

氢燃料电池商用车氢安全保障技术研究

秦志东^{1,2,3} 张志芸^{1,2,3} 赵宏建¹ 刘永亮¹ 姚东升¹ 张健¹ 刘尹¹

(1. 北汽福田汽车股份有限公司,北京 100085;2. 北京卡文新能源汽车有限公司,北京 100085;3. 北清智创(北京)新能源汽车科技有限公司,北京 100085)

【欢迎引用】秦志东, 张志芸, 赵宏建, 等. 氢燃料电池商用车氢安全保障技术研究[J]. 汽车文摘, 2023(8): 31-35.

【Cite this paper】QIN Z D, ZHANG Z Y, ZHAO H J, et al. Research on Hydrogen Safety Guarantee Technologies for Hydrogen Fuel Cell Vehicles [J]. Automotive Digest (Chinese), 2023(8): 31-35.

【摘要】氢燃料电池汽车具有绿色环保、续航里程长、加氢时间短的特点,特别适合中远途、中重型商用车场景,是氢能应用的重要领域。一直以来,氢安全是氢燃料电池商用车推广的重要保障,也是用户关心的问题。从文献和标准规范研究以及实车开发、装配和使用经验,对燃料电池商用车设计、装车、使用和监控主要环节的氢安全保障技术进行总结,为氢燃料电池商用车氢安全提供可参考和借鉴的方法。

关键词:氢燃料电池汽车;氢安全;安全设计;检测

中图分类号:U469.72⁺²

文献标识码:A

DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220200

Research on Hydrogen Safety Guarantee Technologies for Hydrogen Fuel Cell Vehicles

Qin Zhidong^{1,2,3}, Zhang Zhiyun^{1,2,3}, Zhao Hongjian¹, Liu Yongliang¹, Yao Dongsheng¹, Zhang Jian¹, Liu Yin¹

(1. Beiqi Foton Motor Co. Ltd., Beijing 100085; 2. Beijing Caven New Energy Automotive Co. Ltd., Beijing 100085; 3. Beijing Zhichuang (Beijing) Fuel Cell Motor Technology Co. Ltd., Beijing 100085)

【Abstract】Hydrogen fuel cell vehicles have the characteristics of green environmental protection, long driving range, short hydrogenation time. For a long time, hydrogen safety is an important guarantee for the promotion of hydrogen fuel cell commercial vehicles, and it is also the most concerned issue of users. From the literature and standards specification research as well as the experience of real vehicle development, assembly and service, the hydrogen safety measures in the main links of fuel cell commercial vehicle design, loading, service and monitoring are summarized, so as to provide reference and methods for hydrogen safety of hydrogen fuel cell commercial vehicles.

Key words: Hydrogen fuel cell vehicle, hydrogen safety, safety design, testing

0 引言

氢能具有清洁、高效和来源广泛的优点,是具有战略意义的能源载体,是实现能源转型和“碳中和”的有效手段,将代替传统化石能源在高耗能发电、工业、建筑、交通等领域发挥重要的作用^[1]。其中,质子交换膜燃料电池汽车具有绿色环保和续航里程长的优势,特别适用于中远途、中重型商用车场景,是目前氢能应用的重要领域,在交通领域被视为绿色低碳交通的有效解决方案之一。我国氢燃料电池车辆主要以商用车推广为主,根据中国汽车工业协会统

计数据,截止2022年,我国已累计销售氢燃料电池汽车12306辆。

但是,由于氢气自身的性能如易燃性、易爆性、泄露性以及氢脆特性,使燃料电池商用车的安全性成为人们关注的重要问题^[2-5]。因此,为了加速氢燃料电池商用车的推广和使用,氢安全研究至关重要。很多学者从多层面研究了燃料电池汽车氢安全问题^[6-7]。吴兵^[8]对燃料电池车载系统、燃料电池系统的氢安全设计和管理进行了详细研究和探讨。黄兴等^[4]综述了氢的特性和典型的燃料电池氢系统构成,概述了国际上燃料电池汽车氢安全相关的标准法

