

燃料电池汽车被动安全性能检测方法的研究

王立民，李志，何成，李君

（中国汽车技术研究中心有限公司，天津300300）

摘要：燃料电池汽车是未来新能源汽车主要类型之一，为确保其在道路事故中的安全性能，需要对其在碰撞过程中的乘员保护性能做相应的检测与鉴定。根据燃料电池电动汽车的特性，从燃料泄漏和触电防护两个方面，研究适用于燃料电池汽车的被动安全检测评价方法。

随着居民生活水平的提高，汽车逐渐走进千家万户，便利了人们的出行。同时，持续上升的汽车产量和保有量使得化石燃料的消耗量日益增加，对环境的污染也越来越严重。为了解决能源和环境问题，对新能源的开发成为解决问题的一条重要路径。

时下最流行的新能源汽车莫过于电动汽车。与纯电动汽车和混合动力汽车相比，燃料电池电动汽车是未来电动汽车发展的方向与趋势。为保障今后燃料电池电动汽车在道路上行驶安全，需要对其安全性能进行研究分析，通过制定相关的法规要求，检测燃料电池电动汽车在设计和制造过程中是否满足安全性能要求。在道路事故中，碰撞是造成伤害的主要原因，所以研究燃料电池电动汽车碰撞安全性能显得格外重要。

1燃料电池电动汽车碰撞安全性问题

燃料电池汽车作为新型汽车有其独特之处，既携带易燃易爆的活性气体燃料，又通过电能驱动车辆，所以其被动安全性能评价更为严苛复杂。各类型汽车的被动安全性能评价内容如表1所示。为了更好了解燃料电池电动汽车的特征，分析其安全性能，参考汽车碰撞的方法及相关标准，从结构防护与气体泄漏、乘员损伤以及试验后电气安全等主要影响因素出发，研究燃料电池电动汽车的碰撞试验方法。

表1 四种类型车辆被动安全评价项目

汽车类型	评价项目			
传统燃油汽车	乘员损伤	车身变形量	燃料泄漏	
混合动力汽车	乘员损伤	车身变形量	燃料泄漏	电安全
纯电动汽车	乘员损伤	车身变形量		电安全
燃料电池汽车	乘员损伤	车身变形量	气体泄漏	电安全

1.1燃料电池电动汽车的结构特征

为了更好地保护储氢系统，燃料电池电动汽车在车辆结构方面，有了一定的改变。车身底部布置了燃料电池堆、动力控制单元、储氢装置及管路等模块，后舱布置动力电池、储氢装置等。

1.2碰撞安全性问题

作为新型电动汽车，燃料电池电动汽车主要包括储氢装置、氢气供给管路、燃料电池堆、动力电池以及电动机。对于高速碰撞来说，巨大减速度会给车内乘员带来伤害。对于储氢装置和氢气供给管路来说，碰撞使其存在泄漏和爆炸等问题。而对于燃料电池、动力电池和电动机来说，碰撞则会带来触电等问题。

2碰撞试验方法的研究

目前，国内还没有相关的标准是针对燃料电池电动车进行碰撞测试的要求和说明。相关联的标准有《燃料电池汽车安全要求》（GB/T24549—2009）和《氢系统安全的基本要求》（GB/T29729—2013），其标准主要是对使用氢气的相关设备和环境以及安全方面提出了相关要求。结合整车碰撞的试验方法以及燃料电池电动汽车碰撞的危害因素，将碰

撞试验分为以下两步。

2.1 试验前车辆危险源因素的处理

氢气的内在特征，决定了燃料电池电动汽车有不同于传统新能源汽车的危险特性，它有着易燃、易泄漏等诸多危险。氢又是最轻的元素，比液体燃料和其他气体燃料更容易从小孔中泄漏。一旦发生泄漏，氢气就会迅速扩散。与汽油、丙烷、天然气相比，氢气在空气中具有较大的快速上浮能力和较强的扩散性，而且氢的燃烧范围很广，着火点很低。氢气火焰几乎是看不到的，因为在可见光范围内，燃烧的氢放出的能量很少。因此接近氢气火焰的人可能会不知道火焰的存在，增加了危险性。

