

超细煤粉还原 NO_x 的试验研究

金 晶, 李瑞阳, 张忠孝

(上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 超细煤粉再燃技术脱氮效率高而运行费用低, 易于实现。通过试验方法, 研究了超细煤粉再燃技术中主要因素对 NO_x 还原率的影响。研究表明: 再燃燃料粒度越细, 对 NO_x 的还原性越强, 最佳再燃燃料平均粒径为 20 μm; 最佳再燃燃料的比例, 对于龙口褐煤为 20%, 对于神府烟煤为 25%; 再燃燃料喷射位置存在最佳值, 一般煤阶越高, 距主燃料喷口距离越远; 最佳再燃区内的停留时间, 龙口褐煤为 0.63 s, 神府烟煤为 0.75 s。

关 键 词: 超细煤粉; 再燃; 氮氧化物; 还原率

中图分类号: TK16 文献标识码: A

1 引 言

随着全球环境污染问题的日益加重, NO_x 的排放控制问题已引起世界各国的普遍关注。在各种降低 NO_x 排放的技术中, 燃料再燃技术是最为行之有效的方法之一。Smart J. P.、Kichener A. 等人的研究表明^[1~4], 用煤粉作为再燃燃料, 不但对 NO_x 还原效果非常明显, 而且不需要其它燃料, 运行费用低, 这对在大量煤粉炉上使用再燃技术提供了十分有利的条件。但运行实践表明该技术尚存在燃烧不充分, 未完全燃烧损失增大等问题, 使这一技术的推广和应用受到一定的限制。以超细煤粉作为再燃燃料, 由于煤粉的细化使燃料的着火提前, 挥发分析出加快, 燃尽率提高, 无疑为煤粉再燃技术开辟了更加广阔的应用前景。

对于超细煤粉, 现在燃烧工程上还没有严格的定义, 通常将较常规煤粉更细的煤粉称为超细煤粉。

2 试验系统、煤样及工况

试验研究是在一维热态煤粉炉上进行的, 其主要技术参数为: 炉膛内径 200 mm, 高 2 520 mm, 炉膛

额定温度 1 200 °C, 试验煤种见表 1, 煤粉粒度见表 2。标准试验工况为: 炉膛温度 1 200 °C, 主燃区过量空气系数 1.15, 再燃区过量空气系数 0.84, 再燃燃料由氮气输送, 平均粒度 60.8 μm 的神府烟煤为主燃料, 再燃燃料分别采用平均粒度为 16.8 μm 的神府烟煤和 14.8 μm 的龙口褐煤, 再燃燃料质量分数为 20%, 总给粉量 1 kg/h。

表 1 煤样的工业分析

煤种	工业分析/ %			
	Mad	Aad	Vad	FCad
龙口褐煤	8.40	22.10	39.70	29.80
神府烟煤	1.76	30.11	23.06	45.07
新泰贫煤	0.50	23.90	12.80	62.80

表 2 煤粉粒度表

煤种	平均粒径/ μm				
	3.9	14.8	28.7	48.9	57.6
龙口褐煤	3.9	14.8	28.7	48.9	57.6
神府烟煤	4.2	16.8	29.3	49.0	60.8

3 超细煤粉再燃还原 NO_x 的试验结果与分析

3.1 再燃燃料粒度的影响

分别以神府烟煤和龙口褐煤作为再燃燃料, 在保证其它条件与标准试验工况相同的情况下, 研究再燃燃料粒径对 NO_x 还原效果的影响。

从图 1(a)、(b)中可以看出, 使用超细煤粉作为再燃燃料, NO_x 排放量明显降低, 还原率有所提高。随着再燃燃料粒度的减小, 挥发分析出与燃烧的速率提高, 挥发分的快速析出使得原来的燃烧化学反应平衡受到破坏, 平衡向着有利于析出更多挥发分的方向移动, 这就意味着燃料中会有更多的 CH 基团和含氮组分随着挥发分的析出而产生。在再燃区的贫氧条件下, 这些基团和 NO_x 发生还原反应, 使

收稿日期: 2004-07-05; 修订日期: 2004-09-06

基金项目: 上海市教委发展基金资助项目(02GK08)

作者简介: 金 晶(1963-), 女, 山东济南人, 上海理工大学副教授, 博士研究生。

NO_x 排放量降低,还原率升高。

再燃燃料粒度变小后,煤的比表面积显著增加^[3],异相还原反应速度大大提高,使得超细煤粉比常规粒度的煤粉具有更高的反应活性,从而对 NO_x 具有更好的还原效果。