规,同时着重从加氢、储氢泄漏和排氢安全及整车紧急状态等方面阐述了氢系统安全控制策略。蒋燕青等^[5]研究分析了国内外汽车安全测试方法,确定了氢系统碰撞试验和评价方法,满足车辆碰撞要求。张城兴等^[6]分析了对燃料电池用氢安全的影响,并提出对氢燃料电池汽车本身用氢安全的微观优化策略和对氢燃料电池汽车行业用氢安全的宏观管理策略。

通过综述文献、标准以及商用实车设计、装车、使用环节,总结出氢燃料电池商用车设计、装车、使用和监控环节的氢安全保障措施与技术。

1 氢燃料电池商用车氢安全设计

在氢燃料电池商用车设计阶段,主要考虑氢系统、燃料电池系统和整车氢安全3个方面。

1.1 氢系统氢安全设计

氢系统是氢燃料电池汽车的重要组成部分,为燃料电池系统提供氢气,主要包括储氢瓶、加氢口、瓶口阀、单向阀、安全阀、减压阀、溢流阀、瓶尾阀、压力传感器、氢气传感器和管路^[3,4,6-7](图1、图2)。氢系统在氢安全方面的设计要符合T/ZSA 103—2021《燃料电池商用车车载氢系统技术要求》,主要考虑零部件和整个系统安全^[8]。

在零部件方面,要确保储氢瓶、阀、管件、接头、传感器可靠性。目前,储气瓶一般使用三型瓶,采用碳纤维缠绕复合材料来保障瓶体的强度和刚度。通常单位质量碳纤维复合材料的强度是钢材的6倍,刚度是钢材的4倍^[3],比钢材更轻、更可靠。其他阀、管件、接头及连接件、仪表选用的金属材料与氢都具有良好的相容性。

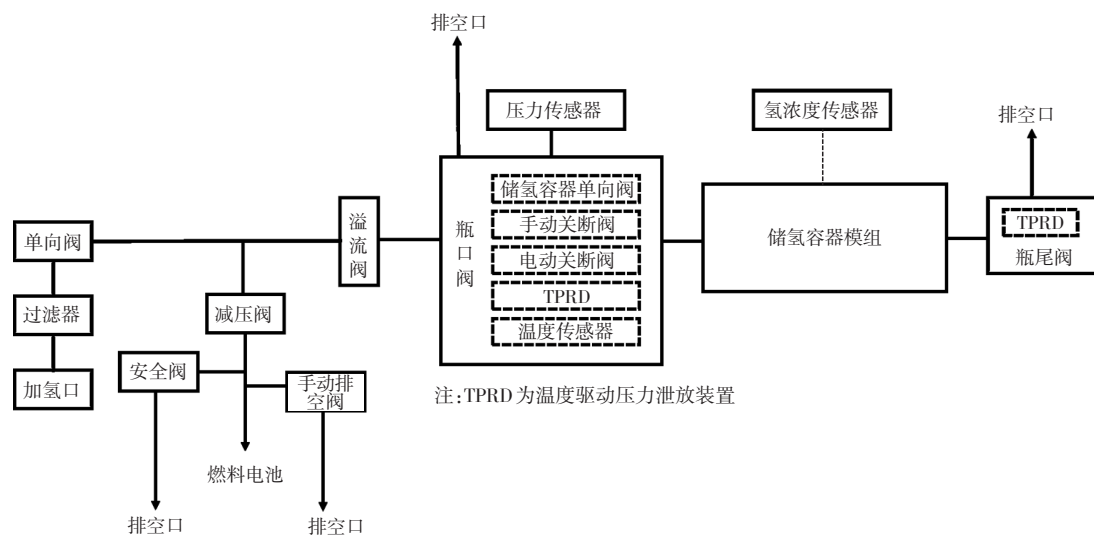


图1 氢系统原理^[8]



