烧结烟气低温SCR脱硝催化剂的制备及试验研究

梁 磊
(江苏新中金环保科技股份有限公司,江苏 宜兴 214200)

摘要: 为探索烧结烟气低温SCR脱硝催化剂的使用性能,制备了一种低温脱硝催化剂,在烧结厂区构建SCR脱硝试验装置,优化研究温度、NH_3/NO_x摩尔比与脱硝效率的关系,220 ℃及200 ℃连续运行及再生状况。结果表明:在200~350 ℃,脱硝效率达90.2%~93.6%,且随温度升高而升高,NO_x满足超低排放要求;脱硝效率随NH_3/NO_x摩尔比增大而增大,适宜NH_3/NO_x摩尔比为1.0;220 ℃脱硝系统连续稳定运行,350 ℃在线再生恢复催化剂性能,再生周期为6 000 h,再生时长为150 min;200 ℃脱硝系统连续运行1 200 h,催化剂严重堵塞,350 ℃再生不能恢复性能。通过成分分析,推断堵塞物形成机理为:原烟气SO_x与还原剂NH_3易形成NH_4HSO_4包裹体,包裹体内含有350 ℃不能分解的炭粉和硫酸铁盐类物质。低温脱硝催化剂应用于工业实践的适宜温度应为220 ℃,若要实现200 ℃低温脱硝,应消除脱硝前烟气中的SO_x。

关键词: 低温脱硝; 催化剂; SCR脱硝; 超低排放; NH_3/NO_x摩尔比; 在线再生; NH_4HSO_4; SO_x
中图分类号: X701 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2021)03-0086-07
doi: 10.13403/j.sjqt.2021.03.044

Preparation and experimental research on low temperature SCR denitration catalyst for sintering flue gas

LIANG Lei
(*Jiangsu Xinzhongjin Environmental Protection Technology Co.,Ltd.,Yixing* 214200,*Jiangsu*,*China*)

Abstract: In order to explore the performance of low temperature SCR denitration catalyst for sintering flue gas, a low-temperature denitration catalyst is prepared. The SCR denitration test device is constructed in the sintering plant to optimize the research on the relationship between temperature, NH_3/NO_x molar ratio and denitration efficiency, as well as the continuous operation and regeneration status under the condition of 220 ℃ and 200 ℃. The results show that the denitration efficiency reaches 90.2%~93.6% at 200~350 ℃, and the NO_x meets the ultra-low emission requirement with the increase of temperature. The denitration efficiency increases with the increase of the NH_3/NO_x molar ratio, the suitable NH_3/NO_x molar ratio is 1.0. The denitration system operates continuously and keeps stably at 220 ℃, and the catalyst performance is regenerated online at 350 ℃. The regeneration cycle is 6 000 h, and the regeneration time is 150 min. The denitration system has continuously operated for 1 200 h at 200 ℃, the catalyst is seriously blocked, and the regeneration could not restore its performance at 350 ℃. Through the composition analysis, it is inferred that the formation mechanism of the obstruction is that: the inclusions of NH_4HSO_4 can be easily formed by the original flue gas SO_x reacting with the reducing agent NH_3, and the inclusions contain charcoal powder and ferric salts that could not be decomposed at 350 ℃. Low temperature denitration catalyst is used in industrial practice, the appropriate temperature should be 220 ℃. To achieve low-temperature denitration at 200 ℃, SO_x in the flue gas should be eliminated before denitration.

Key words: low temperature denitration; catalyst; SCR denitration; ultra-low emissions; NH_3/NO_x molar ratio; online regeneration; NH_4HSO_4; SO_x

