

Ce-Co 催化剂用于催化还原 N_2O 的实验研究

王伟¹, 陈利国², 程鑫培², 宋静³, 周长城^{2,3}, 徐海涛^{2,3*}

(1.江苏苏美达成套设备工程有限公司, 江苏南京 210000; 2.南京工业大学环境科学与工程学院, 江苏南京 211816; 3.南京杰科丰环保技术装备研究院有限公司, 江苏南京 211106)

摘要:氧化亚氮(N_2O)作为硝酸工业尾气排放的主要污染气体,严重危害人体健康和生态环境。硝酸工业烟气温度低,因此对于催化剂的低温活性要求更高。以稀土金属氧化物 CeO_2 为载体采用等体积浸渍法,通过系统调节 Ce/Co 比例制备复合氧化物催化剂,结果表明催化剂的活性从高到低依次为:10% Co_3O_4/CeO_2 > 15% Co_3O_4/CeO_2 > 20% Co_3O_4/CeO_2 > 5% Co_3O_4/CeO_2 。进一步优化催化剂焙烧温度和时间,得到以 300℃ 焙烧 3 h 制备的催化剂转化率最优。同时探究了 NO 与 O_2 加入对于反应体系的影响,发现 NO 气体有助于 N_2O 的转化。而氧气的影响与其加入浓度有关,在低浓度氧气下适当提高温度会提高 N_2O 的转化率,而高浓度氧气则会抑制 N_2O 的转化并产生副产物,为脱 N_2O 催化剂的制备提供新思路,为 N_2O 脱除工况条件调整提供了新方法。

关键词: N_2O ; 浸渍法; $CoCeO_x$

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)08-0124-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.022

Experimental investigation on the catalytic reduction of N_2O over Ce-Co catalysts

WANG Wei¹, CHEN Li-guo², CHENG Xin-pei², SONG Jing³, ZHOU Chang-cheng^{2,3}, XU Hai-tao^{2,3*}

(1.SUMEC Complete Equipment & Engineering Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2.School of Environmental Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

3.Nanjing Gekof Institute of Environmental Protection Technology & Equipment Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Nitrous oxide (N_2O) is the dominant pollutant in tail gases from nitric-acid plants and poses serious threats to human health and the ecological environment. However, the flue-gas temperature in nitric-acid plants is low, imposing stringent demands on the low-temperature activity of catalysts. In this work, rare-earth oxide CeO_2 was employed as a support, and composite oxide catalysts were prepared by incipient-wetness impregnation while systematically tuning the Ce/Co ratio. Activity tests revealed the following decreasing order of catalytic performance: 10% Co_3O_4/CeO_2 > 15% Co_3O_4/CeO_2 > 20% Co_3O_4/CeO_2 > 5% Co_3O_4/CeO_2 . Further optimisation of calcination temperature and duration identified the catalyst calcined at 300℃ for 3 h as the optimum, exhibiting the highest N_2O conversion. The influence of co-feeding NO and O_2 on the reaction system was also investigated. It was found that NO promotes N_2O conversion, whereas the effect of O_2 is concentration-dependent; under low O_2 levels, a moderate increase in temperature enhances N_2O conversion, whereas high O_2 concentrations suppress N_2O conversion and generate by-products. This study offers new insights into the design of N_2O -abatement catalysts and provides an alternative strategy for adjusting operating conditions in N_2O removal processes.

Key words: N_2O ; impregnation method; $CoCeO_x$

随着全球工业化进程加快,硝酸、己二酸等基础化工产能不断扩张,使得人为源氧化亚氮(N_2O)排放量不断上升^[1-2]。 N_2O 是继 CO_2 和 CH_4 后的第3大温室气体,其不仅会对人体健康产生影响,还会破坏大气层中的臭氧层^[3-5]。因此该气体的研究成为大气污染治理领域的前沿课题,引发社会与科研人员关注。

工业领域 N_2O 排放的治理路径主要为源头控制技术及末端治理技术,在做好源头控制技术的基础上,更重要的是对末端治理技术的开发。目前,主流的 N_2O 后处理技术主要包括高温分解法、直接催

化分解法、非选择性催化还原法、选择性催化还原法^[6-9]。其中选择性催化还原法因其高效环保的特性,已成为己二酸装置尾气处理的首选方案^[6]。其中以 NH_3 为还原剂进行选择性催化还原(SCR)反应的工艺成熟度最高,已有大量的工业化应用^[10-11]。但在实际应用中该技术面临着低温条件下催化活性较低和反应工程中易生成其他多种副产物,而这也对催化剂催化性能提出了更高的要求^[12-13]。

