

600 MW 超临界机组掺烧印尼褐煤、 越南无烟煤试验研究

赵振宁¹, 佟义英², 方占岭², 张清峰¹

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045; 2. 大唐国际发电有限责任公司, 北京 100053)

摘 要: 在设计煤种为优质烟煤、对冲燃烧方式的 600 MW 超临界锅炉上, 进行了用神华、塔山等 4 种烟煤和印尼褐煤掺烧越南无烟煤的试验。通过燃烧调整手段可保证 40% 比例越南煤稳定燃烧, 神华、印尼煤结焦性明显改善, 但飞灰可燃物含量升高, 飞灰粒径变粗。试验结果表明: 无烟煤燃尽比着火稳燃更难解决, 解决此问题并兼顾设备安全的有效手段为: 煤粉细度应尽可能靠近无烟煤燃烧的要求, 而一次风温、风量应按易燃煤种的要求控制。此外, 煤粉浓度、旋流强度、集中给氧、易燃煤种的活性及锅炉负荷等都混煤的燃烧有较大影响。

关 键 词: 600 MW 超临界机组; 印尼褐煤; 越南无烟煤; 掺混燃烧

中图分类号: TQ038.1 文献标识码: A

引 言

国内关于无烟煤掺烧烟煤或褐煤的研究多停留在试验室阶段^[1-10], 多采用热天平进行混煤的热解分析, 在无烟煤或贫煤中掺入一定的高挥发分贫煤或烟煤后, 研究着火稳燃及燃尽特性的变化规律, 而在设计为优质烟煤的锅炉上掺煤无烟煤的研究目前还没有人进行过。本试验研究的过程为: 对各煤种采样化验, 取得煤质数据进行热力特性与结渣特性分析, 制定相应的措施与控制方向后, 直接在实炉上掺烧, 由高锅炉负荷、低掺煤比例逐渐过渡到高掺煤比例、低锅炉负荷, 并解决试烧过程中暴露出来的问题。这种试验风险相对较大, 经验较少, 其思路与过程都有一定参考意义。

利用 600 MW 超临界参数燃煤发电机组, 锅炉型号为 HG-1900/25.4-YM4 进行试验。该锅炉为超临界参数、变压运行螺旋管圈、直流、单炉膛、一次中间再热、前后墙对冲旋流燃烧方式、平衡通风、固态排渣、全钢悬吊结构燃煤锅炉, II 型露天布置, 设

计煤种分别为神华烟煤和山西塔山烟煤, 实际燃用煤种还有大同优混煤。燃烧器为三井巴布科克 LNASB 低 NO_x 轴流式旋流燃烧器, 最低挥发分为 20%。每台锅炉配 6 台 HP1003 中速磨, 设计煤种下煤粉细度 R₉₀ 为 22%, 出力为 57 t/h, 煤粉细度调节范围为 10~35%。

在不进行设备改造的情况下, 通过试验研究的方法, 找到了该锅炉对印尼褐煤和越南烟煤的适应性规律, 并给出有足够安全性、经济性较高, 可以全负荷运行的掺配煤及锅炉运行方式, 得出易燃煤种掺烧难燃煤种的一般规律^[13-14]。

1 燃料特性

从表 1 和表 2 的数据可以看出: 越南煤为典型的无烟煤, 挥发分少且析出温度与着火温度高, 不易着火, 同时焦碳颗粒较大, 内部孔洞小而且少, 只能由外向内逐层燃烧, 燃尽特性也很差。印尼煤应属于老年沥青褐煤, 挥发分、发热量很高, 灰分很小, 挥发分析出温度、着火温度低, 氧元素与氢元素极高, 极易着火, 焦碳颗粒呈镂空状, 具有很大的氧气接触面积, 燃烧时内外同时进行, 所以燃尽性相当好。塔山煤挥发分、发热量较高, 灰分不大, 着火、燃尽特性都可以保证。神华煤与大同优混煤在国内应用较广, 都是优质烟煤, 燃烧特性很好, 但神华煤结渣性很强, 大同优混煤的稳定性较差。

