

商用车CNG气瓶框架轻量化设计与分析

刘 强 张国锐 杨 斌 郭 巍
陕西重型汽车有限公司 陕西 西安 710200

摘 要：随着环保要求的日益严格和对燃油经济性的追求，压缩天然气（CNG）作为一种清洁燃料在商用车上的应用逐渐增多。CNG框架作为储存CNG气瓶的关键部件，其重量对商用车的整体性能有着重要影响。本文旨在设计一款商用车轻量化CNG框架，提高商用车载货量，降低制造成本。通过对框架结构的优化设计和材料选择，在保证框架强度和安全性的前提下，实现框架的轻量化。同时借助Hyperworks软件对设计方案进行仿真分析，并结合实际台架及整车试验验证，最终固化轻量化CNG框架设计方案，为商用车CNG框架轻量化设计提供了技术支持。

关键词：CNG气瓶框架；轻量化；CAE分析

引言

在全球倡导节能减排的大环境下，商用车领域对降低能耗和减少排放的需求愈发迫切。CNG以其相对清洁、成本较低等优势，成为商用车替代传统柴油燃料的重要选择之一^[1]。CNG框架用于固定和保护CNG气瓶，是商用车CNG系统的重要组成部分。然而，传统的CNG框架往往较重，这不仅增加了商用车的整备质量，降低了有效载荷，还会导致能源消耗的增加。因此，对商用车CNG框架进行轻量化设计具有重要的现实意义。

国外在汽车轻量化领域起步较早，在材料研发、结构优化设计以及先进制造工艺应用等方面取得了许多成果。国内近年来也加大了对汽车轻量化的研究投入，并在整车降重方面取得了显著的效果。对于骨架结构的轻量化，一些研究通过采用新型高强度铝合金材料和拓扑优化技术，实现了框架重量的显著降低^[2]。还有部分学者通过对框架结构进行尺寸优化和形状优化，提高了框架的性能并减轻了重量^[3]。

本文旨在通过结构优化和高强钢材料应用，对商用车CNG框架进行轻量化设计。在满足强度、刚度和安全性要求的前提下，最大限度地降低框架重量，有助于提高商用车的载货量，降低运营成本，提高商用车产品行业竞争力。

1 轻量化 CNG 框架设计

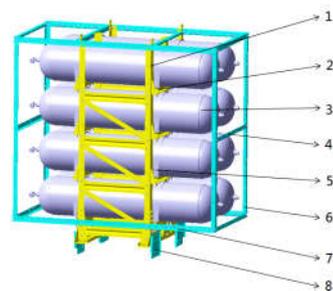
1.1 CNG供给系统组成

CNG供给系统包含CNG气瓶和气瓶框架，其中气瓶采用双排8气瓶布置，共4层。气瓶通过紧固带固定在气瓶托架上，通过侧立柱、中间立柱、底部横梁和车架连接板将总成固定在车架纵梁上。相关零部件如图1所示。

1.2 轻量化CNG框架方案设计

根据整车实际使用工况及产品设计相关规范，设计

一款轻量化CNG框架，具体结构如图2。根据承重的重要度划分，轻量化方案采用不同的材料，其中气瓶托架、中间立柱等使用750L钢材，侧立板使用510L钢材。通过不同尺寸及型号材料的匹配，整体结构相对优化前（全部结构均为510L）降重大于100kg。



1-中间立柱 2-气瓶托架 3-CNG气瓶 4-加强梁 5-紧固带 6-侧立柱
7-底部横梁 8-车架连接板

图1 CNG 气瓶及框架组成图



图2 轻量化CNG框架结构图

2 轻量化 CNG 框架仿真分析

本次模型采用CATIA进行方案设计，并使用Hypermesh软件进行仿真分析，具体分析方法^[4]：

（1）前处理：将框架导入Hypermesh，建立单元类型、施加载荷及边界条件的材料模型、定义求解器OptiStruct所需的控制卡片等各类满足求解所需的必要信息后，即可得到求解器可以识别的模型文件，然后提交

