

DG-1000/17.6-IIIb型锅炉 NO<sub>x</sub> 排放特性试验研究

赵向前, 李文学

(华能汕头电厂, 广东 汕头 515041)

**摘要:**分析了华能汕头电厂 DG-1000/17.6-IIIb 型锅炉 NO<sub>x</sub> 排放的特性。通过全面的燃烧调整试验, 对 NO<sub>x</sub> 排放特性和飞灰可燃物 C<sub>fh</sub> 的各种影响因素进行了比较, 试验表明, 该锅炉的 NO<sub>x</sub> 排放量较低, 但飞灰可燃物 C<sub>fh</sub> 偏高。同时, 提出了降低飞灰可燃物 C<sub>fh</sub> 的几点建议。

**关键词:** 锅炉; 燃烧调整; NO<sub>x</sub> 排放

中图分类号: TM621.2 文献标识码: A

## 1 锅炉及其燃烧器特性

华能汕头电厂 1 号、2 号锅炉为东锅产配 300 MW 发电机组的 1 000 t/h 亚临界中间再热自然循环锅炉, 单炉膛四角切圆燃烧。设计煤种为神府东胜烟煤, 校核煤种为山西晋北烟煤, 煤质特性见表 1。制粉系统采用正压直吹式, 每台锅炉配备 5 台 HP863 型碗式中速磨煤机, 每台磨煤机分别向炉膛四角同一层 4 只煤粉燃烧器送粉, 燃用设计煤种时投 4 台磨煤机可保证锅炉最大连续出力所需的给煤量。

表1 燃煤煤质特性

项 目	符号 单位	设计煤种 校核煤种		主要燃烧煤种 (大同混煤*)	
收到基水分	M <sub>wr</sub> /%	14.01	9.61	11.89	
空干基水分	M <sub>Ad</sub> /%	0.49	2.85	2.10	
收到基灰份	A <sub>wr</sub> /%	11.01	19.77	12.17	
可燃基挥发份	V <sub>ad</sub> /%	36.44	32.31	29.12	
收到基低位发热量	Q <sub>wr</sub> /kJ·kg <sup>-1</sup>	22 760	22 440	23 980	
收到基碳	C <sub>wr</sub> /%	60.33	58.56	65.12	
收到基氢	H <sub>wr</sub> /%	3.62	3.36	2.92	
收到基氧	O <sub>wr</sub> /%	9.94	7.2	6.69	
收到基氮	N <sub>wr</sub> /%	0.7	0.79	0.60	
收到基硫	S <sub>wr</sub> /%	0.41	0.63	0.61	
变形温度	t <sub>1</sub> /°C	1 130	1 110	1 325	
软化温度	t <sub>2</sub> /°C	1 160	1 190	1 340	
熔化温度	t <sub>3</sub> /°C	1 210	1 270	1 350	
灰熔点	哈氏可磨性系数	K/HGI	56	57.64	53

\* 西安热工院实际化验结果

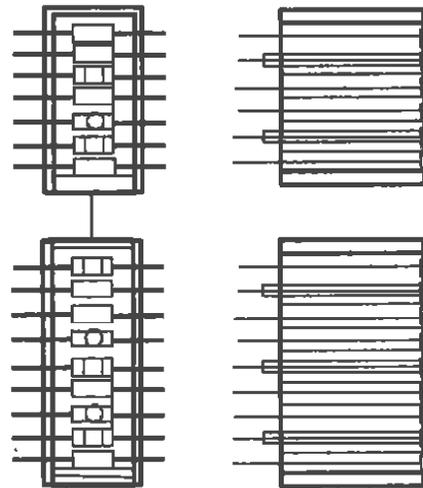


图1 燃烧器喷口布置图

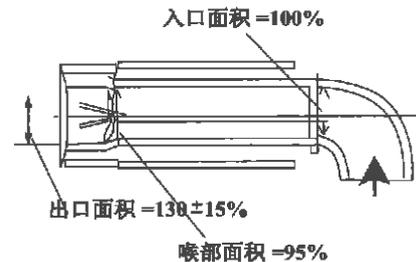


图2 带有三角形扩锥的可摆动一次风喷口

该锅炉燃烧器为直流宽调节比(WR)摆动式燃烧器, 每组燃烧器采用 CE 公司传统的大风箱结构, 用隔板分割成若干个风室, 各风室出口处布置喷嘴。整个燃烧器共有 16 层风室, 分上下两组, 从下至上各层风室的代号分别为 A、B、C……O、P, 其中 B、E、H、K、N 五层风室为一次风(周界风)风室, C、F、L 三层风室为带油枪的二次风风室, P 层风室为顶二次风风室, 即燃尽风(OFA)风室, 其作用是降低 NO<sub>x</sub> 的生成量, 其余各层为普通二次风风室, 如图 1 所示。该锅炉煤粉燃烧器的两个突出特点是, 为提高锅炉低负荷运行时燃烧的稳定性的, 在可摆动的一次风喷口内装有三角形扩锥, 锥角(2α=20°), 扩锥的作用是使在喷口外的一次风气流中心形成一个回流区, 以有利于提高煤粉气流的着火性能, 并且也能有较好的燃烧稳定性; 在燃烧器一次风入口弯头中故意不安

