

DOI: 10.19666/j.rlfed.202308388

宽温脱硝催化剂低负荷特性研究

宋玉宝, 姚 燕, 何 川, 王乐乐, 梁俊杰, 朱德力
(西安热工研究院有限公司苏州分公司, 江苏 苏州 215153)

[摘 要] 燃煤机组低负荷运行时, 遇到 SCR 脱硝催化剂硫酸氢铵 (ABS) 失活问题, 对此现象进行了试验研究。结果显示: 1) 烟气温度低于 ABS 凝聚温度时, ABS 在催化剂微孔内逐渐积聚造成堵塞而失活, 而 ABS 凝聚温度与微孔孔径成反比, 与烟气中 NH_3 和 SO_3 体积分数的乘积正相关; 2) 与常规催化剂一样, 孔径 2~20 nm 的微孔仍然是宽温脱硝催化剂的结构主体, 改变不了其在低负荷下 ABS 失活的现象; 3) 基于催化剂 ABS 失活的物理可逆特性, 防治结合仍旧是解决 ABS 问题的根本方法。

[关 键 词] 燃煤机组; 宽温脱硝催化剂; 硫酸氢铵; 凝聚温度; 失活与恢复

[引用本文格式] 宋玉宝, 姚燕, 何川, 等. 宽温脱硝催化剂低负荷特性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 170-175. SONG Yubao, YAO Yan, HE Chuan, et al. Study on low load characteristics of wide temperature denitration catalyst[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 170-175.

Study on low load characteristics of wide temperature denitration catalyst

SONG Yubao, YAO Yan, HE Chuan, WANG Lele, LIANG Junjie, ZHU Deli
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou Branch, Suzhou 215153, China)

Abstract: During the low load operation of coal-fired units, the SCR denitration catalyst may be deactivated by ammonium bisulfate (ABS). The experimental tests are carried out on this phenomenon and the results show that: 1) with the flue gas temperature below the ABS condensation temperature, the catalyst will be deactivated due to the gradual deposition of ABS in the micropores. The ABS condensation temperature is inversely proportional to the micropore diameter, and the ABS concentration is positively related to the product of NH_3 and SO_3 concentrations in the flue gas; 2) the micropores with pore diameters of 2~20 nm are still the main structure of wide temperature denitration catalyst as well as the conventional catalysts, which cannot change its fate of ABS deactivation under low load; 3) the physical reversibility of catalyst ABS deactivation makes "combination of prevention and treatment" still the fundamental method to solve the ABS problem.

Key words: coal-fired unit; wide temperature denitration catalyst; ammonium bisulfate; ABS condensation temperature; deactivation and recovery

燃煤机组采用 SCR 烟气脱硝技术控制 NO_x 排放时, 易发生空气预热器等冷端设备硫酸氢铵 (ABS) 堵塞现象, 也会在机组 0~30% ECR 低负荷下发生 SCR 脱硝催化剂 ABS 失活现象, 但二者作用机理不一样, 本文仅讨论催化剂 ABS 失活现象。

日本日立造船公司^[1]在 1979 年提出 ABS 露点温度与 NH_3 和 SO_3 体积分数的对应关系, Matsuda、Muzio 等人^[2-4]提出催化剂微孔内的 ABS 凝聚温度预测模型。日本 BHK 公司^[5]研究了运行温度和时间对

催化剂 ABS 失活与恢复的影响。美国 CORMETECH 公司^[6]研究了不同尺度微孔内的 ABS 凝聚温度和催化剂在凝聚温度下的运行调整策略。美国 EPRI 总结了 SCR 反应器潜在在低负荷失活、高负荷恢复期间的变化规律^[7]。国外相关研究和运行经验显示:

1) 造成催化剂 ABS 现象的内因是催化剂的微孔结构, 与催化剂配方无关。微孔是脱硝催化剂的基本结构, 对脱硝性能起着关键性作用, 基本上难以改变。

修回日期: 2023-08-08

基金项目: 苏州市重点产业技术创新项目 (SGC2021121)

