

# 燃煤热电厂烟气超低排放提标改造及技术应用

瞿国忠，陈建如，陈杏荣

（江苏华昌化工股份有限公司热电厂）

**摘 要：**本文介绍了热电厂原有环保设施在超低排放要求下，系统存在的瓶颈问题和制约因素，通过对脱硫、除尘等污染物脱除技术路线方案的优化对比研究,并通过新技术的应用和系统性综合改造，试运后已达到超低排放，经受住了严峻的考验，为公司生产提供了环保支撑。同时改造充分考虑热电厂和化工生产的环保协同处理，提升了公司整体环保综合处理能力。

**关键词：**超低排放；CFB 锅炉；环保方案；改造应用

## 前 言

随着国家环保标准的日益苛刻，进一步提高燃煤电厂（包括自备电厂）大气污染物排放标准势在必行。2015 年 12 月 2 日国务院常务会议决定，在 2020 年前对燃煤机组全面实施超低排放和节能改造，大幅降低发电煤耗和污染排放。位处长三角地区这一特殊区域的华昌化工热电厂，地方政府已明确要求提前到 2018 年底实现超低排放。

所谓燃煤电厂超低排放就是指烟气污染物排放满足：二氧化硫  $35\text{ mg/m}^3$ 、氮氧化物  $50\text{ mg/m}^3$ 、烟尘  $10\text{ mg/m}^3$ 、汞及化合物  $0.03\text{ mg/m}^3$ 、烟气黑度为 1（基准含氧量 6%）的限值指标。

## 1 超低改造前环保流程

热电厂现有 5 台次高温次高压 CFB 锅炉，其主要的环保设施和系统是经过不同环保阶段，逐步改造到现在，才勉强维持特别排放标准要求（烟尘  $20\text{mg/m}^3$ 、二氧化硫  $50\text{mg/m}^3$ 、氮氧化物  $100\text{mg/m}^3$ ）。面对更严厉环保超低排放要求，环保系统设计裕度不能满足要求，必须进行改造。环保系统工艺流程框图如图 1：

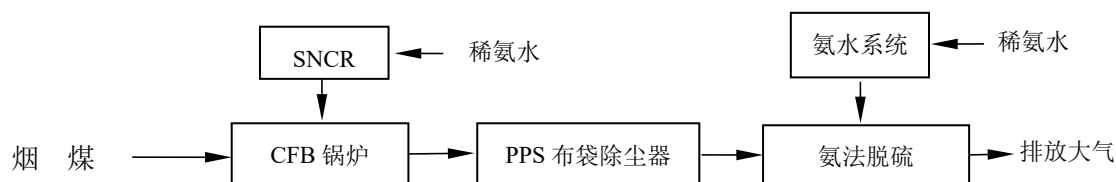


图 1 热电厂特标排放阶段环保工艺流程

## 2 环保装置的制约因素

我们对原有环保装置进行超低排放试探性运行，对系统的工艺流程、结构性能和运行效果等多方面进行了跟踪和分析，认为装置存在如下技术瓶颈和制约因素

### 2.1 制约脱硫系统超低排放因素

热电厂脱硫装置采用“五炉一塔”工艺结构形式，原建于 2012 年的氨法脱硫装置构成相对简单、工艺技术相对不完善。通过对氨法脱硫装置进行提标操作控制，脱硫效果虽短时能达到超低排放水平，但排放指标不可控、系统运行不稳定，不能长期维持运行。

氨法脱硫超低排放运行时，吸收系统 pH 必须控制得很高，才能达到  $\text{SO}_2$  低于  $35 \text{ mg/m}^3$ ，但氨逃逸非常高，氨耗过高运行成本大大上升，还形成严重的烟气拖尾现象，二次视觉污染又成为环保关注焦点；大量携带的气溶胶使烟尘“抬升”现象明显，烟尘检测时有不达标现象；虽脱硫效率还能达到一定要求，但过多的烟气量造成脱硫系统压差大，烟气并列运行后还严重影响小锅炉出力。

