

440 t/h CFB 锅炉掺烧石油焦 二氧化硫排放特性研究

张中林¹,陈晓平²

(1. 南京工程学院 电力仿真与控制工程中心 江苏 南京 210013; 2. 东南大学 能源与环境学院 江苏 南京 210096)

摘 要: 在 440 t/h 大型循环流化床锅炉上进行了燃烧不同比例煤和石油焦混合燃料时二氧化硫排放特性的试验研究。研究了燃烧不同比例的混合燃料、炉膛温度、过量空气系数和钙硫摩尔比对二氧化硫排放特性的影响。研究结果表明,过量空气系数和钙硫摩尔比的增加可以降低二氧化硫排放浓度。存在一个最佳脱硫温度,二氧化硫排放浓度最低,对于各种混合燃料最佳脱硫温度应在 830 ~ 850 ℃ 之间。

关 键 词: 循环流化床; 掺烧; 石油焦; 二氧化硫

中图分类号: X701 文献标识码: A

引 言

循环流化床锅炉(CFB)具有燃料适应性广,能够燃用一切种类的燃料,燃烧温度低,燃料停留时间长,能够达到很高的燃烧效率,特别是低挥发分和难以燃尽的燃料,所以目前普遍采用循环流化床锅炉燃烧石油焦,回收石油焦的热值,成为利用石油焦回收热量的最佳方式^[1-2]。但是循环流化床锅炉纯烧石油焦时存在着严重的聚团、结渣、腐蚀等问题,通过煤和石油焦的混烧,可以利用煤灰的稀释效应有效地解决这种问题,而且显著改善床内粒径分布,保证足够的循环物料量,提高锅炉燃烧效率,稳定运行。目前,大多数循环流化床锅炉均采用煤和石油焦混合燃烧的方式来处理石油焦。

国内外对纯烧煤的循环流化床锅炉的二氧化硫排放特性研究较多,但对石油焦或煤和石油焦混合燃烧循环流化床锅炉的二氧化硫的排放特性研究较少。由于石油焦含硫率较高,且随着我国环保要求越来越高,二氧化硫的排放量成为限制石油焦作为工业燃料的主要瓶颈。

所以,研究煤和石油焦混合燃烧的二氧化硫排放特性,对于提高脱硫效率,降低二氧化硫排放量,有效利用石油焦和保护生态环境有着重要意义。

国内首次在 440 t/h 大型循环流化床锅炉上进行了煤和石油焦混合燃料二氧化硫排放特性研究,针对不同混合比混合燃料进行了试验,对烟气中的 SO₂、CO₂、O₂、NO 和 N₂O 进行了在线测试。分析了床温、过量空气系数及 Ca/S 摩尔比对 SO₂ 排放特性的影响,试验结果为混烧煤和石油焦的循环流化床锅炉的优化设计和运行提供了数据,并为更高参数和更大容量的循环流化床锅炉上进行煤和石油焦混合燃烧提供了指导意见。

1 试验装置

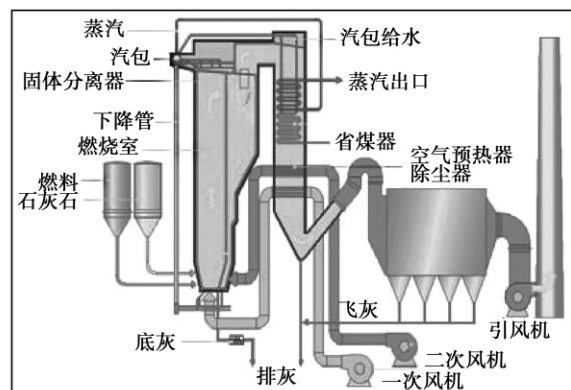


图 1 440 t/h CFB 锅炉本体示意图

Fig.1 Schematic diagram of a 440 t/h CFB boiler proper

图 1 是美国 FW 公司生产的第三代 440 t/h 循环流化床锅炉。炉膛底部布置有布风板,布风板上装有箭头形风帽,一次风由布风板进入炉膛,使床料产生流化。炉内布置膜式水冷壁,炉膛出口布置有八面水冷耐火材料衬里的紧凑型旋风分离器。锅炉配有四台称重式给煤机,燃料由前墙加入炉膛。脱硫剂经破碎后,通过气力输送方式由锅炉前、后墙加入炉内。

