



移动扫码阅读

黄加昀,朱平,徐志超,等. SNCR-双氧水氧化脱硝烟气治理工程实例分析[J].能源环境保护,2021,35(3): 60-65.

HUANG Jiayun, ZHU Ping, XU Zhichao, et al. Case analysis of flue gas treatment project by SNCR-hydrogen peroxide oxidation denitration[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(3): 60-65.

SNCR-双氧水氧化脱硝烟气治理工程实例分析

黄加昀,朱平*,徐志超,张旭,陈海文

(武汉龙净环保科技有限公司,湖北武汉430205)

摘要:针对某公司60万吨氧化球团生产线的链篦机-回转窑烟气 NO_x 超标排放问题,采用SNCR+双氧水氧化脱硝工艺进行烟气超低排放改造。该工程处理烟气体积为 $400\,000\text{ m}^3/\text{h}$,脱硝系统总投资约180万元,年运行成本为189.46万。运行效果表明: NO_x 的浓度从脱硝前的 $100\text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降至 $45\text{ mg}/\text{Nm}^3$,低于山东省地方标准(DB 37/990—2019) NO_x 排放限值($50\text{ mg}/\text{Nm}^3$),实现了 NO_x 的超低排放。

关键词:烟气脱硝;SNCR;双氧水氧化脱硝;超低排放

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)03-0060-06

Case analysis of flue gas treatment project by SNCR-hydrogen peroxide oxidation denitration

HUANG Jiayun, ZHU Ping*, XU Zhichao, ZHANG Xu, CHEN Haiwen

(Wuhan Long King Environmental Technology Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: In order to solve excessive NO_x emission of the grate-rotary kiln flue gas from a 600,000 tons oxidized pelletizing production line, SNCR + hydrogen peroxide oxidation denitration was used to upgrade the process and realize the ultra-low emission of flue gas. The treatment capacity of the flue gas in this project was $400,000\text{ m}^3/\text{h}$. The total investment of the denitration system was about 1.8 million, and the annual operating cost was 1.8946 million. The operation results showed that the concentration of NO_x was reduced from $100\text{ mg}/\text{Nm}^3$ to $45\text{ mg}/\text{Nm}^3$, which was lower than the NO_x emission limit ($50\text{ mg}/\text{Nm}^3$) of Shandong provincial local standard (DB 37/990—2019) and realize the ultra-low NO_x emission.

Key Words: Flue gas denitration; Selective non-catalytic reduction; Hydrogen peroxide oxidation denitration; Ultra-low emission

0 引言

近年来,大气污染问题已成为我国建设“美丽中国”中面临的非常严峻的问题。其中氮氧化物(NO_x)是大气污染的主要污染源之一^[1],而 NO_x 的主要来源是大型锅炉、发电厂、回转窑等产业的燃煤。随着社会形态的发展,大气污染的若干问题也越来越受全国各级政府的重视,出台了很有限制排放的标准。政策驱使相关行业必须安装烟

气脱硝装置以实现 NO_x 的达标排放^[2-3]。

1 工程概况

该项目地处山东境内,为60万吨氧化球团生产线的链篦机-回转窑的脱硝改造项目。氧化球团链篦机回转窑烟气特点如下:(1)烟气排放量大;(2)烟气成分随配料变化而变化的趋势较明显;(3)烟温不稳定,波动幅度大,一般在 $50\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内^[4]。该回转窑在配备任何烟气处

收稿日期:2020-12-03;责任编辑:蒋雯婷

第一作者简介:黄加昀(1992-),女,湖北武汉人,硕士,初级工程师,主要研究方向为烟气脱硫脱硝处理。E-mail:281751417@qq.com

通讯作者简介:朱平(1988-),女,湖北武汉人,硕士,中级工程师,主要研究方向为烟气脱硫脱硝处理。E-mail:460982096@qq.com

理装置时,烟气成分中粉尘浓度较大,为 2 000 mg/m³(标态、干基 16%氧),回转窑及其他烟气参数见表 1。

表 1 链篦机-回转窑主要烟气参数

Table 1 Main flue gas parameters of grate-rotary kiln

项目	实测值
窑炉数量/台	1
烟囱高度/m	76
工况烟气量/(m ³ ·h ⁻¹)	400 000
主抽风机风压/Pa	8 200
设备厂界环境噪声排放标准/dB	昼间 60、夜间 50
脱硝入口粉尘浓度/(mg·m ⁻³)	2 000
脱硫入口 NO _x 浓度/(mg·Nm ⁻³)	100
回转窑窑尾至链篦机预热段温度/℃	800~1 000