近年来以稀土金属氧化物或者过渡金属氧化物为组分,制备形成的催化剂的低温活性好而引起广泛关注^[14-15]。其中稀土元素铈(Ce)的催化特性和

收稿日期: 2025-10-24; 修回日期: 2026-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3500605); 扬州市科技计划项目(YZ2023020, YZ2024283)

作者简介: 王伟(1987-),男,硕士,研究方向为环境污染防治, wangweict@sumec.com.cn; 徐海涛(1977-),男,博士,教授,研究方向为大气污染物控制、土壤污染治理, 通讯联系人, htxu@njtech.edu.cn。

储氧性能被广泛应用于 SCR 的反应。Tan 等^[16]采用共沉淀法制备了 CeO_2-SiO_2 混合氧化物,研究发现该材料在 NH_3-SCR 反应中展现出显著抗硫性能。与单一载体 SiO_2 和 CeO_2 负载的 CeO_2 催化剂相比, $CeSi_2$ 在含 $2.20 \times 10^{-5} \text{ mol/L } SO_2 + 5\% H_2O$ 的苛刻反应条件下仍能维持优异的脱硝活性。这是由于 $CeSi_2$ 独特的微孔复合结构和通过 E-R 机制的反应途径。Li 等^[17]研究了掺杂 MoO_3 的 CeO_2/TiO_2 催化剂在 NH_3-SCR 反应中的催化活性和抗 As 性能。李想^[18]的研究发现,氧化砷对 $CeO_2/MoO_3/TiO_2$ 催化剂活性的影响明显小于 CeO_2/TiO_2 催化剂。当引入 MoO_3 后氧化砷对 CeO_2/TiO_2 催化剂的失活效应得到显著缓解。此外,由于 As-Mo 的相互作用更强,因此可以缓解 As 对活性位 CeO_2 的毒害作用,还可以恢复可反应的 Brønsted 酸和 Lewis 酸位点。过渡金属复合氧化物因有着可调控的氧化还原特性以及表面酸性特征,在 N_2O 催化分解领域表现出优势。可以发现铈因独特的动态氧空位调控机制受到关注, Ce^{3+}/Ce^{4+} 氧化还原对的价态循环可以动态生成反应活性高的表面氧空位,这些结构缺陷位点能有效吸附并活化 N_2O 分子,同时高储氧能力保证催化反应的高效进行^[19]。

本文以 CeO_2 作为催化剂载体,通过掺杂过渡金属氧化物 Co,采用等体积浸渍法制备 Co_3O_4/CeO_2 催化剂,并通过调控 Co/Ce 比例优化催化剂的氧化性能,得到两者的最优配比。同时通过调控焙烧温度以及焙烧时间来优化催化剂的催化性能,并以 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)等表征手段探究催化剂的组分及表面形貌,得到催化剂制备的最优方法。随后进一步调整反应气氛,探究 NO 以及 O_2 对于 N_2O 去除的影响,实现对 N_2O 催化还原效率的有效提升。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料和仪器

本研究使用的实验试剂与材料包括:六水硝酸铈(分析纯,麦克林生化科技有限公司)、六水硝酸钴(分析纯,麦克林生化科技有限公司)。实验气体包括:氮气(纯度 99.99%,南京特种气体厂股份有限公司)、氧气(纯度 99.99%,南京特种气体厂股份有限公司)、氨气(1%+99% N_2 ,南京特种气体厂股份有限公司)、一氧化氮(1%+99% N_2 ,南京特种气体厂股份有限公司)、氧化亚氮(1%+99% N_2 ,南京上元特种气体有限公司)。

本研究使用的主要仪器设备涵盖:电子天平(JJ124BF,常熟市双杰测试仪器厂)、多联加热磁力搅拌器(HJ-4A,上海尚谱仪器设备有限公司)、电热恒温干燥箱(DHG-9078A,上海精宏实验设备有限公司)、马弗炉(KF1200,南京博蕴通仪器科技有限公司)、管式炉(OTF-1200X,合肥科晶材料技术有限公司)、红外烟气分析仪(崂应 3021 型,青岛崂应海纳光电环保集团有限公司)、ICP-MS(7850 型,安捷伦)、烟气综合分析仪(崂应 3022 型,青岛崂应海纳光电环保集团有限公司)。

