用烟煤实测的燃烧效率 η_r 为 97.15%, 与上表中计算值吻合非常好, 证明燃烧效率模型是正

确的, 用它计算燃烧效率简单、方便。

2.4 物料的循环倍率与分离效率

如图 3 所示, 设进入稀相区的灰量为 A , 被分离循环的灰量为 B , 未被分离排出炉膛的灰量为 C , D 为稀相区的总灰量。

定义循环倍率 N 为循环灰量与进入稀相区的灰量之比, 即

$$N = B/A \quad (13)$$

定义分离效率 η 为循环灰量与稀相区总灰量之比, 即

$$\eta = B/D = B/(A + B) \quad (14)$$

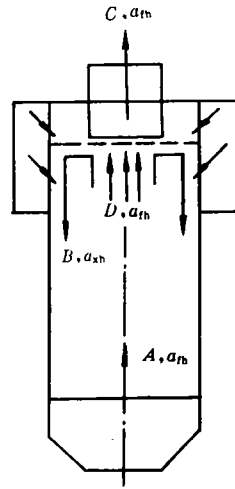


图 3 内循环流化床灰平衡图

又设稀相区循环灰份额为 a_{xh} , 飞离稀相区的飞灰份额为 a_{rh} (在稳定工况下, 该值等于进入稀相区的飞灰份额), 则稀相区总的飞灰份额 a_{xt} 为:

$$a_{xt} = a_{xt} + a_{rh} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{因为 } A &= a_{rh}A^y, B = a_{xh} \cdot A^y \\ &= (a_{xt} - a_{rh})A^y, \end{aligned}$$

则有:

$$\eta = (a_{xt} - a_{rh})/a_{xt} = a_{xh}/a_{xt} \quad (16)$$

$$N = (a_{xt} - a_{rh})/a_{rh} = a_{xh}/a_{rh} \quad (17)$$

由式(13)、(14)还可得到如下关系:

$$\eta = N/(N + 1) \quad (18)$$

$$N = \eta/(1 - \eta) \quad (19)$$

$$D = A/(1 - \eta) \quad (20)$$

因为 $a_{xt} \cdot A^y = a_m \cdot A^y/(1 - \eta)$

所以又有

$$a_{xt} = a_m/(1 - \eta) \quad (21)$$

2.5 循环物料的平均含碳量

内循环流化床物料的平均含碳量是指稀相区循环物料的含碳量 C_1 占循环物料量 $(D + C_1)$ 的百分比,即

$$C_m = \frac{C_1}{C_1 + D} \times 100\% \quad (22)$$

为了使问题简化,假定循环物料在稀相区每次循环燃烧的燃烧效率相同,均为 η_1 。进入稀相区每单位物料的总含碳量为 C^y ,分离效率为 η ,则有

经过一次燃烧后物料的含碳量减为 $C^y(1 - \eta)$ 。经第一次分离循环再燃烧后物料的含碳量变为 $C^y(1 - \eta_1)^2\eta$,……依次类推,最后求得平均含碳量为:

$$C_m = \frac{1}{a_m \frac{A^y}{C^y} \cdot \frac{1 - \eta(1 - \eta_1)}{(1 - \eta)(1 - \eta_1)} + 1} \times 100\% \quad (23)$$

上式中 η_1 值主要与燃料特性及流动工况有关,详见 2.3 所述。

当分离效率为 0.8 时,内循环流化床稀相区的平均含碳量 $C_m\%$ 大致范围为:扎赉诺尔褐煤 5~10;山东良庄烟煤 6~9;四川芙蓉贫煤 11~19;京西安家滩无烟煤 14~20;安徽淮北煤矸石 3~4。

