

水泥炉窑中低温催化脱硝技术中试性能

刘怀平¹,尹海滨²,熊尚超¹,房晶瑞³,李俊华^{1*} (1.清华大学环境学院,北京 100084; 2.江苏科行环保股份有限公司,江苏盐城 224051; 3.中国建筑材料科学研究总院有限公司,绿色建筑材料国家重点实验室,北京 100024)

摘要: 利用中低温 SCR 脱硝技术路线对水泥窑炉进行深度脱硝,设计建设了烟气处理量为 10000m³/h 的 SCR 中试实验装置,考察了在 SNCR 装置后烟气中未能反应的 NH₃ 进一步在 SCR(selective catalytic reduction)装置的脱硝效果,并分析了不同入口 NO_x 浓度对脱硝率的影响.结果表明,所研究的水泥厂仅采用 SNCR(selective non-catalytic reduction)和低氮燃烧技术,能够将烟气中的 NO_x 控制在 100~135mg/Nm³,在不喷氨的状态下 SCR 系统的脱硝效率可达到 50%以上,说明 SNCR 反应存在着一定懂得氨逃逸;在 SCR 系统补充喷射氨气后,SCR 脱硝效率有显著的提升,可提到至 80%以上.通过低氮燃烧、SNCR 与 SCR 等脱硝技术的联合使用,可将水泥炉窑烟气中 NO_x 的排放浓度控制在 50mg/Nm³ 以内,满足超低排放要求;将经过较长时间稳定运行后催化剂从系统中取出,进行成分、孔径分布和脱硝活性对比,结果表明催化剂内部微孔会被部分堵塞,导致比表面积降低,但经吹扫处理催化剂的脱硝效率可恢复,说明催化剂在水泥窑炉烟气条件下长期运行未出现中毒现象.

关键词: 水泥炉窑; 烟气脱硝; 中低温 SCR; 孔道堵塞; 中试实验

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)07-3169-07

A pilot scale study of low-temperature De-NO_x in cement furnace. LIU Huai-ping¹, YIN Hai-bin², XIONG Shang-chao¹, FANG Jing-ru³, LI Jun-hua^{1*} (1.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Jiangsu Kehang Environmental Protection Co. LTD, Yancheng 224051, China; 3.State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China). *China Environmental Science*, 2021,41(7): 3169~3175

Abstract: Low temperature selective catalytic reduction (SCR) combined with low-nitrogen combustion and selective non-catalytic reduction (SNCR) were used for deep De-NO_x in a cement kiln. The SCR pilot plant with a flue gas of 10000m³/h was designed and constructed. The De-NO_x effect of SCR using residual NH₃ after SNCR was investigated, and the influence of inlet NO_x concentration on the catalytic efficiency was also studied. To meet the emission standard, the SNCR and low-NO_x burner techniques were carried out and the concentration NO_x in flue gas was 100~135mg/m³. The De-NO_x efficiency of SCR could reach more than 50% without the ammonia injection, which indicated the existence of NH₃ slip of SNCR. With the increase of ammonia injection quantity, the De-NO_x efficiency of SCR can be significantly improved. After a long time of test, the proposed De-NO_x technology scheme could stably and effectively control the NO_x emission in flue gas, and could meet the ultra-low emission standard. Finally, the influence of dust on the micropore blockage of catalyst was investigated, which indicated that the soot blowing system of catalyst was very important to guarantee the performance of catalyst.

Key words: cement kiln; flue gas De-NO_x; low-temperature SCR; pore blockage; pilot study

我国是世界上水泥生产与消耗量最大的国家,水泥行业的快速发展也带来了一系列环境问题,例如氮氧化物(NO_x)的大量排放所致的酸雨、雾霾和光化学烟雾等^[1].当前水泥行业已经投入应用的脱硝技术包括低氮燃烧、分级燃烧和选择性非催化还原(SNCR)脱硝等^[2-4].其中,SNCR 技术是指在较高烟气温度下喷入 NH₃,不需要催化剂即可将 NO_x 还原为 N₂ 和 H₂O.在实际应用中,SNCR 技术可以与低氮燃烧技术相结合,进一步降低 NO_x 排放浓度至 400mg/Nm³ 以内^[5],但是仍然难以满足日益严格的排放标准^[6].