Supported by: Technological Innovation of Key Industries in Suzhou (SGC2021121)

第一作者简介: 宋玉宝 (1972), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为燃煤锅炉氮氧化物协同控制技术, sybyuyu@126.com。

2) 造成催化剂 ABS 现象的主要外因是烟气中的 SO₃, 在没有 SO₃ 的烟气条件下, 常规催化剂的工作温度非常宽, 可以安全地运行在 200 °C 之下。

3) ABS 造成的催化剂失活是物理可逆失活, 可以在一定范围内控制运行条件使沉积的 ABS 气化而恢复催化剂活性。

4) 催化剂 ABS 失活程度, 取决于烟气中的 SO₃ 浓度和低于最低喷氨温度的运行温度与时间。温度越低、时间越长, 失活越严重, 可逆的程度也越差。

5) 解决催化剂 ABS 问题的正确方法是防治结合, 烟气提温“防”ABS 凝聚, 运行调整“治”理凝聚的 ABS。

2016 年起, 国内开始研究宽温脱硝催化剂。文献[8-9]率先探索脱硝催化剂表面的 ABS 低温分解。文献[10-12]采用表面改性助剂研究 ABS 控制方法, 将催化剂使用温度从 300~420 °C 拓展到 250~420 °C。此外, 在温州电厂 300 MW 机组^[13]、江油电厂烟气旁路^[14]以及和丰电厂 330 MW 机组^[15]上分别进行了宽温脱硝催化剂的中试和示范应用。文献[16-18]对催化剂表面的 ABS 生成与分解控制以及低负荷下的应用做了梳理, 认为宽温脱硝催化剂是实现燃煤机组全负荷脱硝的重要技术手段, 而表面化学改性是控制 ABS 的有效措施。当前, 一些催化剂公司推出宽温脱硝催化剂新产品, 一些催化剂再生公司开展催化剂宽温再生业务。

为探讨表面化学改性对抑制 ABS 在催化剂表面的沉积或者促进 ABS 分解在解决燃煤机组低负荷脱硝问题上的实际功效, 本文在催化剂微孔内 ABS 凝聚规律的研究基础上, 通过实验室试验和现场测试, 评估了宽温脱硝催化剂的实际使用效果, 进一步明确, 防治结合仍旧是当前燃煤机组解决低负荷脱硝催化剂 ABS 失活问题的根本方法。

1 试验材料与方

1.1 催化剂样品

样品取材于实际工程项目的平板式宽温脱硝催化剂, 节距为 7.00 mm, 壁厚为 0.65 mm, 几何比表面积为 281 m²/m³。样品切割组装成 2 种规格: 截面为 150 mm×150 mm、长度为 1 200 mm 的样品, 用于脱硝性能测试; 截面为 50 mm×50 mm、长度为 1 200 mm 的样品, 用于 ABS 失活测试。

1.2 测试方法

利用 ASAP 2460 全自动分析仪分析催化剂微

孔孔径、孔容以及表面积分布, 采用 NGA2000 化学荧光法烟气分析仪测量烟气中 NO 和 O₂ 质量浓度, 采用 Procedure for collection and analysis of ammonia in stationary source (EPA-CTM-027) 标准规定的方法测量烟气中 NH₃ 体积分数, 采用 Determination of sulfuric acid and sulfur dioxide emissions from stationary (EPA-M-8) 标准规定的方法测量烟气中的 SO₃ 体积分数。

