

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.04.002

曾文, 苏子越, 霍焯, 等. 一氧化碳检测传感器在电力设备故障监测中的研究进展 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(4): 16-37.

# 一氧化碳检测传感器在电力设备 故障监测中的研究进展

曾文<sup>1</sup>, 苏子越<sup>1</sup>, 霍焯<sup>2</sup>, 李雨琦<sup>3</sup>, 王中长<sup>2</sup>

- 重庆大学产业技术研究院 智能传感中心, 重庆 400030; 2. 西南大学 材料与能源学院, 重庆 400715;
- 重庆文理学院 材料科学与工程学院, 重庆 402106

**摘要:** 电力工业是国家核心基础产业, 电力设施的运行安全已成为关乎国计民生的核心议题。一氧化碳(CO)作为绝缘材料热分解或不完全燃烧的产物, 往往先于温升和烟雾信号出现, 是极具价值的早期预警指标。CO 检测传感器分为半导体传感器、电化学传感器及光学传感器, 探讨一氧化碳传感器的构建模式、检测特点及材料改良, 对比分析三者的技术经济优势。深入剖析一氧化碳传感器在变压器监控、锂电储能安全、电缆防火及 GIS 故障诊断中的具体应用成效, 分析其应用前景。针对目前这 3 种传感器在复杂环境下存在的交叉敏感及寿命瓶颈, 进一步探讨了传感器向智能化、长寿命方向演进的技术路径。

**关键词:** 一氧化碳传感器; 电力设施故障检测; 能源电力工业

中图分类号: TP212; X773

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)04-0016-22

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research Progress on Carbon Monoxide Detection Sensors in Power Equipment Fault Monitoring

ZENG Wen<sup>1</sup>, SU Ziyue<sup>1</sup>, HUO Ye<sup>2</sup>,  
LI Yuqi<sup>3</sup>, WANG Zhongchang<sup>2</sup>

- Intelligent Sensing Center, Chongqing University Industrial Technology Research Institute, Chongqing 400030, China;
- School of Materials and Energy, Southwest University, Chongqing 400715, China;
- School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Arts and Science, Chongqing 402106, China

**Abstract:** The power industry serves as a core foundational sector of national economy, with the operational safety of power facilities being a critical issue closely related to national economy and people's livelihood.

收稿日期: 2025-02-27

基金项目: 教育部学科先导项目(JYB2025XDXM701); 重庆英才计划包干制项目(cstc2021ycjh-bgzxm0341)。

作者简介: 曾文, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事智能传感材料及器件的研究。

Carbon monoxide (CO), produced from the thermal decomposition or incomplete combustion of insulating materials, typically manifests prior to temperature rise and smoke signals, making it a highly valuable early warning indicator. CO sensors are categorized into semiconductor sensors, electrochemical sensors, and optical sensors. For each category, the construction mechanisms, detection characteristics, and material modification strategies are discussed, followed by a comparative analysis of their technical and economic advantages. Furthermore, the practical applications of CO sensors in transformer monitoring, lithium battery energy storage safety, cable fire prevention, and gas-insulated switchgear (GIS) fault diagnosis are analyzed in detail to evaluate their effectiveness and application prospects. Considering the current challenges faced by the three types of sensors in complex environments, including cross-sensitivity and limited operational lifetime, this study further explores potential technological pathways for the evolution toward intelligence and extended service life.

**Key words:** carbon monoxide sensor; power facility fault detection; energy and power industry

电力工业是国家核心基础产业,我国拥有庞大的电力设备规模,但同时也面对着复杂多样的电力设施运行环境,因此电力设备的安全稳定运行对国民经济与社会公共安全尤为重要。随着电网向大容量、高电压等级及高度集成化方向演进,变压器<sup>[1]</sup>、气体绝缘开关设备(GIS)<sup>[2]</sup>、电缆系统<sup>[3]</sup>及电力储能装置<sup>[4]</sup>等关键基础设施在长期服役过程中,不可避免地面临着绝缘老化、局部过热及潜在火灾等安全风险。一氧化碳(CO)作为典型的热降解产物,往往在设备产生明显温升、可见烟雾或火焰信号之前即已析出,表现出卓越的早期指示特征<sup>[5]</sup>。

目前,CO检测已纳入电力行业技术标准。在变压器运维领域,CO被列为评估固体绝缘热老化的核心指标;在储能安全领域,明确规定应具备CO等特征气体的监测报警功能。在工业应用中,电力设备状态监测主要依赖传统变压器油中溶解气体分析(DGA)<sup>[6]</sup>、红外成像及环境参数感知等手段。此类方案虽已大规模应用,但在捕捉早期异常信号时仍存在迟滞,暴露了对隐性热故障不敏感、密闭空间兼容性差等突出短板,此外,工业级传感器普遍存在的零点漂移与寿命瓶颈,也增加了电力全生命周期的管理成本。相较而言,基于CO的传感技术以响应敏捷、检出限极低及易于实时监测等优势,有力填补了传统物理量感知的空白,成为保障电网运行的新型技术支撑。近年来,在材料科学与微纳加工技术的驱动下,CO探测技术实现了跨越式发展。从成熟的电化学元件到高性能半导体材料,再到前沿的光学探测手段,传感方案正全速向低功耗、高选择性及智慧化迭代。这些创新不仅强化了复杂电磁与化学背景下的感知可靠性,更通过融合信号处理算法与大数据挖掘,深度探究其在健康评价与风险预控中的应用价值,对电力系统智能化升级意义重大<sup>[7-8]</sup>。

本文着眼于电力生产的安全需求,全面梳理了CO监测及智能感知技术的研发脉络。文中首先剖析CO传感器的基本物理机制及高性能敏感技术的研究现状;继而重点论述其在变压器、储能系统、高压电缆及GIS装置中的典型应用场景;最后深入探讨了当前制约行业发展的交叉干扰、长效稳定性等技术瓶颈,并对未来的智能化发展蓝图进行展望,旨在为电力工业安全监测的研究与管理提供有益的参考。

## 1 一氧化碳传感器技术概述

传感器材料和传感技术的更新不断提升着检测一氧化碳的传感器性能。用于电力设备检测的新型一氧化碳传感器研究,需要找到高灵敏度、高选择性、低功耗且不易损耗的检测体系,以期达到在各种电力设备的复杂工作环境中稳定运行且低成本的目标。在一氧化碳传感器研究领域,不同技术路线往往依赖不同的研究方法进行性能优化与机理分析。总体来看,当前一氧化碳传感器研究主要涉及3类方法:材料制备实验、理论计算模拟和系统集成验证。在材料研究方面,材料制备实验是最主要的研究手段,包括气敏材

料合成、结构表征和气体响应测试。通过水热法、溶胶—凝胶法或化学气相沉积等方法制备气敏材料,并结合扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)及X射线衍射仪(XRD)等表征手段分析材料结构,再通过气敏测试平台评估其灵敏度、响应时间及稳定性。在机理研究方面,理论计算模拟,如第一性原理计算(DFT),被广泛用于分析气体分子在材料表面的吸附行为和电荷转移机制,从理论层面解释传感机理。在工程应用研究中,研究者通过系统集成验证构建完整的传感系统,并在变压器、储能电池或GIS设备等场景中开展应用测试,以评估传感器在复杂环境中的稳定性和可靠性。因此,在一氧化碳传感器研究中,材料制备实验、理论计算模拟与系统集成验证往往相互结合,共同推动传感技术的发展。

根据检测手段的不同,将用于检测电力设备故障产生一氧化碳的传感器分为3类:1) 半导体传感器,2) 电化学传感器,3) 光学传感器,每一种传感器都在故障气体检测领域各具优势。在实际应用情景中,还需要综合考虑设备效能、技术成本以及安全性等指标。

### 1.1 半导体传感器

半导体传感器因其高灵敏度、快速响应及低成本特性,自问世以来一直备受研究人员青睐。传统半导体传感器选择性较低,在复杂气体环境下误差较大,尤其是金属有机框架材料(MOFs)传感器依赖较高的工作温度,对电力设备工作环境的适应性较差。为解决这一问题,研究人员采用了多种策略,包括优化制备流程、调整形态结构,过渡金属及纳米材料掺杂<sup>[9]</sup>等,显著提升了金属半导体传感器的选择性、响应时间和恢复时间。

常见的半导体材料分为n型( $\text{SnO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{WO}_3$ 等)和p型( $\text{NiO}$ 、 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 等)。n型材料传感器工作时, $\text{O}_2$ 分子吸附在环境空气中的表面,捕获电子形成表面耗尽层,降低了导电性。当CO与表面相互作用时, $\text{O}_2$ 与CO反应,释放电子回到导带中并增加导电性。p型材料的工作机制则相反, $\text{O}_2$ 吸附增加孔的浓度,增强导电性,而气体减少则中和 $\text{O}_2$ 并降低空穴浓度,从而降低导电性<sup>[10]</sup>。p-n异质结是由p型和n型半导体耦合形成的,这些复合材料的结点接触处形成电场,可以有效分离电子和空穴,提升传感器识别的效率<sup>[11]</sup>,被研究人员广泛认为是提升CO检测性能的重要方向之一。

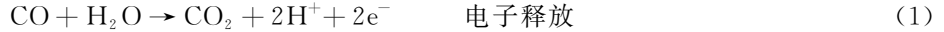
Khalili等<sup>[12]</sup>构建了一种基于 $\text{In}_2\text{O}_3$ @CuO P-N异质结的传感器,对该传感器在 $10\sim 900\text{ mg/m}^3$ 内的CO浓度响应进行了系统实验,其表现出较高的CO吸附与信号响应强度。而Xie等<sup>[13]</sup>制备了MOF衍生的NiO/ $\text{SnO}_2$ 复合气敏材料,实验表明, $\text{SnO}_2$ 修饰使两个材料在纳米尺度上形成异质结界面,利于载流子分离与界面电荷重组。掺杂过渡金属或其氧化物是半导体材料领域的长期热门话题,许多研究成果都证明,合适的过渡金属或其氧化物掺杂可以提高对特定气体的响应灵敏度,并显著降低功耗。Chakraborty等<sup>[14]</sup>研究了本征ZrSSe(a)、Sc-ZrSSe体系(b)以及Ti-ZrSSe(c)对CO的吸附作用,发现相比改良前的ZrSSe,掺杂Sc或Ti后的材料显著降低了CO的吸附能。Chen等<sup>[15]</sup>研究了Nb、Ta和V掺杂ZnO单层对变压器油中典型溶解故障气体的吸附与气敏特性,结果表明:过渡金属掺杂显著增强了ZnO对气体分子的吸附能力,其中Nb/Ta-ZnO对CO表现出明显优于本征ZnO的吸附强度和电荷转移特性。相比较于本征ZnO,Nb和Ta掺杂使CO吸附能增加了3~4倍。Hu等<sup>[16]</sup>研究了4种故障气体在NiO、 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$ 等过渡金属氧化物修饰石墨烯单分子层表面的吸附行为,指出3种过渡金属氧化物在石墨烯单层表面存在各自最优的修饰位点,并显著改善了导电性能,其中,NiO-石墨烯单层对CO气体表现出最大的吸附能以及明显的化学吸附特征。

### 1.2 电化学传感器

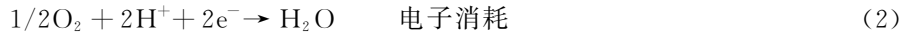
电化学传感器特异性好,耗电极少,对环境因素依赖小,且在低浓度气体下响应迅速,非常适应于有关气体的设备故障检测。相较于其他两种传感器,它在故障气体检测领域应用最广,尤其是在可见烟雾出现前识别闷燃,这些特性使得电化学传感器成为早期火灾探测系统的理想选择,已在各种火灾烟雾的探测工作中有了成熟的应用体系。它通过检测CO等可燃气体,可以更早探测火灾、警告有毒气体积累。电化学传感器当前虽然普遍用于检测故障气体,但在实际应用中仍面临诸多挑战,由于损耗和有毒物质附着,导

致传感器需要定期校准,使用年限较短,是商业传感器应用不可避免的问题。

电化学传感器通常由工作电极、对电极和参比电极 3 个关键部件组成(图 1),全部浸入电解液中。大多数电化学传感器采用安培电化学单元设计,当目标气体扩散到传感器并到达工作电极表面时,会经历由电极表面催化的氧化/还原反应。例如,一氧化碳在铂工作电极氧化:



电子从工作电极流经外部电路到对电极,在那里发生互补还原反应(通常氧还原):



该过程在电极之间感应出与一氧化碳浓度成正比的电流<sup>[14]</sup>。参考电极提供稳定电位,确保工作电极处的反应得到控制。通过监测传感器的输出电流信号或电位变化,可以准确定量目标气体的浓度。若气体浓度超过阈值,则会发出警报。

