

工业石灰窑窑尾烟气 SCR 脱硝工艺工程应用及运行效果分析

陈成

江苏永钢集团有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i5.3210

[摘要] 为应对工业用石灰窑尾部烟气 NO_x 超标排放问题,以实际生产中的大型工业用石灰窑为载体,运用低温选择性催化还原脱硝工艺展开工程应用的研究,结合实际工程项目探讨了其具体工艺配置、运行工况以及治理效果。工程采用蜂窝式钒钛基催化剂,并通过对流场分布和喷氨配比的优化来适应工业石灰窑具有高尘且温度起伏大的烟气特点。经实践结果证明:经过系统的正常化运行后,目前 NO_x 排放浓度长期稳定低于 $150\text{mg}/\text{Nm}^3$ 并具备低于 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的能力,脱硝效率可达94%,系统中出现的逃逸 $\text{NH}_3 \leq 2.5\text{ppm}$ 。此工艺针对有着较为复杂环境的工业石灰窑而言,具备优越的脱硝效果并且维护成本低,可进行规模化的推广,对于类似情况下的窑炉烟气脱硝治理提供一定的借鉴意义。

[关键词] 工业石灰窑; 窑尾烟气; SCR脱硝; 工艺应用; 运行效果

中图分类号: P619.26+3 **文献标识码:** A

Engineering Application and Performance Evaluation of Low-Temperature Selective Catalytic Reduction (SCR) for NO_x Abatement in Flue Gas from Industrial Lime Kiln Exhaust

Cheng Chen

Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd.

[Abstract] To mitigate non-compliant nitrogen oxide(NO_x)emissions from the exhaust flue gas of industrial lime kilns—a persistent challenge due to high dust loading, wide temperature fluctuations, and variable gas composition—this study presents a comprehensive engineering implementation and operational performance assessment of a low-temperature selective catalytic reduction(SCR)system. Based on full-scale deployment across multiple production-line lime kilns, the work details the design rationale, catalyst selection (honeycomb vanadium-titanium composite), and critical process adaptations—including optimized flow-field homogenization, staged ammonia injection with real-time feedback control, and thermal management strategies tailored to high-dust, transient-temperature conditions. Long-term operational data confirm stable NO_x emissions below $150\text{ mg}/\text{Nm}^3$ (dry,10% O_2),with peak performance achieving $\leq 50\text{ mg}/\text{Nm}^3$ under controlled load conditions. The system consistently delivers $\geq 94\%$ NO_x removal efficiency while maintaining ammonia slip at $\leq 2.5\text{ ppm}$. Notably, catalyst service life exceeds 24 months without regeneration,and annual maintenance costs remain $<0.8\%$ of total denitrification investment—demonstrating robustness,cost-effectiveness, and scalability. This work provides empirically validated guidance for deploying SCR technology in thermally unstable, particulate-rich industrial kiln exhaust streams,and contributes transferable engineering insights for NO_x control in analogous high-challenge thermal processes.

[Key words] industrial lime kiln; exhaust flue gas; low-temperature SCR; NO_x abatement; high-dust flue gas; operational reliability

引言

石灰作为钢铁行业烧结工序、炼钢工序生产过程中的溶剂辅料,工业上使用最多的是回转式石灰窑,在其生产运行过程中窑尾烟气会排放大量的氮氧化物。石灰窑的烟气中含粉尘量高,

且温度波动较大,并且含有较多的碱性成分,很容易造成脱硝催化剂堵塞以及催化剂中毒,常规脱硝工艺适用性较差。SCR脱硝技术具有较高的脱硝率,且脱硝工艺相对成熟稳定,已成为工业上用于石灰窑超低排放改造的常用技术之一。为了进一步了

解脱硝工艺在该石灰窑运行工况下的适应能力,以实际工程应用为依托,详细论述了工艺设计以及设备组成,监测运行后期各项数据变化情况,并针对其中出现的不足进行优化改进,从而更好地实现石灰窑脱硝工程的应用规范。

