

聚酰亚胺/石墨烯改性复合材料对氢气传感器气敏性能的优化

刘馨璐, 梁欣

(中国石化销售股份有限公司应用技术研究院, 天津 300384)

摘要: 为了有效优化氢气传感器气敏性能, 文章研究聚酰亚胺/氧化石墨烯(PI/GO)改性复合材料对氢气传感器气敏性能的优化效果。以鳞片石墨与硝酸钠等为原料, 通过Hummers法制备氧化石墨烯(GO)溶液, 将其与聚酰亚胺(PI)混合, 设计不同聚四氟乙烯(PTFE)掺入比例, 制备PI/GO改性复合材料, 将未添加PTFE的复合材料作为对照组, 制作氢气传感器; 通过智能微分析系统与气敏仪组装测试箱分析不同PTFE掺入比例下PI/GO改性复合材料对氢气传感器气敏性能的优化效果。结果表明: 添加PTFE对PI/GO改性复合材料的气敏性能具有明显优化效果。PTFE掺入质量分数为5%时, 传感器的气敏响应绝对值达到0.05, 灵敏度达到0.5以上, 电压变化幅值达到350 mV以上, 检出限(LOD)高于7.5 $\mu\text{mol/mol}$, 氢诱导晶格应变率高于1.4%, 气敏性能优化效果最佳。

关键词: 聚酰亚胺; 石墨烯; 复合材料; 氢气传感器; 气敏性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0092-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.017

Optimization of Gas Sensitivity Performance of Hydrogen Sensors by Polyimide/Graphene Modified Composites

LIU Xinlu, LIANG Xin

(Sinopec Marketing Research Institute of Applied Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to effectively optimize the gas sensing performance of hydrogen sensors, the article studied the optimization effect of polyimide/graphene oxide (PI/GO) modified composites on the gas sensing performance of hydrogen sensors. Using flake graphite and sodium nitrate as the raw materials, graphene oxide (GO) solution was prepared by Hummers method, mixed with polyimide (PI), and different PTFE doping ratios were designed to prepare PI/GO modified composites. The composite without PTFE was used as the control group to fabricate a hydrogen gas sensor. By assembling an intelligent microanalysis system and a gas sensor in a test box, the optimization effect of PI/GO modified composites on the gas sensing performance of hydrogen sensors under different PTFE doping ratios was analyzed. The results show that the addition of PTFE has a significant optimization effect on the gas sensing performance of PI/GO modified composites. When the PTFE doping mass fraction is 5%, the absolute value of the gas sensing response of the sensor reaches 0.05, the sensitivity reaches 0.5 or above, the voltage change amplitude reaches 350 mV or above, the limit of detection (LOD) value is higher than 7.5 $\mu\text{mol/mol}$, the hydrogen induced lattice strain rate is higher than 1.4%, and the optimization effect of gas sensing performance is the best.

Keywords: Polyimide; graphene; Composites; Hydrogen sensor; Gas sensing performance

氢气属于清洁能源, 在能源转型和工业生产中具有重要的作用^[1-3]。但是, 氢气的爆炸危险性极高, 且爆炸极限

跨度大, 氢气一旦发生泄漏, 极有可能酿成灾难性的安全事故^[4-6]。因此, 开发高性能的氢气传感器可提升氢气使用

收稿日期 Submitted date 2025-03-29; 修回日期 Revised date 2025-05-05; 录用日期 Accepted date 2025-06-12

基金项目: 中国石化集团公司科技项目(123072)

联系人, liuxinlu0215@163.com

引用本文: 刘馨璐, 梁欣. 聚酰亚胺/石墨烯改性复合材料对氢气传感器气敏性能的优化[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 92-96.

Citation: LIU X L, LIANG X. Optimization of gas sensitivity performance of hydrogen sensors by polyimide/graphene modified composites [J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 92-96.

