



天线轨道接头形式对接触疲劳力学性能的影响

殷睿华¹, 杨再瞰¹, 兰惠清^{1*}, 王惠^{2,3}

1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044

2. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011

3. 新疆射电天体物理重点实验室, 乌鲁木齐 830011

*联系人, E-mail: hqlan@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-10-19; 接受日期: 2026-01-07; 网络出版日期: 2026-05-09

国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203601)、西部之光-西部交叉团队重点实验室专项(编号: xbzg-zdsys-202320)、新疆维吾尔自治区天山英才培养计划(编号: 2023TSYCCX0105)资助项目

摘要 针对大型射电望远镜天线轮轨接触损伤(尤其是接触疲劳)问题, 本文以新疆奇台13 m实验天线轨道为对象, 结合仿真与试验重点研究了焊接和拼接两种连接方式对其轮轨接触疲劳力学性能的影响. 本文主要通过开展疲劳试验、单轴拉伸试验和冲击试验获得轨道焊接区的材料特性和材料参数, 并通过有限元仿真研究滚轮轴重、轮轨摩擦系数、轨缝对接力学性能和疲劳寿命的影响. 相关研究为研究天线轨道焊接区的疲劳力学性能、减少轮轨焊接区的损伤及QTT 110 m天线轮轨系统的设计维护提供了理论支持.

关键词 轮轨接触, 力学性能, 疲劳试验, 冲击试验, 有限元仿真

PACS: 02.60.Cb, 95.55.Jz, 02.70.Dh, 46.70.-p

1 引言

大型轮轨式天线方位轨道安装方式一般分为两种: 分段拼接式与整体焊接式^[1]. 对于分段拼接式轨道, 拼接接头大多采用螺栓连接, 相比于焊接接头, 由于拼接轨缝的存在, 使得强度与刚度相对较低, 而焊接接头采用与母材力学性能相近的焊材, 故力学性能得到保证, 但焊接成本较高. 此外, 拼接接头可能存在轮轨冲击, 而焊接接头能很好地避免轮轨间冲击, 但焊后残余应力与残余变形是需攻克的难题. 随着焊接工艺的逐

渐成熟, 能够最大程度地减少焊接残余应力与残余变形, 使焊接式轨道能广泛用于大口径、高精度的轮轨式射电天线中. 对于小口径且精度要求不高的射电天线, 更适合选择造价低、安装难度小的拼接式轨道^[2,3].

在天线轨道接触力学研究方面, Antebi和Kan^[4]针对墨西哥50 m天线轮轨系统, 结合有限元仿真与力学试验测试, 揭示了焊接工艺对轨道精度的关键作用; 顾健星^[5]在佘山25 m天线研究中发现轨道拼接接头处的大变形会显著降低天线指向精度; 郭洪伟^[6]基于Hertz接触理论与有限元分析, 阐明了某雷达天线滚轮

引用格式: 殷睿华, 杨再瞰, 兰惠清, 等. 天线轨道接头形式对接触疲劳力学性能的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 299510

Yin R-H, Yang Z-T, Lan H-Q, et al. Influence of track joint types on contact fatigue mechanical performance for antenna (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 299510, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0467

表面裂纹的成因; 孟晋乐^[7]则运用接触余能原理与有限元模型, 解析了密云50 m天线轮轨的接触应力与变形, 并通过现场测试验证了模型可靠性; 王松根^[1]基于非Hertz接触理论建立密云天线轮轨模型, 仿真揭示了接触形变与滑移规律, 并指出轨道接缝角度、温度等外部因素对力学性能的影响. 此外, Arslan和Kaya-başı^[8]发现轮轨接触中钢轨易出现大塑性变形; Kuminnek和Aniołek^[9]证实网格划分与材料参数对接触应力敏感性显著; Tian等人^[10]进一步揭示接触压力增大会使接触斑由正多边形演变为不规则多边形, 轨道等效应力与弹性变形呈先骤降后缓升的趋势, Yin等人^[11]则是研究了热力耦合作用.

铁路轮轨方面的理论较为成熟, 可借鉴大量的疲劳接触力学研究经验. 在接触理论方面, Dugdale提出条形塑性区简化模型, 而Barenblatt则从微观吸附力角度建立裂纹尖端力学模型, 两者存在理论关联性^[12]; Ishida和Abe^[13]利用轮轨滚动试验机进行了滚动接触疲劳裂纹萌生实验, 分析了载荷的变化对疲劳裂纹萌生的影响; Chen和Ishida^[14]通过双盘试验机开展疲劳试验以研究轮轨表面粗糙度对滚动接触疲劳裂纹萌生的影响; Johnson^[15]基于Hertz理论以安定图的形式揭示了循环载荷作用下的材料中最大接触压力、循环剪切强度与牵引系数的关系; Burstow^[16]考虑了磨耗与滚动接触疲劳的关系, 建立了损伤函数模型, 形成从萌生到扩展的完整研究体系. 同时, 轨道疲劳寿命的预测同样也有许多学者进行了有价值的研究. Bannantine等人^[17]采用材料最大剪切应变幅计算疲劳寿命; Dang等人^[18]基于Fatemi-Socie模型提出了一种适用于弹性安定状态下高周疲劳的剪应力的多轴疲劳破坏准则; Morrow^[19]从能量的角度提出了一种疲劳裂纹萌生寿命预测模型; Smith等人^[20]提出了广泛用于I型疲劳裂纹萌生和扩展的考虑多轴加载中受平均应力影响的能量密度模型; Kapoor^[21]提出了一个能准确预测棘轮效应下的疲劳裂纹萌生寿命的经验模型; 上述理论已被广泛应用^[22-24].

本文通过实验和仿真, 对拼接和焊接两种接头形式的接触力学性能展开深入研究, 探究接头形式对天线轮轨接触疲劳损伤的影响, 为射电天线长期高效率的运营提供技术支持与理论参考. 由于天线轨道焊接试验件的稀缺性, 本研究采用了较少的试验件.

2 试验

2.1 试验试件和仪器

疲劳和拉伸试样取自13 m天线轨道焊接区(图1). 图2是焊接区的正视图和俯视图, 由于轨道焊接段热影响区和焊缝区尺寸小, 无法仅对热影响区和焊缝区进行疲劳试验, 故决定对焊接段整体进行取样. 试件平行段宽度为20 mm, 由于取样过程中尽可能多地获得测试件以减少误差, 考虑到几何尺寸关系, 采用该尺寸下最小的厚度, 即2 mm的板状试样. 疲劳试样设计采用标准GB/T 3075-2021^[25].

