

燃用褐煤锅炉改烧烟煤时干燥剂的计算及选取

束继伟¹, 孟繁兵¹, 黄启龙², 徐伟鑫³

(1. 哈尔滨工业大学 能源学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 黑龙江省电力科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030;

3. 黑龙江省电力勘察设计研究院, 黑龙江 哈尔滨 150010)

摘要: 200 MW 褐煤机组在全改烧省内烟煤时, 进行了改前改后的对比性试验, 试验中发现, 锅炉可满足全烧省内烟煤, 锅炉效率基本达到烧褐煤时的设计值, 燃烧稳定, 未发现结焦, 但制粉系统存在磨出口温度高、含氧量高等问题, 通过对干燥剂的重新热力计算及选取, 确定以“高温炉烟+热风+压力冷风”为合理的干燥方式, 并满足制粉系统的防爆要求。

关键词: 褐煤; 烟煤; 制粉系统; 干燥剂

中图分类号: TK229.6 文献标识码: A

1 前言

富拉尔基发电总厂从发展地方经济, 降低发电成本出发, 在原设计燃用褐煤的锅炉基础上改烧省内烟煤, 并在3号炉上进行了全烧褐煤、全烧烟煤对比性试验研究。试验结果表明: 从燃烧系统方面讲, 全烧烟煤时, 锅炉主蒸汽参数、烟风参数、燃烧效率等均能满足经济、稳定运行的要求。从制粉系统方面讲, 四台磨煤机运行即可满足锅炉满负荷运行的需要。但存在三方面的问题: (1) 煤粉细度高于其经济煤粉细度; (2) 全烧烟煤后, 磨煤机冲击板运行周期减少60%以上, 使发电成本增加, 检修频繁; (3) 全烧烟煤时, 调节冷风门、热风门全开, 磨出口温度高达140℃以上, 磨出口氧量达18%~19%, 不能满足制粉系统防爆要求。

针对上述(3)存在的问题, 以四种不同干燥方式, 对制粉系统进行校核热力计算, 经过论证, 确定最佳改造方案。

技术改造设计原则是: (a) 四台磨煤机运行, 两台备用; (b) 保持磨煤机通风量不变(90 000 m³/h); (c) 尽量减少改造工作量。

2 制粉系统计算原始数据及计算结果

2.1 锅炉机组

锅炉主要参数(以下数据中的总耗煤量、计算燃煤量及锅炉效率均取自全烧烟煤试验结果)见表1。

表1 锅炉主要参数

锅炉型式	HG-670/140-6
蒸发量/t·h ⁻¹	670
过热蒸汽压力/MPa	13.73
过热蒸汽温度/℃	540
炉膛出口烟温/℃	1 040
热风温度/℃	274
冷风温度/℃	20
炉膛出口过量空气系数	1.236
总耗煤量/t·h ⁻¹	92.14
计算燃煤量/t·h ⁻¹	89.91
锅炉效率/%	89.77

2.2 燃料特性参数

根据全烧烟煤试验期间所取三个煤样的平均值进行计算, 分析结果如表2。

表2 燃料元素及工业分析

名称符号	数据
全水分 W _w /%	5.41
分析基水份 W _a /%	0.69
应用基碳 C/%	48.85
应用基氢 H/%	3.07
应用基氧 O/%	5.01
应用基氮 N/%	0.91
应用基硫 S/%	0.20
应用基灰份 A _v /%	34.15
可燃基挥发份 V _v /%	32.31
应用基低位发热量 Q _{net,w} /kJ·kg ⁻¹	20 776

2.3 风扇磨煤机主要数据

表3 风扇磨煤机主要参数

名称符号	数据
磨煤机型号 FM318.630	
磨煤机通风量 V _g /m ³ ·h ⁻¹	90 000
磨煤机出口温度 t ₂ /℃	120
磨煤机压头 H/Pa	1 833.4
磨煤机出力 B _m /t·h ⁻¹	23.04

