

# g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料的制备及其气敏性能

储向峰<sup>1</sup>, 刘醒醒<sup>1</sup>, 卜鑫<sup>1</sup>, 鲍思洁<sup>1</sup>, 王春水<sup>1</sup>, 梁士明<sup>2</sup>

(1. 安徽工业大学 化学与化工学院, 安徽 马鞍山 243032)

(2. 临沂大学 材料科学与工程学院, 山东 临沂 276005)

**摘要:** 采用水热-煅烧法制备了 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>, 并使用超声混合法制备一系列不同质量比例的 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料。通过 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜 (SEM)、X 射线光电子能谱 (XPS) 等方法对 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料进行了表征, 研究了不同比例的 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料的气敏性能。研究表明: 当 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的加入量为 2.5% (质量分数) 时, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料对于异丙醇气体的灵敏度最高, 在 170 °C 的最佳工作温度下, 对 100 μL/L 的异丙醇气体的灵敏度可达 117, 与纯 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 的灵敏度 1.4 相比提高了 83.6 倍, 最低检测限为 0.1 μL/L。

**关键词:** g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>; 异丙醇; 气敏性能

中图分类号: TB332; TB381

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)10-3673-07

作为一种挥发性有机化合物(VOCs), 异丙醇广泛应用于制药、化妆品以及汽车行业<sup>[1]</sup>。不同浓度的异丙醇气体对人体有不同程度的危害, 低浓度的异丙醇气体会刺激眼睛、鼻子、嘴巴, 高浓度的异丙醇气体会导致昏厥, 严重将会导致死亡<sup>[2-3]</sup>。因此, 开发检测异丙醇气体的气敏传感材料十分有意义<sup>[4]</sup>。

目前已经有相关文献研究了检测异丙醇气体的气敏传感器。Xu 等<sup>[5]</sup>采用了溶胶凝胶法制备了 BiFeO<sub>3</sub> 纳米材料, 该材料在最佳工作温度 240 °C 时, 对 100 μL/L 异丙醇气体的灵敏度为 31.0, 最低检测限可达 2 μL/L, 响应时间为 6 s。Yang 等<sup>[6]</sup>利用水热法合成了 ErFeO<sub>3</sub> 纳米材料, 该材料在最佳工作温度 270 °C 时对 100 μL/L 异丙醇气体的灵敏度为 20.0, 最低检测限为 2 μL/L。Erwin 等<sup>[7]</sup>采用超声辅助胶体法制备了尖晶石型的 ZnMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 纳米材料, 该材料在最佳工作温度 250 °C 时对 100 μL/L 异丙醇气体的灵敏度为 100.0, 最低检测限为 10 μL/L。上述材料对异丙醇气体检测都有工作温度较高和最低检测限较高的问题。

Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 作为一种 n 型半导体材料, 拥有双极性电荷传输能力以及优异的光学和电学性能, 以及 SnO<sub>2</sub> 和 CdO 的特性<sup>[8-9]</sup>。然而目前有关于 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 在气敏领域应用的报道较少, 王彩红等<sup>[9]</sup>利用水热法制备了 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 材料, 该气敏材料在 300 °C 时对三乙胺、乙醇以及丙酮的灵敏度为 16.9、14.1 和 12.1, 对三乙胺气体的最低检测限为 5 μL/L。二维材料的掺杂能够改

善材料的气敏性能。已有文献报道, 掺杂适量的 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 可以改善金属氧化物的气敏性能, Cao 等<sup>[10]</sup>使用水热法制备了 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SnO<sub>2</sub> 复合材料, 该材料在最佳工作温度为 300 °C 时对 500 μL/L 的乙醇气体的灵敏度可达 360.0, 该灵敏度相比纯 SnO<sub>2</sub> 材料对于同浓度的乙醇气体的灵敏度要高出 1.5 倍。Wang 等<sup>[11]</sup>采用液体超声混合法制备了 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-WO<sub>3</sub> 纳米材料, 该材料在最佳工作温度为 340 °C 时对 100 μL/L 的丙酮气体的灵敏度可达 35.0, 和纯 WO<sub>3</sub> 的灵敏度相比高出了 3 倍。

本研究采用水热-煅烧法制备了 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 纳米材料, 并使用超声混合法制备了一系列不同质量比例的 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>, 并分别进行气敏性能测试。为 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料的研制开发提供实验数据。