收稿日期: 2020-08-14; **修回日期:** 2020-11-20
基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20181023)
作者简介: 梁 磊(1984—),男,高级工程师,硕士生导师,从事环境工程教学及烟气脱硫、脱硝工程设计、新技术研发方面的工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2019 年 4 月 28 日，国家五部委联合发布《关于推进钢铁行业超低排放的意见》，提出烧结烟气 NO_x 排放质量浓度小时均值需达到 50 mg/Nm^3（标态干基、基准氧体积分数 16% 的折算值，其余同）以下。现阶段，部分企业烧结烟气 NO_x 超低排放治理选用了低温选择性催化还原法（SCR）。烟气中的 SO_2、SO_3 会与脱硝还原剂 NH_3 发生化学反应，生成 $(NH_4)_2SO_4$ 和 NH_4HSO_4 等物质，易黏附积累，堵塞催化剂床层通道及活性位点，先脱硫后脱硝的工艺技术路线行业内已经达成共识[1-2]。目前，应用于烧结烟气脱硫技术主要有干法、半干法和湿法 3 类[3-6]，脱硫后烟气温度均有不同程度的降低。工业实际应用中，通过燃烧焦炉煤气或高炉煤气加热升温脱硫后的烟气，为后续低温 SCR 脱硝提供温度条件。火电机组烟气 NO_x 治理的脱硝催化剂，在 320～400 ℃的温度条件下，显示出较好的脱硝活性，其工程应用最为普遍[7-9]。烧结烟气排烟温度较低，多为 90～160 ℃，加热至 320～400 ℃下进行脱硝，煤气消耗量较大，运行成本较高，技术难以直接移植。开发低温条件下能够长期、高效、稳定运行的脱硝催化剂，降低脱硝系统的能源消耗，已成为近年来研究的热题[10-11]。本文中将制备一种蜂窝式低温脱硝催化剂，在厂区烧结烟气活性焦脱硫装置后，构建 SCR 脱硝试验装置，研究低温条件下催化剂的脱硝性能，以期为未来低温 SCR 脱硝催化剂的研发及工程实际应用提供参考。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验首先称取 WO_3、TiO_2、Ti_2O_3、V_2O_3、Na_2WO_4、Ce_2O_3，质量比为 12∶18∶20∶8∶3∶20，经球磨机研磨成 50 μm 左右的混合粉末；再在混合粉末中加入 2 倍质量的 C_2H_6OS 和 3 倍质量的 H_2O，搅拌溶解，在 100 ℃超声条件下反应 3 h 后，超声条件下减压浓缩去除 C_2H_6OS 和 H_2O，得到坯料；最后坯料经挤出机挤出蜂窝式催化剂模块，用适量 $C_5H_{12}O$ 洗涤后，依次经过 100 ℃、5 h 干燥，300 ℃、3 h 煅烧及 500 ℃、5 h 煅烧，得到蜂窝式催化剂模块成品。成品性能参数如表 1 所示。由表 1 可知：催化剂孔数为 35×35，孔隙率为 72.14%，几何比表面积为 791 m^2/m^3。催化剂孔数多，比表面积大。

表 1　催化剂性能参数

Table 1　Catalyst performance parameters

模块尺寸/mm	单体尺寸/mm	孔数/个	孔隙率/%	几何比表面积/(m^2·m^{-3})	节距/mm	壁厚/mm
1910×970×962	150×150×962	35×35	72.14	791	4.2	0.6

1.2　试验装置

低温 SCR 脱硝试验装置如图 1 所示。该装置主要包括进出口烟道、喷氨系统、天然气加热系统、反应器、引风机、烟囱及配套管道、阀门、仪表等。反应器尺寸为 2 m（长）×1 m（宽）×8 m（高），上部设整流装置，烟气强制分流。下部装填两层催化剂，催化剂上方均设声波吹灰器，定时吹灰每周一次。上层催化剂上方设温度测点，每层催化剂均设压差测点。压力约 0.4 MPa 的纯氨气来自厂区母管，与稀释风机送来的空气在混合器中配置成体积分数约为 5% 的氨气，经喷氨格栅与烟气均匀匹配。氨气管道上设切断阀、调节阀和单向阀，稀释风机管道上设调节阀，均配有压力、温度、流量测点。喷氨格栅上部为烧嘴，加热进入反应器的烟气，燃料为天然气，来自厂区母管，管道上设切断阀、调节阀和单向阀，配有压力、温度、流量测点。反应器进、出口烟道均设 SO_2、NO_x、颗粒物、温度、压力、流量、H_2O、O_2 在线监测，进口烟道设有备用监测口，出口烟道设有氨分析仪。活性焦脱硫后的烧结烟气，与喷氨格栅喷出的 NH_3 混合，经烧嘴加热后，进入反应器，在催化剂的作用下完成脱硝反应，脱硝后烟气由引风机送烟囱排放。引风机为离心式，风量 18 000 m^3/h，全压 3 kPa。试验条件下，烧结烟气颗粒物、SO_2 和 NO_x 质量浓度分别为 5、10 及 400 mg/Nm^3 以下，O_2 体积分数为 15%～18%，温度约为 120 ℃，湿度为

