

# 四角切圆空气分级燃烧技术及应用

张惠娟, 宋洪鹏, 惠世恩

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 介绍四角切圆空气分级燃烧原理与技术, 分别说明轴向和径向空气分级燃烧过程, 讨论其技术优缺点; 并依据大量的国内技术文献, 较全面地介绍空气分级燃烧技术在我国的应用情况。

**关键词:** 煤粉锅炉; 分级燃烧; 降低  $\text{NO}_x$  排放;

中图分类号: TK16

文献标识码: A

## 1 空气分级燃烧原理

空气分级燃烧技术是目前世界上较多采用的低  $\text{NO}_x$  燃烧技术之一。它通过将燃烧所需的空气分级送入炉内, 降低锅炉主燃烧区的氧气浓度, 使其  $\alpha < 1$ , 火焰中心的燃烧速度和温度水平相应降低, 从而降低主燃烧区  $\text{NO}_x$  的生成量; 而完全燃烧所需的其余空气, 则由燃烧中心以外的其它部位引入, 与主燃烧区生成的烟气混合实现完全燃烧。这样, 燃料的燃烧过程在炉内分级分阶段地进行, 从而控制燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的生成反应, 降低锅炉  $\text{NO}_x$  的排放浓度。

空气分级燃烧主要有轴向和径向分级燃烧两种。

### 1.1 轴向空气分级燃烧

图 1 为轴向分级燃烧示意图。在距燃烧器上方一定位置处开设一层或两层所谓燃尽风喷

口, 将助燃空气沿炉膛轴向(即烟气流动方向)分级送入炉内, 使燃料的燃烧过程沿炉膛轴向分级分阶段进行。在第一阶段, 将从燃烧器供入炉膛的空气量减少到总燃烧空气量的 70%~75% (相当于理论空气量的 80% 左右), 燃料先在贫氧条件下燃烧, 此时, 第一燃烧区内过剩空气系数  $\alpha < 1$ , 降低了燃烧区内的燃烧速度和温度水平, 这不但延迟了燃烧过程, 使燃料中的 N 在还原性气氛中转化成  $\text{NO}_x$  的量减少, 而且将已生成  $\text{NO}_x$  部分还原, 使  $\text{NO}_x$  排放量减少。在燃尽风喷口附近的第二燃烧区内, 喷入的空气与第一燃烧区内生成的烟气混合, 剩余燃料在  $\alpha > 1$  的富氧条件下完成燃烧过程。

### 1.2 径向空气分级燃烧

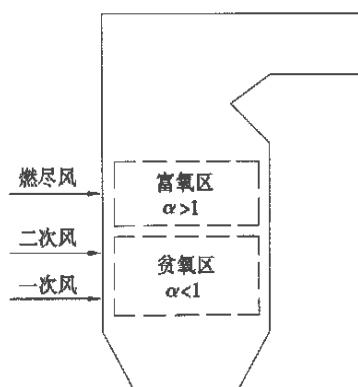


图 1 轴向分级燃烧示意图

将二次风射流轴线向水冷壁偏转一定角度, 形成一次风煤粉气流在内, 二次风在外的径向分级燃烧。此时, 沿炉膛水平径向把煤粉的燃烧区域分成位于炉膛中心的贫氧区和水冷壁附近的富氧区(见图 2)。由于二次风射流向水冷壁偏转, 推迟了二次风与一次风的混合, 降低了燃烧中心氧气浓度, 使燃烧中心  $\alpha < 1$ , 煤粉在缺氧条件下燃烧, 抑制了  $\text{NO}_x$  的生成,  $\text{NO}_x$  的排放浓度降低。由于在水冷壁附近形成氧化性气氛, 可防止或减轻水冷壁的高温腐蚀和结焦。