收稿日期: 2011 - 08 - 17; 修订日期: 2011 - 09 - 22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2006CB705806)

作者简介: 张中林(1977 -) 男,江苏扬州人,东南大学博士研究生,现为南京工程学院讲师。

锅炉配有两台风水联合冷渣器,炉膛排渣至冷渣器,经冷却后排至渣斗,细灰随冷渣风返回炉膛。锅炉配有飞灰再循环装置,空预器下灰斗和静电除尘器电场捕集的飞灰采用气力输送方式由前墙送回炉内,可用于调节床温。旋风分离器出口的烟气依次经过装有末级过热器、一级过热器、省煤器和空气预热器的尾部竖井烟道和静电除尘器由烟囱排放。DCS 控制系统采用 Foxbro I/A 系统,能准确地调整和显示锅炉各种参数。为了提高试验精度,在锅炉烟囱处布置测点,采用德国德图公司的 Testo 350XL 型烟气分析仪进行烟气取样和成份分析,主要分析了空气预热器出口烟道内烟气中 O₂、CO₂、SO₂、NO、N₂O 和 CO 等 6 种烟气成份,并通过计算机将这些数据进行实时打印、绘图和保存等处理。

2 燃料和脱硫剂特性

表 1 燃料元素分析及工业分析(%)

Tab.1 Elementary and industrial analysis of fuel(%)

	无烟煤	石油焦
M _t	9.1	5.91
A _{ar}	18.09	3.57
V _{ar}	9.82	6.36
C _f	57.30	84.16
C _{ar}	66.56	82.95
H _{ar}	3.07	3.35
O _{ar}	0.25	0.13
N _{ar}	0.38	1.00
S _{ar}	2.55	5.09
Q _{dw} /MJ·kg ⁻¹	22.7	31.88

表 2 脱硫剂石灰石粒径分布

Tab.2 Particle diameter distribution of a desulfurizing agent

粒径/mm	粒径分布/%
<0.163	1.03
0.163~0.325	2.69
0.325~0.630	42.95
0.630~1.250	51.60
1.250~2.500	1.49
2.500~5.000	0.24

表 1 为燃料的元素分析和工业分析(收到基),无烟煤取自山西晋城无烟煤,石油焦为金陵石化炼

油厂生产的石油焦。由表 1 可以看出,石油焦与无烟煤相比固定碳含量很高,热值高,灰分小,但是硫含量高,挥发分小,属于高热值,高硫和难燃燃料。脱硫剂采用石灰石,石灰石经破碎后粒径分布如表 2 所示,石灰石碳酸钙含量为 87%。煤和石油焦的粒径分布如表 3 所示。

表 3 煤和石油焦粒径分布

Tab.3 Coal and petroleum coke particle size distribution

粒径/mm	无烟煤粒径分布/%	石油焦粒径分布/%
<0.16	19.8	20.1
0.16~0.35	3.7	4.6
0.35~0.68	13.6	19.1
0.68~1.31	15.0	21.5
1.31~2.55	7.2	10.3
2.55~5.10	21	21
5.1~6	3.9	3.3
>6	16	0
平均值	2.61	1.42