续表 3

名称符号	数据
煤粉水分 $W_{mf}/\%$	0.69
煤粉细度 $R_{90}/\%$	25
密封风量 $V_{mf}/m^3 \cdot h^{-1}$	6 000
制粉系统漏风系数 K_{lf}	0.4
制粉系统散热损失 $q_5/kJ \cdot kg^{-1}$	系统输入热量的 5%

2.4 计算数据汇总

表 4 基本计算数据

名称符号	数据
蒸发水蒸气量 $\Delta W/kg \cdot kg^{-1}$	0.047 5
制粉系统干燥剂量 $g_1/kg \cdot kg^{-1}$	2.197 4

2.5 制粉系统热平衡计算

干燥剂成份: 热风 + 高温炉烟 + 冷风

表 5 制粉系统热平衡计算

名称	表达式或数据(4 184 × kJ · kg ⁻¹)
加入系统热量	
热风代入热量	$q_{rf} = 143.462 r_{rf}$
高温炉烟代入热量	$q_{gy} = 636.226 4 r_{gy}$
漏风、冷风代入热量	$q_{lf} = 4.285 8 + 10.714 5 r_{lf}$
碾磨发热量	$q_{jk} = 14.62$
密封风代入热量	$q_{mf} = 13.231$
煤的物理热	$q_r = 0$
系统输入热量	$Q_1 = 143.462 r_{rf} + 636.226 4 r_{gy} + 10.714 5 r_{lf} + 32.136 8$
系统输出热量	
蒸发水分支出热量	$q_{\Delta W} = 30.827 5$
加热燃料热量	$q_{jr} = 37.827 9$
散热损失	$q_5 = 0.05 Q_1$
干燥剂带走热量	$q_2 = 31.786 6 + 64.577 2 r_{df} + 65.315 5 r_{gy} + 64.577 2 r_{lf}$
系统支出热量	$Q_2 = 0.05 Q_1 + 100.442 + 64.577 2 r_{rf} + 65.315 5 r_{gy} + 64.577 2 r_{lf}$

热平衡方程: $Q_1 = Q_2$ 得:

$$71.711 7 r_{rf} + 539.099 6 r_{gy} - 54.398 2 r_{lf} = 69.912 1 \quad (1)$$

质量平衡方程:

$$r_{rf} + r_{gy} + r_{lf} = 1 \quad (2)$$

一次风率控制方程:

$$r_{lk} = \frac{g_1(r_{gy} r_{gk} + r_{lf} + r_{rf} + k_{lf}) z_m B_m \times 1000 + 6000 z_m}{1.285 \alpha V^0 B_j \times 1000}$$

按一次风率 $r_{lk} = 0.24, 0.35, 0.4, 0.39$ 分别代入方程, 得:

$$r_{rf} + r_{lf} + 0.173 7 r_{gy} = 0.326 9 \quad (3)$$

$$r_{rf} + r_{lf} + 0.173 7 r_{gy} = 0.714 5 \quad (3)'$$

$$r_{rf} + r_{lf} + 0.173 7 r_{gy} = 0.890 6 \quad (3)''$$

$$r_{rf} + r_{lf} + 0.173 7 r_{gy} = 0.855 4 \quad (3)'''$$

分别解上述联立方程, 当一次风率 $r_{lk} = 0.24$

~ 0.35 时, 均不符合实际要求, 取 $r_{lk} = 0.39$ 进行计算, 并得如下结果:

$$\begin{cases} r_{rf} = 0.162 1 \\ r_{lf} = 0.662 9 \\ r_{gy} = 0.175 0 \end{cases}$$

2.6 制粉系统干燥方式计算

表 6 制粉系统干燥方式计算

名称符号	数值
热风、冷风和漏风中的含氧量 $r_k^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.633 3
制粉系 密封风中含氧量 $r_{mf}^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.078 7
统含氧 高温炉烟中含氧量 $r_{gy}^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.016 26
量计算 干燥剂中总含氧量 $\sum_{gy}^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.728 3
制粉系统末端含氧量 $r_{df}^{O_2}$	0.186 4
干燥 高温炉烟量 $V_{gy}/m^3 \cdot h^{-1}$	33 161.07
剂量 冷风量 $V_{lf}/m^3 \cdot h^{-1}$	28 031.19
计算 热风量 $V_{rf}/m^3 \cdot h^{-1}$	12 562.70

