

某电厂 350 MW 锅炉燃烧试验调整和防结焦试验研究

白洪森,郭金城,胡桢

(华中科技大学 能源与动力工程学院,武汉 430070)

摘要:为了解决某电厂锅炉结焦和 NO_x 排放超标问题,通过一系列针对性试验,精准掌握了该锅炉的运行状态,找出了锅炉严重结焦的原因。经优化调整,得到了锅炉的最佳运行状态,持续性的锅炉垮焦问题得到解决,NO_x 排放值也降低到锅炉所能达到的最佳水平,锅炉的燃烧试验调整和防结焦试验达到了预期效果。

关键词:燃烧试验;配煤;结焦;效率

中图分类号:TK 16 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2017)07 - 0028 - 04

某电厂位于湖北省,该厂有多组大型燃煤锅炉,为达到环保部低氮排放的要求,该厂对锅炉进行了低氮改造,改造后锅炉的燃烧器换成了哈尔滨锅炉厂生产的 LNASB 型低 NO_x 轴向旋流燃烧器。改造后的锅炉出现持续性垮焦问题,且 NO_x 排放不达标,对锅炉的安全运行产生极大影响。为解决上述问题,本文对锅炉进行各种性能试验,以期找到解决问题的办法。

1 设备概况

某电厂机组锅炉为 350 MW 超临界参数变压运行直流炉,单炉膛、一次中间再热、平衡通风、固态排渣、紧身封闭、全钢悬吊结构 II 型锅炉。改造方案:取消原来的 16 个燃尽风(OFA)喷口,原下 OFA 喷口封堵后,在上 OFA 喷口位置重新开 8 个 OFA 喷口,新 OFA 喷口和原 OFA 喷口相比略微增大,相当于 OFA 中心上移了一定距离。对原 OFA 风箱、风道进行改造,并在 OFA 风道上布置新的热补偿器和调节风门,改造后 OFA 风量最大可达总风量 30%,将主燃烧器区域内的过量空气系数控制在 0.9 以下,实现空气深度分级。

锅炉的燃烧器布置如图 1 所示,前墙布置 3 层,后墙布置 2 层。

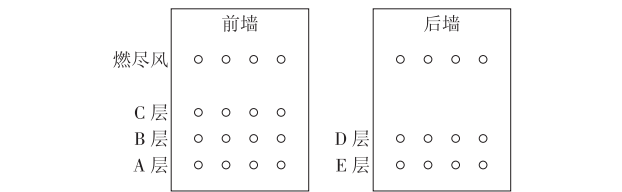


图 1 改造后锅炉纵剖面

锅炉主要设计参数见表 1(BMCR 为锅炉最大连续蒸发量;TMCR 为汽轮机最大连续功率)。

表 1 锅炉主要设计参数

项目	单位	BMCR	TMCR
热蒸汽质量流量	kg/s	1125.00	1071.00
过热蒸汽出口压力	MPa	25.40	25.28
过热蒸汽出口温度	℃	571.0	571.0
再热蒸汽质量流量	kg/s	900.60	854.95
再热蒸汽进口压力	MPa	4.47	4.24
再热蒸汽出口压力	MPa	4.28	4.06
再热蒸汽进口温度	℃	323.1	318.0
再热蒸汽出口温度	℃	569.0	569.0
给水温度	℃	289.8	286.2

锅炉的燃料特性参数见表 2。从元素分析可以看出,锅炉的燃料含碳量在 49.83% ~ 59.67% 之间,挥发分在 17.10% ~ 30.66% 之间,入炉煤成分复杂,增加了燃烧实验调整的难度。

2 锅炉出现的问题

近年来随着国内煤炭市场变化,电厂主要燃用灰熔点较高(>1400℃)的晋北煤和山煤,其中混有部分灰熔点较低的烟煤。由于配煤不合理、改造后调整试验不尽完善等原因^[2-3],锅炉在运行过程中主要出现了以下问题。

(1)结焦。在高负荷时,锅炉燃用目前煤种时,在前后墙中上层燃烧器喷口周围出现严重结焦,燃烧器区上部和折焰角之间的锅炉水冷壁上也有部分结焦。锅炉结焦较多,渣量较大,经常有大渣块掉落,引起较大的负压波动;不但造成锅炉屏超温和锅炉减温水量偏大,而且需要人工除焦,在渣块严重偏多时还曾出现锅炉掉焦灭火,严重威胁锅炉安全运行。

