

文章编号: 1005-0523(2025)04-0029-08



## 基于断口分析的机车铸造牵引座焊后疲劳失效机制研究

朱涛<sup>1</sup>, 齐红瑞<sup>2</sup>, 太万秋<sup>2</sup>, 张帆<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 肖守讷<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 中车大同电力机车有限公司技术中心, 山西 大同 037038)

**摘要:** 针对铁路机车铸造牵引座在长期服役过程中关键位置裂纹率偏高的问题, 开展基于断口分析的铸造牵引座关键位置焊后疲劳失效机制研究。首先建立了经试验验证的牵引座有限元模型, 确定了牵引座在标准牵引制动载荷下底座大圆弧处存在显著应力集中区域; 然后, 开展了基于标准载荷谱的牵引座高周疲劳试验, 再现了宏观裂纹在应力集中区域的萌生和扩展过程; 最后, 对疲劳裂纹失效区域进行了断口分析、扫描电镜(SEM)观察、金相检验和能谱分析(EDS), 表明裂纹区域存在明显的焊接修复痕迹及热处理组织。研究结果表明, 牵引座疲劳开裂失效是底座圆弧处应力集中与焊接修复引入的缺陷共同作用的结果, 应着重控制底座大圆弧处的铸造质量, 避免补焊。该研究可为铁路货运的安全高效运营和零部件的维护检修提供理论指导。

**关键词:** 机车铸造牵引座; 高周疲劳试验; 断口分析; 疲劳失效

**中图分类号:** U270

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 朱涛, 齐红瑞, 太万秋, 等. 基于断口分析的机车铸造牵引座焊后疲劳失效机制研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(4): 29-36.

## Research on Fatigue Failure Mechanism of Locomotive Casting Traction Seat After Welding Based on Fracture Analysis

Zhu Tao<sup>1</sup>, Qi Hongrui<sup>2</sup>, Tai Wanqiu<sup>2</sup>, Zhang Fan<sup>1</sup>, Wang Chao<sup>1</sup>, Xiao Shoune<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. CRRC Datong Co., Ltd., Datong 037038, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of high crack rate in key positions of cast traction seats for railway locomotives during long-term service, a study was conducted on the post-weld fatigue failure mechanism at key positions of cast traction seats based on fracture analysis. Firstly, an experimentally validated finite element model of the traction seat was established, and it was determined that there is a significant stress concentration area at the large arc of the base of the traction seat under standard traction braking loads. Then, a high cycle fatigue test was conducted on the traction seat based on the standard load spectrum, reproducing the initiation and propagation process of macroscopic cracks in the stress concentration area. Finally, fracture analysis, scanning electron microscopy (SEM) observation, metallographic examination, and energy dispersive spectroscopy (EDS) were per-

收稿日期: 2025-07-03

基金项目: 四川省自然科学基金创新研究群体项目(2025NSFTD0014); 国家重点研发计划(2022YFB4301201)

formed on the fatigue crack failure area, indicating the presence of obvious welding repair marks and heat-treated microstructure in the crack area. The research results indicate that the fatigue cracking failure of the traction seat is the result of the combined effect of stress concentration at the base arc and defects introduced by welding repair. It is important to focus on controlling the casting quality at the large arc of the base and avoid welding repairs. The research can provide theoretical guidance for the safe and efficient operation of railway freight and the maintenance and repair of parts.

**Key words:** locomotive casting traction seat; high cycle fatigue test; fracture analysis; fatigue failure

**Citation format:** ZHU T, QI H R, TAI W Q, et al. Research on fatigue failure mechanism of locomotive casting traction seat after welding based on fracture analysis[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(4): 29–36.

重载列车有着载重大、编组辆数多的特点<sup>[1]</sup>,在铁路货运系统中有着优势。目前,货运铁路也朝着高轴重,多编组的方向发展。机车作为货运列车的动力来源,在日常运行中会经历较为频繁的牵引启动和制动过程,车钩、牵引装置、拉杆座等此类纵向承载部件会产生巨大的纵向载荷波动<sup>[2]</sup>,增加了牵引装置断裂失效、裂纹萌生扩展而导致的疲劳失效等安全隐患。

