

通过镍掺杂提升氧化铈的气体传感性能

徐 民¹, 刘力铭¹, 兰 阳¹, 韩皓璇¹, 郑元昊², 杨佳伟¹, 王炜鹏²,
刘 鹏¹, 陈 迪^{1*}

(1. 清华大学 未来实验室, 北京 100084;

2. 清华大学 材料学院 先进材料教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要:稀土元素由于特殊的电子结构而表现出特异的物理和化学性质,在传感器等领域有着广泛的应用。本文研究了氧化镍掺杂对稀土氧化铈基材料的物相、化学态和形貌等理化性质的影响。对比了基于掺杂前后氧化铈基敏感材料的传感器对不同有机物和氢气的响应情况。研究发现, NiO 的掺杂诱使 CeO₂ 材料产生氧空位,且提高了 Ce³⁺ 的浓度。掺杂 1.0%NiO 的 CeO₂ 对有机物的敏感性显著提高,其中对丙酮的响应明显高于其他有机物。相较于未掺杂的 CeO₂ 基传感器,其对丙酮的响应强度提升了约 4 倍,且对痕量的氢气也表现出良好的响应特性。研究结果表明,镍的掺杂能有效提升 CeO₂ 中氧空位的含量,因而有效改善材料对部分气体的响应特性。

关键词: 二氧化铈; 镍掺杂; 氧空位; 气体传感器; 氢气检测

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-0277(2026)02-0013-08

随着社会发展,人类活动排放的气体污染物如挥发性有机化合物、易燃易爆气体以及温室气体等所引起的问题引发人们的日益关注,气体的检测变得更加重要^[1~3]。作为有效的气体检测工具,气体传感器被大量应用于环境监测等行业^[4,5]。气体传感器基于敏感材料和待测气体间的相互作用触发物理或者化学信号的变化响应,从而实现目标气体的实时以及定量监测^[6]。在各类气敏材料中,稀土氧化物是研究的热点候选材料之一^[7]。

铈元素具有独特的 4f 电子结构,因而展现出

独特的物理化学特性^[8,9]。铈基材料资源储备丰富(占地壳含量 0.0046%,质量分数),也是广泛应用的一类稀土材料。其中二氧化铈具有独特的萤石结构,其储放氧能力强,化学活性高、稳定性好,因而在气体检测方面受到关注^[10,11]。由于 CeO₂ 需要在较高操作温度下才能展现出较好的气体敏感特性,因而常被应用于高温氧传感器^[12]。优化 CeO₂ 性能提升往往依赖于结构的优化,例如制备高比表面积纳米材料和特殊形貌的材料^[13,14]。此外,利用掺杂或者复合

收稿日期: 2024-01-16

基金项目: 国家重点研发计划“稀土新材料”重点专项青年科学家项目(2021YFB3502000); 国家自然科学基金项目(52102137); 清华大学自主科研计划前沿交叉专项(20221080080)

作者简介: 徐 民(1990-),男,安徽宿州人,博士,主要从事固体氧化物燃料电池的研究, E-mail: xumin2021@foxmail.com

* 通信作者: 陈 迪, 副研究员, E-mail: dichen@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.3724/S1004-0277.202602002

等改性手段能有效提高 CeO_2 材料的气敏性能^[15~17]。本文探索了镍掺杂对 CeO_2 气敏性能的改善效果,结合材料表征理解气敏性能提升的可能调控机制。

1 材料和方法

1.1 样品材料制备

CeO_2 和掺杂的材料由溶胶凝胶法制备得到,原料为 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (99.99%, Sigma Aldrich), $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sigma Aldrich, 99.99%), 乙二醇 (Greagent) 和无水柠檬酸 (Greagent)。将金属盐与乙二醇和柠檬酸按照 1 : 2 : 4 的比例混合,加入去离子水搅拌均匀后形成透明溶液,随后置于加热搅拌器上反应。设置温度为 80 °C, 转速约为 200 转/分钟。待溶液形成凝胶后,放入马弗炉在空气中 600 °C 下煅烧 6 小时得到目标材料。