## 1 实验

### 1.1 材料制备

原材料: Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O(上海萨恩化学技术有限公司, AR); SnCl<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O(上海阿拉丁试剂有限公司, AR); 三聚氰胺(国药集团化学试剂有限公司, AR); NaOH(国药集团化学试剂有限公司, AR); 无水乙醇(国药集团化学试剂有限公司, AR); 去离子水(实验室自制)。

称取 4.0 g 三聚氰胺置于坩埚中, 按照 2 °C/min 的升温速率放入马弗炉中进行煅烧, 在 550 °C 时保温 4 h, 煅烧完毕并冷却至室温后研磨得到黄色粉末, 该黄色粉末为 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(61971003); 山东省自然科学基金(ZR2020MF025)

作者简介: 储向峰, 男, 1966 年生, 教授, 安徽工业大学化学与化工学院, 安徽 马鞍山 243032, E-mail: xfchu@ahut.edu.cn

称取 1.234 g 的  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  和 0.720 g 的  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  于烧杯中, 加入 20 mL 去离子水, 搅拌 2 h 使其充分溶解。使用 2 mol/L 的 NaOH 溶液将上述悬浊液的 pH 值调节为 9.5, 将调节好的溶液移入 50 mL 聚四氟乙烯内衬中, 置于不锈钢反应釜, 使其在 170 °C 下保温 16 h。用去离子水和无水乙醇对得到的产物分别洗涤 3 次, 之后放入 80 °C 的烘箱内干燥 12 h, 研磨得到白色粉末。将所得白色粉末在马弗炉中以 5 °C/min 的升温速率升至 550 °C 保温 2 h, 得到黄色  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  粉末。

先称取 5 份 0.1 g 的  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$ , 置于烧杯中, 然后称取 1.0, 1.5, 2.5, 3.5, 4.0 mg 的  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  分别加入到烧杯中, 以 20 mL 无水乙醇为溶剂, 超声处理 2 h。后将混合溶液置于 80 °C 的烘箱内烘干 12 h, 得到  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$  复合材料, 分别标记为 CNC-1(1%  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$ )、CNC-1.5(1.5%  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$ )、CNC-2.5(2.5%  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$ )、CNC-3.5(3.5%  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$ )、CNC-4 (4%  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$ )。

### 1.2 气敏性能测试

取适量上述  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$  复合材料粉末于研钵中进行充分研磨, 加入 1~2 滴松节油透醇, 将研磨好的浆状物材料均匀涂抹在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  管的外壁上, 然后将 Ni-Cr 加热丝穿插在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  管内, 制成旁热式气敏元件<sup>[12]</sup>。在实验过程中, 通过调节加热丝功率的大小, 实现对元件工作温度的调控。气敏元件的灵敏度 (sensitivity)<sup>[13]</sup> 被定义为:  $S=R_a/R_g$ , 其中,  $R_a$  是气敏元件在空气当中的稳定电阻,  $R_g$  是在被测气体中的稳定电阻。实验过程相对湿度条件为 60%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料表征

图 1 是纯  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  和一系列复合材料的 XRD 图谱。如图所示, 制备的纯  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  纳米材料在  $2\theta$  角为 27.48°、32.48°、33.82°、39.25°、51.73°和 56.72° 出现了明显的衍射峰, 与  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  晶体的 (220)、(311)、(222)、(400)、(511) 以及 (440) 晶面对应<sup>[14]</sup>。33.82° 出现的衍射峰对应于 (222) 晶面, 归属于  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  纳米材料的立方相。图中, 成功制备的  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$  复合材料的衍射峰中并没有出现较为明显的  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  的特征峰, 可能原因是  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  位于  $2\theta$  为 27.4° 对应于 (002) 衍射面的特征峰与  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  的重合, 而位于  $2\theta$  为 12.9° 对应于  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  的 (100) 衍射面的特征峰不明显的的原因是  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  添加量较少<sup>[15]</sup>。此外, 从图中可以观察到  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$  复合材料的衍射峰强度均高于纯  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  纳米材料的,

表明  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  的复合增强了  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  的结晶度, 降低了复合材料的缺陷度, 有利于电子的传导, 进而影响  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  的性能<sup>[16]</sup>。