针对S-N曲线绘制的疲劳测试, 使用了ZWICK Amsler 250HFP 5100高频疲劳试验机(图3), 采用纵向拉伸对称循环应力(应力比 $R = -1$)的加载方式. 室温下高频疲劳试验机加载基频为 123 ± 1 Hz, 试验后记录试样破坏时的应力幅值以及对应的疲劳寿命, 方便后续进行数据处理和绘制S-N曲线.

从试件中随机抽取三个试样A1, A2和A3进行静载拉伸试验. Ramberg-Osgood (R-O)本构方程考虑到材料在拉伸过程中的应变硬化效应, 描述了试样变形过程中应力、应变和应变硬化指数的关系, 未考虑温度相关的环境因素, 具体拟合过程可参考文献^[3,26]. 本次静载拉伸试样中的试验温度为室温, 因此可选取R-O本构方程对A1, A2和A3三个试样的拉伸本构关系



图1 焊接区
Figure 1 Weld zone.

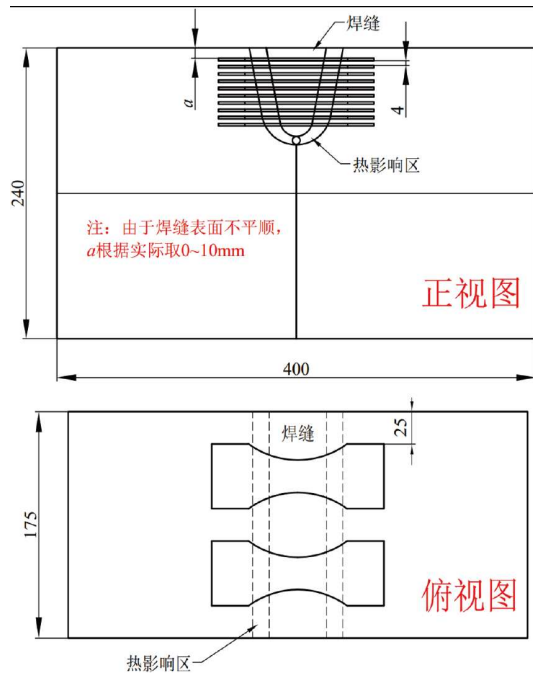


图 2 疲劳试样取样
Figure 2 Fatigue sample sampling.



图 3 单轴疲劳与拉伸加载试验机
Figure 3 Uniaxial fatigue and tensile loading testing machine.

进行拟合. R-O本构方程表达式为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n, \quad (1)$$

其中, E 是弹性模量, σ_0 是常规弹性极限, ε_0 是与弹性极限对应的残余应变, n 是应变硬化指数.

冲击试验采用标准GB/T 229-2020金属材料夏比摆锤冲击实验方法^[27], 试样制备如图4所示. 试样形式为V型缺口试样, 共测试15个试样.

2.2 试验结果分析

试样A1-A3拉伸力-位移曲线特征量如表1所示,



图 4 夏比摆锤冲击试样设计(mm, 15个)
Figure 4 Charpy pendulum impact sample design (mm, 15 pieces).

表 1 试样A1-A3拉伸力-位移曲线特征量

Table 1 Parameters of tensile force-displacement curve of samples A1-A3

试样编号	屈服力(kN)	屈服位移(mm)	最大拉伸力(kN)	最大拉伸位移(mm)
A1	36	0.314	52	1.787
A2	27	0.293	37	2.249
A3	<30	≤0.265	40-50	0.997

拉伸曲线如图5所示, 本构拟合结果如图6所示.

对A1-A3三个试样的拉伸本构关系进行拟合. 结合表1以及图6(b)进行计算可得出R-O本构方程:

$$\begin{aligned} (A1) \quad \varepsilon &= \frac{\sigma}{246667} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{912} \right)^{6.83}, \\ (A2) \quad \varepsilon &= \frac{\sigma}{233333} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{670} \right)^{11.26}, \\ (A3) \quad \varepsilon &= \frac{\sigma}{200000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{820} \right)^{5.5}. \end{aligned} \quad (2)$$

可见, 试样本构曲线的差别主要体现在试样的塑性变形阶段, 三个试样的抗拉强度有明显不同, 表现为 $A1 > A3 > A2$. 结合图2可知, 这是母材、热影响区、焊缝在力学性能上的显著差异导致的. 由于该差异无法进行单一深入的分析, 根据试样A1-A3的力学本构曲线近似推断出母材、热影响区以及焊缝的力学性能参数, 包括弹性模量与屈服应力, 用于有限元模型以及焊缝疲劳试验.

结合图5中关于试样A1-A3的名义应力-应变试验曲线, 取合适的载荷水平对剩余试样进行单轴疲劳试验, 表2是各试样试验结果整理. 选取有效的疲劳试样数据, 取对数疲劳寿命与对数应力水平进行线性拟合. 图7是双对数坐标系中S-N曲线拟合结果与参数分析.

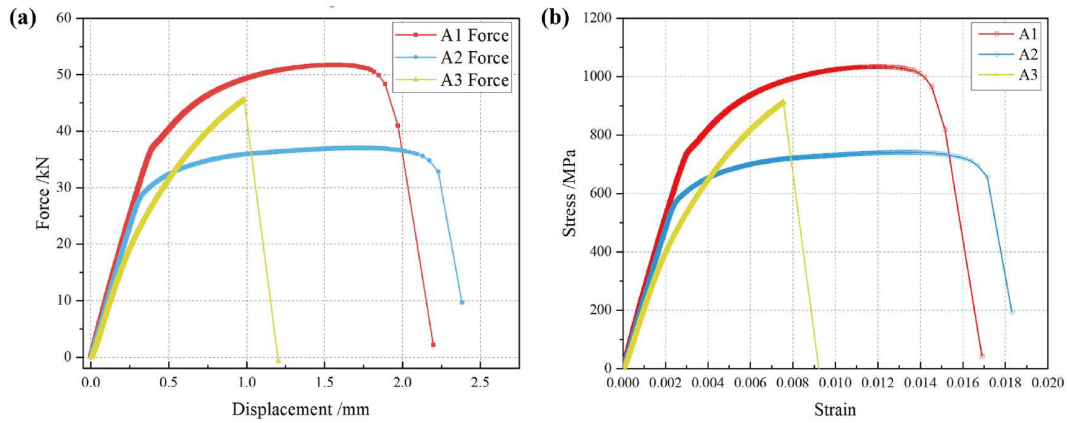


图 5 试样的(a)拉伸力-位移曲线和(b)名义应力-应变曲线

Figure 5 Tensile force-displacement curve (a) and nominal stress-strain curves (b) of samples.

