

• 燃料电池汽车技术专题 •

燃料电池汽车用氢气浓度传感器技术现状 及发展趋势*

李浩^{1,2} 陈向阳^{1,4} 郝冬^{1,4} 卫芃男^{1,3} 杨子荣^{1,4}

(1. 中汽研新能源汽车检验中心(天津)有限公司,天津 300399; 2. 山东理工大学,淄博 255049; 3. 同济大学,上海 201804; 4. 中国汽车技术研究中心有限公司,天津 300399)

【摘要】对燃料电池汽车用氢气传感器的技术要求进行分析,并对各类车载氢气传感器的工作原理和特点进行研究,对比了现阶段主流氢气浓度传感器的性能和参数,对氢气浓度传感器的发展现状进行了综述和分析,并结合行业发展需求对氢气浓度传感器的技术发展趋势进行了展望。

关键词: 氢气浓度传感器 燃料电池 技术发展趋势

中图分类号:TM911.4 文献标志码:A DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230362

Development Status and Trends of Hydrogen Concentration Sensors for Fuel Cell Vehicles

Li Hao^{1,2}, Chen Xiangyang^{1,4}, Hao Dong^{1,4}, Wei Pengnan^{1,3}, Yang Zirong^{1,4}

(1. CATARC New Energy Vehicle Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300399; 2. Shandong University of Technology, Zibo 255049; 3. Tongji University, Shanghai 201804; 4. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300399)

【Abstract】This article analyzed the technical requirements of hydrogen sensors used in fuel cell vehicles, and studied the working principles, characteristics of various vehicular hydrogen sensors, compared the performance and parameters of mainstream hydrogen concentration sensors at present, summarized and analyzed the current development status of hydrogen concentration sensors. The technical development trend of hydrogen concentration sensors was predicted based on industry development needs.

Key words: Hydrogen concentration sensors, Fuel cells, Technological development trend

【引用格式】李浩,陈向阳,郝冬,等.燃料电池汽车用氢气浓度传感器技术现状及发展趋势[J].汽车工程师,2024(3): 21-27.

LI H, CHEN X Y, HAO D, et al. Development Status and Trends of Hydrogen Concentration Sensors for Fuel Cell Vehicles[J]. Automotive Engineer, 2024(3): 21-27.

1 前言

氢气浓度超过4%时即存在爆炸的风险^[1]。因此,在氢气的使用过程中,需确保其浓度在安全范围内^[2]。氢燃料电池汽车在不同行驶工况下,受可能发生的碰撞、撞击、腐蚀及温度和压力影响,燃

料电池系统部件(如氢气储气瓶、管道、阀门等)可能出现裂纹、损坏或密封不良等情况,最终都可能导致氢气泄漏^[3]。整车中燃料电池电堆、动力电池等部件所在空间相对密闭,若发生氢气泄漏,更容易引发燃烧或爆炸等事故,造成严重后果^[4]。因此,通过氢气传感器来检测氢气泄漏的浓度以降

*基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2501500)。

第一作者:李浩(2000—),男,河北人,硕士在读,研究方向为燃料电池汽车安全技术,17659936128@163.com。

通信作者:郝冬(1988—),男,研究方向为燃料电池关键部件测评技术,haodong@catarc.ac.cn。

低风险,对于推动氢燃料电池汽车的发展具有重要意义^[5]。

车载氢气传感器可监测氢燃料电池汽车内的氢气浓度,浓度超过安全限值时,整车发出报警信号^[6]。相比于传统的氢气检测仪器,车载氢气传感器具有体积小、可在线测量和响应时间短等优势,可快速准确地测量氢气浓度。

2 车载氢气浓度传感器的技术要求

燃料电池汽车上需合理布置氢气浓度传感器,传感器过多会增加成本,并提高产生电火花的风险,传感器过少则可能无法准确检测氢气的浓度。此外,布置时要选择多种类型的氢气浓度传感器,以便检测时覆盖多级别氢气浓度范围^[7]。

图1所示为某款车型的氢气浓度传感器安装位置,所有传感器信号均需直接发送到组合仪表的醒目位置^[8]。目前,燃料电池汽车多将燃料电池发动机安装在前机舱,且乘员舱不需进行氢气浓度检测,所以氢气浓度传感器多安装在车载氢系统和前机舱部位。