选择性催化还原(SCR)脱硝具有脱硝率高、选

择性高等优势,在国内燃煤机组得到了广泛的应用^[7].在国外水泥行业中,SCR 也逐渐成为主流的脱硝技术,其一般技术路线为^[8-10]在水泥炉窑一级预热器出口设置 SCR 反应器,烟气温度为 300~400℃^[11-13],以满足现有商业催化剂(钒钨钛催化剂)的反应温度窗口.然而在实际运行过程中,一级预热器出口处烟气中粉尘浓度较高(>100g/Nm³),极易造成催化剂的堵塞和磨损^[14].此外,对于已安装余热发

收稿日期: 2020-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51702308);国家重点研发计划项目(2017YFC0210700)

* 责任作者,教授,lijunhua@tsinghua.edu.cn

电系统的水泥生产线,在一级预热器出口布置 SCR 反应器会显著影响余热发电效率.因此,将 SCR 反应器布置在余热锅炉之后成为一种优选方式.因此,开发适用于水泥窑炉的中低温 SCR 催化剂(活性温度区间 150~220℃),形成水泥窑高效 SCR 脱硝技术方案,是突破水泥工业 SCR 技术工程应用问题的关键.

本文开发了一种适用于水泥工业的中低温脱硝催化剂,并在某水泥有限公司 4500t/d 熟料生产线余热锅炉之后建成了烟气量为 10000m³/h 的 SCR 中试实验装置,分析空速、喷氨量、入口 NO_x 浓度等因素对 SCR 脱硝效果的影响,联合生产线原有的低氮燃烧和 SNCR 脱硝技术,旨在实现 NO_x 超低排放目标.

1 中试实验装置

SCR 中试装置建设地点为河北石家庄某水泥生产线,于 2018 年 9 月初进厂安装,同年 9 月底进行调试后运行使用.基于该中试实验装置,进行中低温 SCR 脱硝催化剂的中试性能测试,工艺流程与中试系统如图 1 所示.

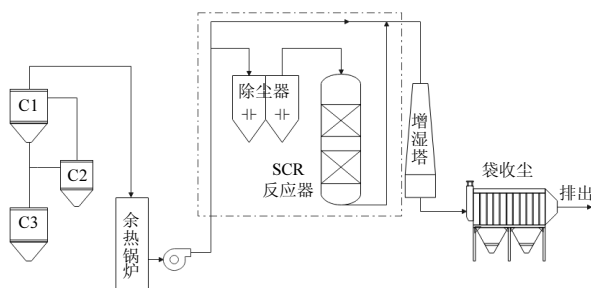


图 1 工艺流程与中试实验装置示意

Fig.1 Schemes of process flow and pilot plant

一级预热器出口烟气经过余热锅炉后,实现余热发电,将一部分烟气热能转化为电能.余热利用后烟气温度为 200~220℃.该烟气经过高温风机后分为两路,其中一路烟气按原有烟道设计,依次经过增湿塔和除尘器,从烟囱排出.另一路烟气(流量为 10000m³/h)进入惯性沉降室进行预除尘,可以有效脱除粒径较大的粉尘,预除尘后烟气粉尘浓度降至 35~40g/Nm³,经过预除尘后的中低温烟气进入 SCR 反应器,反应器出口安装一台离心风机,用以克服 SCR 系统的阻力,SCR 反应器前后进出口各安装一个蝶阀,以便整个系统的启动和关停.烟气状态参数

如表 1 所示.

表 1 中试系统设计参数

Table 1 Design parameters of pilot plant

参数	数值
脱硝装置入口烟气量(Nm ³ /h)	10000
脱硝装置入口烟气温度(℃)	200~220
处理前烟气中 NO _x 浓度(mg/Nm ³)	<250
烟气中含尘浓度(g/Nm ³)	35~40
烟气中 SO ₂ 浓度(mg/Nm ³)	<1
设计脱硝效率(%)	≥85%
处理后烟气中 NO _x 浓度(mg/Nm ³)	≤50
脱硝系统总阻力(Pa)	≤2000
催化剂用量(m ³)	4.37
氨逃逸(×10 ⁻⁶)	<5

表 2 反应器内催化剂设计参数

Table 2 Design parameters of catalyst in reactor

名称	数值
催化剂层数	3+1(备用层)
每层催化剂模块数	1
模块尺寸(mm)	970×1910×1105
单模块体积(m ³)	1.46
模块单元数	6×12
催化剂体积(m ³)	4.37
反应器截面尺寸(mm)	970×1910
空塔流速(m/s)	1.5
体积空速(h ⁻¹)	2288
压损(Pa)	<2000
催化剂孔数	13

表 3 催化剂几何特征

Table 3 The geometric property of the catalysts

参数	数值
孔数	13
断面横向长度 LA(mm)	150
断面纵向长度 LB(mm)	150
长度(mm)	900
内壁厚度(mm)	1.5
外壁厚度(mm)	2.3
孔径(mm)	9.8
节距(mm)	11.3
开孔率(%)	72.14
几何比表面积 AP(m ² /m ³)	294

