

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0521

氢气传感器最新研究进展与分析

钟爱华, 周涣欣, 高 悦

(深圳大学 物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 氢能源作为清洁能源, 在国家节能减排战略中具有重大意义, 其清洁、高效的特性使其成为未来能源体系的核心支柱之一。然而, 氢气“高度可燃、无色无味”的固有属性使其在实际应用中存在一定的安全隐患, 因此氢气检测技术成为保障氢能安全、推动产业发展的关键支撑技术。针对近年来氢气传感器及其技术的发展情况, 本文主要探讨了热导式、催化燃烧式、电化学式、光学式和功函数式氢气传感器的研究进展, 同时对氢泄漏检测传感器技术的现状和发展进行了分析, 并探讨了氢泄漏检测技术急需解决的问题和未来的发展方向。

关键词: 氢气传感器; 传感器种类; 氢气检测

中图分类号: TP212

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2025)06-0041-13

进入 21 世纪以来, 能源短缺与环境污染逐渐成为全球各国共同关注的核心议题, 推动能源结构向清洁化、低碳化转型已成为国际社会的普遍共识。在此背景下, 2015 年达成的《巴黎协定》明确提出, 应加强全球应对气候变化的协同行动, 将全球平均气温较前工业化时期的上升幅度控制在 2℃以内, 并努力将升温限制在 1.5℃以内。随后, 2018 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《全球升温 1.5℃特别报告》进一步指出, 若要避免更严重的生态危机, 必须采取更加严苛且迅速的减排措施, 以防止全球气温突破 1.5℃的关键阈值^[1-2]。在全球低碳转型大趋势下, 中国积极响应并出台一系列政策推动清洁能源发展, 其中氢能的战略地位不断凸显。2022 年 3 月, 中国发布《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》^[3], 在 2024 年 11 月出台的《中华人民共和国能源法》更是首次将氢能正式纳入国家能源管理体系, 标志着氢能在国家能源战略中日益凸显的重要地位^[4-5]。截至目前, 全国各省市已陆续发布三百余份氢能相关的政策和规划文件, 从地方层面为产业发展提供了坚实的制度保障, 有效加快了氢能产业规模化与规范化的进程^[5]。作为推动“碳达峰、碳中和”目

标实现的关键支撑力量, 氢能不仅是未来国家能源体系的重要组成部分, 更成为用能终端实现绿色低碳发展的重要载体, 在全球能源结构变革与中国绿色发展战略中均发挥着不可替代的作用^[6-7]。

氢能的战略价值主要体现在其“高能量密度”与“零碳排放”。从环保属性来看, 传统化石燃料因自身含碳成分, 燃烧过程中必然会排放大量二氧化碳等温室气体, 不仅加剧全球气候变暖, 部分燃料甚至在不完全燃烧时还会生成一氧化碳等有毒气体, 对生态环境与人体健康造成双重危害。而氢气在氧气中燃烧仅生成水蒸气, 全程无任何污染物排放, 因而被视为理想的清洁燃料。从能源利用效率来看, 氢能的高效特点尤为突出, 氢的热值高达 120.0 MJ/kg, 是同质量焦炭、汽油等传统化石燃料热值的 2~4 倍。同时氢能还具有能量密度高、存储形式多样的特点, 可以作为存储介质调配太阳能、风能等新能源发电。正因如此, 氢能既是清洁能源, 又是支撑化石能源清洁高效利用、可再生能源大规模储能的重要手段^[8-9]。氢气也因此被视为 21 世纪最具发展潜力的绿色能源之一。据国际氢能委员会(Hydrogen Council)预测, 到 2050 年, 氢能有望在全球能源消费中占据约 18% 的份额, 届时每年还

收稿日期: 2025-05-22

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(62071307)

第一作者: 钟爱华, 博导/副教授, 主要研究方向为气体传感芯片、传感器阵列和光电探测器。E-mail: zhongah@szu.edu.cn

能减少约 60 亿 t 的二氧化碳排放, 同时还将带动全球创造 3 000 万个就业岗位以及 2.5 万亿美元的经济产值。

然而, 氢气“无色无味、易燃易爆”的特点使其在实际应用场景中存在显著安全隐患。当空气中氢气体积分数达到 4% 时, 一旦遇明火就会发生爆炸; 且氢气具有点火温度低、燃爆浓度范围大、扩散速度极快的特点, 难以被人感知, 容易出现泄漏事故, 因此在应用过程中需特别重视其安全性。此外, 氢气还会对金属材料产生劣化作用, 当金属材料长时间暴露在氢气环境中时, 易发生氢腐蚀和氢脆现象, 进一步增加了设备运行风险。这些因素共同决定了氢能的规模化利用必须建立在完善的安全保障与实时监测基础之上^[10]。在氢能产业迅速发展的同时, 氢气在制取、储运与终端应用环节均面临着潜在的泄漏与燃爆风险, 因此发展高灵敏度与高可靠性的氢气检测技术已成为保障产业健康发展的关键支撑^[11-20]。

值得注意的是, 氢气检测技术的需求还延伸到了锂电池安全领域。锂电池在过充或大功率充电过程中容易引起锂枝晶生长, 严重时还会刺穿隔膜, 导致电池短路, 从而引起火灾甚至爆炸事故。但锂枝晶生长发生在电池内部, 目前尚无有效技术手段对其生长进行直接监测。近些年研究^[21]发现, 锂枝晶生长时会与电池内部的粘合剂发生反应, 释放出氢气。研究还发现, 对环境中的氢气浓度进行监测, 可比传统烟雾传感器提前十余分钟实现安全预警, 大幅提高了锂电池使用过程的安全性。基于这些研究成果, 研究人员已达成共识, 检测电池包中的氢气浓度变化是当前监测锂枝晶生长最有效的办法。然而, 此应用场景对氢气传感器提出了更高要求: 一是锂电池释放的氢气浓度极低, 需要传感器具备超高的低浓度检测能力; 二是考虑到锂电池的使用寿命, 传感器须满足十年以上长期稳定的工作要求。综上, 氢能源的快速发展以及锂枝晶生长监测等新应用场合的需求, 共同催生了对性能更优、适应性更强的新型氢气传感器的研发需求。

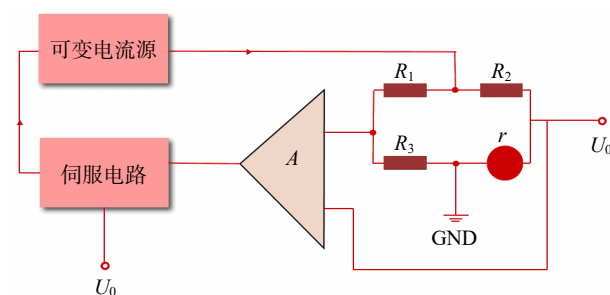
1 氢气传感器分类

氢气检测最早被用于飞艇加气站, 后来逐渐普及到各类工业生产中, 发展已历经百余年^[10]。在氢

气检测技术发展初期, 传统检测手段以气相质谱仪、色谱仪等大型分析仪器为主, 但这些仪器价格昂贵、体积庞大、维护复杂, 且检测响应速度缓慢, 无法满足实时监测的需求, 在应对氢气泄漏等紧急情况时存在明显短板。相比之下, 氢气传感器凭借成本低、尺寸小、检测响应快速等优势, 逐渐成为氢气检测领域的主流技术方向。经过几十年的技术迭代与创新研发, 有许多不同类型的氢气传感器实现了技术突破或商业化应用, 为各领域的氢气安全检测提供了多元化解决方案^[22-23]。

1.1 热导式氢气传感器

鉴于不同气体具有不同导热系数, 热导式氢气传感器是通过氢气与背景气体的热导率差异进行检测的氢气传感器。氢气热导率为 $16.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 约为空气 (约 $0.024 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 的 680 倍。利用氢气热导率远大于其他气体热导率的特点, 可知待测混合气体的导热系数与氢气的浓度存在相关关系, 即整体导热能力改变的幅度与氢气体积分数相关。当发生氢气泄漏时, 泄漏氢气会融入周围背景气体, 导致混合气体的热导率发生改变, 这种热导率的变化直接引起了传感器内部热敏电阻的阻值变化, 然后利用惠斯通电桥将热敏电阻的阻值变化转化为电压信号输出, 最终根据电压信号与氢浓度的对应关系, 实现对氢气浓度的定量检测^[24], 相应原理如图 1 所示。



