论文

温度梯度荷载作用下CRTS II型板式无砟轨道砂浆层界面损伤分析

赵春发^{1*}, 刘建超^{1,2}, 毛海和², 肖瑞金²

1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031;

2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037

* E-mail: cfzhao@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2017-07-31; 接受日期: 2017-09-07; 网络出版日期: 2017-11-03

国家重点基础研究发展计划(编号: 2013CB036202, 2013CB036205)和国家自然科学基金(批准号: 51478397)资助项目

摘要 温度荷载引起的轨道板与砂浆层之间界面的损伤影响轨道结构的传力与受力特性, 是服役期内高速铁路无砟轨道需要重点关注的问题. 建立CRTS II型板式无砟轨道有限元模型, 采用内聚力模型模拟分析了极端温度梯度荷载作用下砂浆层界面的损伤行为, 以及温度梯度荷载循环作用下不同黏结状态界面的累积损伤特性. 结果表明: 在极端温度梯度荷载作用下, 沿轨道板边缘出现环状的界面损伤区域, 边角处产生离缝, 损伤发生后界面内应力重新分布, 在边缘附近形成应力集中带. 在温度梯度荷载循环作用下, 黏结性能良好界面的损伤区域较小, 损伤区随循环作用次数的增加没有明显扩展; 对于黏结性能不良的界面, 其损伤区域和离缝面积均随循环作用次数增大而加快发展, 离缝区越靠近轨道板中心, 界面损伤发展速率越大.

关键词 高速铁路, 无砟轨道, 温度荷载, 界面损伤, 累积损伤

1 引言

截止2016年底, 我国高速铁路运营总里程超过2.2万千米, 基本建成“四纵四横”高速骨干网. 中国高速铁路分布范围广, 服役环境复杂, 跨越了高原、沙漠、冻胀土、湿陷性黄土、软土等特殊地质条件区域, 承受着高寒、湿热、多雨、大风等极端气候环境. 受列车荷载与环境荷载(水、温度)的反复作用, 服役期内高速铁路轨道结构劣化不可避免, 调查结果也表明, 我国高速铁路运营线上无砟轨道已出现结构性损伤与破坏, 例如轨道板、底座或支承层裂纹, 砂浆充填层

碎裂, 轨道板与砂浆充填层之间黏结失效破坏等, 这些现象大致可归纳为层间联结失效、结构部件损伤开裂两大类问题^[1,2]. 其中, 水泥乳化沥青砂浆充填层(CA砂浆)作为CRTS II板式无砟轨道关键结构层, 起着支承、调整、传力、承力以及隔振和减振的作用. 如果轨道板与CA砂浆层的界面出现损伤甚至离缝, 将导致层间黏结退化, 有效黏结面积减小, 引起尖端应力增大, 最终导致轨道板与CA砂浆层联结失效, 这不仅降低了轨道结构的寿命, 而且还影响高速列车运行安全性和乘坐舒适性^[3-5].

国内外学者对轨道板与砂浆层的界面损伤及其

引用格式: 赵春发, 刘建超, 毛海和, 等. 温度梯度荷载作用下CRTS II型板式无砟轨道砂浆层界面损伤分析. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 79-86
Zhao C F, Liu J C, Mao H H, et al. Interface damage analysis of CA mortar layer of the CRTS II ballastless slab track under temperature gradient loads (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 79-86, doi: [10.1360/N092017-00254](https://doi.org/10.1360/N092017-00254)

工程影响已开展了较多研究. 朱胜阳^[6]采用内聚力模型, 分析了温度场在一天内变化时温度与列车荷载作用下轨道板与砂浆层界面的损伤特性. 戴公连和栗淼^[7]模拟分析剪切荷载作用下轨道板与砂浆层界面应力、界面黏结承载力和界面破坏区域分布, 初步揭示了剪切荷载作用下界面黏结破坏机理. 田冬梅等人^[8]试验研究了高低温循环作用下CA砂浆与混凝土黏结界面的变化情况, 指出环境温度变化、SL砂浆和混凝土热行为差异是板式轨道在服役过程中出现层间离缝等劣化现象的主要原因. 此外, 还有学者研究了CA砂浆离缝对轨道结构性能和车辆运行性能的影响, 探讨了轨道板与砂浆层离缝的控制标准^[9-13]. 上述已有研究表明, 无砟轨道结构温度变形是造成砂浆层离缝的主要原因, 而且离缝对结构服役性能的影响较为明显, 但目前仍缺乏对温度循环荷载作用下砂浆层损伤发生、发展机制与规律的深入研究.

