

Co 对工业 V-Mo/Ti 脱硝催化剂的影响

常嵘峰¹, 刘洋¹, 高义博¹, 黄力¹, 纵宇浩¹, 王虎¹, 李金珂¹, 韩沛²

(1.大唐南京环保科技有限公司, 江苏 南京 211111; 2.内蒙古科技大学 分析测试中心, 内蒙古 包头 014010)

摘要:为提升工业 V-Mo/Ti 脱硝催化剂的低温活性, 拓展催化剂的活性温度窗口, 对催化剂进行过渡金属元素 Co 改性。通过浸渍法制备了一系列不同 CoO 负载量的 V-Mo/Ti 脱硝催化剂。采用 XRF、N₂-吸附脱附、H₂-TPR、拉曼光谱和 NH₃-TPD 对不同催化剂进行表征, 分析了 CoO 对催化剂物理化学性质的影响。通过固定床微型反应评价装置, 对不同催化剂的脱硝性能和抗 SO₂、H₂O 性能进行测试。研究表明: CoO 负载对 V-Mo/Ti 催化剂的孔结构、晶型影响较小。V-Mo-Co/Ti 催化剂上 VO_x、MoO_x 物种的结构也与 V-Mo/Ti 催化剂基本一致。向 V-Mo/Ti 催化剂上负载适量 CoO (质量分数 0.28%) 后, 催化剂的酸性性能提升, 还原性能基本不变, 催化剂的脱硝活性增加。负载 CoO 质量分数 0.28% 的 CO-2 催化剂在烟温 280 °C 时, 脱硝效率达 80% 以上。继续增加 CoO 负载量, 尽管催化剂的酸性进一步增加, 但催化剂的活性组分被 CoO 覆盖, 减少了与反应气体的接触, 催化剂脱硝活性下降。研究还发现, 负载一定量 CoO 后, 能有效增强催化剂的抗 SO₂、H₂O 性能。

关键词:脱硝催化剂; Co 改性; SCR; 催化性能; V-Mo/Ti

中图分类号: TQ534 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2022)05-0160-05

Effect of cobalt on the catalytic performance of industrial V-Mo/Ti de-NO_x catalystCHANG Zhengfeng¹, LIU Yang¹, GAO Yibo¹, HUANG Li¹, ZONG Yuhao¹, WANG Hu¹, LI Jinke¹, HAN Pei²

(1. Datang Nanjing Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanjing 211111, China; 2. Instrumental Analysis Center, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to enhance the catalytic performance at low flue gas temperature and broaden its catalytic activity temperature, cobalt modified industrial V-Mo/Ti De-NO_x catalysts were prepared by impregnation method. XRF, N₂-adsorption-desorption, H₂-TPR, Raman spectrum and NH₃-TPD were used to characterize the catalysts. The denitrification performance and resistance to SO₂ and H₂O of the different catalysts were tested by a fixed-bed micro-reactor. The results show that the loading of CoO has little impact on the pore structure and crystal structure of V-Mo/Ti catalyst. The structures of VO_x and MoO_x species of V-Mo-Co/Ti catalysts are similar to that of the V-Mo/Ti catalyst. Suitable amount of CoO (0.28%) can lead to the enhancement of acidity of the catalyst, without decreasing the reducibility of the catalyst. As a result, the catalyst activity is improved. When the flue gas temperature is 280 °C, the NO_x conversion of CO-2 catalyst with 0.28% CoO is above 80%. However, excessive loading of CoO might result in the coverage of active sites by CoO, which reduces the chances of contact between VO_x species and the reaction gas. Consequently, the catalytic activity of the catalyst decreases. Besides, this study also finds that the SO₂ and H₂O resistance of the catalyst can be effectively enhanced by Co modification.

