

# 循环流化床煤燃烧 过程中 $N_2O/NO_x$ 的排放研究

卢建欣 刘皓 冯波 林志杰 刘德昌  
(华中理工大学)

[摘要] 在一个循环流化床热态试验台上,研究了煤燃烧过程中氮氧化物( $NO_x$  和  $N_2O$ )的生成过程,测试了其沿床层高度方向的浓度变化。试验发现,沿炉膛向上, $N_2O$  浓度不断增加而  $NO_x$  迅速减少,在炉膛出口处  $N_2O$  达到最大值,且排放量远大于 BFB。作者对其原因进行了分析,同时研究了运行参数对  $N_2O$  及  $NO_x$  排放的影响。

关键词 循环流化床 煤燃烧 氮氧化物  
分类号 TQ53

## 1 前言

流化床煤燃烧过程中产生的氮氧化物主要来源于煤中氮。这包括以 HCN 和  $NH_3$  形式随挥发分析出,通过均相反应生成的  $N_2O$  和  $NO_x$  和以焦炭氮形式通过多相反应生成的  $N_2O$  和  $NO_x$ 。但是对于两者所起作用大小,目前尚未形成定论。Hulgaard<sup>[2]</sup> 等认为  $N_2O$  主要是由挥发分形成,而 Tullin<sup>[3]</sup> 等通过试验发现焦炭燃烧对其有重要作用。本工作目的之一是通过循环流化床中煤燃烧过程的研究,找到挥发分和焦炭对  $N_2O$  和  $NO_x$  所起的作用;目的之二是通过测试 CFB 和 BFB 炉内各种气体和固体浓度变化,研究两者运行过程中  $N_2O/NO_x$  排放差异,并从中找到引起这种差异的原因。

## 2 试验研究

实验的主要工作是在一个半工业性热态循环流化床试验台上进行的,其结构如图1所示。床层截面为  $250 \times 250$  mm,高 6.0 m。

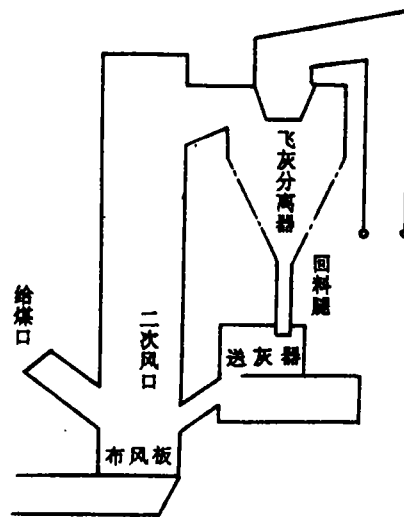


图1 实验室规模循环流化床简图

沿炉膛高度方向上,布置了五个测点,高度依次为:1.3 m,2.2 m,3.8 m,4.5 m,5.6 m,同时测量 CO、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub> 等多种气体的浓度。燃用煤种为一种烟煤,粒径为 0—8 mm。其煤质性能列于表 1。

表 1 煤质特性

挥发分	固定炭	水分	灰分	H	O	N	S	C
20.81	41.64	3.35	34.12	5.83	29.4	1.11	0.71	62.95

2.1 试验过程

2.1.1 以鼓泡床方式运行,沿床高测量气体和固体浓度。

2.1.2 以循环流化床的方式运行,并分别改变:

- (1) 床温
  - (2) 过剩氧量
  - (3) 二次风口位置
  - (4) 循环倍率
- 测量沿床层高度的气体及固体颗粒之浓度

3 结果与讨论

3.1 N<sub>2</sub>O/NO<sub>x</sub> 炉内分布特性

图 2 为床温 920℃,以循环床方式运行时沿炉膛高度方向各气体浓度变化情况。由图可知,沿炉膛向上,N<sub>2</sub>O 浓度逐渐升高,NO<sub>x</sub> 浓度迅速降低。

