

国产大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用研究

武娟娟 管全梅 郭金城

中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063000

摘要: 采用国产大丝束碳纤维 HFC20(50K) 和阻燃环氧树脂膜制备碳纤维复合材料, 测试其力学性能, 并与东丽公司的 PANEX35(50K) 及 T300(6K) 碳纤维复合材料进行对比, 初步探讨将国产大丝束碳纤维应用于轨道车辆部件的可行性。通过结构设计、仿真分析与部件疲劳试验, 验证国产大丝束碳纤维 HFC20(50K) 在轨道车辆车体上边梁部件中应用的可行性。研究结果显示, 采用 HFC20(50K) 制备的上边梁部件, 其承载能力和耐久性均满足部件使用需求。研究可为碳纤维复合材料在轨道车辆部件领域的工程化应用, 提供技术方案与研究方法的参考。

关键词: 大丝束碳纤维; 复合材料; 力学性能; 轨道车辆; 上边梁; 有限元仿真; 疲劳试验

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)04-0030-05

Research on application of domestic large-tow carbon fiber in rail vehicle components

Wu Juanjuan, Guan Quanmei, Guo Jincheng

CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063000, Hebei, China

Abstract: Carbon fiber composites were prepared using domestic large-tow carbon fiber HFC20 (50K) and flame-retardant epoxy resin film. Their mechanical properties were tested and compared with those of Toray's PANEX35 (50K) and T300 (6K) carbon fiber composites. The feasibility of applying domestic large-tow carbon fiber in rail vehicle components was discussed. Through structural design, simulation analysis, and component fatigue test, the feasibility of applying domestic large-tow carbon fiber HFC20 (50K) in the upper side beam components of rail vehicle body was verified. The research results showed that the load-bearing capacity and durability of the upper side beam components prepared by HFC20 (50K) could meet the requirements of the components. The research provides a reference for the technical solutions and research methods of the engineering application of carbon fiber composites in rail vehicle components.

Keywords: large-tow carbon fiber; composite; mechanical property; rail vehicle; upper side beam; finite element simulation; fatigue test

基金项目: 国家重点研发计划大丝束碳纤维及复合材料低成本高效制备与应用技术研究(2022YFB3704500)

收稿日期: 2025-01-08

作者简介: 武娟娟, 女, 1985年生, 正高级工程师, 主要从事轨道车辆结构设计及复合材料应用技术研究工作, wujuanjuan.ts@crrec.cc

为实现轨道车辆的轻量化目标,轻质高强的碳纤维复合材料被广泛应用于车辆部件。在碳纤维复合材料用于轨道车辆部件的探索研究方面,国外起步较早且已取得显著成果。如,韩国的摆式特快列车(TTX)、日本新干线 E4 系电力动车组与新干线 N700 系电力动车组及 efWING 转向架,以及法国高速铁路系统(TGV)的双层车体等,均不同程度采用了碳纤维复合材料^[1]。国内方面,中国中车集团有限公司携手相关科研院所与企业,开展了碳纤维复合材料在轨道车辆部件中的应用研究。在主承载部件领域,已成功研制出地铁车辆车体、磁悬浮复合材料车体、碳纤维转向架及悬浮架等;在次要承载部件方面,研究范围涵盖司机室外罩、设备舱、座椅及受电弓等组件。

碳纤维复合材料应用于轨道车辆部件的技术可行性已得以验证。然而,目前碳纤维复合材料在车辆部件中的应用仍处于研发及小规模示范应用阶段,尚未实现大规模的商业化应用。主要原因之一是其成本高昂,当前碳纤维复合材料轨道车辆部件的制作成本约为传统金属部件的 3~15 倍。作为新型材料,碳纤维复合材料的制备工艺复杂,加之技术封锁与市场垄断的影响,原材料成本居高不下。

碳纤维又分为小丝束和大丝束两类,其中 24K(丝束中单丝数量为 24 000 根)以下为小丝束,24K 及以上为大丝束。小丝束碳纤维价格高昂,大丝束碳纤维的价格则相对较低^[2-3]。相比小丝束碳纤维,大丝束碳纤维不仅生产效率高,而且在复合材料制备过程中的铺层效率也较高,能够将复合材料生产成本降低 30% 以上^[4-5]。因此,探索大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用,有利于降低成本,推动碳纤维复合材料在轨道交通车辆中的应用进程^[6]。