2.6 飞灰浓度

我国现行热力计算方法中的飞灰浓度计算公式不能直接用于计算内循环流化床的飞灰浓度。如果将已求出的平均含碳量关系式(23)代入计算公式,则仍可执行现行热力计算方法。现行热力计算方法中飞灰浓度按下式计算:

$$\mu_m = \frac{A^y a_m \cdot 100}{G_y(100 - q_4)(100 - C_m)}$$

对于内循环流化床,如果计算稀相区的飞灰浓度,则 a_m 应代入 a_{xt} , C_m 应代入平均含碳量公式(23),烟气重量仍由公式 $G_y = 1 - \frac{A^y}{100} + 1.306\alpha_{p1}V^0$ 计算。代入 a_{xt} 及平均含碳量 C_m 公式后,得到

$$\mu_m = \frac{C^y [1 + \frac{A^y}{C^y} a_m \frac{1 - \eta(1 - \eta_1)}{(1 - \eta)(1 - \eta_1)}]}{G_y(100 - q_4) \frac{1 - \eta(1 - \eta_1)}{1 - \eta_1}} \quad (24)$$

利用该式可以正确计算内循环流化床内的飞灰浓度。

3 结论

3.1 本文给出的单颗粒焦炭燃烧速率方程为深入研究床内粒子的燃烧机理奠定的基础。

3.2 内循环流化床稀相区入炉热量除了考虑燃料及空气带入热量,还应加上循环灰物埋热,式(6)提供了正确计算方法。

3.3 内循环流化床稀相区出口烟气焓数值上不等于下一级受热面入口烟气焓,它们之间相差循环灰焓。内循环流化床稀相区出口烟气温度与下一级入口烟气温度,数值上相等。

3.4 内循环流化床燃烧效率、循环倍率、分离效率、床内平均飞灰含碳量、飞灰浓度分别由式(11)、(13)、(14)、(23)、(24)进行计算。

参 考 文 献

- 1 王怀彬 陈崇枢等. 内循环流化床及其粒子带出率的试验研究. 热能动力工程, 1991, 6(6): 341~346.
- 2 王怀彬. 内循环流化床锅炉中含碳粒子的分离与燃烧效率的研究. 应用能源技术, 1991(4): 4~7
- 3 赵长遂. 旋涡流化床悬浮段气固悬浮流试验研究. 东南大学学报, 1990(2): 35~41.
- 4 [加]P. 巴苏, S. A. 费雷泽著, 岑可法等译. 循环流化床锅炉的设计与运行. 科学出版社, 1994

市场营销

热水锅炉无压运行控制器

〔中国专利 932220169〕

高建伟 (海伦农场)

根据减压原理,对热水锅炉的无压运行控制,创造出一种新式的控制方法。其控制方法的最大特点是:无需在热水锅炉锅筒的顶部装一与大气相通的开式水箱,只要将其安装在热水锅炉的总回水管道上,即可实现热水锅炉的无压运行。使热水锅炉的制造成本降低、更趋于简单,且运行安全可靠。该项技术已获得了国家专利。

热水锅炉无压运行控制器的结构简图见图1。

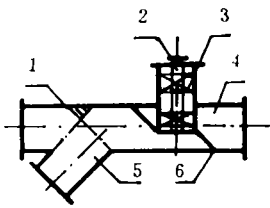


图1 结构简图

1—阀体 2—弹簧调节螺栓 3—弹簧
4—阀室 5—过滤网 6—阀瓣

1 工作原理

锅内的热水通过出水管上的循环水泵,将其送入供热系统,经无压运行控制器返回炉内,周而复始。

由于热水锅炉无压运行控制器为常开型弹簧式,可调节阀瓣的开启程度,调定阀后压力和热水循环流量的大小。

当热水循环所产生的压力,通过改变其截流口的面积,造成压差损失,消除压力,从而达到控制热水锅炉处于无压运行的目的。

2 安装

热水锅炉无压运行控制器安装简单,只需按图2所示的形式,将其安装在热水锅炉的总回水管道上,即可实现热水锅炉的无压运行。

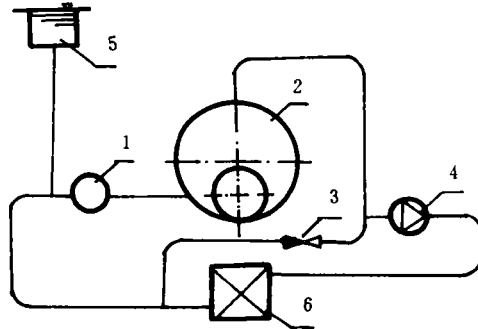


图2 安装示意图

1—控制器 2—热水锅炉 3—防水击止回阀
4—热水循环泵 5—膨胀水箱 6—热用户

3 特点:

