

地铁车辆排障器支架断裂失效分析与试验研究^{*}

南 松^{1,2}, 李会杰³, 夏 热⁴

(1. 广州铁路职业技术学院机车车辆学院 广州, 511300)

(2. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州, 510641)

(3. 中车唐山机车车辆有限公司技术研究中心 唐山, 064000)

(4. 武汉大学动力与机械学院 武汉, 430072)

摘要 针对地铁列车在运营期间排障器支架断裂问题,以断裂支架为研究对象,通过断口分析、强度仿真计算、动应力试验以及振动特性分析等多种研究手段,揭示支架断裂的复合原因。结果表明:长期高频交变载荷作用诱发支架结构疲劳故障,表面加工方式不当引起其疲劳寿命降低;现有轮轨条件下,排障器摆动量较大,存在动应力过大的问题;全线道床结构类型与排障器支架横向弯曲模态频率接近,导致的共振现象使振动能量变大,长期运营造成振动疲劳断裂;为避免排障器支架断裂的发生,建议在设计阶段采用更具有抗振、耐疲劳性能的材料,提高排障器的摆动稳定性,并对其结构进行优化,降低其共振频率。

关键词 地铁车辆;疲劳断裂;动应力;线路试验

中图分类号 U270;TH17

引 言

转向架是支撑车体并相对车体回转的走行装置,在车辆结构中主要起到承载、牵引、缓冲、转向和制动等功能。地铁车辆排障器通常安装在头车前转向架和尾车后转向架,起到清除轨道上障碍物的作用。随着城市轨道交通中小半径、大坡度线路越来越多,排障器在地铁车辆运行期间受到的载荷也变得尤为复杂,特别是轨道上障碍物冲击、结构共振和潜在焊接缺陷等因素极易导致排障器出现结构裂纹甚至断裂的现象,致使列车在运行过程中存在脱轨风险,严重影响行车安全。

关于地铁车辆零部件结构失效机理的分析,文献[1-2]基于欧洲和日本标准评估了转向架焊接结构疲劳强度。张凯函等^[3]运用有限元仿真计算了转向架构架的静强度和疲劳强度,确定了最大应力发生位置。文献[4-5]建立了车辆刚柔耦合多体动力学模型,基于准静态惯性释放有限元分析,预测了转向架构架关键部位的疲劳寿命。文献[6-7]从材料学角度分析了转向架零部件结构失效行为,发现微观疏松会成为疲劳失效裂纹源,确定了失效行为属于疲劳开裂。兰清群等^[8]基于应力-寿命曲线进行

损伤计算,利用 Miner 损伤累积理论计算了转向架构架的使用寿命。胡杰鑫等^[9]利用虚拟实验方法对转向架枕梁结构进行了恒变幅载荷下的寿命预测。

上述研究在一定程度上揭示了车辆结构断裂失效的原因,然而,其研究方法过于单一,缺乏实测数据支撑,对失效机理的研究仍然不足。为此,李娅娜等^[10]将排障器静强度的仿真结果与试验测点数据进行对比,分析了二者存在差异的影响因素。文献[11-12]通过理论推导和台架试验,提出了一种频率-时间混合校准方法。Xiu 等^[13]对比了标定载荷谱、测量载荷谱、模拟载荷谱的转向架构架疲劳寿命评估。文献[14-15]提出了线路动应力试验和疲劳强度仿真相结合的轴箱吊耳断裂原因分析方法。文献[16-17]在车辆运营条件下,通过高精度测力构架,结合断裂力学方法,分析了构架载荷动态特性和损伤状况。虽然这些方法提高了车辆结构断裂机理分析的准确性,但研究对象多为车辆承载部件,对于排障器这类悬挂结构的研究较少。

基于列车运行过程中排障器潜在的断裂失效问题,亟需全面分析其失效模式和失效机理。本研究对地铁车辆日常巡检过程中所发现的排障器支架开裂问题进行失效分析与试验研究,通过断口分析、强

^{*} 广东省普通高校青年创新人才类资助项目(2025KQNCX223);广州市教育局产教融合资助项目(2024312523)

收稿日期:2023-07-05;修回日期:2023-10-06

度仿真计算、动应力试验以及振动特性分析等多方位的探究,揭示支架断裂的复合原因,为进一步提升排障器支架结构设计、优化排障器支架疲劳寿命提供研究思路。

1 支架断口分析

1.1 宏观形貌分析

排障器支架安装在转向架的天线梁上,由钢板焊接而成,用于固定排障器,支架上设置长圆孔以调节排障器的位置高度。断裂位置位于长圆孔两侧薄壁处,支架断裂位置示意图如图 1 所示。支架断口侧面宏观形貌如图 2 所示。图中支架侧面存在 2 处圆弧形凹坑,凹坑附近存在油漆脱落和锈蚀痕迹,为垫片配合压装所致。

