

振动式无缝线路应力放散方法验证及参数选择^{*}许玉德^{1,2} 石梓煊^{1,2} 吴宣庆³ 汪鑫⁴ 薛志强^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海; 3. 辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 110166, 沈阳; 4. 罗格斯大学, 08854, 新泽西州)

摘 要 [目的]为解决现有无缝线路应力放散方法存在的问题,以激振器代替撞轨器,提出一种振动式无缝线路应力放散新方法。[方法]基于现场作业流程,建立无缝线路应力放散有限元模型,结合实测锁定轨温,模拟作业前钢轨的非均匀温度应力状态。设置自然拉伸、撞轨拉伸、激振拉伸 3 种作业工况,以钢轨温度应力均值和标准差作为评价指标,对比分析各作业工况下的放散效果,并验证所提应力放散新方法的可行性。改变激振器参数(激振力幅值及频率),对比分析钢轨温度应力均值和标准差,确定所提应力放散新方法的最优激振参数。[结果及结论]振动式无缝线路应力放散作业后,钢轨温度应力均值和标准差显著降低,降幅分别达到了 99.3% 和 66.4%,钢轨的非均匀温度应力状态得到了有效改善。不同激振参数对应力放散效果有一定的影响,当激振力幅值为 5 kN、激振力频率为 50 Hz 时,作业钢轨的温度应力放散效果最佳。

关键词 城市轨道交通; 无缝线路; 应力放散; 激振力

中图分类号 U213.9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.027

Verification and Parameter Selection of Stress Releasing Method for Vibration-based CWR

XU Yude^{1,2}, SHI Zixuan^{1,2}, WU Xuanqing³, WANG Xin⁴, XUE Zhiqiang^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, 201804, Shanghai, China; 3. Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., 110166, Shenyang, China; 4. Rutgers University, 08854, State of New Jersey, USA)

Abstract [Objective] To address issues with stress releasing approaches for the continuous welded rail (CWR), a novel vibration-based CWR stress releasing method is proposed, substituting the rail impactor with a vibrational exciter. [Method] Based on the on-site procedure, a CWR stress releasing fi-

nite element model is established. The measured locking rail temperature is incorporated to simulate the pre-operation non-uniform temperature stress state. Three stress releasing operational scenarios, namely natural tension, impact tension, and vibration tension, are set. The mean and standard deviation of temperature stress are set as evaluation indicators to compare and analyze the release effects under each operating condition, and to verify the feasibility of the proposed new stress release method. By changing exciter parameters (excitation force amplitude and frequency), a comparative analysis of the rail temperature stress mean value and standard deviation are carried out to determine the optimal excitation parameters of the proposed new stress release method. [Result & Conclusion] After the vibration-based CWR stress releasing operation, the mean and standard deviation of the rail temperature stress are significantly reduced, with the decrease values of 99.3% and 66.4% respectively, and the non-uniform temperature stress state of the rail is effectively improved. Certain influences of various excitation parameters on stress release effect are observed. The temperature stress release effect of the operating rail reaches the best when the excitation force amplitude is 5 kN and the excitation force frequency is 50 Hz.

Key words urban rail transit; CWR; stress releasing; excitation force

无缝线路应力放散对于保障无缝线路稳定性具有重要意义^[1]。目前,工程与维护部门常采用撞轨式无缝线路应力放散方法,利用撞轨器配合拉伸器进行应力放散,但其放散效果并不理想,存在钢轨受力不均、配套夹轨器易脱落、应力放散不均等诸多问题。国内外学者为此开展了一系列研究,主要聚焦于解决撞轨器施力均匀化问题^[2-3]、夹轨器滑移问题^[4]及应力放散工艺的适应性问题^[5-6]。但从现场实践来看,撞轨器的纵向冲击力存在一定的局限性,在解决摩擦力对钢轨纵向位移的阻碍方面

^{*} 国能朔黄铁路发展有限责任公司科技创新项目(SHTL-21-02);国家重点研发计划项目(2022YFB2602900)

效果有限。

基于此,本文以激振器的激振力代替撞轨器的冲击力,提出一种新的振动式无缝线路应力放散方法(以下简称“新应力放散法”),结合锁定轨温实测数据,建立非均匀温度应力状态下的无缝线路应力放散有限元模型,对比验证了所提新应力放散法的可行性,并确定了其最优激振参数。本文研究可为后续振动式无缝线路应力放散工艺的推广提供参考。

