



烧结烟气 CO 催化氧化中试实践

何凯琳¹, 李海涛², 康建刚¹, 李俊杰¹, 蔡鹏鹏², 廖继勇¹,
王 延¹, 杨本涛¹, 葛彦凯¹

(1. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205;

2. 湖南立泰环境科技有限责任公司, 湖南 岳阳 414000)

摘要: 针对烧结烟气 CO 治理问题, 本文研究了贵金属涂层上载量、空速、NO_x、NH₃、反复升降温对自主研发的蜂窝 CO 催化剂活性的影响; 并鉴于各钢铁厂烧结烟气之间的差异性, 在不同钢厂工况下进行了中试。中试研究中, 催化剂均表现出良好的稳定性, 不易因 NO_x、粉尘以及烧结、中试系统启停而失活。其中, 1[#] 试样(贵金属涂层上载量为 210 g/L) 在 A 钢厂双级活性炭脱硫脱硝工艺(双级 AC) 后烟气中稳定运行 160 d, 在 B 钢厂循环流化床脱硫 + SCR 脱硝(CFB + SCR) 后烟气中稳定运行 90 d; 2[#] 试样(贵金属涂层上载量为 180 g/L) 在 B 钢厂的 CFB + SCR 后烟气中稳定运行 30 d, 在 C 钢厂的活性炭脱硫 + SCR 脱硝(AC + SCR) 后烟气中稳定运行 60 d。

关键词: 催化剂; CO; 烧结烟气; 催化氧化

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 1000 - 8764(2025) 05 - 0102 - 07

doi: 10. 13403/j. sjqt. 2025. 05. 084

Pilot practice of CO catalytic oxidation of sintering gas

HE Kailin¹, LI Haitao², KANG Jiangan¹, LI Junjie¹, CAI Pengpeng², LIAO Jiyong¹,
WANG Yan¹, YANG Bentao¹, GE Yankai¹

(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China;

2. Hunan Litai Environmental Science&Technology Co., Ltd., Yueyang 414000, Hunan, China)

Abstract: Aiming at the CO treatment problem of sintering gas, the effects of loading, airspeed, NO_x, NH₃ and repeated temperature rise and fall of precious metal coatings on the activity of self-developed honeycomb CO catalysts are studied. In view of the differences between the sintering gas of each steel mill, a pilot test is carried out under different steel mill conditions. In the pilot study, the catalysts show good stability and are not inactivated by NO_x, dust, sintering, and the start and stop of the pilot system. Among them, the 1[#] specimen (loading amount of precious metal coating 210 g/L) runs stably in the flue gas after the double-stage activated carbon desulfurization and denitrification process (dual-stage AC) in steel mill A for 160 days, and in the flue gas after cyclic fluidized bed desulfurization + SCR denitrification (CFB + SCR) in steel mill B for 90 days. The 2[#] specimen (loading amount of precious metal coating 180 g/L) runs stably in the flue gas after CFB + SCR in steel mill B for 30 days, and in the flue gas after activated carbon desulfurization + SCR denitrification (AC + SCR) in steel mill C for 60 days.

Key words: catalyst; CO; sintering gas; catalytic oxidation

近年来, 粉尘、SO₂、NO_x等常规污染物的脱除逐步达到了超低排放标准, 烟气治理产业的关

注点逐渐转移至非常规污染物 CO。CO 是造成臭氧污染的主要前驱体, 同时也危害人类健康, 引起

收稿日期: 2025 - 09 - 20; 修回日期: 2025 - 09 - 29

基金项目: 中国五矿科技创新发展基金资助项目。

作者简介: 何凯琳(1992—), 女, 博士, 从事工业烟气净化, 非均相催化方面的研究。

通信作者: 杨本涛(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 从事工业三废治理及资源化方面的研究。

心血管系统疾病,甚至使人因窒息而亡^[1]。工业 CO 排放的主要来源之一是钢铁行业,其中,钢铁烧结工序烟气中的 CO 体积分数在 0.3%~1.0%^[2],远高于 SO₂、NO_x 污染物总和。安阳市污染物分析报告表明,90% 以上工业 CO 排放源于钢铁行业。唐山市 CO 质量浓度在 2019—2021 年期间,在全国 168 个重点城市中排名倒数。2024 年,河北省生态环境厅专题会议纪要(第 28 号)提出,将烧结机 CO 排放质量浓度限值设定在 2 800 mg/m³,钢铁企业进行 CO 治理,可享受重污染天气不停产、不减产、环保税减免和财政补贴等各类优惠政策。可见,钢铁 CO 治理已成为环保治理领域的新趋势。