表 2 锅炉燃料特性参数

项目		设计煤种	校核煤种 I	校核煤种 II
元素分析	收到基碳分/%	55.80	49.83	59.67
	收到基氢分/%	2.83	2.55	3.06
	收到基氧分/%	4.53	2.60	6.22
	收到基氮分/%	0.74	0.65	0.78
	收到基硫分/%	1.19	2.20	0.54
工业分析	收到基水分/%	11.10	9.00	12.00
	收到基灰分/%	23.81	33.17	17.73
	干燥无灰基挥发分/%	24.89	17.10	30.66
	收到基低位发热值/(MJ·kg ⁻¹)	20.72	18.81	22.06
	可磨系数	76	71	77
	冲刷磨损指数	2.35	3.00	2.00

(2)NO_x 排放质量浓度高。在低氮燃烧器改造后,锅炉 NO_x 生成质量浓度达 500 mg/m³ (标态,下同)以上,严重影响了锅炉的排放达标^[4]。

(3)炉膛温度高。火焰最高温度在 1 500 ℃ 以上,炉膛温度从燃烧器至锅炉屏式过热器底部的降低梯度不正常,炉膛整体温度偏高。

3 问题分析及研究

结合煤质分析、锅炉设备和现场燃烧优化调整试验结果,分析锅炉结焦严重及其他问题的原因,为运行调整和设备改进提供参考。锅炉内壁的大面积结焦,和锅炉低氮改造后的燃烧调整不合适及锅炉配煤不合理有很大关系。锅炉低氮改造后,锅炉燃烧所使用的煤由于掺烧比例不确定的关系,原先的灰熔点较高的烟煤(平煤、山煤等)掺混了挥发分较高的烟煤,新混煤虽然易于燃烧,利于降低 NO_x 排放,但也更易结焦;锅炉结焦后,炉膛吸热减少,炉膛内温度上升,使得锅炉更易结焦;炉膛整体温度上升极大地影响了 NO_x 的生成,致使热力型 NO_x 生成大量增加,原本应该在还原区被还原的一部分 NO_x 无法还原,还导致选择性非催化还原反应(SNCR)的温度区间和锅炉的合适的温度区间不在最佳范围内,增加了调整难度。试验期间,对因锅炉掉大渣引起炉膛负压波动现象时的吹灰器吹灰情况进行了统计,发现负压波动时并未出现压力先变小后变大的过程,由此推测渣块较小,引起较大负压波动的渣主要分布在 OFA 与主燃烧器之间区域、OFA 上部(上数第 1 层吹灰器)。为了解决这一问题,有必要进行锅炉制粉系统设备诊断、混煤掺烧试验及运行优化调整试验,以准确掌握该锅炉的运行状态,

并通过优化调整措施,减轻锅炉结焦、降低 NO_x 质量浓度,保证机组的安全、经济、环保运行^[5]。

根据观察锅炉所发现的问题,本文主要进行了以下试验研究。

(1)燃烧调整试验。调整的主要目标是减轻锅炉炉膛结焦、降低 NO_x 质量浓度、降低炉膛整体温度。

(2)制粉系统试验。在每台磨煤机的风管做风速调平试验和煤粉细度 R₉₀ 调平试验,确保进入锅炉的每层一次风粉速度均匀,颗粒大小合适,以便于下一步试验得到更精确的数据。

(3)锅炉热效率试验。通过燃烧试验调整,尽量保证锅炉的效率不下降。

(4)混煤掺烧试验。对混煤掺烧进行分析,确定锅炉结焦是否和混煤掺烧有较大关系。

4 燃烧调整试验

摸底阶段试验,主要在 210 MW 和 290 MW 负荷段对炉膛温度进行测试,测试结果显示 2 个负荷段下炉膛温度相差不大,最高温度均在 1 500 ℃ 以上,选择性催化还原技术(SCR)装置入口 NO_x 质量浓度在 500 mg/m³ 以上,经锅炉看火孔观察水冷壁结渣情况,除 A,E 层燃烧器区域锅炉水冷壁外,其余部位均布满一层渣块。摸底结束后,锅炉进行制粉系统试验。