1.2 催化剂制备

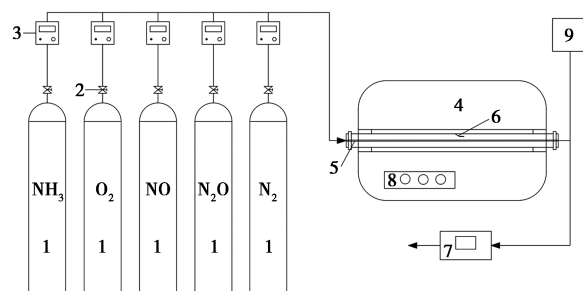
(1) Co_3O_4/CeO_2 催化剂制备:采用浸渍法以 Ce、Co 不同的摩尔比,用电子分析天平称取对应量 $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ 和 $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 溶于去离子水中,并在恒温搅拌器恒温($60^\circ C$)持续搅拌至水分蒸干,随后将产物转移到烘箱中于 $120^\circ C$ 干燥 2 h,最后将干燥后的前驱体置于马弗炉中于 $500^\circ C$ 下焙烧 3 h,获得以 CeO_2 负载在不同摩尔比 Co_3O_4 的催化剂样品,分别记为 5% Co_3O_4/CeO_2 、10% Co_3O_4/CeO_2 、15% Co_3O_4/CeO_2 、20% Co_3O_4/CeO_2 。此外分别称取 10 g $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ 和 10 g $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 以上述方法和条件制备成样品分别标记为 CeO_2 和 Co_3O_4 。

(2) 不同焙烧温度 Co_3O_4/CeO_2 催化剂制备:根据 10% Co_3O_4/CeO_2 摩尔比用电子分析天平称取对应量 $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ 和 $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 溶于去离子水中,并在恒温搅拌器恒温($60^\circ C$)持续搅拌至水分蒸干,随后将产物转移到烘箱中 $120^\circ C$ 干燥 2 h,最后将干燥后的前驱体置于马弗炉 $300^\circ C$ 、 $400^\circ C$ 、 $500^\circ C$ 、 $600^\circ C$ 、 $700^\circ C$ 下焙烧 3 h,获得不同温度下焙烧的催化剂。

1.3 催化剂活性测试

1.3.1 实验装置

实验装置简图见图 1。



1—气瓶;2—质量流量计;3—稳压阀;4—加热炉;5—石英反应管;6—热电偶;7—烟气分析仪;8—温度控制器;9—尾气处理装置

图 1 选择性催化还原活性评价装置简图

1.3.2 催化剂活性测试和评价方法

将制备好的催化剂用研钵轻轻研磨,使其通过 20 目和 40 目的两个筛网过筛,取 1 mL 粒径为 20~40 目的催化剂粉末用石英棉固定在石英管(内径 8 mm,外径 10 mm)中,将石英管放入管式炉。测试条件为:气体总流速 = 400 mL/min、 $N_2O = 1.1 \times 10^{-5}$ mol/L、 $NH_3 = 2.2 \times 10^{-5}$ mol/L、 $NO = 1.1 \times 10^{-5}/2.2 \times 10^{-5}$ mol/L 和 $O_2 = 5\%/10\%/15\%$,其余为 N_2 。采用程序升温,升温速率为 $2^\circ\text{C}/\text{min}$,每次升温 30°C ,以初始温度为 250°C 开始测试直至反应温度为 400°C 。期间待升温至目标温度后将温度保持 30 min 并对尾气进行分析。将收集的尾气通过红外烟气分析仪和烟气综合分析仪检测,读取入口和出口的 N_2O 和 NO_x 的浓度。

N_2O 的转化率(X)定义如式(1)所示。

$$X(\%) = ([N_2O]_{in} - [N_2O]_{out})/[N_2O]_{in} \quad (1)$$

其中, $[N_2O]_{in}$ 为入口 N_2O 浓度, mg/m^3 ; $[N_2O]_{out}$ 为出气口 N_2O 浓度, mg/m^3 。

1.4 催化剂表征方法

(1) X 射线衍射仪(XRD)

通过赛默飞 ARL EQUINOX Pro XRD 分析催化剂物相结构,扫描范围为 $5 \sim 85^\circ$,扫描速度为 $10^\circ/\text{min}$ 。XRD 分析利用 X 射线衍射效应,针对晶体及非晶体结构材料,能够对其内部各组分的形态及物相结构进行定性分析。

(2) 扫描电子显微镜(SEM)

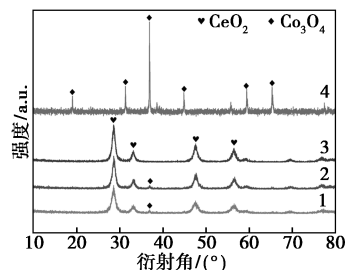
通过日本电子公司 JSM-5900 型扫描电镜测试催化剂样品的表面形貌,进行微观的成分分析。

