

典型 W 型锅炉 SCR 脱硝催化剂全寿命管理

姚燕¹, 杨晓宁¹, 曾多², 何川¹, 孔凡海¹, 王乐乐¹

1. 西安热工研究院有限公司苏州分公司, 江苏 苏州 215153

2. 华能重庆珞璜发电有限责任公司, 重庆 402269

Life-cycle Management of SCR Denitrification Catalyst for W-flame Boiler

YAO Yan¹, YANG Xiaoning¹, ZENG Duo², HE Chuan¹, KONG Fanhai¹, WANG Lele²

1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou Branch, Suzhou, Jiangsu 215153

2. Huaneng Chongqing Luohuang Power Generation Co., LTD., Chongqing 402269

ABSTRACT: The selective catalytic reduction (SCR) denitrification system of a typical W-flame boiler in a power plant was taken as the research object. According to the characteristics of the project, such as high temperature, high sulfur, high dust and high inlet NO_x concentration, the whole process life management technology of SCR catalyst was adopted. Various improvement measures, such as catalyst addition and regeneration to improve were applied to meet the NO_x emission requirements. Through catalyst selection and evaluation to ensure that no dust deposit and no wear on the catalysts under high ash conditions. On the premise of ammonium bisulfate control, the balance between the amount of ammonia escape and SO₂/SO₃ conversion rate were optimized to alleviate air preheater blockage and reduce unit operation risk. In addition, physicochemical properties of the different sampling catalysts, such as the crystal form, micro-morphology, BET specific area and surface chemical compositions were analyzed to provide theoretical guidance for the operation management of the catalyst.

KEY WORDS: W-flame boiler; SCR catalyst; life-cycle management; physical and chemical characterization

摘要: 以某典型“四高”W型锅炉选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)脱硝系统为研究对象, 针对其高温、高硫、高尘以及高入口NO_x浓度的特点, 采取SCR脱硝催化剂全过程寿命管理技术, 通过催化剂加装、再生等多种提效措施实现机组NO_x达标排放; 通过催化剂选型评估保证机组在高灰条件下不堵灰、不磨损; 以空气预热器硫酸氢铵防治为目标, 优化SCR脱硝氨逃逸和SO₂/SO₃转化率之间的协调关系, 缓解空气预热器堵塞风险。此外, 通过

催化剂理化表征, 对不同运行寿命催化剂样品的微观晶型、形貌、BET比表面积及化学成分进行了表征分析, 解释了催化剂的失活成因, 为催化剂的寿命管理提供了理论依据。

关键词: “四高”锅炉; SCR催化剂; 全寿命管理; 失活成因; 硫酸氢铵防治

引言

选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)技术作为燃煤电厂应用最为广泛的脱硝控制手段, 催化剂是整个技术工艺的核心, 是保障氮氧化物达标排放和机组安全运行的关键, 其性能评价以及寿命管理是保证机组安全经济运行的保障^[1]。SCR脱硝催化剂全过程寿命管理的目的是在最经济的预算下, 优化机组运行, 达到最优污染物控制策略^[2]。催化剂寿命管理不仅仅涉及催化剂性能检测、加装或者换装, 广义的催化剂全过程寿命管理还包括机组催化剂选型评估、NO_x减排要求、氨逃逸控制指标、催化剂体积量评估等方面^[3-4]。作为主要燃用无烟煤和贫煤的锅炉, “W”型火焰锅炉存在典型的“四高”现象, 即燃用煤硫份高、灰份高、省煤器出口烟温高、NO_x浓度高^[5], 这对脱硝催化剂的选型、运行、维护等寿命管理环节提出了更高的要求。在国内, 尚未系统开展“W”火焰锅炉脱硝催化剂的持续检测及寿命评价的研究。

该文以某电厂典型660MW“W”火焰锅炉为研究对象(下文称某电厂), 持续对催化剂取样进行实验室检测评估, 分析影响催化剂寿命的主要因素, 针对性制定应对方案, 为“W”火焰锅炉脱硝催化剂的选型、运行维护等寿命管理工作提供借鉴。

基金项目: 中国华能集团科技项目“燃煤耦合污泥发电对SCR催化剂影响及对策研究”(HNKJ21-HF208)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. “Study on the influence of coal-fired coupling sludge power generation on SCR catalysts and countermeasures”(HNKJ21-HF208).