印尼煤的灰熔点 4 个温度值都小于 1 200 °C, 且差值很小, 所以必须考虑其结渣性。根据表 3 中各种结渣预测指标, 判定该灰渣类型为典型的玻璃体渣, 结渣性为中等偏强。

收稿日期: 2008-04-22; 修订日期: 2009-03-23

作者简介: 赵振宁(1973-)男, 内蒙古乌兰察布人, 华北电力科学研究院有限责任公司高级工程师

表1 各煤种煤质特性表

	塔山煤	神华煤	印尼煤	越南煤
工业分析				
收到基全水分 $M_{af}/\%$	14	14.4	20.8	5.9
空干基水分 $M_{ad}/\%$	2.01	8.00	11.94	1.60
收到基灰分 $A_{af}/\%$	11.76	5.45	3.44	27.11
收到基挥发分 $V_{af}/\%$	25.09	27.71	35.79	6.01
收到基固定碳 $FC_{af}/\%$	—	52.44	39.98	60.98
干燥无灰基挥发分 $V_{daf}/\%$	33.8	34.57	47.23	8.97
元素分析				
收到基碳 $C_{af}/\%$	63.09	65.47	57.49	60.73
收到基氢 $H_{af}/\%$	3.95	3.71	4.00	2.07
收到基氮 $N_{af}/\%$	0.82	0.82	1.19	0.89
收到基全硫 $S_{af}/\%$	0.45	0.14	0.36	0.57
收到基氧 $O_{af}/\%$	5.93	10.01	12.73	2.74
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/kJ \cdot kg^{-1}$	24 190	24 620	22 190	22 640
哈氏可磨性系数 HGI	51	57	—	59
变形温度 DT/ $^{\circ}C$	1 500	1 120	1 120	1 350
软化温度 ST/ $^{\circ}C$	1 500	1 160	1 140	1 430
半球温度 HT/ $^{\circ}C$	1 500	1 170	1 150	1 440
流动温度 FT/ $^{\circ}C$	1 500	1 180	1 190	1 500
二氧化硅 $SiO_2/\%$	48.69	35.94	48.80	57.46
三氧化二铝 $Al_2O_3/\%$	35.47	14.90	19.59	25.89
三氧化二铁 $Fe_2O_3/\%$	5.17	6.34	12.62	6.35
氧化钙 $CaO/\%$	3.21	28.44	6.04	0.90
氧化镁 $MgO/\%$	0.44	4.99	4.55	1.32
氧化钠 $Na_2O/\%$	0.34	0.37	0.40	0.16
氧化钾 $K_2O/\%$	0.85	0.32	1.7	4.62
二氧化钛 $TiO_2/\%$	0.72	1.46	1.06	0.93
三氧化硫 $SO_3/\%$	2.29	5.74	1.25	0.55
二氧化锰 $Mn_2O_2/\%$	0.02	—	—	—

表2 热重分析结果简表 ($^{\circ}C$)

	塔山煤	印尼煤	越南煤
挥发分初析温度	313	236	368
着火温度	411	331	502
放热量最大温度	499	401	572

2 试验掺煤方案与控制思路

越南煤与设计煤种和燃烧器最低挥发分的要求相差很大,单独应用无法维持着火,只能考虑炉外掺烧,用两台斗轮机在上煤皮带上时进行掺配,使每套制粉系都燃用相同的混煤,提高越南混煤的活性,既保证燃烧器安全,又不结渣。

烟煤掺烧越南煤时,采取的措施是:提高一次风温度,降低一次风速(量)以降低煤粉气流的着火温度;采用大旋流强度、大二次风量来提高二次风卷吸周围高温烟气的能力及一、二次风掺混能力以维持稳定着火;着火后,立即加大二次风量,及时补氧,以提高燃烧的集中度与越南煤粉颗粒整个燃尽路径区域的温度水平。由于着火特性差,燃用越南煤时需要采用煤粉变细以扩大其燃烧比表面积,最好有较高的负荷。

越南煤掺烧印尼煤时,前者必须强化燃烧,后者必须弱化燃烧。综合考虑两种煤的着火、燃尽特性制定技术措施是采用低风温、大风量、细煤粉的策略来兼顾两种处于极端的混煤的着火与燃尽要求,达到安全与经济兼顾。

