

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.06.005

北京地铁减振轨道钢轨波磨治理效果试验研究

崔日新^{1,2}, 石熠^{1,2}, 李玉路³, 王进⁴, 李仲华^{1,2}

(1. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100068; 2. 城市轨道交通全自动运行系统与安全监控北京市重点实验室, 北京 100068; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心, 北京 100081; 4. 北京城市快轨建设管理有限公司, 北京 100068)

摘要: 为验证钢轨阻尼装置对减振轨道钢轨波磨的治理效果, 选取北京地铁梯形轨枕、钢弹簧浮置板两种减振轨道结构, 对试验段添加钢轨阻尼装置前后的轨道及隧道振动、轨旁噪声特性进行测试对比, 并对钢轨波磨的发展进行跟踪调查。结果表明: 在梯形轨枕轨道上安装钢轨阻尼装置可在较宽频域范围内获得良好的减振降噪效果, 可将钢轨振动与轨旁噪声分别降低 9.7 dB、11 dB(A); 在钢弹簧浮置板轨道上安装钢轨阻尼装置, 可使其工作频率范围内的钢轨振动与轨旁噪声分别降低 8.3 dB、3 dB(A)。长期跟踪测试表明: 钢轨阻尼装置可使减振轨道钢轨波磨的发展速率延长一倍以上。

关键词: 城市轨道交通; 波磨; 梯形轨枕轨道; 钢弹簧浮置板轨道; 阻尼装置; 减振降噪

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)06-0035-06

Experimental Study on Rail Corrugation Treatment for Vibration Reduction Tracks in Beijing Subway

CUI Rixin^{1,2}, SHI Yi^{1,2}, LI Yulu³, WANG Jin⁴, LI Zhonghua^{1,2}

(1. Beijing MTR Construction Administration Co., Ltd., Beijing 100068; 2. Beijing Key Laboratory of Fully Automatic Operation and Safety Monitoring for Urban Rail Transit, Beijing 100068; 3. Urban Rail Transit Center, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081; 4. Beijing Urban Rapid Transit Construction Administration Co., Ltd., Beijing 100068)

Abstract: To verify the effects of rail damping devices in the rail corrugation treatment for vibration reduction tracks, rail damping devices were added to a ladder-type sleeper track and a steel-spring floating slab track, respectively, in this study. The vibration and trackside noise characteristics of the two vibration-reduction tracks were reported, and the development of rail corrugation was tracked. The results show that the rail damping devices installed on the ladder-type sleeper track can achieve positive effects in vibration and noise reduction in a wide band range, which can reduce rail vibration and trackside noise by 9.7 dB and 11 dB (A), respectively. The rail damping devices installed on the steel-spring floating slab track can reduce rail vibration and trackside noise by 8.3 dB and 3 dB (A), respectively, within their operational frequency range. Long-term tracking tests revealed that the installation of rail damping devices can at least halve the rate of rail corrugation development on vibration reduction tracks.

Keywords: urban rail transit; rail corrugation; ladder-type sleeper track; steel-spring floating-slab track; damping device; vibration and noise reduction

收稿日期: 2023-12-06 修回日期: 2024-08-09

第一作者: 崔日新, 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为轨道交通振动噪声控制, cuirixin_work@163.com

基金项目: 北京市轨道交通建设管理有限公司双创基金项目(SCJJ2024006); 北京市基础设施投资有限公司科研项目(2022-10-06-01)

引用格式: 崔日新, 石熠, 李玉路, 等. 北京地铁减振轨道钢轨波磨治理效果试验研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(6): 35-40.

CUI Rixin, SHI Yi, LI Yulu, et al. Experimental study on rail corrugation treatment for vibration reduction tracks in Beijing subway[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(6): 35-40.