### 2.2 制约脱硝系统超低排放因素

SNCR 脱硝技术应用于 CFB 锅炉时，是基于 CFB 锅炉独特的燃烧方式和低氮燃烧特性。SNCR 脱硝技术相对投资少、改造工程量小、运行维护成本低。超低排放运行方式下现有 SNCR 脱硝系统存在较多瓶颈：

(1) 脱硝效率偏低：SNCR 脱硝效率偏低，最高设计效率也只有 60~70%。由于锅炉结构和使用年限的差异，个别锅炉的 SNCR 脱硝效率有时差别较大，控制同样的排放指标需要消耗更多的氨水。SNCR 脱硝过程不能充分利用的还原剂  $\text{NH}_3$ ，同样存在氨逃逸问题。逃逸氨易与烟气中  $\text{SO}_3$  结合形成硫酸氨盐黏附在灰尘中，造成锅炉空预器堵塞、尾部腐蚀，并对布袋除尘器本体和布袋都有影响。

(2) 锅炉运行稳定性要求高：SNCR 脱硝反应环境是要保证反应处于还原性气氛，在  $800\sim 900^\circ\text{C}$  窗口温度下才可使得氮与氧反应生成燃料型  $\text{NO}_x$ ；锅炉运行氧量与脱硝效率的关系尤为密切，对锅炉运行的稳定性和风煤比控制操作要求高；锅炉原始  $\text{NO}_x$  排放随燃烧工况波动较大，特别是氧量的影响有时  $\text{NO}_x$  排放最高时达到  $350\sim 400 \text{ mg/m}^3$ ，在低负荷时脱硝控制更困难，问题更为突出。

### 2.3 制约除尘系统超低排放因素

(1) 原有 PPS 布袋不能满足要求：原有 PPS 布袋按  $30 \text{ mg/m}^3$  设计，除尘设备自身就不能满足超低  $10 \text{ mg/m}^3$  新的环保要求。

(2) 含湿量影响：由于 SNCR 脱硝的使用，在炉内大量喷入氨水，使锅炉尾部烟

气中的含湿量大大增加，有时可达到 10%以上，因结露而造成布袋“糊袋”现象严重，也使除尘器阻力进一步增大。

（3）氨法脱硫抬升烟尘现象：氨法脱硫效果明显，随着烟气量的加大，系统设计余量不足有所显现；气液比（G/L）余量偏小造成水洗效果差等原因，会造成烟气携带硫酸铵盐现象及气溶胶加重，会使氨法脱硫后的“烟尘”出现不降还上升的“抬升”现象，这是所有湿法脱硫的共性。

## **2.4 新增超低排放检测因子**

《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011）中规定燃煤电厂大气污染物控制项目共有烟尘、二氧化硫、氮氧化物、汞及化合物和烟气黑度等五项，并明确执行相关排放标准执行的具体年份。其中汞及化合物、烟气黑度等污染物项目，必须在超低排放改造中要有针对性的防范控制措施。

## **3 超低排放改造路线**

### **3.1 改造原则**

（1）当时因超高压大锅炉项目建设正在审批之中，工程配套了相应环保新设施，公司综合考虑确定了老系统应充分挖潜原有环保设施潜力，对瓶颈环节充分进行利旧改造，以达到超低排放的改造思路。

（2）由于三台 75t/h 锅炉已被政府列入限期停用对象，此范围只考虑过渡期内必要的改造，不进行长期性投资改造。

（3）氨法脱硫系统脱硫塔只进行旧塔改造，老系统不新增脱硫塔。

（4）挖掘热电厂环保装置潜力，进行全厂性环保协同脱除综合治理，形成多种污染物高效集成脱除处理，减轻公司化工生产环保负担。

（5）充分调研新的环保治理技术，加强引进应用，提升公司环保治理的技术实力。

### **3.2 改造方案**

从 2014 年 9 月国家发改委发布超低排放行动计划以来，相关的超低技术和厂商较多、改造路线多样，但短短的几年时间，各种环保治理技术路线的效果还没有得时间验证，问题也没有充分暴露。氨法脱硫工艺在行业中应用范围相应窄小得多（约 10%），改造和运行经验稍丰富，热电厂这次以老氨法脱硫系统为主体的超低改造确实是一次技术考验，热电厂和职能部门根据系统的瓶颈环节和对超低排放存在的影响因素，进行了针对性排查、调研和方案比较，立足自身技术力量，对相关超低技术方案进行了认证筛选。