求解器进行解算。

(2) 求解：求解器读入前处理中HyperMesh创建的模型文件，然后计算结构对输入载荷的响应，即位移、应变、应力等结果，后处理阶段可通过HyperView查看。

(3) 后处理：查看求解结果的过程，对仿真结果进行确认，给出仿真分析报告，并根据仿真结果提出改进意见等。

2.1 有限元模型建立

CNG气瓶及框架总成有限元模型由气瓶框架、8个CNG气瓶、橡胶垫带组成，如图3所示。气瓶紧固带和橡胶垫带通过Contact命令来设置接触关系。支架之间通过焊缝、螺栓等方式连接起来，其中焊缝采用Seam进行建模，螺栓连接部位通过建立Beam单元模拟。通过Section beam设置螺栓的外形，即圆柱和螺栓尺寸。虽然仿真中的螺栓仅为线单元，但其物理性质与实际无差别。

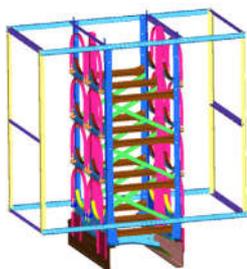


图3 轻量化CNG框架CAE模型图

2.2 网格划分及材料参数赋值

根据有限元设计方法，对焊接螺栓进行实体网格划分，橡胶垫带、气瓶紧固带和气瓶框架结构均用四边形网格划分，并含有少量的三角形网格确保有限元网格外形与三维数模一致。表1为CNG气瓶有限元气瓶及框架模型数据，表2为CNG气瓶框架材料属性。

表1 轻量化CNG框架及气瓶模型数据表

总单元数量	节点数量	三角形单元数量	四边形单元数量	实体单元数量
715464	644195	7767	582543	125154

表2 轻量化CNG框架材料属性表

材料牌号	弹性模量 (MPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
750L	212000	0.3	7900	650	750
510L	210000	0.3	7900	355	510