为了观察复合材料的微观形貌特征, 对 CNC-2.5 复合材料以及纯  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  材料进行了 SEM 表征。图 2a 和 2b 表明  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  材料是由无数具有立方体结构的颗粒堆积而成<sup>[17]</sup>。图 2c 和 2d 是 CNC-2.5 的 SEM 形貌, 从图中可以观察到立方体颗粒 ( $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$ ) 和片层状<sup>[18]</sup> 物质 ( $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ), 而这种形貌导致 CNC-2.5 复合材料出现较多的孔隙, 使复合材料更易于吸附目标气体, 提升材料的气敏性能<sup>[19]</sup>。图 2e 是 CNC-2.5 复合材料的 EDS 元素面扫描及 EDS 分析结果, 由图可知 CNC-2.5 复合材料由 C、N、O、Cd 和 Sn 元素组成, 且元素在 CNC-2.5 复合材料中的分布较为均匀。其中 C、N、O、Cd 和 Sn 元素质量分数分别为 4.803%、6.200%、59.532%、19.461% 和 10.004%。

带隙的大小能在一定程度上影响半导体金属氧化物的气敏性能<sup>[12]</sup>。图 3a 和 3b 分别是纯  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$ 、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$  和 CNC-2.5 复合材料的紫外光吸收光谱以及对应的禁带宽度。由图 3b 可知, 纯  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$ 、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$  和 CNC-2.5 复合材料的带隙大小分别为 3.022、2.78 和 2.86 eV, CNC-2.5 复合材料的禁带宽度处于纯  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  和  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  材料的禁带宽度之间, 并且略微小于纯  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  的禁带宽度, 说明  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  材料与适量的  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  复合会导致材料的禁带宽度的减小, 因此价电子由价带激发到导带所需的能量减少, 进而提升了 CNC-2.5 复合材料的气敏性能<sup>[20]</sup>。

图 4 是为了研究 CNC-2.5 复合材料元素价态以及表面化学成分组成的 XPS 谱图。图 4a 是 CNC-2.5 复合材料的总谱图, 可知该复合材料主要是由 Cd、Sn、C、N 和 O 元素组成。图 4b 中出现在 485.80 和 494.41 eV

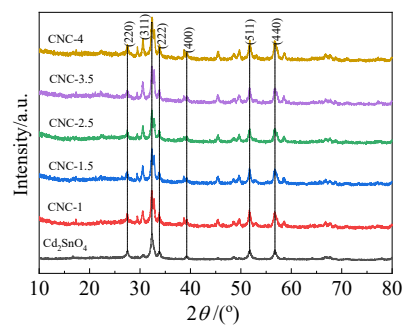


图 1  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  和一系列  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$  复合材料的 XRD 图谱  
Fig.1 XRD patterns of  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  and a series of  $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Cd}_2\text{SnO}_4$  composites