### 3.2.1 超低排放技术方案和比较

表 1 超低排放技术方案对比表

污染物名称	超低排放方案	技术特点或优缺点	确定方案
二氧化硫	方案一：氨法脱硫工艺改造（双塔多循环双氧化工艺）	老系统设计和结构瓶颈明显，改造成新工艺相对实施容易、周期短，可进一步提高氨法脱硫的超低排放状态下运行稳定性。	相对较可行。
	方案二：老系统新增脱硫塔	新建投资太大，周期长、场地受限。	大锅炉项目新建氨法脱硫，将老系统烟气接入，不新增脱硫塔。
	方案三：石灰石脱硫	长周期运行不能保证，对锅炉受热面的磨损大。	部分优化改造作为后备补充环节
氮氧化物	方案一：低氮燃烧+SNCR	形成综合性互补脱氮模式，可大幅度减轻炉内脱硝逃逸氨的腐蚀影响，调节裕度大，可应对任何环保排放标准的变化。	方案较可行性，形成组合脱除，提高炉外脱硝的比例，运行灵活。
	方案二：SNCR+SCR	锅炉空间小，不满足 SCR 改造的空间和技术条件，投资相对更大。	老锅炉系统不建议采用。
烟 尘	方案一：130t 锅炉布袋除尘器 5mg 超低改造+脱硫塔、水洗塔优化改造	改造布袋除尘器即满足短期的干法脱硫运行时尘的尘超低排放，又降低氨法脱硫进口烟气的尘含量，再通过氨法脱硫的除尘除雾的优化改造，减轻湿法脱硫系统抬升“烟尘”的现象。	确定为采纳方案，并对小锅炉的布袋视工况进行更换（只要求 10mg 以下标准布袋）。
	方案二：湿电除尘器	湿电除尘效果好，但应用于氨法脱硫系统非常少，运行时电源系统稳定性、腐蚀影响对长周期运行存在太多的不稳定；改造投资量大。	继续跟踪了解行业使用及其技术发展情况。
烟气黑度	除尘器改造+多级水洗	干法时由除尘器超低运行保证；湿法时由氨法脱硫系统和水洗系统保证。	协同处理，指标能保证。
化工处置物	部分尾气：采用不同的管线，将部分化工生产尾气接入电厂锅炉烟气系统； 固态物：充分利用 CFB 流化燃烧特点，掺烧后进入脱硫脱硝联合处理系统；	废气炉、气化脱硫尾气接入系统，其它考虑预留。	