以 SNCR 系统逃逸的氨和 SCR 系统入口烟道喷入的氨作为还原剂,补氨装置采用双流体喷枪,通过压缩空气将氨气喷射到 SCR 反应器前的进口烟道中.催化剂是由清华大学和中国建筑材料科学研

究总院联合开发的稀土耦合钒钛体基催化剂,钒含量为 3.5%。SCR 反应器内催化剂的设计参数和催化剂的体积参数分别见表 2 和表 3。每层催化剂布置一台耙式吹灰器,采用换热后的热压缩空气作为气源,同时采用声波吹灰器辅助吹灰。SCR 反应器入口处烟气温度为 200~220℃,NO_x 浓度约为 250mg/Nm³。

2 结果与分析

2.1 脱硝效率测试结果

所研究水泥生产线原有脱硝方案为低氮燃烧技术结合 SNCR 脱硝,排放烟气中 NO_x 浓度为 100~135mg/Nm³,满足当地环保规定 150mg/Nm³ 的排放标准。根据图 2 可以看出,开启 SCR 中试系统后,即使在不喷氨的条件下,脱硝效率依然可以达到 58%左右,说明原有 SNCR 系统存在一定的氨逃逸。在实际运行中,SNCR 系统的氨水(20%)喷入量根据窑尾 NO_x 排放浓度进行自动在线调节,喷入量通常控制在 17~25L/min,烟气从一级预热器出口排出后经生料磨、余热锅炉、除尘等系统,氨会吸附到生料和粉尘中,窑尾烟囱排出的烟气中氨浓度通常在 7×10⁻⁶ 以下(窑尾氨逃逸在线检测数据)。

调节 SNCR 喷氨量,改变烟气中 NO_x 和 NH₃ 浓度,如图 2 所示。随着 SCR 入口 NO_x 浓度的逐渐降低,脱硝效率逐渐增加;当入口浓度分别为 230,100mg/Nm³ 时,SCR 脱硝效率分别为 50%和 65%。为了分析氨逃逸量,采用哈希 NH₃-N 分析仪测试了 NO_x 浓度为 100mg/Nm³ 时反应器入口氨浓度,其测试方法是通过烟尘取样器取出一部分烟气,并将烟气中的氨溶于蒸馏水中,加入化学试剂进行滴定,计算得出烟气中的氨逃逸。测试结果显示,入口氨逃逸浓度约 17~40×10⁻⁶,具有较大的波动性。检测数据和窑尾烟囱在线监测系统的氨逃逸数据远低于根据 SCR 中试系统脱硝率反推出的氨量,造成这一现象的可能原因:①窑炉工况和烟气成分波动较大,测试数据存在较大误差;②烟气经余热锅炉后会进入生料磨烘干生料、袋式收尘器除尘,逃逸的氨在粉磨除尘系统中会吸附到物料中,使得最终排放烟气中氨逃逸浓度显著降低。

考察了在 10000Nm³/h 风量下不同入口 NO_x 浓度时 SCR 中试系统较长时间运行的稳定性。较低浓度条件下 SCR 脱硝效果如图 3(a)所示。当入口 NO_x

浓度约为 100mg/Nm³ 时,仅依靠 SNCR 反应后残余的 NH₃,SCR 的脱硝效率仅有 60%~65%,这说明烟气中所携带的残留 NH₃ 不足以满足 SCR 反应过程对氨的需求。在补充喷氨(补氨量 100L/h)条件下,SCR 装置脱硝效率有明显的提高,可达 73%左右,相较于未补氨时提高了 15%~20%,说明在 SCR 反应器入口补充氨气对其脱硝效果有显著的影响。另外,在 24h 运行条件下,补充喷氨时 SCR 出口的 NO_x 浓度较为稳定;而未喷氨条件下,脱硝效果稳定性相对较差。这可能是因为,SNCR 运行过程中受水泥炉窑运动波动影响较大,导致 SNCR 出口烟气中携带的 NH₃ 浓度波动较大,因此在未喷氨条件下,脱硝效率波动相对较大。

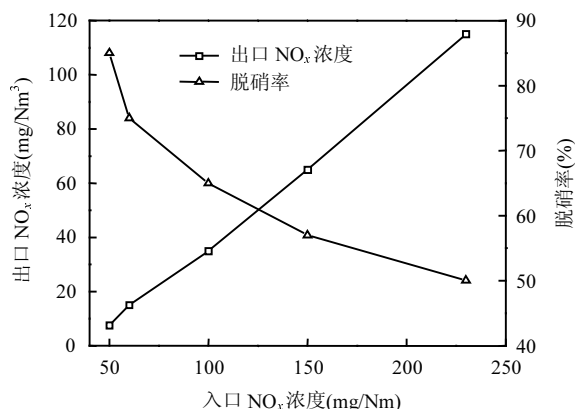


图 2 入口 NO_x 浓度对 SCR 脱硝效果的影响(未喷氨)