1.2 传感器测试

将所制备的材料分散在无水乙醇中,搅拌制备浆料。将浆料滴涂在叉指电极自加热的陶瓷基座上,随后利用不锈钢外壳进行封装得到传感器用于测试。实验使用的有机物通过注射泵注入反应腔室,反应温度约为 300 °C。对氢气的响应测试使用同样的传感器结构和反应腔室,通入 4% H_2/N_2 并记录响应。使用源表 (Keithley 2700) 记录器件电阻随通入气体的响应变化,传感器响应由电阻计算得到。

$$S = \Delta R/R_0 \quad (1)$$

式中: $R_0(\Omega)$ 是传感器电阻底噪, ΔR 是测试响应电阻与底噪的差值。

1.3 表征测试

X 射线衍射谱 (XRD) 由 Rigaku D/max-2550 使用 $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 0.15418 \text{ nm}$) 测试。元素价态等信息由 X 射线光电子能谱仪 (XPS, Thermo fisher) 测量得到。XPS 图谱的拟合使用 CasaXPS 软件得到。材料的拉曼谱由 HORIBA Scientifi 拉曼光谱仪测试得到,采用激光波长为 532 nm。形貌和元素分析由透射电子显微镜 (TEM, 日本 JEOL JEM F200) 和能量色散谱 (EDS) 进行测试。

2 结果与分析

2.1 材料晶体结构和物相

从 XRD 图谱上能够看到合成的 CeO_2 与标准 CeO_2 (PDF-431002) 谱图一致,见图 1。 CeO_2 展现出萤石结构,晶格常数 $a = b = c = 0.54 \text{ nm}$, 空间群为 $\text{Fm}3\text{m}$ 。Ni 掺杂的样品展现出相似的 XRD 图,图谱上没有观测到明显属于 NiO 的杂峰,且衍射峰也没有明显的偏移。这可能因为掺杂 Ni 的量较少,没有形成明显的杂相,这也说明 Ni 掺杂较为均匀。需要注意的是由于测试仪器对 $\text{Cu-K}\alpha$ 信号未能完全过滤,因而在所有样品的谱图上能够观察到明显的 $\text{K}\alpha$ 峰,约为 27.4°。

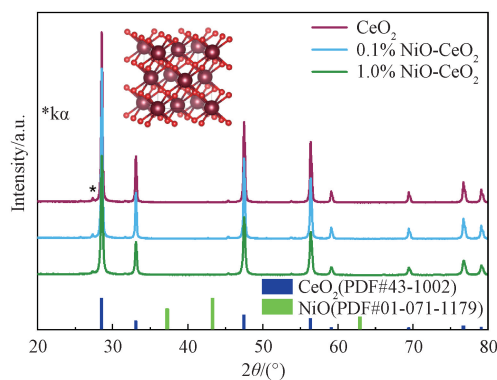


图 1 样品 XRD 谱图和 NiO、 CeO_2 的标准数据对比

Fig. 1 XRD patterns of samples and the standard patterns of NiO and CeO_2

从图 2a 能够看到两种镍掺杂浓度材料的 XPS 图谱。对所得 Ce 3d 谱图 (870 eV ~ 920 eV) 进行分峰,分别对 Ce^{4+} 和 Ce^{3+} 的 3d 5/2 和 3d 3/2 轨道进行拟合^[18]。其中 Ce^{4+} 拟合为六个峰, Ce^{3+} 拟合为四个峰,分别对应 3d 5/2 和 3d 3/2。根据峰的面积可以计算得到拟合结果中各个价态离子占整体量的比例。NiO 掺杂量从 0.1% 增加到 1.0% 时, Ce^{3+} 的量从 20.21% 增加到 26.64%,见表 1。

此外,通过拟合 O 1s 谱 (525 eV ~ 535 eV) 能够对比材料中氧物种的变化,见图 2。从图上能够看到 O 1s 图谱主要可以分为晶格氧 (O_{latt})、表面氧和

