

地铁小半径曲线钢轨型面打磨技术及评价^{*}

林凤涛¹ 胡伟豪² 王瑞涛³ 万晟阳⁴ 李志和⁵

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 330013, 南昌; 2. 中铁物总运维科技有限公司, 100081, 北京;

3. 中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所, 100120, 北京; 4. 南昌轨道交通集团有限公司运营分公司, 330224, 南昌;

5. 中国铁路南昌局集团有限公司鹰潭机务段, 335001, 南昌//第一作者, 副教授)

摘要 为了解决地铁小半径曲线钢轨非正常磨耗问题、延长曲线段钢轨使用寿命、保障列车运行的安全性和稳定性, 通过实测分析小半径曲线钢轨型面数据的磨耗特点及其接触变化, 设计出适用于小半径曲线轨道的钢轨打磨型面 (Opt-60 型面)。建立地铁 B 型车动力学模型和轮轨接触有限元模型, 分别对不同打磨型面在整个维护周期内的钢轨性能进行仿真计算。计算结果表明: 相对于 CN60 打磨型面, Opt-60 型面的打磨量减小了 44.2%, 打磨深度减小了 0.646 mm; 在维护周期内 Opt-60 型面的轮轨横向力和脱轨系数都有明显改善, 安全系数有所提升, 且横向平稳系数与垂向平稳性系数均得到提高; 在一定列车通过量下, Opt-60 型面的轮轨接触面积比 CN60 打磨型面的轮轨接触面积大 14.63%~27.13%, 接触应力减小 19.27%~27.97%。计算结果已明显表明, Opt-60 型面能有效减缓钢轨磨耗、抑制钢轨疲劳, 还能提高列车运行的安全性和平稳性, 优化了列车的动力学性能。

关键词 地铁环形线路; 钢轨打磨型面设计; 评价; 轮轨接触; 有限元仿真分析

中图分类号 U261.42⁺4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.005

Grinding Technology and Evaluation of Rail Profile of Metro Small Radius Curve

LIN Fengtao, HU Weihao, WANG Ruitao, WAN Shengyang, LI Zhihe

Abstract To solve the problem of abnormal rail wear of metro small radius curve, and to prolong the service life of curve section rail, ensuring the safety and stability of train operation, by analyzing rail wear characteristics and change in contact from the small radius curve rail profile measured data, the rail grinding profile (Opt-60 profile) suitable for small radius rail is designed. The dynamic model of metro B-type vehicle and the finite element model of wheel-rail contact are established and are respectively adopted for simulation calculation

of rail performance of different grinding profiles in the entire maintenance cycle. The calculation results show that the grinding amount of Opt-60 profile is reduced by 44.2% compared with that of CN60 profile, and the grinding depth is reduced by 0.646 mm. Within the maintenance cycle, the wheel-rail lateral force and the derailment coefficient of Opt-60 profile are obviously improved, as well as the safety coefficient, the lateral and vertical stability coefficients. Under the condition of certain throughput, the wheel-rail contact area of Opt-60 profile increases by 14.63%—27.13% compared with that of CN60 profile, and the contact stress decreases by 19.27%—27.97%. Calculation results show that the Opt-60 profile can effectively alleviate rail wear and suppress rail fatigue, improving the safety and stability of train operation and optimizing the train dynamic performance.

Key words metro ring line; rail grinding profile design; evaluation; wheel-rail contact; finite element simulation analysis

First-author's address School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

钢轨打磨是有效解决钢轨磨耗的手段之一。传统钢轨打磨主要是为了清除钢轨特殊病害、修复钢轨型面、改善轮轨关系, 以保证钢轨和车轮的接触状态回归到正常状态。传统打磨多采用标准打磨型面, 即 CN60 钢轨廓形。但在实际情况中, 采用 CN60 打磨的地铁线路, 在不同位置上出现了不同程度、不同发展速度的钢轨磨耗问题。这表明, 单一的钢轨打磨型面并不能完全适用于不同的线路、车辆和运行条件。

目前, 钢轨打磨技术已从简单消除钢轨表面损伤的打磨方式向以控制钢轨伤损、提高轮轨接触关系为目标的预防性打磨转变。根据以往的运维经

^{*} 国家自然科学基金项目 (51665014)