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

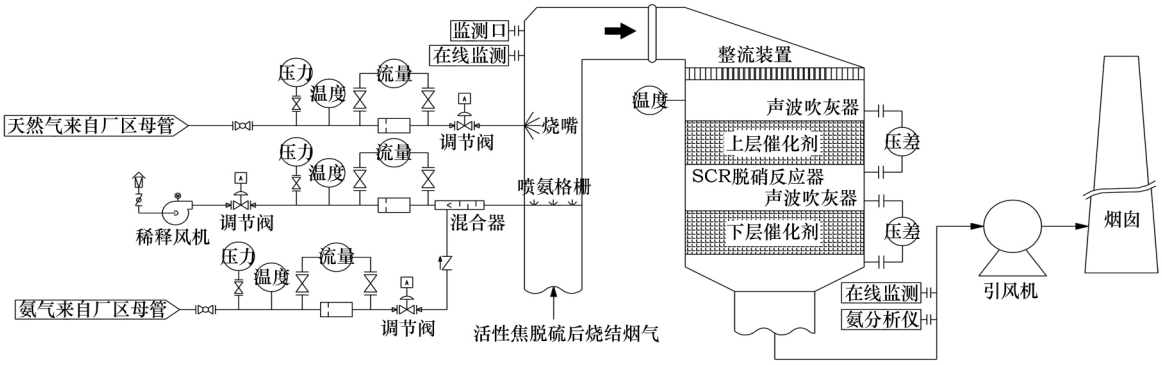


图1 低温SCR脱硝试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of low temperature SCR denitration test device

10%~13%，空塔烟气流速约为2.5 m/s。

1.3 试验方法

(1) 加热升温反应器内烟气到一定温度，以NO_x质量浓度为400 mg/Nm^3，NH_3/NO_x摩尔比为1计算调整喷氨量，稳定运行30 min后，定时读取进、出口NO_x和出口逃逸NH_3质量浓度，计算脱硝效率，得到温度与脱硝效率的关系；调整喷氨量，得到NH_3/NO_x摩尔比与脱硝效率的关系。试验分3次进行，测得数据取平均值。

(2) 加热升温反应器内烟气到220 ℃和200 ℃，以NO_x质量浓度为400 mg/Nm^3，NH_3/NO_x摩尔比为1计算调整喷氨量，待出口NO_x质量浓度降低到一定数值稳定后计时，读取上下层催化剂压差、(进、出)口NO_x和出口逃逸NH_3质量浓度，得到220 ℃和200 ℃连续运行试验曲线。

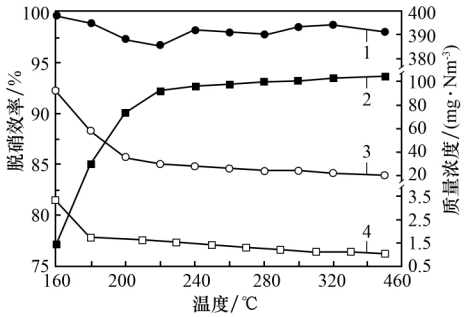
(3) 在220 ℃和200 ℃运行试验结束后，加热升温反应器内烟气至350 ℃，读取上、下层催化剂压差、(进、出)口NO_x和出口逃逸NH_3质量浓度，分别得到220 ℃和200 ℃运行后催化剂再生试验曲线。

2 结果与讨论

2.1 温度与脱硝效率的关系

在上述试验条件下，温度与脱硝效率的关系如图2所示。

由图2可知：脱硝效率随温度升高而增加，温度越低，催化剂活性越弱，还原剂NH_3的利用率越低。当空速为2 880 h^{-1}、NH_3/NO_x摩尔比为1、反应温度为160~180 ℃时，进口NO_x质量浓度为395~398 mg/Nm^3，出口NO_x和逃逸NH_3质量浓度分别降低至59~91、0.9~3.3 mg/Nm^3，脱硝效率达到77.1%~85.1%；当温度为160 ℃时，出口逃逸NH_3质量浓度为3.3 mg/Nm^3，高于《火电厂烟气脱硝工程技术规范-选择性催化还原法》HJ562—2010中规定最大允许值2.5 mg/Nm^{3}的排放标准；当温度为200~350 ℃时，脱硝效率增加幅度减缓，逐渐趋于稳定，进口NO_x质量浓度为385~394 mg/Nm^3，出口NO_x质量浓度降低至25~38 mg/Nm^3，脱硝效率达90.2%~93.6%，满足超低排放要求；出口逃逸NH_3质量浓度为1.0~1.7 mg/Nm^3，随温度升高而升高，低于2.5 mg/Nm^{3}的排放要求，满足NO_x和逃逸NH_3达标排放要求。可见，最大程度地降低烟气脱硝



