

碳纤维复合材料在新能源客车上的应用

谷杰伟, 郭 晖, 覃盛世, 李 腾, 李荣康

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘 要:分析碳纤维复合材料在新能源客车上应用的优劣势, 针对碳纤维技术在现有客车上应用的局限性, 提出一些改良对策, 为碳纤维技术在新能源客车上的研发应用提供参考。

关键词:碳纤维; 复合材料; 新能源客车

中图分类号: U469.1; U465.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2024)04-0058-05

Application of Carbon Fiber Composite Materials to New Energy Buses

GU Jiewei, GUO Hui, QIN Shengshi, LI Teng, LI Rongkang

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: This paper analyzes the advantages and disadvantages of the application of carbon fiber composite materials in new energy buses, some improvement measures are proposed to address the existing applied to limitations of carbon fiber technology in buses, which provides references for the development of carbon fiber technology applied to new energy buses.

Key words: carbon fiber; composite material; new energy bus

碳纤维是一种由碳元素组成的特种纤维, 其碳含量一般在 90% 以上, 与常规的碳钢、铝合金、不锈钢等力学结构材料相比, 碳纤维具有优良的材料性能特质^[1-3]。随着我国汽车轻量化技术和碳纤维复合材料技术的快速发展, 碳纤维复合材料已应用在国内新能源客车上^[4], 本文基于已批量商业化应用的 10.7 m 碳纤维复合材料车身客车与相同尺寸的普通碳钢材料车身客车, 在车身重量、产品成本、生产周期、制造工时、能耗仿真等方面展开对比分析, 为新能源客车轻量化技术研发应用提供参考。

1 碳纤维复合材料现状

碳纤维复合材料由有机纤维经过一系列热处理转化而成, 是含碳量高于 90% 的无机高性能纤维。与常规的碳钢、铝合金、不锈钢等力学结构材料相比, 碳纤维复合材料具有以下优缺点^[5-6]。

1.1 碳纤维复合材料性能优点

1) 强度高。碳纤维复合材料的强度非常高, 非常适用于制造需高强度和刚度的零件和结构。其抗拉强度是普通钢材的数倍, 弹性模量优于普通钢材, 具有优异的抗蠕变性能和抗震性。

2) 刚度大。碳纤维复合材料的刚度非常高, 其弹性模量可达到 150 GPa 以上。因此碳纤维复合材料可以保持形状和尺寸的稳定性, 即使在极端条件下也能保持稳定。

3) 密度低。碳纤维复合材料密度很低, 只有 1.5 g/cm³ 左右。因此碳纤维复合材料比大多数金属轻很多, 使用碳纤维复合材料可以降低整个结构的重量, 提高其性能。

4) 耐腐蚀。碳纤维复合材料具有良好的耐腐蚀性, 不会被大多数化学物质腐蚀。因此碳纤维复合材料可以在恶劣环境(如高温、高压、酸性、碱性和盐雾

收稿日期: 2024-05-20。

第一作者: 谷杰伟(1977—), 男, 硕士; 工程师; 主要从事商用车整车开发和技术研究工作。E-mail: carsongu@126.com。

通讯作者: 李荣康(1992—), 男, 硕士; 助理工程师; 主要从事新能源客车产品管理工作。E-mail: 1224430045@qq.com。

环境)下使用。其抗腐蚀,抗老化,耐用,使用寿命可达到15年以上。

5) 热膨胀系数小。碳纤维复合材料的热膨胀系数很低,只有 $1.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 左右。这意味着在温度发生变化时,碳纤维复合材料结构的形状和尺寸的变化非常小。

6) 热导率低。碳纤维复合材料的热导率非常低,只有 $1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右。因此碳纤维复合材料具有很好的隔热性能,适用于需要隔热的领域。

7) 3D打印性好。随着3D打印技术的快速发展,碳纤维复合材料也可通过3D打印技术进行成型。碳纤维复合材料通常采用增材制造技术,该技术利用计算机控制的层层叠加的方法,将材料逐层堆叠并融合在一起,最终形成所需的形状。

8) 耐温范围较大。碳纤维复合材料温度适应范围在 $-40 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 。因此其在新能源客车的运营工况下,无需再做特殊处理即可满足整车使用需求。

1.2 碳纤维复合材料性能缺点

1) 回收性欠佳。通过回收利用碳纤维复合材料中的碳纤维,不仅能降低生产成本,还能减少对新资源的依赖,同时符合环保理念,这推动了碳纤维回收市场的扩大。但目前业内缺乏碳纤维回收再加工制造的相关技术和知识,抑制了碳纤维回收市场的增长。回收后的碳纤维还与E-玻璃纤维、S-玻璃纤维以及其他低成本成熟产品激烈竞争,进一步限制了碳纤维回收市场的增长。

