

地铁橡胶浮置板小半径曲线段钢轨波磨及振动测试分析*

涂勤明¹ 罗信伟¹ 杨哲² 刘庆杰² 冯青松²

(1. 广州地铁设计研究院, 510010, 广州;

2. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 330013, 南昌//第一作者, 高级工程师)

摘要 为研究小半径曲线段地铁不同轨道结构对钢轨波浪形磨耗(以下简称“钢轨波磨”)的产生与发展的影响,分析了列车通过橡胶浮置板轨道引起的振动特性问题。选取某地铁区段进行波磨测试,其中包括普通整体道床直线段、普通整体轨道曲线段和橡胶浮置板曲线段。此外,以橡胶浮置板区段某一代表断面为例,测试其隧道内的振动情况。研究表明:钢轨波磨主要出现在小半径曲线段的内侧钢轨,而其外侧钢轨波磨的产生和发展与轨道结构有着密切的关系;橡胶浮置板轨道的外侧钢轨更容易产生钢轨波磨问题;内侧钢轨先产生波磨,并在继续使用的过程中向外侧钢轨传递;波磨在整体刚度较小的橡胶浮置板轨道内发展速度更快;曲线段外侧钢轨的不平顺等级在所有波长范围内均有明显增大。

关键词 地铁;橡胶浮置板;小半径曲线;钢轨波磨;现场实测

中图分类号 U213.4⁺2;U211.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.05.014

Rail Corrugation and Vibration Test Analysis of Metro Rubber Float Slab Small Radius Curve Section

TU Qinming, LUO Xinwei, YANG Zhe, LIU Qingjie, FENG Qingsong

Abstract To analyze the influence of different rail structures on rail corrugation generation and development in metro small radius curve sections, the characteristics of vibration caused by train passing rubber floating slab track are studied. A metro section is selected for corrugation test, including the straight section of ordinary monolithic track bed, the curve section of ordinary monolithic track and the curve section of rubber floating slab. In addition, a representative section of rubber floating slab section is selected to test the vibration condition in the tunnel. Research results show that rail corrugation mainly occurs in the inner rail of small radius curve section, while the generation and development of outer rail corrugation are closely relat-

ed to track structure; the outer rail of rubber floating slab track is more prone to rail corrugation. The inner rail is the first to generate corrugation and it is transmitted to the outer rail during continuous service. Rail corrugation develops faster in the rubber floating slab track with lower overall stiffness, and the irregularity level of the outer rail in curve section increases significantly in all wavelengths.

Key words metro; rubber floating slab; small radius curve; rail corrugation; field measurement

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

随着地铁运营里程的增加,地铁钢轨波浪形磨耗(以下简称“钢轨波磨”)已成为一种常见的钢轨病害问题。根据调查发现,地铁线路小半径曲线段存在大量的钢轨波磨问题,对地铁的安全运营造成了较大的影响。此外,在部分直线段线路中也存在较为明显的钢轨波磨问题^[1-2]。小半径曲线段的钢轨波磨问题最为严重,几乎所有小半径曲线段都会产生钢轨波磨问题,且钢轨在打磨过后的短时间内波磨问题又会再次出现^[3-4]。此外,相较于其他线路地段,小半径曲线段在列车通过时引起的环境振动噪声问题也更为严重。小半径曲线段的有效减振措施主要为采用浮置板轨道和减振扣件轨道^[5]。因此本文通过现场对比实测的方式,统计分析了小半径曲线铺设浮置板轨道段钢轨波磨特征及其引起的振动特性,研究结论可为工程设计和运营维护人员提供基础数据及参考。