1.3 试验台架

采用图 1 所示的催化剂性能检测台架系统测试催化剂的脱硝性能和评估催化剂 ABS 失活特性。

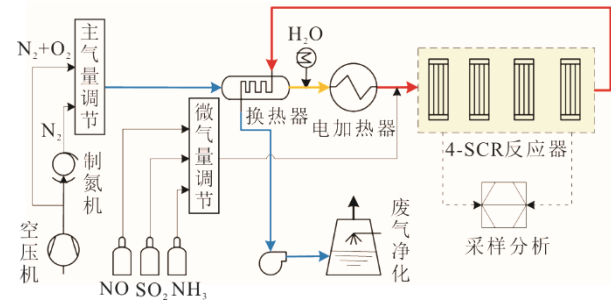


图 1 催化剂性能检测台架系统
Fig.1 Bench reactor system for catalyst test

图 2 为 SCR 脱硝反应器系统。在机组低负荷时, 测试第 1 层催化剂的脱硝效率和氨逃逸体积分数及其随时间的变化。

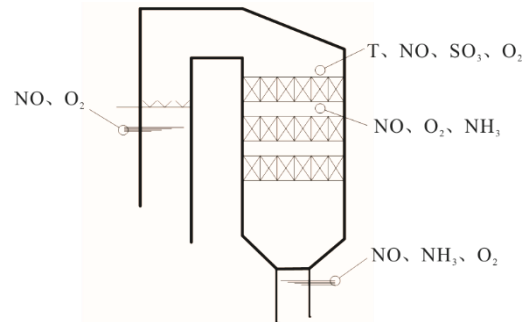


图 2 催化剂性能的现场测试系统
Fig.2 Field test system for catalyst performance

1.4 数据处理

脱硝效率与氨逃逸是催化剂的主要性能指标, 合并为潜能 P (式(1)), 表征催化剂的脱硝能力。

$$P = 0.5 \times \ln \left(\frac{\alpha}{(\alpha - \eta) \times (1 - \eta)} \right) \quad (1)$$

$$\alpha = \eta + \frac{2.05 \times \varphi_{\text{NH}_3}}{\rho_{\text{NO}_x}} \quad (2)$$

式中: P 为潜能; α 为氨氮摩尔比; η 为脱硝效率; φ_{NH_3} 为烟气中 NH₃ 体积分数, $\mu\text{L/L}$; ρ_{NO_x} 为烟气中

NO_x 质量浓度, mg/m³。

催化剂微孔内的 ABS 凝聚温度采用 Matsuda 模型^[2] (式(3)) 计算。以 ABS 凝聚温度为基准, 考虑 ±10 °C 烟气温度分布偏差和 15~25 °C 安全裕量, 得到 SCR 脱硝系统的最低运行温度。

$$P_{\text{NH}_3} \times P_{\text{SO}_3} = 1.14 \times 10^{12} \times e^{\frac{-12\ 679}{R \times (T_{\text{ABS}} + 273.2)}} \quad (3)$$

式中: P_{NH_3} 为烟气中 NH₃ 分压, Pa; P_{SO_3} 为烟气中 SO₃ 分压, Pa; R 为气体常数, J/(K·mol); T_{ABS} 为催化剂 ABS 凝聚温度, °C。

2 试验结果与分析

2.1 ABS 失活试验

在实验室和现场进行宽温脱硝催化剂 ABS 失活试验, 烟气参数见表 1, 测试结果如图 3 所示。由表 1 和图 3 可知: 实验室工况 1, 烟气中 SO₃ 体积分数为 10 μL/L, ABS 凝聚温度为 293 °C, 运行温度为 250 °C, 比凝聚温度低 43 °C, 催化剂的相对潜能 P/P_0 在前 5 h 内降低较慢, 此后逐渐加快, 25 h 后降低到 0.74; 实验室工况 2, 烟气中 SO₃ 体积分数为 25 μL/L, ABS 凝聚温度为 304 °C, 运行温度为 250 °C, 比凝聚温度低 54 °C, 催化剂的相对潜能 P/P_0 降低较快, 5 h 后降低到 0.71。

现场工况, 机组在 25.1% ECR 负荷下, SCR 脱硝系统进口烟气中 SO₃ 体积分数为 23 μL/L, ABS 凝聚温度为 295 °C, 运行温度为 262 °C, 比凝聚温度低 33 °C。第 1 层催化剂的相对潜能 P/P_0 在 6 h 内快速降低到 0.61, 且持续降低的趋势明显。