2) 耐磨性差。成型后直接用砂纸即可磨下碳粉,硬度较低,使用中容易因摩擦而出现刮痕或破损。

3) 成本高。因其工艺复杂,原料成本高,产量有限,一般较少批量生产,因此价格相对较高。

4) 机械加工性能差。碳纤维板的材质特殊,脆性大,易断裂,导致其机械加工性能较差。

综上可知,碳纤维复合材料在轻量化方面具有很大优势。20世纪50年代,在火箭、航空等尖端领域兴起,而后应用在汽车上,最初用在追求极致性能但价格昂贵的超级跑车和赛车上。随着技术的持续发展,碳纤维与环氧树脂、玻璃纤维等结合使得其生产成本下降明显,除在航空和汽车行业外,在其他领域

(如体育器械、医学、化工、纺织、建筑等现代工业领域)也有了广泛应用^[7-8]。

碳纤维复合材料应用在汽车领域主要是为了减轻重量,预计到2025年,汽车市场对碳纤维的需求将达到约1.5万吨^[9]。全球碳纤维复合材料主要生产厂商是日本、美国、德国和韩国等国的少数企业。我国的碳纤维材料及技术近年在风电叶片、体育用品等领域得到广泛应用,市场规模一直保持增长趋势。据不完全统计,我国碳纤维材料产量从2019年的1.2万吨增至2023年的6.96万吨,年均复合增长率高达55.2%。从汽车行业的轻量化技术路线来看,国际领先水平的企业在从单一材料轻量化车身技术向多材料混合轻量化车身技术方向发展。在已有的乘用车及商用车量产车型中,碳纤维复合材料逐步成为多材料混合车身体系的一部分^[10]。

2 碳纤维复合材料在新能源客车上的应用

现在的新能源客车普遍采用金属骨架,车体结构重量较大,加之动力电池重量大,严重影响其续航里程。因此,具有轻量化特性的碳纤维复合材料因其良好的力学性能开始应用于新能源客车行业^[11]。2019年荷兰EBUSCO EV公司发布了12 m碳纤维复合材料车身新能源公交客车,相比于12 m传统客车,整备质量降低了3 500 kg,车身减轻了27%;2021年8月国内某科研机构与国内某客车企业共同发布了10.7 m碳纤维复合材料车身纯电动客车,并在浙江省嘉兴市批量投入市场运营。

2.1 国内某10.7 m碳纤维复合材料车身新能源客车情况

对已批量商业化应用的10.7 m碳纤维复合材料车身客车($10\,754 \text{ mm} \times 2\,550 \text{ mm} \times 3\,180 \text{ mm}$)与同等米段尺寸传统碳钢材料车身客车($10\,750 \text{ mm} \times 2\,550 \text{ mm} \times 3\,310 \text{ mm}$),在车身骨架、内饰覆盖件等方面进行质量比较,具体参数见表1。

此款新能源客车,碳纤维复合材料的应用主要在车身左右侧围和顶盖,车身质量减重约320 kg。目前,该批车辆投入市场运营已超过2年,采用碳纤维复合材料的车身未出现异常。

表 1 10.7 m 碳纤维复合材料车身与传统碳钢材料车身
质量对比(剔除配置差异影响) kg

车身结构	碳纤维复合材料 车身客车	传统碳钢材料 车身客车
侧围骨架	400(碳纤维)	494
侧围内饰	0(侧碳纤维结构带)	97
顶盖骨架	350(碳纤维)	664(含顶蒙皮)
顶盖内饰	0(顶碳纤维结构带)	23
顶盖蒙皮	0(顶碳纤维结构带)	0(已包含在顶盖重量内)
车架连接埋板	110	0
车架连接螺栓	10	0
顶盖侧围连接螺栓	8	0
侧围内部填充物	100(铝合金骨架支撑)	20(隔热降噪材料)
总质量	978	1 298

2.2 碳纤维复合材料在新能源客车应用的优势

1) 轻量化。由表 1 可知,相比于传统碳钢材料车身,10.7 m 碳纤维复合材料车身可实现结构减重约 320 kg,减轻了 24.7%。对整车能耗降低、载客人数提升作出贡献。

2) 内饰简洁。车内两侧立面及顶部可触面为碳纤维复合材料本体,经表面喷漆处理后耐脏污、可清洗、可擦拭,可视部位表面均为无缝一体化结构。油漆颜色可根据终端客户需求进行喷涂。

3) 六大片车体合装简便。六大片车体合装与铝材料车身结构类似,侧围与顶盖通过螺栓连接,侧围通过螺栓连接在车架的埋板上,以减少车身焊接工作量及部分内饰装配工作量。

4) 使用寿命长。碳纤维复合材料耐腐蚀、耐盐雾性能好,使用寿命周期长,可达到 15 年以上。

5) 碳纤维复合材料的抗拉强度是普通钢材的数倍,弹性模量优于普通钢材,具有优异的抗蠕变性能和抗震性。车体在受到轻微碰撞时可以回弹,不会产生塑性形变。因此碳纤维复合材料适用于对结构强度和刚度需求较高的零部件。该款 10.7 m 新能源客车顶部安装了 8 箱电池,整车运营情况正常。

