

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212139

碱基吸收剂脱除SO₃试验研究

宋玉宝¹, 谢新华¹, 何川¹, 宋友亚², 魏德军²,
赵雪成¹, 马云龙¹, 方朝君¹

(1.西安热工研究院有限公司苏州分公司, 江苏 苏州 215153;
2.华能湖南岳阳发电有限责任公司, 湖南 岳阳 414002)

[摘要] 燃煤机组选择性催化还原(SCR)烟气脱硝系统在运行过程中, 烟气中的NH₃与SO₃在特定温度下生成液态硫酸氢铵(ABS), 易在0~40%低负荷造成脱硝催化剂ABS失活和加剧空气预热器冷端换热元件ABS灰垢堵塞。碱粉喷射脱除SO₃是控制ABS的重要方法, 但现有的格栅式多喷嘴装置存在喷射不均、SO₃脱除效率低等问题。研发了立式气固流态化混合分配装置, 改善了烟道截面的粉体喷射均匀性。中试试验结果显示: SCR脱硝系统上游烟气中的SO₃脱除效率达到55.6%, 催化剂ABS结露温度降低8.6℃, 最低连续喷氨运行温度降低11.9℃, 可拓展催化剂安全运行温度下限, 并减轻对机组调峰负荷下限的制约; 空气预热器上游SO₃脱除效率达到84.3%, ABS沉积影响系数降低86.9%, 可延缓空气预热器冷端的ABS灰垢堵塞; 烟囱SO₃排放浓度约为2.5~3.4 mg/m³, 可消除蓝色烟羽。

[关键词] 燃煤机组; SO₃; 碱基吸收剂; 气固流态化; CFD模拟; 中试试验

[引用本文格式] 宋玉宝, 谢新华, 何川, 等. 碱基吸收剂脱除SO₃试验研究[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 122-126. SONG Yubao, XIE Xinhua, HE Chuan, et al. Experimental study on SO₃ removal by alkaline absorbent[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 122-126.

Experimental study on SO₃ removal by alkaline absorbent

SONG Yubao¹, XIE Xinhua¹, HE Chuan¹, SONG Youya², GUO Dejun²,
ZHAO Xuecheng¹, MA Yunlong¹, FANG Zhaojun¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. Suzhou Branch, Suzhou 215153, China;
2. Huaneng Hunan Yueyang Power Generation Co., Ltd., Yueyang 414002, China)

Abstract: During the operation of selective catalytic reduction (SCR) flue gas denitration system of coal-fired units, NH₃ and SO₃ in the flue gas generate liquid ammonium bisulfate (ABS) at a specific temperature, which is viscous and easy to cause catalyst deactivation at 0~40% low load due to micropore plugging and aggravate the fly ash blockage of heat exchange elements at the cold end of air preheater. Alkali powder injection to remove SO₃ from flue gas is an important method to control ABS. However, the existing grid type multi-nozzle device has problems of uneven injection and low SO₃ removal efficiency. A vertical gas-solid fluidization mixing and distribution injection device is developed to improve the uniformity of absorbent powder injection in the flue section. The pilot test results show that, the SO₃ removal efficiency at upstream of the SCR denitration system reaches 55.6%, the condensation temperature of the catalyst ABS decreases by 8.6 °C, and the minimum operation temperature decreases by 11.9 °C, which can expand the lower limit of the catalyst operation temperature and reduce the restriction on the lower limit of the peak load of the unit. The SO₃ removal efficiency at upstream of the air preheater reaches 84.3%, and the ABS deposition influence coefficient decreases by 86.9%, which can delay the ABS ash blockage at the cold end of the air preheater. The SO₃ emission mass concentration from the chimney is 2.5~3.4 mg/m³, which can eliminate blue smoke.