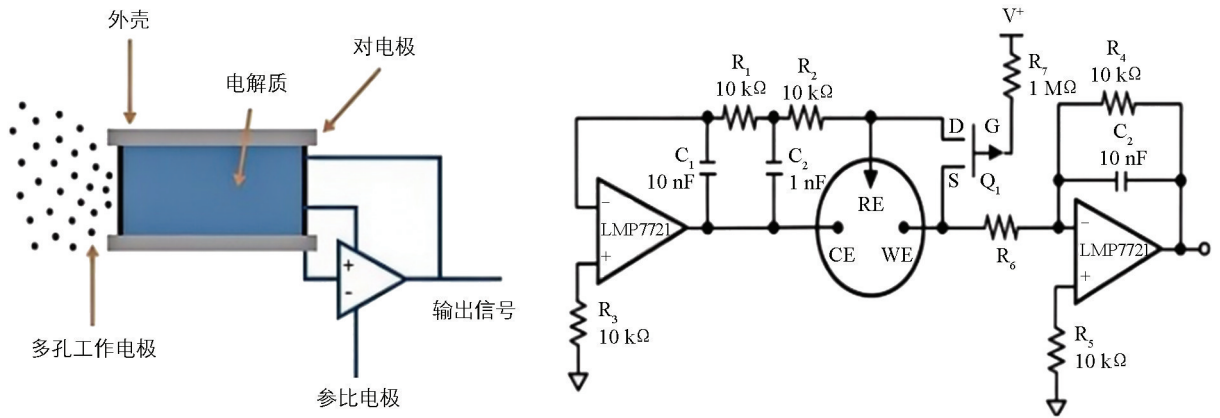


图 1 电化学传感器的工作原理及典型恒电位电路图<sup>[17]</sup>

电化学传感器根据电解质状态,可分为液体电解质传感器、凝胶电解质传感器和固体电解质传感器。传统的电化学传感器通常使用液体或凝胶电解质,虽然很高效,但也有电解质蒸发、泄漏的危险,热稳定性也有限。相比之下,固体电解质已成为克服许多限制的潜力研究方向。近年来,碳纳米结构、贵金属和金属有机框架等先进材料作为电解质在电化学传感器应用方面取得了显著进展,极大地提升了传感器性能。Kalyakin 等<sup>[18]</sup>研究了基于钒稳定氧化锆的固态安培传感器,传感器温度在 600~750 °C 时,能够快速检测空气中总量高于 10% 的 CO 和 CO<sub>2</sub>,且不会发生交叉反应。Asilian 等<sup>[19]</sup>设计了一种检测范围为 0~470 mg/m<sup>3</sup>、灵敏度为 6 nA、检测限为 1 mg/m<sup>3</sup> 的电化学一氧化碳传感器,两个电极由金和氧化锡组成,且金红石结构的 n 型半导体 SnO<sub>2</sub> 有助于提高灵敏度。响应时间和恢复时间分别为 27.5 s 和 39 s。

### 1.3 光学传感器

相较于半导体和电化学传感器,近年来光学传感器逐渐成为了气体检测领域的重要技术方向。光学传感器的优势与其工作原理密切相关,通过测量气体分子在特定波长下对光的吸收或散射来确定气体浓度,赋予其卓越的灵敏度、选择性和非接触检测的能力,几乎没有传感器中毒的风险,非常适合检测微量气体。

根据传感器结构和工作原理,光学传感器可分为吸收光谱传感器(典型有非色散红外(NDIR)传感器、傅里叶变换红外光谱(FTIR)传感器)、拉曼光谱传感器和光声光谱传感器<sup>[20-21]</sup>等,部分传感装置见图 2。

各类光学方法均能够覆盖 CO 的特征信号,但在灵敏度要求与干扰抑制方面存在差异。吸收光谱传感器利用气体分子在中红外区域的吸收特征进行定性定量分析,灵敏度高,但对环境因素比较敏感,例如 FTIR 受环境湿度的干扰较大;拉曼光谱传感器可克服不同气体成分之间的交叉干扰实现多种气体同时检测,但它运行所需要的复杂配置使其可能会被环境和光强影响;光声光谱传感器利用被

测气体吸收激光的能量后产生的声信号进行检测,高灵敏且不依赖光强,但易受噪声影响、抗交叉干扰能力较弱。

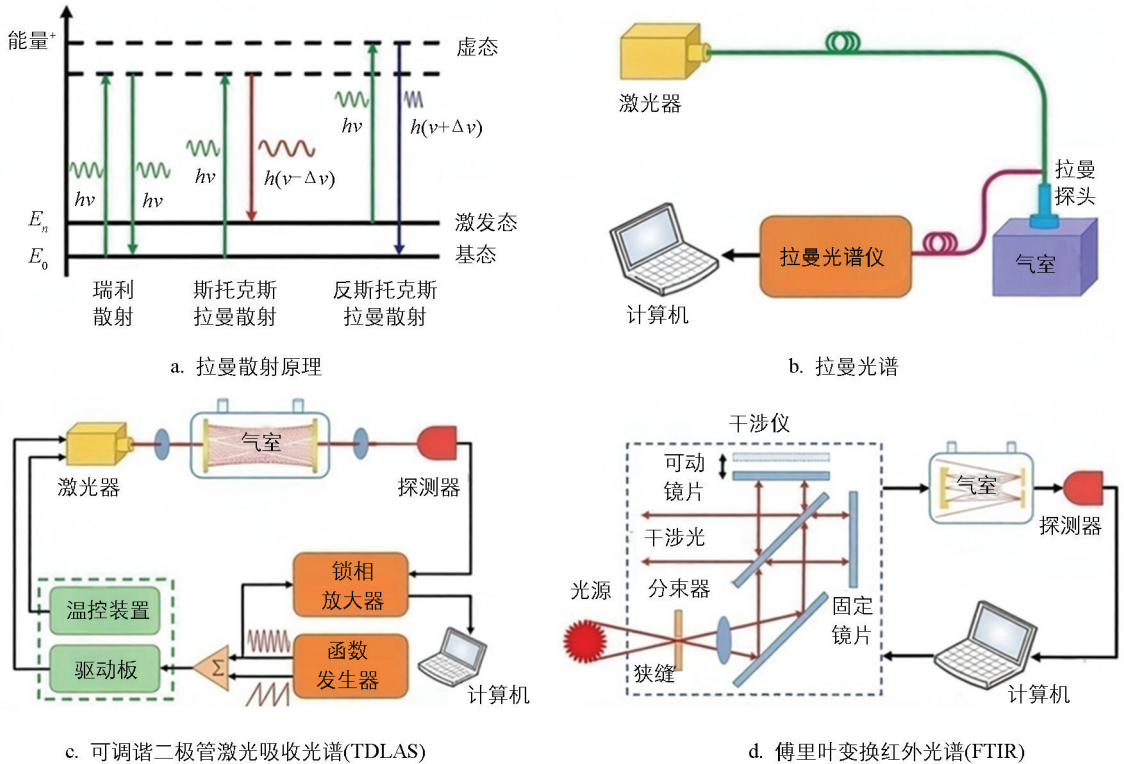


图2 拉曼散射原理和3种典型的光学传感技术装置

保证光学系统的稳定性和抗干扰能力是传感器工程的关键,一些相应的新研究正不断给这些问题提供解决方案。马凤翔等<sup>[22]</sup>设计了一种将油—气分离与气体检测功能集成的光纤光声传感探头,通过膜分离技术使溶解在油中的CO进入微型气腔,并利用两根光纤分别传输近红外激发光与探测光。通过光纤FPI声传感器探测激发态气体分子产生的光声压力波,检测F-P腔变化量获得光声信号大小,实现对CO体积分数的灵敏检测。相较于传统光谱传感器,具有抗电磁干扰能力强、油气脱离过程简单等显著优势。结果表明:该系统对CO气体体积分数的检测灵敏度为 $0.345 \times 10^{-6}$ ,检测下限达 $5 \times 10^{-6}$ 。Han等<sup>[23]</sup>提出了一种基于上转换检测的中红外高灵敏度无腔体原位一氧化碳气体感测方法,利用上转换检测,将由可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)获得的中红外吸收信号转换至可见光波段,然后使用硅基探测器进行检测,在无谐振腔、原位检测条件下,该方法在仅0.14 m吸收路径长度下实现了最高 $79.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的检测限,克服了中红外CO吸收信号弱、难以直接检测的问题。通过利用单光子雪崩二极管(SPAD),实现了CO浓度在扩散反射条件下的单光子级的实时检测。Wan等<sup>[24]</sup>研究出了一种新型空心抗共振纤维(HC-ARF)拉曼气体传感装置,同时对包括CO在内的多种电池热失控气体进行监测。不仅拉曼信号增强比裸光纤高约3.1倍,还采用了两种方法过滤噪声信号,在200 mW的激励功率和60 s积分时间下,检测限均低于 $4.5 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,响应时间极短。

#### 1.4 传感器的应用效用比较

不同类型的气体传感器在灵敏度、选择性、响应时间等特征上存在显著差异,其全寿命周期内的经济性特征指标也各不相同。因此,在实际应用中,针对多变的监测环境选择恰当的气体传感器有助于故障气体检测发挥最大作用,实现精准抗干扰、实时监控和快速干预。

基于技术和经济的角度对3类传感器进行对比,半导体材料具备响应时间极快且成本较低的特点,在短期部署场景中具备优势,但选择性差且对环境变化敏感,其较高的工作温度在像电池这样的电力设备中

运行也存在安全风险。电化学传感器以高选择性和低功耗见长,在当前的电力安全管理中应用广泛,但寿命有限,需要定期校准更换,这也增加了监测设备的运维成本,不适合像电动车组这样的高度集成系统。光学传感器的优越性不仅体现在卓越的灵敏度和选择性上,还在于无接触检测对延长设备寿命的优化潜力,尽管当前主流光学一氧化碳传感器较慢的反应速度和庞大的体积限制了集成应用,但从长期投资回报看,相比其他类型传感器有更长的寿命,在需要长期监测的场景中具备显著的经济优势(表 1)。

表 1 半导体、电化学和光学传感器的性能比较以及维护成本预估值<sup>[10-25]</sup>

传感器类型	灵敏度	响应速度	选择性	功耗	寿命/ 年	单件维护成本/ (元·年 <sup>-1</sup> )
半导体	mg/m <sup>3</sup>	快	差	高	5~10	40~300
电化学	μg/m <sup>3</sup>	中	良	低	1~3	300~800
光学	μg/m <sup>3</sup>	慢	优	中	>10	200~500

注:维护成本数据来源参考深圳霍尼艾格科技有限公司(2025年)。

综上所述,一氧化碳传感器应用研究方向可遵循如下逻辑:半导体传感器多在故障发生系数较高、依赖快速检测的电力设备场景中应用,重点提升其快速响应能力,同时关注交叉敏感性和依赖高温工作的安全风险;电化学传感器良好的性能普遍适用于日常检测,主流研究采用固态先进材料电解质来克服响应速度和选择性的限制;光学传感器长期投资回报率高,未来集中研究提升响应速度、设备的轻量化与集成化。

## 2 一氧化碳传感器的研究进展

随着传感技术和电化学技术的飞速进展,一氧化碳传感器在电力设备安全监测中的应用得到显著提升。在各种现代重要电力设备中,利用一氧化碳传感器实现故障早期识别已成为研究重点之一。

### 2.1 变压器安全监测

在长期运行或异常工况下,电力变压器内部的绝缘纸和绝缘油受热应力及电流效应影响,会发生分解并释放以一氧化碳(CO)为代表的特征气体<sup>[26]</sup>(表 2)。变压器油中的溶解气体分析(DGA)是诊断电力设备潜在故障的核心技术,通过分析这些溶解气体的成分、浓度及其相关性,可以有效实现变压器故障的早期诊断与识别。

表 2 故障类型与产生气体成分对应关系

故障类型	主要气体成分	次要气体成分
油过热	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
油和纸过热	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
油纸绝缘中的局部放电	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CO <sub>2</sub>
油中火花放电	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	—
油中电弧	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
油和纸中电弧	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>

#### 2.1.1 光声光谱技术研究

光声光谱技术(PAS)作为一种间接吸收光谱技术,其原理是通过检测目标气体吸收光能后激发产生的声压波振幅来反演气体浓度,这种无背景检测方法极为灵敏。更重要的是,由于声压波幅度与光声池体积成反比,PAS技术表现出显著的小型化潜力,使其在变压器油中溶解气体的微量、在线监测领域具有独特的应用优势。Yun等<sup>[27]</sup>利用系统集成验证法于2007年首次将PAS技术引入变压器油气检测领域。将PAS结果与传统气相色谱结果进行比较,成功验证了光声信号与气体浓度之间的线性响应关系,证实了PAS技术在DGA检测中的可行性。在此基础上,Mao等<sup>[28]</sup>进一步采用系统优化与集成法,于

2015 年设计了一套改进的 PAS 检测系统,该系统在检测性能上取得了显著提升,其对 CO 的最低检测限(MDLs)达到了  $39 \text{ mg/m}^3$ ,展现出 PAS 技术在这一领域极高的发展潜力。

随着 PAS 技术在变压器油溶解气体检测中的可行性逐步得到验证,研究重点开始从原理验证转向结构优化与灵敏度提升。2018 年,李志军等<sup>[29]</sup>提出了基于主动光声腔的改进型检测结构,该技术通过优化声学谐振腔体参数并实现调制频率与共振频率的精确匹配,提高了光声转换效率和信噪比,结果显示,该设计有效克服了传统光声池体积庞大及光源校准复杂的局限性。通过实现 PAS 系统的微型化,不仅显著提升了测量的精度,使 CO 的 MDLs 达到  $1 \text{ mg/m}^3$ ,还进一步增强了系统运行的稳定性。类似地,不断进步的研究为实际在变压器故障早期预警中的应用提供了更可靠的技术支持。