1 研究内容及方法

1.1 机组现状

“W”火焰锅炉燃料燃尽性差，飞灰和大渣可燃物含量在15%以上，粉尘含量达到 $45\text{g}/\text{m}^3$ 以上，设计煤种收到基硫含量约为4.0~4.5%，典型的高灰高硫。表1为某电厂600MW机组的SCR反应器入口烟气参数。

表1 SCR反应器入口烟气参数
Table1 Flue gas parameters of SCR reactor inlet

项目	内容	数值	备注
污染物浓度	NO _x 浓度/(mg/m ³)	1200	干基、标态、6%O ₂
	SO ₂ @6%O ₂ , 干基/(mg/m ³)	14000	—
	SO ₃ @6%O ₂ , 干基/(mL/L)	175	—
	飞灰浓度/(g/Nm ³)	49	—
省煤器出口烟气参数	机组负荷/MW	600	BEGR 工况
	省煤器出口湿烟气量/(m ³ /h)	1920000	湿基
	省煤器出口烟气温度/°C	410	—

从表中可以看出，该机组省煤器出口温度达到410℃，SCR入口NO_x浓度高达 $1200\text{mg}/\text{m}^3$ ，SO₂浓度为 $14000\text{mg}/\text{m}^3$ 。高硫煤项目为抑制硫酸氢铵的生产，对氨逃逸控制显得尤为重要^[6-7]。该项目在保证出口NO_x达标情况下，控制氨逃逸不大于 $2\mu\text{L}/\text{L}$ ，SO₂/SO₃转化率不大于0.8%，催化剂脱硝性能要求和SO₂/SO₃转化率控制均具有较大压力。

1.2 运行管理策略

自2012年11月某电厂SCR脱硝装置投运以来至今，随着催化剂脱硝性能的下降和NO_x排放控制要求的提高，某电厂采取了不同的催化剂运行管理方案：初装两层催化剂，设计脱硝效率大于89%；运行15,500h时，对初装催化剂脱硝性能评估后加装了第三层备用层催化剂；运行28000h时，为适应新的NO_x排放要求，对机组进行了低氮改造控制SCR入口NO_x浓度，同时对两层初装层催化剂进行了再生处理，3层整体脱硝效率要求大于93%。

表2 SCR催化剂运行方案列表
Table 2 List of catalyst operation scheme

运行方案	催化剂层数/层	脱硝效率/%	运行时间/h	体积量/m ³
初装两层	2	89	4000	438.4
加装一层备用层	3	89	15500	657.6
初装两层催化剂再生	3	93	28000	657.6

1.3 全寿命管理研究

催化剂寿命作为一个设计参数，是一个具体的值但并不是催化剂固有特性，每个项目应根据脱硝要求、机组运行状况确定合适的催化剂寿命时间。在一个寿命期内，脱硝效率、氨逃逸、SO₂/SO₃转化率3个参数必须同时满足性能指标要求，以保障实验室SCR脱硝催化剂检测评价的现场应用性和指导性。而催化剂不同运行时间下活性的检测和评估，为催化剂再生及更换等运行管理提供了依据。

针对某电厂W火焰锅炉脱硝装置的不同控制要求，通过定期对催化剂进行取样检测分析，对不同运行状况下的催化剂取样进行检测和性能评估，完成了初装性能诊断、加装检测以及再生运行评估的全寿命管理，保障了脱硝环保排放要求和机组的安全运行。

2 结果与讨论

2.1 SCR催化剂全寿命脱硝评估

针对机组出口NO_x排放要求，分别在不同运行时间下对催化剂进行了检测评估，催化剂运行管理曲线见图1。2层催化剂在4000h取样检测时，在89%效率下氨逃逸为 $1.8\mu\text{L}/\text{L}$ ；催化剂在运行15,500h之后进行性能检测，两层催化剂串联脱硝效率为84.0%时，氨逃逸已达到 $5.1\mu\text{L}/\text{L}$ 。文献^[7]对催化剂体积量评估指出，氨逃逸控制越严格，对催化剂体积量要求也越高。加装第三层催化剂后氨逃逸降低值 $0.5\mu\text{L}/\text{L}$ ，脱硝性能得到保障。随着运行时间增加，催化剂相对潜能下降，氨逃逸增加，此时对两层初装层进行了再生处理，以达到恢复脱硝性能和控制氨逃逸小于 $2.0\mu\text{L}/\text{L}$ 的目的。