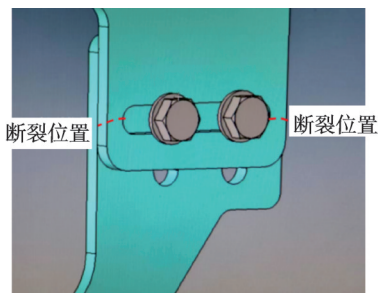


图 1 支架断裂位置示意图

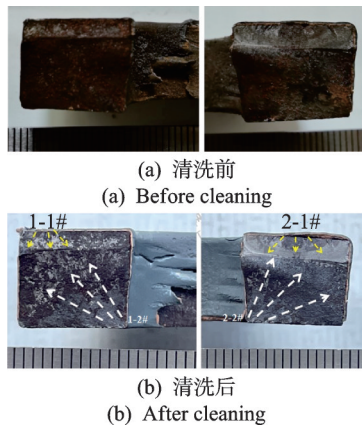
Fig.1 Schematic diagram of bracket fracture location



图 2 支架断口侧面宏观形貌

Fig.2 Macroscopic morphology of bracket fracture surface

图 3 为断面宏观形貌。断口周围未见明显塑性



(b) 清洗后
(b) After cleaning

图 3 断面宏观形貌

Fig.3 Macro morphology of cross-section

变形,断面存在黄褐色锈蚀。根据断面粗糙程度差异可以将断面分为 2 个区域,即图 3(a)中上方平滑区和下方粗糙区。如图 3(b)所示,经除锈清理后,断面纹理清晰可见,平滑区存在明显的疲劳弧线,根据疲劳弧线收敛方向可以推测裂源均位于支架与垫片接触面处,即 1-1#和 2-1#处;由粗糙区断面纹理可知,裂源均位于孔内壁拐角处,即 1-2#和 2-2#处,从该处向对侧快速疲劳扩展,由此初步判定支架断裂是由疲劳引起的。

1.2 微观形貌分析

采用扫描电子显微镜进一步探究支架断裂原因,裂纹源和扩展区微观形貌如图 4 所示。1-1#断口裂源区存在多个裂纹交汇台阶和锈蚀覆盖物,未见疏松、夹渣和老旧性裂纹。1-2#断口裂源区位于孔内壁拐角处,裂纹处存在锈蚀覆盖物,未见疏松、夹渣和老旧性裂纹。观察断口扩展区发现,支架微观形貌以准解理断裂为主,在局部观察到疲劳裂纹。

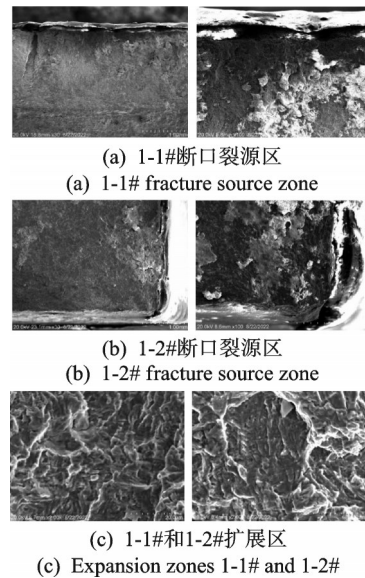


图 4 裂纹源和扩展区微观形貌

Fig.4 Microscopic morphology of crack source and expansion zone

1.3 组织分析

支架金相组织分析如图 5 所示。图 5(a)中,支架组织结构为铁素体和条带状分布的珠光体,铁素体晶粒度级别为 7.5 级,未见晶粒粗大与混晶现象。图 5(b)中,对支架断口裂纹源附近截面进行微观形貌分析,发现其表面存在深约 100 μm 的沿晶二次裂纹,裂纹源金相组织为该区域截面金相组织,表层存在热影响层。最表层为黄褐色淬硬层,为黄褐色板

条马氏体和少量白色铁素体,表面存在的二次裂纹呈沿晶扩展。

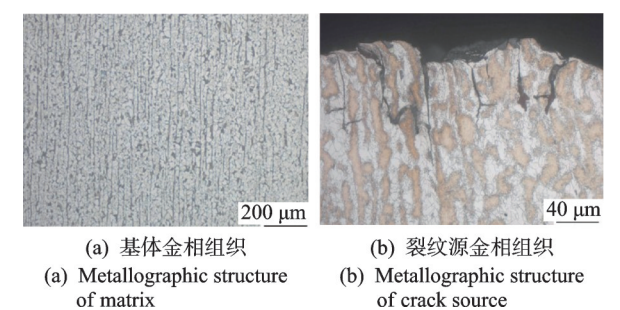


图 5 支架金相组织分析
Fig.5 Metallographic structure analysis of bracket

支架维氏硬度测试结果见表 1。2 个区域硬度值相差较大,说明支架表面加工方式不当,导致表层存在硬而脆的淬火马氏体,降低了支架的疲劳寿命。

表 1 支架维氏硬度测试			
Tab.1 Vickers hardness test of bracket			
位置	1	2	3
裂纹源	439HV0.5	424HV0.5	431HV0.5
心部基体	164HV0.5	175HV0.5	170HV0.5