针对此类纵向承载部件,许多研究学者对其进行了大量的可靠性研究。张志超等<sup>[3]</sup>对重载机车钩缓装置在不同运行线路上的稳定性进行了研究,并针对车钩分离等安全性问题提出了解决方案。徐京涛等<sup>[4]</sup>针对重载货车常用车钩设计了一种更为便捷准确的车钩强度计算分析方法,为服役部件的可靠性计算提供了新的理论思路。范云鹏等<sup>[5]</sup>依据各项标准对机车牵引装置进行了强度评估,并对比了不同边界条件对计算结果的影响。米立柱等<sup>[6]</sup>使用有限元方法对和谐号HXD2机车牵引装置结构的强度进行了校核研究,并给出了应力集中部位。马呈祥等<sup>[7]</sup>针对机车转向架拉杆座角焊缝疲劳失效问题进行了分析研究,通过断口分析、硬度测试和有限元仿真等方法获取了角焊缝的疲劳失效机理。王伟等<sup>[8]</sup>针对经常出现失效的牵引拉杆座问题,对其三维模型在超工况下进行了有限元强度计算,发现了牵引拉杆座结构存在的严重问题,并给出了优化方案。

由于铸造工艺在生产形状复杂、体积较大且产量较大的零部件时具有天然优势,因此被广泛应用于航空航天<sup>[9-10]</sup>、轨道交通<sup>[11-13]</sup>和工程桥梁<sup>[14-16]</sup>等领

域。然而,铸造工艺不可避免地会产生铸造缺陷,严重影响结构强度和疲劳寿命,可以考虑通过焊接工艺对铸造缺陷进行修复。许章华等<sup>[17]</sup>等对经TIG焊修复后的铸造组织进行了疲劳性能测试和显微组织分析,发现合适的焊接修复工艺可以有效克服铸造缺陷对结构强度的影响。王家鑫等<sup>[18]</sup>等针对转向架齿轮箱吊座经常出现铸造缺陷而导致结构失效的现象,验证了使用焊接修复工艺消除铸造缺陷的可行性。

HXD2型“和谐号”电力机车牵引座作为车辆大型纵向承载部件之一,同样使用铸造工艺制造,在生产过程中,通过焊接工艺对铸件表面的可见铸造缺陷进行消除。其铸造材料选用铸造E级钢<sup>[19]</sup>ZG25MnCrNiMo,化学成分包括:碳0.26%,硅0.36%,锰1.40%,硫0.02%,铬0.5%,镍0.45%,钼0.25%,铜0.20%,磷0.03%以及大量的铁元素。该牵引座在服役200万km后检修发现裂纹率高达50%,裂纹主要分布在底座圆弧处和牵引座头部位置,这些部位通常存在焊修行为,为服役结构的疲劳失效提供了更多可能。目前针对焊后铸件的失效分析案例还不多,对此,本文针对经焊修后的铸造牵引座发生疲劳失效的现象进行了失效机制研究,期望可为铁路货运的安全高效运营和零部件的维护检修提供理论指导。

## 1 机车牵引座结构和有限元计算

### 1.1 机车牵引座结构

机车采用中央推挽式牵引装置,结构相对简单。如图1所示,该装置主要由牵引杆、牵引座及连

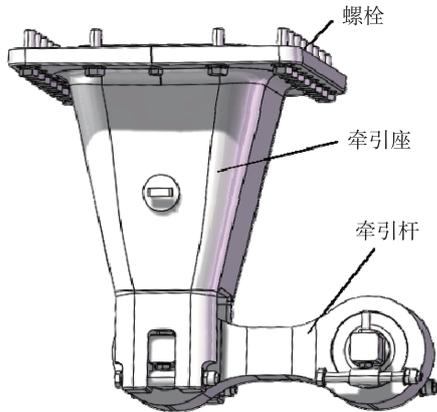


图1 牵引装置几何结构

Fig. 1 Geometric structure of traction device

接销轴连接组成,牵引杆与机车转向架相连,牵引座通过底部的螺栓与车体相连。牵引座作为该结构核心铸造件,主要承受车辆纵向传递的牵引力和制动力。参考相关文献,表1给出了铸造E级钢<sup>[19]</sup>的材料基本力学性能,作为后续进行有限元计算的初始输入。

表1 铸造E级钢的基本力学性能

Tab.1 Basic mechanical properties of cast grade E steel

密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	强度极限/ MPa	泊松比
7 850	204 639	640	806	0.28

### 1.2 三维模型的建立

对牵引座结构进行有限元建模时,严格遵循ISO8855车辆坐标系标准建立正交笛卡尔坐标系系统。有限元模型由实体单元、质量单元、螺栓紧固单元、刚性单元组成。综合考虑计算精度和计算效率,网格采用尺寸为4 mm的四面体实体单元网格,单元类型为Solid185;各部件之间使用刚性单元CERIG进行连接;使用RBE单元模拟实际载荷的加载区域。最终的有限元模型网格总数为1 039 879个,节点总数为219 237个。

