低温SCR烟气脱硝技术在湛江钢铁烧结工序的应用

赵利明[1]，梁利生[1]，蔡 嘉[2]，龚天龙[1]
（1. 宝钢湛江钢铁有限公司 炼铁厂，广东 湛江 524000；2. 中冶长天节能环保技术有限公司，湖南 长沙 410205）

摘要：“活性炭脱硫+低温SCR脱硝”组合式净化工艺在宝钢湛江钢铁实现了工业化应用，各污染物排放质量浓度达到国家超低排放标准限值。本文详细阐述了低温SCR脱硝系统的主要组成，分析并解决了运行中出现的结晶物堵塞、温度场不均的问题，为低温SCR脱硝技术在烧结工序烟气超低排放改造提供借鉴与参考。

关键词：烧结烟气；活性炭；脱硫；SCR；低温脱硝
中图分类号：X757 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2022)05－0089－06
doi：10.13403/j.sjqt.2022.05.076

Application of low-temperature SCR flue gas denitrification technology in sintering process of Zhanjiang Iron & Steel

ZHAO Liming[1], LIANG Lisheng[1], CAI Jia[2], GONG Tianlong[1]
(1. *Iron Making Plant, Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co., Ltd., Zhanjiang* 524000, *Guangdong, China*;
2. *Hunan Zhongye Changtian Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan, China*)

Abstract: The combined purification process of "activated carbon desulfurization + low temperature SCR denitration" has been industrially applied in Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co., Ltd. The emission mass concentration of each pollutant is lower than the national ultra-low emission standard limit. In this paper, the main components of the low-temperature SCR denitration system are expounded in detail, the problems of crystal blockage and uneven temperature field during operation are analyzed and solved, which can provide references for the low-temperature SCR denitration technology in the ultra-low emission transformation of flue gas in the sintering process.

Key words: sintering flue gas; activated carbon; desulfurization; SCR; low temperature denitration

湛江钢铁炼铁厂1#、2#烧结机有效烧结面积均为550 m^2，分别于2015年8月、2016年7月建成投产，工程配套建设了活性炭烟气净化装置。烧结烟气经活性炭装置净化后，SO_2质量浓度降至20 mg/Nm^3以下，出口粉尘质量浓度降至10 mg/Nm^3以下。由于活性炭烟气净化装置采用单级吸附，其脱硝效率在60%左右，NO_x排放质量浓度为100～150 mg/Nm^3，该值大于超低排放标准（$NO_x \leqslant 50$ mg/Nm^3，基准含氧量体积分数以16%计），为实现NO_x超低排放目标，需要对现有烟气净化系统进行改造。

选择性催化还原技术（SCR）是目前最可靠的脱硝技术[1]，其核心是V_2O_5-WO_3（MoO_3）/TiO_2催化剂体系，SCR催化剂不同，还原NO_x的最佳温度区间不同，高温（280～320 ℃）SCR脱硝技术在我国燃煤发电厂烟气脱硝中得到广泛应用。单级活性炭之后烟气温度约为130～150 ℃，采用高温SCR脱硝技术时，需要将烧结烟

收稿日期：2021－09－15；修回日期：2022－03－31
作者简介：赵利明（1982—），高级工程师，从事烧结技术研究与管理工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气的温度加热至230～260 ℃，再额外补充30～50 ℃升温热量，大大提高了该技术应用的投资和运行成本。目前，国内宝钢股份宝山基地4#烧结机采用了高温SCR脱硝技术[3]，因此，低温SCR脱硝技术在烧结烟气中的应用具有实际的研究意义，但催化剂性能的优劣直接决定了SCR脱硝工艺的可靠性[4]。本文鉴于低温SCR催化剂研究和湛江钢铁烧结烟气特性，采用钒钨钛系低温(180 ℃)催化剂，选用“活性炭脱硫+低温SCR脱硝”烟气处理工艺，在各活性炭烟气净化系统后串联1套低温SCR脱硝系统。