2 支架强度仿真分析

2.1 有限元模型建立

为保证排障器有限元建模精度,选用 Solid187 单元对排障器主体结构进行建模,支架及安装座等薄壁结构选用 Shell281 单元进行建模,选用 Beam188 单元对连接螺栓进行建模,选用 Mass21 单元模拟结构重心,各螺栓间的连接使用刚性单元进行模拟。排障器有限元模型如图 6 所示,共划分 250 552 个网格单元和 437 617 个节点。

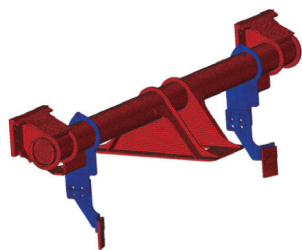


图 6 排障器有限元模型
Fig.6 Finite element model of cowcatcher

2.2 结构强度计算分析

为分析排障器结构设计的合理性,建立排障器有

限元模型并进行加载。静强度冲击载荷工况采用纵向±5g、横向±10g、垂向±20g 的组合进行计算;疲劳冲击载荷工况采用纵向±2.5g、横向±5g、垂向±6g 的组合进行计算,其中 $g=9.81\text{ m/s}^2$ 。将上述静强度和疲劳强度的全部工况计算结果导入软件,绘制得到静强度分析的外包络等效应力云图和疲劳强度分析的材料利用率云图。强度仿真分析如图 7 所示。

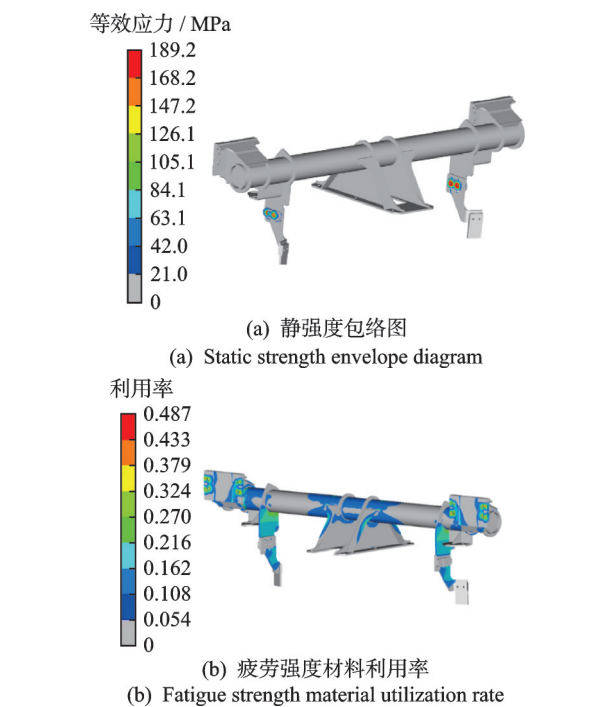


图 7 强度仿真分析
Fig.7 Strength simulation analysis

由图 7(a)可知,排障器的最大等效应力为 189.2 MPa,位于支架螺栓孔连接部位,小于材料屈服极限 345.0 MPa;由图 7(b)可知,排障器的最大疲劳强度材料利用率为 0.487(无量纲),小于 1。由此说明排障器的静强度和疲劳强度均满足设计标准要求。尽管仿真分析可以从理论上反映结构设计的合理性,但这仅是一种近似的模拟,并不能完全代表排障器实际的工作状况。因此,还需要以排障器仿真分析结果中显示的危险部位作为参考,进行线路动应力试验分析。