机车牵引座的边界载荷条件参考EN12663-1 2010中的标准牵引制动力,最终确定牵引载荷为285 kN,制动载荷为200 kN。对牵引座结构进行静强度分析时,约束住牵引座与底板螺栓连接位置,在拉杆远端施加牵引制动载荷,牵引座有限元模型和边界条件如图2所示。

### 1.3 仿真结果分析

图3给出了牵引座在牵引、制动工况下的Von-

Mises应力计算结果。结果显示,机车铸造牵引座在牵引工况下的最大应力为119.37 MPa,在制动工况下的最大应力为83.77 MPa,两种工况下的最大应力远小于材料的屈服强度,满足静强度设计要求。

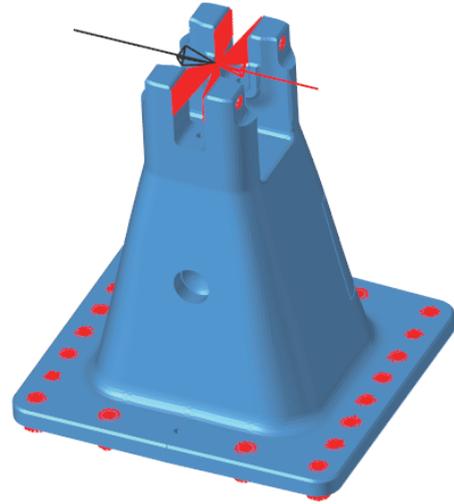
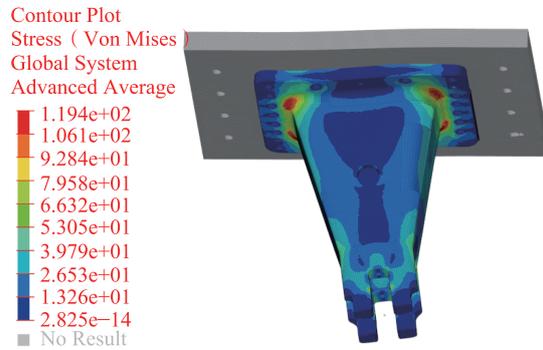
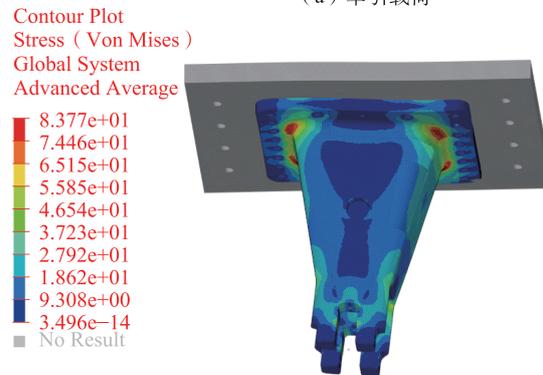


图2 牵引座有限元模型

Fig. 2 Finite element model of traction seat



(a) 牵引载荷



(b) 制动载荷

图3 各载荷下牵引座 Von Mises 应力分布

Fig. 3 Von Mises stress distribution of traction seat under different loads

通过应力分布结果可以看到,在两种工况下,牵引座底座4个大圆弧处都出现了应力集中现象,这为疲劳裂纹的萌生提供了有利条件。尽管在两种工况下的最大应力均小于材料的屈服强度,但在长期交变载荷作用下,这些应力集中区域仍会成为疲劳裂纹最主要的萌生源。

#### 1.4 有限元模型的验证

有限元计算结果明确了牵引座在牵引、制动载荷下的应力分布规律,为结构危险薄弱位置的确定提供了理论依据。然而,数值模拟结果的准确性仍需要通过试验加以验证,因此本研究对服役牵引座结构进行了静强度试验。图4给出了静强度试验过程中的测点位置。

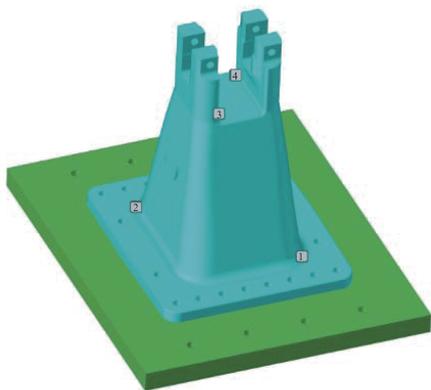


图4 静强度试验的测点布置

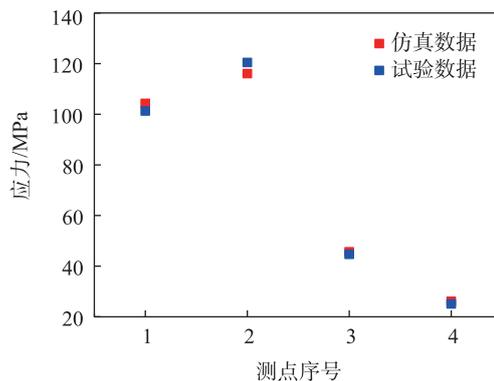
Fig. 4 Arrangement of measuring points for static strength test