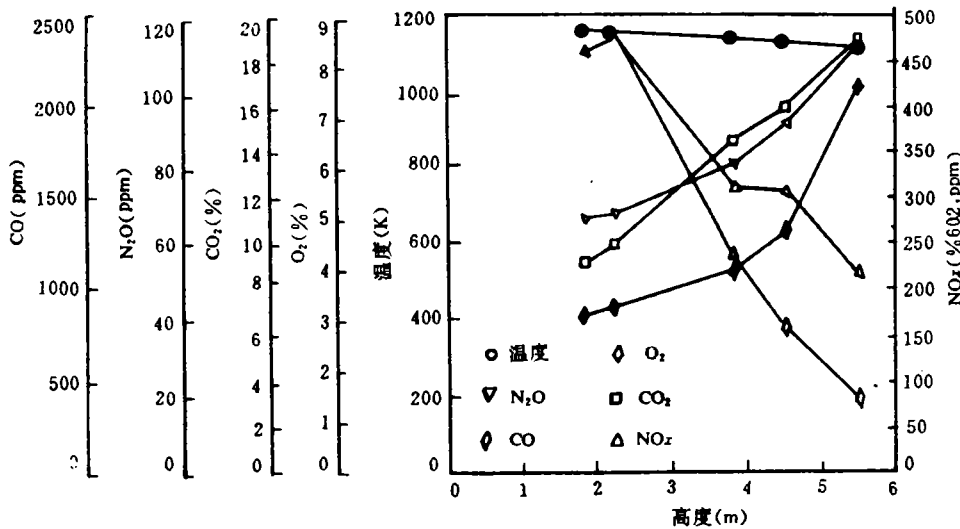


图 2 CFB 炉内沿炉膛高度各种气体浓度分布

图 3 为在相同工况下,分别以鼓泡床和循环床方式运行时沿炉膛高度方向上 N<sub>2</sub>O/NO<sub>x</sub> 分布情况。可以看出,两床内 N<sub>2</sub>O 和 NO<sub>x</sub> 分布差别较大,在某些区段,其变化甚至呈相反趋势。

因为流化床中氮氧化物主要是煤中 N 燃烧形成,所以要弄清其中的原因,必须对炉内煤的燃烧情况进行分析。在鼓泡床内,燃烧

主要发生在沸腾床层,只有很少的细颗粒才到炉膛上部燃烧,而对循环床,其较大的流化速度使炉膛上部焦炭浓度相当大,同时结构上具有较高炉膛高度可使煤粒有足够空间燃烧,因此循环流化床内燃烧不只局限于下部,而是在整个炉膛内。由图 1 知,沿炉膛向上,O<sub>2</sub> 浓度不断减小,CO<sub>2</sub> 和 CO 浓度急剧增大,这说明循环床炉膛上部燃烧仍很强烈,远大

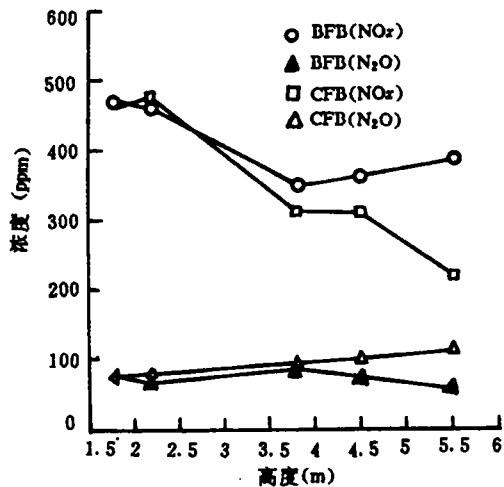


图 3 鼓泡床和循环床内氮氧化物排放比较

于鼓泡床。因为上部燃烧的主要是焦炭,所以,我们认为:循环流化床内沿床高方向,N<sub>2</sub>O 不断增加是由于焦炭燃烧而生成 N<sub>2</sub>O 在起作用。这也正是其炉膛出口排放量远大于鼓泡床的原因所在。