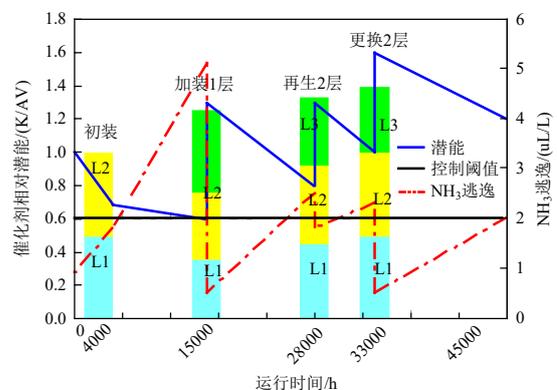


图1 催化剂运行管理曲线

Fig. 1 Catalyst operation management curve

表3为历次催化剂取样检测数据。根据图1所示，若两层初装催化剂经再生后经过一段时间运

行, 3层催化剂无法满足出口 NO_x 浓度小于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 要求, 则需要采取催化剂更换方案以控制 NO_x 排放和氨逃逸。

表3 脱硝性能检测结果

Table 3 Results of DeNO_x Performance

名称	运行时间/h	氨氮摩尔比 / MR	入口 NO_x 均值 / (mg/m^3)	出口 NO_x 均值 / (mg/m^3)	脱硝效率 / %	氨逃逸 / ($\mu\text{L}/\text{L}$, 6% O_2)
第1次取样	4000	0.844	1196.3	200.8	83.2	1.8
第2次取样	15500	0.85	1202.3	192.9	84	5.1
第3次取样	28000	0.837	1210.4	198.5	83.6	0.5
第4次取样	33000	0.941	701	50	93.7	1.7
换装评估	—	0.937	700	45	93.6	0.5

2.2 SCR催化剂磨损与积灰

脱硝系统运行过程中, 受反应器内烟气流速、粉尘特性(浓度、硬度)、流场均匀性、吹灰措施等因素影响, 反应器内可能出现大面积飞灰沉积、催化剂模块磨损等状况^[8]。本项目粉尘含量达到 $49\text{g}/\text{m}^3$, 但未发生大面积积灰或者催化剂冲刷坍塌等问题。该项目催化剂选型为平板式催化剂, 平板式催化剂特有的高开孔率和优良的振动特性, 一定程度上减缓了飞灰在孔道内的聚积和对活性物质的冲刷^[8-9]。此外, 针对高灰特性, 催化剂模块上方还设置了大颗粒拦截网, 这有效预防了大颗粒飞灰对催化剂的磨损; 蒸汽吹灰器以及声波吹灰器的合理布置和运行也降低了飞灰在催化剂模块上的富集^[10]。



(a) 模块检查

(b) 催化剂板体图

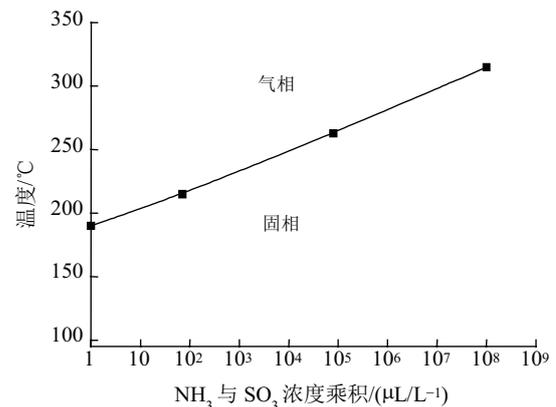
图2 反应器模块及板体检查图

Fig. 2 Module inspection pictures

2.3 硫酸氢铵堵塞控制

有研究表明, 烟气中 NH_3 浓度和 SO_3 浓度乘积是影响硫酸氢铵沉积温度的重要参数, 3者关系如图3所示^[11]。文献[12]指出, 随着 NH_3 浓度和