注: U_0 为参考电压; R_1 、 R_2 、 R_3 为桥臂电阻;
 r 为热导传感器; A 为电流表。

图 1 热导式氢气传感器原理图

由于热导式氢气传感器的检测原理基于气体热传导特性, 而非化学反应, 因此传感器材料不会在检测过程中被消耗或失活。这种优异的材质稳定性使其具备“半永久性使用寿命”, 正常工况下使用寿命可达 5~10 a。相较于其他类型的氢气传感器, 热导式氢气传感器展现出三大优势: 其一, 量

程覆盖范围可达 100%, 在高浓度氢气检测方面具有明显优势; 其二, 结构简单, 价格便宜, 利于维护; 其三, 其检测原理可让它在无氧环境下进行检测, 且在惰性气体环境中稳定工作, 此特性也使其成功地应用于航天器燃料舱监测等特殊领域。Wu 等^[25]制备出一种基于铂纳米线的热导式氢气传感器, 该传感器兼具超低功耗、高稳定且高线性度响应的特点。该传感器由 $\text{Si}_{1-x}\text{N}_x/\text{Si}$ 基底、金电极以及对称蛇形/桥式铂纳米线加热元件构成, 尺寸分别为 $584\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m} \times 90\ \text{nm}$ (蛇形) 和 $6\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m} \times 90\ \text{nm}$ (桥式)。为实现与基底的热解耦, 加热元件被完全悬空, 从而促进其表面与周围气体之间的高效热交换。值得注意的是, 该悬空加热元件采用高纵横比的纳米线结构, 使其在热交换过程中能够快速达到热平衡, 进而确保氢气浓度变化时传感器的快速响应与恢复特性。性能测试结果显示, 该传感器与现有直流氢热导传感器相比有着更低的功耗, 最低功率仅为 $3.32\ \mu\text{W}$ 。在体积分数 0.25%~10% 的氢气中, 输出信号与气体浓度之间具有良好的线性关系, 如图 2 所示, 且在 30 000 次循环后仍保持稳定。

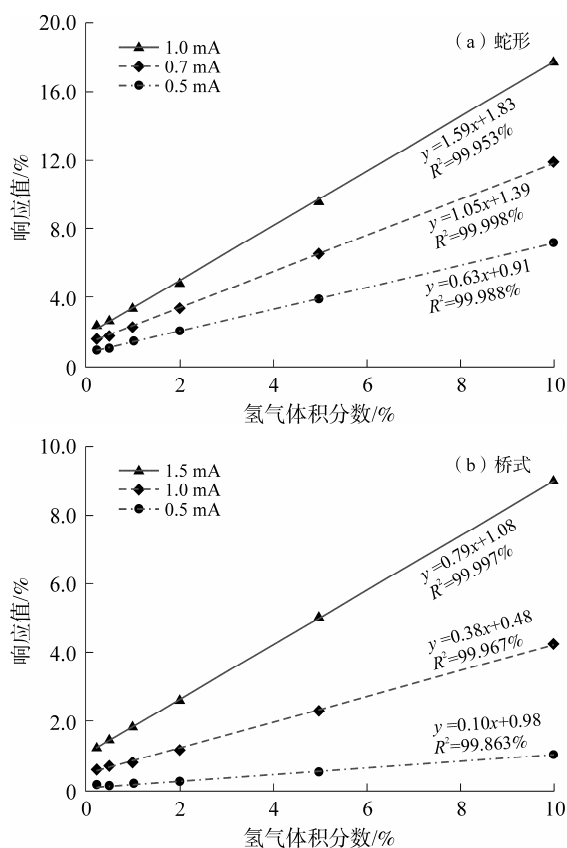


图 2 2 种结构传感器氢气浓度与响应度的关系^[25]

当蛇形元件暴露于体积分数 5% 氢气、电流为 0.5 mA 时, 测得的响应时间为 1.5 s, 恢复时间为 3.8 s。此外, 该器件还具备大面积微集成的潜力, 能够在 Pt 基座上与其他气敏催化剂耦合, 不仅使其成为多功能复合超灵敏超低功耗气体传感器的理想候选者, 更为新一代热导传感器技术的升级和迭代提供了宝贵的研究参考价值。

但热导式传感器易受温度条件影响, 当环境温度改变时, 传感器精度会相应下降, 造成灵敏度发生改变; 同时, 温漂大也是热导式传感器的一大缺点。因此, 如何解决环境温度改变使检测结果产生偏移的问题成为热导传感器研究的重点。此外, 该传感器在中高浓度氢气检测方面具有优异的性能, 但无法实现对低浓度氢气的有效检测, 这在一定程度上限制了其应用。

1.2 电化学氢气传感器

电化学氢气传感器核心工作原理是利用氢气与电极材料发生化学反应, 通过捕捉反应过程中电信号或电化学性质的变化来实现氢气浓度检测^[26]。具体来说, 氢气在传感器阳极处发生氧化反应, 产生电子转移后, 传感器通过检测电信号的变化即可计算得出氢气浓度, 如图 3 所示。根据检测信号类型的不同, 电化学氢气传感器可分为电流型氢气传感器和电压型氢气传感器。这两种传感器的响应信号都由传感电极和电解质的电化学反应产生, 但根据不同的工作方式测量出不同的信号。电流型氢气传感器的结构由电极和电解质构成, 一般情况下电极有两个——传感电极和对电极。电解质一般使用质子导电材料, 检测时通过氢气响应引起电极之间电流的变化来反映氢气浓度。电压型氢气传感器则主要通过检测电极间开路电位的变化来反映氢气浓度^[26]。

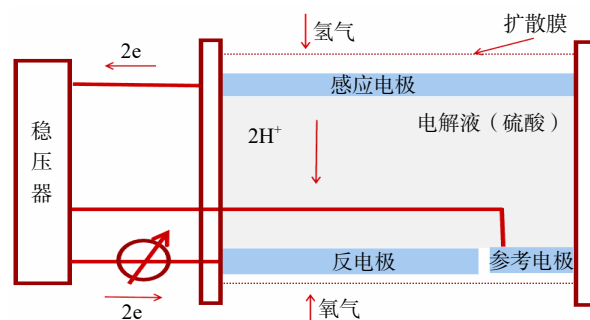


图 3 电化学氢气传感器示意图

电化学氢气传感器成本低,技术成熟,适合批量生产,在实际使用中功耗较低,同时它还能测量较低浓度氢气($1 \times 10^{-6} \sim 3\,000 \times 10^{-6}$),已在多个领域实现了良好的商业应用。然而,电化学氢气传感器也存在一些缺点,首先传感器体积偏大,不利于多传感器集成的微型化需求;其次使用寿命较短,常规工况下寿命仅 2~3 a。此外,传感器内部电解液和电极催化剂性能在长时间使用下均会出现下降,在工业测量环境下使用寿命更短,而且对测试环境较为敏感。因此,开发长寿命电解质、电极催化剂和全固态传感器是电化学氢气传感器突破的重点方向^[27-28]。

Lee 等^[29]制造了一款完全封装结构的电化学氢气传感器。该传感器可随环境变化连续测量体积分数 20%~100% 的氢气,且在不同温度($-40 \sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$)、相对湿度(10%~98%)和压力(30~350 kPa)下测试后,传感器响应始终保持稳定,未因环境参数波动出现明显偏差。该结果表明,电化学氢气传感器可以成为燃料电池汽车中氢气检测系统的重要组成部分。

Yi 等^[30]制备了一款 SnO_2 纳米纤维(NF)作为电极材料的电化学氢气传感器。当氢气体积分数小于 250×10^{-6} 时,传感器响应时间随着氢气浓度上涨快速减小,并随着浓度上升,其响应时间减小程度变得缓慢。当氢气体积分数为 $1\,000 \times 10^{-6}$ 时,响应和恢复时间分别为 5 s 和 13 s。团队同时在传感器的稳定和可重复运行上也取得了一定进展。图 4 显示了 NFs 传感器在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、33 d 内对体积分数 100×10^{-6} 、 200×10^{-6} 和 300×10^{-6} 氢气进行响应度测试的情况。由图可见,氢气的响应值具有良好的一致性,