的安全性^[7-8]。应用复合材料可提高氢气传感器的气敏性能,进而增强其氢气监测精度^[9]。

近年来,研究人员进行了许多复合材料对传感器气敏性能的优化研究。胡林河等^[10]采用一步静电纺丝法制备 In_2O_3 纳米纤维,利用热处理方式在 In_2O_3 内提取空纳米纤维,并与Ni混合得到复合材料的传感器,分析其气敏性能。储向峰等^[11]以 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 为原料,经水热-煅烧合成 Cd_2SnO_4 ,再经超声混合 WS_2 与 Cd_2SnO_4 ,得到复合材料,制备传感器,分析其气敏性。但 WS_2 的团聚现象会导致复合材料的局部性能不均匀,影响传感器的整体气敏性能。陈勇康等^[12]采用水热法制备ZnO纳米线,将其与活性炭复合获取复合材料,分析其气敏性能。环境的变化会导致活性炭的吸附性能发生改变,从而影响ZnO/活性炭复合材料传感器的气敏性能。梁红博等^[13]以Hammer法制备氧化石墨烯(GO),经水热合成SnS/GO纳米复合材料。

聚酰亚胺(PI)具备出色的抵御温度变化能力,拥有良好的强度、韧性、硬度等特性^[14-16]。但单一的PI对氢气的气敏响应灵敏度有限,无法满足实际应用中高精度氢气检测的需求^[17-18]。GO是一种由石墨烯经化学修饰得到的衍生物,具有一系列独特的物理和化学性质。石墨烯的电子结构非常特殊,其二维的蜂窝状晶格结构赋予了其卓越电子迁移率,从而在电子设备中表现出优异的电导性能^[19-20]。石墨烯的力学性能同样出色,其单层结构即便在极薄的情况下也展现出高度的强度与韧性。在热学性能方面,石墨烯的热导率极高,使其在热管理应用中具有重要的潜力^[21-22]。这些性能使GO在气体吸附领域显示出独到的优势,如在过滤和环境监测中的应用。石墨烯的大面积和高比表面积增加了其与气体分子的接触面积,提高了吸附效率。在传感技术方面,石墨烯的高电子迁移率和敏感的表面特性使其能够检测到极低浓度的化学物质,从而在环境监测、医疗健康及安全检测等领域发挥重要作用。GO的化学可调性也支持多种功能化策略,进一步扩展其在传感器领域的应用范围。这些独特的属性确保了其在气体吸附和传感方面具有显著优势^[23-25]。因此,本文研究PI/GO改性复合材料对氢气传感器气敏性能的优化,为开发高性能的氢气传感器提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

鳞片石墨(C),分析纯,青岛格菲特石墨碳素公司;浓硫酸(H_2SO_4),分析纯,山东普惠分化学公司;硝酸钠(NaNO_3),分析纯,河南标准物质研发中心;高锰酸钾(KMnO_4),分析纯,山东海洲生物工程公司;去离子水(H_2O),分析纯,自制;过氧化氢(H_2O_2),分析纯,天津开发区乐泰化工公司;盐酸(HCl),分析纯,天津基准化学试剂公司;无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$),分析纯,石家庄瑞兴石化公司;氨水($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$),分析纯,昆山东南化工材料公司;水合肼

($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$),分析纯,天津市大茂化学试剂厂;N-二甲基乙酰胺(DMAc),分析纯,无锡市千聚恒贸易公司;二氨基二苯醚(ODA),分析纯,山东西亚化学公司;抗坏血酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$),分析纯,上海舟福科贸公司;均苯四甲酸二酐(PMDA),分析纯,山东多聚化学公司; γ -(2,3-环氧丙氧基)丙基三甲氧基硅烷(GPTS),分析纯,上海凯赛化工公司;聚乙烯醇(PVA),分析纯,广州阿尔斯新材料公司;PI,分析纯,湖北鑫宇宏生物医药技术公司;聚四氟乙烯(PTFE),分析纯,上海鸿塑塑化公司;氢气(H_2),分析纯,湖北纽瑞德电子气体有限公司。

