

Dy₂O₃/La₂O₃ 稀土复合氧化物催化发光 传感 1,2-环氧丙烷

张雨薇, 杜一浩, 张琰图, 李云云

(延安大学化学与化工学院, 延安 716000)

摘要 开发了基于 Dy₂O₃/La₂O₃ 稀土复合氧化物的高性能催化发光传感平台, 用于 1,2-环氧丙烷(PO) 的特异性检测. 通过优化调控稀土氧化物的组成比例, Dy₂O₃/La₂O₃ 异质界面产生了显著的协同催化效应, 实现了对 PO 分子的高灵敏度与高选择性检测(LOD=82.8 μmol/L, 对 PO 的响应强度是干扰物的 10 倍以上). 在最佳实验条件下(检测波长 575 nm, 检测温度 360 °C, 气体流速 320 mL/min), 催化发光强度与 PO 浓度呈良好线性关系, 线性方程为 $y=9701.25x+15085.19$, 检出限为 8.28×10^{-5} mol/L, $R^2=0.9969$. 该传感系统具有良好的稳定性(11 次循环测试 RSD<3%), 加标回收率为 96%~108%. 基于实验结果提出了“光激发-氧活化-选择性氧化-特征发光”的传感机制. 本工作为开发新型稀土氧化物基传感材料提供了新策略, 并为环境挥发性有机物(VOCs) 的识别与传感提供了创新解决方案.

关键词 稀土复合氧化物; 界面协同效应; 环氧丙烷检测; 催化发光传感器; 气敏反应机理

中图分类号 O656.31; X831 文献标志码 A doi: 10.7503/cjcu20250108

Cataluminescent Sensing of 1,2-Epoxypropane Using Dy₂O₃/La₂O₃ Rare Earth Composite Oxides

ZHANG Yuwei, DU Yihao, ZHANG Yantu, LI Yunyun*

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Yan'an University, Yan'an, 716000, China)

Abstract In this study, we developed a high-performance cataluminescence (CTL) sensing platform based on Dy₂O₃/La₂O₃ rare-earth composite oxides for specific detection of 1,2-epoxypropane(PO). Through optimized composition regulation of the rare-earth oxides, the Dy₂O₃/La₂O₃ heterointerface demonstrated remarkable synergistic catalytic effects, achieving both high sensitivity (LOD=82.8 μmol/L) and exceptional selectivity (10-fold higher response to PO than interferents). Under optimal conditions (detection wavelength: 575 nm; temperature: 360 °C; gas flow rate: 320 mL/min), the CTL intensity showed excellent linear correlation with PO concentration ($y=9701.25x+15085.19$, $R^2=0.9969$), with an ultralow detection limit (8.28×10^{-5} mol/L). The sensing system exhibited outstanding stability (RSD<3% over 11 cycles) and satisfactory recovery rates (96-108%). A "photoexcitation-oxygen activation-selective oxidation-characteristic luminescence" sensing mechanism was proposed. This work provides a novel strategy for developing rare-earth oxide-based sensing materials and offers an innovative solution for environmental VOC monitoring.

收稿日期: 2025-04-11. 网络首发日期: 2025-06-03.

联系人简介: 李云云, 女, 博士, 副教授, 主要从事功能多孔材料在光/电催化环境应用方面的研究. E-mail: liyun233@126.com

基金项目: 陕西省科技厅项目(批准号: 2024JC-YBQN-0120)、延安大学博士科研启动项目(批准号: YAU202303811)、大学生创新创业训练计划项目(批准号: D2024247)、延安大学校级科研计划项目(批准号: YDQ2019-20)和国家自然科学基金(批准号: 52063029)资助.

Supported by the Project of the Department of Science and Technology of Shanxi Province, China(No.2024JC-YBQN-0120), the Doctoral Research Initiation Project of Yan'an University, China(No.YAU202303811), the College Student Innovation and Entrepreneurship Training Program Project of Yan'an University, China(No.D2024247), the Yan'an University Campus level Scientific Research Program Project of Yan'an University, China(No.YDQ22019-20) and the National Natural Science Foundation of China(No.52063029).

Keywords Rare-earth composite oxides; Interfacial synergistic effect; Propylene oxide detection; Cataluminescence sensor; Gas-sensing reaction mechanism

挥发性有机物(Volatile organic compounds, VOCs)是一类广泛存在于工业排放、汽车尾气、家居产品和自然环境中的有机物^[1-3]。由于其毒性、刺激性和致癌性, VOCs对人类健康和环境构成严重威胁^[4-6]。因此,开发高效、灵敏的VOC传感检测技术具有重要意义。其中,1,2-环氧丙烷(Propylene oxide, PO)是一种重要的化工原料,广泛用于聚酯多元醇、丙二醇等产品的生产,然而PO具有毒性和易燃性,存在潜在的健康危害和环境风险^[7]。因此,开发高效、灵敏的1,2-环氧丙烷传感检测技术在环境监测、工业安全和质量控制中具有重要意义。

