

1000MW 超超临界塔式锅炉运行优化调整

刘滋奇

(徐州华润电力有限公司, 江苏 徐州 221000)

摘 要: 徐州华润电力有限公司三期5、6号机组是华润电力首家超超临界百万机组, 自2009年投产以来, 发电运行人员一直在探索提高锅炉效率的方法。随着运行调整经验的积累, 逐步掌握一套行之有效的锅炉优化调整方法, 改善锅炉运行工况, 提高锅炉整体安全性, 并取得很好的节能成绩及经济效益。

关键词: 超超临界; 塔式锅炉; 运行优化; 调整; 节能

0 概述

徐州华润电力有限公司2×1000MW超超临界塔式锅炉自投产以来, 一直存在锅炉配风方式不合理、锅炉结焦严重、烟气温度偏差大、锅炉效率低、锅炉辅机电耗高等问题, 与国内同型号锅炉标杆值相比还是有一定差距。在生产实践中, 发电运行人员逐步探索提高锅炉效率方法, 优化锅炉运行方式, 有效解决了上述问题, 提高了锅炉经济性与安全性, 取得很好的节能成绩及经济效益。这种运行优化调整的方法有以下优点: (1) 不涉及设备改造, “零”投资; (2) 任何小的优化及改进因为锅炉长时间连续运行所取得的收益会持续扩大; (3) 可复制性, 对国内超超临界塔式锅炉运行方式有一定的借鉴意义。

1 设备概况

徐州华润电力有限公司三期5、6号锅炉采用的是上海锅炉厂生产的SG-3044/27.46-M535型超超临界参数直流锅炉, 单炉膛、一次再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构、切圆燃烧方式塔式锅炉。设计煤种为晋中烟煤, 校核煤种为徐州混煤。锅炉燃烧系统按中速磨正压直吹式制粉系统设计, 配置6台型号为ZGM133N的磨煤机。每台磨煤机供两层燃烧器, 共48只直流式燃烧器分12层布置于炉膛下部四角。风烟系统配有两台型号PAF19.6-14.6-2动叶调节轴流式一次风机, 额定电流398A; 两台型号FAF28-14-1动叶调节轴流式送风机, 额定电流320A; 两台型号AN42e6(V19-1°)静叶调节轴流式引风机, 额定电流684A。锅炉配2台三分仓回转式空预器, 静电除尘器以及烟气脱硫、

脱销装置。锅炉排渣系统采用刮板式捞渣机。

2 锅炉配风方式优化

2.1 锅炉燃烧器配置

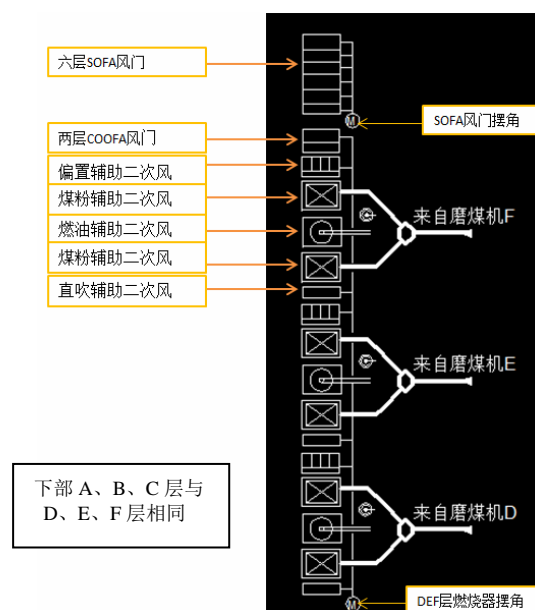


图1 锅炉燃烧器布置图

如图1所示, 徐州华润电力有限公司三期锅炉配置低 NO_x 同轴燃烧系统(LNTFS), 主要组件为: 可水平摆动的分离燃尽风(SOFA)、紧凑燃尽风(CCOFA)、预置水平偏角的辅助风喷嘴(CFS)、强化着火(EI)煤粉喷嘴。一共设有12层煤粉喷嘴, 在煤粉喷嘴四周布置有燃料风(周界风)。燃烧器风箱分成独立的3组, 下面2组风箱各有6层煤粉喷嘴, 对应3台磨煤机, 在每相邻2层煤粉喷嘴之间布置有1层燃油辅助风喷嘴。每相邻2层煤粉喷嘴的上方布置了1组合喷嘴, 其中预置