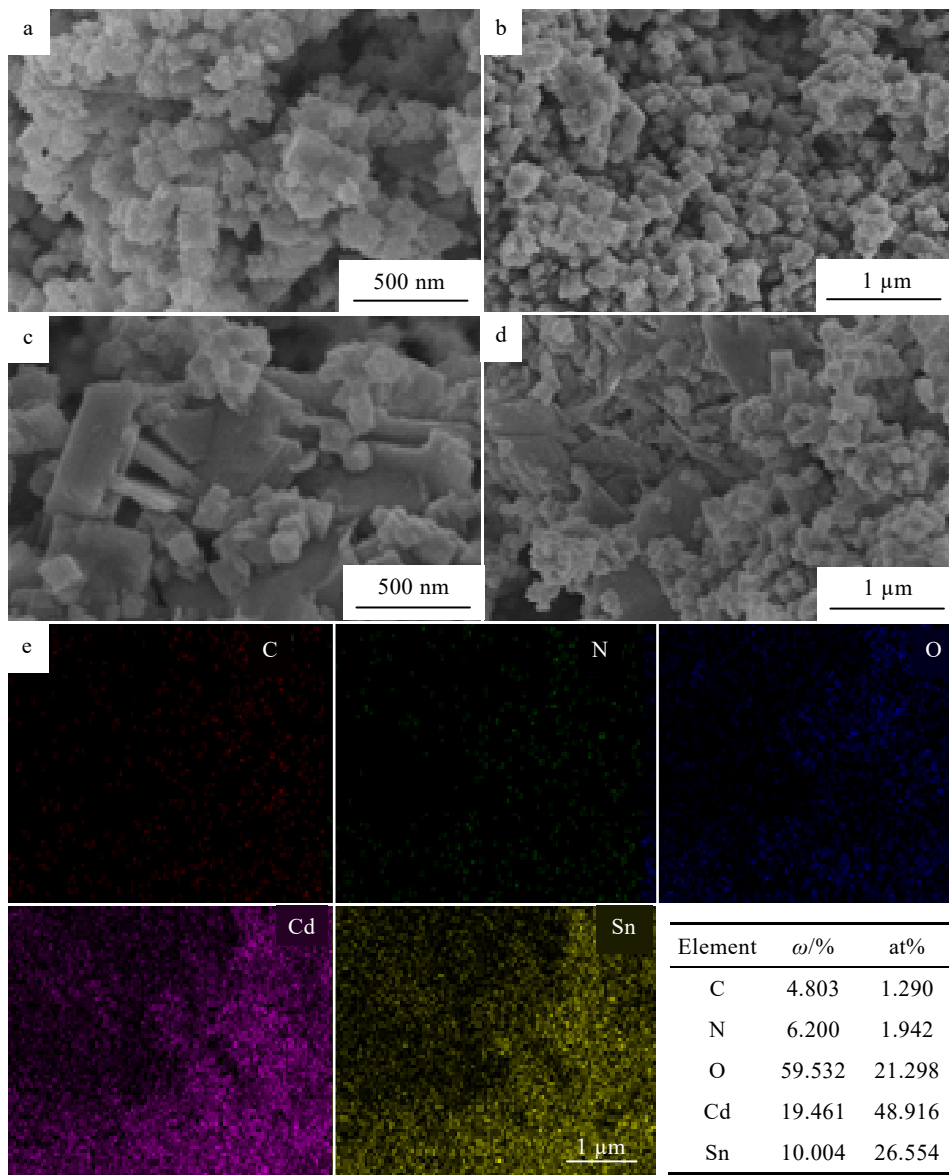


图 2  $Cd_2SnO_4$  和 CNC-2.5 复合材料的 SEM 形貌及复合材料 EDS 分析结果

Fig.2 SEM morphologies of  $Cd_2SnO_4$  (a, b) and CNC-2.5 (c, d) composites; EDS elements mappings and analysis results of CNC-2.5 composite (e)

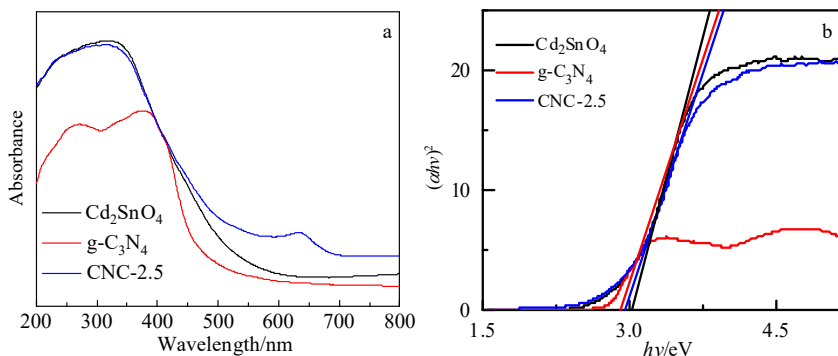


图 3  $Cd_2SnO_4$ 、 $g-C_3N_4$  和 CNC-2.5 复合材料的紫外吸收光谱和禁带宽度

Fig.3 UV-Vis absorption spectra (a) and band gap (b) of  $Cd_2SnO_4$ ,  $g-C_3N_4$  and CNC-2.5 composites

的 2 个特征峰对应于 Sn 3d<sub>5/2</sub> 和 Sn 3d<sub>3/2</sub>, 表明 Sn 元素在复合材料中以 +4 价态存在。图 4c 为 Cd 3d 的图谱, 404.25 和 411.70 eV 分别对应 Cd 3d<sub>5/2</sub> 和 Cd 3d<sub>3/2</sub> 的特征峰, 说明 Cd 元素在复合材料中以 +2 价态存在。图 4d 是 CNC-2.5 复合材料中的 N 1s 图谱, 图谱中经过拟合出现了位于 404.45 和 405.68 eV 处的特征峰, 其中位于 404.45 eV 处的特征峰归属于 sp<sup>2</sup> 杂化形成的 C=N-C, 而结合能 405.68 eV 处的特征峰则归属于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 材料中的 N<sup>3-</sup>[21]。图 4e 是 CNC-2.5 复合材料中 C 1s 的图谱, 通过拟合得出位于 284.49, 285.59 和 288.72 eV 处的特征峰, 分别对应 C-C、C-N 以及