Key words: denitrification catalyst; Co modification; SCR; catalytic performance; V-Mo/Ti

0 引言

选择性催化还原(SCR)技术广泛应用于国内外

燃煤电厂的脱硝工程, 可在脱硝催化剂的作用下, 将燃煤电厂烟气中的氮氧化物(NO_x)转化为无害的 N₂ 和 H₂O^[1]。工业脱硝催化剂以钒钛系为主, 主要

收稿日期: 2021-03-25; 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21032501

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20210001); 中国博士后科学基金资助项目(2019M651632)

作者简介: 常嵘峰(1988—), 男, 安徽淮北人, 高级工程师, 博士。E-mail: changzf@dtcg.com.cn

通讯作者: 黄力(1986—), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 硕士。E-mail: huangl@dtcg.com.cn

引用格式: 常嵘峰, 刘洋, 高义博, 等. Co 对工业 V-Mo/Ti 脱硝催化剂的影响[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(5): 160-164.

CHANG Zhengfeng, LIU Yang, GAO Yibo, et al. Effect of cobalt on the catalytic performance of industrial V-Mo/Ti de-NO_x catalyst[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(5): 160-164.

移动阅读

成分为 $V_2O_5-MoO_3(WO_3)/TiO_2$, 按型式又可分为蜂窝式、平板式和波纹板式 3 种。钒钛系催化剂的活性温度窗口通常在 $320\sim 420\text{ }^\circ\text{C}$ 。然而, 当燃煤电厂低负荷运行时, 烟气温度较低, 催化剂难以达到较好的脱硝效果^[2-3]。为此, 采用有效手段, 提高催化剂的低温脱硝活性, 拓宽催化剂的活性温度窗口, 成为近年来大气污染防治领域的研究热点。

采用过渡金属对钒钛系催化剂进行改性, 是提升催化剂脱硝活性的有效手段。段景卫等^[4]采用等体积浸渍法制备了不同浓度的 $CrCl_3$ 钒钛基催化剂, 发现添加 Cr 可以提高催化剂的比表面积和表面酸性, 有利于提升催化剂脱硝效率。吴彦霞等^[5]发现向 V-Mo/Ti 脱硝催化剂上掺杂 ZrO_2 后, 可增强催化剂吸附和氧化 NO 的能力, 增加催化剂的弱酸量, 提高催化剂的脱硝性能。课题组之前研究发现, Y 可以提升 V-Mo/Ti 催化剂的 $(V^{4+} + V^{3+})/V^{5+}$ 和 $O_\alpha/(O_\alpha + O_\beta)$ 的物质的量比, 有利于增强催化剂脱硝性能^[6]。

Co 是工业催化领域常用的过渡金属元素。在脱硝催化剂方面, Co 已应用于 Ce 基脱硝催化剂^[7]、Fe 基脱硝催化剂^[8]、Mn 基脱硝催化剂^[9] 的改性, 研究发现掺杂 Co 能增加与活性组分的相互作用, 提高催化剂的氧化还原性能及分散度, 增加表面酸性位数量, 减少硫酸根离子和水分子在催化剂表面的累积, 从而增强催化剂的抗水抗硫性能^[10-12]。

然而, 目前对钒钛系催化剂进行 Co 改性研究的报道较少。笔者采用浸渍法, 将 Co 负载在工业 V-Mo/Ti 脱硝催化剂上, 通过 XRD、XRF、 N_2 -吸附脱附、 H_2 -TPR 等表征手段, 研究了 Co 对催化剂物理化学性质的影响。并且, 通过固定床微型评价装置, 对比了负载 Co 前后催化剂脱硝性能的变化。

1 试 验

1.1 催化剂制备

采用某公司生产的工业 V-Mo/Ti 脱硝催化剂进行试验。将催化剂研碎后, 过 $180\sim 150\text{ }\mu\text{m}$ ($80\sim 100$ 目) 筛。随后, 称取一定量的催化剂粉末, 浸渍在硝酸钴水溶液中, $80\text{ }^\circ\text{C}$ 水浴搅拌 2 h, 经烘干, $500\text{ }^\circ\text{C}$ 焙烧 2 h 后, 制得不同 CoO 含量的 V-Mo-Co/Ti 催化剂。将 V-Mo/Ti 催化剂记为 CO-1, 按 CoO 负载量由低到高的顺序, 将 3 种 V-Mo-Co/Ti 催化剂依次记为 CO-2、CO-3 和 CO-4, Co(0.9)/Ti 为二氧化钛上负载了 0.9% 的 CoO。

