

马倩,王赫,屈嘉鑫,等.Ni-Ce复合协同促进CO同步催化去除NO的性能和机理[J].中国环境科学,2025,45(2):671-681.

Ma Q, Wang H, Qu J X, et al. Performance and mechanism of Ni-Ce composite synergistically promoting CO-selective catalytic reduction of NO [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):671-681.

## Ni-Ce 复合协同促进 CO 同步催化去除 NO 的性能和机理

马倩<sup>1,2</sup>,王赫<sup>1,2</sup>,屈嘉鑫<sup>1,2</sup>,吉硕<sup>1,2</sup>,王薇<sup>3</sup>,黄宇<sup>4</sup>,党小庆<sup>1\*</sup> (1.西安建筑科技大学环境与市政工程学院,陕西西安710055; 2.陕西省环境工程重点实验室,西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西西安710055; 3.西安地球环境创新研究所,陕西西安710061; 4.中国科学院地球环境研究所,气溶胶化学与物理重点实验室,黄土与第四纪地质国家重点实验室,陕西西安710061)

**摘要:** 采用水热法制备了双金属 NiCe-x(x=1:3、2:2、3:1、0:1、1:0)催化剂,并应用于 CO 选择性催化还原 NO(CO-SCR)反应.结果显示,与 NiO 和 CeO<sub>2</sub> 催化剂相比,NiCe 复合催化剂展现出了优良的低温 CO 同步催化去除 NO 的性能,其中 NiCe 比例为 3:1 的催化剂在 200~450 °C 的宽温域达到 90%以上的 NO 转化率,并且表现出对 H<sub>2</sub>O 和 SO<sub>2</sub> 的良好耐受性.利用表征手段对样品的结构和性能进行了探究,发现 NiCe 双金属催化剂的比表面积较单一金属氧化物均提高,NiCe 复合催化剂中 Ce<sup>4+</sup>和 Ce<sup>3+</sup>之间的电子转移增加了催化剂表面的氧空位,Ni 和 Ce 离子共存促使氧化还原循环(Ce<sup>3+</sup>+Ni<sup>3+</sup>↔Ce<sup>4+</sup>+Ni<sup>2+</sup>)增强,进而提高了催化剂脱硝活性.最后,基于原位 DRIFTS 结果,发现吸附的 NCO 是 NiCe-3:1 在 CO 同步催化去除 NO 过程中的重要中间物种.

**关键词:** NiCe 复合; CO-SCR; 氧空位; 反应机理

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)02-0671-11

**Performance and mechanism of Ni-Ce composite synergistically promoting CO-selective catalytic reduction of NO.** MA Qian<sup>1,2</sup>, WANG He<sup>1,2</sup>, QU Jia-xin<sup>1,2</sup>, JI Shuo<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>, HUANG Yu<sup>4</sup>, DANG Xiao-qing<sup>1\*</sup> (1.School of Environment & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2.Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment, and Ecology, Ministry of Education, Key Laboratory of Environmental Engineering of Shaanxi Province, Xi'an 710055, China; 3.Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an 710061, China; 4.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China). *China Environmental Science*, 2025,45(2): 671~681

**Abstract:** The bimetallic NiCe-x(x=1:3, 2:2, 3:1, 0:1, 1:0)catalysts were successfully synthesized using the hydrothermal method and subsequently evaluated for their efficacy in the selective catalytic reduction of NO by CO(CO-SCR). The results indicated that compared to NiO and CeO<sub>2</sub> catalysts, the NiCe composite catalyst exhibited superior performance in simultaneously removing low-temperature CO and NO. Superior performance was demonstrated by the NiCe composite catalyst with a 3:1 ratio, which achieved over 90% NO conversion over an extensive temperature range of 200~450°C and exhibited strong resistance to SO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. Characterization indicated that the existence of Ni and Ce ions led to an increased specific surface area and accelerated redox cycling (Ce<sup>3+</sup>+Ni<sup>3+</sup>↔Ce<sup>4+</sup>+Ni<sup>2+</sup>), which improved denitrification activity. In-situ DRIFTS findings confirmed that adsorbed NCO played a crucial role as an intermediate in the CO-SCR process employing NiCe-3:1.

**Key words:** NiCe compound; CO-SCR; oxygen vacancies; mechanism of reaction

氮氧化物(NO<sub>x</sub>)是大气中的主要污染物之一,且是引发二次细颗粒物和近地表臭氧形成的关键前驱物<sup>[1]</sup>.CO 常伴随燃料的不完全燃烧存在于钢铁烧结、工业锅炉、水泥窑炉和燃油汽车等燃烧过程的尾气中<sup>[2-3]</sup>.除了对全球气候和环境产生影响之外,CO 和 NO 作为近地面的主要污染气体也可能对人们的健康造成威胁<sup>[4-5]</sup>.利用烟气中的 CO 作还原剂选择性脱除 NO,可减少喷氨在储存及运输时的泄

露和氨逃逸等问题.此外,该方法还能同时消除 NO<sub>x</sub> 和 CO 这两种污染物,从而在污染治理过程中降低还原剂的成本,达到“以废治废”的目标<sup>[6-8]</sup>.因此,开发 CO-SCR 催化剂对控制钢铁烧结等行业烟气 NO<sub>x</sub>

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2024SF-ZDCYL-05-06,2024SF-YBXM-569)

\* 责任作者, 教授, dangxq@163.com

排放具有重要的作用<sup>[9]</sup>.

贵金属催化剂(如 Pt、Pd 和 Ru)因在 CO 还原 NO 反应中具有较高的催化性能而得到了广泛的研究<sup>[10-11]</sup>.然而,由于贵金属催化剂的高成本、稀缺性,过渡金属氧化物(如 CuO<sub>x</sub>、CeO<sub>x</sub>、FeO<sub>x</sub>、CoO<sub>x</sub> 和 NiO<sub>x</sub>)作为替代材料得到了更多的关注<sup>[12-13]</sup>.其中 Ce 基催化剂具有良好的氧化还原能力、优异的氧迁移性和储氧能力<sup>[10,13]</sup>.为了进一步提高单一金属氧化物催化剂的催化性能,CeO<sub>2</sub> 常作为金属氧化物的促进剂<sup>[14-15]</sup>.已有研究表明,NiO 在 CO 氧化、甲烷干重整以及 N<sub>2</sub>O 分解等化学反应中具有较高的催化活性和稳定性,是一种很有前途的催化剂<sup>[16]</sup>.为了提高 NiO 的催化性能,研究者对 Ce 和 Ni 之间的协同作用与催化活性之间的关系进行了广泛的探讨.研究显示,NiO<sub>x</sub>/CeO<sub>2</sub> 催化剂在 CO 还原 NO 反应中效果优良,250℃时达到 90%的 NO 转化率与 80%的 CO 转化率<sup>[17]</sup>,这可能归功于 CeO<sub>2</sub> 表面形成的 NiO<sub>x</sub> 晶体结构<sup>[18]</sup>.同时,Tang 等<sup>[19]</sup>也指出表面 NiO 和 Ni-Ce-O 固溶体中的 Ni<sup>2+</sup>都是活性位点,可以明显促进 NiO<sub>x</sub>/CeO<sub>2</sub> 的 CO-SCR 活性.上述研究报道了现阶段 CO 与 NO 同步去除的现状以及 NiO 与 CeO<sub>2</sub> 载体之间的相互作用,但不同复合比例的 NiCe 低温复合催化剂在理化性质和催化活性方面的直接比较仍然缺乏.通过精确调控复合催化剂中不同金属的比例,能够有效调节催化剂中的氧空位浓度<sup>[20]</sup>.这种调控能够改变催化剂的表面结构和电子状态,进而影响其活性位点的数量和分布<sup>[20]</sup>.氧空位作为 NO 解离的重要活性位点,在低温条件下能够显著提高催化剂对 CO 还原 NO 的活性<sup>[21]</sup>.因此,优化 Ni/Ce 比例以调节氧空位浓度,是提升 NiCe 复合催化剂低温 CO-SCR 活性的有效策略.

