



移动扫码阅读

任翠涛,陈晨,刘丁嘉,等.某高砷煤电厂SCR脱硝催化剂性能检测与评价[J].能源环境保护,2022,36(2):90-95.
REN Cuitao, CHEN Chen, LIU Dingjia, et al. Performance determination and evaluation of SCR denitration catalyst in a high-arsenic coal-fired power plant[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(2): 90-95.

某高砷煤电厂SCR脱硝催化剂性能检测与评价

任翠涛¹, 陈晨², 刘丁嘉², 贾海威², 曲艳超^{2,*}

(1.北京华电光大环境股份有限公司, 北京 102206; 2.浙江科卓环保科技有限公司, 浙江 绍兴 312300)

摘要:为分析燃煤电厂平板式抗砷中毒SCR脱硝催化剂在高砷燃煤烟气中的运行效果,测试了抗砷中毒SCR脱硝催化剂和新鲜催化剂的脱硝活性,通过X射线原子荧光(XRF)、N₂吸附/脱附、X射线衍射(XRD)和X射线光电子能谱(XPS)等方式表征催化剂样品。结果表明:运行一年的催化剂在150~450℃烟气条件下的脱硝活性与新鲜催化剂非常接近;运行一年后,催化剂中的砷含量达到3.06%,主要以As₂O₅的形式存在;催化剂比表面积出现小幅下降,载体TiO₂的晶型未发生明显转变;催化剂中V⁴⁺和O_α含量未出现明显变化,催化剂未出现明显的物理中毒和化学中毒现象,具有较强的抗砷中毒性能。

关键词:SCR催化剂;抗砷中毒;脱硝性能;高砷烟气

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)02-0090-06

Performance determination and evaluation of SCR denitration catalyst in a high-arsenic coal-fired power plant

REN Cuitao¹, CHEN Chen², LIU Dingjia², JIA Haiwei², QU Yanchao^{2,*}

(1. Beijing National Power Group Co., Ltd., Beijing 102206, China;

2. Zhejiang Keshuo Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shaoxing 312300, China)

Abstract: In order to analyze the effect of plate-type anti-arsenic-poisoning SCR denitration catalysts on treating high-arsenic coal-fired flue gas of coal-fired power plant, the denitrification activities of anti-arsenic-poisoning SCR denitration catalyst and fresh catalyst were tested. The catalyst samples were characterized by X-ray fluorescence (XRF), N₂ adsorption/desorption, X-ray diffraction (XRD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results showed that the denitrification activity of the one-year-used catalyst under 150~450℃ was close to that of the fresh catalyst. After one year of operation, the content of arsenic in the catalyst reached 3.06%, mainly in the form of As₂O₅. The specific surface area of the catalyst decreased slightly. The crystal form of the support TiO₂ and the content of V⁴⁺ and O_α did not change significantly. The catalyst had no obvious physical and chemical arsenic poisoning, showing good anti-arsenic poisoning performance.

Key Words: SCR catalyst; Anti-arsenic-poisoning; Denitrification performance; High-arsenic flue gas

0 引言

在工业烟气脱硝领域中,选择性催化还原(SCR)脱硝技术是现今应用最为广泛的主流技术^[1-2],在脱硝效率、反应选择性以及技术成熟性等方面均有着显著优势^[3-4],而作为技术核心的脱

硝催化劑^[5-6],直接关系到脱硝系统的运行效果和脱硝成本^[7]。随着国内环保标准的完善,更多行业的烟气中氮氧化物排放浓度被纳入监督范围,更多类型的工业烟气需要进行脱硝处理。与火电厂300~420℃烟气脱硝相比^[8-9],钢铁、水泥、垃圾焚烧等行业对脱硝催化剂性能提出了更高的