4.1 制粉系统试验

在进行锅炉的燃烧调整试验前,须保证该锅炉的一次风喷口风速均匀,煤粉粗细偏差较小,故对制粉系统进行了磨煤机出口一次风粉管风速调平、R₉₀ 调整试验。调平结果见表 3。

表 3 风速调平结果

项目	调整前		调整后	
	风速/(m·s ⁻¹)	偏差/%	风速/(m·s ⁻¹)	偏差/%
A 磨煤机	29.31	-2.00	25.87	3.25
	32.85	9.82	24.76	-1.19
	26.97	-9.84	25.26	0.78
	30.52	2.02	24.35	-2.84
B 磨煤机	28.00	-2.86	满足要求,未做调整	
	29.65	2.86		
	29.86	3.59		
	27.79	-3.59		
C 磨煤机	28.42	-0.03	满足要求,未做调整	
	28.12	-1.08		
	28.33	-0.36		
	28.85	1.47		

续表				
项目	调整前		调整后	
	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	偏差/%	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	偏差/%
D 磨煤机	23.57	0.35	满足要求,未做调整	
	23.29	-0.84		
	22.79	-2.98		
	24.3	3.47		
	23.64	0.99		
E 磨煤机	17.47	-25.4	28.67	1.36
	26.45	12.98	28.57	1.02
	26.09	11.43	27.89	-1.38
			28.00	-1.00

经过调平试验后,A,E 磨煤机各风管风速偏差值均较小,故而可以进行 R_{90} 调平试验。首先对各磨煤机 R_{90} 进行了摸底,结果见表 4。

表 4 R_{90} 摸底结果

项目	A	B	C	D	E
给煤量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	28.1	39.0	20.3	30.0	33.9
风量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	69.0	76.0	76.0	62.0	60.0
加载力/MPa	8.75	8.87	8.87	8.89	8.36
$R_{90}/\%$	21.3	33.8	32.0	34.2	23.5

从表 4 可以看出,其中,B,D 磨煤机 R_{90} 偏粗,B 磨煤机 R_{90} 达到 33.8%,D 磨煤机 R_{90} 达到 34.2%,在进一步进行燃烧调整试验前,需要对 B,D 磨煤机进行 R_{90} 调整。调整过程及结果如表 5、表 6。

表 5 B 磨煤机 R_{90} 调整结果

工况	给煤量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	风量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	加载力/ MPa	$R_{90}/\%$
工况 1	39.0	76.0	8.87	33.8
工况 2	39.0	76.0	8.87	34.8
工况 3	39.0	76.0	8.87	41.0
工况 4	34.2	76.0	7.55	28.8
工况 5	34.9	75.5	8.00	34.4
工况 6	35.0	76.3	9.50	30.0
工况 7	35.3	85.0	9.38	33.2
工况 8	35.1	70.1	9.38	32.4

调整过程中,D 磨通过增加磨煤机加载力,可以将 R_{90} 降到 25% 左右,但 B 磨受限于磨煤机加载力,始终无法将 R_{90} 降低。尽量将 B 磨 R_{90} 调到最佳能达到的程度,进行下一步实验。

4.2 锅炉燃烧调整试验

锅炉的调整思路主要为推迟燃烧器区域煤粉着火,防止由于煤粉过早着火引起的燃烧器喷口结焦、

表 6 D 磨煤机 R_{90} 调整结果

工况	给煤量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	风量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	加载力/ MPa	$R_{90}/\%$
工况 1	35.0	56.0	7.98	30.8
工况 2	35.0	56.0	7.98	30.7
工况 3	35.0	56.0	7.98	31.5
工况 4	35.0	56.0	9.00	28.0
工况 5	35.0	56.0	10.40	25.6
工况 6	35.0	56.0	6.50	30.0
工况 7	35.0	73.0	9.51	31.2

燃烧器区域热负荷过高、煤粉气流贴墙等问题,调整的手段也围绕这个思路展开,具体包括减小 A,B,D,E 燃烧器外二次风旋流强度,提高 D,E 层燃火,防止由于煤粉过早着火引起的燃烧器喷口结焦、燃烧器区域热负荷过高、煤粉气流贴墙等问题,调整的手段也围绕这个思路展开,具体包括减小 A,B,D,E 燃烧器外二次风旋流强度,提高 D,E 层燃烧器一次风速,降低运行氧量和减小 B,D 层燃烧器风箱开度等措施。试验一共进行了 14 个工况,具体见表 7。