1—进口NO_x质量浓度；2—脱硝效率；3—出口NO_x质量浓度；4—逃逸NH_3质量浓度。

图2 温度与脱硝效率的关系

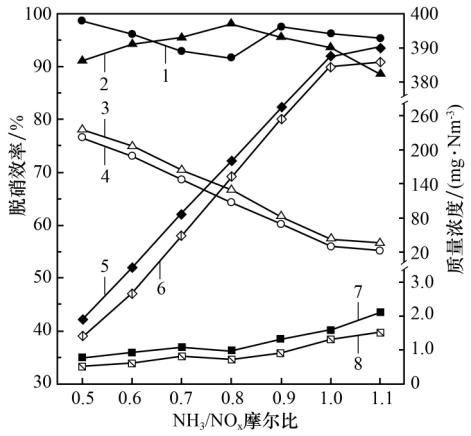
Fig. 2 Relationship between temperature and denitration efficiency

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

温度，减少烟气加热使用燃料成本，具有重大经济意义，以下试验无特殊说明，均在 220 ℃和 200 ℃时进行。

2.2　NH_3/NO_x 摩尔比与脱硝效率的关系

喷入脱硝系统还原剂 NH_3 摩尔数与烟气中 NO_x 摩尔数的比值，称为 NH_3/NO_x 摩尔比。试验条件下，NH_3/NO_x 摩尔比与脱硝效率的关系如图 3 所示。



1—220 ℃时进口 NO_x 质量浓度；2—200 ℃时进口 NO_x 质量浓度；3—200 ℃时出口 NO_x 质量浓度；4—220 ℃时出口 NO_x 质量浓度；5—220 ℃时脱硝效率；6—200 ℃时脱硝效率；7—200 ℃时逃逸 NH_3 质量浓度；8—220 ℃时逃逸 NH_3 质量浓度。

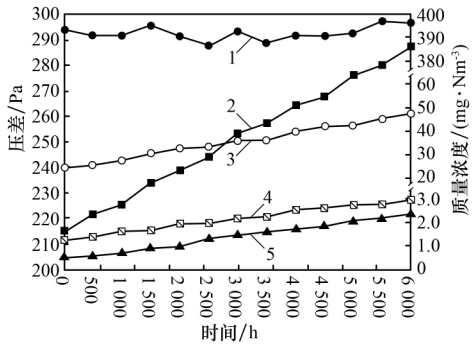
图 3　NH_3/NO_x 摩尔比与脱硝效率的关系

Fig. 3　Relationship between NH_3/NO_x molar ratio and denitration efficiency

由图 3 可知：当反应温度为 220 ℃和 200 ℃时，脱硝效率均随 NH_3/NO_x 摩尔比的增大而升高。当 NH_3/NO_x 摩尔比为 0.5 ~ 1.0 时，两种温度下脱硝效率随 NH_3/NO_x 摩尔比增加幅度较明显；当 NH_3/NO_x 摩尔比为 1.0 时，出口 NO_x 质量浓度均降低至 50 mg/Nm³ 以下，满足超低排放要求；当 NH_3/NO_x 摩尔比为 1.0 ~ 1.1 时，两种温度下的脱硝效率随 NH_3/NO_x 摩尔比增大幅度大大减缓；当 NH_3/NO_x 摩尔比为0.5 ~ 1.1 时，两种温度下出口逃逸 NH_3 质量浓度分别为 0.7 ~ 2.1、0.5 ~ 1.5 mg/Nm³，均低于 2.5 mg/Nm³ 的排放标准；当 NH_3/NO_x 摩尔比相同时，220 ℃时脱硝效率高于 200 ℃时的脱硝效率，高温有利于提高还原剂 NH_3 的利用率，220 ℃时逃逸 NH_3 质量浓度低于 200 ℃时逃逸 NH_3 质量浓度。可见，NH_3/NO_x 摩尔比越大，脱硝效率越高，还原剂 NH_3 的用量越多，反之则用量越少。为了满足 NO_x 和逃逸 NH_3 达标排放，合适的 NH_3/NO_x 摩尔比对脱硝系统的经济运行具有重要意义，以下试验如无特殊说明，NH_3/NO_x 摩尔比取 1.0。