## 2 四角切圆空气分级燃烧技术及其在我国的应用

为了满足不断严格的  $\text{NO}_x$  排放限制的要求, 美国 ABB-CE 公司自 20 世纪 70 年代起, 陆续开发出了整体炉膛空气分级燃烧系统、二次风射流偏置的同轴燃烧系统—CFS、低  $\text{NO}_x$  同轴燃烧系统—INCFS 等低  $\text{NO}_x$  燃烧系统。在 20 世纪 90 年代初, 该公司在美国能源部的支持下, 对 INCFS 进行重大的改进, 于 2000 年开发出最新一代的 TFS2000 燃烧系统。

### 2.1 整体炉膛分级燃烧系统

整体炉膛分级燃烧系统以轴向空气分级燃烧为基础, 在煤粉

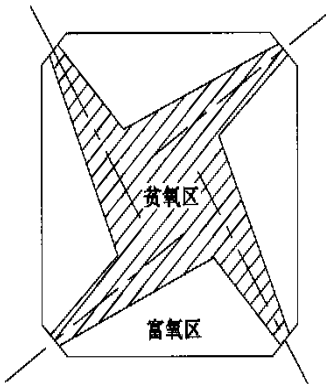


图2 径向分级燃烧示意图

燃烧器顶部设置了一层或两层燃尽风喷口—OFA, 将入炉总风量的约 20% 空气经此喷口送入炉膛, 借以减少主燃烧区的氧浓度, 抑制  $\text{NO}_x$  的生成。燃尽风口提供燃尽所需的其余空气, 保证燃料的完全燃烧。这种燃烧系统的技术关键是: (1) 合理确定燃尽风喷口与燃烧器最上层一次风喷口的距离  $H$ 。距离大, 分级效果好,  $\text{NO}_x$  下降幅度大, 但飞灰可燃物会增加。合适的距离与炉膛结构、燃料种类有关。根据前全苏热工研究所试验经验<sup>[1]</sup>,  $H$  由下式计算:

$$H = 1.5 (V_{\text{daf}}/10)^{0.5}$$

根据  $H$  的大小, 将燃尽风分为紧靠最上层一次风煤粉喷口的紧凑布置燃尽风 (CCOFA) 和远离一次风煤粉喷口的分离燃尽风 (SOFA); (2) 燃尽风量要适量。风量大, 分级效果好, 但可能引起燃烧器区域严重缺氧而出现受热面结焦和高温腐蚀。对于煤粉炉, 合理的燃尽风占锅炉总风量的 15% ~ 20% 左右, 燃油、燃气炉可高一些; (3) 燃尽风要有足够高的流速, 以保证与烟气的良好混合。文献 [5] 推荐, 燃尽风速约为 45 ~ 50 m/s 合适; (4) 合理的燃尽风喷口布置方式。常见的是

角置式 OFA 喷口, 也有采用墙置式结构, 即 OFA 喷口沿炉膛四面墙布置。

在我国, 采用整体炉膛分级燃烧系统的电站锅炉主要有: (1) 国外进口机组: 大连电厂 1 号和 2 号炉、福州电厂 1 号和 2 号炉、宝钢自备电厂 1 号和 2 号炉整套引进日本三菱公司六台 350 MW 机组 (CE 技术) 和北仑电厂进口 CE 公司的 600 MW 机组; (2) 引进 CE 技术我国自行设计制造机组: 石横电厂 1 号和 2 号炉、平圩电厂 1 号和 2 号炉、黄台电厂 7 号和 8 号炉、珠江电厂、汉川电厂 1 号和 2 号炉等; (3) 改造机组: 元宝山电厂 2 号炉等。

以福州电厂为例, 简要介绍整体炉膛分级燃烧系统结构与特点。其燃烧系统 (见图 3) 采用配有两层紧凑 OFA 喷口的 CE 型角置直流燃烧器, 每组燃烧器的煤粉喷口和辅助风、燃料风喷口作为一个整体上下摆动  $\pm 30^\circ$ , 以调节再热气温, 燃尽风喷口可以单独手动上摆  $30^\circ$ 、下摆  $5^\circ$ , 用于控制  $\text{NO}_x$  排放量。通过运行测试,  $\text{NO}_x$  排放量为  $700 \text{ mg}/\text{m}^3$  左右。