本研究采用水热法成功合成了 NiCe 复合催化剂,并对其进行了 CO-SCR 脱硝活性的实验测试,研究了金属的比例对材料影响的性质,进而筛选出活性最好的材料.同时利用 XRD、EPR、BET、SEM、TEM、XPS、H<sub>2</sub>-TPR 和 In-situ DRIFTS 对材料的理化性质进行表征,探究了材料的反应机理以及双金属之间的协同催化效应,为 CO 同步催化去除 NO 的低温脱硝阳离子催化剂的研发提供理论参考.

## 1 材料与方 法

### 1.1 催化剂制备

Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 分别购自阿拉丁和山浦公司,对苯二甲酸购自源叶生物公司,乙醇由富宇公司提供,N,N-二甲基甲酰胺品牌为科密欧.

称取一定量 Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O (NiCe 比例为 1:3、2:2、3:1、0:1、1:0)溶于 40mL 的 N,N-二甲基甲酰胺溶液中搅拌 30min,以确保其完全溶解.随后,加入适量的对苯二甲酸配体,并在室温条件下进行 1.5h 的剧烈搅拌.之后,将这些混合液转移到带有聚四氟乙烯内衬的反应釜内,并将该反应釜放入鼓风干燥箱中,在 120℃下反应 24h,然后离心收集反应物.用无水乙醇和 N,N-二甲基甲酰胺对离心后收集的样品分别进行 3 次洗涤,离心完的样品于鼓风烘箱中 100℃干燥 12h.接着,将样品放入马弗炉,并以 15℃/min 的速度加热到 500℃,然后进行 2h 退火处理,所得为 NiCe-x,x 为 Ni 和 Ce 的物质的量之比.

### 1.2 CO-SCR 反应活性测试

在多气路固定床反应器内,进行了催化剂活性的实验测试.在内径为 16mm 的石英管,填充了 1g 催化剂,并使用石英棉封闭反应器的两端,之后将其固定在固定床反应器内.为了模拟工业烟气,反应工况设置如下:[NO]=500×10<sup>-6</sup>,[CO]=1000×10<sup>-6</sup>,[SO<sub>2</sub>]=50×10<sup>-6</sup>(使用时),H<sub>2</sub>O=5vol%(使用时),N<sub>2</sub> 作为平衡气,气体总流量为 1000mL/min,GHSV=60000mg/(g·h),利用电子流量计控制,进行 CO-SCR 检测.在活性测试中,温度从 100℃增加到 450℃,升温速度为 5℃/min,每升高 50℃稳定 30min,同时利用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)对反应后气体中的 NO、N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CO 浓度进行检测记录.NO 转化率、N<sub>2</sub> 选择性、N<sub>2</sub>O 产率、CO 转化率由公式(1)-(4)计算:

$$\text{NO Conversion}(\%) = \frac{([\text{NO}]_{\text{in}} - [\text{NO}]_{\text{out}})}{[\text{NO}]_{\text{in}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{N}_2 \text{ Selectivity}(\%) = \frac{([\text{NO}]_{\text{in}} - [\text{NO}]_{\text{out}} - 2[\text{N}_2\text{O}])}{[\text{NO}]_{\text{in}} - [\text{NO}]_{\text{out}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{N}_2\text{O Yiled}(\%) = \frac{2[\text{N}_2\text{O}]}{[\text{NO}]_{\text{in}} - [\text{NO}]_{\text{out}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{CO Conversion}(\%) = \frac{([\text{CO}]_{\text{in}} - [\text{CO}]_{\text{out}})}{[\text{CO}]_{\text{in}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:[NO]<sub>in</sub> 为进口气体中 NO 浓度;[NO]<sub>out</sub> 为出口气体中 NO 浓度;[N<sub>2</sub>O]为出口气体中 N<sub>2</sub>O 浓度;[CO]<sub>in</sub> 为进口气体中 CO 浓度;[CO]<sub>out</sub> 为出口气体中 CO 浓度.

### 1.3 催化剂性能表征

XRD 的表征采用了日本理学公司生产的 Ultimate IV 型 X 射线衍射仪,其测试的角度范围为 5~90°,电压为 40kV,电流 40mA,并且扫描步长为 0.02. BET 测试使用日本-麦奇克拜尔-BELSORP MaxII 型仪器,在 77K 液氮条件下,使用 N<sub>2</sub>+He 气氛对样品进行气体吸脱附测试,并通过 BET 方程和 BJH 方程从吸附/解吸等温线计算出比表面积、孔体积和平均孔径.样品的表面形貌及微观结构通过 GeminiSEM500 仪器进行观察,扫描工作电压为 15kV,同时在 200KV 电压下使用透射电子显微镜(TEM,美国 FEI Talos F200x),观察样品的形貌.用于表征材料的 XPS 测试采用美国赛默飞 Thermo Scientific ESCALAB Xi+型,测定样品表面的元素种类和价态信息,光源是单色化 Al 靶的 K $\alpha$ ( $E=1486.68\text{eV}$ )射线,能谱采用 C1s 的标准结合能 284.8eV 进行校正,谱图使用 Avantage 软件进行分峰拟合.EPR(电子顺磁)测试采用德国布鲁克-A300 型号设备,扫场宽度为 200G,扫场时间为 30s. H<sub>2</sub>-TPR 是通过 Auto Chem II 2720Micromeritics 型的化学吸附仪进行的,在测试前先将 100mg 催化剂置于 He 气氛中 300°C 预处理 0.5h,待冷却至 25°C 后进行后续操作,正式测定时以 10°C/min 的升温速率从 25°C 升至 900°C,保温 30min 后记录结果.利用布鲁克 VERTEX-70 型傅里叶变换红外光谱仪对催化剂进行 In-situ DRIFTS 的测试,不同温度下分别

对反应气体进行 0.5h 的吸附,在 600~4000cm<sup>-1</sup> 范围内以 4cm<sup>-1</sup> 的分辨率作为时间函数累计 16 次扫描采集光谱,用吸光度检测样品对特定波长红外光的吸收程度.

## 2 结果与讨论

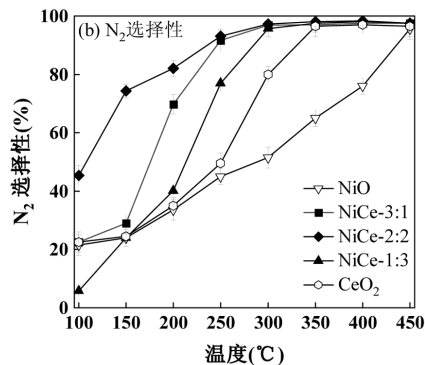
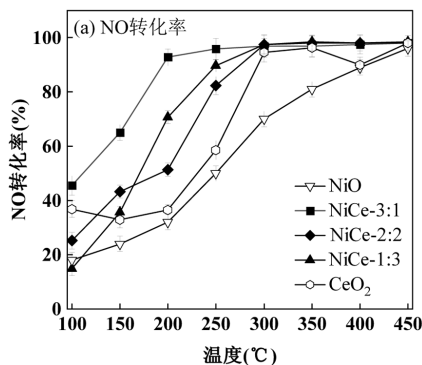
### 2.1 NiCe-x 催化剂活性测试

对不同 Ni/Ce 比例的 NiCe-x 催化剂进行活性测试,考察催化剂 CO 同步催化去除 NO 的转化率、N<sub>2</sub> 选择性、N<sub>2</sub>O 产率和 CO 转化率.