Key words: coal-fired unit; SO₃; alkaline absorbent; gas-solid fluidization; CFD simulation; pilot test

修回日期: 2022-12-12

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。

燃煤机组运行过程中, 煤中硫约有 0.5%~2.0% 在炉膛内被氧化成 SO₃, 约 0.8%~1.5% 在选择性催化还原 (SCR) 脱硝反应器中被氧化成 SO₃^[1-2]。烟气中的 SO₃ 会导致烟囱出口出现蓝色烟羽^[3], SCR 脱硝催化剂在机组低负荷下 ABS 失活^[4], 空气预热器冷端 ABS 粘结飞灰堵塞^[5-6], 烟气余热回收省煤器硫酸腐蚀^[7], 从而影响环境、增加机组能耗与损坏设备。

在锅炉尾部烟气 SO₃ 沿程迁移规律研究基础上^[8-9], 国内外开展了 SO₃ 脱除机理研究^[10-11], 其中碱基吸收剂喷射脱除 SO₃ 技术逐渐引起关注^[12-15]。国家能源集团谏壁电厂与大唐集团托克托电厂在 SCR 脱硝反应器进出口烟道喷射碱基吸收剂粉体, 开展了 SO₃ 脱除示范研究, 粉体采用气力输送, 经母管→根支管→子支管→子支管多喷嘴。这种格栅式三级分配装置喷射到烟道截面上, 粉体的惯性偏流作用^[16]使根支管之间、子支管之间、子支管喷嘴之间出现粉体流量分配不均, 局部粉体质量浓度过高或者过低, 降低了 SO₃ 脱除效果, 也增加了碱基吸收剂耗量。

本文在全烟道宽度烟气自混合器和碱基吸收剂脱硝 SO₃ 实验室小试研究的基础上, 基于流态化粉体颗粒呈现的液体特性, 研发了立式气固流态化粉体混合分配装置, 开展了实验室粉体分配冷态试验和现场 SO₃ 脱除中试试验研究。

1 试验内容

1.1 试验台架

借鉴流态化气固多相流呈现的液体特性, 设计了立式气固流态化混合分配装置。冷态模拟试验装置如图 1 所示。混合器底部设 1 层直径为 5 mm 的多孔布风板和整流格栅, 顶部设置 20 根单喷嘴支管, 每根支管连接 1 个布袋除尘器。以低压冷风作为粉体输送介质, 碱基吸收剂粉体经文丘里式注射器注入冷风管, 被冷风携带到混合器内混合, 然后经单喷嘴支管喷射。

在华能集团岳阳电厂 2 号 362.5 MW 燃煤机组 B 侧 SCR 脱硝反应器进口烟道内, 增设了 1 套气固流态化粉体混合分配装置, 系统如图 2 所示。在原 SCR 脱硝稀释风机、氨/空气混合器、喷氨支管的氨气供应管路上, 自氨/空气混合器出口接引新的管路。含氨空气进入气固流态化混合分配装置, 粉体经气力输送也进入气固流态化混合分配装置, 被含

氨空气裹挟混合均匀后经 27 根单喷嘴支管喷入烟道, 在 SCR 脱硝反应器进口烟道内, 形成锅炉省煤器→氨气/粉体喷射格栅→氨气喷射格栅→全烟道烟气混合器→催化剂的工艺流程。氨气/粉体喷射格栅至顶层催化剂的烟气流程约 35 m, 催化剂进口至 SCR 脱硝反应器出口测点的烟气流程约 15 m, 机组满负荷下的烟气停留时间分别为 2.5 s 和 3.0 s。



图 1 气固流态化混合分配冷态试验装置
Fig.1 The fluidized gas-solid mixing distribution cold-state device