1 无缝线路应力放散模型

1.1 放散流程

撞轨式无缝线路应力放散方法的关键流程^[7]有:①撞轨拉伸作业前,复紧待放散钢轨始、终端前后 50 m 线路的扣件;切割终端钢轨,留出长钢轨自由伸缩量;分组松开同一股钢轨的全部扣件,设置滚筒并撤除胶垫。②撞轨拉伸作业时,在撞轨点标记处安装撞轨器,在锯轨终端安装拉伸器,同步配合撞轨;当各观测点放散到位时,停止撞轨和拉伸。③撞轨拉伸作业后,锁定终端,撤除拉伸器和滚筒,恢复胶垫并上紧扣件。

本文所提新应力放散法将以激振器替代撞轨器,其他关键流程与撞轨式放散方法一致。

1.2 建立有限元模型

基于无缝线路应力放散关键流程,建立无缝线路应力放散模型,如图 1 所示。在模型部件方面,主要考虑钢轨及滚筒两种部件。钢轨部件采用 CHN60 廓形,长度为 500 m;滚筒部件采用圆形截面,两个滚筒的间距为 10 m。在模型相互作用方面,设置钢轨与滚筒之间为纵向滚动摩擦接触及垂向硬接触。在模型边界条件方面,滚筒下方设置完全约束以防止窜动;钢轨左侧为始端,对应固定端,设置为完全约束;钢轨右侧为终端,对应拉伸端,以位移边界条件模拟拉伸作用。

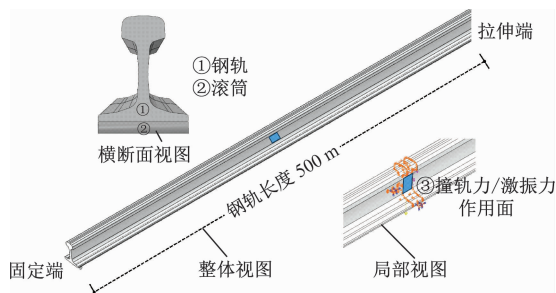


图 1 无缝线路应力放散模型

Fig. 1 Stress releasing model for CWR

钢轨伸缩量 Δl 可以表示为:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T \quad (1)$$

式中:

α ——钢轨线膨胀系数;

l ——钢轨长度,取为 500 m;

ΔT ——轨温变化幅度。

1.3 载荷设置

钢轨锁定轨温是影响钢轨温度应力分布的重要因素^[8]。在气候变化等因素影响下,服役钢轨锁定轨温往往会出现非均匀现象,从而导致钢轨温度应力呈现非均匀分布。

为确定放散作业前钢轨的非均匀温度应力,开展锁定轨温测试,结果如表 1 所示。由表 1 可知:此范围内的钢轨温度应力变化明显。为表征钢轨温度应力的非均匀性,以钢轨温度应力标准差为指标,通过计算可知,试验区段钢轨温度应力标准差为 1.5 MPa。

表 1 锁定轨温测试结果

Tab. 1 Results of locking rail temperature test

| 测点编号 | 测点里程 | 实际轨温/℃ | 锁定轨温/℃ | 温度应力/MPa |
|------|-----------|--------|--------|----------|
| 1 | K32 + 000 | 22.0 | 22.2 | 0.5 |
| 2 | K32 + 300 | 21.9 | 20.8 | -2.7 |
| 3 | K32 + 600 | 22.9 | 23.4 | 1.3 |
| 4 | K32 + 900 | 21.9 | 22.3 | 0.9 |
| 5 | K33 + 000 | 22.1 | 21.5 | -1.4 |

注:温度应力以拉应力为正,压应力为负。

同时,根据现场调研数据,在夏季高温时节,通常设定轨温变化幅度为 15 ℃,以适应气温变化。钢轨温度应力 σ 可以表示为:

$$\sigma = E \alpha \Delta T \quad (2)$$

式中:

E ——钢轨弹性模量,取为 2.1×10^5 MPa。

通过式(2)可以计算得到,轨温变化幅度为 15 ℃时对应的温度应力为 37.17 MPa。因此,为模拟夏季作业前,钢轨的非均匀温度应力状态,以 -37.17 MPa 为均值、1.5 MPa 为标准差,采用正弦函数模拟温度应力的交替变化,选取沿纵向路径距离 500 m 范围进行分析。作业前,钢轨非均匀温度应力分布如图 2 所示,同时其也将以预定义温度场的形式,导入后续的放散作业工况中。