Fig.2 The influence of inlet NO_x concentration on De-NO_x efficiency without additional ammonia injecting

同样在 10000Nm³/h 风量下,当入口 NO_x 浓度约 230mg/Nm³ 左右时,SCR 反应器脱硝中试实验测试结果如图 3(b)所示。可以看出,与图 3(a)实验结果类似,补充喷氨对脱硝效果影响显著。依靠烟气中携带的 NH₃ 脱硝时,脱硝率仅 50%左右,补喷氨后(补氨量 400L/h)脱硝效率提高了约 30%,可达到 80%左右。可以看出,在不同初始 NO_x 浓度工况下,初始 NO_x 浓度越高,补喷氨后脱硝效率提升越明显,同时各种工况下都能将 NO_x 排放浓度降到 25~40mg/Nm³;此外,在中试试验过程中出现了喷氨效果不佳问题,可能导致测试到的喷氨效率偏低。

中试试验通过调节 SCR 系统入口及引风机进口阀门开度,来调节 SCR 系统风量,以获得不同的反应空速,在此基础上测试了不同 SCR 入口浓度条件

下($\sim 100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 与 $\sim 230\text{mg}/\text{Nm}^3$)反应空速对脱硝效率的影响规律.较低入口 NO_x 浓度条件下($\sim 100\text{mg}/\text{Nm}^3$)的测试结果如图 4(a)所示.整体上看,在两种不同的条件下(仅依靠烟气携带 NH_3 、补充 NH_3),脱硝效率基本随着空速的增加而逐渐降低.这是因为随着空速的提升($1600\sim 3500\text{h}^{-1}$),烟气与催化剂表面接触时间缩短,导致脱硝效率降低.在不喷氨时,脱硝效率缓慢下降,但基本保持在 $55\%\sim 67\%$,且在 $2000\sim 2500\text{h}^{-1}$ 时脱硝效率趋于稳定;在同等喷氨比例条件下,脱硝效率不断小幅度下降,但基本保持在 $71\%\sim 83\%$,且在 $2000\sim 2500\text{h}^{-1}$ 时脱硝效率趋于稳定.

30%),可达 $80\%\sim 85\%$.

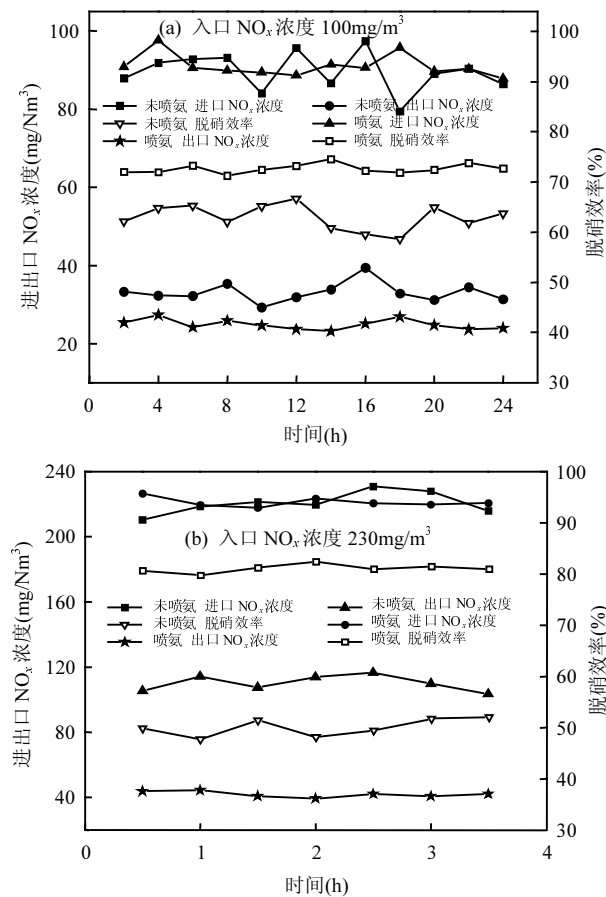


图3 不同入口 NO_x 浓度下喷氨对 SCR 脱硝效果的影响
Fig.3 The influence of inlet NO_x concentration on De- NO_x efficiency of SCR with different inlet NO_x concentration

在类似的操作条件下,考察了较高入口 NO_x 浓度条件下的脱硝效果,如图 4(b)所示.与图 5 中实验规律相同,脱硝效率基本随着反应空速的增加而有所降低.在不喷氨时,脱硝效率小幅度下降,但基本保持在 $51\%\sim 56\%$,且在 $2000\sim 2500\text{h}^{-1}$ 时脱硝效率趋于稳定.补充喷氨后,脱硝效率得到显著提升(提高约