CO 是一种有毒污染物,也是一种可利用的能源物质。2023 年,中国烧结矿产量为 13.78 亿吨,烧结烟气排量达 6.89×10^{12} m³,CO 排放量近 2.75×10^{10} m³,造成了大量能源浪费。由于烧结烟气量大、CO 质量浓度不高,燃烧处理不实际。将烧结烟气中低质量浓度 CO 进行催化氧化处理,释放热量用于烟气升温至 SCR 脱硝温度,可以减少常规 SCR 工艺所需燃料(如高炉煤气),实现以废治废,为钢铁企业节省烟气处理成本。

虽然 CO 氧化是一种简单的反应,但烧结烟气中 SO_x、NO_x、高体积浓度水汽、以及各种 VOCs(挥发性有机物)的存在使这一反应变得困难,抑制甚至毒化 CO 氧化催化剂。例如,水汽可通过使 OH 提供氧原子,促进 Pt/TiO₂ 催化剂的 CO 氧化活性^[3],但同时 OH 也会促使 SO₂ 形成硫酸盐^[4],导致催化剂活性降低。CuMn 尖晶石催化剂拥有丰富的氧空位和酸位点,在含有苯和水汽的烟气中能稳定催化 CO 氧化^[5],但这种非贵金属催化剂长期运行会因 SO₂ 中毒。

各个钢厂的烧结烟气具体成分及比例不尽相同,提高了催化剂的应用难度。烟气成分与原料、烧结机运行工况有关,这是因为烧结烟气污染物产自烧结台车不同的温度和料层状态下。料层前段温度低、湿度高、原燃料和碳燃料燃烧不充分,产生大量的 CO、CH₄、VOCs、H₂O 和 NO_x;料层后段温度高、湿度低、原燃料和碳燃料燃烧充分,氯盐、硫酸盐分解,HCl 和 SO₂ 释放^[6-8]。烧结烟

气成分还与末端处理工艺有关。烧结烟气的净化包含了除尘、脱硫和脱硝步骤,分别可选用电除尘、布袋除尘、干法脱硫、湿法脱硫、半干法脱硫、SCR 脱硝、活性炭法脱硝等技术。不同的烟气处理技术虽然都能实现常规污染物的超低排放,即粉尘、SO₂、NO_x 排放质量浓度分别不超过 10、35、50 mg/m³,但对非常规污染物有不同的作用。例如活性炭法脱硫/脱硝可以协同脱除部分 HCl、HF、NH₃,而高温 SCR 脱硝可以协同脱除部分 VOCs^[9]。各钢厂烧结烟气成分中,差异最大的是 VOCs,总量范围广(在 1.29 ~ 209.47 mg/m³ 之间^[10-12]),种类多样(一般包括烷烃、烯烃、卤代烃、苯系物、多氯芳烃、多环芳烃等)。芳香族化合物^[8,13]、二硫化碳^[11]、卤代烃^[12] 均有可能成为主要 VOCs,这取决于钢厂原料和烟气测试的取样方式。钢厂烧结烟气之间巨大的差异对 CO 氧化催化剂可能造成不同的影响,然而目前暂无针对同类催化剂在不同钢铁厂烧结烟气中的应用研究。

