

# 高效煤粉工业锅炉低氮控制技术

李 婷<sup>1,2,3</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013;2. 煤炭资源开采与环境保护国家重点实验室,北京 100013;  
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

**摘要:**借鉴国内外主流低氮减排技术,通过对原有技术优化升级,开发出新一代煤粉锅炉 NO<sub>x</sub> 联合控制技术,进一步发掘了煤粉燃烧器的低氮潜力,并将煤气化空气无级分级低氮燃烧与烟气再循环技术进行耦合。经工业试验验证,应用后锅炉尾气 NO<sub>x</sub> 排放可达 200 mg/m<sup>3</sup> 以下,结合 SNCR 烟气脱硝技术,NO<sub>x</sub> 排放可降到 100 mg/m<sup>3</sup> 以下。通过以上低氮措施,煤粉锅炉系统 NO<sub>x</sub> 控制水平得到提升,满足并优于国家最新环保标准。

**关键词:**氮氧化物;低氮燃烧;烟气再循环;煤粉锅炉

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2015)03-0107-03

## NO<sub>x</sub> emission reduction technology of efficient pulverized coal fired industrial boiler

LI Ting<sup>1,2,3</sup>

(1. China Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;  
2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Environmental Protection, Beijing 100013, China;  
3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

**Abstract:** NO<sub>x</sub> emission reduction technology of efficient pulverized coal fired industrial boiler was developed through drawing from advanced NO<sub>x</sub> emission reduction technologies at abroad. The coal gasification air classification of low NO<sub>x</sub> combustion and flue gas recycling technologies were coupled. Through industrial test, it was found the technology decreased the NO<sub>x</sub> emission of boiler below 200 mg/m<sup>3</sup> which could be kept under 100 mg/m<sup>3</sup> by combining the coupled technology with SNCR flue gas denitration technology. The transformation improved NO<sub>x</sub> emission control ability of pulverized coal fired industrial boiler and met the new environmental protection standards of China.

**Key words:** NO<sub>x</sub>; low nitrogen combustion; flue gas recirculation; pulverized coal fired boiler

## 0 引 言

面对日益严峻的环境污染现状,尤其是雾霾天数的增多和覆盖地区的逐步增大,国家加大了对大气 NO<sub>x</sub> 排放的控制力度,尤其是对于我国 NO<sub>x</sub> 主要排放源之一的燃煤工业锅炉,制订了更加严格的限排标准。环保部新近发布的《锅炉大气污染物排放标准》<sup>[1]</sup>中就增加了对 NO<sub>x</sub> 排放标准的限值要求,规定新建燃煤工业锅炉 NO<sub>x</sub> 排放小于 300 mg/m<sup>3</sup>,重点地区锅炉排放小于 200 mg/m<sup>3</sup>,并已于 2014 年

7月1日起正式实施。高效煤粉工业锅炉<sup>[2-4]</sup>是煤炭科学技术研究院有限公司(以下简称煤科院)研发且拥有全部知识产权的新型节能环保产品,目前已在国内多个省市推广应用,总规模达 200 多台(套),总容量 2000 多蒸 t/h。在 NO<sub>x</sub> 控制方面,煤粉锅炉第 I、II 代燃烧器采用空气分级低氮燃烧技术,据工程实测,尾部烟气 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度在 300 ~ 350 mg/m<sup>3</sup>,优于传统链条锅炉平均排放 500 ~ 600 mg/m<sup>3</sup> 的水平,但已无法满足国家最新环保要求。需对现有低氮技术进行优化升级。基于前

收稿日期:2014-12-18;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.03.027

基金项目:煤炭科学研究总院技术创新基金资助项目(2014CX03)

作者简介:李 婷(1982—),女,山东菏泽人,助理研究员,工学硕士,从事煤粉工业锅炉烟气净化技术研发工作。E-mail:tingli\_2008@126.com

引用格式:李 婷. 高效煤粉工业锅炉低氮控制技术[J]. 洁净煤技术,2015,21(3):107-109,120.

LI Ting. NO<sub>x</sub> emission reduction technology of efficient pulverized coal fired industrial boiler[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 107-109, 120.