目前已报道的PO检测技术有气相色谱法(GC)、质谱法(MS)、红外光谱法(IR)、电化学传感及荧光传感等^[8-11],然而这些方法各有其优缺点,如GC法和MS法虽然灵敏度高,但通常设备昂贵、操作复杂耗时,无法满足实时监测需求。因此,在实际应用中需综合考虑灵敏度、选择性、成本和操作复杂度。相比而言,催化发光(Cataluminescence, CTL)传感技术在VOCs检测中具有独特的优势,尤其在灵敏度、响应速度和实时监测方面表现突出。CTL传感器结构相对简单、制造成本较低,主要由气敏材料和光学检测器组成,可直接对气体样品进行检测,无需复杂的样品预处理步骤^[12-14]。在CTL传感系统中,气敏材料作为传感元件,其性能直接影响CTL的灵敏度、选择性和稳定性^[15,16]。

稀土氧化物具有独特的电子结构、优异的光学性能和催化活性,有望用于VOCs的催化发光传感检测。稀土氧化物(如CeO₂, La₂O₃, Y₂O₃等)具有良好的化学稳定性和热稳定性,且具有丰富的表面氧空位和优异的氧化还原性能,能够催化VOCs的氧化反应^[17,18]。因此通过调控稀土氧化物的组成、结构或与其它材料复合,可增加比表面积和活性位点,从而进一步提升催化活性和选择性,实现对特定VOCs的高选择性及高灵敏度检测^[19]。然而,此方面的研究报道较少,相关机制尚不清晰^[20]。

本文采用简单的水热法制备了Dy₂O₃掺杂的Dy₂O₃/La₂O₃稀土复合氧化物,并通过粉末X射线衍射仪(PXRD)、扫描电子显微镜(SEM)和X射线光电子能谱(XPS)等技术表征了其微观结构和基本理化性质。通过调控Dy₂O₃掺杂量(5%~30%)增强La₂O₃的催化活性。通过优化催化发光传感的检测条件如传感温度、检测波长和载气流速,实现了PO的高灵敏度及高选择性的CTL传感检测。最后,对复合材料的循环稳定性和传感机制进行了研究。

1 实验部分

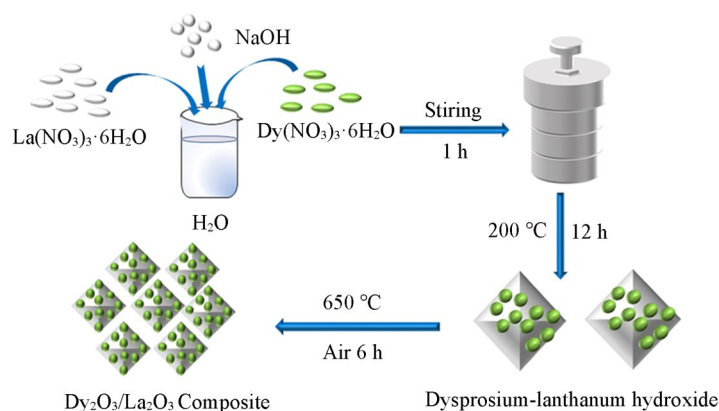
1.1 试剂与仪器

六水合硝酸镧[Dy(NO₃)₃·6H₂O]和六水合硝酸镧[La(NO₃)₃·6H₂O],上海麦克林公司;氢氧化钠、无水乙醇、1,2-环氧丙烷、丙烯腈、二氯甲烷、甲醇、甲醛、四氢呋喃、乙酸乙酯和异丙醇,国药集团化学试剂公司。实验所用试剂均为分析纯。

X'Pert PRO MPD型X射线衍射仪(XRD, 荷兰PANalytical公司); Zeiss Sigma 300型扫描电子显微镜(SEM, 德国Carl Zeiss AG公司); Thermo Kalpha型X射线光电子能谱仪(XPS, 美国Thermo Fisher Scientific公司); BPCL-1-TIC型超弱化学发光分析仪(广州微光科技公司)。