### 3.2.2 超低排放环保工艺流程：

本着“协同处置，综合治理”的原则，经职能部门和热电厂较长时间的调研和对比认证，最后确定出热电厂环保超低排放和综合处理工艺系统流程如（图 2）：

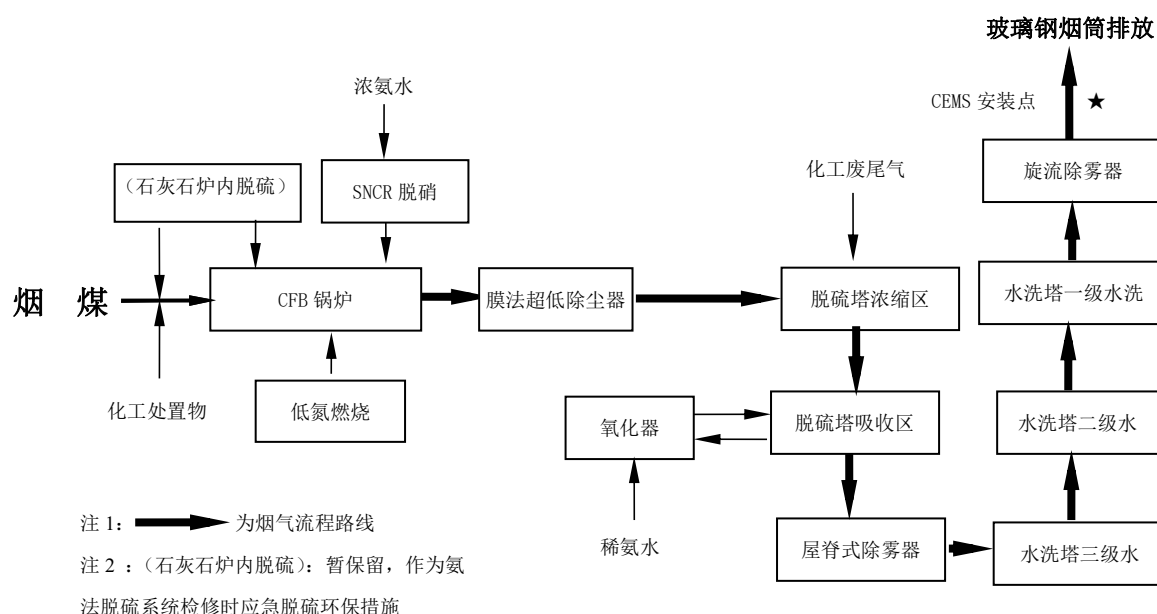


图 2 热电厂环保超低排放和综合处理工艺流程

## 4 主要改造措施和技术应用

### 4.1 工艺改造

双塔多循环双氧化设计：将单塔单循环改为双塔工艺，由单一的脱硫塔改为脱硫塔和水洗塔双塔结构，将脱硫塔原单塔三段单层循环改为二塔多层循环，新建水洗塔进行烟尘的组合去除；将脱硫塔内氧化工艺改为塔内、塔外双氧化，新增氧化器以实行主氧化功能，同时保留性改造脱硫塔内浆液原有氧化器，增浓系统只作辅助氧化，改造后整个系统氧化率大大提高，最大限度地减少了亚硫酸铵存在。这样实现了功能区明显区分又相互补充，形成“双塔多循环双氧化”氨法脱硫主流工艺路线，与目前氨法脱硫行业最先的工艺已不差上下。

高效多层循环喷淋工艺设计：优化对各功能区的循环工艺进行设计和改造，采用高效多层循环喷淋以提高液气比（L/G）满足超低排放要求。脱硫塔结构由氧化段、吸收段、清洗段三段结构改造成增浓段、吸收段二段布置，增设出口除雾喷淋系统；吸收段每层对应独立的吸收泵；在脱硫塔吸收段新增双相整流装置，在喷淋层下方各加装一层壁环提高增效作用；在增浓层增加气体分布器，提高烟气分布效果；将原脱硫吸收段二层喷淋改为三层喷淋工艺结构，并对三层喷嘴形式进行了优选和改型，采用高效多层循

环喷淋设计，提高系统液气比，这样增加了气液反应路程，因硫酸铵气溶胶形成与液气比关系密切，从抑制硫酸铵气溶胶的角度考虑，选择较大液气比，可将液相游离氨、气相中铵盐、烟气中烟尘含量控制得很低。

多点加氨工艺：改变原吸收泵出口单点加氨设计方式，根据氧化器结构和溶液流向采用吸收段各层都设立加氨小流量精确调节回路、增浓段增加前置加氨的多点加氨设计，使系统烟气与氨反应进行前移，保证氨水充分混合、挥发的气氨能充分吸收。多点、定量精确加氨提高氧化器内 pH 值控制精度，保证脱硫区域气相游离氨浓度控制得尽量低。在增浓段再增设辅助加氨系统，使浆液中  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  与  $\text{NH}_3$  充分反应，提高系统脱硫效率。改变了原系统只能低指标状态运行，逃逸氨和烟囱拖尾严重的问题，使二氧化硫在超低排放运行时能在  $0\sim 35\text{mg}/\text{m}^3$  狭小的范围内得到有效控制，同时充分降低逃逸氨。

