

燃料电池汽车的氢安全问题

王晓蕾^{1,2}, 马建新², 邬敏忠³, 杨代军², 林 瑞², 张存满²

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学新能源汽车工程中心, 上海 201804;
3. 上海燃料电池汽车动力系统有限公司, 上海 201804)

摘 要: 在燃料电池汽车试验经验的基础上, 结合国内外研究进展, 介绍了有关车载燃料电池氢气安全问题, 包括车载氢气系统的安全措施, 车载氢气系统的安全性测试与试验, 车载氢气系统日常安全维护等。最后, 进一步指出了促进车载氢气系统安全的措施, 如从燃料电池汽车整体考虑氢安全问题以及加快和完善车载氢气系统的安全法规的建立等, 以加快氢能源在中国的大规模应用化进程。

关键词: 动力机械及工程; 燃料电池汽车; 车载氢系统; 氢安全

中图分类号: X9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-7180(2008)05-0365-5

Key concerns about hydrogen safety of fuel cell vehicles

WANG Xiaolei^{1,2}, MA Jianxin², WU Minzhong³, YANG Daijun², LIN Rui², ZHANG Cunman²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;
2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804;
3. Shanghai Fuel Cell Vehicle Powertrain Co., Ltd., Shanghai 201804)

Abstract: The development of hydrogen safety of fuel cell vehicles (FCVs), including safety measures, testing experiment, and daily maintenance of on-board hydrogen system, were introduced based on long term experimental experience and document surveying. In addition, some countermeasures for improving hydrogen safety of FCVs were suggested, i.e., the integrated consideration of all the parts of FCVs, and the implementation of new code and standard on hydrogen safety, so as to push forward the large-scale application of hydrogen energy in China.

Key words: power machine and engineering; fuel cell vehicles; on-board hydrogen system; hydrogen safety

随着技术和经济的发展, 人们对能源的需求日益增大, 而石油等传统能源正在日益枯竭, 能源危机日益严峻, 目前中国就有 31% 的石油依赖进口^[1]。另一方面, 由交通引起的环境污染日益威胁到人们的生活, 温室气体的排放, 酸雨的形成无不与使用传统燃料的交通运输息息相关。发展绿色的可替代

燃料, 既可以解决能源问题, 又可以减少对环境的污染。在这种背景下, 以氢为中间媒介的能源系统——氢能源系统逐渐引起了人们的广泛关注^[2~4]。

当今国内外普遍关注的燃料电池汽车就是一种理想的氢能系统, 也是氢能在交通运输领域的具体应用。燃料电池汽车是以氢气为燃料, 由氢气和氧

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2003AA501340, 2006AA11A187)

作者简介: 王晓蕾(1980-), 女, 博士研究生

通信联系人: 马建新, 教授, jxma@mail.tongji.edu.cn

通过燃料电池产生电能。这一过程不仅有极高的能量利用效率,而且排放物只有水,对环境没有任何污染^[5]。但是,一种新能源系统要得到推广和应用,其安全性是人们应该首先关心的问题。由于氢气本身的特性,如泄漏性、爆炸性、氢脆等现象,而使得车载氢气系统存在着一定的安全隐患。但是,氢气相对于石化燃料的安全性在1937年的“行登堡”号飞艇事故中得到了体现。丁泰克(Dynetek)等公司也都进行了相应的安全性实验,实验证明了在一般情况下,氢的安全性不低于天然气或液化石油气,甚至在一定的情况下要高于汽油。氢能系统正在迅速发展,在世界上的主要城市里,有以氢气为燃料的燃料电池公共汽车的范例。美国、德国和日本的汽车巨头投资数亿美元来研发高效、无污染的燃料电池汽车。“三大”汽车公司计划最早在2004年使消费者得到燃料电池汽车。主要的石油公司,包括皇家荷兰壳牌集团、德士古公司、大西洋富田公司和英国石油阿莫科公司正将它们定位于提供氢气作为运输燃料的公司。生产、运输、储存、分配氢气的基础设施已经得到示范,用于指导这些系统安全设计的所需规范也正在研究当中。

上海一直是我国氢燃料电池轿车的开发基地,我国燃料电池汽车国家标准的编制工作已经在上海启动,为了促进氢能和燃料电池汽车的进一步发展以及《燃料电池汽车整车安全要求》等相关氢能安全标准的制定,对氢能的安全性和燃料电池汽车的氢安全问题进行研究是很有必要的。在长期试验研究基础上,结合国内外在燃料电池氢安全方面取得的重要成果,对其进行了详细的介绍与总结,以推动氢能源在我国的产业化应用。

