

燃料电池轻型货车氢系统布置及安装结构设计

张汝辉^{1,2}

(1. 厦门金龙旅行车有限公司, 福建 厦门 361022; 2. 福建省新能源汽车企业重点实验室, 福建 厦门 361022)

摘要:为进一步提升有效载货空间,本文结合某款燃料电池轻型货车整车开发项目指标,完成了车载氢系统的设计匹配和结构设计,并采用有限元法对储氢系统的整车搭载方案进行了结构强度、抗振性、耐冲击性的仿真分析。通过振动台试验测试,验证了该布置方案的可行性,保障了车载氢系统在运行中的安全可靠性。

关键词:燃料电池轻型货车; 车载氢系统; 布置结构设计; 仿真测试

中图分类号:U461. 91; U469. 21 文献标志码:A DOI:10. 15917/j.cnki. 1006-3331. 2025. 05. 008

Layout and Installation Structure Design of Hydrogen System for Fuel Cell Light Trucks

ZHANG Ruhui

(1. Xiamen Golden Dragon Bus Co., Ltd., Xiamen 361022, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of New Energy Vehicles Enterprises, Xiamen 361022, China)

Abstract: To further enhance the effective cargo space, this paper aligns with the development targets of a specific fuel cell light truck project. It performs design matching and structural integration of the onboard hydrogen system. It employs the finite element method to simulate and analyze the structural strength, vibration resistance, and impact performance of the vehicle-mounted hydrogen storage system. The feasibility of the layout scheme is verified through vibration table testing, ensuring operational safety and reliability of the onboard hydrogen system.

Key words: fuel cell light truck; on-board hydrogen system; layout structure design; simulation test

发展燃料电池汽车已成为我国重要战略之一^[1]。目前大部分燃料电池汽车供氢系统均采用高压储氢方式^[2-3],其中,燃料电池货车高压储氢压力通常高达 35 MPa,因此对储氢系统的结构安全要求极为苛刻^[4]。此外,氢气瓶组通常布置在驾驶室后方,这种布置方式直接减少了货箱的有效载货空间。

在保障车载氢系统符合使用需求的基础上,本文重点研究氢系统布置设计和结构安全,以提升燃料电池轻型货车的有效载货空间。

1 选型计算

燃料电池汽车的主要能源来自车载储氢瓶中的

氢气^[5]。因此,储氢瓶的选型匹配直接决定了车辆的可用储氢量,是影响整车续驶里程的最主要因素。

1.1 氢气单位质量与体积的换算

车载储氢系统为高压储氢,由于理想气体方程在此压力下计算偏差较大,因此采用温度压力法^[6-7]进行近似计算。

$$Z = \frac{MpV}{mRT} \quad (1)$$

式中: Z 为气体压缩系数; M 为氢气摩尔质量,按 0.002 016 kg/mol 计算; p 为压强; V 为体积; m 为单位氢气质量,按 1 kg 计算; R 为理想气体常数,按 8.314 5 J/(mol·K) 计算; T 为气体绝对温度。

收稿日期:2025-06-16。

第一作者:张汝辉(1982—),男,博士,高级工程师,主要从事新能源汽车开发设计工作。E-mail:zhangruhui@xmjl.com。

当 T 为室温 298.15 K 且 p 为 35 MPa 时, 按文献 [5] 查表可知 Z 为 1.22, 将以上参数代入式(1)可得单位质量下氢气体积 V 为 42.8 L。

1.2 气瓶容积计算

基于已有的整车动力学模型进行实际工况的能耗仿真, 百公里氢耗为 2.5 kg。为满足续驶里程不低于 400 km 的整车性能指标, 要求车载氢系统储氢量不低于 10 kg。选用标称压力规格为 35 MPa 的储氢瓶。在该压力与常温条件下, 储存 1 kg 氢气的体积约为 42.8 L。因此, 为储存 10 kg 氢气, 气瓶总容积应不低于 428 L。