缺陷氧($O_{\text{surf/defect}}$)^[19]。通过详细拟合分析峰面积变化发现,0.1% NiO 掺杂的样品中表面氧化物含量

约为 16.96%,而 1.0% NiO 掺杂的样品中表面氧化物含量稍高,约为 17.85%。

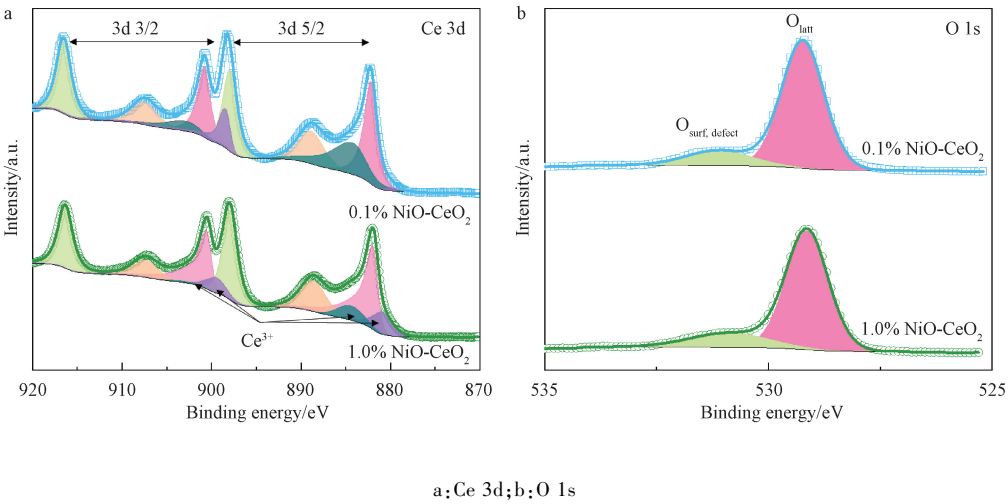


图 2 样品中不同元素的 XPS 图谱

Fig. 2 XPS spectra of different elements in the sample

表 1 不同样品 Ce 3d 的 XPS 拟合结果

Table 1 XPS fitting result of Ce 3d for two different samples

Samples	Species	Ce ⁴⁺ 3d 5/2				Ce ⁴⁺ 3d 3/2		Ce ³⁺ 3d 5/2		Ce ³⁺ 3d 3/2	
0.1% NiO-CeO ₂	Peak area	299281.77	142284.37	247378.35	203283.58	79400.07	177259.94	66760.59	108542.87	66253.61	7138.91
	Atomic/%	34.49	16.47	28.83				7.71	12.50		
	Ce ³⁺ /Ce/%					20.21					
1.0% NiO-CeO ₂	Peak area	243272.93	136063.49	203784.39	168456.45	94218.39	185730.12	11970.06	200603.28	109376.09	63426.67
	Atomic/%	30.45	17.11	25.79				1.50	25.14		
	Ce ³⁺ /Ce/%					26.64					

为了进一步分析材料结构以及氧空位的变化,图 3 显示了不同材料在 532 nm 激光作用下振动的拉曼光谱。拉曼光谱可以提供不依赖于周期对称性的材料结构信息。CeO₂ 中的氧空位对其活性起到关键决定性作用,图 3 显示不同 NiO 的掺杂对 CeO₂ 拉曼谱图的影响。其中区域 I 显示随着掺杂量增加到 1.0%,在 224 cm⁻¹ 位置出现明显的峰,这个位置的峰对应氧空位形成产生的振动^[20]。此外,能够看到在 464 cm⁻¹ 附近的主振动峰(区域 II)也发生了明显的变化。这一峰是典型的 CeO₂ 萤石结构中的三重兼并模式(F_{2g} 对称振

动)对应面心立方结构中 Ce—O 键的拉伸^[21]。振动峰位置向左偏移说明 NiO 的掺杂会降低 CeO₂ 晶粒尺寸,这可能由于低价态 Ni 掺杂在 Ce 晶格中引起晶格收缩。另外,627 cm⁻¹ 处(区域 III)产生了新的宽峰,说明 Ni 的掺杂会诱导氧空位的产生^[22,23]。值得注意的是,0.1% NiO 掺杂和 CeO₂ 谱图相比并无明显变化,说明少量的掺杂影响较小。

2.2 材料的微观形貌和元素分布

从上面的表征能够发现,1.0% NiO 掺杂的 CeO₂ 产生更多的氧空位,因此利用透射电镜对其进

行了详细的分析。从 TEM 上能够看到材料晶粒形状不规则,尺寸约为 10 nm,见图 4。通过对材料中元素定量分析可以发现,Ni : Ce 的比例约为 0.82 : 76.13(为 1.1%),接近设计的比例。从元素的面分布图能够看到 Ni 分布十分均匀。图 5 展示的是材料局部位置的选区衍射图和高分辨 TEM 图。图 5a 中所示为样品的选区电子衍射图(SAED),图中所示衍射谱图为明显的衍射斑点与衍射环并存,因此可以看出材料是多晶状态。根据衍射环半径可以标定对应材料的(111),(200)和(220)晶向。图 5b 至 5d 展示的是材料不同部位的高分辨透射电镜图