2.3　220 ℃运行及再生试验

220 ℃运行试验曲线如图 4 所示。由图 4 可知：出口 NO_x 和逃逸 NH_3 质量浓度、上层和下层催化剂压差均随运行时间的延长而上升。在运行0 ~ 6 000 h 时，进口 NO_x 质量浓度为 388 ~ 397 mg/Nm³，出口 NO_x 质量浓度为 25 ~ 48 mg/Nm³，满足超低排放要求，出口逃逸 NH_3 质量浓度为 0.6 ~ 2.4 mg/Nm³，小于 2.5 mg/Nm³ 排放标准，上层和下层催化剂压差分别从 214、212 Pa 增加到 288、228 Pa，上层催化剂压差增加速度明显大于下层；在运行 6 000 h 时，出口 NO_x 和逃逸 NH_3 质量浓度均已接近排放标准，催化剂需要再生恢复脱硝活性。脱硝系统 220 ℃ 连续运行时，催化剂再生周期适宜控制在 6 000 h 以内。



1—进口 NO_x 质量浓度；2—上层催化剂压差；3—出口 NO_x 质量浓度；4—下层催化剂压差；5—出口逃逸 NH_3 质量浓度。

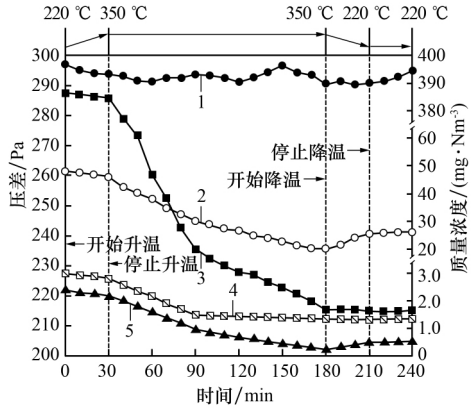
图 4　220 ℃运行试验曲线

Fig. 4　220 ℃ operation test curve

220 ℃连续运行 6 000 h 后催化剂再生试验曲线如图 5 所示。由图 5 可知：试验在 220 ℃升温、350 ℃再生及再生后降温至 220 ℃期间，进口 NO_x 质量浓度为 389 ~ 397 mg/Nm³，出口 NO_x 质量浓度为 21 ~ 48 mg/Nm³，满足超低排放要求；出口逃逸 NH_3 质量浓度为 0.3 ~ 2.4 mg/Nm³，小于 2.5 mg/Nm³ 排放标准；上、下层催

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

化剂压差分别从288、228 Pa下降到214、212 Pa；在350 ℃再生前期(30～90 min)，热烟气与$(NH_4)_2SO_4$和NH_4HSO_4传热面积大，热分解速率较快，出口NO_x和逃逸NH_3质量浓度、上层和下层催化剂压差均下降较快，再生后期，残余$(NH_4)_2SO_4$和NH_4HSO_4较多处于催化剂微孔通道底部，热分解速率减缓，出口NO_x和逃逸NH_3质量浓度、上层和下层催化剂压差下降趋势均大大减缓；催化剂经过350 ℃连续150 min高温在线再生，各项性能基本恢复至初始阶段。



