

动静态转子分离器的试验研究

杨龙滨¹, 吴少华¹, 邱朋华¹, 高振森²

(1. 哈尔滨工业大学 燃烧工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2 黑龙江科技学院 洁净煤技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘 要: 研究动静态转子分离器性能的试验装置; 以煤粉为物料, 对分离器在不同风量、不同转子转速和不同给粉浓度的条件下进行了试验。通过对试验结果的整理分析, 减小风量、提高转速和降低给粉浓度可使出口煤粉变细, R_{90} 可以达到 5.43%, 此时综合分离效率为 52.46%。若调整这 3 个参数时会对分离效率和阻力产生利弊两方面的影响, 所以这两个指标的变化情况需要通过详细的分析比较和具体试验来确定。

关键词: 分离器; 气固流动; 试验研究
中图分类号: TK229.6 **文献标识码:** A

1 引言

再燃低 NO_x 燃烧技术又称为燃料分级或炉内还原技术, 它是降低 NO_x 排放的诸多炉内方法中最有效的措施之一。在日本、美国、欧洲再燃技术大量应用于新建电厂锅炉和已有电厂锅炉改造, 已在商业运行中取得良好的环境效益和经济效益。超细化煤粉再燃低 NO_x 技术符合我国以煤为主的能源结构^[1-3]。

煤粉燃烧锅炉上磨煤机配用的粗粉分离器是制粉系统中关键部件之一。分离器型式根据叶片在工作中的状态不同, 分为静态分离器、动态转子分离器和动静态转子分离器 3 类。

磨煤机上配用动静态转子分离器作为粗粉分离器, 出口煤粉细度可调, 煤粉均匀性好^[4], 从而可以用于制备超细化煤粉再燃系统中的再燃燃料—超细化煤粉。

在煤粉再燃过程中, 煤颗粒粒径越细小, 其升温速率也越高, 热分解发生得也越早, 释放出的挥发份也越多。在相同条件下, 较细的煤粉能够释放出更多的挥发份, 因此有较高的 NO 还原效率^[5]。同时, 有实验结果表明, 再燃燃料量占主燃料的 20% 左右时可以获得良好的再燃效果^[6]。为了获得足够的合格超细化煤粉, 对动静态转子分离器的分离性能有必要进行深入的了解。因此本文分析是在一套试验装置上研究了动静态转子分离器的分离特性和阻力特性随转速、风量和浓度的变化关系。

2 试验装置及方法

整个试验系统如图 1 所示, 为负压运行系统。

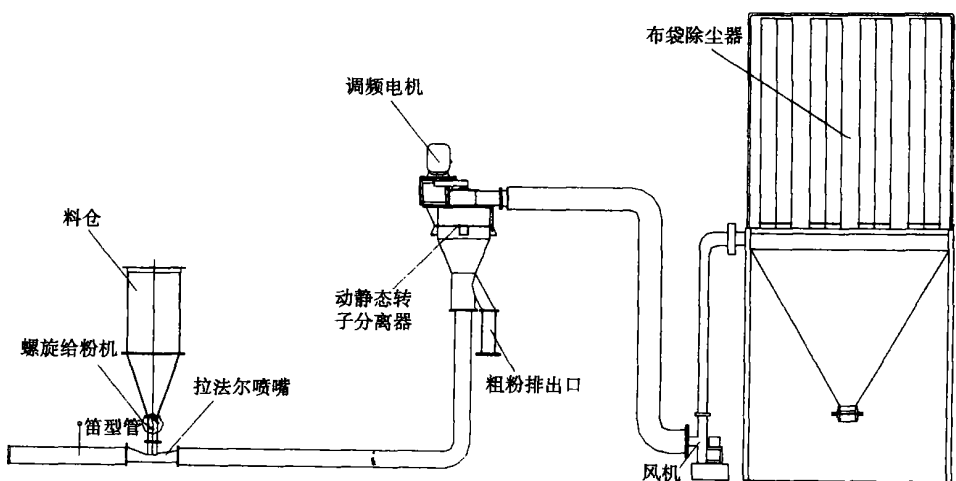


图 1 试验系统简图

收稿日期: 2005-04-14; 修订日期: 2005-07-20

基金项目: 国家“十五”“863”计划基金资助项目(2002AA 527051)

