

300MW 燃煤机组锅炉综合升级节能改造实践

顾孟祥, 张 杰, 谢 辉, 张剑茹, 张希光

(太仓港协鑫发电有限公司, 江苏 太仓 215433)

摘 要: 本文主要介绍了太仓港协鑫发电有限公司 300MW 燃煤机组锅炉综合升级节能改造工程实例, 锅炉典型的节能改造技术应用及实践效果, 为同类型燃煤锅炉节能减排技术改造方案选择提供借鉴和参考, 在行业中加以推广, 从而实现锅炉的有效节能减排控制。

关键词: 锅炉; 节能; 改造

0 前言

当前我国经济快速增长, 各项建设取得巨大成就, 但也付出了巨大的资源和环境被破坏的代价, 这两者之间的矛盾日趋尖锐, 人们对环境污染问题反应强烈。这种状况与经济结构不合理、增长方式粗放直接相关。不加快调整经济结构、转变增长方式, 资源支撑不住, 环境容纳不下, 社会承受不起, 经济发展难以为继。只有坚持节约发展、清洁发展、安全发展, 才能实现经济又好又快发展。同时, 温室气体排放引起全球气候变暖, 备受国际社会广泛关注。进一步加强节能减排工作, 也是应对全球气候变化的迫切需要。国家“十二五规划”明确提出了节能减排的目标, 即到 2015 年, 单位GDP二氧化碳排放降低 17%; 单位GDP能耗下降 16%; 非化石能源占一次能源消费比重提高 3.1 个百分点, 从 8.3%到 11.4%; 主要污染物排放总量减少 8%到 10%的目标。“十二五”规划提出的约束性指标更加明确了国家节能减排的决心, 对于提高能源资源利用效率, 推进电力行业加快转变发展方式, 建设资源节约型、环境友好型社会具有重要意义。

为此, 各发电企业纷纷行动, 将节能减排工作提到主要日程上来, 采取多项措施, 实施发电机组设备节能技术改造。太仓港协鑫发电有限公司几年来加大技改投入, 采用节能技术, 实施机组设备节能升级改造, 并取得了良好节能效果及经济效益, 为社会节能减排承担了责任和义务, 特别是对 300MW 机组锅炉实施了一系列的综合升级节能改造, 主要包括脱硫、脱硝系统节能改造, 锅炉微油点火节油改造, 空预器刷式密封改造, 锅炉定排、连排、吹灰疏水回收改造等。

1 300MW 机组锅炉脱硫、脱硝系统节能改造

1.1 锅炉脱硫、脱硝系统节能改造提出背景

根据国家最新的火电厂大气污染物排放标准, 在“十二五”期间, 火电厂大气污染物排放标准日趋严格, 燃煤电厂必须在近期采取措施降低 NO_x、烟尘排放值。

公司 4 台 300MW 机组锅炉为亚临界控制循环汽包锅炉, 单炉膛Π型露天布置, 中速磨正压直吹制粉系统, 平衡通风, 三分仓容克式空气预热器。每台锅炉配备两台 50%BMCR 容量的静调轴流引风机, 脱硫系统为两炉一塔配置, 每台炉配置一台 100%BMCR 容量的动调轴流增压风机, 公用一台烟气换热器 GGH。

1.2 脱硫、脱硝系统改后主要工艺

2011 年实施了 4 台 300MW 机组锅炉脱硫、脱硝改造, 每台炉新建脱硫装置、新增脱硝装置, 脱硫系统采取无旁路、烟气换热器 GGH、增压风机配置, 烟囱进行钛钢复合板钢内筒防腐改造。在满足国家环保排放改造要求的同时, 还采取了一系列的节能改造措施, 主要是取消原有的烟气换热器 GGH 装置, GGH 设计阻力为 1.2kPa, 在脱硫系统运行中, 石膏等物的粘结易造成 GGH 堵塞, 蒸汽吹扫后实际运行阻力还高达 2kPa, 使得原增压风机消耗更多的电能, 取消 GGH 不仅可有效降低系统本身的阻力, 同时可简化系统流程, 减少烟气沿程阻力, 减少引风机的电能消耗。脱硫系统设计阻力为 3.6kPa, 取消 GGH 优化锅炉空预器改造及简化烟道改造至少降低了 1.6kPa 烟气阻力, 减少了整个脱硫系统阻力的 44.4%。脱硫系统的烟气阻力降低后, 给取消增压风机带来了可行性, 仅采用新型引风机, 就能