1 车载氢气系统安全措施

与其他任何燃料一样,必须重视氢气的物理特性。氢是最轻的元素,很容易从小孔中泄漏。例如,对于透过薄膜的扩散,氢气的扩散速度是天然气的3.8倍。因而传统思想错误的认为,在车上既安全又经济储存氢气是不可能的。但是,工业界和美国宇航局已经有了数十年安全储存氢气的经验,这使得长期以来氢气工业有一个相当好的安全纪录。通过借鉴美国国家航空和宇航局储存氢气的经验,选择合适的储罐材料,可以有效地解决氢气泄漏的问题。例如,昆腾(Quantum,通用公司拥有部分股权)和丁泰克(Dynetek)这样一些公司,现在出售的塑料内胆和铝内胆碳纤维缠绕的高压储氢罐因其重量轻,

单位重量储氢密度高,与钢制容器相比很好地解决了氢脆问题,同时也大大降低了成本,在美国加州进行的燃料电池示范项目中基本都采用了上述公司提供的碳纤维缠绕高压储氢罐。目前德国、美国和加拿大等国已经通过了 3.75×10^7 Pa的高压氢罐的相应测试以及生产许可。工作压力可高达 6.89×10^7 Pa的高压氢罐也已经通过了相应的实验,预计很快也会步其后尘^[6]。

在国内,同济大学自行开发设计的燃料电池轿车采用丁泰克公司提供的铝内胆碳纤维缠绕的高压储氢罐。以超越三号为例,储氢罐的工作压力为350 bar,储氢总量2.67 kg,续驶里程230 km。在开放空间碰撞的情况下,如果存储罐不破裂,它可以承受比汽车本身更高的压力。

在燃料电池轿车上,有包括电磁阀(Solenoid Valve)、安全阀(Pressure Relief Valve PRV)、溢流阀(Overflow)、热熔栓(Fusion Bolt)、手动截止阀(Manual Stop Valve)、温度传感器(Temperature Sensor)和压力传感器(Pressure Sensor)等在内的辅助安全装置,这些装置很好地维护了车载氢气系统的安全性。

总的来说车载氢气系统安全措施应从预防与监控两方面着手。从预防的角度来说,图1给出了车载氢气安全实例(其中气罐附件,包括气罐安全阀、温度传感器、压力传感器、气罐手动截止阀、气罐电磁阀为必选项)。

由图1所示,当气瓶中氢气压力超过设定值后,能通过气罐安全阀自动泄压,例如在瓶体温度由于某种原因突然升高造成气瓶内气体压力上升,当压力超过安全阀设定值时,安全阀自动泄压,保证气瓶在安全的工作压力范围之内。气罐电磁阀为12 V直流电源驱动,无电源时处于常闭状态,主要起到开关气瓶的作用,与氢气泄露报警系统联动,一旦泄漏氢气浓度达到保护值能自动关闭,从而达到切断氢源的目的。手动截止阀,通常处于常开状态,当气瓶电磁阀失效时能手动切断氢源。气罐电磁阀和手动截止阀联合作用,有效地避免了氢气泄漏。温度传感器是用来检测气罐内气体温度的部件,可以将气体的温度信号发送到驾驶室仪表盘上,通过气体温度的变化来判断外界是否有异常情况发生。例如在气体温度突然急剧上升时,如排除温度传感器故障之外,则在氢瓶周围可能有火警发生。压力传感器,主要用于判断气瓶中剩余氢气量,保证车辆的正常行驶,当压力低于某值时可以提示驾驶员加注氢气。加气口在加注的时候与加气机的加气枪

相连,从而达到加注的目的,同时具有单向阀的功能,应与未遮蔽的电气接头、电气开关和其他点火源保持至少 200 mm 的距离。单向阀在加气口出现损坏情况下防止气体向外泄漏并提高加气口的使用寿命。管路电磁阀,在给气瓶充气时,可有效防止气

体进入电池。减压阀可以将氢气的压力调节到电池所需要的压力。当出现危险的时候针阀可以将氢气瓶中的残余氢气安全放空。气体流动的高压管路的材质一般会选用不锈钢,耐压要大于 5 000 psi。