1—进口NO_x质量浓度；2—出口NO_x质量浓度；3—上层催化剂压差；4—下层催化剂压差；5—出口逃逸NH_3质量浓度。

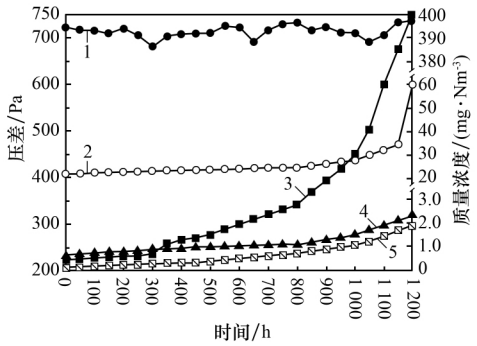
图5 220 ℃运行后再生试验曲线

Fig. 5 Regeneration test curve after operation at 220 ℃

2.4 200 ℃运行及再生试验

200 ℃连续运行试验曲线见图6。由图6可知：出口NO_x和逃逸NH_3质量浓度、上层和下层催化剂压差均随运行时间的延长而上升，前期阶段上升速度均缓慢，后期阶段上升速度均较快。在运行0～1 150 h时，进口NO_x质量浓度为386～397 mg/Nm³，出口NO_x质量浓度为25～49 mg/Nm³，满足超低排放要求；在运行1 200 h时，出口NO_x质量浓度为99 mg/Nm³，大于超低排放要求；在运行0～1 200 h时，出口逃逸NH_3质量浓度为0.6～2.3 mg/Nm³，后期已经接近2.5 mg/Nm³排放标准，上、下层催化剂压差分别从214、212 Pa增加到749、299 Pa，上层催化剂压差增加速度明显。随后进行了催化剂再生试验，结果如图7所示。

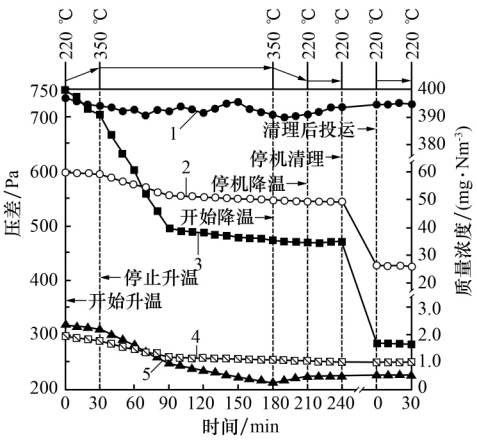
由图7可知：试验在220 ℃升温、350 ℃再生及再生后降温至220 ℃期间，进口NO_x质量浓度为390～397 mg/Nm³，出口NO_x质量浓度为78～99 mg/Nm³，高于超低排放要求，出口逃逸NH_3质量浓度为0.2～2.4 mg/Nm³，小于2.5 mg/Nm³排放标准，上、下层催化剂压差分别从749、299 Pa下降到472、250 Pa；催化剂经过350 ℃连续150 min高温在线再生，各项性能不能恢复。再生结束后停机检修，发现上层催化剂上表面覆盖了大量片状和颗粒状黑色物质，催化剂床层通道堵塞严重(图8)，下层催化剂没有明显堵塞现象。清扫催化剂上表面堵塞物，用负压为80～100 MPa的真空吸尘器对催化剂上表面进行全面吸尘后投入运行，进口NO_x质量浓度为394～396 mg/Nm³，出口NO_x



1—进口NO_x质量浓度；2—出口NO_x质量浓度；3—上层催化剂压差；4—出口逃逸NH_3质量浓度；5—下层催化剂压差。

图6 200 ℃运行试验

Fig. 6 Test run at 200 ℃



1—进口NO_x质量浓度；2—出口NO_x质量浓度；3—上层催化剂压差；4—下层催化剂压差；5—出口逃逸NH_3质量浓度。

图7 200 ℃运行后再生试验

Fig. 7 Regeneration test after operation at 200 ℃

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

质量浓度为 31 ~ 32 mg/Nm^3，满足超低排放要求，出口逃逸 NH_3 质量浓度为0.5 mg/Nm^3，小于 2.5 mg/Nm^3 排放标准，上层催化剂压差从 472 Pa 下降到 298 Pa，下层催化剂压差仍稳定在 250 Pa 左右，催化剂性能劣于初始阶段。



图 8　上层催化剂表层堵塞照片

Fig. 8　Photo of upper catalyst surface blocking

2.5　堵塞物成分检测及形成机理

取样清理后的堵塞物，检测灰分、挥发分和固定碳含量，用 X 射线荧光光谱分析灰分元素成分，结果见表 2、3。由表 2、3 可知：堵塞物固定碳质量分数高达 92.72%，为活性焦脱硫过程中随烟气带来的细小炭粉颗粒。X 射线荧光光谱分析表明：Fe_2O_3 与 SO_3 质量分数分别达到 54%、39.5%，表明 Fe 和 S 元素占比很高，应为硫酸铁盐类物质，其它元素占比均较低。

表 2　堵塞物检测结果(质量分数)