1 大丝束碳纤维的发展与应用现状

大丝束碳纤维的历史较长,但早期因性能局限,其大规模应用受限。20 世纪 90 年代中期制备的大丝束碳纤维,其抗拉强度仅约 2 000 MPa。之后,技术突破使得抗拉强度提升至 3 600 MPa 并持续得以提高^[7]。英国 Courtaulds 公司于 20 世纪 70 年代末率先展开对大丝束碳纤维的研究,并于 1985 年成功研制出性能与 T300 相当的 48K(丝束中单丝数量为

48 000 根)大丝束碳纤维^[8]。作为目前世界上最大的碳纤维生产商,日本东丽公司自 2014 年收购了美国 ZOLTEK 公司后,加大了对大丝束碳纤维生产应用的研发力度^[9]。日本三菱公司、Solay 公司以及美国 Cytec 公司等亦在大丝束碳纤维制备和应用研究方面走在前列^[10-12]。

国内大丝束碳纤维的制备与应用研究起步较晚,但近年来发展态势迅猛。其中,吉林国兴碳纤维有限公司的大丝束碳纤维产能已达 2.5 万 t/a,新疆隆炬新材料有限公司的 2 条年产 6 000 t 碳纤维生产线现已投产^[13]。截至 2022 年年底,上海石化大丝束碳纤维项目一阶段 3 条生产线中已有 2 条投入运行,产品质量可与 T300 级碳纤维相媲美^[14]。近年来,受全球贸易环境影响及市场需求驱动,国产大丝束碳纤维的产能迅速增长,工业级碳纤维的发展潜力大、应用前景广。

目前,大丝束碳纤维已在建筑工程、休闲体育用品、风电叶片、航空航天及汽车零部件等多个领域广泛应用。随着国产大丝束碳纤维性能的持续优化与成本的逐步下降,其在轨道车辆部件领域的应用前景愈加广阔。该材料的应用不仅能够有效推动轨道交通领域的轻量化发展,还能够有效降低相关部件的生产成本,提升整体经济效益,为轨道交通行业的可持续发展提供技术支撑。

2 大丝束碳纤维复合材料的力学性能

为探索国产大丝束碳纤维 HFC20(50K)及其复合材料在轨道车辆上的应用可行性,对其进行力学性能测试,并与东丽 PANEX35(50K)及 T300(6K)碳纤维复合材料进行性能对比。其中:T300 碳纤维应用于轨道交通部件领域已有大量研究,积累了较完备的性能数据;东丽 PANEX35 碳纤维作为性价比高的 50K 大丝束碳纤维,其生产成本仅为 T300 碳纤维的 1/5,因此也将其纳入对比研究的范畴。

2.1 试样制备

先将阻燃环氧树脂膜平铺放置在含浸机上,再分别将展纤后的 3 种碳纤维平铺放置在 2 层树脂膜之间,通过含浸机使树脂膜附着在纤维表面,最后通过高温压合,使树脂浸润碳纤维,制得面密度为 200 g/m²、树脂质量分数为 35% 的碳纤维单向预浸

料。将碳纤维单向预浸料按照预定铺层信息进行铺设后,使用压机对其进行模压成型处理,制得碳纤维复合材料层合板。对复合材料层合板进行切割即可制得碳纤维复合材料试样。试样尺寸及铺层信息如表 1 所示。其中, $[0^\circ]_6$ 表示沿 0° 方向铺 6 层, $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$ 表示先重复再对称铺层,即沿 45° 、 -45° 、 45° 、 -45° 、 -45° 、 45° 、 -45° 、 45° 方向铺层,共铺 8 层。

表 1 试样尺寸及铺层信息

Tab. 1 Specimen dimensions and ply-up information

测试项目	试样尺寸/mm		铺层信息
	长	宽	
拉伸强度/模量	250	25	$[0^\circ]_6$
压缩强度/模量	140	6	$[0^\circ]_6$
面内剪切强度/切变模量	250	25	$[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$