Tums 提出,焦炭颗粒的燃尽时间与燃料粒径的平方成正比^[4]。所以在一定的炉内停留时间内,采用超细煤粉作为再燃燃料,较常规粒度煤粉再燃的燃烧效率有明显提高。运行实践表明:与没有再燃的煤粉燃烧相比,以平均粒径为 $44\ \mu\text{m}$ 的超细煤粉作为再燃燃料,燃烧效率几乎没有降低,飞灰含碳量没有明显增加^[3]。

试验结果表明:当再燃燃料粒径小于 $20\ \mu\text{m}$ 后,随着煤粉粒径的进一步减小, NO_x 还原率的升高趋于平缓。综合考虑超细煤粉的还原性,燃尽率以及加工的经济性等因素的影响,认为选用平均粒径为 $20\ \mu\text{m}$ 的再燃燃料最佳。

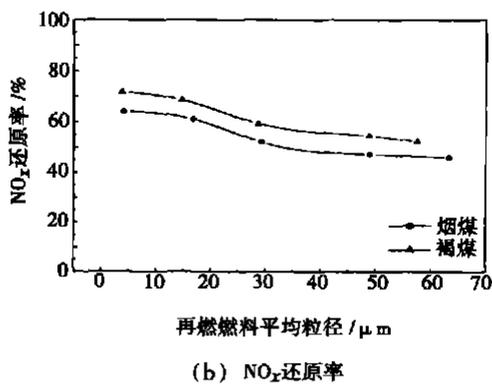
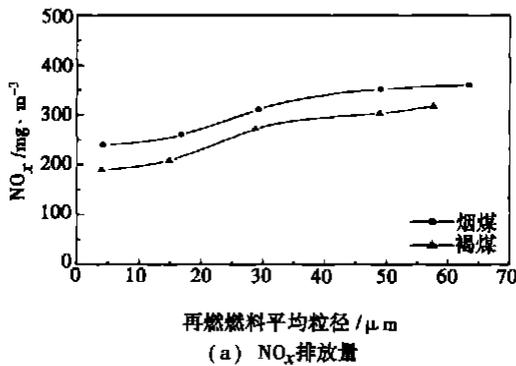


图1 不同再燃燃料粒度对 NO_x 排放量和还原率的影响

3.2 再燃燃料比例的影响

再燃燃料占总燃料量的质量分数在煤粉再燃过程中也是一个十分重要的影响因素。为保证再燃区

内对 NO_x 的还原效果,需送入足够数量的再燃燃料,以使再燃区内具有还原 NO_x 所需的烃根浓度。

图2中的结果表明,随着再燃燃料比例的增加,各工况均呈现 NO_x 排放量降低和脱氮率增加的趋势。当龙口褐煤作为再燃燃料时,再燃燃料比例大于20%后, NO_x 排放量和还原率的变化都趋于平缓;当神府烟煤作为再燃燃料时,再燃燃料比例大于25%后, NO_x 排放量和还原率的变化才趋于平缓。这主要是因为褐煤与烟煤中的挥发分含量不同而造成的。在再燃区的还原性气氛中最有利于 NO_x 还原的成分是 C_nH_m ,由于高挥发分的二次燃料热解时会产生较多的烃根,故对 NO_x 具有更好的还原效果^[9]。

当再燃燃料量增加时,导致再燃区内随挥发分释放的 CH 基团和含 N 组分增加,所以 NO_x 排放量降低。但当再燃燃料量达到一定值后,对 NO_x 的还原已接近最大值,继续增加还原 NO_x 基团,作用已不明显。

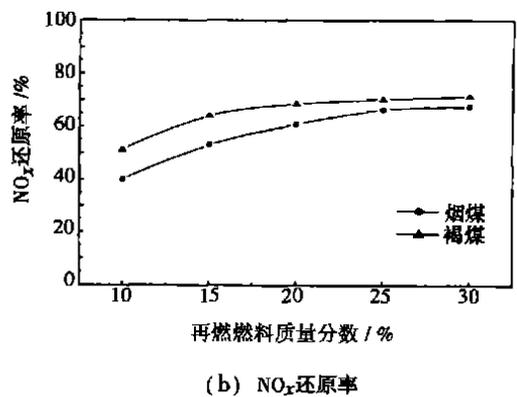
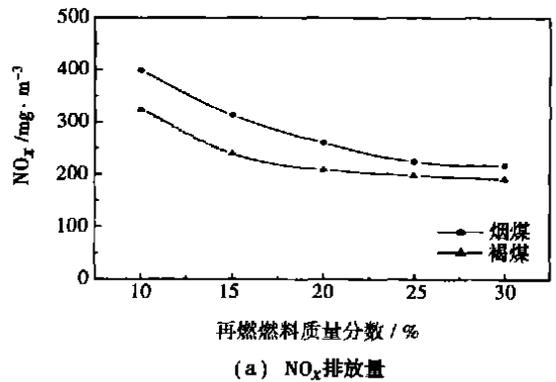


