

# 碳纤维复合材料在轨道交通车辆转向架上的应用

梁云 湛亮 杨集友 吕常秀 贾洪龙 王一淞

(中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春//第一作者, 教授级高级工程师)

**摘要** 分析了现有转向架安全托及安全吊架断裂问题的原因, 针对碳纤维复合材料的高强度、高韧性、耐疲劳、耐高温、耐腐蚀、重量轻等优异性能, 提出了现役车辆使用碳纤维复合材料安全托的整改方案。以某车型为例, 对新型安全托进行冲击和振动疲劳的有限元计算分析, 和具体线路的进行往返应力测试。计算结果和测试结果证明: 采用 CFRP 安全托可以满足运用要求, 能缓解并提高安全吊座的使用寿命; 而且利用车辆整备时间即可完成整改处理, 避免了扣车整改的不利影响。

**关键词** 轨道交通; 车辆; 碳纤维复合材料; 转向架; 安全托

**中图分类号** U260.331; U270.4<sup>+</sup>2

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2020.01.030

## Application of Carbon Fiber Composite Polymer on Urban Rail Transit Vehicle Bogy

LIANG Yun, CHEN Liang, YANG Jiyu, LYU Changxiu, JIA Honglong, WANG Yisong

**Abstract** Reasons for the breaking problems in current boggy safety bracket and safety hanger are analyzed. Based on the excellent properties of carbon fiber composite polymer, including high strength, high toughness, fatigue resistance, high temperature resistance, corrosion resistance, light weight and so on, a rectification scheme is proposed for the use of carbon fiber composite polymer in safety bracket on the active vehicles. Taking a certain vehicle type as the example, the finite element calculation analysis of the impact and vibration fatigue on new safety bracket is conducted, and a cyclic dynamic stress test on specific routes is implemented. Both the calculation and test result show that the CFRP safety bracket can fully meet the operational demands, alleviate the stress and increase the safety hanger lifespan. At the same time, the vehicle rectification can be completed within the preparation time, thus the undermining influence of vehicle rectification could also be avoided.

**Key words** rail transit; vehicle; carbon fiber composite polymer; boggy; safety bracket

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

碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)是一种新型材料,已在航空、船舶、汽车及体育用品等领域广泛运用,其技术成熟。碳纤维复合材料在轨道交通领域的应用具有良好的前景。

在国外,尤其是日本、韩国、英国和德国,对轨道交通列车的 CFRP 应用范围从内饰、车内设备、司机室外罩等非承载部件和次承载部件,扩大到车体、转向架等主承载结构。

国内在轨道交通领域的 CFRP 应用研究起步较晚,但发展迅速。目前已完成了 CFRP 材质次承载件和零部件的研制与应用(如车辆司机室头罩、裙板、内饰板及车体侧墙等)。2018 年初,中车长春轨道客车股份有限公司研制出世界首辆全 CFRP 材质的地铁车体。该车体采用薄壁筒形整体承载结构,车体长度为 19 000 mm,宽度为 2 800 mm,车体顶面距轨面高度为 3 478 mm,较同类地铁金属车体减重约 35%。

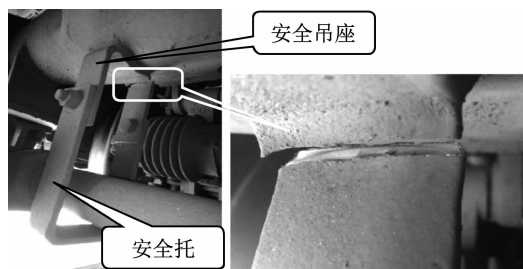
总体来说,在轨道交通车辆上的 CFRP 应用已有大量研究,但车上应用远多于车下,转向架部分的应用更是少之甚少。所以,有必要结合转向架的结构和运用特性进行深入研究,以点带面,从小部件着手,积累经验的同时逐步扩展至转向架的总体,从而使性能优异的 CFRP 充分助力转向架的性能提升和减重节能。

## 1 现有转向架应用中的常见问题

目前,常用的某型客车转向架构架会设置安全吊座和安全托,以起到防脱功能。其中,钢制安全吊座焊接在构架上,钢制安全托通过紧固件与吊座连接。在使用过程中,会发生个别安全吊座断裂的故障,具体如图 1 所示。

对安全吊座的断裂原因进行分析,确认其是由原始焊接缺陷导致的疲劳断裂。另外,现场调研发现,个别安全吊座与安全托之间存在较大的装配间隙差,只能别扭组装,从而使安全吊座结构的内应

力增大,加速了吊座缺陷的扩展速度。



a) 断裂位置 b) 断裂部位局部放大

图1 安全吊座断裂故障现场照片

## 2 解决方案及验证

### 2.1 方案描述

针对上述问题及其原因,对于新造车辆,可通过严格控制制造质量来保证车辆的安全运用;对于目前大量的在役车辆,需整改进行处理。整改措施不能采用过于复杂的处理措施,以免由于扣车整改过于影响车辆利用率,导致车辆无法正常运行。

