

碳纤维复合材料在轨道交通车辆转向架上的应用

张 莉 董 磊 刘志远

(中车长春轨道客车股份有限公司转向架研发部, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘 要 介绍了碳纤维复合材料在轨道交通领域的应用现状, 分析了碳纤维复合材料的轻质高强、可靠性高、耐腐蚀、抗疲劳等性能特点, 针对碳纤维复合材料转向架的整体化制造、大型模具工装制造及变形控制技术等关键技术, 阐述了技术难点和解决措施。论证了碳纤维复合材料转向架技术应用的可行性。

关键词 轨道交通车辆; 转向架; 碳纤维复合材料

中图分类号 U270.331; U270.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.08.046

Application of Carbon Fibre Composites in Rail Transit Vehicle Bogie

ZHANG Li, DONG Lei, LIU Zhiyuan

Abstract With an introduction of the carbon fiber composites application in urban rail transit, the performance characteristics of carbon fiber composites such as the light weight, high strength, high reliability, corrosion resistance and fatigue resistance are analyzed. Then, the key technical points and corresponding resolutions in integrated bogie manufacture process, large mould frock manufacturing technique and transmutation control technique based on carbon fiber composites are elaborated, the application feasibility of carbon fiber composites bogie is conformed.

Key words urban rail transit vehicle; bogie; carbon fibre composites

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

轻量化一直以来都是轨道交通车辆设计制造追求的目标, 对于节能环保具有重要意义。当今, 轨道交通行业快速发展, 技术突飞猛进, 对车辆轻量化的要求日渐显著且亟待解决。

转向架是轨道交通车辆的关键承载部件, 对车辆的安全性、平稳性及舒适性有着至关重要的影响。而转向架质量占整车质量的 40% 以上, 其减重对实现整车减重的意义重大。使用传统金属材料时, 在保证强度的前提下, 转向架减重空间极小,

难以实现轻量化目标。CFRP(碳纤维复合材料)具有比强度高、比刚度高、耐腐蚀、抗疲劳、阻尼性能好、高安全性、可设计性强以及易于整体成型等特点, 在航空、航天等领域获得成熟应用。随着低成本 CFRP 技术的不断发展, 原材料与制造成本不断降低, 已经成为解决轨道交通车辆轻量化问题的绝佳选择。

1 CFRP 在轨道交通领域的应用现状

CFRP 在航空、航天等领域的成熟应用, 为其在轨道交通领域应用积累了丰富的经验。国内外 CFRP 在轨道交通的应用, 同航空航天领域应用发展一样, 都从非承载结构向次承载结构、再向主承载结构渐进发展。

1.1 国外应用现状

20 世纪 80 年代中期, 德国研制出世界上第一台复合材料构架(FVW)的转向架——HLD-E 转向架, 对应的列车设计速度为 200 km/h。其在德国铁路明登试验所进行了静强度和疲劳强度试验。试验结果表明, 构架刚度与理论设计值基本一致, 载荷循环次数对动态性能影响甚小, 构架无任何损伤。1988 年 1 月, 该转向架被装在 1 列城际列车上进行线路运营考核, 3 年半的时间内共运行了 100 万 km, 在整个运行考核阶段没有发现任何损坏、磨损、撕裂。

继德国之后, 日本在 1989 年成功试制了自重 0.3 t 的 CFRP 转向架构架, 比普通钢制构架减轻了 70%。该构架侧梁为 CFRP 层压板结构, 板厚 16.4 mm, 横梁采用 CFRP 缠绕成型, 相应的列车最高设计速度为 160 km/h。

1992 年, Eureka(尤里卡-欧洲创新联盟)为欧洲轨道交通车辆研制了 CFRP 高级悬挂系统, 以提高车辆的装载能力并降低运营成本, 并用玻璃纤维制成 GRP25 转向架。其构架侧梁采用双拱结构, 横梁为整体板式。构架利用玻璃纤维的弹性和承载

性能,取消了轴箱弹簧和减振器,使侧梁与轮对轴箱固结。这种结构设计使构架具有两级垂向刚度。由 GRP25 转向架的垂向变形曲线(见图 1)可知:当垂向挠度在 40 mm 以内时,垂向刚度为 0.95 kN/mm;当垂向挠度达到 40 mm 以上时,垂向刚度可达 6.80~10.10 kN/mm。