综合考虑常用氢气瓶规格、车辆可布置空间及气

量使用下限等因素, 选择采用 2 个容积为 270 L、压力为 35 MPa 的氢气瓶组方案, 其总容积为 540 L, 可满足设计需求。

2 方案设计

车载储氢系统是燃料电池汽车的重要组成部分, 主要功能是为燃料电池发动机提供稳定压力的氢气来源。车载氢系统具有高压氢气储存、氢气加注、稳压供氢的功能, 主要由高压储氢瓶、瓶阀、减压阀、加氢口、单向阀、管路接头、高压与中压压力传感器、氢泄漏传感器、氢控制器、泄压阀、手动放气装置、集成框架、内部线束等零部件组成。车载氢系统方案原理如图 1 所示。

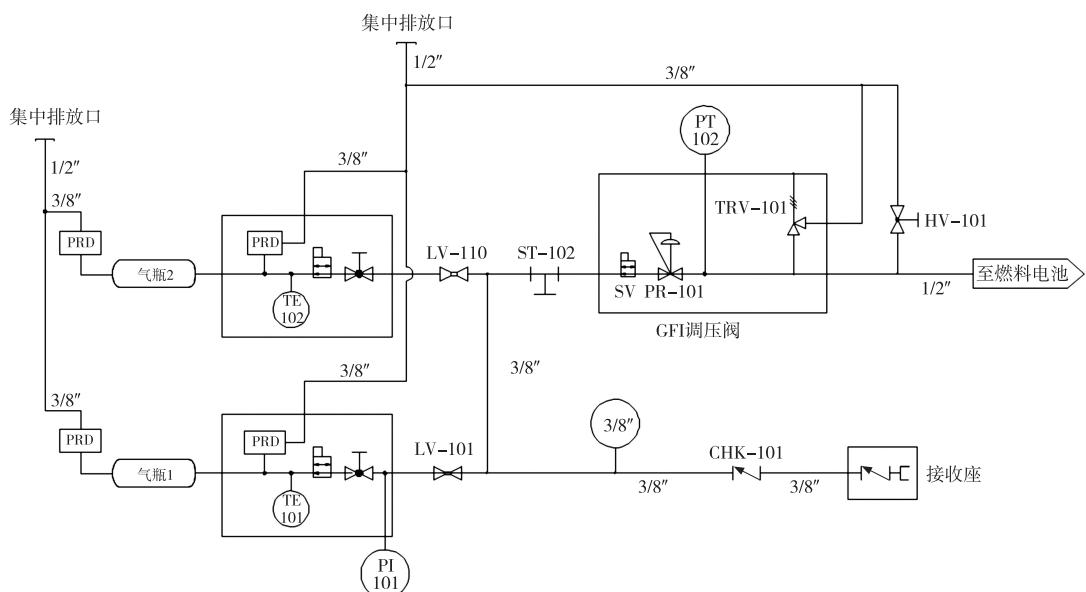


图 1 车载氢系统原理框图

2.1 氢系统的整车布置

燃料电池轻型货车采用常规布置方式, 即将氢气瓶组布置在驾驶室和货箱之间。此布置方式会侵占货箱空间, 减少载货量。由于驾驶室下方已布置燃料电池发动机系统, 若再将氢系统集中布置在车辆前部, 会加剧车辆前桥载荷, 影响底盘配重平衡。

为给货箱预留更多使用空间, 将 2 个氢气瓶和 1 个动力电池箱分别布置于车辆底盘(见图 2)。动力电池框架与气瓶框架靠近大梁的一侧均设有安装面。安装面上方通过螺栓与大梁连接固定; 安装面下方则通过连接结构将两框架相互连接加固。此设计使电池框架、气瓶框架与车辆大梁共同形成一个整体性更

