

# 煤粉燃烧过程强化脱硝技术研究

周 棋<sup>1,2</sup>, 王 勇<sup>1,2</sup>, 刘松霖<sup>3</sup>, 刘 一<sup>1,2</sup>, 陈 灿<sup>1,2</sup>, 范卫东<sup>3</sup>

(1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 四川 成都 611731; 2. 东方电气集团 东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001;

3. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:**为进一步提高炉内燃烧过程的脱硝效率, 尤其是解决燃用挥发分低的贫煤和无烟煤时炉内  $\text{NO}_x$  排放浓度高的问题, 基于高温燃尽区喷氨还原 NO 机理, 提出了多级燃尽风布置区的高温强化还原区喷氨脱硝技术——多级强化还原煤粉燃烧技术(MERC)。借助 50 kW 下行燃烧炉, 开展了氨氮比( $R_{\text{NSR}}$ )、还原剂与烟气混合程度、还原剂载气等关键技术参数对脱硝效率的影响, 同时开展了 MERC 和 SNCR 对比试验研究, 并进行了 MERC 技术的工程应用试验。结果表明:采用双支喷枪对喷能提高还原剂与炉内烟气的混合程度, 双支喷枪对喷使脱硝效率从单支喷枪的 45% 提高到 70%; 空气作为载气, 氨氮比超过 1.2 时,  $\text{NO}$  浓度在 500 ~ 700  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , 随着氨氮比增加,  $\text{NO}_x$  浓度先升后降; 烟气作为载气时  $\text{NO}_x$  浓度大幅降低, 仅为 100  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  左右, 因此还原剂的载气中含氧量越低, 越有利于增强高温中喷氨还原 NO 的效果, 还原剂载气需尽可能降低氧含量或采用无氧媒介。通过对比 SNCR 和 MERC 试验结果发现, 氨氮比小于 2 时, 常规 SNCR 的  $\text{NH}_3$  耗量高于 MERC; 氨氮比超过 2.5 后,  $\text{NH}_3$  同 NO 的反应趋于饱和, 过量的  $\text{NH}_3$  同  $\text{SO}_2$  发生反应生成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$ , 这是工程上出现 SNCR 过量喷尿素后造成空气预热器堵塞的原因。对某电厂 125 MW 燃煤锅炉进行低氮改造, 由于该电厂 1、2 号锅炉燃用无烟煤+贫煤+烟煤的混煤, 2015 年低氮燃烧系统改造后一直存在锅炉出口  $\text{NO}_x$  浓度不稳定的情况, 尾部脱硝装置入口最低在 500  $\text{mg}/\text{m}^3$  以下, 最高为 1 200  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。为确保改造达到超低  $\text{NO}_x$  排放目标值, 在原有燃烧优化试验+SNCR 改造+SCR 优化提效的设计方案的基础上增加了燃尽风前的尿素喷枪。结果表明:炉内脱硝效率高于 65%, 结合锅炉尾部 SCR 装置能实现烟囱位置  $\text{NO}_x$  浓度不高于 30  $\text{mg}/\text{m}^3$  的超低排放, 达到了预期效果。

**关键词:**下行炉; 强化还原; 还原剂; 燃尽风; 脱硝效率

中图分类号:TK16

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)04-0111-08

## Research on enhanced denitrification technology in pulverized coal combustion process

ZHOU Qi<sup>1,2</sup>, WANG Yong<sup>1,2</sup>, LIU Songlin<sup>3</sup>, LIU Yi<sup>1,2</sup>, CHEN Can<sup>1,2</sup>, FAN Weidong<sup>3</sup>

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China;

2. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., Dongfang Electric Corporation, Zigong 643001, China;

3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to further promote the denitrification efficiency in the combustion process, especially to solve the problem of high  $\text{NO}_x$  emission in the furnace when burning low volatile meagre coal or anthracite, a technology with ammonia injection denitrification in the high temperature intensified reduction zone-multi-staged enhanced reduction pulverized coal combustion technology (referred to as MERC) was proposed based on the reducing NO mechanism by ammonia. By means of a 50 kW down-fired furnace facility, the effects of key technical parameters, i. e., ammonia-nitrogen ratio ( $R_{\text{NSR}}$ ), mixing degree of reductant and flue gas, and carrier gas type of reductant on denitrification efficiency were studied. The comparative experiments of MERC and SNCR were carried out, and the engineering application test

收稿日期:2019-03-21; 责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19032101

基金项目:四川省科技支撑计划资助项目(2016JZ0019)

作者简介:周 棋(1964—),男,重庆人,高级工程师,主要从事大型电站锅炉设备研发、煤粉燃烧技术、CFB 锅炉技术研究。

E-mail:zhouq@dbc.com.cn

引用格式:周棋,王勇,刘松霖,等.煤粉燃烧过程强化脱硝技术研究[J].洁净煤技术,2019,25(4):111-118.

ZHOU Qi, WANG Yong, LIU Songlin, et al. Research on enhanced denitrification technology in pulverized coal combustion process[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 111-118.