期研究基础,借鉴国内外同类技术,煤科院开发出新一代  $\text{NO}_x$  联合控制技术:充分发掘煤粉燃烧器的低氮潜力,并将煤气化空气无级分级低氮燃烧与烟气再循环技术进行耦合,应用后的锅炉尾气  $\text{NO}_x$  排放浓度在  $200 \text{ mg/m}^3$  以下。另外结合在电站锅炉广泛应用的选择性非催化还原法(SNCR)烟气脱硝技术, $\text{NO}_x$  排放浓度还将进一步降低,达到  $100 \text{ mg/m}^3$  以下。

## 1 几种常见 $\text{NO}_x$ 减排技术

$\text{NO}_x$  控制主要分为燃烧中处理和燃烧后处理。燃烧中处理即低氮燃烧技术,包括空气分级燃烧、烟气再循环、燃料分级燃烧和低氧燃烧法等技术。燃烧后脱氮主要是指烟气脱硝,包括选择性催化还原法(SCR)、选择性非催化还原法(SNCR)等。

### 1.1 低氮燃烧技术

国外低氮燃烧技术起步早,技术成熟。20世纪50年代,美国首先开发出了空气分级燃烧技术,随后日本和德国相继研制出了低  $\text{NO}_x$  燃烧器,经过多年的优化改进,形成了多种产品,各公司的低  $\text{NO}_x$  燃烧器各具特色,相互交叉和渗透。我国的  $\text{NO}_x$  减排技术在20世纪八九十年代就已起步,当时着眼点是投资少而又易于加装改造的措施,各式各样的低氮燃烧器和炉膛设计陆续研制完成,取得了一定的效果。

空气分级燃烧技术<sup>[5-7]</sup>是将空气分成一级或多级加入,在前段燃烧区(一级燃烧区)只加部分空气,形成过量空气系数  $a < 1$  的富燃料区并制造还原性气氛,抑制  $\text{NO}_x$  的形成并还原已经形成的  $\text{NO}_x$ 。在后段燃烧区内加入充足的空气,形成  $a > 1$  的贫燃料区使煤粉燃烬提高燃烧效率。Babcock公司的第二代燃烧器WB型燃烧器(双调风燃烧器)、WSF型燃烧器,到第三代DS型燃烧器均是空气分级燃烧器的典型代表。

烟气再循环也是目前使用较多的低  $\text{NO}_x$  燃烧技术<sup>[8-9]</sup>,是在锅炉的空气预热器前抽取一部分烟气返回炉内,利用惰性气体的吸热和氧浓度的减少,使火焰温度降低,抑制燃烧速度,减少热力型  $\text{NO}_x$ 。烟气再循环只能减少热力型  $\text{NO}_x$ ,抽取的烟气可以直接送入炉内,也可以混合一次风或二次风送入炉内。当再循环烟气从燃烧器直接送入炉膛内部时,由于再循环烟气的温度水平与炉膛相比要低许多(炉膛温度在  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,而再循环烟气  $250 \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$ ),所以能显著降低炉膛内的温度水平;另一方

面,由于尾部烟气是燃料燃烧后的气体和少量漏风的混合物,氧气含量低。将两方面的影响综合起来,烟气再循环可同时降低炉膛内温度水平和氧气浓度,抑制煤粉燃烧中  $\text{NO}_x$  的形成。当烟气再循环率为  $20\% \sim 30\%$  时,煤粉炉的  $\text{NO}_x$  排放浓度可降低  $30\%$  左右。

### 1.2 烟气脱硝技术

SCR烟气脱硝是当前主流烟气脱硝技术,主要用于电站锅炉<sup>[10-11]</sup>。其工艺原理是在有催化剂存在的条件下,将还原剂(氨气)喷入一定温度下( $290 \sim 430 \text{ }^\circ\text{C}$ )的烟气内,使  $\text{NO}_x$  还原成  $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的方法。催化剂是SCR工艺的重要部分,成本占到总投资的  $25\% \sim 30\%$ ,成本很高。在理想状态下,SCR法  $\text{NO}$  脱除率可达  $90\%$  以上,但实际脱除率仅达  $65\% \sim 80\%$ 。脱除性能的好坏取决于催化剂的活性、用量以及  $\text{NH}_3$  与废气中的  $\text{NO}_x$  的比率。

SNCR<sup>[12-14]</sup>是用  $\text{NH}_3$ 、尿素等还原剂喷入炉膛为  $850 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$  的区域,还原剂可与烟气中的  $\text{NO}_x$  进行选择性反应生产  $\text{N}_2$ 。SNCR技术是把燃烧室作为反应器,脱硝效率较为  $30\% \sim 60\%$ ,与SCR相比,SNCR技术具有投资少、运行费用低、回收周期短的优点。如能与低  $\text{NO}_x$  燃烧技术联合使用,运行费用则更低。总之,SNCR是一种成熟经济的烟气脱硝技术。