1.2 催化剂表征

XRF 在 ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪上

进行。

N_2 -吸附脱附在美国 Micromeritics 公司的 ASAP 2000 型比表面积测定仪上进行, 在液氮温度下进行氮气吸附过程, 根据 BET 公式计算其比表面积。

H_2 -TPR 在美国 Micromeritics 公司的 AutoChem II 2920 全自动化学吸附仪上进行。称取 0.05 g 样品, 置于 U 型石英管中, 在 He 气氛下 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 吹扫 1 h, 冷却至室温后, 切换 5% H_2/Ar 混合气, 以 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率进行程序升温还原分析。

NH_3 -TPD 在美国 Micromeritics 公司的 AutoChem II 2920 全自动化学吸附仪上进行。称取 0.10 g 样品, 置于 U 型石英管中, 在 He 气氛下 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 吹扫 1 h, 冷却至室温后进氨至吸附平衡。随后, 将气体切换成 He, 以 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率进行程序升温脱附分析。

1.3 催化剂评价

催化剂的脱硝性能测试在固定床微型反应评价装置上进行。催化剂装填量 0.25 mL, 体积空速为 $240\ 000\text{ h}^{-1}$ 。模拟烟气流量 $1\text{ L}/\text{min}$, 模拟烟气组成为: NH_3 体积分数 500×10^{-6} , NO 体积分数 500×10^{-6} , 5% O_2 , 平衡气为 N_2 。采用美国 EMERSON 公司的 MPO3000 型烟气分析仪分析反应前后的 NO 浓度。催化剂的脱硝效率 η 计算公式为

$$\eta = \frac{\varphi(\text{NO})_{\text{in}} - \varphi(\text{NO})_{\text{out}}}{\varphi(\text{NO})_{\text{in}}} \times 100\%$$

式中, $\varphi(\text{NO})_{\text{in}}$ 为入口烟气中 NO 体积分数; $\varphi(\text{NO})_{\text{out}}$ 为出口烟气中 NO 体积分数。

2 结果与讨论

表 1 为不同催化剂的 XRF 分析数据和孔结构分析数据。CO-1~CO-4 催化剂的 V_2O_5 、 MoO_3 含量基本一致, 分别在 1.0%、2.5% 左右。CO-1 催化剂的比表面积和孔容较大, 分别达到 $74.4\text{ m}^2/\text{g}$ 和 $0.356\text{ cm}^3/\text{g}$ 。随着 CoO 负载量的增加, 催化剂的比表面积和孔容略降低, 平均孔径增大。这是由于 CoO 的增加堵塞了载体部分微孔所致。

图 1 为不同催化剂的 N_2 -吸附脱附等温线。4 种催化剂的 N_2 吸附脱附等温线均为 IV 型, H3 型迟滞环, 即催化剂的孔道结构为狭缝型。由图 1 可知, 4 种催化剂的 N_2 吸附脱附等温线无明显差异, 结合表 1 中的孔结构分析数据, 可以认为, CoO 的负载没有显著影响载体的孔道结构。

表1 不同催化剂的XRF和孔结构分析数据
Table 1 XRF and textural properties for different catalysts

催化剂	V ₂ O ₅ 质量分数/%	MoO ₃ 质量分数/%	CoO 质量分数/%	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	孔容/ (cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/ nm
CO-1	1.01	2.48	—	74.4	0.356	19.16
CO-2	0.99	2.47	0.28	69.4	0.347	19.74
CO-3	1.02	2.49	0.61	69.3	0.343	20.04
CO-4	1.03	2.48	0.93	68.2	0.336	20.71