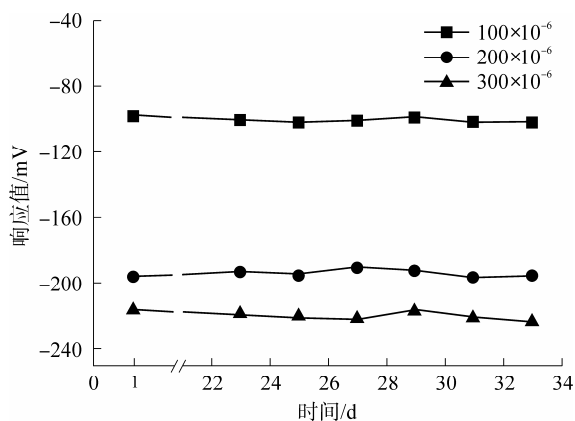


图 4 不同体积分数氢气 33 d 内的连续测试情况^[30]

证明 NFs 传感器具备出色的长期稳定性。图 5 则展示了 2 个不同 NFs 传感器在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的响应情况,由图可见,传感器在每个浓度下的响应值都非常接近,并且差异在 10% 以内,进一步验证了该技术方案在批量制备与性能一致性上的可靠性。

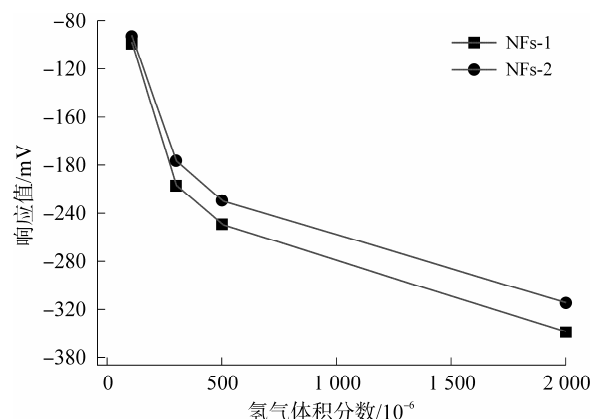


图 5 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 2 个 NFs 传感器的响应情况^[30]

1.3 催化燃烧式氢气传感器

催化燃烧式氢气传感器的工作原理是氢气和氧气在传感器表面发生催化反应后,反应过程中释放的热量会改变传感器内部热敏元件的温度,进而通过热敏电阻的阻值变化来实现氢气的浓度检测。催化燃烧式传感器基本结构如图 6 所示,它主要由催化剂、载体、铂丝线圈和惠斯通电桥构成,且采用“补偿元件+检测元件”的设计以消除环境干扰。其中一个载体表面不涂催化剂,仅作为补偿元件,用于抵消环境温度、湿度等因素对电阻的影响;另一个载体的表面则涂有催化剂(通常是贵金属钯或者铂),作为核心检测元件。当环境中存在氢气时,氢气和空气中氧气在催化剂作用下发生反应放出热量,这部分热量使涂有催化剂部分的载体温度升

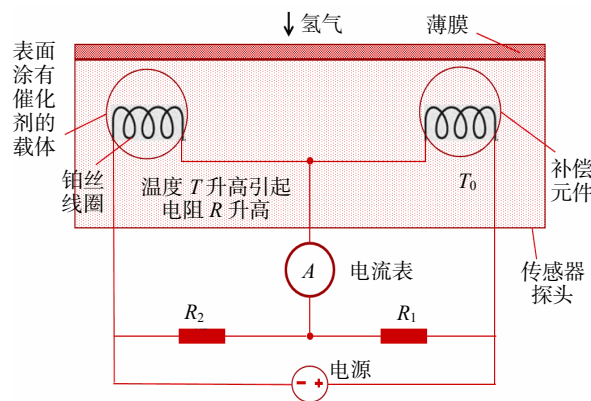


图 6 催化燃烧式氢气传感器示意图

高,进而改变线圈的电阻值,此时即可通过惠斯通电桥对检测元件与补偿元件的线圈阻值差异进行测量,最终实现对氢气浓度的精准定量测定。

催化燃烧式氢气传感器灵敏度高,响应速度快,准确度高,适用于中高浓度氢气检测($1\,000\times 10^{-6}\sim 60\,000\times 10^{-6}$),同时它还具有良好的稳定性和较长的寿命,缺点是选择性较差。但受限于催化燃烧的原理,当甲烷等可燃气体混入时会干扰氢气检测。与此同时,它的能耗也较高,且传统结构的设计不易实现微型化。目前,催化式氢气传感器的开发已明确朝着低功耗、微型化方向发展。在催化式传感器上结合电沉积技术可以解决相关的高功率和低抗震性问题,同时也可以通过调整电沉积参数对涂层的形态特征(包括厚度和孔隙率等)进行有效控制。Zhang等^[31]通过结合电沉积技术开发了一种新型催化式氢气传感器,同时还研究了Pd催化层厚度对其性能的影响,如图7所示。当Pd催化层厚度为 $1.635\,\mu\text{m}$ 时,传感器对氢气检测的灵敏度达到26.8%的峰值。同时,该结构传感器对甲烷和一氧化碳的响应显著降低,器件抗干扰能力获得提升,且传感器还有低功耗(25 mW)和高抗震性等优点。这种无载体传感器的实现有望满足氢能源汽车氢气检测系统的要求。此外,Panama等^[32]在钠钙玻璃上引入具有较厚催化剂层的氢气传感器,

相比于膜平台,钠钙玻璃基板上的传感平台具有低导热性,显示出良好的机械强度,只要催化剂处于活性状态,就可以确保传感器的可靠性。在 $80\,^{\circ}\text{C}$ 下,空气中1%氢气的响应值为9.43%,且响应和恢复时间分别为48 s和75 s,催化燃烧产生的温度增量为 $84\,^{\circ}\text{C}$ 。目前,微机电型催化燃烧传感器能有效地将传感器功耗从几百毫瓦降低到几十毫瓦。Del等^[33]研究的微机电型催化燃烧传感器具有高响应速度和高恢复速度的优点($<12\,\text{s}$),并且其功耗低至4 mW,此研究为催化燃烧式氢气传感器的微型化和低功耗化提供了非常有价值的指导。

目前,催化式氢气传感器已实现商业化,发展也较为成熟,已应用于丰田汽车Mirai等氢能源汽车。该传感器主要用于0.1%~6%浓度区间的氢气检测,但不适合锂电池枝晶生长监控,且工作中会释放大量热量,造成氢气检测时仍有引燃和引爆高浓度氢气的隐患,因此不适合应用在密闭空间。

1.4 光学型氢气传感器

光学型氢气传感器是利用光学特性与氢气浓度相关的物理/化学变化来检测氢气的传感器,目前应用较广的是光纤型氢气传感器,如图8所示。

光纤型氢气传感器具体工作原理:传感器中氢敏材料与光纤相结合,当氢气在氢敏材料处发生反应时,光纤的物理特性随之改变,从而导致光纤光

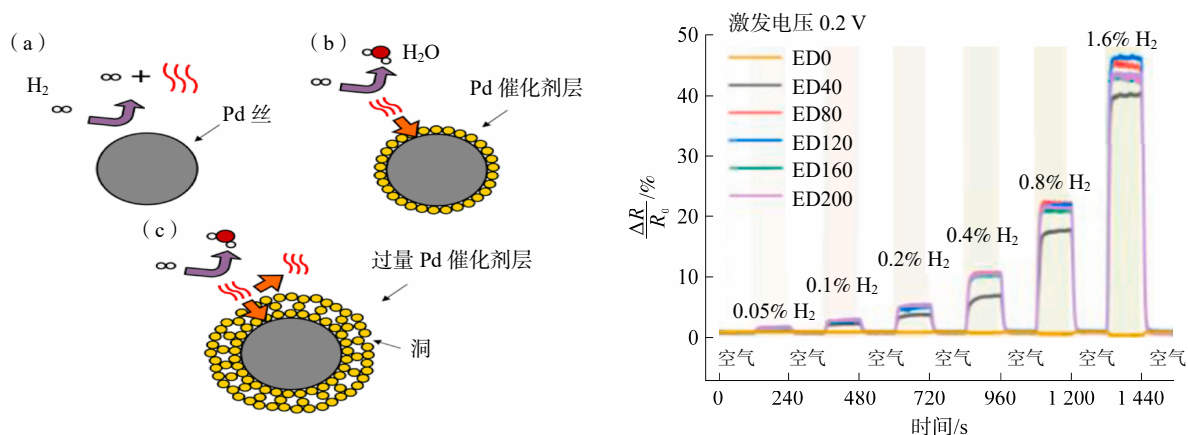


图7 催化燃烧传感器传感机制及浓度时间曲线^[31]