Table 2　Blockage test results　%

灰分	挥发分	固定碳
2.81	4.47	92.72

表 3　堵塞物灰分元素

Table 3　Elements of blockage ash

Fe_2O_3	SO_3	TiO_2	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	MnO	Cl	K_2O	CeO_2	P_2O_5	Cr_2O_3
54	39.5	1.78	1.02	0.91	0.34	0.33	0.18	0.09	0.08	0.07	0.03	0.09

结合检测结果，推测形成此堵塞物的原因主要为烟气中的 SO_2、SO_3 会与脱硝还原剂 NH_3 发生化学反应，生成 $(NH_4)_2SO_4$ 和 NH_4HSO_4 等，$(NH_4)_2SO_4$ 为干燥固体粉末，可以被声波吹灰器去除，对催化剂影响很小[13]。监测口抽样检测烟气中 SO_3 质量浓度达 17.3 mg/Nm^3，与还原剂 NH_3 反应生成 NH_4HSO_4，NH_4HSO_4 熔点为 147 ℃，200 ℃以液滴形式分散在烟气中，NH_4HSO_4 黏性强、易潮解、与烟气中的水结合，电离出 H^+ 和 SO_4^{2-}，液滴呈强酸性[14]。液滴易粘附烟气中的炭粉、粉尘及烟道、反应器内表面铁锈形成包裹体，包裹体内，NH_4HSO_4 与金属氧化物反应形成金属硫酸盐。包裹体被拦截并黏附在催化剂上，随运行时间延长，积累聚集，堵塞催化剂床层孔道，引起催化剂层压差增大。包裹体主要为 NH_4HSO_4、$(NH_4)_2SO_4$、炭粉、粉尘及金属硫酸盐等[15]，经 350 ℃高温再生后，NH_4HSO_4 和 $(NH_4)_2SO_4$ 分解为气态物质随烟气流出，剩余物质主要为不能分解的炭粉、金属硫酸盐及粉尘。

比较 220 ℃连续运行 6 000 h 和 200 ℃连续运行 1 200 h，上层催化剂层压差、出口 NO_x 质量浓度，前者变化幅度明显低于后者。在 220 ℃时，SO_2、SO_3 与 NH_3 反应主要生成 $(NH_4)_2SO_4$，350 ℃高温分解后，催化剂性能恢复；在 200 ℃时 SO_2、SO_3 与 NH_3 反应主要生成 NH_4HSO_4[16]，形成包裹体，黏附在催化剂上，堵塞烟气孔道，350 ℃高温再生后，包裹体内不易分解的物质对催化剂仍有很大影响，催化剂性能不能恢复，清除催化剂表面堵塞物并吸尘后，性能劣于初始阶段，说明部分物质深入催化剂微孔内部，堵塞了部分微孔通道和活性点位。

3　结　论

(1) 低温脱硝催化剂在 220 ~ 350 ℃范围内，NO_x 能够满足超低排放标准，脱硝反应温度窗口宽。

(2) 脱硝系统在 220 ℃下连续稳定运行，350 ℃时能够在线再生恢复催化剂性能，再生周期为 6 000 h，再生时长为 150 min。

(3) 脱硝系统在 200 ℃下连续运行 1 200 h，催化剂严重堵塞，350 ℃再生不能恢复性能。脱硝前烟气中的 SO_x 是产生问题的根源，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

若要实现在200 ℃下，脱硝系统长期、高效、稳定运行，SO_x的消除应为必要条件。

参考文献:

[1] WU X,YU W,SI Z C,et al. Chemical deactivation of V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalyst by combined effect of potassium and chloride,frontiers of environmental [J]. Science and Engineering,2013(7):420-427.

[2] 兰国谦,刘建秋,张江伟. 钢铁行业烧结烟气脱硫技术现状和发展趋势 [J]. 中国环保产业,2014(6):42-46.
LAN Guoqian,LIU Jianqiu,ZHANG Jiangwei. Status of sintering FGD technology and development trend [J]. China Environmental Protection Industry,2014(6):42-46.

[3] 丁志伟,万利远,张奇,等. 烧结活性焦烟气净化工艺烟气温度控制的探究 [J]. 矿业工程,2016,14(1):48-50.
DING Zhiwei,WAN Liyuan,ZHANG Qi,et al. The study on the flue gas tenperature control in flue gas purification process by active coke in for sintering [J]. Mining Engineering,2016,14(1):48-50.