在系统集成与工程验证法的深度探索中,针对 CO 在近红外波段吸收谱线较弱的瓶颈,研究者们正在探索跨波段光源组合与光路增强技术。2022 年,Li 等<sup>[30]</sup>采用该方法提出了一种基于组合光源的多反射增强型光声光谱(MPAEPAS)检测系统,该装置在结构上采用了中红外(MIR)宽光谱光源与双近红外 DFB 激光器的异构双向入射设计,并选用高透射率的 BaF 窗片与带微孔的凹面镜构建谐振式光声池。结果表明,这种基于增强型结构的系统能够实现油中溶解 CO 的超高灵敏度检测。Luo 等<sup>[31]</sup>提出了一种基于石英增强光声光谱(QEPAS)的溶解 CO 检测方案,进一步提升了检测灵敏度与系统微型化水平,该研究利用单晶石英调谐叉的高 Q 值压电谐振特性,将声学信号转换效率显著提高,并引入微型谐振管结构,提高局部声压幅值,在低压脱气条件下实现了油中溶解 CO 的高灵敏检测。结果显示,该系统对 CO 的最低检测限达到  $0.37 \text{ mg/m}^3$ ,显著优于传统 PAS 结构。相比早期电容式麦克风光声系统及主动光声腔结构,QEPAS 方案在抗环境噪声能力、系统微型化程度上均实现了突破,表明光源光路优化技术正在展现出广阔的应用前景。

### 2.1.2 吸收光谱技术研究

可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)具有高灵敏度、高选择性和抗交叉干扰特性,在气体检测应用中脱颖而出。2021 年,陈杨等<sup>[32]</sup>通过系统集成与工程验证法构建了基于近红外 TDLAS 的变压器油溶解气体在线检测装置,实现了包括 CO 在内的多组分气体的分时扫描检测,并通过 WMS 与二次谐波算法提升信噪比与稳定性,结果与气相色谱高度一致,验证了 TDLAS 在油的 DGA 在线监测中的可行性。同年,Chen 等<sup>[33]</sup>进一步深化系统集成研究,开发了基于三激光器架构的 TDLAS 在线监测系统(图 3a),针对 CO 气体的检测,研究者选用了中心波长为  $1569 \text{ nm}$  的 DFB 激光器,并配合时分多路复用技术实现其与  $\text{CO}_2$  等气体的共轴准直检测。结果显示,该装置对 CO 的测量覆盖了  $25 \sim 5000 \mu\text{L/L}$ ,且在全量程范围内的测量误差均保持在  $2 \mu\text{L/L}$  以内。其在展现优异 CO 响应的同时增强了复杂环境检测的能力,成为 TDLAS 技术走向实用的研究路径。

传统的油气分离方法应用于 TDLAS 检测时,往往存在检测限不达标以及测量精度较低等瓶颈。针对这一问题,LI 等<sup>[34]</sup>通过理论计算模拟与系统优化集成相结合的方法研制出一种测定变压器油中溶解 CO 与  $\text{CO}_2$  的低压 TDLAS 传感器。该工作经理论计算锁定了最佳工作压力与最佳调制深度,并引入了 Herriot 型多反射池设计(图 3b-3c)。气室通过涂覆金或银等高反金属膜,有效削弱了体积引起的气体稀释效应,极大地优化了系统的最低检测限。

### 2.1.3 气敏材料创新研究

气敏材料的性能决定了检测的灵敏度与选择性。当应用于变压器绝缘油溶解气体检测时,目标气体需经透气膜分离后与敏感材料表面发生物理或化学吸附,从而引起电阻或电容等电学参数的变化<sup>[35]</sup>。传统金属氧化物半导体(如 NiO、 $\text{SnO}_2$ )因制备工艺成熟、成本较低,在 CO 气体检测中得到广泛应用,但单一金属氧化物通常存在工作温度高、响应值有限及选择性不足等问题<sup>[36]</sup>。在材料制备的应用方面,Xie 等<sup>[13]</sup>设计并制备了一种基于 MOF 衍生多孔 NiO 的室温 CO 传感器。该研究通过热分解 Ni-MOF 前驱体获得多孔 NiO,并引入 n 型  $\text{SnO}_2$  纳米颗粒构建 p-n 异质结,成功将工作温度降低至室温。同年,Xie 等<sup>[37]</sup>进一步采

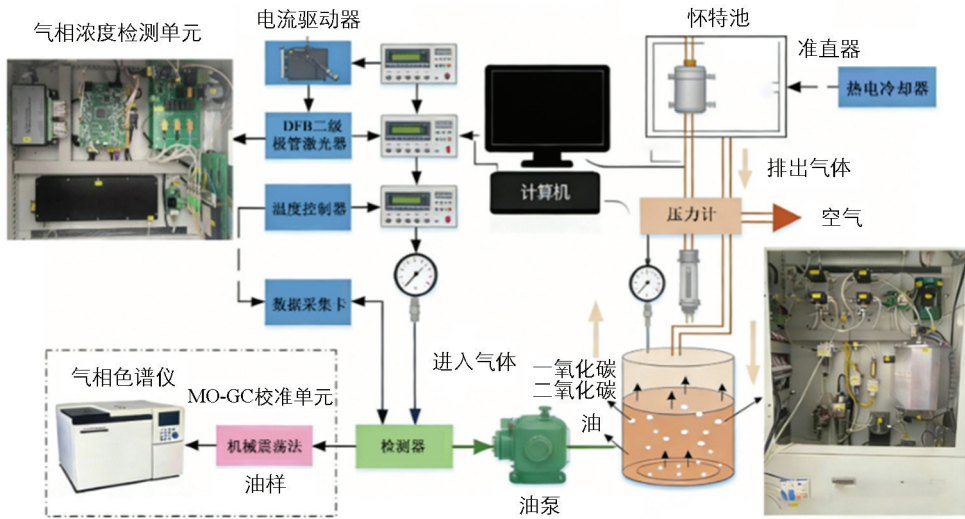
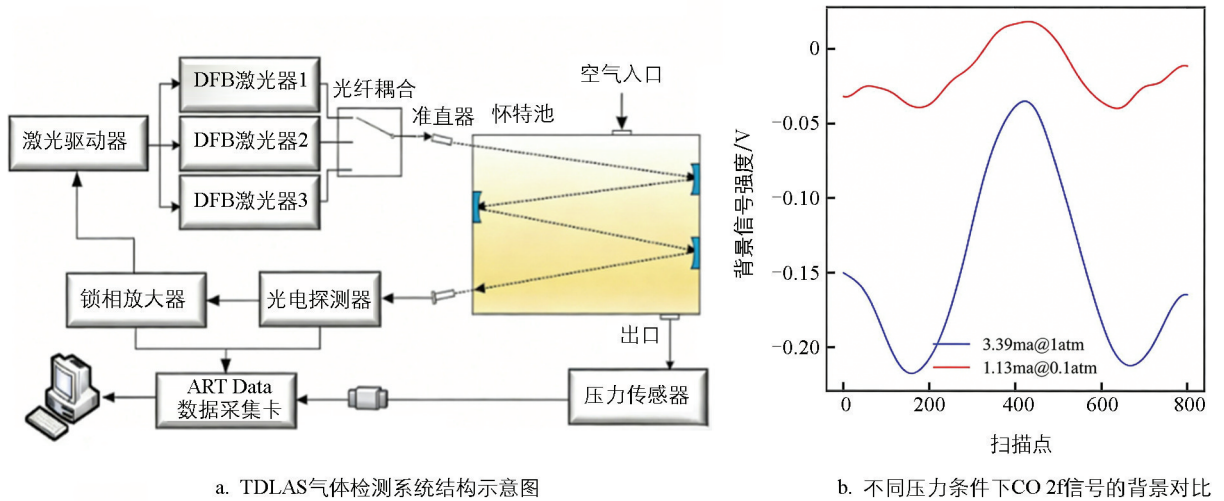


图 3 基于 TDLAS 的气体检测系统及其低压传感特性表征

用该方法构建了一种基于 CuO/TiO<sub>2</sub>/N-MWCNTs 三元纳米复合材料的电阻型气体传感器,该传感器在室温(约 30 ℃)下对 50 mg/m<sup>3</sup> CO 的响应值达到 4.33,较单一异质结体系提高了约 1.74 倍,且响应/恢复时间缩短至 230 s/60 s,显著提升了传感性能。

近年来,随着气体传感材料研究由传统金属氧化物体系向低维半导体拓展,双层以及单层的材料结构也成为了研究热点。依靠理论计算模拟法,Wang 等<sup>[38]</sup>基于密度泛函理论提出 Ag 单原子掺杂 MoS<sub>2</sub> 单层结构(图 4a—4c),Ag 原子能够稳定锚定于 MoS<sub>2</sub> 表面的硫空位,形成局域活性位点,从而显著增强对 CO 等特征气体的化学吸附能力,证明单原子掺杂可有效提升二维材料的电阻型传感性能。随着研究工作进一步拓展至金属簇修饰体系,Huang 等<sup>[39]</sup>同样利用理论计算法构建了基于金属簇(Pt<sub>3</sub>、Rh<sub>3</sub>)修饰 WTe<sub>2</sub> 单分子层的气体传感器材料<sup>[40]</sup>。结果表明,金属簇能够稳定锚定在 WTe<sub>2</sub> 表面的 Te 位点,从而显著提升材料对 CO 分子的化学吸附能力<sup>[41]</sup>。图 4d 显示,Pt<sub>3</sub>-WTe<sub>2</sub> 体系对 CO 表现出较高的吸附能,并伴随明显的功函数而变化,适用于功函数型传感机制;相比之下,Rh<sub>3</sub>-WTe<sub>2</sub> 在电阻型传感模式下展现出更为显著的带隙调制效应和较高的灵敏度<sup>[41]</sup>(图 4e)。Jiang 等<sup>[42]</sup>采用密度泛函理论构建了 Cu<sub>n</sub> 和 Pd<sub>n</sub> (n=1~3)簇修饰的 WSe<sub>2</sub> 单层模型。研究指出,尽管本征 WSe<sub>2</sub> 单层具有良好的电学性能,但其对目标气体的吸附作用相对有限。引入过渡金属簇后,金属原子可稳定分布在 WSe<sub>2</sub> 表面,形成局域高活性位点,从而增强气体分子与



基底之间的相互作用。研究还对 CO 在不同  $TM_n$ - $WSe_2$  ( $n=1\sim 3$ ) 体系中的吸附能、电荷转移及能带结构变化进行了系统比较, 结果见图 4f—4g。

此外, 最新理论研究还建立了 Ag、Pb、Ni 3 种过渡金属掺杂的  $ZrSe_2$  单层模型<sup>[43]</sup>, 并分析了其对变压器油溶解气体的吸附特性, 包括吸附能、电子结构及电荷转移行为(图 4h)。结果显示, 纯净  $ZrSe_2$  与 CO 之间仅存在较弱的物理吸附, 而经金属掺杂后, 体系的吸附强度与电荷转移能力均明显提高, 从而改善了材料的气体传感性能。总体来看, 过渡金属与二维材料的协同调控为 CO 检测提供了有效的设计思路。