如图 1(a)所示,在 100~450°C 的温度区间内,相较于 NiO 和 CeO<sub>2</sub> 催化剂,NiCe 复合催化剂具有优良的低温催化活性.且 CO-SCR 活性与 NiCe 比例密切相关,当 NiCe 的物质的量比为 3:1 时,NO 转化率最高.对于该样品,当温度达到 200°C 时 NO 转化率为 91%,纯 CeO<sub>2</sub> 和 NiO 催化剂的活性在温度区间内整体呈上升趋势,300°C 的活性达到 97%.其他复合催化剂的 NO 转化率依次为:NiCe-3:1>NiCe-1:3>NiCe-2:2. NiO 催化剂在整个温度区间活性相对较低,引入过渡金属 Ce 之后,催化活性有显著提高.

不同 Ni/Ce 比例对催化剂 N<sub>2</sub> 选择性的影响如图 1(b)所示.在反应温度上升到 250°C 之前,NiCe-x 催化剂的 N<sub>2</sub> 选择性都在 80% 以下.随着温度的升高,N<sub>2</sub> 选择性逐渐升高,说明副产物的产量在减少.其中选择性最好的催化剂为 NiCe-3:1,在温度上升到 250°C 以后,N<sub>2</sub> 选择性接近 100%,表明 NiCe-3:1 催化剂可以将 NO 完全转化为 N<sub>2</sub>.

由图 1(c)可以看出,NiCe-x 催化剂的 CO 转化率随着温度的升高都有所提高,其中,NiCe-3:1 催化剂在 100~450°C 温度范围内显示出最高的 CO 转化率,在 300°C 时达到了 90% 以上,说明该样品 CO 吸附转化参与催化反应的能力较强<sup>[22-23]</sup>.



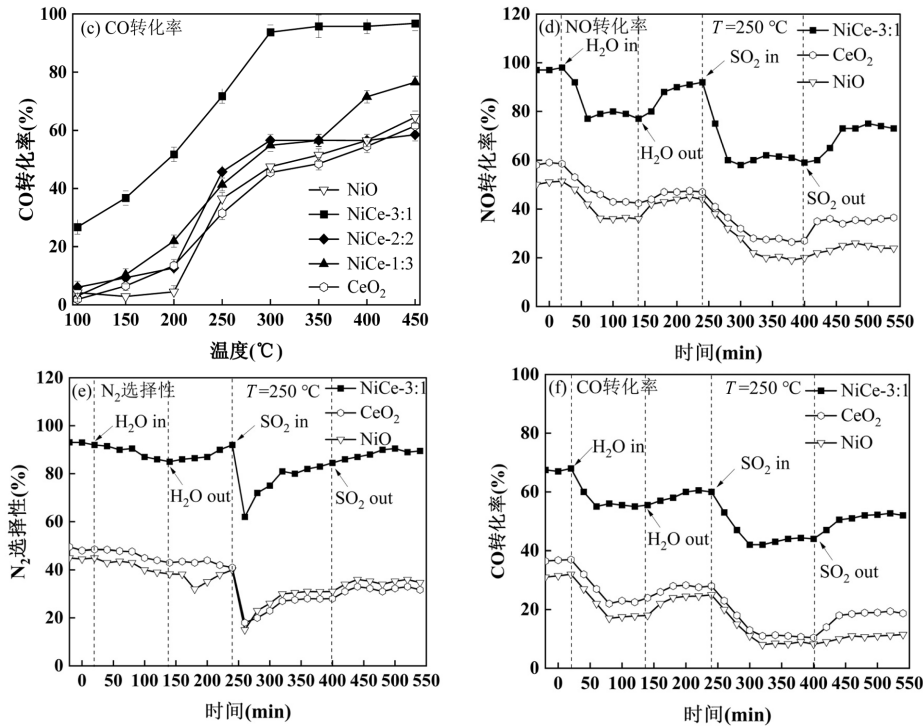


图1 NiCe- $x$  催化剂的 NO 转化率、 $N_2$  选择性、CO 转化率和抗水抗硫性

Fig.1 NO conversion,  $N_2$  selectivity, CO conversion, and water and sulfur resistance of NiCe- $x$  catalyst

反应工况:  $[NO]=500 \times 10^{-6}$ ,  $[CO]=1000 \times 10^{-6}$ ,  $N_2$  平衡气, GHSV=60000mg/(g·h),  $[SO_2]=50 \times 10^{-6}$  (使用时),  $H_2O=5vol\%$  (使用时)

$H_2O$  和  $SO_2$  对 NiCe- $x$  催化性能的影响如图 1(d)-(f)所示.与 NiO 和  $CeO_2$  相比,NiCe-3:1 表现出良好的耐水性.加入 5vol%的水蒸汽 3h 后,仍能保持约 90%的 NO 转化率, $N_2$  选择性几乎不受影响,CO 转化率下降 8%左右.相比之下, $SO_2$  对 NiCe-3:1 催化剂产生了明显的毒化作用.NO 转化率从 92%降至 73%, $N_2$  选择性下降 3%,CO 转化率从 60%下降到 52%.

## 2.2 NiCe- $x$ 催化剂的结构形态特征

不同催化剂的物相分析见图 2.水热法制备的  $CeO_2$  样品在  $2\theta$  值为  $28.5^\circ$ 、 $33.1^\circ$ 、 $47.5^\circ$ 、 $56.4^\circ$  (PDF#89~843)时表现出典型的萤石型立方晶体结构<sup>[24-25]</sup>.在 NiO 的衍射图中(PDF#75-019),可以看到 NiO 相(111)、(200)、(220)晶面处的  $37.3^\circ$ 、 $43.4^\circ$ 、 $62.9^\circ$ 峰.双金属样品中,存在着典型的  $CeO_2$  立方萤石结构的衍射峰, $CeO_2$  的峰强度也会随着 Ce 含量的降低而减弱,且向更低的衍射角偏移,NiO 仅峰强度随着 Ni 含量的降低逐步减弱,这表明 Ni 物种可能被纳入到  $CeO_2$  的晶相中形成固溶体.固溶体结构的形成会伴随着氧空位的生成<sup>[26]</sup>,这可能与 NiCe 复合催化剂活性增强有关.

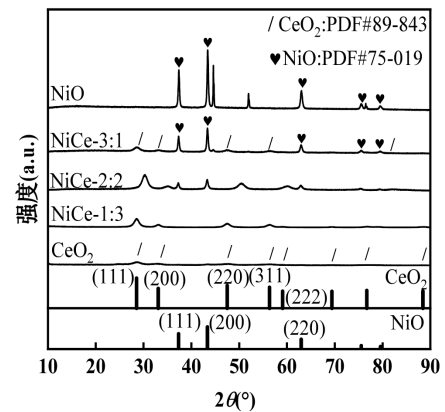


图2 NiCe- $x$  的 XRD 图

Fig.2 XRD patterns of NiCe- $x$  catalyst

NiCe- $x$  催化剂的比表面积和孔结构见图 3.按照 IUPAC 的分类标准,5 种催化剂的吸附脱附曲线可以被归类为 IV 类吸附等温线<sup>[27]</sup>.NiCe-1:3、 $CeO_2$ 、NiCe-2:2 都展现出了显著的  $H_2$  滞留回环特性,这意味着它们具有不均匀分布的管状孔和颗粒密集堆积的间隙孔.NiCe-3:1 和 NiO 的滞回曲线表现为  $H_1$  型,表明其孔隙尺寸分布较窄,颗粒尺寸较为均匀.从图 3(b)中可以观察到,催化剂在 2~7nm 的范围内呈现出显著的单峰特性,并且孔径呈现出介孔集中分

布模式.