0 引言

城市轨道交通线网多穿越人口密集的城区,受周边环境条件限制,线路设计常采用小半径曲线型。但由于曲线上轨道与车辆系统结构刚度、轮轨硬度及轮轨接触的合理匹配存在一定的难度^[1],导致钢轨波磨问题在曲线段发生率很高。减振区段发生钢轨波磨,不仅会引起轮轨作用力增大、激发车内噪声、降低乘客舒适性,还造成列车运行条件恶化,严重时会导致原本满足减振需求的环境振动指标再次超标,影响沿线居民的生活与健康。因此,对减振区段钢轨波磨的治理展开研究,对建设乘客与沿线居民“双重满意”的轨道交通具有重要意义。

自十九世纪末,城市轨道交通钢轨波磨问题出现后,各国对钢轨波磨成因及治理的研究一直延续至今。目前,典型的钢轨波磨成因理论有轮轨共振理论、自激振动理论、磨耗功理论等,而针对钢轨波磨治理的具体方法则较少。目前国内外经过实践的治理方法有钢轨打磨、改变车速、轮轨界面摩擦调节、更换扣件、安装钢轨阻尼装置等。

钢轨打磨是各国轨道交通波磨治理最常用的方法。目前,打磨计划的制定与高效打磨设备的研发是限制其技术提升的关键^[2-3]。列车行驶速度是影响钢轨波磨特征的因素之一,运行速度的改变可能会抑制波长依赖于该车速的波磨的发展,但不一定能够消除波磨^[4];轨顶摩擦控制装置通过对轮轨界面摩擦特性的管理,控制轮轨接触区的黏-滑振动,从而实现了对钢轨波磨的抑制^[5];根据工程类比^[6]的分析可知,轨道扣件刚度是钢轨波磨的重要影响因素之一,通过改变扣件刚度治理钢轨波磨的方法在国内外轨道交通中均有研究^[7-9]。

除上述方法外,在钢轨上安装阻尼装置亦逐渐成为钢轨波磨治理的有效选择。THOMPSON提出的一种附加于钢轨轨腰的调谐阻尼装置,可在较宽频率范围内实现钢轨振动衰减能力的提高,为抑制钢轨波磨发展提供了一种可能^[10];此后,刘卫丰等人将类似的钢轨阻尼装置应用于北京地铁剪切型扣件轨道、DTVI₂型扣件轨道的钢轨波磨治理^[11-12];吴赛甲等人就钢轨谐振器对小半径曲线上钢轨波磨的治理进行了研究^[13]。

目前,钢轨阻尼装置在普通非减振区段上治理钢轨波磨取得了良好的效果,但其对道床类减振轨道钢轨波磨的治理效果尚待研究与验证。本文针对目前北

京市城市轨道交通常用的两种道床类减振轨道,即梯形轨枕轨道与钢弹簧浮置板轨道,提出在道床类减振轨道上采用钢轨阻尼装置治理钢轨波磨的方案,并对其治理效果开展了试验研究,以为减振轨道钢轨波磨的治理提供参考。

1 现场试验组织

为考察钢轨阻尼装置对道床类减振轨道钢轨波磨的治理效果,选取北京地铁线上梯形轨枕轨道与钢弹簧浮置板轨道两段试验段,分别测试安装钢轨阻尼装置前后轨道与隧道振动特性、轨旁噪声特性及钢轨波磨发展趋势。梯形轨枕试验段位于 $R=650\text{ m}$ 的曲线上,长度为 133 m ,采用DTVI₂-T型扣件;钢弹簧浮置板轨道试验段位于 $R=995\text{ m}$ 的曲线上,长度为 225 m ,采用DTVI₂型扣件。采用波磨测量小车对测试区间梯形轨枕与钢弹簧浮置板轨道的钢轨粗糙度级进行测量,如图1所示,测试区间内梯形轨枕钢轨波磨的特征波长范围为 $100\sim 200\text{ mm}$,结合运行车速(约 $63\sim 68\text{ km/h}$),其波磨特征频率为 $87.5\sim 175\text{ Hz}$;钢弹簧浮置板轨道的特征波长为 125 mm 与 250 mm ,其波磨特征频率为 75 Hz 与 151 Hz 。

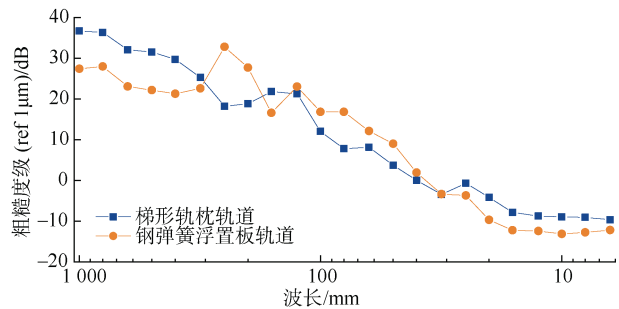


图1 测试区间钢轨表面粗糙度级

Figure 1 Roughness level of rail surface in the test interval

试验段安装的钢轨阻尼装置由弹性体及包裹在弹性体内的质量块组成,弹性体与质量块一起构成了阻尼性质量-弹簧减振系统,可抑制轮轨相互作用能量在钢轨上的传播^[10-12],钢轨阻尼装置设计参数见表1。

