燃料电池系统中氢气储存与输送技术的创新研究

高继[1] 包忠峰[2] 张宗辉[1] 龚正[1]

1. 中国船舶集团有限公司第七〇四研究所；2. 长三角钢铁产业发展协会

摘要：为促进氢燃料电池技术的发展和应用，本文全面介绍了氢燃料电池系统的工作原理和组成结构，重点讨论了氢气储存与输送技术的应用，探讨了储氢技术的概况、储氢质量影响因素分析和不同环境温度下储氢瓶压力特性分析，讨论了氢气输送系统的组成、管路和安全性分析，并提供了氢燃料电池在汽车行业的应用案例。本文为进一步推动氢燃料电池技术的发展和应用提供了有益参考。

关键词：燃料电池系统；储氢技术；氢气输送技术；可持续能源

随着全球对可持续能源的需求日益增加，氢燃料电池系统作为一种环保、高效的能源转化和利用方案，受到了广泛的关注和研究[1]。氢燃料电池系统通过将氢气和氧气进行电化学反应，产生电能，为传统能源的替代方案提供了可持续的解决方案。通过更深入地了解氢燃料电池系统的工作原理，可以更好地设计和优化系统的核心组件，提高系统的电能输出效率，促进氢燃料电池技术的进一步应用和推广。储氢技术和氢气输送技术是氢燃料电池系统中的两个重要环节，研究氢气储存与输送技术以及安全性分析有助于更好地选择和优化储氢设备，并确保系统的安全运行。

1 氢燃料电池系统简介

1.1 氢燃料电池系统的工作原理

氢燃料电池系统通过将氢气和氧气通过电化学反应转化为电能，为传统能源提供了环保的替代方案。氢燃料电池系统的工作原理基于电化学反应原理，如图 1 所示，具体包括以下几个步骤。

1）氢气供应：分子氢被供应到燃料电池的阳极。

2）电解质：燃料电池中含有电解质，例如聚合物电解质膜，用于促进离子交换。

3）阳极反应：在阳极，氢分子通过阳极表面的催化剂被分解为质子和电子。

4）质子交换：质子通过电解质传递，而电子通过外部电路传导生成电流。

5）阴极反应：在阴极，来自空气的氧与质子和电子结合形成水。

6）电能输出：生成的电能可用于产生驱动力。

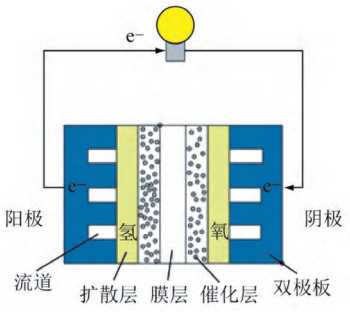


图 1 氢燃料电池工作原理

1.2 氢燃料电池系统的组成结构

氢燃料电池系统由多个组件组成，这些组件协同工作以将氢和氧转化为电能，以下是典型的氢燃料电池系统中的主要组件[2]。

1）燃料电池堆：氢燃料电池系统的核心部分，由多个单独的燃料电池单元串联或并联而成。

2）阳极：燃料电池中的氢电极，氢气在阳极表面发生氧化反应，释放出质子和电子。

3）阴极：燃料电池中的氧电极，氧气与通过电解质传递过来的质子和电子在阴极上发生还原反应，生成水。

4）电解质：在燃料电池中起到离子交换的作用，常见的电解质材料包括聚合物电解质膜、碱性聚合物电解质、磷酸盐玻璃电解质等。

5）双极板：用于支撑燃料电池堆的结构，并促进与每个电池单元的气体流动和电子传输。

6）氢气储存和输送系统：需要一个储存和输送氢气的系统，用于提供

氢气供应。

7）辅助设备：包括用于控制燃料电池系统运行和维护正常操作的组件。

8）功率调节单元：将燃料电池堆产生的直流电能转换为交流电能，以适应不同电器设备的需要。

2　燃料电池系统中的氢气储存技术

2.1　储氢质量影响因素分析

储氢质量是指单位体积或单位重量下储存的氢气量，受储氢瓶压力、储氢容积和温度的影响。本文利用范德瓦尔斯方程计算储氢质量，并将其与实测数据进行对比，结果见表 1。可以看出，计算得出的储氢质量与实际测量值非常接近，验证了范德瓦尔斯方程在储氢质量计算中的准确性。

表 1　储氢质量计算结果与实测结果对比

压力 / MPa	计算值	实测值	偏差（%）
0.1	0.015	0.015	0
1	0.13	0.15	-15.9
5	0.52	0.53	-1.4
25	2.60	2.67	-2.5
35	3.40	3.47	-2.1
40	4.08	3.98	2.3
70	5.35	6.25	14.1