虽然, 带 OFA 喷口的 ABB—CE 型整体炉膛分级燃烧系统与传统的直流燃烧器系统相比, 其  $\text{NO}_x$  排放量减少 30% 左右, 但脱  $\text{NO}_x$  效率仍不理想, 难以满足高的环保要求, 其主要原因是: (1) 由于制造工艺方面的原因, OFA 喷口只能紧靠煤粉喷口布置, 距最上层煤粉喷口的距离较小, 其值普遍低于由前全苏热工所推荐的经验公式计算出的值, 影响了分级效果; (2) 为了防止水冷壁结焦和高温腐蚀, 燃尽风率仅占总二次风量的 14% 左右 (约占入炉总风量的 11.5%), 分级效果差。

## 2.2 同轴燃烧系统 CFS

同轴燃烧系统以径向空气分级燃烧技术为基础, 主要有两种形式: (1) 二次风射流向水冷壁偏转一定角度, 在炉内形成一次风煤粉气流在内, 二次风在外的同轴同向双切圆燃烧方式——CFS I; (2) 一次风煤粉气流与二次风射流方向相反的同轴反向双切圆燃烧方式——CFS II。

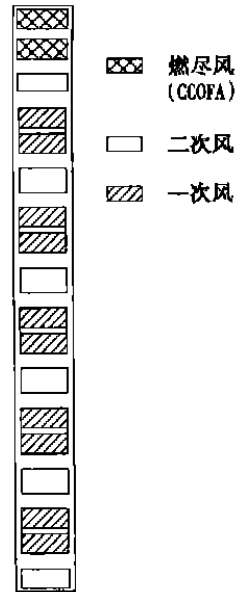


图3 福州电厂锅炉燃烧器结构图

CFS I 的开发主要是为了降低  $\text{NO}_x$  的排放。二次风射流向水冷壁偏转后, 推迟了二次风与一次风煤粉气流的混合, 有效降低了燃烧中心氧气浓度, 使燃烧中心  $\alpha < 1$ , 煤粉在缺氧条件下燃烧, 抑制了  $\text{NO}_x$  的生成,  $\text{NO}_x$  的排放浓度降低。同时, 由于在水冷壁附近形成氧化性气氛, 可防止或减轻水冷壁的高温腐蚀和结焦。它的技术关键在于二次风的偏转角度, 偏转角度大,  $\text{NO}_x$  排放量下降幅度大, 但飞灰可燃物也会增多, 合适的偏转角度因煤种而异。

所谓 CFS II 是一次风反切送入

炉膛,二次风射流方向与炉内主气流旋转方向一致切向送入的同轴反向双切圆燃烧方式。它是 CE 公司在 1984~1985 年间进行了详细的试验室空气动力模拟后,对 CFS I 所做的重大改进。由于 CFS II 燃烧系统的一次风煤粉气流受上游混合气流冲击时,先是被推向火焰中心,然后它在二次风的引射作用下,跟随二次风旋转,一次风射流实际切圆比 CFS I 的要小,这样,不仅推迟了一、二次风过早混合,降低燃烧中心氧气浓度,使炉内径向分级效果更好,脱 NO<sub>x</sub> 效果优于 CFS I;同时还具有以下优点:

(1)提高一次风煤粉气流在炉内穿透能力,并使其远离下方水冷壁,减轻炉内结焦和高温腐蚀;

(2)由于一、二次风切圆方向相反,使炉内煤粉与空气的混合极为强烈,同时反向二次风将上游一次风煤粉射流推向炉膛中心高温区,有利于稳燃和燃尽,因而可减小炉内过剩空气系数,进一步降低 NO<sub>x</sub> 排放;