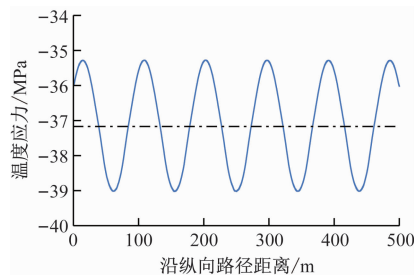


图2 作业前钢轨非均匀温度应力分布

Fig. 2 Rail non-uniform temperature stress distribution prior to the operation

此外,由于本文设置了撞轨拉伸及激振拉伸等放散作业工况,故对应设置了撞轨力和激振力。对于撞轨力,综合考虑文献[2]的研究结果及现场实际情况,设置纵向撞轨力为 32.4 kN。采用机械式离心激振器产生激振力,设置垂向、纵向正弦激振力,垂向、纵向之间存在半个相位差,对应垂向激振力 $F_v(x)$ 和纵向激振力 $F_l(x)$ 可以表示为:

$$F_v(x) = A \sin(2\pi fx) \quad (3)$$

$$F_l(x) = A \cos(2\pi fx) \quad (4)$$

式中:

A ——激振力幅值,单位 kN;

f ——激振频率,单位 Hz;

x ——沿纵向路径距离,单位 m。

其中,设置撞轨力与激振力均为面力,作用于轨腰处,作用面尺寸为 60 mm × 60 mm。

2 方法验证

为验证新应力放散法的可行性,设置自然拉伸、撞轨拉伸、激振拉伸等 3 种放散作业工况进行计算,并选择作业前、后钢轨的温度应力均值和标准差作为评价指标,对比分析各作业工况的放散效果。

2.1 自然拉伸放散

为明确拉伸作用对放散效果的影响,设置自然拉伸放散作业工况,即去除撞轨器,保留拉伸器,对应仅设置拉伸作用。自然拉伸放散后的钢轨温度应力如图 3 所示。

由图 3 可知:相比于图 2 的钢轨非均匀温度应力状态,自然拉伸放散后,钢轨整体温度应力有所减小,具有一定的应力放散效果。但此时,钢轨整体温度应力水平呈现非均匀态势,拉伸端为拉应力,呈现“过拉伸”状态;固定端为压应力,呈现“欠拉伸”状态。这一分布形态与钢轨滚筒之间的摩擦力密切相关。

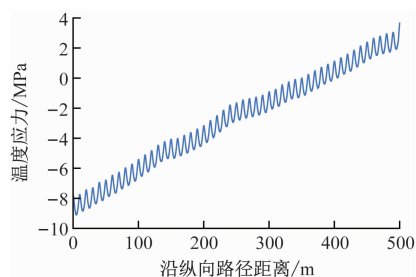


图3 自然拉伸放散后钢轨温度应力

Fig. 3 Rail temperature stress after natural tension releasing

2.2 撞轨拉伸放散

根据撞轨式无缝线路应力放散方法的关键流程,设置撞轨拉伸放散作业工况,即撞轨器和拉伸器配合作业,对应设置撞轨力和拉伸作用。撞轨拉伸放散后的钢轨温度应力如图 4 所示。

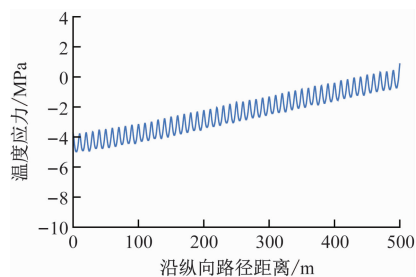


图4 撞轨拉伸放散后钢轨温度应力

Fig. 4 Rail temperature stress after impact tension releasing

由图 4 可知:相比于图 2 的钢轨非均匀温度应力状态,撞轨拉伸放散后,钢轨整体温度应力大幅减小,具有较好的放散效果。但此时,钢轨整体应力水平仍然呈现出非均匀状态,拉伸端与固定端均为压应力,存在“欠拉伸”现象。这是由于纵向撞轨力可以配合拉伸作用,促进钢轨纵向位移的传递,但无法降低钢轨滚筒间的摩擦作用影响。

2.3 激振拉伸放散

基于新应力放散法,设置激振拉伸放散作业工况,以激振器替换撞轨器,配套拉伸器共同作用,对应设置激振力和拉伸作用。激振拉伸放散后的钢轨温度应力如图 5 所示。

由图 5 可知:相比于图 2 的钢轨非均匀温度应力状态,激振拉伸放散后,钢轨整体温度应力趋近于 0,具有良好的应力放散效果。此时,钢轨整体温度应力变化趋势平缓,无明显“过拉伸”与“欠拉伸”现象。这是由于持续的垂向振动使得钢轨处于悬浮状态,减少与滚筒接触面积,从而降低了摩擦力的影响。而持续的纵向振动可配合拉伸作用,促进