3 试验结果和分析

3.1 床温对脱硫效果的影响

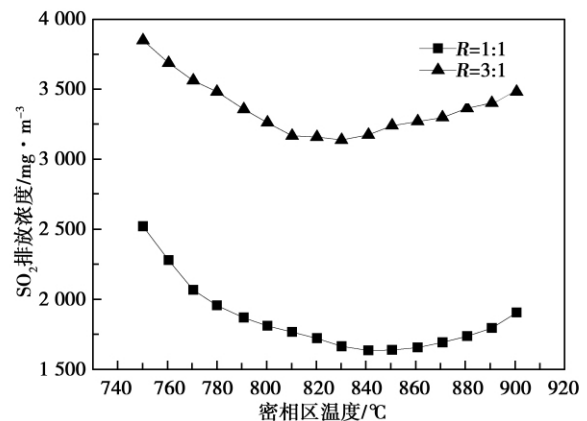


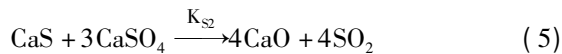
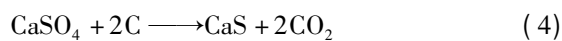
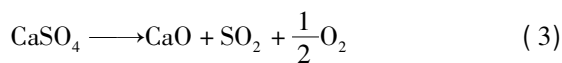
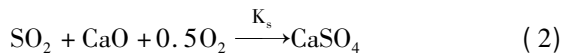
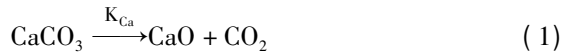
图 2 密相区温度对二氧化硫排放浓度的影响

Fig.2 Influence of the temperature in the dense-phase zone on sulfur dioxide emissions concentration

流化床密相区温度对二氧化硫排放浓度的影响如图 2 所示。在试验中,保持 Ca/S 摩尔比为 1.5,分别对焦煤比为 1:1 和 3:1 进行试验,通过调节一次风和二次风调节床温,使床温由 800 °C 逐步上升至 900 °C,考察燃烧温度(密相区温度)对二氧化硫

排放浓度的影响。由图2可以看出,随着密相区温度的升高,排放浓度呈现先下降后上升的趋势,其中存在一个最佳脱硫温度,此时排放浓度最低。焦煤比越高,由于石油焦含硫率较高,二氧化硫排放浓度对密相区温度更敏感,所对应的曲线斜率更大。对于焦煤比为1:1的混合燃料,最佳脱硫温度在850℃左右,而对于焦煤比为3:1的混合燃料,最佳脱硫温度在830℃左右。

循环流化床内脱硫反应主要由以下几个控制方程实现:



方程(1)为石灰石加热分解过程,方程(2)为二氧化硫和氧化钙反应过程,方程(3)表示高温下硫酸钙的分解,方程(4)、方程(5)表示在还原性气氛下的分解。若只考虑一级反应,如方程(2)所示,床内的脱硫反应速率为^[3]:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_m} + \frac{\lambda}{D_e} \quad (6)$$

式中: K_s —化学反应速率常数; K_m —脱硫剂颗粒固体表面的扩散系数; D_e —颗粒内部扩散系数; λ —颗粒内部气体扩散平均距离。

在循环流化床内颗粒表面的扩散系数比较大,所以 K_s 值比较大,对整个反应的影响可以忽略。化学反应速率常数 K_s 取决于反应温度,所以在床温较低的时 K_s 较小,反应速率较低。而且在较低温度时,碳酸钙的分解速率也较低,方程(1),同时也限制了脱硫反应的进行。当反应温度较高时,由于脱硫剂的烧结,孔径闭塞, D_e 值较小,限制了脱硫反应。在高温状态下 ($> 1200^\circ\text{C}$) 硫酸钙开始分解,流化床的床温一般达不到 1200°C ,所以在流化床运行温度下,一般不发生硫酸钙的直接分解,但是在还原性气氛下 (C、CO、H 原子存在),方程(4)和方程(5)发生,这些反应对温度的要求相对较低,一般在 900°C 左右。流化床密相区内一般均维持还原性气氛,所以在床温进一步升高时,由于还原反应的作用,二氧化硫排放浓度升高。循环流化床燃烧混合燃料时存在一个最佳的脱硫温度,在本试验中焦煤比 1:1 的混合燃料在 850°C 左右,而焦煤比 3:1 的混合燃

料最佳脱硫温度在 830°C 左右。

3.2 过量空气系数的影响

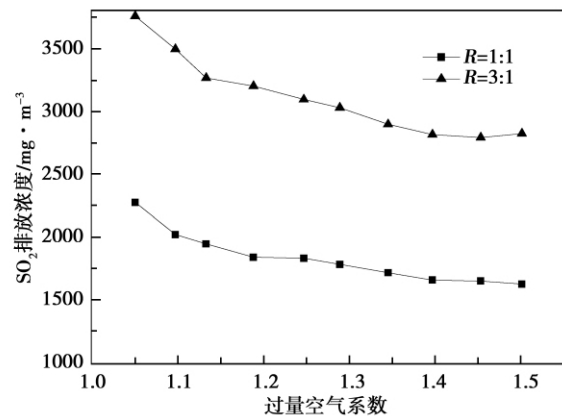
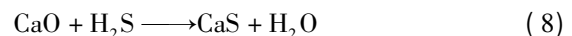
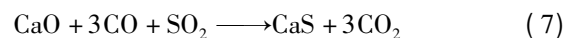