表1 试验段钢轨阻尼装置设计参数

Table 1 Design parameters of the rail damping devices

	质量/kg	刚度/(kN/m)	阻尼/(kN·s/m)
梯形轨枕轨道	7.5	5.2	6.6
钢弹簧浮置板轨道	16.8	4.1	3.9

试验段左右轨上均安装了钢轨阻尼装置,安装前对钢轨进行了打磨作业,现场安装效果如图2所示。



图2 钢轨阻尼装置安装试验段

Figure 2 Installation of rail damping devices in sites

此次测试分为钢轨阻尼装置安装前与安装后两个阶段,测试内容分为钢轨振动衰减率、行车条件下轨道与隧道壁振动及轨旁噪声响应、钢轨波磨发展跟踪调研3部分。其中,钢轨振动衰减率的测点布设依据规范 BS EN 15461: 2008+A1: 2010 的要求^[14];行车条件下轨道与隧道壁振动及轨旁噪声测试的测点布设如图3所示;现场传感器布设如图4所示。本次测试中,对钢轨波磨发展情况的跟踪调研持续半年以上。

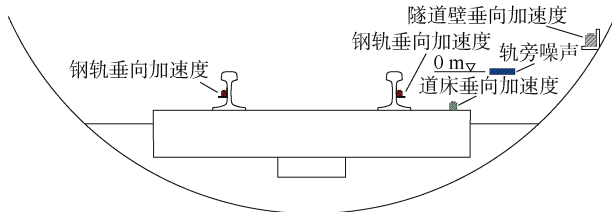


图3 行车条件下振动与噪声测点布设

Figure 3 Vibration and noise measurement points in sites



(a) 道床加速度测点 (b) 隧道壁加速度测点

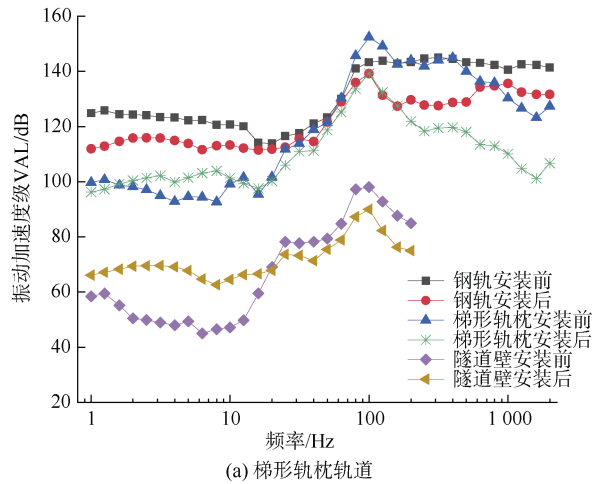
图4 传感器布设

Figure 4 Onsite deployment of the sensor

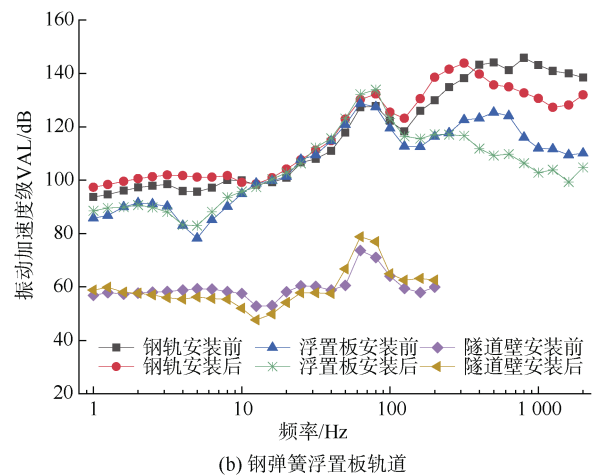
2 治理效果分析

2.1 振动控制效果

为考察钢轨阻尼装置对道床类减振轨道振动特性的提升效果,对行车条件下安装钢轨阻尼装置前后两种减振轨道的钢轨、轨枕(道床)及隧道壁的振动加速度级(VAL)进行测试分析,测试结果如图5所示。