1 测试概况

测试位置选定为南方某城市地铁隧道橡胶浮置板轨道段,其为矩形断面隧道,曲线半径为 320

* 江西省自然科学基金项目(20202BAB204026);国家自然科学基金项目(51868024)

m,测试包括隧道内及地面振动测试和钢轨波磨测试。选取橡胶浮置板曲线段中间断面作为测试对象,测点位置及测试内容如表 1 所示,测点布置位置示意图如图 1 所示。采用 352C04 加速度传感器测试隧道内的钢轨振动加速度,采用 393B04 加速度传感器测试轨道板和隧道壁的振动加速度。采用 RMF-1100 波磨小车进行检测,推行过程中的采样间隔为 0.002 m,采样仪器可同时连续采集左右两侧钢轨,进而获得钢轨表面不平顺的时程情况。分 3 种工况进行波磨测试:工况 1——普通整体道床直线段;工况 2——普通整体道床小半径曲线段;工况 3——橡胶浮置板小半径曲线段。由列车通过时间可以计算获得列车通过测点位置的平均速度约为 60 km/h。测试路段基本情况如表 2 所示。

表 1 测点位置及测试内容

Tab. 1 Location of measuring points and test contents		
测点编号	测点位置	测试内容
RA1	内轨	钢轨竖向振动加速度
RA2	外轨	钢轨竖向振动加速度
BA3	整体道床	整体道床竖向振动加速度
TA4	曲线内轨侧隧道壁	隧道壁竖向振动加速度
TA5	曲线外轨侧隧道壁	隧道壁竖向振动加速度

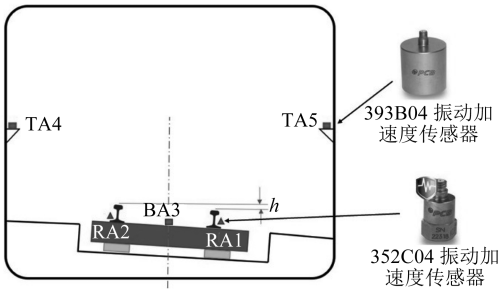


图 1 测点布置位置示意图

Fig. 1 Layout diagram of measuring points

表 2 测试段线路基本情况

Tab. 2 Basic information of test line sections				
测试路段	线路半径/m	坡度/%	特征波长/mm	轨道结构
直线段		3.45		普通整体道床
曲线段	320	25.50	160~200	普通整体道床
曲线段	320	19.70	160~200	橡胶浮置板轨道

2 钢轨波磨特征分析

针对钢轨波磨的不同磨耗程度,依据铁运[2006]146号《铁路线路修理规则》,计算 1/3 倍频程波长的钢轨表面不平顺粗糙度级,并将其作为钢

轨波磨的评价指标。钢轨表面不平顺粗糙度级 L_r 可以表示为:

$$L_r = 10 \lg \left(\frac{r_{rms}^2}{r_0^2} \right)$$

(1)

式中:

- r_{rms} ——钢轨表面波磨幅值有效值,单位 μm ;
- r_0 ——钢轨表面短波不平顺参考值,取 $r_0 = 1 \mu\text{m}$ 。

3 种工况下的轨道内外侧钢轨波磨曲线如图 2 所示,3 种工况下的轨道内外侧钢轨不平顺等级对比如图 3 所示。由图 2 和图 3 可知:①在直线段,内外侧钢轨均不存在较为明显的特征波长。②在普通整体式道床小半径曲线段,内侧钢轨表面开始出现较为明显的波磨情况,特征波长出现在 160~200 mm 附近,波深约为 0.3 mm;外侧钢轨表面无明显的特征波长。③在橡胶浮置板轨道小半径曲线段,内外侧钢轨均存在较为明显的波磨情况,特征波长在 160~200 mm 附近;内侧钢轨波深约为 0.3 mm,外侧钢轨波深约为 0.1 mm,内侧钢轨不平顺幅值大于外侧钢轨不平顺幅值,且与普通整体式道床小半径曲线段的内侧钢轨不平顺幅值基本一致。不同测试区段的波磨情况统计如表 3 所示。