移动阅读

of MERC was performed. The results show that the mixing degree of reducing agent and flue gas in the furnace can be improved by using double-spray guns, and thus, the denitrification efficiency can be increased from 45% to 70%. The NO concentration is between 500–700 mg/Nm<sup>3</sup> when air acts as a carrier gas and the ammonia–nitrogen ratio exceeds 1.2. The NO<sub>x</sub> concentration rises firstly and then falls as the ammonia–nitrogen ratio increases. When the flue gas is used as the carrier gas, the NO<sub>x</sub> concentration is greatly reduced to be only ca. 100 mg/Nm<sup>3</sup>. The results show that the lower oxygen content in the carrier gas of the reducing agent, the more beneficial it is to enhance the effect of ammonia reduction in high temperature. The reducing agent carrier gas needs to reduce oxygen content as much as possible or use oxygen-free medium. By comparing the results of SNCR and MERC experiments, it is found that the NH<sub>3</sub> consumption of conventional SNCR is higher than that of MERC when the ammonia–nitrogen ratio is less than 2, then the reaction of NH<sub>3</sub> with NO tends to be saturated after the ammonia–nitrogen ratio exceeds 2.5, and the excess NH<sub>3</sub> reacts with SO<sub>2</sub> to form (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> and NH<sub>4</sub>HSO<sub>3</sub>, which is the reason of clogging of the air preheater caused by excessive SNCR injection in the project. Laboratory research results are further practiced in engineering. Low nitrogen technological reform was applied to 125 MW coal-fired boiler in a power plant. Since the No. 1 and No. 2 boilers in this power plant were fed anthracite+lean and coal+bituminous coal mixture, the concentration of NO<sub>x</sub> at the outlet of the boiler was unstable since the retrofit of the low nitrogen combustion system in 2015. The inlet of the tail denitrification unit is below 500 mg/m<sup>3</sup> and the maximum is 1 200 mg/m<sup>3</sup>. In order to ensure that the retrofit achieves the target value of ultra-low NO<sub>x</sub> emission, the urea spray gun before exhaust air was added on the basis of the original design scheme of combustion optimization test+SNCR retrofit+SCR optimization. The results show that the denitrification efficiency in the furnace is higher than 65%. Combining with SCR device at the tail of the boiler, the ultra-low emission of NO<sub>x</sub> concentration at the chimney position is achieved, which is not higher than 30 mg/m<sup>3</sup>. Eventually, the MERC application was realized, and the field test of retrofit project proved the MERC application achieved the desired effect.

**Key words:** down-fired furnace facility; enhanced reduction; reductant; burnout air; denitration efficiency

## 0 引言

煤炭作为我国的主要能源,长期占据不可替代的重要地位<sup>[1-2]</sup>。近年我国经济高速发展,雾霾等空气污染现象时有发生,环境污染不容忽视<sup>[3]</sup>。虽然国内大部分燃煤电厂均已实现超低超净排放,而如何进一步降低 NO<sub>x</sub> 等污染物排放,提高经济效益仍是研究重点<sup>[4]</sup>。目前炉内脱硝技术主要有低氮燃烧技术、选择性非催化还原技术(SNCR)。其中烟气再循环+空气分级、SNCR 是脱硝效率较高的成熟技术。Greul 等<sup>[5]</sup>采用电加热炉,利用分级燃烧与喷氨相结合的方式降低 NO<sub>x</sub> 排放,取得了良好效果,使烟气中 NO<sub>x</sub> 脱除率达到 70%。张树国等<sup>[6]</sup>借助沉降炉研究了二级燃尽风对脱硝效率的影响,将燃尽风分为 2 股从不同位置同时给入,结果表明采用二级燃尽风的方式能明显改善脱硝效果。近年来诸多学者侧重研究了单空气分级条件下过量空气系数、温度、氨氮比等因素对脱硝效率的影响<sup>[7-8]</sup>。对于脱硝机理研究方面。Speth 等<sup>[9]</sup>利用携带流反应器研究了木屑燃烧过程,以及空气分级+喷氨对脱硝过程的影响,结果表明相比只有空气分级条件,木屑燃烧的脱硝效率提高 40%。刘鹏等<sup>[10]</sup>借助固定床在高温环境下,模拟烟气组分进行喷氨过程脱硝机理研究,利用 Chemkin 软件对比优化了 Kilpinen 及 Glarborg 等的脱硝机理模型<sup>[11-12]</sup>,结果表明 NH<sub>2</sub> 与 NO 反应

对整个脱硝过程有明显影响。Tayyeb 等<sup>[13]</sup>介绍了三聚氰酸作为潜在还原剂的应用,综述了氨、尿素和三聚氰酸的反应机理。但鲜见多级燃尽风布置区高温强化还原区喷氨脱硝的相关研究。本文提出一种新型脱硝技术——“多级强化还原煤粉燃烧技术(multi-staged enhanced reduction pulverized coal combustion technology, MERC)”。MERC 是在锅炉空气分级基础上,向多级燃尽风布置区的高温缺氧强化还原区喷入尿素、氨气等还原剂,在还原性气氛下与 NO 发生还原反应生产 N<sub>2</sub>,实现煤粉燃烧过程中直接脱除 NO。燃用低挥发分的贫煤和无烟煤时, MERC 有利于解决炉内 NO<sub>x</sub> 排放浓度高的问题,如可使 W 火焰锅炉的尾部 SCR 脱硝系统更易实现超净排放,同时降低脱硝成本。本文在东方电气集团东方锅炉股份有限公司试验中心 50 kW 下行燃烧炉上开展了 MERC 试验研究,分析其脱硝规律,并进行工程应用试验,以验证 MERC 技术的可行性及可靠性。

## 1 试验

### 1.1 试验煤样

试验煤种为阳泉无烟煤、贵州无烟煤和寿阳贫煤,其工业分析和元素分析见表 1。可知阳泉无烟煤的氮元素含量最高,为 1.07%,贵州无烟煤氮元素含量次之为 0.73%,而寿阳贫煤氮元素含量最低,仅为 0.70%。

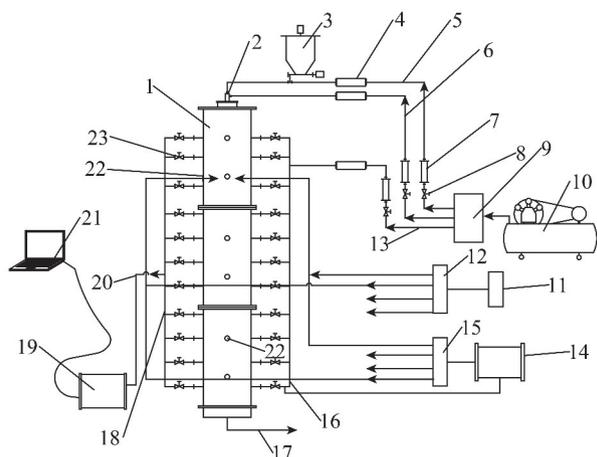
表1 煤样工业分析及元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coals