表 1 进一步给出了样品的比表面积、孔容和孔径. NiCe 复合催化剂的比表面积和孔容相比单一金属氧化物均增大. 当 NiCe 比为 3:1 时, 催化剂平均孔径为 5.83nm, 此时比表面积最大为  $167.64\text{m}^2/\text{g}$ . 这一结果提高了催化剂的化学吸附性能, 同时促进了金属氧化物的分散, 防止颗粒聚集<sup>[28]</sup>, 进而提高催化剂的脱硝活性.

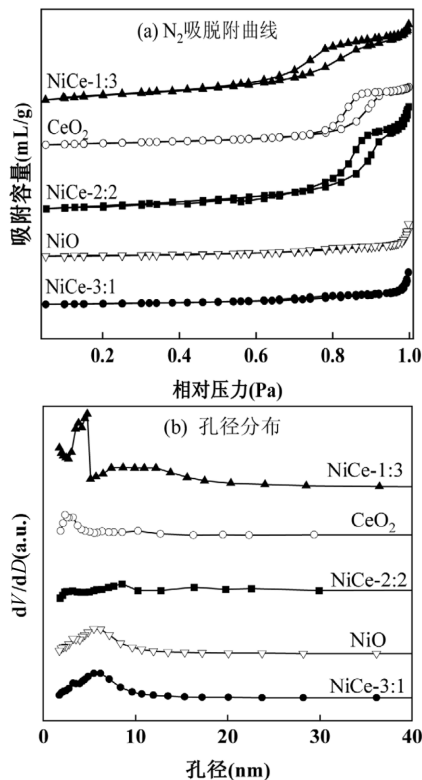


图 3 NiCe- $x$  催化剂的  $\text{N}_2$  吸脱附曲线图和孔径分布图  
Fig.3  $\text{N}_2$  adsorption-desorption isotherms and pore size distribution curves of NiCe- $x$  catalyst

表 1 NiCe- $x$  催化剂的结构数据  
Table 1 Structural data of NiCe- $x$  catalyst

样品	比表面积( $\text{m}^2/\text{g}$ )	孔容( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	孔径(nm)
NiO	40.64	0.20	6.71
NiCe-3:1	167.64	0.43	5.83
NiCe-2:2	110.73	0.31	5.27
NiCe-1:3	158.30	0.39	7.82
$\text{CeO}_2$	56.09	0.23	7.74

NiCe- $x$  催化剂的微观形貌变化见图 4. 可以观察到, NiO 催化剂表现出疏松多孔的沟壑形状;  $\text{CeO}_2$  催化剂为类球状; 将 Ni 和 Ce 复合后, 表现出疏松多孔的结构上附着类球状物体结构. NiCe-3:1 催化剂

的能谱图如图 4(d-f)所示, 元素均匀地分散在催化剂上. 同时利用 TEM 对晶体结构进行了表征. 对于  $\text{CeO}_2$  催化剂, 其  $\text{CeO}_2(111)$  晶体的晶格间距为 0.315nm,  $\text{CeO}_2(222)$  为 0.156nm,  $\text{CeO}_2(311)$  为 0.163nm. NiCe-3:1 催化剂主要呈现  $\text{CeO}_2$  晶体的结构, 相应 Ce 晶面的晶格间距出现轻微减小的趋势, 这可能是  $\text{Ce}^{4+}$  被离子半径小的金属离子 Ni 取代进而形成固溶体<sup>[17,29]</sup>.

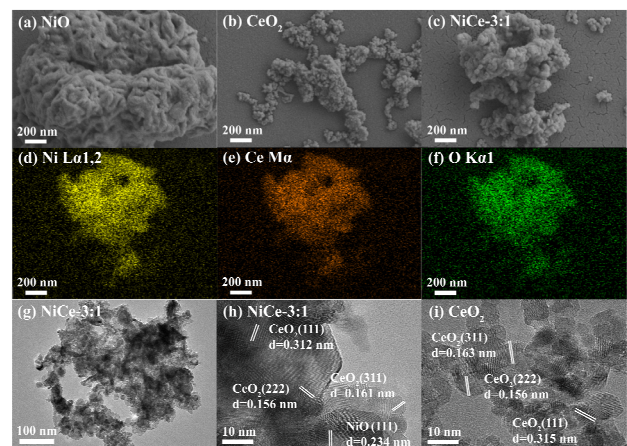


图 4 NiCe- $x$  催化剂的 SEM、EDS、TEM 图  
Fig.4 SEM, EDS, and TEM images of NiCe- $x$  catalyst

### 2.3 NiCe- $x$ 催化剂的表面元素和氧化还原性能

元素的化学组成和化学价态如图 5 所示. 对 Ni2p 光谱图, 在 Ni2p<sub>3/2</sub> 轨道范围内, 854~855eV 为  $\text{Ni}^{2+}$  的特征峰, 856.0eV 为  $\text{Ni}^{3+}$  的特征峰, 859~861eV 为轨道卫星峰<sup>[30]</sup>; 在 Ni2p<sub>1/2</sub> 轨道范围内, 870.9~873.2eV 为  $\text{Ni}^{2+}$  的特征峰. 这些结果表明, 在 NiO 和 NiCe 复合催化剂中, Ni 物种主要以  $\text{Ni}^{2+}$  和  $\text{Ni}^{3+}$  的价态形式存在. 从表 2 中  $\text{Ni}^{3+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$  的特征峰面积比可知, 双金属 NiCe-3:1 表现出最高的  $\text{Ni}^{3+}$  浓度 ( $\text{Ni}^{3+}/(\text{Ni}^{2+}+\text{Ni}^{3+})$  比率为 77.68%), 据报道<sup>[18]</sup>  $\text{Ni}^{3+}$  的含量越高, 更有利于电子传输, 部分电子通过配体中的氧从  $\text{Ce}^{3+}$  迁移到  $\text{Ni}^{3+}$ , 导致了 Ni 中心的部分电子结构发生了变化. 此外, 与 NiO 相比, 双金属复合的  $\text{Ni}^{3+}$  峰向低结合能偏移, 表明 Ni 和 Ce 离子共同存在会导致氧化还原循环 ( $\text{Ce}^{3+}+\text{Ni}^{3+}\leftrightarrow\text{Ce}^{4+}+\text{Ni}^{2+}$ ) 增强, 印证了 NiCe- $x$  双金属之间存在着强烈的相互作用.