图2 不同再燃燃料比例对 NO_x 排放量及还原率的影响

3.3 再燃燃料投射位置的影响

分别选常规粒度的神府烟煤和新泰贫煤作为主

燃料,以 14.8 μm 的褐煤作为再燃燃料,在保证其它试验条件与标准试验工况相同的情况下,通过改变主燃区的长度,来确定最佳再燃燃料喷射位置。图 3 表明:再燃燃料喷射位置存在一个最佳值,在燃烧条件一定时,这一数值主要与一次燃料的种类有关。本试验中烟煤、贫煤的最佳再燃燃料喷射位置分别在距主燃料喷口 0.9 m 和 1.0 m 处。

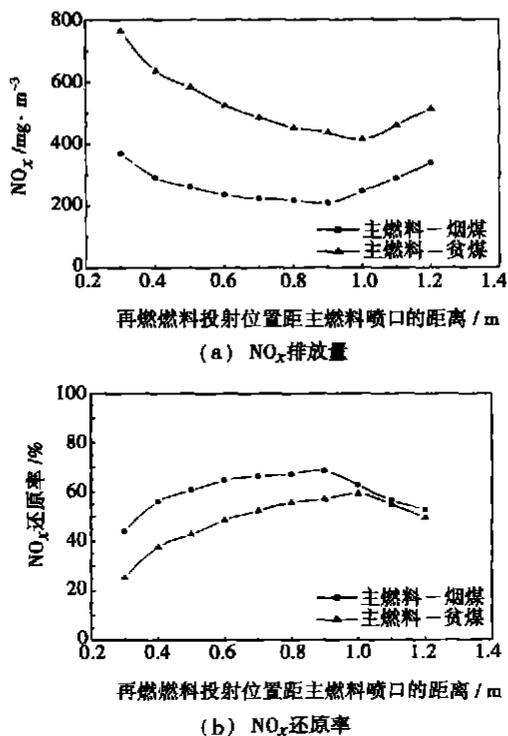


图 3 再燃燃料喷射位置对 NO_x 排放量及还原率的影响

如果再燃燃料喷口离主燃料喷口太近,会造成主燃料燃烧不充分,主燃区较多的剩余氧量进入再燃区,削弱了再燃区的还原性气氛,致使 NO_x 被还原效果减弱;但当再燃燃料喷口离主燃料喷口太远时,再燃燃料远离炉膛局部高温区,一方面较低的温度不利于 NO_x 的还原反应,另一方面由于烟气在氧化性气氛中的停留时间增加,使 NO_x 的生成量增加。一般受炉膛尺寸的限制,主燃区越长,再燃区或燃尽区就会越短,从而影响再燃效果或再燃燃料的燃尽率,这也是不可取的。所以,在保证主燃区燃料基本燃尽的前提下,应尽量缩短主燃区长度,使再燃燃料在较高的温度环境投入。

3.4 再燃区停留时间的影响

理论上,再燃区停留时间越长,则还原反应越充

分,降低 NO_x 的效果就越明显。但由于受到炉膛尺寸和燃尽要求的制约,一般再燃区的停留时间也不能过长。从图 4 中可看出:提高再燃区停留时间有利于降低 NO_x 的排放。但随着停留时间的增加,其影响趋势趋于平缓。由图 4 (b) 可以发现,褐煤作为再燃燃料时,当再燃区停留时间为 0.5 s 时,NO_x 的还原率就已达到 60% 以上。当停留时间大于 0.63 s 后,NO_x 还原率的变化趋势已变平缓。以神府烟煤作为再燃燃料时,当再燃区停留时间大于 0.75 s 后,NO_x 的还原率便不会明显提高。