表3 印尼煤结渣性预测分析

	公式	值	意义
铁/钙性	$Fe_2O_3 > (CaO + MgO)$	是	高铁褐煤灰,可减少 Na_2O 对结渣的贡献
酸碱性	$SiO_2 < Fe_2O_3 + CaO + Na_2O$	是	酸性
灰渣类型	$SiO_2 = 50\% \sim 60\%, Al_2O_3 \leq 22\%, CaO < 8\%$	—	玻璃体渣,粘温曲线变化平缓,结渣性弱
碱酸比	$B/A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$	0.36	中等偏强结渣
硅比	$G = 100 \times \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO}$	124	不结渣
Na_2O 含量/ $\%$	化验	0.4	不结渣
Fe_2O_3 含量/ $\%$	化验	12.62	中等结渣
含灰量/ $\%$	化验	3.44	危险小

各种不同烟煤掺越南煤时的配风方式与煤粉细度控制如表4所示。

表 4 不同煤种掺越南煤时的配风条件与煤粉细度

与越南煤的掺煤配煤	纯烟煤	大越混煤	塔越混煤	神越混煤	印越混煤
总体氧量/ %	5	5	5	5	5
一次风与给煤量质量比	1.9~2.0	1.6	1.6~1.75	> 1.9	2.0~2.2
一次风速/ m·s ⁻¹	27	23	23~24	27	27~30
一次风温/ °C	75~78	85	85	70	65~70
二次风门开度/ %	50	60	60	50	50
燃尽风门开度/ %	40	10	10	20	20
煤粉细度 R ₉₀ / % *	27~30	10~15	10~15	10~17	17~20

* 不同的磨煤机调整的细度稍有不同。

3 试验研究过程及数据

越南煤与国内烟煤的掺烧试验在潮州电厂进行, 由 2006 年底到 2007 年 3 月结束, 由于设备原因负荷限制区段在 300~400 MW 之间, 投运三到四套制粉系统, 分 3 个阶段进行。试验过程如表 5 所示。

3.1 国内烟煤掺烧越南煤试验过程

表 5 越南煤掺烧国内烟煤的试验过程

研究阶段	目的	方法与措施	安全性结果	经济性结果
单层燃烧器稳燃试验	考验在下层燃烧器的支援下燃烧器掺烧越南煤的着火与稳燃能力	下层燃烧器燃用烟煤, 中层层燃烧器燃用越、烟混煤, 越南煤比例逐步由 20% 增加到 40%	锅炉运行正常	飞灰可燃物明显增加
全炉掺烧稳燃性试验	考验没有支援的情况下, 单个燃烧器在考验的着火特性与稳燃能力	全部燃烧器都投入越南煤, 用优混煤及塔山煤的混配煤, 比例由 20% 增加到 30%	火检模拟信号强度摆动, 着火稳定性出现问题	飞灰可燃物达 30% 左右
全炉掺烧燃尽性优化试验	降低飞灰可燃物, 提高低负荷着火稳定性	燃烧器旋流强度调整到最大, 煤粉细度调整到 16% 以下, 并根据不同煤种, 采用不同的配风条件, 使着火、燃尽、结渣兼顾	火检信号波动基本消失, 低负荷稳燃的能力加强	20% 越南煤比例, 飞灰可燃物 < 8%; 30% 越南煤比例, 飞灰可燃物约为 16%