SO_3 浓度的增加, 硫酸氢铵的生成温度也随之降低, 在反应物浓度为 $5\sim 40\mu\text{L}/\text{L}$ 时, 硫酸氢铵的峰值温度可达到 $180\sim 240\text{ }^\circ\text{C}$, 而且与 NH_3 相比, SO_3 更能促进硫酸氢铵的生成。W火焰锅炉烟气中 SO_x 浓度极高, 控制 SO_2/SO_3 转化率可以一定程度上减少硫酸氢铵的生成, 保证下游设备的安全运行。催化剂活性成分 V_2O_5 含量、催化剂壁厚、催化剂类型等都是影响 SO_2/SO_3 转化率的重要因素^[13-14]。

图3 NH_3 和 SO_3 浓度乘积与硫酸氢铵形成的影响^[11]Fig. 3 Effect of NH_3 and SO_3 concentration on formation of ammonium hydrogen sulfate

由于该项目 SO_2 浓度高, SO_3 相对浓度范围为 $36\sim 45\mu\text{L}/\text{L}$, 若氨逃逸大于 $2\mu\text{L}/\text{L}$, 这势必造成下游空预器中低温区域出现硫酸氢铵富集, 造成积灰速率增加以及端面腐蚀, 影响机组安全运行^[12,15]。因此, 本项目选取具有低 SO_2 转化率优势的平板催化剂^[13-14], 初装2层催化剂的 SO_2/SO_3 转化率要求控制在 0.80% 以下。

对硫酸氢铵的控制除采用低转化率的催化剂外, 采用低硫燃料以及掺烧石灰石或者喷入钙镁吸附剂等降低烟气中 SO_3 浓度效果也极为明显^[16]。防止过量喷氨、调整氨氮分布均匀性以及提高催化剂脱硝性能则可降低烟气中氨逃逸量^[11]。该项目依据催化剂性能变化及时进行运行方案调整, 整个运行阶段未发生严重的空预器堵塞状况。

2.4 催化剂表征分析

历次取样催化剂样品的 XRD 分析检测结果见图4, 在 2θ 为 25.55° , 37.15° , 48.35° , 54.15° 和 55.35° 等处出现典型锐钛型 TiO_2 的衍射峰^[2], 催化剂没有出现因高温烧结而造成的锐钛型向金红石晶态变化的情况, 未在 20.26° 、 30.52° 、 34.42° 处出现活性成分 V_2O_5 的聚合态^[17], 也未出现 MoO_3 ($2\theta=25.70^\circ$ 、 38.98°) 的衍射峰。研究表明, 钒含量在 5% 以下的钛基钒系催化剂在 873K 处理下出现 V_2O_5 ^[18], 该项目未

发生高温烧结，活性成分分散均匀未出现团聚。

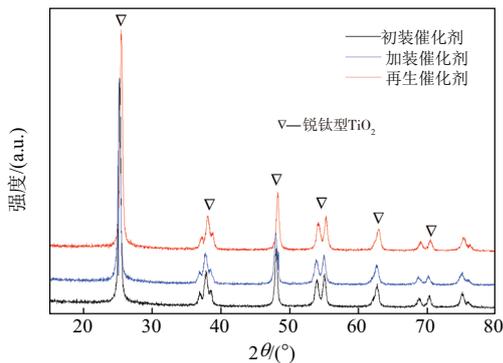
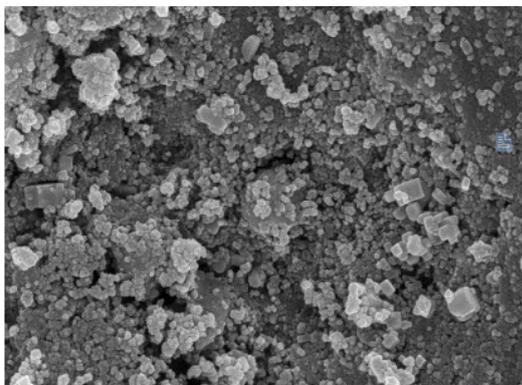