图2 氢系统实物(三瓶组)示意

整个氢系统设计方面,安装压力传感器、温度传感器和氢浓度传感器监测氢系统的压力、温度和氢泄漏情况,使其具备过温保护、过压保护、低压保护、过

流保护、氢气泄漏检测报警功能。其中,主要4项功能简述如下:

- (1)过温保护:当氢瓶温度过高时,通过瓶尾阀自动快速泄放氢瓶内气体,防止发生事故。
- (2)过压保护:当氢系统压力超过安全值时,系统通过瓶口阀自动泄压,使氢系统在安全压力范围内。
- (3)低压保护:当氢系统内压力过低时,及时切断燃料输出。
- (4)过流保护:当储氢瓶或管道中的流量异常增大时,通过溢流阀自动关断储氢瓶中的氢气供应。在氢系统顶部安装氢浓度传感器,使氢气在较低浓度下能快速响应,达到报警作用。

1.2 燃料电池系统氢安全设计

燃料电池系统氢安全设计方面要考虑系统的气

密性、电堆的防撞保护和氢泄漏检测,符合 GB/T 36288—2018《燃料电池电动汽车 燃料电池堆安全要求》^[6,9]。

燃料电池工作的核心部件是电堆,作为氢气和空气反应的场所,应保证良好的气密性,要求在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下,电堆仍可保持良好的气密性,氢气侧最大泄漏率不超过 $2\ 400\text{ mL/min}$ 。同时,电堆在集成到燃料电池系统时,需要有金属壳体对其封装保护,这样做一方面有利于燃料电池系统附件在物理结构上的集成,另一方面可起到保护电堆,防止外界异物损伤电堆,发生氢气泄漏,同时对外起到绝缘保护的作用。考虑到电堆工作时仍然有轻微氢气渗漏,金属壳体并不会完全密封电堆,会在壳体上设置通风孔,并通过外围管路连接,将壳体内部气体进行通风排到外界,保持内部氢气浓度维持较低的水平。

燃料电池系统在工作时,会有未完全反应的氢气通过排气管排出,因此需增加对排气管中氢气浓度的检测。目前,一种技术方案是在排气管附近直接安装氢浓度传感器,实时检测氢气浓度。另外一种方案是通过采集电堆氢气进出口的流量,计算出电堆氢气进出口的流量差,进而计算出排气管中氢气含量。排气管通常设有歧路,与燃料电池系统的空气进气路相通,该通路上设有控制气路开闭的电磁阀,当氢气体积浓度接近安全标准时,电磁阀开启,空气进气路的空气通过排气管的歧路进入排气管,稀释其中的氢气浓度,直到远低于安全标准之下。目前 GB/T 36288 规定为保证任意连续 3 s 内的平均氢气体积浓度应不超过 3% ,且瞬时氢气体积浓度不应超过 8% 。现行产品都应符合标准规定。

1.3 整车氢安全设计

在整车方面,氢安全要符合 GB/T 24549—2020《燃料电池电动汽车 安全要求》^[10]。

在系统整车布置方面,储氢容器及氢管路应布置在通风良好的位置或设计相应通风措施,保证发生泄漏时氢能够迅速扩散到环境中去。同时,氢系统布置应确保储氢瓶距离车边缘有一定的安全距离。应加装必要的保护装置,防止阳光照射、雨水侵袭,同时兼顾使用、维护和维修便利性。免受电火花、高温源、高低线束和振动源影响,距离可能产生电火花的位置以及高温源应保留 200 mm 距离,距离高低压线束、振动源至少保证不接触。安装要牢固,应避开易受振动、摩擦、冲击和碰撞的位置。