3 支架动应力试验分析

3.1 试验方案

为进一步测试排障器支架的抗疲劳性能,测试了列车在空载工况下运行时的应力状态,以检测支架长圆孔两侧薄壁区域的受力状况。测试采用动态

信号采集系统和应变片监测支架关键区域。综合考虑有限元计算结果、裂纹区域及操作空间,在支架螺栓孔附近和拐角处共计10个测点进行贴片,测点位置及编号如图8所示。

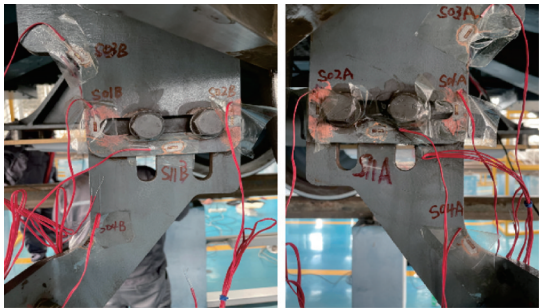


图8 测点位置及编号

Fig.8 Locations and numberings of measurement points

试验按照列车正常运行状态完成,包括启动、启动、行驶、进站及站内等待,试验测试里程为65 km,最高运行速度为80 km/h。通过动态信号采集系统采集各测点在试验全过程中所受最大应力值、最小应力值及应力幅值,全程测点应力最值结果见表2。其中,S03B测点的应力变化范围最大,其幅值为89.5 MPa。

表2 全程测点应力最值

Tab.2 Maximum stress values at the entire measurement points					
			MPa		
测点	最大值	最小值	测点	最大值	最小值
S01A	21.86	−33.70	S01B	50.01	−74.84
S02A	30.70	−40.99	S02B	54.67	−62.09
S03A	30.06	−26.19	S03B	86.27	−92.74
S04A	47.82	−46.52	S04B	53.89	−54.66
S11A	6.96	−7.06	S11B	4.62	−6.85

通过对各通道数据进行整理分析,得到在空载状态下,列车运行过程中10个测点应变与时间的关系。其中,测点S03应变-时间图如图9所示,可以发现,应变随着时间变化呈现出明显的波动特征。在部分时间段内,波峰和波谷的变化幅度较大,这可能是由于列车在运行过程中受到强烈的随机振动、障碍物冲击或者轨道不平顺等因素所导致。

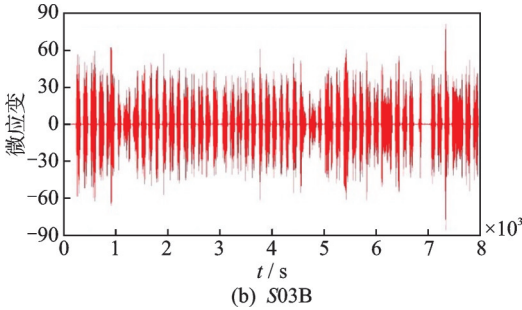
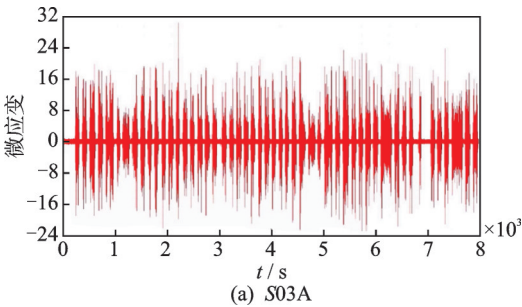


图9 S03测点应变-时间图

Fig.9 Strain-time diagram of measuring point S03

3.2 支架疲劳可靠性评估

雨流计数法是评估排障器支架结构疲劳可靠性的一种有效手段,该方法可通过处理应力循环状态来准确预测和评估支架结构的疲劳寿命。支架动态应力响应代表其疲劳损伤的累计过程^[18]。在编制应力谱时,为准确反映实际动应力历程,取10个测点的64级应力谱进行编制。采用Miner线性累计损伤法则和国际焊接学会推荐的应力-寿命曲线进行损伤计算^[19-20],此方法可合理考量各级应力水平产生的损伤,其表达式为

$$D=\frac{L}{L_i}\sum_{i=1}^{64}\frac{n_i}{N_i}=\frac{L}{L_i}\sum_{i=1}^{64}\frac{n_i\sigma_{-1ai}^m}{C}$$

(1)

其中: L_i 为试验测试里程; L 为寿命周期内运营总里程; m 和 C 为材料常数; σ_{-1ai}^m 为第 i 级应力; n_i 为第 i 级应力对应的循环次数。

综上,通过对试验数据进行零漂处理、雨流计数及应力编谱,对各测点进行损伤计算,得到各测点 36×10^5 km损伤值(无量纲)。支架各测点损伤值见表3。

表3 支架各测点损伤值

Tab.3 Damage values of bracket measuring points			
测点	损伤值	测点	损伤值
S01A	7.11×10^{-4}	S01B	1.21
S02A	3.53×10^{-3}	S02B	2.53×10^{-1}
S03A	1.60×10^{-3}	S03B	3.49
S04A	9.82×10^{-2}	S04B	3.05×10^{-1}
S11A	2.00×10^{-9}	S11B	2.25×10^{-10}