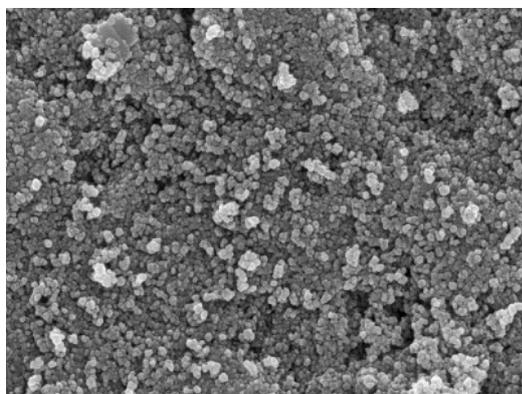
图 4 催化剂晶态分析图

Fig. 4 XRD-profiles of catalysts

图5为运行15500h的在役催化剂和运行28800h后经再生处理催化剂的电镜扫描图。从图上可以看出，2次取样催化剂颗粒均匀分散，未发生烧结团聚现象，这也与XRD检测结果相一致。此外，与在役催化剂相比，再生后催化剂表面因飞灰沉积造成的杂质减少，这也是恢复催化剂表面活性位点和提高脱硝性能的主要原因^[19]。



(a) 在役催化剂



(b) 再生催化剂

图 5 催化剂 SEM 图

Fig. 5 SEM images of catalysts

图6为不同运行时间下催化剂样品的化学成分

相对含量示意图，随着运行时间的增长，除去迎风端活性成分吹刷流失外，催化剂板上活性成分 V_2O_5 以及 WO_3 等含量也明显降低。由于粉尘沉积，催化剂表面的 SO_3 、 P_2O_5 、 Fe_2O_3 、 K_2O 等物质相对百分含量出现增加状况。活性物质的冲刷流失以及粉尘覆盖可造成催化剂脱硝性能的下降。本项目中未发现 As_2O_3 、 HgO 等重金属物质的大量富集，这也与催化剂脱硝性能未出现异常下降的结论一致。从图中可以看出，经再生处理后催化剂表面 SO_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 CaO 含量明显减低， V_2O_5 和 MoO_3 含量增加，SCR 催化剂再生过程是一个去处催化剂表面及孔道积灰、补充活性成分的过程，活性位点的恢复以及活性成分的增加有效地恢复并提高催化剂的脱硝性能^[19]。

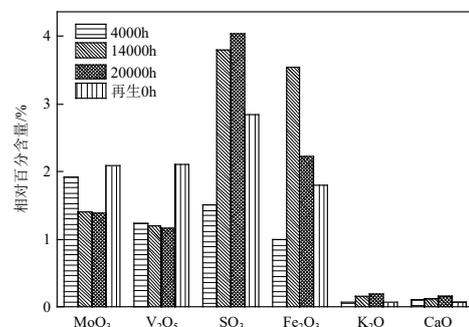


图 6 催化剂表面元素百分含量比例图

Fig. 6 XRF-profiles of catalysts

表4为催化剂的微观比表面积测试结果，从表中看出，初装催化剂比表面积为 $84.9m^2/g$ ，经4000h运行后下降至 $52.0m^2/g$ ，持续运行至15500h时降低为 $40.6m^2/g$ ，经再生处理后催化剂的比表面积提高为 $55.4m^2/g$ 。催化剂微孔比表面积的大小反映活性位点的分布情况，随运行时间出现下降趋势，排除催化剂碱金属或者砷等重金属中毒外，比表面积的降低一般是由于烟气中飞灰沉积到催化剂微孔内造成的。微观比表面积的降低不利于 NO 和 NH_3 在活性位点的充分接触和扩散，是造成催化剂脱硝性能下降的原因之一^[20]。再生处理使得催化剂微观比表面积恢复，其脱硝性能也随之提高^[19]。

表 4 微观比表面积检测结果

Table 4 Result of Micro Specific Surface Area

样品	运行时间 /h	BET 比表面积 (m^2/g)
在役催化剂	4000	52.0
在役催化剂	15500	40.6
加装新催化剂	0	84.9
再生催化剂	33000	55.4