对于山东境内球团烧结产业排放标准除了需满足国标外,还需要严格满足山东省地方标准(DB 37/990—2019)(见表 2)^[5],即此改造项目脱硝效率需达到 50%以上。

表 2 超低排放标准(DB 37/990—2019)

Table 2 Ultra-low emission standard(DB 37/990—2019)

污染物项目	限值
颗粒物/(mg·Nm ⁻³)	10
二氧化硫/(mg·Nm ⁻³)	35
氮氧化物/(mg·Nm ⁻³)	50
氟化物/(mg·Nm ⁻³)	3.0
二噁英类/(mg·Nm ⁻³)	0.5
基准含氧量/%	16

2 脱硝工艺方案比对

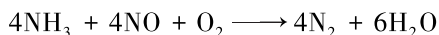
2.1 选择性非催化还原法(SNCR)

选择性非催化还原技术(SNCR)是一项成熟的低投资脱硝技术,不需要对回转窑的结构进行改动,仅在合适的位置开孔即可,也不需要改变回转窑的常规运行方式,对回转窑的主要运行参数不会有显著影响^[6]。

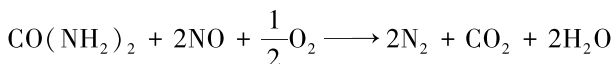
该技术直接把炉膛作为反应器,将含有氨基的还原剂(工业中常用的是氨水或者尿素溶液)喷入炉膛(温度区间 850~1 100 ℃),还原剂与烟气中的 NO_x 发生反应,生成氮气和水,而烟气中的氧气却极少与还原剂反应,从而达到对 NO_x 选择性还原的效果^[7]。SNCR 技术用于煤粉炉的脱硝效率一般为 25%~40%,应用于链篦机-回转窑时最高可达 60%。

在 850~1 100 ℃ 范围内,NH₃ 或者尿素还原 NO_x 的主要反应为:

NH₃ 为还原剂时:



尿素为还原剂时:



当烟气温度低于 870 ℃ 时,脱硝的反应速度大幅度降低,而当烟气温度大于 1 050 ℃ 时,氧化速度会明显加快,以氨的氧化反应为主,发生副反应:



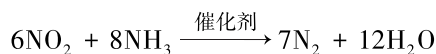
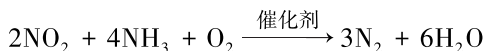
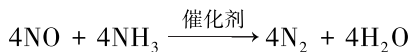
此时会增加 NO 的生成量,使 NO_x 的还原率降低^[8]。因此 SNCR 脱硝技术的关键点在于反应温度窗的选取,在实际项目中即为喷枪开孔位置的选取。当还原剂喷入过量或者分布不均匀、喷入点温度过低均会导致氨逃逸。此项目的最佳反应区域应在回转窑尾至链篦机预热段,但是该球团链篦机-回转窑烟气温度波动较大,并不能保证烟温始终在最佳反映温度窗内,单纯的采用 SNCR 脱硝技术很可能出现技术风险,不能保证排放的 NO_x 浓度达标。

2.2 选择性催化还原法(SCR)

