

# 北京地铁个性化钢轨廓形打磨技术应用效果分析

刘永乾<sup>1,2</sup> 王军平<sup>1</sup> 徐 宁<sup>2</sup> 郭贝侨<sup>1</sup>

(1. 中铁物总运维科技有限公司, 100036, 北京; 2. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 100044, 北京//第一作者, 工程师)

**摘 要** 针对北京地铁某半径 350 m 曲线段钢轨严重波磨和疲劳伤损的问题, 采用个性化钢轨廓形打磨方法对其实施了打磨。打磨后利用实测车轮踏面、实测钢轨廓形、车辆及线路实际参数建立了车辆多刚体系统动力学模型, 对打磨前后轮径差、轮轨接触几何关系、接触应力和磨耗指数等关键动力学参数进行了分析; 在打磨后 6 个月时, 对该曲线段的钢轨光带、波磨和疲劳伤损等进行了跟踪观测。仿真结果和观测结果表明: 实施个性化钢轨廓形打磨后, 各项车辆动力学指标明显改善, 波磨超限率减少了 80% 以上、峰峰值最大降低 90%, 钢轨波磨和疲劳伤损发展得到明显抑制, 光带宽度和位置保持良好, 仿真结果与现场实测数据吻合良好。说明个性化廓形打磨可有效整治地铁小半径曲线钢轨波磨和疲劳伤损问题, 延长钢轨使用寿命。

**关键词** 地铁; 车辆动力学; 个性化钢轨廓形打磨; 钢轨波磨; 疲劳伤损

**中图分类号** U216.42<sup>+</sup>4

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2020.08.045

## Application Effect Analysis of Personalized Rail Profile Grinding Technology in Beijing Metro

LIU Yongqian, WANG Junping, XU Ning, GUO Beiqiao

**Abstract** To solve the serious rail corrugation and fatigue damage on a R350 m curve section of Beijing metro, the personalized rail profile grinding is implemented. Then, a vehicle-railway system dynamics model is established after rail grinding by using the parameters of measured wheel tread, wheel profile, vehicle and rail line, the key dynamics parameters of wheel diameter difference, wheel rail contact geometry, contact stress and wear index before and after grinding are analyzed. The contact band, corrugation and fatigue damage of the curve rail are tracked and measured after 6 months of grinding. The results show that the vehicle dynamic indexes are significantly improved after the implementation of personalized rail profile grinding, the corrugation overrun is reduced by more than 80.1%, the corrugation peak-to-peak value is reduced by 90%, the development of rail corrugation and fatigue

damage are obviously suppressed, the width and position of the light band are well maintained. Since the simulation results are in good agreement with the measured data, it shows that the personalize designed profile grinding could rectify the rail corrugation and fatigue damage on the small radius curve, and extend the rail service life effectively.

**Key words** metro; vehicle dynamics; personalized rail profile grinding; rail corrugation; fatigue damage

**First-author's address** China Railway Materials Operation and Maintenance Technology Co., Ltd., 100036, Beijing, China

## 0 引言

据不完全统计, 在北京地铁中, 有超过线路总长 21% 的地段存在钢轨异常波磨现象<sup>[1]</sup>。钢轨波磨不仅增大了轮轨噪声, 而且对车辆的乘坐舒适度和转向架结构强度都产生不良影响, 还加剧了轮轨磨耗, 甚至危及行车安全<sup>[2]</sup>。研究表明, 在轨道结构、线路几何形态、行车速度、钢轨材质及轮轨关系等多种因素共同作用下产生的轮轨黏滑振动, 是诱发地铁钢轨波磨产生的主要原因<sup>[3-7]</sup>。文献[1-7]对国内外地铁钢轨波磨的表现特征、影响因素、形成机理进行了详尽的分析, 文献[7-9]提出了减小小曲线不平顺、使用高强度钢轨和钢轨打磨等波磨整治措施。但大部分研究均停留在理论分析层面, 对打磨现场实施和打磨后跟踪观测分析较少。此外, 传统钢轨打磨作业主要针对钢轨既有病害, 其在打磨过程中未控制钢轨目标廓形, 未充分考虑轮轨接触关系, 导致打磨后病害在短时间内复现, 甚至有加重趋势<sup>[10]</sup>。