模拟载荷实际传递路径,对牵引座施加+285 kN/-200 kN作用力模拟实际服役载荷,两种工况下各施加3次作用力,分别采集测点处的应变数据并计算均值以减小误差,与有限元计算结果进行对比,得到结果如图5所示。最大误差为7.52%,表明仿真模型和试验具有较好的一致性,进一步验证了有限元计算的准确性。

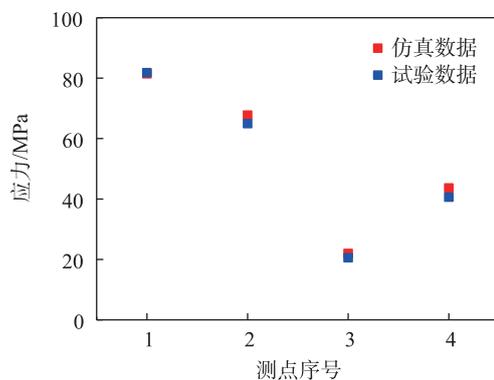
## 2 牵引座疲劳强度试验

### 2.1 高周疲劳试验

牵引制动载荷在预测极端重载作业场景下的疲劳寿命起着重要作用,牵引座作为机车关键纵向力承载件,在长期承受交变冲击载荷作用下极易发生疲劳失效。因此,研究牵引制动载荷下牵引座的疲劳失效有着重要意义。如图6所示,铸造牵引座高周疲劳试验在水平单轴振动台上进行,对其以牵引制



(a) 牵引载荷



(b) 制动载荷

图5 各载荷下仿真计算结果和试验数据对比  
Fig. 5 Comparison of simulation results and experimental data



图6 高周疲劳试验现场

Fig. 6 High cycle fatigue test site

动载荷进行加载,载荷谱幅值为+285 kN/-200 kN,加载频率为1.5 Hz。

### 2.2 试验结果

高周疲劳试验中,在牵引座底座圆弧表面首先监测到了宏观裂纹,裂纹符合I型张开型裂纹特征并具有明显的裂纹扩展现象。表2给出了不同表面宏观裂纹长度对应的载荷循环次数。当载荷循环至261万次时,裂纹已扩展至长度为143 mm。如图7所示,此时裂纹扩展速率明显下降,这是裂纹扩展导致应力释放且裂纹离开应力集中区域导致的。

表2 裂纹长度对应的载荷循环次数

Tab.2 Number of load cycles corresponding to the crack length

裂纹长度/mm	载荷循环次数/次
45	1 232 224
55	1 563 254
87	2 203 027
113	2 482 301
143	2 614 738



图7 牵引座表面宏观裂纹

Fig.7 Macroscopic cracks on the surface of the traction seat

### 3 断口分析

#### 3.1 宏观断口形貌

为深入分析牵引座出现裂纹的原因,在裂纹区域进行取样,以便对断口进行分析。将试样沿断口分开,浸入酒精溶液进行超声波清洁后烘干,得到裂纹宏观形貌(图8)。可以观察到在疲劳断口明显存在与基体不同的焊接修复组织区域,这部分组织有着比铸造母材更为粗大的晶粒。此外,在断口发现了较严重的尖锐裂纹,这表明在焊接修复过程中存在焊接工艺不当、焊接参数不合理等问题,导致焊接缺陷的产生,最终成为结构疲劳失效的主要原因。