2.7 其它干燥方式计算

表 8 其它干燥方式计算结果

计算结果	热风 + 高温炉烟 + 低温炉烟	热风 + 低温炉烟	热风 + 冷风
热风份额 r_{rf}	0.049 9	0.972 2	0.985 7
高温炉烟份额 r_{gy}	0.112 0		
低温炉烟份额 r_{dy}	0.838 1	0.027 8	
冷风份额 r_{lf}			0.014 3
热风和漏风中的含氧量 $r_k^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.232 5	0.709 4	
密封风中的含氧量 $r_{mf}^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.078 7	0.078 7	
高温炉烟中的含氧量 $r_{gy}^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.010 4		
低温炉烟中的含氧量 $r_{dy}^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.136 8	0.004 5	
干燥剂中总含氧量 $r_{gz}^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.458 4	0.792 6	
制粉系统末端含氧量 $r_{df}^{O_2}/m^3 \cdot kg^{-1}$	0.117 4	0.202 9	0.21
高温炉烟量 $V_{gy}/m^3 \cdot h^{-1}$	21 223.09		
低温炉烟量 $V_{dy}/m^3 \cdot h^{-1}$	49 954.17	1 656.99	
热风量 $V_{rf}/m^3 \cdot h^{-1}$	3 867.24	75 345.22	76 391.47
冷风量 $V_{lf}/m^3 \cdot h^{-1}$			604.69
一次风率 r_{lk}	按 0.24 计算	0.425 6	0.431 0

对于风扇磨煤机、直吹式系统, 如果磨出口温度 < 130 °C, 系统末端含氧量可不作考虑。

3 计算结果分析

以“热风 + 高温炉烟 + 低温炉烟”作干燥剂, 一次风率可以控制到 24%, 这对烟煤的初期着火是有

利的, 但低温炉烟量较大。恢复原设计冷炉烟系统及增加电除尘装置, 三台炉改造费用将超过 200 万元, 且运行费用较高。

以“热风 + 低温炉烟”作干燥介质, 一次风率高达 42.56%。四台磨运行, 总低温炉烟量仅为 6 627.96 m³/h。为此而恢复冷炉烟系统是不经济的。

以“热风 + 冷风”作干燥剂, 一次风率高达 43.10%, 这对烟煤的着火、燃尽都是不利的。按照常规设计, 烟煤水分较低, 所需干燥剂热量亦较小, 因此不需要抽取高温炉烟作干燥剂。但对现有的风扇磨直吹系统来讲, 磨煤机通风量无法调节, 如果用纯空气干燥, 势必造成一次风率偏高。从电厂实际情况看, 应保留现有的热风、高温炉烟系统, 因为, 一旦烟煤供应量不足时, 全烧或掺烧褐煤仍能保证正常的生产运行。

从以上分析来看, 干燥介质的选取, 以“热风 + 高温炉烟 + 冷风”为宜。一次风率可以控制到 39%, 单台磨冷风量为 28 031.19 m³/h。试验表明, 从冷风调节门最多可以掺入 21 902.88 m³/h 的冷风。因此, 可以从送风机抽取压力冷风或增设冷风门抽取冷风。

4 参照试验结果进行热平衡计算

从试验结果看, 由于风扇磨煤机冲击板运行时间的不同, 其制粉出力、通风量、干燥介质成分均有所不同。因此, 通过对磨煤机不同运行工况的计算,

可以了解干燥介质成份的变化及对锅炉燃烧工况可能造成的影响。干燥介质为热风 + 高温炉烟 + 冷风。

(a) 制粉系统漏风系数 $k_{lf} = 0.5$

(b) 密封风量 $V_{mf} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$

(c) 磨煤机冲击板运行前期(200 小时左右)与运行后期(750 小时左右)的出力比为 37:27 = 1.37:1, 假定两台磨为运行前期, 两台磨为运行后期。

$$\text{磨运行前期出力为 } B_{mq} = \frac{1.37}{1.37+1} \times \frac{92.14}{2} = 26.631 \text{ t/h}$$

$$\text{磨运行后期出力为 } B_{mh} = \frac{1}{1.37+1} \times \frac{92.14}{2} = 19.439 \text{ t/h}$$