在氢电安全方面,应考虑氢电的有效隔离。将可

能产生电弧或火花等火源形式的点与氢系统进行隔离,或将可能产生静电、电弧及火花的位置可靠接地。此外通氢管路及部件(含加氢口)应接地,以避免静电火花引燃泄漏的氢气。

在安全监测方面,整车具有氢气安全主动监控系统,包括压力传感器、温度传感器、氢气泄漏传感器检测元件以及电磁阀、声光报警器执行元件,具备检测、显示、报警功能。另外,燃料电池汽车上还应装有碰撞传感器,当车辆发生碰撞时碰撞传感器与整车联动,切断整车氢气供应。

氢气浓度监测方面,燃料电池汽车在车载氢系统和燃料电池系统以及其他可能积聚氢气的位置安装了氢浓度传感器,用于氢泄漏的实时监测。不同整车企业处理方案有所不同。氢气着火下限浓度(Lower Flammable Limit, LFL)为 4% ,当监测到氢气浓度达到氢气 LFL 的 25% 时,判定仅做报警处理,可正常行车。当监测到氢气浓度达到氢气 LFL 的 50% 时,燃料电池降载关机,同时做报警处理。关机完成后关闭氢气供应,整车可依靠纯电模式行车。当监测到氢气浓度达到氢气 LFL 的 75% 时,整车发出氢泄漏报警,同时燃料电池紧急停机,切断氢源,同时整车立即下高压电,停车等待人员检修处理。

1.4 整车装配环节

在实车装配环节,主机厂一般会对涉氢气部件的装配有特殊要求,比较关键的事项一般有以下4项:

(1)氢系统首次装车时,加氢口处的保护盖以及氢气管路的防尘堵头都不可打开,以免外界杂质进入管路。

(2)装配时禁止刮碰瓶体、各种阀体、管路。

(3)装配过程中不在氢系统周围进行焊接、火焰切割操作。

(4)装配时不允许踩踏管路及管阀件操作。脚踏气瓶及其他部位应使用防护胶垫遮盖被踩部位,操作者须穿平底鞋,防止划伤气瓶表面。

事项(1)是防止外界微尘杂质进入氢系统。这些微尘进入到系统中,可能会造成过滤器堵塞,导致氢系统流量不足。

事项(2)、(3)、(4)是由于氢系统气瓶外层是玻璃纤维,在装配过程中应防止玻璃纤维层被刮蹭、烫损,从而影响气瓶使用安全。

1.5 整车下线气密性检测

实车装配下线后会进行气密性检测。通常检测流程为以氮气或者 90% 氮气和 10% 氢气的混合气为充

装介质,通过充装设备,将系统压力加压至5 MPa,检测无异常后压力继续阶梯性增加,每次增加5 MPa后暂停,检测无异常后继续增压,最后将车载氢系统压力增加至要求压力,通常为公称工作压力的1.1倍,进行最后一次检测。

检测方法通常使用涂液法或观察压力读数法。涂液法使用专用的检漏液对车载氢系统的管阀件接口处进行涂抹检测,若检测区域内不出现可见的气泡则为合格。观察压力读数法则是观测压力读数的变化,0.5 h内压力变化在0.1 MPa内则为合格。

2 氢燃料电池商用车氢安全检测

为保障氢燃料电池汽车的氢安全,氢系统、燃料电池系统和整车在装车之前、上车之前都要通过相关氢安全国家强制性法规检测,测试结果要符合相关法规标准,这也是对安全设计的进一步检验。

在车载氢系统方面,依据GB/T 29126—2012《燃料电池汽车 车载氢系统 试验方法》、GB/T 26990—2011《燃料电池电动汽车 车载氢系统 技术条件》进行车载氢系统正常行驶和停车条件下氢安全检测,包括储氢瓶、管路、加氢口、压力释放装置、压力表、氢气泄漏及检测等项目进行检验,结果要满足标准要求^[11-12]。同时,依据GB/T 24549—2020《燃料电池电动汽车 安全要求》,符合燃料加注要求,在氢气储存与供给中氢气瓶符合要求,整个系统的过压保护、低压保护、氢气释放泄漏检测符合标准要求^[10]。