首先,利用车辆整备时间先对在役车辆进行焊缝质量普查,消除焊缝缺陷隐患;随后,在保证接口一致的前提下,采用 CFRP 安全托替换原钢制安全托。CFRP 的高强度能保证安全托的承载能力;CFRP 的高韧性能够消除别劲组装造成的装配内应力;CFRP 的低密度能提高固有频率,降低振动对安全吊座的影响;CFRP 的耐疲劳、耐腐蚀特性可有效延长安全托的使用寿命。

基于 CFRP 的结构特性,为了保护螺栓安装孔,使其免遭装配损伤,CFRP 安全托在通孔处设置了不锈钢衬套。这样既保护了装配孔,又维持了原连接螺栓紧固力矩不变,维持了更改前后装配工艺的一致性。

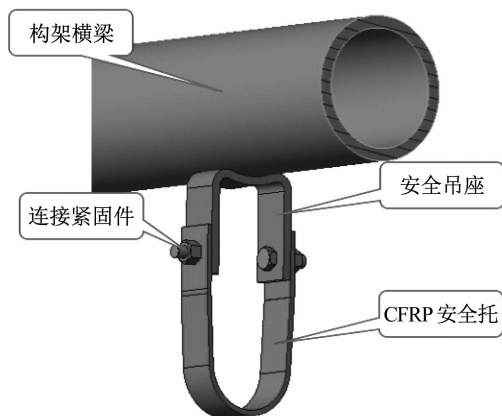


图2 CFRP 安全托整改方案

### 2.2 计算分析

通过有限元建模,施加相同的约束和载荷,对原结构和整改方案进行对比分析。按照 IEC 61373 《铁路应用 铁道车辆设备冲击和振动试验标准》,对 CFRP 安全托进行冲击和振动疲劳计算,以评定其结构的安全性。

安全托所用材料为 T700 CFRP,采用蔡吴 (Tsai-Wu) 准则进行校核。蔡吴准则判断依据为:

$$I_F = \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + \left( \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) \sigma_1 + \left( \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2$$

式中:

$I_F$ ——蔡吴破坏因子; $I_F < 1$ ,表示层合板安全。

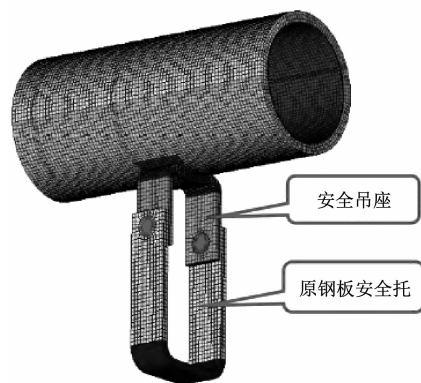
$F_{12}$ ——计算强度参数,为 2 个正应力分量的相

关项,且有  $F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}}$ ;

$X_t$ ——沿纤维材料主方向(经向)的拉伸强度;

$X_c$ ——沿纤维材料主方向(经向)的压缩强度;

$Y_t$ ——垂直于纤维材料主方向(纬向)的拉伸强度;



a) 原钢板安全托模型



b) 换为 CFRP 安全托的模型

图3 有限元计算模型

$Y_c$ ——垂直于纤维材料主方向（纬向）压缩强度；  
 $S$ ——沿纤维材料主方向的面内剪切强度；  
 $\sigma_1、\sigma_2、\tau_{12}$ ——分别为经向、纬向和剪切工作应力。

通过计算可知,对于 CFRP 安全托,在各个计算

工况下安全托 FI 的最大值为 $2.124 \times 10^{-3}$ ,小于 1。对于安全吊座,冲击载荷下的最大应力由 80.87 MPa 降低至 9.634 MPa;振动载荷下的疲劳损伤值由 0.033 降低至 0.010;一阶模态频率由 125.582 Hz 提高至 215.5 Hz。具体对比如表 1 所示。

表 1 原结构与整改方案对比表

	原结构	整改方案
冲击工况	<div><p>应力: MPa</p><p>0 17.972 35.943 53.915 71.886 8.986 26.957 44.929 62.9 80.872</p><p>最大应力为 80.87 MPa</p></div>	<div><p>最大应力为 9.634 Mpa</p></div>
疲劳损伤	<div><p>疲劳损伤值</p><p>0.390E-17 0.007 29 0.014 581 0.021 871 0.029 161 0.003 645 0.100 935 0.018 226 0.025 516 0.032 806</p><p>疲劳损伤值为 0.033</p></div>	<div><p>疲劳损伤值为 0.01</p></div>
一阶模态	<div><p>频率为 125.582 Hz</p></div>	<div><p>频率为 215.5 Hz</p></div>