收稿日期:2021-12-26;责任编辑:蒋雯婷

第一作者简介:任翠涛(1987-),女,河北石家庄人,硕士,中级工程师,主要从事工业烟气治理研究。E-mail:rencthd@163.com

通讯作者简介:曲艳超(1988-),男,山东临沂人,硕士,高级工程师,主要从事工业烟气治理研究。E-mail:qyanchao@126.com

要求^[10-12]。

常规 SCR 脱硝催化剂在传统火电烟气中使用寿命一般为 2~3 年^[13],当处于某些特殊烟气下,如低温烟气、高碱金属含量烟气、高砷含量烟气等,常规催化剂会快速出现失活现象^[14-15],使用寿命大幅缩短,脱硝系统的运行成本也随之大幅升高^[7]。

燃用高砷煤产生的烟气中 As_2O_3 含量较高,当烟气流经催化剂时,气态 As_2O_3 可以通过虹吸作用进入催化剂孔道,与催化剂的活性位点^[16]和酸位点^[17-19]发生反应,降低催化剂活性,使催化剂发生化学中毒。此外, As_2O_3 和氧化生成的 As_2O_5 还可以通过覆盖及堵塞催化剂孔道,阻断 SCR 脱硝反应^[18],使催化剂发生物理中毒。砷中毒是 SCR 脱硝催化剂失活的主要原因之一^[20-21],针对高砷烟气,国内厂商开发并商业化生产抗砷中毒 SCR 脱硝催化剂。本文以使用高砷煤的某燃煤电厂提供的已经运行一年的抗砷中毒 SCR 脱硝催化剂和新鲜抗砷中毒催化剂作为研究对象,对催化剂样品进行脱硝活性测试以及 X 射线原子荧光 (XRF)、 N_2 吸附/脱附、X 射线衍射 (XRD) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 表征,深入分析砷元素对催化剂脱硝活性、比表面积、晶型结构、价态分布等方面的影响,为后续开发适用于高砷烟气的抗砷中毒 SCR 脱硝催化剂提供理论支撑。

1 实验部分

1.1 实验原料

该燃煤电厂装机容量为 300 MW,燃用煤中砷含量为 $145 \mu\text{g/g}$,属于煤炭行业标准 (MT/T 803—1999) 中规定的四级含砷煤 ($\geq 25 \mu\text{g/g}$)。脱硝反应器运行烟温为 $310 \sim 420^\circ\text{C}$,催化剂按照 3 层设计,安装催化剂为平板式抗砷中毒 SCR 脱硝催化剂,基材为不锈钢网板,催化剂单板尺寸为 $456 \text{ mm} \times 516 \text{ mm}$,板厚为 0.65 mm ,节距为 7.51 mm ,波高为 7.03 mm ,波宽为 21.98 mm 。

从 1 号脱硝反应器上层抽取已经运行一年的抗砷中毒 SCR 脱硝催化剂作为测试样品,记为 C-used;以电厂提供的还未投入使用的新鲜催化剂作为对比样品,记为 C-fresh,样品照片如图 1 所示。将上述两个催化剂样品进行研磨筛分处理,得到 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 的粉末催化剂用于后续的测试和表征。