如图 5(b) 展示的 Ce3d 轨道谱图, Ce3d 轨道被分为 8 个振动峰, 它们分别属于  $\text{Ce}^{4+}$  的 881.8, 887.2, 897.8, 900.8, 907.2, 916.0eV 和  $\text{Ce}^{3+}$  的 884.6、

904.2eV.由表 2 可以看出 NiCe-3:1 中  $Ce^{3+}$  含量最高, $Ce^{3+}$  的含量与氧空位有着密切的关系,电子在  $Ce^{4+}$  和  $Ce^{3+}$  之间的迁移有助于氧空位的生成<sup>[31]</sup>.  $CeO_2$  晶格显著改变了 Ni 的化学态,表明部分 Ni 并入  $CeO_2$  晶格,这很好地解释了在 TEM 图像中观察到  $CeO_2$  晶相为主相的原因.改性晶格的结构与 NiO 之间的协同作用对催化活性的影响至关重要<sup>[32]</sup>.  $CeO_2$  晶格中的氧空位是由  $Ce^{3+}$  取代  $Ce^{4+}$  位置引起的.同样,当晶格中的  $Ce^{4+}$  被 Ni 离子取代时,晶格中的一个氧被释放以保持价态平衡,从而在晶格中产生一个氧空位.

O1s 轨道的 XPS 谱图如图 5(c)所示,529.6~529.8eV 为晶格氧的特征峰,记为  $O_\alpha$ .531.5~531.7eV 是表面化学吸附氧的特征峰,记为  $O_\beta$ ;据报道, $O_\beta$  在氧化还原反应中的氧转移中起关键作用<sup>[33]</sup>.相比于单金属氧化物催化剂,NiCe 复合催化剂的  $O_\beta/(O_\alpha+O_\beta)$  比例增大,表明 NiCe 复合后催化剂产生了更多的氧空位<sup>[34]</sup>,这解释了催化性能提高的原因.图 5(c)中观察到,氧在 NiCe 复合催化剂上有较低的结合能,这也有利于氧物种在催化反应中的迁移<sup>[23]</sup>.

利用 EPR 实验直观地展示了催化剂表面氧空位的变化.如图 6 所示,NiO、 $CeO_2$  和 NiCe-3:1 的 EPR 谱都显示出  $g=2.003$  的信号,这些信号归因于氧空位的存在<sup>[21]</sup>.对于双金属 NiCe-3:1 催化剂,具有比单金属 NiO、 $CeO_2$  更多的氧空位,这与 XPS 结果一致.

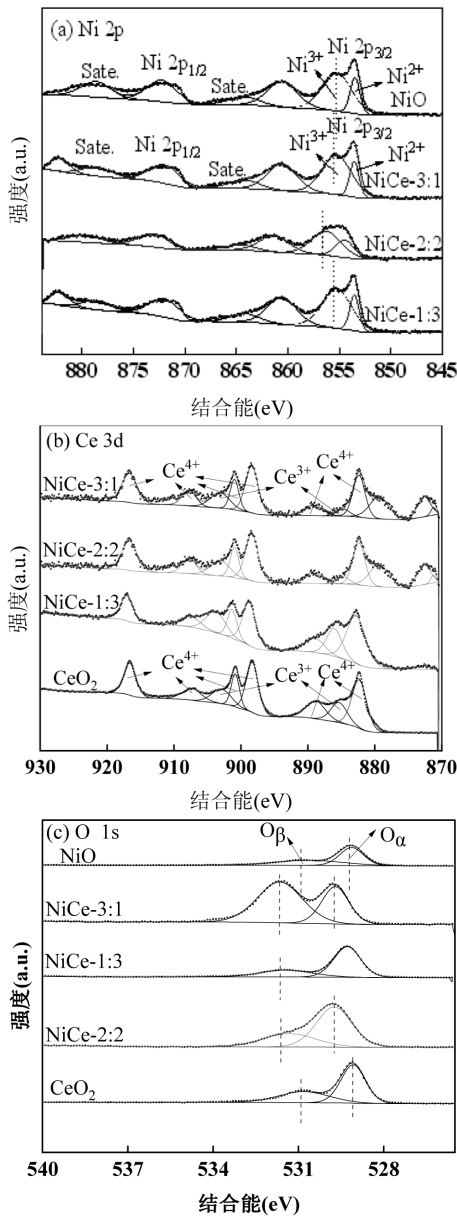


图 5 NiCe-x 催化剂的 XPS 光谱图  
Fig.5 High-resolution XPS spectra of NiCe-x catalyst

表 2 基于 XPS 的 NiCe-x 的化学成分

Table 2 Chemical composition table of NiCe-x catalyst based on XPS (%)

样品	O	Ni	Ce	Ni <sup>3+</sup> / (Ni <sup>2+</sup> +Ni <sup>3+</sup> )	Ce <sup>3+</sup> / (Ce <sup>3+</sup> +Ce <sup>4+</sup> )	O <sub>β</sub> / (O <sub>α</sub> +O <sub>β</sub> )
NiO	39.4	41.2	-	76.3	-	37.1
NiCe-3:1	44.8	32.2	6.0	77.7	24.8	63.9
NiCe-2:2	63.0	8.67	1.7	69.0	23.9	45.1
NiCe-1:3	30.1	6.6	5.8	50.0	23.3	38.0
CeO <sub>2</sub>	51.6	-	19.6	-	19.4	30.6

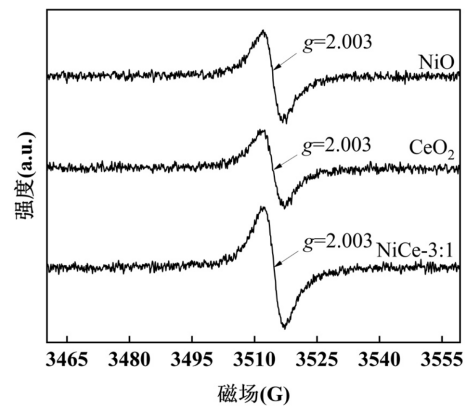


图 6 NiCe-x 催化剂的 EPR 图  
Fig.6 EPR spectra of NiCe-x catalyst

图 7 展示了不同 NiCe 复合催化剂的氧化还原特性.对于 NiO 催化剂,仅观察到 344℃ 处的还原峰,这是  $Ni^{2+}$  转化为  $Ni^0$  的关键还原峰<sup>[35]</sup>;  $CeO_2$  催化剂于 384℃ 存在一个较长而微弱的  $H_2$  消耗峰,这是由于  $CeO_2$  很难被  $H_2$  还原,仅  $CeO_2$  的表层可被  $H_2$  还



酸盐羰基的峰强度随着温度的上升呈现出先增加后减小的趋势,CO<sub>2</sub>物理吸收峰强度在 250℃后也逐渐增加,CO 的特征峰在 350℃处峰强显著降低.上述峰强的变化表明催化剂表面积累的碳酸盐物种在 250℃及以上发生了分解和转化<sup>[42]</sup>.

**2.4.2 NO 吸附** 由图 9(a)-(c)可知,在 2185, 1942, 1965, 1810cm<sup>-1</sup> 观察到的峰谱可归因于 NO 气体物理吸收峰<sup>[27]</sup>.对于 NiO 催化剂,1524, 1290cm<sup>-1</sup> 的峰为单齿硝酸盐<sup>[30]</sup>;1120cm<sup>-1</sup> 位置的峰为 ν<sub>s</sub>(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)表面硝酸盐<sup>[27]</sup>.对于 CeO<sub>2</sub> 催化剂,1714, 1542, 1452, 1361, 1251, 1224cm<sup>-1</sup> 处出现的峰分别归属于吸附(NO)<sub>2</sub>物种<sup>[17]</sup>、桥状双齿硝酸盐<sup>[27]</sup>、单齿表面亚硝酸盐<sup>[27]</sup>、NO 气体物理吸收峰<sup>[30]</sup>、螯合亚硝酸盐<sup>[17]</sup>、螯合双齿硝酸盐<sup>[16]</sup>.其中不稳定的单齿表面亚硝酸盐与 NO 气体物理吸收峰随着温度升高峰强度下降,这表明亚硝酸盐和 NO 可能作为中间体参与反应.