2.3 试验验证

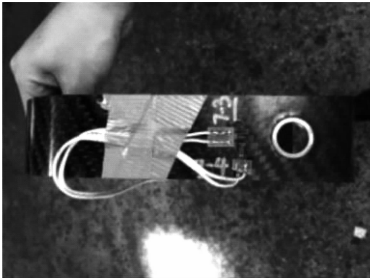
为了验证整改方案 CFRP 结构的可行性,选取沈大线的沈阳北站—熊岳城站区间作为典型的测试线路(包含了高速线路(160 km/h)和曲线线路),进行往返动应力测试工作,车辆为额定载荷工况。其中安全吊座测点编号为 2K25~2K32,安全托测点编号为(7-1)~(7-4)。具体测点如图 4 所示。



a) 安全吊座测点



b) 安全托 7-1、7-2



c) 安全托 7-3、7-4

图4 CFRP 安全托动应力测试

现阶段对于 CFRP 的研究分析方法还主要是有限元仿真计算分析和样件的试验台验证。由于 CFRP 存在各向异性,目前针对轨道交通车辆 CFRP 产品的线路运行状态研究还基本空白。此次线路测试的主要目的是验证 CFRP 安全托对安全吊座的

应力缓解,以保证安全吊座可以安全运用。其次,通过测试 CFRP 安全托表层应力状态,对比有限元计算结果进行寿命评估,积累轨道交通车辆 CFRP 产品线路运行状态的试验和评估方法的经验。

通过 2 次往返测试得到了各个测点的应力值。经数据处理可知,采用 CFRP 安全托后,安全吊座的最大等效应力为 44.7 MPa,小于焊缝许用应力 70 MPa(见表 2),证明其结构满足运用要求。安全吊座 2K26 测点的应力时域图如图 5 所示。

表 2 安全吊座与横梁连接处测点等效应力 MPa

测点	第一次往返		第二次往返	
2K25	27.6	19.4	12.5	11.0
2K26	44.2	40.8	44.7	41.2
2K27	28.4	25.7	28.3	25.2
2K28		37.9		44.6
2K29	31.5	24.6	18.9	17.9
2K30	34.5	30.8	35.4	30.7
2K31	38.9	37.4	39.1	37.4
2K32	20.5	14.6	11.4	9.2

对于 CFRP 安全托,测点 7-3 的最大应力幅为 14.1 MPa,如图 6 所示。参照线性疲劳累计损伤法则,按整个寿命期车辆运行 1 200 万 km 考虑,经数据处理可知,安全托表面测点的最大等效应力幅值为 32 MPa,对比安全托有限元的计算应力,CFRP 安全托能满足 1 200 万 km 的使用要求。

3 结语

本文以安全托整改方案为例进行分析计算和线路测试。计算结果和测试结果证明:采用 CFRP 安全托可以满足运用要求,能缓解并提高安全吊座的使用寿命;而且利用车辆整备时间即可完成整改处理,避免了扣车整改的不利影响。转向架 CFRP 安全托整改方案简洁可行。

CFRP 的运用为转向架零部件的结构设计提供了新的思路。CFRP 具有高强度、高韧性、重量轻、耐疲劳、耐腐蚀的特性,更适合转向架恶劣的工作环境。悬挂件的安全托、一系起吊止挡及排障装置等部件也可以尝试使用 CFRP。而且,利用辅材填充技术的 CFRP 还可应用在推拉杆件上(如牵引拉杆、推力杆等)。这些思路和成果为后续转向架整体性能提升,提供了数据基础,积累了经验。

