

表 1 ASME PTC6 与 ASME PTC46 对比

序号	内容	PTC6-1996	PTC46-1996
1	试验目的	测定汽机本体的热力性能,包括热耗和出力。	测定整个电厂的最终性能指标,即供电煤耗和上网功率。
2	试验边界	限定为汽机本体、加热器、冷凝器、抽汽管道、泵、发电机等均在试验系统之外,后者性能的好坏要对汽机的性能进行计算修正。	以整个发电厂为试验边界,内部主辅机设备及管道之间不作区分,因此也不作修正,只对整个发电厂的边界条件的改变作修正。
3	试验时间	推荐最好在首次并网后 8 周内进行,或做基准性试验以判断机组是否性能下降。	没有具体规定(按合同要求)。
4	试验基准	以阀点为基准,作阀点性能曲线以验证性能保证值。	同 PTC6
5	基本测量方法	通过对电功率和主凝水流量的测量,用热平衡方法计算抽汽量,进而得出给水流量、主汽流量和再热汽流量,计算试验热耗,再对热耗和出率进行参数和系统修正。	测量上网电功率和输入锅炉的燃料量。对煤粉炉直接测量锅炉的燃煤量不够准确,要求通过对锅炉输入热量的测量,再除以锅炉效率。而锅炉效率的测量仍按 ASME PTC4.1 热损失法。
6	试验总精度要求	<0.25%(汽轮机部分)	热耗<3%(煤粉炉) <1.5%(燃气或燃油) 出力<1%
7	不明泄漏量	<0.1%	不作具体规定,但要求作系统隔离。但对影响正常运行的系统不允许隔离和调整。
8	修正范围	包括进汽温度、压力、再热汽温度、压损、排汽压力、功率因素、加热器端差、抽汽管道压损、泵的焓升、冷凝器过冷度、减温水流量等。	燃料特性、循环水温度、空气温度、湿度、燃料温度、功率因素等。
9	试验次数	同一工况不少于 2 次,相容性在 0.25% 以内为合格。	不强制要求,但重复试验可以验证试验结果的可靠性和整个系统的稳定性。
10	试验持续时间	>2h	>2h(煤、油、气炉) >4h(流化床) >1h(联合循环)
11	数据采集次数	根据各类参数的重要性和波动的大小有具体规定,一般不少于约 30 次。	不少于 30 次,无其它特殊要求。
12	电功率测量	测发电机输出端功率,功率表和电能表均可,要求 0.1 级功率表或电能表,0.3 级电流电压互感器。	测主变输出功率,要求 0.2 级精度的功率表或电能表,0.3 级电流电压互感器。也可测发电机输出功率,再减去厂用电和主变损耗。
13	主流量测量	对主凝水进行测量,再推算给水、主蒸汽及再热蒸汽流量。主凝水测量用喉部取压低 $\beta$ 长颈式喷嘴。	同 PTC6 一致
14	压力测量	重要参数用 0.1 级压力传感器,次要参数用 0.25 级压力传感器。	同 PTC6 一致 但不直接参与结果计算,只是监视各设备运行状况,以证明试验有效的参数可以用厂用仪表。
15	温度测量	用热电偶、热电阻等均可,要求误差不大于 1°F(0.5K)	用热电偶、热电阻均可,对:重要参数,误差<1°F 次要参数,误差<3°F 重要参数温度在 200°以下时,要求误差<0.5°F
16	试验结果裕度	试验结果要求做不确定度分析,但结果本身无裕度,认为裕度是商业条款。	同 PTC6
17	老化问题	如不能在 8 周内进行试验,可按基准试验或推荐的方法进行老化修正。	无明确规定

精度也较高,结果也更符合实际运行情况。当然,各主机设备的分项考核仍可分别进行。

(4) 机组常规大修前后的性能试验,以及各种系统节能改造前后的性能测试,也宜采用 ASME PTC46 规程,或规程推荐的部分方法,以能更好地反映机组大修或改造后的真实效果。

(5) 目前,国内发电机组的供电煤耗,一般是按机、电、炉各分项指标及管道效率综合而成,但分项测试不同步,试验的要求和边界条件又不一致,会导致结果与实际值有较大的差异。原电力部曾经颁发过用入炉煤量计算发供电煤耗的方法(参考文献[3]),但关键问题还是入炉煤量的准确

计量,实际应用难度较大。建议可采用或部分采用 ASME PTC46 规程推荐的方法。

#### 参考文献:

- [1] ASME PTC6-1996, Performance Test Code 6 on Steam Turbine[S].
- [2] ASME PTC46-1996, Performance Test Code on Overall Plant Performance [S].
- [3] 电力部. 火力发电厂按入炉煤量正平衡计算发供电煤耗的方法[S]. 1993.
- [4] 电力部. 火力发电厂基本建设工程启动及竣工验收规程[S]. 1996.

