降低循环流化床锅炉NOx排放浓度的技术改造和调整方法探讨

胡建峰（浙江新都绿色能源有限公司）

摘　要：本文针对新都三台75t/hCFB锅炉NOx初始浓度高达400-450mg/m3的问题，分析认为主要是炉膛温度偏高所致。对此，对目前低氮燃烧主流技术和脱硝工艺进行筛选，最终确定空气分级燃烧和SNCR相结合的脱硝工艺进行技术改造。低氮改造后NOx排放浓度达到280mg/m3以下，SNCR改造后氨水的耗量在100-120L/H，NOx的排放浓度＜100mg/m3，并在此基础上实施了补充循环灰、调整入炉煤粒径、煤种、拆除防磨梁等技术措施，使氨水的耗量进一步降到20-40L/H，NOx的排放浓度＜100mg/m3，取得了较好的经济效益。

关键词：CFB锅炉　空气分级燃烧　SNCR脱硝工艺　补充循环灰抑制NOx生成　减少氨水消耗

1、企业现状

根据《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011）的要求，该厂执行重点地区 NOx≤100mg/m3的标准限值。该厂目前三台 75T/H 系无锡锅炉厂生产的次高温高压循环流化床锅炉，锅炉的型号为UG-75/5.3-M19，NOx的初始排放浓度#3炉为500mg/m3，#4-#5炉为400-450mg/m3。

2、NOx排放浓度偏高的原因

早期中小型循环流化床锅炉排放指标基本都在 400mg/m3 左右，《火电厂大气污染物排放标准》GB13223-2003第3时段燃煤锅炉当Vdaf＞20%NOx的排放限值为≤450mg/m3，所以按2003版的标准执行基本上都能达标。因此大部分锅炉厂只重视锅炉热效率，在床温设计时都偏高，空气过剩系数大，从而影响NOx排放。该厂在额定负荷情况下，床温达到1050-1070℃，空气过剩系数达到1.6以上，在中低负荷时为了维持合理主蒸汽温度，空气过剩系数更高。通过无数次试验、分析，认为NOx排放浓度偏高的主要原因是锅炉本体设计不合理，从而导致床温高、空气过剩系数高。

3、低氮改造技术分析和技术筛选

2010年环保部颁布《火电厂氮氧化物防治技术政策》明确指出我国火电行业氮氧化物防治技术路线：低氮燃烧应作为燃煤电厂氮氧化物控制的首选技术，当采用低氮燃烧技术后氮氧化物排放浓度不达标或不满足总量控制要求时，应建设烟气脱硝装置。目前相对比较成熟主流低氮燃烧的技术共有4种，分别是烟气再循环、空气分级燃烧、燃煤分级燃烧、低氮燃烧器（CNB），而满足CFB锅炉燃煤条件的只有二种：烟气再循环与空气分级燃烧。

3.1 烟气再循环低氮燃烧技术简介

烟气再循环就是用风机来抽吸空预器出口的烟气或者抽吸引风机出口的烟气再输送到一次风机进

口，在保证总的流化风量不变的前提下降低了一次风的氧量，从而减少了下层燃烧区域的氧量；在保证总的氧量不变情况下减少部分一次风氧量增加到二次风量来补充，来实现抑制氮氧化物生成。

3.2 空气分级燃烧低氮燃烧技术简介

空气分级燃烧低氮燃烧技术实质上是炉内配风优化。在相同负荷保持总空气量不变情况下，减少下层燃烧区的氧量，同时增加上层区域的氧量，通过适当配风，可以使主燃烧区域为缺氧燃烧，减少氮元素被氧化的可能，即减少燃料型NOx的生成。而上部为燃烧区域的富氧气氛，降低了此区域的温度，进一步减少了热力型NOx的生成，从而达到了抑制总氮氧化物生成量的目的。