验,钢轨型面是影响轮轨关系的重要因素之一,钢轨打磨型面设计的好坏将直接影响钢轨打磨过程及打磨效果^[1]。

目前在型面优化方面,已有多种轮轨型面设计模型或设计方法等研究成果。文献[2]基于轮径差优化了钢轨型面,研发了钢轨打磨设计廓形 60D;文献[3]针对我国轮轨匹配存在的问题研发了新轨头廓形钢轨 60N;文献[4]根据轮轨接触理论,以轮轨法相间隙为优化目标,对道岔钢轨打磨廓形优化。而这些型面设计研究只针对型面本身进行评价,对设计型面在维护周期中的动力学性能和轮轨接触状态的关注少之又少。

本文主要基于轮轨接触和动力学分析,针对某地铁环形线路条件下的小半径曲线和地铁轨道结构参数,以减小磨耗量、延长钢轨使用寿命、提高列车动力学性能为原则,设计得到钢轨外轨打磨型面,并在整个钢轨维护周期内进行性能评价,使得设计型面在整个维护周期内都可以达到优化列车行车安全性、降低轮轨振动噪声、控制轮轨接触疲劳、降低磨耗和减缓裂纹扩展的效果。

1 钢轨型面设计

1.1 钢轨型面数据的采集

某地铁环形线路中小半径曲线钢轨的侧磨等钢轨异常病害易导致车辆运行平稳性和乘坐舒适性大大降低,需通过钢轨打磨来改善轮轨接触状态,以改善其动力学性能。由于曲线外轨侧磨严重,病害易出现,故本文仅分析小半径曲线的外轨。

通过实际测量得到南昌地铁小半径曲线下钢轨外轨不同时期的磨耗,如图 1 所示。根据磨耗位置和磨耗程度,把外轨分别分成 a_1 、 b_1 、 c_1 三段。由图 1 可知:外轨 a_1 段为轨头横坐标 $x = -36 \sim 0$ mm 处,基本没有磨损; b_1 段为轨头 $x = 0 \sim 25$ mm 处,磨损比较严重; c_1 段为轨头 $x = 25 \sim 36$ mm 处,磨损最为严重。进一步研究可知:在磨耗发展的初期, c_1

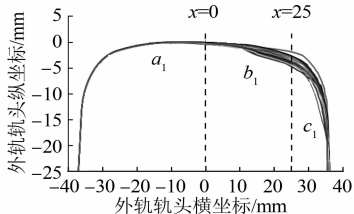


图 1 实测钢轨型面图

Fig. 1 Profile field measurements

段垂磨和侧磨的速度基本相当;在磨耗中后期, c_1 段侧磨速度不断加大,垂磨速度降低。

1.2 钢轨打磨型面的设计

钢轨打磨型面的设计主要基于以下原则:①减小每次钢轨打磨的打磨量,延长钢轨的使用寿命。②通过增大滚动圆半径差,改善地铁车辆在环型线路中小半径曲线的动力学性能,以提高车辆曲线通过性能、减小磨耗量。③增加轮轨接触面积,减小轮轨接触应力,减缓滚动接触疲劳的产生。

基于非对称打磨理论^[5-7],对外轨轨头中部和外侧(a_1 段)进行打磨,以增大内外车轮滚动圆半径差,提高列车的曲线通过性能,减小车轮轮缘部分和外轨轨侧的接触,减小侧磨影响; b_1 段的打磨则尽量贴近磨耗后型面的曲线,不仅能保证良好的轮轨接触特性,还能减小每次钢轨维护过程中的打磨量,延长钢轨使用寿命; c_1 段需对 60 kg 标准钢轨和磨耗轨进行平滑过渡,采用插值拟合法^[8]得出钢轨打磨型面。拟合后的钢轨打磨型面 (Opt-60 型面) 和标准打磨型面 (CN60 型面) 的对比如图 2 所示。由图 2 可以看出, a_1 段最大垂向材料去除量 L_1 为 0.825 mm, c_1 段最大横向材料去除量 L_2 为 1.236 mm。

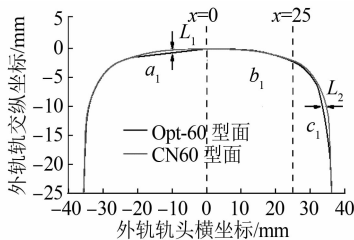


图 2 Opt-60 型面与 CN60 型面对比图

Fig. 2 Comparison between Opt-60 and CN60 profiles

2 车辆-轨道动力学模型

为了更加具体地分析钢轨型面变化对地铁车辆各项动力学性能和指标的影响,在 UM (Universal Mechanism) 软件中建立地铁车辆 B 型车的动力学模型。模型考虑了轮轨接触几何、轮轨蠕滑特性、车辆悬挂等非线性环节,由 1 个车体、2 个转向架、8 个轴箱及 4 对轮对组成。车辆动力学结构拓扑图如图 3 所示。