1 湛江SCR脱硝系统应用情况及特点

湛江钢铁炼铁厂于2020年1月开始建设，1#、2#烧结机脱硝装置于2021年2月建成投运，低温SCR脱硝系统主要由烟气系统、烟气换热器(GGH)、加热炉系统、氨空气混合器、喷氨格栅系统、反应器催化层、吹灰系统组成。该系统设计参数见表1。

表1 低温脱硝系统设计参数

Table 1 Design parameters of low temperature denitration system

烟气量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	入口温度/℃	出口温度/℃	质量浓度/($mg \cdot Nm^{-3}$)				SO_2/SO_3转化率/%
			入口SO_2	入口NO_x	出口NO_x	氨逃逸	
913 000	130	140	≤35	≤400	≤50	≤3	≤1

1.1 烟气系统

烟气系统将活性炭烟气净化系统和低温SCR脱硝系统有序稳定的联系在一起。该系统通过入口烟风门烟道、引风机等设备将经过活性炭脱硫后的烧结烟气引至催化剂反应层，净烟气通过GGH由烟囱排入大气。烟气系统流程如图1所示。

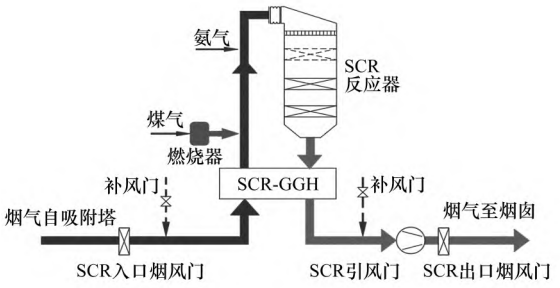


图1 烟气系统流程

Fig. 1 Flow chart of flue gas system

1.2 GGH

通过GGH对进出脱硝系统的原、净烟气进行换热，使脱硝系统需要的热量绝大部分留在脱硝系统内部循环使用，从而降低烟气再热需要的能量，减少加热炉的负荷要求，大大降低脱硝系统的运行费用。本项目采用的是回转式烟气换热器，并配置低泄漏风机，其设计性能参数如表2所示。

表2 GGH设计参数

Table 2 Design parameters of GGH

项目	参数	
	热侧	冷侧
烟气类别	脱硝后净烟气	脱硝前原烟气
烟气流量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	913 000	913 000
进口烟气温度/℃	180	130
出口烟气温度/℃	145	165
漏风率/%	≤1.5	≤1.5

回转式烟气换热器有中心驱动和围带驱动两种形式，基于系统可靠性、维修便利性和启动稳定性3个方面的差异(如表3所示)，本项目采用的为围带驱动方式。

1.3 加热炉

湛江1#、2#烧结机每个脱硝反应器对应设置一个SCR加热炉，加热炉对GGH预热后的脱硫烟气进行升温。加热炉设备主要由热风炉本体、自动点火烧嘴、热风炉主烧嘴和热风炉出口高温烟气分配器组成。加热炉两个燃烧室预留炉膛温度检测、火焰检测接口；热风炉分配室出口预留温度检测、压力检测、可燃物在线检测接口等。加热炉主烧嘴分为内外两个通道，采用分级控制模式，可逐步加大主烧嘴的能力，直至达到正常生产要求。加热炉设计参数如表4所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　GGH 围带驱动和中心驱动差异对比

Table 3　Comparison of differences between GGH shroud drive and center drive

项目	围带驱动	中心驱动
系统可靠性	柔性连接，转子倾斜不会造成停机，驱动系统可以和径向柔性密封很好地结合	受热膨胀和受力变化影响，转子可能会发生倾斜，造成转子倾斜、卡死等现象
维修便利性	驱动装置位于常温区域，维护、巡检更加方便	传动装置位于 GGH 中心位置，温度高，维护、巡检都很困难
启动稳定性	转子驱动装置位于在转子壳板的外侧，力臂大，可以实现直接启动，无需变频	驱动位于换热器上端，启动力矩大，需采用变频器，在高温高灰的情况下易发生故障