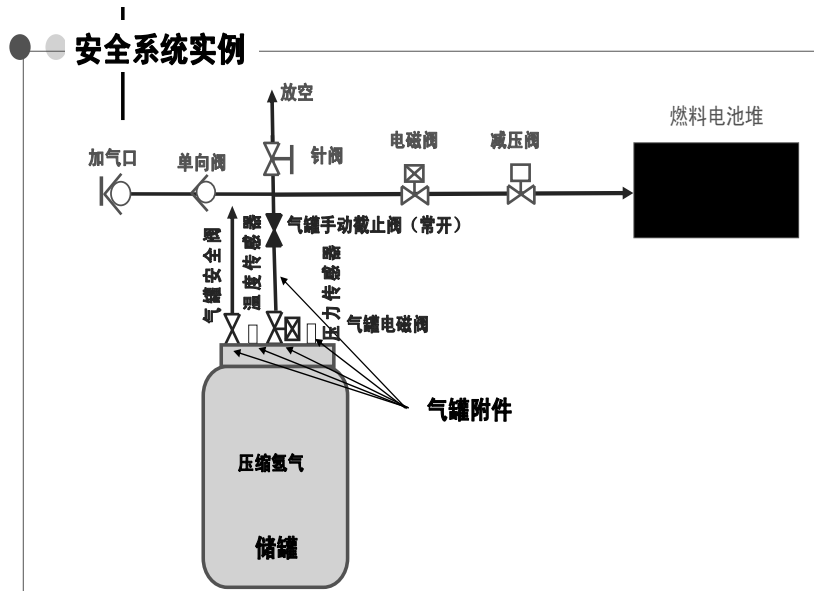


图 1 车载氢气安全系统示意图

Fig. 1 The sketch map of on-board hydrogen safety system

从监控的角度来说主要是指氢气泄漏传感器以及碰撞传感器。由于氢气传感器的测量原理不同,造成了其测量灵敏度及测量范围的差别,主要有半导体式、催化燃烧式、电化学式以及光化学式等。根据传感器的量程不同,又可以分为低量程 TGS821($1\ 000\times 10^{-6}\sim 5\ 000\times 10^{-6}$)传感器和高量程 TGS813($1\ 000\times 10^{-6}\sim 10\ 000\times 10^{-6}$)传感器。从灵敏度上看,低量程的反应比较快,并且两种传感器在低浓度时反应比较明显。传感器可以等效于两个电阻,一个是可变电阻,另一个为固定电阻。可变电阻随着氢气浓度、湿度和温度的变化而变化,其中氢气浓度和湿度对它的影响比较大。传感器的可变电阻随着浓度变大而变小(即信号端的输出电压也变大)。固定电阻是用来加热的。

根据不同的要求,在车上对氢气传感器类型、数量以及布置的位置均有一定的要求。一般来说,出于对安全性能考虑,氢能汽车总共要求安装 4 个氢气传感器,而所有传感器信号需直接传送到仪表盘的醒目位置,及时通知驾驶员。

同济大学自行研制的氢燃料电池轿车的氢气传感器的布置位置如图 2 所示。

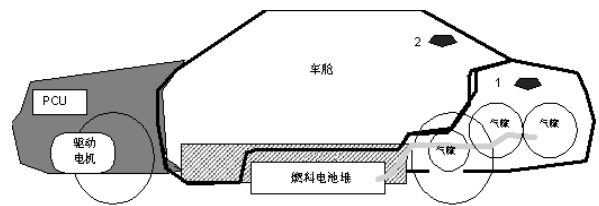


图 2 氢气泄漏报警仪位置布置示意图

Fig. 2 The disposition of hydrogen leakage alarms

由于位置 1 处靠近氢源,因而布置 2 个氢气泄露报警仪,报警值设置在 $1\ 000\times 10^{-6}$ (2.5% LEL)、 $5\ 000\times 10^{-6}$ (12.5% LEL) 和 $10\ 000\times 10^{-6}$ (25% LEL),报警级别分别为三级、二级和一级(一级氢气浓度报警,系统自动切断氢气供应,由司机将车移至指定的安全区域由专人检查整个系统;二级氢气浓度报警,红色报警,建议驾驶员切断氢气供应,将车开

至指定的安全区域由专人检查整个系统；三级氢气浓度报警，黄色报警，建议提醒驾驶员及时停机用氢气检漏工具检查供氢系统）。

在位置2处，布置2个报警仪，报警值设置在 $1\ 000 \times 10^{-6}$ (2.5% LEL)和 $5\ 000 \times 10^{-6}$ (12.5% LEL)，报警级别为一级和二级，分别安装在后座的左右两侧。报警系统需要自带蜂鸣器，氢气传感器需要常供电，在不开车的情况下如果测到氢气泄漏，蜂鸣器可以发出报警声音。

在车辆发生碰撞的情况下，整车控制系统能通过车上安装的碰撞传感器信号将氢气供应系统切断，这一点与传统汽车在发生碰撞情况下自动切断油路系统一样。

2 车载氢气系统的安全性测试与试验

除了保证车载氢气系统安全性之外，一些相关的安全性试验在燃料电池汽车动力系统的开发方面也显得尤为重要。

燃料电池车载供氢系统使用之前应进行气体泄漏检测。常规的检查方法就是向供氢系统通入氮气或氦气等惰性气体，气泡检测（水下）或者皂泡试验，检查所有连接点；灵敏度较高的检测方法有超声波、卤素火焰法以及氦质谱泄漏检测仪等。

振动试验则用来考察车载氢气系统的可靠性。通常的操作方法为：在垂直方向8g（重力加速度）加速度，在水平方向2g加速度进行振动试验，持续规定的时间之后，再检查整个系统的气密性。