N-C=N[22]。图 4f 是 CNC-2.5 复合材料中 O 1s 的图谱, 图中位于 529.84, 530.70 和 531.81 eV 的特征峰分别对应于 CNC-2.5 复合材料的表面晶格氧、表面吸附氧和羟基氧[23]。

### 2.2 气敏性能

图 5a 是不同比例 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料和 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 材料制备的气敏元件在不同工作温度下对 100 μL/L 异丙醇气体的灵敏度曲线。从图中观察发现, CNC-2.5 在 170 °C 时对 100 μL/L 异丙醇的灵敏度达到最高的 117。相同条件下纯 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>、CNC-1 和 CNC-4 在 25~260 °C 的范围内对 100 μL/L 异丙醇气体的灵敏

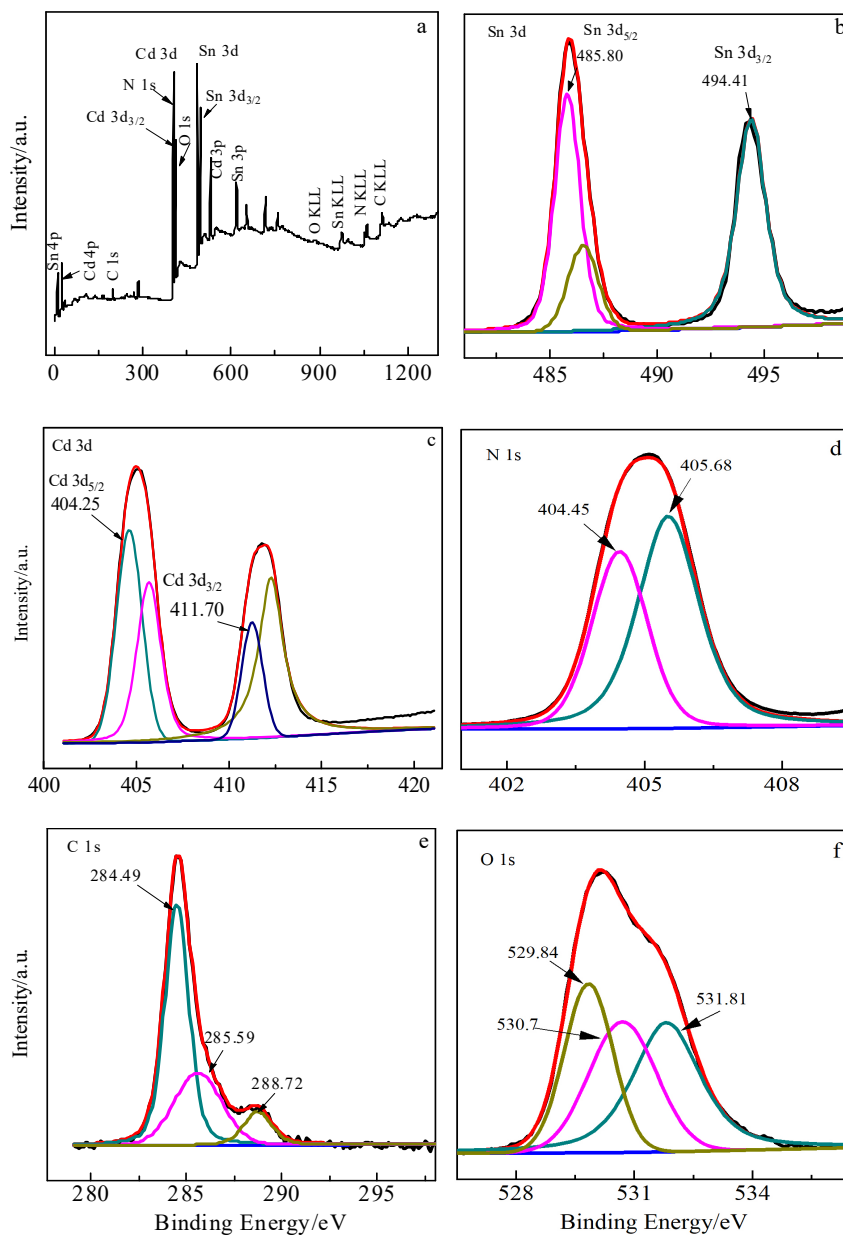


图 4 CNC-2.5 复合材料的 XPS 图谱和各元素分谱

Fig.4 XPS spectra of CNC-2.5 composite: (a) full spectrum; (b) Sn 3d, (c) Cd 3d, (d) N 1s, (e) C 1s, and (f) O 1s