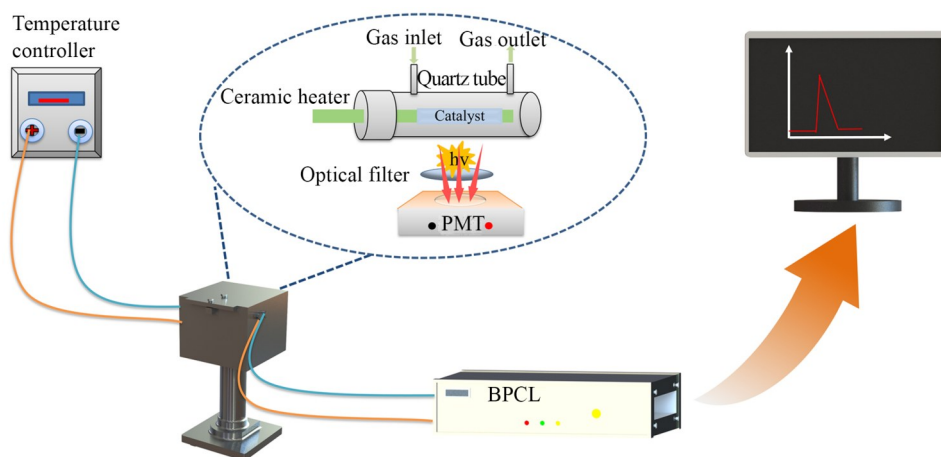
1.2 实验过程

1.2.1 传感材料的制备 Dy₂O₃/La₂O₃复合材料的制备: 参照文献[17]方法并稍作修改,利用水热合成法制备了Dy₂O₃/La₂O₃稀土复合氧化物。如Scheme 1所示,首先称取5 mmol(2.1652 g)La(NO₃)₃·6H₂O和0.23mmol(0.1051 g)Dy(NO₃)₃·6H₂O溶解于30 mL去离子水中;在碱性条件下搅拌1 h后,将溶液转移到具有聚四氟乙烯内衬的高压反应釜中,在200 °C下反应12 h;反应完成后冷却至室温,对产物进行离心分离,并用去离子水和无水乙醇交替洗涤3次;处理完成后,置于烘箱中80 °C干燥12 h;最后,将产物置于马弗炉中于650 °C煅烧6 h,得到Dy₂O₃掺杂量为10%的Dy₂O₃/La₂O₃纳米材料。此外,利用该方法制备了Dy₂O₃掺杂量为5%~30%的Dy₂O₃/La₂O₃稀土复合氧化物。实验中还制备了单组分La₂O₃纳米颗粒,其制备方法除不添加Dy(NO₃)₃·6H₂O外,与上述合成步骤相同。



Scheme 1 Synthesis of $\text{Dy}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3$ nanocomposite

1.2.2 传感器的构建 如Scheme 2所示,实验采用自主搭建的催化发光传感系统,主要由催化反应模块、气路控制模块及信号检测模块构成.催化反应模块:称取一定量的 $\text{Dy}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3$ 纳米复合催化剂,用乙醇超声分散后,均匀涂覆于陶瓷加热棒表面,待乙醇挥发后将其插入石英管中.气路控制模块:待测气体经一定温度充分气化后,通过注射输送至催化反应区.信号检测模块:催化反应产生的CTL信号通过光电倍增管实时捕获. BPCL超微弱化学发光分析仪参数:采集间隔为1 s,工作电压为1000 V.



Scheme 2 Schematic diagram of the CTL sensing system

2 结果与讨论

2.1 复合材料结构表征

2.1.1 XRD 表征 图1所示 $\text{Dy}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3$ 稀土复合氧化物的XRD图谱显示,在 $2\theta=26.11^\circ$, 29.13° , 29.96° , 39.53° , 46.08° , 52.13° , 55.44° 位置出现明显的衍射峰,分别对应 La_2O_3 标准卡片(PDF#05-0602)的(100), (002), (101), (102), (110), (103)和(112)晶面,这些尖锐的衍射峰与标准卡片完全匹配^[21].同时,在 $2\theta=28.98^\circ$, 33.59° , 48.23° 处的衍射峰归属于 Dy_2O_3 (PDF#43-1006)的(222), (400)和(441)晶面^[22]. $2\theta=27.5^\circ$ 附近出现的衍射峰可能归因于 Dy_2O_3 掺杂导致晶格参数变化,从而引起衍射峰位的微小位移^[17];由于 La_2O_3 极易吸湿变质,可与空气中的水分反应生成 $\text{La}(\text{OH})_3$ ^[23],因此该衍射峰也可能对应于样品表面在测试前处理或保

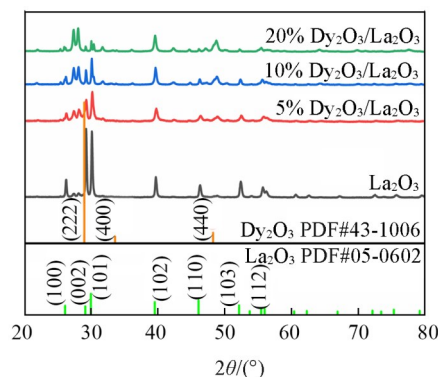


Fig. 1 XRD patterns of $\text{Dy}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3$ nanocomposite(B)

存过程中形成的La(OH)₃杂质相。此外，衍射图谱中未检测到其他杂质峰，说明所制备的Dy₂O₃/La₂O₃具有优异的结晶性和相纯度，表明该合成方法能够成功制备单一物相、高纯度的Dy₂O₃/La₂O₃稀土复合氧化物。