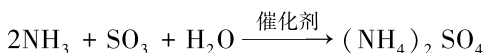
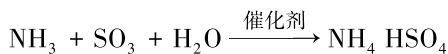
选择性催化还原脱硝技术(SCR)的基本原理是利用氨(NH₃)对 NO_x 的还原功能,使用氨气(NH₃)作为还原剂,将体积浓度 5%~10%的氨气通过氨气喷射格栅(AIG)喷入到温度为 320~400 ℃ 的烟气中,与烟气中的 NO_x 混合后,扩散到催化剂表面,在催化剂的作用下,氨气(NH₃)与烟气中的 NO₂ 和 NO 反应,还原成无公害的氮气(N₂)和水(H₂O)^[9]。这里的“选择性”是指氨有选择的与烟气中的 NO_x 进行还原反应,而不与烟气中大量的氧气(O₂)作用。整个反应的控制环节是烟气在催化剂表面层流区和催化剂微空内扩散。SCR 脱硝技术的脱硝效率理论上可达 90%以上^[10]。

典型 SCR 反应的化学反应方程式如下:

主反应方程式为:



副反应方程式为:



SCR 脱硝技术与 SNCR 脱硝技术最大的区别

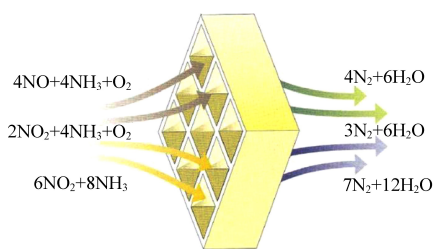


图 1 SCR 反应示意图

Fig.1 Schematic diagram of SCR reaction

是有无催化剂,SCR 脱硝技术的关键点也在于催化剂的选择与布置^[11]。从上述反应方程式中可以看出,NO_x的脱除过程中伴随着 NH₄HSO₄ 的生成,而其是一种较难处理的黏稠性物质,粘结烟气中的飞灰颗粒附着于催化剂表面,减小催化剂活性组分与烟气的接触面积从而降低脱硝效率,同时还会恶化空预器运行环境,造成堵塞和腐蚀,因此控制降低氨逃逸也是极为关键的。SCR 脱硝技术的脱硝效率对催化剂运行温度、活性、烟气流速、装置密封性、积灰、阻力以及系统流场的均匀性均有很高的要求。

针对此改造项目,SCR 脱硝技术一方面需要新建反应器和催化剂,增加前期投资成本,另一方面该项目粉尘较大(见表 1),直接采用 SCR 脱硝技术会导致积灰覆盖和堵塞催化剂微孔,使脱硝效率难以保证。此外,该项目 NO_x 浓度不算很高,用 SCR 脱硝技术性价比不高。

2.3 SNCR-SCR 组合工艺

SNCR-SCR 组合工艺是结合 SCR 技术高效、SNCR 技术投资省的特点而发展起来的一种新型工艺。该工艺系统分为两个反应区:第一个反应区为高温段 SNCR 法,温度为 850~1 150 °C,在锅炉炉墙上设置喷枪,将还原剂喷射进炉内,使还原剂与 NO_x 反应,实现初步脱硝;第二反应区为低温段 SCR 法,温度为 320~400 °C,在 SCR 反应器内发生反应,进行进一步脱硝^[12-13]。该组合工艺脱硝效率为 40%~80%。

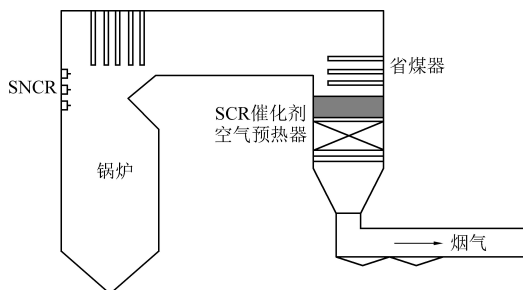


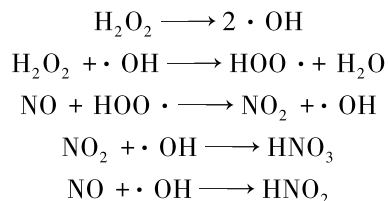
图 2 SNCR-SCR 组合工艺系统

Fig.2 SNCR-SCR combined process system

该组合工艺主要特点如下:催化剂用量小,因第一反应区的存在实现初步脱硝,故第二反应区中催化剂的用量较单纯的 SCR 工艺大大减少;省去了 SCR 工艺设置在烟道里复杂的 AIG (氨喷射) 系统,减少了投资且降低了系统控制的难度^[14]。但是该组合工艺仅适用于小机组,对大机组和脱硝效率要求较高的改造来说性价比不高,大机组需要的催化剂用量大,减小了第一反应区 SNCR 工艺投资省的优势,组合工艺的优势特点难以体现。