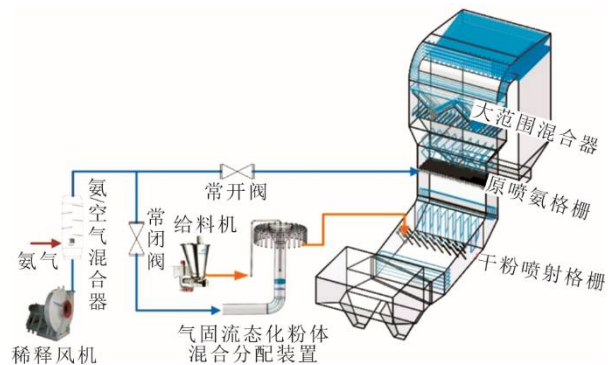


图 2 SCR 脱硝反应器进口多功能气固流态化喷射器系统
Fig.2 The SCR reactor inlet multifunctional gas-solid fluidization injector system

1.2 试验材料

试验用粉体包括氢氧化钙、氢氧化镁、氧化钙、氧化镁、氯化铵等, 粒径为 25~58 μm, 相关参数见表 1。

表 1 试验用吸收剂参数
Tab.1 Parameters of the sorbents for tests

项目	Ca(OH) ₂	CaO	Mg(OH) ₂	MgO
粒径/μm	50	58	25	25
纯度/%	95	95	92	95
密度/(g·mL ⁻¹)	2.24	3.350	2.36	3.58
分子量	74.10	56.08	58.32	40.30
分解温度/℃	500~600		300~380	
每吨价格/元	750	950	4 000	6 000

1.3 测试分析方法

气固流态化混合分配装置的冷态试验采用氧化钙粉体,各支管布袋收集的粉体样品采用电子天平称重。

粉体喷射中试试验过程中,采用气溶胶冷凝法采集烟气中的 SO_3 样本,用化学滴定法分析与折算烟气中 SO_3 体积分数。采用 NGA2000 分析仪测试烟气中的 O_2 和 NO 体积分数。

1.4 数据处理

SCR 烟气脱硝最低连续喷氨运行温度^[17]为:

$$T_{\text{MOT}} = a \times \ln(C_{\text{SO}_3} \times C_{\text{NH}_3}) + b \quad (1)$$

式中: T_{MOT} 为最低连续喷氨运行温度, $^{\circ}\text{C}$; C_{SO_3} 为烟气中 SO_3 体积分数, $\mu\text{L/L}$; C_{NH_3} 为烟气中 NH_3 体积分数, $\mu\text{L/L}$; a 和 b 为函数系数和常数项。

碱基吸收剂对 SO_3 的脱除效率为:

$$\eta_{\text{SO}_3} = \frac{C_{\text{SO}_3,\text{in}} - C_{\text{SO}_3,\text{out}}}{C_{\text{SO}_3,\text{in}}} \times 100 \quad (2)$$

式中: η_{SO_3} 为 SO_3 脱除效率, %; $C_{\text{SO}_3,\text{in}}$ 为进口烟气中 SO_3 体积分数, $\mu\text{L/L}$; $C_{\text{SO}_3,\text{out}}$ 为出口烟气中 SO_3 体积分数, $\mu\text{L/L}$ 。

空气预热器冷端的 ABS 沉积系数^[18]为:

$$D_n = C_{\text{SO}_3} \times C_{\text{NH}_3} \times (T_{\text{ABS}} - 0.3 \times T_{\text{F}} - 0.7 \times T_{\text{A}}) \quad (3)$$

式中: D_n 为 ABS 沉积系数; T_{ABS} 为 ABS 露点温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{F} 为排烟温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{A} 为冷风温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2 试验结果与分析

2.1 气固流态化喷射装置 CFD 模拟设计

采用 FLUENT 软件数值模拟设计立式气固流态化粉体混合分配装置。图 3 为碱基喷射混合分配装置内的气相流线。由图 3 可见,27 根支管出口速度分布很均匀,均值为 16.5 m/s,相对偏差小于 $\pm 5\%$ 。跟踪 60 个颗粒,颗粒全部从支管喷嘴流出,说明气固流态化粉体混合分配装置内无颗粒残留死区。