和不同位置上观察到晶粒的晶格条纹。通过分析发现显示的晶格条纹均属于 CeO₂,包含了(100),(110),(111)等晶向,与 XRD 和选区衍射的结果

一致^[24]。说明合成的材料中晶粒分布随机且无明显的取向。

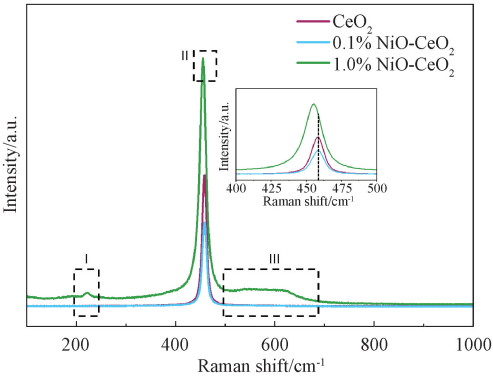


图 3 样品拉曼光谱图(插入图为区域 II 的放大部分)
Fig. 3 Raman spectra of samples and the inserted picture shows an enlarged spectrum of region II

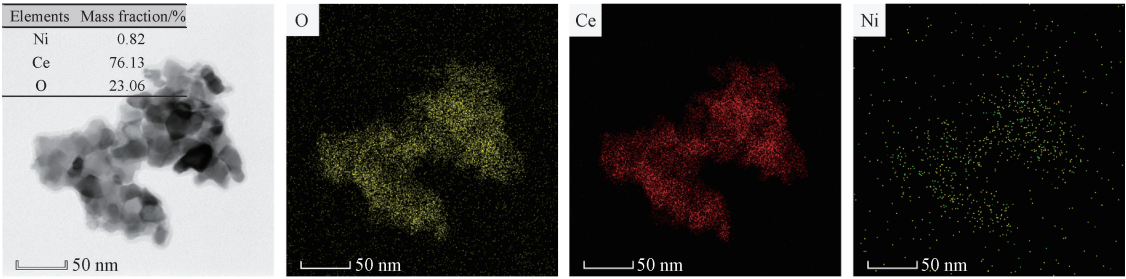
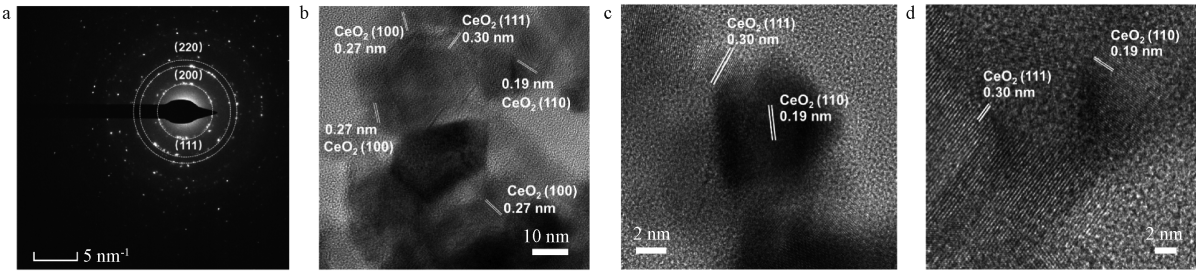


图 4 1.0% NiO 掺杂 CeO₂ 样品的透射电镜图和能量色散谱元素及其面分布图
Fig. 4 TEM image, EDS analysis and elemental mapping of 1.0% NiO-doped CeO₂ sample



a:样品选区衍射图;b,c,d:不同位置处样品的高分辨透射电镜图
图 5 1.0% NiO 掺杂 CeO₂ 的选区衍射和高分辨透射电镜图
a:SAED pattern of the sample;b,c,d:The high-resolution TEM images of samples at different locations