1.2 仪器与设备

超声细胞粉碎机,35K-400,江苏高周科技公司;离心机,LSF450,张家港市永嘉净化设备公司;水浴锅,DK-6D,上海楚定分析仪器公司;磁力搅拌器,HQ-1A,郑州海奇仪器科技公司;鼓风干燥箱,LS-3101,河北魏州仪器公司;冷冻干燥机,XH72603CH2NR,无锡沃信仪器有限公司;反应釜,MY555,梁山铭扬机械设备公司;气敏元件测试仪,WS-30A,山东元创仪器公司;高温热压烧结炉,GJC-RYL-50,株洲广吉昌科技公司;微生物鉴定药敏分析系统,MA120,上海寰春医疗器械公司;高精度数字万用表,VC890C+,深圳市驿生胜利科技有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 GO的制备

采用Hummers法制备GO。制备方法如下:在冰浴条件下将1.5 g C与1.5 g NaNO_3 混合均匀,缓慢加入50 mL H_2SO_4 并搅拌35 min。分3次加入6.6 g KMnO_4 (每次间隔15 min),搅拌1.5 h,得到墨绿色溶液。转移至35 °C水浴搅拌2 h至棕色,常温下缓慢加入45 mL H_2O 并高强度搅拌。95 °C水浴搅拌25 min,滴加5 mL H_2O_2 至溶液呈亮黄色,继续搅拌12 min。离心清洗至pH值为7,冷冻干燥得固体GO。超声剥离后取0.1 g GO,加入200 mL $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$,超声处理60 min,加入1 mL $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和2 μL GPTS,搅拌12 h。离心清洗至中性,冷冻干燥,得到最终GO实验溶液。

1.3.2 PI/GO改性复合材料制备

为了避免GO凝胶化形成不可逆的聚集体,影响在聚合物基体中的均匀分散,保持胶体稳定性,量取GO实验溶液(由0.1 g GO分散于200 mL乙醇制备分散液,GO质量分数约0.063%)放置在三口瓶内,并添加DMAc超声处理30 min,再添加ODA,充分搅动至混合均匀。在冰浴条件下,分批次添加PMDA,获取褐色黏稠溶液。进行五阶段升温亚胺化反应处理。表1为PI/GO改性复合材料的配方。按照表1所示配方将GO实验溶液、PI、 H_2O 、PVA、PTFE等材料混合,保持搅动状态12 h,获取均匀浆料,放在干燥箱内,持续烘干2 h。其中助剂PTFE的添加质量分数基于PI和GO的干重总质量计算,因为PVA和溶剂DMAc、 H_2O 在烘干过程中挥发。因此设计3种PTFE的掺入质量分数,并将未添加PTFE的复合材料作为对照组。

表1 PI/GO改性复合材料的配方
Tab.1 Formula of PI/GO modified composites

样品编号	m_{PI}/g	m_{GO}/g	$w_{PTFE}/\%$	m_{PTFE}/g	V_{DMAC}/mL	m_{ODA}/g	m_{PMDA}/g	V_{H_2O}/mL	m_{PVA}/g
1	0.90	0.10	3	0.03	14	0.64	0.76	2	2
2	0.90	0.10	5	0.05	14	0.64	0.76	2	2
3	0.90	0.10	7	0.07	14	0.64	0.76	2	2
4	0.90	0.10	0	0.00	14	0.64	0.76	2	2

将4种材料试样置于预先升温至350℃的高温热压烧结炉内进行烧结,待浆料在炉内自然冷却至室温后取出,进行压实操作,得到具备多孔结构的扩散电极。通过范德堡法依次组装电极,获取氢气传感器。

1.4 性能测试与表征

样品尺寸严格统一为圆形电极结构,直径10 mm,厚度0.5 mm。高纯度气体和环境满足GB/T 30435—2013和GB/T 38361—2019要求,测试箱尺寸为300 mm×300 mm×200 mm,容积18 L,内部气体流速控制在100 mL/min,使用氢气作为测试气体,浓度范围在10~100 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间呈梯度变化,以模拟实际应用场景。

气敏性能响应测试:通过微生物鉴定药敏分析系统与气敏元件测试仪组装测试箱,使用气敏元件测试仪在标准测试箱中向传感器通入梯度变化的氢气,直接比较不同PI/GO改性复合材料在相同氢气浓度下的电信号响应程度,记录信号变化。