表 6 印尼煤掺烧越南煤正交及大比例试验结果

燃料	可燃物含量(等速取样飞灰/大渣, %)				
20% 越南煤+ 80% 印尼煤 ⁽¹⁾	负荷/ MW	320	400 ⁽²⁾	500	约 600
	含碳量/ %	14	12	7.1	7.8~10
	越南煤灰的含碳量/ %	21.70	19.28	12.38	13.44
	越南煤折算低位发热量/ kJ·kg ⁻¹	20 106	20 456	21 348	21 220
	飞灰是否可以回收利用	否	否	是	是
	锅炉效率下降/ %	2.29	1.93	1.07	1.19
	煤耗上升/ g·(kWh) ⁻¹	7.32	6.16	3.42	3.81
30% 越南煤+ 70% 印尼煤	负荷/ MW	280	450	490	600
	含碳量/ %	18/ 15	13	14.71	12.30
	越南煤灰的含碳量/ %	23.06	17.72	19.65	16.98
	越南煤折算低位发热量/ kJ·kg ⁻¹	19 900	20 671	20 403	20 770
	飞灰是否可以回收利用	否	否	否	否
	锅炉效率下降/ %	3.79	2.55	2.96	1.44
	煤耗上升/ g·(kWh) ⁻¹	12.23	8.28	9.60	4.72
40% 越南煤+ 60% 印尼煤	负荷/ MW	320 ⁽²⁾	420	500	600
	含碳量/ %	24.84	16.95	13.83	13/ 17
	越南煤灰的含碳量/ %	27.30	20.40	17.29	16.40
	越南煤折算低位发热量/ kJ·kg ⁻¹	19 206	20 297	20 728	20 846
	飞灰是否可以回收利用	否	否	否	否
	锅炉效率下降/ %	6.74	4.14	3.24	1.69
	煤耗上升/ g·(kWh) ⁻¹	21.56	13.24	10.37	5.39

注: (1) 该比例试验在宁德电厂 4 号炉进行, 其它试验都在 3 号炉上进行; (2) 该工况于中雨天天气下进行; (3) 越南煤煤含碳量表示其本身的燃尽程度, 即把所有煤灰可燃物都折算到越南煤灰时的数值; (4) 越南煤折算低位发热量为扣除未燃尽后实际利用的低位发热量。

3.2 印尼煤掺烧越南煤试验过程

为了研究高负荷下越南煤的燃烧情况,2007年4月试验移到宁德电厂进行,掺烧煤种改为印尼煤。在潮州电厂试验研究的基础上,越南煤比例起始点在20%,进行各种负荷/比例下的正交试验,结果表明:掺入越南煤可以稳定燃烧的安全性比例可达40%,但越南煤比例超过30%后飞灰可燃物很难控制在8%以下,如表6所示。

4 试验结果分析

4.1 着火及稳燃性

从看火孔观察:40%越南煤比例时,燃烧器出口黑龙明显,低负荷时(50%左右)火焰亮度下降明显,但未投运燃烧器附近烟气温度仍有1100℃,投运燃烧器出口火焰温度约1250℃,锅炉运行平稳,汽水系统无其它异常,因此,越南煤比例着火稳燃比例可达40%。

由于越南煤燃烧滞后性,混煤对于氧气的消耗速度小于纯烟/褐煤粉气流的氧气消耗速度,因此,着火过程中混煤气流中氧气氛围好于纯烟/褐煤粉气流,只要温度条件可以满足纯烟/褐煤燃烧的要求,其着火、燃尽性就可以保证,并尽早点燃越南煤颗粒,提供高温燃烧区,使越南煤燃尽。只有在越南煤比例特别大,负荷特别低,混煤中烟/褐煤的燃尽特性才可能会因为温度水平、燃烧反应速度变差而受到影响。

着火初期温度水平主要由烟/褐煤的燃烧来保证,因而其热力特性越活泼,对越南煤的着火、燃尽也越有利。试验表明,印尼煤掺烧越南煤时,着火稳燃性明显优于其它混煤。神华煤结渣性强,采用较低的烟风参数后,如表5所示,着火稳燃特性与塔山煤、大同混煤掺烧时相差不大,均可保证40%比例越南煤在50%负荷左右安全运行。但大同混煤的稳定性不能保证,煤质差时其热值只有16000kJ/kg左右,此时越南煤比例增加到30%以上后,有着火不稳的趋势。

着火不稳的现象原因与表现形式有两种,需要区别对待:

第一种表现形式为:锅炉总体上的火检信号比较稳定,也无法明显用眼睛看出火焰燃烧不稳,但个别火检强度波动剧烈,主要是斗轮机掺煤不均引起,一般可以通过提高一次风气流温度、加大二次风量来消除。由于越南煤可磨性好,入炉后除了火检模