## 2 新一代煤粉锅炉低氮控制技术

### 2.1 煤粉锅炉低氮燃烧技术

#### 2.1.1 研发思路

第I、II代煤粉燃烧器采取空气分级低氮燃烧技术,通过在预燃室内低氧气氛的反应,很好地抑制了挥发分氮和一部分焦炭氮向  $\text{NO}_x$  的转化。但是到了炉内由于还原性气体的作用有限,焦炭氮以及热力型氮的转化得不到有效的控制。而焦炭氮的主要影响因素是氧浓度和温度,热力氮的最主要因素是温度( $>1500 \text{ }^\circ\text{C}$  有大量  $\text{NO}_x$  生成,提高  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  反应速度增加  $6 \sim 7$  倍)。因此,避免局部高温,降低氧浓度成为炉内低氮的关键方法。同其他抑制技术相比较,烟气再循环更适合于组织高温空气燃烧使用,也更接近工程实践,并且采用炉外烟气再循环,锅炉改造方便,改造成本也相对低廉。

为彻底解决以上问题,新一代煤粉锅炉低氮燃烧技术采用(半)煤气化空气分级低氮燃烧耦合烟气再循环,通过对原有燃烧器的结构及配风优化,强

化预燃室内还原气氛,极大抑制  $\text{NO}_x$  生成率;同时将尾部烟气再循环稀释炉膛内空气含氧浓度,进一步提高综合低氮效果。

### 2.1.2 工艺原理

煤粉锅炉低氮燃烧工艺原理如图 1 所示。在预燃室内分级送风,一、二次风的合计送入量小于燃烧所需空气量,煤粉在缺氧条件下发生(半)煤气化反应,形成以  $\text{CO}$  为主的还原性气氛,抑制  $\text{NO}_x$  的生成;形成的可燃性煤气从燃烧室喷口高速喷入炉膛后继续燃烧;从引风机下游抽取部分烟气,与三次风混合后进入燃烧室的空冷夹套,先是作为燃烧室的冷却介质,经换热后,这部分低温低氧混合气经旋流加速后喷入炉膛,在炉膛中心区域的火焰四周形成环型助燃风,随燃烧反应进程均匀缓慢提供所需  $\text{O}_2$ ,使得炉膛内温度均匀,燃烧稳定, $\text{NO}_x$  的生成进一步抑制。整个燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的生成量可得到有效抑制,实现燃烧系统低  $\text{NO}_x$  排放。经工业试验,折算后的  $\text{NO}_x$  排放  $<200 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,比优化前低氮效率提高 50% 以上。

另外,新型低氮燃烧器采用混合空冷设计,相对传统水冷壁的冷却方式,可有效降低燃烧器的整体质量、安装及操作难度。

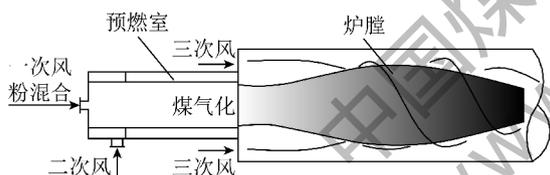


图 1 煤粉锅炉低氮燃烧工艺原理示意

### 2.2 烟气脱硫技术选择

为进一步降低  $\text{NO}_x$  排放,可将烟气脱硝与低氮燃烧技术联合使用,使得  $\text{NO}_x$  排放降到  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$  以下。在  $\text{NO}_x$  排放要求更为严格的地区,可作为煤粉锅炉系统  $\text{NO}_x$  减排备选工艺及未来技术储备。

2 种烟气脱硝技术的工艺对比见表 1<sup>[15]</sup>,2 种脱硝工艺的经济性对比如下:投资单价 SCR 约 150 元/kW,SNCR 约 50 元/kW; $\text{NO}_x$  脱除运行成本 SCR 约 2 分/kWh,SNCR 约 0.3 分/kWh(投资成本为设备国产化价格)<sup>[15]</sup>。