2 结果和讨论

2.1 催化剂物相和形貌分析

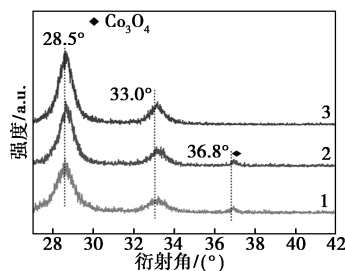
图 2 展示了不同催化剂的 XRD 图。如图 2(a) 所示,纯 CeO_2 催化剂在 $2\theta = 28.5^\circ$ 、 33.1° 、 36.8° 和 47.5° 处呈现典型萤石结构的特征衍射峰(JCPDS 34—0394),其高衍射峰强度表明样品具有高结晶度和完整晶格结构。与之形成鲜明对比的是,纯 Co_3O_4 在相同测试条件下未检测到明显衍射峰,推测其可能以高度分散态或非晶相形式存在^[20]。当加入 Co 制备成 Co/Ce 摩尔比为 10% 的复合催化剂时,XRD 图谱仅显示归属于 CeO_2 萤石结构的特征峰并且没有观察到 Co_3O_4 尖晶石相的特征峰。这表明 Co 成功掺入了 CeO_2 晶格,并且相互作用形成了固溶体。图 2(b) 展开分析可发现, CeO_2 特征峰强度随着焙烧温度呈现出非单调的变化态势:在

300°C 至 500°C 区间内,峰强度逐渐变弱,这可能是晶格氧位形成导致的晶格畸变所导致的^[21]。而当温度升高至 700°C 时其峰强再度降低,这可能是由于高温引发的晶体重排以及结晶度提高所致。同时随着焙烧温度的升高,在 $2\theta = 28.5^\circ$ 的 CeO_2 衍射峰向高角度偏移,这也进一步表明 Co 掺入了 CeO_2 晶格是成功的,并且在热作用下出现晶格畸变^[22]。



1— 300°C 10% Co@Ce; 2— 700°C 10% Co@Ce; 3—Ce; 4— Co_3O_4

(a) 4 种催化剂的 XRD 图谱

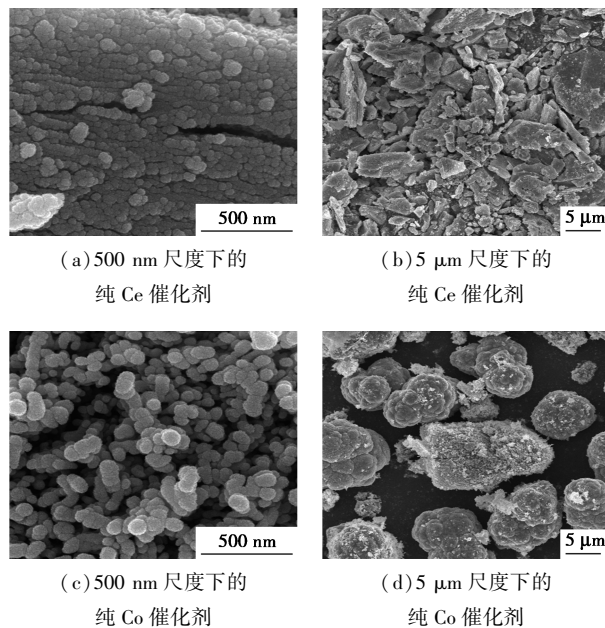


1— 300°C 10% Co@Ce; 2— 700°C 10% Co@Ce; 3—Ce

(b) 含铈催化剂 XRD 图谱部分放大图

图 2 催化剂的 XRD 图谱

图 3 展示了相同焙烧条件下制备的纯 Co_3O_4 和纯 CeO_2 催化剂的 SEM 图,从图中可以清晰地看出,



(a) 500 nm 尺度下的
纯 Ce 催化剂

(b) 5 μm 尺度下的
纯 Ce 催化剂

(c) 500 nm 尺度下的
纯 Co 催化剂

(d) 5 μm 尺度下的
纯 Co 催化剂

图 3 扫描电镜图

纯 CeO_2 催化剂呈现出球状颗粒,这些颗粒紧密堆积在一起,形成了高度紧密有序结构。而纯 Co_3O_4 催化剂呈现出球状颗粒,与纯 CeO_2 催化剂相比这些颗粒更为松散,形成了分散的块状物。