将计算线路设置为直线-缓和曲线-圆曲线-缓和曲线-直线的线路形式,轨道激励为美国 5 级谱,钢轨廓形分别设置为 CN60 和 Opt-60,车轮型面为

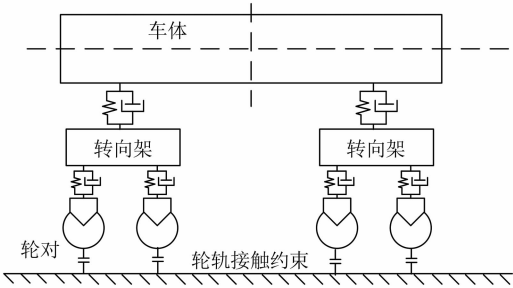


图 3 车辆动力学结构拓扑图

Fig. 3 Topological diagram of vehicle dynamics structure

LMA, 轮轨摩擦系数为 0.3, 缓和曲线长度为 80 m。根据 GB 50157—2013《地下铁道设计规范》, 设置曲线半径 $R=300\text{ m}$, 则有

$$v_{Q_{\max}} = \sqrt{(h_{\max} + h_{q_{\max}})R/11.8} = 3.9\sqrt{R} \quad (1)$$

式中:

$v_{Q_{\max}}$ ——地铁列车通过曲线时的最大运行速度;

h_{\max} ——最大超高, $h_{\max}=120\text{ mm}$;

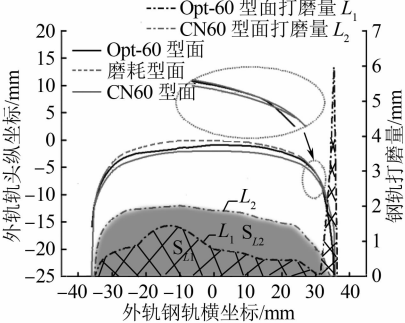
$h_{q_{\max}}$ ——最大欠超高, $h_{q_{\max}}=60\text{ mm}$ 。

根据式 (1) 可得, $v_{Q_{\max}}=60.7\text{ km/h}$ 。通过 UM 软件计算车辆通过计算线路时的各项动力学性能指标, 对比分析设计的钢轨廓形对车辆动力学各项指标的影响。

3 对 Opt-60 型面的评价

3.1 钢轨打磨量分析

选取某地铁线路的磨耗钢轨型面, 对按 CN60 和 Opt-60 型面的打磨量进行对比, 如图 4 所示。根据对比结果, 在对相同的磨耗轨进行打磨时: 对于曲线段外轨, Opt-60 型面的打磨面积 $S_{L_1}=63.68\text{ mm}^2$, CN60 型面的打磨面积 $S_{L_2}=114.13\text{ mm}^2$, S_{L_2} 比 S_{L_1} 小 44.2%; 与 CN60 相比, Opt-60 型面轨顶处打磨深度最大



注: S_{L_1} 、 S_{L_2} 分别为打磨量 L_1 及 L_2 横坐标轴所围面积。

图 4 不同型面的钢轨打磨对比图

Fig. 4 Comparison of rail grinding of different profiles

减小了 0.65 mm。可见, Opt-60 型面打磨量小、打磨深度小, 可有效延长钢轨的使用寿命。

3.2 不同钢轨型面的动力学分析

仿真工况为: 地铁列车以 60 km/h 的速度通过小半径曲线, 钢轨型面分别设置为磨耗钢轨型面、CN60 型面和 Opt-60 型面。分别计算不同工况下车辆一位轮对的轮轨横向力和脱轨系数, 如图 5 所示。