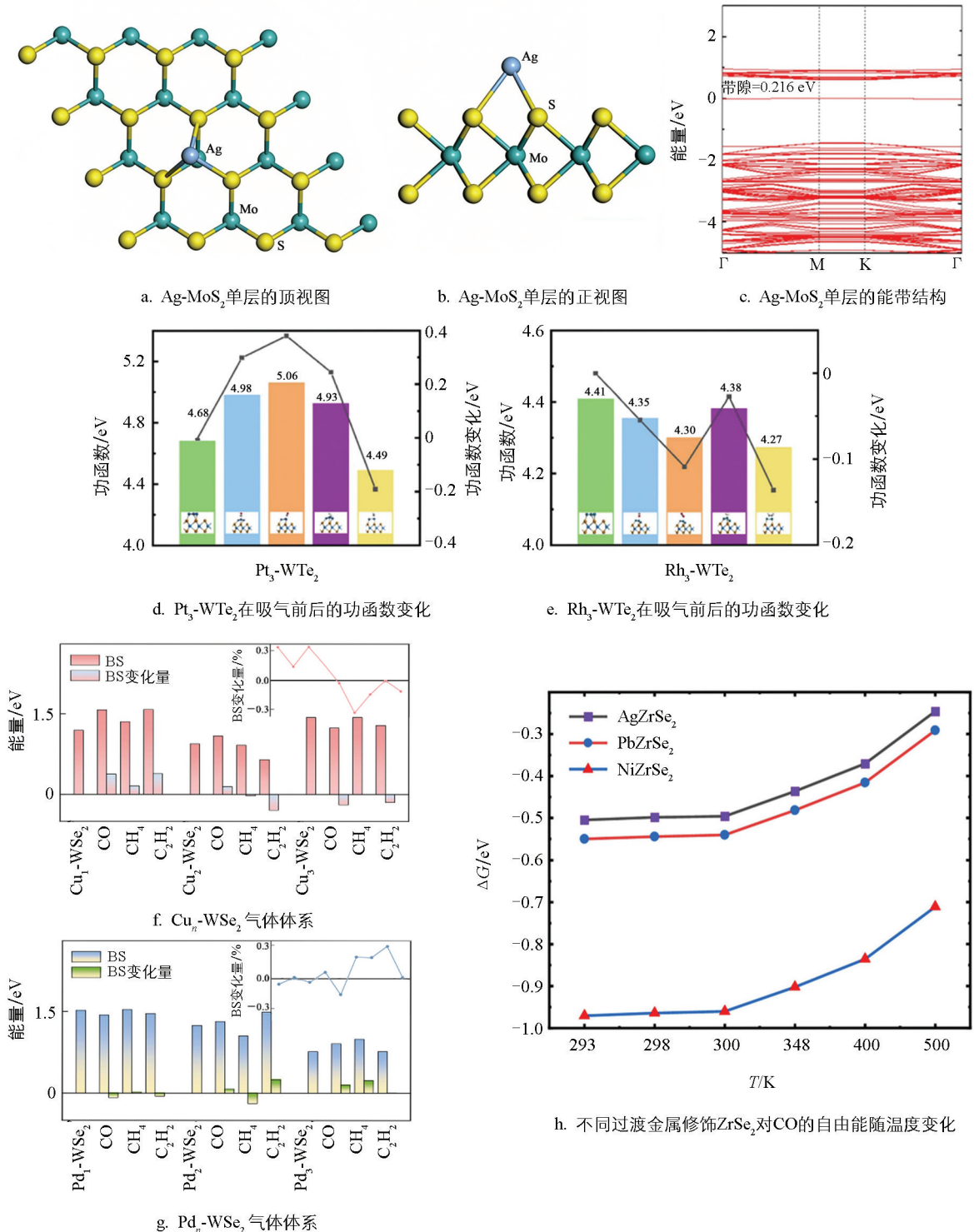


图 4 不同过渡金属修饰二维材料对 CO 气体传感性能的理论研究结果

## 2.2 电池安全监测

锂离子电池(LIB)凭借其高能量密度优势,已广泛应用于电动汽车和电池储能系统。然而,由于其内部采用易燃电解质及高活性电极材料,当电池遭受机械滥用、电滥用或热滥用时,极易引发内部放热反应,进而导致热失控(TR)<sup>[44]</sup>。热失控发生期间,电池内部温度会迅速攀升,并伴随易燃、易爆及有毒气体的释放(表 3)。与变压器油中溶解气体分析主要来源于绝缘材料热分解不同,储能电池热失控过程中通常会同时释放 H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 及电解液分解产生的多种挥发性有机气体(VOCs),形成复杂的混合气体环境。这种多气体耦合释放特征会对 CO 检测产生一定的交叉敏感干扰,使其浓度变化规律与变压器油中存在明显差异,因此对传感器的选择性与抗干扰能力提出了更高要求。近年来,LIB 热失控预警技术发展迅速,其中 CO 气体检测技术能够提供更早期的预警信号,适用于锂电池安全监测的 CO 传感器通常呈现出不依赖高工作温度的特点。将气体传感器与电池管理系统(BMS)相结合,正逐渐成为实现电池全生命周期多模态安全管理的重要技术路径。

表 3 不同类型锂离子电池热失控过程中产生的气体种类

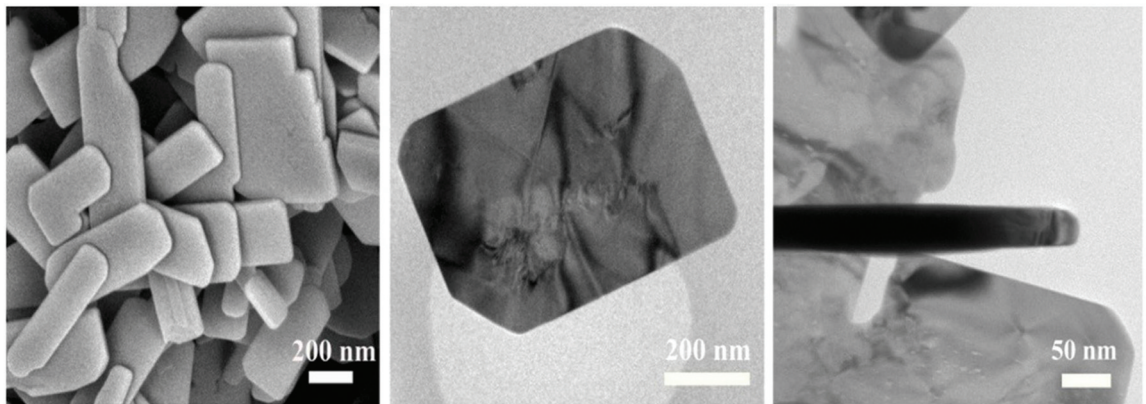
模式	对象	气体类型
热滥用	LCO/NCM/LFP	CO <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
热滥用	LFP/LTO/NMC	CO <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
热滥用	LCO/NCM	CO <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> 、C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>
热滥用	LCO/LMO/NMC/LFP	CO <sub>2</sub> 、CO、HF、有机产物
热滥用	LFP/NMC/LMO	CO <sub>2</sub> 、CO、HF、POF <sub>3</sub> 、有机碳酸酯、氟化烃
热滥用	NCA	CO <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
热滥用	NMC	CO <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
热滥用	LCO	CO、HF、有机产物
电滥用	LFP	CO <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> F
电滥用	LCO	CO <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
电滥用	NCM	CO <sub>2</sub> 、CO、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
机械滥用	NCM	CO <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、CH <sub>4</sub>

注: NCA 为镍钴铝酸锂, LCO 为钴酸锂, NCM/NMC 为镍钴锰酸锂, LFP 为磷酸铁锂, LTO 为钛酸锂, LMO 为锰酸锂。

### 2.2.1 低温半导体气敏材料

二维纳米材料具有优异的载流子迁移率和丰富的吸附位点,有利于电子传输,为实现低功耗、低工作温度的气体传感提供了重要基础<sup>[45]</sup>。在材料制备与表征实验法的应用中, Qin 等<sup>[46]</sup>通过实验合成与气敏性能测试方法,以金属有机框架(MOF)纳米片为前驱体,提出了一种可推广的合成方法,成功制备出多孔钴基双金属氧化物纳米片(Co-M-O NSs, M=Cu、Mn、Ni、Zn)。该策略能够调节 Co 与 M 的原子比例,同时保证成分均匀,使所得材料保持二维结构特征,具有较高的比表面积(146.4~220.7 m<sup>2</sup>/g)。得益于这种结构优势,Co-Mn-O 纳米片在 175 °C 条件下对 100 mg/m<sup>3</sup>CO 表现出突出的响应值,最高可达 264%。Wu 等<sup>[47]</sup>则开发了一种基于 CuO 纳米片的室温 CO 传感器。该材料通过一步水热法制备,纳米片厚度约为 35 nm,具有大量暴露的(111)晶面及丰富的氧空位缺陷(图 5a-5c)。在室温下,该传感器对 100 mg/m<sup>3</sup>CO 的响应值达到 39.6,响应与恢复时间分别为 100 s 和 72.4 s。器件在 60 d 测试周期内保持良好的稳定性,即使在高湿度环境中,其性能衰减也仅为 8.01%。此外, Li 等<sup>[48]</sup>采用理论计算模拟法,针对 Cu 改性 HfS<sub>2</sub> 单层构建了两种模型结构:表面负载型(Cu@HfS<sub>2</sub>)和缺陷嵌入型(Cu-HfS<sub>2</sub>),用于研究其对锂离子电池热失控特征气体的吸附与传感行为。图 5d-5e 结果显示,嵌入型 Cu-HfS<sub>2</sub> 对 CO 表现出明显的化学吸附特征,吸附能为 -0.750 eV。基于电导变化建立的电阻型传感模型显示,该

结构对 CO 的响应接近 99%，且在室温条件下理论恢复时间仅为数秒，展现出良好的应用潜力。



a. CuO-140的SEM图(200 nm)

b. CuO-140的TEM图(200 nm)

c. CuO-140的TEM图(50 nm)

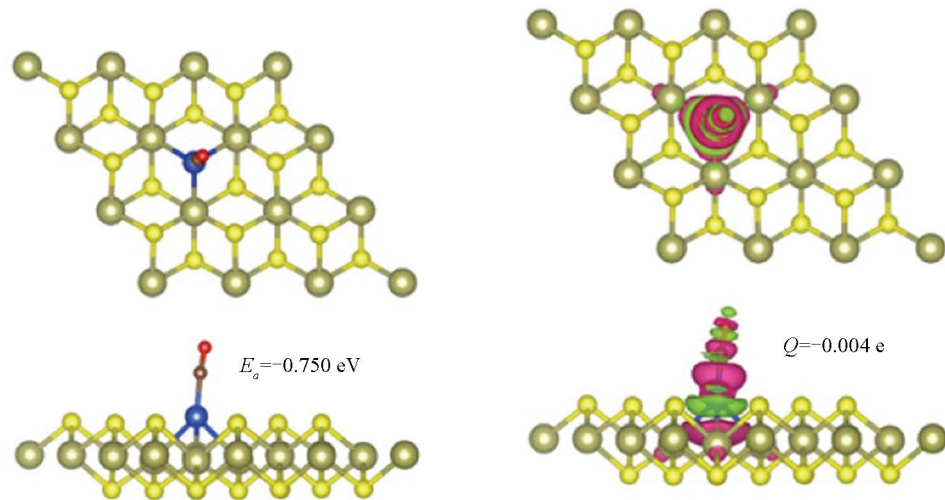
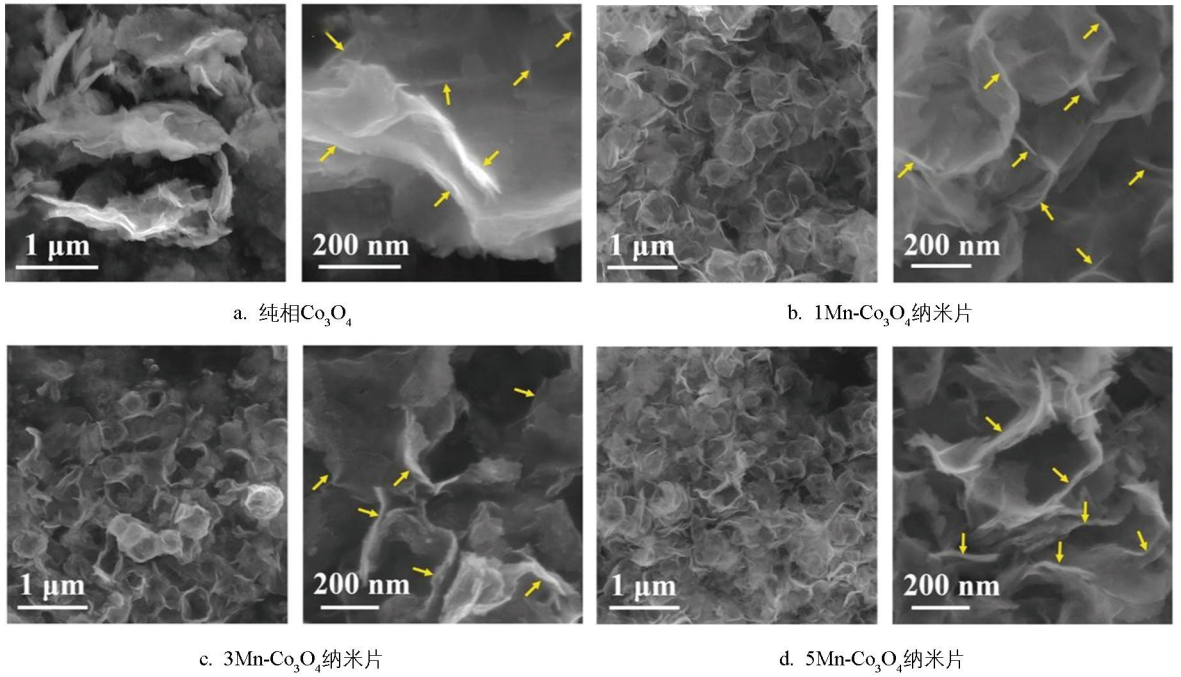
d. Cu-HfS<sub>2</sub>单分子层上CO的最稳定吸附结构e. Cu-HfS<sub>2</sub>单分子层上CO的电荷密度差

图 5 CuO 纳米片的形貌及 Cu-HfS<sub>2</sub> 单层对 CO 的吸附行为

针对室温的需求,金属氧化物半导体(MOS)的元素掺杂也是当前研究热点。在材料制备与表征实验法的持续探索中,Qin等<sup>[49]</sup>以MOF纳米片为前驱体,构建了Mn掺杂Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>多孔二维纳米片结构(图6)。3Mn掺杂的Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>显著提高了材料的比表面积(199.0 m<sup>2</sup>/g)及氧空位浓度,并优化了Co<sup>3+</sup>/Co<sup>2+</sup>比例,从而增强了CO的表面氧化反应活性。在125℃下对40 mg/m<sup>3</sup>CO的响应值达到280%,明显优于未掺杂样品。相比之下,Li等<sup>[50]</sup>报道的铟(In)掺杂Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米结构则实现了真正的室温高灵敏检测,球形花状In掺杂氧化铋(In/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)纳米复合材料由大量褶皱纳米片自组装而成(图7),In离子的引入不仅诱导了局部晶格畸变和氧空位的产生,还促使材料表面形成更加粗糙疏松的多孔结构,显著增大了气体扩散通道。结果表明,该传感器在室温(26℃)下对40 mg/m<sup>3</sup>CO的响应值高达103.68%,且具备极快的响应/恢复速度(67 s/4 s)及低至0.64 mg/m<sup>3</sup>的检测限,为开发低功耗电池安全监测器件提供了新思路。