2.1.2 XPS表征 通过XPS分析了Dy₂O₃/La₂O₃材料的化学组成。如图2(A)所示，XPS全谱中清晰可见Dy, La, O和C元素的特征峰。图2(B)~(D)为10% Dy₂O₃/La₂O₃的高分辨率XPS谱图，其中La_{3d}谱图[图2(B)]在834.98 eV(La_{3d_{5/2}})和851.68 eV(La_{3d_{3/2}})处呈现典型双峰，结合能间距为16.7 eV。由于电子-空穴耦合效应，在La_{3d_{3/2}}和La_{3d_{5/2}}处分裂出强度不同的卫星峰^[24,25]。Dy_{3d}谱图[图2(C)]显示，1295.88 eV(Dy_{3d_{5/2}})和1334.18 eV(Dy_{3d_{3/2}})处的特征峰对应于Dy³⁺的化学态^[26,27]。O_{1s}谱图[图2(D)]可拟合为3个特征峰，分别对应528.38 eV处的晶格氧(O_{latt})、530.48 eV处的羟基氧(—OH)以及531.38 eV处的吸附氧(O_{ads})。丰富的氧空位有助于增强气体吸附能力并提供更多活性位点，从而提升传感器性能^[28]。

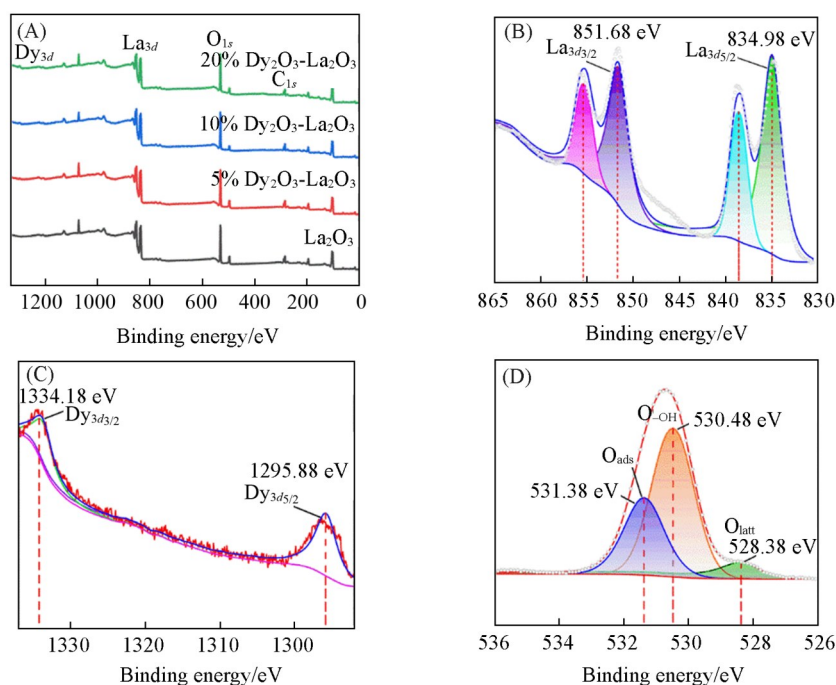


Fig. 2 XPS survey spectra of Dy₂O₃-La₂O₃(A) and high-resolution spectra of La_{3d}(B), Dy_{3d}(C), O_{1s}(D) of 10%Dy₂O₃/La₂O₃

2.1.3 SEM表征 Dy₂O₃/La₂O₃复合材料的微观结构如图3(A)~(D)所示，SEM分析表明，Dy₂O₃的引入并未显著改变La₂O₃的基体形貌，样品仍保持片状纳米结构特征。值得注意的是，纳米片层间形成了

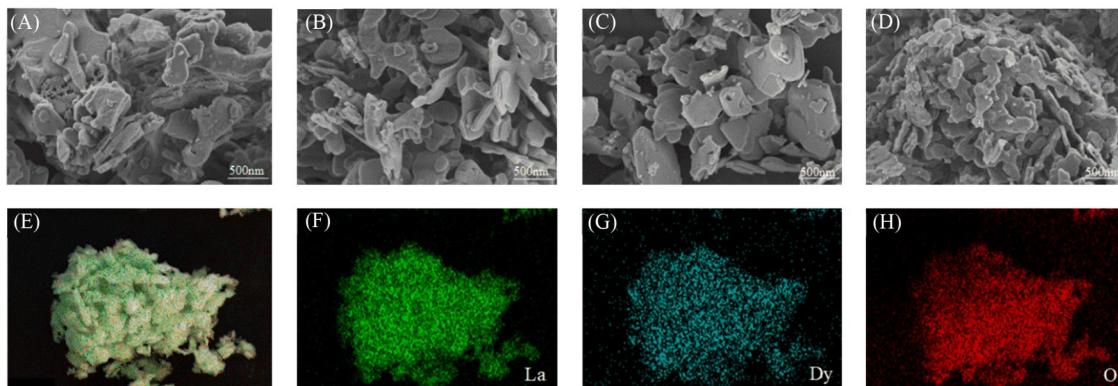


Fig. 3 SEM images of Dy₂O₃/La₂O₃ composites

(A) Pure La₂O₃; (B—D) Dy₂O₃-doped samples with 5%, 10%, and 20% doping concentrations, respectively; (E—H) corresponding elemental mapping of 10% Dy₂O₃/La₂O₃.

