

12 号合金钢组合辙叉单开道岔疲劳裂纹萌生寿命预测

刘 启 宾

(中铁第一勘察设计院集团有限公司,西安 710043)

摘 要:基于有限元分析软件建立 12 号合金钢组合辙叉单开道岔静、动力学分析模型;基于列车直、侧向过岔的动力仿真结果,确定岔区钢轨疲劳敏感区域,并提取敏感区域疲劳荷载谱;采用静力分析模型研究单位荷载下各敏感区域钢轨内部应力分布情况;基于 Miner 线性累积法则对岔区钢轨疲劳裂纹萌生寿命进行预测;研究列车轴重、速度对钢轨裂纹萌生寿命的影响;给出不同轴重、不同速度列车通过时岔区钢轨疲劳敏感区域裂纹萌生寿命的预测公式.结果表明:道岔不同敏感区域钢轨的疲劳裂纹萌生寿命相差很大,列车轴重及侧向通过速度对钢轨的疲劳裂纹萌生寿命有很大影响,疲劳裂纹萌生寿命随列车轴重的增加而大幅降低,随列车侧向通过速度的增加也有所降低.
关键词:铁路轨道;合金钢单开道岔;组合辙叉;疲劳裂纹;萌生寿命;Miner 线性累积法则
中图分类号:U213.6;U211.5 **文献标志码:**A

Prediction of rail fatigue crack initiation life of No.12 alloy steel single turnout with combined frog

LIU Qibin

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co.,Ltd., Xi'an 710043,China)

Abstract: The static and dynamic analysis models of No.12 alloy steel single turnout with combined frog are established based on finite element analysis software. The fatigue sensitive areas of turnout rail are located by the dynamic simulation results of the dynamic model when the train is passing through the turnout in a straight or branch line, the load spectrums of each sensitive area are extracted for fatigue analysis. The internal stress of rails in each sensitive area under unit load are researched by the static model. The fatigue crack initiation lives of rails in sensitive areas are predicted based on Miner linear cumulative rule. The effects of axle-weight and vehicle speed on the fatigue crack initiation lives of rails are studied. A prediction formula of fatigue crack initiation lives of rails in sensitive areas under different axle loads and vehicle speeds is given. The results show that the fatigue crack initiation lives of rails in different sensitive areas of turnout varies greatly, and axle-weight and vehicle speed when the train is passing through the turnout in the branch line have great effects on the fatigue crack initiation lives of rails. The fatigue crack in

收稿日期:2016-12-29
基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划重大课题(Z2015—G002)
Foundation item: Science and Technology Research and Development Major Program of China Railway Corporation(Z2015—G002)
第一作者:刘启宾(1987—),男,河南新乡人,工程师,硕士.研究方向为铁路轨道结构.email:869683915@qq.com.
引用格式:刘启宾. 12 号合金钢组合辙叉单开道岔疲劳裂纹萌生寿命预测[J].北京交通大学学报, 2017, 41(6): 130—135.
LIU Qibin. Prediction of rail fatigue crack initiation life of No.12 alloy steel single turnout with combined frog[J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(6): 130—135.(in Chinese)

itation life decreases significantly with the increase of axle-weight, and it also decreases with the vehicle speed when the train is passing through the turnout in the branch line.

Keywords: railway track; alloy steel single turnout; combined frog; fatigue crack; initiation life; Miner linear cumulative rule

合金钢组合辙叉单开道岔服役过程中岔区钢轨常出现鱼鳞裂纹和玻璃掉块等疲劳病害^[1-2],需通过打磨消除钢轨表面疲劳裂纹.疲劳破坏过程可分为裂纹萌生期、扩展期及最终破坏期.裂纹一旦进入扩展期,其扩展迅速,钢轨会在较短的时间内出现疲劳破坏^[3].控制钢轨疲劳破坏的最佳手段是在裂纹扩展进入萌生期末端到扩展期起始阶段采取打磨措施,及时消除疲劳裂纹.目前岔区钢轨的打磨周期没有合理的标准,现场凭经验或疲劳病害发展情况确定,不可避免地会出现打磨不及时、超打磨或欠打磨等现象,消耗大量物力和财力,却效果不佳.