在前人研究基础上, 本文建立CRTS II型板式无砟轨道的空间有限元模型, 开展了温度梯度荷载作用下轨道板与CA砂浆层界面的损伤行为模拟分析, 给出了温度梯度荷载循环作用下砂浆层界面的累积损伤特性, 以期高寒、高温差区域高速铁路CRTS II型板式无砟轨道的设计与运营维护提供参考.

2 CRTS II型板式轨道有限元模型

路基段CRTS II型板式轨道由钢轨、弹性扣件、预制轨道板、CA砂浆及混凝土支承层等组成. 轨道板纵向通过6根精轧螺纹钢连接成整体, 砂浆层和支承层均为连续结构. 无砟轨道结构直接暴露在环境中, 其内部温度特别是轨道板温度场受外部环境温度、日照条件的影响较大.

2.1 板式轨道模型

忽略钢轨和纵向连接钢筋对轨道板的约束, 考虑

轨道结构自重的影响, 使用Abaqus软件建立了包括轨道板、砂浆层、底座板和砂浆层界面, 长为6.55 m的CRTS II型板式轨道有限元模型, 如图1所示.

砂浆层界面位于轨道板与CA砂浆层之间, 模型中以极小厚度模拟, 并采用内聚力单元模拟界面层的黏结力学行为, 其法向和切向黏结强度取值参考文献^[6], 取1 MPa, 断裂能为15 J/m². 轨道板、砂浆层和底座板采用C3D8R实体单元. 表1列出了CRTS II型板式轨道模型的主要参数.

内聚力单元基于连续介质损伤力学理论, 在模拟单调载荷和疲劳载荷下复合材料裂纹扩展具有良好的适应性^[14]. 以损伤因子 D 表征界面的损伤状态, 当 $D=0$ 时, 表示界面无损伤; 当 $D=1$ 时, 界面完全损伤, 该处形成裂纹^[15]. 模型初始状态假设砂浆层和底座板黏结良好, 轨道结构中各层间界面均为绑定约束, 包括轨道板和界面、界面和砂浆层以及砂浆层和底座板之间界面.

2.2 温度梯度荷载

为了分析极端工况下砂浆层界面的损伤情况, 参考国内外学者对无砟轨道结构温度场的现场测试研究结果^[16,17]以及中国《高速铁路设计规范 (TB10621-

图1 (网络版彩图) CRTS II型板式轨道有限元模型

表1 CRTS II型板式轨道模型参数

参数名称	轨道板	砂浆层	支承层
宽度(mm)	2550	2550	3250
高度(mm)	200	30	300
密度(kg/m ³)	2500	1900	2500
弹性模量(MPa)	36000	7000	25500
泊松比	0.2	0.3	0.2

2014)》, 本文取轨道板的正负极端竖向温度梯度 T_g 分别为 $90^\circ\text{C}/\text{m}$ 和 $-45^\circ\text{C}/\text{m}$, 沿厚度方向呈线性变化.

3 极端温度荷载作用下界面损伤行为

3.1 界面损伤区域

图2和图3分别给出了温度梯度为 $90^\circ\text{C}/\text{m}$ 和 $-45^\circ\text{C}/\text{m}$ 时砂浆层界面的损伤因子分布图. 图2显示, 在正温度梯度荷载作用下, 轨道板和砂浆层界面的损伤因子在边角位置半径约 0.5 m 的扇形区域内达到1, 说明该处已形成离缝. 界面中部椭圆形区域内无损伤发生, 沿边缘位置形成环状损伤带. 出现这一现象的原因是: 轨道板上表面温度大于板底和砂浆层, 轨道板和CA砂浆层变形不协调, 导致边界处的界面内应力过大, 超过其黏结强度, 引起界面损伤.