表 2 为测点 1 处等速取样所得炉内煤粒的分析结果,可以看出,其挥发分很低,而焦炭含量相当大。这意味着在循环床下部,燃烧的主要是挥发分,此处所测 N<sub>2</sub>O 是由挥发分中含 N 物形成。同时,因煤粒中仍含有相当多的焦炭和 N,炉膛上部 N<sub>2</sub>O 应是焦炭 N 燃烧形成的

表 2 取样焦炭颗粒分析

挥发分	固定碳	灰分	水分	N
3.15	37.8	56.63	2.62	0.78

为了弄清焦炭燃烧过程中氮氧化物的生成情况,在一个小型流床试验台上进行了焦炭燃烧实验,实验在典型流化床状态下进行,燃用焦炭是上述煤在 900℃ 时隔绝空气加热 15 分钟而制得。其分析结果见表 3。

表 3 焦炭特性

挥发分	固定碳	灰分	水分	C	H	O	N	S
1.86	52.72	42.55	2.87	59.24	0.95	33.94	1.14	0.85

试验发现,该焦炭燃烧能形成较多 N<sub>2</sub>O 和 NO<sub>x</sub>。温度为 850℃ 时,所测 N<sub>2</sub>O 近 100 ppm。图 4 为氮氧化物转化率与温度的关系,850℃ 时,N<sub>2</sub>O 和 NO<sub>x</sub> 的转化率分别为 10.8% 与 31.5%,随着燃烧温度降低,总的转化率有所下降,但 N<sub>2</sub>O 转化率相对升高,这和 Tullin<sup>[2]</sup> 所得结论相同,说明焦炭燃烧可以产生相当数量的 N<sub>2</sub>O。

对于循环流化床煤燃烧过程中产生较多 N<sub>2</sub>O, Mochizuki<sup>[4]</sup> 等认为这是由 NO 在焦炭表面还原生成的。蔡学军<sup>[5]</sup> 在一个小型固定床反应器上,进行了 NO 在多种焦炭作用下的还原反应实验,他们发现,尽管反应器出口 NO 浓度均有一定程度降低,但所测得 N<sub>2</sub>O 却微乎其微(小于 5 ppm)。为了避免不同焦炭可能造成的不同影响,我们用上述烟煤在多种条件下制取了多种焦炭进行实验,结果所

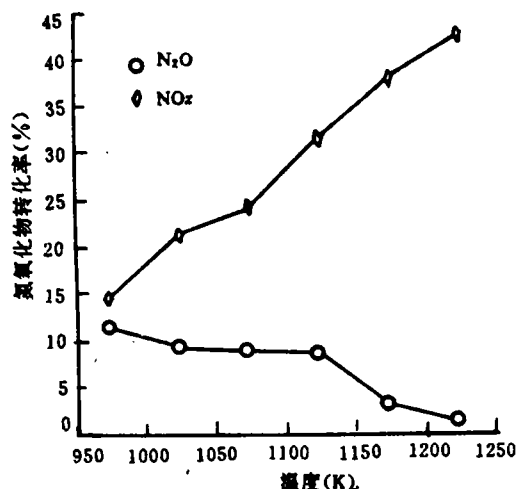


图 4 燃烧温度对焦炭氮氧化物转化率的影

测得  $N_2O$  同样非常少,最多只有 6 ppm。与其燃烧所产生的 70 - 100 相比,几乎可以忽略。这说明:通过 NO 在焦炭表面还原而生成的  $N_2O$  不足以导致循环流化床煤燃烧过程中沿炉膛方向大幅度增加,造成这种情况的根本原因是焦炭的燃烧。即使按照 Mochizuki 所说,NO 在焦炭表面可还原生成较多  $N_2O$ ,但其试验条件要求氧化性气氛,而由图 2 可以看出,沿炉膛向上, $O_2$  浓度不断降低,CO 浓度迅速上升,CO/ $O_2$  比急剧增加。CO/ $O_2$  比的增加意味着还原性气氛加强和氧化性气氛削弱,而这是不利于 NO 转化成  $N_2O$  的,倒是更有助于生成  $N_2$ 。事实上,NO 在焦炭表面主要是被还原为  $N_2$ <sup>[6]</sup>。更何况,既然有  $O_2$  存在,不能保证所测到的  $N_2O$  不是直接由焦炭燃烧而形成。