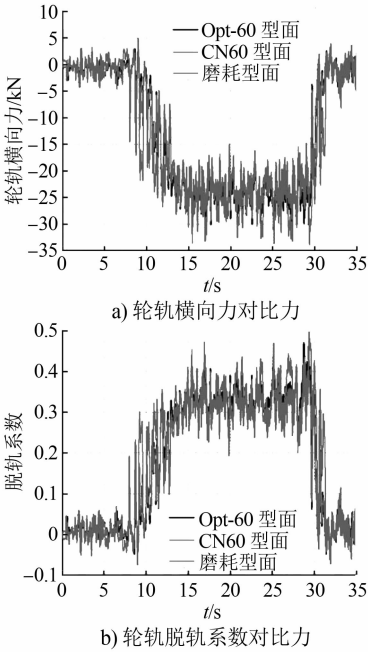


图 5 不同钢轨型面时的车辆动力学结果对比图

Fig. 5 Comparison of vehicle dynamics results of different rail profiles

由计算结果对比可知: 磨耗型面 (打磨前) 的轮轨横向力为 34.93 kN, 脱轨系数为 0.587; CN60 型面的轮轨横向力为 31.45 kN, 比打磨前减小了 9.96%, 脱轨系数为 0.471, 比打磨前减小了 19.7%; Opt-60 型面的轮轨横向力为 30.34 kN, 比打磨前减小了 13.14%, 脱轨系数为 0.422, 比打磨前减小了 28.1%。

由此可知, 预打磨钢轨型面无论是 CN60 还是 Opt-60, 打磨后轮轨横向力和脱轨系数都会明显减小, 动力学性能都能得到改善。此外, 采用 Opt-60 型面时的车辆动力学性能不仅能满足相关行业标准, 还略优于采用 CN60 型面时。

4 对 Opt-60 型面打磨周期内的评价

轮轨力相互作用时会产生磨耗, 而轮轨磨耗会引起钢轨、车轮表面材料的损失, 导致型面的变化。型面的变化又会对轮轨接触状态和几何关系产生

巨大的影响。钢轨磨耗的演化过程是一个连续的、无间断的过程。

对整个钢轨打磨周期内的整体动力学性能进行评价,要先对整个磨耗过程进行离散,再进行迭代计算,并假设在每一步的迭代过程中,型面不会发生变化;在每一步计算完成后,通过由磨耗分布计算模型求得的磨耗速率结果,来计算累计磨耗量更新型面;型面更新后,进入下一步的计算。

本研究采用的自适应步长算法^[9],可以根据磨耗速率不断调整迭代步长的大小,以避免定步长所引起的计算结果偏大或者偏小,减小计算误差。本研究设计的型面更新条件为:最大磨耗深度为 0.1 mm。通过 3 次样条曲线平滑插值法对更新的型面进行平滑处理。钢轨型面更新策略流程图见图 6。

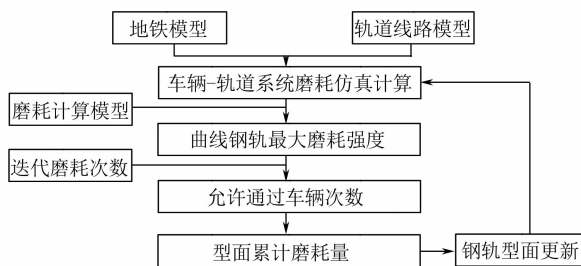


图 6 钢轨型面更新策略流程图

Fig. 6 Flow chart of rail profile update strategy

选取某运营周期内的钢轨,分别打磨成 CN60 和 Opt-60 型面,通过 UM 软件来仿真计算整个运营周期内的钢轨型面变化和其他安全性指标的变化。在仿真过程中,假设钢轨在 2 年内不进行打磨,车轮按照一定周期进行镟修,忽略车轮变化的影响。根据地铁实际情况,每天运行时长为 17 h,在高峰期增加计算车次,每天大约运行 300 趟。按照 8 节编组列车计算得到 1 年的列车通过量为 87.6 万次,维护周期为 2 年。对列车通过量为 200 万次、时长大约为 2 年的运行历程进行仿真,并依据 GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》,评定车辆动力学性能的各项指标。

4.1 维护周期内的车辆安全性指标分析

本文采用轮重减载率、脱轨系数、轮轨横向力和轮轨垂向力作为车辆安全性指标。按每次型面更新后的最大值取值,仿真得到安全性指标见图 7。

由图 7 a) 和图 7 b) 可见,在钢轨寿命周期内,轮重减载率和轮轨垂向力的变化不大,相对较平稳,说明钢轨型面优化对地铁小半径曲线的轮轨垂

向力和轮重减载率的影响不明显。分别计算 200 万次列车通过次数下的轮重减载率均值发现,Opt-60 型面下均值为 0.256, CN60 型面下均值为 0.257。这说明钢轨型面的优化可略微减小地铁小半径曲线的轮重减载率。