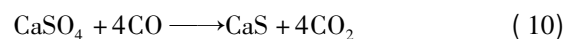
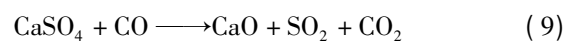
图3 过量空气系数对二氧化硫排放浓度的影响

Fig. 3 Influence of the excess air coefficient on sulfur dioxide emissions concentration

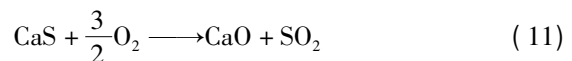
过量空气系数对二氧化硫排放浓度的影响如图3所示。随着过量空气系数的增加,二氧化硫排放浓度降低,且焦煤比 3:1 的混合燃料比焦煤比 1:1 的混合燃料的排放浓度要高。过量空气系数较低时,流化床密相区处于还原性气氛下,还原性气氛下脱硫反应除了方程(4)和方程(5)之外还有如下几个控制方程实现^[4]:



在特别强的还原性气氛下, CaSO_4 特性很不稳定,发生如下反应:



在循环流化床密相区内如果是强还原性气氛的话, CaSO_4 会被大量的还原成 CaO 或者生成大量的含硫还原性物质 CaS , 流化床的密相区的上部稀相区是氧化性气氛,在氧化性气氛发生如下氧化反应:



总体来说,床内还原性气氛是不利于脱硫反应的进行,过量空气系数较小时,密相区处于强还原性气氛下,脱硫剂被大量还原反应,二氧化硫排放浓度也急剧增大。增加过量空气系数,使密相区运行在氧化性气氛下或微还原性气氛下,能够有效提高脱硫剂利用效率,降低二氧化硫排放浓度。但是,过量增加过量空气系数对提高脱硫效率的作用有限,同时增加厂用电耗且不利于床温控制,所以根据锅炉热平衡计算和能量

平衡计算存在着一个经济的过量空气系数,本次试验中过量空气系数在1.3左右较合适。

3.3 Ca/S 摩尔比的影响

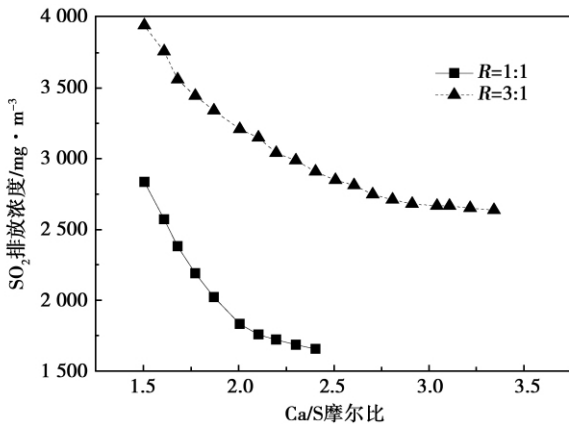


图4 Ca/S 摩尔比对二氧化硫排放浓度的影响关系

Fig. 4 Influence of Ca/S mole ratio on the sulfur dioxide emissions concentration

钙硫摩尔比对二氧化硫排放浓度的影响如图4所示。随着Ca/S摩尔比增加二氧化硫排放浓度明显降低。Ca/S摩尔比是流化床内脱硫重要影响因素,随着钙硫摩尔比的增加,二氧化硫排放浓度减少,当钙硫摩尔比增加至一定程度时,二氧化硫排放浓度减少的速率逐渐降低,此时脱硫剂的有效利用率降低,脱硫剂使用成本急剧增加,所以存在一个经济的Ca/S摩尔比。图4所示的钙硫摩尔比与脱硫效率的变化曲线与纯烧石油焦的燃烧工况有所区别,因为混合燃料下的污染物生成机理与纯烧石油焦区别较大,混合燃料中石油焦含硫量提高,但所需钙硫比并不成比例增加,这说明混合燃烧能够在一定程度上改善燃料特性,抑制污染物的生成。本试验中,对于焦煤比1:1的混合燃料最佳钙硫摩尔比为2.1左右,对于焦煤比3:1的混合燃料最佳钙硫摩尔比为3.0左右。