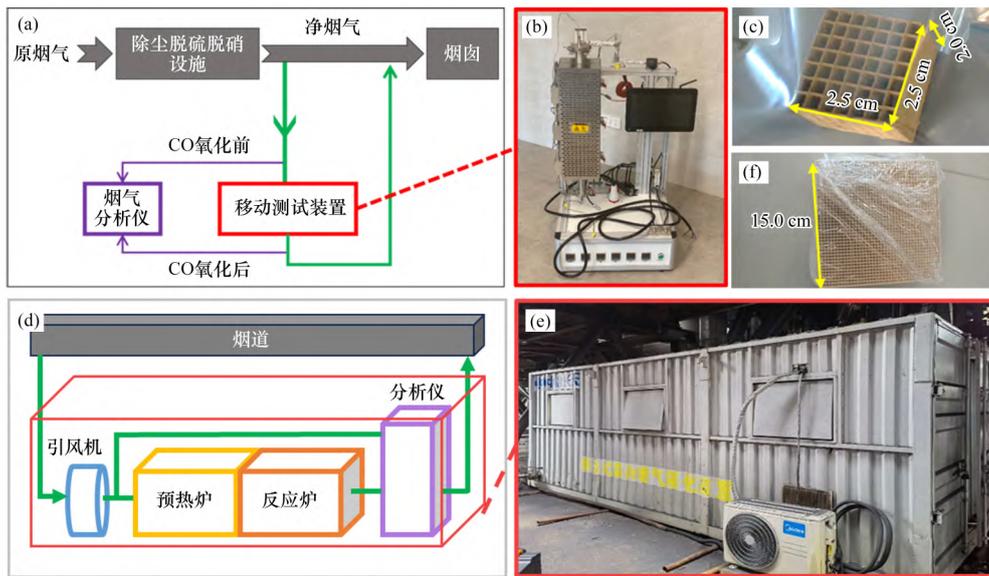
本研究使用移动中试系统和放大中试系统在多个钢铁厂开展实践研究,分析了贵金属涂层上载量、空速、NO_x、NH₃、反复升降温对催化剂效率的影响,评价、对比了自主研发的催化剂在 A 钢厂活性炭脱硫脱硝(双级 AC)后烟气、B 钢厂循环流化床脱硫 + SCR 脱硝(CFB + SCR)后烟气、C 钢厂活性炭脱硫 + SCR 脱硝(AC + SCR)后烟气中的应用效果,对工程应用具有指导意义。

1 试验方法

1.1 移动中试

试验在 A、B 钢厂所用移动中试系统如图 1(a)、(b)所示。测试时,从钢厂烧结烟气管道中引出烟气进入移动测试装置,经 CO 脱除催化剂处理后排出。烟气具体流经路径:烟道/反应器取气口→反应器(上进下出)→冷凝器→干燥器→流量计→抽气泵→排气口。催化剂处理前后的 CO 质量浓度通过便携式烟气分析仪测试。

试验所用 CO 脱除催化剂为金属氧化物负载贵金属蜂窝催化剂[图 1(e)]。催化剂大小为长×高×宽=2.5 cm×2.5 cm×2.0 cm,由工业用 40 孔大块催化剂(长×高×宽=15 cm×15 cm×15 cm)



A、B 钢厂移动中试系统: (a) 系统示意; (b) 实物; (c) 样品;
C 钢厂放大中试系统: (d) 系统示意; (e) 实物; (f) 样品

图 1 中试系统

Fig. 1 Pilot system

切割所得。每次测试取用两块，上下叠加置于反应炉中。试验使用 1[#]和 2[#]两种试样，其贵金属涂层上载量分别为 210 g/L 和 180 g/L，其它成分相同。

系统运行时，炉温设定为 280 ℃，入口烟气温度随烟道烟气初始温度及空速波动，一般在 250 ~ 270 ℃ 之间。空速调节通过控制转子流量计实现，范围为 10 000 ~ 35 000 h⁻¹。系统启动时，催化剂在冷烟气中逐渐升温，约 1 ~ 2 h 达到设定炉温；系统停机时，5 ~ 10 min 降至室温。此外，烧结停机时，中试系统不停机。

1.2 放大中试

图 1(d)、(e)、(f) 别为 C 钢厂放大中试系统的示意、实物和所用样品。测试时，通过引风机从烟道中引出烟气至预热炉，将烟气加热至 280 ℃，再进入反应炉进行 CO 催化脱除后排出。使用烟气分析仪测试 CO 氧化前、后烟气中的 CO 质量浓度。所用样品为两块 40 孔大块催化剂，并列放置。

系统运行时，烟气流量设定为 100 ~ 150 m³/h，空速约为 15 000 ~ 22 500 h⁻¹。与移动中试相似，系统开启时，催化剂在冷烟气中经 4 h 升温逐渐达到 280 ℃，且烧结停机时系统仍然运行。

