

快速检测技术在燃料电池汽车用氢气 品质检测中的应用

王恩泽*, 郭丰铭, 冯子钊

(广州能源检测研究院, 广州 511447)

摘要: 燃料电池汽车作为新能源汽车领域的重要组成部分, 其动力源于氢气通过燃料电池产生电能的过程。其性能直接受氢气品质的影响。确保氢气的高品质对于提高燃料电池的效率和寿命至关重要。本文综合探讨了燃料电池汽车与氢气品质的关系、现有的氢气品质检测技术及其局限性, 并重点介绍了几种新型快速检测技术, 包括氢气传感器技术、光谱分析技术和质谱分析技术, 及其在燃料电池汽车氢气品质检测中的应用。

关键词: 快速检测技术; 燃料电池汽车; 氢气品质检测技术

Application of rapid detection technology in hydrogen quality testing for fuel cell vehicles

WANG En-Ze*, GUO Feng-Ming, FENG Zi-Zhao

(Guangzhou Energy Testing and Research Institute, Guangzhou 511447, China)

ABSTRACT: As an important component of the new energy vehicle field, fuel cell vehicles are powered by the process of hydrogen gas passing through fuel cells to generate electricity. The quality of hydrogen directly affects the efficiency and lifespan of fuel cells, therefore ensuring the high quality of hydrogen is crucial. This article comprehensively explores the relationship between fuel cell vehicles and hydrogen quality, existing hydrogen quality detection technologies and their limitations, and focuses on several new rapid detection technologies, including hydrogen sensor technology, spectral analysis technology, and mass spectrometry analysis technology, as well as their applications in hydrogen quality detection of fuel cell vehicles.

KEY WORDS: rapid detection technology; fuel cell vehicles; hydrogen quality testing technology

0 引言

在新能源汽车领域, 燃料电池汽车凭借其零排放、高能效比及长续航能力等优势, 正逐渐成为推动全球汽车产业向绿色、低碳转型的关键力量。这类车辆不仅对环境的影响小, 还符合当今全球减排的需求。燃料电池系统作为其核心动力来源, 依赖

于高纯度氢气作为能源。其性能和寿命极大程度上受到供给氢气品质的影响。燃料电池汽车从20世纪90年代初期的研发阶段, 已发展至今日逐步商用化, 并显示出强劲的市场潜力。随着这一进程的加速, 氢气供应链的建设及管理亦随之扩展。氢气品质的检测与保障成为确保燃料电池汽车安全、可靠运行的前提。因此, 开发一种能够实现快速、准确检测氢气品质的技术, 对

基金项目: 广州市市场监督管理局科技项目: 氢能燃料氢气中痕量气体杂质的测定方法研究(2023KJ22)

Fund: Science and Technology Project of Guangzhou Market Supervision Administration: Research on the Determination of Trace Gas Impurities in Hydrogen Fuel Hydrogen (2023KJ22)

*通信作者: 王恩泽, 硕士, 中级工程师, 研究方向为能源物质检测。E-mail: enjolaswang@qq.com

*Corresponding author: WANG En-Ze, Master, Engineer, Guangzhou Energy Testing and Research Institute, Guangzhou 511447, China. E-mail: enjolaswang@qq.com

于提升燃料电池汽车的运行效率和安全性具有重要意义。此外，氢气供应链的健全与高效是推动燃料电池汽车市场扩展的关键，确保氢气的稳定供应和高品质是行业发展的基础^[1]。

1 燃料电池汽车与氢气品质

1.1 燃料电池汽车工作原理

燃料电池汽车的核心动力系统，燃料电池，通过电化学反应直接将氢气与氧气转化为电能，这一过程不仅高效而且产生的唯一排放物为水，极大地降低了环境污染。在此系统中，氢气的纯度直接关联到燃料电池的性能和寿命，因此，确保供应的氢气达到高纯度标准是至关重要的^[2]。快速检测技术在这一背景下显得尤为重要，它可以通过高精度传感器和先进的分析算法，实时监测氢气中的杂质水平，包括有机和无机污染物的浓度。此外，该技术还能评估氢气中微量水分和氧气的含量，这些都是评估氢气品质的关键指标。快速检测技术的应用不仅

提升了检测效率，还优化了数据处理流程，通过采用机器学习和模式识别方法，能够从复杂数据中提取有价值的信息，进而精准预测燃料电池的性能变化^[3]。燃料电池汽车利用氢燃料电池作为其主要动力源，该技术依靠氢气与氧气在电解质膜上的电化学反应来生成电力，水和热量，从而驱动电动机并推动车辆前进氢燃料电池动力源如图1所示^[4]。