满足锅炉及脱硫、脱硝的系统平衡通风，功能为“引风+脱硫+脱硝”的三合双吸离心风机。原工频控制的增压风机是靠动叶调节，节流损失大及调节品质极差，加上 GGH 系统运行阻力，所以增压风机耗电较高，同时经常出现振动等不稳定工况，也增加了维修成本。新增变频调节 2 台引风机效率较原引风机效率提高 2.45%，同时直接设计为变频拖动。同时，随着脱硫系统取消旁路后系统可靠性大幅度提高，取消了增压风机，由改造后的引风机直接就能克服脱硫装置系统阻力，一定程度上简化系统，排除增压风机故障对系统可靠性的影响。

锅炉脱硫系统改造前后主要流程如图1、2所示。

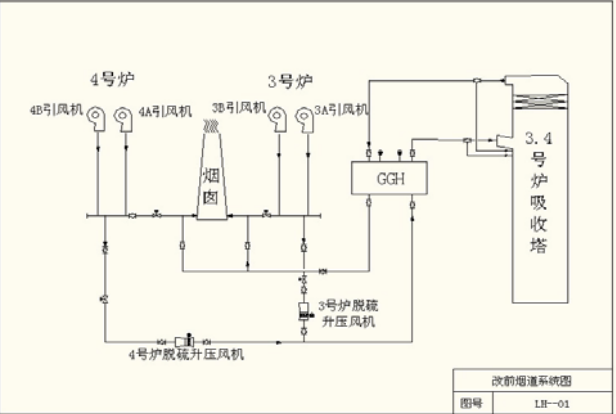


图 1 锅炉脱硫系统改造前主要流程

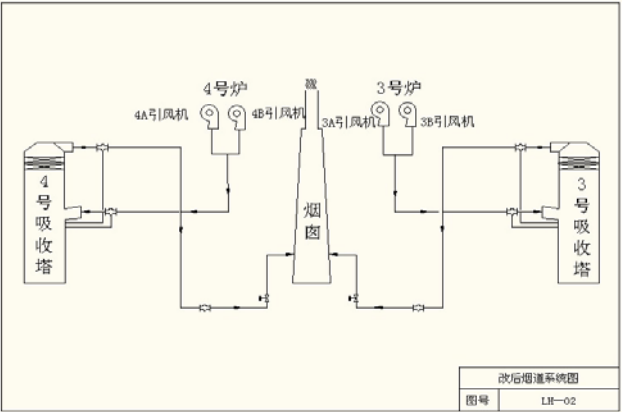


图 2 锅炉脱硫系统改造后主要流程

1.3 脱硫、脱硝系统改后双吸离心引风机性能参数

公司脱硫、脱硝系统改造后的三合一功能双吸离心引风机性能参数如表 1、2、3 所示。

1.4 脱硫、脱硝改后效益分析

脱硫、脱硝改造前 2010 年度脱硫与引风机耗电率为 1.61%，如指标统计表 4。

脱硫、脱硝改造前 2010 年 1 月份脱硫与引风机耗电率 1.66%，如指标统计表 5。

表 1 三合一风机性能数据

项目	设计煤种	
	TB 工况	B-MCR 工况
风机入口体积流量/(m³/s)	288.78	262.53
风机入口质量流量/(kg/s)	230.88	217.98
风机入口温度/℃	146	136
入口空气密度/(m³/kg)	0.7995	0.8303
风机入口全压/Pa	-7734	-6445
风机入口静压/Pa	-7866	-6558
风机出口全压/Pa	1968	1640
风机出口静压/Pa	1836	1527
风机全压升（包括附件损失）/Pa	9702	8085
风机静压升（包括附件损失）/Pa	9702	8085
风机出口风温/℃	160	147
风机附件损失/Pa	已包含在风机全压效率中	
风机全压效率/%	85.1	85
风机轴功率/kW	3250.6	2478.5
风机转速/(r/min)	974	878