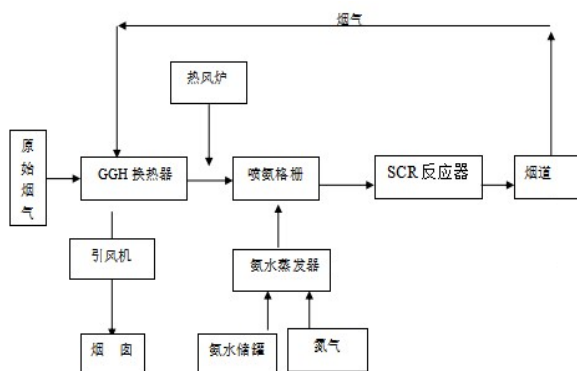
1 工程概述与工艺设计

1.1 工程基本工况

本文针对实际生产中的石灰窑烟气脱硝工程进行分析设计。该石灰窑为回转窑形式,生产能力为600t/d,烟气量为135000Nm³/h,烟气主要成分为生石灰粉尘、SO₂、NO_x,入口烟气温度为90~110℃,烟气含氧量为10~13%,入口NO_x浓度≤900mg/Nm³。针对该石灰窑烟气的高尘、高碱性以及烟尘成分复杂、烟气温度低等特点,本工程采用低温SCR脱硝技术并配套烟气补热系统,SCR脱硝还原剂采用20%浓度的工业氨水,SCR催化剂采用蜂窝式钒钛基催化剂,项目设计能力NO_x排放浓度≤50mg/Nm³,NH₃逃逸≤2.5ppm。

1.2 主要工艺流程

石灰窑窑尾出来的烟气先进入布袋除尘进行处理,有效地去除粉尘,从源头降低粉尘造成的催化剂磨损和结垢堵塞等风险。经处理后的烟气通过取气烟道进入板式换热器,经板式换热器换热后温度升至150℃(其热源来自脱硝反应后180℃的净烟气),换热后的烟气经烟气补热系统的再次加热后温度升高到180℃左右,然后进入喷氨段,与利用高压雾化喷嘴雾化成微米级别的氨水液滴充分稀释混合,再由SCR反应器上部进入,烟气与NH₃的混合物在通过多层蜂窝式钒基催化剂层时,烟气中的NO_x在催化剂的作用下与NH₃反应生成N₂与H₂O,脱硝后的净烟气由SCR反应器下方出口烟道进入板式换热器换热后,经增压风机后从烟囱达标排放。



图一 脱硝系统工艺流程图

1.3 系统关键工艺参数

针对石灰窑烟气变化特点,合理选取了催化剂使用寿命、出口NO_x排放浓度、NH₃逃逸等重要工艺参数。

2 工程运行效果分析

2.1 脱硝净化效果分析

整个工程项目建设投用后,严格按照要求对脱硝系统进行了连续试运行,并对脱硝系统进出口烟气量、进出口NO_x排放浓

度、进出口烟气温度、烟气含氧量等运行数据进行了监测,监测结果证明:在整个脱硝运行期间,由于受间歇性给料、煅烧温度反复调整、燃烧工况不均匀、燃料成分波动等因素影响,系统入口NO_x浓度变化较高且烟气扰动较大,并且入口烟气温度整体偏低,通过烟气补热系统加热、低温SCR脱硝系统有效净化之后,脱硝效率最高可达94%,出口NO_x排放浓度长期稳定在100~150mg/Nm³之间并具备低于50mg/Nm³的能力,每年可减少氮氧化物排放约100t。该套脱硝工艺净化性能较强、抗干扰能力突出、脱硝能力明显,满足国家环保排放标准要求,并且具有较高的环境效益。

表一 主要设计运行参数表

关键工艺参数	单位	设计值	实际值
催化剂使用寿命	小时	≤24000	17280(已使用时间)
出口NO _x 排放浓度	mg/Nm ³	≤150	100~150
NH ₃ 逃逸	ppm	≤2.5	1.8~2.5
催化剂压力损失	Pa	≤600	300
最低连续运行烟温	℃	180	180
最高连续运行烟温	℃	350	230
理论氨耗用量	Kg/h	35	30

2.2 控制氨逃逸

氨逃逸是评价SCR脱硝工艺系统经济、环保运行的最为关键的技术指标,是整个脱硝工程的重点控制项目^[1]。脱硝反应过程中,过量不参加还原反应的逃逸氨将直接造成氨耗原料成本增加,并且在烟气中与酸性微量物质结合生成具有黏性的硫酸氢铵、硫酸铵等气溶胶,易引发烟道积灰、烟气拖尾以及腐蚀设备等问题产生二次污染。本工程采用高精度变频式氨水计量泵对氨水量精准输送配合均匀分布、数量较多的微小雾化喷嘴及流体仿真优化后的喷射角度、压力以保证喷氨精细、均匀并配合管道静态混合器扰动强迫混合,优化烟道流场分布避免了局部浓度偏高的氨富集和偏析现象发生。经全年长期运行监测结果表明,本系统逃逸控制稳定在1.8~2.5mg/Nm³之间,平均仅2.15mg/Nm³低于≤3mg/Nm³行业控制标准。通过精确的氨量控制不仅减少了原料氨耗的成本消耗而且有效规避了过量氨气带来的二次污染气溶胶的发生,满足工业石灰窑长期满负荷生产的要求^[2]。