为降低试验危险，提高试验的安全系数，同时又能准确模拟现实中燃料电池电动汽车碰撞的场景，可以利用氦气替代氢气作为试验中的燃料气体。试验前，需要抽空所有储氢装置中的氢燃料以及管道中的氢气，用相同质量的氦气来替代。氢气的排空和氦气的置换需要经过多次重复，目的是把储氢罐中的氢气浓度降低到4%以下。同时，为了排空管路中的剩余氢气，完成氦气置换后，需要启动车辆至车辆自动灭火。

2.2 碰撞过程中的相关检测

将燃料电池电动汽车中的氢气用氦气替代，其他操作按正常法规要求进行，试验过程中除了需要对乘员损伤做相关评价外，还需检测试验后燃料气体的泄漏及高压电气安全。

3 碰撞后氦气介质泄漏检测

大部分燃料电池汽车的储气机构是一种中部为圆柱形、两端为椭圆形的气罐。碰撞发生后，不论是输气管路破裂泄漏还是气罐破裂泄漏，储气罐内部气压都会发生变化。通过在储气机构内部加装气压传感器来监测碰撞过程中气压的变化，同时这些试验前后的气压值也是计算气体泄漏量的依据。通过仿真可以发现这种两端椭圆形结构的气瓶在出气口与封头的过渡处产生应力集中，是容易发生材料破裂的危险位置，如图1红色区域所示。在此位置附近加装气压传感器能有效检测气压变化。