煤样	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	$M_{\text{ad}}$	$V_{\text{daf}}$	$A_{\text{ar}}$	$FC_{\text{ar}}$	$C_{\text{ar}}$	$H_{\text{ar}}$	$O_{\text{ar}}$	$N_{\text{ar}}$	$S_{\text{ar}}$	
阳泉无烟煤	1.78	8.64	18.76	70.00	69.65	2.86	2.73	1.07	2.33	26.81
贵州无烟煤	1.31	16.34	30.75	56.37	58.03	2.33	4.41	0.73	1.88	22.11
寿阳贫煤	1.44	20.00	47.55	40.46	42.07	2.34	4.81	0.70	0.66	16.04

## 1.2 试验系统

50 kW 下行燃烧试验台的主体由炉膛、配风及燃料输送系统、沿程气体采样装置、沿程温度采样装置、尾部排烟系统等组成,并新增了一套烟气再循环系统和还原抑制剂喷注系统,如图1所示。



1—下行炉炉体; 2—燃烧器; 3—主给粉机;  
4—空气预热器; 5—一次风送风管路; 6—二次风送风管路;  
7—送风管路流量计; 8—送风管路控制阀门; 9—送风管管;  
10—空气压缩机; 11—还原剂储罐;  
12—还原剂流量分配控制系统; 13—燃尽风送风管管;  
14—烟气再循环系统; 15—再循环烟气流量分配控制系统;  
16—燃尽风送风管管; 17—尾部烟道; 18—烟气取样管网;  
19—烟气分析仪; 20—抽气取样管路; 21—计算机;  
22—还原剂喷枪; 23—烟气取样管路控制阀门

图1 东方锅炉50 kW 下行燃烧试验台系统

Fig. 1 Schematic picture of 50 kW down-fired furnace facility of Dongfang Boiler Group Co

下行燃烧炉的主炉体由7节组成。第1节安装有电加热,用于启炉点火;第1、2节配备有分层掺烧燃烧器,用于多煤种掺烧试验;第1~6炉体均设有温度热电偶、烟气采样孔、燃尽风注入孔、取灰孔等;每3节配备有烟气采样管网和燃尽风供风管网;第7节为烟气排出段,且采用水封池集灰密封。从燃烧器喷口至烟气排出口距离为6 600 mm,配备的煤粉燃烧器布置在炉膛顶部,向下组织煤粉气流燃烧。所用的煤粉燃烧器为小型旋流燃烧器,煤粉稳定燃烧后第1段炉膛内温度可达到1 450 ℃以上,烟气采样口和燃尽风喷口等距布置,相同编号的采样口和燃尽风喷口的竖直高度完全相同,下行炉实炉及

燃尽风管网如图2所示。



(a) 下行燃烧炉实炉 (b) 燃尽风管网

图2 下行燃烧炉实炉及燃尽风管网

Fig. 2 Scene picture of down-fired furnace and local tubes arrangement of OFA

氨气控制系统包括氨气气源(若干气瓶)、氨气分配母管、关断阀门、转子流量计、质量流量控制器、氨气泄漏报警器等,氨气经过控制器调整流量后进入水冷喷枪同再循环烟气混合后喷入炉内。氨气控制系统如图3所示。



图3 氨气控制系统

Fig. 3 Ammonia control system

## 1.3 试验方法

本试验将燃尽风分为2级,燃尽风总风率控制在37%,一级燃尽风占总燃尽风量的45%,二级燃尽风占总燃尽风量的55%,下行燃烧炉总空气过量系数1.16,主燃区过量空气系数维持在0.73左右,通过炉膛整体深度空气分级后,喷氨试验前燃用无烟煤的 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度控制在650~750 mg/m<sup>3</sup>( $\text{O}_2$ 体积分数为6%时);喷氨试验前燃用贫煤的 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度控制在520~600 mg/m<sup>3</sup>( $\text{O}_2$ 体积

分数为6%时)。采用氨气作为NO还原剂,液氨降压气化后进入氨气流量分配控制系统,由七星数字式气体质量流量控制器(CS200A)根据不同氨氮比( $R_{NSR}=[NH_3/NO]$ )调节分配氨气流量,氨气进入喷枪后与再循环烟气混合,由再循环烟气携带送入目标还原区。按试验工况还原剂的喷入可采取单支枪一侧喷入,2支枪对喷或2支枪错位喷的方式,所需再循环烟气均由烟气再循环系统提供。本试验使用2台烟气分析仪,其中MRU VARIO PLUS烟气分析仪为就地测量装置,示数由人工读取,另一台为ABB A2000烟气分析仪,通过信号线连接至控制室计算机,可在计算机上显示烟气组分浓度,2台烟气分析仪互为参考,可在烟气组分数据相差过大时及时发现问题,避免因测量装置故障获得错误数据。本项目开展了多次重复性试验,结果重复性较好,试验数据偏差在5%~8%。

试验过程中下行燃烧炉能保持煤粉自持燃烧,喷氨试验前分别燃用3种煤时的炉内温度分布曲线如图4所示。

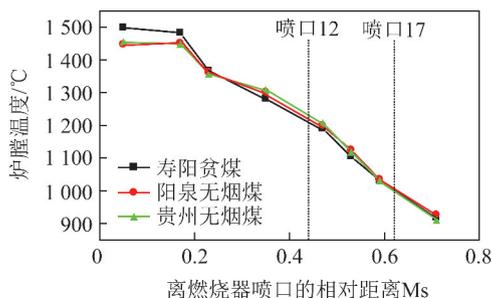


图4 下行燃烧炉温度曲线

Fig. 4 Down-fired furnace temperature curve

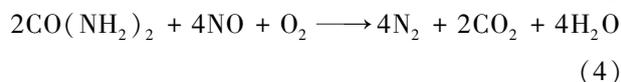
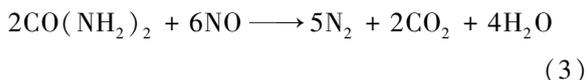
## 2 试验结果与分析