气敏性能灵敏度测试:温度为常温(25±2)℃,相对湿度保持在(50±5)%。绘制各材料的浓度-响应值曲线并计算其斜率。灵敏度定义为响应值与气体浓度的比值。斜率越大代表复合材料对氢气浓度变化的感知越灵敏。

气敏性能电压变化测试:在恒流工作模式下,利用高精度数字万用表监测传感器两端的工作电压,记录其在暴露于氢气前后电压的绝对变化值。电压变化幅度更大的材料通常预示着更强的气体分子相互作用与更佳的信号输出潜力。

气敏响应检出限(LOD)性能测试:在超低浓度氢气环境与常温环境下计算信号与噪声的标准偏差比值(信噪比 $S/N=3$),计算出下限。

气敏性能氢诱导晶格应变率测试:氢气浓度按国标要求以步进方式增加,每浓度点稳定5 min后记录数据,生成XRD谱图,记录初始层间距并计算氢诱导晶格应变率。应变率越高说明材料微观结构对氢气的响应越活跃。

2 结果与讨论

2.1 PI/GO改性复合材料对氢气传感器气敏性能响应值的影响

图1为不同PI/GO改性复合材料对传感器气敏响应值的优化效果。从图1可以看出,不同PTFE添加质量分数下,PI/GO改性复合材料制作传感器的气敏响应值均为负,说明氢气传感器的气敏元件接触氢气后电阻下降。添加PTFE后,传感器响应值绝对值明显增大,说明PTFE对

PI/GO改性复合材料的气敏响应值具有优化作用。当PTFE添加质量分数为5%时,传感器响应值绝对值达到0.05,响应值较高;其次是PTFE添加质量分数为3%时,说明适当添加PTFE可提升氢气传感器的气敏性能。其中,PTFE添加质量分数5%为最佳添加量,此时气敏元件电阻变化幅度最大,对氢气响应更显著,响应时间最短,达到稳定响应的时间更久。PTFE的疏水性和化学惰性修饰了PI/GO改性复合材料的表面特性,从而优化了氢气吸附动力学。PTFE的引入可形成微孔结构,增强氢气的扩散和接触面积,同时PTFE的氟原子与GO的含氧官能团相互作用,调节了复合材料的电子能带结构,促进了氢气分子在表面的电荷转移过程。这导致电阻变化更显著,响应时间缩短,体现了界面工程在提升气敏响应中的关键作用。此外,PTFE的适量添加可能抑制了GO片层的团聚,维持了均匀的导电网络,从而放大了氢气诱导的电阻下降效应。

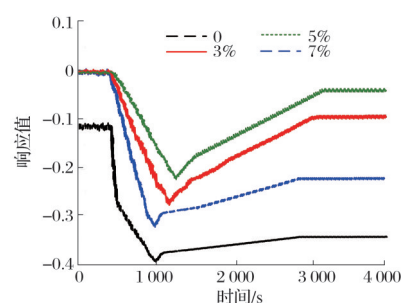


图1 不同PI/GO改性复合材料对传感器气敏响应值的优化效果
Fig.1 Optimization effect of different PI/GO modified composites on gas sensitivity response values of sensors

2.2 PI/GO改性复合材料对氢气传感器气敏性能灵敏度的影响

图2为不同PI/GO改性复合材料对传感器气敏灵敏度的优化效果。从图2可以看出,随着氢气浓度的提升,4种PI/GO改性复合材料氢气传感器灵敏度均呈现上升趋势,说明在常温条件下,不同复合材料对应的氢气传感器对不同浓度氢气均有响应,同时氢气浓度与其灵敏程度呈正相关。在不同氢气浓度下,添加PTFE的PI/GO改性复合材料灵敏度优化效果均高于未添加PTFE的PI/GO改性复合材料。当氢气浓度大于60 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 时,添加5%PTFE的PI/GO改性复合材料的灵敏度优化效果显著高于其他添加量下的复合材料,达到0.5以上。5%PTFE在高浓度下表现突出的深层机理与PTFE改性后复合材料的表