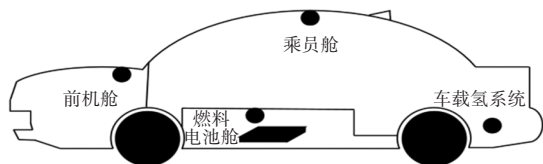


图1 氢气浓度传感器布置位置

车载氢气传感器的设计考虑到了汽车使用氢气作为燃料的特殊要求,除满足车载器件安装和集成便捷、持久耐用、节能和环保等普适性要求外,还应满足以下要求:

a. 高灵敏度和准确性^[9]并可自动报警^[10]。需具备高灵敏度,能够对低浓度的氢气进行快速、准确检测。当封闭空间或半封闭空间中氢气体积浓度不低于 $2.0\% \pm 1.0\%$ 时,应发出警告;当封闭空间或半封闭空间中氢气体积浓度不低于 $3.0\% \pm 1.0\%$ 时,应立即自动关断氢气供应,如果车辆装有多个储气瓶,允许仅关断存在氢泄漏的储气瓶的氢气供应。

b. 快速响应^[11]和稳定性。需能够及时响应氢气浓度的变化,具有较短的启动时间、响应时间和恢复时间,且性能稳定,能够在长期运行中保持测量结果准确、可靠。

c. 检测范围广且误差小^[12]。需具备宽广的工作范围,能够适应不同环境和工况下的氢气浓度变化,且测量误差应不大于满量程的 $\pm 1\%$ 。

d. 高耐受能力^[13]。除能够耐受汽车工作环境中的高温、低温、高湿度、振动等恶劣条件外,还应能耐受高浓度氢气冲击。

e. 预防传感器短暂失效^[14]。预防硅中毒,防止有机硅等化学物质损坏传感器,缩短使用寿命、降低传感器灵敏度,且催化燃烧型传感器需预防高浓度条件下的灵敏度下降。

3 车载氢气浓度传感器的种类及特点

目前,车载氢气浓度传感器主要包括催化燃烧型、电化学型、电学型、光学型、热导型和声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)型,如表1所示。

表1 氢气浓度传感器分类

类型	工作原理(材料)	敏感信号
催化燃烧型	催化燃烧 ^[15]	温度/电阻
电化学型	电流法 ^[16]	电流
	电压法 ^[17]	电压
电学型	半导体金属氧化物型 ^[18]	电阻
	非半导体(金属或合金)型 ^[19]	物理化学性质
光学型	光吸收特性 ^[20]	光学物理性质
热导型	热导 ^[21]	温度/电阻/电压
声表面波型	声波学 ^[22]	频率/波数/时间

对于催化燃烧型氢气浓度传感器,氢气与氧气在催化剂条件下较易发生反应并释放热量,导致测试元件发热,根据换热量可以计算出氢气浓度^[23]。Li等^[24]研究表明,在多孔AlO₃基板上丝网印刷的铂电极催化燃烧型氢气浓度传感器具有高灵敏度(体积浓度每变化1百分点,输出电压变化约30 mV)和较好的稳定性。Jiang等人^[25]采用微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术制备了一种惠斯通电桥结构的PdNi薄膜氢气浓度传感器,在50℃条件下,氢气浓度的检测下限为 10×10^{-6} ,对应的响应电压为600 μV,检测氢气浓度范围为 $10 \times 10^{-6} \sim 4\ 000 \times 10^{-6}$ 时的响应时间超过2 min。该类型氢气浓度传感器小巧、灵敏度高,响应时间短且稳定可靠,但工作时温度高,催化剂可能被氧化,存在引爆风险^[26]。

电化学型氢气浓度传感器相当于一个燃料单电池,发生反应时电极的电势发生变化,电路的电流与氢气的浓度成线性关系,从而可采用电流表征氢气浓度。Shao等^[27]研制了一种传感电极为纳米ZnO和质子导体为CaZr电解液的电流型氢气浓度

传感器。董汉鹏等^[28]研制了一种高分子电解质三电极氢气浓度传感器,灵敏度可达到 $4\text{ A}/(100\times 10^{-6})$ 。Jung等^[29]开发了一种高浓度电压型氢气浓度传感器,可在20%~99.99%氢气浓度范围内工作,不受环境温度、湿度、压力等因素的影响。电化学型氢气浓度传感器灵敏度高、测量的浓度范围宽、稳定性好且寿命长,但延迟时间较长^[30]。