综上所述，二种低氮燃烧技术的思路是一致的，都是减少下层氧量，增加上层氧量；都是燃烧中脱氮；都包含如何抑制燃烧中的NOx的形成和还原已形成的NOx二部分技术。经过技术筛选，认为烟气再循环会增加总的烟气量，增加局部磨损。决定采用空气分级燃烧低氮燃烧技术作为改造方案。

4、空气分级燃烧和SNCR脱硝工艺组合的工程实施

4.1 空气分级燃烧低氮改造

空气分级燃烧改造，由无锡锅炉厂负责设计

4.1.1 改造部位

（1）二次风管布置

保留原来第一层二次风位置，喷嘴数量管径都不变，但改为由一次风风机接入，主要是一次风有富余量，二次风没有余量。第二层二次风喷嘴位置数量不变，但将二次风管直径Φ159扩大到Φ219。新增第三层喷嘴，前墙二个，后墙4个，高度离布风板高度2.4m，充分体现空气分级燃烧的设计思路，实现分级燃烧。

（2）水冷屏改造

新增一组水冷屏，以提高蒸发量，降低床温，抑制NOx的产生。

（3）分离器改造完善

由于改造时间限制，无法对目前绝热分离器彻底改造成水冷或汽冷分离器，只能将分离器靴区磨损部分进行大修，恢复原来设计状态，并将分离器进口喉部尺寸作适当调整，提高分离效率

4.1.2 空气分级燃烧改造的效果

改造后的#3炉分离效果明显提高，炉内循环灰充足，在额定负荷情况下床温＜930℃，沸下温度与炉膛出口之差＜30℃，在氧量控制在6%时，NOx≤150mg/m3，在今年春节期间供热量少，热负荷波动少，锅炉负荷稳定，NOx可以达到≤100mg/m3。

改造后的#4、#5炉由于分离器分离效果没有#3炉好，床温＜950℃，沸下温度与炉膛出口之差＜70℃，在氧量控制在6%时，NOx≤280mg/m3。

4.2SNCR脱硝改造

SNCR脱硝工艺在CFB锅炉改造中难点在于锅炉在低负荷时，炉膛出口温度达不到SNCR反应窗口时，必须将喷枪安装在炉膛中部合适位置，保证氨水与烟气接触均匀，防止烟气短路，又不至于氨逃逸率不超标，这才是SNCR工程的核心技术。我们的做法除在分离器进口各安装二支喷枪外还在高布风板约4.5米处在两侧墙各安装2支喷枪。为保证喷枪安装后喷出的水流、气流影响贴壁流的循环灰通道，对喷枪

周边的水冷壁管造成磨损，用浇注料保护。

5、进一步降低 NOx 排放浓度的调整方法

5.1 投用灰再循环装置，保证足够的循环飞灰量

众所周知，保持良好的物料循环也是 CFB 锅炉改造和运行中需要重点考虑的问题。物料循环流动伴随着质量和能量流动，会对炉内各区域的燃烧分额产生影响，使热量在炉膛内各区域之间重新分配，显著改变锅炉各受热面的传热系统和传热量，同时对锅炉的磨损也产生重大影响。尤其进行空气分级燃烧低氮改造之后，我们发现物料循环量对 NOx 的抑制作用十分敏感，循环物料的多少能非常直接、直观地改变 NOx 的生成量，从而影响氨水的消耗量，而衡量物料循环优劣的辨别标准就是炉膛差压。

经过长达一年的调试分析，发现炉室下端压力和炉膛差压对 NOx 的抑制作用十分明显。炉膛差压高，NOx 的生成就低；炉膛差压低，NOx 的初始温度就搞，氨水耗量就大。