随着铁路运营速度的不断提高、列车轴重的不断增加,钢轨疲劳问题越来越严峻^[4],国内外学者对钢轨疲劳问题进行了系列试验及理论研究.雷晓燕,钟雯,罗慧刚等针对小曲线半径地段钢轨疲劳伤损发展严重的现象进行了疲劳试验^[5-7].邓建辉等从轮轨接触关系及位置的角度对钢轨接触疲劳伤损进行了试验研究^[8].周小林等通过室内三点弯曲试验,对钢轨疲劳裂纹扩展深度及对应的循环次数进行了测试^[9].习年生,王建西,刘学文等基于现场调研及疲劳伤损的统计分析,采用不同的方法对裂纹的开展与线路通过总重之间的关系进行了拟合分析^[10-12].王少锋,刘建锋等采用不同的手段分别建立了钢轨疲劳裂纹萌生寿命预测模型,研究了多种因素对钢轨疲劳寿命的影响规律^[13-14].但是,现有研究手段及方法常依托大量调研或室内试验,工作量大、耗费时间长,却难以满足我国铁路日益复杂的运营养护需求.

本文作者基于 Miner 线性累积法,结合有限元和多体动力学方法,对道岔区钢轨疲劳裂纹的萌生寿命进行预测,为制定合理的道岔区钢轨打磨周期及延长道岔结构的使用寿命提供理论指导,同时,为研究钢轨疲劳裂纹的萌生寿命提供一种新方法.

1 疲劳敏感区域及荷载谱的确定

首先建立车辆-道岔空间耦合动力仿真分析模型,确定岔区的疲劳敏感区域,并提取敏感区域荷载谱.然后对敏感区域钢轨进行静力分析,得到单位荷载作用下钢轨应力的分布情况.最后将钢轨应力分布及荷载谱输入到疲劳分析软件 Nsoft 中,基于 Miner 线性累积法则计算得出敏感区域疲劳裂纹的

萌生寿命.

1.1 仿真分析模型的建立

采用 SIMPACK 多体动力学软件建立了车辆-道岔空间耦合模型,如图 1 和图 2 所示.其中,车辆为 25 t 轴重货车,相关参数根据文献^[15]附表 7 进行取值;钢轨采用 60 kg/m 钢轨;扣件采用弹条Ⅱ型扣件;轮轨接触采用赫兹接触.



图 1 车辆-道岔耦合动力分析模型

Fig.1 Vehicle-turnout coupled dynamic analysis model

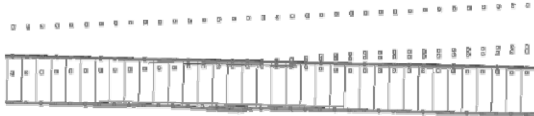


图 2 辙叉区域有限元模型

Fig.2 Finite element model of turnout frog area

为验证模型的可靠性,将仿真结果与现场实测的列车通过 12 号合金钢组合辙叉单开道岔时的轮轨动力响应数据进行对比,结果如表 1 所示.

表 1 仿真结果与测试结果对比

Tab.1 Comparison between simulation results and test results

工况	结果类型	脱轨系数	轮重 减载率	轮轴横向 力/kN
直向过岔 (50 km/h)	仿真值	0.31	0.24	42.3
	测试值(均值)	0.27	0.20	46.7
侧向过岔 (30 km/h)	仿真值	0.59	0.35	64.3
	测试值(均值)	0.51	0.32	70.8

由表 1 可以看出,仿真结果与实测结果之间的误差相对较小,模型的仿真结果比较可信,可以用于下一步的理论分析.

1.2 疲劳敏感区域的确定

轮轨相互作用剧烈的区域,钢轨易出现疲劳伤损.分别提取列车直、侧向过岔的轮轨垂、横向力时程曲线,则轮轨垂、横向力值较大的区域即为钢轨疲劳敏感区域,提取的轮轨垂、横向力时程曲线如图 3

和图 4 所示.