对于半导体金属氧化物型氢气浓度传感器,当氧化性气体吸附在材料表面时,该类传感器可捕获电子,导致电阻增大,当还原性气体吸附到材料表面时,该类传感器将释放电子给材料,从而导致电阻下降^[31]。Rashid等^[32]制造了一种在ZnO纳米带上覆盖8 nm厚钌纳米膜的氢气传感器。

非半导体型(非电阻型,即金属或合金型)氢气浓度传感器基于氢气与氢敏材料间的化学反应或物理吸附来检测氢气浓度。Ryger等^[33]研发了Pt/NiO肖特基氢气浓度传感器,可在50℃条件下检测体积浓度 $1\ 000\times 10^{-6}$ 的氢气,且检测效果良好。该类氢气浓度传感器灵敏度高、可靠性强、安全性好,但选择性差、对温度依赖性强,易受湿度影响,易发生零点漂移^[34]。

光学型氢气浓度传感器将光纤与氢敏材料相结合,利用光敏材料的光学特性变化间接测量氢气浓度^[35]。孙艳等^[36]在光纤端面上,使用Pd/WO₃共溅射敏感膜制造了氢气浓度传感器,该传感器可以测量0.01%的标准氢气浓度,氢气浓度在2%~4%范围内时灵敏度高,且响应时间缩短至15 s以内。张保磊^[37]研发了一种多层膜的Pd-Au合金微透镜型光纤的氢气浓度传感器,有效测量范围为0~16%,具有0.7%的分辨率,且可以检测0.1%以下的浓度。该类型氢气浓度传感器具有灵敏度高、响应快、安全性好、无需加热、稳定性强等优点,但易受环境光、温度及湿度等因素影响^[38]。

热导型氢气浓度传感器利用氢气和空气的热传导系数差异来检测氢气浓度,该传感器具有从低于1%氢气浓度到100%氢气浓度的广泛探测范围^[39]。Berndt等^[40]通过微制造技术在硅晶片上加工传感器元件,研究了一种基于MEMS技术的车用热导型氢气浓度传感器。该传感器响应和恢复时间很短,仅需几秒,且能检测到低至 $2\ 000\times 10^{-6}$ 体积分数的氢气。该类型氢气浓度传感器具有响应快、寿命长、灵敏度高、稳定性好且无需使用催化金属的优点,可避免传感器中毒,但是对温度具有依赖性,

易受湿度影响、易发生零点漂移,制造工艺复杂^[41]。

声表面波型氢气浓度传感器以声波传播原理为基础,当氢气与感应层接触时,引起感应层发生物理或化学性质变化,导致声波在感应层表面的传播速度发生变化,这种变化转变为电信号即可用于检测氢气浓度^[42]。Li等^[43]将Pd纳米粒子修饰过的氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)涂覆层用于氮化铝/硅(AlN/Si)层状结构上,研制了一种SAW氢气浓度传感器,该传感器在氢氮混合气试验中表现出良好的稳定性、重复性,且响应速度快。Yang等^[44]研制了一种由SnO₂和Pd纳米颗粒层组成的双层结构敏感膜SAW氢气浓度传感器,这种结构可以增强SnO₂传感膜的性能,其响应时间仅为1 s,工作温度范围为25~275℃。声表面波型氢气浓度传感器具有灵敏度高、选择性好、稳定可靠等优点,但易受到湿度影响,对温度依赖性强^[45]。

各类氢气浓度传感器追求的目标是更高的灵敏度、更快的反应速度、更广的检测范围和更强的可靠性。目前,考虑成本和技术成熟程度等因素,常用的消费类氢气传感器为催化燃烧型氢气浓度传感器,该类传感器也是氢燃料电池汽车中最常见的选择。

4 车用氢气浓度传感器研发企业及产品

目前,全球范围内已经涌现出一批专注于车用氢气传感器研发和生产的公司,并且已经研发出一些商业化的车用氢气传感器产品,而车载氢气传感器仍主要依赖日本FIS和日本理研。表2总结了一些国内外公司产品的主要技术参数。