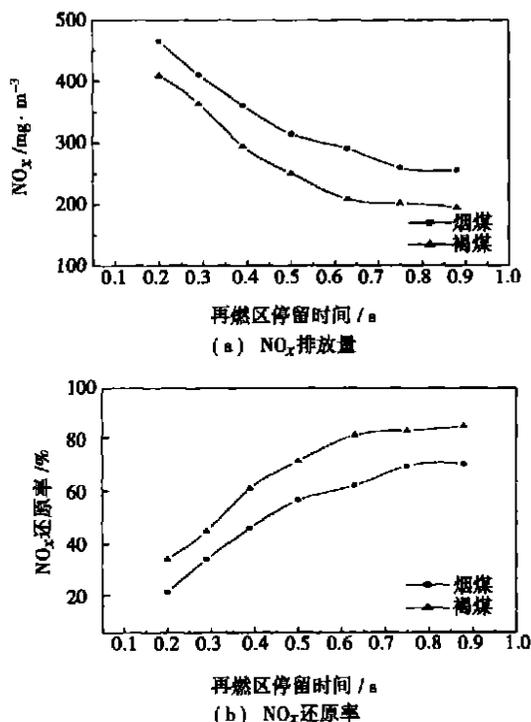


图 4 再燃区停留时间对 NO_x 排放量及还原率的影响

由于再燃区位于再燃燃料喷口和燃尽风喷口之间,因此再燃区停留时间实际上由再燃燃料喷口和燃尽风喷口的位置所确定。另外再燃燃料喷口的位置还影响主燃区的停留时间。在炉膛尺寸一定时,为了保证一定的 NO_x 还原效果和较高的燃料燃尽率,不能一味地追求过长的再燃区停留时间。

4 结 论

(1) 再燃燃料粒度越小,对 NO_x 的还原性越强,采用超细煤粉作为再燃燃料,可以明显降低 NO_x 的排放,NO_x 的还原率最高可达 70% 左右,最佳再燃燃料粒度为 20 μm 。

(2) 随着再燃燃料比例的增加, NO_x 排放量呈现降低的趋势, 最佳再燃燃料的比例, 对于龙口褐煤为 20%, 对于神府烟煤为 25%。

(3) 再燃燃料投射位置存在一个最佳值, 这一数值主要与主燃料种类有关, 一般煤阶越高, 距主燃料喷口距离越远。

(4) 提高再燃区停留时间有利于降低 NO_x 的排放, 但停留时间不易过长, 最佳再燃区内的停留时间, 龙口褐煤为 0.63 s, 神府烟煤为 0.75 s。

参考文献:

[1] SMART J P, MORGEN D J. The effectiveness of multi-fuel reburning

in an internally fuel-staged burner for NO_x reduction [J]. **Fuel**, 1994, 73(9): 1437-1442

[2] KICHENER A, SPLIECHOFF H. The effect of different reburning fuels on NO_x reduction [J]. **Fuel**, 1994, 73(9): 1443-1446.

[3] 姜秀民, 李巨斌, 邱健荣. 超细化煤粉燃烧特性的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 71-74.

[4] TURNS S R. An introduction to combustion [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1996.

[5] NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY. Micronized coal reburning demonstration for NO_x control: A DOE Assessment [R]. PA 15236-0940, Washington, US Department of Energy, 2001.

[6] 岑可法, 姚 强, 骆仲决, 等. 高等燃烧学 [M]. 杭州, 浙江大学出版社, 2000.

高温有机载热体燃煤加热炉

高温有机载热体加热炉又称导热油炉, 该炉是石油、化工、纺织、印染、轻工等工业等常用的能量转换设备, 具有其他工业锅炉所不能比拟的工艺特点。其最大特点是“低压高温”且不发生相变。这种加热炉早已被国外一些国家所利用, 尤其是美、俄、日、英、法等国。在 40 年前就形成自己的系列产品被广泛应用。国外这种加热炉的加热方法均为燃气或燃油。采用这种燃料, 在我国大城市以外的部分地区不能满足要求, 所以开发高温有机载热体燃煤加热炉在我国有广阔的发展前景。

(1) 燃煤立式手烧圆盘管型

该炉型的炉体由加热盘管和壳体组成。上煤除渣均采用手工操作, 烟囱采用钢制烟囱, 进行内部消烟除尘(内部设置两 幅辐射拱), 排烟余热可考虑回收(利用水套夹层)、其预热水可作为油-水交换器的进水, 这种炉子的容量一般较小。

