

文章编号: 1005-0523(2020)01-0001-08

道岔钢轨病害打磨对高速列车动力学性能影响研究

杨逸航¹, 肖乾²

(1. 中铁物轨道科技服务集团有限公司, 北京 100037; 2. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 选取京沪高铁1组轨面病害较为严重的道岔作为道岔钢轨病害打磨研究对象, 进行长期跟踪观测, 并分析打磨前后轮轨几何关系, 建立车辆—道岔耦合无砟轨道系统动力分析模型, 研究对比打磨前后高速列车动力学特性。结果表明: 通过道岔钢轨病害打磨, 钢轨轨面病害得到较好改善, 但道岔钢轨工作边出现棱角, 轨面出现双光带现象; 轮轨等效锥度均未在理想范围以内; 列车通过道岔岔中区域时, 高速列车动力学特性得到较好的改善, 但列车通过岔前及岔后区域时, 高速列车动力学特性不如打磨前。建议高速道岔打磨时需要充分考虑轮轨关系, 不应仅仅对轨面病害进行打磨。

关键词: 高速铁路; 道岔钢轨打磨; 动力学仿真; 轮轨磨耗; 等效锥度

中图分类号: U211.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.01.001

随着我国高铁开通运营时间的延长, 部分高速道岔钢轨出现了鱼鳞纹、掉块、轨头踏面压宽、垂直磨耗和侧面磨耗等一系列问题, 影响了高速道岔的使用寿命及轨道平顺性^[1]。钢轨打磨作为极具针对性的钢轨病害处理方法, 已被广泛用于全路各类不同线路中^[2]。

现如今国内诸多学者对钢轨打磨进行研究。研究表明钢轨预打磨能够有效改善轨面不平顺状态。池茂儒^[3]建立动车组车辆多体动力学模型, 仿真分析了轨肩过度打磨和轨头过度打磨对轮轨接触匹配关系、车辆稳定性及车辆运行品质的影响。宗聪聪^[4]对道岔基本轨和尖轨部分打磨廓形优化进行设计, 并引入踏面跳跃点横向间距作为优化控制条件。樊文刚^[5]通过调查表明钢轨打磨是当前国内外公认的去表面损伤和缺陷、抑制滚动接触疲劳、改善轮轨匹配关系、延长钢轨使用寿命、提高列车运行平稳性、安全性以及乘客舒适度的有效和通用手段。

高铁道岔直股钢轨由5段不同钢轨焊接而成, 如图1所示, 分为岔前、岔中及岔后区域, 选取京沪高铁1组道岔进行钢轨病害打磨研究试验, 由于主要钢轨病害均在道岔直股, 未对道岔曲股进行打磨, 故本文仅对道岔直股进行研究。通过分析道岔打磨前后轮轨几何关系, 并建立车辆—道岔耦合无砟轨道系统动力分析模型, 研究对比打磨前后高速列车动力学特性。

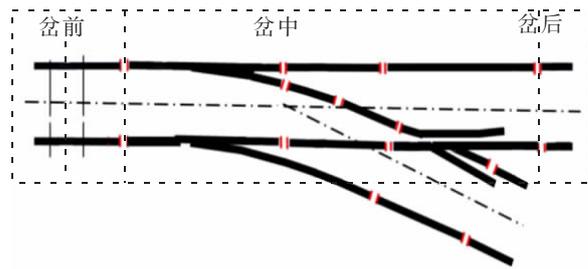


图1 高速铁路道岔示意图
Fig 1 High-speed railway turnout diagram

1 现场打磨跟踪观测

1.1 钢轨廓形变化

图2为道岔打磨前后岔前、岔中及岔后钢轨廓形, 由图可知, 打磨前岔前、岔中及岔后钢轨廓形均有差异, 由于钢轨病害打磨着重是对轨距角处鱼鳞伤进行处理, 打磨后岔前、岔中及岔后钢轨廓形仍有较大差

收稿日期: 2019-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51565013)