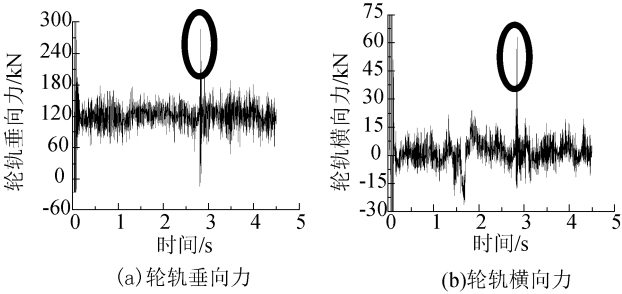


图 3 直向过岔时轮轨力时程曲线

Fig.3 Time-history of wheel/rail force when vehicle passes through the main line of turnout

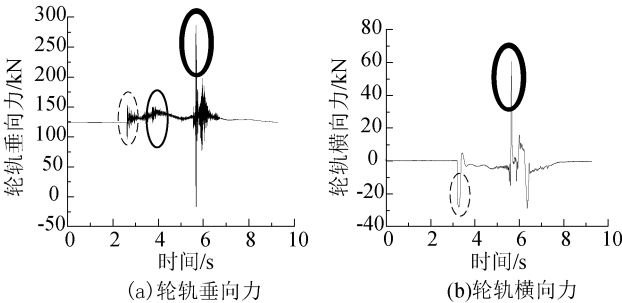


图 4 侧向过岔时轮轨力时程曲线

Fig.4 Time-history of wheel/rail force when vehicle passes through the branch line of turnout

根据仿真分析结果,结合道岔的几何特征可知:曲尖轨顶宽 20~50 mm 轮载过渡区(虚线圈注区域)、曲导轨(细实线圈注区域)、长心轨顶宽 20~50 mm 轮载过渡区(粗实线圈注区域)3 个区域为轮轨作用剧烈区域,即为钢轨疲劳敏感区域.需要指出的是,图 3 中,直向过岔时,在 0~0.2 s 之间轮轨相互作用较大,主要是受模型边界效应的影响,此区域不能作为疲劳敏感区域.

1.3 荷载谱的提取

根据所确定的岔区钢轨疲劳敏感区域,结合动力分析结果,提取敏感区域的荷载谱(以曲尖轨顶宽 20~50mm 轮载过渡区为例),如图 5 和图 6 所示.

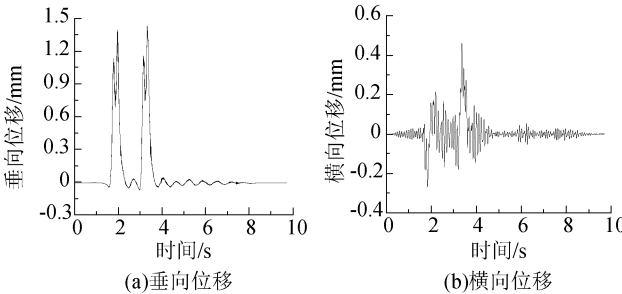


图 5 尖轨位移荷载谱

Fig.5 Displacement load spectrum of switch rail

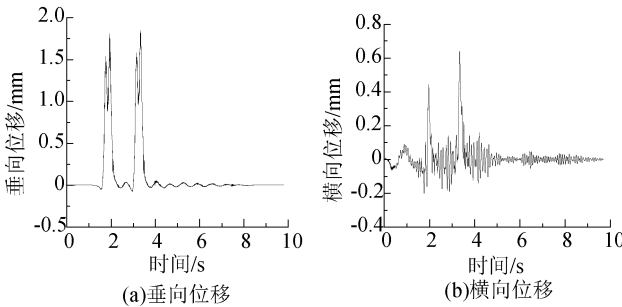


图 6 基本轨垂向位移荷载谱

Fig.6 Displacement load spectrum of stock rail

2 敏感区域应力分布模拟

2.1 静力分析模型建立

采用有限元软件 ANSYS 建立 12 号合金钢组合辙叉单开道岔有限元分析模型,研究岔区钢轨疲劳敏感区域应力分布特征(图 7).模型中钢轨为实体单元模拟,轨枕为空间梁单元模拟,扣件为线性弹簧模拟,间隔铁为非线性弹簧模拟,尖轨及心轨无扣件约束的区域为只受压不受拉的杆单元模拟.钢轨、扣件和轨枕等相关参数的取值与动力分析模型一致.