Fig. 5 SAED and HRTEM images of 1.0% NiO-doped CeO₂

2.3 材料气敏传感性能

从上面的表征能够发现,1.0% NiO 掺杂的 CeO₂ 中元素分布均匀,晶粒随机分布,且产生更多氧空位。为了对比 3 种材料的气敏特性,制备浆料并组装传感器。首先对比了基于不同材料的传感器在 6 种有机物中的响应情况。从图 6 能够看到,通入含有 1×10^{-5} 体积分数的有机物的气体后,传感器能够快速响应。与掺杂 NiO 的材料相比,不同传感器响应时间接近,包括吸附和脱附过程。但是不同材料对有机物响应情况有明显差异。相较而言,CeO₂ 基的传感器对丙酮和乙酸乙酯响应要强于甲醇等其他有机物。随着 0.1% NiO 的掺杂,传感器对不同气体的气敏性稍有提升,其对丙酮有较好的响应。当 NiO 掺杂量提高到 1.0% 时,传感器对丙酮的气敏性比未掺杂材料提升了约 4 倍。这说明 NiO 的掺入能有效提升材料对丙酮的响应特性,这与之前的文献[25,26] 报道类似。

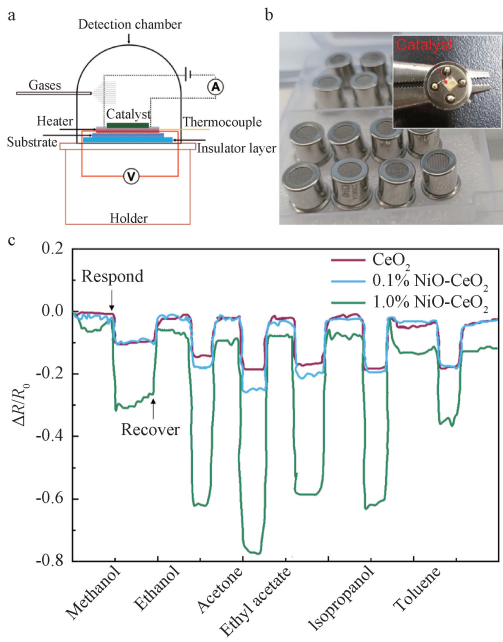


图 6 测试系统示意图 (a)、封装传感器实物图 (b) 及基于三种材料的传感器对 1×10^{-5} 体积分数不同有机物的响应情况 (c)

Fig. 6 Schematic illustration of the test system (a), photograph of the encapsulated sensor (b) and sensor responses based on three different materials to various organic compounds at a volume fraction of 1×10^{-5} (c)

此外,CeO₂ 在还原气氛中往往具有较好的化学稳定性^[27]。为了进一步验证 NiO 掺杂对 CeO₂ 气敏性的影响,本工作还测试了传感器在痕量的氢气 (体积分数约 3.6×10^{-5}) 的响应情况,见图 7。实验发现在 300 ℃ 测试温度下纯 CeO₂ 基传感器对氢气几乎没有响应,得到的信号随机,信噪比较高。而 1.0% NiO 掺杂的 CeO₂ 基传感器则表现出明显的响应特性。随着氢气的通入,传感器在大约 20 s 左右有明显响应。当关闭氢气后,传感器信号随之消失,恢复时间也约为 20 s。在 1500 s 内重复测试 4 个循环后传感器仍然显示较好的响应特性。这说明 1.0% NiO 掺杂的 CeO₂ 对痕量氢气也有较好的响应。此外,对比文献[14] 中报道的 CeO₂ 基传感器,可以看到本工作的 NiO 掺杂 CeO₂ 传感器响应更快。CeO₂ 基传感器增敏效应可以从两个方面考虑,一个是对反应物的吸附作用,二是材料中的电子转移。本工作中,从 XPS 和拉曼图谱中可以看到 Ni 的掺杂一方面提高了材料中氧空位的含量,另一方面增加了低价 Ce³⁺ 的量。氧空位通常被认为是增加某些气体吸附物种的活性位点,因而本工作中材料气敏特性的提升很可能得益于此。此外,Ce³⁺ 的存在则为电子转移提供了路径,因而也有助于提升材料的气敏特性^[28]。

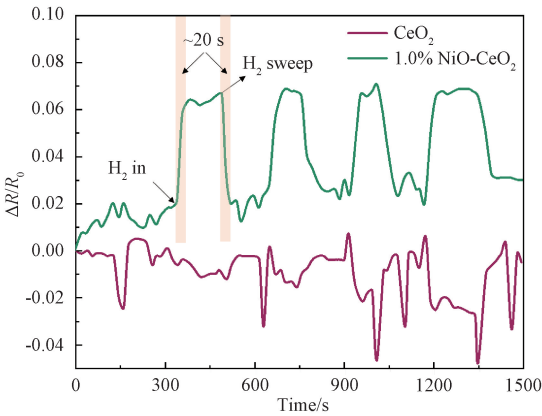


图 7 对比基于 CeO₂ 和 1.0% NiO-CeO₂ 的传感器对 3.6×10^{-5} 体积分数 H₂/N₂ 的响应情况

Fig. 7 Comparison of the sensor responses based on CeO₂ 和 1.0% NiO-doped CeO₂ to H₂/N₂ at a volume fraction of 3.6×10^{-5}