图 4 是焙烧温度为 300℃ 和 700℃ 条件下 10% Co_3O_4/CeO_2 催化剂的扫描电镜图。催化剂在焙烧温度为 300℃ 条件下呈现典型的多孔球状颗粒结构(平均粒径约 50 nm),这些纳米级颗粒通过表面相互作用形成松散堆积的块状聚集体。当温度升高至 700℃ 时,观察到材料表面明显的烧结现象。而对比图 3(a)与图 3(d),可以发现纯 Co_3O_4 和纯 CeO_2 催化剂以及掺杂催化剂的形貌特征存在显著差异。图 4 中 Co 元素掺杂 CeO_2 使得在不同焙烧温度下制备的 Co_3O_4/CeO_2 催化剂均呈现出由球状颗粒堆积而成的块状结构,但其粒径大小因焙烧温度的不同而有所变化,这种催化剂表面形貌的改变也进一步证明 Co 掺入 CeO_2 晶格是成功的。

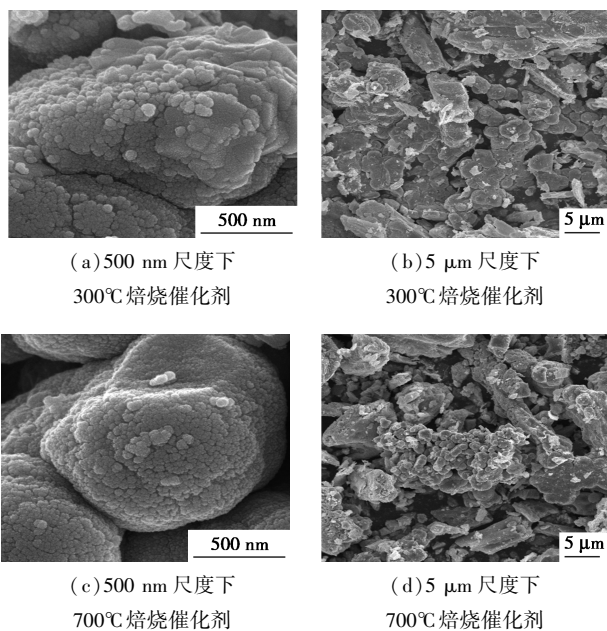


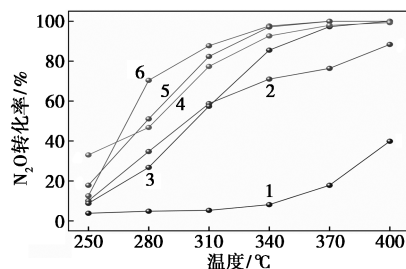
图 4 不同焙烧温度下 10% Co_3O_4/CeO_2 催化剂的扫描电镜图

2.2 催化剂活性评价

2.2.1 不同比例 Co_3O_4 掺杂 CeO_2 催化剂活性测试

图 5 展示了使用浸渍法制备了纯 CeO_2 、纯 Co_3O_4 和以 CeO_2 负载不同比例 Co_3O_4 所得 5% Co_3O_4/CeO_2 、10% Co_3O_4/CeO_2 、15% Co_3O_4/CeO_2 、20% Co_3O_4/CeO_2 催化剂在 250~400℃ 下的催化活性测试结果。如图 5 所示,纯 Ce 催化剂的活性虽然随着温度的升高有所提升,但在 400℃ 时 N_2O 的转化率仍不超过 40%,相比之下,纯 Co_3O_4 催化剂的催

化活性随着温度的升高有大幅度提升,但是在 340℃ 时出现了活性下降的情况,且在 400℃ 时 N_2O 的转化率不足 80%。



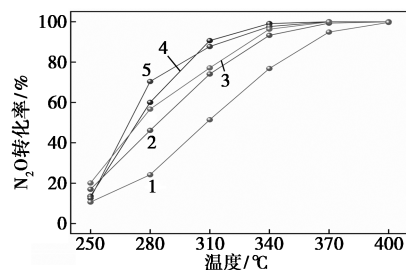
1— CeO_2 ; 2— Co_3O_4 ; 3—5% Co_3O_4/CeO_2 ; 4—20% Co_3O_4/CeO_2 ;
5—15% Co_3O_4/CeO_2 ; 6—10% Co_3O_4/CeO_2