表 4　加热炉设计参数

Table 4　Design parameters of heating furnace

项目	加热前	加热后
燃烧室温度/℃	1 100 ± 50	1 100 ± 50
炉膛压力/Pa	0 ~ －1 000	0 ~ －1 000
正常运行温度/℃	165	180
最高加热能力/℃	165	195

1.4　喷氨系统

喷氨系统包括静态混合器和喷射格栅，并经数模计算和流场分析，可保证氨气和烟气混合均匀，达到设定目标（NH_3/NO_x 混合不均匀性不大于 5%）。NH_3/NO_x 混合均匀性按照中华人民共和国电力行业标准——《燃煤电厂 SCR 烟气脱硝流场模拟技术规范》（DL/T 1418—2015）判断与衡量。

项目中氨气通过氨气/空气混合器与稀释风机鼓入的脱硝后净烟气借流体动力原理将二者充分混合，使 NH_3 质量浓度低于爆炸下限，再将混合物导入气氨分配总管内。氨喷射系统包括供应箱、喷氨格栅和喷孔等。喷射系统配有手动调节阀来调节氨的合理分布，在对 NO_x 质量浓度进行连续分析的同时，调节必要的氨量从喷氨格栅中喷出，通过格栅使氨与烟气混合均匀。

喷射系统具有良好的热膨胀性、抗热变形性和和抗振性，喷入反应器烟道的氨气应为空气稀释后的含 5% 左右 NH_3 的混合气体。NH_3 和 NO 的反应摩尔比不大于 1[4]。

1.5　SCR 反应器

SCR 反应器为氨气与 NO_x 反应的主要设备。当氨气和烟气混合进入 SCR 反应器后，在催化剂的作用下，氨气有选择地把烟气中的 NO_x 还原为无毒无污染的氮气和水。

催化还原烟气脱硝过程比较复杂，其涉及到反应器结构的设计，烟气与还原剂在烟道和反应器里面的湍流流动、传热传质、多组分输运、化学反应等过程。本项目在烟道拐角处设置 3 处导流板、在催化剂上部设置整流格栅，并通过建立 4 个仿真模型：① 烟气在烟道内流动的模拟；② 喷氨系统喷出的氨气在烟道内流动混合的模拟；③ 烟道内能量交换温度场的模拟；④ 反应器催化剂床层里发生的化学反应。同时，系统采用 FLUENT 软件对 SCR 脱硝系统进行模拟，使用 k-ε 湍流模型模拟烟气在烟道内的流动；采用多孔介质模型模拟；采用能量方程模拟温度场；采用组分输运模拟多组分的流动和混合；整流格栅采用建立物理模型方法来模拟，以保证催化剂对烟气分布、流向、温度分布等的要求。经优化的脱硝系统的 NH_3 质量分数分布云图、反应器各项流场指标如图 2 和表 5 所示。

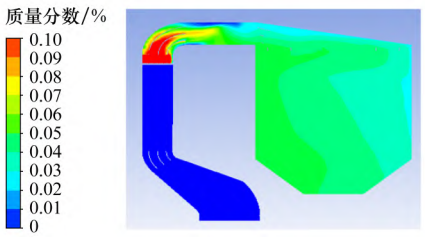


图 2　脱硝系统 NH_3 质量分数分布云图

Fig. 2　NH_3 concentration distribution cloud map of denitration system

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表5 反应器各项流场指标

Table 5 Field indexes of reactor

项目	指标
入口烟气温度偏差/℃	≤10
入口烟气流速相对标准偏差率/%	8.9
入口 NH_3/NO_x 摩尔比相对标准偏差率/%	5
入口烟气夹角/(°)	<10