收稿日期: 2000-01-10

作者简介: 赵向前(1965 年), 男, 内蒙古宁城人, 华能汕头电厂高级工程师。http://www.cnki.net

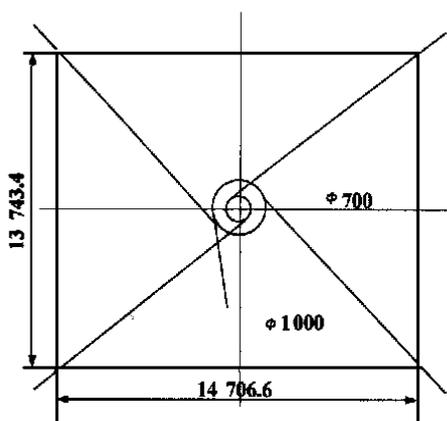


图 3 燃烧器切圆 布置图

装气流导向装置, 这样, 在一次风流经入口弯头后由于离心力的作用, 使水平肋片上部的气流中煤粉浓度较高, 肋片

下部的气流中煤粉浓度较低, 因而也有利于整个喷口的煤粉气流容易着火和在低负荷下保持燃烧稳定, 如图 2 所示。由于该锅炉为四角布置摆动式直流燃烧器, 燃烧器喷口均可上下摆动, 用以调节气温, 除了顶二次风(即 OFA) 喷口能摆动  $15^\circ$  外, 其余喷口能摆动  $30^\circ$ ; 炉内切圆为逆时针同向双切圆, 1、3 号角假想切圆为  $\Phi 700$ , 2、4 号角假想切圆为  $\Phi 1000$ , 炉膛宽  $\times$  深为  $14706.6 \text{ mm} \times 13743.4 \text{ mm}$ , 如图 3 所示; 燃烧器设计参数见表 2。

表 2 燃烧器设计参数

项 目	风比 / %	风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	风温 / $^\circ\text{C}$	阻力 / Pa
一次风	21.94	30	76.7	1 617
二次风	60.06	45	339.4	2 156
周界风	10	35	339.4	
冷却风	4	11	339.4	

锅炉风烟系统由一次风系统、二次风系统和对流烟道组成。配有 2 台轴流式送风机、2 台轴流式引风机、3 台离心式一次风机和 2 台容克式三分仓空气预热器。

## 2 $\text{NO}_x$ 排放特性

### 2.1 仪器、方法及数据处理

烟气成分分析采用 MC PMA30 顺磁式氧量仪 2 台, BINOS 100 红外式  $\text{CO}_2$  仪 2 台, BINOS 1000 红外式  $\text{CO}$  仪 1 台, BINOS 1004 红外式  $\text{NO}_x$  仪 1 台。烟气采样采用代表点, 预热器进出口 4 个烟道均为 1 点 6 孔, 4 个取样截面所采气样分别用 4 个烟道混合器混合, 且分别送烟气分析仪测量, 每 10 分钟测量一次。

飞灰取样采用两种方法, 在预热器出口垂直烟

道上采用静压平衡等速取样装置, 采用网格法, 每 3 点 6 孔, 等时等速取样; 在预热器出口水平烟道上采用撞击式飞灰装置, 试验前装上取样瓶, 试验时连续取样。煤粉取样在磨煤机出口煤粉管上进行, 采用 TPRI 平头式取样装置, 按等面积原则, 逐点等速取样, 用气流筛筛分煤粉细度。

最终测量数据结果为每个工况下的算术平均值, 并换算到标准状况下 ( $\text{O}_2 = 6\%$ ) 干烟气中的  $\text{NO}_x$  的质量浓度, 即  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 2.2 试验工况

采用单因素轮换法, 分别在 300 MW、225 MW 和 180 MW 工况下进行变总风量试验、变一次风压试验、变燃料风量试验、变燃尽风量试验、变煤粉细度试验和变磨煤机组合试验等 7 项内容。

### 2.3 试验结果及分析

#### 2.3.1 变锅炉总风量试验

通过改变送、引风机挡板开度来调整锅炉总风量, 并由经济器出口烟气含氧量对其进行控制, 试验分别在 301 MW、228 MW 工况下进行, 试验结果见图 4 和图 5。图 4 中给出了在相同负荷下 (301 MW) 两种