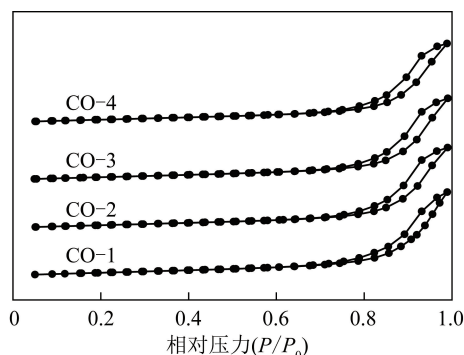


图1 不同催化剂的N₂吸附脱附等温线

Fig.1 Isotherms of N₂ adsorption and desorption over different catalysts

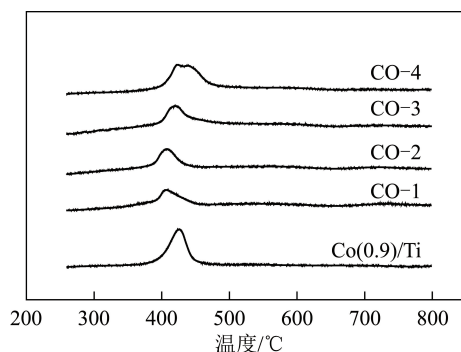


图2 不同催化剂的H₂-TPR图

Fig.2 H₂-TPR profiles for different catalysts

图2为不同催化剂的H₂-TPR图。Co(0.9)/Ti样品在426℃处出现耗氢峰,对应样品上CoO的还原。CO-1催化剂在406℃处出现耗氢峰,归属催化剂上MoO_x和VO_x的还原。V-Mo-Co/Ti催化剂同样在350~450℃出现1个耗氢峰,包含了V、Mo、Co三种氧化物的还原,因此随着CoO负载量的增加,催化剂耗氢峰的峰面积逐步增大。由图2还可以看出,CO-2和CO-1的耗氢峰峰顶温度差异不大,继续增加催化剂上CoO含量,催化剂的耗氢峰峰顶温度向高温方向移动。说明负载过量CoO,会降低V-Mo/Ti催化剂还原性能。

通常,V-Mo/Ti催化剂还原性能的改变与催化剂上VO_x物种的结构有关。文献[13]指出,钒钛系

催化剂中,当相邻的单体钒结合形成聚合钒时,V—O—V键增加,V—O—Ti键减少,VO_x物种与载体之间的结合力降低,从而导致催化剂的还原性能下降。为此,对各催化剂进行拉曼光谱分析如图3所示。由图3(a)可以看出,4种催化剂均在638、514和395 cm⁻¹处出现锐钛矿型TiO₂的特征吸收峰^[14],说明Co的添加不影响载体TiO₂的晶型。图3(b)中,各催化剂均出现3个拉曼吸收峰,位于1070、961和791 cm⁻¹处,分别对应催化剂上单体钒^[15]、聚合钒^[16]和MoO₃^[17]。4种催化剂的拉曼吸收峰的出峰位置基本一致,说明添加CoO对催化剂上VO_x、MoO_x物种结构没有太大影响。相比V-Mo/Ti催化剂,V-Mo-Co/Ti催化剂的还原性能降低,可能是由于CoO覆盖了部分催化剂的活性位。

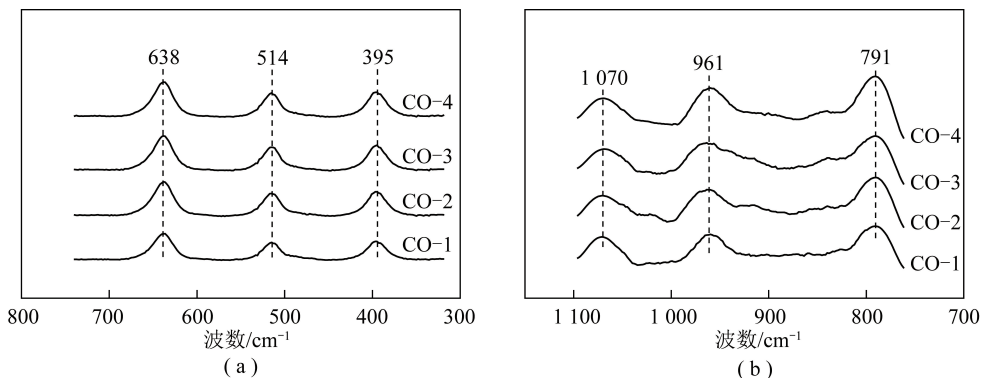


图3 不同催化剂的拉曼光谱

Fig.3 Raman spectra of different catalysts

不同催化剂的 NH_3 -TPD 分析图如图 4 所示,4 种催化剂均在 300 ~ 450 °C 出现 NH_3 脱附峰。随 CoO 含量增加,催化剂的 NH_3 脱附峰面积逐渐增加,催化剂上 CoO 的负载量提升至 0.93% 时,催化剂的 NH_3 脱附峰面积最大,说明 CoO 的负载增加了催化剂的酸量。