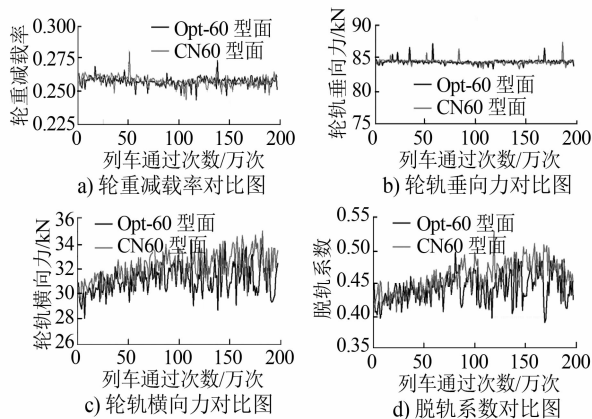


图 7 维护周期内安全性指标对比图

Fig. 7 Comparison of maintenance cycle safety indicators

由图 7 c) 可见,在 Opt-60 型面与 CN60 型面下,轮轨横向力均是一直在增大的,表明钢轨磨耗引起的型面变化会直接导致轮轨横向力的增加。此外,在整个钢轨维护周期内,Opt-60 型面的轮轨横向力略小于 CN60 型面的轮轨横向力,表明采用 Opt-60 型面可降低轮轨横向力,使车辆曲线通过性能更好,可降低侧磨,延长钢轨的使用寿命。

由图 7 d) 可见,在整个维护周期内,在 CN60 型面和 Opt-60 型面下,脱轨系数均在整体增加,但均未超过 GB 5599—1985 规定的限值。这说明钢轨磨耗导致型面变化会导致脱轨系数的增加。当列车通过量为 0~80 万次时,CN60 型面和 Opt-60 型面的脱轨系数差距较小,在列车通过量超过 80 万次时,Opt-60 型面的脱轨系数明显增速变缓,小于 CN60 型面的脱轨系数。这表明 Opt-60 型面在钢轨维护周期中具有更高的安全性,可以保证列车全周期的安全运行。

由此可见,虽然 Opt-60 型面对轮重减载率和轮轨垂向力的影响不大,但在整个维护周期内能有效减小轮轨横向力和脱轨系数。相对于 CN60 型面来说,采用 Opt-60 型面的车辆曲线通过性能更好,小半径曲线车辆运行安全性也更高。

4.2 维护周期内平稳性指标分析

根据 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》,客车平稳性由车体振动加

速度和平稳性指标评定^[9],其中平稳性指标为:

$$W_i = 7.08 \left(\frac{A_i^3}{f_i} F(f_i) \right)^{\frac{1}{10}} \tag{2}$$

式中:

- W_i ——第 i 个工况下的平稳性系数;
 - A_i ——第 i 个工况下的车体振动加速度, m/s^2 ;
 - f_i ——第 i 个工况下的振动频率, Hz ;
 - $F(f_i)$ ——与 f_i 有关的修正系数。
- 则平稳性总指标为:

$$W = (W_1^{10} + W_2^{10} + \cdots + W_n^{10})^{\frac{1}{10}} \tag{3}$$

根据式(2)及式(3)可得列车在某环形线路上运行的平稳性系数,如图 8 所示。

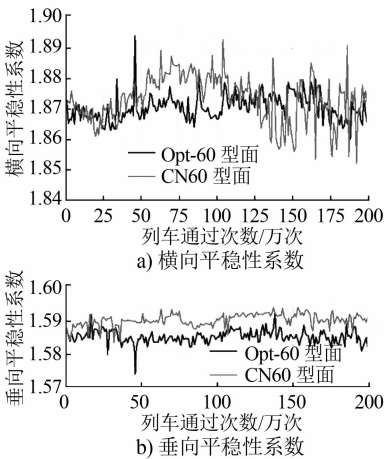


图 8 列车在某环形线路上运行时的平稳系数
Fig. 8 Train stability coefficient during operation on certain ring line