## The Characteristics and Applied Limits for the Test Code ASME PTC6 and ASME PTC46

WANG Xing-ping

(Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** This paper presents a detailed account of steam turbine test objective, method, boundary provided in the test code ASME PTC6 and ASME PTC 46, presents also mainly the characteristics and methods of the code ASME PTC46, and based on the domestic actual situation, puts forward some suggestions of the test codes application. Table 1 and refs 4.

**Key words:** power plant; steam turbine; performance test; coal consumption

(上接第 2167 页)

## Experimental Research on Nitric Oxide Produced in the Process of Volatile Combustion

GUO Xing-ming, HUI Shi-en, CHE De-fu, XU Tong-mo

(School of Energy and Power Engrg., Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Proceeding from the knowledge of the functional forms of nitrogen in coal it should be possible to draw conclusions on the mechanism of its release during volatiles combustion. Combustion experiments were carried out with pulverized Tongchuan coal in a temperature range from 1173 to 1673K. The gases produced during volatiles combustion were sent into MSI Compact Analyzer and nitric oxidation concentration of gases was determined by the instrument too. It is found that the appearance time of concentration peak value of nitric oxidation resulted from volatile combustion of Tongchuan coal will be brought forward with the increasing combustion temperature. There are at least two types nitrogen functionalities existing in volatiles of Tongchuan coal. After 1573K, the continuous rise of combustion temperature will keep Fuel Nitric Oxidation from production though it is propitious to produce Thermal Nitric Oxidation. This investigation contributes to perfect further the theory of coal combustion and provides an essential base in theory for effectively controlling nitrogen oxide formation in the process of coal combustion. Figs 14 and refs 10.

**Key words:** coal; combustion; volatile; nitrogen

· 锅炉技术 ·

文章编号:1000-6761(2003)01-2139-04

# 动态控制锅炉低温腐蚀和节能的有效措施

邵国桢<sup>1</sup>, 张兴无<sup>2</sup>, 赵之军<sup>3</sup>, 朱其远<sup>3</sup>

(1. 上海锅炉厂, 上海 200240; 2. 华北电力设计院, 北京 100011;

3. 上海发电设备成套设计研究所, 上海 200240)

**摘 要:**从控制原理、系统设计、锅炉的可控性、暖风器的可控性等方面论述了一种动态控制锅炉低温腐蚀的有效措施及其经济性。图 1 表 4 参 3

**关键词:**电站锅炉; 低温腐蚀; 动态控制

**中图分类号:**TK 223.7 **文献标识码:**A

## 0 前言

一般而言, 锅炉运行中冷端受热面总是存在不同程度的低温腐蚀, 同时又由于锅炉煤种多变、环境温度大幅度变化使得这种低温腐蚀处于不确定状态, 时好时坏。

目前, 在锅炉设计中, 用户提供设计煤种和校核煤种, 以期尽量覆盖运行中的煤种变化范围; 同时锅炉设计师再留出一定的设计余量。由于这些措施是静态的, 所以若在腐蚀严重的工况满足了低温腐蚀的要求, 则在腐蚀不严重的工况下必然导致不必要的浪费。

因此, 采用动态的锅炉低温腐蚀控制措施, 便可以在运行中应对各种不确定的低温腐蚀工况, 在控制锅炉低温腐蚀的前提下, 取得最经济的运行效果。

下面介绍一种能在电厂运行中动态控制锅炉低温腐蚀、实现机组最经济运行的措施。

## 1 控制原理

锅炉的低温腐蚀是由于烟气中的水蒸气和酸蒸汽结露在锅炉低温受热面上引起, 所以控制结露便可以控制低温腐蚀。

结露是由于锅炉低温受热面金属壁温低于烟气中的酸露点而产生, 所以控制锅炉冷端壁温便

可以控制结露。

锅炉的冷端壁温取决于锅炉的排烟温度和进风温度, 对于 1 台已经运行的锅炉, 进风温度和排烟温度形成一定的对应关系, 所以通过控制锅炉进风温度, 便可以实现控制锅炉的排烟温度, 进而控制锅炉的冷端壁温。