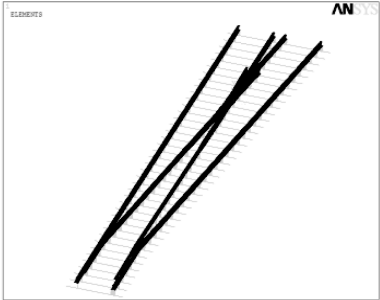


图 7 12 号合金钢组合辙叉单开道岔静力分析模型

Fig.7 Static analysis model of No.12 alloy steel single turnout with combined frog

2.2 荷载及工况

鉴于所采用的疲劳分析荷载谱为钢轨单元节点的位移谱,静力分析工况中所施加的荷载均为单位位移荷载.根据钢轨疲劳敏感区域及列车过岔方式,确定静力研究工况如图 8 所示.工况 1、工况 2 及工

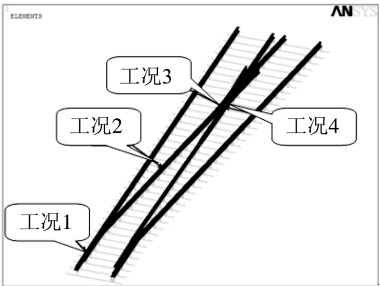


图 8 静力研究工况

Fig.8 Static analysis conditions

况 4 分别是列车侧向过岔时单位位移荷载下曲尖轨顶宽 20~50 mm 轮载过渡区、曲导轨、长心轨顶宽 20~50 mm 轮载过渡区的钢轨应力分布情况,工况 3 是列车直向过岔时单位位移荷载下长心轨顶宽 20~50 mm 轮载过渡区的钢轨应力分布情况。

2.3 模拟结果

单位位移荷载作用下各工况模拟结果如图 9 所示。

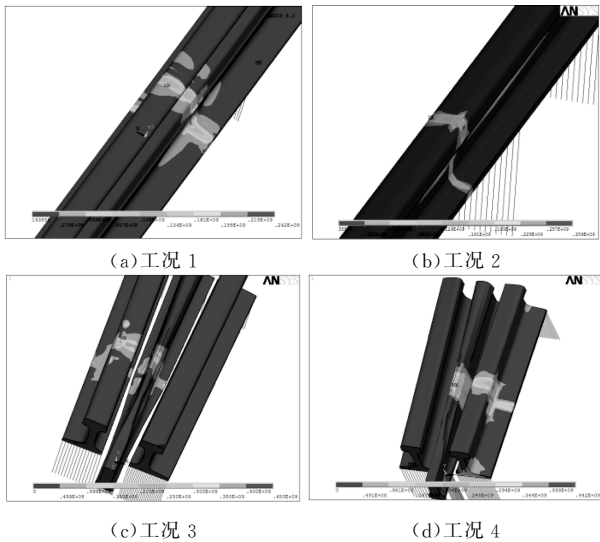


图 9 单位荷载作用下钢轨应力分布

Fig.9 Stress distribution of rail under unit load
单位位移荷载作用,工况 1~4 钢轨应力最大值依次为 242 MPa、283 MPa、450 MPa、442 MPa,可见,取不同工况下钢轨应力最大值相差较大.出现上述情况主要是不同工况下钢轨截面特性及下部基础支撑刚度、约束方式的不同导致的。

3 疲劳裂纹萌生周期预测

3.1 疲劳裂纹萌生寿命预测结果

基于上述分析理论及静、动力分析结果,预测 12 号合金钢组合辙叉单开道岔疲劳裂纹的萌生寿命如图 10 及表 2 所示。

由图 10 和表 2 分析可知,只有长心轨同时受列车直、侧向过岔的影响,其他区域只受列车侧向过岔的影响.因此长心轨的疲劳寿命与列车直侧向过岔的概率有关,其疲劳寿命可以表示为

$$N=N_{直}q_{直}+N_{侧}q_{侧} \tag{1}$$

式中: $N_{直}$ 、 $N_{侧}$ 分别为直、侧向过岔时长心轨的疲劳寿命; $q_{直}$ 、 $q_{侧}$ 分别为机车车辆直、侧向通过道岔的运量所占线路总运量的比率。

取 $q_{直} \approx q_{侧} = 0.5$,即直向过岔列车数量与侧向过岔列车数量近似相同,将表 3 对应的裂纹萌生周期内通过运量 $N_{直} = 499$, $N_{侧} = 591$ 代入式(1),可