2.4 双氧水氧化脱硝工艺

双氧水氧化脱硝是一种绿色无污染的脱硝技术,其主要是基于双氧水的强氧化性,在一定的条件下与 NO_x 逐步反应将其氧化成硝酸以达到脱硝的目的^[15-16]。在不同温度条件下,H₂O₂ 可以分解为 HOO·,HO·,H·,H₂O,O₂。H₂O₂ 与烟气中的 NO_x 反应的主要反应方程式有^[17]:



从上述反应方程式可以看出,其中对 NO_x 起氧化作用的主要是 HO· 自由基,因此在实际应用中主要就是要创造合适的反应条件使其尽可能多的分解为 HO· 自由基。双氧水氧化脱硝最佳反应温度在 90 °C 左右^[18],起初温度升高,双氧水分解产生的 HO· 自由基就比较多,此时氧化作用较为明显,脱硝效率较高,但是当温度继续升高,双氧水会分解成为氧气和水,脱硝效率不升反降。因此控制双氧水反应温度也是极重要的。双氧水氧化脱硝效率在 10%~80%^[19-21]。

双氧水具有价格低廉且环境友好无污染的特点,若能解决好脱硝效率问题,在未来烧结球团行业烟气脱硝有一定的工业前景。在此改造项目中,采用双氧水氧化脱硝技术性价比较高,但是单纯使用双氧水氧化脱硝可能出现技术风险,导致脱硝效率不达标。

对以上几种脱硝工艺特性进行比较,结果见表 3。

3 SNCR-双氧水氧化脱硝工艺

3.1 脱硝工艺方案选择

针对本改造项目,通过以下五个方面的因素对脱硝技术方案进行选择:

表 3 脱硝工艺对比
Table 3 Comparison of denitration processes

主要工艺特性	工艺方法			
	SCR	SNCR-SCR 混合	SNCR	双氧水氧化脱硝
还原剂	NH ₃ 或尿素	尿素或 NH ₃	尿素或 NH ₃	H ₂ O ₂
反应温度	320~400 ℃	前段:850~1 100 ℃ 后段:320~400 ℃	850~1 100 ℃	常温~500 ℃
催化剂	使用	后段使用少量催化剂	不使用	不使用
脱硝效率	可达 90%	40%~80%	煤粉炉 25%~40% CFB 锅炉 60%~70%	10%~80%
SO ₂ /SO ₃ 氧化	会发生	较 SCR 低	不发生	不发生
NH ₃ 逃逸	小于 3 ppm	小于 3 ppm	小于 10 ppm	无
对空气预热器影响	形成 NH ₄ HSO ₄ 造成堵塞或腐蚀	造成堵塞或腐蚀的机会较 SCR 低	基本无影响	基本无影响
燃料的影响	高灰分会磨耗催化剂, 碱金属氧化物会使催化剂钝化	影响与 SCR 相同	无影响	无影响
锅炉的影响	受省煤器出口烟气温度影响	受炉膛内烟气流速、温度分布及 NO _x 分布的影响	与 SNCR/SCR 混合系统影响相同	无影响
占地空间	大(需增加大型催化剂反应器和供氨或尿素分解系统)	较小(需增加一小型催化剂反应器,无需增设供氨或尿素分解系统)	小(无需增加催化剂反应器)	小(无需增加催化剂反应器)
系统压力损失	高	较低	低	低
用于老厂改造	复杂	较容易	容易	容易
投资费用	高	较高	低	中等
运行费用	高	较高	低	中等
使用业绩	机组成功运转经验多	机组成功运转经验较少	机组成功运转经验多	新技术