1.6 催化剂

催化剂的类型分为蜂窝状、样板状、波纹板状等。蜂窝式催化剂属于均质催化剂，适用于灰黏性较小、灰分小于 50 g/m^3 的环境，其催化活性较高，单位体积的蜂窝式催化剂即可达到较高的脱硝率。根据湛江钢铁烧结工序烟气中粉尘质量浓度低、温度低等特性，为了降低投资，提升脱硝效率，项目采用蜂窝式催化剂，催化剂配套耙式吹灰器吹灰。反应器内催化剂按照 2+1 的方式布置，即初次装填 2 层，预留一层加装催化剂的空间。催化剂相关技术参数详见表 6。

表6 催化剂技术参数

Table 6 Technical parameters of catalyst

项目	数值
孔数/个	30
几何比表面积/(m^2·m^{-3})	672
空隙率/%	70.6
密度/(kg·m^{-3})	≈550
每模块的总表面积/m^2	≈1 048
抗压强度/MPa	轴向≥2.0 径向≥0.4
单层的压降/Pa	240
催化剂内线速度/(m·s^{-1})	4.41

2 低温 SCR 烟气脱硝系统调整优化

低温 SCR 烟气脱硝装置投运后，整体运行状况良好，但也存在喷氨系统结晶堵塞及反应器内温度场不均的情况。

2.1 氨稀释系统优化

2.1.1 氨气混合器/稀释器堵塞结晶物

低温 SCR 烟气脱硝装置投运后，发生了氨气混合器、稀释氨末端管道堵塞问题，堵塞物质如图 3 所示。从现场实际来看，堵塞物为白色结晶物且黏度较大。



图3 稀释氨末端管道结晶堵塞

Fig. 3 Crystallization blockage of dilution ammonia at pipe end

为判断结晶物组成，对结晶物进行 XRD 分析，结果如图 4 所示。从图 4 可知，该结晶物，为成分单一的氯化铵。

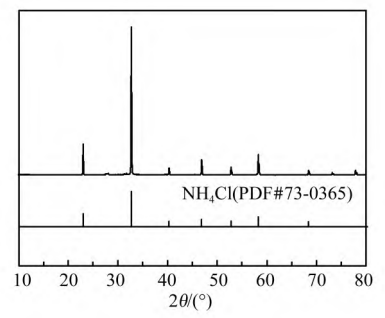


图4 结晶堵塞 XRD 分析

Fig. 4 XRD analysis of crystal blocking

2.1.2 氯化铵结晶反应机理

湛江钢铁烧结用添加水氯离子质量浓度达 500~600 mg/L，烧结原烟气中 HCl 质量浓度约为 50 mg/Nm^3，活性炭烟气净化系统在不喷氨气的情况下优先吸附 SO_2，对 HCl 吸附能力不佳，因此部分 HCl 进入到低温 SCR 系统。脱硝系统在运行过程中会喷入氨气作为还原剂，因此会与 HCl 发生反应生成结晶物。

基于对应态原理计算氯化氢和氨气的逸度系数[5]，并根据化工热力学手册，得到氯化铵结晶反应达到平衡时，温度与气态反应物分压的关系[6-7]：

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$T=\frac{176}{0.2870-0.008314\ln(7.5\times10^{-5}\cdot p_{HCl}\cdot p_{NH_3})} \quad (1)$$

式中：p_{HCL}为 HCl 气体分压，kPa；p_{NH_3}为 NH_3 气体分压，kPa。

根据式(1)计算，在 HCl 质量浓度为 20 mg/Nm^3、NH_3 质量浓度为 130 mg/Nm^3 条件下，NH_4Cl 结晶温度为 113 ℃，低温脱硝烟气系统高于结晶温度，不存在腐蚀结晶问题。若 HCl 质量浓度为 20 mg/Nm^3，而氨气混合器中氨气的质量浓度控制在 3% 左右，此时 NH_4Cl 结晶温度为 156 ℃，稀释空气温度在 150 ℃左右，故在氨气混匀器和稀释氨管道中会有大量 NH_4Cl 生成。