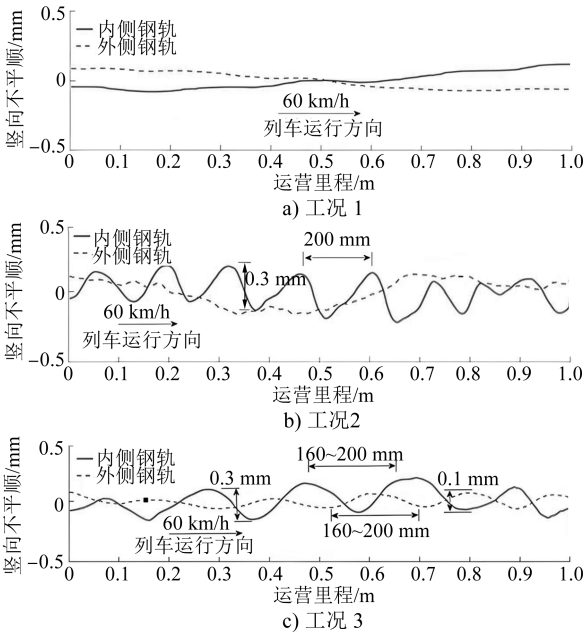


图 2 3 种工况下的轨道内外侧钢轨波磨曲线

Fig. 2 Inner and outer rail corrugation curves under three working conditions

通过对比 3 种工况下内侧钢轨的不平顺等级可以发现,内侧钢轨表面波磨主要受到曲线半

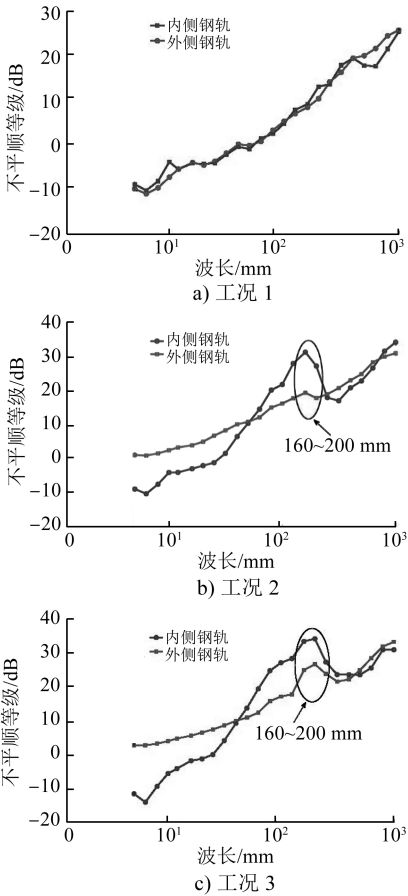


图 3 3 种工况下的轨道内外侧钢轨不平顺等级对比

Fig. 3 Irregularity level comparison of inner and outer rail under three working conditions

表 3 不同测试区段的波磨情况统计

Tab. 3 Statistics of corrugation situation in different test sections

测试区段	特征波长/mm	波磨幅值/mm	不平顺等级/dB
直线段内侧钢轨	—	—	9.4
直线段外侧钢轨	—	—	8.7
曲线段内侧钢轨	160~200	0.3	31.3
曲线段外侧钢轨	—	—	19.4
浮置板曲线段内侧钢轨	160~200	0.3	33.5
浮置板曲线段外侧钢轨	160~200	0.1	25.1

径等因素的影响,而轨道结构对其产生与发展的影响不大。通过对比 3 种工况下外侧钢轨的不平顺等级可以发现:工况 1 无明显特征波长,工况 2 存在不明显波磨,但其在所有波长段的不平顺等级均比直线段的不平顺等级大 5~10 dB,说明曲线段外轨虽然没有形成显著的特征波磨,但相较于普通直线段仍存在较为明显的磨损现象;工况 3 的特征波长在 160~200 mm 附近,在非特征波长段其不平顺等级

与工况 2 的不平顺等级基本一致。通过计算可知,当运行速度为 60 km/h 时,由波长为 160~200 mm 的特征波长引起的通过频率为 83~104 Hz。