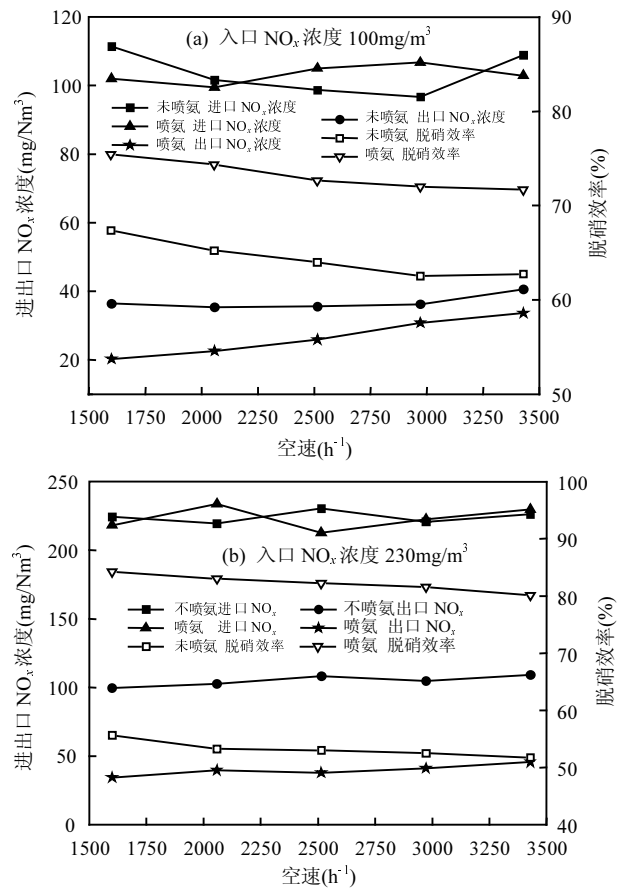


图4 不同入口 NO_x 浓度下空速对 SCR 脱硝效果的影响
Fig.4 The effect of space velocity on De- NO_x efficiency of SCR with different inlet NO_x concentration

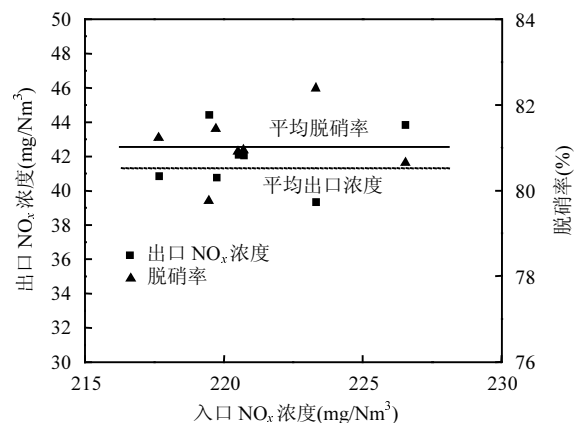


图5 SCR 系统长期运行效果(截取某一周数据)
Fig.5 The De- NO_x efficiency of SCR in one week under long term operation

基于上述实验选用催化剂的最佳空速为 $2000\sim 2200\text{h}^{-1}$,控制氨氮物质的量比在 $0.8\sim 0.85$ 之间^[15-16],对 SCR 中试装置进行了长期性能试验,运

行时间自 2018 年 10 月 7 日~11 月 11 日,累计 2 月(因石家庄市环境污染预警原因停窑 3 次).取一周(7d)SCR 装置出口浓度及 SCR 系统脱除效率每天的数据作图 5.SCR 入口平均浓度为 $221\text{mg}/\text{Nm}^3$,如图 5 所示,经过 SCR 中试脱硝系统后,烟气中 NO_x 平均浓度为 $41.9\text{mg}/\text{Nm}^3$,平均脱硝效率为 81%.可以看出,经过低氮燃烧、SNCR 脱硝与 SCR 脱硝等联合去除技术后,烟气排放的 NO_x 可以达到较低的排放水平,能够稳定控制在 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以内,满足超低排放要求.在此周期内,反应器出口烟气中氨浓度为 $1.07\times 10^{-6}\sim 7.02\times 10^{-6}$.

2.2 SCR 催化剂孔道堵塞特性分析

蜂窝式 SCR 催化剂在烟气脱硝过程装置中应用广泛,然而烟气携带的飞灰容易在催化剂表面沉积,引起催化剂失活与孔道堵塞等问题^[17].尤其是在炉窑运行负荷变动条件下,会产生硫酸氢铵等物质,导致原有飞灰粘性增加,从而显著加剧 SCR 催化剂失活与孔道堵塞^[18-19].因此,本文在 SCR 中试实验系统的基础上考察了催化剂长期运行条件下,孔道积灰与堵塞的问题.