度均没有明显变化。CNC-1.5 和 CNC-3.5 对 100 μL/L 异丙醇气体的灵敏度均在 110 °C 时开始增加, 在 170 °C 时达到最高, 分别为 6.5 和 5.6。CNC-2.5 在 110~260 °C 都有较高的灵敏度, 但最佳工作温度为 170 °C。通过对比 CNC-2.5 和纯 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 发现, 在 170 °C 时 CNC-2.5 的灵敏度(117)是 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 的灵敏度(1.4)的 83.6 倍。综上所述, 通过复合适量的 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 能够显著地提升 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 材料的灵敏度。

图 5b 是 CNC-2.5 复合材料对浓度为 100 μL/L 的 8 种不同气体的灵敏度随工作温度变化的关系曲线。由图可知 CNC-2.5 复合材料在工作温度为 170 °C 时, 其气敏元件对浓度为 100 μL/L 的异丙醇、丙酮、甲醇、三甲胺、甲醛、乙醇、乙醛以及乙酸气体的灵敏度分别为 117.0, 1.0, 1.0, 7.6, 23.5, 1.0, 1.6 和 1.0, 对比可知 CNC-2.5 复合材料对于异丙醇气体的灵敏度远高于其他气体。其中,  $S_{\text{异丙醇}}/S_{\text{甲醛}}$  为 4.98, 说明 CNC-2.5 复合材料制备的气敏元件对于异丙醇气体的灵敏度较高并具备较好的气体选择性。

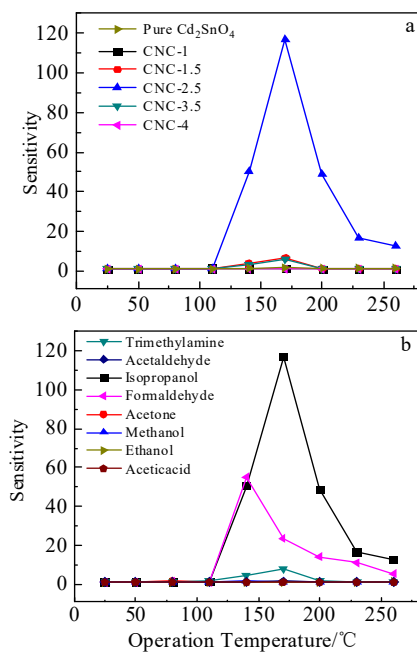


图 5 一系列 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料和 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 材料制备的气敏元件对 100 μL/L 异丙醇的灵敏度随工作温度的变化曲线; CNC-2.5 气敏元件对 8 种浓度为 100 μL/L 的气体的灵敏度随工作温度的关系曲线

Fig.5 Variation curves of sensitivity of gas sensors prepared by a series of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> composite and Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> in 100 μL/L isopropanol with the operating temperature (a); variation curves of sensitivity of the gas sensor prepared by CNC-2.5 material to eight 100 μL/L gases with the operating temperature (b)

图 6a 是 CNC-2.5 复合材料在最佳工作温度 170 °C 时对不同浓度的异丙醇气体的响应-恢复曲线。CNC-2.5 复合材料在 170 °C 时对浓度为 100, 80, 50, 20, 10, 1 以及 0.1 μL/L 异丙醇气体的灵敏度分别为 117.0, 91.0, 50.2, 23.0, 7.7, 4.0 和 1.5, 对于浓度为 100 μL/L 的异丙醇气体响应时间为 58 s, 最低检测限可以达到 0.1 μL/L。CNC-2.5 复合材料对于异丙醇气体的响应-恢复曲线随气体浓度的降低由高到低。

图 6b 为 CNC-2.5 复合材料在 170 °C 时对 100 μL/L 异丙醇气体灵敏度值随湿度的变化曲线。相对湿度在 35%到 60%之间, CNC-2.5 复合材料的灵敏度呈现上升趋势, 并且在相对湿度为 60%时达到最大值 117.0, 这主要是因为被吸附的水分子促进了 CNC-2.5 复合材料与目标气体之间的反应, 从而导致 CNC-2.5 复合材料的导电性能发生改变, 影响 CNC-2.5 复合材料对于异丙醇气体的灵敏度值<sup>[24]</sup>。当相对湿度超过 60%时, CNC-2.5 复合材料对于异丙醇气体的灵敏度呈现出快速降低趋势, 可能原因是随着湿度的增加, 大量的水分子占据了 CNC-2.5 复合材料表面的活性位点, 从而