4.1 国外企业及其产品

日本理研公司基于催化燃烧原理,搭载缓解结露发热装置,制造了FHD-752氢气传感器,如图2所示,该传感器具有较强的抗硅中毒性能,可靠耐用,无需维修且使用寿命长达10年。

日本FIS公司基于催化燃烧原理,开发了一种具有较小质量和宽表面积的新型氢气浓度传感器, FH2-HY11型氢气浓度传感器如图3所示,专用于燃料电池汽车中的氢气泄漏检测。该传感器响应快、拥有较强的抗毒性且使用寿命长。

日本新宇宙(COSMOS)公司基于催化燃烧原理,研发了具有高灵敏度和高耐久性的车载氢气传感器CSD-02C,如图4所示。该传感器响应快速、耐久良好,且使用寿命超长。

表2 不同品牌氢气浓度传感器主要参数对比

生产企业	集普	苏州纳格	固微科技	理研	FIS	新宇宙
型号	H2 Sensor H2-5B	HNC-H2	GHV10A24	FHD-752	FH2-HY11	CSD-02C
额定工作电压/V	12	9~36	24	8~16	12	12
工作相对湿度/%	≤95	≤95	15~90	≤100	≤95	≤100
工作温度/°C	-20~80	-40~85	-40~95	-35~100	-35~85	-35~85
响应时间 T90/s	<1	≤1	<2	<0.5	<2	≤3
探测原理	热导型	热导型	电导型	催化燃烧	催化燃烧	催化燃烧
体积浓度探测范围/%	0~4	0~4	0~4	0~4	0.1~4	0~4
精度(相对于满量程)/%	±12	±5	±10	±10	±10	±10



图2 FHD-752 氢气传感器



图3 FH2-HY11 型氢气浓度传感器



图4 氢气传感器 CSD-02C

4.2 国内企业及其产品

杭州集普(JEBOOL)公司基于热导原理,研发了氢气传感器 H2 Sensor H2-5B,如图5所示,实现了空气中氢气浓度的检测。该传感器使用符合车载标准的MEMS微热板工艺制备芯片,通过温度补偿及信号滤波放大,获得稳定可靠的信号。



图5 氢气传感器 H2 Sensor H2-5B

苏州纳格公司基于热导原理,制造了一款防爆型氢气检测仪 HNC-H2,如图6所示。该产品具有高精度、高灵敏度、高稳定性和高可靠性等特点,且符合 GB/T 3836.1 和 GB/T 3836.2 防爆标准要求,可用于燃料电池汽车氢气浓度的检测。



图6 防爆型氢气检测仪 HNE-H2

固微科技基于电导原理,使用纳米制造与量子传感技术自主研发了新型车用氢浓度传感器 GHV10A24,如图7所示,该传感器具有抗干扰能力强、重复性高和响应快速等特点。该传感器提供模拟电压输出,电压与氢气浓度成正比。



图7 氢气传感器 GHV10A24

5 总结与展望

车载氢气浓度传感器作为燃料电池汽车的关键部件之一,目前已经取得了显著的进展。考虑到车辆环境的特殊性,车载氢气浓度传感器需具备高灵敏度、快速响应、稳定性和耐久性强等特点,并实时监测车辆中氢气的浓度,以及早发现潜在的氢气

泄漏或积累问题,故车用氢气浓度传感器的有关技术仍需进一步提高。未来,可以从材料和结构等多维度开展车载新型氢气浓度传感器的研究,如基于纳米材料高灵敏度、响应快速和良好稳定性等特点,可将其用于提高氢气浓度传感器的性能。为满足日益增长的汽车市场需求,未来燃料电池汽车氢气浓度传感器的发展趋势可能朝以下几个方向发展:

a. 提高精确性、响应速度和耐久性。

b. 高性能材料的应用。随着材料科学和纳米技术的发展,更多高灵敏度、高选择性的材料将用于传感器的制备,以提高传感器的性能和可靠性。

c. 集成化和小型化。更紧凑和集成化的设计将有助于简化安装过程,并减少传感器对车辆空间的占用。

d. 提高可操作性和实用性。具备更强的智能性和可操作性,如通过与车辆的通信系统集成,实现自动校准、故障诊断和数据传输等功能。

总之,燃料电池汽车用氢气浓度传感器在保障车辆安全、优化性能和提供故障诊断方面发挥着重要作用,这将促进燃料电池汽车的大规模应用,推动氢能产业的可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 刘闯,郑治强. 燃料电池试验室氢安全研究与设计[J]. 工程建设与设计, 2022(20): 263-266.
LIU C, ZHENG Z Q. Research and Design of Hydrogen Safety in Fuel Cell Laboratory[J]. Construction & Design for Engineering, 2022(20): 263-266.
- [2] 李昆鹏,徐鹏,熊联友,等. 氢能利用安全技术研究与标准体系建设思考[J]. 大众标准化, 2022(13): 1-3.
LI K P, XU P, XIONG L Y, et al. Research on Safety Technology and Construction of Standard System for Hydrogen Energy Utilization[J]. Popular Standardization, 2022(13): 1-3.
- [3] 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.
YAN X, YAN J F, CHEN K, et al. Research on Hydrogen Leakage and Diffusion and Safety Protection of Hydrogenation Station[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(7): 6-10+40.
- [4] 余亚波. 燃料电池客车高压舱氢气泄漏扩散研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
YU Y B. Study on Hydrogen Leakage and Diffusion of High Voltage Cabin of Fuel Cell Bus[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [5] 何静,刘宏波,魏列,等. 车载储氢瓶泄漏及车库内通风方式研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(9): 181-188.
HE J, LIU H B, WEI L, et al. Study on Leakage of on-Vehicle Hydrogen Storage Cylinder and Ventilation Mode in Garage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(9): 181-188.
- [6] 董亮华,耿彦红,王瑞,等. 车载氢气传感器静态法检测装置[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(1): 7-9.
DONG L H, GENG Y H, WANG R, et al. Vehicle-Mounted Hydrogen Sensor Static Method Detection Device [J]. Metrology & Measurement Technique, 2023, 50(1): 7-9.
- [7] 王凯. 面向氢能汽车的氢泄漏及智能监测系统研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
WANG K. Research on Hydrogen Leakage and Intelligent Monitoring System for Hydrogen Energy Vehicles[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [8] 李楚灏,刘佳. 燃料电池汽车氢泄漏检测探究[J]. 时代汽车, 2023(6): 96-98.
LI C H, LIU J. Research on Hydrogen Leakage Detection of Fuel Cell Vehicles[J]. Auto Time, 2023(6): 96-98.
- [9] FLORIAN S, NIKOLAI S, STEFFEN B, et al. Design Principles for Sensitivity Optimization in Plasmonic Hydrogen Sensors[J]. ACS Sensors, 2020, 5(4): 917-927.
- [10] 李智星. APQP在车用氢气传感器研发中的应用探究[J]. 上海汽车, 2018(12): 27-30+34.
LI Z X. Exploration of the Application of APQP in the Development of Automotive Hydrogen Sensors[J]. Shanghai Auto, 2018(12): 27-30+34.
- [11] TIAN J W, JIANG H C, DENG X W, et al. Response Modulation of PdNi Nano-Film Hydrogen Sensors by Thickness Control[J]. Applied Surface Science, 2021, 562.
- [12] 吴宇尘. 基于长短时记忆神经网络硬件加速的气体燃爆状态监测应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
WU Y C. Application of Explosion State Monitoring Based on Long Short Term Memory Neural Network Hardware Accelerated[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [13] 王瑞,史苏娟,耿彦红,等. MEMS氢气传感器气体冲击试验研究[J]. 工业计量, 2022, 32(2): 69-71.
WANG R, SHI S J, GENG Y H, et al. Research on Gas Shock Test of MEMS Hydrogen Sensor[J]. Industrial Metrology, 2022, 32(2): 69-71.
- [14] 秦昉亮. 可燃气体检测仪传感器中毒的防范与处理[J]. 石油工业技术监督, 2013, 29(7): 57-58.
QIN Y L. Prevention and Treatment of Sensor Poisoning in Combustible Gas Detectors[J]. Technology Supervision in