实验室试验与现场测试均表明, 只要在低于凝聚温度的烟气中运行, 该宽温脱硝催化剂就会发生

ABS 失活, 且烟气中的 SO₃ 体积分数越高, ABS 凝聚温度越高, 越易发生催化剂 ABS 失活现象。

2.2 低负荷脱硝性能

表 2 汇总了国内 3 个宽温脱硝催化剂示范工程的运行数据。案例 A 是本研究所用的平板式催化剂, 机组在 25.1% ECR 负荷 262 °C 烟气温度中运行 6 h, 第 1 层催化剂 ABS 失活造成 SCR 脱硝性能降低 4.9%; 案例 B 和案例 C 均为蜂窝式催化剂, 机组分别在 35.0% ECR 负荷 275 °C 烟气温度、30.0% ECR 负荷 276 °C 烟气温度中长期运行, 烟气温度高于 ABS 凝聚温度, 未发生催化剂 ABS 失活现象。

表 1 催化剂 ABS 失活试验烟气参数

Tab.1 Flue gas parameters of catalyst ammonium bisulfate deactivation test

工况	烟气温度/°C	$\rho_{\text{NO}_x} /$ (mg·m ⁻³)	α	$\rho_{\text{SO}_2} /$ (mg·m ⁻³)	$\rho_{\text{SO}_3} /$ (μL·L ⁻¹)
实验室工况 1	250	791	1.01	3 328	10
实验室工况 2	250	791	1.01	3 328	25
现场工况	262	527	0.82	2 648	23

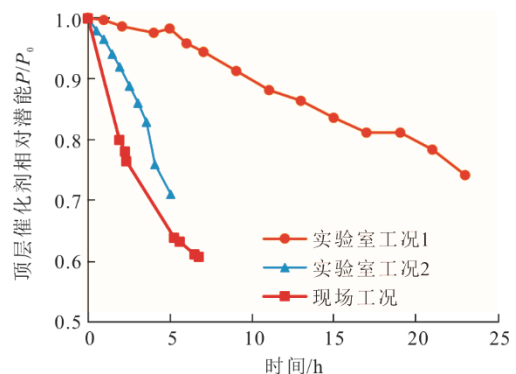


图 3 实验室和现场催化剂 ABS 失活试验
Fig.3 Deactivation test of catalyst due to ammonium bisulfate in laboratory and field

表 2 宽温脱硝催化剂脱硝性能

Tab.2 Performance of wide temperature catalyst

项目	案例 A	案例 B ^[10,13]	案例 C ^[15]
催化剂类型	平板	平板	蜂窝
机组负荷率/%	25.1	25.1 ^①	35.0
烟气运行温度/°C	262	262	275
烟气 SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	2 648	2 648	1 012
烟气 SO ₃ 体积分数/(μL·L ⁻¹)	23.0	23.0	4.1
进口 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	485	500	186
出口 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	50	45	37
脱硝效率/%	89.70	91.00	80.05
氨逃逸体积分数/(μL·L ⁻¹)	1.3	2.2	2.5
催化剂潜能	3.69	3.51	
催化剂 ABS 凝聚温度/°C	295.8	296.4	264.1
SCR 最低运行温度/°C	324.7		283.6
			257.1~272.1 ^②
			273.9~294.5

①在低负荷下失活运行 6 h。

②原文献为 249~253 °C。

由表 2 可见, 相比案例 A, 案例 B 和案例 C 烟气中 SO_3 体积分数差一个数量级, 前者平均为 $23.0 \mu\text{L/L}$, 后者为 $0.7\sim 4.1 \mu\text{L/L}$ 。如前所述, 造成催化剂 ABS 现象的主要外因是烟气中的 SO_3 。优良的烟气条件确保了案例 B 和案例 C 没有发生明显的 ABS 失活现象。可以肯定, 常规催化剂在此优良烟气条件下运行同样不会发生明显的 ABS 失活。

2.3 催化剂 ABS 凝聚规律

2.3.1 微孔结构

图 4 为本研究所用平板式宽温脱硝催化剂样品的孔结构分布。孔容为 $0.294 \text{ cm}^3/\text{g}$, 比表面积为 $101.6 \text{ m}^2/\text{g}$, 微孔孔径主要分布在 $1.7\sim 37.3 \text{ nm}$, 峰值为 11.6 nm 。其中, $2.0\sim 20.2 \text{ nm}$ 微孔的表面积占总面积的 88.2% , 是催化剂的结构主体, 与波纹板^[4]和蜂窝^[19]催化剂的微孔结构特征一致。