作者简介: 杨龙滨(1974-), 男, 黑龙江双城人, 哈尔滨工业大学博士研究生。

给粉装置前进风管道上的笛型管用于测量系统风量。物料从料仓中通过螺旋给粉机供给,在拉法尔喷嘴处与气流混合,被气流携带送往动静态转子分离器。两相气流从动静态转子分离器下部进入,到达分离区域后,首先经过沿周向均匀布置的 30 片静态叶片(叶片倾角为 45°),然后再经过沿周向均匀布置的 60 片动态叶片(叶片倾角为 0°),最后由分离器顶部离开。叶片布置可见图 2。分离出来的粗物料落到分离器内筒后通过粗粉排出口排出。经过分离的两相气流通过风机进入布袋除尘器,物料被布袋除尘器捕集,由布袋除尘器下部的排料口排出,空气则直接排向大气。

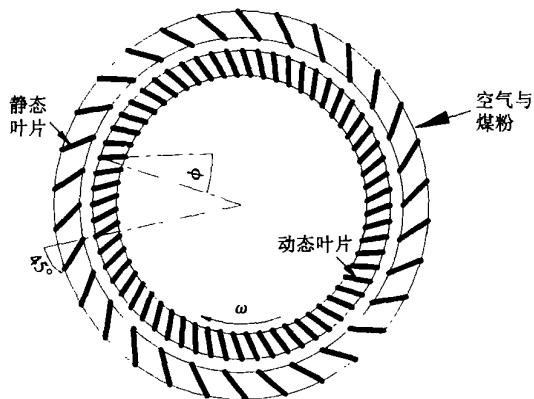


图 2 叶片布置示意图(ϕ —动态叶片倾角)

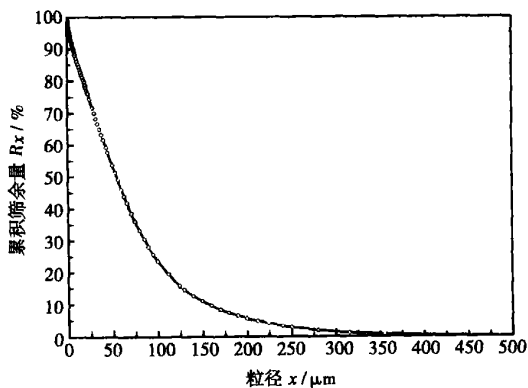


图 3 给粉粒度分布

为了使试验更接近于工业实际应用,直接使用煤粉进行试验,用法国生产的 CILAS 1064 型激光粒度分析仪对煤粉粒度进行测量,给粉粒度分布见图 3。用皮托管和 U 型差压计对分离器进出口压力进行测量,在测量处采用等截面积加权平均法,截面上取 4 个测量点⁷。试验进行了 3 个参数(系统风量、分离器转子转速和给粉浓度)的调整,共计 13 个工

况,工况编号及其对应的参数值见表 1,其中给粉浓度是煤粉与空气的质量比。

表 1 工况编号及参数值

	系统风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	转子转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	给粉浓度/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
工况 1	1 263	360	0.5
工况 2	1 263	540	0.5
工况 3	1 263	750	0.5
工况 4	1 314	360	0.5
工况 5	1 314	540	0.5
工况 6	1 314	750	0.5
工况 7	1 385	360	0.5
工况 8	1 385	540	0.5
工况 9	1 385	750	0.5
工况 10	1 263	360	0.32
工况 11	1 263	360	0.41
工况 12	1 314	540	0.32
工况 13	1 314	540	0.41

3 分离特性试验结果及分析

研究人员最关心的就是分离器的分离性能,下面分别从分离器出口煤粉细度和分离效率两个方面对动静态转子分离器的分离特性进行分析。

3.1 分离器出口煤粉细度的试验研究

出口煤粉细度采用 R_{90} 值来表示,图 4 和图 5 分别给出了不同风量、不同转速和不同给粉浓度下出口煤粉细度的情况。从图 4 中可以看出,转速增大时,出口煤粉细度急剧下降,在转速为 750 r/min 的时候, R_{90} 最小值可以达到 5.43% ;而随着风量增大,分离器出口煤粉则会变粗。经磨煤机碾磨后的煤粒随输粉气流进入分离器,在分离区中颗粒被分离的原理有二:一方面煤粉颗粒与旋转叶片发生碰撞,从而飞逸出分离区;另一方面,分离区中的颗粒受到气流曳引产生的向心力和叶片产生的离心力的作用,当离心力大于向心力时,颗粒飞逸出分离区,在涡流中旋力作用下,将粗颗粒从气粉流中分离出去。因此,分离器结构确定后,转速是影响煤粉细度的主要因素,通过调节转速来控制离心力的大小,从而控制分离器出口煤粉细度¹⁸⁻¹⁹。这说明了当转速增加或风量减小时出口煤粉细度下降的原因。同时从图 4 中还可以看到,风量的变化对出口煤粉细度的影响在不同转速时是不相同的。转速大于 540 r/min 后,风量增大到一定程度后对出口煤粉细度的影响减弱很多。