3 结论

1) 对于 W 火焰锅炉类型的高脱硝性能项目, 催化剂体积量是保障其安全运行的基本, 催化剂加装、再生、更换等提效措施为机组 NO_x 稳定控制提供了经济可靠的保障。

2) 通过 SCR 催化剂全寿命管理技术, 对催化剂选型、防积灰等方面进行综合考虑, 有效降低了催化剂磨损坍塌的风险, 保障了机组的安全运行。

3) 对于高脱硝效率和高硫的 W 火焰锅炉项目, 优化 SCR 氨逃逸和转化率之间的协调关系, 可以缓解空预器硫酸氢铵堵塞风险, 保障机组整体安全运行。

参考文献

- [1] HANS Jensen-Holm, NAN-YU T opsøe, 崔建华. 选择催化还原(SCR)脱硝技术在中国燃煤锅炉上的应用(上) [J]. 热力发电, 2007(8): 13-18.
HANS Jensen-Holm, NAN-YU T opsøe, CUI Jianhua. Application of SCR denitrification technology onto coal-fired boilers in China[J]. Thermal Power, 2007(8): 13-18(in Chinese).
- [2] 姚燕, 杨晓宁, 孔凡海, 等. 燃煤电厂蜂窝式 SCR 催化剂性能检测评估研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(S1): 112-117.
YAO Yan, YANG Xiaoning, KONG Fanhai, et al. Performance analysis and evaluation of honeycomb SCR catalysts in coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 112-117(in Chinese).
- [3] 赵瑞, 刘毅, 廖海燕, 等. 火电厂脱硝催化剂寿命管理现状及发展趋势 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 134-138.
ZHAO Rui, LIU Yi, LIAO Haiyan, et al. Status and development tendency of denitration catalyst lifemanagement in thermal power plant[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 134-138(in Chinese).
- [4] 王乐乐, 宋玉宝, 杨晓宁, 等. 火电厂 SCR 运行性能诊断技术 [J]. 热力发电, 2014, 43(10): 95-99.
WANG Lele, SONG Yubao, YANG Xiaoning, et al. A performance diagnostic technology for SCR equipments in power plant[J]. Thermal Power, 2014, 43(10): 95-99(in Chinese).
- [5] 邓伟力, 陈冬林, 刘良华, 等. W 火焰锅炉机组低氮燃烧、SNCR、SCR 联合脱硝技术 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(2): 88-93.
DENG Weili, CHEN Donglin, LIU Lianghua, et al. Combined denitrification by low NO_x burning, SNCR and SCR for W-flame fired boilers[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 15(2): 88-93(in Chinese).
- [6] 朱珍平, 刘振宇, 牛宏贤, 等. V₂O₅/AC 催化剂低温催化的 NO-NH₃-O₂ 反应—SO₂, V₂O₅ 负载量和反应温度的影响 [J]. 中国科学(B 辑), 2000, 30(2): 154-159.
ZHU Zhenping, LIU Zhenyu, NIU Hongxian, et al. V₂O₅/AC catalyst catalyzed NO-NH₃-O₂ reaction—SO₂, V₂O₅ load and the effect of reaction temperature [J]. Scientia Sinica(Part B), 2000, 30(2): 154-159(in Chinese).
- [7] 黎耘. 与催化剂相关的 SCR 脱硝系统设计问题的探讨 [C] // 第十一届全国燃煤二氧化硫、氮氧化物污染治理技术暨“十一五”烟气脱硫脱氮技术创新与发展交流会论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2007: 30-37.
LI Yun. Discussion on the design of SCR denitrification system related to catalyst[C]// “Eleventh Five-Year Plan” Meeting on Innovation and Development of Flue Gas desulphurization and Nitrogen Removal Technology. Beijing: Chinese Society of Environmental Sciences, 2007: 30-37(in Chinese).
- [8] 王方勇, 李文杰. W 型锅炉 SCR 脱硝装置积灰原因分析与治理 [J]. 中国电力, 2019, 52(2): 178-184.
WANG Fangyong, LI Wenjie. Analysis and treatment of ash deposition in SCR denitration equipments of W boiler[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 178-184(in Chinese).
- [9] 李锋, 於承志, 张朋, Holger Michaelis. 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.
LI Feng, YU Chengzhi, ZHANG Peng, et al. Application of flat-plate catalyst in flue gas denitrification with high dust and high arsenic in power plant[J]. Huadian Technology, 2010, 32(5): 8-11(in Chinese).
- [10] 金理鹏, 谢新华, 黄飞, 等. SCR 脱硝装置大颗粒灰拦截技术试验研究 [J]. 中国电力, 2018, 51(2): 156-161.
JIN Lipeng, XIE Xinhua, HUANG Fei, et al. Experimental study on the technology of large particle ash interception for SCR De-NO_x equipment[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 156-161(in Chinese).
- [11] 马双忱, 金鑫, 孙云雪, 等. SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵的生成机理与控制 [J]. 热力发电, 2010, 39(8): 12-17.