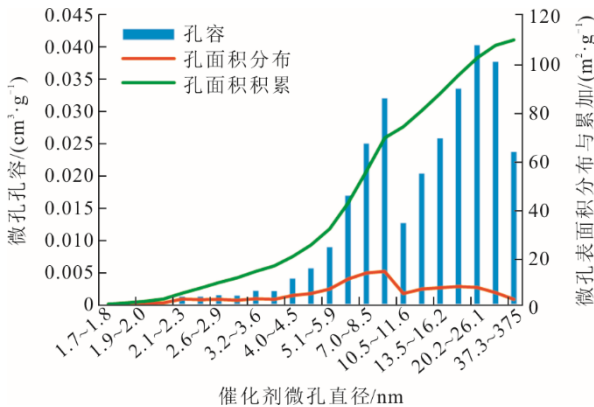


图 4 催化剂孔结构分布

Fig.4 Distribution of catalyst pore structure

2.3.2 ABS 凝聚温度

根据开尔文模型^[20], 微孔孔径越小, 毛细凝聚现象越严重, 对催化剂来说, ABS 凝聚现象就越严重。微孔孔径对 ABS 凝聚程度的影响如图 5 所示。

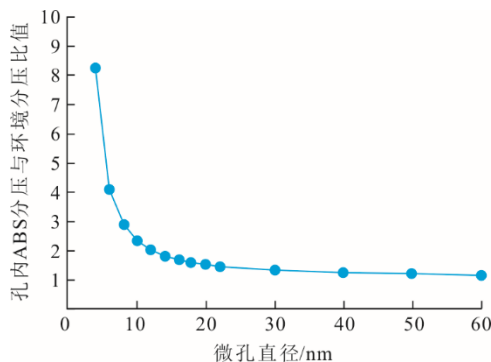


图 5 微孔孔径对 ABS 凝聚程度的影响

Fig.5 The effect of pore size on ABS condensation

由图 5 可知, 在毛细凝聚作用下, 孔径为 4 nm 微孔内的 ABS 分压是环境 ABS 分压的 8.2 倍, 10 nm 和 20 nm 微孔的凝聚效应分别降低到 2.3 倍和 1.5 倍, 而 50 nm 微孔降至 1.2 倍, 毛细凝聚影响已经较弱。

ABS 在不同条件下的凝聚温度^[3]是不一样的, 催化剂微孔孔径越小、烟气中 NH_3 和 SO_3 体积分数越高, ABS 凝聚温度越高, 具体如图 6 所示。由图 6 可知, 在 NH_3 与 SO_3 体积分数乘积为 $5000 \mu\text{L/L} \times \mu\text{L/L}$ 时, 孔径为 $2, 4, 6, 10, 20, 50 \text{ nm}$ 微孔的 ABS 凝聚温度分别为 $329, 303, 295, 288, 283, 280 \text{ }^\circ\text{C}$, 比环境条件下的凝聚温度 $279 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别提高 $50, 24, 16, 9, 4, 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。 20 nm 和 50 nm 微孔对 ABS 凝聚温度的影响较弱; $2\sim 20 \text{ nm}$ 孔径的微孔提供了脱硝反应面积的 $80\%\sim 90\%$, 是催化剂的基本结构主体, 对脱硝性能起着关键性作用, 但也最容易发生 ABS 凝聚, 试图以大孔径微孔解决 ABS 凝聚问题的做法需成倍增加催化剂体积。

