水泥窑高温高尘SCR脱硝工艺设计及影响分析

吴涛 戴子剑 张琳 杨振宇 赵宇鸿
江苏沐唯特环保科技有限公司 江苏 常州 213125

摘 要 水泥窑高温高尘选择性催化还原技术（Selective Catalytic Reduction，SCR）脱硝具有效率高、投资省、占地面积小、反应温度理想等诸多优点，在水泥窑氮氧化物（Nitrogen Oxides，NO_x）超低排放上得到了广泛的应用。SCR反应器布置在C1预热器出口与余热锅炉之间，烟气中粉尘浓度高、粒径小、黏性高，在高尘运行条件下，该工艺存在催化剂磨损、堵塞等风险。为解决水泥窑高温高尘SCR脱硝工艺设计难点，文章对该工艺进行分析并提出建议。

关键词 水泥窑；SCR脱硝工艺；高温高尘

Design and Impact Analysis of High-Temperature High-Dust SCR Denitration Process in Cement Kilns

Wu Tao, Dai Zi-jian, Zhang Lin, Yang Zhen-yu, Zhao Yu-hong
MUWELT Environmental Technology Co., Ltd., Changzhou 213125, Jiangsu Province, China

Abstract Selective Catalytic Reduction (SCR) denitration technology applied in the high-temperature, high-dust environment of cement kilns offers several advantages, including high efficiency, lower investment costs, a small footprint, and an ideal reaction temperature. Consequently, it has been widely adopted to achieve ultra-low emissions of Nitrogen Oxides (NO_x) from cement kilns. The SCR reactor is typically installed between the outlet of the C1 preheater and the waste heat boiler. Under these high-dust operating conditions, where the flue gas contains a high concentration of fine, sticky particles, the process faces risks such as catalyst abrasion and plugging. To solve the design challenges associated with high-temperature, high-dust SCR denitration processes in cement kilns, this paper analyzes the process and puts forward corresponding recommendations.

Key words Cement Kiln; SCR Denitration Process; High-Temperature High-Dust

随着节能减排政策的日趋严格，水泥行业作为氮氧化物（NO_x）排放的重点污染源，面临着严峻的环保治理压力。相较于火电等行业的SCR脱硝，水泥窑烟气最典型的特征是极高的粉尘含量[1]，对SCR脱硝系统的工艺设计、设备选型和运行稳定性提出了更高要求，因此应深入研究水泥窑高温高尘SCR脱硝的工艺原理与系统构成，系统分析其对设备运行和生产线成本的影响，优化工艺与操作策略，为相关工程设计与运行优化提供参考。

1 工艺原理与系统构成

1.1 工艺原理

选择性催化还原法（SCR）脱硝，是在适宜温度且有催化剂的催化作用下，还原剂氨选择性地与烟气中的NO_x发生化学反应，生成无污染的氮气（N_2）与水（H_2O）。其反应方程式如下：

$$4NO+4NH_3+O_2 \rightarrow 4N_2+6H_2O \quad (1)$$

$$2NO_2+4NH_3+O_2 \rightarrow 3N_2+6H_2 \quad (2)$$

反应过程中需要4个条件来相互协调。

1.反应温度。对于常规的SCR脱硝催化剂，活性最佳温度为280～400℃，反应温度过低会导致反应速率剧减，脱硝效率降低；反应温度过高会导致催化剂烧结。此外，低温下的催化剂硫铵中毒影响也不可忽视。烟气中的硫氧化物（SO_x）会与氨（NH_3）反应生成亚硫酸铵[$(NH_4)_2SO_3$]或亚硫酸氢铵（NH_4HSO_3），其反应方程式如下：