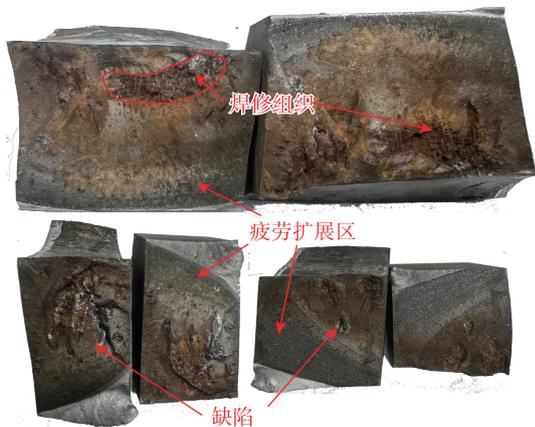
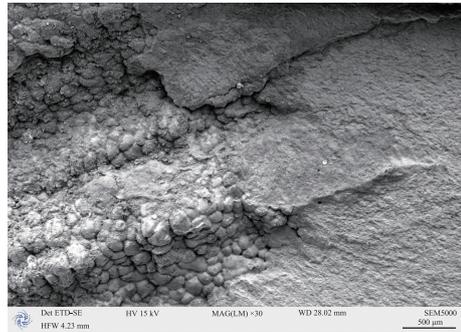


图8 疲劳断口宏观图

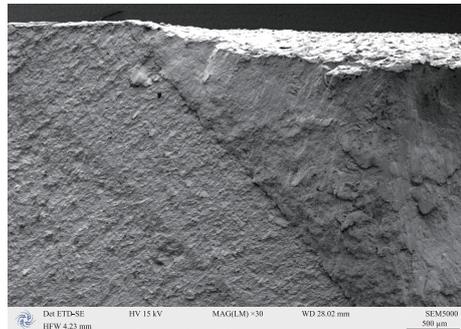
Fig.8 Macroscopic view of fatigue fracture

#### 3.2 微观断口形貌

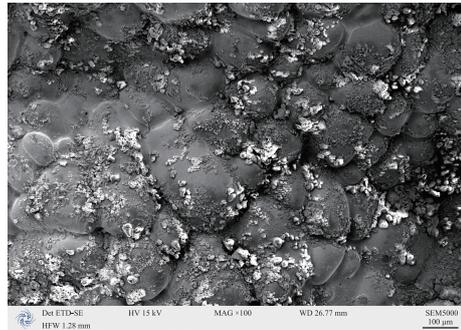
使用国仪量子CIQTEK SEM5000对试样断口表面的微观图像进行采集,得到的SEM电镜微观图像如图9所示。



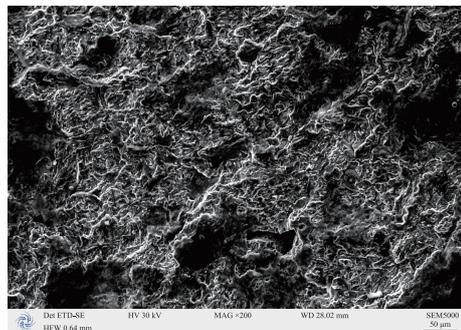
(a) 母材中夹杂的焊接修复组织



(b) 疲劳裂纹条带



(c) 焊接修复组织局部放大图



(d) 裂纹扩展区局部放大图

图9 疲劳断口微观图

Fig.9 Microstructure of fatigue fracture

焊修后的粗大晶粒会降低材料的韧性和抗疲劳性能,使得牵引座在交变载荷作用下更容易产生疲劳裂纹萌生。通过图9(a)能够观察到铸造母材中夹杂的焊接修复组织,经过局部放大后能够明显观察到焊修组织的粗大晶粒,如图9(c)所示。此外,在断口处还发现了光滑的裂纹扩展区,如图9(b)所示,其整体表现为放射状的疲劳条带特征<sup>[20]</sup>,将此处组织在更高倍镜下展示,如图9(d)所示,可以看到这一母材组织形态与焊修组织形态有着巨大差异。

### 3.3 金相分析

为进一步探究各区域的组织分布情况,对疲劳断口处进行金相试验。将试样垂直于断口方向切开,对切开后新的断口进行打磨抛光,并对表面进行腐蚀,置于金相显微镜下,采集图像如图10~图11

所示。

图10中发现4种不同的组织区域,其中区域I是热处理区,区域II是焊接修复区,区域III是热影响区,区域IV是铸造母材区。可见牵引座底座圆弧处在焊接修复后进行了热处理工艺,此处晶粒细化有助于提高结构强度。