(1) 国家及地方对回转窑 NO_x 的排放限值要求。

(2) 脱硝工艺要技术成熟,工程应用案例多且对链篦机-回转窑的正常运行没有影响。

(3) 结合氮氧化物的实际排放情况,使该厂区间对脱硝技术的投资最小化。

(4) 针对该项目的地理位置,脱硝还原剂可靠易得,运行和储存过程的安全性有保障。

(5) 后期运行和检修维护费用尽可能低,降低成本。

基于以上标准,由表 3 可以看出,SCR 脱硝技术脱硝效率高,运行稳定可靠,但该项目粉尘浓度较大,较易堵塞催化剂微孔降低脱硝效率且对链篦机-回转窑的正常运行有一定的影响,故不宜采用 SCR 工艺;鉴于厂区场地极其有限,且 SNCR-SCR 组合工艺在大机组的使用业绩不多,故不予考虑该工艺;SNCR 工艺投资小,运行稳定,其反应温度范围为 850~1 100 ℃,回转窑尾至链篦机预热段温度为 800~1 000 ℃,本项目大致符合 SNCR 工艺运行条件,但是回转窑烟温不稳定,波动范围在 50~100 ℃,单纯的 SNCR 脱硝工艺并不能保证

NO_x 的排放始终达标;单纯的双氧水氧化脱硝技术脱硝效率现阶段无法保证。

综上,以上四种脱硝工艺均不能满足该项目的脱硝要求,结合现场条件及烟气特性提出一种新的脱硝工艺组合方式,即 SNCR+双氧水氧化脱硝来实现该厂区的 NO_x 超低排放。

3.2 脱硝系统工艺说明

该组合以 SNCR 脱硝技术为主,双氧水氧化脱硝为辅,双氧水氧化脱硝系统通过控制系统进行间隙式喷射脱硝,仅在烟囱出口 NO_x 浓度波动较大时运行(即回转窑温度波动较大,偏离出 SNCR 最佳反应窗时),双氧水喷射管道连接湿法脱硫的事故喷淋管道,不需要额外占用场地,如图 3 所示。

针对此改造项目,双氧水在烟道高温下分解出自由基 HO· 将 NO 氧化成 NO₂,然后在吸收塔内由湿法脱硫的碱性物质吸收 HOO· 和 NO₂ 生成硝酸盐,此部分产物在吸收塔内随脱硫废水外排,整个吸收过程不生成其他有污染的副产物,是一