由图 8 a)可以看出:①采用 CN60 型面时,列车通过量为 0~50 万次时,列车运行的横向平稳性系数更高,且横向平稳性系数整体趋于增大,表明在维护周期内钢轨磨耗引起的型面变化导致轮轨接触状态变差,车体平稳性有所降低;当列车通过量超过 100 万次之后,平稳性系数幅值增大,每次迭代变化幅度也有所增加,虽然横向平稳性系数仍在 GB 5599—1985 规定的范围内,但大幅度变化的平稳性系数不利于行车平稳。②采用 Opt-60 型面时,横向平稳性系数虽在列车通过量为 0~50 万次时存在一定的波动,但在整个钢轨使用过程中一直比较稳定;这表明采用 Opt-60 型面打磨时,在整个维护周期内,即使磨耗不断增加,型面变化也仍在可控范围内,有利于行车稳定。

由图 8 b)可见,无论采用 CN60 型面还是 Opt-

60 型面,在维护周期内垂向平稳性系数的变化都不是特别明显。这说明钢轨磨耗对垂向平稳性的影响不大。此外,与 CN60 型面相比,Opt-60 型面下的垂向平稳性系数总体较小,平稳性更好。

从整个维护周期总体看来,与 CN60 标准型面相比,Opt-60 型面的列车运行横向平稳性及垂向平稳性都略优。

4.3 维护周期内的钢轨磨耗分析

本文采用 Archard 磨耗模型分别计算了 CN60 型面和 Opt-60 型面下轮轨通过次数为 100 万次和 200 万次的磨耗量。绘制磨耗后的外轨型面图和磨耗深度图,并与原始型面对比如图 9 所示。

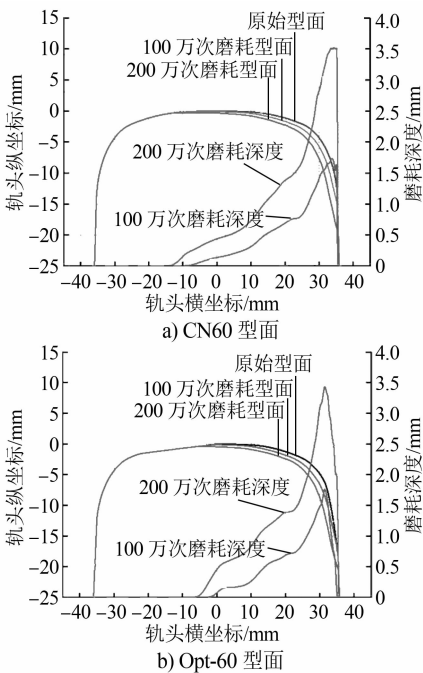


图 9 不同列车通过量的钢轨磨耗对比图
Fig. 9 Comparison of different train throughput wear

由对比结果可知:

- 1) 当列车通过量为 100 万次时:CN60 型面的磨耗面积为 25.73 mm^2 ,磨耗位置为 $x = -10 \sim 36 \text{ mm}$;Opt-60 型面的磨耗面积为 22.62 mm^2 ,磨耗位置为 $x = 3 \sim 35 \text{ mm}$ 。就磨耗面积来看,Opt-60 型面比 CN60 型面小 13.78%。
- 2) 当列车通过量为 200 万次时:CN60 型面的磨耗面积为 55.98 mm^2 ,磨耗位置为 $x = -15 \sim 35 \text{ mm}$;Opt-60 型面的磨耗面积为 52.03 mm^2 ,磨耗位置为 $x = -10 \sim 35 \text{ mm}$ 。就磨耗面积来看,Opt-60 型面比 CN60 型面小 7.06%。

可以看出,在整个维护周期内,与 CN60 型面相

比,Opt-60 型面的累计磨耗量和磨耗宽度都明显更优,其性能也有一定的提升。

5 轮轨接触

5.1 轮轨接触有限元模型

为了解 Opt-60 型面和 CN60 型面在磨耗过程中的接触状态变化,选取打磨型面为 Opt-60 和 CN60 的钢轨,在原始打磨型面、列车通过量 100 万次和 200 万次的磨耗型面进行有限元接触分析,并对比轮轨接触状态的变化。计算工况如表 1 所示。

表 1 轮轨静态计算工况说明

工况	钢轨型面
工况 1	Opt-60 型面
工况 2	Opt-60 型面的 100 万次磨耗型面
工况 3	Opt-60 型面的 200 万次磨耗型面
工况 4	CN60 型面
工况 5	CN60 型面的 100 万次磨耗型面
工况 6	CN60 型面的 200 万次磨耗型面