(a) 梯形轨枕轨道



(b) 钢弹簧浮置板轨道

图5 钢轨、轨枕(道床)与隧道壁振动特性

Figure 5 Characteristics of rail, sleeper (slab), and tunnel

图5(a)为梯形轨枕轨道安装钢轨阻尼装置前后轨道结构与隧道壁的振动加速度级。由图中可知,梯形轨枕轨道的钢轨与梯形轨枕在以100 Hz为中心频率的频带内出现了共振峰值,这与测试得出的梯形轨枕轨道钢轨波磨特征频率(87~174 Hz)相吻合,由此可推知此处钢轨波磨极有可能是钢轨与梯形轨枕出现同向垂向共振而引发的,而安装钢轨阻尼装置后可在较宽的频域范围内获得良好的减振效果,可将钢轨、梯形轨枕的振动分别降低9.7、14.8 dB,将隧道壁Z振级降低1.08 dB。图5(b)为钢弹簧浮置板轨道安装钢轨阻尼装置前后轨道结构与隧道壁的振动特性对比。由图可知,在钢弹簧浮置板轨道钢轨波磨特征频率(75 Hz)附近,钢轨与浮置板均存在较大幅度的振动峰值,可推测这一频率下的钢轨波磨可能是浮置板轨道系统垂向共振引起的,而另一特征频率下(151 Hz附近)的波磨则可能由其他因素导致。钢轨阻尼装置对钢弹簧浮置板结构400 Hz及以上的振

动具有显著的减振效果，可将其工作频段范围内钢轨、浮置板的振动分别降低 8.3、12.9 dB，将隧道壁 Z 振级降低 0.7 dB。

2.2 轨旁噪声

安装钢轨阻尼装置前后梯形轨枕轨道、钢弹簧浮置板轨道的轨旁噪声测量结果如图 6 所示。由图 6(a) 可知，钢轨阻尼装置对梯形轨枕轨道辐射噪声有良好的控制效果，可将测试频段范围内的轨旁噪声降低 11 dB(A)。由图 6(b) 可知，钢轨阻尼装置对钢弹簧浮置板轨道 400 Hz 及以上的噪声有衰减作用，可将其工作频率范围内的轨旁噪声降低 3 dB(A)。

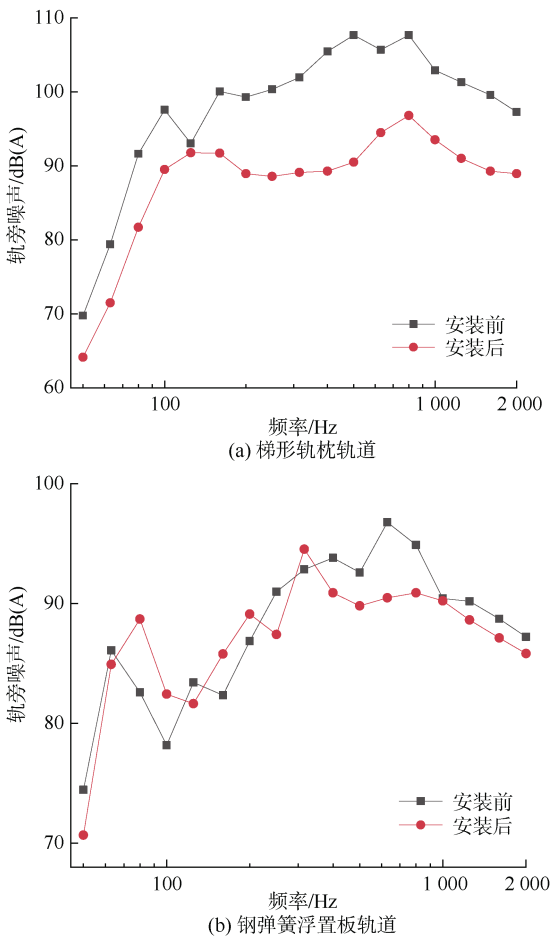


图 6 轨旁噪声
Figure 6 Trackside noise

2.3 钢轨振动衰减率

钢轨振动衰减率是衡量振动沿钢轨纵向衰减能力的有效指标，可以用来反映轨道系统阻尼的大小和噪声辐射能力^[10]。通过对钢轨施加脉冲荷载，获取沿钢轨纵向布设的各测点处钢轨的频响函数，并根据 BS