强的稳定结构, 从而有效提升底盘结构刚度与储氢系统安全性。

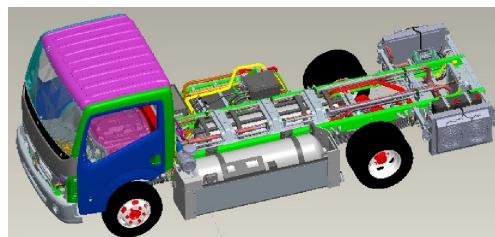


图 2 车载氢系统布置示意图

2.2 氢系统的总体参数

基于选定的 2 个 270 L 高压储氢瓶, 设计车载氢系统的高压侧参数, 并根据车辆燃料电池发动机的正

常工作供氢压力需求(1.5 MPa),配置车载氢系统低压侧参数(见表 1)。

表 1 车载氢系统总体参数

内容	要求
加注接口	35 MPa(TN5)
额定储氢压力	35 MPa
系统储氢容积	2×270 L
高压管路工作压力	35 MPa
低压管路工作压力	静态调压 1.58 MPa(表压)
安全阀开启压力	2.0 MPa(表压)
进电堆管路规格	$\Phi 1/2'' \times 0.049''$ 316 L 不锈钢管
防护等级	IP65 以上
介质	氢气、氮气、氦气

3 结构安全仿真分析

储氢系统在车载环境下可能因振动与冲击诱发结构疲劳损伤、连接件松动或密封失效,进而导致安全隐患^[8]。为确保车载储氢系统的安全运行,需模拟车辆的实际运行状况,并对其结构及安全性能进行仿真分析。仿真分析主要包括以下内容:静强度分析、模态分析、随机振动分析、冲击分析及基于上述结果的疲劳分析^[9]。

氢系统结构及安全性能仿真分析步骤如下:①建立结构的有限元模型,并进行结构模态分析,以确定其固有频率、振型及敏感频率。在此基础上,计算结构的频率响应。②根据功能性随机振动试验的加速度功率谱密度曲线,开展垂向、横向和纵向的功能性随机振动试验仿真。③根据长使用寿命试验的加速度功率谱密度曲线,开展垂向、横向和纵向的长使用寿命试验疲劳仿真。④进行垂向、横向和纵向的显式动力学冲击试验仿真。

3.1 CAE 分析前处理

在进行 CAE 分析前,需对车载氢系统的三维模型进行前处理,以建立有限元模型。建立有限元模型主要包括模型简化、网格划分、设置材料属性和施加约束条件 4 个步骤。

1) 模型简化。忽略辅助构件的小孔、小凸台、小倒角等特征;忽略支架螺纹孔对结构力学性能影响较小的特征;去掉一些对分析结果影响不大但结构复杂

的小零件。简化后的模型如图 3 所示。

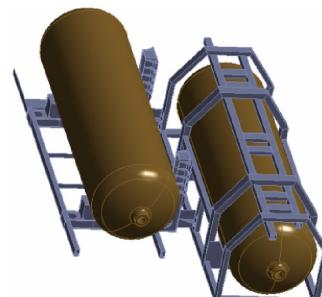


图 3 氢系统结构分析简化模型

2) 网格划分。气瓶网格采用 Solid185 实体单元划分,框架网格采用 Shell181 网格划分,气瓶的网格尺寸设置为 50 mm,框架网格尺寸设置为 5 mm。划分好网格的有限元模型如图 4 所示。

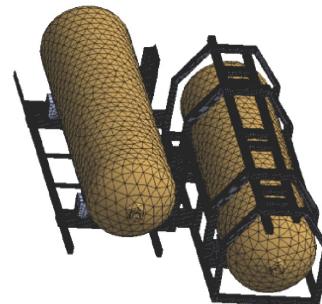


图 4 氢系统网格划分有限元模型

3) 设置材料属性。各材料属性参数见表 2。

表 2 材料属性

材料类型	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	屈服强度/MPa	拉伸强度/MPa
Q355	200	7 850	0.30	355	630
铝合金 6061	71	2 770	0.33	280	310