(d) 磨运行前期通风量 $V_{tq} = 99\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$

磨运行后期通风量 $V_{th} = 63\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$

4.1 运行前期磨煤机热平衡计算

运行前期磨煤机热平衡计算(制粉系统干燥剂质量 $g_1 = 2\ 145.5 \text{ kg/kg}$), 见表 9。

由热平衡方程、质量平衡方程及一次风率控制方程, 按一次风率 $r_{1k} = 0.43$ 代入方程组, 可得以下结果:

$$\begin{cases} r_{rf} = 0.109\ 9 \\ r_{gy} = 0.201\ 5 \\ r_{lf} = 0.688\ 6 \end{cases}$$

4.2 运行后期磨煤机热平衡计算

运行后期磨煤机热平衡计算(制粉系统干燥剂质量 1.855 9), 见表 9。

表 9 磨煤机热平衡计算

名称	运行后期磨煤机热平衡计算(表达式或数据 ($g_1 = 1\ 855.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$))	运行前期磨煤机热平衡计算(表达式或数据 ($g_1 = 2\ 145.5 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$))
加入系统热量		
热风带入热量	$q_d = 134\ 395.4 r_{rf}$	$q_d = 140\ 073.7 r_{rf}$
高温炉烟带入热量	$q_{gy} = 537.349\ 9 r_{gy}$	$q_{gy} = 621.199\ 5 r_{gy}$
漏风、冷风带入热量	$q_w = 4.524\ 7 + 9.049\ 4 r_{lf}$	$q_w = 5.230\ 7 + 10.461\ 5 r_{lf}$
碾磨发热量	$q_{jk} = 14\ 62$	$q_{jk} = 14\ 62$
密封风带入热量	$q_{mf} = 1.306\ 8$	$q_{mf} = 0.953\ 9$
煤的物理热	$q_r = 0$	$q_r = 0$
系统输入热量	$Q_1 = 140\ 073.7 r_{rf} + 621.199\ 5 r_{gy} + 10.461\ 5 r_{lf} + 20.804\ 6$	$Q_1 = 134\ 395.4 r_{rf} + 537.349\ 9 r_{gy} + 9.049\ 4 r_{lf} + 20.451\ 5$
蒸发水分支出热量	$q_{\Delta W} = 30.827\ 5$	$q_{\Delta W} = 30.827\ 5$
系统加热燃料热量	$q_p = 37.827\ 9$	$q_p = 37.827\ 9$
输出热量		
散热损失	$q_s = 0.05 Q_1$	$q_s = 0.05 Q_1$
干燥剂带走热量	$q_2 = 27.858\ 9 + 54.541\ 2 r_d + 55.164\ 8 r_{gy} + 54.541\ 2 r_{lf}$	$q_2 = 31.525\ 9 + 63.051\ 9 r_{rf} + 63.772\ 8 r_{gy} + 63.051\ 9 r_{lf}$
系统支出热量	$Q_2 = 0.05 Q_1 + 100.181 + 63.051\ 9 r_{rf} + 63.772\ 8 r_{gy} + 54.541\ 2 r_{lf}$	$Q_2 = 0.05 Q_1 + 96.514\ 3 + 54.541\ 2 r_d + 55.164\ 8 r_{gy} + 54.541\ 2 r_{lf}$

由热平衡方程、质量平衡方程及一次风率控制方程,按一次风率 $r_{1k} = 0.27$ 代入方程组,可得以下结果:

$$\begin{cases} r_{1f} = 0.1180 \\ r_{gy} = 0.2167 \\ r_{1f} = 0.6653 \end{cases}$$