在炉膛分级燃烧过程中,整个炉膛会形成还原区、过渡区、燃尽区。由于分级形成的富燃料缺氧气氛称为还原区,在还原区中存在大量的CO、H<sub>2</sub>、HCN等还原性气氛。目前公认的主要脱硝化学总包反应<sup>[14-16]</sup>为

氨气:



尿素:



### 2.1 氨气为还原剂,氨氮比对脱硝效率的影响

燃用阳泉无烟煤,选定燃尽风位置喷口8和喷

口14,主燃区过量空气系数 $SR=0.73$ ,使用氨气作为还原抑制剂在喷口12和喷口13分别开展浓度试验,采用单只喷枪在不同氨氮比的条件下进行试验,结果如图5所示。可知,试验在较大氨氮比范围内进行了喷氨气脱硝试验。氨氮比小于1.8时,脱硝效率随着氨氮比的增大明显增大;氨氮比为1.8~2.5时,脱硝效率稳定在38%左右;在氨氮比大于2.5时,脱硝效率随氨氮比的增加继续增加,最终脱硝效率能达到49%,规律与前人研究基本一致<sup>[17]</sup>。

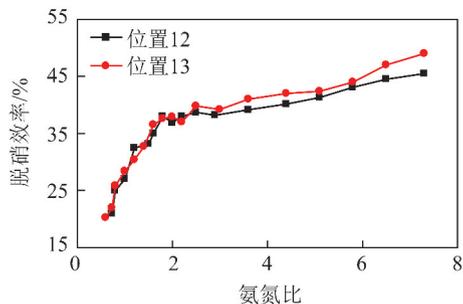


图5 喷口12和喷口13单枪喷氨气脱硝效率随氨氮比的变化

Fig. 5 Change of denitrification efficiency with ammonia-nitrogen ratio of nozzle 12 and nozzle 13

### 2.2 还原剂与烟气混合程度对脱硝效率的影响

还原剂与烟气的混合程度是影响脱硝效率的重要因素。燃用阳泉无烟煤时,主燃区过量空气系数 $SR=0.73$ ,第1级燃尽风从喷口8喷入,第2级燃尽风从喷口14喷入,在喷口12分别采用单支枪喷氨气和2支枪对喷氨气的方式。单支枪喷氨气和2支枪对喷氨气脱硝效率随氨氮比的变化如图6所示。可知2支枪对喷氨气可获得70%以上的脱硝效率,氨氮比为2.5以上时脱硝效率达到80%以上,曲线开始平滑。因为双枪对喷氨气增强了氨气进入炉膛后与炉膛烟气的混合程度,使还原剂更充分地参与到还原NO的反应中。从经济性上考虑,MERC设计氨氮比为1.2比较适宜,并需要强化还原剂与烟气的混合。

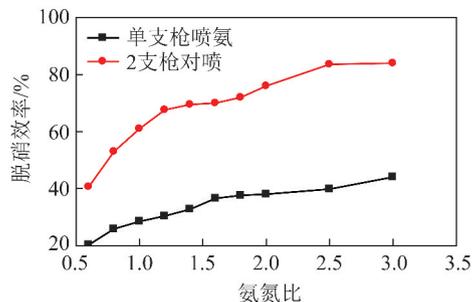
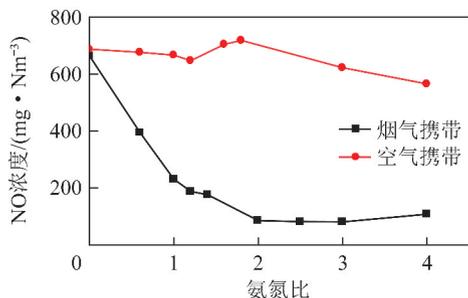


图6 单支枪喷氨气和2支枪对喷氨气脱硝效率随氨氮比的变化

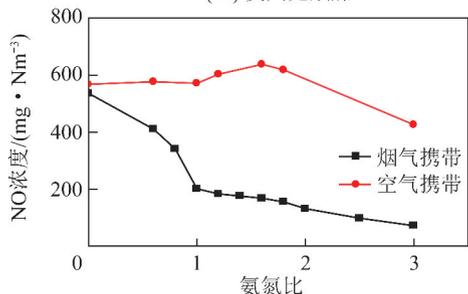
Fig. 6 Change of denitrification efficiency of ammonia jet by single gun and two guns with ammonia-nitrogen ratio

### 2.3 还原剂载气对脱硝效率的影响

对贵州无烟煤和寿阳贫煤,分别采用空气和再循环烟气作为还原剂载气,研究不同氨氮比对脱硝效果的影响,结果如图7所示。试验时,主燃区过量空气系数  $SR=0.73$ ,第1级燃尽风从喷口8喷入,第2级燃尽风从喷口14喷入,在喷口12采用2支枪对喷氨气的方式。采用空气为载气时,为控制总的过量空气系数不变,关小末级燃尽风进行调整。



(a) 贵州无烟煤



(b) 寿阳贫煤

图7 空气携带氨气与烟气携带氨气 NO 浓度随氨氮比的变化

Fig. 7 Changes of NO concentration of ammonia carried by air and flue gas with ammonia-nitrogen ratio