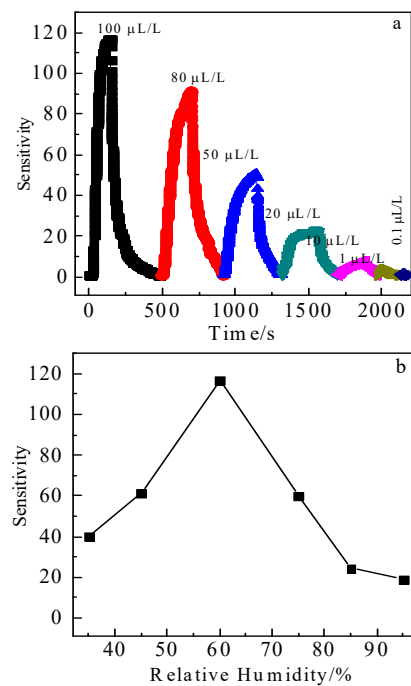


图 6 CNC-2.5 复合材料对不同浓度异丙醇的灵敏度随时间的变化曲线; CNC-2.5 复合材料对异丙醇气体灵敏度随湿度的变化曲线

Fig.6 Variation curves of sensitivity of CNC-2.5 composite gas sensor to the isopropanol with different concentrations with time (a); variation curves of sensitivity of CNC-2.5 composite gas sensor to 100 μL/L isopropanol with humidity (b)



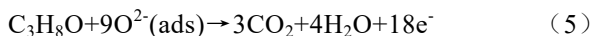
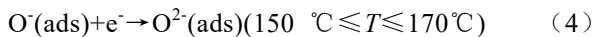
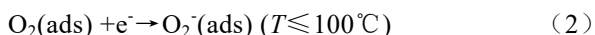
图 7 气敏机理示意图

Fig.7 Schematic diagram of sensing mechanism

阻碍了 CNC-2.5 复合材料与目标气体之间的反应，最终导致了 CNC-2.5 复合材料对于异丙醇气体的灵敏度值下降<sup>[25]</sup>。

### 2.3 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料的气敏机理

目前对于半导体气体传感器的气敏机理，可用表面吸附控制理论来解释<sup>[26-27]</sup>。如图 7 所示，当 CNC-2.5 复合材料暴露在空气中时，空气中的氧分子被吸附在 CNC-2.5 复合材料的表面上变为吸附氧，该吸附氧从 CNC-2.5 复合材料的导带中获取电子，生成了不同类型的氧离子，分别是 O<sub>2</sub><sup>-</sup>、O<sup>-</sup>以及 O<sup>2-</sup>（式（2）、式（3）和式（4））。当 CNC-2.5 复合材料放置在目标气体中时，吸附氧 O<sup>2-</sup>会与异丙醇气体分子发生反应，生成 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 以及电子（式（5）），反应过程中生成的电子会被复合材料的导带吸收，导致 CNC-2.5 复合材料的电阻发生变化，进一步影响 CNC-2.5 复合材料的气敏性能<sup>[28-29]</sup>。



## 3 结 论

通过超声混合分散法制备了一系列不同质量比例的 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料，2.5% g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>（质量分数）复合的 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料对异丙醇气体的气敏性能最佳，处于 170 °C 的工作温度时对浓度为 100 μL/L 的异丙醇气体的灵敏度为 117，与纯 Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 材料的灵敏度 1.4 相比提高了近 83.6 倍，并且最低检测限可达 0.1 μL/L。制备的 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> 复合材料具有实时高效检测异丙醇气体的潜力。

## 参考文献 References

[1] Bi W J, Xiao W, Liu S T *et al. Journal of Materials Science*[J], 2021, 56(10): 6095

[2] Zhao R J, Wang Z Z, Zou T *et al. Chemistry Letters*[J], 2018, 47(7): 881

[3] Luo Y F, Ly A, Lahem D *et al. Journal of Materials Science*[J], 2021, 56: 3230

[4] Krishna K G, Parne S, Pothukanuri N *et al. Sensors and Actuators A: Physical*[J], 2022, 341: 113 578