从图3可以看出, 在 $-45^\circ\text{C}/\text{m}$ 温度梯度荷载作用下, 损伤区域明显小于 $90^\circ\text{C}/\text{m}$ 温度梯度时; 但边角位置仍产生离缝, 离缝沿轨道纵横向长约 17 cm , 环状损伤区域沿边缘分布, 损伤因子由界面边缘向内逐渐减小, 界面内部大范围内无损伤产生.

3.2 界面应力分布

温度荷载作用下, 界面内应力超过一定范围后将

图2 (网络版彩图)温度梯度 $90^\circ\text{C}/\text{m}$ 时界面损伤因子云图

图3 (网络版彩图)温度梯度 $-45^\circ\text{C}/\text{m}$ 时界面损伤因子云图

导致界面局部产生损伤, 其黏结强度将出现软化, 所能承受的最大应力减小, 从而引起界面内应力重新分布. 图4和图5分别给出了温度梯度为 $90^\circ\text{C}/\text{m}$ 和 $-45^\circ\text{C}/\text{m}$ 时界面的纵向、横向切应力和法向拉应力云图. 从图4可以看出, 在正温度梯度作用下, 在完全损伤区域内, 各向应力均为零. 环状损伤带上, 靠近轨道板横向、纵向边缘各形成两条切应力集中带, 这是因为损伤带外沿的损伤因子较大, 已不能承担较大荷载, 故应力向界面内部转移, 损伤带内部应力增大. 模拟结果还显示, 在正温度梯度荷载作用下, 轨道板在垂向上呈现为“板中上拱, 四角下沉”的变形, 因此, 界面法向拉应力中部为正(受拉), 边缘为负(受压).

图5结果显示, 在负温度梯度荷载作用下, 由于轨道板呈现“板中凹陷, 四角翘曲”变形, 四个边角处界面的各向应力基本为零, 说明此处界面已完全损伤. 同样, 由于轨道板两侧边缘损伤因子较大, 界面纵、横向

图4 (网络版彩图)温度梯度 $90^\circ\text{C}/\text{m}$ 时界面应力云图. (a) 纵向; (b) 横向; (c) 法向

图5 (网络版彩图)温度梯度 $-45^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时界面应力云图。(a) 纵向; (b) 横向; (c) 法向

切应力表现为向内部转移,法向拉应力在边角附近达到最大。

3.3 界面最大损伤因子随温度梯度的变化

轨道板温度梯度跟随日照温度呈周期性变化,太阳辐射强度、环境温度和风速均会影响温度梯度的大小。此外,CA砂浆界面边角位置暴露在空气中,且约束相对于界面内部位置较弱,形成界面的奇异点,易发生应力奇异性现象,通常破坏起始于这类奇异点,最大损伤因子也出现在奇异点附近。

图6给出了轨道板与CA砂浆层界面边角位置处的最大损伤因子随温度梯度荷载的变化曲线。可以看出,在 $-10\sim 20^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 范围内较小温度梯度荷载作用下,由于轨道板和砂浆层相对变形较小,边角处各向应力在可承受范围内,没有发生损伤,说明界面黏结性能仍保持良好。但是,当温度梯度处于 $-30\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 和 $20\sim 50^{\circ}\text{C}/\text{m}$

图6 边角处界面损伤因子随温度梯度的变化

两个区间时,边角处应力随着温度梯度绝对值增大而快速增大,其损伤因子也随之增大,边角处界面将发生损伤,界面黏结质量恶化。当温度梯度处于 $-30\sim 45^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 或者 $50\sim 90^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的极端范围内,边角处损伤因子已达到0.95以上,界面已基本丧失黏结能力,直至完全损伤并形成离缝。