为了进一步降低功耗并实现实时监测,Liu等<sup>[51]</sup>构建了一维导电MOF材料,并将其组装为电阻式气体传感器,用于锂离子电池热失控气体的实时检测。该材料由金属节点与有机配体沿一维方向有序连接形成 $\pi$ -d共轭传导链,既具备规则孔道,又提供连续电子传输路径,实现了本征导电特性。与二维或传统金属氧化物传感器依赖高温工作或表面耗尽层调控不同,该1D MOF传感器能够在室温下对CO、H<sub>2</sub>等热失控特征气体快速响应,同时保持低功耗和优异的选择性。通过材料本征电子结构提升气体吸附与电荷调制效率,为电池安全预警提供了一种全新的低功耗、实时气敏解决方案。



黄色箭头指示薄层位置。

图 6 不同 Mn 掺杂  $\text{Co}_3\text{O}_4$  纳米片的形貌对比

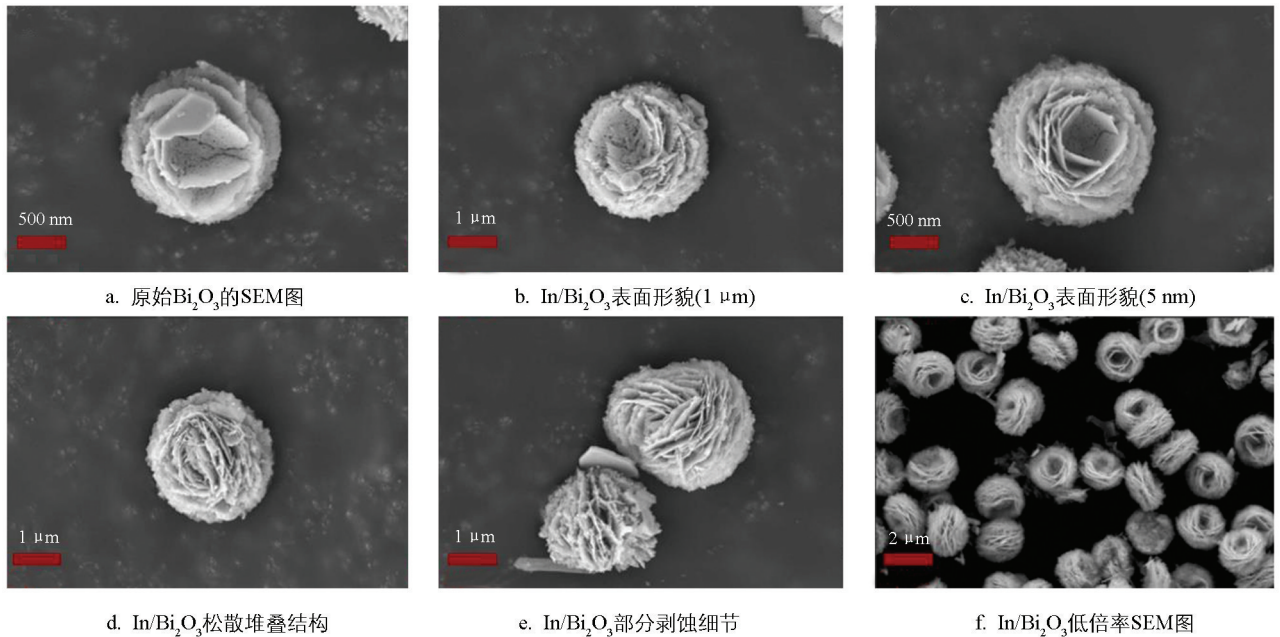


图 7 球形花状  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  和 In/ $\text{Bi}_2\text{O}_3$  扫描电镜图

## 2.2.2 智能电池管理系统

一些研究者将半导体金属氧化物气敏传感器从传统陶瓷管基底转型为先进微机电系统(MEMS), MEMS 金属氧化物半导体气体传感器在 LIB 热失控期间对一氧化碳和氢的早期预警具有显著优势。在系统集成与工程验证法的应用中, Wang 等<sup>[52]</sup>开发了一套智能传感系统, 通过将气体传感器阵列与信号处理算法集成, 实现了快速且准确的热失控检测。该系统的核心敏感层由 n 型( $\text{ZnO-In}_2\text{O}_3\text{-Au}$ )高度定向纳米棒阵列与 p 型( $\text{CuO/NiO}$ )纳米颗粒异质结构组成。这种设计不仅通过增大比表面积提供了丰富的气体吸附位点, 还利用多组分间的协同电子效应显著增强了对还原性气体的催化活性。研究团队进一步采用人工神经网络(ANN)对传感器阵列的多维响应信号进行非线性解耦, 实现了对复杂混合气体中 CO 浓度的高精度

定量分析,平均相对误差低于5.78%,检测限低至 $0.5\text{ mg/m}^3$ ,并实现了零误报的实时预警。

为探究一氧化碳在真实储能场景中的宏观扩散行为,Jia等<sup>[53]</sup>针对大型储能系统,结合全尺寸燃烧实验与计算流体动力学(CFD)模拟,系统研究了86 Ah商用方形磷酸铁锂(LFP)电池热失控期间的气体释放与扩散特性。研究利用布置在电池包外部及集装箱顶部的复合气体探测器捕捉气体运移轨迹。结果显示,在电池包层级CO峰值浓度可达 $802\text{ mg/m}^3$ ,而在集装箱层级模拟中最大浓度为 $412\text{ mg/m}^3$ ,同时揭示了通风与非通风条件下CO的时空分布规律,指出热失控后期通风条件下气体稳定阈值的降低现象。这些研究为储能系统中CO传感器的阈值设定及安装位置优化提供了重要的工程依据。

### 2.3 电缆系统火灾预警监测

电缆火灾事故通常并非突发性的明火燃烧,而是经历了一个由绝缘老化、接触不良或过载导致的长期局部过热过程。目前主流的电力电缆绝缘层材料多为交联聚乙烯(XLPE)、聚氯乙烯(PVC)<sup>[54]</sup>或乙丙橡胶(EPR)等高分子有机聚合物。在热失控或火灾发生的初期,受热点温度虽未达到绝缘材料的着火点,但其长链高分子结构已开始发生热裂解和低温氧化反应,由于电缆敷设环境通常通风不畅,会发生不完全氧化,生成大量一氧化碳。通过高灵敏度传感器捕捉微量CO浓度的变化,能够填补传统感温光纤和感烟探测器在早期预警能力上的空白<sup>[55]</sup>。Zhu等<sup>[56]</sup>在全尺寸电缆层实验平台中系统分析了CO的传播特征,揭示了长狭空间内CO扩散行为对早期预警策略制定的重要性。在传感器器件设计方面,Dang等<sup>[57]</sup>提出了一种基于分布反馈激光与波长调制技术的高选择性CO传感系统,可在 $\text{mg/m}^3$ 级检测范围内实现早期火灾气体的精准捕获。此外,多传感器阵列和热调制金属氧化物半导体传感技术的研究表明,通过复杂气体响应轮廓分析,可有效提高CO火灾检测的可靠性与抗干扰能力。

#### 2.3.1 光学技术研究

光学检测技术基于气体分子物理吸收特性,在电缆火灾早期监测中展现出巨大潜力,在系统集成与工程验证法的早期应用中,激光二极管被引入火灾气体检测系统以验证其可行性。Jiang等<sup>[58]</sup>于2011年构建了一种基于分布反馈(DFB)激光器的CO火灾探测系统,实现了 $2\text{ mg/m}^3$ 的检测限。Hangauer等<sup>[59]</sup>于2014年采用垂直腔面发射激光器(VCSEL)开发了基于可调谐二极管激光吸收光谱的微型CO传感器,用于火灾探测场景。为扩展实时监测范围和多气体检测能力,开放路径光学方法被引入火灾早期预警领域,Yu等<sup>[60]</sup>提出了一种开放路径TDLAS系统,利用中心至 $1579\text{ nm}$ 的DFB激光器和多镜反射光路,在无需气体采样的情况下实时捕获火焰燃烧产物中的CO和CO<sub>2</sub>吸收信号,结果表明该开放路径TDLAS方案能够在无需气体采样的条件下连续捕获燃烧产物中的双气体特征吸收信号,实现对CO和CO<sub>2</sub>浓度的实时定量测量。Li等<sup>[61]</sup>深化了系统集成与算法验证法,在前期研究基础上构建了一套双通道TDLAS气体检测系统。该系统采用时间复用方式,引入 $2.3\text{ }\mu\text{m}$ 与 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ 两种激光器,分别扫描CO和CO<sub>2</sub>的特征吸收谱线;同时结合WMS 2f/1f技术、软件锁相放大技术以及反演算法,实现对气体浓度的精确提取。在动态燃烧实验中,CO与CO<sub>2</sub>的测量误差均控制在2.5%以内,时间分辨率达到20 ms,可实时反映燃烧过程中气体浓度的快速波动。结果表明,该系统在保持较高测量精度的同时显著缩短了响应时间,为复杂火灾场景下的多组分气体在线监测提供了有效技术路径。

红外光谱技术在电缆火灾预警领域同样展现出良好应用前景。LI等<sup>[62]</sup>基于非色散红外吸收原理设计了一种中红外气体传感系统(图8)。该系统构建了紧凑型多通气体吸收池,包含气体预处理模块、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)传感器模块、一氧化碳(CO)传感器模块以及监测平台模块,核心部件包括宽带MEMS脉冲红外光源与双通道热释电探测器。通过优化反射结构,使红外光在仅30 cm的物理腔体内完成6次反射,从而实现约1.8 m的等效光程,增强了气体吸收信号强度。针对CO的选择性检测,研究利用其在 $4.66\text{ }\mu\text{m}$ 处的基频吸收峰,并配合窄带滤光片以减小水汽及其他气体的光谱干扰。结果显示,在0.25 s积分时间下,系统对CO的检测限可达 $0.94\text{ mg/m}^3$ ,验证了中红外光谱技术在非接触式电缆火灾预警中的灵敏检测能力。综合来看,高灵敏度光学检测技术的关键在于充分利用中红外区基频吸收强度高的优势,并通过优化