拟量强度变化以外,磨煤机电流也明显变小,这两个参数可以判断越南煤入炉的时间。

第二种情况为:突然间所有的火检都强烈的波动,无论采用何种调整手段,都无法遏制这种波动,看火孔可以明显看出火焰燃烧不稳定。一定时间后,火检波动又会一下全部消失,燃烧恢复正常。主要原因是上煤时易燃煤种断煤,造成制粉系统的越南煤比例突增到很大。这种情况非常危险,运行人员要及时决定是否投油助燃。

经过表4中第三阶段的优化调整,第一种着火不稳基本消除,但第二种不稳是人为因素造成,无法根除。

4.2 飞灰的变化

飞灰可燃物含量也明显升高,粒径明显变粗,还表现:撞击式飞灰取样器所取飞灰不论何种比例,何种负荷,含碳量都呈一致,约40%~50%,而采用等速取样所取飞灰与比例、负荷有明显的关系;相同条件下,与越南煤掺烧的烟煤灰分高,飞灰可燃物低,反之,则会高;飞灰中粗细灰含碳量差别很大,90 μm 以上粗灰含碳量为50%~60%,非常接近越南煤本身的固定碳。这部分飞灰所占比例一般为总体飞灰的16%左右,却是整体可燃物的主要来源,90 μm 以下细灰的含碳量只有为5%左右;煤粉细度调整后,飞灰的粒径分布也随之明显变细,可见飞灰可燃物主要来源为挥发份析出,但未着火的越南煤焦颗粒。

4.3 结渣性的影响

无论是神华煤还是印尼煤,掺烧越南煤时,渣块明显变小,说明结渣性明显下降,原因是炉内温度水平不到越南煤的熔融温度,导致其飞灰基本上不会发生融化与再组合,且其灰量大,使印尼煤、神华煤等高温熔结灰变成高温粘结灰,强度与危险性大为下降。相比而言,神华煤的渣依然比印尼煤的渣大、坚硬。



图1 印尼煤与越南煤混合燃烧时的大渣

图1显示80%印尼煤掺20%越南煤时的大型渣块碎片,外表多数呈红色,内部呈熔化后再冷却多孔状渣,疏松、含铁量较多。焦块之间粘满了如细沙一样越南煤灰,使整体强度很小,用手可以掰开,对锅炉水冷壁的威胁不大,但大面积结渣容易降低锅炉传热效率,其下落时容易产生较大负压,使锅炉熄火,因此,印尼煤的比例最好不要超过80%。

在潮州电厂还使用神华煤与印尼煤比例进行了掺烧试验研究,结果在高负荷时引起锅炉较为严重的结渣,渣块大而且坚硬,使捞渣机工作困难,飞灰呈明显的铁红色,证实两者掺烧加剧了结渣性,应当杜绝这种尝试。

5 越南煤难以燃尽的根本原因

5.1 煤粉细度不符合要求

煤粉细度对于混煤的着火作用很大,降低煤粉细度是解决混煤着火稳定性最主要的手段,但根据燃用无烟煤的煤粉细度选择公式 $R_{90}=0.5V_{daf}+2$ 得出:燃用越南煤($V_{daf}=8.97$)的煤粉细度应当7%左右,而实际由于HP中速磨煤机的特性,同时考虑到越南煤的比例相对较小,煤粉细度控制值最小只能运行在10%~17%之间,这种细度相对越南煤来说还是太粗。

5.2 锅炉燃烧区小,燃烧时间短

由于锅炉设计为烟煤,炉膛粗而矮,燃烧器热负荷小,燃烧器出口处火球温度仅在1200~1300℃之间,燃烧不好时该温度低于1200℃,造成燃烧区小且温度低,燃烧时间短,不足以完成越南煤的燃尽。当负荷升高时,炉膛温度的提高有利于燃尽,但随负荷增加,烟风量也相应增加,使得炉内烟速升高,煤粉颗粒停留时间缩短,又对燃尽不利,综合两者的影响,一定负荷以后,飞灰可燃物不再发生明显变化。表6显示,越南煤比例为20%时,负荷约为500 MW后,或者30%越南煤比例时,负荷在450 MW后,就无法再通过提高负荷的方式显著减少飞灰可燃物的水平了。

6 强化越南煤燃尽的手段

表4所示的优化试验中显示了各种强化越南煤燃烧的手段,效果最好的是降低煤粉细度及集中给氧,其中集中给氧与以前各文献结论相反^[3,13],原因是他们研究中的混煤以难燃煤为主,而本文中混煤