## 4.2 设施改造

**4.2.1 高效除雾器组合应用：**对脱硫塔进行加高改造，由原有 33 米抬高改为 37 米，在此空间加装三层（图 4）的屋脊式除雾器；采用升气帽分层布置的三级水洗系统中，对各层间装有格栅和填料进行优选改造，将原有波纹式改为聚乙烯塔式填料（如图 5）；在水洗塔出口增装旋流式除雾器（如图 6）；通过采用不同形式高效组合式除雾器，使各层气流分布均匀，水洗液梯差浓度得以形成，烟气温度得到进一步降低，提高了除雾器的气水、携带烟尘和硫化物的分离效率，使烟囱排出的尾气清晰度得以很大的提高。

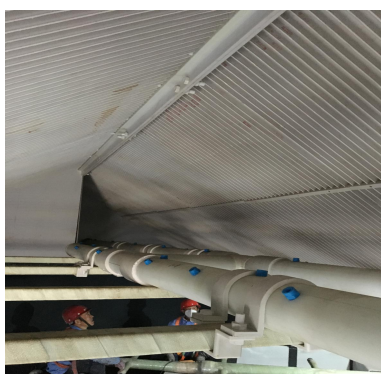


图 4 脱硫塔出口屋脊式除雾器 图 5 一二级水洗层塔式填料安装图 图 6 水洗塔出口旋流式除雾器

选用高效螺旋喷嘴：将吸收段和部分水洗段的实心锥形喷嘴改为新型高效喷嘴，新型喷嘴的最大喷流角度可达  $170^\circ$ 。这种结构紧凑的喷嘴有着畅通的流道，可以最大程度地减少液体阻塞，使液体在给定尺寸的管道上达到最大流量，在  $0.3\text{MPa}$  压强下单个喷

嘴液体流率提高到 250 升/分，同时保证了系统流量泵不作较大的改造。

#### **4.2.2 膜法超高效除尘器改造**

膜法技术的应用：在 130t 锅炉除尘器超低改造中，依托南京工业大学膜科学技术，最终确定了采用校企联合方式，引用超高效膜技术。这一技术最新最前沿的专利技术，采用有机复膜材料布袋属专利技术产品，其原理就是利用表面过滤原理，能有效截留微纳米粉尘颗粒。

除尘器降压差改造：保留原袋式除尘器的下部分，除尘器中箱体整体高度增高 2 米，进行上部净气室改造，并更换新的膜法技术长布袋、袋笼，同步进行相关附属部件的改造；除尘器不设置旁通阀满足环保要求。这样改造后除尘器的阻力有较大幅度的下降，形成低压差高效除尘器，改造后除尘器结构。改造后性能保证值：烟尘排放指标 $\leq 5 \text{ mg/Nm}^3$ ；过滤风速 $\leq 0.8 \text{ m/min}$ ；滤袋阻力 $\leq 800 \text{ Pa}$ 。

#### **4.2.2 CFB 锅炉低氮燃烧改造**

##### **4.2.2.1 循环流化床锅炉低氮燃烧系统改造**

锅炉炉膛密相区布风板统一均匀优化，合理降低一次风率并保证充分流化，是确保 CFB 锅炉正常运行的关键，也是降低  $\text{NO}_x$  炉内过程的优化有了基本保证。布风板和风帽改造是目前比较先进的流化床流态重构技术，是低氮燃烧系统改造的核心技术。锅炉炉膛密相区二次风的合理分级，降低一次风风量后，可适当增加二次风风量。按新的位置和管径校核新的二次风数量和规格，并重新布局以达到炉膛氧量分配均匀的目标。锅炉炉膛密相区一次风优化增加再循环系统，烟气再循环是指将一部分燃烧后的烟气再返回燃烧区循环使用的方法。从引风机出口挡板门后增设一台变频离心风机，将引风机出口净烟气通过加压后，送入锅炉一次风机入口，充当锅炉一次风。以有效降低一次风含氧量，降低燃烧温度，形成燃烧还原反应抑制初期  $\text{NO}_x$  生成。