1.2 催化剂脱硝活性测试

测试所用脱硝活性评价系统如图 2 所示,系

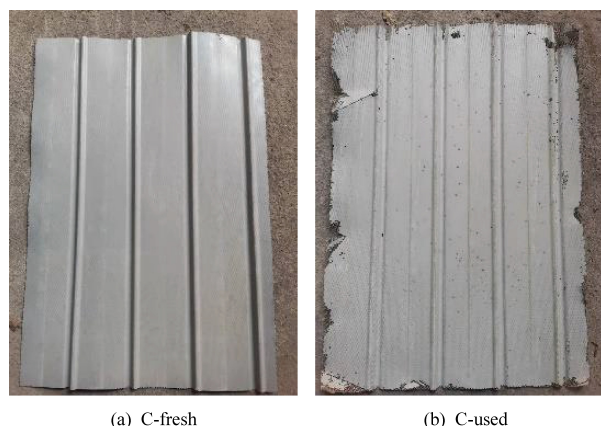


图 1 催化剂样品照片

Fig.1 Photos of different catalysts

统由烟气系统、水系统、SCR 脱硝反应器、烟气分析仪和尾气处理系统组成。测试过程中将准备好的 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 粉末催化剂放入 SCR 脱硝反应器内,按照设计工况设定反应器温度,并通入气体和水,分别通过质量流量计和蠕动泵控制模拟烟气中气体和水蒸气含量,模拟烟气流经催化剂发生反应,反应器进出口 NO_x 浓度通过赛默飞 42i-HL 型氮氧化物分析仪进行测试。模拟烟气组成为: NO 浓度为 500 mg/m^3 , $NH_3/NO = 1$, SO_2 浓度为 500 mg/m^3 , O_2 体积分数为 4% , H_2O 体积分数为 6% ,测试温度区间为 $150 \sim 450^\circ\text{C}$,空速为 $18\,000 \text{ h}^{-1}$ 和 $54\,000 \text{ h}^{-1}$ 。

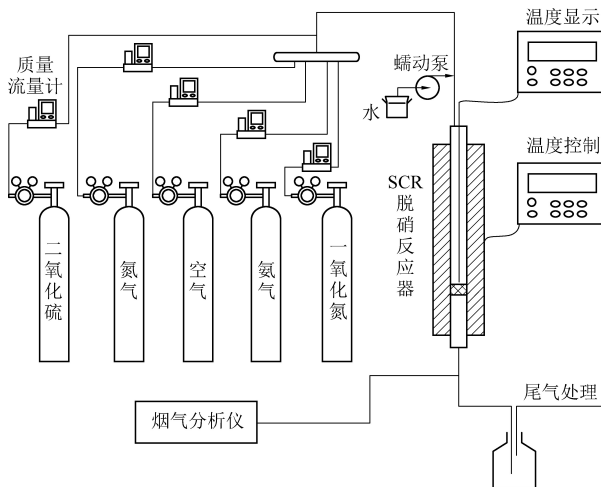


图 2 催化剂脱硝活性评价系统

Fig.2 The evaluation system of denitrification performance of the catalysts

催化剂 NO_x 脱除率计算公式如式(1):

$$\eta = \frac{NO_{x_{in}} - NO_{x_{out}}}{NO_{x_{in}}} \times 100\%$$

式(1)中: η ——脱硝效率, %;

$\text{NO}_{x_{\text{in}}}$ ——脱硝反应器进口 NO_x 浓度, mg/m^3 ;

$\text{NO}_{x_{\text{out}}}$ ——脱硝反应器出口 NO_x 浓度, mg/m^3 。

1.3 催化剂表征

1.3.1 XRF 分析

使用日本岛津公司的 XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪对样品进行 XRF 测试, X 射线管靶为铈靶, X 射线管压为 60 kV (Max)/150 mA (Max), 检测浓度范围为 $10^{-6} \sim 100\%$, 最小分析微区直径为 250 μm , 最大扫描速度为 300 ($^\circ$)/min。

1.3.2 N_2 吸附/脱附

使用美国 Micromeritics 公司的 ASAP2020 型物理吸附仪进行 N_2 吸脱附实验, 测试催化剂样品的比表面积。预处理条件为依次在 90 $^\circ\text{C}$ 下真空处理 1 h 和 200 $^\circ\text{C}$ 下真空处理 6 h, 而后采用静态法在 -196 $^\circ\text{C}$ 条件下测量样品的吸脱附等温线, 最后由 Brunauer-Emmette-Teller (BET) 方程计算样品的比表面积。

1.3.3 XRD 分析

采用 D/max-III A 型全自动 X 射线衍射仪对催化剂样品进行 XRD 分析, 辐射源为 Cu $\text{K}\alpha$, 波长为 0.154 06 nm, 工作条件为 30 kV/30 mA, 扫描区间为 $10^\circ \sim 90^\circ$, 扫描速度为 8 ($^\circ$)/min。

1.3.4 XPS 分析

使用美国赛默飞世尔科技公司的 Escalab 250Xi 型 X 射线光电子能谱仪对催化剂样品 As、V、O 元素进行 XPS 分析, 得到元素的价态和相对含量, 实验射线源为单色 Al $\text{K}\alpha$ ($h\nu = 1\,486.6\text{ eV}$), 结果采用 C 1s 的结合能 ($E_b = 284.8\text{ eV}$) 进行校准。