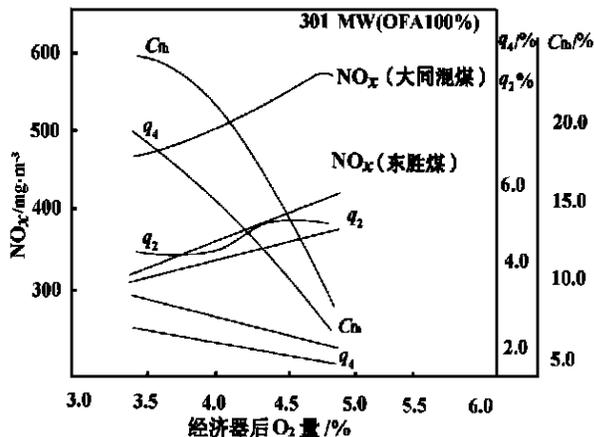


图 4 300 MW 负荷下  $\text{NO}_x$  排放量及锅炉经济性与锅炉总风量变化的关系

煤种的试验结果, 由图可见, 在其它参数相同的条件下经济器后烟气中的氧量由  $3.48\%$  增加到  $4.67\%$  时, 燃烧大同混煤的  $\text{NO}_x$  排放量从  $487 \text{ mg}/\text{m}^3$  增加到  $587 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 增加了  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ ; 而燃烧神府东胜煤的  $\text{NO}_x$  排放量从  $308 \text{ mg}/\text{m}^3$  增加到  $415 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 增加了  $97 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。在 228 MW 负荷下, 如图 5 所示, 经济器后烟气中的氧量由  $4.67\%$  增加到  $5.51\%$  时, 燃烧大同混煤的  $\text{NO}_x$  排放量从  $576 \text{ mg}/\text{m}^3$  增加到  $656$

mg/m<sup>3</sup>, 增加了 80 mg/m<sup>3</sup>。其中两种工况的区别是在 301 MW 负荷下, OFA 的开度是 100%, 在 228 MW 负荷下, OFA 的开度是 0%, 因而造成 NO<sub>x</sub> 排放量的多少不同, 但趋势是一致的。

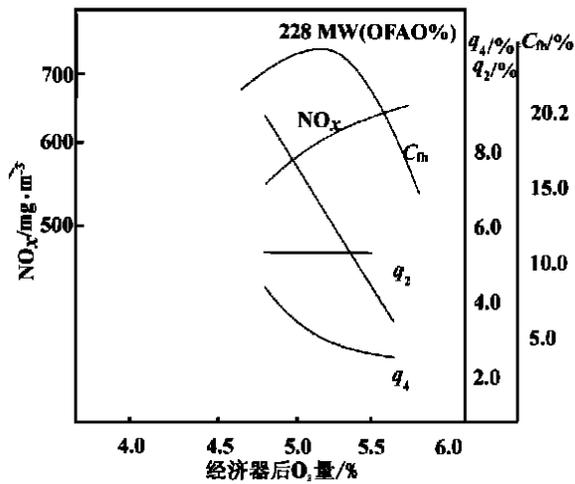


图 5 220 MW 负荷下 NO<sub>x</sub> 排放量及锅炉经济性与锅炉总风量变化的关系

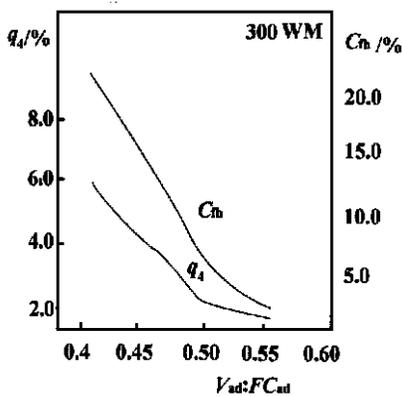


图 6 300 MW 负荷下  $V_{ar}/FC_{ar}$  比与锅炉经济性的关系

从低污染排放的角度看, 当入炉总风量增加时燃烧区域的供氧量也增加, 火焰温度上升, 使温度型 NO<sub>x</sub> 生成量增加<sup>[1-2]</sup>, 同时由于燃烧区域氧浓度增加, 也为燃料氮形成的中间产物与氮的反应提供了可能, 因而燃料型 NO<sub>x</sub> 生成量也增加, 其结果使 NO<sub>x</sub> 排放量增加。另外, 从图 4 的试验结果和表 1 也可以看出, 由于大同混煤氮的含量比神府东胜煤氮的含量高约 0.1%, 因此在相同的条件下其燃料型 NO<sub>x</sub> 生成量要高得多。可见燃料型 NO<sub>x</sub> 生成量受温度影响很小, 然而, 燃用低含氮量的燃料, 确实是降低燃料型 NO<sub>x</sub> 的有效方法之一<sup>[2]</sup>。