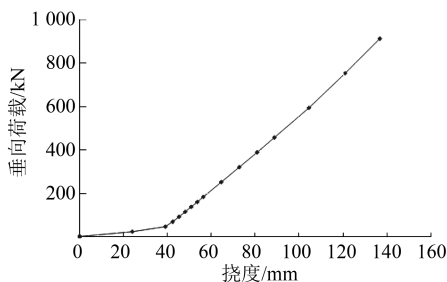


图1 GRP25 转向架垂向变形曲线

1992 年 12 月,德国研制出用于 ICE(Inter City Express)高速列车上的 HLD-300 型转向架,其对应的列车设计速度为 300 km/h。HLD-300 型转向架的 2 个侧梁和 2 个横梁先分别制造,再组装为构架,以降低制造成本。该构架在 1993 年进行了滚动试验和运行试验。试验结果表明:复合材料转向架构架达到了减轻质量、减少零件数和改善性能的目标。

20 世纪末,法国国营铁路公司(SNCF)成功研制出 3 台复合材料转向架,并成功应用于 TGV(train à grande vitesse)高速双层客车。该客车于 2000 年在 TGV 高速铁路网开始运营,设计速度为 350 km/h。构架采用 CFRP 层压板结构。

2013 年 6 月,日本的川崎重工业株式会社发布了新一代 efWING 转向架。该转向架创新性地使用 CFRP 板簧作为构架侧梁的主体结构,取消了轴箱弹簧和减振器。该弓形板簧为三层结构,上下两层主要承受弯曲载荷,中间层主要承受剪切载荷。板簧的宽度根据载荷大小和刚度要求进行了优化设计。每台 efWING 转向架的质量比钢结构约轻 900 kg,有效提高了燃效,降低了运营成本。

2012 年 6 月,efWING 转向架在美国交通技术中心(TTCI)进行了 4 500 km 的线路运行试验。列车最高试验速度为 160 km/h。试验结果表明:转向架在运行中能满足安全性要求,且性能稳定;弓形的 CFRP 构架具有悬挂元件的功能,从而将载荷稳定的传递至钢轨,在改善运行平稳性的同时,降低了脱轨风险;轮重减载率降为先前水平的一半。

2014 年 3 月,2 台 efWING 转向架被装备在九州熊本电气铁道 6000 系的 Kumaden 城轨列车上开始线路运营考核。

1.2 我国应用现状

我国轨道交通领域对 CFRP 的应用起步较晚,发展迅速。

2011 年研制了时速 500 km/h 高速列车试验车的 CFRP 列车头罩。该产品采用 VARI(真空辅助成型技术)低成本制造工艺,满足阻燃要求,能抵抗 1 kg 铝弹 660 km/h 的高速撞击,通过了 137 kN 的静载试验,较玻璃钢列车头罩减重 25%。

2012 年研制的 CFRP 磁悬浮司机室,采用 VARI 工艺成型,能抵抗 1 kg 铝弹 260 km/h 的高速撞击,较原玻璃钢司机室减重 32%。

2015 年研制的中国标准动车组设备舱 CFRP 横梁性能良好:可满足 DIN5510-2:2009《preventive fire protect in railway vehicle parts 2: Fire behaviour and fireside effects of material and parts》中 S3/SR2/ST2 等级的阻燃要求(30min),烟气毒性指数 FED ≤1;经静载荷试验验证,满足 2.2 t 静载不破坏、不开裂(安全系数大于 3)的技术要求;质量减轻 50%。该设备舱已经完成验收,并装车下线运行。

目前,CFRP 已广泛应用在司机室、列车头罩、操控台、内饰板、设备舱及裙板等部件上,但在转向架上的应用还属空白。

2 CFRP 的应用特点

2.1 CFRP 的应用优势

1) 轻量化:CFRP 具有高比模量、高比强度和结构可设计性的特点,减重效果突出,特别是对有较高刚度或变形要求的结构。

2) 化繁为简:利用 CFRP 可整体成型和日趋成熟的液体成形工艺,将大量零件通过机械连接实现的复杂结构组件,简化为由少量一次成型零件,简单装配即可实现的的复合材料结构,能大大减少零件和紧固件数量,实现低成本制造。

3) 高可靠性:CFRP 在飞机结构中已应用了 40 年,积累了丰富的设计、制造和使用经验,基本成熟。

4) 性价比高:航空航天领域的实践证明,CFRP 的性价比优于金属结构的低成本工程化应用,是目前结构轻量化的唯一选择。

5) 耐腐蚀、耐老化。

6) 疲劳性能好。

2.2 CFRP 的性能

1) 质量。CFRP 的特点是质量轻、强度高、刚度大,是一种理想的结构材料,它比金属材料比强度、比模量要高出 1~7 倍,铝合金的密度为 2.7 g/cm^3 ,而 CFRP 为 1.57 g/cm^3 ,相同结构下,使用 CFRP 可实现减重近 1/2。