光程结构提升吸收信号强度,从而实现 CO 等特征气体的低浓度、抗干扰检测,这为复杂电缆环境下的早期火灾预警提供了更加可靠的技术支撑。

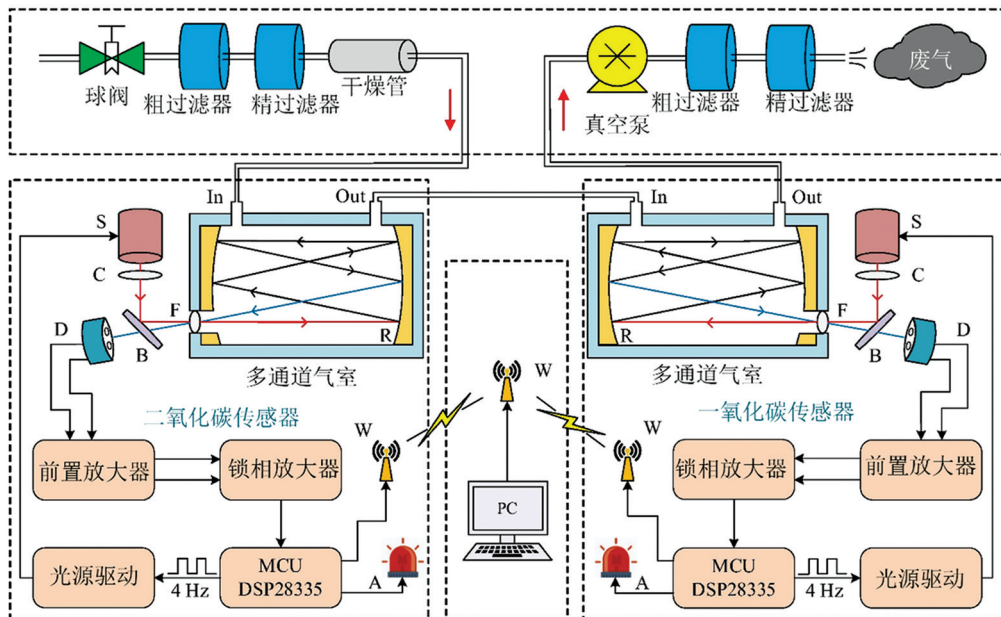


图 8 中红外气体传感系统结构示意图

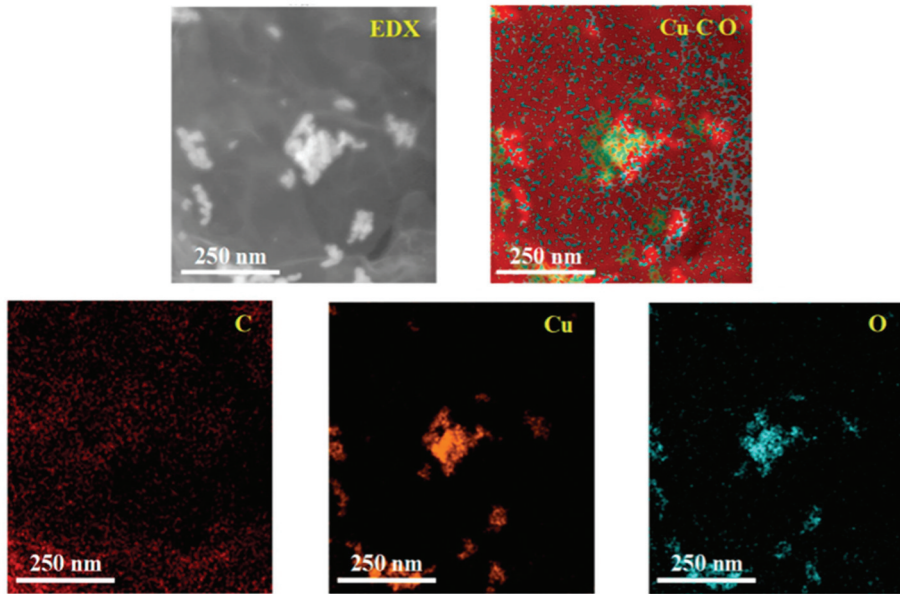
### 2.3.2 柔性传感器技术研究

考虑到电力电缆呈带状分布的几何特性及复杂的敷设路径,传统的点式传感器在全覆盖监测上仍存在空间局限,为了实现贴合电缆本体的连续无盲区监测,在材料制备与表征实验法的前沿探索中,基于功能化传感纤维的柔性器件成为了新的研究前沿。Liu 等<sup>[63]</sup>设计并制备了一种基于还原氧化石墨烯/氯化亚铜(RGO/CuCl)复合材料的柔性 CO 气体传感器,用于室温下对高浓度 CO 的检测(图 9a)。研究团队将 RGO/CuCl 复合膜喷涂在柔性聚酰亚胺基底上的互指电极上,通过测量不同 CO 浓度(400~2 000 mg/m<sup>3</sup>)下的电阻变化评估传感性能(图 9b),柔性结构可承受多次弯曲而保持性能稳定。利用 RGO 提供的二维纳米片高比表面积和优异导电性,结合 CuCl 纳米颗粒对 CO 的特异性吸附,实现了室温下高浓度 CO 的快速响应和良好选择性。

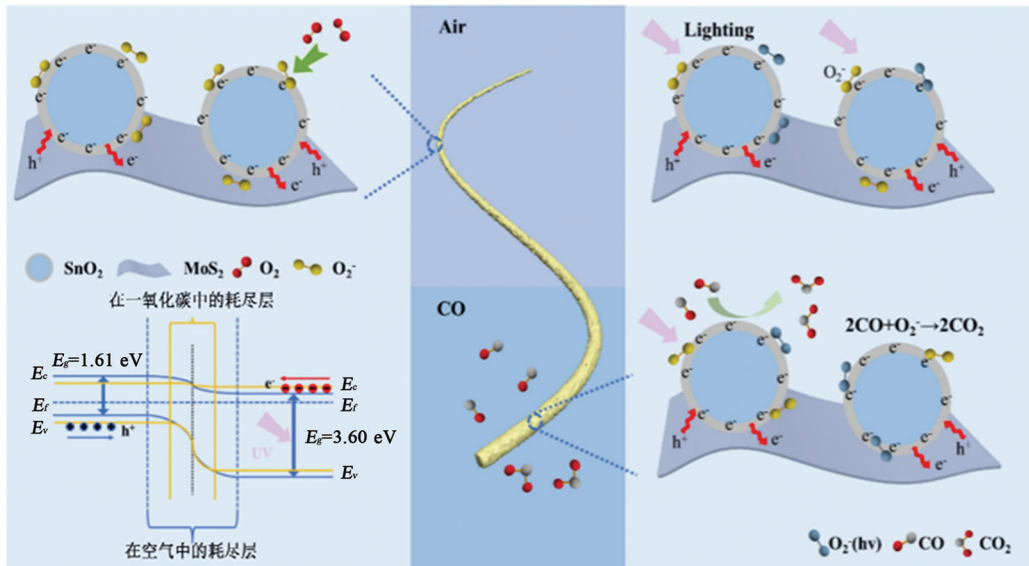
Yu 等<sup>[64]</sup>利用同轴湿法纺丝技术制备了一种具有双模核壳结构的柔性预警传感纤维(SMA)。在该纤维的微观结构设计中,芯层主要由高导电性的 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene 构成骨架,而负责 CO 特异性识别的壳层则是由芳纶纳米纤维(ANFs)基体包裹的二氧化锡/二硫化钼(SnO<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub>)纳米复合材料与银纳米线(AgNWs)共同构成。研究指出,壳层中的 SnO<sub>2</sub> 纳米球锚定在层状 MoS<sub>2</sub> 表面形成独特的 p-n 异质结,这种结构不仅有效防止了纳米颗粒的团聚,还通过能带弯曲显著增强了对 CO 分子的化学吸附与电荷转移能力。这种具有多孔网状壳层结构的纤维对 100 mg/m<sup>3</sup> 的 CO 表现出显著的电阻响应,证实了利用柔性复合材料实现电缆本体原位气体监测的可行性。综上,面向电缆带状结构与复杂敷设环境,柔性功能化传感纤维的研究实现了由刚性点式检测向贴合本体的连续监测模式的转变,这为电缆系统原位、无盲区火灾预警提供了新的技术路径和管理方法。

## 2.4 GIS 及其附属舱室安全监测

六氟化硫(SF<sub>6</sub>)被认为是气体绝缘开关设备(GIS)等装置的理想绝缘介质,但其热分解会产生硫化物(SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、OCS)、氟化物(HF、CF<sub>4</sub>)和碳化物(CO<sub>2</sub>、CO)等有害副产物<sup>[65]</sup>。相较于 SF<sub>6</sub> 的其他分解产物,CO 分子具有更强的扩散能力和热稳定性,能够较早地通过附属舱室的监测接口被传感器捕获<sup>[66]</sup>。通过对 CO 浓度的动态监测,可以实现对 GIS 内部绝缘受损程度的定量评估。近年来,针对 SF<sub>6</sub> 气体绝缘设备内部故障过程中产生的 CO 等分解组分的高精度在线检测需求,研究者开展了大量探索。



a. RGO/CuCl 复合薄膜的EDX表征



b. SMA 传感光纤对 CO 的响应过程及响应机理

图 9 柔性气体传感器的结构表征与 CO 响应特性

高灵敏光学检测技术是最主要的研究方向,在系统集成与工程验证法的应用中,光学吸收法因其选择性强、定量准确而被广泛关注。Wan 等<sup>[67]</sup>开发了一种基于多梳光反馈腔增强吸收光谱(OFC-EAS)的高灵敏 CO 传感器,该系统采用 2.3  $\mu\text{m}$  二极管激光作为光源,针对 CO 第一倍频 R(6) 线( $4\ 285.01\ \text{cm}^{-1}$ )进行检测,该波段在  $\text{SF}_6$  及其分解产物中无干扰,从而实现高选择性测量。结果表明,在最优工作条件下,系统对 CO 的检测下限可降至  $18\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,测量精度达到  $150\ \text{ng}/\text{m}^3$ ,体现出较强的痕量检测能力。此外,Gao 等<sup>[68]</sup>面向 GIS 在线微量 CO 监测需求,构建了一套融合差分傅里叶变换红外光谱(DFTIR)与加权正弦光谱重构卷积神经网络(WSSR-CNN)的检测系统。该方法首先通过差分处理实现吸收谱线的基线校正,以削弱背景漂移的影响,随后利用 WSSR 算法在复杂干扰环境中强化微弱 CO 光谱特征,最终借助卷积神经网络建立浓度反演模型,实现对 CO 浓度的精准测量。结果显示,模型的决定系数  $R^2$  分别达到 0.999 82 和 0.999 99,平均绝对百分比误差为 0.97% 和 0.22%,最低检测限可达  $13\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。整体来看,该方法在复杂气体背景下仍能保持较高的预测准确度与灵敏度。

在系统集成与工程验证法的应用中, PAS 近年来也颇受研究者们青睐。Luo 等<sup>[69]</sup>研究了基于非共振光声光谱的在线气体检测技术, CO 的检测下限分别为  $5.9116 \text{ mg/m}^3$ , 单次测量的相对误差小于 10%, 且系统在连续 12 h 测量中表现出优异的稳定性。Sun 等<sup>[70]</sup>提出一种基于石英增强光声光谱(QEPAS)的高灵敏 CO 检测方案, 设计带槽 T 型石英音叉光声计并配合谐振管以放大激光诱导的信号, 同时采用中心波长  $4.61 \mu\text{m}$  的中红外量子级联激光器激发 CO 基本吸收带(图 10a)。该系统在 10 s 积分时间下实现了  $10 \mu\text{g/m}^3$  的最低检测限, 响应时间约 3 min。尹旭坤等<sup>[71]</sup>设计了一种差分双通道光声池作为检测模块, 构建了一套可在高浓度  $\text{SF}_6$  背景气体下工作的 CO 气体传感系统(图 10c)。该传感系统在 1 s 积分时间条件下, 实现了 CO 灵敏度为  $1.18 \times 10^{-6}$ , 对应的归一化噪声等效吸收系数为  $3.68 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。图 10b 显示, 装置在检测过程中兼具较高灵敏度、良好选择性以及较强的抗噪声干扰能力, 整体性能表现稳定。马凤翔等<sup>[72]</sup>进一步设计了一种 T 型多通光声传感器系统。该系统采用中心波长为  $2333.72 \text{ nm}$  的 DFB 激光器作为激发光源, 在  $\text{SF}_6$  背景气体环境中对痕量 CO 进行检测。结果表明, 当积分时间延长至 100 s 时, 装置的 CO 检测下限可达  $1.50 \times 10^{-7}$ , 相应的归一化噪声等效吸收系数为  $5.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ , 显示出较高的检测灵敏度与良好的长期稳定性。

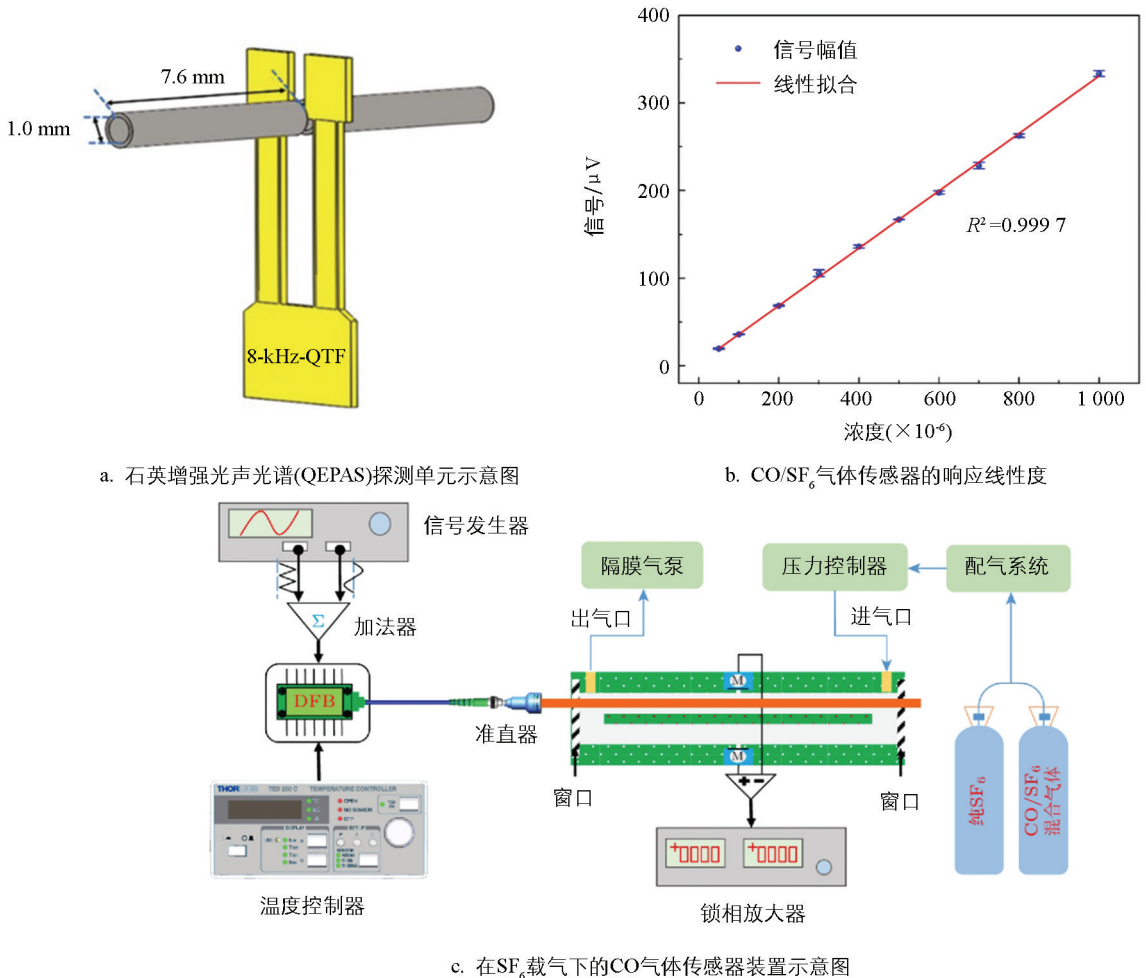


图 10 基于光声光谱技术的 CO 气体传感系统以及性能表征

为实现原位嵌入式监测, 研究者开始探索结构更为紧凑的传感方案。Zhang 等<sup>[73]</sup>提出碳纳米管涂层光纤气体传感器, 并构建光纤环形衰减(FLRD)检测系统, 利用单壁碳纳米管对 CO 的吸附作用引起环形衰减时间变化实现对 CO 的定量检测, 检测限为  $19.951 \text{ mg/m}^3$ ,  $R^2$  达 0.984, 系统重复性和长期稳定性良好。该方案在结构小型化方面具有明显优势, 但灵敏度仍处于  $\text{mg/m}^3$  量级。