以易燃煤为主。

煤粉变细不但扩大了燃烧比表面积,更重要的是减少了煤焦的体积,从而减少了烧尽所需的时间,使着火与燃尽性都明显改善。控制煤粉细度主要手段是关小磨煤机分离器挡板:原燃用纯烟煤时,分离器的开度一般在50%,而掺烧越南煤时把其关小到30%,煤粉细度 R_{90} 从28%调整到10%~17%(各磨稍有差别);在此基础上,还通过适当改变一次风量、改变一次风携粉能力,对煤粉细度进行微调:如掺烧神华煤时需要把一次风量适当加大,使煤粉稍粗一些,而掺烧大同混煤时,则适当减少一次风量使煤粉稍细一些。

集中给氧的配风方式并不增加总体运行氧量,只是适当减少了最上面一层燃尽风,把它们均匀的分配到投运的燃烧器,使其着火后的燃烧初期二次风量有所增加,可以卷吸更多的高温烟气,有利于一二次风早期掺混,提前合并两种煤火焰,使越南煤粉颗粒着火的时间加长。由于每个燃烧器增加的二次风并不多,不会因其提前掺混而影响到混煤的着火,因此,集中给氧对于越南煤的着火与燃尽都有较好效果。试验过程中几次出现的燃烧不稳,都是在关小燃尽风、加大二次风量消除的,典型的过程如图2所示:某一燃烧器二次风挡板开度小于50%时出现火检波动,调整到57%后火检波动消失。

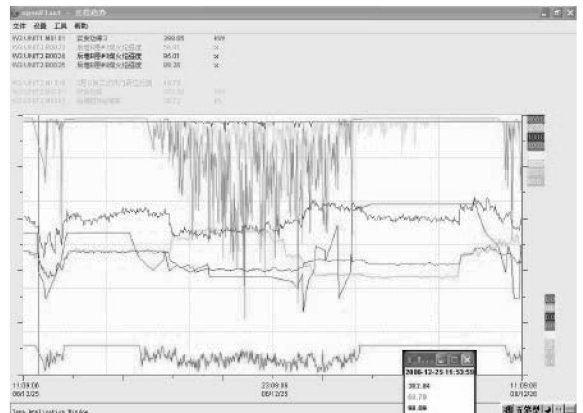


图2 适当关小二次风、加大二次风量消除火检的波动

低负荷和炉膛内温度水平较低时,浓度对于混煤的燃烧的影响也较为明显,每台磨适合的质量浓度要求大于0.5 kg/kg(粉/风),当低于这个浓度时,磨煤机在最小通风量下运行,煤粉浓度迅速下降,导致着火不稳,此时应当减磨运行数量,以提高每台磨的煤粉浓度。煤粉浓度最好维持在0.5~0.6 kg/kg

之间, 需要把一次风与给煤量的质量比控制在 2 ~ 1.65 之间。

7 结 论

本研究的初衷是要找到在烟煤、褐煤等易燃煤种中掺入 40% 越南煤可以保证着火稳燃, 20% 越南煤比例是经济性边界的结论, 但从试验过程中可以得出更多重要的易燃煤种掺烧难燃煤种的运行经验:

(1) 在易燃煤中掺烧难燃煤时, 两种煤燃烧时各自保持自己的着火特性, 挥发分析出、着火与持续燃烧非同步的, 存在时间差。只要易燃煤的挥发分着火后能点燃难煤煤粉, 即足以满足混煤着火的稳定性。

(2) 易煤掺烧难燃煤时, 燃尽性也保持独立性, 混煤煤灰中的可燃物主要来源于难燃煤, 其燃尽性是比其着火更难解决的问题。

(3) 煤粉细度对混煤的着火影响很大, 对燃尽性影响更是决定性因素, 混煤的煤粉细度应当按难燃煤的燃烧要求来控制煤粉细度。

(4) 易燃煤种为主的混煤燃烧在保证着火稳定的情况下, 及时、尽早的集中送风方式, 比分级送风方式有更好的稳燃、燃尽。

(5) 燃烧高温区大小影响难煤燃尽性的主要因素, 因此, 提高负荷可减少飞灰可燃物含量, 但由于负荷提高同时减少了煤粉在炉内的停留时间, 所以一定负荷以后, 锅炉负荷对于燃尽性影响又趋于一致, 要完全适应难燃煤需要对锅炉进行改造。