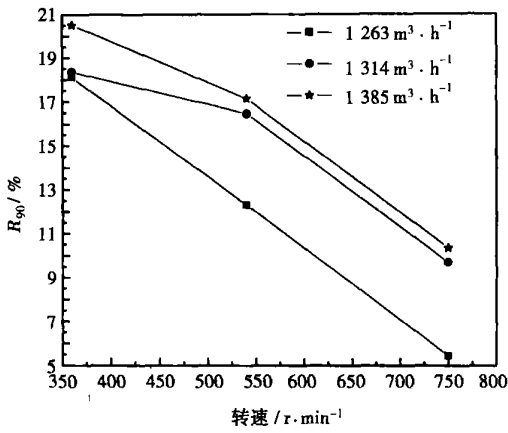


图 4 风量和转子转速变化对分离器出口煤粉细度的影响

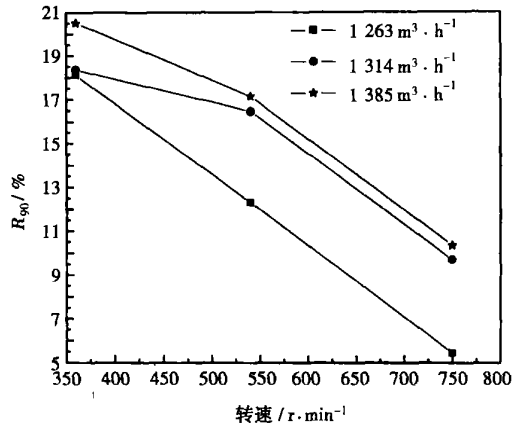


图 6 风量和转子转速变化对分离器综合分离效率的影响

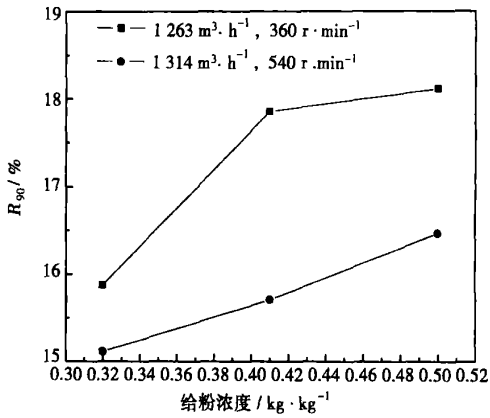


图 5 给粉浓度变化对分离器出口煤粉细度的影响

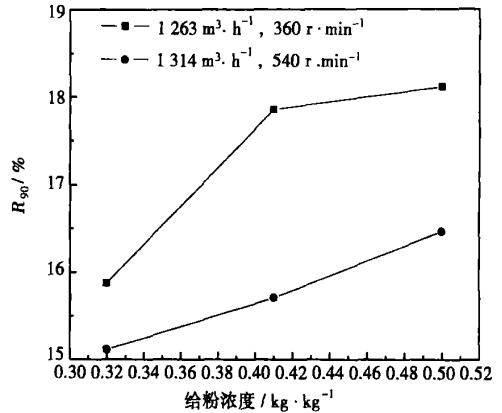


图 7 给粉浓度变化对分离器综合分离效率的影响

图 5 给出了不同给粉浓度下出口煤粉细度的变化。给粉浓度的增大导致 R_{90} 值增加, 表明浓度增大后颗粒之间相互作用的增强, 使粗颗粒更多地穿过了转子, 从而影响了分离的效果。同时也可看到, 在给粉浓度小于 0.41 kg/kg 时, 高风量、高转速条件下给粉浓度变化产生的影响小于低风量、低转速时的情况, 而给粉浓度在 $0.41 \sim 0.5 \text{ kg/kg}$ 时, 低风量、低转速的条件下给粉浓度变化产生的影响很小。

3.2 分离效率的试验研究

对于分离器的分离效率分别取如下 3 个定义^[10]:

粗粉分离效率 η_{cf} , 指分离器出口煤粉中大于 R_{90} 煤粉量与分离器入口煤粉中大于 R_{90} 煤粉量的百分比; 细粉分离效率 η_{xf} , 指分离器出口煤粉中小于 R_{90} 煤粉量与分离器的入口煤粉中小于 R_{90} 煤粉量的百分比; 上述两种分离效率均不能全面判定分离器

的分离效果, 由此有综合分离效率 $\eta = \eta_{xf} - \eta_{cf}$ 。对于分离器的分离效果, 必须对这 3 者进行综合分析来评估。

表 2 各工况下的粗粉分离效率 η_{cf} 和细粉分离效率 η_{xf}

	粗粉分离效率 $\eta_{cf}/\%$	细粉分离效率 $\eta_{xf}/\%$
工况 1	46.18	81.05
工况 2	24.94	69.03
工况 3	9.11	61.57
工况 4	45.81	79.11
工况 5	35.73	70.39
工况 6	17.36	62.81
工况 7	51.98	78.24
工况 8	38.11	71.55
工况 9	23.52	79.16
工况 10	43.56	89.56
工况 11	43.09	76.97
工况 12	30.91	67.40
工况 13	36.47	75.94

表2、图6和图7分别给出了各工况下3个分离效率的结果。

从图6和图7给出的试验结果可以看出,转子转速对综合分离效率的影响是成正比例关系的,即随着转速的增加综合分离效率也增加;风量对综合分离效率的影响却是根据转速的不同而有所不同;给粉浓度变化对综合分离效率的影响在不同的风量、转速下有着很大区别。综合分离效率的复杂变化是由于粗粉和细粉的分离效率随参数变化的规律不一样,而这是因为粗粉和细粉在分离时有着不同的表现。对于粗颗粒的分离,转子转速增加,有利的方面是颗粒受到的离心力增强同时叶片击打到颗粒的频率增加,其中击打频率的提高对分离粗颗粒起了很大的作用;而不利的方面是分离区的湍流程度加强,颗粒受到涡流裹挟而不能被分离出来的概率增加;风量的增加虽然对分离区流场旋转强度的增加有一定作用,但是它更强的表现是在对颗粒的曳引力加强和使分离区的湍流程度增强方面,所以对于粗颗粒的分离是非常不利的。由于煤粉粒径范围内($< 100 \mu\text{m}$)的颗粒的运动行为仍主要是由气流控制^[11],所以对于细颗粒,转子转速增加可以增强它的分离,但是又使它能被涡流裹挟的概率增大;而风量增加对细颗粒分离的作用也是双方面的,随着风量增加到一定程度则使细颗粒更难被分离出来。由此可说明了表2和图6中的各个效率随参数的变化情况。在工况9的条件下,细粉分离效率很高(79.16%)且粗粉分离效率较低(23.52%)的情况下得到的综合分离效率是最高的,为55.64%。

给粉浓度的增加导致颗粒间的相互作用增强,对颗粒既有阻滞的作用也有携带的作用,风量大转速高的时候携带作用就会相对大一些,但是当浓度增加到一定程度后阻滞产生的效果又会变强。所以从图7中可以看到,低风量、低转速时和大风量、高转速时浓度增加对效率的影响出现不同的变化。

4 阻力特性试验结果及分析

为了满足测量的要求,压力测点均设置在分离器进出口的垂直管段上^[7]。图8和图9分别给出了不同风量、不同转速和不同给粉浓度下分离器的阻力情况。引起旋转分离器内部阻力损失的最主要的因素是离心力场的作用产生的压差损失、转子与气粉流碰撞所产生的碰撞损失以及由于转子带动气粉流旋转形成漩涡流场损失^[12]。在图8中可以看到,

随着风量的加大,上述3种压差损失都在增加,使阻力快速增加,趋近于正比例线性增加的程度。而随着转速增加,漩涡流场损失增加了,但是由于通过转子的颗粒量减少,碰撞损失是下降的,所以阻力随转速增加而变化时出现了一个最低值。图9中给出当浓度增加时阻力是增加的,低风量、低转速时变化幅度更大一些,主要是由于浓度增加后颗粒间相互作用加强而导致阻力增大。由于这里的阻力除了分离器本体所产生的,还包括有弯头和管段变异等造成的其它损失,所以阻力值比较大。