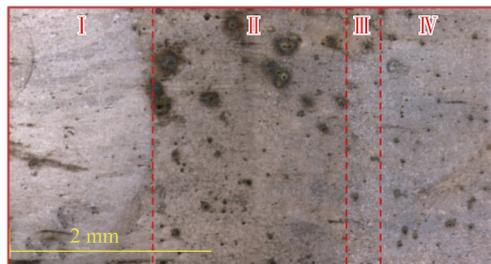
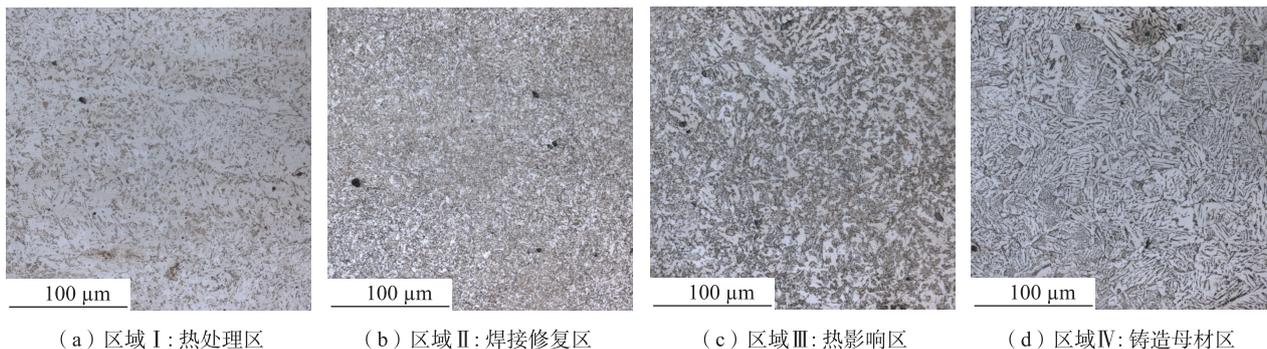


图10 金相组织图

Fig. 10 Metallographic structure diagram



(a) 区域 I: 热处理区

(b) 区域 II: 焊接修复区

(c) 区域 III: 热影响区

(d) 区域 IV: 铸造母材区

图11 金相组织图-局部

Fig. 11 Metallographic organization diagram-local

### 3.4 EDS分析

通过能量色散谱分析可以获取材料组织的化学元素含量和空间分布情况<sup>[21]</sup>,为探究焊接修复区域和铸造母材成分差异,对二者分别进行了能量色散谱分析(EDS),其结果如图12所示。

对比两个区域成分含量,可见相较于基体,焊接修复区域的氧原子含量有明显的提高,表明该区域在裂纹生长过程中经历了严重的氧化反应。此外,焊接修复过程中通过焊材引入了过量的锰和硅元素,导致焊接修复区域的锰、硅元素含量明显高于铸造E级铸钢的规范要求,进一步说明此处经历了焊接修复。

### 3.5 疲劳失效原因分析

在交变载荷作用下,牵引座底座大圆弧出现了应力集中现象,这为疲劳裂纹萌生和扩展提供了驱动力。然而,由焊接修复引入的尖锐裂纹等焊修缺

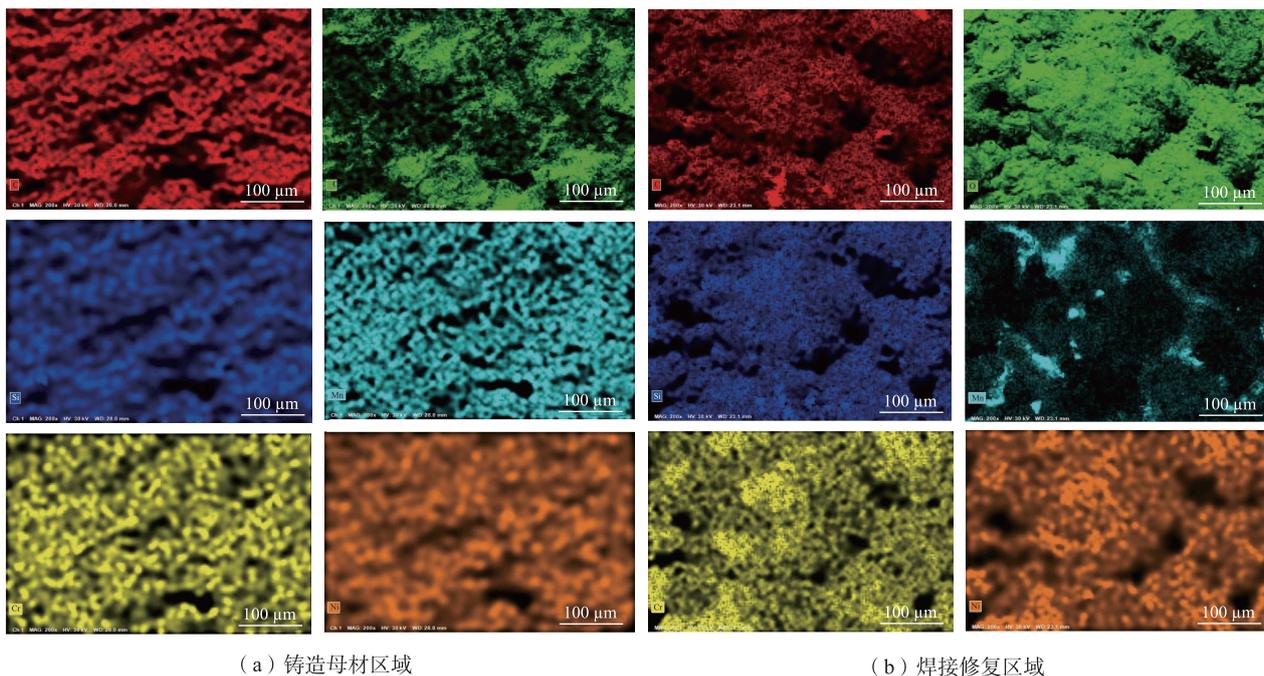
陷在牵引座疲劳失效过程中也起到了至关重要的作用。在二者的共同作用下,牵引座底座圆弧处首先产生疲劳裂纹萌生和扩展现象,最终导致了结构的开裂失效。