NiCe-3:1 催化剂的 NO 物理吸附峰强度高于 NiO 和 CeO<sub>2</sub>,说明在 NiCe-3:1 中 NiCe 双位点的协同可以促进 NO 分子的吸附.观察图 9(c)发现,1413cm<sup>-1</sup> 处的(NO<sub>2</sub>)<sup>-</sup>亚硝酸盐与 1318cm<sup>-1</sup> 位置的(NO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>单齿硝酸盐的峰强先增大后减小,这两种物质结构不稳定且易分解,能够促进反应的进行.与单金属 NiO 相比,NiCe-3:1 与 CeO<sub>2</sub> 的红外峰谱图中显示出了更多相似的 NO<sub>x</sub> 种类,这表明 NiCe-3:1 中的 Ce 离子能够促进化学吸附 NO<sub>x</sub> 物种的形成,并能进一步促进硝酸盐的分解和转化<sup>[43-44]</sup>.

**2.4.3 CO 和 NO 共吸附** 对 NiO 催化剂,在 1960, 1522, 1284, 1120cm<sup>-1</sup> 处出现的红外峰分别为表面碳酸盐羰基<sup>[17]</sup>、双齿硝酸盐<sup>[27]</sup>、螯合亚硝酸盐<sup>[17]</sup>和 ν<sub>s</sub>(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)表面硝酸盐<sup>[27]</sup>,上述物种特征峰强度随着温度的升高逐渐增大.此外,红外光谱图中出现了微弱的 N<sub>2</sub>O\*(2306cm<sup>-1</sup>)<sup>[16]</sup>和 \*NCO(2183cm<sup>-1</sup>)<sup>[33]</sup>的特征峰.对 CeO<sub>2</sub> 催化剂,2164, 1967(1784), 1568, 1545, 1498, 1443, 1363(1084), 1252(1225) cm<sup>-1</sup> 处出现的峰为 \*NCO<sup>[33]</sup>、表面碳酸盐羰基<sup>[17]</sup>、桥状硝酸盐<sup>[30]</sup>、羧酸盐非对称振动模式吸收峰 ν<sub>as</sub>(COO<sup>-</sup>)<sup>[12]</sup>、单齿亚硝酸盐<sup>[27]</sup>、亚硝酸盐<sup>[16]</sup>、硝酸盐<sup>[41]</sup>、单齿硝酸盐<sup>[30]</sup>.其中 \*NCO 的峰在 300-450℃ 呈现递增的趋势;桥状硝酸盐在 300-450℃ 范围内以递减的趋势出现,说明高温下能够促进该物质的分解<sup>[45]</sup>.

NiCe-3:1 的谱图中,在 1582cm<sup>-1</sup> 处出现了桥接

双齿硝酸盐物种的新的特征峰,峰强随着温度增加呈现先增加后降低的趋势,且在 300℃降低得最为显著.双齿硝酸盐物质较稳定,含量减少说明 NiCe-3:1 中的活性位点促进了硝酸盐的分解和转化.\*NCO 物种的峰强变化明显,于 350℃出现了显著提高,并于 400℃消失,可能为催化剂参与反应的重要中间体.

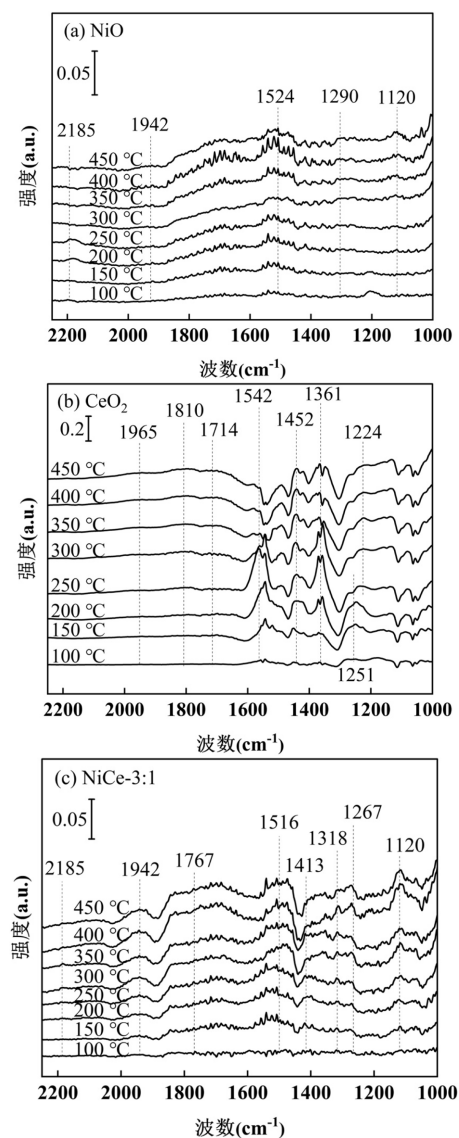


图 9 NiCe-x 催化剂在不同温度下 NO 吸附 In-situ DRIFTS 光谱

Fig.9 In-situ DRIFTS spectra of NO adsorption on NiCe-x catalyst at different temperatures

NiCe-3:1 催化剂在 250℃时的红外光谱图如图 10(d)所示.NiCe-3:1 在 250℃时的 CO 与 NO 物理吸附峰较 NiO、CeO<sub>2</sub> 的吸附峰变弱.上述 CO、NO 和硝酸盐的消耗以及 \*NCO 的生成(公式(5)和(6))进一

步说明 $*\text{NCO}$  是 NiCe-3:1 在 CO 同步催化去除 NO 的重要中间物种, $*\text{NCO}$  物种与 NO 的相互作用是  $\text{N}_2$  生成的重要途径。



基于上述各峰的变动,可以合理地解释 NiCe-3:1 的 CO-SCR 反应机理。在 CO 和 NO 共同进入反应体系后,催化剂表面的 CO 和 NO 会发生竞争性吸

附。在 100~250℃ 下,大部分 CO 与晶格氧反应产生氧空位。随后,NO 吸附在氧空位上并解离成 N 和 O 原子。在 250~450℃ 时,吸附的硝酸盐大量分解,产生  $*\text{N}$ , $*\text{N}$  与 CO 结合生成  $*\text{NCO}$  物种,该物种又会进一步与 NO 反应生成  $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$ 。在 NiCe-3:1 的结构中,由于 Ni 和 Ce 之间的相互作用,使得催化剂产生了更多的氧空位促进了吸附的  $\text{NO}_x$  物种中的 N-O 的断裂<sup>[46]</sup>。