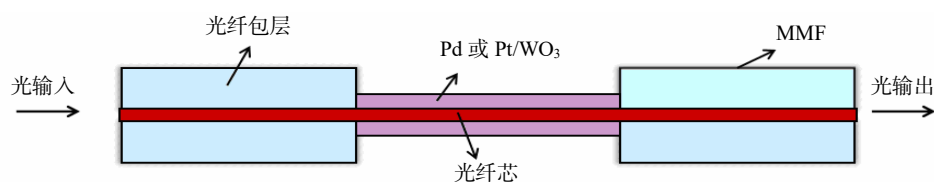


图8 光纤氢气传感器示意图

输出的光学特性发生变化,此时可通过检测相应光学特性物理量的变化来测量氢气浓度的大小。光纤型氢气传感器的氢敏材料通常采用钯、铂或氧化钨,通过光纤技术可以测量薄膜的反射率、透射率来反映氢气浓度的大小。Zhang 等^[34]提出了一种基于热光效应和纳米材料的光纤氢传感器,该传感器通过纳米材料吸收氢分子并触发热效应,使光纤中光栅周期和折射率发生变化,通过实时监测波长漂移就能准确检测出氢气浓度。实验结果表明,该传感器在体积分数 0.5%~3.5%氢气的范围内具有良好灵敏度和稳定性,并且波长漂移与氢气浓度成正比,此时传感器的响应时间和恢复时间在不同浓度下表现出良好重复性和稳定性,如图 9 所示。张莉超等^[35]将镀有钯膜的微悬臂梁探针与单模光纤端面进行组装,设计了一种易制备且低成本的光纤氢气传感器。设计的传感器灵敏度高达 $9.887 \mu\text{m}/\%$,检测下限低至 1.76×10^{-5} ,在 4% 的氢气体积分数下,响应时间约为 178 s。根据之前的研究^[36]报道,响应时间与氢气体积分数有关,并随着氢气体积分数增加,响应时间减少。

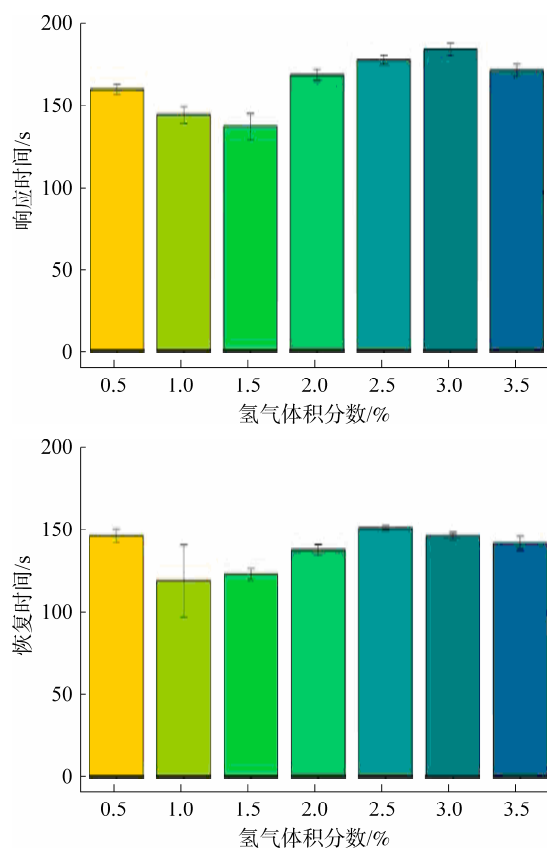


图 9 不同氢气浓度下响应时间和恢复时间的变化规律^[34]

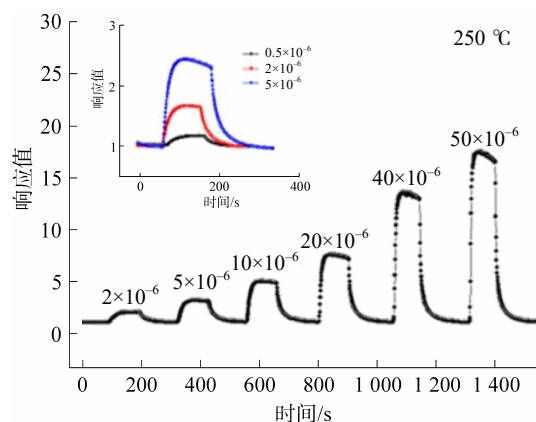
光纤型氢气传感器稳定性好,工艺简单,成本低,可测量较低浓度的氢气。该类传感器利用光信号进行检测,在常温下即可使用,无需加热,避免了爆炸的可能。在某些特殊场景下,还可以实现远距离检测,安全且实用,但缺点是长期稳定性较差、响应时间和恢复时间长,且氢敏材料在使用过程中容易剥落或破损。

1.5 金属氧化物型氢气传感器

金属氧化物氢气传感器通常属于电阻式传感器,其工作原理是金属氧化物材料在氢气气氛下的电阻值会发生变化。当氢气分子(H_2)吸附在金属氧化物表面(SnO_2 、 WO_3 等)时,氢气会发生解离反应。此时氢气分子会解离成吸附态氢原子,然后当氢原子与氢敏材料发生电子转移时,氢敏材料的电阻值发生改变。而当氢气从氢敏材料中脱离时,氢敏材料的电阻也随之恢复。

贵金属钯是较常使用的氢气传感催化材料,金属氧化物与钯复合可以有效提升氢气传感器的灵敏度和选择性。钯和过渡金属氧化物之间会形成电子耗尽层,当电子耗尽层接触到氢气时,电子会返回到金属氧化物处,使金属氧化物电子耗尽层逐渐变薄,进而引起电阻变化。同时,氢气分子被贵金属钯解离为氢原子后会溢出到金属氧化物表面,促进氢与金属氧化物在表面的反应,达到提升氢气传感特性的效果。Duan 等^[37]利用无模板水热法合成了 $\text{Pd-SnO}_2/\text{rGO}$ 三元纳米复合材料。当 Pd 加入体系后,贵金属表面的“溢出”效应提升了材料的电阻变化能力。由于材料能带结构改变,材料中电子会优先转移到 Pd 上,同样会提升材料电阻变化能力。当 Pd 质量分数为 5% 时,复合材料对体积分数 0.5×10^{-6} 氢气的响应时间为 2.4 s,在复杂环境中显示出优异的抗干扰性。Lu 等^[38]采用溶剂热法合成 SnO_2 纳米线,将其滴涂至商用氧化铝基底后,在 350°C 下进行原位退火处理。当在 250°C 下对体积分数 $2 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 氢气进行检测时,传感器表现出灵敏的线性响应能力,如图 10 和图 11 所示。对体积分数 40×10^{-6} 氢气进行检测时,测得响应和恢复时间分别为 15 s 和 31 s。为进一步提高传感器的性能,对掺杂钯的 SnO_2 纳米线进行了深入研究。结果表明,掺杂 Pd 后,传感器工作温度从 250°C 降至 150°C ,体积分数 40×10^{-6} 氢气的检测响应和

恢复时间大幅降至 6 s 和 3 s。



注: 附图是对体积分数 0.5×10^{-6} 、 2×10^{-6} 和 5×10^{-6} 氢气的响应。

图 10 退火 SnO_2 纳米线传感器对不同氢浓度的典型动态响应曲线^[38]

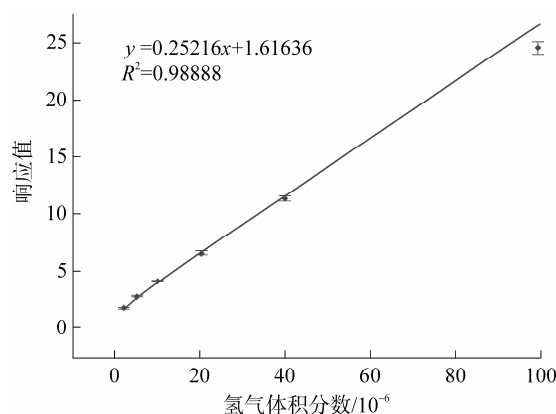


图 11 SnO_2 纳米线传感器响应的线性拟合^[38]