在中试项目运行 3 个月后,从 SCR 反应器中取出催化剂,在实验室对其进行检测分析.从反应器前、中、后位置取出带尘催化剂,分别对其进行再生处理(压缩空气吹扫).

表 4 不同取样位置、处理前后的催化剂样品

Table 4 Catalyst samples at different sampling locations before and after treatment

样品编号	1-1	2-1	3-1	1-2	2-2	3-2
取样位置	反应器前	反应器中	反应器后	反应器前	反应器中	反应器后
再生处理	前	前	前	后	后	后
前后						

表 4 中再生处理前的样品 1-1、2-1 和 3-1 的比表面积分别为 $45.5, 46.4, 51.2\text{m}^2/\text{g}$ (表 5),说明较前部位的催化剂粉尘堵塞更为严重.去除表面覆盖的粉尘后,样品的比表面积可恢复至 $54.4, 55.8, 55.3\text{m}^2/\text{g}$,但仍明显低于新鲜样品的比表面积($65.6\text{m}^2/\text{g}$),说明有少量细粒粉尘进入了催化剂的孔道结构,导致催化剂不可逆的部分失活^[20].

由图 6 可见,经过一段时间的运行,催化剂的平均孔径向大于 10nm 的方向移动.通过压缩空气吹扫,

催化剂样品的微孔($2\sim 10\text{nm}$)比例都有不同程度的增加,说明催化剂微孔堵塞主要是由微细粉尘覆盖造成,且通过适当的压缩空气进行吹扫可以减轻微孔堵塞情况.

表 5 催化剂比表面积分析(m^2/g)

Table 5 BET surface areas of catalysts (m^2/g)

样品名称	新鲜样品	1-1	2-1	3-1	1-2	2-2	3-2
比表面积	65.6	45.5	46.4	51.2	54.4	55.8	55.3

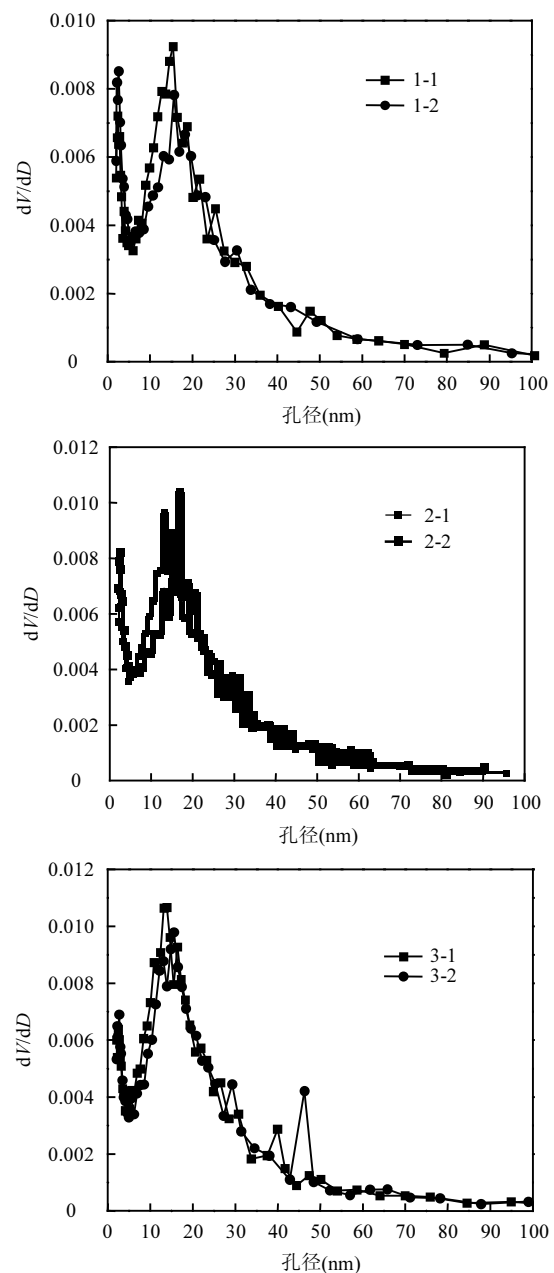


图 6 催化剂孔径分布

Fig.6 The pore size distributions of catalysts

表6 化学成分分析(%)

Table 6 Component analysis of catalysts (%)