(6) 如果是极易燃煤种掺烧无烟煤, 必须同时考虑防燃烧器烧坏和燃尽的矛盾需求, 适当降低一次风温度, 加大一次风量, 同时采用细煤粉是可以尝试的一种方法。

(7) 有结渣性的好煤中掺入一定的差煤, 有助于减轻好煤的结渣性, 两种结渣性大的煤掺烧可能会相互促进作用, 应当避免。

参考文献:

[1] 曾汉才. 无烟煤与烟煤的混合煤燃烧特性与结渣特性研究[J]. 燃烧科学与技术, 1996, 2: 181-189.
 [2] 张晓杰, 李振中. 混煤着火过程试验研究[J]. 电站系统工程, 1999 15(6): 41-44.
 [3] 王湘江, 曾汉才. 锅炉改用混煤的研究及其改进[J]. 华中电力, 2002 15(3): 4-6, 67.
 [4] 张晓杰, 聂其红, 孙绍增, 等. 混煤热天平燃烧模型研究[J]. 热能

动力工程, 2000, 15(4): 356-359.

[5] 黄 伟, 熊蔚立. 低挥发分无烟煤及其混煤燃烧性能研究[J]. 湖南电力, 2006, 26(1): 11-14, 19.
 [6] 姚 强, 岑可法, 施正伦, 等. 多煤种配煤特性的试验研究[J]. 动力工程, 1997, 17(2): 16-20.
 [7] 侯栋岐, 冯金梅. 电站锅炉煤燃烧特性试验研究[J]. 电站系统工程, 1995, 11(1): 46-50.
 [8] 侯栋岐, 冯金梅, 陈春元, 等. 混煤煤粉着火和燃尽特性的试验研究[J]. 电站系统工程, 1995, 11(2): 30-40.
 [9] 龚柏云, 彭 敏, 熊蔚立, 等. 西山烟煤与阳泉无烟煤及其混煤的燃烧性能研究[J]. 热力发电, 2003, 4: 17-20.
 [10] 曾汉才. 劣煤燃烧分析[J]. 广西电力技术, 1991, 1: 1-7, 43.
 [11] 朱群益, 赵广播, 阮根健, 等. 煤粉着火温度与煤的元素分析及工业分析间的关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1993, 25(2): 24-28.
 [12] 张晓杰, 王 阳, 李振中, 等. 褐煤及其混煤燃烧、结渣特性的试验研究[J]. 动力工程, 1999, 12(6): 428-433.
 [13] 赵振宁. 大唐国际潮州发电有限责任公司国内烟煤掺烧越南煤试验研究报告[R]. 北京: 华北电力科学研究院有限责任公司, 2007.
 [14] 赵振宁. 大唐国际宁德发电有限责任公司印尼煤掺烧越南煤试验研究[R]. 北京: 华北电力科学研究院有限责任公司, 2007.

(编辑 何静芳)

· 书 讯 ·

《火力发电新技术新设备培训教材》

本书分 5 篇 32 章, 具体内容有: 第一篇超临界与超超临界技术, 介绍超临界机组及超超临界机组的关键技术; 第二篇洁净燃料技术, 介绍燃烧前煤炭加工和转化技术、煤炭洗选处理技术、燃烧中净化技术、燃烧后净化脱流技术; 第三篇火力发电厂计算机控制技术, 介绍计算机控制技术、分散控制系统、汽轮机数字电液调节系统、锅炉炉膛安全监控系统、智能 PHD 控制、供热计量与温度控制、可编程序控制器、供热网计算机控制系统; 第四篇电站辅机调节技术, 介绍辅机汽轮机驱动、液力耦合器传动及调速技术、变频调速技术、轴流式风机动叶调节技术; 第五篇其它新技术, 介绍燃气-蒸汽联合循环发电技术、燃煤磁流体发电技术、空冷发电技术、电厂化学水处理新技术、传感器新技术、除灰新技术、转速测量新技术、煤粉燃烧新技术、转动机械远程监测诊断技术、红外测温技术、抗蚀防腐技术、流量测量新技术、燃料集中控制运行技术、状态检修技术和等离子点火技术等。