4 温度荷载循环作用下界面的损伤特性

服役过程中,轨道板温度梯度呈周期性变化,轨道结构经历一个昼夜时,温度梯度由正温度梯度向负温度梯度变化,砂浆层界面在温度荷载循环作用下将会逐渐产生损伤并形成离缝。刘学毅等人^[17]根据多次实测结果,建议我国无砟轨道常用温度梯度取为最大温度梯度的一半,因此,本文将温度循环荷载的正、负温度梯度取为 $45^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 和 $-22.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。另外,在无砟轨道施工过程中和服役期内,诸多因素都会导致轨道板和砂浆层界面的黏结性能低于设计标准。例如,砂浆干料的拌制温度、灌浆前的养护质量、灌浆的速度、消泡剂的剂量和使用时机等影响界面黏结强度,轨道板和砂浆黏结表面的微裂纹会减小黏结面积。已有研究表明,这些因素导致砂浆层界面黏结强度约在 $0.23\sim 1.5\text{ MPa}$ 之间变化^[18,19]。因此,本文假定黏结状况良好和退化后的CA砂浆界面的黏结强度分别为 0.54 和 1.0 MPa ,分析了 $45^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 和 $-22.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的温度梯度荷载循环作用下不同黏结状况砂浆层界面的累积损伤特性。

4.1 黏结状况良好时界面的累积损伤

图7分别给出了黏结状况良好时5, 10和20次循环温度荷载作用下的界面损伤云图。可以看出,5次循环

图7 (网络版彩图)温度荷载循环作用下黏结良好界面的损伤发展。(a) 5次; (b) 10次; (c) 20次

作用后,在边角和横向边缘位置的界面损伤因子达到了0.98;循环作用次数增加到10和20次以后,界面损伤区域基本未扩展,仅轨道板前后边界处的损伤带略有发展。可见,当界面黏结强度为1.0 MPa时,在常用温度梯度荷载循环作用下,CA砂浆层界面的损伤区域并不会随温度荷载循环作用次数而快速发展。

图8给出了黏结状态良好时砂浆层界面边角处的最大损伤因子随循环次数的关系曲线。图8表明:初始阶段边角处界面的损伤因子为零;在前5次循环内,损伤因子快速累积,急剧发展到0.98,之后损伤因子稳定在0.99。这是因为起始阶段温度梯度由零增加至45℃/m过程中,界面应力逐渐增大并超过黏结强度,从而产生损伤;损伤产生后,边角处所能承受的最大应力降低,当温度梯度荷载再次作用后,边角处应力会超过其承载能力,损伤继续发展;如此反复,就会引起界面损伤因子呈阶梯型递增,直至发生完全损伤。

图8 边角单元损伤因子随循环次数的变化

4.2 黏结状况退化时界面的累积损伤

当轨道板与砂浆层界面的黏结强度退化为0.54 MPa时,图9给出了5, 10, 15和20次温度荷载循环作用下界面的损伤因子分布图。可以看出,随着循环作用次数的增加,界面损伤区域由边缘位置逐渐向界面中心快速发展。循环作用20次后,界面大部分区域的损伤因子达到1,只有在轨道板中心附近约72 cm×32 cm区域内未完全损伤。

图10给出了黏结状态退化后界面离缝面积占整个界面的百分比随荷载循环作用次数的变化曲线。当温度荷载循环作用5次后,仅在边角位置处出现离缝,离缝面积百分比约为1%;10次循环后完全损伤区域向内部扩展,离缝面积百分比增大至11%;15次循环以后,完全损伤区域快速扩展,离缝面积百分比达到55%;而20次循环以后,整个界面损伤因子几乎均达到1。上述分析表明,在温度荷载循环作用初期,界面离缝面积小,发展缓慢;随着循环作用次数增加,一旦离缝面积百分比超过10%之后,离缝将迅速扩展,引起整个界面黏结失效,最终导致轨道板和砂浆层的脱离。