成分	1-1	2-1	3-1	1-2	2-2	3-2	新鲜催化剂
TiO ₂	77.5	77.5	78.6	81.18	80.86	79.99	81.83
SiO ₂	8	7.7	7.4	7	6.7	7	6.05
CaO	3.7	3.5	2.6	3.7	3.5	2.6	1.61
V ₂ O ₅	3.1	3.1	3.2	2.9	3.3	3.4	3.36
MoO ₃	1.9	2.3	2.4	2.5	2.4	2.6	2.73
Al ₂ O ₃	1.9	1.8	1.8	1.5	1.5	1.6	1.18
SO ₃	1.7	1.8	1.8	1.6	1.6	1.7	1.68
WO ₃	0.77	0.90	0.82	0.74	0.88	0.77	0.85
Tl ₂ O ₃	0.40	0.3	0.37	0.3	0.31	0.33	0.00
Fe ₂ O ₃	0.33	0.31	0.26	0.2	0.2	0.19	0.16
P ₂ O ₅	0.30	0.3	0.31	0.32	0.30	0.27	0.30
NbO	0.19	0.21	0.21	0.23	0.23	0.25	0.25
K ₂ O	0.12	0.11	0.09	-	0.06	0.06	-
Na ₂ O	0.05	0.04	0.05	-	-	-	-

表7 窑灰主要成分(%)

Table 7 Component analysis of kiln dust(%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Loss
40.01	11.62	4.75	2.61	1.38	35.91

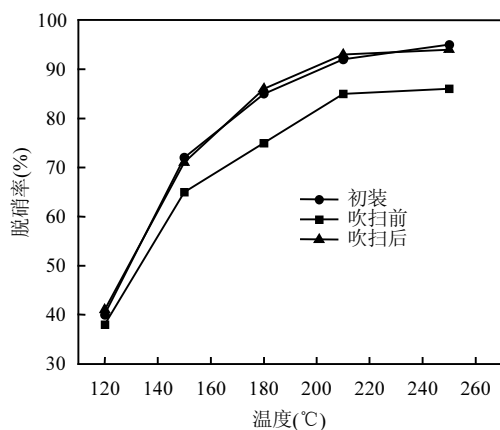


图7 催化剂运行前后活性对比

Fig.7 Catalytic activity of the catalysts before and after long term operation

为了分析粉尘和 SO₂ 对催化剂的影响,对新鲜催化剂和吹扫后的催化剂进行了化学成分(表 6)和活性分析(图 7).从表 5 可知,运行后催化剂中钙、硅、铝、铁等氧化物含量相对增加,其成分与窑灰(表 7)的化学成分一致,经压缩空气吹扫后覆盖在催化剂表面的生料粉尘均有所降低;SO₃ 含量几乎无变化,说明催化剂表面未覆盖硫酸盐类沉积物,应该是烟气中 SO₂ 含量较低而未形成硫酸盐.活性测试采用

实验室催化剂评价平台,截取 20×20×50mm 催化剂放置于反应器中;利用高纯 N₂、O₂、NH₃/N₂(2%标准气)、NO/N₂(2%标准气)配制模拟烟气,设计空速为 5000h⁻¹,总烟气流量约 1667mL/min(N₂、O₂、NH₃/N₂、NO/N₂ 流量分别为 1484,83,50,50mL/min), NO 和 NH₃ 的初始浓度 600×10⁻⁶,O₂ 浓度为 5%.由图 7 可知,运行 3 个月后催化剂脱硝效率有一定程度上的降低,但通过压缩空气进行吹扫,催化剂的脱硝效率恢复到初装时的活性,也证明了催化剂在运行过程中未出现中毒现象.

3 结论

3.1 经过 SNCR 系统的烟气中携带一定浓度的氨气,可以用于 SCR 装置的 NO_x 还原,在未额外增加氨气的条件下,SCR 脱硝效率可达到 50%以上,补充氨气后,脱硝效率有显著提升,可提到至 80%以上;

3.2 所采用低氮燃烧、SNCR 与 SCR 等联合脱硝技术可以稳定、有效的控制水泥炉窑烟气中 NO_x 的排放浓度,控制在 50mg/Nm³ 以内;

3.3 长时间运行后,催化剂内部微孔会被部分堵塞,导致比表面积降低,对催化剂层进行吹灰处理可以有效保障催化剂性能.