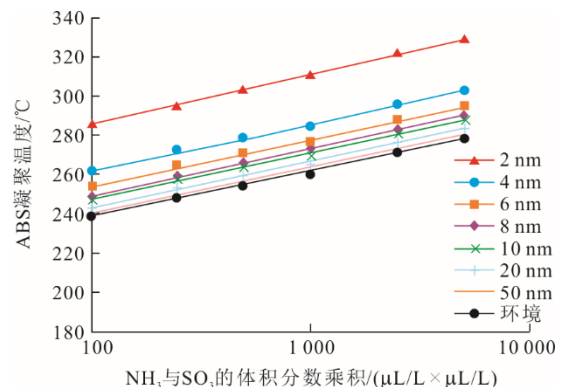


图 6 环境条件与不同孔径下的 ABS 凝聚温度

Fig.6 ABS condensation temperature for bulk and different pore size

图 6 还显示 ABS 凝聚温度与烟气中的 NH_3 和 SO_3 体积分数乘积正相关。一方面, 烟气中没有 SO_3 时, 催化剂不会发生 ABS 失活。奥地利 CERAM 公司在设计运行温度约 $180\sim 230 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的低温脱硝催化剂时, 要求烟气中 SO_2 质量浓度低至 $20\sim 50 \text{ mg/m}^3$ 且不含 SO_3 , 就是为了避免 ABS 失活。催化剂的低温高抗硫特性并不是指抗 ABS 失活, ABS 失活是一个物理过程, 而抗硫特性是指硫对催化剂材料的化学作用; 另一方面, 在 SCR 脱硝反应器内的各层催化剂中, 第 1 层催化剂进口烟气中的 NH_3 和 SO_3 体积分数乘积最大, 这就是 ABS 现象主要发生在第 1 层催化剂的原因。

2.4 ABS 失活的可逆性

模拟配置烟气参数 (SO_3 体积分数为 19.3、33.6 $\mu\text{L/L}$, 温度为 309、298 $^{\circ}\text{C}$), 在测试台架上进行了催化剂试验, 结果如图 7 所示。由图 7 可知: 在前 4 h 低温烟气运行过程中, 工况 T1 的催化剂基本没有失活, 工况 T2 的催化剂相对潜能降低到 0.85 并趋于稳定, 其他 2 个工况的催化剂相对潜能分别降低到 0.82 和 0.72, 且呈现继续降低的趋势; 在后 4 h 比最低运行温度高约 10~19 $^{\circ}\text{C}$ 的高温烟气运行过程中, 工况 T2 的催化剂相对潜能恢复到 1.0, 但相比烟气温度提高了 32 $^{\circ}\text{C}$, 残留的 ABS 阻碍了催化剂相对潜能恢复到 1.1~1.3, 其他 2 个工况的催化剂相对潜能分别恢复到 0.97 和 0.87, 尤其工况 T4 的恢复趋势没有放缓。烟气温度越低和 SO_3 体积分数越高, 催化剂 ABS 失活越快且越严重, 加热恢复^[21]所需时间也越长。日本 BHK 公司还发现^[5], 在 ABS 凝聚温度以下运行超过 10 h 造成的严重失活, 在最低运行温度烟气中加热无法完全恢复。

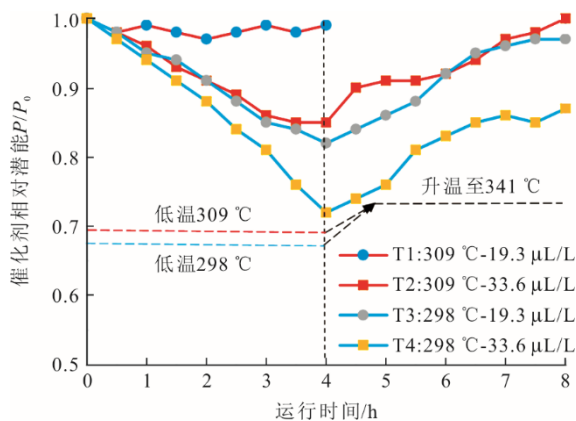


图 7 催化剂 ABS 失活与加热恢复随时间的变化
Fig.7 Change of catalyst ABS deactivation and heating recovery with operating time