疲劳伤损是地铁钢轨的另一种较常见病害。在轮轨接触应力超过钢轨安定极限的情况下, 钢轨材料产生塑性流动并萌生大量的微裂纹, 如其扩展速率大于钢轨磨耗速率, 则会继续发展形成剥离掉块, 甚至导致钢轨断裂, 引发列车脱轨事故<sup>[11-12]</sup>。

个性化钢轨廓形打磨技术根据线路及运行车

辆的实际情况,从解决钢轨病害产生的根源即改善轮轨接触动力学性能入手,设计打磨目标廓形,改善轮轨接触关系,从而有效控制钢轨病害的产生和发展,达到延长钢轨使用寿命,提高列车运行的安全性、平稳性和舒适性的目的<sup>[13-16]</sup>。

个性化钢轨廓形打磨方案实施步骤为:首先,利用实际参数建立车辆-轨道耦合动力学模型,其中轨道及车辆的参数为实际应用参数,车轮廓形参数通过抽样测量不同磨耗状态的车轮廓形而得;然后,采用批量处理的方式,对每个车轮与钢轨的轮轨接触关系进行仿真计算;随后,考虑轮轨接触几何关系、接触应力管理和轮轨蠕滑等动力学性能,通过设计比选,得到能最大限度符合该线路实测车轮廓形的钢轨目标廓形;最后,结合打磨车的特性和线路的实际情况,设计个性化打磨方案,修正钢轨廓形、消除钢轨病害。在打磨过程中,要对作业进行验收以保证打磨质量;在打磨后一段时间内,要跟踪观测检验打磨效果,并为打磨周期制定提出合理建议。

本文对北京地铁某线路半径为 350 m 的曲线段钢轨进行了个性化廓形打磨,利用实测车轮踏面、打磨前后实测钢轨廓形、实际线路和车辆参数,在 Simpack 软件中构建了车辆系统动力学模型,对比分析了打磨前后轮轨接触几何关系、接触应力和磨耗指数等关键动力学指标;对打磨后 6 个月的钢轨波磨、疲劳伤损发展和光带情况进行跟踪观测,以验证个性化打磨的实际效果。

## 1 仿真分析

车辆系统动力学模型包含 1 个车体、2 个构架及 4 个轮对等主要刚体零部件。各刚体间通过一系悬挂及二系悬挂等弹簧阻尼原件相连接。在该模型中,车辆参数参照地铁 B 型车取值,车轮踏面为实测磨耗后的 LM 型踏面,钢轨廓形为打磨前后实测数据,标准轨距为 1 435 mm,轮背距为 1 353 mm,轨底坡为 1:40,车辆通过速度为 55 km/h。仿真线路参数与试验曲线实际参数保持一致:线路总长 440 m(直线长 120 m,缓和曲线长 120 m,圆曲线长 200 m),曲线半径为 350 m,曲线超高为 90 mm。

仿真分析主要指标包括轮径差、轮轨接触几何关系、轮轨接触应力和磨耗指数等。轮径差变化越平缓越有利于车辆通过曲线;轮轨接触位置跳跃越小、轮轨接触应力越小,则轮轨蠕滑及轮轨黏着振

动越小,波磨产生及发展越慢;轮轨接触应力越小,则钢轨疲劳伤损发展越慢。其他动力学指标与此相类似,不再赘述。

### 1.1 轮轨接触几何关系

图 1 为打磨前后轮对横移量在  $-10 \sim +10$  mm 范围内的轮径差对比。打磨前,在轮对横移过程中轮径差存在明显跳变现象;打磨后,轮径差跳变现象消失,变化趋于平缓对称。此外,打磨后轮径差稍有增大,更有利于车辆通过曲线,减小轮轨蠕滑率。

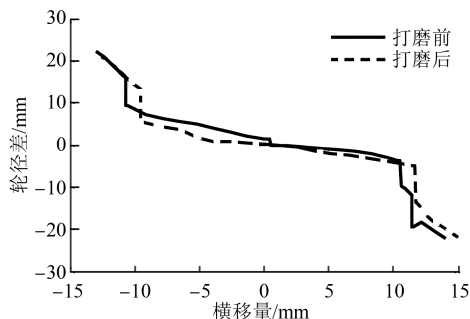


图1 轮径差与轮对横移量的关系

图2及图3为打磨前后的轮轨接触位置分布对比。打磨前,曲线上股的轮轨接触位置分散,且轮轨接触位置存在交叉跳跃情况;打磨后,曲线上股形成了贴合式接触,两点接触滚动半径差减小、蠕滑力矩减小,轮轨黏滑振动减小。