(3)一次风煤粉气流受上游混合气流冲击的作用点距一次风喷口距离较远,一次风偏转得比较迟,因而燃烧器附近不易结焦;

(4)改善炉膛出口气流均匀性,可降低烟气温度、蒸汽温度偏差等,这一点在我国为减少 300 MW、600 MW 机组再热器超温爆管而进行的锅炉改造中得到广泛应用。

在我国,单独采用 CFS 系统的机组并不多,只有石洞口电厂四台锅炉和黄埔电厂两台同型锅炉,为了减少水平烟道烟温偏差,进行了 CFS II 改造,将一次风射流反向向炉膛中心偏转一小夹角(5°~7°),不仅改善了水平烟道两侧烟温偏差,而且有效防止了水冷壁结焦和高温腐蚀。

我国大容量锅炉多数采用 OFA 与 CFS 相结合的低 NO<sub>x</sub> 同轴燃烧系统。

### 2.3 低 NO<sub>x</sub> 同轴燃烧系统 LNCFS

LNCFS 是整体炉膛空气分级和 CFS I 的组合形式——OFA + CFS I。最早出现于美国犹他州亨特电厂 2 号炉的改造中,取得了成功,之后广泛应用于 ABB—CE 公司供货的锅炉上。这种系统的优点在于:(1)不仅在炉膛轴向,同时在燃烧器区域的炉膛径向实现分级燃烧,分级效果好,锅炉 NO<sub>x</sub> 排放量进一步降低;(2)偏置二次风改善了水冷壁附近的气氛,有利于防止水冷壁的高温腐蚀和结焦;(3)一次风煤粉射流处于向火侧高温区,有利于稳燃和燃尽,因而锅炉可采用低过剩空气系数运行方式。

华能石洞口二电厂两台由瑞士苏尔寿公司和 ABB—CE 合作设计的 600 MW 机组采用 LNCFS 系统,其一次风喷嘴为 ABB—CE 公司开发的 WR 型宽调节比煤粉喷嘴,部分二次风向水冷壁偏置 25°。运行测试结果为:锅炉燃用优质烟煤,满负荷运行时,NO<sub>x</sub> 排放量小于 630 mg/m<sup>3</sup>。

在我国进行低 NO<sub>x</sub> 同轴燃烧系统改造的机组有两台:一是西固电厂 7 号炉,二是乌拉山电厂 3 号炉。西固电厂 7 号炉为 TJI—13/A—200 高压锅炉,1988 年由前西安热工研究所对其进行 LNCFS 改造,在原燃烧器上

方增设可上下摆动各 15°的燃尽风喷口,设计燃尽风率占入炉总风量的 14%,相应缩小中上两层二次风口通流面积,并在其中加装了可向水冷壁方向最大偏转 15°的可调试小喷嘴。NO<sub>x</sub> 排放量由改造前的 744 mg/m<sup>3</sup> 减少到 556 mg/m<sup>3</sup>,降低了 25%。乌拉山电厂 3 号锅炉是 WGZ410/100—12 型高压锅炉,1998 年内蒙古工业大学电力学院与德国斯图加特大学合作对锅炉进行改造,将锅炉 22.206 m 标高处原有的 8 个吹灰孔和 4 个观火孔改造成 12 个分离燃尽风喷口(墙式),并适当减少主二次风喷口面积,由专门管路将 15%左右的二次风从二次风箱分流到燃尽风喷口,同时在部分二次风喷口内安装导流板,使燃烧器区域约 32.5%的二次风向背火侧偏转 22°。乌拉山电厂 3 号锅炉采用 LNCFS 改造后,降低 NO<sub>x</sub> 排放效果明显,烟气中 NO<sub>x</sub> 浓度由 982 mg/m<sup>3</sup> 降至 485 mg/m<sup>3</sup> 以下,脱 NO<sub>x</sub> 效率达 50%左右。其燃烧器结构与燃尽风布置见图 4。