作者简介: 杨逸航(1992—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为轮轨接触。

异,且打磨后岔前、岔中及岔后钢轨工作边均出现明显棱角。

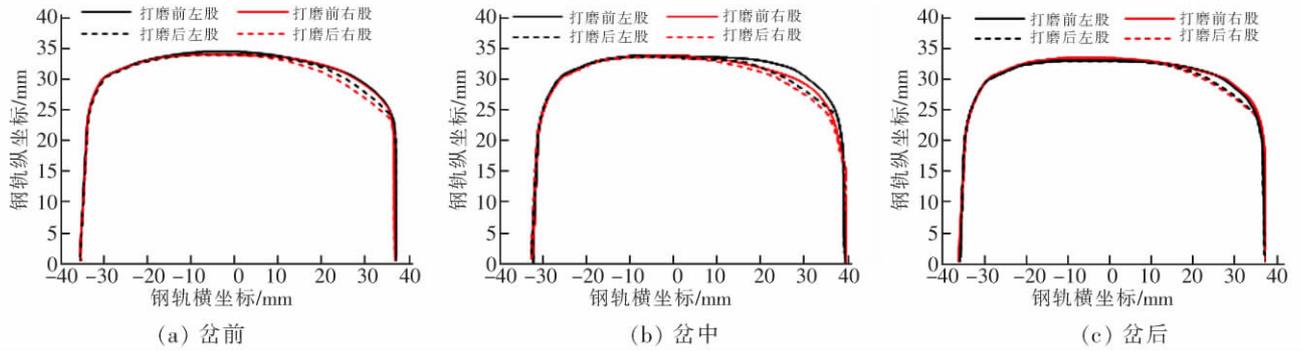


图2 道岔钢轨打磨前后廓形

Fig 2 Turnout rail profile before and after grinding

1.2 钢轨轨面状态变化

图3为道岔打磨前后道岔钢轨轨面状态变化,由图可知,打磨前钢轨轨距角处鱼鳞伤较为明显,光带较宽,打磨后岔前、岔中及岔后轨面鱼鳞伤消除,但轨面出现双光带现象,轮轨关系未能得到改善。

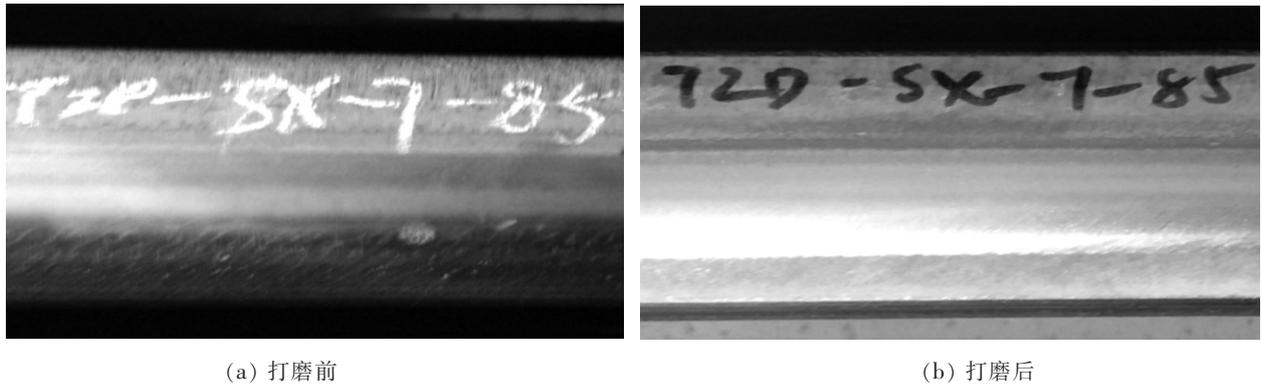


图3 道岔钢轨打磨前后轨面状态

Fig.3 Turnout rail surface before and after grinding

2 轮轨接触几何分析

轮轨接触几何关系对轮轨动力学特性影响很大,等效锥度是轮轨几何接触中的重要参数^[6]。当 LMa 车轮踏面与钢轨接触时,等效锥度变化范围为 0.026~0.041 较为理想^[7]。表 1 为 LMa 型踏面与道岔打磨前后钢轨匹配时等效锥度变化,由表可知,打磨前岔前、岔中、岔后钢轨等效锥度均在理想范围以内,但通过对病害的打磨,钢轨廓形产生较大变化,打磨后岔前等效锥度较打磨前增大 31.25%,打磨后岔中及岔后等效锥度较打磨前分别减小 54.38%,68.29%,且均未在理想范围以内,故道岔通过钢轨病害打磨后,轮轨关系未得到改善。