此外, 基于半导体金属氧化物的电阻式气体传感器因其结构简单、易于集成和成本低廉, 在 SF<sub>6</sub> 设备的在线监测中也受到关注。Tang 等<sup>[74]</sup>采用两相水热法制备 p 型 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 并通过原位 CVD 构建 p-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/n-Co<sub>3</sub>S<sub>4</sub> 异质结敏感材料, 在 200 °C 下对 30 mg/m<sup>3</sup> CO 的响应值在空气和 SF<sub>6</sub> 背景中分别达到 29.19% 和 57.87%, 响应时间最短可达 7 s, 表现出良好的选择性、耐湿性及长期稳定性。理论分析表明, 异质结界面增强了对 CO 分子的吸附与电荷转移能力, 其响应机制主要来源于气体分子与表面吸附氧或吸附氟之间的相互作用。不仅验证了氟协同增强机制的可行性, 更进一步证明了异质结结构对于增强半导体传感器的 CO 检测具备显著优势。

表 4 列举了近年来较为突出的新型一氧化碳检测传感器的研究类型、材料或技术等。新型研究呈现材料设计由单组分向多级异质结构、超快响应恢复速度、检测限向更低量级持续突破的趋势。可以看出, 电化学传感器具备快速响应优势, 半导体传感器在材料改性上创新多样, 而光学传感器则在极限检测限上表现最佳, 不同技术类型可满足多样化的应用需求。

表 4 新型一氧化碳检测传感器研究的类型、材料或技术、研究成果以及检测限

传感器类型	材料或技术	成果	检测限	参考文献
半导体	Pd/C, Pd/NC	掺氮的 Pd/NC 在动态响应和恢复时间上优于未掺氮的 Pd/C 系统	—	[75]
半导体	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> @CuO P-N 异质结	构建了具有增强响应效能的 In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> @CuO P-N 异质结构	10 mg/m <sup>3</sup>	[12]
半导体	Ta-ZnO	相较于本征 ZnO, Ta 掺杂使 ZnO 对 CO 的吸附能从 -0.63 eV 增强至 -2.74 eV	—	[15]
半导体	NiO/SnO <sub>2</sub> 异质结	引入 SnO <sub>2</sub> 获得 NiO/SnO <sub>2</sub> 复合体系, 在纳米尺度上形成异质结界面, 明显增强对 CO 的响应	1 mg/m <sup>3</sup>	[13]
半导体	NiO-石墨烯	从多个角度对比过渡金属氧化物修饰石墨烯单分子层表面吸附, NiO-石墨烯对 CO 具有较强的化学吸附能力和显著的电学响应变化	—	[16]
半导体	一维 Cu <sub>2</sub> DADHA	在室温、无水和无氧条件下, Cu <sub>2</sub> DADHA 对 100 mg/m <sup>3</sup> 一氧化碳的反应率最高(93.2%), 具有灵敏度高、选择性高、长期稳定性等优势	235 μg/m <sup>3</sup>	[51]
半导体	SnO <sub>2</sub> /MoS <sub>2</sub>	增强了光纤对一氧化碳的检测能力, 监测火灾环境中二氧化碳气体, 指导消防员救援行动	—	[64]
半导体	In-Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 花状纳米结构	In 离子的引入显著增大了气体扩散通道, 具备极快的响应/恢复速度(67 s/4 s)	0.64 mg/m <sup>3</sup>	[50]
半导体	Mn-Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 多孔二维纳米片	3Mn 掺杂的 Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 显著提高了材料的比表面积及氧空位浓度, 并优化了 Co <sup>3+</sup> /Co <sup>2+</sup> 比例	—	[49]
电化学	固态钒稳定氧化锆	能够快速检测空气中总含量高于 10% 的 CO 和 CO <sub>2</sub> , 且不会发生交叉反应	—	[18]
电化学	SnO <sub>2</sub>	金红石结构的 n 型半导体 SnO <sub>2</sub> 有助于提高灵敏度, 响应时间和恢复时间加快(27.5 s/39 s)	1 mg/m <sup>3</sup>	[19]
光学	吸收光谱	将 TDLAS 获得的中红外吸收信号转换至可见光波段, 克服了中红外 CO 吸收信号弱难以直接检测的问题	79.6 μg/m <sup>3</sup>	[23]

续表 4

传感器类型	材料或技术	成果	检测限	参考文献
光学	吸收光谱	开发了一种基于多梳光反馈腔增强吸收光谱 (OF-CEAS) 的高灵敏 CO 传感器	18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	[67]
光学	光声光谱	提出了基于主动光声腔的改进型检测结构, 提高了光声转换效率和信噪比	1 $\text{mg}/\text{m}^3$	[29]
光学	光声光谱	提出了一种石英增强光声光谱 (QEPAS) 传感器系统	0.37 $\text{mg}/\text{m}^3$	[31]
光学	波长调制光谱	通过 WMS 结合数字锁相放大算法实现对 CO 吸收信号的高灵敏解调	8.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	[76]

### 3 结论与展望

一氧化碳检测传感器凭借着响应速度快、灵敏度高和环境适应性好等优势, 在电力设备故障早期预警领域中彰显优势。从材料角度看, 利用材料制备与表征实验法, 基于过渡金属掺杂与 n-p 异质结特殊结构的传感器展现出巨大潜力; 从技术视角看, 通过系统集成与工程验证法, 电化学、半导体及光学传感器在重要电力场景各显其能。近年来, 系统集成与人工智能算法的深度融合成为新趋势, 机器学习对多维响应信号的深度分析, 显著提高了故障诊断的及时性并降低了误报率。

一氧化碳检测传感器在电力设备故障预警中尽管展现出很高的实用价值, 但仍然存在一些局限性:

- 1) 电力设备故障产生的气体成分复杂, 除 CO 外, 还有 VOCs、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等重要指示气体, 单一应用检测 CO 的传感器难以满足实际应用要求, 未来应向融合多气体检测的传感器阵列发展。
- 2) 电化学传感器使用寿命较短(1~3 年), 需定期校准更换, 带来不可避免的维护成本。
- 3) 半导体一氧化碳传感器选择性较差, 对环境变化敏感, 且其较高的工作温度在一些电力设备中运行也存在安全风险(锂电池等), 因此仍需通过材料设计和结构优化降低环境依赖性。
- 4) 光学传感器普遍面临易受电磁波等环境因素干扰、检测仪器庞大等问题, 需进一步研究优化电力设备的环境实用性。

本文梳理了 CO 传感器从底层机理到工程实测的全链条路径, 为实现从“学术研究”到“工业落地”的闭环, 未来研究应聚焦以下方向: 在硬件形态上, 系统集成与工程验证法将加速向 MEMS 工艺演进, 实现从实验室原型向原位嵌入集成的转变。针对变压器内部或储能机柜的紧凑空间, 研发厘米级、低功耗的集成芯片, 将敏感单元、信号调理与无线传输模组封装为“即插即用”的工业模组, 彻底解决目前光学设备体积庞大、点式传感器布线困难的工程瓶颈。在智能诊断层面, CO 传感器有望与电力设备在线监测系统深度融合。通过 AI 算法与物联网技术的结合, 将传感器捕获的浓度数据与设备负载、温度动态关联, 利用深度学习实现复杂背景下的早期预判。面向工业的实际应用虽然仍需进一步改良, 但其技术演进亦能看到一条清晰路径, 这需要材料科学、电力工程以及人工智能等各领域的研究者们交叉创新, 协同攻关, 共同推动实现一氧化碳传感器在电力设备状态监测中更高效可持续的应用。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG J Q, HUANG Y B, QIU X J, et al. A Review on Fire Research of Electric Power Grids of China: State-of-the-Art and New Insights [J]. Fire Technology, 2024, 60(2): 1027-1076.
- [2] WANG J X, CHEN W G, WANG P Y, et al. Analysis of SF<sub>6</sub> Decomposed Products by Fibre-Enhanced Raman Spectroscopy for Gas-Insulated Switchgear Diagnosis [J]. High Voltage, 2024, 9(1): 206-216.

- [3] LIU X J, XU Z D, DAI J, et al. Study on the Flame Propagation and Temperature Distribution in Utility Tunnel: The Spread Effect of Cable Fire [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 279: 128101.
- [4] WANG Q S, PING P, ZHAO X J, et al. Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 208: 210-224.
- [5] KOCH S, BIRKE K P, KUHN R. Fast Thermal Runaway Detection for Lithium-Ion Cells in Large Scale Traction Batteries [J]. *Batteries*, 2018, 4(2): 16.
- [6] SUN H C, HUANG Y C, HUANG C M. A Review of Dissolved Gas Analysis in Power Transformers [J]. *Energy Procedia*, 2012, 14: 1220-1225.
- [7] BUSTAMANTE S, MANANA M, ARROYO A, et al. Dissolved Gas Analysis Equipment for Online Monitoring of Transformer Oil: A Review [J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4057.
- [8] GUO W, PU Z H, REN Z G, et al. Analysis of Abnormal Detection Data of Fire Accident in Power Cable Tunnel and Field Test Study on Characteristic Parameters of Tunnel Fire [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 860707.
- [9] LONG H W, LI Y Q, CHAI K, et al. Metal Oxide Semiconductor-Based Core-Shell Nanostructures for Chemiresistive Gas Sensing: A Review [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 417: 136183.
- [10] SONG Y H, JIANG X, LYU N W, et al. Early Warning of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Based on Gas Sensors [J]. *Transportation*, 2025, 26: 100502.
- [11] ALI H, OROOJI Y, AL ALWAN B, et al. Unlocking the Potential of MOFs-Based Heterojunction Photocatalysts: Synthesis, Modification, and Performance Enhancement [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 226: 116359.
- [12] KHALILI S, MAJIDI M, BAHRAMI M, et al. A Portable Gas Sensor Based on  $\text{In}_2\text{O}_3 @ \text{CuO}$  P-N Heterojunction Connected via Wi-Fi to a Smartphone for Real-Time Carbon Monoxide Determination [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 13594.
- [13] XIE R J, LU J B, LIU Y Q. Carbon Monoxide Gas Sensing Properties of  $\text{SnO}_2$  Modified Metal-Organic Skeleton Derived NiO [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 367: 115038.
- [14] CHAKRABORTY P, YU-AN C E, CHIU W T, et al. Design and Development of Amperometric Gas Sensor with Atomic Au-Polyaniline/Pt Composite [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21): 12479-12487.
- [15] CHEN J, WU Z Y, XU M Z, et al. Gas-Sensitive Performance Study of Nb, Ta and V-Modified ZnO for Dissolved Gases in Transformer Oil [J]. *Chemical Physics Letters*, 2025, 863: 141898.
- [16] HU X Y, GUI Y G, ZHU S P, et al. Transition Metal Oxides ( $\text{NiO}$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ) Modified Graphene: A Promising Candidate to Detect and Scavenge  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ , and  $\text{CH}_4$  Gases [J]. *Diamond and Related Materials*, 2022, 123: 108856.
- [17] TRAN K M, SHIM J, LEE H K, et al. Ultrasensitive Carbon Monoxide Gas Sensor at Room Temperature Using Fluorine-Graphdiyne [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(48): 56084-56094.
- [18] KALYAKIN A, VOLKOV A, DUNYUSHKINA L. Solid-Electrolyte Amperometric Sensor for Simultaneous Measurement of  $\text{CO}$  and  $\text{CO}_2$  in Nitrogen [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(9): 4515.
- [19] ASILIAN A, MOHAMMADALI Z S. Design and Fabrication of an Amperometric  $\text{CO}$  Gas Sensor and a Readout Circuit Using a Low-Noise Transimpedance Amplifier to Achieve Standard Analog Outputs [J]. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2023, 171: 154864.
- [20] DAI J L, LUO B, SHEN X W, et al. A Review of Optical Gas Sensing Technology for Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil [J]. *Frontiers in Physics*, 2025, 13: 1547563.
- [21] ZHU L, WAN F, BAI Y T, et al. A Review of Photothermal Spectroscopy for Gas Sensing [J]. *Microchemical Journal*, 2026, 220: 116716.
- [22] 马凤翔, 赵跃, 李辰溪, 等. 变压器油中溶解一氧化碳气体的光纤传感技术 [J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 829-834.
- [23] HAN Z Q Z, ZHANG H, YANG F, et al. Mid-Infrared High-Sensitive Cavity-Free In-Situ  $\text{CO}$  Gas Sensing Based on Up-Conversion Detection [EB/OL]. (2026-01-22) [2026-02-25]. <https://arxiv.org/abs/2601.15981>.