2 结果与讨论

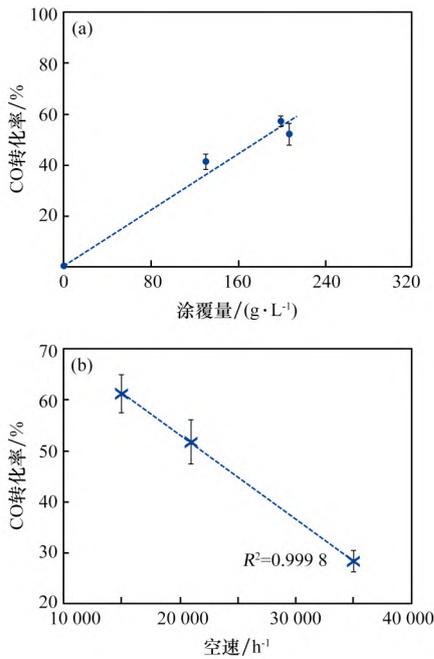
2.1 工业参数对催化剂效率的影响

催化剂实际应用试验中，以 A 钢厂烟气为例，研究了贵金属涂层上载量与空速、NO_x和 NH₃、反复升降温对催化剂活性的影响。

2.1.1 贵金属涂层上载量和空速的影响

蜂窝催化剂在 A 钢厂烟气中的 CO 转化率与贵金属涂层负载量、空速之间的关系如图 2 所示。由图 2(a) 可以看出，提高贵金属涂层上载量可以显著提升其活性。当催化剂无贵金属涂层时，CO 转化率几乎为 0；当贵金属涂层上载量提升至 130 g/L 时，CO 转化率约 41%；当贵金属涂层上载量进一步提升至 250 g/L 时，CO 转化率在 52% ~ 57% 之间。

当贵金属涂层上载量一定时，在空速为 15 000 ~ 35 000 h⁻¹ 范围内，CO 转化率随空速升高而降低。如图 2(b) 所示，当空速为 15 000 h⁻¹ 时，CO 转化率约 62%；空速提升至 21 000 h⁻¹ 时，转化率降至 51% 左右；进一步提高空速至 35 000 h⁻¹，转化率降低至 27% 左右。三种空速下取得的转化率可以拟合为一条直线，其 $R^2 = 0.999 8$ ，说明在空速 15 000 ~ 35 000 h⁻¹ 范围内，



(a) 涂覆量; (b) 空速

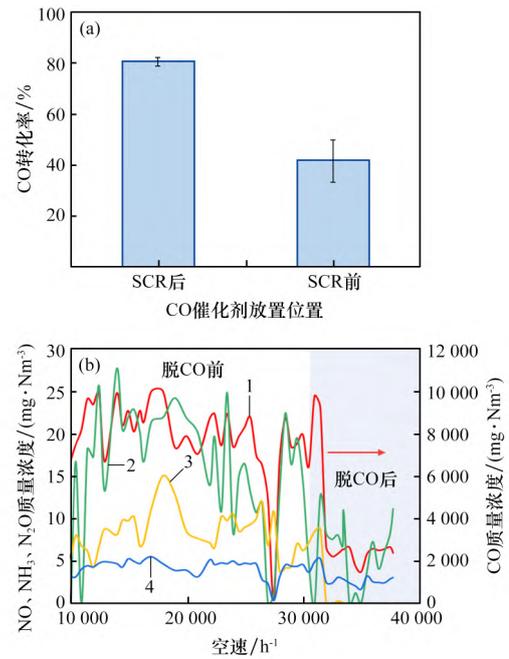
图2 蜂窝催化剂在A钢厂烟气中的CO转化率与贵金属涂层负载量、空速之间的关系

Fig. 2 CO conversion rate to precious metal coating weight and space velocity over a honeycomb catalyst in the flue gas of steel mill A

CO转化率与空速之间存在良好的线性关系。

2.1.2 NO_x和NH₃的影响

在实际工程应用时,若要考虑CO氧化与SCR催化剂放置的先后顺序,需先明确NO_x和NH₃对CO氧化效率影响。A钢厂烟气在SCR脱硝前,含有大量NO_x,质量浓度约为120 mg/Nm³。SCR脱硝后,NO_x大幅减少、NH₃出现,质量浓度分别约为15、7 mg/Nm³。蜂窝催化剂放置于A钢厂的SCR前、后烟气中的CO转化率及脱CO前后烟气成分质量浓度如图3所示。由图3(a)可知,催化剂放置于SCR脱硝前烟气中,CO转化率仅为40%,在SCR脱硝后烟气中,CO转化率达80%。这说明SCR脱硝后,NO_x含量降低可显著提升CO催化活性,且氨逃逸质量浓度较低,对CO催化剂的抑制不明显。此外,由图3(b)可以看出,CO氧化催化剂可协同脱除NO和NH₃,而不会导致N₂O质量浓度升高。因此,CO氧化催化剂置于SCR脱硝之后更合理。