水平偏角的辅助风喷嘴（CFS）和直吹风喷嘴各约占 50%出口流通面积，下方布置一层直吹辅助风喷嘴。在主风箱上部布置有 2 层紧凑燃尽风（CCOFA）喷嘴以及 6 层可水平摆动的分离燃尽风（SOFA）喷嘴。

2.2 锅炉配风方式优化

一般来说锅炉最佳配风方式，是在提高锅炉热效率的基础上降低供电煤耗，降低 NOx 的排放，提高机组整体经济性。锅炉配风方式通常有三种，第一种为均匀配风方式，即六层燃烧器的周界风，偏置风和助燃风的挡板开度基本一致；第二种为宝塔型配风方式，即从下至上，周界风，偏置风和助燃风的挡板开度逐渐减小；第三种为倒宝塔型配风方式，与第二种配风方式正好相反，即从下至上，周界风，偏置风和助燃风的挡板开度逐渐增大。三期锅炉从调试至今一直沿用正宝塔配风方式，且各二次风挡板一直未投入自动，具体配风方式一直没有严格的技术措施，平时调节频率相对较少且有很大随意性，配方方式不尽合理。针对以上问题，在运行中采取一系列配风方式优化措施。

2.2 锅炉配风方式优化

一般来说锅炉最佳配风方式，是在提高锅炉热效率的基础上降低供电煤耗，降低 NOx 的排放，提高机组整体经济性。锅炉配风方式通常有三种，第一种为均匀配风方式，即六层燃烧器的周界风，偏置风和助燃风的挡板开度基本一致；第二种为宝塔型配风方式，即从下至上，周界风，偏置风和助燃风的挡板开度逐渐减小；第三种为倒宝塔型配风方式，与第二种配风方式正好相反，即从下至上，周界风，偏置风和助燃风的挡板开度逐渐增大。三期锅炉从调试至今一直沿用正宝塔配风方式，且各二次风挡板一直未投入自动，具体配风方式一直没有严格的技术措施，平时调节频率相对较少且有很大随意性，配方方式不尽合理。针对以上问题，在运行中采取一系列配风方式优化措施。

2.2.1 SOFA 风门控制方式优化

SOFA 风配风原则为锅炉负荷的函数，见表 1。

表 1 SOFA 风配风方式

参数	数值	
SOFA 风量 / (kg/s)	20	120
锅炉负荷/%	0	100

在锅炉正常运行中，因为 SOFA 风量对 NOx

排放浓度有很大关系，在锅炉负荷超过 75%时，SOFA 风门一般在全开状态。SOFA 风量越大，NOx 排放浓度越小，但是它是牺牲锅炉的经济性为代价的，过大的 SOFA 风量会对再热汽温造成负面影响，影响再热汽温的提高，降低了锅炉效率。SOFA 风门开度对 NOx 排放浓度与再热蒸汽温度影响如图 1 所示。

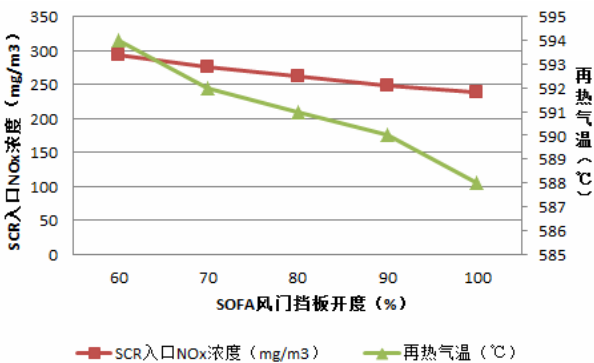


图 1 SOFA 风门开度与 NOx 排放浓度及再热气温关系

在 NOx 排放浓度达标以后，从经济性考虑适当小 SOFA 风门，以提高再热汽温。在 800MW-1000MW 时，保持 SOFA 风门全开，在 800MW 以下负荷时，每降 100MW 负荷，SOFA 风门开度关小 10%。