- Petroleum Industry, 2013, 29(7): 57-58.
- [15] 史苏娟,王瑞,耿彦红,等. 氢能源氢气传感器可靠性试验研究[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(1): 1-3.
SHI S J, WANG R, GENG Y H, et al. Experimental Study on Reliability of Hydrogen Sensor for Hydrogen Energy[J]. Metrology & Measurement Technique, 2023, 50(1): 1-3.
- [16] 刘辰旸. 用于呼气检测的光激发半导体气体传感器[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
LIU C Y. UV-Activated Semiconductor Gas Sensor for Exhaled Breath Detection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [17] 黄钰婷,吕帅帅,郑晓虹. NASCION基电化学气体传感器的研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2023, 29(3): 164-177.
HUANG Y T, LÜ S S, ZHENG X H. Progress of NASCION-Based Electrochemical Gas Sensors[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2023, 29(3): 164-177.
- [18] 刘俊峰,陈侃松,王爱敏,等. 氢气传感器的研究进展[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(8): 8-11.
LIU J F, CHEN K S, WANG A M, et al. Research Progress of Hydrogen Sensors[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(8): 8-11.
- [19] 周绍元. 基于碳纳米管薄膜的超灵敏浮栅晶体管型气体传感器研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
ZHOU S Y. Ultra-Sensitive Floating Gate Transistor Gas Sensor Based on Carbon Nanotube Film[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2021.
- [20] 毛勋. 基于Pt-WO₃的干涉型光纤氢气传感器增敏研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
MAO X. Research on Sensitivity Enhancement of Interferometric Fiber Optic Hydrogen Sensor Based on Pt-WO₃ Film[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.
- [21] 何思阳,姜海波,刘昌宏,等. 基于热导式气体传感器原理的气体浓度检测方法探究[J]. 科技风, 2020(6): 30.
HE S Y, JIANG H B, LIU C H, et al. Exploration of Gas Concentration Detection Methods Based on the Principle of Thermal Conductivity Gas Sensors[J]. Technology Wind, 2020(6): 30.
- [22] 张颖,宿禹祺,陈俊帅,等. 氢气传感器研究的进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(增刊1): 204-219.
ZHANG Y, SU Y Q, CHEN J S, et al. Progress and Prospects of Research on Hydrogen Sensors[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(Z1): 204-219.
- [23] 李庆润. 氢气浓度传感器研究进展[J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(9): 14-19.
LI Q R. Research Progress in Hydrogen Concentration Sensors[J]. Safety Health & Environment, 2021, 21(9): 14-19.
- [24] LI H, WU R, LIU H, et al. A Novel Catalytic-Type Gas Sensor Based on Alumina Ceramic Substrates Loaded with Catalysts and Printed Electrodes[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2021, 49(11): 93-101.
- [25] JIANG H C, TIAN X Y, DENG X W, et al. Low Concentration Response Hydrogen Sensors Based on Wheatstone Bridge[J]. Sensors, 2019, 19(5): 109.
- [26] 迟超,赵振起,孙延玉,等. 氢气传感器的抗力学改进设计研究[J]. 科学技术创新, 2020(24): 36-37.
CHI C, ZHAO Z Q, SUN Y Y, et al. Research on Resistance Improvement Design of Hydrogen Concentration Sensors[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(24): 36-37.
- [27] DAI L, WANG L, SHAO G J, et al. A Novel Amperometric Hydrogen Sensor Based on Nano-Structured ZnO Sensing Electrode and CaZr_{0.9}In_{0.1}O_{3-δ} Electrolyte[J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2012, 173(1): 85-92.
- [28] 董汉鹏,张威,郝一龙. 原电池型高分子电解质三电极氢传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2007(4): 747-750.
DONG H P, ZHANG W, HAO Y L. Research on Three Electrodes Galvanic Cell Hydrogen Sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007(4): 747-750.
- [29] JUNG S W, LEE E K, KIM J H, et al. High-Concentration Nafion-Based Hydrogen Sensor for Fuel-Cell Electric Vehicles[J]. Solid State Ionics, 2020, 344.
- [30] 杨振,李鑫,徐龙华. 基于ZIF-8/Au@f-CNF增敏型双酚A电化学传感器的构建及性能研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 65-73.
YANG Z, LI X, XU L H. Construction and Performance of ZIF-8/Au@f-CNF Sensitized Electrochemical Sensor for Bisphenol A Detection[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(13): 65-73.
- [31] AHMED S, SINHA S K. Studies on Nanomaterial-Based P-Type Semiconductor Gas Sensors[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022(7): 1-12.
- [32] RASHID T R, PHAN D T, CHUNG G S. A Flexible Hydrogen Sensor Based on Pd Nanoparticles Decorated ZnO Nanorods Grown on Polyimide Tape[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 185: 777-784.
- [33] RYGER I, VANKO G, LALINSKY T, et al. Pt/NiO Ring Gate Based Schottky Diode Hydrogen Sensors with Enhanced Sensitivity and Thermal Stability[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 202: 1-8.