(a) CO转化率; (b) 烟气成分

1—CO; 2—NO; 3—NH₃; 4—N₂O。

图3 CO转化率及脱CO前后烟气成分质量浓度

Fig. 3 CO conversion rate and flue gas mass concentration before and after CO removal

2.1.3 反复升降温的影响

由于反应系统启停时,催化剂会经历温度逐渐升高和降低的过程。为研究催化剂在这种情况下下的稳定性,连续进行3次升温-降温循环试验,相关结果如图4所示。由图4可知,反应器初始温度为130℃,出口CO质量浓度约为7500 mg/Nm³,当温度快速升高至280℃时,CO质量浓度迅速降低至2500 mg/Nm³以下,说明催化剂初始性能优良。随后先后降温至110、100℃,CO质量浓度

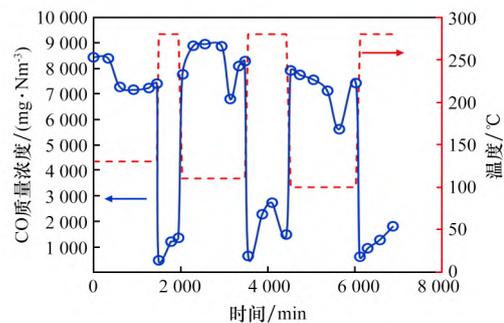


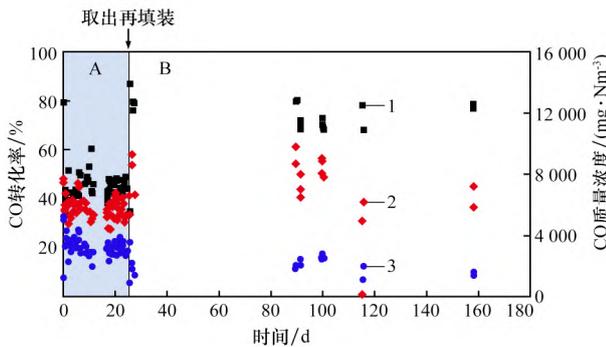
图4 出口CO质量浓度与反应温度随时间变化
Fig. 4 Change of outlet CO mass concentration and reaction temperature with time

均升高至初始水平,再分别升温至 280 ℃,CO 质量浓度均降低至 2 500 mg/Nm³以下。这说明反复升温-降温不会造成催化剂失活。可以预见系统启停不会对催化剂的性能造成严重影响。

2.2 实际应用效果验证

2.2.1 双级 AC 后烟气

针对 A 钢厂烟气,使用 1[#]试样进行测试,结果如图 5 所示。由图 5 可知,催化剂运行的前 25 d 在单级 AC 工艺后烟气中测试。由于烟气未脱硝,NO_x质量浓度约为 120 mg/Nm³,明显抑制催化剂活性,CO 转化率在 40%~50%之间波动,CO 质量浓度从 5 600 mg/Nm³左右降至 3 100 mg/Nm³左右。但 NO_x的存在并不影响催化剂稳定性。催化剂运行第 25 d,将催化剂转至双级 AC 后烟气中测试。可以看出 NO_x的消除(3 mg/Nm³)使催化剂活性大幅提升,CO 转化率在 70%~80%之间,CO 质量浓度从 7 500 mg/Nm³降至 1 900 mg/Nm³左右。1[#]试样共计测试 160 d,在 21 000 h⁻¹高空速、250 ℃的条件下,单级 AC 和双级 AC 工艺后烟气中,均保持了良好的稳定性,不会因 NO_x而中毒。



A—单级 AC(脱硫未脱硝); B—双级 AC(脱硫脱硝);

1—CO 转化率; 2—入口 CO 质量浓度;

3—出口 CO 质量浓度。

图 5 1[#]试样在 A 钢厂单/双级 AC 后烟气中的测试结果 (运行温度为 250 ℃,空速为 21 000 h⁻¹)