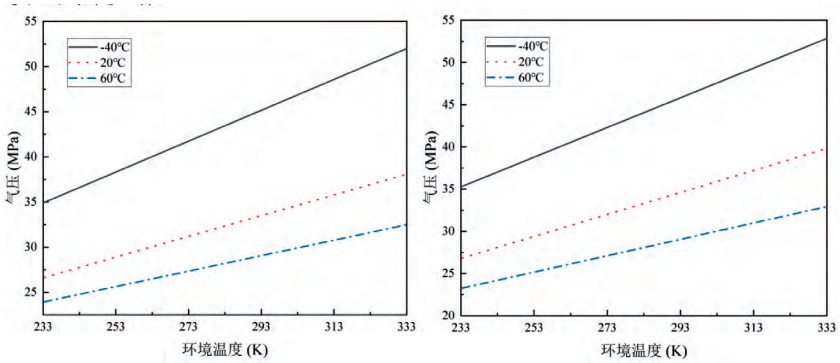
2.2　不同环境温度下储氢瓶压力特性分析

为了解在不同温度条件下储氢瓶压力的变化规律，记录了储气瓶在不同环境温度下的压力数据，如图 2 所示。可以看出，随着环境温度的升高，储气瓶的压力也随之增加。这是由于气体受温度影响而膨胀导致的，因此在燃料电池系统中，不同温度条件下需要有效控制和监测储氢瓶的压力，以确保系统的安全和稳定运行。

2.3　储氢瓶安全控制策略

对于储氢瓶的安全控制，需要采取一系列策略来确保系统的稳定和安全，包括压力监测和控制、氢气泄漏检测和紧急排气等。通过在储氢瓶内安装压力传感器，可以实时监测储氢瓶的压力变化，并根据设定的安全范围来控制压力。氢气泄漏检测系统可以实时监测氢气泄漏，并通过采取相应的应急措施来保持系统的安全。紧急排气装置可以在压力超过安全范围

广告



（a）5 MPa　　（b）70 MPa

图 2　不同环境温度下储氢瓶压力

时迅速排出氢气，以防止高压导致的安全风险。

3　燃料电池系统中的氢气输送技术

3.1　氢气输送系统的组成

氢气输送系统用于将氢气从储存设备传递到燃料电池堆，确保稳定的氢气供应，图 3 展示了氢气输送系统的组成。在系统工作过程中，通过供

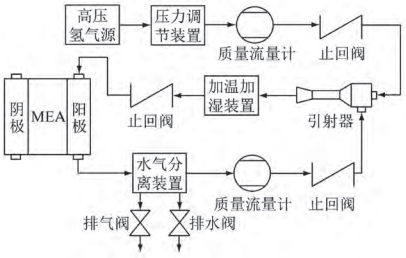


图 3　氢气输送系统的组成

应过量的氢气来保持输出功率的稳定，各组成部分的功能如下 [3]。

1）水气分离装置：这个装置用于将燃料电池堆阳极废气中的水分离出来，并将残余的未反应氢气传输至引射器。

2）引射器：利用高压氢气产生负压，回收未反应的残余氢气，同时不产生额外的寄生功率。

3）混合室：利用高速气流形成低压区，通过压差的作用，引射残余氢气与供应的高压氢气混合，从出口排出并参与电堆阳极反应。

3.2　氢气输送系统安全性分析

为确保氢气输送系统的安全性，在系统设计和运行过程中应考虑以下安全控制措施。

1）压力监测和控制：压力传感器和集成控制系统可以实时监测氢气输送管道和储氢罐的压力，并在超过安全范围时采取相应的控制措施。

2）泄漏检测：氢气泄漏传感器可以及时发现氢气泄漏，并与报警系统和安全控制系统集成。

3）防爆装置：考虑到氢气的燃烧性和爆炸性，氢气输送系统中应配备适当的防爆装置。

4）培训和资质：操作人员应具备氢气系统操作的专业知识，并了解系统的安全操作程序。

表 2　氢燃料电池车辆对比

参数	荣威 950	通用 Equinox	本田 Clarity	现代 ix35	丰田 Mirai
整车质量 /kg	2080	2010	1890	2290	1850
100 km/h 加速时间 /s	12	12	10	12.5	10
最大时速（km/h）	160	160	160	160	160
续航里程 /km	430	320	750	415	650
电池功率 /kW	43	93	100	110	114
储氢质量 /kg	4.2	4.2	5.8	5.64	5

4　氢燃料电池在汽车行业的应用案例

在汽车行业中，氢燃料电池系统作为一种清洁、高效和可持续的能源解决方案，正逐渐得到广泛应用。表 2 提供了不同氢燃料电池汽车的对比数据，这些氢燃料电池车型在汽车行业的应用，证明了氢燃料电池系统作为一种清洁、高效和可持续的动力解决方案的潜力。随着技术的不断进步和成本的降低，预计氢燃料电池车辆将在未来得到更广泛地应用。

5　结语

储氢质量受到压力、容积和温度等因素的影响，其中，环境温度的影响最为显著。为保证储氢瓶的安全性，需要有效控制和监测储氢瓶的压力以确保系统的安全运行，另外还需采取氢气泄漏检测和紧急排气等安全控制策略。为确保输送系统的安全性，需采取压力监测和控制、泄漏检测、防爆装置等安全控制措施。氢燃料电池车辆已经得到了一定程度的商业化推广，其在加速性能、续航里程和储氢质量等方面具有潜力，成为未来汽车行业的重要选择。

参考文献：

[1] 陈传东.储氢液体催化脱氢与氢燃料电池耦合系统的建立与优化[D].北京：北京化工大学，2022.

[2] 陈建军.绿氢的制备、储运及其应用技术进展[J].广东化工，2023，50（15）：70-72+69.

[3] 姜峻岭. 燃料电池汽车氢安全集成设计与控制策略研究[J].上海汽车，2023（03）：5-8+13.