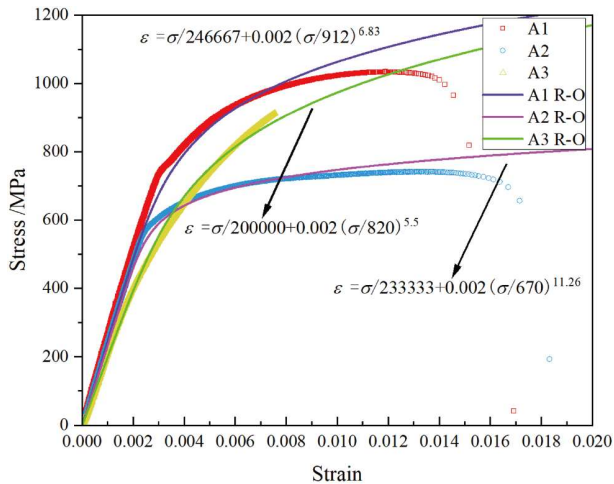


图 6 试验数据与拟合曲线对比

Figure 6 Comparison between test data and fitted curves.

图中 $S-N$ 曲线走向体现了轨道焊接区材料在中寿命区内所受疲劳应力-疲劳寿命的关系。 $S-N$ 曲线修正拟合度指数高达95.68%，可见曲线拟合度良好。根据疲劳 $S-N$ 方程(5)和图7中的拟合结果，可得 $S-N$ 曲线公式(4)：

$$\lg S = \frac{\lg C - \lg N}{m}, \quad (3)$$

$$NS^{5.35} = 6 \times 10^{18}, \quad (4)$$

其中， $a=\lg C$ ， $b=-m$ ，均为材料参数。

将 $S-N$ 曲线与表2试验数据相结合，如图8所示， $S-N$ 曲线对应的寿命区从 10^5 次开始，到 10^7 次结束。可见 $S-N$ 拟合曲线与试验数据点吻合良好，式(4)可作为天线轨道焊接区材料在中高周寿命区的应力疲劳寿命模

表 2 疲劳试验结果整理

Table 2 Fatigue test results collation

样品编号	样品幅值 (MPa)	疲劳寿命(次)	疲劳对数寿命(次)	对数应力幅值(MPa)
1	600	5172	3.713658516	2.77815125
2	540	14000	4.146128036	2.73239376
3	450	32305	4.509269745	2.653212514
4	450	45070	4.653887558	2.653212514
5	390	163818	5.214361619	2.591064607
6	330	166989	5.222687864	2.51851394
7	330	195615	5.291402154	2.51851394
8	270	608068	5.783952149	2.431363764
9	270	998363	5.999288477	2.431363764
10	270	1182258	6.072712261	2.431363764
11	210	1459292	6.164142202	2.322219295
12	210	1592926	6.202195601	2.322219295
13	210	1121176	6.049673793	2.322219295
14	150	10000000	7	2.176091259

型。曲线在 $N = 10^7$ 次对应的疲劳应力为160 MPa。试样能承受的疲劳载荷超过试样的屈服极限并接近试样的抗拉强度时，恰好对应于试样的均匀塑性变形阶段，这时的疲劳寿命通常在 10^5 次以内，试样进入低周疲劳阶段。在多次较高的疲劳载荷作用下试样最终产生局部塑性变形，即疲劳裂纹的萌生和扩展。

图9是室温下各试样冲击力-位移曲线。图9(a)所示，1-3号试样在冲击后的弹性阶段变化吻合度较高，弹性阶段终点对应的力约为15 kN，对应位移约为0.5 mm。在塑性变形阶段略有差别，对应的最大冲击

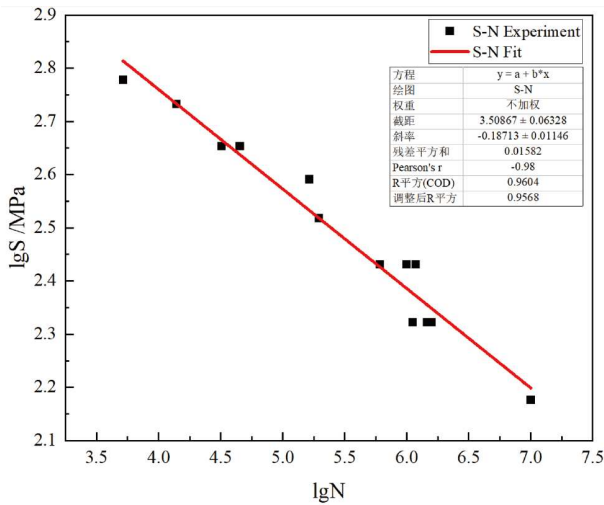


图 7 S-N试验数据与曲线拟合
Figure 7 S-N test data and curve fitting.

力约为21–24 kN, 最大位移约为1.89–2.07 mm.

如图9(b)所示, 6–9号试样在冲击后的弹性阶段变化吻合度较高, 弹性阶段终点对应的力约为15 kN, 对应的位移约为0.5mm. 塑性变形阶段对应的最大冲击力约为25–27 kN, 最大位移约为1.6 mm. 根据各试样在室温下的冲击力-位移曲线进行分析, 表3是室温下各试样对应的冲击特征值.

3 仿真

3.1 仿真模型

滚动接触力学分析流程如图10所示, 基于ABA-

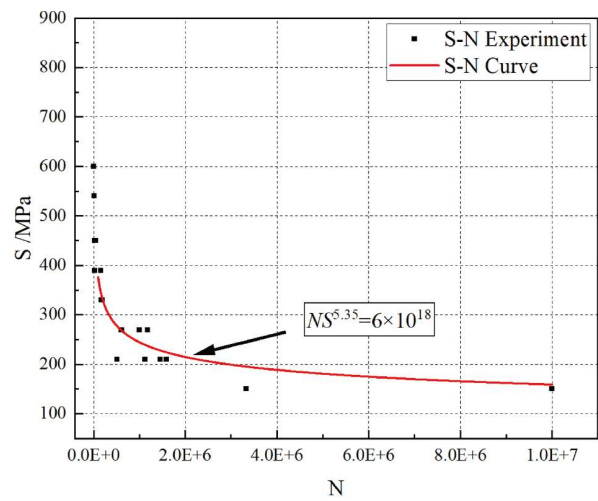


图 8 焊接区S-N拟合曲线与试验点
Figure 8 S-N fitting curve and test point in the welding zone.

QUS, 先改变轴重、摩擦系数和温度等影响因子的值, 进而计算轮轨接触应力场与应变场的变化, 再利用联合分析软件Fe-safe进行疲劳寿命计算.

13 m射电天线方位轨道直径为13 m, 全周长约为41 m, 如图11所示为方位轨道横截面尺寸和拼接部位模型. 由于轨道的结构尺寸很大, 在整段轨道上进行轮轨滚动接触仿真显得过于复杂, 为简化模型, 图12展示了关键部位的网格划分. 取13 m天线轨道的一段建立直线型轨道模型, 轨道长度为1.2 m, 材料模型见表4^[28,29].