从高效率的角度看, 随着入炉总风量的增加, 在两种工况下 C<sub>n</sub> 和 q<sub>4</sub> 均逐渐降低, 而 q<sub>2</sub> 略有增加。但从图 4 可以看出, 当经济器后的氧量小于 4.5% 时, 燃烧大同混煤要比燃烧神府东胜煤 C<sub>n</sub> 和 q<sub>4</sub> 要高得多。为此, 在试验中我们对煤质资料进行了  $V_{ar}/FC_{ar}$

比值的分析。结果表明, 当  $V_{ar}/FC_{ar}$  比小于 0.5 时实际燃烧煤种 C<sub>n</sub> 和 q<sub>4</sub> 的值明显增加, 相反, 当  $V_{ar}/FC_{ar}$  比值大于 0.5 时, C<sub>n</sub> 和 q<sub>4</sub> 明显降低, 如图 6 所示。虽然在试验中我们没有进一步分析其原因, 但是这结果从一定程度上为现场进行必要的混配煤提供依据, 对提高锅炉的经济性具有实际的指导意义。

由此可见, 从高效低污染排放综合性能考虑, 对于该锅炉, 当燃烧大同混煤时, 在 300 MW 负荷下, 运行氧量设定 4.5% 为宜, 225 MW 负荷下运行氧量设定 5% 为宜; 当燃烧神府东胜煤时, 在 300 MW 负荷下, 运行氧量设定 3.5% 便可获得较高的经济性和较低的 NO<sub>x</sub> 排放量。

### 2.3.2 变燃料风量试验

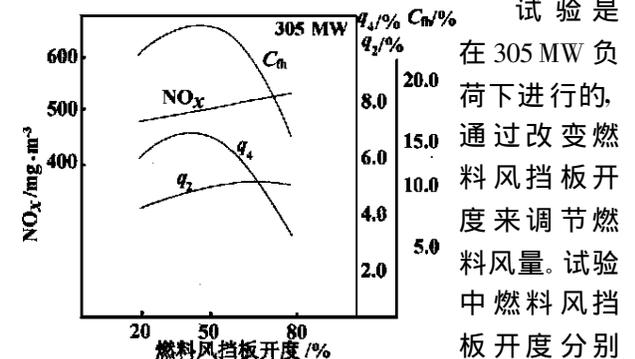


图 7 300 MW 负荷下 NO<sub>x</sub> 排放量及锅炉经济性与锅炉燃料风量变化的关系

由图 8 可以看出, 当燃料风挡板开度从 20% 增加到 80% 时, NO<sub>x</sub> 排放量由 462 mg/m<sup>3</sup> 增加到 510 mg/m<sup>3</sup>, 对应经济器后的氧量增加了 0.6%。当燃料风挡板开度大于 80% 时, C<sub>n</sub> 和 q<sub>4</sub> 的值明显降低, 而 NO<sub>x</sub> 排放量的增加量并不显著, 仅仅增加了 48 mg/m<sup>3</sup>。因此, 从燃料风的作用角度看增加燃料风量可以保护燃烧器, 从经济性方面, 可以提高锅炉效率, 又没有增加更多的污染排放。

### 2.3.3 变一次风压试验

变一次风压试验主要目的是为了确定一次风机裕度。由于该锅炉原设计配备 3 台离心式一次风机, 其出口压力较高, 从而造成磨煤机进口一次热风母管压力达 10 kPa, 使得磨煤机冷、热风门开度均较小, 出现了一定的节流损失, 所以 3 台风机挡板基本全开。为此通过调整风机挡板开度使一次冷风母管压力分别设定为 10 kPa 和 12 kPa, 同时进行了其它参数的测试, 如图 8 所示。

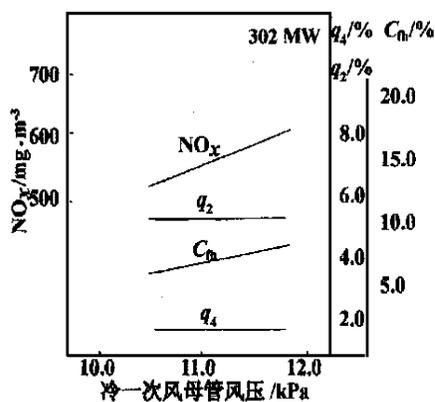


图8 300 MW 负荷下 NO<sub>x</sub> 排放量及锅炉经济性与锅炉冷一次风母管压力变化的关系

由图可以看出,当一次冷风母管压力从 10.5 kPa(实测值)增加到 12 kPa 时,NO<sub>x</sub> 排放量由 526 mg/m<sup>3</sup> 增加到 611 mg/m<sup>3</sup>,增加了 85 mg/m<sup>3</sup>,对应的经济器后的氧量增加了 0.35%。由于氧量的增加,使 NO<sub>x</sub> 排放量随之增加,从理论上讲是正确的,但关键是在该工况下由于煤质的变化起到了主要的作用。这可以从 V<sub>ar</sub>/FC<sub>ar</sub> 比大于 0.5,而未使 C<sub>th</sub> 和 q<sub>4</sub> 明显增加得到证实。由此可见,采取降低一次风母管的压力,来增加一次风机裕度,同时又不会使污染排放量增加过高的措施是可行的。