面能调控有关。PTFE的低表面能特性减少了非特异性吸附,增强了氢气选择性吸附位点的可及性。同时,PTFE的掺入可能诱导GO片层产生缺陷位点,作为活性中心促进氢气分子的解离和表面反应,从而提升灵敏度。在较高氢气浓度下,PTFE的弹性模量有助于维持材料的结构稳定性,防止饱和效应,使灵敏度线性增长。这反映了材料界面化学与气体分子相互作用之间的协同效应,为高浓度氢气检测提供了优化路径。

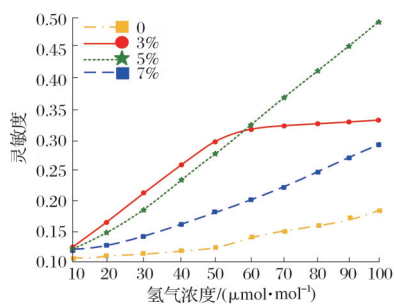


图2 不同PI/GO改性复合材料对传感器气敏灵敏度的优化效果
Fig.2 Optimization effect of different PI/GO modified composites on gas sensitivity of sensors

2.3 PI/GO改性复合材料对氢气传感器气敏性能电压变化幅度的影响

图3为不同PI/GO改性复合材料对传感器气敏电压变化幅度的优化效果。从图3可以看出,随着时间的推移,氢气传感器输出电压的变化幅度随之提升。在不同时间点,添加PTFE的PI/GO改性复合材料电压变化幅度均大于未添加PTFE的PI/GO改性复合材料,说明PTFE对PI/GO改性复合材料气敏性能具有明显改善效果。添加5% PTFE的PI/GO改性复合材料传感器的电压变化幅度相较于其他改性材料更为显著,达到350 mV以上,说明添加5% PTFE的PI/GO改性复合材料使氢气传感器的气敏元件对氢气的电阻变化更明显,响应度更高,能更敏锐地检测氢气。这是因为PTFE作为绝缘相,在GO导电网络中引入了势垒效应,增强局域电场,从而放大氢气吸附引起的电压波动。同时,PTFE的疏水层减少了水分子的干扰,优化了电荷传输路径,使电压响应更稳定且幅值升高。此外,PTFE的纤维状结构可能促进氢气的快速扩散和均匀分布,降低响应弛豫时间,体现了多孔材料设计在提升动态响应性能中的重要性。这种电压变化幅度的优化凸显了PTFE在调控界面电荷转移中的缓冲作用。

2.4 PI/GO改性复合材料对氢气传感器气敏响应LOD的影响

图4为不同PI/GO改性复合材料对传感器LOD的优化效果。从图4可以看出,当PTFE添加质量分数为5%时,LOD始终高于7.5 $\mu\text{mol/mol}$,对浓度信号的辨识精度较高,说明适当添加PTFE可提升氢气传感器的气敏性能。LOD最低的是未添加PTFE的PI/GO改性复合材料,证明了PTFE对复合材料的性能优化。其中,5%为最佳添加

质量分数,此时PI/GO改性复合材料表面对氢气的吸附/反应活性较强,氢气传感器对低浓度值的响应更敏感,能够更灵敏地感知氢气浓度变化。分析机理为PTFE改性后复合材料表面形态的优化。PTFE的引入增加了材料的比表面积和微孔体积,提供了更多低能吸附位点,从而降低检测噪声并提升信噪比。同时,PTFE的化学惰性减少了表面中毒或污染,维持了吸附位点的活性,使传感器对氢气更敏感。此外,PTFE与GO的界面可能形成氢键网络,稳定氢气分子的弱吸附态,增强低浓度下的可逆响应。这揭示了表面修饰在降低检测限中的核心角色,为高精度传感器设计提供了依据。

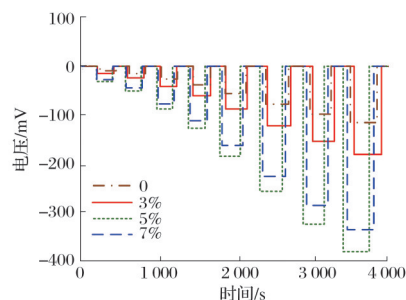


图3 不同PI/GO改性复合材料对传感器气敏电压变化幅度的优化效果

Fig.3 Optimization effect of sensor gas-sensitive voltage variation amplitude of different PI/GO modified composites