为此，要保持合理的炉膛差压必须要具备充足的循环灰，这同分离器的分离效率有较大关系，但要提高分离器的效率理论上办法较多，如缩小进分离器的烟道截面，提高烟气流速；中心筒加长；偏心中心筒；进分离器的烟道底部适当下倾斜式；分离器靶区光滑过度等。大部分项目我们都进行尝试试验，但效果都不理想，最后我们引入灰再循环装置，将布袋除尘器分离下来灰，通过气力输灰再输送到炉内，根据运行工况来补充物料循环，始终将炉膛差压控制在 0.6-0.7KPa，取得了很好的效果，NOx 初始浓度明显下降，氨水耗量在 20-40L/H 之间。不投灰再循环，氨水耗量在 100-120L/H，说明炉膛差压高低直接影响沸下温度，而沸下温度对 NOx 的抑制作用十分明显，见图一。

5.1.1 投用循环灰后的节能效果

引入了循环灰之后不仅能降低床温，沸下温度＜930℃，使沸下温度与炉膛出口温度差＜30℃，保证了整个物料良好循环，有效抑制了 NOx 的生成，而且能有效控制炉膛差压在一个合理的指标范围，对煤种的适应性更广、更好。按每年 7000h 计，每吨氨水按 800 元/T 计，投用循环灰之后每台锅炉年节约成本在 40 万元以上。

5.2 调整煤种和入炉煤粒径

虽然 CFB 锅炉有良好的煤种适应性，但这仅对燃烧角度来分析是正确的，但从控制 NOx 的排放角度来分析，还是存在最合理的煤种适应性问题。对于 CFB 锅炉的煤种不仅要关注低位热值、全水份、挥发份等关键性指标，更重要的要重视灰份的高低，尤其是对某些采用绝热型分离器且分离效率不是很高的锅炉，灰分更显得十分重要。而评价灰份指标的高低不仅要看煤分析单中灰份的绝对值大小，更重要的关注该灰份是否能绝大部分在燃烧后能否形成循环灰。个别煤种在化验单里灰份值较大，而在燃烧后大部分以粗渣形式存在，而不能将＜φ10mm 煤粒燃烧中爆裂形成细灰，而是随着大渣形式排出，留在炉内的循环灰量较少，因此我们定义为该煤种有效灰量较少。因此评价该煤种适应不适应，我们的经验是该煤种＜φ10mm 煤粒通过燃烧后灰是以什么几何形状表现出来。在总的灰份不变情况下，有效灰量越高，对 CFB 锅炉控制 NOx 的排放越有利。我们分别对蒙煤、石碳、平煤系列、山东煤系列、兴煤等多种煤进行对比试验，最终确定平煤系列比较合适。

入炉煤的粒径控制对抑制 NOx 的生成效果也比较明显，入炉煤粒大，床温比较高，NOx 就高，反之就低。设计上入炉的粒径分布有具体要求：煤为 0-10mm，50%切割粒径 d50==1.5mm，而在工程上在煤炭

货源上往往很难满足设计要求，一般都控制入炉煤的最大粒径。为此我们对输煤系统进行了改造，将其中一条输煤线悬振筛改成滚动筛，入炉煤的粒径控制在6mm。该厂有三套破碎设备根据不同的煤种，选择不同的破碎设备，原则上有效灰量高的煤，煤的粒径适应粗一点，控制在12mm以内；有效灰量低的煤种，煤的粒径控制在6mm以内，既节约输煤厂用电消耗，又能保证NOx控制的要求。

5.3 各层风门开度的调整

空气分级低氮燃烧改造后，从我们近半年的运行调试情况分析，上、中、下三层二次风喷嘴风门开度的大小对NOx的影响各有侧重。从低氮燃烧的理论来分析，应减少底层的燃烧份额，强化上层的燃烧。下层二次风喷嘴风门开大对NOx有较大影响，一般开40%风门，蒸汽流量少时开20%。上、中二层喷嘴风门开大关小对NOx的影响有限，一般在相同的氧量情况下上层宜大，中层适当小一点，但远没有循环灰量对NOx的影响这么敏感、这么直接。