2.3.4 变燃尽风量试验

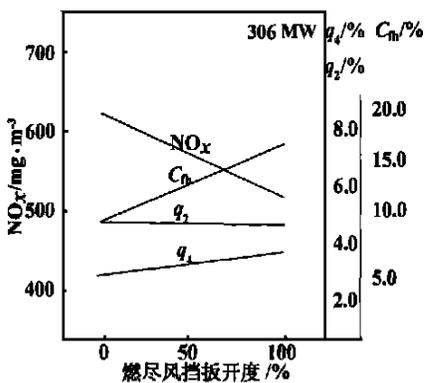


图9 300 MW 负荷下 NO<sub>x</sub> 排放量及锅炉经济性与锅炉燃尽风量变化的关系

该试验是在 306 MW 负荷下进行的,在保持其他参数基本不变的条件下,通过调节燃尽风风门挡板开度分别在风门开度为 100% 和 0% 两种工况下进行测试,结果见图 9。由图 9 可见,当燃尽风风门挡板开度从 0% 增加到 100% 时,NO<sub>x</sub> 排放量从 635 mg/m<sup>3</sup> 降低到 496 mg/m<sup>3</sup>,减少了 139 mg/m<sup>3</sup>。从理论上讲,增加燃尽风量必然使主燃烧器区域的氧量浓度降低,这不仅可以控制燃烧区域的着火温度,同时又能抑制燃料氮形成的中间产物与氧的化合,从而加强了空气分级的效果,降低了 NO<sub>x</sub> 排放量<sup>[3]</sup>。从经济性上看,随着

燃尽风量的增加, C<sub>th</sub> 和 q<sub>4</sub> 的值均存在增加的趋势,但增加幅度不大,对锅炉的效率影响不明显。

2.3.5 变磨煤机组合试验

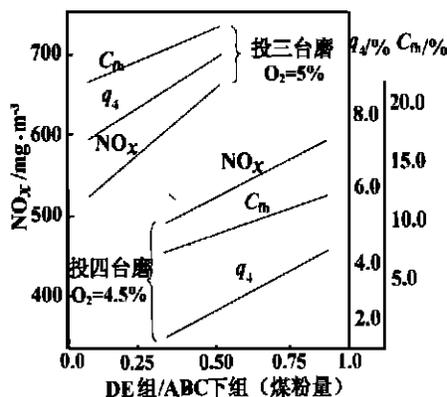


图10 煤粉量分配方式对 NO<sub>x</sub> 排放量及锅炉经济性的影响

变磨煤机组合试验分 300 MW 和 240 MW 负荷下进行,共做了 4 个工况,试验结果见图 10。

由图 10 可见,上组喷口(D,E)煤粉量与下组喷口(A,B,C)煤粉量的比值,即可以表示为(DE)/(ABC)比。在 300 MW 负荷下当 (DE)/(ABC) 比从 0.32 增加到 0.90 时,NO<sub>x</sub> 排放量从 414 mg/m<sup>3</sup> 增加到 577 mg/m<sup>3</sup>,增加了 163 mg/m<sup>3</sup>;在 240 MW 负荷下当 (DE)/(ABC) 比从 0 增加到 0.50 时,NO<sub>x</sub> 排放量从 493 mg/m<sup>3</sup> 增加到 673 mg/m<sup>3</sup>,增加了 180 mg/m<sup>3</sup>。由于增加了分级燃烧的程度,当 OFA 挡板开度在 100% 时 (DE)/(ABC) 比从 0.32 增加到 0.90,即相当于燃尽风(OFA)风口的位置与最上层喷口的距离在改变,这既关系到燃烧经济性,也关系到低 NO<sub>x</sub> 排放量的效果,因此燃尽风(OFA)风口的相对高度定义为<sup>[3]</sup>:

$$H_{ij} = \frac{L}{h_{ly}}$$

式中: H<sub>ij</sub>—燃尽风喷口的相对高度(无因次);  
L—燃尽风喷口中心线和最上层一次风口中心线的距离,mm;

h<sub>ly</sub>—火焰高度,最上层一次风喷口中心线到屏式过热器下沿的距离,mm。

根据上式的定义,该锅炉对燃尽风喷口的相对高度,当 4 台磨运行时上组喷口投 D 磨和投 E 磨的 H<sub>ij</sub> 值分别为 0.15 和 0.06;当 3 台磨运行且上组喷口不运行时 H<sub>ij</sub> 值为 0.26。由此可见,对大容量锅炉上层的 H<sub>ij</sub> 值一般在 0.08 ~ 0.1 之间存在着差异。因而当上层喷口投运时燃尽风对降低 NO<sub>x</sub> 排放量作用很小,而 C<sub>th</sub> 和 q<sub>4</sub> 的值均存在增加的趋势。因而合理组织磨煤机的组合运行方式,对降低 NO<sub>x</sub> 排放量和