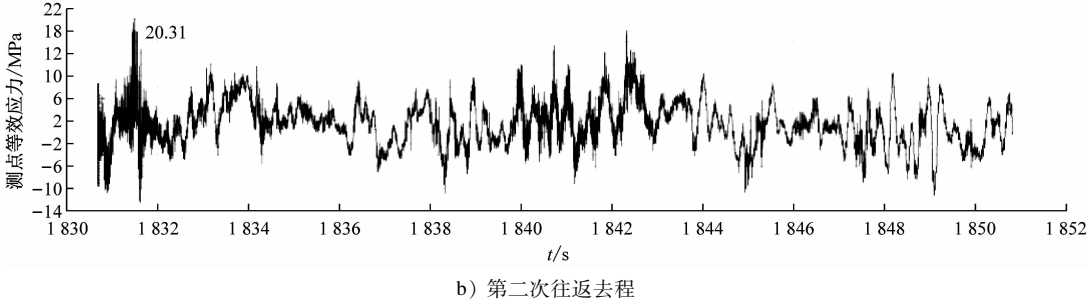
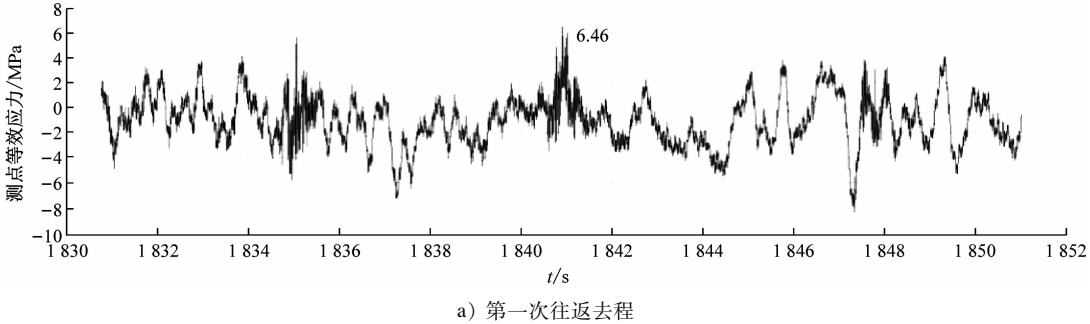


图5 安全吊座 2K26 测点时域图

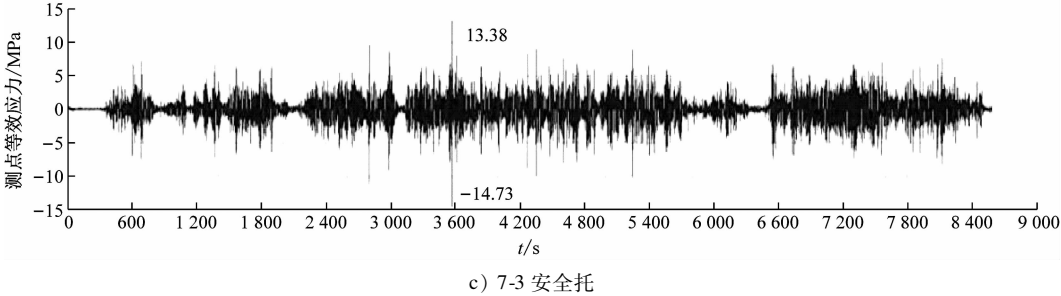
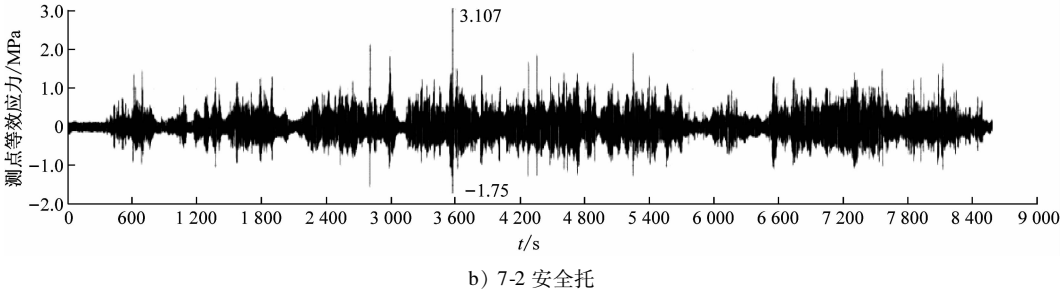
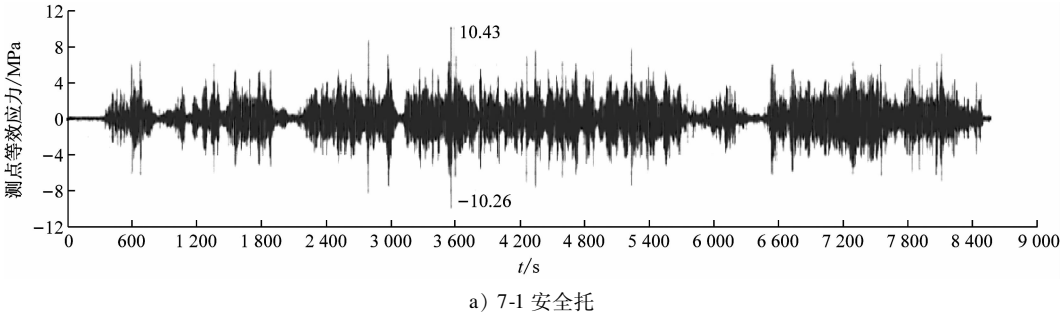


图6 CFRP 安全托测点去零漂时域图

参考文献

[1] 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,2015,12(38):1.

[2] 李文超,董丽. 从专利分析角度看碳纤维复合材料在轨道交通车辆上的应用[J]. 统计分析,2016,3(3):33.

(收稿日期:2018-05-28)