氢气品质对燃料电池的性能有着直接影响，杂质可能污染电池的催化剂，降低电池效率和寿命。燃料电池的能量转换效率也就是将化学能转换为电能的效率，通常要高于传统内燃机，这不仅提高了能源利用率，而且显著降低了车辆的温室气体排放^[5]。

1.2 氢气品质标准和要求

氢气品质标准和要求的制定是为了确保燃料电池系统能够在最优化的条件下运行，从而保障汽车的性能、安全和寿命^[6]。GB/T 37244-2018《质子交换膜燃料电池汽车用燃料氢气》(如表1)，对永久性气体、硫化氢和水含量提出了要求，具体如下：

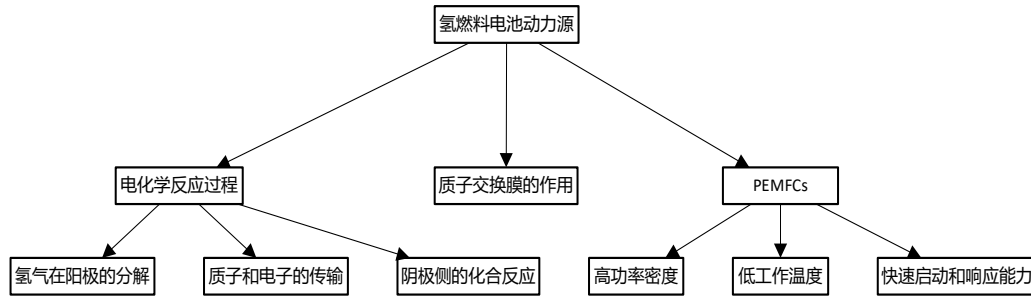


图1 氢燃料电池动力源

Fig.1 Power source of hydrogen fuel cell

表1 燃料氢气技术指标

Table 1 Technical indicators of fuel hydrogen gas

项目	指标
氢气浓度 (摩尔分数)	99.97%
非氢气体总量	300 $\mu\text{mol/mol}$
单类杂质最大浓度	
水 (H_2O)	5 $\mu\text{mol/mol}$
总烃 (按甲烷计)	2 $\mu\text{mol/mol}$
氧 (O_2)	5 $\mu\text{mol/mol}$
氦 (He)	300 $\mu\text{mol/mol}$
总氮 (N_2) 和氩 (Ar)	100 $\mu\text{mol/mol}$
二氧化碳 (CO_2)	2 $\mu\text{mol/mol}$
一氧化碳 (CO)	0.2 $\mu\text{mol/mol}$
总硫 (H_2S)	0.004 $\mu\text{mol/mol}$
甲醛 (HCHO)	0.01 $\mu\text{mol/mol}$
甲酸 (HCOOH)	0.2 $\mu\text{mol/mol}$
氨 (NH_3)	0.1 $\mu\text{mol/mol}$
总卤化合物 (以卤离子计)	0.05 $\mu\text{mol/mol}$
最大颗粒物浓度	1 mg/kg

当甲烷浓度高于 2 $\mu\text{mol/mol}$ 时，甲烷、氮气、氩气总浓度不得超过 100 $\mu\text{mol/mol}$

2 快速检测技术在燃料电池汽车氢气品质检测中的应用

2.1 微型化气相色谱仪

微型化气相色谱仪的关键优势在于其体积小、响应快和可实现现场检测, 特别适合于燃料电池汽车中对氢气品质的即时监测需求^[7]。性能评估可通过色谱理论进行描述, 其中一项核心参数是理论塔板数, 它是衡量色谱分离效能的重要指标^[8]。理论塔板数与色谱柱的长度以及分子在色谱柱内移动速率的均匀性有关, 可通过以下公式计算:

$$N = \frac{L}{H} \quad (1)$$

其中 N 代表理论塔板数, 也是色谱分离效能的量度; L 为色谱柱的长度; H 为单位长度的塔板高, 与分离效率成反比。对于微型化气相色谱仪, 通过优化后, 可实现快速分离与检测。

为了进一步提升微型化气相色谱仪在实时监测氢气品质中的应用效率, 可引入基于最小二乘法的算法来实现杂质浓度的快速定量分析^[9]。该算法基于色谱峰面积与组分浓度之间的线性关系, 通过构建线性模型:

$$C = aA + b \quad (2)$$

其中 C 代表杂质的浓度, A 为色谱峰面积, a 和 b 是通过校准过程确定的系数。最小二乘法可用于优化 a 和 b 的值, 从而提高浓度计算的准确性。该方法的核心在于最小化预测浓度与实际浓度之间差异的平方和:

$$S = \sum (C_{\text{预测}} - C_{\text{实际}})^2 \quad (3)$$

将 S 关于 a 和 b 偏导数设为 0, 可求得系数的最优解, 从而实现对氢气中杂质浓度的准确快速预测。

微型化气相色谱仪结合最小二乘法算法, 不仅优化了氢气品质的实时监测流程, 降低了对专业操作人员的依赖, 同时也大幅提高了数据处理的速度和准确性。同时也凭借其体积小、重量轻、功耗低的特点, 特别适合于燃料电池汽车这类对系统集成度和能效有严格要求的应用场景^[10]。