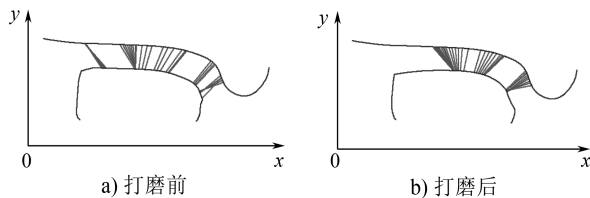


图2 曲线上股轮轨接触几何关系

打磨前,曲线下股的轮轨接触位置存在明显跳跃;打磨后,曲线下股的轮轨接触位置趋于正常,跳变情况消除,其接触范围合理。

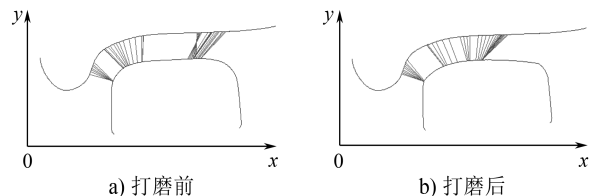


图3 曲线下股轮轨接触几何关系

图4为轮对横移量在 10 mm 时的轮轨接触位置。由图4可见:打磨前,曲线下股接触位置严重偏

外,曲线上股已形成轮缘接触;打磨后,曲线下股的接触位置已然居中,曲线上股尚未形成轮缘接触。打磨后的轮轨接触关系明显较优。

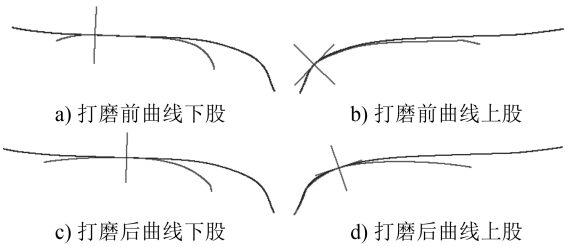


图 4 横移量为 10 mm 时轮轨接触位置

1.2 轮轨接触应力和轮轨磨耗

图 5 为打磨前后的轮轨接触应力对比。由图 5 a) 可知,打磨后,曲线上股的接触应力显著下降,且在缓圆点附近的突变现象得到明显改善。由图 5 b) 可知,曲线下股的接触应力在圆曲线范围内无明显改变,但在缓和曲线上有显著降低。

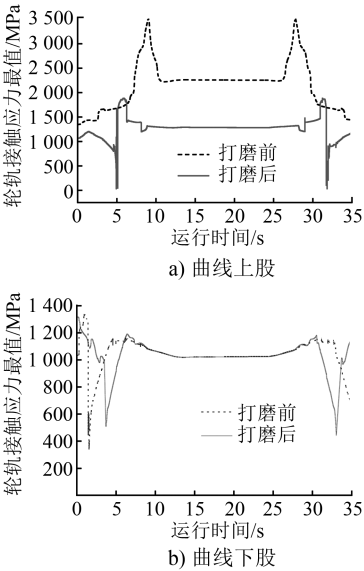


图 5 打磨前后轮轨接触应力

图 6 为打磨前后的磨耗指数对比。由图 6 可见,打磨后,在圆曲线范围内一位轮对的磨耗指数显著下降,二位轮对的磨耗指数也有一定幅度的减小。由此可知,打磨后,钢轨廓形能和车轮踏面良好匹配,蠕滑力矩和蠕滑率减小,车辆通过曲线时的车轮和钢轨磨耗水平显著降低。