2.2 粉体均匀喷射冷态模型实验

在实验室搭建气固流态化混合分配装置的冷态试验台架,采用氧化钙粉体进行模拟试验。气固流态化混合分配装置内的气流速度约为 7 m/s 时(对应各支管内的气流速度约为 14 m/s),粉体分散程度好,很容易被气流携带经支管进入除尘器布袋。混合分配装置内气体速度为 7 m/s 时的支管粉体流量分配如图 4 所示。由图 4 可见,在 8、6、4 Hz 高中低给粉流量下,20 根支管之间的粉体质量相对偏差

在 $\pm 6\%$ 以内。试验过程还发现粉体易团聚,气流速度降低到 0.9 m/s 时,粉体不断沉降且在输送管道及支管内沉积。

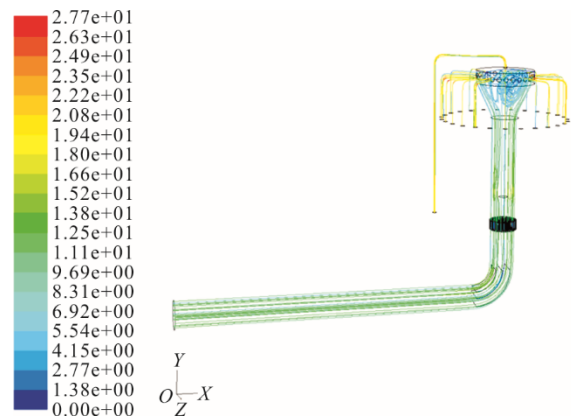


图 3 碱基喷射混合分配装置内的气相流线
Fig.3 The gas streamlines of the alkaline jet mixing distribution device

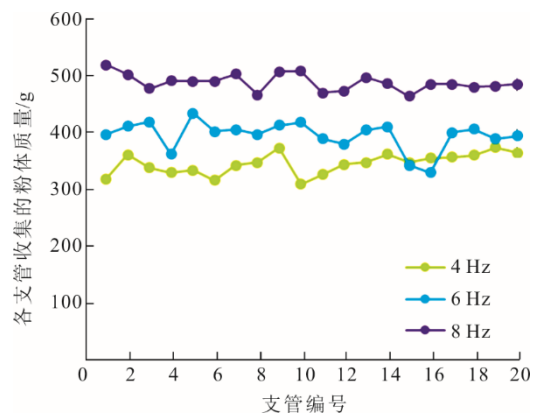


图 4 混合器内气体速度 7 m/s 下的支管粉体流量分配
Fig.4 The branch pipe powder flow distribution at air flow speed of 7 m/s in the mixer

2.3 SCR 脱硝反应器进口烟道粉体喷射中试试验

2.3.1 碱基吸收剂脱除 SO_3 情况

在机组 250 MW 负荷基准工况下,单侧 SCR 脱硝反应器进口烟气量约 329 920 m^3/h ,烟气中 SO_2 体积分数约为 1 000 $\mu\text{L/L}$, SO_3 体积分数为 5.4 $\mu\text{L/L}$,空气预热器进口烟气 SO_3 体积分数为 9.5 $\mu\text{L/L}$,碱基吸收剂脱除 SO_3 的中试试验结果如图 5 所示。由图 5 可见,碱基粉体喷射点至 SCR 催化剂以及空气预热器上游的 SO_3 脱除效率随化学当量比增加而提高。

1) 喷射氢氧化钙粉体时,化学当量比由 7.30 增加到 13.80,空气预热器上游的 SO_3 脱除效率由 77.5% 提高到 80.4%。

2) 喷射氧化钙粉体时,化学当量比由 4.90 增

加到 17.90, SCR 脱硝反应器上游的 SO₃ 脱除率由 37.3% 提高到 55.6%, 空气预热器上游的 SO₃ 脱除效率由 46.9% 提高到 84.3%。