- 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, 2010, 39(8): 12–17(in Chinese).
- [12] 杨建国, 杨炜樱, 郑方栋, 等. NH_3 和 SO_3 对硫酸氢铵和硫酸铵生成的影响 [J]. 燃料化学学报, 2018, 46(1): 92–97.
- YANG Jianguo, YANG Weiyong, ZHENG Fangdong, et al. Effects of NH_3 and SO_3 on the generation of ammonium bisulfate and ammonium sulfate[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2018, 46(1): 92–97(in Chinese).
- [13] 李锋, 於承志, 张朋, Holger Michaelies. 低 SO_2 氧化率脱硝催化剂的开发 [J]. 电力科技与环保, 2010, 26(4): 18–21.
- LI Feng, YU Chengzhi, ZHANG Peng, et al. Development of SCR De NO_x catalyst with low SO_2 oxidation [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2010, 26(4): 18–21(in Chinese).
- [14] 唐昊, 李文艳, 王琦, 等. 商用选择性催化还原催化剂 SO_2 氧化率控制研究进展 [J]. 化工进展, 2017, 36(6): 2143–2149.
- TANG Hao, LI Wenyan, WANG Qi, et al. Research progress on the control of SO_2 oxidation by commercial SCR catalyst[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(6): 2143–2149(in Chinese).
- [15] 张志强, 宋国升, 陈崇明, 等. 某电厂 600MW 机组 SCR 脱硝过程氨逃逸原因分析 [J]. 电力建设, 2012, 33(6): 67–70.
- ZHANG Zhiqiang, SONG Guosheng, CHEN Chongming, et al. Cause analysis of ammonia escape in SCR flue gas denitrification process for 600 MW units [J]. Electric Power Construction, 2012, 33(6): 67–70(in Chinese).
- [16] 刘宇, 单广波, 闫松, 等. 燃煤锅炉烟气中 SO_3 的生成、危害及控制技术研究进展 [J]. 环境工程, 2016, 34(12): 93–97.
- LIU Yu, SHAN Guangbo, YAN Song, et al. Progress in research formation, harm and control technique of SO_3 in flue gas of coal-fired boiler[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(12): 93–97(in Chinese).
- [17] SHANG Xuesong, LI Jianrong, YU Xiaowei, et al. Effective regeneration of thermally deactivated commercial V–W–Ti catalysts [J]. Front Chem. Sci. Eng., 2012, 6(1): 38–46.
- [18] HO Jeong Chaea, NAM In-Sik, HAM Sung-Won, et al. Characteristics of vanadia on the surface of $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Ti-PILC}$ catalyst for the reduction of NO_x by NH_3 [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2004(53): 117–126.
- [19] 王丽朋, 陈宝康, 姚燕, 等. 脱硝催化剂失活及再生实验 [J]. 热力发电, 2017, 46(11): 67–72.
- WANG Lipeng, CHEN Baokang, YAO Yan, et al. Experimental study on deactivation and regeneration performance of denitration catalysts[J]. Thermal Power, 2017, 46(11): 67–72(in Chinese).
- [20] 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.
- YAO Yan, MA Yunlong, YANG Xiaoning, et al. Deactivation of honeycomb SCR catalysts in high-arsenic coal-fired power plant[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 191–196(in Chinese).



姚燕

收稿日期: 2023年6月20日

作者简介:

姚燕(1985), 女, 工学博士, 高级工程师, 主要从事大气污染控制方面的研究工作。E-mail: yaoyan11141@126.com。