提高锅炉的经济性具有重要意义。

### 2.3.6 变煤粉细度试验

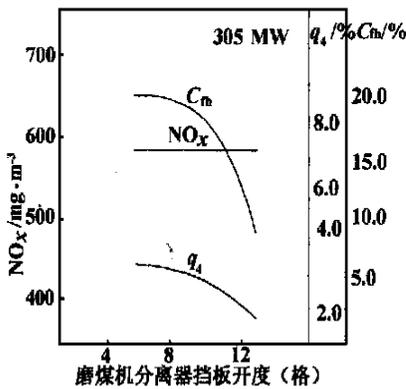


图 11 磨煤机分离器挡板开度变化对 NO<sub>x</sub> 排放量及锅炉经济性的影响

试验在 300 MW 负荷下进行的, 试验中保持其它参数稳定, 通过调整磨煤机分离器挡板开度来改变煤粉细度, 测试结果见图 11。

由图 11 可见, 当磨煤机分离器挡

板开度由 5 格增加到 11 格时, 煤粉细度变细, NO<sub>x</sub> 排

放量从 658 mg/m<sup>3</sup> 减少到 564 mg/m<sup>3</sup>, 降低了 4 mg/m<sup>3</sup>。而 C<sub>h</sub> 和 q<sub>4</sub> 的值均存在明显降低的趋势。可见, 煤粉越细, 燃烧越快, 使炉内温度水平提高, 热力型 NO<sub>x</sub> 增加; 而温度峰值高, 则释放出的挥发分增多, 煤的燃尽度也高, 但此时挥发分射流细, 易与空气混合, 因而燃料型 NO<sub>x</sub> 增加。所以, 煤粉变细, 总的 NO<sub>x</sub> 排放量增加。但由于在试验期间采取了分段燃烧的措施, 即投运 ABCD 磨运行, 且燃尽风挡板开度为 100%, 因而 NO<sub>x</sub> 排放量增加不明显。

## 3 结论与建议

### 3.1 NO<sub>x</sub> 排放特性

根据试验结果可以看出, 该锅炉在额定工况下的 NO<sub>x</sub> 排放量平均在 560 mg/m<sup>3</sup> 左右, 这与目前国内运行的 300 MW 以上燃烧贫煤或烟煤的锅炉排放相比属较高的水平(见表 3)。

表 3 国内部分火电厂 NO<sub>x</sub> 排放量

单位: mg/m<sup>3</sup>

电厂名称	汕头	黄石	妈湾	石横	福州	汉川	德州	阳逻	平圩
锅炉编号	1	7、8	1	1	1	1、2	1、2	1、2	1、2
煤种	烟煤	烟煤	烟煤	烟煤	烟煤	贫煤	贫煤	贫煤	烟煤
NO <sub>x</sub> 控制措施	WR 燃烧器, 分级送风	WR 燃烧器, 分级送风	WR 燃烧器, 分级送风, 部分二次风偏置	WR 燃烧器, 分级送风	WR 燃烧器, 分级送风	WR 燃烧器, 分级送风	WR 燃烧器, 分级送风, 二次风偏置	WR 燃烧器, 分级送风	WR 燃烧器, 分级送风
燃料 N/%	0.79	0.86	1.05	1.1	0.79	1.05	0.85		0.74
NO <sub>x</sub> 排放量 (O <sub>2</sub> = 6%)	568	920、742	551	610	650	783、744	853	800	563、492

试验表明, 由于该锅炉长期燃烧大同混煤, 而且实际运行的入炉总风量偏高 (O<sub>2</sub> = 4.5% 以上), 因此, 尽管在锅炉负荷大于 70% 时燃尽风挡板开度基本处于全开状态下, 仍使 NO<sub>x</sub> 排放量可保持在 600 mg/m<sup>3</sup> 左右的水平。若能够采取措施降低入炉总风量运行, NO<sub>x</sub> 排放量可望降低 100 mg/m<sup>3</sup> 以上。当燃烧神府东胜煤时在相同的条件下 NO<sub>x</sub> 排放量可保持在 400 mg/m<sup>3</sup> 左右的水平。