图 5 不同比例 Co_3O_4/CeO_2 催化剂的 N_2O 转化率

对于不同比例 Co_3O_4 掺杂 CeO_2 催化剂活性评价结果显示,随着 Co 含量的增加,催化剂的催化活性呈现出先增加后减小的规律,4 种催化剂的活性顺序依次为 10% Co_3O_4/CeO_2 > 15% Co_3O_4/CeO_2 > 20% Co_3O_4/CeO_2 > 5% Co_3O_4/CeO_2 。这表明 Co 的含量对催化剂的活性具有显著影响,过高的 Co 含量会导致催化剂表面活性位点的聚集,从而降低其催化性能;而过低的 Co 含量则无法提供足够的活性中心,同样不利于催化反应的进行。只有在 Co 含量适中,催化剂才能表现出最佳的催化活性。

2.2.2 焙烧温度对催化剂反应活性的影响

煅烧作为多相催化剂制备工艺的关键步骤,其热力学参数对材料的结构有着重大影响。在最佳 Co 含量催化剂基础上固定煅烧时间 3 h 条件下,对不同焙烧温度制备催化剂的活性影响如图 6 所示。当焙烧温度升高至 700℃ 时,10% Co_3O_4/CeO_2 催化剂的 N_2O 的转化率显著下降。相比之下,在 300℃ 和 500℃ 的焙烧温度下,10% Co_3O_4/CeO_2 催化剂表现出最高的 N_2O 的转化率,且这 2 种焙烧温度条件



1—700℃; 2—400℃; 3—600℃; 4—300℃; 5—500℃

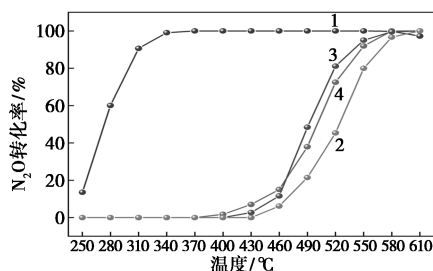
图 6 不同焙烧温度下 10% Co_3O_4/CeO_2 催化剂的 N_2O 转化率

下制备的催化剂,在 340~400℃ 反应温度范围内均保持高于 90% 的 N_2O 转化率。

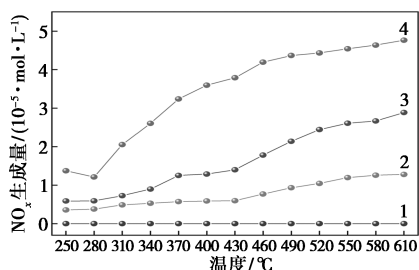
此外,由图 6 可知,随着焙烧温度的降低,催化剂的活性呈现先提高后趋于稳定的变化趋势,当焙烧温度从 700℃ 逐渐降低至 300℃ 时,催化剂在 370℃ 反应温度下的 N_2O 转化率从 80% 持续提升至 100%。在 400~700℃ 范围内焙烧的催化剂表现出较低的活性,这可能是因为过高的煅烧温度对催化剂结构造成了破坏,进而导致催化剂活性降低。考虑到生产成本,10% $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ 催化剂的最佳焙烧温度为 300℃。

2.2.3 O_2 浓度对催化剂反应活性的影响

图 7 展示了催化剂 10% $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ 在不同浓度的氧气中 N_2O 的转化效率。由图 7(a) 可知,氧浓度的增加使催化剂在 580~610℃ 下对 N_2O 的转化率均超过 90%,但是氧气浓度越高其转化速率越慢。因此在低氧浓度下,适当提高氧气浓度可促进 N_2O 的转化。同样的如图 7(b) 所示,随着氧气浓度的增加副反应产生的 NO_x 浓度显著上升,表明较高的氧气浓度下系统会额外产生 NO_x 这一副产物。



(a) N_2O 的转化率



(b) NO_x 浓度的影响

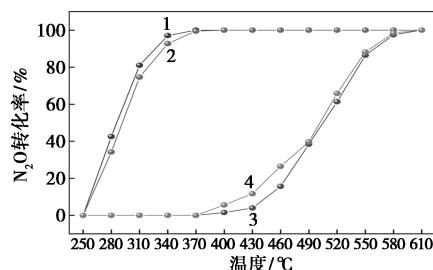
1—0% O_2 ; 2—15% O_2 ; 3—10% O_2 ; 4—5% O_2

图 7 不同氧气浓度对 10% $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ 催化剂的影响

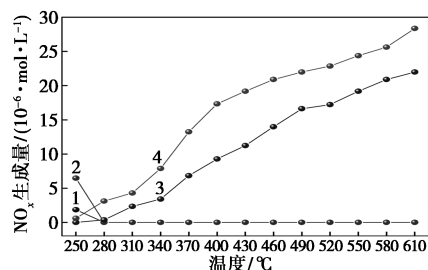
2.2.4 NO 浓度对催化剂反应活性的影响

图 8 展示了不同 NO 浓度下 10% $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ 催化剂的活性曲线。从图 8(a)、(b) 可以明显看出,随着 NO 浓度逐渐升高至 $2.20 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$, N_2O 的转化率在 280~400℃ 的温度区间内呈现出逐步提