丰富的结构缺陷和孔隙,为反应底物提供了高效的传质通道,促进了底物分子的传质扩散速率.图3(E)~(H)为10% Dy₂O₃/La₂O₃的EDS Mapping图,可以观察到Dy, La和O 3种元素在材料中呈现高度均匀的分散状态,各元素分布区域重合度良好,且未发现明显的成分偏析或杂质相富集现象.

2.2 CTL传感检测条件的优化

为优化PO的检测性能,以10% Dy₂O₃/La₂O₃作为传感材料,在10 mmol/L PO浓度条件下考察了检测波长、工作温度和气体流速等参数对CTL响应的影响.

波长优化结果如图4(A)所示,选取一定范围内的滤光片进行测定,随着滤光片波长的增加(400 nm~620 nm),CTL信号强度呈现先增加后减弱趋势.在575 nm处观察到最大响应值,表明该波长下激发的催化发光效率最优,故选定其为最佳检测波长.在固定检测波长(575 nm)条件下,工作温度优化结果如图4(B)所示即随温度升高(260~400 °C),CTL强度呈现先增强后衰减的趋势,并在360 °C达到峰值响应.这一现象符合典型催化发光反应的Arrhenius特性.图4(C)展示了气体流速(220~360 mL/min)对CTL信号的调控作用.当流速 < 320 mL/min时,PO分子与催化剂表面活性位点的接触时间充足,催化反应充分;而当流速 > 320 mL/min时,过快的气流导致反应物滞留时间不足,未完全反应的PO分子被带离反应区;在320 mL/min时实现动力学平衡,获得最大CTL响应.

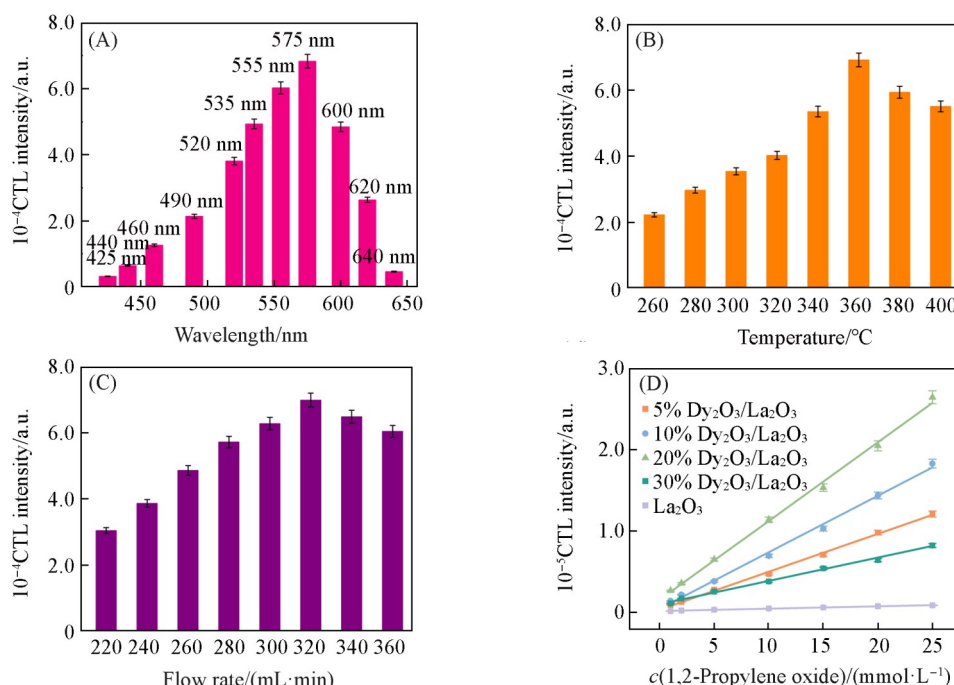


Fig. 4 Detection wavelength(A), working temperature(B), gas flow rate(C) and working curve for the CTL sensing of PO based on Dy₂O₃/La₂O₃ catalysts(D)

2.3 标准曲线及检出限测定

在优化的检测条件下($\lambda=575$ nm, 温度360 °C, 气体流速320 mL/min),不同Dy₂O₃掺杂比例的La₂O₃催化剂对PO的CTL响应特性如图4(D)所示.当PO的浓度范围为1~25 mmol/L时,CTL强度(y)与PO浓度(x)呈现优异的线性关系.线性方程、相关系数 R^2 及检出限(LOD)分别为 $y=4676.55x+2784.60$, $R^2=0.9980$, $\text{LOD}=2.0 \times 10^{-4}$ mol/L(5% Dy₂O₃/La₂O₃), $y=6970.17x+3883.69$, $R^2=0.9955$, $\text{LOD}=1.13 \times 10^{-4}$ mol/L(10% Dy₂O₃/La₂O₃), $y=9701.25x+15085.19$, $R^2=0.9969$, $\text{LOD}=8.28 \times 10^{-5}$ mol/L(20% Dy₂O₃/La₂O₃)及 $y=2839.30x+9711.93$, $R^2=0.9949$, $\text{LOD}=1.51 \times 10^{-4}$ mol/L(30% Dy₂O₃/La₂O₃).实验结果表明,检测灵敏度随着Dy₂O₃含量的增加(5%→20%)而显著提高(4676.55→9701.25 a. u. ·L·mmol⁻¹),20%掺杂样品较5%样品的灵敏度提升了约2.1倍;然而,当掺杂比例继续增加至30%时,材料的CTL强度和检测灵敏度均有所下降.这一结果表明,Dy₂O₃掺杂浓度对材料性能具有显著的调控作用,在最佳掺杂阈值(约20%)下,Dy₂O₃/La₂O₃表现出最高的催化活性,这主要归因于Dy³⁺与La³⁺之间的电子协同效应,复合