利用 ANSYS 有限元分析软件建立轮轨接触模型。为了更真实地模拟实际接触状态,在建模过程中考虑了曲线部分超高和轮对的横移。车轮与钢轨接触区网格单元细化至 1 mm,非接触区网格单元从 2 mm 逐渐过渡到 60 mm 不等;车轮和钢轨之间的相互作用力可以近似等效为柔性体与柔性体之间的接触问题;钢轨和车轮的材料属性定义为弹性模量 $E=214\text{ GPa}$,泊松比为 0.29,密度为 7.85 t/m^3 。根据图 5 的仿真结果,轮轨垂向力取 85 kN,横向力取 25 kN,横移量取 4 mm,轮轨之间的摩擦系数取 0.3。建立的有限元模型如图 10 所示。

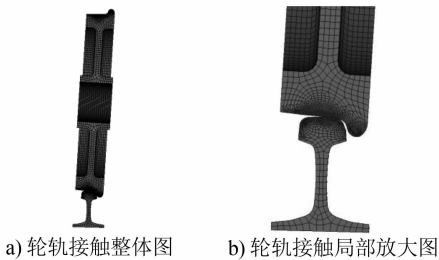


图 10 轮轨接触有限元模型

Fig. 10 Wheel-rail contact finite element model

5.2 计算结果与分析

根据表 1 的 6 种工况分别计算轮轨接触面积和轮轨接触应力。轮轨接触计算结果见图 11,应力云图对比图如图 12 所示。

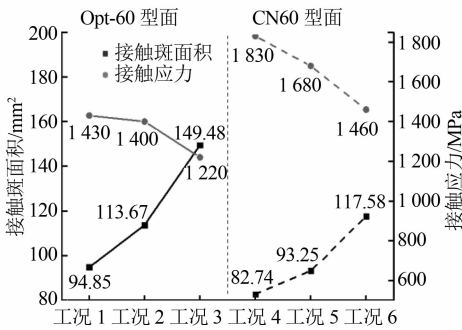


图 11 轮轨接触计算结果对比图

Fig. 11 Comparison of wheel-rail contact calculation results

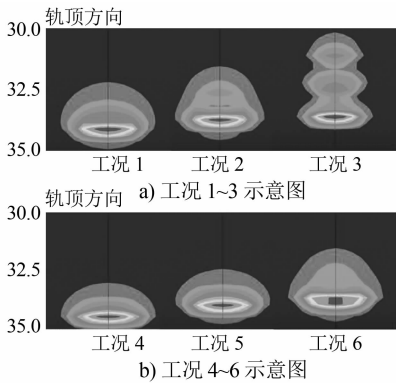


图 12 轮轨接触斑应力云图对比

Fig. 12 Stress nephogram comparison of wheel-rail contact spots

对比图 12 中工况 1 和工况 4 的轮轨接触斑可见,与 CN60 型面相比,Opt-60 型面的接触位置更靠近轨顶部分,其接触斑面积大 14.63%、接触应力小 27.97%。对比图 12 中工况 2 和工况 5 的的轮轨接触斑可见,在列车通过量达到 100 万次之后,与 CN60 型面相比,Opt-60 型面的接触斑面积大 21.89%、接触应力小 20%;对比图 12 中工况 3 和工况 5 的轮轨接触斑可见,在列车通过量超过 200 万次之后,由于磨耗增加引起型面变化导致 2 个型面的接触状态均有恶化,但与 CN60 型面相比,Opt-60 型面的接触面积大 27.13%、接触斑长度增加、接触应力小 19.67%。

总体看来,相对于 CN60 型面来说,Opt-60 型面不论是在刚打磨完成时还是在钢轨维护周期内,都能使接触斑面积增大、接触应力减小。这表明 Opt-60 打磨型面具有更好的适应性,有利于减小钢轨的塑性变形、降低接触疲劳等表面接触损伤。

6 结语

本文针对某地铁环形线路小半径曲线,以延长

曲线段钢轨使用寿命、改善轮轨动力学性能为目标,对内外轨型面进行优化,得到设计的 Opt-60 打磨型面。其动力学计算结果表明,打磨可有效改善列车动力学性能,且 Opt-60 型面性能略优于 CN60 型面性能。

对某地铁环形线路的磨耗钢轨型面进行打磨量分析。分析结果表明,与采用 CN60 型面相比,采用 Opt-60 型面后曲线外轨打磨面积减小 44.2%、轨顶处打磨深度最大减小 0.646 mm,曲线内轨打磨量变化不明显。