$$SO_2+2NH_3+H_2O \leftrightarrow (NH_4)_2SO_3 \quad (3)$$

$$SO_2+NH_3+H_2O \leftrightarrow NH_4HSO_3 \quad (4)$$

$(NH_4)_2SO_3$和NH_4HSO_3在低温（约100～160℃）下均为黏性物质，会裹挟着粉尘黏附在催化剂表面，堵塞催化剂空隙，破坏其多孔结构，从而导致催化剂比表面积大幅降低而失活（催化剂中毒）。需注意这种催化剂中毒是物理过程，和催化剂本身的性质无关，在低温环境下SO_x和NH_3就会生成$(NH_4)_2SO_3$和NH_4HSO_3，进而导致催化剂中毒。因此通过改进催化剂配方来解决硫铵中毒问题并不可靠。但上述（3）（4）反应是可逆的，在高温（180℃以上）环境下，亚硫酸铵和亚硫酸氢铵会分解成SO_x和NH_3。因此，运行在350℃以上温度的水泥窑高温高尘SCR脱硝，不仅能满足催化剂的最佳反应温度，还能有效避免硫铵中毒。

2.还原剂的混合及流场分布[2]。反应需确保还原剂与烟气中NO_x在催化剂层之前充分且均匀混合，否则局部区域还原剂不足会造成脱硝效率低，或者氨过剩导致氨逃逸，增加还原剂消耗及氨的泄漏。

3.化学计量的调控。在大多数情况下，燃烧产生的NO_x主要为一氧化氮（NO）（90%以上），二氧化氮（NO_2）少于10%[3]，水泥窑也不例外。由前述化学反应式（1）（2）可知，当NO_x主体为NO时，NO_x和NH_3反应的化学摩尔比约为1∶1。因此喷入的还原剂摩尔剂量需精准地与烟气中NO_x的量相等，氨过多的话会增加还原剂的消耗和提高氨逃逸。

4.催化剂的组成。催化剂的成分是影响催化反应的重要因素。水泥SCR脱硝催化剂活性成分为五氧化二钒（V_2O_5）和三氧化钨（WO_3）等。理论上催化剂中V_2O_5和WO_3的含量越高，催化效果越好。而水泥脱硝中，高粉尘含量导致的磨蚀对催化剂的强度提出了更高的要求，如何兼顾活性和强度是催化剂配方和设计的重要难点。

1.2 系统构成

一个运行可靠、效果显著的SCR脱硝系统主要由4部分组成：①氨系统，包括还原剂（液氨、氨水或者尿素等）储运、氨制备及注入；②反应器，主要是SCR脱硝反应器本体，其核心部分为多个催化剂层；③吹灰系统，水泥窑高温高尘SCR脱硝与其他领域、其他方式的脱硝相比，最大的特点就是高效的吹灰系统，可以及时清除催化剂积灰，保证反应器长期高效地运行；④控制系统，为精确控制喷氨量及吹灰器运行，需要结合在线监测建立自动控制系统。

2 水泥窑高温高尘SCR工艺的核心设计要点

2.1 反应器位置与温度窗口选择

水泥窑高温高尘SCR脱硝工艺在预热器出口选位，主要考虑到烟气条件的合理匹配。此处的烟气温度基本在300～400℃，是普通钒钛系催化剂的活性温度区间，在此区间催化剂活性和反应动力学条件最佳，最利于脱硝反应快速高效进行。该选位直接利用水泥工艺本身的热源，无须增设燃烧器提高烟气温度，避免了额外能耗和运行费用。然而，该选位也使得反应器直面未经任何预处理、粉尘浓度高达80～120 g/Nm³的原生烟气，给催化剂选型和清灰装置的设计带来了严峻挑战。

2.2 催化剂的选型与设计

面对高粉尘条件，催化剂应同时满足高活性及高耐磨要求，因此，宜选择比表面积大的蜂窝式催化剂，同时采取11 mm到13 mm的大节距设计，以减少粉尘在通道中搭桥堵塞的风险。催化剂的迎风面端部应进行端头硬化以抵御高速含尘烟气对催化剂的物理磨损，大幅度延长其机械寿命。催化剂的化学配方及催化剂的体积用量均根据入口NO_x含量、所需的脱硝效率、所设的氨逃逸值及预期化学使用寿命要求进行核算，并在性能、成本、寿命之间取得最佳平衡[4]。