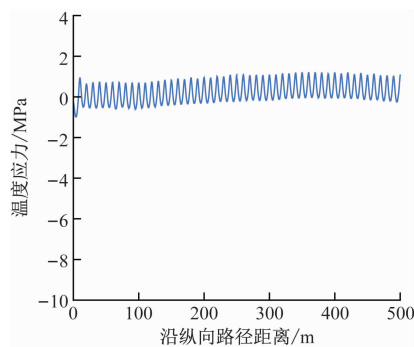


图5 激振拉伸放散后钢轨温度应力

Fig. 5 Rail temperature stress after vibration tension releasing

钢轨纵向位移的传递,从而较好地实现了无缝线路的应力均匀化。

2.4 对比分析

以钢轨温度应力均值作为应力放散准确度指标,以标准差作为均匀度指标,计算自然拉伸、撞轨拉伸、激振拉伸这3种放散作业工况下的放散数据,如表2所示。

表2 3种放散作业工况下的放散数据对比

Tab. 2 Comparison of stress releasing data under three releasing operational scenarios

| 作业工况 | 温度应力均值/MPa | 温度应力标准差/MPa |
|--------|------------|-------------|
| 自然拉伸放散 | -2.788 | 3.269 |
| 撞轨拉伸放散 | -2.442 | 1.381 |
| 激振拉伸放散 | 0.244 | 0.504 |

由表2可知:对比作业前的钢轨非均匀温度应力均值-37.17 MPa,各作业工况下的钢轨温度应力均值均大幅下降;激振拉伸放散的均值下降幅度达到了99.3%,优于自然拉伸放散与撞轨拉伸放散工况,具有更好的应力放散效果。

同时,各作业工况下的钢轨温度应力标准差的差异较大,体现了不同作用力对钢轨应力放散均匀度的影响差异。其中,激振拉伸放散的标准差下降幅度达到了66.4%,明显优于自然拉伸放散与撞轨拉伸放散工况,验证了新应力放散法的可行性。

3 参数选择

为确定激振力幅值与频率对激振拉伸放散效果的影响规律,探寻最优激振参数,采用单因素轮换法设置作业工况。同时,考虑到后续激振放散装置的便携性,设置激振力幅值不超过10 kN,激振力频率不超过100 Hz。

3.1 激振力幅值

设置激振力频率为50 Hz,改变激振力幅值进行分析。不同激振力幅值下,钢轨温度应力均值及标准差如图6所示。由图6可知:随着激振力幅值的增大,钢轨温度应力均值与标准差均出现先减小后增大的趋势;最优激振力幅值为5 kN。

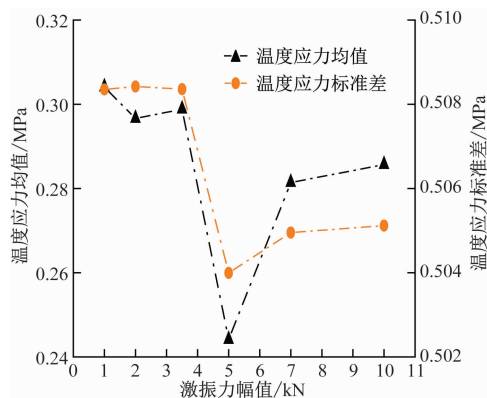


图6 不同激振力幅值下钢轨温度应力均值及标准差

Fig. 6 Mean and standard deviation of rail temperature stress for different excitation force amplitudes

3.2 激振力频率

设置激振力幅值为5 kN,改变激振力频率进行分析。不同激振力频率下,钢轨温度应力均值及标准差数据如图7所示。由图7可知:随着激振力频率的增大,钢轨温度应力均值与标准差出现先减小后增大的趋势;最优激振力频率为50 Hz。

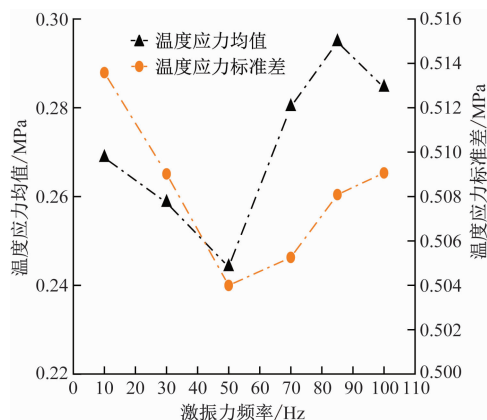


图7 不同激振力频率下钢轨温度应力均值及标准差

Fig. 7 Mean and standard deviation of rail temperature stress for different excitation force frequencies