表 7 锅炉燃烧调整工况

工况	燃烧试验参数
T1	摸底工况(75% BMCR,内二次风 50% 开度,外二次风 50% 开度)
T2	75% BMCR,3.5% 氧量
T3	75% BMCR,3.0% 氧量
T4	75% BMCR,2.0% 氧量
T5	75% BMCR,2.5% 氧量
T6	75% BMCR,A,B,D,E 层风开度统一调至 50%
T7	75% BMCR,后墙 D,E 层一次风风量增大至 70 t/h ,与 A,B 层保持一致
T8	75% BMCR,调整内二次风基准工况
T9	75% BMCR,内二次风旋流开度由 50% 调至 100%
T10	75% BMCR,内二次风旋流开度由 100% 调至 0
T11	85% BMCR,内二次风开度 100%,氧量 3.0%
T12	95% BMCR,内二次风开度 50%,氧量 3.0%
T13	最佳工况,氧量 2.5%
T14	80% BMCR,1.5% 氧量,停 E 磨煤机,启 C 磨煤机

经过 14 个工况的调整,得到了锅炉各工况下炉膛温度的变化情况。根据试验情况,炉膛温度在各工况变化不大,这是由于在炉膛已经严重结渣的情况下,燃烧状态的调整对炉膛温度的变化是个漫长过程,试验结果无法立即显现。随着工况试验的进行,锅炉负荷从稳定状态逐渐升高,锅炉负荷越高,氧量越低, NO_x 质量浓度相应增加;当停 E 磨煤机、启 C 磨煤机时,锅炉的 NO_x 质量浓度突然升高到

800 mg/m³ 以上,说明燃烧中心上移对 NO_x 的排放值有较大影响。

4.3 锅炉热效率试验

锅炉的低氮燃烧可能会降低锅炉热效率,故本次试验挑选了具有代表性的 4 组锅炉负荷(350 MW,263 MW,240 MW,185 MW),测定了各个负荷段的锅炉热效率。

在 350,263,240,185 MW 工况下,实测锅炉热效率为 93.56%,93.82%,94.01%,94.03%,除 350 MW 工况外,均高于相应负荷下的锅炉热效率设计值。炉膛出口氧量分别为 3.20%,3.49%,3.25%,5.35%,飞灰含碳量分别为 3.21%,2.35%,2.23%,2.02%。随着机组出力增加,炉膛出口氧量逐步降低,锅炉飞灰含碳量逐步上升,在当前煤质下,锅炉炉膛出口氧量控制比较合理,飞灰含碳量除 350 MW 工况下偏高,其余工况下均较好^[6]。

4.4 混煤掺烧试验

为了提高经济性及降低 NO_x 排放,锅炉长期使用的煤种开始掺烧一定比例印尼煤,印尼煤的特性是高水分、低灰分、低硫分、高挥发分、灰熔点较低^[7]。在火电厂中,每台锅炉及其辅助设备都是依据一定的煤质特性设计的,锅炉只有燃用与设计煤质接近的煤,才具有最好的经济性。因此有必要制定合理的切实可行的配煤方案,使锅炉在燃用与设计煤质相接近的条件下运行,以达到最佳的经济性和安全性^[8]。

对锅炉机组进行混煤掺烧试验,试验统计数据见表 8。

表 8 混煤掺烧试验统计数据

项目	B,D 磨煤机配 烧印尼煤	D 磨煤机 配烧贫煤
主蒸汽质量流量/(t·h ⁻¹)	822.8	798.1
主蒸汽压力/MPa	23.99	23.47
主蒸汽温度/℃	567.0	565.9
给水温度/℃	267.7	267.7
送风机入口风温/℃	14.9	12.7
排烟温度/℃	120.0	112.1
实测飞灰可燃物质量分数/%	1.05	1.71
应用基灰分/%	15.88	26.24
全水分%	16.98	9.84
排烟热损失百分比/%	4.75	4.39
化学不完全燃烧热损失百分比/%	0.86	0.86
机械不完全燃烧热损失百分比/%	0.31	0.74
散热损失百分比%	0.22	0.23
锅炉热效率%	93.86	93.78