4 结论

国内首次在150 MW机组所配套的440 t/h循环流化床锅炉上进行煤和石油焦混合燃料的二氧化硫排放特性试验研究,试验主要采用焦煤比1:1和3:1两种混合燃料,分别考察床温、过量空气系数和钙硫摩尔比对脱硫效率的影响,试验结果得出如下结论:

(1) 锅炉运行床温对二氧化硫排放浓度影响较

大,低温时脱硫剂活性不够,高温时脱硫剂由于烧结,导致二氧化硫气体无法扩散到脱硫剂的内表面参与反应,并且生成的硫酸钙在高温和还原反应作用下易分解,所以床温过低或过高时脱硫效率均不高,存在着一个最佳脱硫温度,焦煤比1:1混合燃料的最佳脱硫温度为850℃,焦煤比3:1混合燃料的最佳脱硫温度为830℃。

(2) 过量空气系数主要是通过改变流化床内的气体氛围而影响到脱硫效率,流化床内不同的气体氛围下,脱硫反应的机理不一样,在还原性气氛下,会产生大量的还原性中间物质,当这些物质到达氧化区后又被氧化成二氧化硫,造成脱硫剂有效利用率急剧下降,脱硫效率同时也下降。所以还原性气氛是不利于脱硫反应,适当提高过量空气系数,使锅炉运行在氧化性或微还原性气氛下,有利用提高脱硫剂的利用效率。考虑到锅炉能耗和效率,存在着一个经济的过量空气系数,本试验中,根据试验结果过量空气系数取1.3比较合适。

(3) 钙硫摩尔比是影响脱硫效率的最主要因素,增加钙硫摩尔比对于提高脱硫效率总是有益的,但是当钙硫摩尔比达到一定量之后,对提高脱硫效率的作用明显降低,提高钙硫比增加了运行成本,所以存在一个最佳钙硫摩尔比。本试验中,对于焦煤比1:1的混合燃料的最佳钙硫摩尔比在2.1左右,焦煤比3:1的混合燃料的最佳钙硫摩尔比在2.9左右。

(4) 石油焦是高硫分燃料,如果按照纯烧煤或者纯烧石油焦的数据进行推论,试验中混合燃料的污染物排放值低于推论值,这说明煤和石油焦混合燃料在燃烧过程中化学和物理特性及燃烧机理均发生变化,改善了燃料污染物排放特性。试验表明,煤和石油焦的混烧是利用高硫石油焦的有效途径,但是对煤和石油焦混合燃料化学和物理特性机理还要加强研究,为科学合理的混合燃烧提供理论依据。

参考文献:

[1] Chen Jihui, Lu Xiaofeng. Progress of petroleum coke combusting in circulating fluidized bed boilers—a review and future perspectives [J]. Resources Conservation and Recycling 2007, 49(3): 203–216.
 [2] Anon. Key trends in the petroleum coke industry world wide [J]. Mater Technol 2003, 18(2): 115–116.
 [3] Liu H, Gibbs B M. The influence of limestone addition at different positions on gaseous emissions from a coal-fired circulating fluidized bed combustor [J]. Fuel 1998, 77(14): 1569–1577.
 [4] Brereton C M H, Lim C J, Grace J R, et al. Pitch and coke combustion in a circulating fluidized bed [J]. Fuel 1995, 74(10): 1415–1423.