- [34] 郭元元, 蒋楚宁, 郑晓虹. 介孔金属氧化物半导体 NO_x 气体传感器研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2023, 29(3): 141-153.
GUO Y Y, JIANG C N, ZHENG X H. Research Progress of Mesoporous Metal Oxide Semiconductor NO_x Gas Sensors [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2023, 29(3): 141-153.
- [35] 郝孟猛. AAO模板制备快速响应钯基氢传感器[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
HAO M M. Fast Response Palladium-Based Hydrogen Sensor Fabricated by AAO Template[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [36] 孙艳. 微透镜型光纤氢气传感器的实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
SUN Y. Experimental Study on Microlens Fiber Optic Hydrogen Concentration Sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [37] 张保磊. 基于多层膜的光纤氢气浓度传感器研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
ZHANG B L. Research on Multilayer Micro-Mirror Optical Fiber Hydrogen Sensor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [38] 刘琦. 微热平台式钯基薄膜氢气浓度传感器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
LIU Q. Palladium Based Thin Film Hydrogen Sensor on Micro Hotplate[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [39] 李栋辉. 基于 $\text{GO}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 功能材料的 CO_2 气体热导传感器设计及其性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
LI D H. Design and Performance Analysis of CO_2 Gas Thermal Conductivity Sensor Based on $\text{Go}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ Functional Material[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [40] BERNDT D, MUGGLI J, WITTEWER F, et al. MEMS-Based Thermal Conductivity Sensor for Hydrogen Gas Detection in Automotive Applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 305.
- [41] 翟浩然. 基于质子交换膜燃料电池的氢气传感器的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
ZHAI H R. Research on Hydrogen Sensor Based on Proton Exchange Membrane Fuel Cells[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [42] JAKUBIK W P, URBANCZYK M W. SAW Hydrogen Sensor with a Bilayer Structure Based on Interaction Speed [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2005, 106(2): 602-608.
- [43] LI D S, LE X H, PANG J T, et al. A SAW Hydrogen Sensor Based on Decoration of Graphene Oxide by Palladium Nanoparticles on AlN/Si Layered Structure[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2019, 29(4).
- [44] YANG L, YIN C B, ZHANG Z L, et al. The Investigation of Hydrogen Gas Sensing Properties of SAW Gas Sensor Based on Palladium Surface Modified SnO_2 Thin Film[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, 60: 16-28.
- [45] 刘强, 李鸿源, 徐鸿. Al_2O_3 厚度对 SAW 传感器声波模式及性能的影响[J]. 压电与声光, 2023, 45(3): 359-362+367.
LIU Q, LI H Y, XU H. Effect of Al_2O_3 Thickness on the Acoustic Mode and Performance of SAW Sensors[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023, 45(3): 359-362+367.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2023年10月20日。

(上接第20页)

- Review of System Modeling and Control Strategy of Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Energy Reviews, 2024, 3(1).
- [10] 胡宝钢, 应浩. 模糊PID控制技术研究发展回顾及其面临的若干重要问题[J]. 自动化学报, 2001(4): 567-584.
HU B G, YING H. A Review of the Research and Development of Fuzzy PID Control Technology and Some Important Problems It Faces[J]. Acta Automatica Sinica, 2001(4): 567-584.
- [11] 郭昂, 王福, 邓召文. 燃料电池空气子系统模糊解耦控制仿真与试验[J]. 拖拉机与农用运输车, 2022, 49(6): 27-32.
GUO A, WANG F, DENG Z W. Decoupling Control Simulation and Experiment for PEMFC Air Supply System [J]. Tractor & Farm Transporter, 2022, 49(6): 27-32.
- [12] PUKRUSHPAN J T. Modeling and Control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors[D]. Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan, 2003.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2024年1月27日。