EN 15461: 2008+A1: 2010 计算梯形轨枕轨道及钢弹簧浮置板轨道的垂向、横向钢轨振动衰减率，如图 7~8 所示。

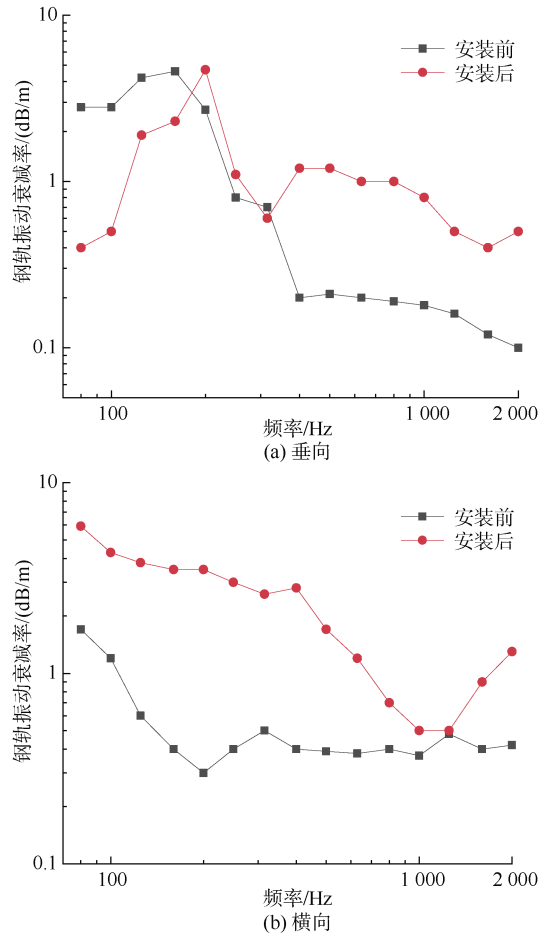


图 7 梯形轨枕轨道钢轨振动衰减率对比
Figure 7 Comparison of vibration attenuation rates of a ladder-type sleeper tracks

由图 7 可知，安装钢轨阻尼装置可有效提升梯形轨枕轨道在 200~2000 Hz 内的垂向钢轨振动衰减率和测试全频段范围内的横向钢轨振动衰减率，可使垂向、横向振动衰减率的最大增量分别达到 2 dB/m(200 Hz) 与 4.2 dB/m(80 Hz)。图 8 中测试结果表明：钢轨阻尼装置可大幅提升测试频段内除 200~300 Hz 外的钢轨垂向振动衰减率，使钢弹簧浮置板轨道的垂向、横向振动衰减率最大提高 6.3 dB/m(630 Hz) 与 3.3 dB/m(500 Hz)。可见，钢轨阻尼装置可有效提高道床类减振轨道的阻尼特性，加强轮轨振动在钢轨中的衰减，有利于控制钢轨波磨的发展，减少轨道噪声的辐射与振动的传播。

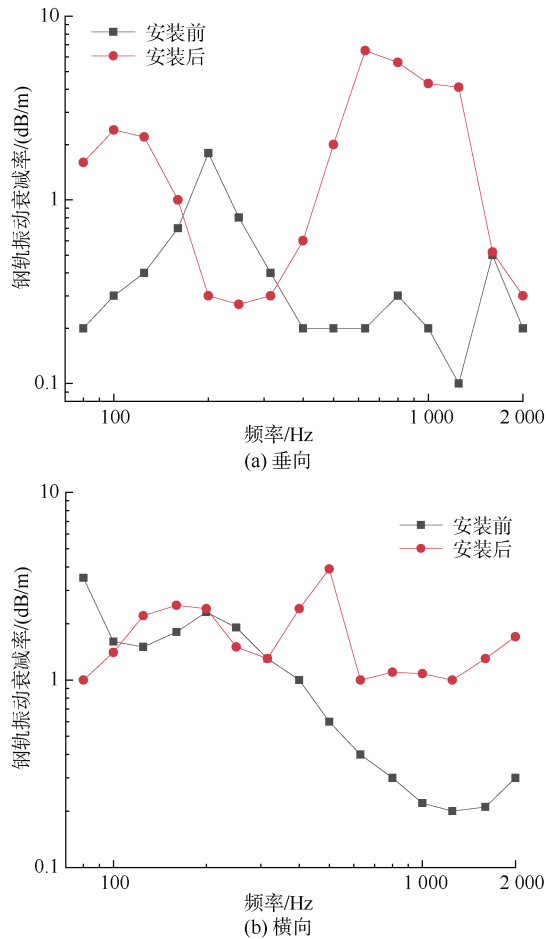


图8 钢弹簧浮置板轨道钢轨振动衰减率对比
Figure 8 Comparison of vibration attenuation rate of steel-spring floating slab rails