我国运行中的大容量电站锅炉多数为四角切圆煤粉炉,此炉

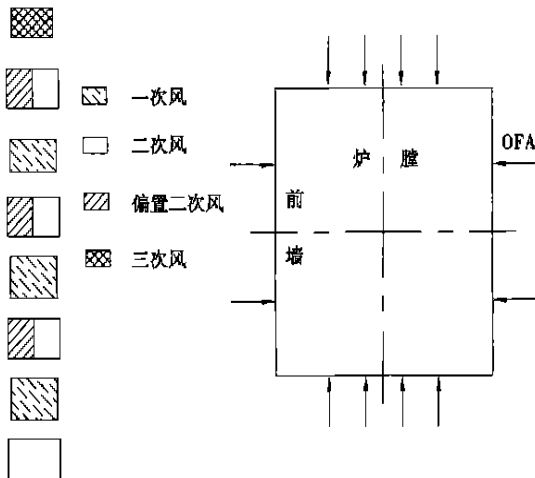


图 4 乌拉山电厂 3 号炉燃烧器结构与燃尽风布置示意图

型在运行中的一个突出问题是再热器超温爆管事故频繁发生, 其主要原因之一就是炉内切向燃烧引起炉膛出口及水平烟道中烟气的残余旋转造成再热器烟气侧放热偏差, 就此在我国大容量电站锅炉中广泛采用正反切燃烧技术——OFA + CFS II, 可认为这是变异的 LNCFS 系统(或称 LNCFS II 系统)。这种系统兼有 OFA 和 CFS II 的优点。LNCFS II 由于分级燃烧效果好,  $NO_x$  排放量与整体炉膛分级燃烧系统相比减少 30% 左右。国内采用这种系统的机组有: 吴泾电厂 11 号和 12 号炉、妈湾电厂 2 号炉、外高桥电厂 5 号和 6 号炉、渭河电厂 3 号和 4 号炉、沙角电厂 4 号和 5 号炉、秦皇岛热电厂 3 号和 4 号炉、哈三热电厂、嘉兴电厂 1 号炉等。另外, 石横电厂 5 号炉为了减轻水平烟道烟温偏差, 防止再热器超温爆管, 在大修中, 将上部 6 层空气喷嘴反切  $25^\circ$ , 取得很好效果。

的旋转切圆, 而二次风却为  $\Phi 6.800\text{ m}$  顺时针反向旋转切圆, 一、二次风射流夹角为  $25^\circ$ 。试验结果表明, 由于燃烧优质烟煤(神木烟煤), 锅炉可实现低氧运行, 使其在具有较高的经济性的同时保证  $NO_x$  排放量较低。11 号锅炉满负荷运行时, 省煤器出口过剩空气系数可控制在 1.14 ( $O_2 = 2.5\%$ ), 锅炉效率达到 93.8%,  $NO_x$  排放量为  $420\text{ mg/m}^3$  [2]。

西安交通大学锅炉实验室以我国自行设计的 300 MW 四角切圆煤粉锅炉为模型, 进行了低  $NO_x$  同轴燃烧系统炉内空气动力学模拟试验, 研究结果表明:

(1) 采用偏置二次风或反切一次风都能推迟燃烧初期一、二次风的混合, 对降低燃烧中心氧气浓度, 抑制  $NO_x$  的生成有利。但偏置二次风会使炉内气流相对切圆直径、旋转动量流率矩和水平烟道速度不均系数等增大, 这对防止或减轻大容量锅炉过热器、再热器热偏差非常不利。而在一、二次风动压比合适的情况下, 反切一次风不仅能使炉膛中心一、二次风之间的混合加强, 促进燃尽, 同时, 使炉内气流相对切圆直径、旋转动量流率矩、水平烟道速度不均系数明显低于同轴同向燃烧系统和传统四角切圆燃烧系统; (2) 分离墙置式燃尽风采用较高的流速 ( $W_{OFA} > 50\text{ m/s}$ ) 时, 由于其刚性强, 并且与炉内主气流形成正交射流, 一方面, 它对主气流有一个较强的向炉膛中心的横向推力, 使其相对切圆直径减小; 另一方面, 燃尽风在炉内有很强的穿透力, 与主气流之间的混合强烈, 这样不仅可以降低炉内气流的旋转动量流率矩、水平烟道速度不均系数, 能促进燃料的燃尽。因此建议: 大容量四角切圆

