

碳纤维复合材料纯电动客车车身拼装工艺

吴接聪^{1,2,3}

(1. 厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023;

2. 福建省客车安全与节能技术企业重点实验室, 福建 厦门 361023;

3. 厦门市客车安全节能环保重点实验室, 福建 厦门 361023)

摘要:本文概述了 XMQ6115 碳纤维复合材料纯电动客车研究背景,详细阐述了其车身的设计思路、连接结构及拼装工艺,并对该车型进行台架试验。试验与应用表明,所选材料在实现降本增效的同时,能够满足纯电动客车的使用要求,具备良好的推广应用前景。

关键词:纯电动客车;碳纤维;复合材料;拼装工艺

中图分类号:U469.72;TB332 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.01.011

Carbon Fiber Composite Materials Body Assembly Technology for Pure Electric Bus

WU Jiecong^{1,2,3}

(1. Xiamen King Long United Automotive Industry Co., Ltd., Xiamen 361023, China;

2. Key Laboratory of Bus Safety and Power-saving Technology Enterprises of Fujian Province, Xiamen 361023, China;

3. Key Laboratory of Bus Safety, Energy Saving and Environmental Protection of Xiamen City, Xiamen 361023, China)

Abstract: This paper outlines the research background of the XMQ6115 carbon fiber composite pure electric bus, elaborates on the innovative design approach, connection structure, and assembly process of its body, and validates the design through bench testing. The test and application results demonstrate that this design solution achieves the goals of cost reduction and efficiency improvement while meeting the operational requirements of the pure electric bus, exhibiting strong potential for broader adoption.

Key words: pure electric bus; carbon fiber; composite material; assembly technology

目前,轻量化是提高纯电动客车续航里程的重要途径,而白车身减重则是实现轻量化的关键环节之一。在满足同等设计要求的前提下,用碳纤维复合材料替代钢材,可实现 30% 以上的减重;此外,碳纤维复合材料还兼具抗冲击性强、抗拉强度高、耐疲劳性能好等特性^[1]。从实际应用历程对比,国外碳纤维复合材料的发展路径明显早于国内。国外自 20 世纪 60 年代起便已开展碳纤维复合材料的研究并应用于多个行业,其中在汽车领域的研究与应用尤为深入;而国内的相关应用则随着 2010 年碳排放政策的实施才逐步展开,且针对客车领域的系统研究与资料积累相对不足^[2]。

本文以我司交付的 XMQ6115 纯电动碳纤维复合材料客车为例,系统阐述其碳纤维复合材料车身的创新设计思路、关键连接与拼装工艺,并通过台架试验

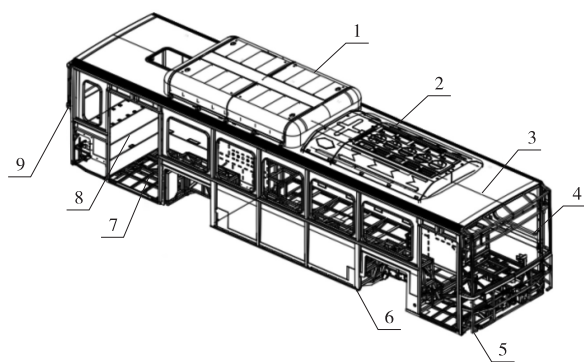
对设计进行验证。

1 整车参数

XMQ6115 车型的整车尺寸(长×宽×高)为 10 745 mm×2 550 mm×3 290 mm,整备质量为 8 900 kg,整车电量为 210.568 kW·h。该车型主要具备三项技术特征:一是搭载了独立悬架与轮边驱动系统;二是采用了碳纤维复合材料与高强度结构钢相结合的混合车身架构,其中碳纤维部件应用于左右侧围、顶盖及后台阶等区域(见图 1);三是乘客区(从前门至后桥)实现了纯平地板布局。基于上述设计,XMQ6115 在核心性能上取得显著提升。与同等电量配置的 10.5 m 车型相比,其整车质量降低约 2 300 kg,同时乘客区站立面积增加约 60%^[3]。

收稿日期:2025-03-01。

第一作者:吴接聪(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事客车总布置相关工作。E-mail:fjwuyc@163.com。