鉴于上述问题，湛江钢铁在活性炭入口加入少量氨气，同时采用电加热方式提高氨气混合器用稀释空气，从源头上彻底解决 NH_4Cl 生成、结晶问题。

2.2　加热炉优化

SCR 反应器截面为 13.77 m×11.96 m，面积很大，加热炉对烟气温度均匀性非常重要，温度均匀即是高脱硝率的必备条件，也是节能降耗的重要基础。湛江钢铁烧结机低温 SCR 烟气脱硝装置投运后，反应器内高温点(T_1、T_6)与低温点(T_3、T_4)温差约 20 ℃(图 5)，其主要原因为 SCR 热风炉的热风分布不均匀。煤气在加热炉内燃烧产生的约 1 000 ℃的高温烟气，通过 5 个高温分配管输送到烟道内，由于两侧的分配管为炉子的顶部出风，高温热风通道比较通畅，高温热风比中间多，所以反应器内温度均匀性不足。针对这个问题，本项目通过对两侧的高温分配管进行部分封堵，将高温热风多分流到中间的 3 个热风通道，以平衡反应器内各区间的温度，保证反应器内温度相差在 10 ℃以内。

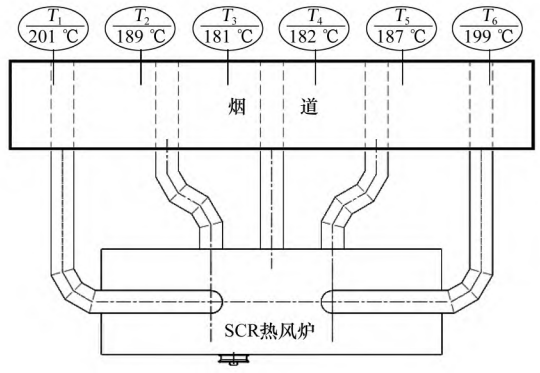


图 5　反应器内烟气温度分布

Fig. 5　Temperature distribution of flue gas in reactor

3　低温 SCR 烟气脱硝系统运行效果

3.1　烟气污染物排放实绩

湛江钢铁 1#、2#烧结机低温 SCR 脱硝系统于 2021 年 2 月正式投产，经过生产技术摸索与攻关，运行逐步稳定，2021 年 1～6 月份 1#、2#烧结机烟气 NO_x 排放质量浓度如表 7 所示。

表 7　2021 年 1#、2#烧结机烟气主要污染物排放质量浓度

Table 7　Emission mass concentration of major pollutants from flue gas of 1# and 2# sintering machine in 2021　　mg/Nm^3

烧结机	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
1#	135	36.6	24.8	30.8	26.9	25.4
2#	140	39.6	34.9	34.9	36.1	30.1

由表 7 可知，2021 年 1 月两套系统出口 NO_x 质量浓度低于 150 mg/Nm^3，SCR 系统投运后，出口 NO_x 质量浓度均控制在 50 mg/Nm^3 以下。

3.2　能源介质消耗实绩

湛江钢铁 1#、2#烧结机低温 SCR 烟气脱硝系统投入运行后，NO_x 排放值远低于超低排放标准(50 mg/m^3)，控制在 30 mg/Nm^3 左右，氨气消耗较活性炭吸附塔喷氨显著降低，利用效率明显提升；同时，脱硝系统各类能源介质消耗也全面达到设计值(表 8)，为烧结工序低成本生产创造了条件。

表 8　吨烧结矿能源介质消耗

Table 8　Energy medium consumption performance of sinter perton

项目	压缩氮气/m^3	压缩空气/m^3	电耗/(kW·h)	COG/m^3	氨气/kg
设计值	2.68	1.88	3.7	3.67	0.31
实际值	1.80	1.19	3.3	3.50	0.22

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 结 论

烧结工序作为钢铁企业生产的重要工序，是钢铁企业成本控制、环保的重中之重，直接关系企业的生存发展。湛江钢铁1#、2#烧结机采用“活性炭+低温SCR”烟气脱硫脱硝协同处理工艺，在达到超低排放标准、各项能源介质消耗达到设计值的同时，充分证明该工艺高度环保、集成净化、资源回收、适应面广和运行稳定等特点，为烧结工序烟气超低排放改造提供了成功范例。

参考文献:

[1] 冀岗，董卫杰，李强，等. 太钢烧结烟气氮氧化物超低排放技术研究[J]. 烧结球团，2018，43(2)：67－71.
JI Gang，DONG Weijie，LI Qiang，et al. Study on ultra-low emission technology of NO_x in Taigang sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(2) 67－71.