2.3 流场模拟与均布设计

为保障SCR系统的高效、低耗运行，对于高速高尘的复杂烟道系统，在烟气与还原剂分布的均匀性上有很高的要求。烟气与还原剂分布均匀首先与SCR脱硝效率有关，若不均匀则会导致局部烟气氨少NO_x多，脱硝效率降低。其次与系统氨逃逸有关，局部氨过量会导致氨逃逸过高。最后与催化剂寿命有关，局部流速过快会导致催化剂寿命迅速衰退，并且局部NH_3在该区域无法参与反应，形成“短路”现象。而局部流速过慢则容易积灰。计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）数值计算分析是现代SCR设计中的必要手段，流场的分布决定了整个系统的脱硝效率、氨的逃逸和催化剂的寿命。在设计过程中，利用CFD模拟软件对从喷氨点到催化剂上游直至烟道出口的整条通道建立模型，通过数值模拟计算出烟气的速度场、浓度场和压力场的分布，并根据模拟计算的结果有针对性地在烟道中安装导流板、整流格栅等装置，从而在实物投运之前将流场调整到理想的状态。一个好的设计目标就是使催化剂入口断面上烟气速度分布的相对标准偏差控制在15%以内，NH_3/NO_x摩尔比分布的相对标准偏差控制在5%以内。

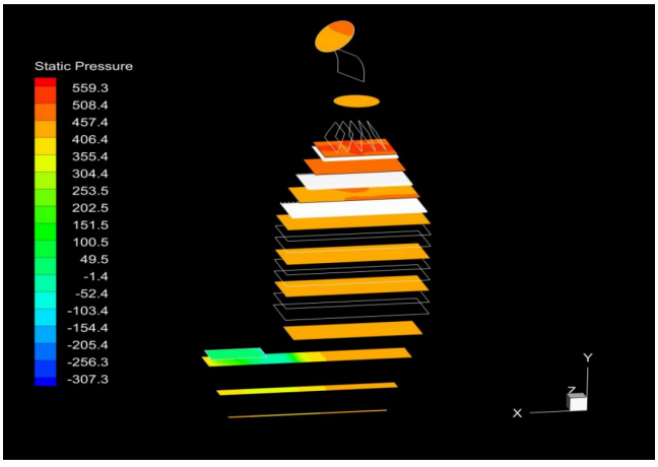

图1 某大型水泥窑高温高尘SCR脱硝项目流场模拟

图1为某大型水泥窑高温高尘SCR脱硝项目的流场模拟。从模拟中可以看到，通过精确设计的导流板和分布格栅可以使烟气在全截面上均匀、稳定地分布。通过CFD模拟技术大大减轻了设计论证的难度和工作量，为更加优化地设计SCR脱硝反应器提供了强有力的手段。而通过CFD模拟技术设计的该大型水泥窑高温

高尘SCR脱硝设备，在工程实践中也取得了良好的效果。

2.4 吹灰系统设计

对水泥窑高温高尘SCR脱硝来说，吹灰器系统是整个系统长期稳定、连续运行的关键。高粉尘含量及粉尘细而黏是水泥烟气最大的特点和难点。若吹灰系统乏力，则粉尘就会快速沉积、板结在催化剂通道里，导致系统阻力上升、催化剂堵死，最终排放不达标、氨逃逸过高，甚至导致整个系统瘫痪。水泥窑高温高尘吹灰一般采用高效的耙式吹灰器。压缩空气通过耙管均匀吹扫催化剂表面及空隙，从而清除积灰。在吹灰系统的设计上要注意三个误区。

吹灰压力并非越大越好。吹灰压力过大，会加速催化剂的磨损，甚至导致催化剂塌床等严重后果，大幅缩短催化剂寿命。目前较为先进的技术是低压吹灰技术。

吹灰系统是一个包含风机、耙管及催化剂在内的完整系统，并非只有耙式吹灰器本身。吹灰系统的设计，需要综合考虑吹灰压力、耙管尺寸和孔隙、耙管高度，以及催化剂设计等多种因素，在各个参数中寻找一个和谐、平衡、高效的方案。