经工艺比选发现,与 SCR 相比,SNCR 在占地、设备投资、运行费用、与煤粉锅炉系统匹配性等方面具有优势,因此更适合中小型规模的煤粉工业锅炉系统。

表 1 2 种烟气脱硝技术的工艺对比

项目	SCR 技术	SNCR 技术
反应剂	以 $\text{NH}_3$ 为主	可使用 $\text{NH}_3$ 或尿素
反应温度/ $^{\circ}\text{C}$	320 ~ 400	850 ~ 1100
催化剂	成分主要为 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{WO}_3$	不使用催化剂
脱硝效率/%	60 ~ 90	30 ~ 60
反应剂喷射位置	脱硫除尘一体化装置(煤粉锅炉专用设备)与 SCR 反应器间烟道内	燃烧装置合适温度窗口
$\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 氧化	会导致 $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 氧化	不导致 $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 氧化
$\text{NH}_3$ 逃逸/ $10^{-6}$	3 ~ 5	5 ~ 10
占地空间	较大,需增加大型催化剂反应器和供氨系统	小,无需增加催化反应器
系统压力损失	催化剂会造成压力损失,一般 $>980 \text{ Pa}$	没有压力损失
燃料的影响	高灰分会磨损催化剂,碱金属氧化物会使催化剂钝化	无影响
锅炉的影响	受脱硫反应器出口烟气温度(约 $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )的影响,需对烟气进行再加热	受炉膛内烟气流速及温度分布的影响

### 3 结 语

通过对原有低氮燃烧技术的优化升级,煤科院开发出新一代煤粉锅炉  $\text{NO}_x$  联合控制技术,进一步发掘煤粉燃烧器的低氮潜力,并将煤气化空气无级分级低氮燃烧与烟气再循环技术进行耦合,经工业试验证明,应用后锅炉尾气  $\text{NO}_x$  排放可达  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$  以下。另外结合 SNCR 烟气脱硝技术, $\text{NO}_x$  浓度还将降低,达到  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$  以下。通过以上低氮措施,煤粉锅炉系统  $\text{NO}_x$  控制水平得到提升,满足并优于国家最新环保标准。

#### 参考文献:

- [1] GB 13271—2014, 锅炉大气污染物排放标准[S].
- [2] 何海军,纪任山,王乃继. 高效煤粉工业锅炉的研发与应用[J]. 煤炭科学技术,2009,37(11):1-4.
- [3] 梁 兴. 高效煤粉工业锅炉与水煤浆工业锅炉的对比分析[J]. 洁净煤技术,2012,18(5):88-91.
- [4] 范 玮. 煤粉工业锅炉产业发展现状及投资分析[J]. 洁净煤技术,2012,18(4):4-7.
- [5] 庞永梅,王晋权,郭 建,等. 空气分级燃烧降低锅炉  $\text{NO}_x$  排放控制技术[J]. 电力科学与工程,2007,23(4):46-49.
- [6] 董 利,李瑞扬. 炉内空气分级低  $\text{NO}_x$  燃烧技术[J]. 电站系统工程,2008,37(6):15-18.

(下转第 120 页)

7,菌液浓度 10 个/L,脱硫效果最好。②氧化亚铁硫杆菌预处理时间 10 min,矿浆浓度 10%,pH 为 1~2 时,脱硫效果最好。

张明旭等<sup>[10]</sup>通过对实际高硫煤中的黄铁矿和较纯净低硫煤配制的人工煤样进行了不同菌种和不同条件下的微生物预处理浮选脱硫的研究,证实了黄铁矿解离的重要性,解离度越高,脱硫效果越好。

### 3.2.3 其他方面的研究

周长春等<sup>[17]</sup>研究了红假单胞菌在煤系黄铁矿表面的吸附量,认为红假单胞菌在黄铁矿表面的吸附量遵守 Langmuir 等温方程式,吸附量和矿浆浓度成反比,pH 值对红假单胞菌吸附量有影响,在中性环境下吸附量最高,在碱性环境下吸附量较小,在酸性环境下吸附量最低。红假单胞菌与黄铁矿的吸附作用中,存在静电引力。

### 3.3 存在问题

近年来,我国在煤的微生物预处理浮选脱硫技术的研究方面取得了很大进展,但也存在诸多问题:①对微生物在黄铁矿颗粒表面的吸附和改性机理研究不够深入;②目前对煤的微生物预处理浮选脱硫技术的研究仍停留在实验室阶段,必须努力将此先进的技术应用到生产中;③引进其他学科先进的理论和技术应用于煤的微生物预处理浮选脱硫技术的研究中,解决研究中存在的问题。

## 4 结 语

煤的微生物预处理浮选脱硫技术以其环保、低耗高效的优势具有广泛的应用前景。不断深入微生物在颗粒表面吸附和改性机理的理论研究,努力将煤的微生物预处理浮选脱硫技术引入工业生产,引进其他学科的新理论、新技术来深化该技术的研究,将是下一步的研究方向。煤的微生物脱硫技术的研究成功,将推动我国洁净煤技术的发展,为我国高硫煤的绿色环保利用提供技术支持,降低因煤炭燃烧而造成的环境污染。

### 参考文献:

[1] 张东晨,张明旭,陈清如.煤中黄铁矿表面细菌氧化的 XRD 及 SEM/TEM 研究[J].中国矿业大学学报,2005,34(6):761-765.  
 [2] 张鸣林.中国煤的洁净利用[M].北京:化学工业出版社,2007:116.  
 [3] 石 斌.高硫煤燃前脱硫及强化脱硫方法[J].选煤技术,2011(4):68-69.