2.4 波磨治理效果跟踪

为考察钢轨阻尼装置对梯形轨枕与钢弹簧浮置板轨道钢轨波磨发展的抑制效果,对安装钢轨阻尼装置半年后的钢轨磨耗情况进行了跟踪测试。测试采用CAT波磨测量小车对钢轨30~100 mm波长波磨的移动矢高幅值峰-峰平均值(PPR)进行测量评判。为客观反映钢轨波磨的发展情况,在评判时加入运营单位采用平直度尺对钢轨波磨波深的测量结果。经测试,两种道床类减振措施钢轨波磨发展情况如图9所示。

由图9(a)可知,在钢轨阻尼装置安装前,梯形轨枕轨道的钢轨波磨波深在11个月内的增长量为145 μm ,增长率为402.8%,月平均增长率约为36.6%。钢轨阻尼装置安装后,左股钢轨波磨PPR在6个月内的增长量为11.6 μm ,增长率为34.7%,月平均增长率约为5.8%,钢轨波磨的发展速率约降至安装前的1/6;右股钢轨波磨PPR在6个月内的增长量为3.0 μm ,增长率为12.9%,

月平均增长率约为2.2%,钢轨波磨的发展速率约降至安装前的1/17。

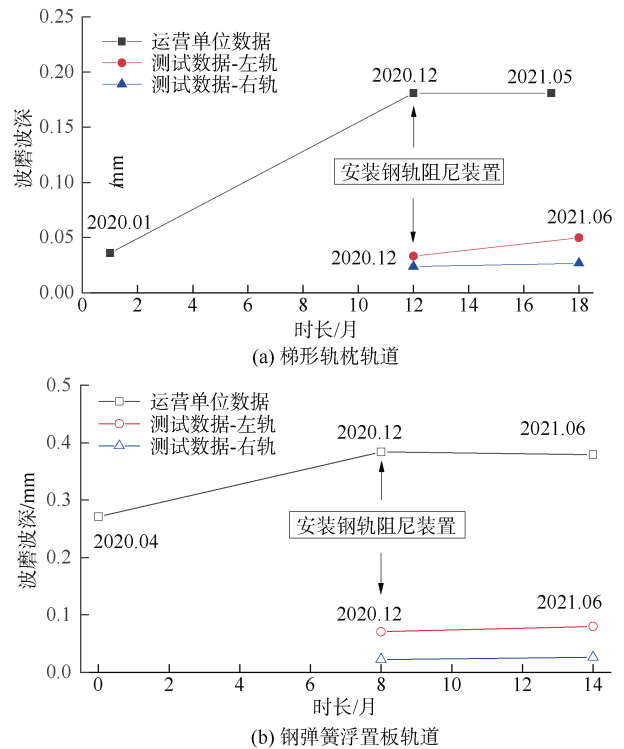


图9 钢轨波磨发展

Figure 9 Rail corrugation development of the two vibration-reduction tracks

由图9(b)可知,在钢轨阻尼装置安装前,钢弹簧浮置板轨道钢轨波磨波深在8个月内的增长量为113 μm ,增长率为41.5%,月平均增长率约为5.2%。钢轨阻尼装置安装后,左股钢轨波磨PPR在6个月内的增长量为9.3 μm ,增长率为13.2%,月平均增长率约为2.2%,钢轨波磨的发展速率约降至安装前的1/2;右股钢轨波磨PPR在6个月内的增长量为3.9 μm ,增长率为14.5%,月平均增长率约为2.9%,钢轨波磨的发展速率约降至安装前的1/2。

3 结论

本文采用试验测试的方法,研究了钢轨阻尼装置对道床减振类轨道钢轨波磨发展的抑制效果,可为城市轨道交通减振段钢轨波磨的治理提供合理参考,具体结论如下:

1) 在梯形轨枕轨道上添加钢轨阻尼装置可有效提高钢轨对振动能量的衰减能力,对波磨特征频率下钢轨与梯形轨枕的共振具有良好的抑制作用。本试验中,钢轨阻尼装置可将钢轨振动降低9.7 dB,将钢轨