另外, 也可采用链条炉排, 增加前后辐射拱, 增加送、引风机和除尘器, 上煤和除渣采用机械化方式, 这样, 这类炉子的容量可以做得大一些。

(2) 燃煤卧式有机载热体炉

这种炉结构类似于强制循环热水炉, 只不过是把水换成导热油。这种炉子有一点要特别注意, 热力不均和流量不均和结构不均引起的热偏差问题比水循环要严重, 因此在设计时, 结构要合理, 集箱直径足够; 循环流速计算要精确, 要调整好燃烧工况, 防止火焰偏斜, 以保证锅炉运行的安全性和经济性。

(3) 高温有机载热体加热炉的特点:

①适用范围广: 这种炉除制造成燃煤型式外也可做成燃油燃气型, 另外导热油的范围也很广。

②低压高温不发生相变, 大大降低了用热设备的压力等级。

③采用闭路循环, 热损失少。

④结构简单、操作方便、安全可靠、投资和占地面积小, 尤其单机对工作温度有特殊要求时利用它更为优越。

⑤节能效果显著。

(王军良 供稿)

coal-based chemical industries, energy comprehensive utilization systems and near-zero pollutant emission systems. Pressurized oxygen-blown gasification fed with dry pulverized coal represents a main direction of development for coal gasification technology. The authors briefly describe a test system of pressurized coal gasification fed with dry pulverized coal, which has been set up in a Thermal Engineering Research Institute. The study and test results of the above system are given. With the clarification of the law of pressurized coal gasification fed with dry pulverized coal the tests have attained the anticipated aim. In addition, the operational stability of the test system under high pressures have also been verified.

Key words: coal gasification, entrained flow, dry feed of pulverized coal

超细煤粉还原 NO_x 的试验研究 = **Experimental Investigation of Super Fine Pulverized-coal Reburning Technology for Reducing NO_x emissions** [刊, 汉] / JIN Jing, LI Rui-yang, ZHANG Zhong-xiao (College of Power Engineering under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 582 ~ 585.

Ultra-fine pulverized coal reburning technology features high-efficiency NO_x reduction, low operating costs and ease of implementation. Through tests the authors have studied the key factors in this reburning technology, which exercise a major influence on NO_x reduction. The results of this study indicate that the finer the reburned fuel particles, the higher the NO_x reduction efficiency. The optimum average particle diameter of the reburned fuel is 20 μm . The optimum ratio of reburned fuel is 20% for lignite of Longkou and 25% for bituminous coal of Shenfu. There exists an optimum injection location for the reburned fuel. In general, the higher the coal rank, the further is the distance from a main fuel nozzle. The residence time of fuel in the optimum reburning zone is 0.63 s for lignite of Longkou and 0.75 s for bituminous coal of Shenfu. **Key words:** super fine pulverized coal, reburning, NO_x , reduction efficiency

一种基于差压波动图的段塞流识别方法 = **Slug flow Identification Method Based on a Differential-pressure Fluctuation Diagram** [刊, 汉] / LIANG Fa-chun, WANG Dong, LIN Zong-hu (National Key Laboratory on Multi-phase Flows in Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 586 ~ 588.

Extensive air-water two-phase flow tests were conducted on a large-sized horizontal test loop of multi-phase flows made of steel pipe of 80 mm inner diameter. The differential-pressure fluctuation signals of stratified, slug and annular flow patterns collected in a certain length of time were displayed as two-dimensional images. Through an analysis of 30 groups of differential-pressure fluctuation data it has been found that the ratio between signal zone area and background zone area has an average value of 0.026 for the slug flow, 0.53 for the stratified flow and 0.35 for the annular flow. The ratio between slug-flow signal zone and the total image area is considerably smaller than that of the other flow patterns. Consequently, this ratio can be taken as a characteristic parameter for slug-flow identification. The method under discussion can be effectively employed for the rapid and automatic detection of slug flow patterns. **Key words:** slug flow, flow pattern identification, differential-pressure fluctuation, image

薄液膜二维表面驻波的流动稳定性研究 = **Flow Stability Investigation of Two-dimensional Surface Stationary Waves on a Thin Liquid Film** [刊, 汉] / YE Xue-min, LI Chun-xi, YAN Wei-ping (Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 589 ~ 592.

The flow stability of stationary waves, a kind of surface wave on a thin-liquid film, is subject to the influence of thermal non-equilibrium effect at a vapor-liquid interface. On the basis of boundary layer theory and thermal non-equilibrium effect derived is a spatial stability equation of the two-dimensional surface stationary waves universally applicable on evaporating, isothermal or condensing liquid films draining down along an inclined wall. From a theoretical viewpoint an in-