2 结果与讨论

2.1 催化剂脱硝活性测试

新鲜催化剂及运行一年催化剂脱硝活性测试结果如图 3 所示。由图 3 可知, 随着测试温度的升高, 两个催化剂样品的脱硝活性均不断上升, 当温度达到 300 $^\circ\text{C}$ 后基本趋于稳定。通过对比图 3 (a) 和图 3 (b) 可知, 在相同的温度条件下, 空速越高, 催化剂脱硝效率越低; 同时, 在不同空速条件下, C-used 与 C-fresh 的脱硝活性差距也有所不同, 当空速为 18 000 h^{-1} 时, C-used 与 C-fresh 脱硝效率差值不超过 1%; 当空速提升至 54 000 h^{-1} 时, C-used 与 C-fresh 脱硝效率差值则在 5.20%~7.71% 之间。

脱硝活性测试结果显示该抗砷中毒 SCR 脱

硝催化剂具有良好的抗砷中毒性能, 在高砷烟气中使用一年后催化剂活性仅出现小幅下降。而根据其他人的研究, 在模拟某燃用高砷煤电厂的烟气条件下, 对蜂窝式脱硝催化剂进行脱硝活性测试中试实验, 当运行时间仅达到 1 000 h, 该实验催化剂脱硝活性已经降低至新鲜催化剂的 69%^[22]。

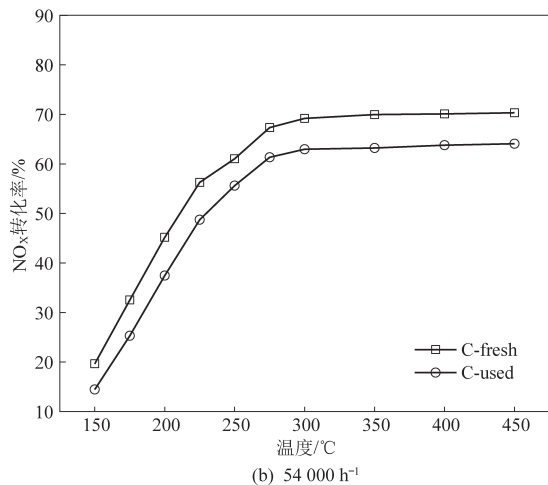
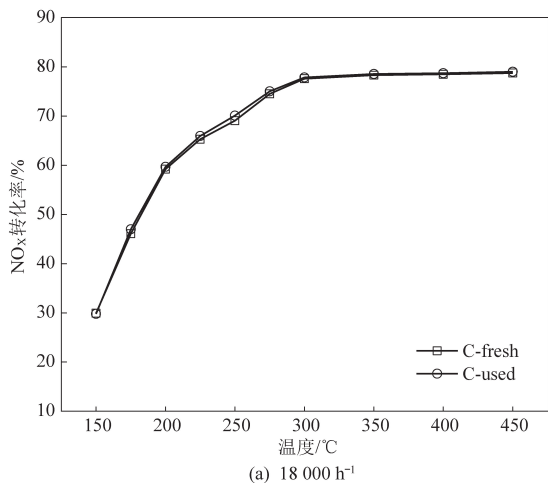


图3 催化剂脱硝活性测试

Fig.3 Denitrification activity tests for different catalysts

2.2 催化剂表征分析

在脱硝活性测试中, 催化剂在高砷烟气中运行一年后的脱硝效率与新鲜催化剂十分接近, 表现出较强的抗砷中毒性能。为进一步了解该催化剂运行一年后的微观变化, 对催化剂样品依次进行 XRF、 N_2 吸附/脱附、XRD 和 XPS 表征分析。

2.2.1 XRF 分析

催化剂样品的 XRF 测试结果如表 1 所示。由表 1 可知, 新鲜催化剂 C-fresh 的砷含量低于检出下限, 而在高砷烟气中运行一年后, 砷元素累积明显, C-used 的砷含量超过 3%。在 Li 等人^[23] 模拟脱硝催化剂砷中毒的研究中, 当砷含量达到 3%