氧化物界面形成的活性氧空位以及优化的表面酸性位点分布^[29-31]. 超过该阈值后, 过量 Dy₂O₃掺杂可能会通过形成杂质相、覆盖活性位点及晶格畸变等机制显著降低 CTL 性能^[32].

2.4 传感材料稳定性评估

Dy₂O₃/La₂O₃复合材料在 PO 检测中的循环稳定性测试结果如图 5(A)所示, 经过 11 次连续测试, 所有样品均表现出优异的信号重现性, 相对标准偏差(RSD)分别为 3.1%(5% Dy₂O₃/La₂O₃), 2.6%(10% Dy₂O₃/La₂O₃), 2.7%(20% Dy₂O₃/La₂O₃)和 3.8%(30% Dy₂O₃/La₂O₃). 测试数据表明, 所有复合材料的 RSD 值均低于 5%, 满足传感材料的稳定性要求.

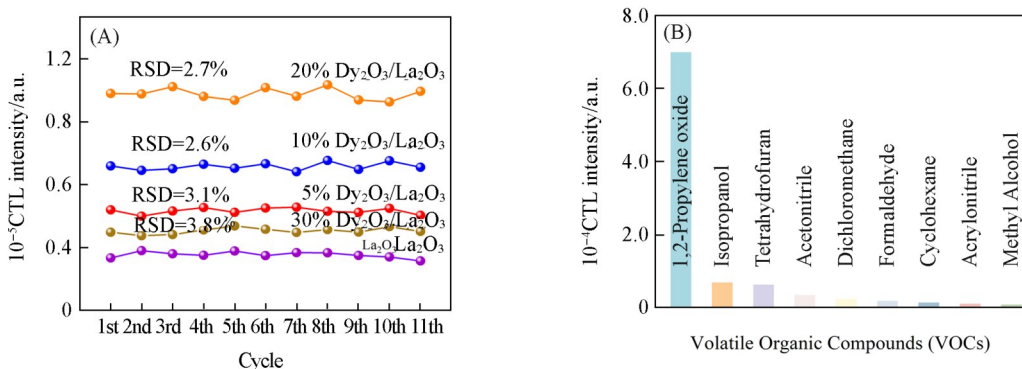


Fig. 5 Cyclic stability test of PO catalytic luminescence(A) and selective response to various VOCs on Dy₂O₃/La₂O₃(B)

2.5 气敏选择性评估

在优化工作条件下($\lambda=575$ nm, 温度 360 °C, 流速 320 mL/min), 采用 20% Dy₂O₃/La₂O₃传感材料对 PO 及其潜在干扰物进行选择性测试. 如图 5(B)所示, 针对 8 种典型 VOCs(包括醇类、醚类、腈类和卤代烃等)的对比实验显示, 异丙醇的 CTL 响应强度仅为 PO 的 9.27%, 四氢呋喃的 CTL 响应强度仅为 PO 的 8.56%, 交叉响应率均低于 10%. 其余干扰物(乙腈、二氯甲烷、甲醛、环己烷、丙烯腈和甲醇)均未检测到显著信号. 以上结果表明, Dy₂O₃/La₂O₃对 PO 表现出特异性催化活性, 可能归因于 Dy³⁺活性中心对环氧基团的特异性识别, 同时 La₂O₃基底抑制非目标物的表面吸附, 独特的能带结构很好的匹配了 PO 的氧化活化能^[33-35], 因此可有效区分环氧化合物与其它 VOCs.

2.6 加标回收实验

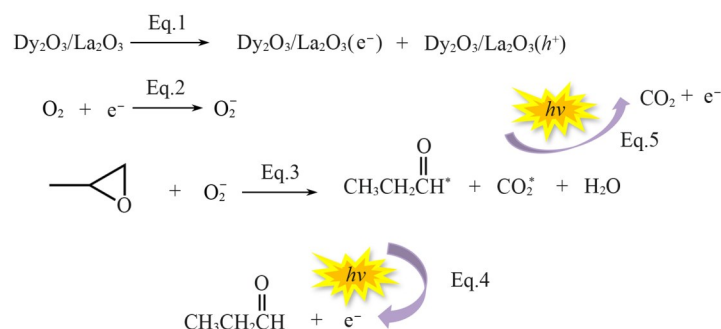
为评估 Dy₂O₃/La₂O₃传感器在实际样品检测中的性能, 采用加标回收法进行了验证. 在 PO 的线性检测范围内, 分别向含有二氯甲烷、甲醇及甲醛的基质中添加低、中、高 3 种浓度的 PO 标准品, 以模拟复杂环境样品. 如表 1 所示, PO 标准品与加标混合样的 CTL 响应信号无显著性差异($P>0.05$), 表明共存干扰物对 PO 检测的影响可忽略. 目标分析物的回收率范围为 96%~108%, 相对标准偏差(RSD)为 1.6%~3.9%, 回收率接近 100%, 证实检测结果准确可靠, 在多种 VOCs 共存条件下仍保持高选择性, 满足分析化学方法验证的要求(回收率 80%~120%, RSD<5%), 表明这一方法适用于含复杂基质的实际样品分析.