[5] Xu H X, Xu J H, Wei J L *et al. Materials*[J], 2020, 13(17): 3829

[6] Yang T T, Ma S Y, Cao P F *et al. Vacuum*[J], 2021, 185: 110 005

[7] Guillén-López E S, López-Urías F, Muñoz-Sandoval E *et al. Materials Today Communications*[J], 2021, 26: 102 138

[8] Bu Xin(卜鑫), Bao Sijie(鲍思洁), Chu Xiangfeng(储向峰) *et al. Chinese Journal of Inorganic Chemistry*(无机化学学报)[J], 2022, 38(11): 2173

[9] Wang Caihong(王彩红), Liu Guoxia(刘国霞), Yin Junying(阴军英). *New Chemical Materials*(化工新型材料)[J], 2012, 40(6): 108

[10] Cao J L, Qin C, Wang Y. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 728(25): 1101

[11] Wang D, Huang S M, Li H J *et al. Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2019, 282: 961

[12] Jiao Cheng(焦成), Jiang Yufang(蒋余芳), Chu Xiangfeng(储向峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(9): 3335

[13] Yuan Z, Zhao Q N, Xie C Y *et al. Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2022, 355: 131 300

[14] Preethi G, Balan R, Koppala S *et al. Materials Research Express*[J], 2019, 6(10): 105 537

[15] Chen Kelong(陈克龙), Huang Jianhua(黄建花). *CIESC Journal*(化工学报)[J], 2020, 71(1): 397

[16] Huang Juanjuan(黄娟娟), Du Jianmei(杜建梅), Du Haiwei(杜海威) *et al. Acta Physico-Chimica Sinica*(物理化学学报)[J], 2020, 36(7): 75

[17] Jiang L, Lv S Y, Tang W Q *et al. Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2021, 345: 130 321

[18] Shang Q Q, Fang Y Z, Yin X L *et al. RSC Advances*[J], 2021, 11(59): 37 089

[19] Cai Z, Chen J R, Xing S S *et al. Journal of Hazardous Materials*[J], 2021, 416: 126 195

[20] Yu S G, Zhang H Y, Chen C *et al. Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2019, 287: 526

- [21] Li L, Hu Y, Deng D Y *et al.* *Analytical and Bioanalytical Chemistry*[J], 2016, 408: 8831
- [22] Wang Y, Zhang R, Zhang Z Y *et al.* *Advanced Materials Interfaces*[J], 2019, 6(23): 1 901 429
- [23] Cao J L, Qin C, Wang Y *et al.* *RSC Advances*[J], 2017, 7: 25504
- [24] Touati A, Sayadi S, Najjar W *et al.* *Materials Science in Semiconductor Processing*[J], 2015, 39: 807
- [25] Sui N, Zhang P, Zhou T T *et al.* *Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2021, 336: 129 612
- [26] Ma Y T, Ma S Y, Tang J *et al.* *Vacuum*[J], 2021, 184: 109 939
- [27] Bedi R K, Singh I. *ACS Applied Materials and Interfaces*[J], 2010, 2: 1361
- [28] Seekaew Y, Wisitsoraat A, Phokharatkul D *et al.* *Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2019, 279: 69
- [29] Nakate U T, Ahmad R, Patil P *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 797: 456
- [25] Sui N, Zhang P, Zhou T T *et al.* *Sensors and Actuators B:*

## Preparation and Gas-Sensing Properties of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> Composites

Chu Xiangfeng<sup>1</sup>, Liu Xingxing<sup>1</sup>, Bu Xin<sup>1</sup>, Bao Sijie<sup>1</sup>, Wang Chunshui<sup>1</sup>, Liang Shiming<sup>2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Linyi University, Linyi 276005, China)

**Abstract:** Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> was prepared by hydrothermal calcination, and a series of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> composites with different mass ratios were prepared by sonication mixing method. The materials were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and other methods. The gas sensing properties of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> composites were studied. The results show that when the addition amount of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> was 2.5wt%, the sensitivity of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> composites to the isopropanol gas was the highest, and the response to 100 μL/L isopropanol gas was up to 117 at the optimal working temperature of 170 °C, which was 83.6 times higher than that of pure Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> with a sensitivity of 1.4, and the low detection limit was 0.1 μL/L.

**Key words:** g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>; isopropanol; gas sensing

---

Corresponding author: Chu Xiangfeng, Ph. D., Professor, School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, P. R. China, E-mail: xfchu@ahut.edu.cn