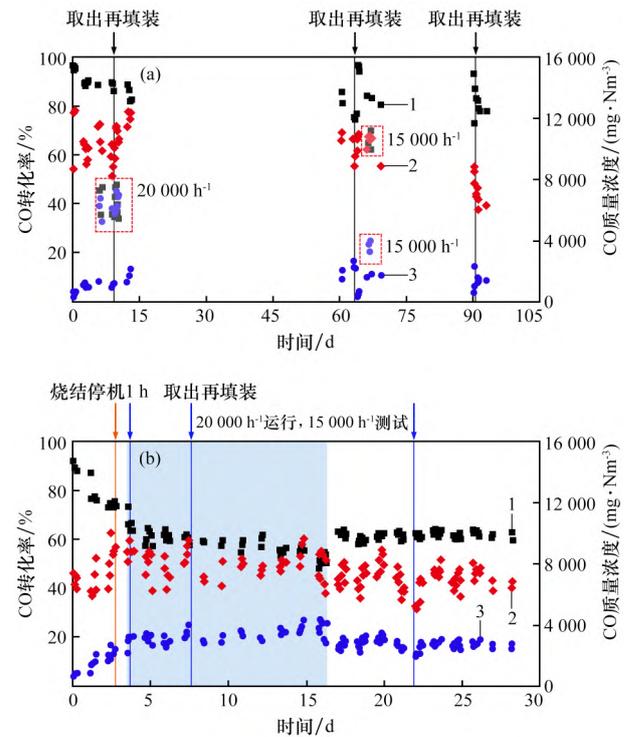
Fig. 5 Test results of sample 1 in flue gas after single/double-stage AC at steel mill A (operating temperature 250 ℃,space velocity 21 000 h⁻¹)

2.2.2 CFB + SCR 后烟气

催化剂在 B 钢厂的 CFB + SCR 后烟气中的测试结果如图 6 所示。由图 6(a)可知,在 10 000 h⁻¹空速下,CO 转化的初始效率达 95%,随后缓慢降至 70%~90%之间并保持稳定。在 1[#]试样测试的第

5~10 d,将空速调至 20 000 h⁻¹,CO 转化率降至 40%。在测试的第 65 d,将空速调至 15 000 h⁻¹,CO 转化率约 65%。以上 CO 转化率随空速变化规律与图 2(b)结论相符。

由图 6(b)可知,2[#]试样在 15 000 h⁻¹空速、260 ℃下,稳定运行 30 d,CO 转化效率维持在 60%,浓度从 7 500 mg/Nm³降至 2 500 mg/Nm³。测试期间,烧结启停、中试系统启停均不影响催化剂活性。催化剂能够耐受以上两种特殊状态下烟气的毒化作用。



(a) 1[#]试样,运行温度为 270 ℃,空速为 10 000 h⁻¹;

(b) 2[#]试样,运行温度为 260 ℃,空速为 15 000 h⁻¹

1—CO 转化率; 2—入口 CO 质量浓度;

3—出口 CO 质量浓度。

图 6 催化剂在 B 钢厂的 CFB + SCR 后烟气中的测试结果

Fig. 6 Test results of catalysts in flue gas after CFB + SCR at steel mill B

2.2.3 AC + SCR 后烟气

将放大制备的 2[#]试样在 C 钢厂的 AC + SCR 后烟气中验证。与图 6 相似,催化剂效率呈现先降低后稳定的趋势。15 000 h⁻¹空速下,CO 转化率稳定在 70%~80%。测试过程中,烧结停机、系统启停均不影响催化剂活性(图 7)。从第 36 d 开始,烟气风量由 100 m³/h 逐渐降低 70 m³/h,这

是烟气中的粉尘在设备管道以及催化剂孔道中累积导致。在测试的第 46 d 使用高流速烟气 ($300 \text{ m}^3/\text{h}$) 吹灰, 风量短暂恢复, 之后又降低至 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 。第 53 d 再次使用高流速烟气 ($300 \text{ m}^3/\text{h}$) 吹灰, 并断电清理管道粉尘, 重启设备后风量恢复至 $100 \text{ m}^3/\text{h}$, 催化效率约 75%。随后将风量调高至 $150 \text{ m}^3/\text{h}$, 使空速达 $22\,500 \text{ h}^{-1}$, 催化效率稳定在 45% 左右。总体来说, 2[#]试样在 C 钢厂的 AC + SCR 后烟气中稳定性较好, 能够耐受烧结烟气中粉尘的毒化。