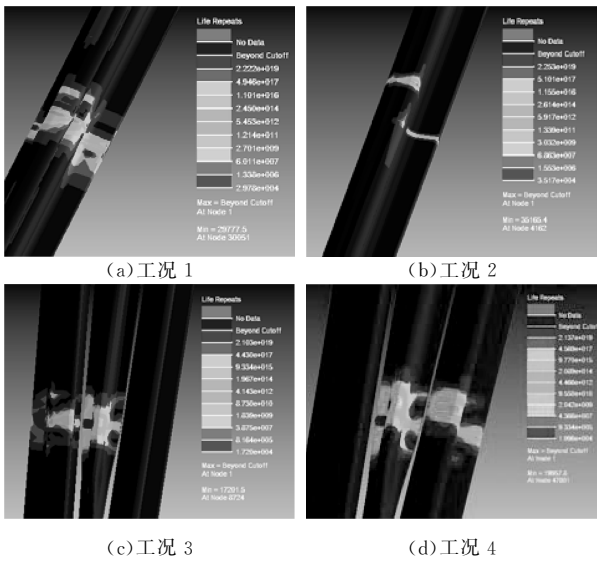


图 10 疲劳裂纹萌生寿命

Fig.10 Fatigue crack initiation life

表 2 钢轨各特征断面疲劳裂纹萌生寿命计算结果

Tab.2 Calculation results of fatigue crack initiation life of rail in each typical section

位置	工况	部件类型	疲劳寿命 ×10 ⁴ /次	裂纹萌生周期 运量/万 t
特征断面 1	工况 1	基本轨	4.827	483
		尖轨	2.978	297
特征断面 2	工况 2	曲导轨	3.517	352
特征断面 3	工况 3	翼轨 1	199.6	200
		长心轨	499.3	499
	工况 4	翼轨 2	1.720	172
		长心轨	5.906	591

得允许通过运量约 540 万 t.综合分析,可近似认为侧向或直向通过运量达到 270 万 t 时,长心轨表面裂纹开始进入扩展期。

由上述分析可见,列车通过道岔时,岔区不同敏感区域钢轨的疲劳裂纹萌生寿命相差很大,其中翼轨的疲劳裂纹萌生寿命最低,不考虑轮轨磨耗的情况下,侧向过岔的运量达到 170 万 t 时即开始进入扩展期;侧向过岔时,尖轨顶宽 20~50 mm 处的基本轨疲劳裂纹萌生寿命最高,不考虑磨耗的情况下,侧向过岔运量达近 500 万 t 时才开始进入扩展期。

3.2 货车参数对疲劳裂纹萌生寿命的影响

我国重载铁路线上运营着 20 t、21 t、23 t 和 25 t 等不同轴重的货车,且其过岔速度各不相同.为研究车辆轴重对钢轨疲劳寿命的影响规律,分别模拟 25 t、23 t、21 t 和 20 t 轴重的重载列车以 60 km/h 速度侧向过岔时各敏感区域钢轨疲劳裂纹的萌生寿命,结果如表 3 所示。

为研究列车通过速度对钢轨疲劳裂纹萌生寿命的影响,分别模拟 25 t 轴重列车以 30 km/h、

40 km/h、50 km/h 和 60 km/h 侧向过岔时各敏感区域钢轨疲劳裂纹的萌生寿命,结果如表 3 所示.

表 3 不同轴重下各特征断面钢轨的疲劳裂纹萌生寿命

Tab.3 Stress distribution of rail of each typical section under different axle-loads 万次					
轴重/t	特征断面 1		特征断面 2		特征断面 3
	基本轨	尖轨	曲导轨	翼轨	长心轨
25	4.827	2.978	3.517	1.720	5.906
23	5.554	3.353	3.981	1.924	6.613
21	7.677	4.477	4.869	2.588	8.841
20	8.934	5.151	5.439	2.936	1.001

表 4 不同速度下各特征断面钢轨的疲劳裂纹萌生寿命

Tab.4 Fatigue crack initiation life of rail of each typical section under different vehicle speeds 万次					
侧向过岔 速度/(km/h)	特征断面 1		特征断面 2	特征断面 3	
	基本轨	尖轨	曲导轨	翼轨	长心轨
60	4.827	2.978	3.517	1.720	5.906
50	5.721	3.114	3.667	1.747	6.267
40	6.145	3.256	3.833	1.843	6.489
30	6.248	3.304	3.919	1.952	6.731

为了便于对比分析,将钢轨各特征断面疲劳裂纹萌生周期运量与列车轴重、侧向过岔速度关系分别采用图 11 和图 12 表示.