表 2 三合一风机技术数据

项目	数值
风机型号	YC36166
风机调节方式	入口调节门调价+变频调速
叶轮直径/mm	3050
轴的材质	35CrMo
轮毂材质	ZG35
叶片材质/数量 /片	NAXTRAM700/2×16
转子重量 /t	10
转子转动惯量 / (kg·m²)	6500
风机的第一临界转速/(r/min)	1274
进风箱材质/壁厚/mm	Q235/14
机壳材质/壁厚/mm	Q235/14
风机轴承型式	滑动轴承
轴承润滑方式	强制油润滑
轴承冷却方式	油循环冷却
风机总重量/t	57
风机旋转方向	左右旋各一台（从电机侧看）

表 3 三合一风机配套电动机综合数据表

项目	数值
额定功率/kW	3600
额定电压/V	6000
额定电流/A	408
额定转速/(r/min)	974
轴承型式	滑动
轴承润滑方式	强制润滑
轴承冷却方式	油循环冷却

表 4 2010 年年度相关指标统计表

项目	脱硫耗电 /(万 kWh)	引风机耗电 /(万 kWh)	合计 /(万 kWh)	发电量 /(万 kWh)	脱硫引风 耗电率/%
3 号炉	2338.7	788.0	3126.7	199968	1.564
4 号炉	2670.4	849.7	3520.1	205969	1.709
5 号炉	2369.8	933.3	3303.0	212208	1.557
6 号炉	2340.6	995.8	3336.4	206927	1.612
合计/(万 kWh)	9719.5	3566.7	13286	825072	1.610

表 5 2010 年 1 月份相关指标统计表

项目	脱硫耗电 /(万 kWh)	引风机耗电 /(万 kWh)	合计 /(万 kWh)	发电量 /(万 kWh)	脱硫引风 耗电率/%
3 号炉	217.2	77.7	294.8	18782	1.570
4 号炉	256.4	82.6	339.0	19715	1.719
5 号炉	226.3	84.2	310.5	18795	1.652
6 号炉	223.2	94.1	317.3	18880	1.681
合计/(万 kWh)	923.0	338.6	1261.6	76172	1.656

脱硫、脱硝改造后 2012 年 1 月份脱硫与引风机耗电量 1.33%，如指标统计表 6。

表 6 2012 年 1 月份相关指标统计表

项目	脱硫耗电 /(万 kWh)	引风机耗电 /(万 kWh)	合计 /(万 kWh)	发电量 /(万 kWh)	脱硫引风 耗电率/%
3 号炉	117.3	108.0	225.3	17326	1.300
4 号炉	83.5	68.0	151.6	12045	1.258
5 号炉	113.4	97.2	210.7	16699	1.262
6 号炉	132.7	97.4	230.1	15397	1.495
合计/(万 kWh)	446.9	370.7	817.6	61467	1.330

改后较改造前同期脱硫与引风机耗电量下降 0.33%。公司脱硫、脱硝改造后使得脱硫系统与引风机耗电量较改造前下降了 0.30% 以上，预计年节电量可达 3000 万 kWh，可给公司带来 1200 余万元的经济效益。

2 300MW 机组锅炉微油点火节能改造项目

2.1 锅炉微油点火节能改造提出背景

公司 300MW 机组锅炉采用传统的轻柴油点火和低负荷投油助燃方式，锅炉设计安装 3 层（12 支）供点火、暖炉用进退式简单机械雾化油枪，出力 1.5 吨/小时。由于油价的长期高涨，启动点火和低负荷助燃的燃料成本极大地影响着发电经济效益，而且在这种方式下冷炉启动初期由于电除尘不能及时投入而造成了烟尘对环境的污染，另外由于助燃不足煤粉燃烬率也较低，因此有必要对点火系统进行改造，寻求一种既可保证提高燃烧过程的经济性，又可以保持火电厂周边生态环境的点火系统，以期满足电力生产日益提高的节能、环保要求。公司按着“技术成熟、经济合理、安全可靠”的原则对 4 台 300MW 机组锅炉进行微油点火技术改造。

2.2 锅炉微油点火节能改造主要工艺

本次微油点火技术改造，将原锅炉 A 层主燃烧器（#1～#4 角一次风喷口）从法兰至喷口段（2m 左右）拆除，更换上杭州浙大天元科技有限公司设计的微油点火煤粉燃烧器。相对应的在锅炉 A 层#1～#4 角微油点火煤粉燃烧器上，各安装一支微油雾化油枪和一支辅助油枪。主油枪出力 50±10kg/h，辅助油枪出力 50±10kg/h。考虑冷炉点火，还安装了暖风器，暖风器位于锅炉前冷风道和热风道之间，暖风器热源采用锅炉辅汽。改造后微油点火燃烧器的平面布置图如图 3。