2 现场观测

在钢轨打磨后 6 个月时,对试验曲线段钢轨的波磨控制情况、疲劳伤损控制情况、廓形变化情况

进行了跟踪观测,并与类似线路条件下的常规打磨钢轨进行比对。

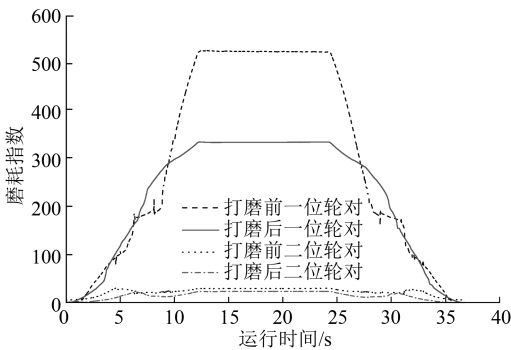


图 6 打磨前后磨耗指数

2.1 波磨控制情况

轨面波磨按波长滤波分为 4 个不同波段。各波段的波长范围及限值的相关标准要求如表 1 所示<sup>[17]</sup>。本研究利用波磨测量仪对轨面波磨进行检测,并按表 1 判断其是否超限。

表 1 不同波段波磨幅值限值		
波段	波长范围/mm	波磨幅值限值/ $\mu\text{m}$
D1	$10 < \lambda \leq 30$	20
D2	$30 < \lambda \leq 100$	20
D3	$100 < \lambda \leq 300$	30
D4	$300 < \lambda \leq 1\,000$	150

2.1.1 波磨超限率

图 7 为打磨前和打磨后 6 个月的波磨超限率。打磨前,在 D3 和 D4 波段的超限率最大,分别为 71.3% 和 23.6%;打磨后,D3 波段的超限率减少了 90%,D4 波段的超限率减少了 80.1%,D1 和 D2 波段的超限情况基本消除。

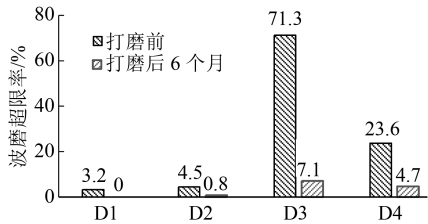


图 7 打磨前和打磨后 6 个月波磨超限率

2.1.2 钢轨不平顺

图 8 为打磨前和打磨后 6 个月的 D2 及 D3 波段波形图。其中,在里程 K3+640 附近的隧道内人防门处钢轨未经打磨,其轨面不平顺依然较大。在打磨过的地段,波磨幅值显著下降。

由于打磨车电机砂轮为恒压跟随磨削,故无法完全消除轨面不平顺,但仍可看出,打磨后的轨面

不平顺均远小于表 1 中的标准要求限值。

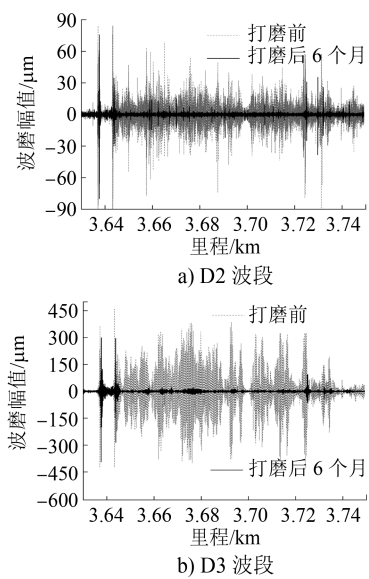


图 8 打磨前和打磨后 6 个月轨面波形图

2.1.3 波磨峰峰值

图 9 为打磨前和打磨后 6 个月的 D2、D3 波段波磨峰峰值。由图 9 可见,波磨峰峰值大幅下降,最大降幅达 90% 以上。同样,在里程 K3+640 的未打磨位置未见波磨峰峰值改善。