在燃料电池系统方面,依据GB/T 24549—2020《燃料电池电动汽车 安全要求》,燃料电池系统符合泄漏、泄漏探测、安全措施检测符合标准^[10]。同时,燃料电池的气密性、绝缘性、机械结构、氢电安全和紧急停机时检测符合GB/T 24554—2022《燃料电池发动机性能试验方法》^[13]和GB/T 36288—2018《燃料电池电动汽车燃料电池堆安全要求》^[9]。

在整车层面,依据GB/T 24549—2020《燃料电池电动汽车 安全要求》,车辆布置、氢电安全、氢气监测和安全监测和检测都符合标准要求^[10]。

3 氢燃料电池汽车氢安全使用

为提高氢燃料电池汽车在使用环节中的氢安全,通常会对车辆停放、车辆使用和火灾消防提出一定要求。

3.1 车辆停放要求

为保证氢燃料电池汽车停放安全,对车辆停放、

停车场和周边环境都有严格的要求^[14]。车辆停放时,对于氢燃料电池车辆气瓶中有氢气,必须停放于露天场地,确保场地、通道通风条件良好。如果燃料电池车辆在满足整车密闭空间测试要求后,可停放于室内场地。停车场地需确保通风条件良好,车辆之间的通道畅通,不得堆放其他杂物,对于室内停车场应在最高处布置氢气泄漏探测系统和联动排气系统。同时,对停车场周边环境也有严格限制,停车场地应远离加油站、加气站、热源、潮湿、可燃设施和可燃物质堆放区域、有腐蚀性气体以及灰尘较多的地方,同时还应避免其他车辆或移动物体对车辆造成撞击或挤压,防止意外事件的二次影响。

3.2 车辆使用要求

为保证车辆在使用过程中的氢安全,通常应遵循以下5点^[14]:

- (1)燃料电池车辆应严格按照整车产品使用说明书操作。
- (2)车内严禁使用明火,车内不放置易燃、易爆物品。
- (3)检修操作应在燃料电池系统完全停机并确认高压端无电压后再进行。
- (4)加完氢气后,请盖好加氢口的防尘帽,避免进入杂物。
- (5)车辆动力系统上电状态不能加氢。

3.3 火灾消防

当发生火情时,具体措施如下^[14]:

- (1)在确保人身安全的情况下,切断气源。
- (2)疏散人员远离火灾区,并往上风处撤离。对着火区进行隔离,防止人员入内。如果可能,将处在火灾区附近、未受火灾直接影响的储氢瓶转移到安全地段。
- (3)如果氢气无法切断,可让气体燃烧,直到储氢瓶内的氢气烧完为止。这种处理方法是在假设火势可以控制的前提下采用的。而且,燃烧过程中应持续用水对储氢瓶进行冷却,直到氢气完全烧尽为止,避免储氢瓶因过热而发生爆炸事故。
- (4)若着火点是在室外通风条件良好的地方,如果可能,站在安全位置上进行灭火。并用水对着火的储氢瓶以及着火区附近的所有压力容器进行持续冷却,使它们在火场中保持冷却。不得设法搬动或靠近被火烘热的储氢瓶。
- (5)如遭遇火警,应立即向消防队报告,告知对方着火的详细地点以及着火原因。火灾解除后,不得使