4) 施加约束条件。如图 5 所示,将拉带与气瓶、气瓶与垫板、垫板与底座固定板,以及各框架之间均设置为绑定接触。

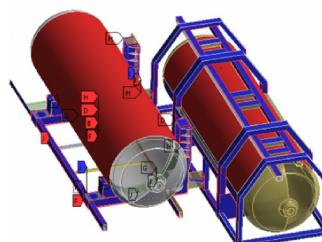


图 5 氢系统结构分析约束条件

3.2 随机振动测试分析

1) 边界条件。依据国标 GB 38031—2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》中对于关键零部件振动要求及随机振动曲线^[10],本分析采用了非M₁、N₁类车辆的功率谱密度。随机振动测试条件下,X轴为行进方向,重力加速度均方根为0.52g;Y轴为垂直于行驶方向,重力加速度均方根为0.57g;Z轴为竖直方向,重力加速度均方根为0.73g。以上每个方向随机振动测试时间均为12 h。振动测试条件见表3。

表3 车载氢系统的振动测试条件

频率/Hz	功率谱密度/(g ² ·Hz ⁻¹)		
	Z轴	Y轴	X轴
5	0.008	0.005	0.002
10	0.042	0.025	0.018
15	0.042	0.025	0.018
40	0.000 5	/	/
60	/	0.000 1	/
100	0.000 5	0.000 1	/
200	0.000 01	0.000 01	0.000 01

2) 分析结果。X方向仿真分析结果如图6所示。随机振动工况下X方向最大变形出现在车载氢系统安装框架的底端,位移量约为0.06 mm。在20 Hz频率点,功率谱密度为2 g²/Hz工况下,X方向最大变形出现在车载氢系统安装框架顶端,位移量约为0.1 mm。

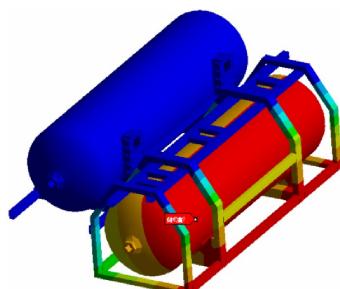


图6 X方向分析

Y方向仿真分析结果如图7所示。在随机振动工况下,Y方向最大变形出现在车载氢系统安装框架的底端,位移量约为0.09 mm。在20 Hz频率点,功率谱密度为1.5 g²/Hz工况下,Y方向最大变形出现在车载氢系统安装框架的底端,位移量约为0.17 mm。

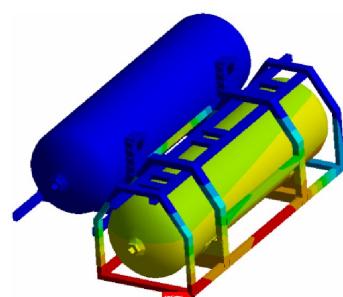


图7 Y方向分析

Z方向仿真分析结果如图8所示。此随机振动工况下Z方向最大变形出现在车载氢系统安装框架的底端,位移量约为0.08 mm。在20 Hz频率点,功率谱密度为1.5 g²/Hz工况下Z方向最大变形出现在车载氢系统安装框架的底端,位移量约为0.1 mm。

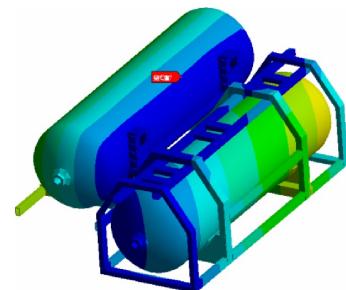
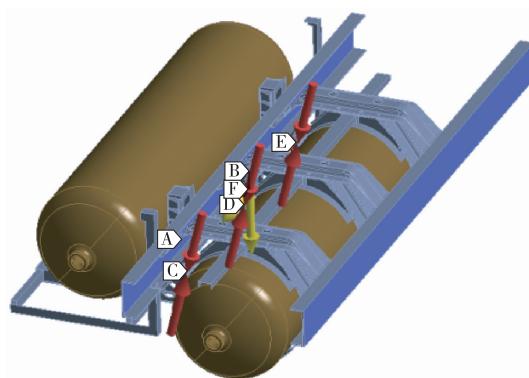