时,催化剂脱硝效率已经不足新鲜催化剂的 40%。而 C-used 在砷含量超过 3% 的情况下,脱硝效率依旧可以达到 78% 左右,进一步证明该催化剂具有较强的抗砷中毒性能。

同时,通过 XRF 测试结果发现,该催化剂的 Mo 含量较高,且运行一年后 MoO_3 的含量出现明显下降(9.559 2%→6.402 2%)。有文献报道,活性助剂 MoO_3 对于提升催化剂的抗砷中毒性能有着十分显著的效果^[24-25], MoO_3 可与烟气中的 As_2O_3 优先反应生成 $\text{Mo}_4\text{As}_{10}\text{O}_{35}$ 等物质^[20,24,26],从而起到保护活性位的作用。由此推断,该催化剂抗砷性能优秀的原因之一应该是高 Mo 含量。在催化剂使用过程中 Mo 成分不断与砷反应,造成 Mo 含量的下降。除此之外, MoO_3 还可与烟气中某些成分反应生成可挥发性络合物,进一步导致 Mo 含量的降低^[27]。

表 1 催化剂组分含量

Table 1 Components content of various catalysts %

	C-fresh	C-used
Na_2O	0.028 5	0.096 8
Al_2O_3	1.932 8	2.383 3
SiO_2	3.376 5	4.484 6
SO_3	-	0.599 1
K_2O	0.035 0	0.111 9
CaO	1.188 4	1.217 9
TiO_2	80.940 1	78.395 3
V_2O_5	1.762 9	1.707 0
Fe_2O_3	0.488 2	0.957 3
As_2O_3	-	3.061 2
MoO_3	9.559 2	6.402 2

注:1.表 1 仅列出催化剂样品中含量超过 0.01% 的成分;2.“-”表示未检出

2.2.2 N_2 吸附/脱附测试

在催化剂使用过程中,烟气中砷等成分会逐渐堵塞催化剂孔道,造成催化剂比表面积下降^[28]。对运行一年的催化剂及新鲜催化剂进行 N_2 吸附/脱附测试,并计算样品比表面积,计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,催化剂在运行一年后,C-fresh 与 C-used 的比表面积差值约为 $9 \text{ m}^2/\text{g}$,未出现明显下降,该结果符合 C-fresh 和 C-used 脱硝活性相近的现象。

表 2 催化剂比表面积

Table 2 Specific surface area of different catalysts

	C-fresh	C-used
比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	85.981 8	77.088 5

2.2.3 XRD 分析

图 4 为新鲜催化剂和运行一年催化剂的 XRD 谱图。由图 4 可知,催化剂运行一年后未发生明显晶型转变,C-used 与 C-fresh 的载体 TiO_2 均呈锐钛矿型。比表面积的下陷应主要由烟气中灰分堵塞催化剂孔道所致。

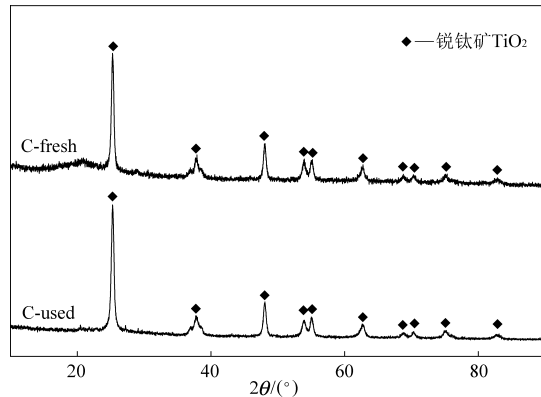


图 4 催化剂 XRD 谱图

Fig.4 XRD patterns of different catalysts

2.2.4 XPS 分析

(1) 钒元素 XPS 分析

图 5 为新鲜催化剂以及运行一年催化剂的 $\text{V } 2\text{p}_{3/2}$ XPS 谱图,其中结合能在 516.0 eV 左右的峰归属于 V^{4+} ,517.3 eV 左右的峰则归属于 V^{5+} 。表 3 为两个催化剂样品中低价钒 (V^{4+}) 在钒元素 ($\text{V}^{4+} + \text{V}^{5+}$) 中的比例。由表 3 可知,C-fresh 与 C-used 中低价钒比例相近,分别为 34.54% 和 33.76%,这说明催化剂在高砷烟气中运行一年后,并未有较多的钒活性位点与砷发生反应^[29]。这可能是砷优先与催化剂中的 MoO_3 发生反应,使催化剂的钒活性位得到保留,而活性位点数量稳定是维持催化剂活性的重要因素。