金属氧化物型氢气传感器成本低, 敏感材料品种众多, 响应速度快, 能检测较低浓度的氢气, 同时还具有便携性。其缺点在于器件稳定性和一致性较差, 且对氢气的选择性有待提高。

1.6 金属电阻式氢气传感器

金属氧化物半导体 (MOS) 因其快速的响应时间和较低的检测限而引起了很大关注^[39], 然而, 其较高的工作温度可能引发氢气爆炸^[40]。涂建鑫等^[41]采用溶剂热法合成氢敏材料 Pd 纳米颗粒, 并且以 MEMS 工艺制备出边缘光滑无毛刺的硅基金 (Au) 叉指电极作为传感器的基底, 通过旋涂法得到了基底上具有不同 Pd 纳米颗粒覆盖率的氢气传感器。室温下, 该传感器对体积分数 $500 \times 10^{-6} \sim 2500 \times 10^{-6}$ 氢气表现出较快的响应恢复速度。如图 12 所示, 体积分数 2000×10^{-6} 氢气测试的响应时间 5 s 左右, 恢复时间 25 s 左右, 显示出传感器在检

测氢气泄漏方面有良好发展潜力。Li 等^[42]发现碳材料 (如碳纳米管 (CNT) 和石墨烯) 在室温下具有优异的机械性能和生物相容性, 能够用于可穿戴气体传感器。此外, 还通过将钯六方纳米粒子/碳纳米管/纤维素纳米晶体集成到滤纸上 (P-Pd HNP/CNTs/CNCs), 开发出在室温下 (25 °C) 具有快速响应的可穿戴氢气传感器。室温下, 该材料对体积分数 0.5% 氢气显示出快速响应/恢复时间 (3 s/3 s), 并可检测出体积分数 50×10^{-6} 的氢气, 如图 13 所示。此外, 它还展现出优异的可穿戴传感耐久性, 包括耐冷冻、耐压和传感材料剥离。

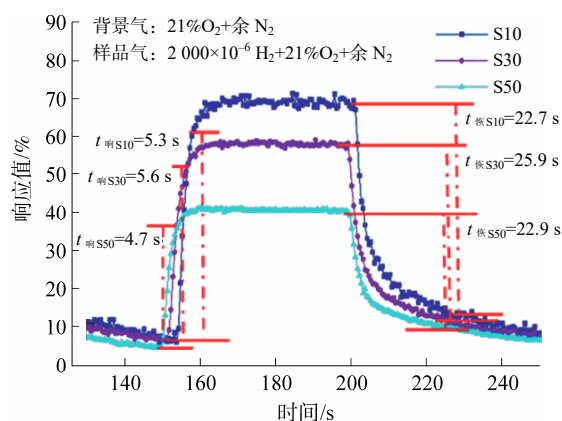


图 12 3 个样品测试氢气的响应/恢复时间^[41]

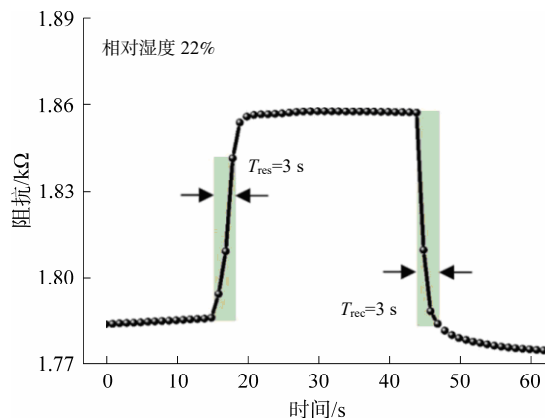


图 13 可穿戴传感器对 0.5% 氢气的响应/恢复时间^[42]

1.7 功函数型氢气传感器

1.7.1 二极管型氢气传感器

氮化镓 (GaN) 是 III-V 族化合物, 作为第三代半导体材料, 有较宽的带隙 (3.4 eV), 此特性给 GaN 带来了优秀的热稳定性。不仅如此, 氮化镓还拥有良好的化学稳定性, 能在较为恶劣的化学环境下存在。即便在强碱性溶液中, 氮化镓被刻蚀速率也较低^[43-44]。同时, 良好的热稳定性能让部分基于

氮化镓的电子设备能在 500 °C 下稳定工作。Luther 等^[45]于 20 世纪末首次发明了 Pt/GaN 肖特基二极管型气体传感器。在 Pt 催化作用下,分子态的氢气被解离扩散到 Pt-GaN 界面变为氢原子;随着氢气浓度的增加,越来越多的氢原子积累在 Pt-GaN 界面,改变了金属栅极的功函数,使肖特基势垒发生改变,此时即可通过检测电流—电压曲线以获得响应信号。Cho 等^[46]采用 SiNM 转移技术在塑料基底上制备了一种基于柔性 Pd/Si 肖特基二极管的氢气传感器,响应测试结果表明,该传感器有较高的氢气灵敏度,如图 14 所示。此外,传感器还进行了反复弯曲测试,以测试其作为柔性传感器所应具备的机械耐久性。结果表明,即使经过 10^4 次反复弯曲,该传感器仍能保持较高的灵敏度和稳定的器件性能,如图 15 所示。

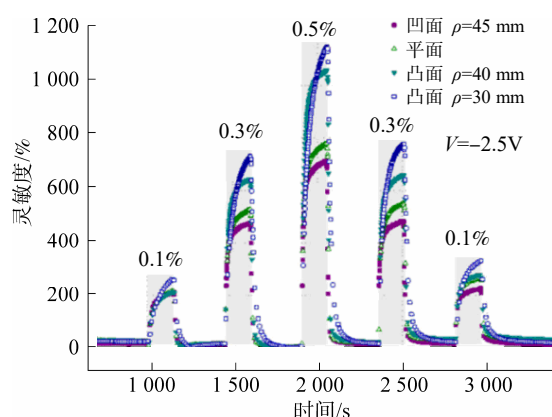


图 14 传感器氢气响应测试^[46]

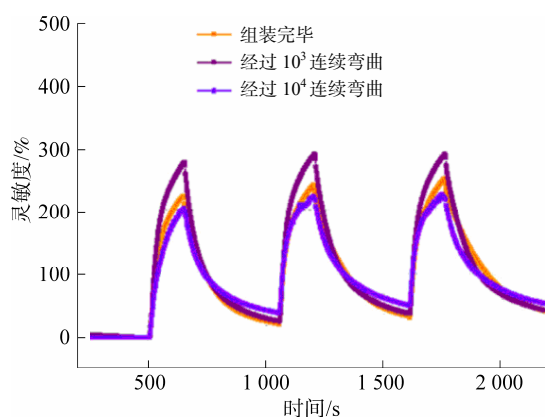


图 15 传感器反复弯曲测试^[46]

由于二极管的反向电流和势垒高度呈指数关系,因此二极管型气体传感器具有高灵敏度和低检测下限。但氢气敏感电极也只是信号收集电极,经过多次检测氢气后,金属界面接触发生变化,从而

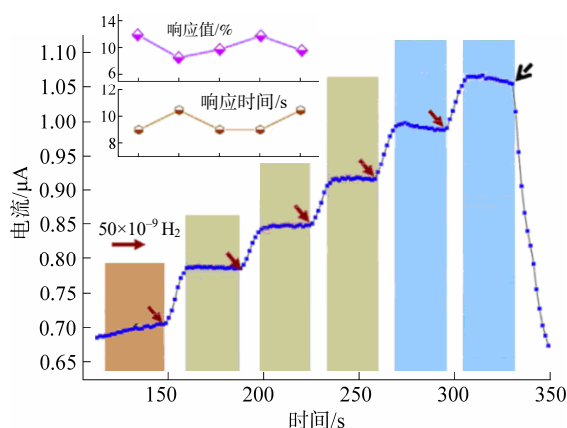
影响信号稳定性和可靠性^[45]。

1.7.2 AlGaIn/GaN HEMT 型氢气传感器

相比二极管型氢气传感器,采用 AlGaIn/GaN HEMT 结构设计的场效应晶体管型氢气传感器表现出更优异的响应性能。AlGaIn 与 GaN 结合后会形成 AlGaIn/GaN 异质结结构,会在该界面处产生自发极化效应和压电极化效应,使得靠近 GaN 的三角形势阱中形成具有高迁移率、高载流子浓度、较强抗外界干扰能力的二维电子气(2-DEG),约为 $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。这些特性使二维电子气适用于纳米技术、高性能电子器件等方面的应用^[47-48]。