2.2 电化学传感器

电化学传感器技术因其对氢气中微量杂质敏感、响应速度快及成本相对较低的特点, 成为了燃料电池汽车氢气品质快速检测的理想选择。该技术基于电化学原理, 通过测定氢气与电极反应产生的电流变化来定量分析氢气中的纯度和杂质含量^[11]。电化学传感器的核心组成部分为电化学电池, 包括参比电极、工作电极以及辅助电极, 其工作原理可简化表示为以下电化学反应过程:



在工作电极上发生的氢气氧化反应导致电子的释放, 而在参比电极上则进行相应的还原反应, 从而形成电流。通过测定该电流的大小, 可以间接计算出氢气中的纯度或杂质浓度。电流与氢气浓度之间的关系, 依据法拉第定律, 可以表达为:

$$I = nFACD \quad (5)$$

其中 I 是测定的电流, n 是反应中电子的转移数, F 是法拉第常数, A 是电极的有效面积, C 是氢气的浓度, D 是氢气

的扩散系数。为了实现氢气品质的实时监测, 可以引入一种基于电流响应的实时监测算法。该算法以电流的实时变化作为输入参数, 通过建立电流与氢气浓度之间的数学模型, 实时计算氢气的纯度或杂质含量^[12]。

考虑到氢气浓度与电流关系的非线性特性, 可以采用非线性回归模型对其进行拟合, 进而实现更为准确的浓度估计。模型可以表示为:

$$I = \alpha + \beta C^n \quad (6)$$

其中 α 、 β 、 n 是模型参数, 通过实验数据进行拟合获得。通过最小化实际测量电流与模型预测电流之间的差异平方和:

$$\min \sum_{i=1}^m (I_{\text{实测},i} - (\alpha + \beta C_i^n))^2 \quad (7)$$

可求解得到最优模型参数 α 、 β 、 n , 从而使电化学传感器能够根据实时测量的电流准确预测氢气中杂质的浓度。电化学传感器结合该非线性回归模型不仅提高了氢气品质监测的准确性, 而且由于其实时性和高灵敏度, 极大地提升了燃料电池汽车安全运行的可靠性。

2.3 光纤传感器

光纤传感器技术, 凭借其高灵敏度、抗电磁干扰能力强、结构紧凑且易于远程监测的特点, 在氢气品质快速检测中展示出显著优势。这种传感器通常基于光学干涉、吸收或荧光原理, 能够实现对氢气中特定杂质如一氧化碳、硫化氢等的高灵敏度检测^[13]。光纤传感器的工作原理可通过其对特定波长光的吸收或散射特性来表述, 其中光吸收原理可由朗伯-比尔定律描述:

$$I = I_0 e^{-\hat{a}cL} \quad (8)$$

其中 I 为透过样品后的光强, I_0 为入射光强, \hat{a} 为吸收系数, c 为待测气体的浓度, L 为光在样品中的传播路径长度。基于此原理, 通过测定特定波长光的吸收强度, 可以定量分析氢气中杂质的浓度。

针对光纤传感器在实时氢气品质监测中的应用, 引入基于最小二乘法的信号处理算法以提升检测的准确性和实时性^[14]。该算法利用测得的吸收光谱与杂质浓度之间的线性关系构建数学模型, 形式如下:

$$c = \beta_0 + \beta_1 A \quad (9)$$

其中, c 表示杂质的浓度, A 为特定波长下吸收光谱的积分面积, $\hat{\beta}_0$ 和 $\hat{\beta}_1$ 为线性模型参数。通过收集一系列已知浓度的标准样本数据, 应用最小二乘法求解模型参数:

$$\min \sum_{i=1}^n (c_i - (\beta_0 + \beta_1 A_i))^2 \quad (10)$$

通过解该最小化问题, 得到 $\hat{\beta}_0$ 和 $\hat{\beta}_1$ 的最优解, 从而实现对未知样本氢气中杂质浓度的精确预测。光纤传感器结合最小二乘法算法的应用, 不仅大幅提升了氢气品质检测的响应速度和准确性, 而且由于光纤传感器的微型化和远程监测能力, 极大地增强了燃料电池汽车氢气供应系统的实时监控能力和系统集成度^[15]。