在砂浆界面层对角线上选取4个损伤观测点(图11),基于数值模拟结果进一步分析了界面损伤随温度荷载循环次数的发展,如图12所示。可以看出,在第1次温度荷载循环作用后,位于角点处的观测点1已经完全损伤,同时应力向界面内部转移,界面内部的观测点2也产生损伤。随着荷载循环次数的增加,观测点2的损伤因子呈阶梯型递增,在第12次循环作用后损伤因子达到1,此时界面应力继续向内部转移;在第15次循环作用后,观测点3出现损伤,并急剧发展,到第18次循环后完全损伤。当观测点3失去承载能力后,界面

图9 (网络版彩图)温度梯度循环作用下黏结退化界面的损伤发展. (a) 5次; (b) 10次; (c) 15次; (d) 20次

图10 离缝面积百分比随荷载循环次数的变化

图12 观测点界面损伤因子随循环次数的变化

图11 砂浆层界面损伤观测点(单位: mm)

有效黏结面积已经很小, 温度荷载继续作用后, 内应力快速向界面中心转移, 观测点4很快产生损伤, 再经

过1次循环后损伤因子接近为1. 综合分析4个观测点的损伤发展曲线可知, 随着荷载循环次数的增加, 界面损伤由内向外的速率越来越快, 其原因是: 当离缝持续向界面中心发展时, 界面有效黏结面积加速缩减, 界面损伤发展速率不断增大.

5 结论

(1) 在本文计算条件下, 数值分析结果表明: 在 $90^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 温度梯度荷载作用下, CRTS II型板式无砟轨道砂浆层界面损伤范围较大, 沿界面边缘呈环状分布, 在边角处形成半径约 0.5 m 的扇形离缝, 损伤会引起界面

内应力重新分布,在轨道板边缘形成应力集中带;在 $-45^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 温度梯度荷载作用下,界面损伤区域相对较小,边角处沿轨道纵、横向形成长约17 cm的离缝。

(2) 在 $-10\sim 20^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 较小温度梯度荷载作用下,轨道板边角处的砂浆层界面无损伤。当温度梯度处于 $-30\sim -10^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 或 $20\sim 50^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 范围内,边角位置的损伤因子对温度梯度变化比较敏感,随温度梯度绝对值增大而快速增大;如果继续增大温度梯度值,边角处的损伤因子接近1,将形成离缝。

(3) 在 $-22.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 和 $45^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 常用温度梯度荷载的循环作用下,对于黏结状况良好的砂浆层界面,界面损伤区域较小,损伤区随循环荷载次数的增加基本没有

进一步扩展。对于黏结状态退化的砂浆层界面,损伤区域和离缝面积均随温度梯度荷载循环作用次数增加而快速增大,离缝区越靠近轨道板中心,界面损伤发展速率越大。

需要说明的是,本文采用了双线性内聚力本构模型,模拟分析了单一温度循环荷载作用下黏结界面裂纹的产生和发展。双线性内聚力本构模型没有考虑损伤累积对界面张力-位移本构关系的影响,砂浆层界面疲劳荷载还包含列车荷载、水压荷载等等,因此,为更准确、更全面揭示轨道板与砂浆层界面的损伤特性,今后还需要在内聚力疲劳本构模型、无砟轨道复杂荷载模拟等方面开展深入研究。