表 1 打磨前后等效锥度变化

Tab.1 Equivalent conicity before and after grinding

道岔位置	打磨前	打磨后
岔前	0.032	0.042
岔中	0.046	0.021
岔后	0.041	0.013

3 车辆—道岔耦合动力学模型建立

依据动车组悬挂参数,在动力学软件 UM 中建立动车组车辆精细模型。考虑车体转向架横向、竖向、侧滚、点头、摇头运动以及轮对横向、竖向、侧滚、摇头运动,包括 1 个车体、2 个构架、4 条轮对和 8 个轴箱总计 15 个刚体,其中,车体、构架、轮对各有 6 个自由度,轴箱相对轮对有 1 个转动自由度,共有 50 个自由度。模

型充分考虑非线性轮轨接触几何关系、非线性轮轨蠕滑特性及非线性车辆悬挂系统。二系空气弹簧分别采用线性弹簧力元模拟,同时考虑阻尼性质。转臂节点采用特殊力元模拟。建模过程中充分考虑轮轨接触几何,横向止档,悬挂力元等非线性特性。

表 2 车体自由度
Tab.2 Vehicle body freedom

自由度	横移	沉浮	伸缩	侧滚	摇头	点头
车体	Y_c	Z_c	X_c	φ_c	ψ_c	β_c
构架($i=1,2$)	Y_{ii}	Z_{ii}	X_{ii}	φ_{ii}	ψ_{ii}	β_{ii}
轮对($i=1\sim4$)	Y_{ui}	Z_{ui}	Z_{ui}	φ_{ui}	ψ_{ui}	β_{ui}
轴箱($i=1\sim4$)	-	-	-	-	-	β_c

车辆模型中各自由度上的动力学方程统一表示形式如下

$$M\ddot{X}+C\dot{X}+KX=P(X,\dot{X},t)$$

式中: M 、 C 和 K 分别代表车辆多体系统的质量、阻尼和刚度矩阵; X 、 \dot{X} 、 \ddot{X} 分别为车辆系统的广义加速度矢量、广义速度矢量和广义位移矢量; $P(X,\dot{X},t)$ 为车辆系统所受的分线性载荷矢量,包含非线性的悬挂力和轮轨作用力, t 为时间。

车轮踏面类型为 LMA,采用轮轨非椭圆多点接触算法(即 K-P 算法)计算蠕滑力。同时将上述拟合处理好后的道岔线型输入至软件中,如图 4 所示为车辆一道岔耦合无砟轨道系统动力分析模型。



图 4 车辆一道岔耦合动力学模型
Fig.4 Vehicle-track coupling dynamic model

4 车辆通过道岔的动力学特性分析

利用高速铁路车辆一道岔耦合无砟轨道系统动力分析模型,模拟仿真动车组单节车辆在没有激励的条件下,以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 的速度通过打磨前后道岔,研究分析道岔钢轨病害打磨对高速列车动力学性能影响。

4.1 轮轨相互作用

1) 轮轨横向力。表 3 为高速列车通过打磨前后道岔岔前、岔中及岔后时,轮轨横向力峰值变化。由表可知,通过道岔钢轨病害打磨后,当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔前时,横向力峰值分别降低 5.95%,20.93%,25.89%,26.56%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔中时,横向力峰值分别降低 71.46%,83.30%,92.13%,93.84%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔后时,横向力峰值分别增加 90.69%,79.84%,57.02%,51.54%。故通过道岔钢轨病害打磨后,列车通过道岔岔前及岔中轮轨横向力显著降低,但列车通过道岔岔后时轮轨横向力峰值显著增大。

2) 轮轨垂向力。表 4 为高速列车通过打磨前后道岔岔前、岔中及岔后时,轮轨垂向力峰值变化。由表可知,通过道岔钢轨病害打磨后,列车通过道岔时轮轨垂向力变化较小,几乎未有改变。

3) 轮轨磨耗功。表 5 为高速列车通过打磨前后道岔岔前、岔中及岔后时,轮轨磨耗功峰值变化。由表可知,通过道岔钢轨病害打磨后,当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔前时,磨耗功峰值分别增加 8.87%,14.14%,18.31%,16.99%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔中时,磨耗功峰值分别降低 97.94%,98.39%,98.18%,97.96%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度

表3 打磨前后轮轨横向力峰值变化
Tab.3 Maximum value of wheel/rail transverse force before and after grinding