(陈滨 编辑)

three-dimensional measurement is realized through a matching of the test images to be measured and the numerical template. The defocus distance of a numerical image is that of the test image. On the basis of an analysis of the test images and the numerical template, the test images were pretreated and the numerical template was corrected respectively, resulting in a better matching effectiveness of the test fluorescent particle images and the numerical template. **Key words:** micro-fluid, Micro-PIV, three-dimensional measurement, image processing

流化床 O_2/CO_2 燃烧(III) -氧浓度对粒径的影响 = O_2/CO_2 Combustion in a Fluidized Bed(III) -Influence of the Oxygen Concentration on Particle Diameters [刊, 汉] ZHAO Ke, TAN Li, DUAN Cui-jiu, LU Qing-gang (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 449 ~ 454

To study the influence of the oxygen concentration on particle diameters of fuel, a combustion test was performed at different oxygen concentrations, fuels and particle diameters in a 15 kW and 0.15 MW circulating fluidized bed test system respectively. The test results show that when coal with a high volatile content is burned, the oxygen concentration has a relatively big influence on the thermal fragmentation of fuel and subsequently affects the particle diameters of fuel. During the combustion at an oxygen concentration of about 50%, for fuel with a high volatile content, the average particle diameter will increase by about 35% when compared with the conventional air combustion. During the combustion process, the thermal fragmentation of Shenmu-originated semi-coke with a low volatile content is relatively weak and the oxygen concentration has no big influence on the thermal fragmentation characteristics and the particle diameters have no obvious difference to those under the condition of air combustion. **Key words:** fluidized bed, O_2/CO_2 combustion, thermal fragmentation, oxygen concentration, particle diameter

440 t/h CFB 锅炉掺烧石油焦二氧化硫排放特性研究 = Study of the SO_2 Emission Characteristics of a 440 t/h Circulating Fluidized Bed Boiler Burning Coal Mixed and Diluted With Petroleum Coke [刊, 汉] ZHANG Zhong-lin (Engineering Center for Electric Power Simulation and Control, Nanjing Engineering College, Nanjing, China, Post Code: 210013), CHEN Xiao-ping (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 455 ~ 458

In a 440 t/h large-sized circulating fluidized bed boiler, an experimental study of its sulfur dioxide emission charac-

teristics was performed by burning coal mixed and diluted with petroleum coke in various proportions. The influence of the furnace temperature, excess air ratio and calcium/sulfur molar ratio on the sulfur dioxide emission characteristics was studied during the combustion of the blended fuel in various proportions. It has been found that to increase the excess air ratio and calcium/sulfur molar ratio can reduce the sulfur dioxide emissions concentration. There exists an optimum desulfurization temperature at which the sulfur dioxide emissions concentration will be the lowest. For a variety of blended fuels, the optimum desulfurization temperature falls in a range from 830°C to 850°C. **Key words:** circulating fluidized bed, mixing-dilution combustion, petroleum coke, sulfur dioxide

220 t/h 锅炉再燃改造的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Reburning Modification of a 220 t/h Boiler**
[刊, 汉] LI De-bo (Guangdong Electric Grid Company, Academy of Electric Power Science, Guangzhou, China, Post Code: 510600), ZHANG Rui (National Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Resources, Thermal Energy Engineering Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 459 ~ 463

To perform a reburning modification of a boiler, with the help of a Fluent 6.3 software platform and by adopting a numerical simulation method, studied were the in-furnace gas flow field, temperature field and pollutant emissions characteristics before and after a reburning modification of a 220 t/h tangentially-fired boiler. Furthermore, the influence of the excess air ratio in the reburning zone on the reburning modification effectiveness was also investigated. The realizable $k-\varepsilon$ and LES model were used as the turbulent flow model respectively and a comparison of the simulation results was conducted. A contrast and verification of the simulation results obtained by using the LES model with the on-the-spot test data were conducted, including the temperature field, component field and NO_x . It has been found that the numerical simulation results obtained by using the LES model are in relatively good agreement with the test results. The calculated results show that after the reburning modification, the temperature distribution in the furnace is more uniform and a reduction atmosphere is formed around the reburning spout, leading to a drop of the NO_x concentration. When the excess air ratio in the reburning zone is 0.90, the reburning effectiveness is deemed as the best one and in such a case, the NO_x concentration at the outlet of the furnace will decrease by 33.87%. The simulation results obtained by using the LES model are more precise than those obtained by using the realizable $k-\varepsilon$ model. **Key words:** tangentially-fired boiler, reburning modification, excess air ratio, NO_x , numerical simulation

基于信息融合技术的风煤比优化控制研究 = **Study of the Optimized Control of Air/coal Ratio Based on the**