综上所述,最优激振参数为:激振力幅值为5 kN;激振力频率为50 Hz。

4 结语

本文提出一种新应力放散法,并建立了考虑钢轨温度应力非均匀状态的无缝线路应力放散有限元模型,分析了3种作业工况下的应力放散效果,以及不同激振参数组合的放散效果,主要获得以下结论:

1) 自然拉伸、撞轨拉伸、激振拉伸这3种作业工况下,作业后的钢轨温度应力均值均有所改善,放散效果排序为:自然拉伸放散效果<撞轨拉伸放散效果<激振拉伸放散效果。激振拉伸放散工况下,作业后的钢轨温度应力均值降幅为99.3%,标准差降幅为66.4%,表明所提新应力放散法具有一定的可行性。

2) 当固定激振力频率不变时,随着激振力幅值的增大,钢轨温度应力均值与标准差呈现先减小后增大的趋势,最优激振力幅值为5 kN。当固定激振力幅值不变时,随着激振力频率的增大,钢轨温度应力均值与标准差也呈现先减小后增大的趋势,最优激振力频率为50 Hz。该参数组合即为新应力放散法的最优激振参数。

需要指出的是,本文在研究过程中未考虑多激振器及钢轨长度等因素,因此后续研究将考虑在多重因素影响下,分析振动式无缝线路的应力放散效果。

参考文献

- [1] 徐栋,陈万里.城市轨道交通无缝线路应力放散施工及运营保障措施[J].铁道勘察,2020,46(3):108.
XU Dong, CHEN Wanli. Stress dispersion construction and operation guarantee measures of continuous welded rails in urban mass transit[J]. Railway Investigation and Surveying, 2020, 46(3): 108.
- [2] 金丁灿,裴翔,赵志鹏,等.轻型无缝线路液压撞轨器研究[J].机械设计与研究,2016,32(2):72.
JIN Dingcan, PEI Xiang, ZHAO Zhipeng, et al. An investigation into the light long seamless hydraulic rail impactor[J]. Machine Design and Research, 2016, 32(2): 72.
- [3] 徐鹏.基于冲击拉伸原理的无缝钢轨应力放散方案研究与装置设计[D].南昌:南昌大学,2020.
XU Peng. Research on stress releasing scheme of seamless rail based on impact tensile principle and device design[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [4] 孙萍,杨志强,曹巍.无缝线路应力放散组合式撞轨器的测试研究[J].铁道建筑,2007,47(5):93.
SUN Ping, YANG Zhiqiang, CAO Wei. Measuring study on destressing assemble rail-impacter used on CWR (continuous welded rail) line[J]. Railway Engineering, 2007, 47(5): 93.
- [5] 赵锋.无缝线路应力放散与锁定技术在乌将铁路扩能改造工程中的应用[J].工程建设与设计,2022(14):144.
ZHAO Feng. Stress release in seamless line and the application of locking technique in capacity expansion and reconstruction project of Urumqi-Jiangjunmiao railway[J]. Construction & Design for Project, 2022(14): 144.
- [6] 高新平.高速铁路无缝道岔应力放散施工技术[J].铁道建筑,2016,56(12):98.
GAO Xinping. Construction technology of destressing in continuous welded turnout on high speed railway[J]. Railway Engineering, 2016, 56(12): 98.
- [7] 张昭.浅谈无缝线路应力放散及调整[J].山西科技,2016,31(2):149.
ZHANG Zhao. Talking about the stress relieving and adjusting of jointless tracks[J]. Shanxi Science and Technology, 2016, 31(2): 149.
- [8] 岳国军.无缝线路钢轨实际锁定轨温超声法测量研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(2):87.
YUE Guojun. Research on ultrasonic measurement of actual stress-free temperature of continuously welded rail[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2021, 34(2): 87.

· 收稿日期:2024-01-07 修回日期:2024-02-23 出版日期:2025-05-10
Received:2024-01-07 Revised:2024-02-23 Published:2025-05-10
· 第一作者:许玉德,教授,xuyude2000@163.com
通信作者:薛志强,博士研究生,xuezhq@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license