[2] 赵利明，陈海波. SCR烟气脱硝技术在宝钢股份4#烧结机的应用[J]. 烧结球团，2017，43(6)：24－28.
ZHAO Liming，CHEN Haibo. Application of SCR flue gas denitrification technology in No. 4 sinter machine of Baosteel Co.，Ltd.[J]. Sintering and Pelletizing，2017，43(6)：24－28.

[3] 王殿二，李国波，李超，等. 商业V_2O_5-WO_3/TiO_2催化剂重金属(Pb、Cu、Zn)中毒机理研究[J]. 分子催化，2019，33(6)：508－522.
WANG Dianer，LI Guobo，LI Chao，at el. Commercial V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalysts for heavy metal(Pb，Cu，Zn) poisoning mechanism[J]. Journal of Molecular Catalysis(China)，2019，33(6)：508－522.

[4] 赵利明，向家发，杨鸣. 活性炭烟气净化技术在宝钢股份宝山基地3#烧结机的应用[J]. 烧结球团，2017，42(6)：5－9.
ZHAO Liming，XIANG Jiafa，YANG Ming. Application of activated carbon flue gas purification technology in 3# sintering machineof Baoshan base of Baosteel[J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(6)：5－9.

[5] 金浩哲，偶国富，王宽心，等. 加氢处理系统NH_4Cl结晶沉积预测及优化防控[J]. 石油学报(石油加工)，2014，30(4)：662－667.
JIN Haozhe，OU Guofu，WANG Kuanxin，et al. Prediction of NH_4Cl crystalline deposition and optimized prevention method in hydrotreating unit system[J]. Acta PeroleiSinica(Petroleum processing Section)，2014，30(4)：662－667.

[6] American Petroleum Institute. Design，materials，fabrication，operation，and inspection guidelines for corrosion control in hydroprocessing reactor effluent air cooler(REAC) systems[M]. US: API Publication，2004: 11－27.

[7] 董锐锋，吴文龙，王锋涛，等. 燃煤电厂超低排放改造后烟道氯化铵结晶原因分析及对策[J]. 热力发电，2018，47(3)：128－134.
DONG Ruifeng，WU Wenlong，WANG Fengtao，et al. Reason analysis and countermeasures of ammonium chloride crystallization in the flue system of coal-fired power plants after ultra-low emission transformation[J]. Thermal Power Generation，2018，47(3)：128－134.

(上接第58页)

XIA Leige，SU Buxin，LI Xinyu，et al. Relationship of firing temperature to pellet strength and reducibility[J]. Sintering and Pelletizing，2014，39(1)：21－24.

[10] 刘丕亮，臧日浩，崔桂梅，等. 带式焙烧机焙烧温度分析研究[J]. 烧结球团，2018，43(2)：29－32.
LIU Piliang，ZANG Rihao，CUI Guimei，et al. Analysis and research on roasting temperature of travelling grate[J]. Sintering and pelletizing，2018，43(2)：29－32.

[11] 张一敏. 球团理论与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社，2004: 113.
ZHANG Yimin. Pellet theory and technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press，2004: 113.

[12] 王冬青，青格勒，潘文，等. w(CaO)对球团矿高温液相生成的热力学分析[J]. 烧结球团，2020，45(1)：29－34.
WANG Dongqing，QING Gele，PAN Wen，et al. Thermomechanical analysis of w(CaO) on the formation of high temperature liquid phase of pellets[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(1)：29－34.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net