2.3 碳纤维复合材料在新能源客车应用的劣势

1) 对定制化设计需求的适应性较差。碳纤维复

合材料车身为开模产品,模具需抽真空,产品需加热固化。现有技术暂时无法实现活动模具,产品定型后,若要改变规格和配置(如车辆长度、侧窗洞口、乘客门位置、空调及顶风窗位置),需要重新开模或者修改模具。

2) 设计及生产容错性较低。内饰埋板均需在生产阶段提前预埋,若设计阶段遗漏或者生产开孔错误,则较难更改或修复。

3) 碳纤维复合材料车身内部无法走线。由于碳纤维复合材料车身的左右侧围及顶盖均为约 40~50 mm 厚度片体式结构(不是类似金属型骨架的腔体结构),内部为实心体,电线只能在车体结构外部布置安装,即碳纤维复合材料车身内部无法走暗线,这导致车内顶部和侧围线束除借用风道外无法隐藏。若要在侧围安装电器件则需走明线,或者安装在风道中。

4) 侧窗通透性较差。碳纤维复合材料车身侧窗立柱在车辆宽度方向上的厚度较薄,因结构受力要求,碳纤维复合材料车身侧窗立柱前后向宽度较大,约为 200 mm,与普通城市客车相比,其侧窗较小,乘客视野通透性较差。

5) 地板革侧密封存在风险。因其侧围为整块碳纤维复合材料制成,无法与金属结构的车架采用钣金连接的方式进行密封,与传统金属骨架车体结构拥有独立内饰覆盖件不同,碳纤维复合材料的侧围片体表面直接作为车身的内饰外观面,材质差异导致了地板革上翻后无法采用粘接胶进行全封闭式密封,铆钉压接无法绝对保证密封效果。同时地板革上翻后在立面的收口结构美观性较差,仅能与侧围进行对接,相对于传统方案,其缺少一道密封结构,对烟尘和温度的隔绝存在一定风险。

6) 对车架平整度要求较高。车身侧围与车架通过螺栓连接的方式固定在一起,需要车架各固定点保持在一个较高的精度范围内,否则易出现装配扭曲的结构异常。

7) 维修便利性差。若发生轻微交通事故,碳纤维复合材料结构可通过自身强度和刚度保证车辆不发塑性形变,回弹复原。若发生较大交通事故,则修复较为困难,需要用专业设备进行维修或整片更换。

维修便利性差,且成本比普通钢车身高。

2.4 其他方面比较

1) 产品成本。现有的碳纤维复合材料大型客车车身在小批量生产时每辆成本约为15万元(侧围+顶盖),约为传统碳钢材料车身成本的4~5倍、约为铝材料车身成本的2倍;单套模具(侧围+顶盖)成本投入约为200万元。随着规模化量产,每辆碳纤维复合材料车身大型客车的成本有望下降至10万元左右,与铝材料车身成本大致相当,约为传统碳钢材料车身成本的2~3倍。

2) 生产工艺。碳纤维复合材料车身生产方式与玻璃钢一体成型材料(不需要金属骨架的结构类型)有类似之处,原理上可简化管理为将玻璃纤维替换成碳纤维复合材料编织布。在车身结构受力部分增加高分子材料进行填充,起到受力支撑及隔音降噪作用。生产完成后,产品在模具上抽真空处理,然后通过模具上自带的加热板,提供要求的温度进行固化。碳纤维复合材料车身生产方式以一体成型为主,侧围及顶盖骨架无需单独制作,同时减少了侧内饰及顶内饰的安装环节,工艺较简单。传统的金属结构车身骨架多采用无缝钢管组合焊接拼装的工艺,或采用铝合金型材组合铆接拼装工艺,将侧围骨架、顶盖骨架以及车架分开制作后再进行拼装,然后,外覆涨拉或粘接蒙皮,内覆各类塑料成型装饰件。由表2可知,因生产工艺的差异,碳纤维复合材料车身比传统碳钢材料车身的生产工序少5项。

3) 生产周期。由上述生产工艺差异以及表2中生产工时对比分析可知,相比于传统碳钢材料车身,碳纤维复合材料车身生产工时节省了约18 h。对比具体工序可知,碳纤维复合材料客车车身合拢工时变长,同时前围、后围、左右侧围和顶盖及底架合拢后需要粘接蒙皮及玻璃的支撑骨架,粘接胶需要固化时间,相比于传统碳钢材料结构车身,碳纤维复合材料客车车身在整车合拢和侧围蒙皮安装阶段生产周期加长约1~2天。按照小批量生产组织方式,使用单套模具的碳纤维大客车车身生产周期约为1.5套/天。总体来看,碳纤维复合材料客车车身虽然减少了侧围骨架及顶盖骨架的生产工序,但传统碳钢材料车