试验结果还显示, ABS 在催化剂微孔内的凝聚、气化是与温度相关的气-液物态转化物理过程, 催化剂活性因低温沉积 ABS 而劣化、因高温析出 ABS 而恢复, 且失活与恢复都是逐渐累积的过程^[3], 该物理现象是防(烟气提温防 ABS 凝聚)治(运行调整治理凝聚的 ABS)结合解决催化剂 ABS 问题的基础。美国 CORMETECH 公司^[6]据此在 2004 年提出, 催化剂在机组低负荷烟气温度接近 ABS 凝聚温度下运行, 适度失活的催化剂在额定负荷高温烟气中恢复活性, 提高低负荷下的 SCR 运行灵活性, 并避免昂贵的烟气提温改造, 该运行方法在 Duke Energy Plant 等电厂 20 多台机组上成功应用。

3 结 语

燃煤机组低负荷下的催化剂 ABS 失活现象, 主要内因是催化剂的微孔结构导致的毛细凝聚效应, 决定性外因是烟气中的 SO_3 , 与催化剂配方无关。与常规催化剂相比, 宽温脱硝催化剂没有改变微孔结构特征, 其所依赖的表面化学改性技术, 在宏观上还不足以促成凝聚在催化剂微孔中的 ABS 的分解, 也就无法解决低负荷下的催化剂 ABS 失活问题。而基于 ABS 的气液物态可逆转化特征, 防治结合仍旧是解决催化剂 ABS 问题的根本方法。

[参 考 文 献]

- [1] SALEEM A, GALGANO M, INABA S. Hitachi-Zosen DeNO_x process for fossil fuel-fired boilers[C]. Proceedings of the Second NO_x Control Technology Seminar, Electric Power Research Institute, Denver, 1979.
- [2] MATSUDA S, KAMO T, KATO A, et al. Deposition of ammonium bisulfate in the selective catalytic reduction of nitrogen-oxides with ammonia[J]. Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, 1982, 21(1): 48-52.
- [3] MUZIO L, BOGSETH S, HIMES R, et al. Ammonium bisulfate formation and reduced load SCR operation[J]. Fuel, 2017, 206: 180-189.
- [4] THOGERSEN J R, SLABIACK T, WHITE N. Ammonium bisulphate inhibition of SCR catalysts[R]. Frederikssund: Haldor Topsøe Inc, 2007: 1-16.
- [5] 石崎昌典. 催化剂失活与最低运行温度[C]. 2013 年度脱硝催化剂业主大会暨技术交流会, 日立(中国)有限公司. 杭州, 2013: 1-15.
ISHIZAKI Masanori. Catalyst deactivation and minimum operating temperature[C]. 2013 Denitration Catalyst Owner's Conference and Technical Exchange, Hitachi (China) Co., Ltd.. Hangzhou, 2013: 1-15.
- [6] CHRISTOPHER J. Method for enhanced low load SCR operation[C]. Power Plant Pollutant Control and Carbon Management "MEGA" Symposium. Baltimore, MD, 2016: 1-29.
- [7] MARTZ T, MUZIO L J, BOGSETH S, et al. Summary of selective catalytic reduction system operational issues at low load[R]. Palo Alto: EPRI, 2010: 1021028.
- [8] SHI Y J, SHU H, ZHANG Y H, et al. Formation and decomposition of NH_4HSO_4 during selective catalytic reduction of NO with NH_3 over $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$ catalysts[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 150: 141-147.
- [9] LI C X, SHEN M Q, YU T, et al. The mechanism of ammonium bisulfate formation and decomposition over V/WTi catalysts for NH_3 -selective catalytic reduction at various temperatures[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2017, 19(23): 15194-15206.
- [10] 屈瑞阳. 新型宽温度窗口催化剂选择性催化还原 NO_x 的机理研究[J]. 杭州: 浙江大学, 2017: 88-91.
QU Ruiyang. A mechanistic study on the rational design of SCR catalyst with wide operation temperature window[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 88-91.
- [11] 周佳丽, 马子然, 赵俊平, 等. 杂多酸改性 V-Mo/Ti-W 催化剂的宽温 SCR 脱硝性能[J]. 化工进展, 2022, 41(7): 3615-3623.