近年来,国内外研究团队围绕如何有效利用 AlGaIn/GaN HEMT 独特的二维电子气通道进行气体检测方面展开了大量研究,主要方法是通过使用不同的栅极气敏材料来修饰传感器,并利用场效应晶体管对 HEMT 的二维电子沟道进行开关式调控。Schalwig 等^[49]是最早一批报道栅极采用贵金属材料修饰的 AlGaIn/GaN HEMT 氢气传感器的团队,虽然响应度和响应时间还不太理想,但仍在 2002 年证实了用钯(Pd)、铂(Pt)等贵金属修饰栅极的可行性。Baik 等^[50]为提高器件性能,在栅极上利用纳米级 Pt 进行修饰,通过增加栅极与氢气接触面积,材料有了更多活性位点对氢气进行吸附,此举显著改善了漏极电流并提高了氢气的响应值。Sun 等^[51]用 2 nm Pd 作为气敏材料,而 2 nm 的临界厚度有效缩短了氢原子的扩散距离,因此提高了氢气传感器在低浓度下的性能。结果显示,传感器在 120 °C 下能检测到体积分数 50×10^{-9} 的氢气,响应值为 9.6%,响应时间约为 9.5 s,且在低浓度范围内具有高分辨率,如图 16 所示。体积分数 500×10^{-6} 氢气平均响应和恢复时间分别为 6.84 s 和 106.13 s。Pd 作为栅极调控的 HEMT 器件对氢气的响应度是氢气的 1973 倍,因此采用 Pd 作为栅极材料时,传感器对氢气选择性更好。与此同时,如图 17 所示,由 AlGaIn/GaN HEMT 器件在放置 30、40、85 d 后对体积分数 200×10^{-6} 氢气测试来看,HEMT 器件的稳定性也表现良好^[51]。

Nguyen 等^[52]基于 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)的氢气传感器,在传感器栅极区域使用 10 nm Pd 催化剂层进行功能化,并在 Pd 层顶部沉积一层薄 WO_3 层增强了传感器的选择性。



注: 附图显示氢气体积分数每增加 50×10^{-9} 时, 传感器的响应值和响应时间, 表明在低浓度范围内具有高分辨率。

图 16 氢气传感器在低浓度下的检测情况^[51]

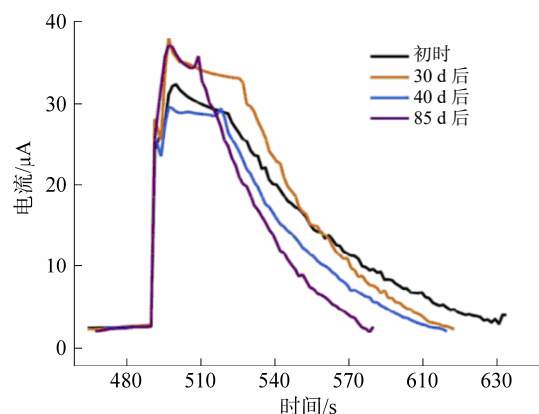


图 17 HEMT 对氢气 85 d 内的稳定性测试^[51]

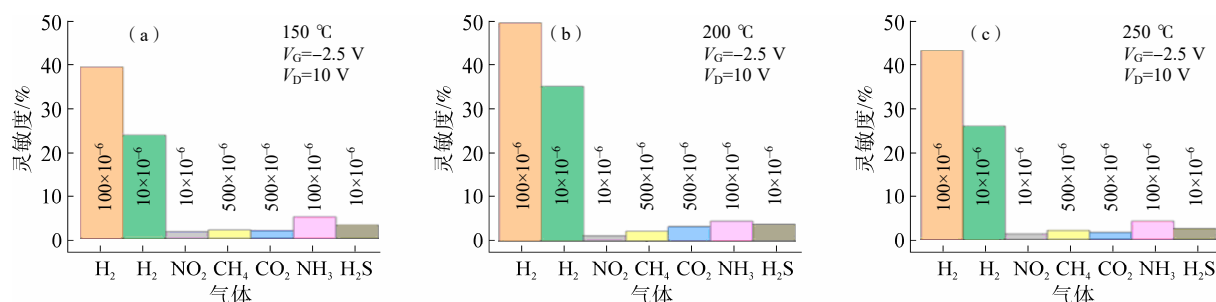


图 18 传感器在 150、200、250 °C 下的选择性表现^[52]

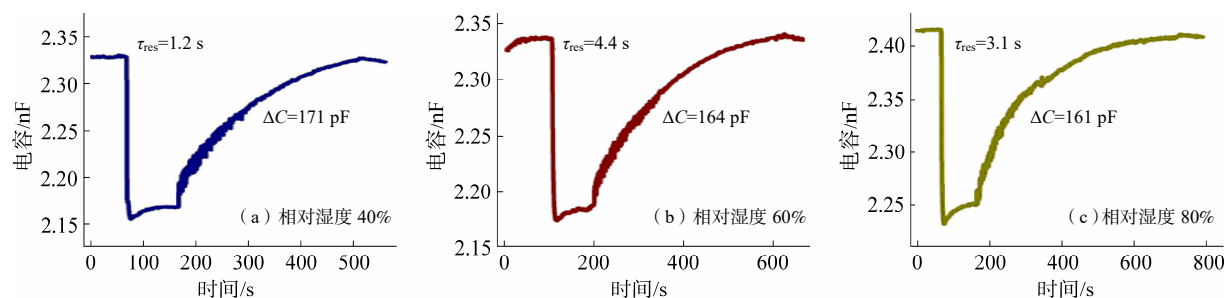


图 19 Pd-GaN/Si 电容式传感器在不同相对湿度 (40%、60%、80%)、体积分数 1000×10^{-6} 氢气、70 °C 下的动态曲线^[53]

在 150~250 °C 区间, 传感器对体积分数 10×10^{-6} 氢气的响应比 NO_2 、 CH_4 、 CO_2 、 NH_3 、 H_2S 大 8 倍, 如图 18 所示。

1.7.3 电容式氢气传感器

目前研究的主流固态氢传感器普遍存在一个共同缺陷——工作过程中可能产生电火花, 此缺陷在测量高浓度氢气时具有巨大的安全隐患。因此, 开发一种适用于氢气传感器的无源器件已成为解决该安全问题的关键需求。无源器件核心优势体现在两方面: 一方面, 其不消耗电能, 可以有效降低传感器系统的功耗; 另一方面, 因不依赖电能驱动, 根本上避免了可能产生会点燃含氢气体的电火花。其中电容式传感器是典型代表, 其优点是工作时不会产生电火花, 能耗低, 易于与其他设备集成; 更重要的是不存在不必要的静态功耗, 特别适用于如无线传感器网络等能量受限场合中。Zhong 团队^[53]设计并展示了一种基于 GaN 蜂窝纳米网络的电容式气体传感器, 以 10 nm Pd 层作为传感电极用于氢气检测。如图 19 所示, 实验测试表明, 这款 Pd-GaN/Si 电容式气体传感器在 70 °C 相对低温下, 对体积分数 1000×10^{-6} 氢气响应时间可缩短到 1.2 s。此外, 电容式传感器对 CH_4 、 NO_2 和常见的挥发性有机化合物 (VOCs) 气体表现出可忽略的响应, 有效避免了干扰气体对氢气检测结果的影响。综合