种清洁的脱硝技术^[22]。

该组合工艺优势明显,系统简单,绿色无二次污染,能适应各种不同工况,不需要新建反应器,

占地面积小,对链篦机-回转窑的运行基本无影响,既能满足 NO_x 的超低排放,又能使厂区内对脱硝工艺的投资成本大大减少。

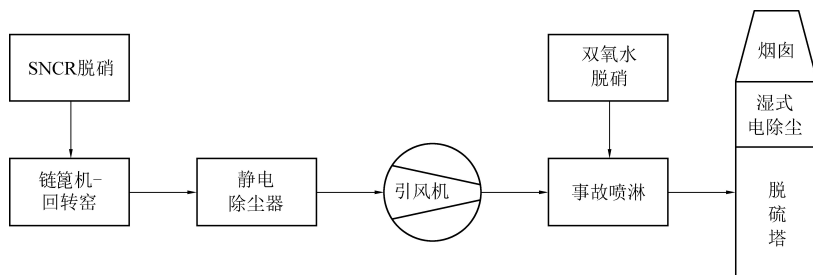


图 3 烟气处理工艺流程

Fig.3 Process flow chart of flue gas treatment

3.3 脱硝系统设备参数

该项目 SNCR 脱硝工艺还原剂采用尿素,辅

助系统脱硝采用工业过氧化氢。脱硝系统的主要设备参数如表 4 所示。

表 4 脱硝系统设备参数

Table 4 Equipment parameters of the denitration system

序号	名称	单位	数量	规格及参数
1	尿素溶解罐	台	1	容积 4 m ³ , 材质: 304
2	尿素溶液储罐	台	1	容积 15 m ³ , 材质: 304
3	稀释水罐	台	1	容积 4 m ³ , 材质: 304
4	尿素溶解罐搅拌机	台	1	N=0.55 kW, 材质: 316 L
5	尿素溶液转存泵	台	2	Q=5 m ³ /h, 扬程 H=15 m, N=0.75 kW
6	尿素溶液输送泵	台	2	Q=0.5 m ³ /h, 扬程 H=120 m, N=1.1 kW
7	稀释水输送泵	台	2	Q=0.5 m ³ /h, 扬程 H=120 m, N=1.1 kW
8	地坑泵	台	1	Q=5 m ³ /h, 扬程 H=50 m, N=3 kW
9	尿素溶解罐电加热器	台	1	N=40 kW
10	尿素溶液储罐电加热器	台	1	N=40 kW
11	双流体喷枪	批	1	材质: 316 L
12	氧化剂卸载泵	台	1	Q=10 m ³ /h; 扬程 H=15 m, N=1.5 kW, 材质: FSB 氟塑泵
13	氧化剂储液罐	台	1	容积 4 m ³ , 材质: FRP
14	氧化剂调配罐	台	1	容积 4 m ³ , 材质: RRP
15	调配罐搅拌机	台	1	N=0.55 kW, 材质: 碳钢衬塑
16	调配泵	台	1	Q=5 m ³ /h, 扬程 H=15 m, N=0.75 kW
17	氧化剂计量泵	台	1	Q=5 m ³ /h; 扬程 H=35 m, N=1.1 kW

3.4 脱硝系统耗量及运行成本

本工程脱硝系统总投资约 180 万。实际运行费用主要包括尿素费用、双氧水费用、稀释水费用及电费。

尿素及双氧水单价均为工业批发的价格,实际价格应结合当地的物价考虑,年运行时间按 8 000 小时计,脱硝系统耗量及运行成本如表 5 所示。

4 运行结果分析与结论

本项目脱硝前后链篦机-回转窑 NO_x 排放情况见表 6。

从表 6 可以看出,通过 SNCR 工艺和双氧水氧化脱硝工艺, NO_x 从脱硝前的 100 mg/Nm³ 降至 45 mg/Nm³, 脱硝效率达到 55%, NO_x 的年排放量从 350.4 t 降至 157.7 t, 减少了 192.7 t, 实现了氧化球团链篦机-回转窑 NO_x 的超低排放, 满足山东

表 5 脱硝系统耗量及运行成本

Table 5 Consumption and operation cost of the denitration system

序号	名称	小时耗量	年耗量 (按 8 000 h 计)	单价/元	年运行成本 /万元
1	工业尿素颗粒	0.04 t	320 t	2 000	64
2	工业过氧化氢	0.35 t	2 800 t	800	224
3	稀释水	0.46 t	3 680 t	2	0.74
4	电	30 kWh	24 000 kWh	0.3	0.72
	小计	/	/	/	289.46

表 6 改造前后烟气中氮氧化物排放浓度

Table 6 Emission concentration of nitrogen oxide in flue gas before and after modification

项目	脱硝前 NO _x 浓度/ (mg · Nm ⁻³)	综合脱硝效率/ %	脱硝后 NO _x 浓度/ (mg · Nm ⁻³)	脱硝前 NO _x 年排放 量/(t · a ⁻¹)	脱硝后 NO _x 年排放 量/(t · a ⁻¹)	NO _x 年减排量/ (t · a ⁻¹)
数值	100	55	45	350.4	157.7	192.7

省地方标准 (DB 37/990—2019) 中 NO_x 排放限值 50 mg/Nm³ 的要求。

通过该项目的正常运行,可以看出针对氧化球团链篦机-回转窑这一类烟温波动较大、NO_x 浓度不高的机组,采用 SNCR+双氧水氧化脱硝的组合工艺来达到 NO_x 达标排放的性价比较高,此组合工艺具有投资小、使用安全、适于各种不同工况的特点,能够达到重点行业 NO_x 的排放要求,特别适合 60 万吨及以下氧化球团生产线链篦机-回转窑脱硝烟气改造。