在锅炉运行中量化煤种变化和环境温度变化对锅炉冷端壁温的影响, 并在运行中发出调节指令, 便可以实现锅炉低温腐蚀的动态有效控制, 并在控制低温腐蚀的前提下取得最经济的运行效果。

## 2 系统设计

图 1 示出了锅炉低温腐蚀程控系统图。主要由汽源部分和调节部分组成, 要求锅炉的排烟温度具有可控性, 要求暖风器具有可调性。

### 2.1 汽源部分

图 1 中的汽源部分汽轮机抽汽参数和汽轮机参数取自上海汽轮机有限公司 300MW 机组数据, 暖风器汽源取自 2 个抽汽口(山东黄台火力发电厂 6 号机组设计实例), 机组在 50% 负荷以上运行时, 用低压缸抽汽口抽汽; 机组在负荷小于 50% 及启动运行时, 由于汽轮机滑压运行, 图示低压缸抽汽口压力小于 0.16MPa, 可能蒸汽压力太低, 要用厂用辅助蒸汽。

采用 2 个汽源是为了尽量提高机组的运行经济性, 当机组在 50% 负荷以上运行时, 低压缸抽汽口抽汽完全可以满足暖风器加热和调节要求, 与辅助蒸汽相比, 这部分抽汽量的回热效率提高

收稿日期: 2002-04-15 修订日期: 2002-09-10

作者简介: 邵国桢(1960—), 男, 高级工程师, 上海锅炉厂有限公司设计处副处长。主要从事电站锅炉的设计和调试工作。

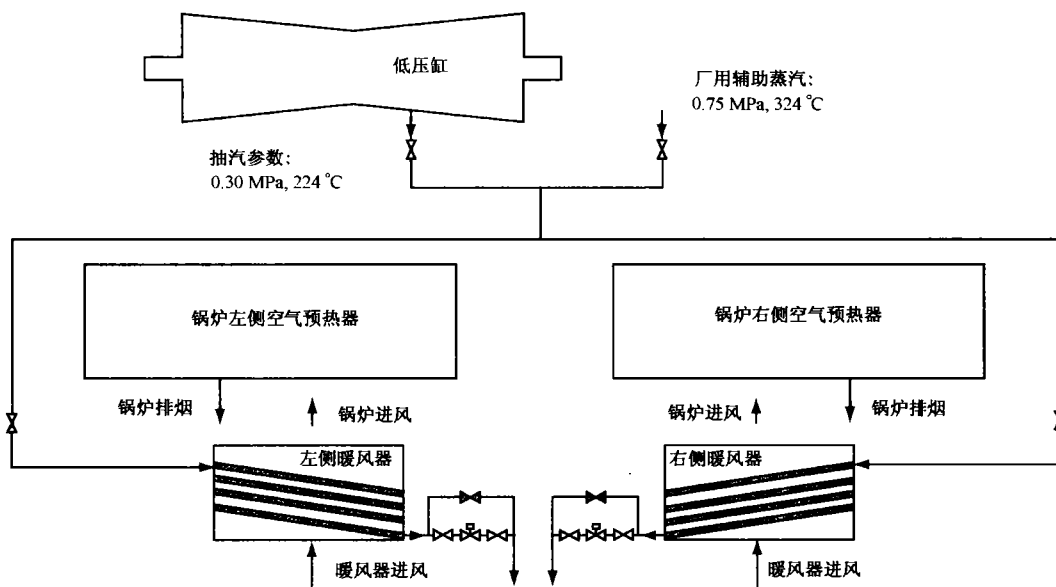


图1 锅炉低温腐蚀动态程控系统图

25%，相当于机组发电煤耗平均下降 0.5 g 标煤/kWh。

## 2.2 调节部分

图1中的调节部分由上海博创热能机械有限公司开发研制的专利产品——电站锅炉排烟温度程控装置完成，专利申请号为 01126330。参考文献[1]详细讨论了锅炉暖风器疏水侧调节的优越性，表1列出了1台300MW机组的锅炉暖风器采用蒸汽侧调节和疏水侧调节的机组发电煤耗计算结果。

表1 蒸汽侧调节和疏水侧调节的经济性对比计算结果

锅炉进风温度 (°C)	锅炉排烟温度 (°C)	锅炉效率 (%)	蒸汽侧调节, 煤耗 (g 标煤/kWh)	疏水侧调节, 煤耗 (g 标煤/kWh)	发电煤耗改变量 (g 标煤/kWh)
20	130	91.63	313.84	313.84	0
24	127	91.79	313.25	312.95	-0.3
29	124	91.95	312.66	312.06	-0.6
33	121	92.14	312.07	311.18	-0.89
37	118	92.32	311.48	310.3	-1.18