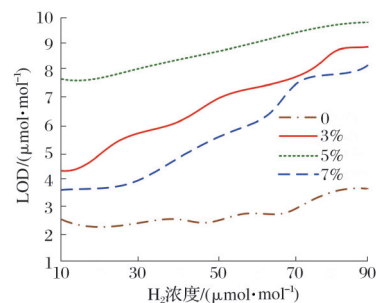


图4 不同PI/GO改性复合材料对传感器LOD的优化效果

Fig.4 Optimization effect of sensor LOD of different PI/GO modified composites

2.5 PI/GO改性复合材料对氢气传感器气敏性能氢诱导晶格应变率的影响

图5为不同PI/GO改性复合材料对气敏性能氢诱导晶格应变率的优化效果。从图5可以看出,添加PTFE的PI/GO改性复合材料的氢诱导晶格应变率高于未添加PTFE的PI/GO改性复合材料。当PTFE添加质量分数为5%时,气敏性能氢诱导晶格应变率始终高于1.4%,此质量分数下PTFE的机械缓冲作用可以有效抑制GO因氢气嵌入导致的膨胀失稳,提升对浓度信号的辨识效果;而3%和7%两种质量分数下,PI/GO改性复合材料表面GO层间距变化率较小,无法灵敏感知氢气浓度。因此可以得出结论,5%为最佳添加质量分数,此时PI/GO改性复合材料表面对氢气应变性能较灵敏,且不受膨胀失稳干扰,保证氢

气传感器感知准确性。PTFE的高柔韧性和低模量可吸收氢气嵌入GO层间引起的晶格应力,抑制膨胀导致的结构失稳,从而稳定应变响应。同时,PTFE的分布可能调控GO的层间距变化,优化氢气扩散路径,增强应变信号的线性度。此外,PTFE与PI的相容性可能减少界面缺陷,促进均匀应变分布,提升检测的可重复性。这说明复合材料力学性能在气敏传感中的重要性,为通过界面工程优化应变相关指标提供了新视角。

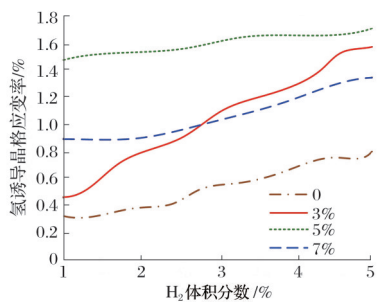


图5 不同PI/GO改性复合材料对气敏性能氢诱导晶格应变率的优化效果

Fig.5 Optimization effect of hydrogen-induced lattice strain rate in gas-sensitive performance of different PI/GO modified composites

3 结论

PI的热稳定性与机械性能较优,GO的比表面积较高,电学性能较优,两者均属于氢气传感器的理想基底材料。通过制备PI/GO改性复合材料分析其对氢气传感器气敏性能的优化效果,得出以下主要结论:随着氢气浓度的提升,PI/GO改性复合材料制作的氢气传感器灵敏度均呈现上升趋势,添加质量分数5%的PTFE的PI/GO改性复合材料可以更有效地提升氢气传感器的气敏性能。