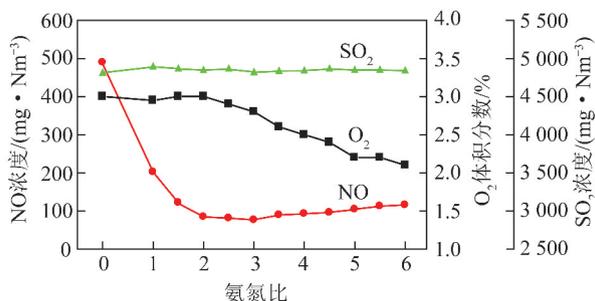
由图7可知,空气携带氨气时 NO 初始浓度比烟气携带的初始浓度高,这是由于试验条件所限,空气做载气时,末级燃尽风减少用作还原剂载气所致。2种燃煤更换载气前后的 NO 变化趋势一致,载气更换为空气后,氨氮比小于1.2时,NO 变化不明显;氨氮比在1.2~2.0时,NO 不降反升,最高时有约10%的升幅,当氨氮比超过2.0后,NO 又开始降低。综合分析,由于喷氨区域烟气温度超过传统 SNCR 的反应温度,采用空气作为载气,喷入的氨气一部分同已生成的 NO 发生还原反应,而一部分被氧化为 NO,当氨氮比低于1.2时,氧化和还原反应趋于平衡,表现出最终 NO 变化不大。氨氮比在1.2~2.0时,氧化反应大于还原反应,表现出最终 NO 升高,氨氮比超过2.2时,在小区域内氧含量消耗,形成小区域的还原性气氛,还原反应大于氧化反应,表现出最终的 NO 开始降低,由于该条件下氨氮比很大,运行经济性较差。因此,还原剂载气需尽可能降低氧

含量或采用无氧媒介。

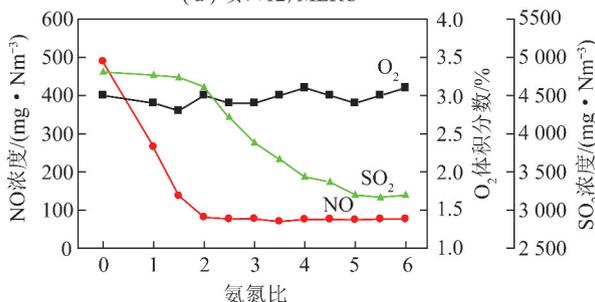
### 2.4 MERC 和 SNCR 对比试验

对贵州无烟煤,采用再循环烟气作为还原剂载气,分别在 MERC 和常规 SNCR 区域研究氨氮比对脱硝效果的影响。试验前,控制主燃区过量空气系数  $SR=0.73$ ,第1级燃尽风从喷口8喷入,第2级燃尽风从喷口14喷入。

喷氨试验时,MERC 的喷口12炉内区域温度在  $1\ 200\sim 1\ 230\ ^\circ\text{C}$ ,高于常规 SNCR 的反应水平,而喷口17炉内区域温度在  $1\ 020\sim 1\ 050\ ^\circ\text{C}$ ,处于常规 SNCR 的反应水平。保持以上工况,投运氨气试验时,采用再循环烟气作为载气,分别在 MERC 喷口12采用2支枪对喷氨气的方式和在常规 SNCR 喷口17采用对喷氨气的方式进行试验,大幅度改变氨氮比,在下行炉尾部测孔23测试烟气成分,结果如图8所示。



(a) 喷口12, MERC



(b) 喷口17, SNCR

图8 MERC 和常规 SNCR 条件下脱硝效果随氨氮比的变化

Fig. 8 Change of denitrification efficiency with ammonia-nitrogen ratio under MERC and conventional SNCR conditions

由图8(a)可知,在氨氮比1.5以内时脱硝效率已经很高,随着氨氮比提高,脱硝效率进一步升高,只是趋势减缓,氨氮比达到3以上时 NO 排放反而上升,氨氮比超过2以后  $O_2$  明显降低。分析原因为,喷入过量  $NH_3$  后,未来得及反应的  $NH_3$  经过末级燃尽风时部分被氧化成 NO,但在大量喷  $NH_3$  条件下,却没有出现 NO 急剧增加的现象,所以  $NH_3$  经过末级燃尽风时除了氧化反应外,同时伴随还原反应,只是氧化反应速率高于还原反应速率,最终表现出 NO 排放升高的趋势。另外末级燃尽风前喷

氨,  $\text{SO}_2$  改变不明显, 因此该区域生成的  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  较少。

由图 8(b) 可知, 氨氮比为 2 时脱硝效率基本达到最高, 氨氮比进一步提高, 脱硝效率改变不明显, 改变氨氮比对  $\text{O}_2$  变化也不明显, 随着氨氮比提高,  $\text{SO}_2$  呈下降趋势。氨氮比小于 2 时,  $\text{NH}_3$  优先同  $\text{NO}$  反应, 但也有少部分同  $\text{SO}_2$  反应<sup>[18]</sup>, 此时常规 SNCR 的  $\text{NH}_3$  耗量高于 MERC。氨氮比超过 2.5 后, 由于  $\text{NH}_3$  同  $\text{NO}$  的反应趋于饱和, 因此过量的  $\text{NH}_3$  同  $\text{SO}_2$  发生反应生成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$ <sup>[19]</sup>, 随着氨氮比的提高, 最高达到 35% 以上的  $\text{SO}_2$  脱除效率, 这也是工程上 SNCR 过量喷尿素后造成空预器堵塞的原因。因此 SNCR 反应区段  $\text{NH}_3$  会与  $\text{SO}_2$  生成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$ , 过量喷入  $\text{NH}_3$  后, 工程上易造成空预器堵塞。而 MERC 技术不会出现该问题。