煤粉锅炉采用同轴反切燃烧系统, 配以高速分离墙置式燃尽风, 这对降低  $NO_x$  排放、保证锅炉较高效率、减轻锅炉过热器和再热器热偏差均有利。

2.4 TFS2000 燃烧系统

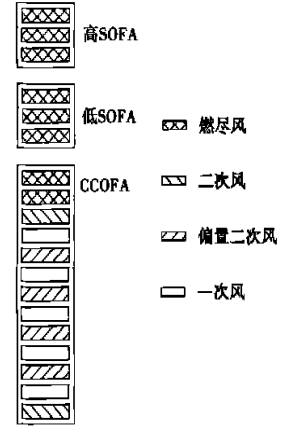


图 6 TFS2000 燃烧系统示意图

ABB-CE 在对 LNCFS 系统进行大量试验的基础上, 于 2000 年开发出了最新一代的 TFS2000 燃烧系统, 并已使用于新设计的电站锅炉。TFS2000 燃烧系统采用紧靠最上层一次风煤粉喷口的紧凑布置燃尽风 (CCOFA) 和远离最上层一次风煤粉喷口的多层分离燃尽风 (SOFA) 的多级 OFA 与 CFS I 的组合形式——多级 OFA + CFS I。图 6 为 TFS2000 燃烧系统示意图。此系统不仅具有优良的分级效果, 脱  $NO_x$  效率显著, 可达 55% ~ 65%, 偏转二次风使炉内结渣和腐蚀减到最轻, 同时能够保证锅炉在整个运行负荷范围内具有灵活的分级能力。据介绍, 美国一台采用 TFS2000 燃烧系统的 240 MW 机组, 燃用美国东部烟煤, 在整个运行负荷范围内  $NO_x$  排放量保持在低于  $240\text{ mg/m}^3$  的水平。

目前, TFS2000 燃烧系统在我国尚无使用实例。

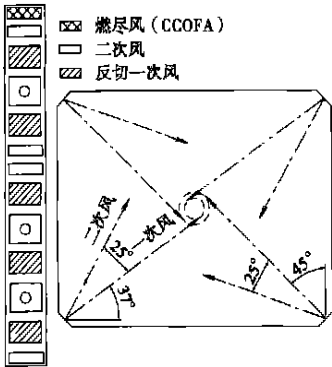


图 5 吴泾电厂锅炉燃烧器结构及切圆布置图

上海吴泾电厂 1025 t/h 锅炉采用 CE 型燃烧器, 其结构与切圆布置见图 5。燃烧器最上层布置有紧凑 OFA 喷嘴, 同时采用 CFS II 燃烧系统, 其一次风煤粉射流在炉膛中心构成  $\Phi 1.062\text{ m}$  和  $\Phi 1.376\text{ m}$  的两个逆时针方向