##### **4.2.2.2 循环流化床锅炉低氮燃烧系统优化调整**

锅炉低氮燃烧改造后，锅炉布风板密相区为缺氧还原反应，上部为富氧反应，一次风量和烟气再循环控制的原则是保证床料流化和控制床温及大渣燃尽，二次风根据负荷变化原则为控制氧量，保证二次风能穿透和扰动床料，满足密相区上部富氧燃尽所需的氧量，正常情况下一般床温控制在  $920\sim 950^\circ\text{C}$ ，二次风压力控制在  $2\sim 6 \text{ KPa}$  之间，风室压力控制在  $8.5\sim 9.0 \text{ KPa}$  之间。烟气再循环量的大小根据床温大渣含碳量排烟温度及三

大指标来控制。密相区的过量空气系数要小于 1。在加减负荷时要根据燃烧的情况进行二次风的加减，保证氧量在范围内，如大幅度负荷调整，也要对一次风量和再循环风量进行调整，在运行中要严密监视氧量及各运行参数的变化要及时调整。

4.3 氨法脱硫超低改造优化运行控制

正交对比，固化指标：影响氨法脱硫工艺主要指标有氧化率（氨硫酸铵浓度的高低）、pH 值、温度、空气流量和流速等。其中满足烟气分布均匀、与吸收溶液充分接触、实现强制混合反应，是运行操作控制的关键，通过控制氧化器运行液位、提高氧化效果工作性能；通过交叉试验，确定吸收液 pH 值最佳值为 5.5—6.5，烟气拖尾可得到有效控制。

提高氧化风风压：选用高风压氧化风机，并将罗茨风分别送入空气在氧化器吸收段、脱硫塔增浓段内进行双段强制氧化，双段氧化的设计，实现了浆液系统全过程氧化，抵制其易分解的逆反应发生。运行上提高氧化风风压，确保氧化风压力控制在 75—85KPa，测定浆液系统氧化率提高到 99.9%以上；氧化风管上增加冲洗水管路，并定期冲洗防堵塞，从设计上就减少了其被烟气携带的量，降低溶液中亚硫酸铵组分。

5 超低排放改造后效果

5.1 环保排放指标

超低排放改造全部完成后投入运行，经试运行调整后，三大重要指标运行数据能在超低排放要求内得到有效控制，系统调节灵活。表 2 为环保局检测数据。

表 2 超低排放排放口检测数据

环保局分析编号	A1-1128304 29	A1-1128304 30	A1-1128304 31	超低限值或标准
氮氧化物 (mg/Nm <sup>3</sup> )	30	32	32	50
二氧化硫 (mg/Nm <sup>3</sup> )	3, ND <sup>a</sup>	3	3	35
烟尘(mg/Nm <sup>3</sup> )	6.4	8.8	4.7	10
氨逃逸 (mg/Nm <sup>3</sup> )	0.41	0.77	0.23	10 <sup>b</sup>
流速 (m/s)	9.7	9.5	9.7	
湿度(%)	8.9	8.8	8.8	

a: ND 表示未检出；二氧化硫检出限值为 3mg/m<sup>3</sup>。  
b: 氨法烟气脱硫工程通用技术规范 HJ2001-2010 标准。



## 5.2 主要技术经济指标

表 3 环保改造主要经济性对比

参 数	锅炉日产汽量 (t/d)	氨脱进口 最高压力 (KPa)	除尘器日耗 电量 (kW·h/d)	逃逸氨浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	硫铵产量 (t/d)
改造前（17 年 1 月 23 日）	7298	2.8	35262	9.3	11.09
改造后（17 年 12 月 6 日）	8680	2.9	29124	0.47	13.46
全年节支（万 元）			131.2	12.51	59.10
合计：			202.81		

注：按 2017 年 2599938 吨总产汽量、氨价 2300 元/t、硫铵价按 700 元/、电价按 0.6 元/kW·h 估算。

## 6 结语

在短短的几年时间内，国家环保政策日趋严厉，热电厂环保设施经历了总量排放、限值排放、特标排放、超低排放等提标改造阶段。热电厂超低排放改造中，遵循了“协同处理、综合治理”的原则，实现了热电厂和公司化工生产综合治理，提升了热电厂环保处理能力，体现了公司内部技术力量和新技术的应用优势。热电厂环保超低装置经受了“进博会”和当地政府提前要求企业“10·30”实施超低排放严峻的政治考验，有力为公司满负荷生产提供了环保保障。