吹灰的作用更主要是把粉尘流态化，避免其在催化剂表面聚集和板结。流态化的粉尘随着烟气从催化剂孔隙中流走。而指望靠强力吹风穿透催化剂的孔隙通道是不可能的，也是对催化剂伤害极大的。

3 对水泥窑设备的影响

3.1 对余热锅炉发电量的影响

高温高尘SCR脱硝系统设置于预热器和余热锅炉之间，烟气经过脱硝反应器，再到余热锅炉回收利用其热量。因此，烟气的温度变化对余热锅炉的效率有显著影响。SCR反应器和烟道的传热会造成烟气温度下降5～15℃。进入余热锅炉后，烟气温度降低造成锅炉传热温差下降，导致热量利用率降低[5]。当前，通过技术的升级和设计的优化，已经能使水泥窑高温高尘SCR脱硝反应器温降低于5℃。

3.2 对高温风机的影响

高温风机的运行状态决定了窑系统的稳定性。催化剂、导流板、分布格栅和增加的烟道等部分可导致烟气流通阻力增加600～1 000 Pa。风机的轴功率与烟气阻力成正比，增加的阻力使得风机轴功率（转速）增加，进而导致风机电机电流增加、耗电增加。因此，在SCR系统设计之初应对高温风机进行能力计算。若风机原设计裕量小于15%，则应通过换更大功率电机、对风机叶轮进行结构优化等形式增大风机出力，以保证风机能够克服新增阻力。

3.3 对生产线运行成本影响分析

SCR脱硝系统的使用将会对水泥生产线的总成本产生直接与间接两方面的影响。直接成本主要有还原剂成本、催化剂成本、设备电耗成本等，三项占总运行成本的80%以上。其中，还原剂成本在SCR反应效率高的条件下主要取决于处理NO_x的量，并非可以无限降低。催化剂成本是直接成本的重要部分，其在水泥窑高温高尘环境下的寿命，取决于受到的粉尘磨损和催化剂的失活情况。高效的吹灰系统及优化的催化剂选型，则决定了催化剂寿命及后期运行的长期成本。通常水泥窑高温高尘催化剂的使用年限为2～5年。而环保处罚规避成本是间接成本的隐性效益，如果不安装使用SCR则企业的NO_x排放浓度将超出国家标准，在环保检查中可能需要承担每日1～10万元的罚款，SCR设备的正常运行则可以保证脱硝达标[6]。综合来看，SCR脱硝系统虽增加了生产成本，但从环保合规、社会责任和长远发展角度来看，仍是水泥企业实现绿色转型的必要投入。

4 结束语

总之，高温高尘SCR脱硝工艺是水泥行业较为合适的脱硝技术路线之一，与选择性非催化还原（Selective Non-Catalytic Reduction，SNCR）系统联合运行，可以经济高效地达到超低排放要求。设计时需重点考虑高浓度、高黏性粉尘对催化剂带来的磨损、堵塞、中毒等不良影响，工艺设计关键在于催化剂的选型设计、SCR反应器流场设计及清灰系统设计。通过优化设计，可以使高温高尘SCR系统的投运对水泥窑运行及余热利用无明显影响。

参考文献

[1]罗祥波,赖永花,陈文瑞,等.高温微尘SCR一体化技术在5000t水泥窑的成功应用[J].中国环保产业,2024(11):43-48.

[2]刘立国,邵继刚.精准脱硝联合SCR实现水泥窑氮氧化物超低排放[J].水泥工程,2025,38(4):8-9,32.

[3]钟秦,曲虹霞,徐复铭.V_2O_5/TiO_2选择性催化还原脱除烟气中的NO_X[J].燃料化学学报,2001,29(4):378-380.

[4]陶磊.高温低尘SCR脱硝技术在水泥生产线烟气治理的分析及应用[J].能源与环境,2024(6):114-116,126.

[5]李阁男.水泥窑高温高尘SCR脱硝工艺设计及影响分析[J].水泥,2024(4):20-24.

[6]时耀辉,王兴.水泥窑六级预热器配套高温高尘SCR反应器布置方法[J].水泥,2024(3):49-51.

（本文编辑　曹　阳）