速度/(km/h)	打磨前			打磨后		
	岔前	岔中	岔后	岔前	岔中	岔后
100	0.64	0.98	0.59	0.61	0.28	1.13
200	0.79	1.69	0.68	0.62	0.28	1.23
300	0.94	3.59	0.90	0.70	0.28	1.42
400	1.05	4.70	1.00	0.77	0.29	1.52

表4 打磨前后轮轨垂向力峰值变化
Tab.4 Maximum value of wheel/rail vertical force before and after grinding

速度/(km/h)	打磨前			打磨后		
	岔前	岔中	岔后	岔前	岔中	岔后
100	62.62	63.91	62.68	62.64	62.36	63.12
200	62.75	64.06	62.71	62.69	62.36	63.40
300	62.80	64.32	62.71	62.79	62.37	63.65
400	62.81	64.44	62.79	62.86	62.38	64.00

通过岔后时,磨耗功峰值分别降低 49.76%,28.49%,18.06%,32.66%。故通过道岔钢轨病害打磨后,列车通过道岔岔前时轮轨磨耗功显著增大,列车通过道岔岔中及岔后时轮轨磨耗功显著减小。

表5 打磨前后轮轨磨耗功峰值变化
Tab.5 Maximum value changes of wheel/rail wear power before and after grinding

速度/(km/h)	打磨前			打磨后		
	岔前	岔中	岔后	岔前	岔中	岔后
100	1.99	57.65	14.27	2.17	1.19	7.17
200	3.94	148.28	26.48	4.50	2.38	18.94
300	5.61	195.98	34.98	6.64	3.57	28.67
400	7.19	232.49	38.29	8.41	4.76	25.78

4.2 车辆运行安全性

车辆运行安全性主要涉及车辆的临界速度,脱轨等问题,Nadal 脱轨系数及轮重减载率是判断列车运行安全性的主要参数^[8]。

1) 轮重减载率。表6为高速列车通过打磨前后道岔岔前、岔中及岔后时,轮重减载率峰值变化。由表可知,通过道岔钢轨病害打磨后,当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔前时,轮重减载率峰值分别增加 29.55%,50.93%,41.52%,36.04%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔前时,轮重减载率峰值分别减小 23.02%,12.24%,12.91%,4.16%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔后时,轮重减载率峰值分别减小 11.16%,5.61%,4.88%,4.13%。故通过道岔钢轨病害打磨后,列车通过道岔岔前时轮重减载率显著增大,列车通过道岔岔中及岔后时轮重减载率显著减小。

表 6 打磨前后轮重减载率峰值
Tab.6 Maximum value of wheel weight reduction before and after grinding

速度/(km/h)	打磨前			打磨后		
	岔前	岔中	岔后	岔前	岔中	岔后
100	0.007 5	0.011 7	0.008 8	0.009 8	0.008 9	0.010 8
200	0.007 7	0.011 7	0.008 7	0.011 9	0.015 2	0.013 2
300	0.008 4	0.011 7	0.008 7	0.011 6	0.016 1	0.013 3
400	0.008 9	0.011 7	0.008 9	0.012 1	0.017 2	0.013 6

2) 脱轨系数。表 7 为高速列车通过打磨前后道岔岔前、岔中及岔后时,脱轨系数峰值变化。由表可知,通过道岔钢轨病害打磨后,当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔前时,脱轨系数峰值分别增加 54.25%,69.66%,92.19%,119.31%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔中时,脱轨系数峰值分别降低 81.34%,77.09%,72.68%,82.91%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔后时,脱轨系数峰值没有明显变化。故通过道岔钢轨病害打磨后,列车通过道岔岔前时脱轨系数显著增大,但列车通过道岔岔中时脱轨系数显著减小。

表 7 打磨前后脱轨系数峰值
Tab.7 Maximum value of derailment coefficient before and after grinding

速度/(km/h)	打磨前			打磨后		
	岔前	岔中	岔后	岔前	岔中	岔后
100	0.009	0.027	0.026	0.014	0.005	0.025
200	0.010	0.024	0.029	0.016	0.005	0.027
300	0.009	0.022	0.031	0.018	0.006	0.028
400	0.008	0.037	0.032	0.018	0.006	0.029