5.4 炉内脱硫投用的调整

适量投入石灰石进行炉内脱硫之后对分离器效率偏低的锅炉对降低NOx是有利的。没有发现炉内喷入石灰石之后NOx会上升的现象。据介绍SO2与NOx的控制成反比关系，这可能与投入的石灰石量有关系。我们在运行中发现石灰石进入炉膛后，同煤中的硫生成硫酸钙，一些极细微粒通过烟气携带进入除尘器排除，大颗粒随锅炉底渣排掉。此外，还有一些颗粒（0.2-0.4mm）被分离器捕捉从烟气中分离出来，通过返料进入炉内循环，因此炉内物料浓度和循环灰量会增加，类同于灰再循环功能，对降低NOx运行有利。

5.5 拆除防磨梁

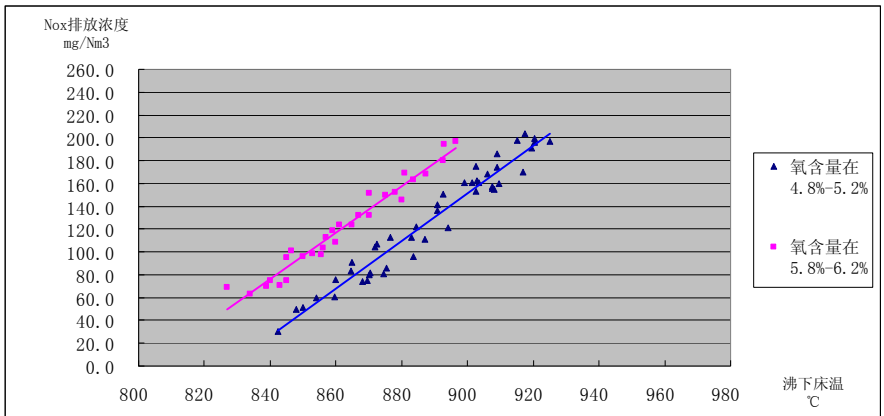
为防止水冷壁管磨损，在#3炉上安装有四道防磨梁，每道间距约2m，应该来说安装防磨梁之后对减轻水冷壁管的磨损起到了较好的保护效果，有效地缓冲了循环灰贴壁流对管子的冲刷，但也影响了CFB锅炉循环灰的内循环，拆除了之后NOx的排放浓度突然从150mg/m3降到100mg/m3以下，目前#3炉一般工况下可以不投SNCR就能达标排放，取得了意外的收获。

5.6 返料风机挡板开度调整

返料风机出口风门开度的大小来控制返料风量的大小能有效调整炉室下端压力和炉膛差压，对保持炉膛差压在一个合理的水平能起到一个很好的调节作用。由于采用了灰再循环补灰手段以及煤种灰份的高低都会影响物料循环量，为维持合理的炉膛差压，确保稳定的物料循环量，过多过少物料循环都不利于燃烧的控制，会引起床温波动，不利于NOx控制，要将NOx的初始浓度控制在最佳的范围之内，所以可以利用返料风机的出口风门的大小来调整、平衡物料循环量，这一点对NOx排放指标的控制十分重要。

5.7 调整锅炉负荷、稳定床温

锅炉负荷波动会引起床温、氧量波动，NOx也随之波动。今年春节供热量很少且稳定，机组基本接近纯冷凝运行，锅炉负荷很稳定，结果发现同样的调整办法、同样的运行工况NOx很低且很稳定，一般在50-100mg/m3.而且连续运行近一个星期。这种现象在近半年的调试中从未出现过，可见锅炉负荷波动引起床温波动对NOx的影响十分明显。随春节后，供热上升，锅炉负荷出现波动，床温也波动，NOx也波动（SNCR还未改造），见下图二。