另外，燃料电池汽车追尾碰撞安全性研究也极其重要。如何预防并保证燃料电池汽车在发生追尾碰撞时，不会导致其氢气的泄漏、控制系统的失效以及电路起火，这些都是在燃料电池汽车开发过程中必须考虑的安全性问题。

同济大学的王宏雁等^[7]通过对国内自主开发的燃料电池汽车进行的追尾碰撞虚拟试验分析，为进一步提高燃料电池车在追尾碰撞时的安全性提供了更多可行性建议，为燃料电池车身的开发提供参考依据。

同济大学的邬诚君^[8]选取“超越二号”燃料电池轿车作为虚拟试验对象，通过建立其整车有限元模型，运用适当的计算方法，模拟了轿车的实际正碰撞，并对其正面碰撞人体伤情指数进行分析，从被动安全性角度为燃料电池轿车进一步的总布置设计以及车身改进提出具有参考价值的建议。

3 车载氢气系统日常安全维护

通常情况下，氢气没有腐蚀性，也不与典型的容器材料发生反应。在特定的温度和压力条件下，它可以扩散到钢铁和其他金属中，导致我们所知的“氢脆”现象。鉴于此，不仅车载氢气系统的设计必须符合高安全标准，而且其日常维护也非常重要。在氢气供给及安全报警系统中，各种传感器的作用尤为突出，它关系到能否对氢气的泄漏进行实时监测，并且做出相应的控制措施。传感器是非常灵敏的元件，只有对其进行定期的校正，才能确保其正常工作。

建立氢气安全系统的主要焦点是使泄漏和火源的危險降低到最小程度。因此，工作人员就应该定期进行载氢系统的气密性检测，对管路进行定期的保压实验，以减少氢气的泄漏。此外，对相关的工作人员进行良好的培训及设计一套较好的强调安全操作的程序是十分必要的。

此外，在燃料电池车开发时，既要考虑常规汽车的安全性，又要考虑燃料电池汽车本身特有的安全性要求。尤其在行李箱内装有氢气瓶和控制系统的情况下，在装载车载供氢系统的汽车行李厢中，要增加通风对流结构以避免非常情况下的氢气快速积聚。

4 展望

通过经验总结以及对相关文献的调研，发现有关车载氢气安全系统的研究还不是很多，另外氢安全不应局限于氢气本身，还应从燃料电池汽车整体考虑。由于燃料电池汽车本身涉及到很多电器设备以及高压电，电安全对车载氢气系统的安全性有着不可低估的作用。另外，有关氢能安全特别是车载氢气系统的安全法规还不是很健全。所以，我国今后要加强氢能安全研究，包括实验研究和计算机模拟研究等，增加人们对氢安全性的认识，同时设计更有效的安全措施，为氢能的利用保驾护航。

[参考文献](References)

- [1] CHALK Steven G, MILLER James F. Key Challenges and Recent Progress in Batteries, Fuel Cell, and Hydrogen Storage for Clean Systems[J]. Journal of Power Sources, 2006, 159(1): 73-80.
- [2] HOU Yongping, ZHANG Mingxi, WAN Gang. The Analysis for the Efficiency Properties of the Fuel Cell Engine[J]. Renewable Energy, 2007, 32(7): 1175-1186.
- [3] KIM Minjoong, PENG Hui. Power Management and Design

- Optimization of Fuel Cell/Battery Hybrid Vehicle[J]. Journal of Power Source, 2007, 165(2): 819~832.
- [4] HIGGINS Cortney J, MATTHEWS H. Scott and HENDRICKSON Chris T, et al. Lead demand of future vehicle technologies[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2007, 12(2): 103~114.
- [5] 冯文, 王淑娟, 倪维斗, 等. 氢能的安全性和燃料电池汽车的氢安全问题[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 677~682.
FENG Wen, WANG Shujuan, NI Weidou, et al. The safety of hydrogn energy and fuel cell vehicles[J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2003, 24(5): 677~682.(in Chinese)
- [6] LOVINS Amory B. Twenty Hydrogen Myths [OL]. America: <http://www.rmi.org/sitepages/art7516.phb>. 2003, 6.
- [7] 王宏雁, 范益丞. 燃料电池汽车追尾碰撞模拟分析[J]. 上海汽车, 2005, (1): 29~31.
WANG Hongyan, FAN Yicheng. Simulating the rear impact safety of a fuel cell vehicle[J]. Shanghai Auto, 2005, (1), 29~31. (in Chinese)
- [8] 郭诚君. 基于虚拟试验的轿车正面碰撞安全性分析[J]. 汽车研究与开发, 2005, (11): 32~36.
WU Chengjun. Safety analysis of car frontal collision test based on simulating test[J]. Automobile Research and Development, 2005, (11): 32~36. (in Chinese)。