在滚动接触仿真中, 载荷为轴向载荷, 方向垂直向下, 滚轮考虑其重力, 切向采用罚函数, 法向采用硬接

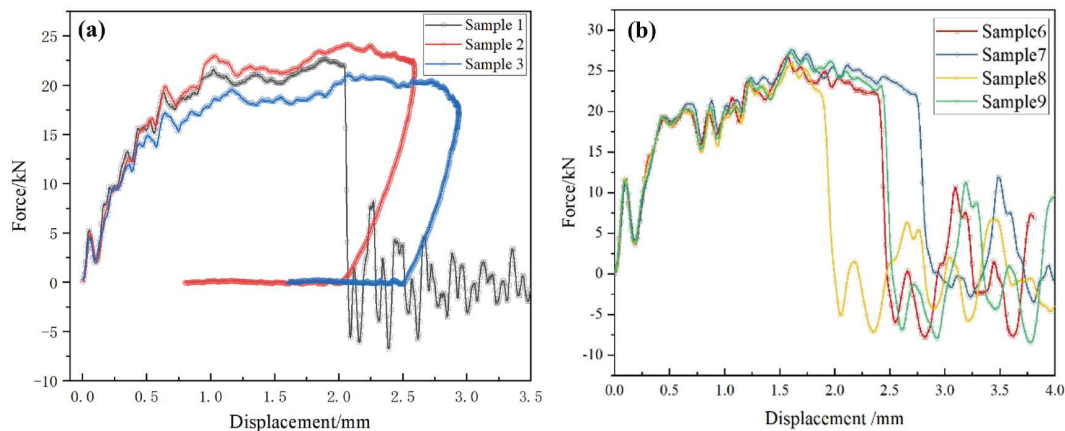


图 9 室温下试样冲击力-位移曲线. (a) 试样1–3号, (b) 试样6–9号
Figure 9 Impact force-displacement curve at normal temperature. (a) Samples 1–3, (b) samples 6–9.

表 3 室温下各试样冲击特征值

Table 3 Impact parameters of each sample at normal temperature

试样	F_{gy} (kN)	S_{gy} (mm)	W_e (J)	F_{max} (kN)	S_{max} (mm)	W_m (J)	W_p (J)
1	15.63	0.427	3.54	22.714	1.888	32.54	4.26
2	15.29	0.442	3.49	24.147	2.059	37.47	7.89
3	15.61	0.602	5.71	21.128	2.074	32.66	14.46
6	15.43	0.354	2.94	26.77	1.560	27.39	19.80
7	15.20	0.358	2.80	27.6	1.601	28.93	35.13
8	15.29	0.358	3.025	25.8	1.601	28.01	7.67
9	15.65	0.358	2.99	27.4	1.612	28.50	20.93

触. 旋转后, 分析步骤为: 首先将滚轮向下移动, 使其与轨道发生过盈接触, 从而在轨道与滚子之间建立牢固的接触. 为此, 将创建静态一般分析步骤, 并将初始时间增量设置为等于总时间. 然后, 构建下一个分析步骤以释放重力, 使轮轨接触自然稳定. 施加重力后, 滚轮会因向下的压力而回弹, 最终在车轮和轨道之间建立稳定的自然接触状态.

对于轮轨材料的疲劳性能参数, 主要分为S-N曲线方程(应力-寿命法)与E-N曲线方程(应变-寿命法)^[30]. 轮轨有限元模型弹性部分材料模型与疲劳性能参数如表5所示, 寿命预测模型采用了Basquin公式以及Manson-Coffin公式. 其中弹性应变与疲劳寿命的关系如下所示:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b, \quad (5)$$

塑性应变与疲劳寿命的关系为

$$\varepsilon_p = \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (6)$$

其中, σ'_f 是疲劳强度系数, b 是疲劳强度指数, ε'_f 是疲劳塑性应变系数, c 是疲劳塑性应变指数.

因此若不考虑平均应力的影响, 结合式(5)和(6)可得应变-寿命法的E-N曲线方程:

$$\varepsilon = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c. \quad (7)$$

Palmgren-Miner理论认为材料在各个应力水平作用下的疲劳损伤是独立的, 并且总损伤可由各应力水平对应损伤线性累加. 当损伤累积达到临界值时, 材料发生疲劳破坏, 假设导致材料发生疲劳破坏的每个应力各不相同, 本文采用了基于损伤累积的失效判据:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (8)$$

其中, n_i 是第*i*个载荷下的循环次数; N_i 是第*i*个载荷作用下试样发生疲劳破坏对应的寿命. n_i 从结构的载荷谱分析中得到, 而 N_i 主要来源于试样的S-N疲劳曲线.

3.2 仿真结果分析

首先, 轨道可能出现由于轴重引起的轮轨滚动接

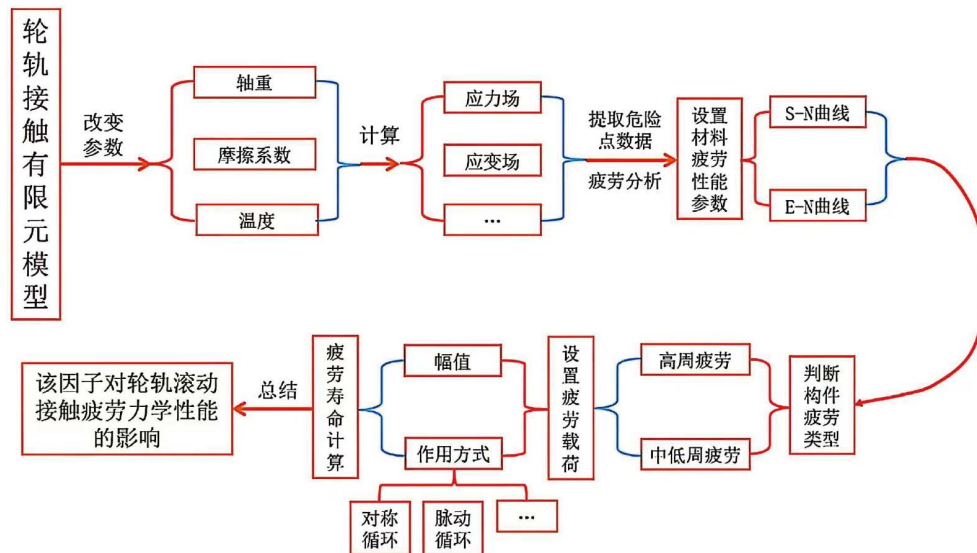


图 10 焊接区接触疲劳力学分析流程

Figure 10 Analysis process of contact fatigue in the welding zone.