由图 3 可知:在测点 1 以下,鼓泡床和循环床内产生的  $N_2O/NO_x$  浓度很接近,但这并不意味着炉膛下部,氮氧化物产生过程相同。恰恰相反,两者有很大区别。我们知道,鼓泡床内煤燃烧主要在下部进行,其下部煤粒浓度远较循环床大,这么高的浓度,如果燃烧完全(即使没有完全燃烧,较长的停留时间也使其比 CFB 内燃烧得更彻底),产生的  $N_2O$  应当比同高度 CFB 内高得多。但事实上,净的  $N_2O$  并不多。既然净的  $N_2O$  是生成与分解共同作用的结果,那么造成这种现象的原因是燃烧生成的  $N_2O$  被迅速分解了。这是因为在鼓泡床下部,具备了分解  $N_2O$  的良好条件:较高的床层温度和固体颗粒浓度(包括焦炭、灰分、床料)以及较长停留时间<sup>[7]</sup>。

### 3.2 各种运行参数对循环流化床 $N_2O/NO_x$ 排放的影响

#### 3.2.1 温度的影响

图 5 为循环流化床煤燃烧时随温度变化炉膛出口氮氧化物的排放情况。可以看出,随着床层温度的升高, $N_2O$  浓度逐渐减小, $NO_x$  浓度不断增加。这是由于高温下  $N_2O$  分解作

用加强。而对  $NO_x$ ,温度升高有利于热力及燃料  $NO - [X]$  的生成。

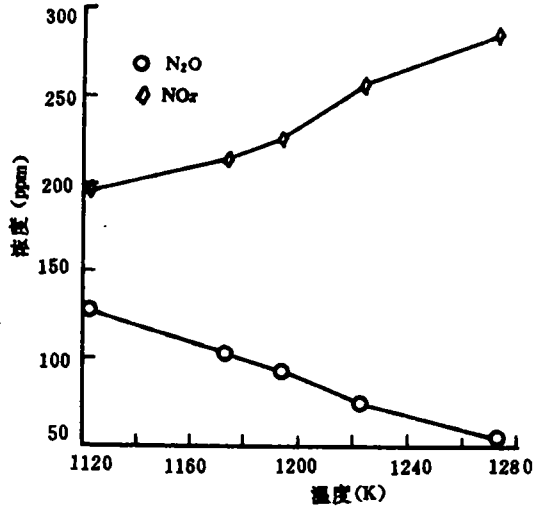


图 5 床温对  $N_2O$  和  $NO_x$  排放的影响

#### 3.2.2 过剩氧量的影响

图 6 所示过剩空气系数对  $N_2O$  和  $NO_x$  的影响。由图可知,随着氧量增大, $N_2O$  和  $NO_x$  有所增加,且  $NO_x$  增长速度超过  $N_2O$ 。这说明,通过减少过剩氧量的方法可以达到同时减少  $N_2O$  和  $NO_x$  的目的。