从燃用的煤质和燃烧器的结构角度看, 根据原全苏热工研究所进行分级燃烧改造的煤粉锅炉试验结果, 提出的空干基挥发分含量 (V<sub>Ad</sub>%) 和燃烧器最上层喷口与燃尽风喷口距离 H' 的关系式<sup>[4]</sup>: H' = 1.5 (V<sub>Ad</sub>/10)<sup>0.5</sup>, 该锅炉燃烧大同混煤和神府东胜煤的 H' 值分别为: 2.32 m、2.55 m。实际上该锅炉 K、N 两层煤粉喷口(即上组喷口)的 H' 值分别为: 3.11

m、1.26 m。因此, 为降低 NO<sub>x</sub> 排放量, 当投 D 磨时燃尽风喷口的摆角应向上摆, 但燃烧大同混煤比燃烧神府东胜煤的摆角要大一些; 投 E 磨时燃尽风喷口的摆角应向下摆动, 但燃烧大同混煤要比燃烧神府东胜煤的摆角小一些。由此可见, 该锅炉燃尽风喷口的位置设计的显然不够合理, 尽管可以通过摆角可做一定的调整, 但是实际调节余量是很小的, 因此在投运最上层喷口时很难做到分级燃烧, 对降低 NO<sub>x</sub> 排放量是不利的。

从上下层煤粉分配浓度比来看, 随着上下层煤粉浓度比的减少, NO<sub>x</sub> 排放量减少, 飞灰可燃物也降低, 这完全符合高效低污染排放综合特性的要求。但是由于锅炉受到着火条件的限制, 煤粉浓度比只能控制在一个最佳范围内运行。

### 3.2 燃烧效率

从上述试验结果可以看出, 该锅炉的燃烧效率变化很大, 突出表现在飞灰可燃物  $C_{fh}$  的大幅度变化上。其主要原因是:

(1) 磨煤机的影响。在试验期间 A、B 磨煤机磨辊间隙偏大, 粉细度较粗  $R_{90} \geq 25\%$ , 未能满足试验

要求, 尽管对磨煤机分离器出口挡板进行了多次调整, 但结果始终不理想。因而, 出现当经济器后的氧量小于 4.5% 时飞灰可燃物  $C_{fh}$  值显著增大,  $q_4$  损失增加, 影响了锅炉的效率(见表 4)。

表 4 煤粉细度测试结果

项 目	磨煤机 A					磨煤机 B					磨煤机 D					
	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	28	29	30	28	28	29
磨出力 / $t \cdot h^{-1}$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	28	29	30	28	28	29
折向门开度 / 格	3	5	7	10	0	3	6	8	10	10	10	5	9	5	9	0
$R_{200} / \%$	3.0	2.4	4.0	3.2	3.6	2.0	1.8	2.8	3.8	5.6	7.2	0.4	0.1	1.4	0.8	2.8
$R_{90} / \%$	22.	20.4	25.	20.	25.	20.	25.	24.	19.6	28.8	20.4	8.8	5.2	10.8	6.8	25.0
$R_{75} / \%$	28.	27.0	32.	26.	32.	26.	34.	32.	24.9	35.0						

(2) 煤质变化的影响。由于该锅炉实际燃烧的煤种与设计煤种偏差较大, 尤其是挥发分与固定碳的比( $V_{ar}/FC_{ar}$  比值)  $> 0.5$  时,  $C_{fh}$  与  $q_4$  的值增加非常明显, 因此, 燃用这种煤种锅炉效率较低。由于目前厂内没有采取混配煤的措施, 在煤质出现波动时较难合理的组织炉内配风, 所以对经常出现的飞灰可燃物  $C_{fh}$  的大幅度变化还未能得到有效的控制。

(3) 运行应加强配风调整, 尽量降低入炉总风量, 尽早实现飞灰在线装置的投入。

### 3.3 风机单耗偏高

试验中分别送、引风机单耗进行了测试, 结果发现, 由于炉膛出口氧量较高(平均为  $O_2 = 4.5\%$ ), 在额定负荷下造成送风机单耗比正常氧量 ( $O_2 = 3.5\%$  左右) 下增加 80 ~ 100 kW, 引风机单耗增加

180 ~ 200 kW。由此可见, 为降低飞灰可燃物  $C_{fh}$  而增大锅炉高氧量运行所带来的负面影响, 不仅增加了  $NO_x$  排放量, 而且也增加了厂用电率。因此, 对本锅炉如何降低飞灰可燃物  $C_{fh}$  较高的问题, 将是进一步研究解决的任务之一。

### 参考文献:

[1] 赵坚行. 热动力装置的排气污染与噪声[M]. 北京: 科学出版社 1995.  
 [2] 庄永茂, 施惠邦. 燃烧与污染控制[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.  
 [3] 毕玉森, 刘振琪. 华能福州电厂 CE 型角置直流燃烧器的  $NO_x$  排放特性[J]. 热力发电, 1992(2): 35-42.