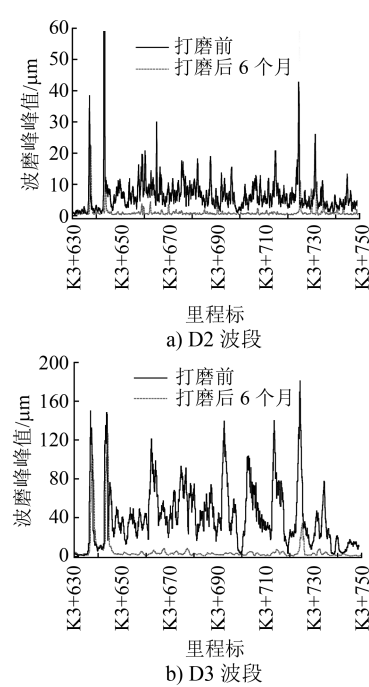


图 9 打磨前和打磨后 6 个月波磨峰峰值

2.1.4 钢轨光带

图 10 为打磨前和打磨后 6 个月钢轨光带实景对比。由图 10 可见:打磨前,钢轨光带呈明显波浪

形宽窄交替;打磨后 6 个月,钢轨光带宽度适中、位置合理,波磨未见明显发展。

2.2 疲劳伤损控制情况

图 11 和图 12 为打磨前和打磨后 6 个月的曲线上下股钢轨疲劳伤损。打磨前曲线上股轨距角、轨顶处存在不同程度的裂纹和掉块;曲线下股光带较宽,轨顶处存在裂纹掉块。打磨后 6 个月检测结果显示,钢轨疲劳伤损控制良好,未见明显发展。

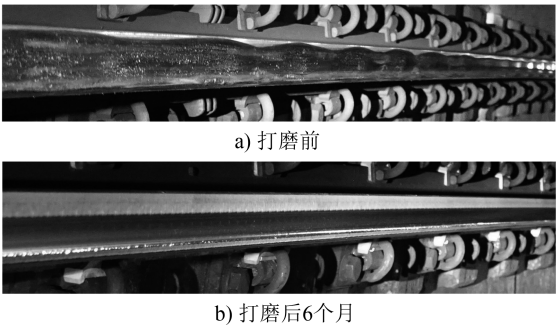


图 10 打磨前和打磨后 6 个月钢轨光带状态

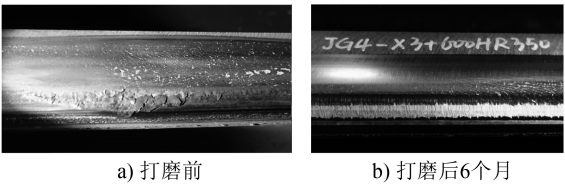


图 11 上股钢轨疲劳伤损情况

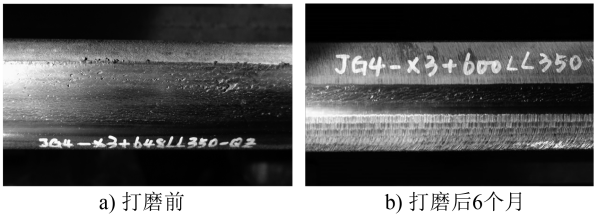


图 12 下股钢轨疲劳伤损情况

2.3 廓形变化情况

经测量,和刚打磨后相比,打磨后 6 个月的钢轨廓形变化较小、保持良好,上股钢轨的轨面垂直磨耗增加了 0.093 mm、下股钢轨的轨面垂直磨耗增加了 0.132 mm。

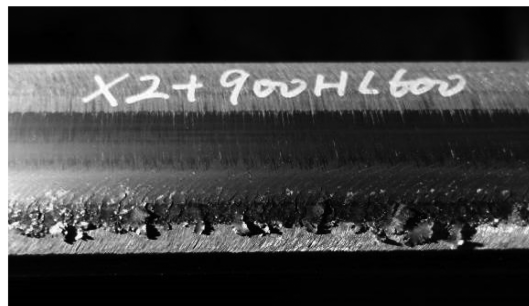
2.4 常规打磨钢轨的效果比对

图 13 为常规打磨钢轨的曲线段(以下简称“对比段”)钢轨波磨和疲劳伤损发展情况。对比段与试验曲线段位于同一区间,其里程为 K2+900。对比段的线路曲线参数与试验段大体接近。

通过现场观测可知,打磨 5 个月后,对比段曲线上股轨道已出现明显波磨,同时还伴随严重的层状掉块。



a) 上股波磨



b) 疲劳伤损

图13 对比段钢轨打磨后5个月的曲线钢轨表面状态

### 3 结语

本文针对北京地铁某半径350 m曲线段钢轨波磨及疲劳伤损问题,采用个性化钢轨廓形打磨技术对其进行了打磨,修正了其钢轨廓形,整治了波磨及疲劳伤损病害。

基于实测车轮踏面、实测打磨前后钢轨廓形,以及实际车辆和线路资料,建立了车辆系统动力学模型,对打磨前后的车辆动力学性能进行了仿真分析。仿真结果表明:实施个性化钢轨廓形打磨后,轮径差、轮轨接触几何关系、接触应力及磨耗水平等关键动力学性能指标均明显改善。