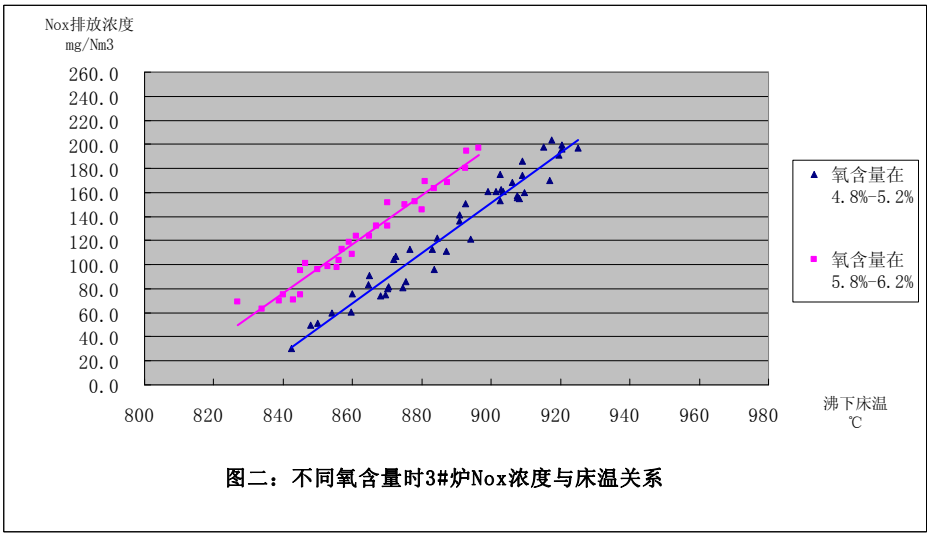


图二：不同氧含量时3#炉Nox浓度与床温关系

从图二中可以分析床温波动时对 NOx 影响非常大，该炉在氧含量为 5%（4.8%-5.2%）左右下，沸下温度与 NOx 排放关系如上图随温度上升而上升，每上升 50℃，Nox 排放上升约 100mg/Nm3。同样，在氧含量为 6%（5.8%-6.2%）左右下，也是每上升 50℃，Nox 排放上升约 100mg/Nm3。所以必须根据供热负荷波动情况作出合理的调整。我们的做法是二台锅炉带基本负荷，一台锅炉调峰，尽可能做到锅炉负荷稳定，这样 NOx 的排放才能稳定，切忌用停给煤机的方法来调整负荷。

5.8 控制氧量

调试中发现氧量增加，NOx 也增加，基本上呈正比例关系，但氧量增加，飞灰残炭逐步下降，所以照顾二者的关系，在保证锅炉安全运行的前提下，将氧量控制 5.5-6.0%。氧量与 NOx 的关系见图二。



图二：不同氧含量时3#炉Nox浓度与床温关系

该炉随氧含量上升与 NOx 排放关系也上升，从上图平均分析得氧含量上升 1%，Nox 排放上升也约 50mg/Nm3。

6、结论

6.1CFB 锅炉采用低氮燃烧和 SNCR 脱硝工艺组合是降低 NOx 初始浓度比较有效的办法之一。

6.2 投用灰再循环装置，补充循环物料是克服分离器分离效果差及煤种、入炉煤粒径等因素造成循环物料不足的重要手段，是进一步完善低氮燃烧改造的有效措施之一。

6.3 运行上调整返料风机出口风门能有效平衡、稳定、控制物料循环量，使锅炉循环灰始终在一个合理范围内运行，能做到锅炉负荷稳定、床温波动少、NOx 排放浓度稳定。

6.4 锅炉负荷调整一定要平稳，切忌用停、开给煤机的方法来调整负荷，氧量控制要兼顾飞灰残炭指标，推荐值 5.5-6%。

6.5 每台锅炉都有其不同的特性，要针对不同的锅炉分别调试，分别取得理想的运行参数、控制方式。

采取上述改造和调整措施之后，CFB 机组 NOx 含量完成可以控制＜100mg/m3 以内，氨水耗量在 0-40L/h 以内，能有效降低运行成本，完全能兼顾环保效益和企业成本。