S01B和S03B测点的累计损伤值均超过1,说明支架在此处存在断裂的风险。按照现有条件运行,只能安全运行 29.7×10^5 km和 10.32×10^5 km,不能满足安全运行 36×10^5 km的要求。此外,测点左侧的累计损伤值略大于右侧数据,说明左侧支架的受力情况较为恶劣,这与试验过程中两侧轮轨的状态

以及振动冲击的传递有关。为探明导致排障器支架断裂的振动来源,需要分别从支架的自身振动特性以及振动传递路径等方面进行计算与试验分析。

4 支架振动特性分析

4.1 模态分析

为分析支架的振动特性,对排障器有限元模型的支架螺栓孔处进行约束,计算得到的排障器约束模态如图10所示。一阶横弯模态频率为61.4 Hz,同时在现场进行锤击试验,得到支架的横向弯曲模态频率为61.8 Hz,阻尼比约为2%,这说明仿真分析结果与试验结果相吻合。

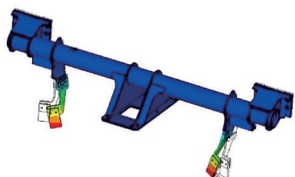


图10 排障器约束模态

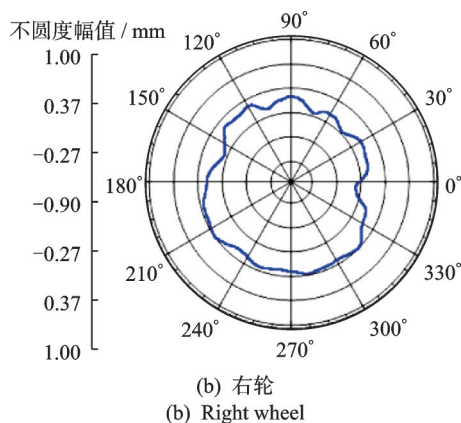
Fig.10 Constraint mode of cowcatcher

4.2 车轮不圆度测试

车轮不圆度测试可用来检测轨道车辆车轮的几何不规则性。在地铁车辆运行过程中,车轮会因重载、长期磨损、制造材料和工艺等因素而出现不规则形状,如椭圆形、三角形、高阶多边形等。多边形车轮会产生周期性动力激励,进而激发轨道的动力响应,加剧转向架的振动,降低车辆部件的疲劳寿命。

为建立车轮多边形激励模型,对车轮进行不圆度测试,发现车轮存在失圆现象,主要表现为9~10阶不圆,粗糙度幅值在30 dB左右。极坐标下车轮不圆度曲线如图11所示。

通常多边形车轮是列车在服役状态下轮轨激励



(b) 右轮
(b) Right wheel

图11 极坐标下车轮不圆度曲线

Fig.11 Curves of wheel out-of-roundness in polar coordinates

的主要来源,其产生的激励频率计算式^[21]为

$$f_k = \frac{kv}{\pi d_w} \quad (2)$$

其中: k 为车轮多边形阶数; v 为列车运行速度; d_w 为车轮名义滚动圆直径。

被测车轮名义滚动圆直径为833.9 mm,当列车以50~65 km/h速度运行时,由式(2)计算得到车轮多边形激励频率为47.42~61.65 Hz。

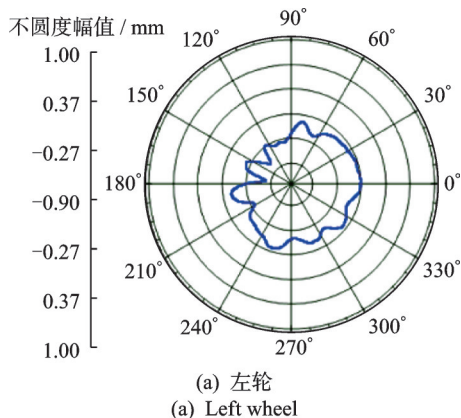
在测试线路检测过程中,发现个别区段存在不同程度的钢轨波磨,波长在50~60 mm,该区段列车运行速度为65~75 km/h,由此得到相应波磨特征频率为300.83~416.60 Hz。

4.3 振动传递分析

通过在排障器支架可能的振动传递路径上布置加速度传感器并监测各部分的振动情况,可有效确定排障器支架振动的来源和影响因素。在布置测点时,选择排障器端部、转向架构架端部、空气弹簧座及天线梁等安装布置三向压电式高频响加速度计。测点布置如图12所示。这些位置可覆盖排障器可能的振动传递路径和最有可能发生振动的区域,以获得准确的测量结果。