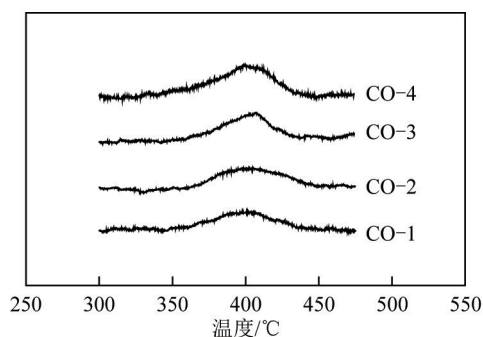


图 4 不同催化剂的 NH_3 -TPD 图

Fig.4 NH_3 -TPD profiles of different catalysts

图 5 为不同催化剂的脱硝效率。由图 5 可知,Co(0.9)/Ti 样品的脱硝效率较低,烟气温度达到 430 °C 时,该样品的脱硝效率仅 23%。CO-1 催化剂在烟温 250 ~ 340 °C 时脱硝效率较低,当烟气温度高于 300 °C,催化剂的脱硝效率达 80% 以上。向 V-Mo/Ti 催化剂上负载 0.28% 的 CoO 后,催化剂的脱硝效率提升明显,烟温 280 °C 时,催化剂的脱硝效率达 80% 以上。继续增加 CoO 负载量至 0.61%,催化剂的整体脱硝效率较 CO-2 催化剂有所降低。对于 CO-4 催化剂,烟温 310 °C 时,催化剂的脱硝效率达 84%,随后随温度升高,脱硝效率逐渐降低。

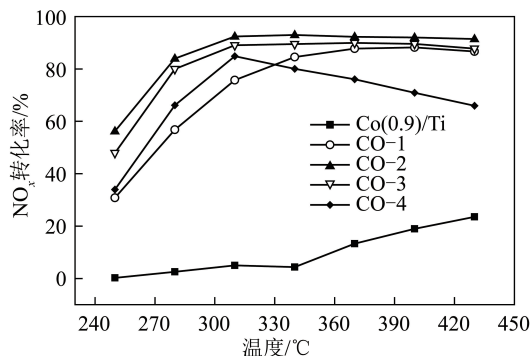


图 5 不同催化剂的脱硝效率

Fig.5 NO_x conversion of different catalysts

文献[18-21]报道,钒钛系脱硝催化剂的还原性能和酸性性能共同影响催化剂的脱硝活性。结合 H_2 -TPR 和 NH_3 -TPD 的结果,CO-2 催化剂与 CO-1 催化剂相比还原性能基本一致,但酸性性能提升,因此脱硝活性提高。继续增加 CoO 负载量,尽管催

剂酸性进一步增加,但催化剂的活性组分 V_2O_5 被 CoO 覆盖,减少了其与反应气体的接触,脱硝活性下降。

烟气中的 SO_2 、 H_2O 对催化剂会产生不利影响,因此,抗 SO_2 、 H_2O 性能是催化剂的一项重要指标。对 CO-1 和 CO-2 催化剂进行抗 SO_2 、 H_2O 性能测试,结果如图 6 所示。在 280 °C 时 2 种催化剂运行 2 h 后,向烟气中注入体积分数 300×10^{-6} 的 SO_2 和体积分数 2% 的水蒸气。随后,催化剂的脱硝效率不同程度降低,CO-1 催化剂的脱硝效率由 55.1% 降至 34.8%,CO-2 则降至 61.8%。稳定运行约 9 h 后,切断烟气中 SO_2 和 H_2O ,2 种催化剂的脱硝效率分别恢复到 49.5% 和 76.5%,说明催化剂上生成一定量的硫酸氢铵,抑制了催化剂的脱硝活性。运行约 12 h 后,烟气温度提升到 370 °C 时,催化剂的脱硝效率提升至 88% 以上,这是高温使催化剂表面的硫酸氢铵分解所致。继续向烟气中注入 300×10^{-6} 的 SO_2 和体积分数 2% 的水蒸气,催化剂的脱硝效率又有不同程度降低,CO-1 比 CO-2 下降多。表明催化剂上负载一定量的 CoO 能够有效增强催化剂的抗 SO_2 、 H_2O 性能。当运行时间增长到约 22 h 时,停止烟气中 SO_2 和 H_2O 的注入,各催化剂的脱硝效率逐步恢复到 92% 左右。