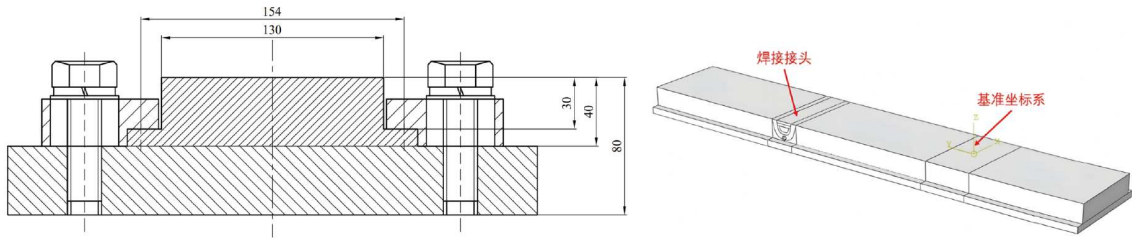


图 11 方位轨道横截面尺寸(mm)
Figure 11 Azimuth track cross-section dimensions (mm).

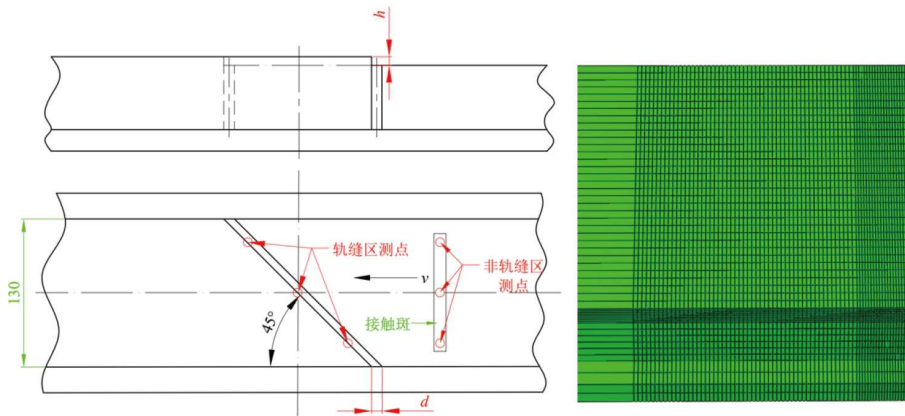


图 12 13 m天线轨道的拼接部位模型和密集网格
Figure 12 Track joint model of 13 m antenna track and mesh.

表 4 轮轨有限元模型材料模型^[28,29]

Table 4 The wheel-rail finite element model ^[28,29]

结构	弹性模量 E (GPa)	泊松比
滚轮/轨道母材区	220	0.28
热影响区	200	
焊缝	215	

表 5 轮轨有限元模型材料疲劳性能参数^[28,29]

Table 5 Fatigue parameters of wheel-rail finite element model ^[28,29]

S-N曲线参数			E-N曲线参数		
a	b	σ_f (MPa)	b	ε_f	c
3.522	-0.187	1166.4	-0.127	0.298	-0.474
3.509					

触疲劳损伤现象; 其次, 摩擦系数的影响也较为显著. 现基于有限元的方法, 通过改变轴重研究其轮轨接触力学响应. 图13为仿真历程, 图13(a)展示了轴重载荷时程变化, 图13(b)展示了仿真过程中载荷与位移的变化. 对于焊接区而言, 图14展示了焊接区Mises应力随轨道深度的变化趋势, 图14(a)–(c)分布展示了母材、

热影响区和焊缝的仿真应力变化结果.

随着轴重增加, 焊接区域的塑性硬化开始时间以及整个过程中产生的塑性应变最大值也不同, 如图15所示. 结合上述仿真分析结果, 提取该部位的应力数据作为疲劳载荷, 按照脉动循环的加载方式进行表面滚动接触疲劳寿命的计算. 表6为轨道不同区域在两种轴重下轮轨接触疲劳寿命内部分布对比. 焊接区接触疲劳寿命变化如图16所示.

在焊接区主要研究摩擦系数对疲劳寿命的影响, 当摩擦系数为0.1和-0.5时, 图17展示了摩擦系数对仿真寿命计算结果的影响. 而在拼接区域主要研究轨缝对疲劳寿命的影响, 图18展示了拼接区的应力变化, 图18(a)给出了Mises应力的变化趋势, 图18(b)给出了接触应力的变化趋势. 图19展示了不同轨道接头对应冲击疲劳寿命.

总的来说, 随着轴重增加, 轨道表面接触疲劳寿命呈指数型衰减. 摩擦系数对疲劳寿命的分布影响不大, 主要是通过改变轮轨接触剪应力来改变接触应力场, 进而对接触疲劳寿命的数值造成微小的影响. 轮轨接

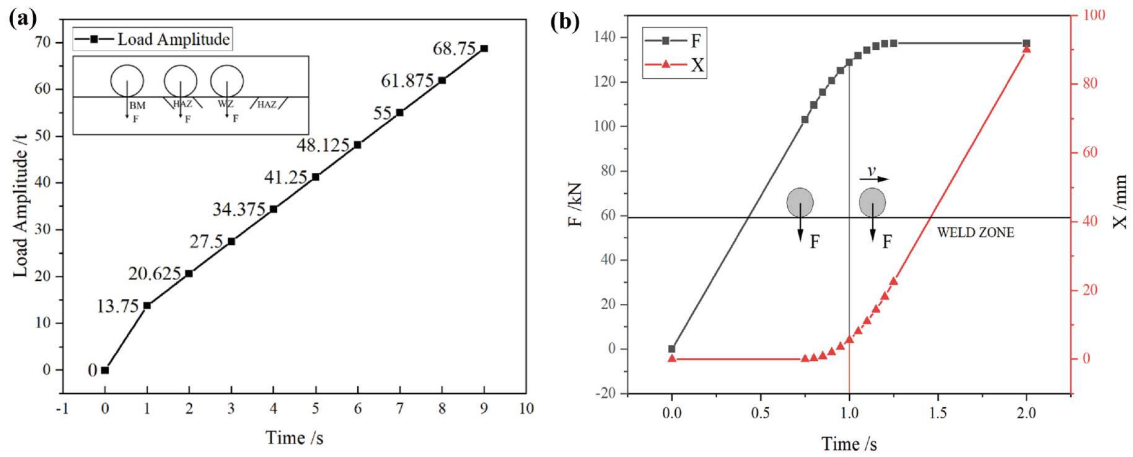


图 13 仿真历程. (a) 轴重载荷时程变化, (b) 载荷与位移的变化

Figure 13 History of simulations. (a) Axle load time history, (b) change of load and displacement.