以 3 种工况下总长为 370 m 的线路为例,研究波磨在直线段和曲线段之间的过渡情况,每隔 10 m 对线路进行一次不平顺等级 1/3 倍频程计算。内外侧钢轨在 3 种工况下的不平顺等级变化情况如图 4 所示。由图 4 可知:在由直线段过渡到曲线段的过程中,存在明显的不平顺等级增大过渡区段;在曲线段特征波长附近,不平顺等级呈现出内侧轨道大于外侧轨道的现象,但在非特征波长区段,外侧钢轨的不平顺等级显著大于内侧钢轨的不平顺等级。

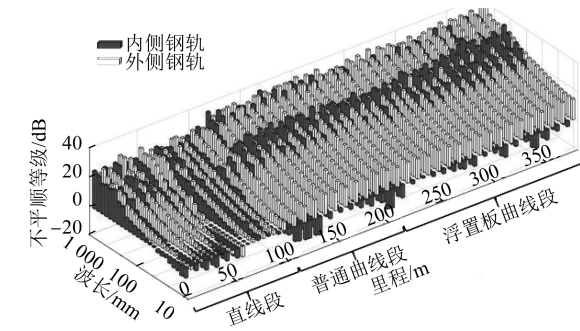


图 4 内外侧钢轨在 3 种工况下的不平顺等级变化情况

Fig. 4 Changes of inner and outer rail irregularity level under three working conditions

综上所述,小半径曲线段内侧钢轨表面波磨的产生与发展主要受曲线半径等因素的影响,与轨道结构关系不大。而小半径曲线外侧钢轨波磨的产生与发展受轨道结构的影响较大。同时,外侧钢轨的波磨很可能是由于内侧钢轨表面产生波磨后在继续使用的过程中传递至外侧钢轨的。同时,在曲线段,外侧钢轨不平顺等级在所有波长范围内均有明显增大,这可能是引起列车在通过曲线段时产生剧烈振动的重要原因之一。

3 振动加速度测试分析

浮置板曲线段振动状况统计表如表 4 所示,橡胶浮置板曲线段隧道内振动加速度级及其频谱对比如图 5 和图 6 所示。由表 4、图 5 和图 6 可知:①橡胶浮置板曲线轨道振动特征频率约为 200.0 Hz、80.0 Hz 和 31.5 Hz,且其内外轨之间无明显差别,内外侧钢轨的加速度峰值有效值分别为 9.49 m/s² 和 10.41 m/s²,Z 振级分别为 114.4 dB 和 115.0 dB;曲

线段内外侧钢轨的振动加速度并不受波磨发展程度的影响。②轨道板振动加速度的特征频率约为 200.0 Hz、80.0 Hz 和 31.5 Hz,且其加速度峰值有效值为 6.45 m/s^2 ,Z 振级为 110.7 dB;轨道板的振动加速度小于钢轨的振动加速度,但两者的特征频率基本保持一致。③内外侧隧道壁的振动加速度特征频率均处于 31.5 Hz 和 80.0 Hz 附近,其中 80.0 Hz 的振动频率与 200 mm 特征波长引起的通过频率相一致,加速度峰值的有效值分别为 0.008 m/s^2 和 0.032 m/s^2 ,Z 振级分别为 61.6 dB 和 63.8 dB;内外隧道壁的振动加速度并无明显的区别。

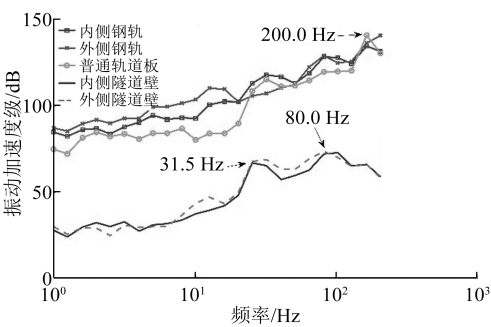


图 5 橡胶浮置板曲线段隧道内振动加速度级对比
Fig. 5 Comparison of rubber floating slab curve section vibration acceleration levels in tunnel