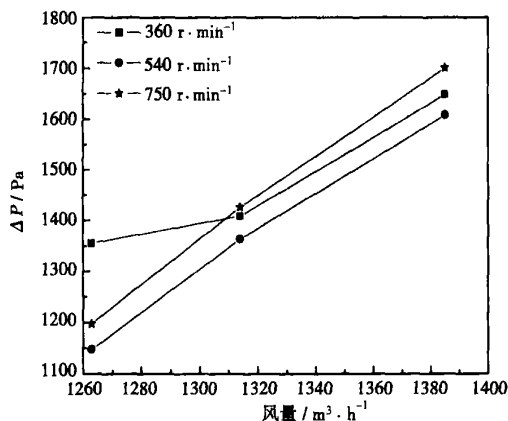


图8 风量和转子转速变化对分离器阻力的影响

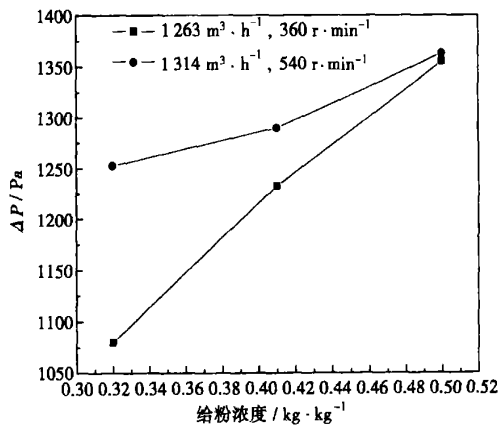


图9 给粉浓度变化对分离器阻力的影响

5 结 论

通过对动静态转子分离器在不同风量、不同转子转速和给粉浓度下的试验研究,了解了它的分离性能,得到以下几点结论:

(1)分离器转子的转速为 750 r/min 同时系统风

量为 $1\ 263\ \text{m}^3/\text{h}$ 时,分离器出口煤粉的 R_{90} 值达到最小 5.43% , 此时的综合分离效率为 52.46% , 阻力损失为 $1\ 197.5\ \text{Pa}$, 是本次试验中的最佳运行工况。

(2)通过增加分离器转子的转速、降低通过分离器的风量可以使分离器出口煤粉变细,而提高分离器入口煤粉浓度则使分离器出口煤粉变粗。

(3)综合分离效率随着转子转速增加而提高,而当风量增加或给粉浓度增加时却不是简单的提高或降低。实际上,要分别考察参数变化时分离器在粗粉和细粉两方面分离效率上的变化,综合分离效率是在这两方面分离效果变化的基础上得到的。试验中综合分离效率最大可以达到 55.64% 。

(4)分离器的阻力与风量和给粉浓度均成正比关系,但是在转子转速增加时,由于引起了阻力产生因素中粒子碰撞损失减小和漩涡损失增大两种变化,所以阻力损失随转速增加时存在着一个最低阻力的转速值,为 $540\ \text{r}/\text{min}$ 。

参考文献:

[1] 吴少华,刘辉,姜秀民,等.采用超细煤粉再燃技术降低氮氧化物排放[J].中国电力,2003,36(2):1-4.

- [2] SMOOT L D, HILL S C, XU H. NO_x control through reburning[J]. *Progress in Energy and Combustion Science* 1998, 24(5): 385-408.
- [3] 郑巧生.天然气再燃——一种低成本的 NO_x 控制技术[J].锅炉技术,1995(9):23-27,29.
- [4] 肖杰,董正岗,石江陵,等.静动叶结合型旋转式粗粉分离器在南京热电厂的应用[J].中国电力,2002,35(1):74-76.
- [5] 刘忠,阎维平,高正阳,等.超细煤粉的细度对再燃还原 NO 的影响[J].中国电机工程学报,2003,23(10):204-208.
- [6] 李戈,师东波,池作和,等.煤粉再燃还原 NO 的实验研究[J].电站系统工程,2004,20(1):44-46.
- [7] 岑可法.锅炉燃烧试验研究方法及测量技术[M].北京:水利电力出版社,1987.
- [8] 孔文俊,栾庆富,张晓梅,等.MPB磨静动叶片结合组合式旋转分离器性能的评价[J].电站系统工程,1995,11(4):56-59,26.
- [9] 孔文俊,程尚模,栾庆富.组合式旋转分离器的试验研究[J].动力工程,1996,16(6):50-54.
- [10] 夏金安.旋转气固多相流的数值模拟及回转煤粉分离器的实验与理论研究[D].武汉:华中理工大学,1993.
- [11] 范卫东,章明川,高继慧,等.百叶窗浓缩器内气固两相流DPDA试验研究[J].燃烧科学与技术,2001,7(3):214-218.
- [12] 娄新生,张明春,孔文俊,等.MPS磨煤机旋转分离器两相阻力特性的试验研究[J].热能动力工程,1996,11(3):143-146.