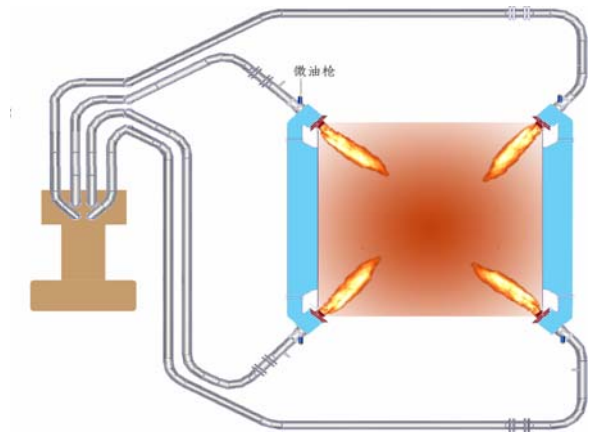


图 3 微油点火燃烧器的平面布置图

2.3 锅炉微油点火节能改造效益分析

公司 4 台锅炉微油点火改造后，经调试节油率达到 80% 以上，较设计值 90% 略有差异，主要是机组启动时的方式不同，改造前公司 300MW 机组锅炉冷态启动，耗油定额为 46 t，一般情况下启动耗用在 35~40 t 之间，6 号锅炉在 2011 年改造后 5 月 22 日启动耗油量为 7.5 t，5 号锅炉在 2011 年改造后 6 月 23 日启动耗油量为 4.4 t，节油率分别是 81.3% 和 89.0%，平均为 85.2%，锅炉启动一次降低成本约 23.8 万余元。

3 300MW 机组锅炉空预器刷式密封改造项目

3.1 锅炉空预器刷式密封改造提出背景

公司 4 台 300MW 发电机组，锅炉是上海锅炉厂生产的 1025 t/h 亚临界压力控制循环锅炉，并配备 2-29VI（T）型容克式三分仓空气预热器。空气预热器密封结构采用设备运行状态下保证有两道密封片同时进入扇形板区的双道密封技术，且热端径向密封间隙采用 LCS 自动调节控制，空预器设计漏风率（ECR）为 6~8%，空预器传动主电机额定电流 35.9A，运行电流为 15A 左右。转子直径 10318mm，转子高度 1880mm，转速 1.19r/min。空预器一次风阻力 300Pa，二次风阻力 650Pa，烟气阻力 934Pa。

经市场调研一种带有刷式密封装置的回转式空气预热器，主要包括：绕中心轴转动的转筒，转筒上有若干径向仓隔板，转筒外套装有预热器固定外壳，沿转筒的径向上、下对称地有扇形板，安装在固定外壳与中心筒之间，转筒与固定外壳之间有密封装置，其中密封装置是在转筒的每个径向仓隔板与扇形板之间的径向密封和转筒的外缘与固定外

壳之间的轴向密封为刷式密封。本实用新型与传统的接触式密封比，更容易适应由于蘑菇状热变形、制造误差、转筒晃、摆动、振动等原因造成的密封间隙无规律变化，充分发挥了刷式密封件良好的变形补偿能力，使回转式空气预热器漏风率大幅下降，泄漏量是迷宫密封片的 1/5~1/10，且结构简单，安装方便。

3.2 锅炉空预器刷式密封改造主要工艺

公司在 2010 年 4 台 300MW 机组检修中，对锅炉空预器冷端扇形板进行了调平工作，并对回转式空气预热器径、轴向密封进行改造，在原折边密封片外增加一道刷式密封片，刷式密封板高出折边密封板 1~5mm（冷热端、轴向间隙根据情况定），其寿命可达到 3 年以上。空预器密封片安装示意图如图 4。