4.3 车辆运行平稳性

1) 车体振动加速度。表 8 为高速列车通过打磨前后道岔岔前、岔中及岔后时,车体横向加速度峰值变化。由表可知,通过道岔钢轨病害打磨后,当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔前时,车体横向加速度峰值分别增加 29.71%,3.68%,20.09%,18.73%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔中时,车体横向加速度峰值分别降低 65.69%,63.89%,59.17%,61.34%;当列车分别以 100,200,300 km/h 及 400 km/h 速度通过岔后时,车体横向加速度峰值分别增加 128.06%,18.43%,68.58%,91.44%。故通过道岔钢轨病害打磨后,列车通过道岔岔前及岔后时车体横向加速度峰值显著增大,列车通过道岔岔中时车体横向加速度峰值显著减小。

表 8 车体横向加速度峰值变化
Tab.8 Maximum value of vehicle body lateral acceleration before and after grinding

速度/(km/h)	打磨前			打磨后		
	岔前	岔中	岔后	岔前	岔中	岔后
100	0.014	0.084	0.024	0.018	0.029	0.055
200	0.028	0.161	0.054	0.029	0.058	0.064
300	0.038	0.207	0.056	0.045	0.085	0.095
400	0.046	0.252	0.058	0.054	0.097	0.111

表9为高速列车通过打磨前后道岔岔前、岔中及岔后时,车体垂向加速度峰值变化。由表可知,通过道岔钢轨病害打磨后,当列车分别以100,200,300 km/h及400 km/h速度通过岔前时,车体垂向加速度峰值未有明显变化;当列车分别以100,200,300 km/h及400 km/h速度通过岔中时,车体垂向加速度峰值分别降低58.63%,69.48%,75.08%,80.75%;当列车分别以100,200,300 km/h及400 km/h速度通过岔后时,车体垂向加速度峰值未有明显变化。故通过道岔钢轨病害打磨后,列车通过道岔岔前及岔后时,车体垂向加速度峰值几乎未有明显变化,但列车通过道岔岔中时车体垂向加速度峰值显著减小。

表9 车体垂向加速度峰值变化
Tab.9 Maximum value of vehicle body vertical acceleration before and after grinding m/s^2

速度/(km/h)	打磨前			打磨后		
	岔前	岔中	岔后	岔前	岔中	岔后
100	0.000 8	0.001 8	0.000 8	0.000 7	0.000 7	0.000 8
200	0.000 8	0.002 4	0.000 8	0.000 7	0.000 7	0.000 8
300	0.000 8	0.002 9	0.000 8	0.000 7	0.000 7	0.000 8
400	0.000 8	0.003 8	0.000 8	0.000 8	0.000 7	0.000 8

2) 构架振动加速度。表10为高速列车通过打磨前后道岔岔前、岔中及岔后时,构架横向加速度峰值变化。由表可知,通过道岔钢轨病害打磨后,当列车分别以100,200,300 km/h及400 km/h速度通过岔前时,构架横向加速度峰值分别增加0.86%,13.64%,18.63%,22.85%;当列车分别以100,200,300 km/h及400 km/h速度通过岔中时,构架振动加速度峰值分别降低97.56%,96.75%,96.19%,95.79%;当列车分别以100,200,300 km/h及400 km/h速度通过岔后时,构架振动加速度峰值分别降低26.69%,24.75%,23.22%,23.24%。故通过道岔钢轨病害打磨后,列车通过道岔岔前时构架横向加速度峰值显著增加,列车通过道岔岔中及岔后时构架横向加速度峰值显著减小。

表11 高速列车通过打磨前后道岔岔前、岔中及岔后时,构架垂向加速度峰值变化。由表可知,通过道岔钢轨病害打磨后,当列车分别以100,200,300 km/h及400 km/h速度通过岔前时,构架垂向加速度峰值分别增加79.92%,40.53%,23.92%,10.34%;当列车分别以100,200,300 km/h及400 km/h速度通过岔中时,构架垂向加速度峰值分别降低79.75%,86.34%,89.89%,91.46%;当列车分别以100,200,300 km/h及400 km/h速度通过岔后时,构架垂向加速度峰值未有明显变化。故通过道岔钢轨病害打磨后,列车通过道岔岔前时构架垂向加速度峰值增加,列车通过道岔岔中时构架垂向加速度峰值减小。

表10 构架横向加速度峰值变化
Tab.10 Maximum value of bogie frame lateral acceleration before and after grinding m/s^2