参考文献

- 1 翟婉明,赵春发.现代轨道交通工程科技前沿与挑战.西南交通大学学报,2016,51: 209-226
- 2 翟婉明,赵春发,夏禾,等.高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题.中国科学: 技术科学,2014,44: 645-660
- 3 田冬梅.板式轨道水泥乳化沥青砂浆充填层劣化与失效机理研究.博士学位论文.长沙:中南大学,2013. 34-47
- 4 Bellego C L, Gerard B, Pijaudier-Cabot G. Mechanical analysis of concrete structures submitted to an aggressive water attack. In: de Borst R, Mazars J, Pijaudier-Cabot G, et al, eds. Fracture Mechanics of Concrete Structures. Lisse: Swets & Zeitlinger, 2001. 239-246
- 5 Zhu S Y, Cai C B. Interface damage and its effect on vibrations of slab track under temperature and vehicle dynamic loads. *Int J Non-Linear Mech*, 2014, 58: 222-232
- 6 朱胜阳.高速铁路无砟轨道结构损伤行为及其对动态性能的影响.博士学位论文.成都:西南交通大学,2015. 107-131
- 7 戴公连,栗淼.剪切荷载下板式无砟轨道界面黏结破坏机理.华中科技大学学报(自然科学版),2016,44: 16-21
- 8 田冬梅,邓德华,彭建伟,等.温度对水泥乳化沥青砂浆层与混凝土层间界面黏结影响.铁道学报,2013,35: 79-85
- 9 Song X L, Zhao C F, Zhu X J. Temperature-induced deformation of CRTS II slab track and its effect on track dynamical properties. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 1917-1924
- 10 汪力,王平,刘仁义. CRTS II型板砂浆层的常见劣化现象及其对轨道结构的影响分析.铁道标准设计,2012,11: 11-14
- 11 向俊,赫丹,曾庆元.水泥沥青砂浆劣化对板式轨道动力学性能的影响.中南大学学报(自然科学版),2009,40: 791-796
- 12 徐浩,刘霄,徐金辉,等.温度作用下轨道板与CA砂浆离缝对CRTS II型板式轨道的影响分析.铁道标准设计,2013,9: 9-12
- 13 姜子清,施成,赵坪锐. CRTS II型板式无砟轨道砂浆层离缝检查及损伤限值研究.铁道建筑,2016,1: 53-57
- 14 Dugdale D S. Yielding of steel sheets containing slits. *J Mech Phys Solids*, 1960, 8: 100-104
- 15 Needleman A. A continuum model for void nucleation by inclusion debonding. *J Appl Mech*, 1987, 54: 525-531
- 16 刘钰,陈攀,赵国堂. CRTS II型板式无砟轨道结构早期温度场特征研究.中国铁道科学,2014,35: 1-6
- 17 刘学毅,赵坪锐,杨荣山,等.客运专线无砟轨道设计理论与方法.成都:西南交通大学出版社,2010. 161-164
- 18 元强,郭建华,邓德华,等.板式轨道用高弹模水泥沥青砂浆与混凝土黏结性能的试验研究.铁道科学与工程学报,2013,10: 40-44
- 19 熊文涛. CRTS II型水泥乳化沥青砂浆灌注过程气泡产生机理与控制技术.硕士学位论文.武汉:武汉理工大学,2012. 25-35

Interface damage analysis of CA mortar layer of the CRTS II ballastless slab track under temperature gradient loads

ZHAO ChunFa¹, LIU JianChao^{1,2}, MAO HaiHe² & XIAO RuiJin²

¹ State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

² Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China

Damage of interface between the track slab and the cement asphalt (CA) mortar layer under temperature loads will deteriorate mechanical characteristics of the ballastless slab track, so this issue should be paid more attention in service period of the ballastless slab track. This paper established a finite element model of the CRTS II ballastless slab track, which use a cohesive zone model to simulate damage behaviors of the CA mortar layer interface under extreme temperature gradient loads, and the cumulative damage behaviors of the interface with different adhesive strength under cyclic temperature gradient loads. Numerical results show that a ring-shaped interface damage zone appears near the edges of CRTS II ballastless slab track when it is acted by the extreme temperature gradient loads, and the damage causes a redistribution of interface stress, some stress concentration belts are generated on the edges of slab track. Under the cyclic common temperature gradient loads, the interface damage zone of CA mortar layer with normal adhesive strength is relative small, and it does not expand distinctly with cyclic number of temperature loads. For the deteriorated CA mortar interface with a low adhesive strength, the damage zone and the seam area increases quickly with cyclic number of temperature loads, namely, the larger the seam area, the larger the damage expand rate of CA mortar layer.

high-speed railway, ballastless track, temperature gradient, interface damage, cumulative damage

doi: 10.1360/N092017-00254