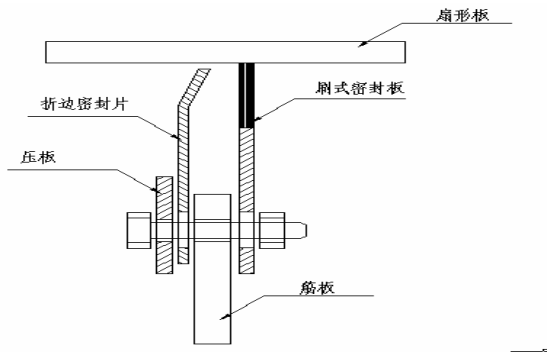


图 4 空预器密封片安装示意图

主要技术工艺要求：

- (1) 转子变形量：根据公式计算，75%至 100% 负荷变化 2.5mm；
- (2) 冷端扇形板存在偏差 2mm，因此最大过盈要不小于 4.5mm，本次放到 5mm；
- (3) 热端零位时扇形板与密封片间隙 2mm，工作时扇形板接触转子后上提 3.2mm，因此最大过盈要不小于 3.2mm，即刷封至少要比密封片高出 5.2mm，本次放到 5.5mm；
- (4) 各部刷封间隙表如下（以下表中数值单位 mm）见表 7、8、9、10。

表 7 冷端刷封间隙（3 块板）				
密封片间隙	差值	刷封间隙	100%最大过盈值	75%最大过盈值
0	1	-1	1	
5	2	3	2	
10	3	7	3	
20	5	15	5	2.5

表 8 冷端刷封间隙（4 块板）

密封片间隙	差值	刷封间隙	100%最大过盈值	75%最大过盈值
0	1	-1	1	
1.5	1	0.5	1	
5.5	2.5	3	2.5	
11.5	3.5	8	3.5	
20	5	15	5	2.5

表 9 热端刷封间隙（4 块板）

密封片间隙	差值	刷封间隙	最大过盈值	正常过盈值
2	1	1	1	
4	2	2	1	
5.5	2	3.5	2	
4.5	3.5	1	2.5	
2	5.5	-3.5	3.5	0.3

表 10 轴端刷封间隙（2 块板）

密封片间隙	差值	刷封间隙	100%最大过盈值	75%最大过盈值
10	3	7	3	0.5
5	2	3	2	

(5) 热端刷封装好后，需把扇形板放到零位（即与密封片间隙为 2mm），使刷封与扇形板过盈值在 3.5mm，此时盘动空预器，使刷封进行初次变形。

3.3 锅炉空预器刷式密封改造后效益评估

空预器刷式密封改造后，锅炉空预器投入运行，空预器电流由原来的 15A 上升至 16.5~17.5A 之间，电流上升约 2A。在相近工况下，较改造前，一次风机、送风机和引风机电流下降约 20A。表 11 为公司 5 号机组满负荷（300MW）时修前和修后测得的锅炉空预器漏风率对比。

表 11 5 号炉修前和修后锅炉空预器漏风率

修前（热端扇形板平均 -10mm）/%			修后（B 侧热端扇形板平均 -9mm，影响漏风率）/%		
A	B	平均	A	B	平均
7.52	6.65	7.01	5.37	5.63	5.50

从表 11 可以看到，在热端扇形板平均位置在 -10mm 时，也即 LCS 漏风控制系统正常投入工况下，空预器漏风率能控制在 5.5% 以下。

在机组额定负荷工况下，空预器漏风率达基本达到设计要求。采用刷式密封技术，在 LCS 自动调节控制装置可靠投入，额定工况下空预器漏风率平均值可降低 1.5%，且在机组各负荷工况下，空预器漏风率均可低于 5.5%。空预器漏风率的降低，使一次风机、送风机、引风机及升压风机四大风机电流降低 25A。

按照经验耗差（综合测算值），空预器漏风每下降 1% 供电煤耗（标煤）下降 0.14g/kWh，每台机

组平均 20 亿发电量测算，则 4 台 300MW 机组年节约标煤约 1680 t 标煤，可见经济效益十分可观。

4 300MW 锅炉定排、连排疏水回收节能改造项目

4.1 锅炉定排、连排疏水回收节能改造提出背景

公司 3、4 号锅炉型号 SG-1036/17.47-M868，5、6 号锅炉型号 SG-1036/17.47-M873。锅炉设计排污率为 1.5%，锅炉运行时，连排调节阀保持 5~10%，排水量约 8~11t/h，部分蒸汽回收至除氧器后仍有 52.1% 部分以疏水的形式排放至锅炉定排扩容器，排放至化学废水，该部分疏水压力为 0.7MPa，温度为该压力下的饱和温度 165℃，具有较高的热能，锅炉运行时还对锅炉底部联箱进行定期排污。所以锅炉连排、定排的汽水回收具有较大的经济效益，为此设计安装设备将锅炉定排、连排疏水进行回收至供热管网，达到热能有效回收利用。锅炉定排、连排疏水至工业供热管网不会影响供热品质，完全能满足热力用户需求。