升的趋势,与此同时,与之相对应的 NO_x 浓度也显著减少。随着氧气的加入, N_2O 的转化率较低,且 NO_x 浓度大幅度增加了,表明高浓度氧气对 N_2O 的转化有抑制作用,而在低浓度氧气下对 N_2O 的转化又有提升作用。



(a) N_2O 的转化率



(b) NO_x 浓度的影响

1— $1.1 \times 10^{-5} \text{ mol/L NO}$; 2— $2.2 \times 10^{-5} \text{ mol/L NO}$;

3—5% $\text{O}_2 + 1.1 \times 10^{-5} \text{ mol/L NO}$; 4—10% $\text{O}_2 + 1.1 \times 10^{-5} \text{ mol/L NO}$

图 8 不同 NO 浓度对 10% $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ 催化剂的影响

3 结论

本研究以稀土金属氧化物 CeO_2 为载体,通过浸渍法将不同摩尔比的 Co 负载于其上,制备了一系列 $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ 催化剂。通过 XRD 和 SEM 表征不同焙烧温度下催化剂的物化性质,发现在更高的焙烧温度下催化剂有明显的烧结现象,这揭示了热处理温度对 N_2O 还原性能的影响关系。随后实验通过测定 N_2O 转化率来评估不同活性组分催化剂的活性,结果表明催化剂活性从高到低依次为:10% $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2 > 15\% \text{ Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2 > 20\% \text{ Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2 > 5\% \text{ Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$;通过考察不同焙烧温度条件下 10% $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ 催化剂的活性,发现焙烧温度设定为 300℃、焙烧时间为 3 h 时制备的催化剂性能最优,在 370℃ 实现 N_2O 的完全转化。通过观察不同反应气氛条件下 10% $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ 催化剂的活性,发现 NO 气体加入有助于 N_2O 的转化率提升,同时提升强度会随着温度的升高而更显著。但在同时加入氧气后,随着氧气的增加,催化剂对 N_2O 的转化

影响和氧气浓度相关。在低浓度氧气下,适当提高温度会提高 N_2O 的转化率,而高浓度氧气的加入会表现出抑制作用且还会额外产生 NO_x 这一副产物。本研究通过以上实验为优化催化剂性能提供理论基础,为 N_2O 脱除催化剂的制备提供了新思路。