1—电池罩; 2—空调; 3—碳纤维复合材料顶盖;
4—碳纤维复合材料左侧围; 5—前围; 6—碳纤维复合材料右侧围;
7—底架; 8—碳纤维复合材料后台阶; 9—后围。

图1 XMQ6115整车布置示意图

2 碳纤维复合材料车身六大片连接结构

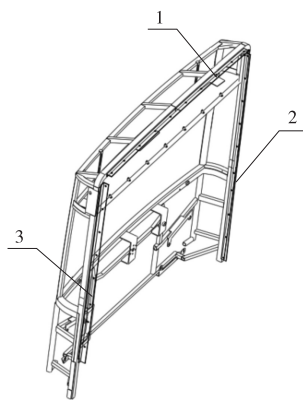
碳纤维复合材料与金属在刚度、电学性能及热膨胀系数等方面存在固有差异,易使焊接接头产生应力集中,从而降低其承载能力^[4-5]。因此,碳纤维复合材料与钢、铝合金、镁合金等部件连接时,应选用机械连接(如螺栓、铆钉)或粘接工艺^[6]。具体连接方式需根据部件的结构及需求进行选择,涉及六大片的相互连接结构如下:

1) 侧围与前(后)围连接结构设计。侧围与前围采用螺栓连接,连接边界处采用L型支架。支架一侧焊接前围,另一侧开螺栓孔,通过螺栓连接左右侧围。螺栓需从车内向车外固定,其头部由内饰件与侧窗垫条覆盖,以兼顾连接强度要求和外观平整。后围与前围边界状态基本一致,其连接方式可参考前围。由于后围包含舱门,为避免L型支架与舱门产生干涉,在设计时需控制其长度与位置,以免影响舱门正常安装。

2) 前(后)围与顶盖连接结构设计。顶盖与前围连接结构如图2所示,为防止漏水,顶盖处L型支架一侧通过铆钉与前围连接,另一侧开螺栓孔,通过螺栓连接顶盖。为确保前围与顶盖的密封性不受影响,设计上需满足两点:一是在顶盖与前围之间预留间隙;二是将支架连接面相对于顶盖上平面下沉15 mm,以此确保安装后的螺栓头不超出平面。后围与前围边界状态基本一致,连接方式可参考前围。

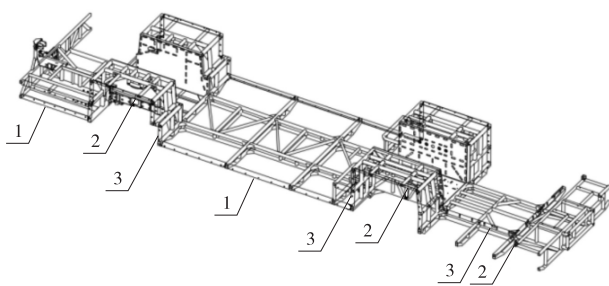
3) 侧围与底架连接结构设计。侧围与底架采用螺栓连接,底架两侧需设计带螺栓孔的连接件,通过螺栓连接侧围,如图3所示。连接件主要采用以下3

种连接方式:①带孔方钢连接。该方式利用开设螺栓孔的方钢进行连接,安装位置包括前后轴立柱截面、前中门踏步处、后台阶与底架连接处及舱门上沿(见图4)。其优点是能充分保留原底架的结构和强度,无需进行特殊的工艺处理。②P型方钢连接。该方式通过将一侧开孔的P型方钢用螺栓固定于侧围实现连接(见图5),主要应用于中区地板面及驾驶员下方区域。其设计通过增大接触面积来增强底架与碳纤维复合材料车身间的连接强度。所有螺栓固定点均位于地板面之下,避免了占用车内空间,兼顾了安装便利性与整体美观性。③角钢连接。该方式采用角钢对轮罩、后台阶两侧的非结构件与主体进行连接(见图6)。