用遭受火灾影响的储氢瓶。

4 氢燃料电池汽车氢安全监控

随着信息技术的发展,大数据也将在氢燃料电池商用车氢安全中发挥重要作用。自2017年,在工业和信息化部推动下,我国首个全国新能源汽车国家监测与管理平台建立。该平台实现了全国新能源汽车的运行数据采集、存储与分析,从技术层面实现车辆安全性预测预警、车辆性能评价,致力于从技术层面实现数据真实性与有效性的检测,实现车辆里程核算、运营效果评估以及节能减排评估^[15]。目前,专门针对氢燃料电池汽车的大数据平台比较多,在氢安全方面,数据平台从氢能制取、储存、运输、加注、氢燃料电池系统和车辆多环节进行氢安全监测,实现氢安全监控和风险预警。当氢气制取、储存、运输和加注环节氢气管路泄漏时,数据平台可实现泄漏源可定位、可主动报警的氢泄漏监控,同时对氢气制取、储存、运输和加注环节仪器、零部件运行数据进行性能分析,从而达到提前预警,降低事故发生,同时可溯源事故发生环节。氢燃料电池汽车大数据平台为氢燃料商用车的氢安全提供了有效的安全保障。

5 结束语

氢燃料电池汽车氢安全是车辆安全运行以及氢燃料电池产业快速发展的关键因素。本文通过结合商用车氢安全设计、检测和使用的实车经验及相关文献综述,从车辆设计、使用和后端监测环节,对氢燃料电池汽车氢安全保障措施进行详细的探讨和总结,对氢燃料电池商用车在研发、设计、使用和后端监测中涉及的氢安全具有参考价值,同时增强了公众对氢燃料电池商用氢安全的认识。研究表明,严格的设计和使用要求,能有效保障氢燃料电池商用车氢安全。当然,随着技术的发展,零部件、传感器及其他检测技术的发展,如易感知的声光报警技术、大数据监测技术等,还会进一步推动燃料电池汽车氢安全措施的进步,车辆氢安全还会进一步加强。

参 考 文 献

- [1] 伊文婧, 梁琦, 裴庆冰. 氢能促进我国能源系统清洁低碳转型的应用及进展[J]. 环境保护, 2018, 46(2): 30-34.
- [2] 王健建, 胡辰树. 我国氢燃料电池专用车发展现状与趋势分析[J]. 专用汽车, 2021(4): 51-55.
- [3] 吴兵. 燃料电池汽车氢安全的研究与设计[J]. 上海汽车, 2013(12): 5-8.
- [4] 黄兴, 丁天威, 赵宏辉, 等. 车用燃料电池系统氢安全控制综述[J]. 汽车文摘, 2019(4): 6-10.
- [5] 蒋燕青, 王鸿鹄, 李亚超, 等. 燃料电池车高压储氢系统碰撞安全设计与分析[J]. 上海汽车, 2011(12): 11-14.
- [6] 张城兴, 付玉生. 氢燃料电池汽车车载用氢安全问题分析及对策研究[J]. 河南科技, 2020(7): 139-141.
- [7] 刘艳秋, 张志芸, 张晓瑞, 等. 氢燃料电池汽车氢系统安全防控分析[J]. 客车技术与研究, 2017(6): 13-16.
- [8] 中关村标准化协会. 燃料电池商用车 车载氢系统 技术要求: T/ZSA 103—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [9] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 燃料电池电动汽车 燃料电池堆安全要求: GB/T 36288—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [10] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 燃料电池电动汽车 安全要求: GB/T 24549—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [11] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 燃料电池电动汽车 车载氢系统 试验方法: GB/T 29126—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [12] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 燃料电池电动汽车 车载氢系统 技术条件: GB/T 26990—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [13] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 燃料电池发动机性能试验方法: GB/T 24554—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [14] 中国汽车工业协会, 中国汽车动力电池产业创新联盟燃料电池分会. 氢燃料电池汽车安全指南(2019版)[R]. 2019.
- [15] 马符讯, 张照生. 新兴产业的数字治理研究—以新能源汽车国家监测与管理平台为例[J]. 管理评论, 2021, 33(11): 94-105.

【作者简介】

秦志东, 1977年, 男, 正高级工程师, 研究方向新能源汽车。

E-mail: qinzhidong@foton.com.cn

张志芸, 1984年, 女, 副研究员, 研究方向氢能与燃料电池。

E-mail: zhangzhiyun@foton.com.cn