### 3 工程应用

#### 3.1 工程改造

MERC 技术处于国际前沿, 无工程可借鉴。本文在完成下行炉 MERC 技术机理研究的同时, 为验证 MERC 技术的可行性, 在某电厂 SNCR 脱硝改造中临时增加了燃尽风前的尿素喷枪, 达到了预期效果。某发电厂一期为  $2 \times 125$  MW 燃煤机组, 锅炉为超高压自然循环煤粉炉。一期 1、2 号锅炉为满足环保  $\text{NO}_x$  达标排放, 曾在 2015 年进行低氮改造, 采用低氮燃烧器结合 SCR 脱硝, 设计尾部脱硝装置出口  $\text{NO}_x$  浓度为  $100 \text{ mg/m}^3$ 。根据最新国家环保超低排放要求, 尾部脱硝装置出口  $\text{NO}_x$  浓度不得高于  $50 \text{ mg/m}^3$ , 电厂对 2 台锅炉进行脱硝超低排放改造, 以达到该目标值, 东方锅炉根据现有条件, 提出燃烧优化试验+SNCR 改造+SCR 优化提效的设计方案。

由于该电厂 1、2 号锅炉燃用无烟煤+贫煤+烟煤的混煤, 2015 年低氮燃烧系统改造后一直存在锅炉出口  $\text{NO}_x$  浓度不稳定的情况, 尾部脱硝装置入口最低在  $500 \text{ mg/m}^3$  以下, 最高为  $1200 \text{ mg/m}^3$ 。为了确保改造达到超低  $\text{NO}_x$  排放目标值, 本次在原有燃烧优化试验+SNCR 改造+SCR 优化提效的设计方案的基础上增加了燃尽风前的尿素喷枪, 但受制于成本原因, 未增加烟气再循环系统, 鉴于现场布置位置两侧墙有大风箱, 为节约改造成本, 仅在燃尽风前的前后墙上增加了尿素喷枪。

#### 3.2 喷枪布置

此次改造采用 MERC 技术在燃尽风前 19.6 m

处前后墙上各布置了 3 只短枪, 采用机械雾化, 设计了专用水冷喷枪, 由于该区域左右墙有大风箱, 为减少改造成本, 未在左右墙上布置喷枪, 也未增设烟气再循环系统, 该位置的脱硝效率预估不高, 仅验证喷尿素是否能降低  $\text{NO}_x$  排放。为了验证靠近主燃烧器位置喷尿素是否有效, 在 17.6 m 预留了喷枪管座, 可将 19.6 m 位置 6 只喷枪移到该位置开展试验, 具体布置如图 9、10 所示。

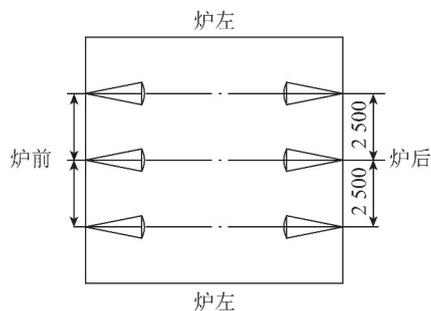


图 9 下层喷枪布置示意(下层)

Fig. 9 Spray gun arrangement on the lower layer (lower layer)

#### 3.3 试验结果分析

试验在 2 号锅炉 110 MW+供热条件下分别投运 SNCR 上层喷枪(大屏和水平烟道喷枪)、中层喷枪和 MERC 下层喷枪(图 10), 对尿素喷枪投运位置的效率进行对比。通过燃烧调整后停运所有尿素喷枪时的初始  $\text{NO}_x$  排放在  $320 \sim 350 \text{ mg/Nm}^3$ , 分层投运尿素喷枪试验结果如图 11 所示。

由图 11 可知, SNCR 脱硝效率最高, 因为该负荷段烟温水平处于 SNCR 的最佳区段; 而中层喷枪由于处于氧化性气氛, 且烟温已超过 SNCR 要求的温度, 喷入的尿素被大量氧化, 炉膛出口  $\text{NO}_x$  出现增长; MERC 下层尿素喷枪由于布置枪偏少, 采用机械雾化, 动能不足, 尿素同烟气混合较差, 脱硝效率偏低(20%~25%), 但验证了在该区域喷尿素能降低  $\text{NO}_x$  排放。某电厂锅炉炉内尿素综合脱硝效率高于 65%, 远超过设计指标。

试验还在 2 号锅炉 60 MW+供热条件下分别投运 SNCR 上层喷枪、中层喷枪和 MERC 下层喷枪, 对尿素投运位置的效率进行对比。通过燃烧调整后停运所有尿素喷枪时的初始  $\text{NO}_x$  排放在  $380 \sim 420 \text{ mg/Nm}^3$ , 分层投运尿素喷枪后的试验结果如图 12 所示。

由图 12 可知, 低负荷条件下投运上层尿素喷枪, 即大屏+水平烟道喷枪的 SNCR 脱硝效率比高负荷时大幅降低; 而中层喷枪由于低负荷烟温水平处于 SNCR 的最佳区段, 所以脱硝效率最高; 下层尿素