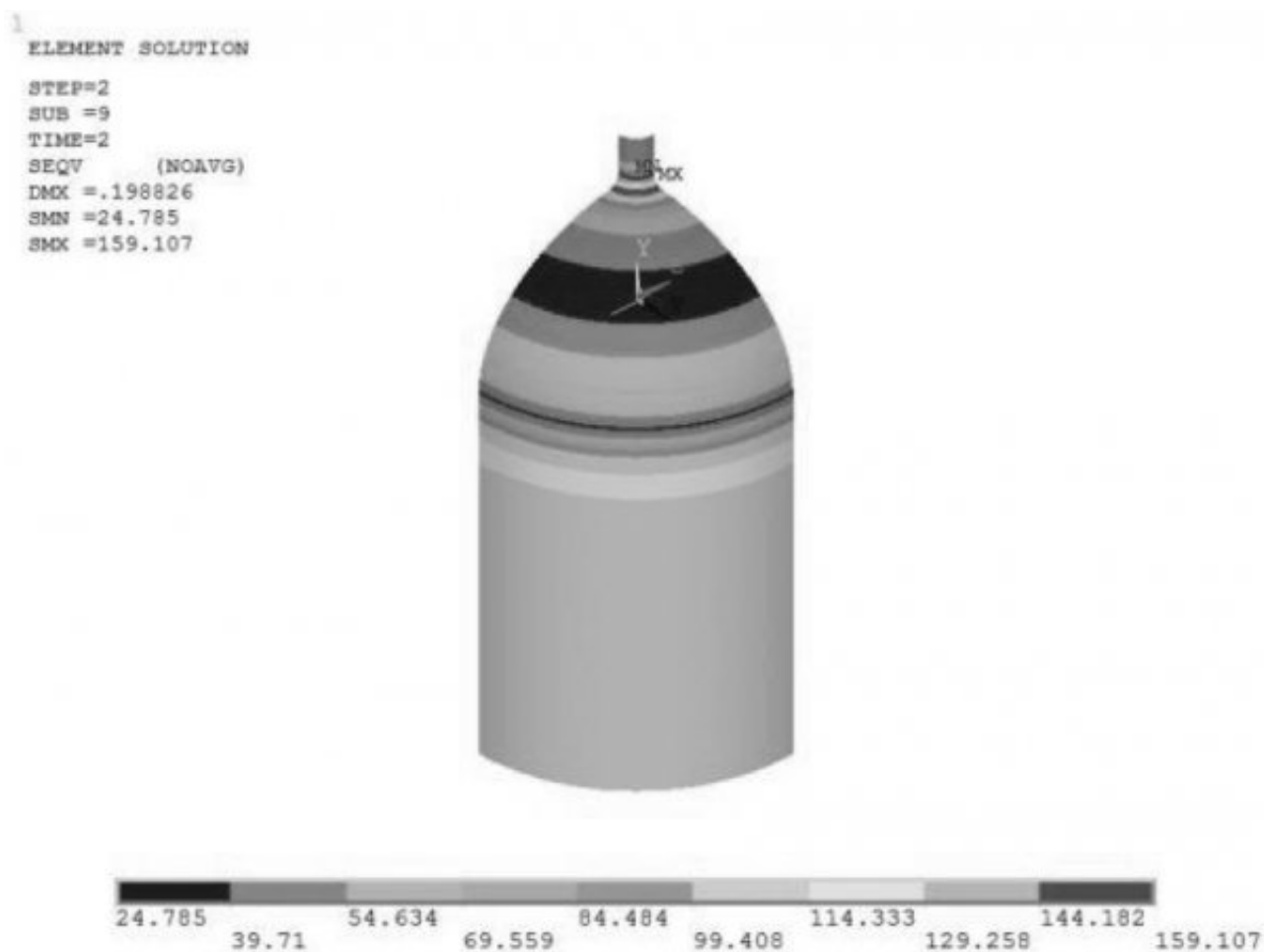


图 1 试验工况下气罐的总体应力分布云图

对于燃料电池电动汽车，碰撞过程中，利用氦气代替氢气进行试验，气体的泄漏率应按以下程序计算。在碰撞前和碰撞后的规定时间间隔 t 内，应测量氦气的压力 P_0 和温度 T_0 ，。时间区间 t 数值通过以下公式计算，如果计算时间小于 60min，则按 60min 测试，大于 60min 以计算时间为准：

$$\Delta t = V_{\text{CHSS}} \frac{NWP}{1000} [R_s(-0.028NWP + 5.5) - 0.3] - 2.6R_s. \quad (1)$$

式(1)中: V_{CHSS} 为储氢系统的容积, L; NWP 为公称工作压力, MPa; $R_s = P_s / NWP$.

储氢系统中氦气的初始质量 M_0 公式为:

$$M_0 = \left[-0.0043 \left(\frac{288P_0}{273T_0} \right)^2 + 1.53 \left(\frac{288P_0}{273 + T_0} \right) + 1.49 \right] \times V_{\text{CHSS}}. \quad (2)$$

式(2)中: P_0 为初始压力的测试值, MPa; T_0 为初始温度的测试值, °C; V_{CHSS} 为储氢系统的容积, L。

在时间间隔 (Δt) 结束时, 储氢系统中氦气的最终质量 (M_f) 可按以下公式计算:

$$M_f = \left[-0.0043 \left(\frac{288P_f}{273 + T_f} \right)^2 + 1.53 \left(\frac{288P_f}{273 + T_f} \right) + 1.49 \right] \times V_{\text{CHSS}}. \quad (3)$$

式(3)中: P_f 为时间间隔 (Δt) 结束时的最终压力测试值, MPa; T_f 为最终温度测试值, °C。

在时间间隔 (Δt) 内氦气的平均流量 V_{He} 公式为:

$$V_{\text{He}} = \frac{22.4(M_f - M_0)}{4.003\Delta t} \frac{P_0}{P_{\text{target}}}. \quad (4)$$

式(4)中: V_{He} 为时间间隔内的平均体积流量, NL/min; P_0/P_{target} 为用于抵消初始压力测试值 P_0 与目标充装压力 P_{target} 之间的差异。

将氦气的平均流量转化为氢气平均流量:

$$V_{\text{H}_2} = 4/3 \times V_{\text{He}}. \quad (5)$$

4碰撞后高压电气安全检测

燃料电池电动汽车在碰撞后也存在高压电气安全的问题，所以在碰撞试验的过程中，需要对其相关的性能进行检测。参考法规《电动汽车碰撞后安全要求》（GB/T31498—2015）以及燃料电池电动汽车的特征，将高压电气安全检测分为以下几个部分。

4.1触电防护要求

为了防止高压对乘员带来电击伤害，燃料电池电动汽车碰撞后应满足触电防护要求。

绝缘电阻检测：测量负载端和REESS端的绝缘电阻阻值，判断在基本防护或单点失效的情况下，流入人体的电流是否在安全电流范围以内。具体测量方法参考《电动汽车碰撞后安全要求》（GB/T31498—2015）。