3 结 论

1. 利用溶胶凝胶法制备具有萤石结构的 NiO 掺杂的 CeO₂ 材料,晶粒尺寸约为 10 nm。

2. 0.1% NiO 的掺杂对 CeO₂ 的影响几乎可以忽略不计,1.0% NiO 的掺杂会诱使 CeO₂ 材料中产生氧空位和低价的 Ce³⁺。

3. NiO 的掺杂能够提升 CeO₂ 材料对甲醇、乙醇等有机物的响应,其中对丙酮的响应有显著改善,传感响应提升约 4 倍。

4. NiO 的掺杂还能够提升 CeO₂ 材料对痕量氢气的响应,在 300 ℃ 的测试条件下,其对氢气的响应和恢复时间约为 20 s。

致谢

感谢国家重点研发计划“稀土新材料”重点专项青年科学家项目(2021YFB3502000),国家自然科学基金(52102137)和清华大学自主科研计划前沿交叉专项(20221080080)的支持。

参考文献:

[1] Irga P J, Mullen G, Fleck R, et al. Volatile organic compounds emitted by humans indoors—A review on the measurement, test conditions, and analysis techniques [J]. *Building and Environment*, 2024, 255: 111442.

[2] Hu W W, Wu W W, Jian Y Y, et al. Volatolomics in healthcare and its advanced detection technology [J]. *Nano Research*, 2022, 15(9): 8185-8213.

[3] Nugroho F A A, Darmadi I, Cusinato L, et al. Metal-polymer hybrid nanomaterials for plasmonic ultrafast hydrogen detection[J]. *Nature Materials*, 2019, 18(5): 489-495.

[4] Dhall S, Mehta B R, Tyagi A K, et al. A review on environmental gas sensors: Materials and technologies[J]. *Sensors International*, 2021, 2: 100116.

[5] Hu Q T, Solomon P, Österlund L, et al. Nanotransistor-based gas sensing with record-high sensitivity enabled by electron trapping effect in nanoparticles[J]. *Nature Com-*

munications, 2024, 15: 5259.

- [6] Zhang J, Liu X H, Neri G, et al. Nanostructured materials for room-temperature gas sensors[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(5): 795-831.
- [7] Xiao Y N, Li H, Wang C, et al. Room temperature wearable gas sensors for fabrication and applications[J]. *Advanced Sensor Research*, 2024, 3(3): 2300035.
- [8] Schmitt R, Nenning A, Kraynis O, et al. A review of defect structure and chemistry in ceria and its solid solutions[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(2): 554-592.
- [9] 周超, 赵阳, 徐佳, 等. pH 值对浸渍法制备的铈钨钛脱硝催化剂的影响[J]. *稀土*, 2020, 41(5): 59-69.
- Zhou C, Zhao Y, Xu J, et al. Effect of pH on denitration performance of CeWTi catalyst[J]. *Chinese Rare Earths*, 2020, 41(5): 59-69.
- [10] 殷越, 王丁. CeO₂ 气敏材料的研究进展[J]. *电子元件与材料*, 2020, 39(4): 1-9.
- Yin Y, Wang D. Research progress of CeO₂ gas sensing materials [J]. *Electronic Components and Materials*, 2020, 39(4): 1-9.
- [11] Sai Bhargava Reddy M, Kailasa S, Geeta Rani B, et al. MgO@CeO₂ chemiresistive flexible sensor for room temperature LPG detection [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30(18): 17295-17302.
- [12] Michel C R, Martínez-Preciado A H. CO sensor based on thick films of 3D hierarchical CeO₂ architectures[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 197: 177-184.
- [13] Dong Z, Hu Q M, Liu H, et al. 3D flower-like Ni doped CeO₂ based gas sensor for H₂S detection and its sensitive mechanism [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 357: 131227.
- [14] Hussain S, Aslam N, Yang X, et al. Unique polyhedron CeO₂ nanostructures for superior formaldehyde gas-sensing performances [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(16): 19624-19630.