2.2.2 辅助二次风配风方式优化

辅助二次风配风原则二次风门挡板开度为锅炉负荷函数。运行中，因为各二次风挡板控制均未投入自动，随着负荷上升，辅助风挡板调整幅度偏小，现场各辅助二次风门开度偏小，造成二次风箱差压偏大。二次风箱风压过低会造成二次风速低，二次风刚性差，影响煤粉完全燃烧。但二次风箱差压过大，送、引风机出力偏大，造成厂用电率偏高，这一点在#5 炉上尤为明显。通过调整辅助二次风挡板开度，保持合适的二次风箱差压，在满足二次风速要求下，可以有效降低送、引风机电流。利用机组稳定满负荷运行时机，在保证稳定燃烧情况下，2013 年 7 月 11 日，在保持风量及负荷不变情况下（负荷均为 1000MW，风量分别为 3078t、3073t），对辅助风挡板开度小幅度调整，得到结果见表 2。

表 2 不同辅助风挡板开度下相关参数

C、D、E 辅助风挡板开度/%	二次风箱差压/kPa	送风机电流 /A	引风机电流 /A
35	1.407	173.9	402
45	1.0	158	396
60	0.8	149	389

由表 2 可以看出,在负荷、风量均不变情况下(负荷均为 1000MW,风量分别为 3078、3073t),将 C、D、E 层辅助风挡板开大 10%(35%开大至 45%),二次风箱差压由 1.407kPa 降至 1.0kPa,送风机电流由 173.9A 降至 158A,引风机电流由 402A 降至 396A;将 C、D、E 层辅助风挡板开大至 60%,二次风箱差压降至 0.8kPa,送风机电流降至 149A,引风机电流降至 389A。四台风机电流共下降 75.8A,电功率共降低 693.2kW。按上网电价 0.4 元,机组年利用小时数 6200 小时计算,每年约节省成本 171.8 万元左右,显然会带来明显的经济效益。但是,随着辅助风门开度增大,NO_x 排放浓度随之增大,辅助风门开度与 NO_x 排放浓度之间关系如图 2 所示。

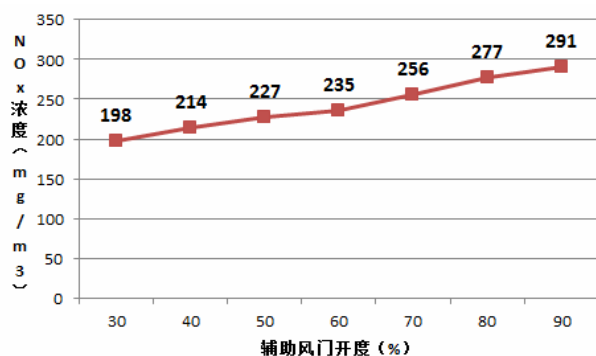


图 2 辅助风门开度与 NO_x 排放浓度关系

因此,在运行中,需要综合考虑辅机电耗与 NO_x 排放浓度之间关系。根据实际运行经验建议 1000MW 负荷时,辅助风门开度维持在 65%左右,停运磨组辅助风门开度在 30%,A、B 层磨组辅助风门开度维持在 80%以上。

2.2.3 偏置二次风优化

偏置二次风(CFS)与一次风之间有 22°的角度,如图 3 所示,由于一次风煤粉气流被偏转的二次风气流(CFS)裹在炉膛中央,形成富燃料区,在燃烧区域及上部四周水冷壁附近则形成富空气区,这样的空气动力场组成减少了灰渣在水冷壁上的沉积,并使灰渣疏松,减少了墙式吹灰器的使用频率,降低因吹灰造成蒸汽的浪费,提高了下部炉膛的吸热量。水冷壁附近氧量的提高也降低了燃用高硫煤时水冷壁的高温腐蚀倾向。在机组负荷及其他风门不变的情况下,经过长期运行总结可以发现随着偏置二次风门开度增大,锅炉结焦状况明显改善,现在锅炉吹灰频率也降为原来一半,这样缩短了因吹