速度/(km/h)	打磨前			打磨后		
	岔前	岔中	岔后	岔前	岔中	岔后
100	0.088	0.753	0.245	0.088	0.018	0.179
200	0.181	1.477	0.476	0.205	0.048	0.358
300	0.265	1.984	0.673	0.315	0.076	0.517
400	0.329	2.338	0.838	0.404	0.098	0.644

表 11 构架垂向加速度峰值变化
Tab.11 Bogie frame vertical acceleration maximum value before and after grinding

速度/(km/h)	打磨前			打磨后		
	岔前	岔中	岔后	岔前	岔中	岔后
100	0.010	0.066	0.021	0.017	0.014	0.020
200	0.014	0.110	0.027	0.020	0.015	0.027
300	0.020	0.161	0.033	0.024	0.016	0.032
400	0.026	0.205	0.040	0.029	0.017	0.040

5 结论

本文选取京沪高铁上 1 组道岔进行道岔钢轨病害打磨试验,通过跟踪观测打磨前后道岔岔前、岔中及岔后轨面状态,并分析打磨前后轮轨几何关系,建立车辆—道岔耦合无砟轨道系统动力模型,研究对比打磨前后高速列车动力学特性。综上,可以得到以下结论:

1) 通过现场跟踪观测可知,打磨后岔前、岔中及岔后钢轨廓形仍有较大差异,钢轨工作边均出现明显棱角,轨面鱼鳞伤消除,但出现明显双光带现象;

2) 通过轮轨接触几何分析可知,打磨后岔前等效锥度增大,岔中及岔后等效锥度均减小,且均未在理想范围以内,轮轨接触几何关系较差;

3) 通过动力学特性分析可知,打磨后列车通过岔中区域时,列车轮轨作用力、车辆运行安全性及车辆运行平稳性得到较好的改善,但列车通过岔前及岔后区域时,列车轮轨作用力、车辆运行安全性及车辆运行平稳性未能得到改善。

故只对道岔钢轨进行病害打磨,钢轨状态、轮轨接触几何特性及车辆动力学特性难以得到较为明显改善,建议对道岔钢轨打磨时,不应该仅仅对钢轨工作边打磨处理,需要对钢轨非工作边也进行打磨,在降低工作边同时,使得非工作边也降低,轮轨接触等效锥度将维持在理想范围,列车轮轨关系及运行品质也能得到改善。

参考文献:

- [1] 陈海龙. 高速铁路钢轨和道岔打磨技术应用[J]. 中国新技术新产品, 2019(3):85-86.
- [2] 肖杰灵. 客货混跑铁路钢轨非对称打磨的理论及试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [3] 池茂儒,蔡吴斌,梁树林,等. 高速铁路钢轨打磨偏差对车辆动力学性能的影响[J]. 中国机械工程, 2019, 30(3):261-265.
- [4] 宗聪聪,张让,周云飞,等. 道岔尖轨段打磨目标廓形优化研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(1):132-135.
- [5] 樊文刚,刘月明,李建勇. 高速铁路钢轨打磨技术的发展现状与展望[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22):184-193.
- [6] 金学松,杜星,郭俊,等. 钢轨打磨技术研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(1):1-11.
- [7] 黄彩虹. 高速车辆减振技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
- [8] 韩梅,王艳玲,庞亮,等. 基于脱轨系数安全标准的重车重心限制高度[J]. 中国铁道科学, 2007(4):106-110.

Research on the Influence of Turnout Rail Disease Grinding on High-Speed Trains Dynamic Characteristic

Yang Yihang¹, Xiao Qian²

(1. China Railway Materials Track Technology Service Group Co., Ltd., Beijing 100036, China; 2. Key Laboratory of Vehicle Tools and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Turnout of Beijing-Shanghai high-speed rail was selected as the research object of turnout rail disease grinding. This paper analyzed the geometric relationship of grinding wheels/rails, and the dynamic characteristics of high speed train before and after grinding. The results show that the working edge of turnout rail appears to be angular, and double light band appears on the rail surface. The conicity of wheel/rail equivalent is not within the ideal range. When the train passes through the middle region of the turnout, the dynamic characteristics of the high-speed train are better improved, but when the train passes the front and the back regions of turnout, the dynamic characteristics of the high-speed train are not as good as that before being polished. It is suggested that the wheel/rail relationship should be fully taken into account in the grinding of high-speed turnout in addition to the rail surface diseases grinding.

Key words: high speed rail; turnout rail grinding; dynamic simulation; wheel-rail wear; wheel/rail equivalent conicity