2.3 系统损耗与稳定性分析

低的运行能耗和设备的稳定性是脱硝工程工业化应用价值大小以及工艺先进性的体现。石灰窑生产工况下,本系统平均综合电耗为10kWh/t(石灰),平均氨水单耗1.6kg/t(石灰),其耗材能耗较低,并处于可控水平。设备维护简单,采用了全自动在线声波清灰技术,无需拆机人工清灰。催化剂清灰周期一般为1次/8h,不需频繁停机检修,对生产基本没有影响,保证生产的连续化进行。系统在正常运行中,未发生停机故障,系统综合运行

率达100%。催化剂表面没有大面积结粉及中毒现象,耐受负荷能力较好,完全适合于长期工业化稳定运行。

3 运行问题及优化改善措施

3.1 现存运行问题

基于本脱硝系统运行半年以上持续监测的数据,通过对催化剂状态、氨水消耗、出口烟气数据等进行定期回顾,总结出本低温SCR脱硝设施在石灰窑高碱值高尘工况下的两个典型问题。其一,脱硝系统在初期运行过程中未根据现场实际工况及排放数据进行合理、精准喷氨,而是一直采用固定的频率持续喷氨。由于过量喷氨,不仅造成氨逃逸,还导致氨水消耗量大幅上升增加了运行成本,同时烟气中微量SO₃和逃逸的氨结合形成低温黏性铵盐黏附在催化剂表面以及微孔内部,经过长时间积累将会造成催化剂的永久性的活性丧失。其二,脱硝系统采用了全自动在线声波清灰技术,在初期运行过程中清灰频次为2次/8h,通过定期自动清灰,清除催化剂表面的粉尘,避免催化剂堵塞。但是由于清灰频次过高,不仅造成压缩空气消耗过多,还会带走大量的热量导致烟气补热系统煤气消耗量大幅增加,同时频繁清灰造成烟囱出口粉尘浓度瞬时上升,影响环保在线监测稳定性。

3.2 针对性优化措施

为了改善过度喷氨、过度清灰等问题,我们对脱硝系统进行了优化。针对过度喷氨情况,优化设备PLC自动控制逻辑与在线实时监控系统,结合CEMS检测模块,构建氮氧化物排放浓度与喷氨联合控制系统,在出现氮氧化物排放浓度偏高时,自动精准调节氨水供给流量,并对应催化剂当前反应能力,一方面防止多余氨气体未反应滞留于烟道中,从源头上减少硫酸氢铵,硫酸铵等低温副产品的形成,降低了催化剂粘盐的堵塞;另一方面避免了过量氨逃逸,在达标排放的同时进一步降低氨水成本。针对过度清灰问题,重新标定喷吹间隔时间和频率,使常规清灰周期由2次/8h缩短至1次/8h,在降低压缩空气、煤气消耗的同时也实现

颗粒物稳定达标排放。经过上述优化措施实施,氨水消耗量下降20%,压缩空气消耗量下降50%,氨逃逸控制稳定在1.8~2.5mg/Nm³之间,脱硝系统整体运行性能得到明显提升且运行成本大幅降低。

4 结束语

石灰窑窑尾烟气通过采用低温SCR脱硝技术,能很好地适应高粉尘、温度变化和碱性气氛等复杂环境,工程建设稳定性和烟气脱硝净化能力都很高。实际测量结果显示,其脱硝效率最高能达到94%,同时NO_x的排放也满足现在及未来的国家排放标准要求,而且氨逃逸控制得当。针对存在的低温脱硝率偏低、催化剂堵塞、脱硝设施腐蚀、氨逃逸等问题,通过采取优化流场分布、增强烟气预处理、设置催化剂吹灰系统、精准喷氨、优化烟气加热系统等措施,有效地解决了上述问题。整体上来看,工艺流程十分紧凑,并且适用性强,在不需要对原有的窑炉设备进行大改的情况下就可以实施,综合性价比极高。未来可以考虑通过分析原辅燃料成分、生产工艺参数、设备状态等多种因素,构建科学、动态的污染物排放智能调度模型,实现污染物排放的精准预测与前瞻性管理,在实现稳定、精准、达标排放的同时达到降低环保运行费用的目标,推动石灰生产企业朝绿色低碳方向转变,并为同类型工业窑炉的脱硝工程提供了可靠的技术参考和依据。

[参考文献]

- [1]袁岩江,李臣,袁国安.SCR脱硝技术在碳化尾气处理中的应用及节能改造[J].纯碱工业,2023,(03):3-6.
- [2]刘健.WDH系列混烧竖式石灰窑及配套烟气处理设备[R/OL].山东省,山东万达环保科技有限公司,2022-05-12.

作者简介:

陈成(1989—),男,汉族,江苏省南通市如东县岔河镇人,本科,中级,研究方向:环境工程。