4.2 锅炉定排、连排疏水回收节能改造主要工艺

分别在锅炉定排扩容器定排调门、连排旁路调门后管道，通过三通各引出一路管道，并在连排调门引出的管道上安装止回阀、手动截止阀，在定排引出的管道上安装手动截止阀，接入供热管道。

锅炉定排、连排改造设计如图 5。

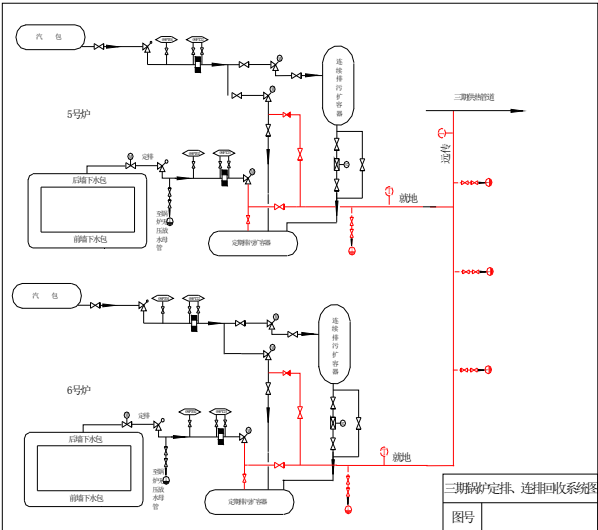


图 5 锅炉定排、连排改造设计图

4.3 锅炉定排、连排疏水回收节能改造效益评估

锅炉设计排污率为 1.5%，锅炉运行时，连排调节阀保持 5~10%，排污量约 8~11t/h，部分蒸汽回收

至除氧器后仍有 52.1% 部分以疏水的形式排放至锅炉定排，排放至化学废水，该部分疏水压力为 0.7MPa，温度为 165℃，锅炉运行按 8000 h 计算，标煤热值 29307 kJ/kg，锅炉排污参数统计如表 12。

表 12 锅炉排污参数统计表

项目	数值
负荷率/%	#3 机组
	77.58
	#4 机组
	75.54
锅炉排污参数（饱和水）	#5 机组
	76.97
	#6 机组
	77.33
压力/MPa	17.47
	温度/℃
焓值/(kJ/kg)	1699
	压力/MPa
除氧器回收参数（饱和和汽）	0.7
	温度/℃
焓值/(kJ/kg)	165
	2763
压力/MPa	0.7
	温度/℃
供热回收参数（饱和水）	165
	焓值/(kJ/kg)
设计值/%	720
	1.5

$$\text{锅炉排污量} = 1036 \times (77.58 + 75.54 + 76.97 + 77.33) / 100 \times 1.5\% = 47.77(\text{t})$$

锅炉排污回收量

$$= 47.77 \times (2763 - 1699) / (2763 - 720) = 24.88(\text{t})$$

$$\text{锅炉定排、连排回收节能改造节能量} = 24.88 \times 8000 \times 1000 \times 720 / 29307 / 1000 = 4890 (\text{t 标煤})$$

4 台锅炉定排、连排回收节能改造后每年可节约标煤 4890 t。

5 300MW 锅炉吹灰疏水回收节能改造项目

5.1 锅炉吹灰疏水回收节能改造项目提出背景

公司 300MW 锅炉设计安装有吹灰器，对炉膛及烟道运行时产生附在换热管壁上的灰渣，进行定期吹扫，保持锅炉受热面清洁，保持具有良好的换热效果。锅炉本体吹灰蒸汽取至锅炉分隔屏出口联箱（3 号炉经改造后取至墙再出口联箱）的过热蒸汽。在进行锅炉连续吹灰时，影响锅炉汽温产生较大波动，出现低温情况较多，因此采取间歇吹灰方式，导致吹灰系统需要频繁疏水，另外吹灰前还需要对吹灰管路进行彻底疏水，吹灰蒸汽中不能有汽水存在，否则影响锅炉吹灰效果及锅炉汽温。吹灰管路内疏水为过、再热蒸汽，该疏水品质较好，因此可回收利用，减少吹灰疏水损失。