2) 强度。CFRP 的强度为铝合金的 6~7 倍,比模量为铝合金的 3~4 倍。此外,与金属材料不同,CFRP 没有屈服过程,可随着载荷的增加直至破坏。

3) 缺口敏感性。金属材料的疲劳强度通常只有其静强度的 30%~50%,而 CFRP 的疲劳强度是其拉伸强度的 70%~80%,甚至更高。CFRP 对疲劳载荷不敏感,抗疲劳损伤能力强,其阻止裂纹扩散能力是钢的 2.7 倍。金属材料在疲劳破坏过程中,当裂纹扩展到一定尺寸后,材料破坏往往具有瞬时性和无法预测性,降低了可靠性和安全性;而 CFRP 对扩展裂纹的敏感度很低,且其纤维与基体的界面能阻止裂纹扩展,即使出现损伤,也是逐渐扩展,不会瞬时破坏,并且在破坏前有明显的征兆。

4) 各向异性。金属材料在各个方向上都有着相同的结构性能。CFRP 可通过材料选择、结构设计及铺层设计等方法来解决各向异性问题,也可根据强度和刚度的需要来布置纤维方向,以便灵活设计。根据载荷和功能设计的 CFRP 交叉铺层层合板性能甚至优于金属材料。

5) 抗冲击及损伤扩展形式。CFRP 具有优良的抗冲击性能,在遭受碰撞过程中能吸收较多的能量。CFRP 的损伤扩散形式为面内分层。金属的损伤扩散形式为穿透裂纹。在受损的结构中 CFRP 具有更持久的承载能力。

6) 隔声降噪能力。纤维与树脂基体界面有吸振能力,故其振动阻尼高。有研究对形状和尺寸相同的轻金属合金悬臂梁及 CFRP 悬臂梁进行振动衰减特性试验,轻金属合金梁需要 9.0 s 才能停止振动,而 CFRP 梁仅需 2.5 s。CFRP 自振频率为钢的 1.9 倍,隔声降噪能力优于铝合金。

7) CFRP 耐腐蚀性强,在恶劣环境下优势明显。金属材料多需要化学处理防护,其维护成本高。

8) 热膨胀系数低。对于热膨胀系数,钢为 12,铝为 23,玻纤为 2.6,而 CFRP 仅为 0.2,几乎零膨胀。

3 CFRP 转向架关键技术

为了充分发挥 CFRP 的刚度可设计性及阻尼特

性,通过结构设计以及铺层设计,可以简化传统的转向架一系弹簧及减震器。为保证转向架整个结构的一系弹簧与二系弹簧的静挠度比值合理,最佳的一系与二系静挠度比值为 35:65~25:75,相对阻尼系数为 0.2~0.3。以此来确定构架结构设计的刚度边界条件。

通过仿真计算与试验验证相结合的方式进行了结构优化设计,以最大化保证设计的准确性与安全性。

3.1 整体化制造技术

技术难点:转向架外形尺寸较大,结构复杂;在工艺制造过程中,要具备可操作性、大尺寸气密性、固化过程中各部位温度均匀性、固化的升降温速率的合理性。

解决途径:设计合理的工装,保证制造过程中的可实施性。为保证制造过程中的气密性以及温度均匀性,拟进行多点压力和温度监测,以便及时发现问题解决问题。结合试验选取最优化工艺方案,并通过工艺试验确定最优化升降温速率方案。

3.2 大型模具工装制造技术

技术难点:整体方案模具分为芯模和外模。芯模和外模尺寸大。其中,芯模在工艺制造过程需悬空。由于刚度强度要求高,结构复杂,故设计难度较大,尤其是大型模具的温度均匀性控制较困难。此外,还有模具数量多、加工装配困难、气密性难保证等问题。

解决途径:提高模具整体厚度和结构刚度,通过试验及结构分析,对悬空模具的可适用性进行验证和分析,从而对芯模整体进行变形控制。模具设计尽量厚薄均匀,拟借鉴航空航天常用的框架式模具设计方法,以保证制品生产过程温度均匀性。在模具装配过程中采用激光跟踪仪进行三坐标定位,严格保证装配尺寸精度。模具之间通过密封条密封,以保证模具整体气密性良好。

3.3 变形控制技术

技术难点:由于转向架尺寸大、结构形式复杂,故在制造过程中容易变形。

解决途径:主要从材料、设计、工艺及模具等方面来控制。材料选取低收缩率树脂和纤维;设计尽量采用对称铺层,减少泊松比耦合;工艺制造过程中采用低的固化温度,同时降低升降温速率;模具选用低收缩率材料,其厚度应尽量一致,既能保证加热过程中的温度均匀性,又能降低成型过程模具