图8 Z方向分析

综上,车载氢系统及其框架结构在整车随机振动工况下满足框架强度要求。

3.3 框架冲击分析

供氢系统框架碰撞冲击分析如图9所示。



- [A] Fixed Support
- [B] Standard Earth Gravity: 98 066 mm/s²
- [C] Bolt Pretension: Lock
- [D] Bolt Pretension 2: Lock
- [E] Bolt Pretension 3: Lock
- [F] Acceleration: 80 000 mm/s²

图9 框架碰撞冲击分析

在储氢系统与车体的安装点处设置固定约束。静态分析时,施加 $1g$ 的重力加速度以模拟自重;动态分析时,则分别在 X 、 Y 、 Z 方向施加 $8g$ 的冲击加速度。供氢系统框架在 $8g$ 加速度工况下,最大位移量小于 13 mm ,总体应力小于材料屈服强度,满足框架强度要求。

4 测试评价

车载氢系统的耐振动性能关系到整车的使用安全和工作寿命。振动试验的目的是模拟车载氢系统在燃料电池货车行驶过程中可能出现的振动激励,提前预测因振动导致的潜在故障和失效模式,以便在车载氢系统的安装设计过程中避免此类问题,满足车辆全生命周期运行的需求。

为保障车载氢系统安全,根据 GB/T 44131—2024《燃料电池电动汽车碰撞后安全要求》^[11]中的安全要求,每个储氢瓶均配置有主关断阀、氢泄漏传感器及碰撞传感器。当碰撞冲击产生时,储氢气瓶阀门能自动关断,防止氢气泄漏。车载氢系统的振动测试如图 10 所示,振动功率谱密度按照表 3 执行。



图 10 车载氢系统振动测试

试验顺序按照 Z 、 Y 、 X 方向依次进行。车载氢系统经过振动和碰撞试验后,气密性和泄漏量满足要求,同时车载氢系统相关保护功能不存在失效情况。在完成振动测试后,车载氢系统无结构损坏、密封性良好、无泄漏,仍能正常工作。

5 结束语

本文从选型匹配、布置优化、结构安全、仿真分析与测试评价等多个方面,系统完成了某轻型燃料电池货车车载氢系统的方案设计。创新性地将氢气瓶组集成布置于底盘空间,并结合整车结构设计优化,显著提升了货箱的有效利用空间。经仿真分析与试验验证表明,优化后的氢气瓶组布置结构效果达到预期目标。相关设计思路与实施方法不仅有助于提升氢系统的结构安全性,还为整车安全使用提供了可靠保障。

参考文献:

- [1] 王贺武,欧阳明高,李建秋,等.中国氢燃料电池汽车技术路线选择与实践进展[J].汽车安全与节能学报,2022,13(2):211-224.
- [2] 郭婷,杨云凡,王金伟,等.燃料电池汽车氢电安全法规标准的研究[J].客车技术与研究,2018,40(4):57-59.
- [3] 李建秋,方川,徐梁飞.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(1):17-29.
- [4] 刘宗巍,史天泽,郝瀚,等.中国燃料电池汽车发展问题研究[J].汽车技术,2018(1):1-9.
- [5] 李玉鹏,李进,李飞强,等.燃料电池城市客车电电混合动力系统研究[J].客车技术与研究,2014,36(6):21-23.
- [6] 吴诗雨.燃料电池汽车氢气消耗量测量方法研究进展[J].中国汽车,2022(1):59-64.
- [7] 郭婷.燃料电池汽车续驶里程测量方法的研究[J].电源技术,2021,45(7):848-850.
- [8] 张静远.氢燃料电动客车车身骨架轻量化研究与碰撞安全性分析[D].广州:华南理工大学,2020.
- [9] 李锦康.车载供氢系统氢气瓶固定装置有限元建模及结构优化[D].北京:北京交通大学,2020.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部.电动汽车用动力蓄电池安全要求:GB 38031—2020[S].北京:中国标准出版社,2020:1-36.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部.燃料电池电动汽车碰撞后安全要求:GB/T 44131—2024[S].北京:中国标准出版社,2024:1-20.