低电能检测：从能量角度出发，要求在碰撞后5~60s后，负载端所释放的电能小于0.2J。

低电压检测：为确保安全电压，要求在碰撞试验结束后5~60s间测量电力系统负载端高压母线的电压值均不大于30V交流或60V直流。

物理防护检测：碰撞试验后对车辆进行直接接触测试和间接接触测试，要求车身直接防护能满足IPXXD的要求以及外露的可导电部件与电平台之间电阻值小于0.1Ω。

4.2 REESS端安全要求

对于燃料电池汽车来说，碰撞后存在电池起火爆炸风险和燃料起火爆炸的风险，所以在碰撞后，要切断各类供需系统之间的联系，主要为氢燃料与燃料电池堆、电池与电力负载。主要检测项为REESS端不起火爆炸，REESS端气体泄漏不得超过出规定值，REESS电解液泄露不得超过出规定值。

4.3 REESS位移要求

为确保安全，要求碰撞结束后，REESS端不得伸入乘员舱，内部元器件不得伸出保护壳，对于氢气瓶和电池的位移不得超过规定值。

5试验后的安全评价

根据上面试验的检测项目，以及国内外相关的法规、标准，建立氢燃料电池电动汽车碰撞安全性能评价体系（不包含乘员损伤评价），如表2所示。从表2中可以看出，所建立的评价体系基本涵盖了燃料电池所存在的安全问题，其次这一评价体系也适用于当下现有的各类标准法规。

综上所述，为了使燃料电池电动汽车有更好的发展方向，我国应尽早制订出一个完善的、有针对性的燃料电池电动汽车碰撞安全综合性标准法规。

表 2 燃料电池电动汽车碰撞安全性能评价体系

序号	检测项目	试验方法	评价指标
1	储氢装置的泄漏	碰撞前和碰撞后规定的时间间隔内,测量燃料气体的温度和压力	燃料系统的平均氢气泄漏率不得超过 118 NL/min
2	管路泄漏	利用气体探测仪或泄漏检测仪对管路易破损以及接头处进行气密性检测	泄漏速率不得超过 0.005 mg/s
3	气体浓度检测	检测在驾驶员上方车顶 250 mm 以内、乘员舱顶部中心附近以及行李舱顶部的浓度传感器中的气体浓度变化	平均氢气浓度不超过 4%、氧气浓度不超过 3%
4	高压触电防护	检测 B 级电路的绝缘电阻	绝缘电阻大于 500 Ω /V
		检测车身电器的物理防护	满足 IPXXD 的要求以及等电位要求
		测量试验后 60 s 内 B 级电路电压	电压低于 60 V 直流、30 V 交流
		计算试验后试验后 60 s 内的电能	电能小于 0.2 J
5	位移要求	碰撞后,检测动力电池和氢瓶保护装置的位移变化	要求动力电池没有穿入的乘员舱及其他危险区域(如气体泄漏口)
			氢瓶固定装置不松动,气瓶位移量小于 13 mm
6	电解液泄漏	碰撞 30 min 内,电解液的泄漏量	泄漏量小于 5 L

6结论

对于燃料电池电动汽车进行的各类形式的碰撞试验,不但需要按照各类形式的碰撞标准法规进行试验,试验过程中,还需做到以下几点: 试验前,按照碰撞标准对车辆进行处理,同时将氢气排空,用相同体积的氮气替代进行试验; 试验过程中除了考核乘员损伤指标以外,还需增加表2中的相关检测项目,同时按照表格内的评价指标对其进行相应的考核; 需要对试验后的车辆进行隔离观察,待确认安全以后,再进行相应的处理。

参考文献:

- [1]刘桂彬,孙振东,李玉刚,等.GB/T31498—2015电动汽车碰撞后安全要求[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [2]何云堂,冯力中,赵静炜,等.GB/T24549—2009燃料电池电动汽车安全要求[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [3]李向荣.燃料电池汽车正面碰撞安全性研究[J].汽车工程,2010(3):213-216.
- [4]孙振东.基于氢燃料电池汽车碰撞安全性的研究[J].北京汽车,2009(2):27-30.
- [5]李建秋.燃料电池汽车研究现状及发展[J].汽车安全与节能学报,2014(5):17-29.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/156795.html>