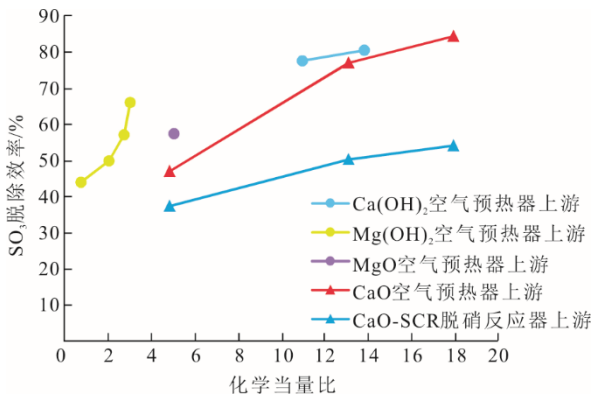


图 5 碱基吸收剂脱除 SO₃ 中试试验结果
Fig.5 The pilot test result for SO₃ removal by alkaline absorbents

3) 喷射氢氧化镁粉体时, 化学当量比由 0.76 增加到 3.03, 空气预热器上游的 SO₃ 脱除效率由 43.9% 提高到 66.0%。

4) 喷射氧化镁粉体时, 化学当量比为 5.05, 空气预热器上游的 SO₃ 脱除效率为 57.3%。

相同化学当量下, 氢氧化镁的 SO₃ 脱除效率最高, 这与此前实验室小试结果一致^[19]。在 SO₃ 脱除效率相同时, 氧化钙的化学当量比约为氢氧化镁的 2.5 倍, 但价格仅为氢氧化镁的 0.25 倍。考虑与石灰石-石膏湿法脱硫吸收剂一致以及运行成本, 宜优先采用氧化钙作为 SO₃ 脱除吸收剂。

2.3.2 SO₃ 脱除对尾部设施的影响

燃煤机组 0~40% 低负荷运行时, SCR 脱硝反应器进口烟气温度偏低, NH₃ 与 SO₃ 会在催化剂微孔内生成 ABS 结露, 堵塞微孔致催化剂失活。在 SCR 脱硝反应器进口烟气中喷射不同流量的碱基吸收剂, 烟气中不同 SO₃ 体积分数对应的 SCR 烟气脱硝最低连续喷氨运行温度见表 2。由表 2 可见, 与 250 MW 基准工况 T-00 相比, 工况 T-03 脱硝装置进口烟气中的 SO₃ 脱除效率约 55.6%, 催化剂微孔内的 ABS 结露温度由 267.9 °C 降低到 259.3 °C, SCR 烟气脱硝最低连续喷氨运行温度由 293.7 °C 降低到 281.8 °C, 降幅为 11.9 °C, 为拓展机组调峰负荷下限减轻了 SCR 催化剂 ABS 失活的束缚。

表 3 为碱基吸收剂喷射对空气预热器硫酸氢铵沉积系数的影响。由表 3 可见, 与基准工况 T-00 相比, 工况 T-03 空气预热器进口烟气中的 SO₃ 体积分

数由 9.5 μL/L 降低到 1.5 μL/L, 环境空间中的 ABS 结露温度由 213.0 °C 降低到 202.4 °C, ABS 沉积系数由 3963 降低到 520, 降幅达 86.9%, 有效延缓了空气预热器冷端换热元件狭长通道内因 ABS 粘附飞灰所造成的沉积堵塞。

表 2 碱基喷射对 SCR 反应器最低连续喷氨运行温度的影响
Tab.2 Influence of alkaline injection on the minimum continuous operating temperature of the SCR reactor

项目	工况 T-00	工况 T-01	工况 T-02	工况 T-03
进口 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	257	257	257	257
脱硝效率/%	87	87	87	87
进口氨气体积分数/(μL·L ⁻¹)	112	112	112	112
进口 SO ₃ 体积分数/(μL·L ⁻¹)	5.4	2.7	2.9	2.4
预测催化剂 ABS 结露温度/°C	267.9	260.2	261.2	259.3
预测最低连续喷氨运行温度/°C	293.7	283.1	284.5	281.8