参考文献

- [1] Venterea R T, Maharjan B, Dolan M S J J O E Q. Fertilizer source and tillage effects on yield-scaled nitrous oxide emissions in a corn cropping system [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40 (5): 1521-1531.
- [2] 刘嘉欣, 陈彬, 段存存, 等. 基于 SD 模型的城市生活污水处理系统 N_2O 排放现状及预测 [J]. *环境科学学报*, 2024, 44 (12): 415-425.
- [3] Choi H M, Lee S J, Moon S H, *et al.* Comparison between unsupported mesoporous Co_3O_4 and supported Co_3O_4 on mesoporous silica as catalysts for N_2O decomposition [J]. *Catalysis Communications*, 2016, 82: 50-54.
- [4] 王涵啸. SCR 脱硝催化剂改性协同催化分解 N_2O 的实验研究 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2021.
- [5] 刘焱, 张荣兵, 陈操操, 等. 城镇污水处理厂典型处理工艺非二氧化碳温室气体排放特征及控排策略研究 [J]. *给水排水*, 2026, 62 (2): 31-38.
- [6] 陈标华, 田梦, 徐端年. 化工生产中温室气体 N_2O 排放与工业化减排技术 [J]. *环境工程*, 2023, 41 (10): 82-90.
- [7] 李香梅. 氧化亚氮减排技术的选择 [J]. *中氮肥*, 2010, (6): 28-30.
- [8] 于泳, 王亚涛. 己二酸尾气中 N_2O 处理技术进展 [J]. *工业催化*, 2016, 24 (7): 17-20.
- [9] 邵建军, 朱锡, 申文杰. Co_3O_4/CeO_2 的氧化还原性能及反应条件对其 CO 氧化活性的影响 [J]. *燃料化学学报*, 2012, 40 (1): 75-79.
- [10] 景艳丽, 黄晓昇, 唐忠诚, 等. NH_3 -SCR 高温烟气脱硝催化剂研究现状及进展 [J]. *分子催化*, 2026, 40 (2): 249-259.
- [11] 段玉梅, 张靖, 何云刚, 等. Sm 掺杂提高 Mn 基催化剂低温活性和抗水抗硫性 [J]. *现代化工*, 2026, 46 (2): 144-151.
- [12] 王倩. 高效铂基催化剂应用于低温氢气选择性还原 NO 的研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
- [13] 郁苏俊. 低温脱硝 SCR 催化剂改性研究及工业应用进展 [J]. *化工管理*, 2025, (5): 62-65.
- [14] 康嘉霓, 邓双, 王海强, 等. 铈基催化剂用于 CO 选择性催化还原 NO_x 的研究进展 [J]. *化学研究与应用*, 2024, 36 (5): 942-954.
- [15] 张兴华, 王宽岭, 王学海, 等. 原位 DRIFTS 在 SCR 过渡金属催化剂研究中的应用进展 [J]. *化工环保*, 2023, 43 (5): 580-589.
- [16] Tan W, Liu A N, Xie S H, *et al.* Ce-Si mixed oxide: A high sulfur resistant catalyst in the NH_3 -SCR reaction through the mechanism-enhanced process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55 (6): 4017-4026.
- [17] Li X, Li X S, Li J H, *et al.* Identification of the arsenic resistance on MoO_3 doped CeO_2/TiO_2 catalyst for selective catalytic reduction of NO_x with ammonia [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 615-622.
- [18] 李想. 废旧脱硝催化剂中毒机制与再生技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [19] 姚米航. 铈钛基氨气选择性催化还原 NO_x 催化剂的制备及其抗碱金属性能的研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2024.
- [20] Liu W J, Long Y F, Liu S N, *et al.* Promotional effect of Ce in NH_3 -SCO and NH_3 -SCR reactions over Cu-Ce/SCR catalysts [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2022, 107: 197-206.
- [21] 陈冠宜, 徐骏伟. 锡基钙钛矿水热合成及高温相变和表面活性位研究 [J]. *无机盐工业*, 2025, 57 (4): 37-44.
- [22] 孙世龙, 张国芳, 束俊, 等. 纳米 $Ce_{1-4x}(FeAlCoLa)_xO_{2-δ}$ 固溶体微观光谱特征及氧化还原性能研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44 (7): 1883-1888. ■
- [16] Chakraborty V, Das P. Synthesis of Nano-silica-coated biochar from thermal conversion of sawdust and its application for Cr removal: Kinetic modelling using linear and nonlinear method and modelling using artificial neural network Analysis [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020, 13 (2): 821-831.
- [17] Ren Z, Jiang X, Liu L, *et al.* Modification of high-sulfur polymer using a mixture porogen and its application as advanced adsorbents for Au (Ⅲ) from wastewater [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 328: 115437.
- [18] Ma Y, Shi C, Du J, *et al.* The key role of unsaturated olefin content on polysulfides prepared via inverse vulcanization of waste plant oils for mercury removal from wastewater [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31 (13): 19753-19763.
- [19] Ghumman A S M, Shamsuddin M R, Nasef M M, *et al.* Synthesis and characterization of sustainable inverse vulcanized copolymers from non-edible oil [J]. *Chemistry Select*, 2021, 6 (6): 1180-1190.
- [20] Valle S F, Giroto A S, Klaic R, *et al.* Sulfur fertilizer based on inverse vulcanization process with soybean oil [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, 162: 102-105.
- [21] Abbasi A, Yahya W Z N, Nasef M M, *et al.* Copolymerization of palm oil with sulfur using inverse vulcanization to boost the palm oil Industry [J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2021, 29 (9): S1446-S1456.
- [22] Aboli E, Jafari D, Esmaili H. Heavy metal ions (lead, cobalt, and nickel) biosorption from aqueous solution onto activated carbon prepared from Citrus limetta Leaves [J]. *Carbon Letters*, 2020, 30 (6): 683-698.
- [23] 曹军, 陆毕帅, 吕向菲, 等. 高分子复合黄土吸附剂的制备及其吸附水体铅离子研究 [J]. *应用化工*, 2025, 54 (2): 409-421.
- [24] 李童, 汪黎东, 齐铁月. 焙烧态镁铁铝水滑石对脱硫酸水中硒的吸附研究 [J]. *现代化工*, 2025, 45 (2): 103-108.
- [25] Salcedo O D C, Vargas D P, Giraldo L, *et al.* Study of mercury [Hg (Ⅱ)] adsorption from aqueous solution on functionalized activated carbon [J]. *ACS Omega*, 2021, 6 (18): 11849-11856. ■

(上接第 123 页)