## 4 结论

本文通过对机车铸造牵引座的有限元仿真、高周疲劳试验和断口分析,研究了牵引座在牵引制动载荷下的失效机制,取得了以下主要结论。

1) 通过对机车铸造牵引座模型进行有限元分析,得到底座大圆弧处为牵引座高应力集中区域。尽管结构最大应力远小于母材屈服强度,但在长期交变载荷下,应力集中区域成为裂纹萌生和扩展的核心位置。

2) 通过牵引制动载荷下的高周疲劳试验,得到了牵引座疲劳失效的宏观裂纹扩展趋势,可见在裂



(a) 铸造母材区域

(b) 焊接修复区域

图12 铸造母材与焊接修复区域的EDS图

Fig. 12 EDS diagram of casting base metal and welding repair area

纹扩展过程中,裂纹优先向应力大的方向进行扩展。得到的疲劳断口为断口形貌分析和金相试验提供了试样支撑。

3) 通过对疲劳断口的形貌分析和金相试验,确定了牵引座底座圆弧开裂区域存在焊接修复过程。进一步表明结构发生疲劳失效是由于焊接修复过程引入的尖锐裂纹和应力集中共同作用导致的,应着重控制底座大圆弧处的铸造质量,避免补焊。

#### 参考文献:

- [1] 于宗泽,魏玉光,于海龙,等.重载列车车钩缓冲装置纵向动力学精细化模型[J].中国铁道科学,2025,46(2):192-202.  
YU Z Z, WEI Y G, YU H L, et al. Refined longitudinal dynamics model of the coupler and draft gear for heavy-haul trains[J]. China Railway Science, 2025, 46(2): 192-202.
- [2] 唐磊,武伯有,徐博,等.地铁列车车体关键区域与车钩载荷相关性研究[J].电力机车与城轨车辆,2024,47(2):50-54.  
TANG L, WU B Y, XU B, et al. Research on correlation between key areas of metro train car body and coupler load[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2024, 47(2): 50-54.
- [3] 张志超,储高峰,王开云,等.重载机车安全性与钩缓装置承载稳定性研究进展[J].交通运输工程学报,2024,24(5):195-216.  
ZHANG Z C, CHU G F, WANG K Y, et al. Research progress on safety of heavy-haul locomotive and bearing stability of couple and buffer system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(5): 195-216.
- [4] 徐京涛,朱涛,尹敏轩,等.一种重载货车车钩强度的分析方法[J].机械制造与自动化,2022,51(2):29-33.  
XU J T, ZHU T, YIN M X, et al. A method for analyzing strength of heavy-haul coupler[J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(2): 29-33.
- [5] 范云鹏,李茂春,周佐斌,等.机车牵引装置强度评估方法研究[J].电力机车与城轨车辆,2025,48(3):66-72.  
FAN Y P, LI M C, ZHOU Z B, et al. Research on strength evaluation method of locomotive traction device[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2025, 48(3): 66-72.
- [6] 米立柱,封全保,李强.HXD2机车牵引装置结构及其强度研究[J].机车电传动,2010(4):5-6.  
MI L Z, FENG Q B, LI Q. Study on structure and strength of HXD2 locomotive traction device[J]. Electric Drive for Locomotives, 2010(4): 5-6.
- [7] 马呈祥,龙健,张林杰,等.HXD2机车转向架拉杆座角焊缝疲劳失效机理[J].焊接,2022(7):40-47.  
MA C X, LONG J, ZHANG L J, et al. Fatigue failure