2.2 测试方法

试验在 ISO 291 规定的二级标准条件下进行,即试验温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $(50 \pm 10)\%$ 。试验仪器为微机控制电子万能试验机。按照 GB/T 3354—2014《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》对试样进行拉伸性能测试,试样加载速度为 2 mm/min 。按照 GB/T 3856—2005《单向纤维增强塑料平板压缩性能试验方法》对试样进行压缩性能测试,试样加载速度为 2 mm/min 。按照 GB/T 3355—2014《聚合物基复合材料纵横剪切试验方法》对试样进行剪切试验,试样加载速度为 5 mm/min 。

2.3 测试结果与分析

3 种碳纤维复合材料的力学性能测试结果如表 2 所示。可以看出,PANEX35 碳纤维复合材料的拉伸强度、拉伸模量与 0° 压缩强度、 0° 压缩模量,以及面内剪切性能均高于 T300 碳纤维复合材料,原因是 PANEX35 碳纤维的拉伸强度和拉伸模量与 T300 碳纤维相比略高。PANEX35 碳纤维复合材料的 90° 压缩强度及 90° 压缩模量均略低于 T300 碳纤维复合材料,表明树脂在 T300 碳纤维中的浸润效果优于在 PANEX35 碳纤维中的浸润效果。整体而言,大丝束碳纤维复合材料的强度与模量均略高于 T300 小丝束碳纤维复合材料。

对比大丝束碳纤维 HFC20 与 PANEX35 复合材料的力学性能发现:HFC20 碳纤维复合材料的 0° 拉

伸强度更高,达 $2\ 387.3\text{ MPa}$,相较于 PANEX35 碳纤维复合材料的 $2\ 204.4\text{ MPa}$ 提高了 8.3% ; 0° 拉伸模量达 128.6 GPa ,相较于 PANEX35 碳纤维复合材料的 123.6 GPa 提高了 4.0% ;HFC20 碳纤维复合材料的 0° 压缩强度与 0° 压缩模量也高于 PANEX35 碳纤维复合材料;HFC20 碳纤维复合材料的 90° 拉伸强度、 90° 拉伸模量、 90° 压缩强度、 90° 压缩模量,以及面内剪切强度与切变模量均低于 PANEX35 碳纤维复合材料,原因可能是树脂在 PANEX35 碳纤维中的浸润效果优于在 HFC20 碳纤维中的浸润效果。但 2 种材料的性能差异较小,均在 5% 以内。

总体而言,国产 HFC20(50K)碳纤维复合材料的力学性能与 PANEX35(50K)碳纤维复合材料的基本相当,与 T300(6K)碳纤维复合材料相近,且国产 HFC20(50K)碳纤维的树脂浸润性良好,可替代具有一定研究基础的 T300(6K)碳纤维,通过进一步的研制应用于轨道车辆部件中。

表 2 碳纤维复合材料的力学性能测试结果

Tab. 2 Test results of mechanical properties of carbon fiber composites

测试项目	T300 复合材料	PANEX35 复合材料	HFC20 复合材料
0° 拉伸强度/MPa	2 074.4	2 204.4	2 387.3
90° 拉伸强度/MPa	38.2	41.2	40.9
0° 拉伸模量/GPa	117.9	123.6	128.6
90° 拉伸模量/GPa	10.6	10.8	10.3
0° 压缩强度/MPa	1 222.2	1 327.7	1 431.2
90° 压缩强度/MPa	163.8	156.8	150.2
0° 压缩模量/GPa	125.6	133.7	135.2
90° 压缩模量/GPa	11.5	10.4	10.1
面内剪切强度/MPa	58.3	61.7	60.4
面内切变模量/GPa	4.1	4.2	4.0

3 国产大丝束碳纤维在车体上边梁部件中的应用

基于国产 HFC20(50K)碳纤维复合材料良好的力学性能,通过结构设计、仿真分析、疲劳试验验证该国产大丝束碳纤维在轨道车辆车体上边梁部件中的应用可行性。上边梁是轨道车辆车体的一部分,为连接车顶与侧墙的过渡结构(图 1),在车辆承受纵向压缩或扭转时,承担纵向载荷传递的作用。