1—顶盖处L型支架; 2—左侧围L型支架; 3—右侧围L型支架。

图2 前围处连接结构示意图



1—P型方钢; 2—角钢; 3—带孔方钢。

图3 底架处连接结构示意图



图4 带孔方钢

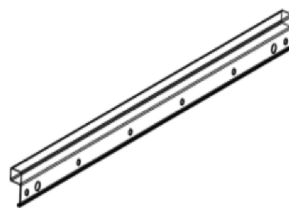


图5 P型方钢



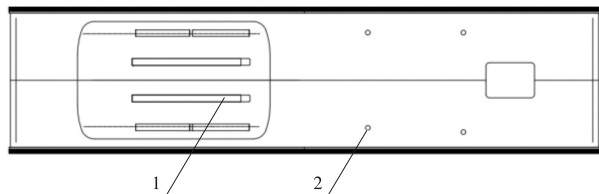
图6 角钢

4) 侧围与顶盖的连接结构设计。侧围与顶盖均采用碳纤维复合材料,并通过铆钉连接。顶盖两侧延伸为L型翻边结构,延伸长度为70~100 mm。侧围与翻边以内外搭接的形式进行铆接,其中侧围位于内侧,翻边位于外侧,铆钉间距控制在200~250 mm。

5) 后台阶与底架的连接结构设计。将采用碳纤维复合材料的后台阶安装于底架上方,通过底架方钢上的螺栓孔和螺栓与底架连接。因其与侧围同为碳纤维复合材料,两者之间采用铆钉连接。

6) 车顶电池、空调的连接结构设计。碳纤维复合材料顶盖呈非平面结构,而电池与空调的固定面为平面结构。若直接采用预埋螺栓固定电池或空调,易在固定点区域产生装配间隙,进而破坏该区域的密封完整性,最终导致漏水。为解决这一结构匹配问题,设计引入了具有填充与密封功能的粘接工艺:空调采用“螺栓紧固与粘接密封”相结合的固定方式;电池则通过一个过渡支架进行安装,该支架中间部分与顶盖粘接密封,两侧采用螺栓紧固。该设计通过控制装配间隙,解决了由结构不匹配引起的漏水问题。

常规空调在两侧有进、回风口,钢骨架顶盖在中部通过螺栓固定连接。碳纤维复合材料顶盖中部区域无法采用螺栓固定,需调整空调的固定结构,采用粘接结构固定(见图7)。



1—进、回风口; 2—电池支架固定点。

图7 顶盖连接结构示意图

7) 碳纤维复合材料与其他零部件的连接结构设计。碳纤维复合材料与其他零部件的连接方式如下:①侧窗、侧围蒙皮、侧舱门、顶侧蒙皮等大面积外饰件,通过粘接与支架相结合的方式固定到侧围;②乘

客门、前后内顶、风道等内部功能件采用L型支架通过螺栓固定在侧围和顶盖上;③管线的支架、零部件的固定支架通过铆接固定到后台阶和顶盖上。

3 碳纤维复合材料车身六大片结构拼接

碳纤维复合材料与钢的材料特性显著不同,故XMQ6115车身无法采用常规的直接焊接工艺。这一根本差异决定了其六大片复合部件的工装设计也不同于常规车型。具体的碳纤维复合材料车身工装顺序如下:

第1步:定位底架并固定侧围。将底架推进拼装台位置,合拢左右侧围靠近底架外伸梁,缓慢合拢使得左右侧围与底架基本贴合。通过底架的连接件调整位置并采用螺栓固定。

第2步:调整底架平面度。调整底架前端,将中区地板上表面、底架后端骨架上表面与侧围标记的零件高度对齐,依次检查并确认底架左右两侧高度,保证底架整体的平面度。

第3步:安装并固定顶盖。将顶盖吊装至侧围上方后缓慢下落至安装位置。调整顶盖,使其前端与侧围前端立面对齐,并确保顶盖准确套装在侧围上沿外侧。随后,在顶盖前后位置使用大力钳夹紧,确保其与侧围充分贴合,最后使用铆钉将顶盖与侧围固定。

第4步:安装前围并与顶盖固定。将前围吊装至设定的安装工位,调整其位置,确保其上沿与顶盖贴合,且与侧围上沿平齐。确认对位准确后,采用螺栓连接方式将其与顶盖固定。

第5步:检查并焊接前围。检查底架前外伸梁与前围连接板之间的对位间隙与平齐度。根据我司焊接工艺标准及文献[7],其位置偏差应小于3 mm。若实测偏差超过此限值,则需对前围进行修正调整;待调整合格后,方可将前围连接板与底架焊接固定。

第6步:安装后围。后围的安装流程参照前围(即第4步与第5步)执行。

第7步:安装后台阶。将后台阶搬抬至底架尾部对应位置,初步调整使其前立面超出底架横梁约10 mm;随后,在后台阶上标识螺栓孔位,将其拆卸并完成开孔;最后,重新将其安装到底架上方,并使用螺栓固定。