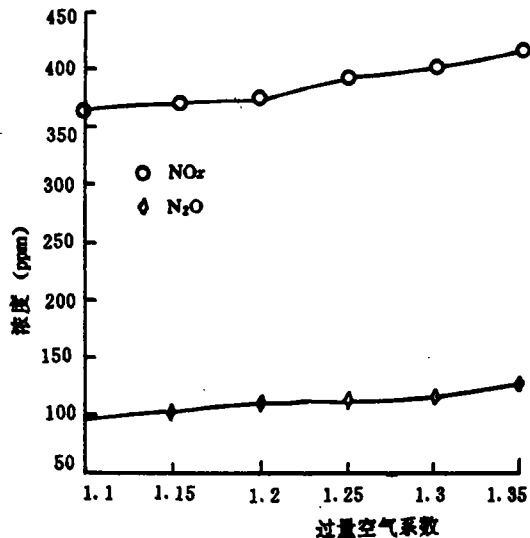


图 6 过剩氧量对氮氧化物排放的影响

氧量增加使挥发分和焦炭反应速度加快,焦炭氮析出过程提前,从而瞬时生成的  $N_2O/NO_x$  浓度增大。同时,氧量增大使氧化性气氛加强,还原性气氛减弱,CO 和上部剩余焦炭粒子浓度减少,因而  $NO_x/N_2O$  通过焦炭及 CO 还原的反应减弱,  $N_2O/NO_x$  的浓度增加,且  $NO_x$  的影响更为显著。

### 3.2.3 二次风投入的影响(分级燃烧的影响)

图7为二次风分别在1.4 m和2.4 m投入时  $N_2$  和  $NO_x$  变化情况。二次风投入点升高时,沿高度  $N_2O$  浓度增加变慢,出口值下降18 ppm,  $NO_x$  下降更快,达57 ppm。这是由于二次风投入点升高后,在投入点以下氧量较少,CO 浓度较高,通过焦炭氧化生成的NO 浓度减少而同时CO 和焦炭对NO 的还原作用又增加,因而NO 浓度大大降低。对于  $N_2O$ ,二次风口以下氧量变少,生成  $N_2O$  的反应受抑制,排放量也减少。

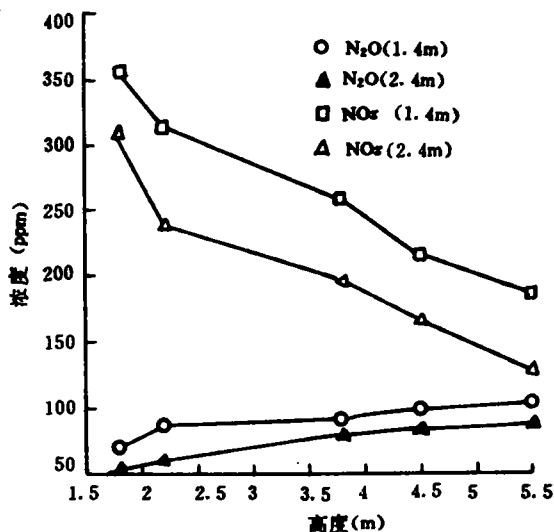


图7 二次风投入时对氮氧化物的影响

### 3.2.4 飞灰循环的影响

由图8可以看出,循环倍率增加时,  $N_2O$  的浓度略有上升,  $NO_x$  有所下降。但是,其变

化很微弱。所以飞灰循环不是导致循环流化床排放  $N_2O$  多的主要原因(至少在循环倍率变化不大的范围内如此)。尽管飞灰循环增大了炉内固体颗粒浓度,但这些灰粒对氮氧化物作用十分有限,既不能导致其大量生成,也不能导致大量分解<sup>[7]</sup>。

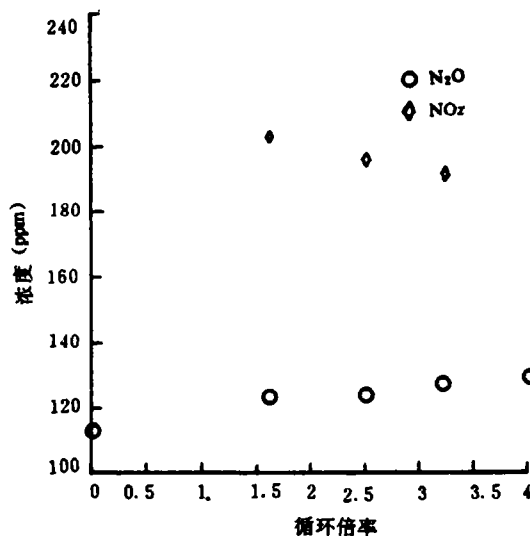


图8 循环倍率对氮氧化物的影响

## 4 结论

通过以上的可以得出如下结论:

- ① 循环流化床煤燃烧过程中产生较多  $N_2O$ , 是许多因素共同作用的结果, 但起决定性作用的是焦炭的燃烧。
- ② 循环流化床燃烧过程中, 沿床高向上,  $N_2O$  增加而  $NO_x$  减小。
- ③ 过剩氧量增加,  $N_2O$  和  $NO_x$  排放量均增大。
- ④ 温度升高,  $N_2O$  排放量减少而  $NO_x$  增加。
- ⑤ 二次风投入后,  $N_2O$  和  $NO_x$  均减少。
- ⑥ 在循环倍率变化不大的范围内, 其对  $N_2O$  和  $NO_x$  的排放没有显著影响, 本试验所

测得的 N<sub>2</sub>O 的浓度偏低,我们认为是由以下原因造成的:

第一,燃用煤的问题,该煤的含 N 量不高。

第二:燃用煤粒属宽筛分。(导致炉内温度、浓度分布差异)。

### 参 考 文 献

1 Young B C, Colingd M E and Mann N D. Pilot-scale studies on N<sub>2</sub>O emissions, coal properties, and condition in a circulating fluidized bed combustor. Proceedings of the 5th Intl. Workshop on N<sub>2</sub>O Emission, Tuskuba, 1992

2 Huigaard T, Dam-Johansen K (1993). Homogeneous nitrous oxide formation and destruction under combustion conditions. *AIChE Journal*, 1993, Vo. 139, pp1324-1354

3 Tullin C. L, Sarofim A. f, Beer J. M (1993). Formation of NO and N<sub>2</sub>O coal combustion. The Relative Importance of Volatile and Char Nitrogen, 12th International Proceeding on Fluidized Bed Combustion. ASME, 1993, pp599-609

4 Mochizuki M et al. The mechanism of N<sub>2</sub>O formation from FBC charcombustion 5th international workshop nitrous oxide emission, 1992

5 蔡学军硕士论文. 流化床煤燃烧过程中 N<sub>2</sub>O 的生成研究. 华中理工大学, 1993

6 曹汉才. 燃烧与污染. 华中理工大学出版社, 1992

7 冯波 等. 流化床燃烧工况下 N<sub>2</sub>O 多相分解机理的研究. 中国工程热物理年会燃烧学术会议, 1993  
(梁 源, 李多复 编辑)

作者简介:卢建欣,男,25岁,1992年毕业于重庆大学热能动力工程专业。专门从事流化床煤燃烧 N<sub>2</sub>O 生成与控制的研究,已发表5篇有关论文,参加了有关 N<sub>2</sub>O 的国家自然科学基金课题和国家攀登计划科研项目。现在华中理工大学煤燃烧国家重点实验室攻读硕士学位。(武汉 430074)

## V84. 3A — 结合航空发动机技术的新一代燃气轮机.

据“Diesel & Gas Turbine Worldwide”1995年1—2月份报道,通过引入 V84. 3A 燃气轮机,西门子公司把航空发动机技术应用到重型燃机达到了一个新的高度。新的“A系列”燃机结合了西门子和普拉特 & 惠特尼公司广泛的经验。

该燃机装有单环 HBR(混合燃烧器环)燃烧室,允许增加燃烧室内的温度,以便提高效率而不增加 NO<sub>x</sub> 值。V84. 3A 可以把燃烧温度较早先设计提高 20℃,使燃烧温度达到 1310℃,并使排放的 NO<sub>x</sub> 值保持低于 25 ppm。

此外,还改进了涡轮和压气机的设计,包括采用更高效的叶片形状、“受控扩压”压气机叶型、单晶涡轮叶片和“EB-PVD”陶瓷热障涂层、最新的冷却技术等。今年在德国柏林进行的样机试验表明,V84. 3A 在 ISO 条件下以天然气作为燃料的额定输出功率为 163 MW,热耗率为 9463 kJ/(kW·h),简单循环效率为 38%,较以前提高 2%。