波磨增长率降低至原来的 1/6,有效控制了梯形轨枕钢轨波磨的发展。

2) 本试验中,钢轨阻尼装置对钢弹簧浮置板轨道系统振动噪声的有效衰减频率范围为 400 Hz 及以上,可将其工作频率范围内的钢轨振动降低 8.3 dB。跟踪测试表明,安装钢轨阻尼装置可将钢轨波磨的发展速率降至未安装前的近 1/2。由于工作频率较高,钢轨阻尼装置并未能降低波磨特征频率下浮置板与钢轨的垂向共振幅值,但钢轨阻尼装置的安装可有效提高浮置板轨道波磨特征频率附近的钢轨振动衰减率,进而控制了钢轨波磨的发展。

参考文献

- [1] 关庆华,张斌,熊嘉阳,等. 地铁钢轨波磨的基本特征、形成机理和治理措施综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 316-337.
GUAN Qinghua, ZHANG Bin, XIONG Jiayang, et al. Review on basic characteristics, formation mechanisms, and treatment measures of rail corrugation in metro systems[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 316-337.
- [2] TANAKA H, MIWA M. Modeling the development of rail corrugation to schedule a more economical rail grinding[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2020, 234(4): 370-380.
- [3] 尧辉明,沈钢,崔巍. 曲线钢轨波磨打磨方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1162-1167.
YAO Huiming, SHEN Gang, CUI Wei. Grinding method for rail corrugation in curved track[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(8): 1162-1167.
- [4] COLLETTE C, VANHONACKER P, BASTAITS R, et al. Comparison between time and frequency studies of a corrugated curve of RER Paris network[J]. Wear, 2008, 265: 1249-1258.
- [5] 郭向前. 武汉北编组站全面摩擦控制系统应用实例分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(4): 134-137.
GUO Xiangqian. An example analysis of comprehensive wheel-rail friction control system in Wuhanbei marshalling station[J]. Railway engineering, 2018, 58(4): 134-137.
- [6] 杨广武,彭华,王佳妮,等. 基于工程类比的北京地铁钢轨异常波磨整治方法[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(4): 40-45.
YANG Guangwu, PENG Hua, WANG Jiani, et al. Remediation method of abnormal rail corrugation of Beijing subway based on engineering analogy[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(4): 40-45.
- [7] EGANA J I, VINOLAS J, SECO M. Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system[J]. Wear, 2006, 261(2): 216-224.
- [8] 刘卫丰,刘维宁,吴宗臻,等. 北京地铁剪切型减振器扣件钢轨波磨治理的试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 73-79.
LIU Weifeng, LIU Weining, WU Zongzhen, et al. Test study on treating rail corrugation for egg fastener in Beijing metro[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(21): 73-79.
- [9] 杨广武,郭建平,彭华,等. 地铁基础减振地段钢轨异常波磨治理方案研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(4): 75-81.
YANG Guangwu, GUO Jianping, PENG Hua, et al. Management of abnormal rail corrugation in underground foundation vibration reduction section[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 75-81.
- [10] THOMPSON D J, JONES C, GAUTIER P E. Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [11] LIU Weifeng, ZHANG Hougui, LIU Weining, et al. Experimental study of the treatment measures for rail corrugation on tracks with Egg fasteners in the Beijing metro[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2018, 232(5): 1360-1374.
- [12] 陈嘉梁,刘维宁,刘卫丰,等. 北京地铁 DTVI2 扣件钢轨波磨整治措施的试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 64-69.
CHEN Jialiang, LIU Weining, LIU Weifeng, et al. Demonstration test on treatment solution against rail corrugation occurs at DTVI2 fastener track sections in Beijing metro[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(4): 64-69.
- [13] 吴赛甲,倪昊,薛佳鑫,等. 单自由度钢轨谐振器在钢轨波磨治理中的应用研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 101-106.
WU Saijia, NI Hao, XUE Jiabin, et al. Application of single degree of freedom rail resonator in rail wave grinding treatment[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 101-106.
- [14] BSI-British Standards Institution. Railway applications-Noise emission-Characterization of the dynamic properties of track selections for pass by noise measurements: BS EN 15461: 2008+A1: 2010[S]. London: BSI-British Standards Institution, 2011.

(编辑: 傅依萱)