- mechanism of fillet weld in tie rod seat of HXD2 locomotive bogie[J]. *Welding & Joining*, 2022(7): 40-47.
- [8] 王伟, 郑建科, 燕春光, 等. 基于有限元分析的地铁构架牵引拉杆座模型优化设计[J]. *机车电传动*, 2020(2): 140-143.  
WANG W, ZHENG J K, YAN C G, et al. Model optimization design of traction pull rod of subway structure based on finite element analysis[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2020(2): 140-143.
- [9] PAZHANI A, VENKATRAMAN M, ANTHONY XAVIOR M, et al. Synthesis and characterisation of graphene-reinforced AA 2014 MMC using squeeze casting method for lightweight aerospace structural applications[J]. *Materials & Design*, 230: 111990.
- [10] LIU Y X, ZHOU W B, HUA L, et al. Investigation of the microstructure evolution and mechanical properties of cast Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy during ultra-high pressure heat treatment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 912: 146967.
- [11] MORSY M A, KHAFAGY S, MOSA E S. Failure analysis of the semi-permanent coupler used in metro rail[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 611(1): 012028.
- [12] 黄志超, 丁阳喜, 唐晓红, 等. 球墨铸铁凸轮轴激光表面改性处理的试验研究[J]. *华东交通大学学报*, 2002, 19(1): 39-41.  
HUANG Z C, DING Y X, TANG X H, et al. Study on laser surface hardening camshaft of cast nodular-iron[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2002, 19(1): 39-41.
- [13] 马俊成, 李向平, 孙亚晓, 等. 轨道交通用大型铝合金齿轮箱铸件的研制[J]. *金属加工(热加工)*, 2024(10): 1-5.  
MA J C, LI X P, SUN Y X, et al. Development of a large aluminum alloy gearbox casting for rail transit[J]. *MW Metal Forming*, 2024(10): 1-5.
- [14] 闫华东, 宫维佳, 靳慧. 铸造缺陷对铸钢节点钢结构力学性能的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(2): 343-349.  
YAN H D, GONG W J, JIN H. Effect of casting defects on mechanical properties of steel structures with cast steel joints[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(2): 343-349.
- [15] 李立新, 李增民, 谭建波. 消失模圆柱面桥梁支座的生产控制[J]. *铸造技术*, 2010, 31(2): 214-215.  
LI L X, LI Z M, TAN J B. Operation and control measures for cylindrical surface bridge bearing produced by lost foam casting[J]. *Foundry Technology*, 2010, 31(2): 214-215.
- [16] HALDIMANN-STURM S C, NUSSBAUMER A. Fatigue design of cast steel nodes in tubular bridge structures[J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(3): 528-537.
- [17] 许章华, 谢志雄, 康茂东, 等. K4169高温合金铸件铸造缺陷修复及疲劳性能研究[J]. *材料导报*, 2021, 35(22): 22115-22120.  
XU Z H, XIE Z X, KANG M D, et al. Study of casting defect repair and fatigue performance of K4169 superalloy casting[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(22): 22115-22120.
- [18] 王家鑫, 陈凤艳, 樊强, 等. 转向架构架用铸件缺陷焊接修复技术研究[J]. *焊接技术*, 2019, 48(2): 101-102.  
WANG J X, CHEN F Y, FAN Q, et al. Study on welding repair technology of casting defects for bogie frame[J]. *Welding Technology*, 2019, 48(2): 101-102.
- [19] 王超, 朱涛, 肖守讷, 等. 铸造E级钢CT试样疲劳裂纹扩展试验与仿真分析[J]. *机械强度*, 2021, 43(2): 281-286.  
WANG C, ZHU T, XIAO S, et al. Fatigue crack propagation test and simulation analysis of cast E-grade steel CT specimen[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2021, 43(2): 281-286.
- [20] DUAN C F, YANG S L, LIU H B, et al. Formation and fatigue property of MIG welded high-speed train 6005A-T6 aluminum alloy[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(5): 056532.
- [21] LINDSAY J, BURNETT T L, GOULDEN J, et al. Developments in large volume 3D analysis via P-FIB: EBSD & EDS[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2017, 23(S1): 284-285.



通信作者: 朱涛(1984—), 男, 研究员, 博士生导师, 国家级人才计划入选者, 四川省自然科学基金创新群体负责人, 研究方向为车辆结构剩余寿命评估方法与延寿技术。

E-mail: zhutao034@swjtu.edu.cn.

(责任编辑: 吴海燕)