本身变形对制品的影响。

4 CFRP 转向架的技术可行性

4.1 使用寿命

CFRP 的飞机结构设计寿命为 30 年。CFRP 在飞机上从上世纪 60 年代末开始应用,到目前已经经历了 40 多年,迄今为止,没有因 CFRP 结构疲劳而发生过任何飞行事故。由于 CFRP 具有优异的疲劳性能,所以通常航空复合材料结构设计中,采用了“静力覆盖疲劳”的设计理念。CFRP 转向架通过合理的材料选择、整体结构设计与分析、关键局部连接结构设计及验证、结合可靠的成型制造工艺,并且在设计不同阶段进行相应的疲劳试验验证,可以满足常规的 30 年使用寿命。

4.2 环境温度

与金属材料一样,环境温度对 CFRP 的力学性能会有一定的影响,因此在设计选材和许用值选取时应充分考虑和试验验证。例如, EV101 环氧树脂的使用温度范围为 $-55 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可以满足转向架常规 $-40 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的使用要求。

4.3 环境湿度

中温固化的 EV101 环氧树脂具有优异的耐湿热性能。在室温环境 ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$)、饱和吸湿状态下, EV101/HFW10 织物层压板的力学性能完全能满足转向架在相对湿度 95% 以上的环境使用要求。

4.4 强度校核标准

CFRP 转向架可按照 EN13749—2011《Railway Applications-Wheel Sets and Bogies-Methods of Specifying Structural Requirements of Bogie Frames》标准设计,并通过仿真分析及结构优化,以保证其满足要求。

CFRP 具有优异的疲劳性能。CFRP 中存在着不同的相与界面,这些不同的相与界面能够阻止和改变裂纹扩展方向,因此 CFRP 具有较高的疲劳极限。通常在航空 CFRP 结构设计中,采用了“静力覆盖疲劳”的设计理念。

CFRP 属于为各向异性材料,和各向同性金属强度校核方法存在差异。CFRP 设计通常采用“应变控制、强度校核”理念,即对使用载荷采用最大应变进行控制,其设计载荷常采用蔡胡准则或其他准则进行强度校核。

4.5 设计、制造及检测标准

由于目前轨道交通行业还没有 CFRP 构件的设计、制造及检测等方面的标准,可借鉴航空航天行业的相关标准,结合项目实际情况,逐步建立符合轨道交通行业要求的相关标准。

4.6 其他性能

1) 表面可油漆性。CFRP 可以与金属一样进行喷漆。喷漆时,应选用与 CFRP 中树脂同质的油漆材料,并对需喷漆表面进行打磨处理,以增加油漆附着力、保证喷漆质量。

2) 防火性能。通过合理选材,CFRP 可以满足 DIN5510-2:2009 中 S4 级阻燃要求及其它相关标准要求。

3) 转向架可修复性。借鉴航空业丰富的经验,CFRP 结构件有完善的维修修复方法。

4) 环保性。CFRP 转向架减重可达 30% 以上,其节能减排效果显著。目前国内外在 CFRP 的回收方面也进行了大量研究,已经取得了显著的成果。

5) 接地及电磁兼容性。碳纤维本身为半导体,不透电磁波,也不存在吸波现象。在需要透波的区域,CFRP 构件可采用玻璃钢蒙皮,或根据要求在设计时采取搭铁和接地来解决。

5 结语

CFRP 在轨道交通领域转向架上应用的技术方案可行,经初步计算减重效果达 30% 以上。对于起停频繁的地铁列车来讲,CFRP 转向架不仅能极大降低列车的运营能耗,亦可填补我国在碳纤维复合材料转向架方面的空白,还能有效促进碳纤维复合材料在我国轨道交通领域的大量应用,有力提升我国高铁、地铁在国际市场中的竞争力,显著发挥新型轻量化材料的作用,带来巨大的经济效益及社会效益。

参考文献

- [1] 贺冠强,刘永江,李华,等. 轨道交通装备碳纤维复合材料的应用[J]. 机车电传动,2017(2): 5.
- [2] 丁叁叁,田爱琴,王建军,等. 高速动车组碳纤维复合材料应用研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2015(S1): 1.
- [3] 刘晓波,杨颖. 轻量化高性能碳纤维复合材料车体研发关键技术[J]. 合成纤维,2013(10): 29.
- [4] 单勇,谭艳. 复合材料在轨道交通领域的应用[J]. 电力机车与城轨车辆,2011(2): 9.

(收稿日期:2018-08-14)