在实施打磨6个月后进行观测,试验曲线段的上下股钢轨光带宽度位置合理,波磨基本消除,钢轨表面疲劳伤损情况控制良好。现场观测结果与仿真分析结果相吻合。

综上所述,地铁小半径曲线采用个性化钢轨廓形打磨是合理且必要的。个性化钢轨廓形打磨可以改善轮轨接触关系,消除或抑制轮轨黏滑振动、减小轮轨接触应力,达到控制钢轨波磨和疲劳伤损等病害产生和发展的目的。

### 参考文献

- [1] 刘维宁,任静,刘卫丰,等.北京地铁钢轨波磨测试分析[J].都市轨道交通,2011(3):6.
- [2] 李克飞,刘维宁,张厚贵,等.地铁钢轨波浪形磨耗的研究分析[J].都市轨道交通,2010(2):1.
- [3] ZAREMBSKI A M. Type of rail corrugation[J]. Railway Track & Structures, 1989: 13.
- [4] 李伟,杜星,王衡禹,等.地铁钢轨一种波磨机理的调查分析[J].机械工程学报,2013(16):26.
- [5] 曹亮,许玉德,周宇,等.城市轨道交通钢轨波浪形磨耗特征分析[J].城市轨道交通研究,2010(2):46.
- [6] 沈钢,张学华,郭满鸿.地铁曲线波浪型磨耗的机理分析[J].同济大学学报,2011(3):381.
- [7] GRASSIE S L, KALIOUSEK J. Rail corrugation: characteristics, causes and treatments[J]. Part F: J. Rail and Rapid Transit, 1993, 207(F): 57.
- [8] 谷爱军,刘维宁.国外城市轨道交通钢轨波浪形磨耗病害研究及治理[J].城市轨道交通研究,2011(12):51.
- [9] 李文勇.钢轨波浪磨耗的调查分析及减缓措施[J].技术与市场,2010(2):46.
- [10] MAGEL E, RONEY M. The blending of theory and practice in modern rail grinding[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2003(10): 921.
- [11] 肖乾,方骏.铁道车辆轮轨滚动接触疲劳裂纹研究综述[J].华东交通大学学报,2015(1):16.
- [12] RINGSBERG J W, JOSEFSON B L. Investigation of the rolling contact fatigue resistance of laser clad twin-disc specimens[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit 215(4): 243.
- [13] 金学松,杜星,郭俊.钢轨打磨技术研究进展[J].西南交通大学学报,2010(1):1.
- [14] 雷晓燕.钢轨打磨原理及其应用[J].铁道工程学报,2000(1):28.
- [15] 周清跃,田常海,张银花,等.高速铁路钢轨打磨关键技术研究[J].中国铁道科学,2012(2):66.
- [16] 张铭达,刘学毅.钢轨预防性打磨原理及应用[J].铁道建筑,2006(7):86.
- [17] 中国铁路总公司.高速铁路钢轨打磨管理办法:铁总运[2014]357号[S].北京:中国铁道出版社,2014.

(收稿日期:2018-12-20)

(上接第184页)

### 参考文献

- [1] 高嵘华.应答器在基于通信的列车控制系统中的应用[J].城市轨道交通研究,2015(11):118.
- [2] 浙大网新众合轨道交通工程有限公司.杭州市地铁四号线ATP子系统技术规格书[R].杭州:杭州市地下铁道有限责任公司,2019.

- [3] 林瑜筠.城市轨道交通信号工程设计[M].北京:中国铁道出版社,2018.
- [4] 赵跟党,李乐.点式列车自动保护(IATP)模式下车载信号丢失、无推荐速度故障分析及处理[J].城市轨道交通研究,2013(10):104.
- [5] 杨建福.高速铁路列控系统中应答器维护[J].铁路通信信号工技术,2012(3):66.

(收稿日期:2019-10-10)