(何静芳 编辑)

## 燃气轮机基本循环的热力经济分析

《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2000 年 10 月号报道了使用热力经济模块程序对燃气轮机基本循环分析的结果。

代码的模块结构允许针对多种先进燃气轮机循环的不同情况(涡轮进口温度、压比、燃料费用、装置费用、每年的运行小时等)以快捷和可靠的方法进行热力经济分析。分析结果用一些新的实用表达式: 费用与效率的函数关系、费用与比功的函数关系以及费用与压比的函数关系表示。

在提供的热力经济分析中, 不仅考虑了已购置设备的费用, 而且也考虑到总投资的影响。提供并讨论了各种先进循环的热力经济分析结果, 尤其考虑到涡轮进口温度和压比(总的: 低压、高压)的影响。

提供的方法可用来分析联合装置、混合循环(STIG, ISTIG 等), 以及先进燃气轮机和燃料电池的联合装置的热力经济效果。

(思 娟 供稿)

喷射器一维设计理论的研究进展 = **Recent Advances in the Study of One-dimensional Ejector Design Theory** [刊, 汉] / LIU Zhi-qiang, SHEN Sheng-qiang, LI Su-fen (Power Engineering Department, Dalian University of Science & Technology, Dalian, Liaoning Province, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 229 ~ 232

This paper mainly focuses on the recent progress in the theoretical research on one-dimensional gas ejector design theory. Discussed are such a variety of topics as constant pressure mixing theory, constant area mixing theory as well as their experimental research results. The authors end the paper with a forecast of the future prospects of the above-mentioned ejectors. **Key words:** ejector, constant-pressure mixing theory, constant-area mixing theory

DG-1000/17.6-IIIb 型锅炉  $\text{NO}_x$  排放特性试验研究 = **Experimental Study of  $\text{NO}_x$  Emission Characteristics of a Model DG-1000/17.6-IIIb Boiler** [刊, 汉] / ZHAO Xiang-qian, LI Wen-xue (Huaneng Shantou Power Plant, Shantou, Guangdong Province, China, Post Code: 515071) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 233 ~ 238

An analysis is performed of the emission characteristics of a model DG-1000/17.6-IIIb boiler at Huaneng Shantou Power Plant. Through a comprehensive combustion adjustment test compared were the various factors liable to have an influence on  $\text{NO}_x$  emission characteristics and fly-ash combustibles  $C_{\text{fh}}$ . The test results indicate that the above-mentioned boiler features low  $\text{NO}_x$  emissions but an excessively high amount of fly-ash combustibles  $C_{\text{fh}}$ . In view of this, some proposals have been put forward for the reduction of fly-ash combustibles  $C_{\text{fh}}$ . **Key words:** utility boiler, combustion adjustment,  $\text{NO}_x$  emissions

切向炉燃烧器区涡量分布的实验研究 = **Experimental Investigation of Vorticity Distribution in the Burner Zone of a Tangentially Fired Boiler** [刊, 汉] / HE Bo-shu, CHEN Chang-he (National Key Laboratory of Coal Clean Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), DIAO Yong-fa, XU Jin-yuan (Institute of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 239 ~ 242

With the help of a six-sensor hot-wire probe the authors have measured for the first time the velocity and vorticity field in the burner zone of the cold model of a tangentially fired boiler. Presented are the parameters depicting turbulent flow characteristics, such as turbulent flow intensity, skewness factor and flatness factor, etc. The results of an experimental investigation indicate that there emerges a wall-attachment phenomenon as soon as the jet flow at the burner zone reaches its outlet. Furthermore, a high intensity of vorticity and turbulence can be observed near the wall surface. **Key words:** tangentially fired pulverized-coal boiler, vorticity, skewness factor, flatness factor

分离式热管小螺旋管蒸发段换热特性的实验研究 = **Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Small Spiral-tube Evaporating Section in a Segregation-type Heat Pipe** [刊, 汉] / YI Jie, WANG Jing (Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), ZHANG Hong, et al (Nanjing Chemical Engineering University, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 243 ~ 246

Small-diameter spiral tubes were employed in the evaporating section of a segregation-type heat pipe. Through the use of a glass tube and stainless steel tube a simulation was conducted of the evaporating section of the above-mentioned heat pipe. Under the condition of different liquid-filling rates and heat flux densities an experimental investigation was undertaken of the fluid flow and heat exchange characteristics inside the small-diameter spiral tube. By way of a visualized test observed was the flow pattern inside the evaporating section of the spiral tube. A preliminary analysis was conducted of the influence of the heat flux density and liquid-filling rate on the transformation of flow pattern. A discussion of the relationship between wall temperature distribution and in-tube two-phase flow pattern has led to the following conclusion: the pulsation shock in the spiral tube and secondary return flow can bring about an intensified turbulence of the in-tube fluid. As a result, there emerged an enhancement of the average heat exchange factor and critical heat flux density as well as an