[4] 涂瑞,李强,葛帅华. 太钢烧结烟气脱硫富集SO_2烟气制酸装置的设计与运行 [J]. 硫酸工业,2012(2):26-30.
TU Rui,LI Qiang,Ge Shuaihua. Design and operation of taiyuan Iron & steel's sulphuric acid plant based on SO_2 from desulphurization and enrichment of sintering off-gas [J]. Sulphuric Acid Industry,2012(2):26-30.

[5] 李强,杨晓岗. 半干法烧结烟气脱硫工艺技术分析 [J]. 山西冶金,2008,31(5):1-4.
LI Qiang,YANG Xiaogang. Analysis of semi-dry desulphurization process of sinter fuel gas [J]. Shanxi Metallurgy,2008,31(5):1-4.

[6] 梁磊. 电石渣-石膏湿法烟气脱硫工艺技术研究 [J]. 中国电力,2016,49(6):166-169.
LIANG Lei. Study on carbide slag-gypsum wet flue gas desulfurization process technology [J]. China Electric Power,2016,49(6):166-169.

[7] 梁磊. 2×75 t/h 煤粉锅炉烟气SNCR+SCR混合脱硝工艺设计及应用 [J]. 东北电力技术,2016,37(1):30-33.
LIANG Lei. Design and application of 2×75 t/h pulverized coal boiler flue gas SNCR+SCR mixed denitration technolog [J]. North East Electric Power Technology,2016,37(1):30-33.

[8] 沈艳梅,魏书洲,崔智勇. 造成SCR脱硝催化剂失活的关键物质及预防 [J]. 中国电力,2016,49(4):1-5.
SHEN Yanmei,WEI Shuzhou,CUI Zhiyong. The key substances causing SCR denitration catalyst deactivation and the preventive measures [J]. China Electric Power,2016,49(4):1-5.

[9] 仲兆平,黄金,朱林. 一种中低温SCR脱硝催化剂及其制备方法:201810028858.7 [P]. 2018-07-06.
ZHONG Zhaoping,HUANG Jin,ZHU Lin. Catalyst and preparation method for medium and low temperature SCR denitration:201810028858.7 [P]. 2018-07-06.

[10] YU W C,WU X D,SI Z C,et al. Influences of impregnation procedure on the SCR activity and alkali resistance of V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalyst [J]. Applied Surface Science,2013,283:209-214.

[11] FANG D,HE F,XIE J L,et al. Effects of atmospheres and precursors on MnO_x/TiO_2 catalysts for NH_3-SCR at low temperature [J]. Chen Sci Ed,2013,28(5):888-892.

[12] 吴彦霞,梁海龙,赵春林,等. 载体对Mn-Ce催化剂低温选择性催化还原脱硝性能的影响 [J]. 石油炼制与化工,2019,50(4):44-48.
WU Yanxia,LIANG Hailong,ZHAO Chunlin,et al. Effect of support on low temperature denittrification performance of Mn-Ce catalysts [J]. Etroleum Processing and Petrochemicals,2019,50(4):44-48.

[13] 马双忱,金鑫,孙云雪. SCR烟气脱硝过程中硫酸氢氨的生成机理与控制 [J]. 热力发电,2010,39(8):12-16.
MA Shuangchen,JIN Xin,SUN Yunxue,et al. The formation mechanism of ammonium bisulfate in SCR flue gas denitrification process and control thereof [J]. Thermal Power Generation,2010,39(8):12-16.

[14] 殷海波,李洋,王述银. 粉煤灰中残留氨含量对混凝土性能影响 [J]. 水力发电,2019,49(5):118-122.
YIN Haibo,LI Yang,WANG Shuyin,et al. Effect of residual ammonia content in fly ash on concrete performance [J]. Water Power,2019,49(5):118-122.

[15] 胡增旗,王磊. SCR脱硝技术导致空预器堵灰的分析与处理 [J]. 科技与创新,2014(6):59-62.
HU Zengqi,WANG Lei. SCR $DeNO_x$ technology leads to plugging air preheater ash analysis and processing [J]. Science and Technology & Innovation,2014(6):59-62.

[16] 张占成. SCR脱硝过程硫酸氢铵形成及堵塞机理研究 [J]. 现代工业经济和信息化,2017(5):42-44.
ZHANG Zhancheng. Analysis of formation and plugging mechanism of ammonium bisulfate in SCR denitrification process [J]. Modern Industrial Economy and Informationization,2017(5):42-44.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net