灰造成主、再热汽温扰动时间,提高了锅炉经济性,但 NO_x 排放浓度略有增加。

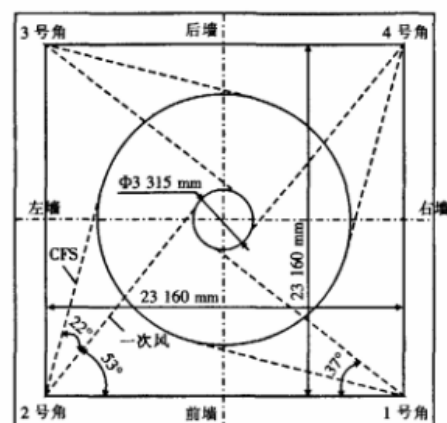


图 3 偏置二次风(CFS)布置图

2.3 降低 NO_x 排放浓度优化

以上对 SOFA 风门控制方式优化、辅助二次风配风方式优化以及偏置二次风配风优化其结果负面影响均为 NO_x 排放浓度会增大,在这时候可以从以下几个方面调整:(1) NO_x 排放浓度已经超标时,适当开大 SOFA 风门;(2)保持合适风量,严格控制锅炉省煤器出口氧量在满负荷时不超过 3%;(3) NO_x 排放浓度已经超标时,适当关小偏置二次风喷嘴(CFS),NO_x 同轴燃烧系统(LNTFS)在设计时采用同心切圆(CFS)燃烧方式,部分二次风气流在水平方向分级,在初始燃烧阶段推迟了空气和煤粉的混合,降低了 NO_x 生成量;(4)适当开大 CCOFA 风挡板开度。应用以上手段,配合 SCR 系统喷氨量,NO_x 排放浓度完全可以在控制范围之内。在锅炉运行中,通过氧量控制及以上良好的配风措施,与调整前相比可降低 NO_x 排放浓度 60mg/m³左右,减少了因 NO_x 排放引起的相关费用。

3 锅炉制粉系统运行方式优化

3.1 一次风压优化

一次风压优化之前 5、6 号锅炉额定负荷下一次风机出口压力约为 13.2kPa,经过空气预热器后热一次风母管压力为 12.4kPa。为克服制粉系统通风阻力以及燃烧器燃烧需要,磨煤机入口压力控制在 10~11kPa 左右,磨煤机出口压力控制在 4~5kPa。由于热一次风母管压力高于磨煤机入口压力控制值,实际运行中磨煤机入口冷、热一次风门开

度通常控制在 30%~50%，风门开度较小，一次风压由 12.4kPa 左右降至 10~11kPa，节流损失严重。根据燃用相似煤质以及采用同样低 NO_x 同轴燃烧系统（LNTFS）相关电厂经验以及在运行中逐步进行试验，采取的优化措施主要有：（1）降低磨煤机出口风粉压力。磨煤机出口风粉压力主要为了保证粉管不积粉，同时保证煤粉进入炉内后适当的燃烧着火距离，不发生烧喷嘴。5、6 号锅炉磨煤机出口风粉压力在 4~5kPa 左右，相对偏高。我们将磨煤机出口风粉压力控制在 3~4kPa，磨煤机出口风粉压力降低 1kpa 左右。（2）降低热一次风母管压力。5、6 号锅炉磨煤机入口冷热一次风门开度在 30%~50%，节流损失达到 1~2kPa，风门开度偏小，节流损失明显，浪费一次风机耗。在实践中，在降低磨煤机出口风粉压力的同时，降低一次风机出口压力，修正磨煤机煤量与风量函数曲线，降低煤量对应的风量，满负荷时降低一次风压力 1.5kPa 左右。2013 年 9 月 20 日在保持负荷及煤量不变情况下（负荷 1000MW，煤量 398t、396t），降低一次风压力 1.48kPa 可以得到表 3 数据。