当两台磨在运行前期及后期时,一次风率为:

$$r_{1k} = \frac{g_{1q}(r_{gyq}r_{gykq} + r_{1fq} + r_{1fq} + k_{1f})z_{mq}B_{mq} \times 1000 + 500z_{mq} + g_{1h}(r_{gyh}r_{gykh} + r_{1fh} + r_{1fh} + k_{1f})z_{mh}B_{mh} \times 1000 + 500z_{mh}}{1.285\alpha l^0 B_j \times 1000} =$$

0.3499

以上计算说明:当两台磨在运行前期及后期时,一次风率为 34.99%,比较符合实际运行工况。

4.3 制粉系统冷风掺入量计算

运行前期单台磨冷风量:

$$V_{1fq} = r_{1fq} \frac{g_{1q}}{1.285} \times \frac{273 + t_{1f}}{273} \times 1000B_{mq} =$$

32 861.31 m³/h

运行后期单台磨冷风量:

$$V_{1fh} = r_{1fh} \times \frac{g_{1h}}{1.285} \times \frac{273 + t_{1f}}{273} \times 1000B_{mh} =$$

20 046.93 m³/h

制粉系统总掺入冷风量:

$$V_{1f} = 2(V_{1fq} + V_{1fh}) = 105 816.48 \text{ m}^3/\text{h}$$

试验测得冷风掺入量 $V_{1fs} = 87 611.53 \text{ m}^3/\text{h}$

设备改造后,多掺入冷风量为: $\Delta V_{1f} = V_{1f} - V_{1fs}$

$= 18 204.95 \text{ m}^3/\text{h}$

冷风掺入量增加不大,这说明对排烟温度影响较小。

5 结论

通过现场试验及计算,在燃用褐煤的锅炉改烧烟煤的方案是可行的,系统的改动量不大,只需增加部分冷风管道。根据计算结果,制粉系统所需冷风量全部由送风机供给,同时设计压力冷风管道。运转平台处大气冷风门仅作特殊情况的调节用,正常运行时处于关闭状态。

四台磨煤机满负荷运行时总冷风量:

$$4 \times V_{1f} = 4 \times 28 031.19 = 112 124.76 \text{ m}^3/\text{h}$$

甲、乙两侧单管冷风量:

$$2 \times V_{1f} = 2 \times 28 031.19 = 56 062.38 \text{ m}^3/\text{h}$$

通往磨煤机的压力冷风道推荐流速为 15 ~ 25 m/s

选择管道 700 × 700 × 3 四条,截面积 $S = 0.4896 \text{ m}^2$

管道流速为: $W_{1f} = \frac{V_{1f}}{3600s} = \frac{28031.19}{3600 \times 0.4896} = 15.9 \text{ m/s}$,满足推荐流速。

由于停磨后压力冷风调节门关闭不严,压力冷风将从高温炉烟抽烟口漏入炉膛,从而造成抽烟口结焦。为防止这一现象的发生,在 26 m 标高处的冷、热风混合管道上增设一道翻板式截止门,以减少冷风漏入量。磨煤机启动时,截止门全开。磨煤机停止时,截止门全关。其热工操作系统可以接入磨煤机联锁保护中,以减少运行人员操作量。

参考文献:

[1] 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.

(渠 源 编辑)

燃气轮机叶片用的分析软件

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2000 年 7—8 月号报道,美国纽约 SET 技术公司开发了供评定并改进涡轮机部件耐久性和性能用的专用软件。编制的 BLADE—GT(燃气轮机叶片)程序能够迅速和高效地完成应力、自然频率和疲劳寿命的分析。

该程序通过对提议的压气机和涡轮叶片设计多次迭代,能够加速并优化设计;诊断并纠正运行中那些影响发动机准备状态和安全性的问题;通过分析提供关键的信息,以便减少对试验的要求。