注：表1计算基准为：机组负荷100%，蒸汽侧调节的汽源参数 0.75 MPa/324°C，疏水侧调节的汽源参数 0.3 MPa/224°C，锅炉冷端壁温维持 85°C。

从表1可见：疏水侧调节具有很好的节煤效益，能使机组发电煤耗平均下降 0.6 g 标煤/kWh 左右。

## 2.3 系统优越性

图1所示系统由于汽源部分和调节部分的设计充分考虑了机组效率，所以具有良好的运行经济性，表2列出了与热风再循环相比的机组发电煤耗计算结果。

所谓热风再循环方式，指空气预热器出口的热风部分返回空气预热器空气入口，与冷空气混合提高温度后再进入空气预热器。

从表2所列计算结果可以得出以下3个结论：

(1) 热风再循环方式的锅炉效率略有下降，原因是热风带入热量属于锅炉内部热量，对锅炉效率无影响；而图1所示系统中热风带入热量属于外界带入热量，对锅炉效率有影响，但二者相差不大。

(2) 图1所示系统与热风再循环方式相比，具有明显的节煤效益，平均能使机组发电煤耗下降 0.7 g 标煤/kWh，这完全是抽汽回热使机组循环热效率提高的效果。

(3) 在表2所列数据中，热风再循环方式的机组发电煤耗与表1所列的暖风器蒸汽侧调节的机组发电煤耗基本相当，这一点与传统观念吻合，即传统暖风器主要用来控制低温腐蚀，对效率影响不大。

## 3 锅炉排烟温度的可控性

锅炉排烟温度的可控性定义为：锅炉设计排烟温度对应的设计进风温度高于当地最高环境温度。这样，在任何环境温度工况下，锅炉排烟温度

表 2 图 1 所示系统与热风再循环方式相比的机组煤耗计算结果

锅炉进风温度(°C)	锅炉排烟温度(°C)	图 1 所示系统		热风再循环方式		机组煤耗改变量(g/kWh)
		锅炉效率(%)	发电煤耗(g/kWh)	锅炉效率(%)	发电煤耗(g/kWh)	
20	130	91.63	313.84	91.63	313.84	0
21	127	91.79	312.95	91.79	313.3	-0.35
29	124	91.95	312.06	91.95	312.77	-0.71
33	121	92.14	311.18	92.1	312.23	-1.05
37	118	92.32	310.3	92.26	311.69	-1.39

注:表 2 计算基准为机组负荷 100%, 锅炉冷端壁温维持 85°C。

都处于可控状态且能够实现在有效控制低温腐蚀的前提下机组运行经济性最好。我国各地的最高环境温度一般低于 40°C。

锅炉的排烟温度具有可控性,是在运行中实现自动按要求控制锅炉排烟温度的必要条件。否则,在夏季由于锅炉排烟温度太高会严重影响机组效率。对于水分子含量和硫分含量较高的煤种,烟气酸露点温度较高,要求的冷端壁温也较高,一般可以做到锅炉的排烟温度具有可控性。

但对于水分含量和硫分含量较低的煤种,烟气酸露点温度较低,要求的冷端壁温也较低,一般只能作做到锅炉的排烟温度具有半可控性(设计进风温度 20°C~40°C)。在这种情况下,只有在环境温度低于锅炉设计进风温度的时候才能投运图 1 所示系统,取得良好的运行效果;而在环境温度高于锅炉设计进风温度的时候,图 1 所示系统解列,锅炉运行排烟温度随着环境温度的升高而自然升高,虽然锅炉冷端壁温得到了不必要的提高,但机组运行经济性变差。

只要锅炉的排烟温度具有可控性,图 1 所示系统便能在一定范围内修正锅炉热力计算的误差,抵消煤种变化的影响,实现运行中自动按要求控制锅炉排烟温度,在控制锅炉低温腐蚀的前提下取得最好的运行经济性。例如,设计煤种要求的锅炉冷端壁温为 85°C,由此确定的锅炉排烟温度为 120°C,进风温度 36°C;由于热力计算误差或其它原因,实际运行中锅炉排烟温度为 125°C,则可将锅炉进风温度降低到 32°C,相应的锅炉排烟温度调整到 123°C,维持冷端壁温不变。