表 3 不同一次风压力相关参数

一次风压 /kPa	磨煤机出口 风压/kPa	磨煤机平均热风 门开度/%	一次风机电 流/A
13.7	5.1	43	213.9
12.22	3.8	74	196.7

从表 3 可以看出：两台一次风机的电流共下降 34.4A，电功率共降低 314.6kW，带来明显的经济效益。

3.2 磨煤机出口温度优化

磨煤机出口温度优化前，额定负荷下 5、6 号锅炉空气预热器出口热一次风温度约为 310℃，磨煤机出口风粉温度控制不超过 80℃（磨制褐煤时不超过 60℃）。为满足实际燃煤不到 15%左右的水分所需干燥出力要求，磨煤机入口风温通常需要控制在 200~250℃左右，迫使制粉系统不得不掺大量冷风运行。从优化前的运行数据计算，5、6 号锅炉制粉系统掺入的冷风量约占一次风量的 10~20%，占入炉总风量约 2~4%，导致经过空预器的风量减少，使锅炉排烟温度升高 4~8℃左右。针对以上情况，根据我厂燃用煤种成分分析及《电力设备典型消防规程》中规定，将磨煤机出口温度提升至 90℃，在磨辊油温不超过 95℃情况下，允许将磨煤机出口

温度提升至 100℃。根据计算及运行数据分析可以得出此项优化可以降低排烟温度约 4.8℃，机组发电煤耗可下降约为 0.5g/(kW·h)。

4 省煤器出口氧量优化

2011 年 5、6 号炉省煤器出口氧量报表见表 4 及图 3。

表 4 2011 年 5、6 号锅炉运行氧量月报统计

月份	#5 炉氧量/%	#6 炉氧量/%
1 月	6.13	5.63
2 月	5.9	5.46
3 月	5.75	6.05
4 月	5.25	4.81
5 月	停炉	3.43
6 月	6.24	4.64
7 月	5.2	4.69
8 月	5.46	5.05
9 月	5.36	5.24
10 月	7.5	5.07
11 月	4.44	4.54
12 月	4.03	4.06

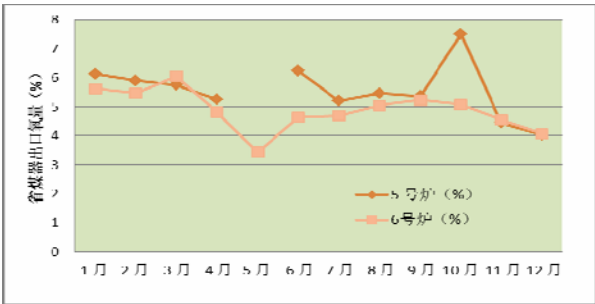


图 4 2011 年 5、6 号锅炉运行氧量月报统计

根据数据统计，徐州电厂 5、6 号锅炉 2011 年负荷率分别约为 74%、76%，日常运行氧量控制在 4~6%。在 2011 年对 5、6 号锅炉不同负荷工况下飞灰、炉渣可燃物含量进行测量统计，其飞灰、炉渣含碳量基本在 1~3%波动，对应的固体未完全燃烧热损失均低于设计值，可见 5、6 号锅炉省煤器出口氧量偏高。5、6 号锅炉燃用煤质为烟煤混煤，入炉煤挥发分在 35~40%，根据其煤质特性分析，其着火燃尽特性相对较好，适宜采用低氧量运行。

在运行调整中，逐步降低省煤器出口氧量，并对飞灰、炉渣含碳量时时测量，在保证飞灰及炉渣含碳量不超过设计值情况下，在满负荷时，氧量由 4~6%降至 2.5%~3%。氧量的降低不仅可以大大减少锅炉排烟热损失，而且送、引风机电流及 NO_x