BLADE—GT 的要点包括高效的有限元模型,利用参数数据输入,热力、应力和模态分析,包括叶轮结构的周期对称模态分析,强迫谐振响应和振动应力计算,使用局部应变方法和 Goodman 图的疲劳寿命的强度估算,使用直接取自有限元结果的应力数据的故障容限分析。

使用的局部应变法是一种估算低循环和高循环疲劳寿命的精确方法。

(思娟 供稿)

Post Code: 266033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 447 ~ 449

Presented is a highly cost-effective mode of electric power generation, the so-called thermal power and pumped storage-based electric power generation. Under the above-mentioned power generation mode a steam turbine directly drives a water pump for pumped storage power generation, thereby reducing the secondary energy conversion link and making it possible to enhance power generation efficiency by 11%. The boiler, steam turbine and pumps all can operate at a full rated load, thus attaining the maximum efficiency. Moreover, the thermal power and pumped storage-based power generation system enjoys a higher operational safety, a better peak load shaving capability and greater savings in condenser circulating water. Furthermore, it also entails a moderate investment outlay. **Key words:** thermal power and pumped storage-based power generation, peak load shaving, electrical power economy

逆向 FTF 方法在船用燃气轮机故障分析中的应用 = **The Application of Reverse FTF Method in the Fault Analysis of Marine Gas Turbines** [刊, 汉] / LIU Yong-bao (Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430015), HAN Feng-ke (Harbin Turbine Works, Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 450 ~ 452

Discussed are the specific features of FTA (failure tree analysis) and FMECA (failure mode effect criticality analysis) as well as the interrelationship between the two methods of analysis. On this basis the authors have come up with a reverse FTF (FTA + FMECA = comprehensive analysis method) method to analyze system reliability. With the help of the above-cited method a quantitative analysis was conducted of the start-up failure of a marine gas turbine with vulnerable links in the turbine system being identified and practical countermeasures suggested. **Key words:** failure analysis, fault tree analysis, gas turbine

燃用褐煤锅炉改烧烟煤时干燥剂的计算及选取 = **The Calculation and Selection of Drying Agents in Connection with the Change of Fuel for a Boiler from Brown Coal to Bituminous One** [刊, 汉] / SHU Ji-wei, MENG Fan-bing (Energy Engineering College under the Harbin Institute of technology, Harbin, China, Post Code: 150006), HUANG Qi-long (Heilongjiang Provincial Electric Power Research Academy, Harbin, China, Post Code: 150030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 453 ~ 456

Contrast tests were conducted concerning a 200 MW brown coal-fired boiler prior to and after its modification to firing bituminous coal of Heilongjiang Province. During the tests it has been found that after a change of coal to the bituminous one the boiler enjoyed a stable combustion and basically attained the same design efficiency as that of the brown coal-fired boiler. No severe slag-formation has been detected. However, regarding the pulverized coal preparation system there was an excessively high temperature and oxygen content of flue gas at the coal mill outlet. Through a renewed thermodynamic calculation and selection of the drying agent it was decided to adopt a more rational drying mode involving the use of "high-temperature boiler flue gas + hot air + pressurized cooling air". The latter can also meet the explosion-proof requirements of the pulverized coal preparation system. **Key words:** brown coal, bituminous coal, pulverized coal preparation system, drying agent

邻炉高温风加热技术的应用 = **An Exploratory Study on the Technique of Using High-temperature Air from a Neighboring Boiler** [刊, 汉] / MENG Xiang-jun (Changjiakou Xiahuyuan Power Plant in Hebei Province, Changjiakou, Hebei Province, China, Post Code: 075300) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 457 ~ 458

Prior to conducting the start-up of a peak load-shaving boiler it is essential to enhance the metal temperature of its various components. This plays a very unique role in attaining the rapid and stable ignition and burning of the pulverized coal at the early period of the boiler start-up. In view of the above one should pay due attention to improving the high-temperature air heating system of a neighboring boiler so that the high-temperature air can be made available during the whole process of a boiler start-up. The addition of a recirculation pipe for the neighboring boiler high-temperature air may improve the above-mentioned heating system and render its design more rational. **Key words:** boiler, high-temperature air, heating system