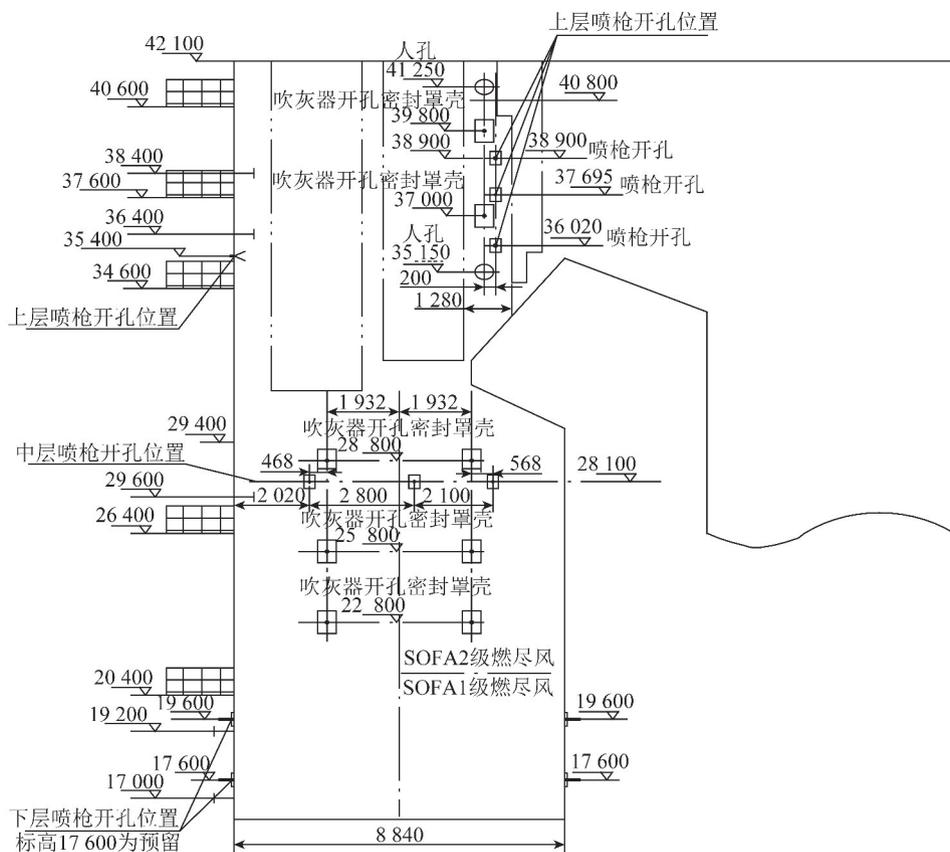


图 10 脱硝系统喷枪布置示意

Fig. 10 Schematic diagram of the spray gun arrangement of the denitration system

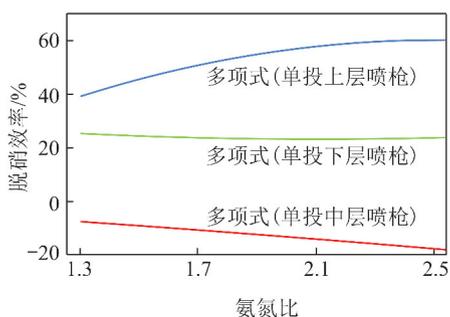


图 11 高负荷分别投运各层尿素喷枪的脱硝效率

Fig. 11 Denitration efficiency of each layer of urea spray guns with high load

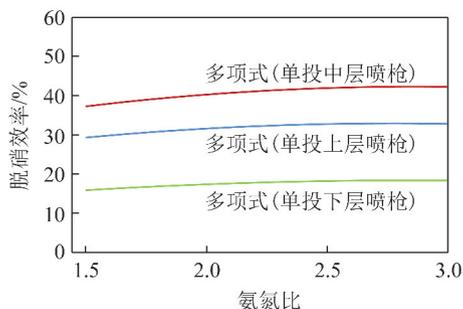


图 12 低负荷分别投运各层尿素喷枪的脱硝效率

Fig. 12 Denitration efficiency of each layer of urea spray guns with low load

喷枪由于布置枪偏少,采用机械雾化动能不足,尿素同烟气混合较差,脱硝效率偏低(16%~20%),但仍能有效降低 $\text{NO}_x$ 排放改造后通过燃烧优化,结合SNCR运行,锅炉尾部SCR脱硝入口 $\text{NO}_x$ 浓度排放稳定,在最恶劣工况2台磨运行及切换磨煤机的情况下仍能实现烟囱位置 $\text{NO}_x$ 浓度不高于 $30\text{ mg/m}^3$ 的超低排放,达到预期改造目标。

在高低负荷工况下,MERC应用总体成功。但由于改造工程的条件限制,未实现尿素射流与炉内烟气的良好混合,以及未采用含氧量低的烟气作为还原剂载气,根据前述实验室研究成果,显然MERC在本工程中应用的脱硝效率偏低是合理的。

## 4 结 论

1) 下行燃烧炉试验中,2支枪对喷氨气的脱硝效果明显好于单支枪喷氨气。单支喷枪的脱硝效率最高可达到45%左右;而2支枪对喷氨气可取得70%以上的脱硝效率,氨氮比为2.5以上时脱硝效率达到80%以上。即增强氨气进入炉膛后与炉膛烟气的混合程度,可使还原剂更充分地参与到还原NO的反应中。

2) 采用空气作为载气,喷入的氨气一部分同已

生成的NO发生还原反应,而一部分被氧化为NO<sub>2</sub>。氨氮比为1.2以上,空气作为载气时,随着氨氮比增加,NO<sub>x</sub>浓度先升后降;烟气作为载气时NO<sub>x</sub>浓度大幅降低,因而还原剂载气需尽可能降低氧含量或采用无氧媒介。

3)对比SNCR和MERC发现,氨氮比小于2时,常规SNCR的NH<sub>3</sub>耗量高于MERC。氨氮比超过2.5后,NH<sub>3</sub>同NO的反应趋于饱和,过量的NH<sub>3</sub>同SO<sub>2</sub>发生反应生成(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>和NH<sub>4</sub>HSO<sub>3</sub>,这是工程上出现SNCR过量喷尿素后造成空预器堵塞的原因。

4)为验证MERC技术的可行性,在某电厂SNCR脱硝改造中临时增加了燃尽风前的尿素喷枪,炉内脱硝效率高于65%,结合锅炉尾部SCR装置能够实现烟囱位置NO<sub>x</sub>浓度不高于30 mg/m<sup>3</sup>的超低排放,达到预期效果。

## 参考文献(References):

[1] 冉黎铭,张山鹰,谢佳. 新型W火焰低氮燃烧系统开发与应用[J]. 洁净煤技术,2018,24(5):97-102.  
RAN Shenming, ZHANG Shanying, XIE Jia, et al. Development and application of new type low-NO<sub>x</sub> W-flame combustion system[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5):97-102.