第一台 V84. 3A 计划在 1996 年第一季度交付给买主。生产型 V84. 3A 将在 Milwaukee 制造,第一台机组计划于 1996 年下半年建造。

通过其比例放大可产生 50 Hz 的 V94. 3A;比例缩小可得到 50/60 Hz 的 V64. 3A。因为这两个型号是通过现有设计比例放大或缩小得到的,就不需要如同 V84. 3A 那样进行广泛的设计研制。

(学牛 供稿)

An abrupt converging and abrupt diverging piping should not be viewed as a simple superimposition of an abrupt converging connection to an abrupt diverging one. It has been found through tests that under the condition of a given distance of the abrupt convergent and abrupt divergent connection the pressure drop in a piping is related to the dual-phase flow dryness and gas flow rate for which the authors have derived the corresponding calculation formulas. Key words: abrupt convergence, abrupt divergence, gas/liquid dual-phase flow, pressure drop

磁化水在冷却循环和供暖系统中的应用研究—An Applied Study of Magnetized Water in a Cooling Circulation and Heat Supply System [刊,中]/ Guo Ping (Kunming Non-ferrous Metallurgy Design Institute), Zhao Danya (Yunnan Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -371~374

On the basis of the experimental research conducted by scientists of the former Soviet Union a series of theoretical analyses have been carried out regarding the mechanism of fouling prevention and elimination of magnetized water when used in a cooling circulation and heat supply system with the aim that such a technology may eventually find widespread uses in China. Key words: solubility product, salt hardness, hydration, magnetic field force, complex compound

循环流化床煤燃烧过程中  $N_2O/NO_x$  的排放研究—An Investigation on the Emissions of  $N_2O/NO_x$  During the Process of Circulating Fluidized Bed Coal Combustion [刊,中]/ Lu Jianxin, Liu Hao, Feng Bo, Lin Zhijie, Liu Dechang (Central China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -375~380

On a circulating fluidized bed hot state test rig an investigation has been conducted of the generation during coal combustion of nitrogen oxides (including  $N_2O$  and  $NO_x$ ) with the variation of their concentration along the bed height being measured. It has been found through tests that there emerged a continuous increase in  $N_2O$  and a drastic decrease in  $NO_x$  with the increase in furnace height. The  $N_2O$  attained a maximum value at the furnace outlet with a dramatic increase in emissions. The authors have analysed the underlying causes of such phenomena and also studied the effect of operating parameters on the  $N_2O$  and  $NO_x$  emissions. Key words: circulating fluidized bed, coal burning, nitrogen oxides

发电厂省煤器管镍基合金喷熔层组织与性能的研究—Study on Structures and Properties of the Nickel Based Alloy Spray Welding Layers on the Pipes of Economizers of Coal-Fired Power Stations [刊,中]/ Liu Shaoguang, Wang Ping, Shu Delin (Anhui Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -381~384

In this paper, the authors investigated on purpose the structures and properties of the nickel based alloy spray welding layers, considering the serious actual situation of high temperature erosion of the pipes of economizers of coal-fired power stations. It has been shown that there are the complex structures, higher hardness and connecting strength, excellent oxidation resistance and high temperature erosion resistance on the layers. It is fairly suitable to deal with the high temperature erosion problem of the pipes of the economizers. Key words: economizers, high temperature erosion, nickel based alloy spray welding layers, structures and properties

工业汽轮机转子高温疲劳及寿命评估—High-temperature Fatigue and Service Life Evaluation of Industrial Steam Turbine Rotors [刊,中]/ Guo Yimu, Lu Zutong, (Zhejiang University), Ni Jinhui, Sun Yinghai (Hangzhou Industrial Steam Turbine Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -385~392

On the basis of industrial turbine rotor material low-cycle fatigue tests and the analysis under actual operating conditions of the rotor transient temperature and stress field a prediction of the rotor effective life has been conducted with the ensuing development of a special software. The analysis of specific examples shows that the software is capable of effectively