为研究支架在横向振动性能方面的表现,在设定数据采集和存储频率为1 kHz的条件下采集全程数据,支架及安装座横向振动加速度时域图如图13所示。支架在横向振动加速度上的振幅范围为±10g,个别区段达到±22g,均方根最大值为10.75g;同时,支架安装座在横向振动加速度上的振幅范围为±2g,个别区段达到±5.7g,其均方根最大值为2.08g。

截取上行方向部分数据,对轴箱、支架及支架安装座部位的振动特征进行分析。区段排障器部件振



(a) 左轮
(a) Left wheel

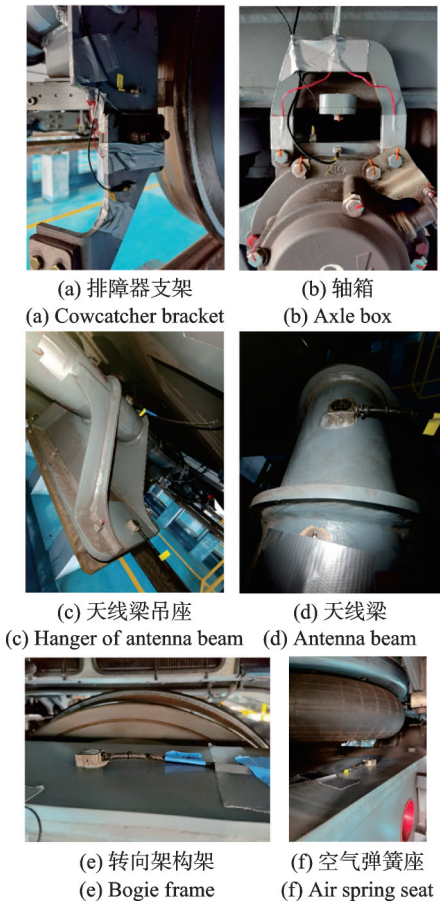


图 12 测点布置图

Fig.12 Layout of measurement points

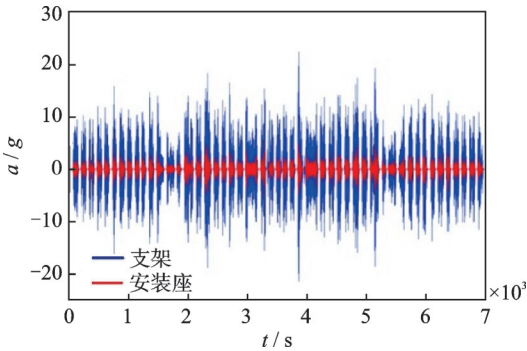


图 13 支架及安装座横向振动加速度时域图

Fig.13 Time domain of lateral vibration acceleration of bracket and mounting base

动加速度时域图如图 14 所示。在列车行驶过程中，轴箱垂向、支架和支架安装座横向振动加速度在区段 2 明显小于区段 1 和区段 3，主要原因可归结为轨道结构的不同。

由线路试验振动加速度数据得到轴箱、支架及支架安装座的相关数据。区段排障器部件振动加速度频谱图如图 15 所示。轴箱垂向、支架和支架安装座横向振动加速度主频均在 59 Hz 左右，与支架的

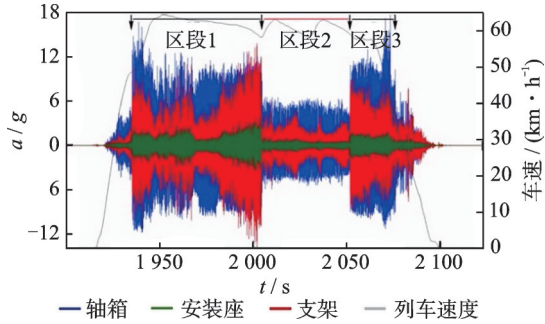


图 14 区段排障器部件振动加速度时域图

Fig.14 Time domain of vibration acceleration of section cow-catcher components

横向弯曲模态频率较为接近，因此容易引起共振。

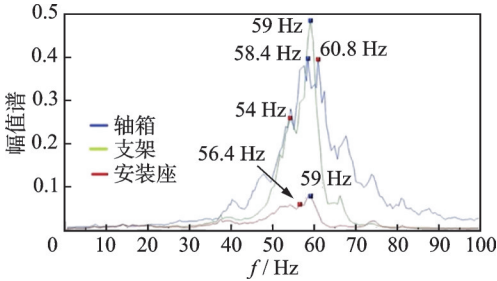


图 15 区段排障器部件振动加速度频谱图

Fig.15 Spectrogram of vibration acceleration spectra of cow-catcher eliminator components