表 1 各类传感器性能总结

传感器类型	检测浓度范围	响应时间/s	恢复时间/s	使用寿命	特点
热导式	0.25%~100%	1.5	3.8	5~10 a	无氧环境工作，量程广，结构简单，受温漂影响大，无法检测低浓度氢气 ^[25]
电化学式	$1\times10^{-6}\sim3\,000\times10^{-6}$	5~13	10~30	2~3 a	低功耗，可在室温工作，适合低浓度检测，体积较大，寿命较短 ^[29-30]
催化燃烧式	$1\,000\times10^{-6}\sim60\,000\times10^{-6}$	1	3	较长	中高浓度检测，稳定性好，响应快，存在引燃的隐患 ^[31-32]
光学型	10^{-9} 级别	178		一般	低浓度检测，安全性高，长期稳定性差 ^[34-36]
金属氧化物型	$0.5\times10^{-6}\sim100\times10^{-6}$	6	31	一般	低成本，低浓度检测，手工制作一致性差 ^[37-38]
金属电阻式	$50\times10^{-6}\sim2\,500\times10^{-6}$	3	3	一般	室温工作，可穿戴，成本高，选择性差 ^[41-42]
功函数型	$50\times10^{-9}\sim1\,000\times10^{-6}$	<10	80	>10 a	低浓度检测，低功耗，高分辨率，须进行温度校准 ^[51-53]

注：检测浓度指氢气的体积分数。

来看，电容式传感器在响应速度、工作温度、功耗和安全性方面具有诸多优势，且易于与其他传感器集成，其小型化和智能化特性在物联网发展中具有巨大潜力。

表 1 对当前常见氢气传感器的性能及特点进行了总结。根据检测原理的不同，这些传感器在性能指标上有着各自的优势。热导式氢气传感器测量范围大，尤其适用于高浓度氢气检测，但检测不了低浓度氢气。电化学式氢气传感器具有良好的低浓度检测性能和优异的稳定性，已实现了广泛的商业应用，但体积较大，寿命较短。金属氧化物氢气传感器成本低、敏感材料品种众多且可检测低浓度氢气，但稳定性和一致性方面面临较大挑战。催化燃烧式传感器稳定性好，检测速度快，也已得到了良好的商业应用，但不适合检测低浓度氢气。功函数型传感器可通过标准半导体工艺制备，具有良好的一致性和稳定性，寿命长，功耗低，适合低浓度氢气检测。各类氢气传感器均有明确的适用场景与技术边界，实际应用中须根据检测浓度范围、环境条件、集成需求等因素，选择适配的传感器类型，这也为后续氢气传感器的技术优化创新提供了参考依据。

2 结语、挑战和展望

氢气具有无色无味且易燃易爆的性质，在泄漏时难以被及时发现，导致发生安全事故。针对检测原理的不同，本文介绍了氢气检测传感器的种类及

其应用进展。各个领域对氢气检测浓度要求大不一样，比如锂电池枝晶生长监控需要亚百万分之一到数十百万分之一体积分数的量程，而氢能源汽车的量程要求仅为 0~6%。能测中高浓度氢气的传感器则往往很难测量数十百万分之一体积分数的低浓度氢气，而能测量低浓度氢气的传感器在检测高浓度时则往往会出现饱和现象。因此，须根据具体应用场合有针对性地研究开发相应的氢气传感器。

近些年锂电池行业快速发展，对电池枝晶生长监控需求迫切，对枝晶生长时释放的氢气浓度进行检测是提升电池安全性的关键手段。然而，枝晶生长早期的氢气浓度很低，体积分数往往只有百万分之几，经稀释到整个电池包后浓度更低，因此对传感器的低浓度氢气检测能力提出了极高要求。目前具备百万分之几体积分数的氢气检测能力的只有电化学和金属氧化物型传感器，但两者均存在相应的短板。电化学氢气传感器性能稳定，但由于其电解质为消耗品，平均寿命只有 2~3 a，无法满足该行业寿命不少于 10 a 的要求，且体积较大，不易实现多传感器集成。金属氧化物氢气传感器虽寿命较长，低浓度检测性能良好，但敏感材料涂覆到基底成膜时的均匀性难以控制，导致产品一致性存在问题，且温度和湿度变化造成的基线漂移也是一个制约其应用的重要因素。相比之下，功函数型氢气传感器不仅具备低浓度检测能力，还可通过标准半导体工艺进行量产，产品具有良好的一致性，已成为锂电池行业氢气传感器发展的一个重要方向。随着

电解氢行业的快速发展,相关设备和工厂都需要检测氧气中的氢气浓度,而该场合下的氧气浓度很高,对传感器的抗氧气干扰能力又提出了新要求,须针对性地开发具有高抗氧气干扰能力的新型氢气传感器。此外,上述固态气体传感器的选择性普遍不太好,当存在未知干扰气体时,可能导致高的误报率;急剧的温湿度等环境变化也同样可能导致基线漂移,进而使准确率出现明显下降。为了解决这些问题,须积极融合人工智能,通过传感器阵列的数据采集和模式识别技术大幅增强选择性,并通过特定算法消除或减少基线漂移的影响,确保传感器在复杂环境下的检测准确性和长期可靠性。

随着“双碳”战略目标工作的深入推进,高可靠性、长寿命、低功耗的智能氢气传感器已成为传感器技术领域研究热点。未来,氢气传感器的产业化发展与多学科协同创新须在关键材料、原理机制、制备工艺和智能化应用方面不断深化,以满足能源安全、环境监测和工业应用等领域的实际需求,加快推动氢能新质生产力的发展。

参考文献:

- [1] 王虹,梁雪莲,陈庆玺.氢能产业政策研究[J].煤气与热力,2020,40(7):27-31.
- [2] BUTTNER W J, POST M B, BURGESS R, et al. An overview of hydrogen safety sensors and requirements[J]. International journal of hydrogen energy, 2011, 36(3): 2462-2470.
- [3] 程一步. 2022 年国内氢能产业发展动态及新政策对产业影响浅析[J]. 石油石化绿色低碳, 2022, 7(5):1-6.
- [4] 何青,孟照鑫,沈轶,等. “双碳”目标下我国氢能政策分析与思考[J]. 热力发电, 2021, 50(11):27-36.
- [5] 杨曜光. 浅谈氢能及制氢的应用技术现状及发展趋势[J]. 新型工业化, 2020, 10(6):127-128.
- [6] 高慧,杨艳,赵旭,等. 国内外氢能产业发展现状与思考[J]. 国际石油经济, 2019, 27(4):9-17.
- [7] 雷超,李韬. 碳中和背景下氢能利用关键技术及发展现状[J]. 发电技术, 2021, 42(2):207-217.
- [8] WINTER C J. Hydrogen energy-abundant, efficient, clean: a debate over the energy-system-of-change[J]. International journal of hydrogen energy, 2009, 34(14): S1-S52.
- [9] 阳月,杨明,陆晖. 我国氢能产业发展综述[J]. 红水河, 2025, 44(1):54-57, 88.
- [10] 沈丹丹,高顶云,潘相敏. 氢能源利用安全性综述[J]. 上海节能, 2020(11):1236-1246.
- [11] CAO W G, LI W J, ZHANG L, et al. Flame characteristics of premixed H_2 -air mixtures explosion venting in a spherical container through a duct[J]. International journal of hydrogen energy, 2021, 46(52): 26693-26707.
- [12] DWIVEDI S K, VISHWAKARMA M. Hydrogen embrittlement in different materials: a review[J]. International journal of hydrogen energy, 2018, 43(46): 21603-21616.
- [13] KOYAMA M, AKIYAMA E, LEE Y K, et al. Overview of hydrogen embrittlement in high-Mn steels[J]. International journal of hydrogen energy, 2017, 42(17): 12706-12723.
- [14] SÁNCHEZ A L, WILLIAMS F A. Recent advances in understanding of flammability characteristics of hydrogen [J]. Progress in energy and combustion science, 2014, 41:1-55.
- [15] CAO W G, LI W J, YU S, et al. Explosion venting hazards of temperature effects and pressure characteristics for premixed hydrogen-air mixtures in a spherical container[J]. Fuel, 2021, 290:120034.
- [16] LHUILLIER C, BREQUIGNY P, CONTINO F, et al. Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions[J]. Fuel, 2020, 269: 117448.
- [17] HAN X L, WANG Z H, COSTA M, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH_3 /air, NH_3/H_2 /air, NH_3/CO /air and NH_3/CH_4 /air premixed flames[J]. Combustion and flame, 2019, 206: 214-226.
- [18] 郑津洋,刘自亮,花争立,等. 氢安全研究现状及面临的挑战[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1):106-115.
- [19] 闫晓,闫军芬,陈珂,等. 氢泄漏与扩散研究及加氢站安全防护[J]. 能源与节能, 2022(7):6-10, 40.
- [20] 张来斌,胡瑾秋,张曦月,等. 氢能制-储-运安全与应急保障技术现状与发展趋势[J]. 石油科学通报, 2021, 6(2):167-180.
- [21] JIN Y, ZHENG Z, WEI D, et al. Detection of micro-scale Li dendrite via H_2 gas capture for early safety warning[J]. Joule, 2020, 4(8):1714-1729.
- [22] BOON-BRETT L, BOUSEK J, BLACK G, et al. Identifying performance gaps in hydrogen safety sensor technology for automotive and stationary applications[J]. International journal of hydrogen energy, 2010, 35(1): 373-384.
- [23] HÜBERT T, BOON-BRETT L, PALMISANO V, et al.