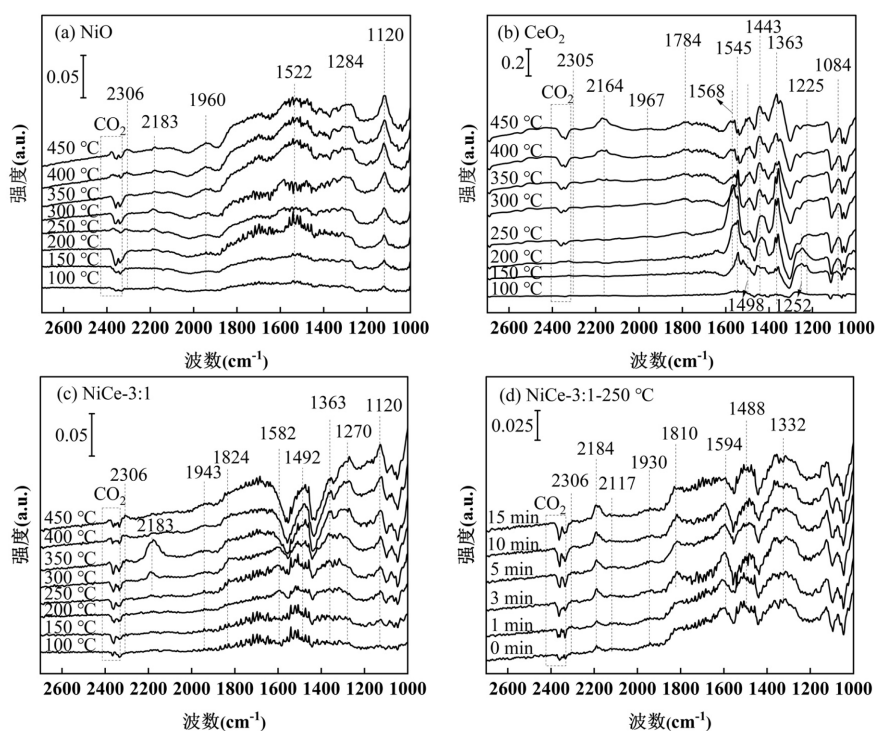


图 10 NiCe- $x$  催化剂在不同温度下 CO+NO 共吸附 In-situ DRIFTS 光谱

Fig.10 In-situ DRIFTS spectra of CO+NO co-adsorption on NiCe- $x$  catalyst at different temperatures

### 3 结论

3.1 NiCe- $x$  复合金属氧化物催化剂对 CO 同步催化去除 NO 的催化活性优于单一金属氧化物,其中 NiCe-3:1 样品对 NO 去除性能优异,在 250~450℃ 宽温域范围内,NO 转化率达到 95% 以上水平, $\text{N}_2$  选择性高于 90%,并且表现出对  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{SO}_2$  的良好耐受性。

3.2 NiCe-3:1 催化剂脱硝性能的提高主要原因:双金属复合催化剂具有更大的比表面积,从而暴露出更多的活性位点;Ni 向  $\text{CeO}_2$  晶格的纳入促进了氧空位的生成,合理改善了反应的氧化还原循环。In-situ DRIFTS 研究表明  $*\text{NCO}$  是 NiCe-3:1 在 CO 同步催

化去除 NO 的重要中间物种。250~450℃ 时,氧空位促使吸附的硝酸盐分解,产生  $*\text{N}$ , $*\text{N}$  与 CO 结合生成  $*\text{NCO}$  物种。 $*\text{NCO}$  物种与 NO 的相互作用促进  $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  生成。

#### 参考文献:

- [1] Du Y, Gao F Y, Zhou Y S, et al. Recent advance of CuO-CeO<sub>2</sub> catalysts for catalytic elimination of CO and NO [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021,9(6):106372.
- [2] 廖继勇,郑浩翔,甘敏,等.烧结烟气 CO 的产生及治理途径—源头及过程控制技术 [J]. 烧结球团, 2021,46(2): 8-16.  
Liao J Y, Zheng H X, Gan M, et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas—source and process control technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2021,46(2):8-16.
- [3] 宋雨桐.浅析我国光化学烟雾的形成与防治 [J]. 生物化工,

- 2020,6(1):126-129.
- Song Y T. The formation and prevention of the photochemical smog in China [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2020,6(1):126-129.
- [4] Zhang Z, Fan L, Liao W, et al. Structure sensitivity of CuO in CO oxidation over CeO<sub>2</sub>-CuO/Cu<sub>2</sub>O catalysts [J]. *Journal of Catalysis*, 2022,405:333-345.
- [5] 孙朋琨,张宇晴,童 华,等.Ce 掺杂对 MnO<sub>x</sub> 在低温等离子体协同下的脱硝性能影响 [J]. *环境工程学报*, 2023,17(5):1533-1542.
- Sun P K, Zhang Y Q, Tong H, et al. Effect of Ce doping on the denitrification performance of MnO<sub>x</sub> in the presence of low temperature plasma [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023,17(5):1533-1542.
- [6] 石 勇,李 橙,黄 磊,等.Ti<sub>x</sub>-Ni<sub>1-x</sub>-MOFs 的制备及其 CO 选择性催化还原 NO<sub>x</sub> 研究 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(11):5080-5087.
- Shi Y, Li C, Huang L, et al. Preparation of Ti<sub>x</sub>-Ni<sub>1-x</sub>-MOFs and their selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by CO [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(11):5080-5087.
- [7] Zou W, Ge C, Lu M, et al. Engineering the NiO/CeO<sub>2</sub> interface to enhance the catalytic performance for CO oxidation [J]. *RSC advances*, 2015,5(119):98335-98343.
- [8] 付玉秀,仲雪梅,常化振,等.铈钴复合氧化物催化剂催化 CO-SCR 反应机理研究 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(8):2934-2940.
- Fu Y X, Zhong X M, Chang H Z, et al. Mechanism study on CO-SCR over Ce-Co-O<sub>x</sub> mixed oxides catalysts [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(8):2934-2940.
- [9] 陈小根,张茹杰,深伯雄,等.以 CO 为还原剂的选择性催化还原 NO 催化剂研究进展 [J]. *现代化工*, 2020,40(5):68-72.
- Chen X G, Zhang R J, Shen B X, et al. Research progress in catalysts for selective catalytic reduction of NO with CO as reductant [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020,40(5):68-72.
- [10] Liu T, Qian J, Yao Y, et al. Research on SCR of NO with CO over the Cu<sub>0.1</sub>La<sub>0.1</sub>Ce<sub>0.8</sub>O mixed-oxide catalysts: Effect of the grinding [J]. *Molecular Catalysis*, 2017,430:43-53.
- [11] He Y, Liu J, Zhang G, et al. Insights into the structure activity relationships of highly efficient CuCe oxides for the low temperature CO oxidation and CO-SCR [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2022, 104:142-155.
- [12] Xu Z, Li Y, Lin Y, et al. A review of the catalysts used in the reduction of NO by CO for gas purification [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020,27(7):6723-6748.
- [13] Shi X, Chu B, Wang F, et al. Mn-Modified CuO, CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> three-phase strong synergistic coexistence catalyst system for NO Reduction by CO with a wider active window [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2018,10(47):40509-40522.
- [14] Du X X, Yao T L, Wei Q L, et al. Investigation of Fe-Ni mixed-oxide catalysts for the reduction of NO by CO: Physicochemical properties and catalytic performance [J]. *Asian Chemical Editorial Society*, 2019,14(17):2966-2978.
- [15] Ueda K, Tsuji M, Ohyama J, et al. Active coordination sites of Co spinel oxides for NO reduction by CO [J]. *Catalysis Today*, 2023, 411:113816.
- [16] Atzori L, Cutruffello M G, Meloni D, et al. Highly active NiO-CeO<sub>2</sub> catalysts for synthetic natural gas production by CO<sub>2</sub> methanation [J]. *Catalysis Today*, 2018,299:183-192.
- [17] Wang H, Dang X Q, Huang Y, et al. Research progress of Cu-based and Ce-based catalysts for the selective catalytic reduction of NO with CO [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2024,48:104310.
- [18] Zhang S H, Lee J, Kim D H, et al. Investigation of NO reduction by CO reaction over oxidized and reduced NiO<sub>x</sub>/CeO<sub>2</sub> catalysts [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2020,11(24):7850-7865.
- [19] Tang K, Liu W, Li J, et al. The effect of exposed facets of ceria to the nickel species in nickel-ceria catalysts and their performance in a NO+CO reaction [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(48):26839-26849.
- [20] 孙敬方,葛成艳,安冬琦,等.稀土铈基催化材料氧空位的表征方法综述 [J]. *化工学报*, 2020,71(8):3403-3415.
- Sun J F, Ge C Y, An D Q, et al. Review on characterization methods of oxygen vacancy in rare earth cerium-based catalysts [J]. *CIESC Journal*, 2020,71(8):3403-3415.
- [21] Yao J, Liu S G, Lin W S, et al. Study on performance of Ce-Cr-Ni/TiO<sub>2</sub> catalysts in CO-SCR [J]. *New Chemical Material*, 2019,39(5): 123-127.
- [22] Helena M A, Gisela O, Carmen M, et al. Co/Ni mixed-metal expanded IRMOF-74 series and their hydrogen adsorption properties [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019,44(33):18205-18213.
- [23] Cheng X Q, Zhu A, Zhang Y Z, et al. A combined DRIFTS and MS study on reaction mechanism of NO reduction by CO over NiO/CeO<sub>2</sub> catalyst [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009,90:395-404.
- [24] Liu Z S, Yu F, Dong D, et al. Transition-metal-doped ceria carried on two-dimensional vermiculite for selective catalytic reduction of NO with CO: Experiments and density functional theory [J]. *Applied Surface Science*, 2021,566:150704.
- [25] Xiao X, Zou L L, Pang H, et al. Synthesis of micro/nanoscaled metal-organic frameworks and their direct electrochemical applications [J]. *Chemical Society Reviews*, 2020,178:202-232.
- [26] Li L C, Wang Y S, Yu Y X, et al. Low-temperature selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> on MnO<sub>2</sub> octahedral molecular sieves(OMS-2) doped with Co [J]. *Catalysts*, 2020,10(4):396-412.
- [27] 王淑程,程 昊,吉 茂,等.改性活性焦负载 Ni-Ce 双功能催化剂富养一体化脱除 NO 和 CO [J]. *燃料化学学报*, 2022,50(7):877-883.
- Wang S Y, Cheng H, Ji M, et al. Simultaneous removal of NO and CO over Ni-Ce bifunctional catalyst supported by modified activated coke at oxygen-rich condition [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2022,50(7):877-883.
- [28] 常峥峰,纵宇浩,黄 力,等.Ni 的添加对 V-Mo/Ti 脱硝催化性能的影响 [J]. *有色金属工程*, 2021,11(1):131-136.
- Chang Z F, Zong Y H, Huang L, et al. Effect of Ni doping on the catalytic performance of V-Mo/Ti catalyst for selective catalyst Reduction of NO [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021,11(1): 131-136.
- [29] Guo T, Zhang L J, Yun S, et al. One-step synthesis of bimetallic Ni-Fe phosphates and their highly electrocatalytic performance for water oxidation [J]. *Materials Research Bulletin*, 2019,114:80-84.
- [30] Rezaee S, Shahrokhian S. Facile synthesis of petal-like NiCo/NiO-CoO/nanoporous carbon composite based on mixed-metallic MOFs and their application for electrocatalytic oxidation of methanol [J].