[4] 魏德洲,朱一民,李晓安.生物技术在矿物加工中的应用[M].北京:冶金工业出版社,2008:166-168.  
 [5] 陈清如.建设有中国特色的大型坑口电站:燃前采用两段高效干法选煤技术[J].中国煤炭,2004(10):55-56.  
 [6] 孙丽梅,单忠健.煤炭脱硫工艺研究进展[C]//国际选煤技术交流大会论文集.徐州:中国矿业大学出版社,2004:221-224.  
 [7] 武秀琴,张建新,谷立坤.煤炭微生物脱硫技术的研究及进展[J].选煤技术,2009(2):65-67.  
 [8] 张明旭,李 庆,王 勇,等.皖南高硫煤微生物-浮选法脱硫的研究[J].煤炭学报,2001,26(6):671-674.  
 [9] 张明旭,李贤国,李 庆.球红假单胞菌对浮选脱除黄铁矿的影响[J].选煤技术,2004(2):12-15.  
 [10] 张明旭,李 庆,张东晨,等.几种生物脱硫菌种作为生物抑制剂对人工煤样的浮选脱硫研究[J].选煤技术,2006(10):79-82.  
 [11] 周桂英,张 强,曲景奎.煤炭微生物预处理浮选脱硫降灰的实验研究[J].矿产综合利用,2004(5):11-14.  
 [12] 巩冠群,陶秀祥.煤炭生物脱硫的白腐菌浮选和浸滤研究[J].煤炭科学技术,2006,34(2):49-51.  
 [13] 魏德洲,周志付,梁海军,等.燃煤微生物预处理浮选脱硫的试验研究[J].东北大学学报,2002,23(5):477-479.  
 [14] 周志付,魏德洲,崔振扬,等.燃煤微生物预处理浮选脱硫的研究[J].矿冶工程,2002,22(2):57-58.  
 [15] 周长春,陶秀祥,刘炯天.红假单胞菌浮选脱硫影响因素研究[J].煤炭转化,2005,28(3):35-37.  
 [16] 周长春,陶秀祥,刘炯天.煤的微生物浮选脱硫影响因素研究[J].煤炭学报,2006,31(4):497-500.  
 [17] 周长春,陶秀祥,刘炯天.红假单胞菌在煤系黄铁矿表面吸附量的测定[J].中国矿业大学学报,2007,36(1):81-84.

(上接第 109 页)

[7] 李芳芹,魏敦崧,马京程,等.燃煤锅炉空气分级燃烧降低 NO<sub>x</sub> 排放的数值模拟[J].燃料化学学报,2004,32(5):537-541.  
 [8] 贾 力,殷 龙.烟气再循环实现低 NO<sub>x</sub> 排放的实验研究[J].工业加热,2003,19(6):47-49.  
 [9] 陈 杏.低氮燃烧+选择性非催化还原烟气脱硝技术(SNCR)在循环流化床锅炉脱硝工程上的应用[J].能源环境保护,2013,27(4):33-35.  
 [10] 赵宗让.电厂锅炉 SCR 烟气脱硝系统优化设计[J].中国电力,2005,38(11):69-72.  
 [11] 冯立波,罗钟高,葛春亮.火电厂 SCR 烟气脱硝工艺系统设计[J].能源工程,2009(2):48-52.  
 [12] 王方群,杜云贵,刘 艺,等.国内燃煤电厂烟气脱硝发展现状及建议[J].中国环保产业,2007(1):18-22.  
 [13] 顾卫荣,周明吉,马 薇.燃煤烟气脱硝技术的研究进展[J].化工进展,2012,31(9):2084-2092.  
 [14] 胡浩毅.以尿素为还原剂的 SNCR 脱硝技术在电厂的应用[J].热力发电,2009,38(3):22-24.  
 [15] 项 昆.3 种烟气脱硝工艺技术经济比较分析[J].热力发电,2011,40(6):1-3.