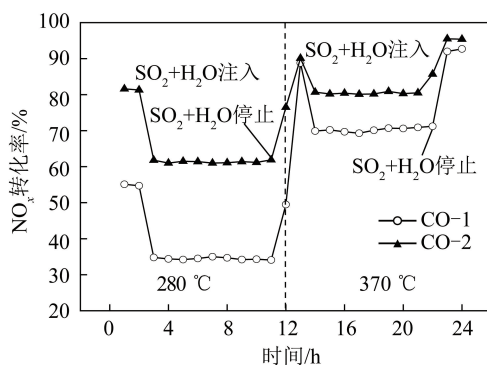


图 6 不同催化剂的抗 SO_2 、 H_2O 性能

Fig.6 Effects of SO_2 and H_2O on NO_x conversion over different catalysts

3 结 论

1) 脱硝催化剂负载 CoO 后,催化剂的酸性性能有所提升。V-Mo-Co/Ti 催化剂的脱硝效率优于 V-Mo/Ti 催化剂。继续增加 CoO 的负载量,尽管催化剂的酸性进一步增加,但催化剂的活性组分被 CoO 覆盖,减少了与反应气体的接触,催化剂脱硝活性会下降。

2) 脱硝催化剂负载一定量 Co 后,能够有效增强催化剂的抗 SO_2 、 H_2O 性能。

参考文献(References):