下面以浙江嘉兴电厂由上海锅炉厂生产的 SG-1025/18.3-M830 型 300MW 控制循环锅炉的设计煤种为例,计算该锅炉选择不同排烟温度设计值的经济性和可控性:

煤种:  $C_y = 60.33\%$ ,  $H_y = 3.62\%$ ,  $O_y =$

$9.94\%$ ,  $N_y = 0.7\%$ ,  $S_y = 0.41\%$ ,  $W_y = 14\%$ ,  $A_y = 11\%$ ,  $Q_{dwy} = 14720\text{kJ/kg}$ 。

机组功率:300MW; 锅炉给水温度:273°C;

汽轮机主蒸汽压力/温度/流量:16.67MPa/538°C/908.19t/h;

汽轮机再热蒸汽出口压力/温度/流量:3.533MPa/318°C/746.1t/h;

汽轮机再热蒸汽进口压力/温度/流量:3.234MPa/538°C/746.1t/h;

锅炉主蒸汽压力/温度/流量:17.3MPa/540°C/908.19t/h;

锅炉再热蒸汽进口压力/温度/流量:3.5MPa/316°C/746.1t/h;

锅炉再热蒸汽出口压力/温度/流量:3.3MPa/540°C/746.1t/h;

计算结果列于表 3 和表 4:

从表 3 所列计算结果可见:5 个设计工况的锅炉进风温度和排烟温度的组合维持相同的锅炉冷端壁温 85.7°C,即锅炉低温腐蚀情况相同,但锅炉排烟温度的可控性不同,机组的发电煤耗也不同。锅炉排烟温度的可控性越好,机组的发电煤耗也越低。例如:与原设计锅炉进风温度 20°C 相比,当锅炉进风温度提高到 36°C 时,锅炉的排烟温度在环境温度低于 36°C 的情况下完全具有可控性,同时机组的发电煤耗也下降节 3g 标煤/kWh,以机组年运行 7000h 计算,每年节约标煤 6300t。

当然,随着锅炉设计排烟温度降低、进风温度升高,锅炉的受热面增加,锅炉制造成本也相应增加,有关锅炉的计算结果列于表 4。

从表 4 可见:以比较设计工况 4 为例,当锅炉进风温度设计取值 36°C 时,锅炉受热面的最小温差—空气预热器进口烟温与出口风温之差约为 25°C,省煤器出口烟温与进口水温之差约为 44°C,

表 3 不同锅炉排烟温度可控性对应的机组煤耗计算结果

项目	实际设计 工况	比较设计 工况 1	比较设计 工况 2	比较设计 工况 3	比较设计 工况 4
空预器进风温度(°C)	20	24	28	32	36
空预器出风温度(°C)	310	~310	~310	~310	~310
锅炉排烟温度(°C)	131.7	128.9	126.1	123.3	120.5
锅炉冷端壁温(°C)	85.7	85.7	85.7	85.7	85.7
锅炉效率(%)	92.9	93.02	93.18	93.34	93.5
机组煤耗(g 标煤/kWh)	297.18	296.4	295.6	294.86	294.1
煤耗改变量(g/kWh)	0	-0.78	-1.55	-2.32	-3.08
锅炉燃煤量(t 原煤/h)	115	114.5	114.2	113.9	113.6
暖风器汽耗量(t/h)	0	1.9	3.82	5.71	7.6
主蒸汽流量(t/h)	908.17	909.1	910	910.9	911.8
再热蒸汽流量(t/h)	746.1	746.86	747.6	748.3	749

传热过程可以完成。虽然受热面数量大幅增加,预计锅炉价格将会相应增加 400 万元左右,但每年可节约标准煤 6300t 左右,以标准煤价 300 元/t 计算,投资回收期 2~3 年。

#### 4 暖风器的可调性

暖风器的可调性定义为:在任何外界空气温度条件下,暖风器都能将进风加热到锅炉要求的进风温度送入锅炉。

从表 3 计算结果可见:如果当地最低温度为 -10°C,暖风器设计温升 46°C,则在环境温度低于 36°C 的气候条件下能满足锅炉设计进风温度 36°C 的要求。而对于暖风器而言,设计温升 46°C 是容易做到的,成本变化不大,暖风器阻力小于 0.5kPa。