建立地铁车辆 B 型车动力学模型,模拟环形轨道小半径曲线线路,分别按 CN60 型面和 Opt-60 型面作为打磨型面,对整个维护周期内的列车动力学性能进行对比。结果表明,采用 Opt-60 型面时的列车安全性和平稳性都略优。在相同列车通过量的情况下,与 CN60 型面相比,Opt-60 型面的钢轨总体磨耗量降低了 7.06%~13.78%,且磨耗宽度和磨耗深度均有所改善。

模拟分析表明,与 CN60 型面对比,Opt-60 型面在相同的使用情况下接触斑面积明显增大,接触应力明显减小。这说明采用 Opt-60 型面可有效抑制钢轨疲劳,进而避免掉块剥离等伤损发生。此外,在整个维护周期内,Opt-60 型面表现出良好的适应性。

参考文献

- [1] 孙京健. 浅谈地铁钢轨廓形打磨技术应用及发展方向[J]. 铁路采购与物流,2019(5):40.
SUN Jingjian. Brief analysis of application and development direction of rail profile grinding technology in metro[J]. Railway Purchase and Logistics, 2019(5):40.
- [2] 王军平,沈钢,毛鑫,等. 基于轮径差的直线钢轨廓形优化设计方法[J]. 中国铁路,2018(11):87.
- [3] WANG Junping, SHEN Gang, MAO Xin, et al. The optimized design method of straight rail profile based on rolling radii difference[J]. China Railway,2018(11):87.
- [4] 周清跃,刘丰收,俞喆,等. 我国铁路钢轨型面优化研究[J]. 中国铁路,2017(12):7.
ZHOU Qingyue, LIU Fengshou, YU Zhe, et al. Study on the optimization of rail profile in China[J]. China Railway, 2017(12):7.
- [5] 赵向东. 基于轮轨法向间隙的道岔钢轨廓形优化方法[J]. 铁道建筑,2018(3):83.
ZHAO Xiangdong. Optimization method for turnout rail profile based on normal gap between wheel and rail[J]. Railway Engineering,2018(3):83.
- [6] PERSSON I, NILSSON R, BIK U, et al. Use of a genetic algorithm to improve the rail profile on Stockholm underground[J]. Vehicle System Dynamics,2010,48(sup1):89-104.
- [7] 黄育斌,王文健,郭俊,等. 钢轨非对称打磨对车辆运行性能影响[J]. 铁道科学与工程学报,2015(2):264.
HUANG Yubin, WANG Wenjian, GUO Jun, et al. Effect of asymmetrical rail grinding on running performance of vehicles[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015(2):264.
- [8] 贾晋中,司道林. 朔黄铁路小半径曲线轨道钢轨打磨目标型面研究[J]. 中国铁道科学,2014(4):15.
JIA Jinzhong, SI Daolin. Target profile of rail grinding for small radius curve of Shuohuang Railway[J]. China Railway Science,2014(4):15.
- [9] 林凤涛. 高速列车车轮磨耗及型面优化研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2014.
LIN Fengtao. Research on wheel wear and wheel profile optimization of high speed train[D]. Beijing:China Academy of Railway Sciences,2014.
- [10] 王璞. 重载铁路轮轨磨耗预测及钢轨型面优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
WANG Pu. Prediction of wheel-rail wear and optimization of rail profile for heavy haul railway[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2017.

(收稿日期:2019-12-11)

(上接第20页)

- ZHANG Xumin, ZHAO Huaiming, WANG Daqi. Complete street and route planning for modern trams[J]. Urban Rapid Rail Transit,2019(2):115.
- [4] 周小华,路静,王敏. 武汉光谷现代有轨电车与其他交通方式的一体化衔接[J]. 都市快轨交通,2016(5):116.
ZHOU Xiaohua, LU Jing, WANG Min. Research on the integrated connection between modern tram of Optics Valley of China and other transportation modes[J]. Urban Rapid Rail Transit,2016(5):116.
- [5] 贺方会,张杰. 现代有轨电车新区发展适用性研究[J]. 都市

快轨交通,2016(1):97.

HE Fanghui, ZHANG Jie. Research on the development applicability of modern trams in new urban districts[J]. Urban Rapid Rail Transit,2016(1):97.

[6] 张子栋. 有轨电车系统规划设计研究[J]. 城市交通,2013(4):30.

ZHANG Zidong. Streetcar system planning and design[J]. Urban Transport of China,2013(4):30.

(收稿日期:2020-01-19)