- [1] 陈欢哲,何海霞,万亚萌,等.燃煤烟气脱硝技术研究进展[J].应用化工,2019,48(5):1146-1155.
CHEN Huanzhe, HE Haixia, WAN Yameng, et al. Research progress of coal-fired flue gas denitrification technology [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(5): 1146-1155.
- [2] 胡冬. 脱除烟气 SO₃ 实现 SCR 宽复合脱硝的可行性分析[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 49-55.
HU Dong. Feasibility analysis on the application of SO₃ removal technology in coal-fired power units at low load SCR operation [J]. Electric Power, 2019, 52(3): 49-55.
- [3] 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): 47-53.
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 Environmental Protection, 2019, 35(2): 47-53.
- [4] 段景卫,王学涛,张福顺,等. CrCl₃ 掺杂对钒钛基 SCR 催化剂脱硝活性的影响[J]. 功能材料, 2018, 49(3): 3103-3108.
DUAN Jinwei, WANG Xuetao, ZHANG Fushun, et al. Influence of CrCl₃ doping on vanadium-titanium catalysts for selective catalytic reduction [J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49(3): 3103-3108.
- [5] 吴彦霞,梁海龙,陈鑫,等. ZrO₂ 掺杂对 V₂O₅-MoO₃/TiO₂ 催化剂脱硝性能的影响[J]. 环境工程, 2020, 38(5): 107-119.
WU Yanxia, LIANG Hailong, CHEN Xin, et al. Effect of ZrO₂ doping on denitrification performance of V₂O₅-MoO₃/TiO₂ catalysts [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(5): 107-119.
- [6] 黄力,王虎,纵宇浩,等. Y 改性对 V₂O₅-MoO₃/TiO₂ 催化剂脱硝性能的影响[J]. 现代化工, 2020, 40(3): 162-166.
HUANG Li, WANG Hu, ZONG Yuhao, et al. Influence of yttrium addition on denitrification performance of V₂O₅-MoO₃/TiO₂ catalyst [J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(3): 162-166.
- [7] 眭国荣,金奇杰,王红,等. Co 掺杂对 CeMoO_x/Al₂O₃ 协同催化 NO、CO 和 C₃H₈ 的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 1-6.
SUI Guorong, JIN Qijie, WANG Hong, et al. Effect of cobalt modification on CeMoO_x/Al₂O₃ for CO, NO and C₃H₈ elimination [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2017, 39(6): 1-6.
- [8] 陈九玉,朱宝忠,堵同宽,等. Co 改性 Fe₂O₃/AC 催化剂低温 SCR 脱硝性能[J]. 有色金属工程, 2017, 7(2): 99-102.
CHEN Jiuyu, ZHU Baozhong, DU Tongkuan, et al. Low-temperature selective catalytic reduction of NO_x with NH₃ over Co modified Fe₂O₃/AC catalysts [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(2): 99-102.
- [9] 吴彦霞,梁海龙,陈鑫,等. Ni, Co 掺杂对 Mn-Ce/TiO₂ 催化剂脱硝活性的影响[J]. 化工环保, 2016, 36(3): 321-325.
WU Yanxia, LIANG Hailong, CHEN Xin, et al. Effects of doped Ni, Co on denitrification activity of Mn-Ce/TiO₂ catalyst [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2016, 36(3): 321-325.
- [10] 莫建红,童志权,张俊丰. Mn/Co-Ba-Al-O 催化氧化 NO 性能研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1793-1798.
MO Jianhong, TONG Zhiquan, ZHANG Junfeng. Performance of Mn/Co-Ba-Al-O for catalytic oxidation of nitric oxide [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(11): 1793-1798.
- [11] BONINGARI Thirupathi, PANAGIOTIS G Smirmiotis. Co-doping a metal (Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ce, and Zr) on Mn/TiO₂ catalyst and its effect on the selective reduction of NO with NH₃ at low-temperatures [J]. Applied Catalysis B Environmental, 2011, 110: 195-206.
- [12] LI Kai, TANG Xiaolong, YI Honghong, et al. Low-temperature catalytic oxidation of NO over Mn-Co-Ce-O_x catalyst [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 192: 99-104.
- [13] CASAGRANDE L, LIETTI L, NOVA I, et al. SCR of NO by NH₃ over TiO₂-supported V₂O₅-MoO₃ catalysts: Reactivity and redox behavior [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1999, 22(1): 63-77.
- [14] CHOO S T, LEE Y G, NAM I S, et al. Characteristics of V₂O₅ supported on sulfated TiO₂ for selective catalytic reduction of NO by NH₃ [J]. Applied Catalysis A: General, 2000, 200: 177-188.
- [15] DONG G J, BAI Y, ZHANG Y F, et al. Effect of the V^{4+(3+)/V⁵⁺} ratio on the denitration activity for V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalysts [J]. New Journal of Chemistry, 2015, 39: 3588-3596.
- [16] YU W C, WU X D, SI Z C, et al. Influences of impregnation procedure on the SCR activity and alkali resistance of V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalyst [J]. Applied Surface Science, 2013, 283: 209-214.
- [17] QIU Y, LIU B, DU J, et al. The monolithic cordierite supported V₂O₅-MoO₃/TiO₂ catalyst for NH₃-SCR [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 294: 264-272.
- [18] 张道军,马子然,孙琦,等. 选择催化还原(SCR)反应机理研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(4): 1611-1623.
ZHANG Daojun, MA Ziran, SUN Qi, et al. Progress in the mechanism of selective catalytic reduction (SCR) reaction [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(4): 1611-1623.
- [19] FORZATTI P, NOVA I, TRONCONI E. Enhanced NH₃ selective catalytic reduction for NO_x abatement [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2009, 121(44): 8516-8518.
- [20] ZHU M, LAI J K, TUMULVRI U, et al. Nature of active sites and surface intermediates during SCR of NO with NH₃ by supported V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalysts [J]. Journal of the American Chemical Society, 2017, 139(44): 15624-15627.
- [21] YOUN S, SONG I, LEE H, et al. Effect of pore structure of TiO₂ on the SO₂ poisoning over V₂O₅/TiO₂ catalysts for selective catalytic reduction of NO_x with NH₃ [J]. Catalysis Today, 2018, 303: 19-24.