参考文献

- [1] 邓君,沈剑聪,何雨婷,等. 镍掺杂氧化锌纳米棒阵列光纤氢气传感器[J]. 光学学报, 2025(7): 246-255.
- [2] 刘东升. 乙醇水蒸气重整制氢工况参数研究[J]. 节能, 2025, 44(4): 41-45.
- [3] 高新,李志慧,刘宇鹏,等. 改性石墨烯基传感器对SF₆分解组分H₂S的吸附机理及检测特性研究[J]. 电工技术学报, 2023(13): 3606-3618.
- [4] 谢贵久,杨斌,张月鑫,等. 工作温度对Pd-Ni合金薄膜电阻氢敏性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 381-389.
- [5] 尹优优,刘晨辉,杨黎,等. 二维少层碳化钛/氧化锌复合材料的制备及其气敏性能研究[J]. 现代化工, 2023, 43(7): 113-119.
- [6] 卜鑫,鲍思洁,储向峰,等. MoS₂/Cd₂SnO₄复合材料的制备及其气敏性能[J]. 无机化学学报, 2022(11): 2173-2180.
- [7] 戴威,黎勋,谭添,等. Ru掺杂ZnO纳米棒阵列薄膜氢气传感器性能研究[J]. 材料科学, 2023(10): 894-903.
- [8] 麻艳佳,杨黎,郭胜惠,等. 用于低浓度氢气检测的超灵敏TiO₂传感材料高通量筛选方法研究[J]. 材料导报, 2024(18): 28-34.
- [9] 张轶群,王冲,邵秀峰,等. 酞菁铜-氧化锌复合材料的制备及其气敏特性[J]. 微纳电子技术, 2023(12): 1937-1942.
- [10] 胡林河,李帅镁,刘晓庆,等. Ni掺杂In₂O₃中空纳米纤维制备及其对丙酮气敏传感性能[J]. 微纳电子技术, 2023(6): 847-858.
- [11] 储向峰,李佳豪,卜鑫,等. WS₂/Cd₂SnO₄复合材料的制备及其气敏性能[J]. 稀有金属, 2024(10): 1408-1416.
- [12] 陈勇康,宋亚霖,王运城,等. ZnO/活性炭复合材料的制备及其传感器对低浓度乙醇的气敏性能[J]. 矿业工程, 2023(3): 171-175.
- [13] 梁红博,马耀通. SnS复合石墨烯基CH₃CH₂OH传感器气敏特性研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(2): 72-76.
- [14] 赵晓君,罗旭良,翁梦蔓,等. 离子液体改性聚酰亚胺石墨膜的制备与性能研究[J]. 功能材料, 2023(12): 12018-12022.
- [15] 蔡铭威,王知,卢小闯,等. 聚酰亚胺薄膜在氢气分离中的研究进展[J]. 化工进展, 2023(10): 5232-5248.
- [16] 黎显俊,吴海龙,曹宇,等. Y掺杂空位石墨烯对NO及CO气体表面吸附的第一性原理研究[J]. 原子与分子物理学报, 2024, 41(1): 64-70.
- [17] 岳远霞,罗磊,朱洪强,等. 铁原子修饰的石墨烯表面吸附硫化氢气体的电子性质与光学特性研究[J]. 功能材料, 2025(1): 1113-1119.
- [18] 穆石磊,蒋建杰,邓鹤鸣,等. 电力储能检测用SnO₂/Pd薄膜型氢气传感器及其性能研究[J]. 高压电器, 2025(6): 156-163.
- [19] 孙晓颖,卢健卓,赵震. 石墨烯负载单原子Pt吸附甲醛的理论计算[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(2): 98-103, 97.
- [20] 孙颖,郑留伟,张慧云. 奥氏体不锈钢中应变诱导α'-马氏体作为氢扩散通道的研究[J]. 塑性工程学报, 2024(2): 182-188.
- [21] 张恩诚,孙风云,郭峰旗,等. 三氧化钨/还原氧化石墨烯的制备及其对丙酮的光激发气敏特性[J]. 分析实验室, 2025, 44(3): 403-410.
- [22] 张展博,余娇,魏亚茹,等. 金属二聚体和氮共掺杂石墨烯(Gra)M₂N₆-Gra(M=Cr-Cu)的NO₂吸附特性理论研究[J]. 原子与分子物理学报, 2025(5): 35-42.
- [23] 张玲,轩岩岩,张慧敏,等. GO/WO₃复合材料的制备及对三乙胺气敏性能研究[J]. 化工新型材料, 2025(2): 159-162.
- [24] 邵志刚,万飞龙,刘平平. 铁掺杂五边形石墨烯对CO气敏性的第一性原理研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2023(5): 59-64.
- [25] 曹小英,袁晓凤,马耀通. ZnSnO₃/GO复合材料构建的TEA传感器气敏性能研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2025(1): 35-40.