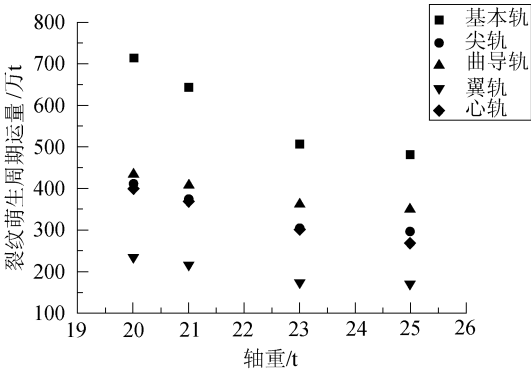


图 11 钢轨各特征断面疲劳裂纹萌生周期运量与列车轴重关系

Fig.11 Relationship between passing volume in the period of crack initiation and vehicle axle-load in each typical section of rail

由图 11 可见,当列车速度一定时,列车轴重由 25 t 降低至 20 t,道岔钢轨各疲劳敏感区域的裂纹萌生周期运量均大幅度增加,最大增幅达 32.4%;由图 12 可见,当列车轴重一定时,列车过岔速度由 30 km/h 提高至 60 km/h 时,道岔钢轨件各疲劳敏感区域的裂纹萌生周期运量均有所降低,最大降幅为 11.5%.

根据上述分析,岔区钢轨疲劳敏感区域裂纹萌生周期运量可以表示为

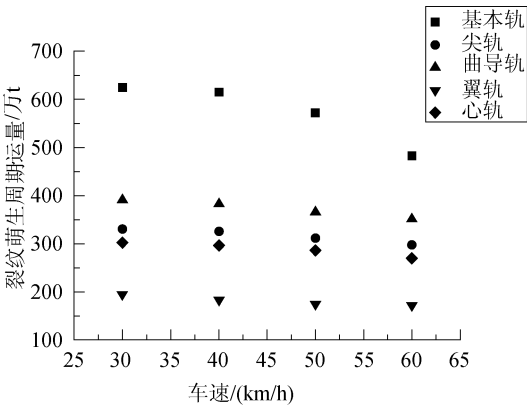


图 12 钢轨各特征断面疲劳裂纹萌生周期运量与列车速度关系

Fig.12 Relationship between passing volume in the period of crack initiation and vehicle speed in each typical section of rail

$$G = \sum P_{ij} \times \frac{n_{ij}}{N} \tag{2}$$

式中: i 为轴重,根据国内货车轴重情况,取值可为 20 t、21 t、23 t 和 25 t; j 为过岔速度,根据 12 号道岔侧向过岔速度的限值,其取值范围为 0~60 km/h; P_{ij} 为轴重为 i 、速度为 j 时钢轨疲劳裂纹萌生寿命周期内通过运量; n_{ij} 为轴重为 i 、速度为 j 的侧向过岔的货车数量; N 为侧向过岔的货车总数.

4 结论

基于有限元分析软件确定了岔区钢轨疲劳敏感区域,并提取了敏感区域荷载谱及单位荷载作用下的钢轨应力,基于 Miner 线性累积法则对岔区钢轨疲劳裂纹萌生寿命进行了预测,并对列车轴重、速度对钢轨裂纹萌生寿命的影响进行了研究,得出以下结论.

- 1)12 号合金钢组合辙叉单开道岔疲劳敏感区域为曲尖轨顶宽 20~50 mm 轮载过渡区、曲导轨、长心轨顶宽 20~50 mm 轮载过渡区等 3 个区域.
- 2)道岔区不同敏感区域钢轨的疲劳裂纹萌生寿命相差很大,应分别制定不同的疲劳裂纹打磨周期.
- 3)列车轴重及侧向通过速度对岔区钢轨疲劳裂纹萌生周期运量影响较大,疲劳裂纹萌生周期运量随列车轴重的增加而大幅度降低,随列车侧向通过速度的增加也有所降低.

参考文献(References):

[1] 赵卫华,曹洋,王平. 合金钢组合辙叉合理受力优化方案研究[J].中国铁路,2012(1):55—57.