Table 1 Results of the spike recovery experiment

| No. | Composition | Actual concentration/ (mmol·L ⁻¹) | Measured concentration/ (mmol·L ⁻¹) | RSD(% , n=3) | Recovery(%) |
|-----|-----------------|--|--|--------------|-------------|
| 1 | Propylene oxide | 5.0 | 5.4 | 3.9 | 108 |
| | Dichloromethane | 5.0 | 5.4 | 3.9 | 108 |
| 2 | Propylene oxide | 10.0 | 9.6 | 3.4 | 96 |
| | Methyl alcohol | 10.0 | 9.6 | 3.4 | 96 |
| 3 | Propylene oxide | 20.0 | 20.0 | 1.6 | 100 |
| | Formaldehyde | 20.0 | 20.0 | 1.6 | 100 |

2.7 催化发光传感机制

基于实验数据与已有文献研究,推测Dy₂O₃/La₂O₃对PO的催化发光反应机理如Scheme 3所示. 首先,PO分子吸附在Dy₂O₃/La₂O₃表面,接着Dy₂O₃/La₂O₃催化PO与O₂发生氧化反应,生成中间产物或最终产物. 该过程可分为4个关键步骤:(1)电子-空穴对生成. 在催化发光反应过程中,Dy₂O₃/La₂O₃作为催化剂参与反应,通过化学反应过程中的能量变化实现电荷分离,Dy₂O₃/La₂O₃+hν→e⁻+h⁺(Eq. 1);(2)活性氧物种形成. 表面吸附氧捕获电子生成超氧自由基:O₂(ads)+e⁻→O₂⁻(Eq. 2);(3)氧化反应过程:PO与活性氧发生选择性氧化生成激发态中间体,C₃H₆O+3O₂⁻→CH₃CH₂CHO*+CO₂* (Eq. 3);(4)光辐射释放:激发态产物弛豫发光,CH₃CH₂CHO*→CH₃CH₂CHO+hν(575 nm)*,CO₂*→CO₂+hν* (Eq. 4). 反应终产物为丙醛与CO₂. 推测界面协同效应促进Dy³⁺-La³⁺双活性中心降低反应活化能,O₂⁻优先攻击环氧环,反应过程中释放的能量会转化为光辐射从而产生特征发光信号^[36].



Scheme 3 CTL sensing mechanism

3 结 论

通过简单的水热法可控合成了Dy₂O₃/La₂O₃纳米复合催化材料体系,并将其应用于环氧丙烷(PO)的催化发光传感检测. 通过系统优化材料组分(Dy₂O₃掺杂比例)和检测参数(激发波长、反应温度和气体流速),实现了对PO分子的高灵敏及高选择性检测. 性能测试结果表明,该传感体系具有宽的动态检测范围(1~25 mmol/L)、超低的检测限(82.8 μmol/L)以及优异的操作稳定性(RSD<3.1%). 该工作不仅为稀土复合氧化物气敏材料的设计提供了新思路,更为环境VOCs现场监测技术的发展提供了新的技术手段,未来可进一步开发便携式检测设备,拓展其应用的领域.