图 16 为轴箱垂向振动加速度时频图。由图可知，车轮不圆是引起轴箱强迫振动的主要原因。其中，车轮 9 阶不圆 (58.81 Hz) 尤其突出，且在区段 1 和区段 3 能量明显增大。分析可知，区段 1 和区段 3 采用 DTVI2 型扣件，该区段 P2 力频率与车轮 9 阶不圆频率接近，导致轴箱振动能量明显增大。因此，从这 2 个区段的时频图中可观察到明显的振动峰值。相比之下，区段 2 采用双层弹性垫板减振扣，该区段的 P2 力频率较低，可以有效地降低 P2 力振动能量，从而减少轴箱振动。

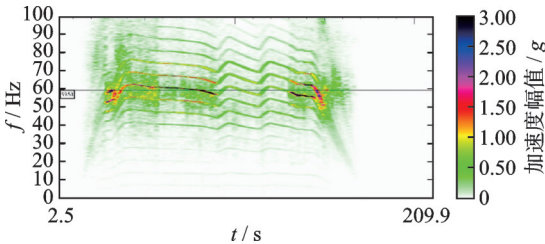


图 16 轴箱垂向振动加速时域图

Fig.16 Time domain of vertical vibration acceleration of axle box

综上，排障器支架断裂原因是由于该地铁线路道床结构类型主要采用 DTVI2 型扣件和长枕整体道床，P2 力频率与支架横向弯曲模态频率接近，而

支架横向弯曲模态阻尼比较低,激起支架及支架安装座产生横向模态振动。当车轮9~11阶车轮非圆磨耗时,9阶不圆产生的轮轨激励频率与P2力频率接近,导致支架横向振动加剧,长时间运营易造成振动疲劳断裂。

5 结 论

1) 对排障器支架断口进行取样分析,确定了支架断口具有双向弯曲疲劳断裂的特征,属于结构疲劳故障。在组织分析中发现支架表层存在硬而脆的淬火马氏体,说明支架表面加工方式不当,导致其疲劳寿命降低。

2) 对于排障器这类悬挂结构的设计,仅根据标准对其施加冲击载荷进行的强度安全校核不够充分,易导致结构出现疲劳断裂。

3) 在基于动应力试验的排障器支架疲劳可靠性评估中,发现现有轮轨条件下,排障器的摆动量较大;在实测的动应力数据中,部分测点受力变化较大,且累计损伤值大于1,无法满足 36×10^5 km安全运行的设计要求。

4) 锤击试验得到排障器支架的横向弯曲模态频率为61.8 Hz。由于全线道床结构类型主要采用DTV12型扣件和长枕整体道床,P2力频率、9阶车轮不圆产生的强迫振动频率与排障器支架横向弯曲模态频率接近,排障器支架发生共振现象,振动能量变大,长期运营导致振动疲劳断裂。

5) 建议现阶段对车轮进行镟修,降低轮轨激励能量。在排障器支架设计阶段进行模态差频设计,在设计固有频率时,使支架避开轮轨激励水平较高的47.42~61.65 Hz和300.83~416.6 Hz频段。

参 考 文 献

- [1] 安琪,李芾,黄运华,等.基于JIS标准的转向架焊接构架疲劳强度评估[J].机车电传动,2009(4):26-29.
AN Qi, LI Fu, HUANG Yunhua, et al. Fatigue strength assessment for bogie welded frame based on JIS standard[J]. Electric Drive for Locomotives, 2009(4): 26-29.(in Chinese)
- [2] 刘上源,阳光武,肖守讷,等.基于UIC和JIS标准的焊接构架疲劳强度对比分析研究[J].机车电传动,2019(6):91-94.
LIU Shangyuan, YANG Guangwu, XIAO Shoune, et al. Comparative analysis of fatigue strength of welded frame based on UIC and JIS standards[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(6): 91-94.(in Chinese)
- [3] 张凯函,李强,杨广雪.西安地铁车辆转向架构架静强度与疲劳强度分析[J].城市轨道交通研究,2013,16(9):79-82,86.
ZHANG Kaihan, LI Qiang, YANG Guangxue. Analysis of the strength and fatigue of Xi'an metro bogie frame [J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(9): 79-82, 86.(in Chinese)
- [4] 黄旭,廖爱华,方宇.基于刚柔耦合的转向架构架关键部位疲劳分析[J].机械设计与制造,2015(2):40-43.
HUANG Xu, LIAO Aihua, FANG Yu. Fatigue analysis of the key parts of the frame based on rigid flexible coupling multibody dynamics simulation [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(2): 40-43.(in Chinese)
- [5] 廖爱华,黄旭,方宇.基于刚柔耦合的轨道车辆转向架构架疲劳分析[J].振动、测试与诊断,2017,37(2):392-397.
LIAO Aihua, HUANG Xu, FANG Yu. Fatigue analysis for bogie frame based on rigid-flexible coupling simulation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(2): 392-397.(in Chinese)
- [6] 陈红圣,徐贵宝,李平平.地铁转向架关键铸钢件失效分析及质量改进[J].铸造,2017,66(12):1329-1332.
CHEN Hongsheng, XU Guibao, LI Pingping. Failure analysis and quality optimization on the critical steel casting of metro bogie [J]. Foundry, 2017, 66(12): 1329-1332.(in Chinese)
- [7] 沈豪.地铁列车转向架构架开裂的失效分析[J].机械工程材料,2013,37(3):103-106.
SHEN Hao. Failure analysis on fracture of subway train bogie frame [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(3): 103-106.(in Chinese)
- [8] 兰清群,李兆君.地铁车辆转向架构架使用寿命评估试验方法[J].现代制造工程,2017(6):79-82.
LAN Qingqun, LI Zhaojun. Service life evaluation method for metro vehicle steering frame [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(6): 79-82.(in Chinese)
- [9] 胡杰鑫,谢里阳,喻海洋,等.基于验证模型的枕梁疲劳寿命预测虚拟实验[J].西南交通大学学报,2019,54(1):106-112.
HU Jiexin, XIE Liyang, YU Haiyang, et al. Virtual experiments to predict bolster fatigue lifetime based on FEM model validated by static tests [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(1): 106-112.(in Chinese)
- [10] 李娅娜,何本政,谢素明.动车组排障器结构非线性强度计算和试验验证[J].机械设计与制造,2017(4):