3.1 结构设计

基于轨道车辆车体的外形及受力分布特性,

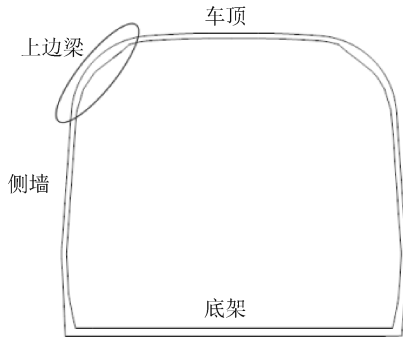


图 1 车体上边梁部位示意

Fig. 1 Position diagram of the upper side beam of vehicle body

将该上边梁设计为等截面结构。以轻量化为目标,将铺层厚度、铺层角度作为优化变量,以结构刚度要求为约束条件,进行碳纤维复合材料上边梁设计。上边梁的截面结构如图 2 所示,其为多空腔结构。

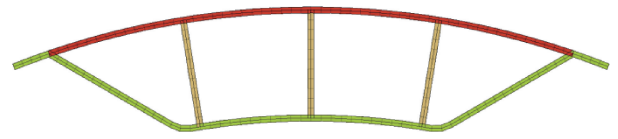


图 2 上边梁截面结构

Fig. 2 The sectional structure of the upper side beam

以国产 HFC20(50K)碳纤维、阻燃环氧树脂为原材料,制备轨道车辆车体上边梁部件。为提高制备效率,采用多轴向织物铺层的形式制备上边梁用碳纤维复合材料。首先,采用 HFC20(50K)碳纤维和阻燃环氧树脂分别制备 0° 单向向织物、0°/90°/±45° 四轴向织物和 0°/±45° 三轴向织物;其次,根据表 3 所示的铺层设计方案,按照从上边梁的空腔侧向表面侧的方向,依次对各层织物(第 1 层~第 7 层)进行层合处理,制备上边梁用碳纤维复合材料;最后,采用碳纤维复合材料制备上边梁部件。

表 3 上边梁铺层设计方案

Tab. 3 The lay-up design scheme of the upper side beam

织物类型	层合顺序	面密度/(g·m ⁻²)	厚度/mm
0°/90°/±45° 四轴向织物	第 1 层	550	0.55
0°/±45° 三轴向织物	第 2 层	400	0.40
0°/90°/±45° 四轴向织物	第 3 层	800	0.80
0°/90°/±45° 四轴向织物	第 4 层	800	0.80
0°/±45° 三轴向织物	第 5 层	400	0.40
0°/90°/±45° 四轴向织物	第 6 层	550	0.55
0° 单向向织物	第 7 层(表面层)	360	0.20

3.2 仿真分析

对上边梁及其连接结构进行模型构建,模拟该上边梁应用于车体部件中的承载工况。本文分别使用 HyperMesh 与 OptiStruct 仿真软件进行仿真模型的前处理和计算,并采用 Hyperview 软件进行后处理。建模过程中,采用壳单元模拟,单元类型为 CQUAD4,提取结构几何面进行网格划分。对于铆钉机械连接方式,采用 rbe3+cbush+rbe3 的组合模型进行模拟;对于结构胶的黏接部分,采用 rbe3+solid+rbe3 模式模拟胶接效果。

根据 TB/T 3451—2016《动车组车体结构强度设计及试验》,提取整车受力工况时上边梁最大载荷(垂向 5 000 N)。在模型的两端支撑点处施加固定约束,中间位置加载集中载荷,有限元模型的约束与加载示意如图 3 所示。

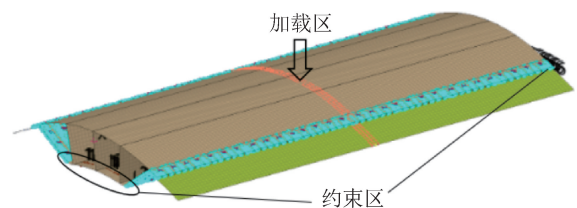


图 3 约束与加载示意

Fig. 3 Schematic diagram of constraints and loading

在垂向集中载荷条件下,提取上边梁用碳纤维复合材料在拉伸、压缩和剪切状态下的应变情况及部件的位移数据。采用基于基体拉伸最大 Hashin 值的判定方法进行上边梁结构强度评估。车体上边梁具体仿真结果见表 4。通常情况下,车辆部件安全系数不小于 1.25,即基体拉伸最大 Hashin 值不大于 0.8 就满足强度要求。由表 4 可以看出,车体上