第8步:处理异质材料连接并完成终检。由于底架为高强度钢,其与碳纤维复合材料存在性能差异而

无法焊接^[8],因此必须采用螺栓连接。连接时,所有接触面须预先刷涂底涂,并对底架与侧围连接处的局部间隙进行打胶密封处理。全部连接工作完成后,须对所有螺栓进行终检:逐一检查其是否漏装或松动,确认合格后使用标记漆进行标识。

4 整车可靠性验证

为评估 XMQ6115 的可靠性,依据襄樊试验场综合道路工况,在图 8 中的六立柱整车道路模拟试验台上进行了等效 20 000 km 的可靠性试验。试验依照 GB/T 12678—2021《汽车可靠性行驶试验方法》^[9]和 GB/T 12679—1990《汽车耐久性行驶试验方法》^[10]执行,试验过程中详细记录车辆的主要故障信息,汇总结果见表 1。



图 8 六立柱整车道路模拟试验台

表 1 XMQ6115 故障问题记录表

故障发生里程/km	问题点	解决方案
684	左前减振器上侧螺栓松动	重新锁紧螺栓
3 155	中门附近顶盖蒙皮焊点整片开裂	检查结构并补焊
5 054	中门前立柱加强板开裂	检查结构并补焊
10 334	前桥后扁方钢与通道槽型铁连接处开裂	检查结构并补焊
20 000	前桥下方方钢开裂及后桥右侧下推力杆处斜撑方钢开裂	检查结构并补焊

本文将 XMQ6115 的试验结果与同平台的 10.5 m 钢结构车型 XMQ6106 进行对比分析。该对比基于相同的六立柱试验台测试条件。基准车型 XMQ6106 的数据记录见表 2。试验结果表明,两种车型的结构损伤模式存在显著差异:XMQ6106(钢结构)的损伤主要表现为结构件焊缝区的开裂;XMQ6115(碳纤维复合材料车身)的损伤则集中于后围铝型材部件,以及前、后围与碳纤维复合材料本体的连接界面。进一

步分析证实,XMQ6115 碳纤维复合材料结构本体在整个试验过程中均保持完好,未发生损伤。

上述试验在验证整车整体可靠性的同时,也揭示了局部结构存在薄弱环节。据此,对相关结构实施了针对性加强,具体措施包括:将连接用的 L 型支架及角钢材料厚度增加至 4~6 mm,并采用 M12 螺栓。L 型支架与碳纤维复合材料的接触面长度宜取 55~75 mm,此范围可同时保证连接强度与打胶密封的便利性。螺栓连接间距按 200~250 mm 分布,螺栓孔中心至碳纤维复合材料构件边缘的距离为 25~50 mm,从而使连接更稳定且不易松动。试验验证表明,经过结构加强的 XMQ6115 碳纤维复合材料车身可靠性已达到标准,具备量产条件。

表 2 钢结构 XMQ6106 故障问题记录表

故障发生里程/km	问题点	解决方案
984	后围铝型材 5 处开裂	更换铝型材并加强结构
1 020	后围左右两侧顶弧根部环形开裂	检查并修复
1 312	后围两侧与侧围连接处共 6 枚铆钉脱落	重新铆接
15 944	前挡框体骨架右下角铝合金焊接处开裂	检查结构并补焊
20 000	顶置电池托架铝合金焊缝断裂	检查结构并补焊

5 碳纤维复合材料车身成本和工艺分析

我司已完成 70 余台 XMQ6115 碳纤维复合材料车型的生产与销售。其涉及的成本和工艺分析如下:

1) 成本分析。碳纤维复合材料车身成型模具(侧围、顶盖及后台阶)的首套开发成本约为 200 万元。基于规模化生产,每台车需承担的模具成本约为 2.8 万元。叠加约 10 万元的碳纤维复合材料部件成本,单车总成本约为 12.8 万元,是传统碳钢车身相应部件成本的 3.2 倍。

2) 工艺分析。我司已掌握完整的碳纤维复合材料车身拼接工艺。在整车总装阶段,碳纤维复合材料车身耗时约 87 h,而传统碳钢车身(侧围与顶盖骨架)约为 51 h,两者相差约 36 h。由于碳纤维复合材料部件可在总装前置阶段并行生产,该环节的耗时增加并未显著影响整车总生产周期。因此,提升碳纤维