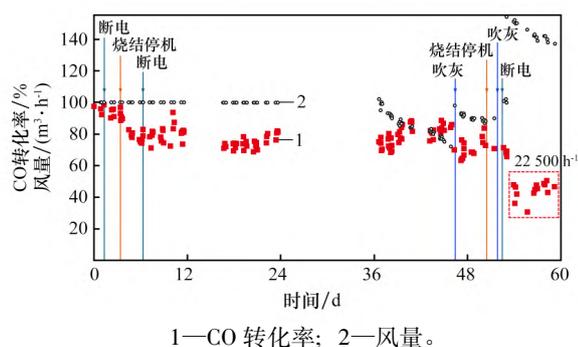


图 7 放大制备的 2[#]试样在 C 钢厂的 AC + SCR 后烟气中的测试结果 (运行温度为 $280 \text{ }^\circ\text{C}$, 空速为 $15\,000 \sim 22\,500 \text{ h}^{-1}$)

Fig. 7 Test results of scaled-up Sample 2 in flue gas after AC + SCR at steel mill C (operating temperature $280 \text{ }^\circ\text{C}$, space velocity $15\,000 \sim 22\,500 \text{ h}^{-1}$)

2.3 讨论

各钢厂烧结的生产参数和烟气处理工艺不完全相同, 导致非常规污染物总量与成分差异, 对 CO 氧化催化剂造成不同程度的抑制, 在工程应用中需选取合理的参数以使 CO 转化率达标。一般来说, 提高温度、增加贵金属含量、降低空速可以提升催化活性。CO 催化氧化与高温 SCR 进行耦合时, 温度选用高温 SCR 的反应温度 ($280 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上)。因此, 工程应用中主要通过调节贵金属上载量和空速来确保 CO 排放达标。在本研究中的贵金属涂层上载量与空速范围内, CO 转化率随二者分别降低和升高。基于这一规律, 在工程应用前使用移动中试系统快速试验, 可帮助选取最优空速与贵金属含量, 指导催化剂生产与装填, 满足目标脱除率的同时, 提升贵金属组分利用率, 降低投资成本。

为避免烟气中各污染物对催化剂的影响, 需

为催化剂营造良好的工况。CO 氧化与 SCR 脱硝耦合时, 建议尽量将 CO 氧化置于 SCR 脱硝之后, 以保障 CO 脱硝效率, 同时深度脱除 NO_x 与 NH_3 。因为脱硝前 NO_x 质量浓度较高, 显著抑制 CO 催化活性, 而脱硝导致的少量氨逃逸对催化剂效率影响不大。同时, CO 催化剂能进一步协同脱除 NH_3 与 NO_x , 且不会将 NH_3 氧化为 N_2O 等有毒物质。尽管如此, 在实际应用中, 应保障 SCR 脱硝效率、降低氨逃逸浓度, 以降低 CO 催化剂负荷, 腾出更多位点用于 CO 氧化反应。此外, 烟气脱硫系统应保障稳定运行, 避免超标排放的高质量浓度 SO_2 对催化剂的毒化。

系统启停时, 催化剂会处于低温烟气中。由于低温有利于污染物吸附在催化剂表面, 且导致 VOCs 不完全氧化而形成积碳, 因此容易造成催化剂失活。而本研究所用的催化剂在反复升降温的过程中保持了高活性, 可以预见其在实际应用中的稳定性。

催化剂在多个钢铁厂进行中试, 均体现出良好的稳定性。1[#]试样在 A 钢厂单级 AC 和双级 AC 后烟气中均能稳定运行。单级 AC 后烟气中含有高质量浓度 NO_x , 而双级 AC 烟气中含有少量氨, 二者均不会导致催化剂失活。2[#]试样在 B 钢厂的 CFB + SCR 后烟气、C 钢厂的 AC + SCR 后烟气中均能稳定运行, 不易受烧结、中试系统启停的影响以及粉尘的毒化。C 钢厂的放大中试所用催化剂为放大生产的蜂窝催化剂, 这证实了催化剂工业生产的可行性。由于 C 钢厂烟气及放大中试系统特性, 烟气粉尘累积严重, 导致烟气量变化。建议工程应用时关注反应系统设计, 减少粉尘影响。