- Developments in gas sensor technology for hydrogen safety[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2014, 39(35):20474-20483.
- [24] BERNDT D, MUGGLI J, WITTEW F, et al. MEMS-based thermal conductivity sensor for hydrogen gas detection in automotive applications[J]. *Sensors and actuators A: physical*, 2020, 305:111670.
- [25] WU Z P, ZHANG X D, CHEN L N, et al. Ultra-low-power, extremely stable, highly linear-response thermal conductivity sensor based on a suspended device with single bare Pt nanowire[J]. *ACS sensors*, 2024, 9(9): 4721-4730.
- [26] HÜBERT T, BOON-BRETT L, BLACK G, et al. Hydrogen sensor: a review[J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2011, 157(2):329-352.
- [27] GORBOVA E, BALKOURANI G, MOLOCHAS C, et al. Brief review on high-temperature electrochemical hydrogen sensors[J]. *Catalysts*, 2022, 12(12):1647.
- [28] WANG C, YANG J X, LI J L, et al. Solid-state electrochemical hydrogen sensors: a review[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2023, 48(80): 31377-31391.
- [29] LEE E G, JUNG S W, JO Y E, et al. Electrochemical hydrogen sensor assembly for monitoring high-concentration hydrogen[J]. *Physica status solidi*, 2022, 219(20):2100782.
- [30] YI J X, ZHANG H, ZHANG Z B, et al. Hierarchical porous hollow SnO₂ nanofiber sensing electrode for high performance potentiometric H₂ sensor[J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2018, 268:456-464.
- [31] ZHANG W B, ZOU J, SUN J Y, et al. Fabrication and sensing performance of carrier-free catalytic combustion hydrogen sensors based on electrodeposition method[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 61:1356-1364.
- [32] PANAMA G, JO M, SHIM S S, et al. Hydrogen sensor with a thick catalyst layer anchored on soda-lime glass[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 55:875-881.
- [33] DEL O H D, CHO I, YANG H, et al. Pt Nanostructures fabricated by local hydrothermal synthesis for low-power catalytic-combustion hydrogen sensors[J]. *ACS applied nano materials*, 2021, 4(1):7-12.
- [34] ZHANG X H, GUO L, WEI X R, et al. Thermo-optic nanomaterial fiber hydrogen sensor[J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(6):440.
- [35] 张莉超, 黄嘉斌, 徐磊, 等. 基于镀钯微悬臂梁探针的光纤氢气传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(23): 123-129.
- [36] XIONG C, ZHOU J T, LIAO C R, et al. Fiber-tip polymer microcantilever for fast and highly sensitive hydrogen measurement[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2020, 12(29):33163-33172.
- [37] DUAN P Y, DUAN Q L, PENG Q K, et al. Design of ultrasensitive gas sensor based on self-assembled Pd-SnO₂/rGO porous ternary nanocomposites for ppb-level hydrogen[J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2022, 369:132280.
- [38] LU S H, ZHANG Y Z, LIU J Y, et al. Sensitive H₂ gas sensors based on SnO₂ nanowires[J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2021, 345:130334.
- [39] BADIE C, LEE J H, MIRZAEI A, et al. Enhanced sensitivity towards hydrogen by a TiN interlayer in Pd-decorated SnO₂ nanowires[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2023, 11(23):12202-12213.
- [40] LI Z X, XING X X, FENG D L, et al. Nitrogen-doped carbon microfibers decorated with palladium and palladium oxide nanoparticles for high-concentration hydrogen sensing[J]. *Ceramics international*, 2024, 50(12):21519-21525.
- [41] 涂建鑫, 邹杰, 孙靖远, 等. 基于钯纳米颗粒导电沟道的室温型氢气传感器的研究[J]. *传感技术学报*, 2024, 37(1):16-21.
- [42] LI Z, FENG D, ZHANG Z, et al. Palladium hexagonal nanoparticles/carbon nanotubes/cellulose nanocrystals integrated over paper for wearable hydrogen sensing with fast response by bridging behavior[J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2025, 427:137153.
- [43] ZHANG M X, ZHAO C H, GONG H M, et al. Porous GaN submicron rods for gas sensor with high sensitivity and excellent stability at high temperature[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, 11(36):33124-33131.
- [44] ZHONG A H, SASAKI T, FAN P, et al. Integrated H₂ nano-sensor array on GaN honeycomb nanonetwork fabricated by MEMS-based technology[J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2018, 255:2886-2893.
- [45] LUTHER B P, WOLTER S D, MOHNEY S E. High temperature Pt Schottky diode gas sensors on n-type GaN[J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 1999, 56(1): 164-168.
- [46] CHO M, YUN J, KWON D, et al. High-sensitivity and low-power flexible Schottky hydrogen sensor based on silicon nanomembrane[J]. *ACS applied materials &*

- interfaces, 2018, 10(15):12870-12877.
- [47] SHARMA N, PANDEY V, GUPTA A, et al. Recent progress on group III nitride nanostructure-based gas sensors[J]. Journal of materials chemistry C, 2022, 10(34): 11219-12157.
- [48] SHEN L, HEIKMAN S, MORAN B, et al. AlGaIn/AlN/GaN high-power microwave HEMT[J]. IEEE electron device letters, 2001, 22(10):457-459.
- [49] SCHALWIG J, MÜLLER G, EICKHOFF M, et al. Gas sensitive GaN/AlGaIn-heterostructures[J]. Sensors and actuators B: chemical, 2002, 87(3):425-430.
- [50] BAIK K H, JUNG S, CHO C Y, et al. AlGaIn/GaN heterostructure based Pt nanonetwork Schottky diode with water-blocking layer[J]. Sensors and actuators B: chemical, 2020, 317:128234.
- [51] SUN A F, YU H M, ZHOU Y, et al. Pd gated AlGaIn/GaN high electron mobility transistor for ppb level hydrogen gas detection[J]. International journal of hydrogen energy, 2022, 47(39):17494-17503.
- [52] NGUYEN V C, CHA H, KIM H. High selectivity hydrogen gas sensor based on $\text{WO}_3/\text{Pd-AlGaIn/GaN}$ HEMTs[J]. Sensors, 2023, 23(7):3465.
- [53] YU H M, SUN A F, LIU Y Q, et al. Capacitive sensor based on GaN honeycomb nanonetwork for ultrafast and low temperature hydrogen gas detection[J]. Sensors and actuators B: chemical, 2021, 346:130488.

Recent progress and analysis of hydrogen sensors

ZHONG Aihua, ZHOU Huanxin, GAO Yue

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: As a clean energy, hydrogen energy holds significant strategic importance under the national melody of energy conservation and emission reduction. Its clean and efficient characteristics establish its importance in the future energy system. However, the highly flammable, colorless, and odorless properties of hydrogen pose certain potential safety risks in practical applications. Therefore, hydrogen detection technology has become a key technology to ensure safety and promote the development of hydrogen energy industry. Aiming at the development of hydrogen sensors and their related technologies in recent years, this paper mainly discusses the research progress of thermal conductivity type, catalytic combustion type, electrochemical type, optical type, and work function type of hydrogen sensors. Meanwhile, it also introduces the status and development of hydrogen leakage detection technology, and explores the urgent problems to be solved and the future development direction of hydrogen detection technology.

Keywords: hydrogen sensor; types of sensors; hydrogen detection

(责任编辑 章践立)