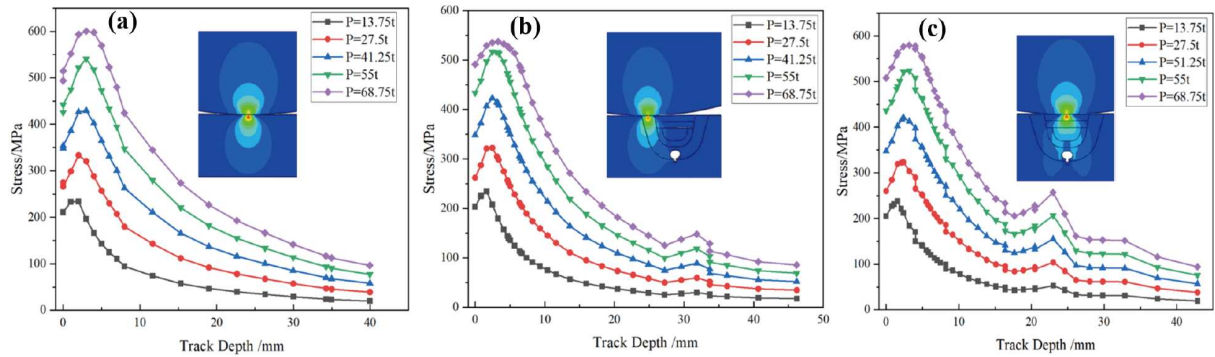


图 14 轨道焊接区Mises应力随轨道深度变化. (a) 母材, (b) 热影响区, (c) 焊缝

Figure 14 Mises stress in the welded region of the track with depths. (a) Base metal (BM), (b) heat-affected zone (HAZ), (c) weld zone (WZ).

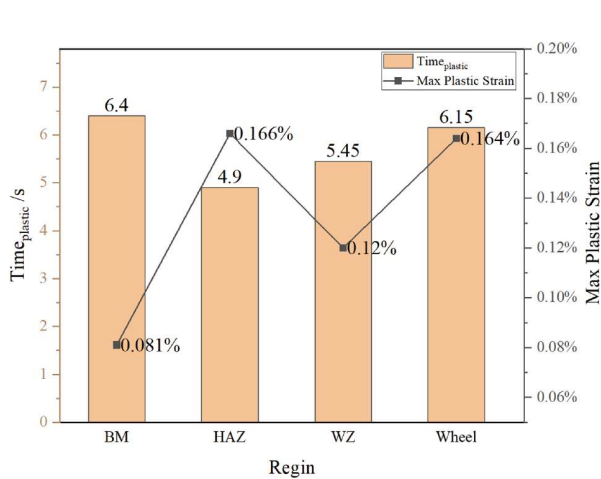


图 15 各区域塑性硬化开始时间与塑性应变最大值

Figure 15 Starting time of plastic hardening and max plastic strain in each region.

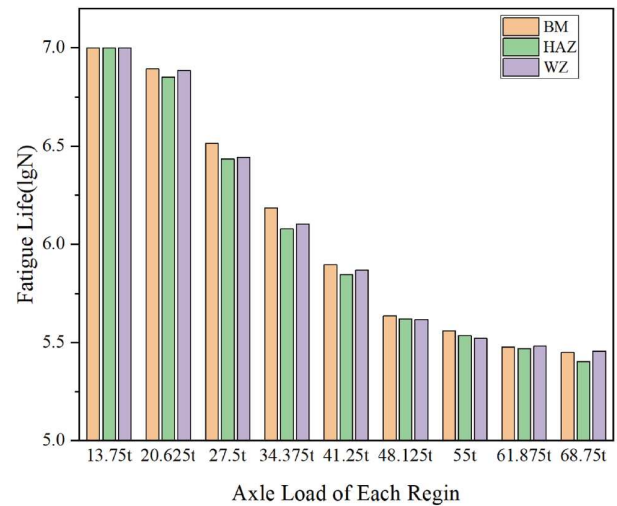


图 16 轨道在不同轴重下对应的接触疲劳寿命

Figure 16 Contact fatigue life of the track at the different axle loads.

表 6 部分轴重下轮轨接触疲劳寿命内部分布
Table 6 Internal distribution of wheel-rail contact fatigue life under partial axle loads

轴重(t)	母材	热影响区	焊缝
27.5			
68.75			

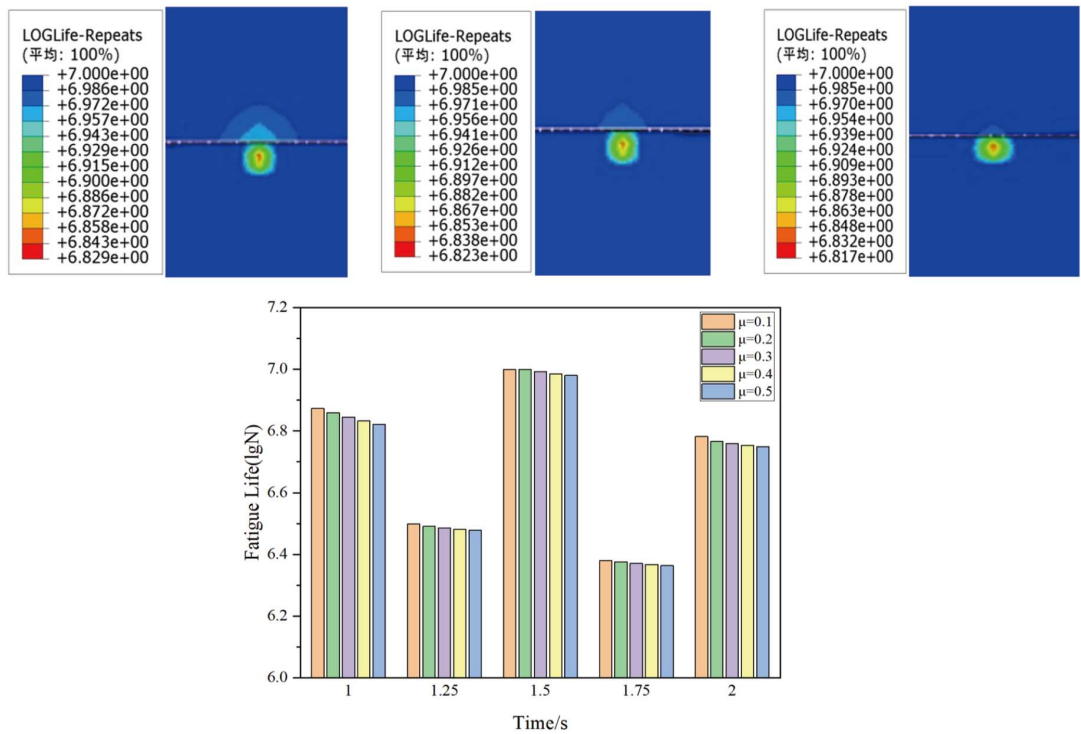


图 17 不同接触疲劳载荷对应的寿命计算结果
Figure 17 Life calculation results at the different contact fatigue loads.