3 结论

(1) CO 氧化蜂窝催化剂对 CO 转化效率随贵金属涂层上载量增加而升高, 随空速升高而降低。可通过提升贵金属涂层负载量、降低空速来提高、预测 CO 转化率, 指导工程应用。CO 催化剂在脱硝前烟气中受 NO_x 抑制明显, 在脱硝后烟气中因 NO_x 和氨逃逸质量浓度均不高而性能较强, 且对 NH_3 与 NO_x 有协同脱除作用。烟气温度反复升高、降低不会导致催化剂失活。

(2) CO 氧化蜂窝催化剂在 A 钢厂双级 AC 后烟气、B 钢厂的 CFB + SCR 后烟气、C 钢厂的 AC + SCR 后烟气中进行中试, 均能稳定运行。1[#] 试样在 A、B 钢厂分别稳定运行 160 d 和 90 d, 2[#] 试样在 B、C 钢厂分别稳定运行 30 d 和 60 d, 且催化剂不易被 NO_x 和粉尘毒化, 不易受烧结、中试系统启停的影响。

参考文献:

- [1] LIU C, YIN P, CHEN R J, et al. Ambient carbon monoxide and cardiovascular mortality: A nationwide time-series analysis in 272 cities in China [J]. *The Lancet Planetary Health*, 2018, 2(1): 12–18.
- [2] XU Z C, LI Y R, SHI H M, et al. Application prospect of K used for catalytic removal of NO_x, CO_x, and VOCs from industrial flue gas: A review [J]. *Catalysts*, 2021, 11(4): 419.
- [3] FENG C L, LIU X L, ZHU T Y, et al. Catalytic oxidation of CO over Pt/TiO₂ with low Pt loading: The effect of H₂O and SO₂ [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2021, 622: 118218.
- [4] HE K L. In situ DRIFTS and TPD studies on surface properties affecting SO₂-resistance of Pt/TiO₂ catalyst in low-temperature CO oxidation [J]. *Surface Science*, 2023, 734: 122315.
- [5] HE K L, ZENG S L. Mutual effects of CO and benzene oxidation over Cu catalysts: The role of surface oxygen species and reaction pathways [J]. *Applied Surface Science*, 2024, 678: 161101.
- [6] 王锋, 张俊, 郗俊懋, 等. 烧结机风箱中烟气排放规律及分析 [J]. *钢铁*, 2019, 54(6): 96–102.
WANG Feng, ZHANG Jun, QIE Junmao, et al. Emission law and analysis of flue gas in sinter wind boxes [J]. *Iron & Steel*, 2019, 54(6): 96–102.
- [7] WANG Y F, DING L, SHI Q, et al. Volatile organic compounds(VOC) emissions control in iron ore sintering process: Recent progress and future development [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 448: 137601.
- [8] 王毅璠, 于清海, 李亚飞, 等. 烧结过程挥发性有机物排放特性 [J]. *钢铁*, 2025, 60(3): 156–165.
WANG Yifan, YU Qinghai, LI Yafei, et al. Characterization of volatile organic compounds emission from sintering process [J]. *Iron & Steel*, 2025, 60(3): 156–165.
- [9] LEI S Y, WANG L L, XU L L, et al. Experimental and theoretical studies on effective synergistic low-temperature removal of NO and typical volatile organic compounds(VOCs) from flue gas based on Cu@VWTi catalyst [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 459: 142567.
- [10] 王海风, 秦松, 姜曦, 等. 钢铁工业烧结过程 VOCs 减排研究进展 [J]. *钢铁*, 2018, 53(1): 1–7.
WANG Haifeng, QIN Song, JIANG Xi, et al. Research development of VOCs emission reduction during iron ore sintering in steel industry [J]. *Iron & Steel*, 2018, 53(1): 1–7.
- [11] 苗沛然. 钢铁工业挥发性有机物(VOCs) 排放特性研究 [J]. *环境与发展*, 2017, 29(2): 79–86.
MIAO Peiran. Research on VOCs emission characteristics in sintering process [J]. *Environment and Development*, 2017, 29(2): 79–86.
- [12] CAI C L, LI J X, HE Y, et al. Target the neglected VOCs emission from iron and steel industry in China for air quality improvement [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2023, 17(8): 95.
- [13] ZHANG X F, GAO S, FU Q Y, et al. Impact of VOCs emission from iron and steel industry on regional O₃ and PM_{2.5} pollutions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(23): 28853–28866.