表 3 碱基吸收剂喷射对空预器硫酸氢铵沉积系数的影响
Tab.3 Effect of alkaline absorbent injection on deposition coefficient of ammonium bisulfate in air preheater

项目	T-00	T-01	T-02	T-03
设定 SCR 脱硝反应器出口氨体积分数/(μL·L ⁻¹)	3.0	3.0	3.0	3.0
实测空气预热器进口 SO ₃ 体积分数/(μL·L ⁻¹)	9.5	1.9	1.8	1.5
排烟温度/°C	147	147	147	147
空气预热器进口风温/°C	43.3	43.3	43.3	43.3
硫酸氢铵结露温度/°C	213.0	204.4	203.9	202.4
硫酸氢铵沉积系数 D _a	3 963	760	687	520

此外, 碱基吸收剂粉体喷射后, 空气预热器出口烟气中的 SO₃ 经下游石灰石-石膏湿法脱硫系统进一步脱除约 50%^[8]后, 烟囱排放的 SO₃ 质量浓度可由基准工况的 17.0 mg/m³ 降低到 2.5~3.4 mg/m³, 满足当前国内最严地方标准《大气污染物综合排放标准》(DB 31/933—2015) 要求的有组织硫酸雾最高允许排放浓度 (5 mg/m³)。

3 结 论

1) 针对格栅式多喷嘴碱粉喷射不均问题, 研发的立式气固流态化混合与分配装置, 支管间的粉体流量分配相对偏差小于 ±6%。

2) SCR 脱硝反应器上游烟气中 SO₃ 脱除效率达到 55.6%, 催化剂 ABS 结露温度降低 8.6 °C, SCR 烟气脱硝最低连续喷氨运行温度降低 11.9 °C;

空气预热器上游 SO_3 脱除效率达到 84.3%，ABS 沉积影响系数降低 86.9%；烟囱 SO_3 排放质量浓度降低到 2.5~3.4 mg/m^3 。这为优化 SCR 烟气脱硝装置低负荷运行、延缓空气预热器 ABS 灰垢堵塞以及消除蓝色烟羽提供一种新的技术选择。