本书可作为全国火力发电企业的管理干部、技术人员的培训教材, 也可作为发电专业师生的参考教材。该书由中国电力出版社 2008 年 04 月出版。

pressure and flash system being compared. The analytic results show that the improved dual-pressure circulation system has a maximum power output and the flash system, however, is simple in structure and flexible in operating modes. Both systems feature relatively wide applications. **Key words:** cement kiln, medium and low temperature waste heat utilization, genetic algorithm, dual-pressure cycle, flash cycle

再燃过程影响因素及燃尽特性研究 = **Study of the Influencing Factors and Burn-out Characteristics of a Re-burning Process**[刊, 汉] / SU Sheng, XIANG Jun, SUN Li-shi, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 507 ~ 512

With five kinds of coal, including two types of low volatile lean coal, serving as the main fuel, a detailed experimental study was conducted of the reburning process and fuel burn-out characteristics of gaseous fuels on a 36 kW one-dimensional boiler. The test results show that under same conditions, the higher the volatile content of the coal which serves as the main fuel, the greater the denitrification efficiency of the gaseous fuel in the reburning process. When a coal of low volatile content serves as the main fuel, a bigger proportion of gaseous reburning fuel and a long residence time in the reburning zone will be required to attain the same reburning denitrification efficiency as that of a coal with a high volatile content. The test results indicate that even if a low-volatile coal was used as a main fuel, when the gaseous reburning fuel proportion is 10% to 15%, the residence time in the reburning zone reaches 0.7 s to 0.9 s and the excess air factor in the reburning zone is between 0.8 and 0.9, the gaseous fuel reburning process can ensure that the burn-out rate of pulverized-coal particles will not drop significantly. In the meanwhile, under the precondition of the gaseous fuel being sufficiently burned up, a reburning denitrification efficiency of above 50% can be obtained. **Key words:** one-dimension boiler, coal particle, gas fuel, reburning, nitrogen oxide, carbon content of flying ash

600 MW 超临界机组掺烧印尼褐煤、越南无烟煤试验研究 = **Experimental Study of Mixed Combustion of Indonesia-originated Lignite and Vietnam-originated Anthracite in a 600 MW Supercritical Unit**[刊, 汉] / ZHAO Zhen-ning, ZHANG Qing-feng (North China Electric Power Science Research Institute Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100045), TONG Yi-ying, FANG Zhan-ling (Datang International Power Generation Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100053) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 513 ~ 518

An experiment was performed of burning four kinds of bituminous coal, including Shenhua-and-Tashan-originated coal, and Indonesia-originated lignite, in a mixed combustion of Vietnam-originated anthracite on a 600 MW supercritical boiler with its design coal rank being high quality bituminous coal under an opposed-firing mode. Through combustion adjustment, it can guarantee a proportion of 40% Vietnam-originated coal to burn steadily, the coking characteristics of Shenhua and Indonesia-originated coal can be significantly improved. However, the flying ash combustible content increases and the flying ash particle diameter becomes bigger. The test results show that the burn-out of anthracite is more difficult to attain than its ignition and steady combustion. The effective means to solve this problem and give due consideration to the safety of equipment items can be given as follows: the fineness of pulverized coal should be close to the requirement for anthracite combustion to the maximum possible degree while the primary air temperature and its feed rate should be controlled as required for easily-ignited coal ranks. In addition, the concentration of pulverized coal, swirling intensity, centralized oxygen supply, activity of the easily-ignited coal rank and boiler load etc. all exercise a relatively big influence on the combustion of the coal mixture. **Key words:** 600 MW supercritical unit, Indonesia-originated lignite, Vietnam-originated anthracite, mixed combustion

人字齿轮承载接触分析的模型和方法 = **A Model and Method for Load-bearing Contact Analysis of Herringbone Gears**[刊, 汉] / WANG Cheng, FANG Zong-de, ZHANG Shun-li (College of Electromechanical Engineering, North