3 案例分析

采用微型化气相色谱仪对目标车辆进行氢气品质检测, 并且针对燃料电池汽车的氢气供应系统设计了一套基于微型化气

相色谱仪的检测流程。通过对比传统的气相色谱技术,微型化气相色谱仪能在数分钟内完成整个氢气样品的分析过程,而传统技术则通常需要半小时以上。表2展示了采用微型化气相色谱仪与传统气相色谱技术在氢气品质检测中的对比结果:

表2 传统检测技术与微型化气相色谱仪的检测结果对比

Table 2 Comparison of test results between traditional test technology and miniaturized gas chromatograph

检测技术	检测时间	检测灵敏度	可测杂质种类	操作复杂度
微型化气相色谱仪	5分钟内	0.1 ppm	20种以上	低
传统气相色谱技术	约30分钟	1 ppm	不足10种	高

在采用微型化气相色谱仪后,氢气中微量杂质的检出时间显著缩短,检测灵敏度也得到了显著提高。在实践中,微型化气相色谱仪体现出的优势包括检测时间的显著缩短,提高了氢气品质监控的实时性;检测灵敏度的提高,增强了对微量杂质的识别能力;操作简便和成本低廉等,体现出了新型快速检测技术更易于在燃料电池汽车中广泛应用。

4 结束语

随着科学技术的快速发展,各种新型快速检测技术相继涌现。在燃料电池汽车氢气品质检测领域,这些技术凭借其独特的检测原理和优化的传感机制,显著提升了氢气品质监控的效率和准确性。与传统的气体分析方法相比,如气相色谱和质谱分析等,快速检测技术在操作便捷性、响应速度和成本效益等方面具有明显优势。传统方法虽然精确,但通常需要复杂的样品预处理和较长的分析时间,这在需要实时或现场检测的应用场景中显得不够高效。展望未来,研究应进一步探索集成化和智能化的快速检测系统,以便更好地适应复杂多变的应用环境。此外,开发低成本、高稳定性的传感材料也是未来研究的重要方向。这将进一步推动快速检测技术在燃料电池汽车以及更广泛的氢能应用中的广泛部署和应用。总之,通过持续的技术创新和系统优化,快速检测技术有望在氢能领域发挥更大的作用,为实现清洁能源转型贡献更多力量。

参考文献

- [1] 常国峰,李玉洋,季运康. 燃料电池汽车动力系统综合测试环境舱的氢安全设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(04): 280-282,287.
- [2] 刘国宏. 氢燃料电池车低浓度恒温差氢气检测装置设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- [3] 张玮麟,郎清泉,郑旭. 氢燃料电池电动汽车氢气量检测装置的设计[J]. 电动工具, 2020, (01): 24-27.
- [4] 郝冬,李林军,王晓兵,等. 基于快速检测的燃料电池汽车用氢气品质分析[J]. 电池工业, 2019, 23(03): 126-129.
- [5] 张宇飞. 燃料电池汽车氢气消耗量检测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

- [6] 魏王慧,高艳秋,董翊,等. 离子色谱法测定燃料电池汽车用氢气中的甲酸杂质含量[J]. 低温与特气, 2019, 37(06): 47-50.
- [7] 刘雨佳. 氢燃料电池用高纯氢气中关键杂质色谱分析方法的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [8] 袁蕙,刘丹,徐广通. 模块化 FTIR 测定 FCV 用氢气痕量杂质[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(03): 853-858.
- [9] 刘鹏华,陈传禄,梁健能. 有效提高氢气品质筑牢氢能推广运用基础[J]. 质量与认证, 2024, (02): 33-35.
- [10] 潘凤文,李乃武,陆寒,等. 瞬态多组分质谱分析系统对燃料电池用氢气品质的检测[J]. 中国测试, 2022, 48(10): 94-99.
- [11] 张祎玮,王亚敏,万伟,等. 质子交换膜燃料电池车用氢气品质分析整体解决方案开发及应用[J]. 分析试验室, 2022, 41(07): 776-782.
- [12] 李明昕,李俊杰,周军旗,等. 加氢站氢气取样工艺技术研究[J]. 机电信息, 2023, (15): 81-84.
- [13] 吴焯峰,张锐明. 质子交换膜燃料电池氢气渗透电流及电子电阻检测方法[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(05): 231-234.
- [14] 马中强,王恒,黄小宇,等. 射线数字成像检测技术在复合材料氢气气瓶上的应用试验与研究[J]. 石油化工设备, 2022, 51(01): 18-24.
- [15] 杨帅. 氢燃料电池系统特点及其安全检测技术研究[J]. 电视技术, 2022, 46(04): 217-220.

作者简介



王恩泽, 硕士, 中级工程师, 研究方向为能源物质检测。

郭丰铭, 助理工程师, 研究方向为能源物质检测。

冯子钊, 助理工程师, 研究方向为能源物质检测。