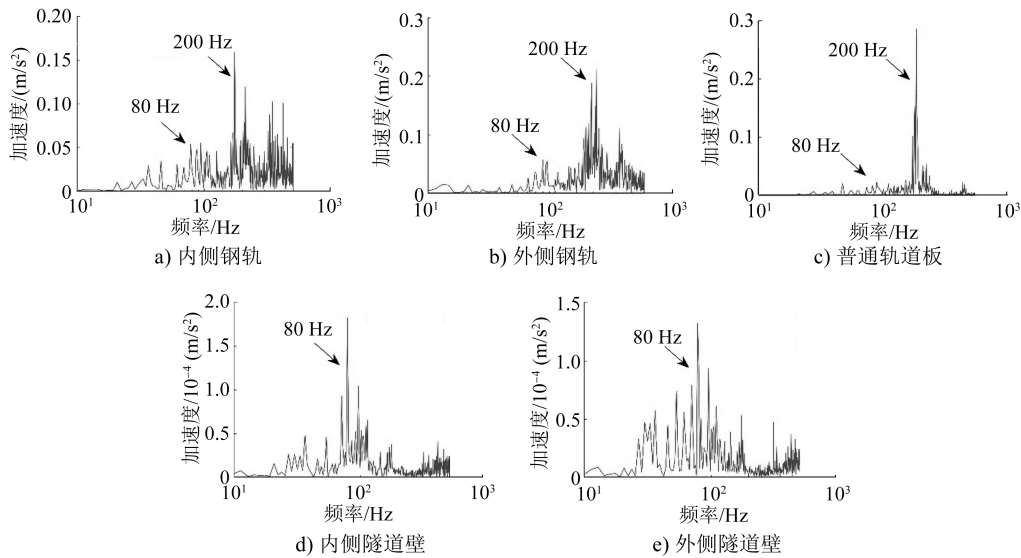


图 6 橡胶浮置板曲线段隧道内振动加速度频谱对比
Fig. 6 Comparison of rubber floating slab curve section vibration acceleration spectrum in tunnel

表 4 浮置板曲线段振动状况统计表			
Tab. 4 Statistics of floating slab curve section vibration condition			
测点位置	加速度峰值/ (m/s^2)	加速度有效值/ (m/s^2)	Z 振级/dB
内側钢轨	162.630	9.490	114.39
外側钢轨	100.880	10.410	114.96
普通轨道板	41.860	6.450	110.96
内側隧道壁	0.041	0.008	61.63
外側隧道壁	0.141	0.032	63.81

4 结语

针对小半径曲线段地铁不同轨道结构对钢轨波磨的产生与发展的影响,以及列车通过橡胶浮置板轨道引起的振动特性问题进行了研究。通过现场实测采集到隧道内及隧道上方地面各点处的振动加速度值,测试了普通整体道床直线段、普通整

体道床小半径曲线段和橡胶浮置板轨道小半径曲线段钢轨表面的波磨情况。主要获得以下结论:

1) 钢轨波磨主要出现在小半径曲线段的内側钢轨,其产生与发展主要与轨道曲线半径等因素有关,轨道结构对其发展影响较小。

2) 小半径曲线段外側钢轨波磨的产生与发展与轨道结构有着密切的关系,橡胶浮置板轨道外側钢轨相较于普通整体道床外側钢轨更容易产生钢轨波磨问题,且由于轨道结构的不同,这一过程在整体刚度较小的橡胶浮置板轨道内发展速度更快。

3) 曲线段外側钢轨在所有波长范围内的不平顺等级均存在显著增大的现象,这可能是列车通过曲线段引起剧烈振动的重要原因之一。

4) 列车通过橡胶浮置板轨道引起的振动在钢轨、普通轨道板、隧道壁的传播过程中逐渐降低,

(下转第 84 页)