- Applied Catalysis B: Environmental, 2019,244:802-813.
- [31] Lee K M, Kim B, Lee J, et al. The NO reduction by CO over NiO<sub>x</sub>/CeO<sub>2</sub> catalysts with a fixed Ni surface density: pretreatment effects on the catalyst structure and catalytic activity [J]. Catalysis Science & Technology, 2024,14(2):279-292.
- [32] Guo J X, Liang J, Chu Y H, et al. Influence of Ni species of Ni/AC catalyst on its desulfurization performance at low temperature [J]. Chinese Journal Catalysis, 2020,3:278-282.
- [33] Aha S Y, Na H S, Jeon K W, et al. Effect of Cu/CeO<sub>2</sub> catalyst preparation methods on their characteristics for low temperature water-gas shift reaction: A detailed study [J]. Catalysis Today, 2020, 352:166-174.
- [34] 李 韧,何汉兵,张 丽,等.低温 CO-SCR 催化剂 UiO-66 制备及其脱硝性能 [J]. 中国有色金属学报, 2021,31(4):968-976.
- Li R, He H B, Zhang L, et al. Preparation and low-temperature CO-SCR denitration properties of UiO-66catalyst [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(4):968-976.
- [35] Wen N N, Su Y X, Deng W Y, et al. Synergy of CuNiFe-LDH based catalysts for enhancing low-temperature SCR-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> performance: Surface properties and reaction mechanism [J]. Chemical Engineering Journal, 2022,438:135570.
- [36] Deng Y Q, Shi X B, Wei L Q, et al. Effect of intergrowth and coexistence CuO-CeO<sub>2</sub> catalyst by grinding method application in the catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by CO [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021,869:159231.
- [37] Demir E, Akbayrak S, Önal A M, et al. Ceria supported ruthenium (0) nanoparticles: Highly efficient catalysts in oxygen evolution reaction [J]. Journal of colloid and interface science, 2019,534:704-710.
- [38] Cheng X X, Zhang X, Su D, et al. NO reduction by CO over copper catalyst supported on mixed CeO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Catalyst design and activity test [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018,239:485-501.
- [39] Wu Z M, Hi Y, Li C Y, et al. Synthesis of bimetallic MOF-74-CoMn catalyst and its application in selective catalytic reduction of NO with CO [J]. Acta Chimica Sinica, 2019,77(8):758.
- [40] Xu B, Yang H, Yuan L C, et al. Direct selenylation of mixed Ni/Fe metal-organic frameworks to NiFe-Se/C nanorods for overall water splitting [J]. Journal of Power Sources, 2017,366:193-199.
- [41] Kumar R, Kumar R K, Pant K K, et al. Tuning the metal-support interaction of methane tri-reforming catalysts for industrial flue gas utilization [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45(3): 1911-1929.
- [42] Zhang Y, Zhao L, Duan J, et al. Insights into DeNO<sub>x</sub> processing over Ce-modified Cu-BTC catalysts for the CO-SCR reaction at low temperature by in situ DRIFTS [J]. Separation and Purification Technology, 2020,234:116081.
- [43] Wang J, Liu W, Luo Z J, et al. Synergistic effect of well-defined dual sites boosting the oxygen reduction reaction [J]. Energy & Environmental Science, 2018,11:3375-3379.
- [44] Zhang S H, Lee J, Kim D H, et al. Effects of Ni loading on the physicochemical properties of NiO<sub>x</sub>/CeO<sub>2</sub> catalysts and catalytic activity for NO reduction by CO [J]. Catalysis Science & Technology, 2020,10:2359-2368.
- [45] Su Z, Si W, Liu H, et al. Boosting the catalytic performance of CeO<sub>2</sub> in toluene combustion via the Ce-Ce homogeneous interface [J]. Environmental Science & Technology, 2021,55(18):12630-12639.
- [46] Li S, Chen X, Wang F, et al. Promotion effect of Ni doping on the oxygen resistance property of Fe/CeO<sub>2</sub> catalyst for CO-SCR reaction: Activity test and mechanism investigation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,431:128622

**作者简介:** 马 倩(1999-),女,山东菏泽人,西安建筑科技大学硕士研究生,主要从事大气污染控制的研究.19863816389@163.com.