根据热试试验测量锅炉不明疏水，每台炉吹灰蒸汽疏水损失约 24t/天，即 1t/h，该部分疏水平均温度 150℃，压力 1.5MPa，具有较高的焓值，吹灰疏水回收具有较大的经济效益，为此设计安装管道

设备将吹灰疏水进行回收至汽机除氧器，达到有效节能。

5.2 锅炉吹灰疏水回收节能改造项目主要工艺

由于吹灰蒸汽疏水压力低，无法回收至供热系统，该部分疏水最理想为回收至除氧器。吹灰器调节阀处压力 1.5MPa，除氧器正常运行压力最高为 0.83MPa，吹灰管道疏水管道压力设计大于 3.5MPa，可以保证吹灰疏水能正常疏水至除氧器。吹灰蒸汽疏水回收改造设计如图 6。

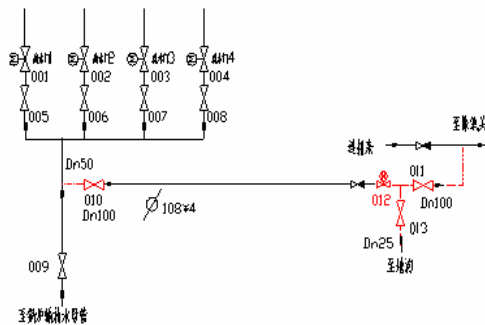


图 6 吹灰蒸汽疏水回收改造设计图

5.3 锅吹灰疏水回收节能改造效益评估

根据热试试验测量锅炉不明疏水，每台炉约 30t/天，该部分主要为吹灰蒸汽疏水损失，吹灰蒸汽疏水损失约 24t/天，即 1t/h，该部分疏水平均温度 150℃，压力 1.5MPa，对应焓值 2791 kJ/kg，全年按 8000 小时计算。

锅炉吹灰疏水回收节能改造节能量 = $1 \times 4 \times 8000 \times 1000 \times 2791 / 29307 / 1000 = 3047$ (t 标煤)，公司 4 台锅炉每年吹灰疏水回收节能改造可节约标煤 3047t。

6 结论

公司 300MW 机组锅炉综合升级节能改造，实施节能效果、效益显著，回收期较短，实现社会效益和经济效益双丰收。此外公司还进行了一次风机变频改造，节电率达 20% 以上，还进行了二期磨煤机取消煤粉分配器改造，4 号炉空预器反转改造，

增大了褐煤掺烧比例，降低了发电成本，等等。当然随着节能新产品、新技术的不断开发应用，锅炉升级改造还需不断的创新，随着电力科技的发展和国家节能减排政策的扶持，锅炉综合升级改造将迎来更广阔的前景和更多的节能量。

参考文献：

[1] 上海锅炉厂有限公司.预热器运行维修说明书[Z]. 上海:上海锅炉厂有限公司,2003.

[2] 上海锅炉厂有限公司.预热器漏风控制系统安装说明书[Z].上海:上海锅炉厂有限公司,2003.

[3] 中环（中国）工程有限公司.太仓港协鑫发电有限公司二三期机组烟气脱硫脱硝改造工程可行性研究报告[Z].南京:中环（中国）工程有限公司,2010.

[4] 太仓港协鑫发电有限公司.300MW 机组集控运行规程[Z].太仓:太仓港协鑫发电有限公司,2011.

[5] 范从振.锅炉原理[M].北京:水利电力出版社,1986.

[6] 李青.火力发电厂节能和指标管理技术[M].北京:中国电力出版社,2006.

[7] 杨亮.燃煤锅炉受热面回转式空预器刷式密封改造[M].上海:协鑫科技出版社,2010.

作者简介：

顾孟祥（1970-），男，江苏太仓人，工程师，从事发电机组设备管理工作；

张 杰（1966-），男，江苏太仓人，工程师，从事发电机组运行管理工作；

谢 辉（1981-），男，江苏太仓人，工程师，从事发电机组设备管理工作；

张剑茹（1981-），女，江苏太仓人，工程师，从事发电机组运行工作；

张希光（1968-），男，江苏太仓人，工程师，从事发电机组节能管理工作。