触疲劳寿命在轮轨接触边缘的次表面较低。在轮轨接触应力作用下，轮轨接触边缘轨道次表面(约2 mm)易产生疲劳裂纹。跟常规工作载荷相比，冲击载荷造成的危害更大，轨缝高度差对冲击疲劳寿命的影响较大。当存在轨缝高度差时，冲击疲劳寿命不会超过10万次，即使轨缝高度差为0时，与焊缝的冲击疲劳寿命相比，

也相差较大。

4 结论

(1) 轨道焊接区域最大Mises应力及其所在位置不同，是由各区域之间组织力学性能的差异导致的。热影

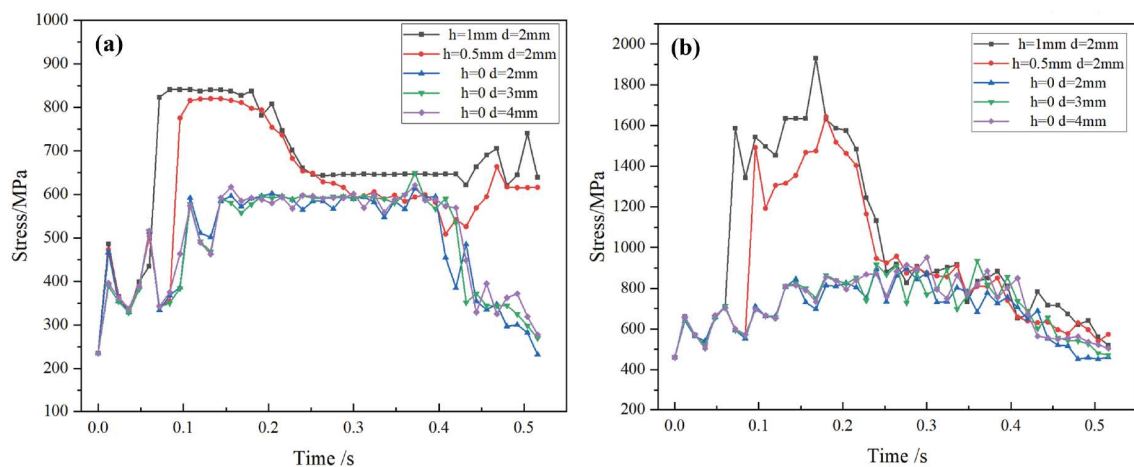


图 18 轮轨应力随轨缝几何参数的变化. (a) 最大Mises应力, (b) 最大接触应力

Figure 18 Stress with different geometric parameters of track splice. (a) Max Mises stress, (b) max contact stress.

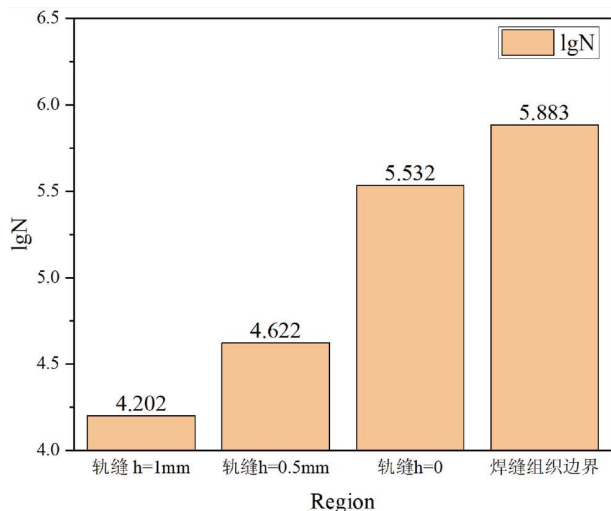


图 19 不同轨道接头对应冲击疲劳寿命

Figure 19 Impact fatigue life of different track joint.

响区和焊缝的Mises应力随轨道深度变化的曲线不如母材区光滑, 在靠近残余应力消除工艺孔时会有一定

起伏. 在弹性接触后, 通过对比发现, 随着轴重的增加, 热影响区最快进入塑性硬化阶段, 同时产生的塑性应变最大. 随着滚轮滚动, 塑性应变将会保留, 轮轨将会产生一定的塑性变形.

(2) 同一载荷工况下, 滚轮和轨道的接触疲劳寿命在表面分布相似, 接触边缘处的疲劳寿命较低, 更容易发生疲劳破坏. 随着轴重增加, 最小疲劳寿命区由接触两端开始向中心扩展. 当轴重达到68.75 t时, 接触疲劳寿命分布已近似于接触斑的分布. 热影响区与焊缝表面接触疲劳寿命分布同理. 此外, 摩擦系数的变化对疲劳寿命的分布影响不大.

(3) 由于轨道在拼接轨缝处的接触刚度较低, 滚轮逐渐接近轨缝的过程中, Mises屈服应力与接触压力逐渐增大. 当轨缝间存在高度差时, 滚轮刚接触轨缝瞬间产生的冲击使得Mises应力与最大接触压力瞬间提高. 这将对轮轨造成较大程度的破坏, 进而显著影响冲击接触疲劳寿命.

致谢 感谢中国电子科技集团公司第三十九研究所提供的天线轨道焊件.

参考文献

- 1 Wang S G. The Analysis and Experiment on Wheel-Rail Contact of Radio Telescope (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014 [王松根. 大型射电天线轮轨接触分析与实验. 硕士学位论文. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014]
- 2 Jin W, Wang M, Zhang J Y, et al. Adjustment and analysis of the 40 m antenna surface (in Chinese). Astron Res Tech, 2006, 3: 401–407 [金旺, 汪敏, 张巨勇, 等. 40 m天线面板调试与精度分析. 天文研究与技术(国家天文台台刊), 2006, 3: 401–407]
- 3 Chen X, Yin R, Yang Z, et al. A study on the mechanical characteristics and wheel-rail contact simulation of a welded joint for a large radio