[2] 杨勇平,杨志平,徐钢,等. 中国火力发电能耗状况及展望[J]. 中国电机工程学报,2013,33(23):1-11.  
YANG Yongping, YANG Zhiping, XU Gang, et al. Situation and prospect of energy consumption for China's thermal power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(23):1-11.

[3] 姜彤,方晓东,陆明智,等. 燃煤烟气多污染物协同治理试验研究[J]. 洁净煤技术,2018,25(5):132-135,141.  
LOU Tong, FANG Xiaodong, LU Mingzhi, et al. Experimental study on synergistic treatment of multi-pollutants from coal-fired flue gas[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5):132-135, 141.

[4] 赵斌,高明非,王振,等. 600 MW燃煤机组超净排放特性及烟尘组分特征分析[J]. 洁净煤技术,2018,24(1):148-152.  
ZHAO Bin, GAO Mingfei, WANG Zhen, et al. Analysis of flue dust characteristics of 600 MW ultra-low emission coal-fired unit[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1):148-152.

[5] GREUL U, SPLIETHOFF H, HEIN K R G. Pulverized coal combustion: Concept for the lowest NO<sub>x</sub> emissions[J]. Chemical Engineering Technology, 1998, 21(1):51-55.

[6] 张树国,韩应,王智微,等. 空气分级燃烧技术中两级燃尽风技术试验研究[J]. 锅炉制造,2008,13(2):12-15.  
ZHANG Shuguo, HAN Ying, WANG Zhiwei, et al. Research of two-section over fire air technology test in the air staged combustion technology[J]. Boiler Manufacturing, 2008, 13(2):12-15.

[7] 李超,吕学敏,罗永浩,等. 高级空气分级脱硝特性的实验研究[J]. 锅炉技术,2009,40(2):63-67.  
LI Chao, LYU Xuemin, LUO Yonghao, et al. Experimental study on NO<sub>x</sub> reduction by advanced air-staging[J]. Boiler Technology, 2009, 40(2):63-67.

[8] 岳朴杰,张健,张忠孝,等. 高温富燃料区喷氨还原NO<sub>x</sub>的实验研究[J]. 动力工程学报,2018,38(3):226-230,252.  
YUE Pujie, ZHANG Jian, ZHANG Zhongxiao, et al. Experimental study on NO<sub>x</sub> reduction by ammonia in high-temperature fuel rich zone[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(3):226-230, 252.

[9] SPETH K, MURER M, SPLIETHOFF H. Experimental investigation of nitrogen species distribution in wood combustion and their influence on NO<sub>x</sub> reduction by combining air staging and ammonia injection[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(7):5816-5824.

[10] 刘鹏,朱江涛,沈平虹. 高温还原性气氛条件下喷氨脱硝机理优化[J]. 燃烧科学与技术,2018,24(6):487-492.  
LIU Peng, ZHU Jiangtao, SHEN Pinghong. Optimization of mechanisms for ammonia-injected de-NO<sub>x</sub> reactions in a high-temperature and reducing atmosphere[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2018, 24(6):487-492.

[11] CODA ZABETTA E, KILPINEN P, HUPA M, et al. Kinetic modeling study on the potential of staged combustion in gas turbines for the reduction of nitrogen oxide emissions from biomass IGCC plants[J]. Energy & Fuels, 2000, 14(4):751-761.

[12] GLARBORG P, ALZUETA M U, DAM-JOHANSEN K, et al. Kinetic modeling of hydrocarbon/nitric oxide interactions in a flow reactor[J]. Combustion and Flame, 1998, 115(1):1-27.

[13] TAYYEB JAVED M, IRFAN N, GIBBS B M. Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 83(3):251-289.

[14] WARGADALAM V J, LÖFFLER G, WINTER F, et al. Homogeneous formation of NO and N<sub>2</sub>O from the oxidation of HCN and NH<sub>3</sub> at 600-1 000 °C [J]. Combustion and Flame, 2000, 120(4):465-478.

[15] SKREIBERG Ø, KILPINEN P, GLARBORG P, et al. Ammonia chemistry below 1 400 K under fuel-rich conditions in a flow reactor[J]. Combustion and Flame, 2004, 136(4):501-518.

[16] 原奇鑫,赵立正,翟刚,等. NH<sub>3</sub>选择性非催化还原脱硝影响因素[J]. 燃烧科学与技术,2017,23(4):94-98.  
YUAN Qixin, ZHAO Lizheng, Zhai Gang, et al. Impact factors of selective non-catalytic reduction denitration by NH<sub>3</sub> [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017, 23(4):94-98.

[17] 郭金龙. 火电机组选择性催化还原脱硝喷氨的优化控制[D]. 北京:华北电力大学(北京),2011.

[18] 胡建根,李文华,韩高岩. 燃煤锅炉SNCR脱硝对于SO<sub>3</sub>生成的研究[J]. 锅炉技术,2018,49(2):75-80.  
HU Jiagen, LI Wenhua, HAN Gaoyan. Influence of SNCR denitration reform on the formation of SO<sub>3</sub> [J]. Boiler Technology, 2018, 49(2):75-80.

[19] 杨建国,杨炜樱,郑方栋,等. NH<sub>3</sub>和SO<sub>3</sub>对硫酸氢铵和硫酸铵生成的影响[J]. 燃料化学学报,2018,46(1):92-98.  
YANG Jianguo, YANG Weiyang, ZHENG Fangdong, et al. Effects of NH<sub>3</sub> and SO<sub>3</sub> on the generation of ammonium bisulfate and ammonium sulfate[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2018, 46(1):92-98.