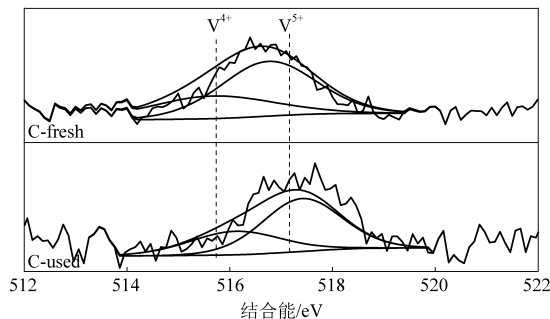


图 5 催化剂 $\text{V } 2\text{p}_{3/2}$ XPS 谱图

Fig.5 XPS spectra of $\text{V } 2\text{p}_{3/2}$ of different catalysts

表 3 钒元素中 V^{4+} 占比

Table 3 Proportion of V^{4+} in the total vanadium

	C-fresh	C-used
V^{4+} 占比/%	34.54	33.76

(2) 砷元素 XPS 分析

图6为新鲜催化剂和运行一年催化剂的 As 3d XPS 谱图,其中结合能 45.1~46.2 eV 对应的是 As^{3+} ,而结合能 44.7~48.2 eV 则对应 As^{5+} ,表4为催化剂样品砷元素中 As^{3+} 和 As^{5+} 的占比。由 XPS 测试结果可知,在催化剂使用过程中,烟气中的砷成分会不断在催化剂上累积,在运行一年的样品中, As^{3+} 和 As^{5+} 在砷的总含量中分别占 10.52% 和 89.48%。这种砷价态分布与杨勇平等^[30]的研究结果相似,即在高砷烟气条件下,上层催化剂中的砷元素主要以 As_2O_5 形式存在,其主要由 As_2O_3 氧化生成,并与 As_2O_3 一同覆盖催化剂表面和孔道,降低催化剂比表面积,影响催化剂的活性。

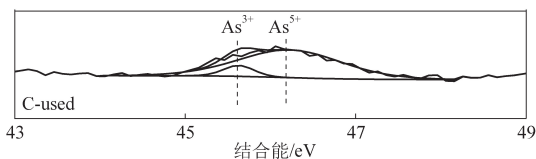


图6 使用一年催化剂的 As 3d XPS 谱图

Fig.6 XPS spectra of As 3d of one-year-used catalyst

表4 砷元素中 As^{3+} 和 As^{5+} 占比

Table 4 Proportion of As^{3+} and As^{5+} in the total arsenic

	C-fresh	C-used
As^{3+} 占比/%	-	10.52
As^{5+} 占比/%	-	89.48

注:“-”表示未检出

(3) 氧元素 XPS 分析

催化剂中的氧化物组成对于 SCR 脱硝反应具有较大的影响。在 SCR 脱硝反应中,吸附氧(O_α)具有更高的迁移率,相较于晶格氧(O_β)和表面氧(O_γ)更为活跃,更有利于 SCR 脱硝反应的进行^[31]。图7为新鲜催化剂和运行一年催化剂的 O 1s XPS 谱图,表5为催化剂样品中 O_α 占总氧量($\text{O}_\alpha + \text{O}_\beta + \text{O}_\gamma$)的比例。由表5可知,C-fresh 与 C-used 中 O_α 所占比例接近,分别为 36.26% 和 36.99%,说明催化剂经过一年使用后,吸附氧并未与砷元素发生较多反应,这也是催化剂能够保持较高活性的原因之一。