- [15] Wang J Q, Li Z J, Zhang S, et al. Enhanced NH_3 gas-sensing performance of silica modified CeO_2 nanostructure based sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 255: 862-870.
- [16] Zhu X J, Chang X T, Tang S K, et al. Humidity-tolerant chemiresistive gas sensors based on hydrophobic $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ heterostructure films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(22): 25680-25692.
- [17] 宋学志, 胡洋洋, 王小凤, 等. CeO_2/ZnO 复合材料制备及气敏性能研究实验设计[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(7): 155-175.
- Song X Z, Hu Y Y, Wang X F, et al. Experimental design about preparation and gas sensing performance investigation of CeO_2/ZnO composite material[J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(7): 155-175.
- [18] Li X, Pereira-Hernández X I, Chen Y Z, et al. Functional CeO_x nanoglues for robust atomically dispersed catalysts[J]. *Nature*, 2022, 611(7935): 284-288.
- [19] Xu M, Jeon Y, Naden A, et al. Synergistic growth of nickel and platinum nanoparticles *via* exsolution and surface reaction [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 4007.
- [20] Maher R C, Shearing P R, Brightman E, et al. Reduction dynamics of doped ceria, nickel oxide, and cermet composites probed using *in situ* Raman spectroscopy [J]. *Advanced Science*, 2016, 3(1): 1500146.
- [21] Schilling C, Hofmann A, Hess C, et al. Raman spectra of polycrystalline CeO_2 : A density functional theory study [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(38): 20834-20849.
- [22] 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.
- [23] Li L, Hu G S, Lu J Q, et al. Review of oxygen vacancies in CeO_2 -doped solid solutions as characterized by Raman spectroscopy[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(5): 1012-1020.
- [24] He S, Li M, Hui J N, et al. *In-situ* construction of ceria-metal/titanate heterostructure with controllable architectures for efficient fuel electrochemical conversion[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 298: 120588.
- [25] Hao P, Lin Z G, Song P, et al. Hydrothermal preparation and acetone-sensing properties of Ni-doped porous LaFeO_3 microspheres[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, 31(9): 6679-6689.
- [26] Chen X J, Xing Q L, Tang X, et al. Low palladium content CeO_2/ZnO composite for acetone sensor with sub-second response prepared by ultrasonic method[J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(7): 2137-2149.
- [27] Chen D, Guan Z X, Zhang D W, et al. Constructing a pathway for mixed ion and electron transfer reactions for O_2 incorporation in $\text{Pr}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{2-x}$ [J]. *Nature Catalysis*, 2020, 3(2): 116-124.
- [28] Jayababu N, Polaju M, Shruthi J, et al. NiO decorated CeO_2 nanostructures as room temperature isopropanol gas sensors[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(24): 13765-13775.

Enhancement of Gas Sensing Performance of Cerium Oxide by Nickel Doping

XU Min¹, LIU Li-Ming¹, LAN Yang¹, HAN Hao-Xuan¹, ZHENG Yuan-Hao², YANG Jia-Wei¹,
WANG Wei-Peng², LIU Peng¹, CHEN Di^{1*}

(1. The Future Laboratory, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;
2. Key Laboratory of Advanced Materials (MOE), School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University,
Beijing 100084, China)

Abstract: Rare earth elements exhibit unique physical and chemical properties due to their special electronic structure and are widely employed in applications such as sensors. This paper investigated the impact of nickel doping on the phase, chemical state, and morphological properties of ceria. A comparison of the sensor responses based on cerium oxide-based sensitive materials before and after doping to various organic compounds and hydrogen. This study found that NiO doping promotes the formation of oxygen vacancies in CeO₂ and enhances the concentration of cerium ions in lower valence states. The sensitivity of CeO₂ doped with 1.0% NiO to organic compounds is significantly enhanced, and its response to acetone is markedly higher than that to other organic compounds. Compared with undoped CeO₂-based sensors, the response intensity to acetone is approximately four times higher, and the sensor also exhibits excellent response characteristics toward trace amounts of hydrogen. Research results indicate that nickel doping can effectively increase the concentration of oxygen vacancies in CeO₂, thereby enhancing the material's response characteristics to specific gases.

Key words: cerium oxide; nickel doping; oxygen vacancy; gas sensor; hydrogen detection