在混煤掺烧试验中发现了如下几个问题:因印尼煤挥发分高,发生掺烧印尼煤层燃烧器喷口处结

焦现象;掺烧印尼煤磨煤机运行时,因印尼煤水分大,磨煤机出力下降很多,增加了其他磨煤机的负担^[9]。

混煤掺烧试验证实了少量掺烧印尼煤可降低飞灰可燃物含量,锅炉热效率上升。混煤掺烧的目的是增加入炉煤的易燃性,降低 NO_x 排放值,合适的掺烧可以达到很好的效果,但是混煤掺烧的比例需要繁琐的长期试验来确定;试验过程中,混煤掺烧比例不完美可能也是导致锅炉结焦的另一个重要原因。

5 结论

通过以上各个试验,得到以下结论。

(1)锅炉经过燃烧调整试验,对比结果,在 95% BMCR 工况时,NO_x 质量浓度稳定在 300 mg/m³ 左右,调整结果和锅炉调整前相比已经有较大的降低,限于锅炉的结焦问题尚未完全解决,这个结果已经是目前能达到的最佳水平。

(2)锅炉经过磨煤机 R₉₀ 调平试验,每台磨煤机出口的 4 根风管风速偏差较小,所有磨煤机 R₉₀ 平均偏差在合理范围内。

(3)锅炉经过燃烧调整试验,锅炉的持续性垮焦问题得到解决,锅炉的结焦问题得到控制,限于锅炉的混煤掺烧等原因,目前通过技术性手段无法完全避免。

(4)考虑到锅炉目前较高炉膛温度及较高的 NO_x 质量浓度,运行氧量在 2.5%~2.8% 之间是较好的选择。

(5)中高负荷时,锅炉一次风量不应低于 70 t/h,A,B,D 层二次风箱开度 50%,E 层二次风箱开度 75% 为比较理想的方案。

(6)经过一系列的试验,发现锅炉的内部仍缺少部分相应的吹灰器,建议标高为 37.25,25.05 m 处两侧前各加装 1 只吹灰器,标高 37.00~46.00 m 四面墙之间的合适位置,加装 16 只吹灰器(同一层)。

(7)考虑到炉膛目前实际最高温度仍在 1 500℃ 以上,电厂应加强对入炉煤监控,降低低灰熔点煤比例,确保入炉煤灰熔点在 1 400℃ 以上。

参考文献:

[1]火电厂大气污染排放标准:GB 13223—2011[S].
[2]杨忠灿,姚伟.电厂锅炉变煤种掺烧问题研究[J].中国电力,2010,43(11):42-45.
[3]李寒旭.配煤降低高灰熔融性淮南煤灰熔点的研究[J].煤炭学报,2002,27(5):529-533. (下转第 35 页)

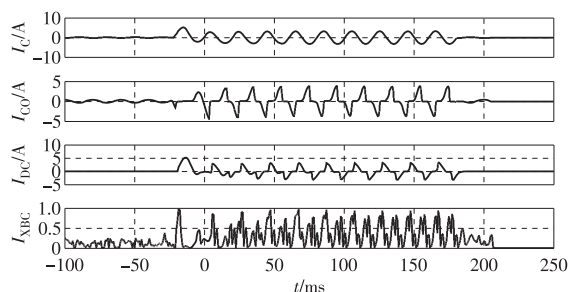


图 6 F1 点 C 相饱和和故障波形

障,故障持续 60 ms 后又发生 F2 点故障,F1 和 F2 故障同时存在的 C 相饱和故障波形图。图中: I_C 为 M 侧 C 相电流; I_{CO} 为 N 侧 C 相电流; I_{DC} 为 C 相差流; I_{XBC} 为 C 相的谐波含量曲线。在故障前 60 ms 内,在每一个差流过零点附近区域,差流谐波含量都 > 谐波含量系数 2 (k_2),则认为是区外故障,闭锁差动保护。60 ms 后又有了 F2 故障,则在 60 ms 后的第 2 个差流过零区域内,谐波含量都 < 谐波含量系数 2 (k_2),则开放差动保护。