表5 总氧量中 O_α 占比

Table 5 Proportion of O_α in the total oxygen

	C-fresh	C-used
O_α 占比/%	36.26	36.99

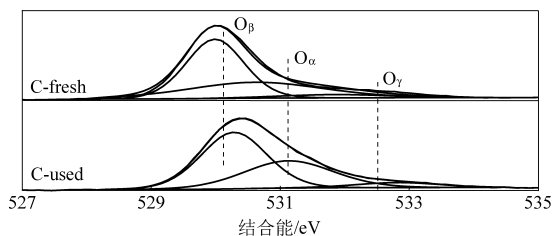


图7 催化剂 O 1s XPS 谱图

Fig.7 XPS spectra of O 1s of different catalysts

3 结 论

对某电厂提供的在高砷燃煤烟气中运行一年的抗砷中毒 SCR 脱硝催化剂和新鲜催化剂进行脱硝活性测试,同时通过 XRF、 N_2 吸附/脱附、XRD 和 XPS 等检测方法进行表征分析,得到以下主要结论:

(1) 该抗砷中毒催化剂使用一年后,在 150~450 $^{\circ}\text{C}$ 的烟气条件下具有与新鲜催化剂相近的脱硝活性,空速为 54 000 h^{-1} 时,运行一年催化剂与新鲜催化剂脱硝效率差值最大为 7.71%;

(2) 运行一年的催化剂中砷累积含量超过 3%,且活性助剂 MoO_3 含量发生明显下降;

(3) 运行一年后,催化剂的比表面积发生小幅度下降,未对催化剂活性造成显著影响;

(4) 运行一年后,催化剂载体 TiO_2 的晶型未发生明显转变;

(5) 运行一年的催化剂中砷主要以 As_2O_5 形式存在,比例达到 89% 以上,但催化剂中 V^{4+} 和 O_α 含量并未出现明显变化,均与新鲜催化剂相近,无明显化学中毒现象;

(6) 结合活性测试和表征分析结果,该催化剂应具有较高的砷容量和稳定的活性位,不易受到烟气中砷成分的毒化,具有十分优异的抗砷中毒性能。

参考文献

- [1] 李俊华. 烟气催化脱硝关键技术研发及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 22.
- [2] 杨延龙. 火电厂氮氧化物减排及 SCR 烟气脱硝技术浅析 [J]. 能源环境保护, 2017, 31 (2): 31-39.
- [3] 李媛, 谭月, 郭小虎, 等. 氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用 [J]. 能源环境保护, 2019, 33 (3): 34-37.
- [4] 顾卫荣, 周明吉, 马薇. 燃煤烟气脱硝技术的研究进展 [J]. 化工进展, 2012, 31 (9): 2084-2092.
- [5] 刘志坦, 姚杰, 庄柯, 等. 燃气轮机与燃煤机组 SCR 脱硝催化剂特性比较 [J]. 中国电力, 2021, 54 (6): 145