动环境影响预测的科学性。

参考文献

- [1] 刘维宁,马蒙,刘卫丰,等.我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状[J].中国科学:技术科学,2016,46(6):547.
LIU Weining, MA Meng, LIU Weifeng, et al. Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass transit in China[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2016, 46(6): 547.
- [2] 胡月琪,刘倩,王铮,等.北京市地铁列车运行引起的建筑室内结构噪声污染特征与评价[J].环境工程技术学报,2017,7(5):606.
HU Yueqi, LIU Qian, WANG Zheng, et al. Characteristics and evaluation of building indoor ground-borne noise pollution induced by subway in Beijing[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(5): 606.
- [3] 杨尚福.不同土体条件下地铁列车引起的环境振动及建筑物二次结构噪声分析[D].成都:西南交通大学,2019.
YANG Shangfu. Analysis of vibration caused by subway train operation and secondary noise of buildings under different soil conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [4] 刘卫丰,刘维宁,袁扬,等.地铁列车与道路车辆运行对环境的振动影响现场测试与分析[J].铁道学报,2013,35(5):80.
LIU Weifeng, LIU Weining, YUAN Yang, et al. In-situ measurements of and analysis on environmental effects of vibrations induced by passage of metro trains and vehicles on the road[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(5): 80.
- [5] 全博伟.成都地铁10号线振动预测方法研究[D].成都:西南交通大学,2019.
TONG Bowei. Study on environment vibration prediction meth-

od of Chengdu Metro Line 10[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

- [6] 巴振宁,高愈辉,梁建文,等.天津软土地区地铁运营沿线地面振动响应实测与建模分析[J].噪声与振动控制,2021,41(1):160.
BA Zhenning, GAO Yuhui, LIANG Jianwen, et al. Field test and finite element modeling of ground surface vibration caused by metro line operation[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(1): 160.
- [7] 卢力,辜小安,杨宜谦,等.城市轨道交通环评导则重点修订内容探析[J].环境影响评价,2019,41(2):20.
LU Li, GU Xiaolan, YANG Yiqian, et al. Analysis on revision of the technical guideline for environmental impact assessment—urban rail transit[J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(2): 20.
- [8] 高盟,高运昌,徐晓,等.青岛岩质地基地铁3号线与上海软土地基地铁10号线振动实测对比分析[J].地震工程学报,2020,42(2):468.
GAO Meng, GAO Yunchang, XU Xiao, et al. Comparative analysis of vibration measurement between Qingdao Metro Line 3 on rock foundation and Shanghai Metro Line 10 on soft foundation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 468.
- [9] 张凌,雷晓燕,刘全民,等.地铁环境振动源强测试与评价标准分析[J].振动测试与诊断,2020,40(1):89.
ZHANG Ling, LEI Xiaoyan, LIU Quanmin, et al. Measurement and evaluation of environmental vibration source strength of the subway[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 89.

(收稿日期:2022-05-24)

(上接第79页)

且在高频区域的振动下降速度远大于低频区域的振动下降速度,即橡胶浮置板轨道对长波长引起的低频振动的隔振效果并不显著。

参考文献

- [1] 温泽峰.钢轨波浪形磨损研究[D].成都:西南交通大学,2006.
WEN Zefeng. Study on rail corrugation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [2] 李伟.地铁钢轨波磨成因及其对车辆/轨道行为的影响[D].成都:西南交通大学,2015.
LI Wei. Study on root cause of metro rail corrugation and its influence on behavior of vehicle-track system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

- [3] 尹镒,蔡成标,朱胜阳.高速铁路轨面粗糙度测量方法与分析[J].中国科学:技术科学,2018,48(9):950.
YIN Qiang, CAI Chengbiao, ZHU Shengyang. Measuring method and analysis of rail roughness in high-speed railway[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(9): 950.
- [4] GRASSIE S L. Rail corrugation: advances in measurement, understanding and treatment[J]. Wear, 2005, 258(7-8): 1224.
- [5] 朱胜阳,王建伟,蔡成标,等.应用动力吸振器的浮置板轨道低频振动控制特性的试验研究[J].铁道学报,2021,43(4):142.
ZHU Shengyang, WANG Jianwei, CAI Chengbiao, et al. Experimental study on low-frequency vibration control characteristics of floating slab track using dynamic vibration absorbers[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(4): 142.

(收稿日期:2021-03-18)