【参考文献】

- [1] 郭彦鹏, 狄华娟, 潘丹萍, 等. 燃煤烟气中 SO_3 的形成及其控制措施[J]. 中国电力, 2016, 49(8): 154-171.
GUO Yanpeng, DI Huajuan, PAN Danping, et al. The formation and control of SO_3 in coal-fired flue gas[J]. Electric Power, 2016, 49(8): 154-171.
- [2] 刘含笑, 陈招妹, 王少权, 等. 燃煤电厂 SO_3 排放特征及其脱除技术[J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 1128-1138.
LIU Hanxiao, CHEN Zhaomei, WANG Shaoquan, et al. Emission characteristics and removal technology of SO_3 from coal-fired power plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(5): 1128-1138.
- [3] Electric Power Research Institute. SO_3 mitigation: current utility operating experience[R]. EPRI, Palo Alto, CA: 2006: 1010754.
- [4] 刁润丽, 赵世伟, 刘嘉. 烟气脱硝产生的硫酸氢铵对空预器的影响及对策[J]. 应用能源技术, 2015(4): 20-24.
DIAO Runli, ZHAO Shiwei, LIU Jia. The effect of ammonium bisulfate in SCR flue gas denitrification process and solution for air preheater[J]. Applied Energy Technology, 2015(4): 20-24.
- [5] 钟礼金, 宋玉宝. 锅炉 SCR 烟气脱硝空气预热器堵塞原因及其解决措施[J]. 热力发电, 2012, 41(8):45-50.
ZHONG Lijin, SONG Yubao. Air preheater blocking in boiler with SCR denitrification device: reason analysis and solutions[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(8): 45-50.
- [6] 王帅, 吴新, 张庆国. 低温省煤器防腐换热管表面耐腐蚀性能[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(3): 266-272.
WANG Shuai, WU Xin, ZHANG Guoqing. Corrosion resistance of different tube coatings for low temperature economizer[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(3): 266-272.
- [7] 舒喜, 田原润, 惠润堂, 等. SO_3 在燃煤电厂各设备中形成和脱除现状研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(11): 121-126.
SHU Xi, TIAN Yuanrun, HUI Runtang, et al. Formation and removal of SO_3 in different equipment of coal-fired power plant: a review[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(11): 121-126.
- [8] 李欣怡, 潘丹萍, 胡斌, 等. 燃煤烟气中 SO_3 迁移转化特性及其控制的研究现状及展望[J]. 化工进展, 2018, 37(12): 370-379.
LI Xinyi, PAN Danping, HU Bin, et al. Research status and prospects of migration, transformation and control of SO_3 from coal-fired flue gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(12): 370-379.
- [9] 刘勇, 郑成航, 杨正大, 等. SO_2 、 SO_3 与 CaO 反应速率控制机制研究[J]. 热力发电, 2018, 47(11): 29-34.
LIU Yong, ZHENG Chenghang, YANG Zhengda, et al. Study on the reaction rate control mechanism of SO_2 , SO_3 and CaO [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(11): 29-34.
- [10] 姚宣, 杨建辉, 王洪亮, 等. 碱性吸收剂喷射脱除电厂烟气 SO_3 技术及理论模型[J]. 中国电力, 2018, 51(4):130-135.
YAO Xuan, YANG Jianhui, WANG Hongliang, et al. Theoretical model for SO_3 removal from flue gas using alkali sorbent injection technology in power plant[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 130-135.
- [11] 陈晓露, 赵钦新, 鲍颖群, 等. SO_3 脱除技术实验研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(12): 966-971.
CHEN Xiaolu, ZHAO Qinxin, BAO Yingqun, et al. Experimental research on SO_3 removal[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(12): 966-971.
- [12] 刘勇. 碱基吸收剂喷射脱除燃煤烟气中 SO_3 的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
LIU Yong. Experimental study on the removal of SO_3 from coal-fired flue gas by alkaline sorbent injection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [13] 吴永杰, 戴永阳. 燃煤电厂碱基喷吹脱除三氧化硫的应用研究[J]. 能源环境保护, 2020, 34(1): 60-64.
WU Yongjie, DAI Yongyang. The technology of removing sulfur trioxide by alkaline sorbent injection in a coal-fired power plant[J]. Energy and Environmental Protection, 2020, 34(1): 60-64.
- [14] 竹涛, 张书庆, 郭娜. 火电行业 SO_3 控制技术进展[J]. 环境工程, 2018, 36(2): 109-112.
ZHU Tao, ZHANG Shuqing, GUO Na. Progress in research on control technique of SO_3 in thermal power plant[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(2): 109-112.
- [15] 杜黎龙. 射流和管内气固多相流测量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
DU Lilong. Measurements on gas-solid multiphase burner and pipe flow[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [16] 宋玉宝, 刘鑫辉, 何川, 等. SCR 催化剂低负荷运行硫酸氢铵失活研究[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 144-150.
SONG Yubao, LIU Xinhui, HE Chuan, et al. Study on the ammonium bisulfate deactivated SCR catalyst at low load operation[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 144-150.
- [17] BURKE J M, JOHNSON K M. Ammonium sulfate and bisulfate formation in air preheaters[R]. US EPA 600/7-82-025a, 1982: 1.
- [18] 何川, 宋玉宝, 马云龙, 等. 钙镁氧化物及氢氧化物脱除 SO_3 协同防治催化剂低温失活[J]. 化工进展, 2020, 39(11): 4619-4624.
HE Chuan, SONG Yubao, MA Yunlong, et al. Synergetic control catalyst deactivation at low temperature through SO_3 removal by calcium magnesium oxide and hydroxide[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(11): 4619-4624.

(责任编辑 杨嘉蕾)