2.3 载荷施加和边界条件约束

根据GB/T 19239要求，气瓶框架在汽车前进方向应能承受8倍于充满额定工作压力的气瓶重力的静力，且气瓶组固定座与其固定点相对最大位移量不大于13mm。

气瓶及框架总成和车架连接处采用螺栓约束，车架两端固定约束。图4为施加载荷与边界条件后的模型。

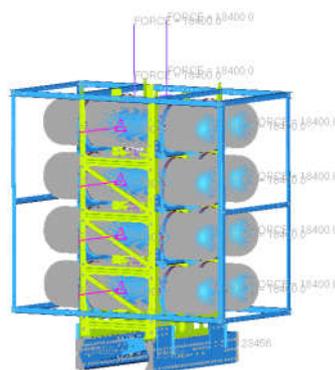


图4 轻量化CNG框架施加载荷模型图

2.4 求解与结果分析

Optistruct求解器用于分析整个气瓶框架的应力分布情况，并进一步进行安全因子的计算。通过仿真计算得出X、Y、Z三个方向的位移和安全因子云图。

2.4.1 CNG框架位移分析

通过仿真分析计算出施加8g加速度工况下的X、Y、Z三个方向的位移，具体位移云图如图5所示，位移值及对比结果见表3。

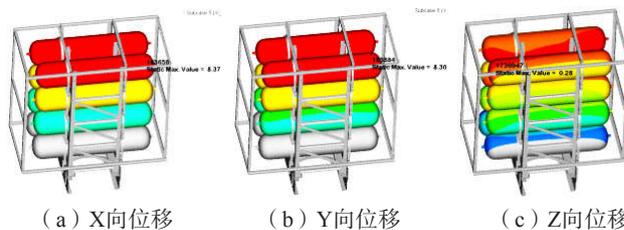


图5 轻量化CNG框架位移云图

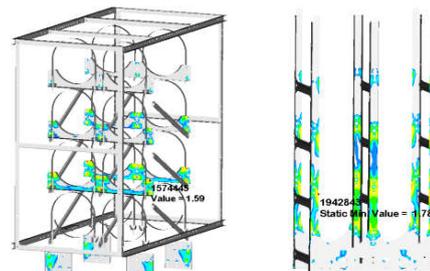
表3 CNG框架位移量对比表

	X向	Y向	Z向
优化前	8.11	8.49	0.25
优化后	8.37	8.30	0.28

根据仿真结果，优化前后方案位移量均满足国标要求（≤13mm），且优化后的位移量小于优化前的方案。

2.4.2 CNG框架安全因子分析

通过仿真分析计算出施加8g加速度工况下X、Y、Z三个方向的安全因子，具体安全因子应力图如图6所示，安全因子值及对比结果见表4。



(a) X向安全因子云图

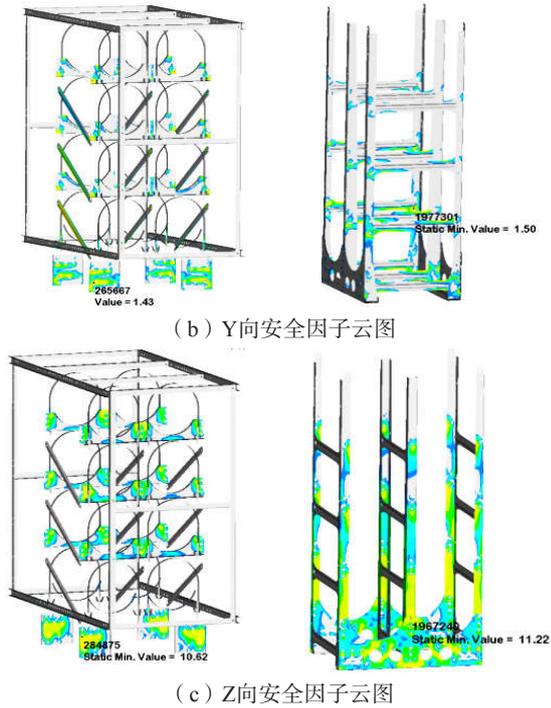


图6 轻量化CNG框架安全因子云图

表4 CNG框架安全因子对比表

	X向8g	Y向8g	Z向-8g
优化前	1.66	1.25	6.80
优化后	1.78	1.50	11.22

根据仿真分析结果，优化前后方案安全因子均大于1，满足仿真要求，且优化后的安全因子更大。

3 轻量化 CNG 框架台架及整车验证

为了验证轻量化CNG框架方案的可靠性，通过台架试验和整车可靠性试验两方面对框架进行了验证。台架试验主要测试框架在承受气瓶重量和模拟载荷时的应力和变形情况。整车可靠性试验主要测试车辆行驶过程中的振动和冲击，以验证框架的疲劳性能和可靠性，如图7所示。



图7 轻量化CNG框架整车试验验证

根据轻量化CNG框架台架及整车试验结果，满足相关试验标准。通过框架的应力、位移、疲劳寿命等数据分析，与有限元分析结果基本吻合，进一步表明仿真分析的准确性。

结论

(1) 本文通过对商用车CNG框架的轻量化设计研究，综合运用结构优化和新型材料应用，实现了框架的轻量化方案设计，总重降低大于100kg，目前该框架已实现批产。

(2) 轻量化设计过程结合有限元分析、台架振动和整车可靠性验证，证明了方案可靠性和可行性，为后期轻量化方案设计提供了有效验证方法。

参考文献

- [1] 陆骛,吕士聪. LNG及车用LNG的现状与未来分析[J]. 时代汽车,2021 (5):21-22.
- [2] 杜子学,罗辉.基于拓扑优化的厢体骨架结构优化设计[J]. 机械设计与制造,2016 (2) :236-240.
- [3] 赵杰,邵湛惟,李兆亭,陈清利.车载 LNG 气瓶框架结构的拓扑优化设计[J]. 机械设计与制造,2020,(11):217-220.
- [4] 王钰栋,金磊,洪清泉等.HyperMesh & HyperView应用技巧与高级实例[M].北京:机械工业出版社,2012:2