身客车的骨架与车架生产通常并行开展,其车身综合生产周期更短。除非在生产碳纤维复合材料车身时投入多套模具并行投产,否则此部分生产工时的减少对缩短整车生产周期无明显效果。

表2 10.7 m 碳纤维复合材料车身与传统碳钢材料车身
生产工序及生产工时对比

碳纤维复合材料车身	生产 工时	传统碳钢材料车身	生产 工时
侧围骨架	0	侧围骨架+埋铁 (下料与组装)	51
顶盖骨架	0	顶盖骨架+埋铁 (下料与组装)	41
车架制作 (增加埋板及套管部分)	151	车架制作	131
整车合拢	33	整车合拢	24
侧围蒙皮 (粘接铝蒙皮+粘接型材)	30	侧围蒙皮(下料与安装)	10
顶蒙皮下料与安装	0	顶蒙皮下料与安装	10
顶部及侧围 隔热密封材料施工	0	顶部及侧围 隔热材料施工(贴棉)	4
侧内饰安装(无侧内饰)	0	侧内饰安装	11
顶内饰安装(无顶装饰板)	0	顶装饰板下料与安装	2
车内油漆	52		
工时总计	266	工时总计	284

2.5 能耗分析

以前述10.7 m新能源客车为例,碳纤维复合材料车身对整车减重贡献约为320 kg。基于40 km/h匀速行驶、负载65%的公交客车运营工况,进行能耗仿真分析。碳纤维复合材料车身与传统碳钢材料车身(重量差为320 kg)的新能源客车能耗仿真对比如下:前者为0.63 kW·h/km,后者为0.65 kW·h/km。整车能耗降低约为3%,按单车每年60 000 km运营里程核算,碳纤维复合材料车身结构的新能源客车,每年可为客户节省约1 200 kW·h的车辆运营耗电量。

3 结束语

对于碳纤维复合材料在新能源客车上应用的现有缺陷,可采取一些针对性对策进行改良。比如开发

组合模具,适应车身要素的灵活调整;可根据需要提前布置与车身对接部件的埋铁位置;碳纤维复合材料车身装配采用的螺接和粘接工艺,随着产量增大可采用专用工装进一步提高装配效率和精度;可通过将摄像头、电视机、多媒体设备的线束应用密封法兰走顶部的方式,解决线束明线不美观的问题。随着新能源客车轻量化技术的发展,预计未来碳纤维复合材料在客车上的应用会较快增长,特别是注重应用高环保、长使用寿命产品且平均售价更高的海外客车市场,碳纤维复合材料车身新能源客车的发展潜力会更大。

参考文献:

[1] 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.
[2] 胡春燕,王方丽,闫桂林. 碳纤维技术发展及应用分析[J]. 化工管理,2020(7):44-46.
[3] 杨艳. 轻量化引领未来汽车技术发展新趋势[J]. 汽车与

配件,2014(45):54-57.
[4] 王立波. 新能源客车轻量化技术途径研究[J]. 汽车实用技术,2020(10):8-9.
[5] 黄纯可,余乐铭,刘杨生,等. 汽车轻量化用碳纤维复合材料国内外应用现状[J]. 时代汽车,2020(3):21-22.
[6] 杨月钢,窦振山,郑能,等. 电动客车轻量化技术研究及应用[J]. 重型汽车,2020(3):24-25.
[7] 姚燕,郅晓,张定金,等. 中国碳纤维产业发展现状与挑战[J]. 智能网联汽车,2014(6):23-29.
[8] 林红,赵凯,余建华,等. 碳纤维产业发展态势分析[J]. 新材料产业,2007(4):33-36.
[9] 琚裕波,李智,柏挺,等. 低成本碳纤维的研究进展与应用[J]. 工程塑料应用,2023,51(11):181-186.
[10] 荆云娟,崔博,马军,等. 碳纤维复合材料产业链发展现状[J]. 合成纤维,2023,52(10):37-42.
[11] 彭孟娜,马建伟. 碳纤维及其在汽车轻量化中的应用[J]. 合成纤维工业,2018,48(1):53-57.

◆ 广告目次

厦门金龙旅行车有限公司	(封面)	北京福田欧辉新能源汽车有限公司	(前插一)
中通客车股份有限公司	(封二)	成都客车股份有限公司	(前插二)
《客车技术与研究》理事会名录	(封三)	比亚迪汽车工业有限公司	(后插一)
期刊信息	(封底)	公益广告	(后插二)