表 4 不同锅炉排烟温度可控性对应的锅炉制造成本变化

项目	实际设计 工况	比较设计 工况 1	比较设计 工况 2	比较设计 工况 3	比较设计 工况 4
空预器进风温度(°C)	20	24	28	32	36
锅炉排烟温度(°C)	131.7	128.9	126.1	123.1	120.5
锅炉冷端壁温(°C)	85.7	85.7	85.7	85.7	85.7
锅炉效率(%)	92.9	93.02	93.18	93.34	93.5
主蒸汽流量(t/h)	908.17	909.1	910	910.9	911.8
再热蒸汽流量(t/h)	746.1	746.86	747.6	748.3	749
锅炉给水温度(°C)	273	273	273	273	273
空预器进口烟温(°C)	352	340	329	329	317
空预器出风温(一次/二次)(°C)	318/308	307/298	297/288	303/297	292/286
省煤器受热面改变量(%)	0	20	43	43	75
空预器受热面改变量	0	0	0	预热器热面高度增加 250mm	

表 4 说明:①实际设计锅炉空气预热器一次风进风温度 23.3°C,二次风进风温度 18.3°C,加权平均 20°C;其它工况的锅炉进风温度均为加权平均值;②实际设计锅炉排烟温度 131.7°C 为修正前数据,其它工况也均为修正前数据。

#### 5 结论

通过本文分析,可以得出下面 3 个结论:

(1)图 1 所示锅炉低温腐蚀动态控制系统能量化锅炉运行中煤种变化和环境温度变化对锅炉冷端壁温的影响,并在运行中发出调节指令,实现锅炉低温腐蚀的动态有效控制,并在控制低温腐蚀的前提下取得最经济的运行效果,但要求锅炉的排烟温度具有可控性,暖风器具有可调性。

(2)维持相同的锅炉冷端壁温,可以有不同的锅炉排烟温度和进风温度组合,选取较高的锅炉进风温度,可以使锅炉的排烟温度具有较好的可控性,同时能使机组发电煤耗明显下降,具有良好的节煤效益。

(下转第 2149 页)

## Industrial Experimental Study of Coal Gasification-Smokeless Combustion Boilers

SUN Dong-hong<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, SUN Jian<sup>2</sup>,  
CUI Yu-ping<sup>2</sup>, LUO Ji-liang<sup>2</sup>, QIN Yu-kun<sup>1</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Northeast China Institute of Electric Power Engrg., Jilin 132012, China)

**Abstract:** The comparative experiments between the coal gasification-smokeless combustion and the traditional hand-fired fashion have been conducted at the same 0.5t/h vertical hand-fired boiler. The experimental results showed that the coal gasification-smokeless combustion boiler not only provided higher thermal efficiency (>80%), but also greater relative in-furnace self-collection efficiency (>96%) than traditional hand-fired boiler. The smoke and dust emission concentration will be less than 80mg/Nm<sup>3</sup>. So, the coal gasification-smokeless combustion is a kind of high efficiency clean coal technology for industrial boilers. Figs3, tables2 and refs 5.

**Key words:** hand-fired boiler; coal gasification; smokeless combustion; collection efficiency

(上接第 2142 页)

(3) 锅炉排烟温度的可控性受窄点温差限制, 窄点温差越小, 机组的发电煤耗越低, 但锅炉受热面要求布置越多, 锅炉制造成本越高。煤价越高、用户要求的投资回收年限越长, 盈亏平衡点对应的锅炉窄点温差越小。

### 参考文献:

[1] 赵之军, 等. 电站锅炉暖风器疏水侧调节的优越性[J]. 发电

设备, 2002(9):15~17.

[2] 赵之军, 等. 电厂锅炉排烟温度自动控制装置的研究与应用[J]. 中国电力, 2002(11).

[3] 赵之军, 等. 论电站锅炉排烟温度的自动控制[J]. 动力工程, 2002(5).

## Effective Measures for Dynamic Controlling Low Temperature Corrosion and Its Energy Saving of Power Boiler

SHAO Guo-zhen<sup>1</sup>, ZHANG Xing-wu<sup>2</sup>,  
ZHAO Zhi-jun<sup>3</sup>, ZHU Qi-yuan<sup>3</sup>

(1. Shanghai Boiler Works Ltd., Shanghai 200240, China;

2. North China Power Engrg. Co. Ltd, Beijing 100011, China;

3. Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Through dissertating the control theory, system design, boiler controllability and air heater controllability, this paper introduces an effective method for dynamic controlling low temperature corrosion of power boiler. Fig 1, tables 4 and refs 3.

**Key words:** power boiler; low temperature corrosion; dynamic control