- [24] WAN F, LIU Q, KONG W P, et al. High-Sensitivity Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Gas Detection Based on Fiber-Enhanced Raman Spectroscopy [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(7): 6849-6856.
- [25] WANG Z, ZHU L, LIU J W, et al. Gas Sensing Technology for the Detection and Early Warning of Battery Thermal Runaway: A Review [J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(12): 6038-6057.
- [26] ABU BAKAR N, ABU-SIADA A, ISLAM S. A Review of Dissolved Gas Analysis Measurement and Interpretation Techniques [J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2014, 30(3): 39-49.
- [27] YUN Y X, CHEN W G, WANG Y Y, et al. Photoacoustic Detection of Dissolved Gases in Transformer Oil [J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2008, 18(6): 562-576.
- [28] MAO X F, ZHOU X L, ZHAI L, et al. Dissolved Gas-in-Oil Analysis in Transformers Based on Near-Infrared Photoacoustic Spectroscopy [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(5): 940-946.
- [29] 李志军, 陈伟根, 邓硕, 等. 基于有源气室结构的光声光谱技术 [J]. *高电压技术*, 2018, 44(5): 1605-1611.
- [30] LI C X, QI H C, ZHAO X Y, et al. Multi-Pass Absorption Enhanced Photoacoustic Spectrometer Based on Combined Light Sources for Dissolved Gas Analysis in Oil [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 159: 107221.
- [31] LUO B, DAI J L, WANG G, et al. Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy Sensor for Detection of Dissolved Carbon Monoxide in Transformer Oil [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2026, 68(1): e70516.
- [32] 陈杨, 戴景民, 王振涛, 等. 基于近红外 TDLAS 变压器油中溶解气体在线检测装置 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(12): 3712-3716.
- [33] CHEN Y, WANG Z T, LI Z, et al. Development of an Online Detection Setup for Dissolved Gas in Transformer Insulating Oil [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(24): 12149.
- [34] LI Z, ZHANG Q R, WANG Z T, et al. A Highly Sensitive Low-Pressure TDLAS Sensor for Detecting Dissolved CO and CO<sub>2</sub> in Transformer Insulating Oil [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 174: 110622.
- [35] MEI H X, PENG J Y, XU D D, et al. Low-Power Chemiresistive Gas Sensors for Transformer Fault Diagnosis [J]. *Molecules*, 2024, 29(19): 4625.
- [36] YIN X T, DASTAN D, GITY F, et al. Gas Sensing Selectivity of SnO<sub>2-x</sub>NiO Sensors for Homogeneous Gases and Its Selectivity Mechanism: Experimental and Theoretical Studies [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 354: 114273.
- [37] XIE R J, LU J B, WANG J. High Performance Room Temperature CO Gas Sensor Based on CuO/TiO<sub>2</sub>/N-MWCNTS Ternary Nanocomposites [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2024, 131: 248-256.
- [38] WANG J X, ZHOU Q, XU L N, et al. Gas Sensing Mechanism of Dissolved Gases in Transformer Oil on Ag-MoS<sub>2</sub> Monolayer: A DFT Study [J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2020, 118: 113947.
- [39] HUANG L, LI T X, YANG D Q, et al. Adsorption and Detection Analysis of Metal Clusters (Pt<sub>3</sub>, Rh<sub>3</sub>) Modified WTe<sub>2</sub> Monolayers to Dissolved Gases (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) in Transformer Oil: A Density Functional Theory Study [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 700: 134670.
- [40] HOU T Y, ZHOU Q, ZENG W. Cr<sub>3</sub>-Doped GaSe Monolayer as an Innovative Sensor and Scavenger for Cl<sub>2</sub>, NO, and SO<sub>2</sub>: A DFT Study [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 19: 4463-4472.
- [41] LIU Z C, GUI Y G, XU L N, et al. Adsorption and Gas-Sensing Properties of Au<sub>n</sub> (n=1~3) Cluster Doped MoTe<sub>2</sub> for NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> Gas Molecules [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2022, 30: 101883.
- [42] JIANG T Y, LIU C M, WANG C, et al. Adsorption and Sensing Properties of Dissolved Gases in Transformer Oil Using Cu<sub>n</sub> and Pd<sub>n</sub> (n=1~3) Cluster Doped WSe<sub>2</sub> Monolayers [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 377: 115742.
- [43] YANG F, ZHOU L W, GUI Y G, et al. Adsorption Performance of Transition Metal (Ag, Pb, and Ni)- Modified ZrSe<sub>2</sub> Monolayers Toward Dissolved Gases (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) in Oil-Immersed Power Transformers: A DFT Study [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2026, 83: 108471.
- [44] WANG H B, DU Z M, RUI X Y, et al. A Comparative Analysis on Thermal Runaway Behavior of Li (NixCoyMnz) O<sub>2</sub>

- Battery with Different Nickel Contents at Cell and Module Level [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122361.
- [45] LI P, WANG Z Z, FENG Y Y, et al. Engineering Semiconductor Metal Oxide Nanostructures for Chemiresistive Gas Sensors in Early Warning of Battery Thermal Runaway [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2025, 193: 118480.
- [46] QIN C, WANG B, WU N, et al. General Strategy to Fabricate Porous Co-Based Bimetallic Metal Oxide Nanosheets for High-Performance CO Sensing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(22): 26318-26329.
- [47] WU Y Y, LI J, LV M S, et al. Selective Detection of Trace Carbon Monoxide at Room Temperature Based on CuO Nanosheets Exposed to (111) Crystal Facets [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 442: 130041.
- [48] LI X C, ZHAO G P, XIE K, et al. Cu-Decorated HfS<sub>2</sub> and Cu-Embedded HfS<sub>2</sub> for Adsorption and Gas Sensing of Lithium-Ion Thermal Runaway Gases: A DFT Study [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2024, 46: 104028.
- [49] QIN C, WANG B, WANG Y D. Metal-Organic Frameworks-Derived Mn-Doped Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Porous Nanosheets and Enhanced CO Sensing Performance [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 351: 130943.
- [50] LI L Z, LI G M, XU H Y, et al. Experimental and Theoretical Investigation of Spherical Flower-Like in/ Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for Room-Temperature CO Sensing in Lithium-Ion Battery Thermal Management [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2026, 1051: 186053.
- [51] LIU X, WU J, FAN C, et al. One-Dimensional Conductive Metal-Organic Frameworks Enable Real-Time Chemiresistive Detection of Thermal Runaway Gases [J]. *ACS Sensors*, 2025, 10(9): 6464-6475.
- [52] WANG Y T, ZOU Q K, WANG Z X, et al. Intelligent Early Detection of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway via H<sub>2</sub>/CO Sensor Arrays and Signal Processing Algorithms [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2026, 451: 139337.
- [53] JIA Z Z, WANG S P, QIN P, et al. Investigation of Gas Diffusion Behavior and Detection of 86 Ah LiFePO<sub>4</sub> Batteries in Energy Storage Systems during Thermal Runaway [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 184: 579-588.
- [54] YANG J, WU Y F, ZHU J L, et al. Insight into the Pyrolysis Behavior of Polyvinyl Chloride Using in Situ Pyrolysis Time-of-Flight Mass Spectrometry: Aromatization Mechanism and Cl Evolution [J]. *Fuel*, 2023, 331: 125994.
- [55] FONOLLOSA J, SOLÓRZANO A, MARCO S. Chemical Sensor Systems and Associated Algorithms for Fire Detection: A Review [J]. *Sensors*, 2018, 18(2)553.
- [56] ZHU H, JI J, NIE J K. Early Fire Evolution and Alarm Characteristics of Cable Fires in Long and Narrow Spaces [J]. *Fire Safety Journal*, 2022, 131: 103627.
- [57] DANG J M, YU H Y, ZHENG C T, et al. An Early Fire Sensor Based on Infrared Gas Analytical Methods [J]. *Analytical Methods*, 2018, 10(27): 3325-3331.
- [58] JIANG Y, ZHU Y, WANG J. Application of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy to Fire Detection: Preliminary Experiment [J]. *J Natural Disasters*, 2011, 20: 56-61.
- [59] HANGAUER A, CHEN J, STRZODA R, et al. Performance of a Fire Detector Based on a Compact Laser Spectroscopic Carbon Monoxide Sensor [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13680-13690.
- [60] YU B, WU X, ZHANG M H, et al. Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for Open-Path Monitoring Gas Markers in Fire Combustion Products [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 131: 104690.
- [61] LI J Y, WANG K M, ZHOU Y, et al. Simultaneous Measurement of Carbon Monoxide and Carbon Dioxide for Combustion Diagnosis Using 2 μm Laser Absorption Spectroscopy [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2024, 66(11): e70009.
- [62] LI Y F, YU L, ZHENG C T, et al. Development and Field Deployment of a Mid-Infrared CO and CO<sub>2</sub> Dual-Gas Sensor System for Early Fire Detection and Location [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, 270: 120834.
- [63] LIU Q Q, ZHANG F Z, PEI M F, et al. RGO/CuCl-Based Flexible Gas Sensor for High-Concentration Carbon Monoxide Gas Detection at Room Temperature [J]. *Micromachines*, 2024, 15(6): 737.

- [64] YU Z C, HUANG L L, ZHOU M, et al. Dual-Mode Core-Shell Structured Early Fire Warning Sensing Fiber with Selective CO and Temperature Detection [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 512: 162586.
- [65] CHEN K, YUAN S, GONG Z F, et al. High Sensitive Detection for SF<sub>6</sub> Decomposition Component of H<sub>2</sub>S Based on Laser Photoacoustic Spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911012.
- [66] OKABE S, KANEKO S, MINAGAWA T, et al. Detecting Characteristics of SF<sub>6</sub> Decomposed Gas Sensor for Insulation Diagnosis on Gas Insulated Switchgears [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(1): 251-258.
- [67] WAN F, ZHOU F, HU J, et al. Highly Sensitive and Precise Analysis of SF<sub>6</sub> Decomposition Component CO by Multi-Comb Optical-Feedback Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy with a 2.3 μm Diode Laser [J]. *Scientific Reports*, 2019(9): 9690.
- [68] GAO J, ZHANG Y C, ZHU R, et al. Ultratrace CO/SF<sub>6</sub> Detection System Based on Differential Fourier Transform Infrared Spectroscopy Combined with the Weighted Sine Spectral Reconstruction Convolutional Neural Network (WSSR-CNN) Model [J]. *Analytical Chemistry*, 2024, 96(45): 18086-18095.
- [69] LUO J, FANG Y H, ZHAO Y D, et al. Research on the Detection of SF<sub>6</sub> Decomposition Products Based on Non-Resonant Photoacoustic Spectroscopy [J]. *Analytical Methods*, 2015, 7(3): 1200-1207.
- [70] SUN B, ZIFARELLI A, WU H P, et al. Mid-Infrared Quartz-Enhanced Photoacoustic Sensor for ppb-Level CO Detection in a SF<sub>6</sub> Gas Matrix Exploiting a T-Grooved Quartz Tuning Fork [J]. *Analytical Chemistry*, 2020, 92(20): 13922-13929.
- [71] 尹旭坤, 董磊, 武红鹏, 等. 面向 SF<sub>6</sub> 气体绝缘设备故障检测的光声 CO 气体传感器设计和优化 [J]. *物理学报*, 2021, 70(17): 76-82.
- [72] 马凤翔, 曹骏, 张晓琪, 等. 面向气体绝缘设备故障诊断的 T 型多通光声传感器 [J]. *光电工程*, 2025, 52(9): 250163.
- [73] ZHANG Y, YU W W, WANG D B, et al. Carbon Monoxide Detection Based on the Carbon Nanotube-Coated Fiber Gas Sensor [J]. *Photonics*, 2022, 9(12): 1001.
- [74] TANG M C, ZHANG D Z, SUN Y H, et al. CVD-Fabricated Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Co<sub>3</sub>S<sub>4</sub> Heterojunction for Ultra-Sensitive Detection of CO in SF<sub>6</sub> Discharge Decomposition Products [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 401: 134968.
- [75] LIN H D, GUO J C, YANG D Y, et al. Pd/C-Based Sensor for Gas Sensing in Transformer Oil [J]. *Catalysts*, 2023, 13(7): 1113.
- [76] QIU X B, WEI Y B, LI N, et al. Development of an Early Warning Fire Detection System Based on a Laser Spectroscopic Carbon Monoxide Sensor Using a 32-Bit System-on-Chip [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 96: 44-51.

责任编辑 周仁惠