- (1) 热水锅炉不需在锅筒的顶部安装开式贮水箱。
- (2) 适用于对现有热水锅炉的改造;
- (3) 特别适用于锅炉厂对热水锅炉的配套使用;
- (4) 无压运行控制器,适用于4t以下热水锅炉。

(接 13 页)

作者简介 王怀彬,男,1953.9生,副教授。1988~1989年作为访问学者由国家教委派往前苏联。回国后,公开出版《锅炉辅助设备》、《锅炉自动调节》等专著;发表学术论文50余篇,其中有多篇被前苏联动力文摘摘录。现主要从事气固两相流、流化床及其锅炉、环保技术的教学和科研工作。(150001 哈尔滨工业大学动力工程系热能工程教研室)

涡轮导叶轴向弯曲对其气动性能影响的研究(三维粘流数值分析)=A Study on the Axial Skewing Effect of Turbine Stator Blades on Their Aerodynamic Characteristics(Three-dimensional Viscous Flow Numerical Analysis [刊/中]/Chen Naixing, Zhou Qian, Huang Weiguang(Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(1). -1~8

Recent years have seen the application of computational fluid mechanics to turbomachinery with a significant contribution being rendered to the three-dimensional computation method and the simultaneous initiation of a transition from academic study to industrial use. Over the recent two decades the Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences had been engaged in the development of a variety of three-dimensional flow computational methods for turbomachinery. The present paper presents the method developed by the authors, its application in the study and analysis of the flow phenomena occurring in a typical turbine stator with a high aspect ratio, and the axial skewing effect on its aerodynamic characteristics. Also given are some study results and the authors suggestions. Key words: numerical analysis of three-dimensional viscous flow, axial skewing of turbine stator blades, turbine aerodynamic characteristics

内循环流化床锅炉燃烧机理及有关热工参数的确定=The Combustion Mechanism of an Internal Circulation Fluidized Boiler and the Determination of Related Thermotechnical Parameters[刊/中]/Wang Huaibin, Dong Yong, Quan Wentao(Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(1). -9~14

Proceeding from the combustion mode specific to an internal circulation fluidized bed boiler, the authors analysed the mechanism of fuel particle combustion and presented a method for determining several major thermotechnical parameters in the thermodynamic calculation. Key words: fluidized bed, internal circulation, combustion mechanism, thermodynamic calculation, thermotechnical parameters

PFBC 高温炉渣连续排放与冷却系统的冷态试验研究=Cold-state Experimental Study of a PFBC High-temperature Boiler Slag Continuous Disposal and Cooling System [刊/中]/Rong Degang, Yang Yaping, Wang Shuangqun (Southeastern University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(1). -15~19

This paper briefly describes a cold-state test plant of boiler slag disposal and cooling for a home-made PFBC-CC intermediate test electric power station as well as its working principle and related operation test conditions. The test results have shown that the slag disposal and cooling system based on the use of a pneumatically controlled non-mechanical valve for controlling slag disposal rate and the cooling of slag through a shallow bed fluidized mode is characterized by a good regulation performance under a pressurized environment, low air consumption and adequate adaptability to large granules. Because of the foregoing the said system is expected to find application in an intermediate test plant to realize the continuous disposal and cooling of PFBC high-temperature boiler slag. Key words: pressurized fluidized bed, boiler slag, disposal, cooling system

链条炉排加煤粉复合燃烧技术=A Combustion Technique Featuring the Combination of a Travelling Grate and Pulverized Coal Firing[刊,中]/Yang Mingxin, Wu Shaohua, Sun Shaozeng,