排放浓度均大幅下降,起到良好的节能减排效果。见图 5、6。

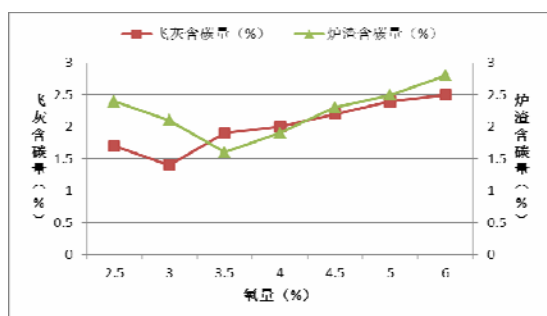


图 5 氧量与炉渣含碳量的关系

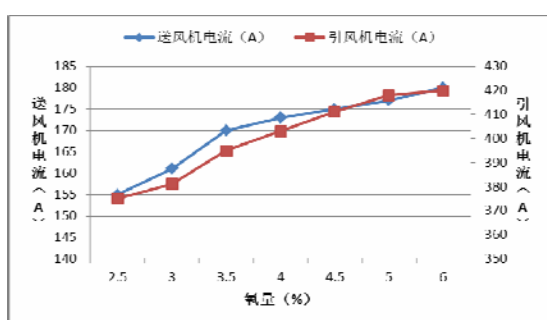


图 6 氧量与风机电流的关系

5 烟温偏差优化

1000MW 超超临界塔式锅炉普遍存在烟气温度偏差大情况,这一点在我厂 5、6 号锅炉体现尤为明显,一般炉膛出口两侧烟气温度偏差可至 50℃左右。这种烟气温度偏差说明炉内火焰有一定的偏斜,主要有以下几点危害:(1)个别三过壁温测点偏高。三级过热器管壁温度局部超温,运行人员不得不采取降低主汽温方法来控制壁温超温,造成主蒸汽温度偏低,影响锅炉经济性。(2)在烟气温度偏差大的情况下,小的扰动(吹灰、增减负荷等)会造成炉膛两侧烟气温度交变,反应到汽温上为汽温两侧温度交变,极易造成主蒸汽及再热蒸汽超温,影响锅炉安全性。炉膛出口烟温偏差是炉膛内的流场造成的,在炉膛垂直出口断面处的烟气流速对烟温偏差的影响要比烟温的影响大得多。这提示,烟温偏差是一个空气动力现象。炉膛出口烟温偏差与旋流指数之间存在着联系。该旋流指数代表着燃烧产物

烟气离开炉膛出口截面时的切向动量与轴向动量之比(较高的旋流指数意味着较快的旋流速度)。旋流值可以通过一系列手段减小,诸如减小气流入射角,布置紧凑燃尽风(CCOFA)喷嘴和分离燃尽风(SOFA)喷嘴,SOFA 反切一定角度,以及增加从燃烧器区域至炉膛出口的距离等,使进入燃烧器上部区域气流的旋转强度得到减弱乃至被消除。在运行中,我们通过以下手段进行调整:(1)调整 SOFA 风门喷嘴水平调整摆角,将 SOFA 风门喷嘴水平调整摆角沿反切方向调整 15°。(2)调整燃烧器摆角。在烟温偏差较大时,将燃烧器摆角向下摆至 40%左右,可以有效缓解烟温偏差现象。

6 结论

通过以上运行优化调整,有效的解决了锅炉配风方式不合理、锅炉结焦严重、烟气温度偏差大、锅炉效率低、锅炉辅机电耗高等问题,使锅炉及其辅机能够安全、高效、低电耗运行,同时兼顾 NO_x 排放特性的最佳运行方式。这种优化调整是在锅炉长时间运行经验总结出来的方式、方法,经过安全性及经济性验证的优化调整,对超超临界塔式锅炉运行方式有很好的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 范从振.锅炉原理[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [2] 徐州华润电力有限公司.2×1000MW 运行规程锅炉部分[Z].
- [3] 徐州华润电力有限公司.上海交通大学.《锅炉设备与系统》[Z].
- [4] 西安热工研究院.徐州电厂百万机组节能诊断研究汇报[R].

作者简介:

刘滋奇(1985-),男,江苏徐州人,工程师,从事发电技术工作, E-mail: 20300761@qq.com.