- telescope azimuth track. *Buildings*, 2024, 14: 1300
- 4 Antebi J, Kan F W. Precision continuous high-strength azimuth track for large telescopes. *Proc SPIE*, 2002, 4840: 612–623
 - 5 Gu J X. Study on the impact of the Sheshan 25 m antenna rail problem on pointing error (in Chinese). *Ann Shanghai Obs Acad Sin*, 1994, 15: 205–211 [顾健星. 佘山25米天线导轨问题对指向误差影响的研究. 中国科学院上海天文台年刊, 1994, 15: 205–211]
 - 6 Guo H W. Analysis of surface crack on wheel of a rail type pedestal of radar (in Chinese). In: *Proceedings of the Electronic Machinery and Microwave Technology Academic Conference (EMMTAC)*. Nanchang, 2008. 270–272 [郭洪伟. 某雷达轮轨式天线座滚轮表面裂纹分析. 见: 中国电子学会2008年电子机械、微波结构工艺学术会议. 南昌, 2008. 270–272]
 - 7 Meng J L. The Contact Mechanism Analysis of Wheel-Rail Used in Large Radio Antenna (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013 [孟晋乐. 大型射电天线轮轨接触力学分析. 硕士学位论文. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013]
 - 8 Arslan M A, Kayabaşı O. 3-D rail-wheel contact analysis using FEA. *Adv Eng Software*, 2012, 45: 325–331
 - 9 Kuminek T, Aniolek K. Methodology and verification of calculations for contact stresses in a wheel-rail system. *Veh Syst Dyn*, 2014, 52: 111–124
 - 10 Tian J H, Jing G Q, Lu X X, et al. The rolling contact research of three dimensional wheel-rail based on finite element analysis. *IOP Conf Ser-Mater Sci Eng*, 2019, 657: 012072
 - 11 Yin R, Lan H, Xu Q. Thermomechanical analysis in wheel-rail contact at the heat-affected zone for large radio telescope tracks. *J Therm Stress*, 2025, 48: 1189–1208
 - 12 Cheng J, Zhao S S. *Fracture Mechanics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006 [程靳, 赵树山. 断裂力学. 北京: 科学出版社, 2006]
 - 13 Ishida M, Abe N. Experimental study on rolling contact fatigue from the aspect of residual stress. *Wear*, 1996, 191: 65–71
 - 14 Chen H, Ishida M. Influence of rail surface roughness formed by rail grinding on rolling contact fatigue. *Q Rep Railw Tech Res Inst*, 2006, 47: 216–221
 - 15 Johnson K L. *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985
 - 16 Burstow M C. Whole Life Rail Model Application and Development for RSSB, Continued Development of an RCF Damage Parameter. Technical Report. London: Rail Safety and Standards Board, 2004
 - 17 Bannantine J A, Comer J J, Handrock J L. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. New Jersey: Prentice-Hall Incorporated, 1990
 - 18 Dang V K, Cailletaud G, Flavenot B F, et al. *Biaxial and Multiaxial Fatigue*. London: Mechanical Engineering Publications, 1989. 459–478
 - 19 Morrow J D. *International Friction, Damping and Cyclic Plasticity*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1965. 45–87
 - 20 Smith K N, Watson P, Topper T H. A stress-strain function for the fatigue of metals. *J Mater Sci*, 1970, 5: 767–778
 - 21 Kapoor A. A re-evaluation of the life to rupture of ductile metals by cyclic plastic strain. *Fatigue Fract Eng Mat Struct*, 1994, 17: 201–219
 - 22 Reis T, Lima E A, Bertelli F, et al. Progression of plastic strain on heavy-haul railway rail under random pure rolling and its influence on crack initiation. *Adv Eng Software*, 2018, 124: 10–21
 - 23 Li Y, Chen J, Wang J, et al. Study on the effect of residual stresses on fatigue crack initiation in rails. *Int J Fatigue*, 2020, 139: 105750
 - 24 Lai H. Analysis on rolling contact fatigue of heavy haul rail U78CrV considering ratcheting behavior (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019 [赖涵. 考虑棘轮效应的U78CrV重载钢轨滚动接触疲劳分析. 硕士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2019]
 - 25 State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 3075-2021 *Metallic Materials—Fatigue Testing—Axial Force-Controlled Method* (in Chinese). 2022-03-01 [国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 3075-2021金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法. 2022-03-01]
 - 26 Chen X. Study on Rolling Contact Mechanical Properties of Welded Joints of Large Radio Antenna Track (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023 [陈晓. 大型射电天线轨道焊接接头滚动接触力学特性研究. 硕士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2023]
 - 27 State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 229-2020 *Metallic Materials—Charpy Pendulum Impact Test Method* (in Chinese). 2021-04-01 [国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 229-2020金属材料 夏比摆锤冲击试验方法. 2021-04-01]
 - 28 Sun Y J. Study of Damage Evolution for 304 Stainless Steel and 42CrMo Steel under Ratchetting-Fatigue Interaction (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 [孙轶君. 304不锈钢和42CrMo钢在棘轮-疲劳交互作用下的损伤演化研究. 硕士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2017]

- 29 Wang W. Study on the Evolution Behavior of Fatigue Short Cracks and Fatigue Life Prediction in 42CrMo Steel (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Jinan: Shandong University, 2008 [王潍. 42CrMo钢疲劳短裂纹演化行为及疲劳寿命预测的研究. 博士学位论文. 济南: 山东大学, 2008]
- 30 Yang D W. Study on Rolling Contact Behavior and Fatigue Life of CRH5 Type EMU (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017 [杨大巍. CRH5型动车组轮轨滚动接触行为及疲劳寿命研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州理工大学, 2017]

Influence of track joint types on contact fatigue mechanical performance for antenna

YIN Rui-Hua¹, YANG Zai-Tun¹, LAN Hui-Qing^{1*} & WANG Hui^{2,3}

¹ School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

² Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

³ Xinjiang Key Laboratory of Radio Astrophysics, Urumqi 830011, China

*Corresponding author (email: hqlan@bjtu.edu.cn)

Aiming to the contact damage (especially contact fatigue) between the rail and wheel for large radio telescope antennas, this article takes the 13-m experimental antenna track in Qitai, Xinjiang, as the object of study. By combining simulations and experiments, the study focuses on the contact fatigue mechanical performance of the wheel-rail connection in the welded and joint region. The article primarily obtains the material properties and parameters of the track welding zone through fatigue tests, uniaxial tensile tests, and impact tests. Additionally, finite element simulations are conducted to explore the influence of roller axle weight, wheel-rail friction coefficient, and track splice on the contact mechanical performance and fatigue life, with comparisons to measured data. This research will provide theoretical support for studying the fatigue mechanical properties of the welded area, reducing damage in the wheel-rail welded region, and the design and maintenance of the QTT 110 m antenna wheel-rail system.

wheel-rail contact, mechanical performance, fatigue testing, impact testing, finite element simulation

PACS: 02.60.Cb, 95.55.Jz, 02.70.Dh, 46.70.-p

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0467](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0467)