能源利用

燃烧高炉煤气的联合循环发电装置

据《Gas Turbine World》2005年5~6月号报道,安徽省马鞍山钢铁厂向日本三菱重工订购一套燃烧高炉煤气的燃气轮机联合循环发电装置。

马鞍山钢铁厂正开展扩建工程,并利用其新高炉的排气向燃气轮机供给燃料。新的发电装置计划于2007年4月投入运行。

150 MW的联合循环装置由1台M701S(M701DA)燃气轮机、1台小型汽轮机、1台余热锅炉和1台发电机组成。低热值高炉煤气燃料的发热值约为 $3\ 728\ \text{kJ}/\text{m}^3$ 。

燃气轮机和汽轮机将在三菱重工的高砂机械厂制造,三菱电力公司将建造发电机,余热锅炉将由马鞍山钢铁厂生产。

迄今为止,三菱重工许多套燃烧高炉煤气的联合循环系统,已在国内外钢铁厂应用,其中一些运行时间已超过100 000 h。

(吉桂明 供稿)

2.16 times of that of a bare tube. For the same tube type within the range of vacuum $P_i = 0.0686$ MPa and cooling water Re number $5 \times 10^3 - 4 \times 10^4$ the total heat transfer factor of a vertically installed tube BGT-1 is about 0.78 - 0.87 times of that of a horizontally installed tube. The results of the tests indicate that the layout scheme, steam condensation load and pressure are major influencing factors for maintaining a sustained dropwise condensation. **Key words:** corrugated tube, dropwise condensation, water working medium, copper-nickel alloy

动静态转子分离器的试验研究 = **Experimental Investigation of a Dynamic-static Rotor Separator** [刊, 汉] / YANG Long-bin, WU Shao-hua, QIU Peng-hua (Combustion Engineering Research Institution under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post code: 150001), GAO Zhen-sen (Research Center of Clean Coal Technology under the Heilongjiang Institute of Science & Technology, Harbin, China, Post Code: 150027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 591 ~ 595

Presented is a test rig for studying the performance of a dynamic-static rotor separator. With pulverized coal serving as a raw material the separator was tested under a variety of conditions, including different airflow rates, different rotating speeds and different concentrations of pulverized coal being fed. After processing and analyzing the test results it has been found that a decrease in airflow rate, an increase in rotating speed and a lowering of pulverized coal concentration can result in a more finely pulverized coal at the outlet with R_{90} attaining 5.43% and a comprehensive separation efficiency in that case being assessed at 52.46%. However, the adjustment of the above-cited three parameters will engender both favorable and undesirable consequences in respect of separation efficiency and resistance. In view of this, the variation of the latter two items should be closely watched and determined through detailed analyses and specific tests. **Key words:** separator, gas-solid flow, experimental study

超细化煤粉的投入量对再燃效果影响的实验研究 = **Experimental Study of the Influence of Ultra-fine Pulverized-coal Feeding Rate on Reburning Effectiveness** [刊, 汉] / BAI Xu-dong, WANG Yang (China National Research Center of Power Plant Combustion Engineering and Technology, Shenyang, China, Post Code: 110034), ZHAO Yan-jun (Beijing Guohua Electric Power Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100025), GAO Dian-cheng (Yuanbaoshan Power Plant, Chifeng, Inner Mongolia, China, Post Code: 024070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 596 ~ 598

Owing to the formidable and arduous task of restricting NO_x emissions from coal-fired power plants currently operating in China it is extremely urgent to develop low NO_x emission technologies suitable for China-specific conditions. The reburning of ultra-fine pulverized coal represents a low NO_x emission technology for coal-fired boilers. Through an experimental investigation conducted on a hot-state combustion test facility clarified and expounded was the influence of the feeding rate of ultra-fine pulverized coal on boiler NO_x emissions, slag formation conditions and mechanical incomplete combustion losses. From the tests it has been found that after feeding pulverized coal for reburning there was little change in the location of the furnace flame center and the removal rate of NO_x can be in excess of 50%. Meanwhile, slag-formation conditions have somewhat improved along with an increase in mechanical incomplete combustion losses. **Key words:** hot-state combustion test facility, reburning, extra-fine pulverized coal feeding rate, NO_x, slag formation