- 152.
- [6] 熊丽仙, 栗莉. 燃煤电厂 SCR 脱硝催化剂失活分析及再生应用 [J]. 能源环境保护, 2017, 31 (6): 23-26.
 - [7] 喻小伟, 周瑜, 刘帅, 等. SCR 脱硝催化剂失活原因分析及再生处理 [J]. 热力发电, 2014, 43 (2): 109-113.
 - [8] 贾会珍, 墨文涛, 崔利锋, 等. 失活 SCR 脱硝催化剂的再生处理工艺研究 [J]. 能源环境保护, 2018, 32 (5): 29-33.
 - [9] G Busca, L Lietti, G Ramis, et al. Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NO_x by ammonia over oxide catalysts: A review [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1998, 18: 1-36.
 - [10] 唐志雄, 岑超平, 陈雄波, 等. 平板玻璃工业窑炉烟气中低温 SCR 脱硝中试研究 [J]. 环境工程学报, 2015, 9 (2): 817-822.
 - [11] 蒋进, 夏勇军, 胡筋, 等. 低温 NH_3 -SCR 催化剂及脱硝机理研究进展 [J]. 能源环境保护, 2021, 35 (5): 7-15.
 - [12] I Nova, L Dall'Acqua, L Lietti, et al. Study of thermal deactivation of a de- NO_x commercial catalyst [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2001, 35: 31-42.
 - [13] J R Strege, C J Zygarlick, B C Folkedahl, et al. SCR deactivation in a full-scale coal-fired utility boiler [J]. Fuel, 2008, 87 (7): 1341-1347.
 - [14] L Lisi, G Lasorella, S Malloggi, et al. Single and combined deactivating effect of alkali metals and HCl on commercial SCR catalysts [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2004, 50 (4): 251-258.
 - [15] 王宝冬, 汪国高, 刘斌, 等. 选择性催化还原脱硝催化剂的失活、失效预防、再生和回收利用研究进展 [J]. 化工进展, 2013, 32 (z1): 133-139.
 - [16] 沈伯雄, 熊丽仙, 刘亭. 负载型 V_2O_5 - WO_3 /TiO₂ 催化剂的砷中毒研究 [J]. 燃料化学学报, 2011, 311: 856-864.
 - [17] Y Peng, J H Li, W Z Si, et al. New insight into deactivation of commercial SCR catalyst by arsenic: An experiment and DFT study [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48 (23): 13895-13900.
 - [18] S Pritchard, C DiFrancesco, S Kaneko, et al. Optimizing SCR catalyst design and performance for coal-fired boilers [C]. Proceedings of the EPA/EPRI Symposium on Stationary Combination NO_x Control, 1995: 16-19.
 - [19] I Morita, M Hiram, G T Biel-Awski. Development and commercial operating experience of SCR De NO_x catalysts for wet bottom coal fired boilers [C]. Power-Gen International Conference, 1998.
 - [20] 朱春华, 陆强, 庄柯, 等. 燃煤电厂砷中毒 SCR 脱硝催化剂的失活特性研究 [J]. 应用化工, 2018, 47 (6): 1145-1149.
 - [21] 赵博, 李浙飞, 周卫可, 等. 含砷 SCR 脱硝催化剂再生处理实验研究 [J]. 能源环境保护, 2019, 33 (2): 25-28.
 - [22] 姚燕, 马云龙, 杨晓宁, 等. 高砷煤 SCR 脱硝催化剂中毒失活研究 [J]. 中国电力, 2020, 53 (6): 191-196.
 - [23] X LI, J H LI, Y PENG, et al. Regeneration of commercial SCR catalysts: Probing the existing Forms of arsenic oxide [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49 (16): 9971-9978.
 - [24] Y Peng, W Z Si, X Li, et al. Comparison of MoO_3 and WO_3 on arsenic poisoning V_2O_5 /TiO₂ catalyst: DRIFT and DFT study [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 181: 692-698.
 - [25] 张烨, 徐晓亮, 缪明峰. SCR 脱硝催化剂失活机理研究进展 [J]. 能源环境保护, 2011, 25 (4): 14-18.
 - [26] 李锋, 承志, 张朋, 等. 平板式催化剂在电厂高尘、高砷燃煤烟气脱硝中的应用 [J]. 华电技术, 2010, 32 (5): 8-11.
 - [27] R Khodayari, C U I Odenbrand. Regeneration of commercial TiO₂- V_2O_5 - WO_3 SCR catalysts used in bio fuel plants [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2001, 30 (1-2): 87-99.
 - [28] Y K Yu, C He, J S Chen, et al. Regeneration of deactivated commercial SCR catalyst by alkali washing [J]. Catalysis Communications, 2013, 39: 78-81.
 - [29] D W Kwon, K H Park, S C Hong. The influence on SCR activity of the atomic structure of V_2O_5 /TiO₂ catalysts prepared by a mechanochemical method [J]. Applied Catalysis A: General, 2013, 451: 227-235.
 - [30] 杨勇平, 陆强, 赵莉, 等. 选择性催化还原烟气脱硝催化剂及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2021: 182-187.
 - [31] L Chen, J H Li, M F Ge. The poisoning effect of alkali metals doping over nano V_2O_5 - WO_3 /TiO₂ catalysts on selective catalytic reduction of NO_x by NH_3 [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 170 (2-3): 531-537.