- 18-20, 25.
- LI Yana, HE Benzheng, XIE Suming. Nonlinear strength analysis and experimental verification of EMU cowcatcher structure[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(4): 18-20, 25.(in Chinese)
- [11] ZHANG Z, RU C, LI Q. Study on a novel field-measured load calibration method for the life assessment of the metro bogie frame[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 136: 106209.
- [12] WANG B J, LI Q, REN Z S, et al. Improving the fatigue reliability of metro vehicle bogie frame based on load spectrum[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105389.
- [13] XIU R X, SPIRYAGIN M, WU Q, et al. Fatigue life assessment methods for railway vehicle bogie frames [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 116: 104725.
- [14] 杨雨, 周劲松, 孙煜, 等. 地铁车辆轴箱吊耳断裂机理分析及优化[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 212-216.
- YANG Yu, ZHOU Jinsong, SUN Yu, et al. Fracture mechanism analysis and structure optimization of metro vehicles axle box lifting lugs[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 212-216.(in Chinese)
- [15] 姬芳芳, 刘东亮, 李志永. 地铁车辆轴箱吊耳断裂分析及优化[J]. 机械强度, 2022, 44(2): 461-467.
- JI Fangfang, LIU Dongliang, LI Zhiyong. Fracture analysis and optimization of lifting lug of metro axle box [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(2): 461-467.(in Chinese)
- [16] 王斌杰, 孙守光, 王曦, 等. 地铁转向架构架运用载荷与疲劳损伤特征研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(6): 53-60.
- WANG Binjie, SUN Shouguang, WANG Xi, et al. Research on characteristics of operation loads and fatigue damage of metro train bogie frame[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(6): 53-60. (in Chinese)
- [17] 谢树强, 王斌杰, 王文静, 等. 基于动应力的地铁构架疲劳损伤与疲劳寿命计算[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 183-190.
- XIE Shuqiang, WANG Binjie, WANG Wenjing, et al. Calculation for fatigue damage and fatigue life of metro bogie based on dynamic stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4): 183-190.(in Chinese)
- [18] ZHAO X Y, XIE S Q, ZHANG Y L, et al. Fatigue reliability analysis of metro bogie frame based on effective notch stress method [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131: 105811.
- [19] HOBACHER A H, BAUMGARTNER J. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Berlin: Springer, 2008: 125-144.
- [20] YUAN Z, CHEN X, LI C, et al. The influence of operation variables on stress spectrum of high-speed train bogie frames[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(2): 499-512.
- [21] 毛冉成, 曾京, 石怀龙, 等. 车轮多边形激励下高速转向架构架振动特性分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(9): 26-32.
- MAO Rancheng, ZENG Jing, SHI Huailong, et al. Vibration behavior analysis of high-speed bogie frame under wheel polygonal excitations[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(9): 26-32.(in Chinese)



第一作者简介:南松,男,1994年9月生,博士、讲师。主要研究方向为轨道车辆结构可靠性分析。曾发表《制动盘表面热疲劳裂纹热应力仿真分析》(《机械设计与研究》2024年第40卷第6期)等论文。

E-mail: nansong@gtxy.edu.cn

通信作者简介:夏热,男,1980年11月生,博士、副教授。主要研究方向为结构力学与实验应力分析。

E-mail: xiare@whu.edu.cn