### 3 低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术在我国的应用前景及发展方向

西安热工研究院对国内未采用任何低 NO<sub>x</sub> 措施的早期国产燃煤锅炉 NO<sub>x</sub> 排放量的调查结果表明,四角切圆固态排渣煤粉炉平均 NO<sub>x</sub> 排放量为 600~1000 mg/m<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>=6%)<sup>[4]</sup>,与工业发达国家的火电厂 NO<sub>x</sub> 排放量相比是较高的。1996 年 3 月 7 日国家环保局发布的《火电厂大气污染排放标准》(GB13223-36)中明确规定 300MW 及以上机组固态排渣煤粉炉 NO<sub>x</sub> 排放量不得超过 650 mg/m<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>=6%)<sup>[5]</sup>,为此,国产的 300 MW、600 MW 四角切圆煤粉炉引进国外低 NO<sub>x</sub> 空气分级燃烧技术,使 NO<sub>x</sub> 排放明显降低,但与国际环保高标准要求还有一定差距,尤其是燃烧挥发分较低的贫煤锅炉,NO<sub>x</sub> 排放量均超过 700 mg/m<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>=6%)<sup>[3]</sup>。虽然,选择性催化还原法、非催化还原法能大幅度地把 NO<sub>x</sub> 排放量降低到 200 mg/m<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>=6%) 以下,但设备昂贵、运行费用高,鉴

于我国目前的投资条件,在大范围内迅速推广尚有一定困难。而低 NO<sub>x</sub> 空气分级燃烧技术具有初投资少,基本不增加运行费用的特点,较为适合我国的国情。因此,国内现役旧机组应以国内外较为成熟的低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术为主,实施锅炉改造,而新机组则应全部采用先进的低 NO<sub>x</sub> 燃烧系统。这样,低 NO<sub>x</sub> 空气分级燃烧技术必将在我国得到广泛应用。

四角切圆煤粉炉低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术始终以保证锅炉具有高的燃烧效率、炉内结渣与高温腐蚀尽可能减小,同时使 NO<sub>x</sub> 排放量不断下降,满足日益高的环保要求为发展方向。ABB—CE 公司开发的最新一代 TFS2000 燃烧系统正体现了这一点。今后,我国应在消化吸收国外先进的 TFS2000 燃烧技术基础上,积极开发出适合我国煤种和国情的低 NO<sub>x</sub> 燃烧器,使我国尽快赶上工业发达国家的水平。

#### 参考文献:

[1] 毕玉森. 低氮氧化物燃烧技术的发展

状况[J]. 热力发电, 2000(2): 2-9.

- [2] 毕玉森. 低 NO<sub>x</sub> 同轴燃烧系统在我国的应用[J]. 中国电力, 1994(10): 30-34.
- [3] 闫志勇. 锅炉分级燃烧降低 NO<sub>x</sub> 排放的技术改造与分析[J]. 动力工程, 2002(4): 764-769.
- [4] 吴生来. 电站锅炉四角切圆燃烧技术刍议[J]. 中国电力, 1999, 32(1): 15-21.
- [5] 曾汉才. 大型锅炉高效低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术的研究[J]. 华中电力, 1998, 11(1): 8-11.
- [6] 刘振琪. 低 NO<sub>x</sub> 煤粉燃烧器在我国的应用实绩[J]. 锅炉技术, 1998(9): 14-21.
- [7] 上海锅炉厂, 哈尔滨锅炉厂. 300 MW、600 MW 引进型切向燃烧锅炉温度偏差的研究鉴定技术资料[R]. 上海: 上海交通大学, 1999.
- [8] 张永兴. 600 MW 机组锅炉分级燃烧试验研究[J]. 中国电力, 1998, 31(9): 3-7.
- [9] 何佩放. 我国燃煤电厂 NO<sub>x</sub> 控制和清洁燃烧技术[J]. 电站系统工程, 1993, 9(1): 36-37.
- [10] 周 昊. 600 MW 锅炉偏转二次风系统降低 NO<sub>x</sub> 排放的试验研究[J]. 锅炉技术, 2000, 31(9): 13-16.
- [11] КОТЛЕР В П. 分级燃烧——降低煤粉锅炉氮氧化物的基本方法[J]. 毕玉森译. 热力电译丛, 1991(1): 15-20.