边梁的最大压缩应变 Hashin 值为 0.405, 小于 0.8, 表明其满足强度要求。

表 4 车体上边梁仿真结果

Tab. 4 Simulation results of upper side beam of vehicle body

项目	数值
位移/mm	0.286
基体拉伸最大 Hashin 值	0.405
拉伸应变/ $(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	459
压缩应变/ $(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	1 011
剪切应变/ $(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	492

3.3 疲劳试验

为验证该国产大丝束碳纤维复合材料上边梁在长期受力下的耐久性, 对其进行疲劳试验。根据高速动车组运行环境和工况要求, 参照 TB/T 3451—2016《动车组车体结构强度设计及试验》标准, 对碳纤维复合材料上边梁试样进行弯曲疲劳性能测试。将试样安装于疲劳试验机两侧支架上并固定, 然后对试样加载疲劳载荷。设定试验载荷为 0.685 ~ 6.850 kN, 加载频率为 1~2 Hz, 疲劳周期为 1 000 万次。对试验前后的试样进行外观及内部质量无损检测。

试验结果表明, 上边梁试样在经过 1 000 万次疲劳试验后, 部件完好, 无外观及内部开裂等损伤, 证实了国产大丝束碳纤维 HFC20 复合材料应用于轨道交通车辆上边梁部件, 能够耐受 1 000 万次的部件疲劳要求。

4 结语

本文介绍了大丝束碳纤维的发展、应用现状及其在轨道车辆领域的应用前景。重点针对国产大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用展开探究, 通过力学性能测试及车体上边梁部件的工程化验证, 证实了国产大丝束碳纤维 HFC20(50K) 基本满足轨道车辆车体上边梁部件的承载性能要求。

尽管国产大丝束碳纤维在轨道车辆部件中的应用可行性已得以验证, 但针对其规模化应用, 未来仍需在整车结构应用评价、长期服役性能评估、标准体系构建等方面深入探究。随着材料性能的持续优

化、工艺技术的日趋成熟及产业生态的逐步完善, 大丝束碳纤维复合材料有望成为未来轨道车辆轻量化主流材料, 助力我国轨道交通行业实现“双碳”目标与高质量发展。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 魏阜伦, 衣海娇. 碳纤维复合材料在轨道车辆应用展望[J]. 现代城市轨道交通, 2021(2): 90-93.
- [2] 陈绍杰, 朱珊. 大丝束碳纤维应用研究[J]. 高科技纤维与应用, 2004, 29(4): 22-25.
- [3] 高硕, 周邦泽, 何梦瑶, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料拉挤成型工艺[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(12): 6-19.
- [4] 祁蓉, 周文明, 冯永国, 等. 风电叶片用大丝束碳纤维拉挤板的应用现状与挑战[J]. 合成纤维工业, 2024, 47(1): 56-60.
- [5] 高心玥, 蒋金华, 陈南梁. 大丝束碳纤维展纱技术研究进展[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(8): 17-27.
- [6] 付东升, 黄翔宇. 大丝束碳纤维复合材料在风电叶片的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2024, 49(1): 48-54.
- [7] 赵稼祥. 美国卓尔泰克(ZOLTEK)公司碳纤维现状与进展[J]. 纤维复合材料, 2003, 20(3): 52-55.
- [8] 周宏. 英国碳纤维技术早期发展史研究[J]. 合成纤维, 2017, 46(5): 15-21.
- [9] 钱伯章. 东丽扩大在墨西哥的大丝束碳纤维生产能力[J]. 合成纤维工业, 2015, 38(3): 73.
- [10] 钱伯章. 三菱丽阳增加碳纤维生产能力[J]. 合成纤维, 2016, 45(9): 46.
- [11] 钱伯章. 索尔维收购大丝束碳纤维原丝制造商[J]. 合成纤维, 2017, 46(12): 50.
- [12] 马祥林. Cytec 与 Dralon 合作研发大丝束工业级碳纤维[J]. 合成纤维工业, 2014, 37(5): 60.
- [13] 2023 年碳纤维行情[J]. 合成纤维, 2023, 52(1): 71.
- [14] 胡拥军. 上海石化: 自立自强, 建成大丝束碳纤维“国之重器”[J]. 上海化工, 2023, 48(1): 70-71.