参考文献

- [1] 路腾飞. CFB 锅炉炉内脱硝及烟气脱硝协同研究 [D]. 河北: 华北理工大学, 2017: 15-40.
- [2] 闫维明, 郁金星, 邹思诣. SCR 法烟气脱硝系统调试分析 [J]. 能源环境保护, 2012, 26 (4): 23-26.
- [3] 赵雪, 程茜, 侯俊先. 脱硫脱硝行业 2017 年发展综述 [J]. 中国环保产业, 2018, 7: 10-24.
- [4] 贾世昌. 水泥窑炉 SNCR 脱硝技术探析 [J]. 环境科技, 2012, 25 (2): 34-37.
- [5] 钢铁工业大气污染物排放标准: DB 37/990—2019 [S]. 山东: 山东省市场监督管理局, 2019.
- [6] 韩应, 高洪培, 王海涛, 等. SNCR 烟气脱硝技术在 330 MW 级 CFB 锅炉的应用 [J]. 洁净煤技术, 2013, 19 (6): 85-88.
- [7] 吴艳艳, 张光学, 王进卿, 等. SNCR 在中温分离器型循环流化床锅炉中的应用 [J]. 电站系统工程, 2014, 30 (1): 27-32.
- [8] Monika Ruzsak, Marek Inger, Marcin Wilk, et al. The application of RANS CFD for design of SNCR technology for a pulverized coal-fired boiler [J]. Polish Journal of Chemical Technology, 2017, 19 (2): 101-106.
- [9] 张道军, 马子然, 王宝冬, 等. SCR 脱硝技术在非电行业烟气治理中的应用进展 [J]. 现代化工, 2019, 39 (10): 24-28.
- [10] Hongke Feng, Chunhua Wang, Ying Huang. Particle deposition behaviors of monolithic De-NO_x catalysts for selective catalytic reduction (SCR) [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2017, 34 (11): 2832-2839.
- [11] 方熙娟. SNCR-SCR 脱硝技术在 500 t/d 垃圾焚烧炉的应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015: 10-25.
- [12] 张仲飞. 循环流化床锅炉 SNCR 脱硝数值模拟研究及应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 15-33.
- [13] Qian Zhang, Rui Ma, Youning Xu, et al. Comparison and analysis on flue gas denitrification technology in coal fired boiler retrofit [J]. Advanced Materials Research, 2013, 781-784: 2497-2501.
- [14] 袁瑞龙, 华玉龙, 戚圣琦, 等. SNCR/SCR 联合脱硝工艺在特殊案例中的应用 [J]. 电站系统工程, 2016, 32 (3): 8-10.
- [15] 杨加强, 梅毅, 王驰, 等. 湿法烟气脱硝技术现状及发展 [J]. 化工进展, 2017, 36 (2): 695-703.
- [16] Zheng C, Xu C, Gao X, et al. Simultaneous absorption of NO_x and SO₂ in oxidant-enhanced limestone slurry [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2014, 33 (4): 1171-1179.
- [17] 马京香, 赵毅, 苏敏. 紫外/双氧水法同时脱硫脱硝的研究 [J]. 热能动力工程, 2009, 24 (6): 792-795+821.
- [18] 王佩. 液相氧化法脱除燃煤烟气中 NO_x 的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 4-17.
- [19] Liu Y, Zhang J, Sheng C, et al. Simultaneous removal of NO and SO₂ from flue gas by UV/H₂O₂ advanced oxidation process [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 162 (3): 1006-1011.
- [20] 李彩亭, 彭敦亮, 范春贞, 等. Fenton 氧化法同时脱硫脱硝的实验研究 [J]. 环境工程学报, 2013, 7 (3): 1059-1064.
- [21] 周思涵. UV/H₂O₂ 类气相预氧化同时脱硫脱硝实验研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 5-20.
- [22] 刘勇军, 王雪娇, 巩梦丹, 等. 氮氧化物控制技术现状与进展 [J]. 四川环境, 2014, 33 (6): 115-117.