- ZHAO Weihua, CAO Yang, WANG Ping. Study on reasonable force optimization of alloy steel single turnout [J]. Chinese Railways, 2012(1): 55—57. (in Chinese)
- [2] 李瑞俊, 韩治平, 魏朝雄, 等. 神朔铁路重载道岔病害成因分析及整治措施[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(9): 28—32.
- LI Ruijun, HAN Zhiping, WEI Chaoxiong, et al. Analysis and treatment of turnout defects on Shen-Shuo heavy haul railway[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(9): 28—32. (in Chinese)
- [3] 石晓玲, 李强, 杨广雪. 高速列车制动盘表面裂纹的扩展特性[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(4): 55—60.
- SHI Xiaoling, LI Qiang, YANG Guangxue. The fatigue crack propagation characteristic on brake disc surface of high speed train[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(4): 55—60. (in Chinese)
- [4] 丁军君, 张良威, 李芾. 基于损伤函数的钢轨滚动接触疲劳研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 19—24.
- DING Junjun, ZHANG Liangwei, LI Fu. Research on rail rolling contact fatigue based on the damage function [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1): 19—24. (in Chinese)
- [5] 雷晓燕, 吕绍棣, 郑明新. 60kg/m 侧磨钢轨疲劳试验研究[J]. 上海铁道大学学报, 2000, 21(10): 11—16.
- LEI Xiaoyan, LYU Shaodi, ZHENG Mingxin. A study on fatigue test of 60 kg/m rail with side wear [J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 2000, 21(10): 11—16. (in Chinese)
- [6] 钟雯, 王文健, 宋纾崎, 等. 曲率半径对钢轨滚动接触疲劳性能的影响[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2): 254—257.
- ZHONG Wen, WANG Wenjian, SONG Shuqi, et al. Effect of curve radius on rolling contact fatigue properties of rails[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(2): 254—257. (in Chinese)
- [7] 罗慧刚. 采用钢轨打磨减缓朔黄铁路小半径曲线钢轨损伤的试验研究[J]. 铁道建筑, 2011(4): 117—119.
- LUO Huigang. Experimental study on rail damage of small radius curve of Shuo-Huang railway by rail grinding[J]. Railway Engineering, 2011(4): 117—119. (in Chinese)
- [8] 邓建辉, 陈朝阳, 邓勇, 等. 轨底坡和轨头廓面对钢轨接触疲劳损伤的影响研究[J]. 铁道建筑, 2011(8): 109—111.
- DENG Jianhui, CHEN Chaoyang, DENG Yong, et al. Study on influence of rail cant and rail profile on rail contact fatigue damage[J]. Railway Engineering, 2011(8): 109—111. (in Chinese)
- [9] 周小林, 向延念, 陈秀方. U71Mn50kg·m⁻¹ 普通碳素钢钢轨疲劳裂纹扩展速率试验研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 86—90.
- ZHOU Xiaolin, XIANG Yannian, CHEN Xiufang. Test and study of fatigue fracture propagation of U71Mn50 kg·m⁻¹ ordinary carbon steel rail[J]. China Railway Science, 2004, 25(3): 86—90. (in Chinese)
- [10] 习年生, 周清跃. 钢轨的疲劳重伤率分布规律与疲劳寿命预测[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(5): 53—56.
- XI Niansheng, ZHOU Qingyue. Distribution and prediction of rail fatigue failures [J]. China Railway Science, 2004, 25(5): 53—56. (in Chinese)
- [11] 王建西, 许玉德, 曹亮. 钢轨踏面疲劳裂纹扩展行为分析[J]. 华东交通大学, 2009, 26(2): 1—7.
- WANG Jianxi, XU Yude, CAO Liang. An analysis on propagation behavior of rail tread fatigue crack [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2009, 26(2): 1—7. (in Chinese)
- [12] 刘学文, 田常海, 邹定强. 在役 U75V 和 U71Mn 钢轨损伤及其统计分析方法[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(6): 19—24.
- LIU Xuewen, TIAN Changhai, ZOU Dingqiang. Failure rule and statistical analysis method for U75V and U71Mn rail in service[J]. China Railway Science, 2007, 28(6): 19—24. (in Chinese)
- [13] 王少锋, 许玉德, 周宇, 等. 基于临界平面法的钢轨裂纹萌生寿命预测模型研究[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(5): 77—82.
- WANG Shaofeng, XU Yude, ZHOU Yu, et al. A research on rail crack initiation life prediction models based on critical plane method [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(5): 77—82. (in Chinese)
- [14] 刘建锋, 魏庆朝. 高速铁路钢轨疲劳寿命预测[J]. 铁道工程学报, 2000(2): 30—34.
- LIU Jianfeng, WEI Qingchao. Prediction of fatigue service life for rails of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000(2): 30—34. (in Chinese)
- [15] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHAI Wanming. Vehicle-track coupled dynamics[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)