复合材料车身制造效率的关键在于缩短总装时间^[11]。

6 结束语

该 XMQ6115 碳纤维复合材料纯电动客车已实现商业运营,经运行验证,车辆在能耗、站立空间、舒适性等方面得到客户认可,运行三年后仍无结构方面的问题^[12],该设计方案的可靠性得到了有效验证。XMQ6115 车身部分采用碳纤维复合材料,其设计方案具有一定开拓性,为碳纤维复合材料在新能源客车上的应用提供了一定的参考意义,有助于碳纤维复合材料在客车其他部件的推广应用。

参考文献:

- [1] 吴森. 高强度碳纤维复合材料大幅度提升客车安全性[J]. 商用汽车, 2016(5): 108.
- [2] ZHANG J, LIN G, VAIDYA U, et al. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2023 (250): 110463.
- [3] 商车. 航天“黑科技”来了金龙客车首批碳纤维地铁巴士交付嘉兴[J]. 商用汽车新闻, 2021(17): 5.

- [4] 康森卫,王青春. 碳纤维增强复合材料在汽车轻量化中的应用[J]. 汽车测试报告, 2023(22): 94-96.
- [5] NEVES P, FERNANDES A. Advanced bus body-in-white design: a review[J]. International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology, 2018(2): 47-57.
- [6] 陈康达,赵福全,郝瀚,等. 碳纤维复合材料在汽车轻量化上的应用现状及发展前景展望[C]//2018 中国汽车工程学会年会论文集, 2018: 606-611.
- [7] 陈利明,伍豪杰,卫琪琳,等. 城市客车焊接工艺与质量控制[J]. 客车技术与研究, 2024, 46(5): 56-59.
- [8] 宋燕利,杨龙,郭巍,等. 面向汽车轻量化应用的碳纤维复合材料关键技术[J]. 材料导报, 2016, 30(17): 16-25.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 汽车可靠性行驶试验方法: GB/T 12678—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 7-12.
- [10] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车耐久性行驶试验方法: GB/T 12679—1990[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990: 4-7.
- [11] 谷杰伟,郭晖,覃盛世,等. 碳纤维复合材料在新能源客车上的应用[J]. 客车技术与研究, 2024, 46(4): 58-62.
- [12] 民心所向! 半年不到金华就又双叟购买了—批金龙地铁巴士! [J]. 城市公共交通, 2021(3): 102.

(上接第 58 页)

3) 通过对安全顶窗与顶部过孔的结构改进,成功将安全顶窗泄漏量平均降低 32 L/min,使整车密封性能显著提升,验证了该优化方法的工程有效性。

参考文献:

- [1] 陈军桥,张超. 汽车车身的常用密封技术和验证方法[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(16): 137-141.
- [2] 李浩东. 遇见绿色出行——第 4 届广州国际新能源、节能及智能汽车展览会侧记[J]. 商用汽车, 2019(9): 93-95.
- [3] 杜红武. 多款新能源商用车闪耀 2018 广州新能源智能车展[J]. 商用汽车, 2018(8): 66-69.
- [4] 耿建,许林倩. 汽车整车密封机理及 NVH 声学包分析[J]. 汽车测试报告, 2021, 18(20): 103-104.
- [5] 任东军. 应用于地铁车辆的 IPX5 防水试验装置设计研究

- [J]. 科学技术创新, 2020(15): 4-6.
- [6] 曲振毅,倪维尧,付赢毅,等. 配合相对误差对挤压式微流道密封技术的影响规律[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(11): 83-90.
- [7] 高伟. 创设真实问题情境在跨学科实践中突破难点——以“气体压强在化学实验中的应用”为例[J]. 化学教与学, 2023(3): 63-66.
- [8] 张雁杰. 关于伯努利方程的一个变形及其应用于挟沙水流泥沙起降分析[J]. 广西物理, 2024, 45(2): 47-49.
- [9] 吴明眼. 伯努利方程原理及其应用[J]. 信息记录材料, 2018, 19(9): 115-117.
- [10] 李育房,王莹莹,同武军,等. 水下井口连接器研发现状及密封关键技术研究进展[J]. 中国海上油气, 2024, 36(5): 187-197.