参 考 文 献

- [1] Ren Y., Dong C., Song C., Qu Z., *Environ. Sci. & Technol.*, **2024**, 58(47), 20785—20811
- [2] Zhao J., Shi L., Zhang X., Song Z., Lu H., Abudula A., Xu G., Guan G., *Coord. Chem. Rev.*, **2024**, 518, 216060
- [3] Zhang N., Zhang J., Gao C., Yuan S., Wang Z., *Desalination*, **2025**, 597, 118372
- [4] Sun X., Li J., Fan J., Fan J., Deng Q., Xu M., Huang H., Wu J., Ye D., *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 491, 137958
- [5] Rehman S., Zheng X., Auja M. I., Mehmood T., *Chem. Eng. J.*, **2025**, 505, 159257
- [6] Guo L., Bi F., Liu N., Zhang X., *Sep. and Purif. Technol.*, **2025**, 362, 131934
- [7] Chi M., Ke J., Liu Y., Wei M., Li H., Zhao J., Zhou Y., Gu Z., Geng Z., Zeng J., *Nat. Commun.*, **2024**, 15(1), 3646
- [8] Abdhussain N., Nawada S., Schoenmakers P., *Chem. Rev.*, **2021**, 121(19), 12016—12034
- [9] Ma Y., Yao J., Zhou L., Zhao M., Liu J., Marchioni E., *Food Chem.*, **2023**, 410, 135432
- [10] Chen J., Zhang R., Guo S., Pan Y., Nezamzadeh-Ejehieh A., Lan Q., *Talanta*, **2025**, 286, 127498
- [11] Meher N., Barman D., Parui R., Iyer P. K., *J. Mater. Chem. C*, **2022**, 10(28), 10224—10254
- [12] Long Z., Ren H., Yang Y., Ouyang J., Na N., *Anal. and Bioanal. Chem.*, **2016**, 408(11), 2839—2859
- [13] Hu J., Zhang L., Su Y., Lv Y., *Luminescence*, **2020**, 35(8), 1174—1184
- [14] Hu J., Zhang L., Lv Y., *Appl. Spectrosc. Rev.*, **2019**, 54(4), 306—324
- [15] Cheng W., Guan W., Lin Y., Lu C., *Anal. Chem.*, **2022**, 94(2), 1382—1389
- [16] Zhou Q., Yan S., Zhang L., *Luminescence*, **2022**, 37(7), 1135—1144
- [17] Hu J., Chen C., Xie X., Zhang L., Song H., Lv Y., *Anal. Chem.*, **2023**, 95(6), 3516—3524

- [18] Hu Q., Cheng X., Zhang X., Xu Y., Gao S., Zhao H., Major Z., Huo L., *Sensor. and Actuat. B: Chem.*, **2020**, *305*, 127434
- [19] Liu Z., Ho Li J. P., Vovk E., Zhu Y., Li S., Wang S., van Bavel A. P., Yang Y., *ACS Catal.*, **2018**, *8*(12), 11761—11772
- [20] Li M., Hu Y., Li G., *New J. Chem.*, **2021**, *45*(26), 11823—11830
- [21] Umar A., Ibrahim A. A., Kumar R., Almas T., Sandal P., Al-Assiri M. S., Mahnashi M. H., AlFarhan B. Z., *Baskoutas S. Ceram. Int.*, **2020**, *46*(4), 5141—5148
- [22] Alonizan N., Madani M., Omri K., Abumousa R. A., Alyami A. A., Alqahtani M. E., Almarri H. M., Algrafy E. M., *The Eur. Phys. J. Plus.*, **2023**, *138*(5), 398
- [23] Fleming P., Farrell R. A., Holmes J. D., Morris M. A., *J. Am. Ceram. Soc.*, **2010**, *93*(4), 1187—1194
- [24] Jaffar B. M., Swart H. C., Seed Ahmed H. A. A., Yousif A., Kroon R. E., *J. Phys. Chem. Solids*, **2019**, *131*, 156—163
- [25] Ogugua S. N., Swart H. C., Ntwaeaborwa O. M., *Sensors Actuat. B: Chem.*, **2017**, *250*, 285—299
- [26] Bhakta N., Das A., Das D., Yoshimura K., Bajorek A., Chakrabarti P. K., *Mater. Chem. Phys.*, **2019**, *227*, 332—339
- [27] Ou Y., Zhou Y., Guo Y., Niu W., Wang Y., Jiao M., Gao C., *ACS Sensors*, **2023**, *8*(11), 4253—4263
- [28] Guo C. Y., Hu Q. C., Xu Y. M., Zhang X. F., Gao S., Zhao H., Xu M. M., Cheng X. L., Huo L. H., *ACS Appl. Nano. Mater.*, **2021**, *4*(9), 9113—9122
- [29] Zhang Y., Liu J., Wang Y., Zhao Y., Li G., Bei K., Zhang G., Lv Y., *Fuel*, **2024**, *367*, 131562
- [30] Lee G. R., Song K., Hong D., An J., Roh Y., Kim M., Kim D., Jung Y. S., Park J. Y., *Nat. Commun.*, **2025**, *16*(1), 2909
- [31] Ruiz Puigdollers A., Schlexer P., Tosoni S., Pacchioni G., *ACS Catal.*, **2017**, *7*(10), 6493—6513
- [32] Karthikeyan S., Dhanakodi K., Shanmugasundaram K., Surendhiran S., *Mater. Today: Proc.*, **2021**, *47*, 901—906
- [33] Song X., Ding Y., Zhang J., Jiang C., Liu Z., Lin C., Zheng W., Zeng Y., *J. Mater. Res. and Technol.*, **2022**, *20*, 3549—3560
- [34] Achari V. S., Lopez R. M., Rajalakshmi A. S., Jayasree S., Shibin O. M., John D., Sekkar V., *Sep. Purif. Technol.*, **2021**, *279*, 119626
- [35] Khan W. U., Hantoko D., Ahmed S., Shoaibi A. A., Chandrasekar S., Hossain M. M., *Catal. Today*, **2025**, *453*, 115277
- [36] Li M., Chen J. Y., Hu Y. F., Li G. K., *Chinese J. Anal. Chem.*, **2019**, *47*(2), 191—196

(E.: F, K)