参考文献:

- [1] 马现奇,高旭东,范永斌,等.国内水泥行业 NO_x 治理及氨排放浅议 [J]. 中国水泥, 2019,5:78-80.
Ma X Q, Gao X D, Fan Y B, et al. NO_x control and NH₃ emission of Chinese cement industry [J]. China Cement, 2019,5:78-80.
- [2] Abuelnuor A A A, Wahid M A, Mohammed H A, et al. Flameless combustion role in the mitigation of NO_x emission: a review [J]. International Journal of Energy Research, 2014,38(7):827-846.
- [3] Liu G, Gao P X. A review of NO_x storage/reduction catalysts: mechanism, materials and degradation studies [J]. Catalysis Science & Technology, 2011,1:552-568.
- [4] Li C, Cui S, Gong X, et al. LCI Study of SCR DeNO_x Technology for Cement Industry [J]. Materials Ence Forum, 2013,743:252-257.
- [5] 余其俊,陈容,张同生,等.水泥工业烟气脱硫脱硝技术研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2020,39(7):2015-2032.
Yu Q J, Chen R, Zhang T S, et al. Research progress on desulphurization and denitration technology of flue gas from cement industry [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020,39(7): 2015-2032.
- [6] Vita A, Kondratenko, Manfred Baems. Mechanistic insights into the formation of N₂O and N₂ in NO reduction by NH₃ over a polycrystalline platinum catalyst [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2007,70:111-118.

- [7] Praveena V, Martin M L J. A review on various after treatment techniques to reduce NO_x emissions in a CI engine [J]. Journal of the Energy Institute, 2018,91(5):704-720.
- [8] 李 媛,吕 龙,张小龙,等.水泥窑炉 SCR 烟气脱硝工艺设计 [J]. 中国环保产业, 2019,11:37-40.
Li Y, Lv L, Zhang X L, et al. Process design of SCR technique for cement kiln [J]. Chinese Environmental Protection Industry, 2019,11: 37-40.
- [9] Neuffer Bill, Laney Mike. Alternative control techniques document update-NO_x emissions from new cement kilns [J]. United States Environmental Protection Agency, 2007,1:25-28.
- [10] Shen Weiguo, Liu Yi, Yan Bilan Y, et al. Cement industry of China: driving force, environment impact and sustainable development [J]. Renewable Sustainable Energy Review, 2017,75:618-628.
- [11] Busca G, Lietti L, Ramis G, et al. Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NO_x by ammonia over oxide catalysts: A review [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1998, 18(1):1-36.
- [12] Orsenigo C, Lietti L, Tronconi E, et al. Dynamic investigation of the role of the surface sulfates in NO_x reduction and SO₂ oxidation over V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalysts [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998,37(6):2350-2359.
- [13] Ha Heon Phil, Maddigapu, Pratap Reddy, et al. SO₂ resistant antimony promoted V₂O₅/TiO₂ catalyst for NH₃-SCR of NO_x at low temperatures [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008,78(3/4): 301-308.
- [14] 范 潇,雷 华,李凌霄,等.水泥窑烟气 SCR 脱硝催化剂的选型及应用 [J]. 水泥, 2019,11:54-57.
Fan X, Lei H, Li L X, et al. Type selection and application of SCR catalyst for cement kiln [J]. Cement, 2019,11:54-57.
- [15] Malpartida I, Marie O, Bazin P, et al. The NO/NO_x ratio effect on the NH₃-SCR efficiency of a commercial automotive Fe-zeolite catalyst studied by operando IR-MS [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2012,113-114:52-60.
- [16] Roy S, Hegde M S, Madras G. Catalysis for NO_x abatement [J]. Applied Energy, 2009,86(11):2283-2297.
- [17] Edelkott D. Operating experience with the high-dust SCR technology [J]. Cement International, 2015,4:46-50.
- [18] Forzatti P. Present status and perspectives in de-NO_x SCR catalysis [J]. Applied Catalysis A: general, 2001,222(1):221.
- [19] Kijlstra W S, Biervliet M, Poels E K, et al. Deactivation by SO₂ of MnO_x/Al₂O₃ catalysts used for the selective catalytic reduction of NO with NH₃ at low temperatures [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1998,16(4):327-337.
- [20] Benson S A, Laumb J D, Crocker C R, et al. SCR catalyst performance in flue gases derived from sub-bituminous and lignite coals [J]. Fuel Process Technology, 2005,86:577-613.

作者简介: 刘怀平(1971-),男,江苏淮安人,研究员级高级工程师,博士,主要研究方向为建材行业大气污染物减排.发表论文 9 篇.

《中国环境科学》再次获评“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”,位列学科榜首

《中国环境科学》在武汉大学中国科学评价研究中心发布的第四届中国学术期刊评价中获评“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”。中国学术期刊评价按照各期刊的期刊学术质量和影响力指标综合得分排名,将排序期刊分为 A+、A、A-、B+、B、C 6 个等级,评价的 6201 种中文学术期刊中有 316 种学术期刊获评权威期刊(A+),A+为得分排名前 5%的期刊.此次获得“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”称号的环境类期刊有 3 种,《中国环境科学》在环境科学技术与资源科学技术学科内荣登榜首。