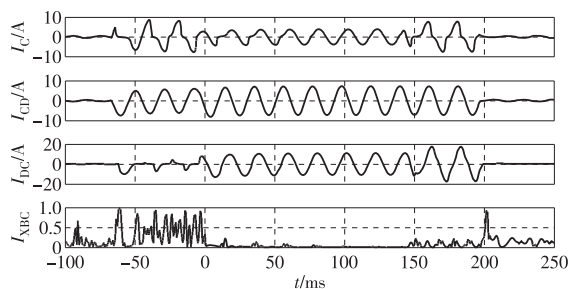


图 7 F1 点转 F2 点 C 相故障波形

5 结束语

本文提出了基于差流谐波含量的差动保护方法,该方法基于保护启动区间和差流过零区间的差流谐波大小来确定谐波的计算数据框,通过新的数据框重新计算差流谐波含量来确定故障的类型。通过 RTDS 仿真证明,该方法可行、有效,且具有较强的适应性。

参考文献:

[1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3 版. 北京:

(上接第 31 页)

- [4] 王学栋. 燃煤锅炉氮氧化物排放特性研究及烟气脱硝催化剂研制[D]. 山东:山东大学,2009.
- [5] 候昭毅. 基于“MBEL”W 火焰锅炉结焦现象原因分析及对策[J]. 锅炉技术,2010,41(6):37-41.
- [6] 周新刚. 燃煤电站锅炉炉灰含碳量预测模型研究[D]. 山东:山东大学,2006.
- [7] 马巧春,周力庆,沈琦. 华能南通电厂 350 MW 机组锅炉掺烧印尼煤试验及分析[J]. 热力发电,2003,32(11):10-12.

中国电力出版社,2005.

- [2] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [4] 索南加乐,宋国兵,许庆强. 任意长度数据窗幅频特性一致的正交相量滤波器的设计[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):45-49,59.
- [5] 杨经超,尹项根,陈德树,等. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):71-77.
- [6] 胡玉峰,陈德树,尹项根. 采样值差动及其应用[J]. 电力系统自动化,2000,24(10):40-44.
- [7] 陈德树,尹项根,张哲,等. 故障分量差动保护与故障变化量差动保护[J]. 电力系统自动化,2008,32(9):39-41,87.
- [8] 袁荣湘,陈德树,马天皓,等. 基于故障分量的采样值电流差动保护研究——原理分析[J]. 继电器,2000,28(3):9-11,14.
- [9] 郑建勇,巫海钢. 短数据窗傅氏算法在微机保护装置中的应用[J]. 电力系统自动化,2000,24(18):49-52,60.
- [10] 袁宇波,陆于平,刘中平. 基于相量法的短数据窗快速滤波算法[J]. 电力系统自动化,2004,28(3):58-63.
- [11] 王毅非. 最小二乘算法的研究与改进[J]. 继电器,2000,28(3):5-8.
- [12] 邵能灵,朱佳杰. 小矢量算法在发电机继电保护中的应用分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(13):51-54,67.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

康丰(1978—),男,湖北汉川人,工程师,从事微机保护的软件应用与开发等方面的工作(E-mail:feng-kang@sac-china.com)。

王闰羿(1990—),男,江苏宜兴人,助理工程师,从事微机保护的软件应用与开发等方面的工作。

张玮(1980—),男,江苏南京人,工程师,工学硕士,从事微机保护的软件应用与开发等方面的工作。

刘庆海(1987—),男,江苏盐城人,助理工程师,从事微机保护的软件应用与开发等方面的工作。

杨青松(1990—),男,江苏盐城人,工程师,工学硕士,从事微机保护的软件应用与开发等方面的工作。

[8] 林介团. 电厂燃煤混配模型的建立及分析[J]. 广东电力,2008,21(4):25-27,31.

[9] 王静. 某电厂褐煤和印尼煤掺烧经验介绍[J]. 制冷空调与电力机械,2011,32(6):79-81.

(本文责编:刘炳锋)

作者简介:

白洪森(1990—),男,河北沧州人,在读硕士研究生,主要研究方向为热能工程、锅炉脱硝脱汞及锅炉燃烧性能优化(E-mail:469066430@qq.com)。