( 辉 编辑 )

## 一相和两相流体内动力设备金属侵蚀—腐蚀

据《Тяжелое ма циностроение》2002 年 8 月号报道,火力发电站、核电站和地热发电站工艺回路的工质流动伴随着它与动力设备金属侵蚀—腐蚀的相互作用。

侵蚀—腐蚀从一相或两相流动一侧以流体动力和腐蚀因素直接作用于动力设备的金属,并且以动力设备金属破坏和损失不同机理的形式表现出来。

通过腐蚀和侵蚀产物含铁化合物使工质变脏并形成沉积物,以及通过改变金属层表面的性能从金属一侧反过来作用于流动。

对湿蒸汽内侵蚀—腐蚀过程计算和试验的研究,可以确定两相流动内结构金属侵蚀—腐蚀的主要准则并制定其数学模型。

完成侵蚀—腐蚀的试验研究和制定的侵蚀—腐蚀数学模型,可以进行金属腐蚀情况的评定及其监控,是确定有关延长动力装置侵蚀—腐蚀寿命的有效措施。

(吉桂明 供稿)

非线性鲁棒控制方法的新进展 = **New Developments in Robust Control Methods for Nonlinear Systems** [刊, 汉] / LI Da-zhong, WANG Xiao-hui, ZHANG Ai-ping (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 220 ~ 223

Main methods of nonlinear robust control are described. In the light of various types of uncertainty specific to controlled objects of a nonlinear system the authors have expounded recent advances in nonlinear robust control methods, such as an improved version of Lyapunov and  $H^\infty$  method as well as an innovative method involving a combination of the above improved version with an intellectualized method. On this basis some new research results in the above area of study are analyzed. **Key words:** nonlinearity, robust control, uncertainty, intellectualized method

四角切圆空气分级燃烧技术及应用 = **Graded Air Feeding-based Tangential Corner Firing Technology and Its Applications** [刊, 汉] / ZHANG Hui-juan, SONG Hong-peng, HUI Shi-en (Institute of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 224 ~ 228

The theory and technology of tangential corner firing with graded air feeding are described, and axial and radial air feeding-based combustion processes separately explained. The technical merits and demerits of these two processes are discussed. On the basis of investigating copious relevant literature available in China the authors give a comprehensive account of the current situation about the use of the above-cited technology at Chinese power plants. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, graded firing, NO emissions reduction

卧式热交换式方形分离器分离性能的试验研究 = **Experimental Study of the Separation Performance of a Square Separator Assuming a Horizontal Heat Exchange Mode** [刊, 汉] / WANG Dong, CHENG Le-ming, ZHOU Qiang, et al (Thermal Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 229 ~ 233

An experimental study was conducted of the separation efficiency and separator resistance of a horizontal heat exchange mode-based square separator under different air speeds and inlet concentrations. The influence of operating conditions on separation performance was analyzed. To achieve an optimized design, the authors have carried out optimization tests with respect to various construction schemes. The test results indicate that a separator incorporating an exhaust pipe with a diameter and insertion length equal respectively to 1/3 and 1/15 of separation characteristic size will offer high efficiency and low resistance, etc. For solid particles with a diameter greater than  $100\mu\text{m}$  the separation efficiency will be in excess of 90% and the resistance less than 1.5 kpa. **Key words:** separator, square separator, horizontal separator

热力系统综合评价模型研究 = **The investigation of a Comprehensive Evaluation Model for a Thermodynamic System** [刊, 汉] / LIU Wei-hua, ANG Hai-song (College of Aerospace Engineering under the Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3). — 233 ~ 236

A comprehensive evaluation model is proposed. By using a stratified evaluation system the requirements of social environment on various aspects of a thermodynamic system are assumed to be the first layer of an evaluation model, while specific evaluation indexes are taken as the second layer of the model. With the use of a fuzzy comprehensive evaluation method the factors of the two layers were joined together. The results of evaluation may be reflected through the magnitude of subordination degree of fuzzy operations. The feasibility and rationality of the model has been substantiated by its use on some specific cases. **Key words:** thermodynamic system, comprehensive evaluation, model, economy, environment,