- ZHOU Jiali, MA Ziran, ZHAO Junping, et al. HPAs-modified V-Mo/Ti-W catalysts for the selective catalytic reduction of NO_x over a wide temperature range [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(7): 3615-3623.
- [12] 陈传敏, 常昊, 贾文波, 等. Mn 掺杂 VWTi 催化剂宽温区脱硝实验研究[J]. 燃料化学学报, 2022, 50(3): 357-365.
- CHEN Chuanmin, CHANG Hao, JIA Wenbo, et al. Experimental study on Mn-doped VWTi catalyst for denitrification in wide temperature range[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2022, 50(3): 357-365.
- [13] 刘海蛟, 程纪东, 孙科, 等. 燃煤电厂宽温催化剂全负荷脱硝的应用研究[J]. 上海节能, 2017(2): 64-68.
- LIU Haijiao, CHENG Jidong, SUN Ke, et al. Study on wide temperature catalyst full load denitrification application at coal-fired power plant [J]. Shanghai Energy Conservation, 2017 (2): 64-68.
- [14] 周佳丽, 马子然, 王宝冬, 等. 燃煤电厂宽温催化剂的开发与应用示范[J]. 电力科技与环保, 2019, 35(2): 47-52.
- ZHOU Jiali, MA Ziran, WANG Baodong, et al. Development and application demonstration of SCR catalyst for coal-fired power plants in wide temperature[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2019, 35(2): 47-52.
- [15] 赵俊平, 马子然, 赵春林, 等. 330 MW 机组宽温脱硝催化剂布置方案设计与运行效果分析[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(6): 51-56.
- ZHAO Junping, MA Ziran, ZHAO Chunlin, et al. Design of wide temperature De NO_x catalyst and operation effect analysis for a 330 MW coal-fired power plant[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2021, 37(6): 51-56.
- [16] 唐昊, 李慧, 杨江毅, 等. NH₃-SCR 工艺中硫酸铵盐的生成与分解机理研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(3): 822-831.
- TANG Hao, LI Hui, YANG Jiangyi, et al. Research progress on the formation and decomposition mechanism of ammonium-sulfate salts in NH₃-SCR technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(3): 822-831.
- [17] 尹子骏, 苏胜, 王中辉, 等. 燃煤烟气中 SO₃ 与 NH₄HSO₄ 生成特性及其控制方法研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(4): 2328-2337.
- YIN Zijun, SU Sheng, WANG Zhonghui, et al. Research progress on the characteristics and control methods of SO₃ and NH₄HSO₄ formation in coal-fired flue gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(4): 2328-2337.
- [18] 马子然, 周佳丽, 马静, 等. 燃煤电厂脱硝催化剂宽负荷运行的现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8415-8430.
- MA Ziran, ZHOU Jiali, MA Jing, et al. Current status and development of wide-load operation of SCR catalysts in coal-fired power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8415-8430.
- [19] 陈进生, 商雪松, 赵金平, 等. 烟气脱硝催化剂的性能检测与评价[J]. 中国电力, 2010, 43(11): 64-69.
- CHEN Jinsheng, SHANG Xuesong, ZHAO Jinping, et al. Performance determination and evaluation of denitration catalyst in flue gas[J]. Electric Power, 2010, 43(11): 64-69.
- [20] 印永嘉, 李大珍. 物理化学简明教程[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2007: 288-292.
- YIN Yongjia, LI Dazhen. Concise course of physical chemistry[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2007: 288-292.
- [21] 梅尾清志郎. 日立造船低温脱硝催化剂[C]. 第七次生活垃圾焚烧处理技术与设备研讨会, 中国城市环境卫生协会, 宁波, 2017: 11-15.
- UMEI Kiyoshiro. Hitachi Zosen low temperature denitration catalyst[C]. The 7th Conference on Municipal Solid Waste Incineration Treatment Technology and Facility. China Association of Urban Environmental Sanitation, Ningbo, 2017: 11-15.

(责任编辑 邓玲惠)