

基于声发射技术的板式无砟轨道层间离缝演化^{*}

陈家璐 何越磊 路宏遥

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海)

摘要 [目的] 板式无砟轨道作为典型的层状结构体系, 其层间界面的黏结状态直接影响着列车运行的安全。对此, 有必要采用微观宏观结合的方式研究板式无砟轨道层间离缝演化。[方法] 制作混凝土-砂浆复合试件, 并对部分试件进行植筋锚固。应用声发射技术, 开展复合试件界面法向性能试验。利用声发射监测系统对复合试件破坏过程进行全程监测, 分别获得层间界面离缝演化过程中宏观上的荷载-时间曲线与微观上离缝出现的声发射累计振铃计数指标。[结果及结论] 层间界面发生脱黏破坏过程可分为三个阶段, 即界面咬合阶段、离缝稳定扩展阶段及界面失稳破坏阶段; 植筋后复合试件层间界面脱黏破坏位移值及脱黏破坏过程中对应的声发射振铃计数均明显增加。通过声发射技术可以对层间界面状态进行科学评价, 从宏微观层面上验证了植筋能够有效地增加复合试件界面黏结性能。

关键词 轨道交通; 板式无砟轨道; 层间离缝演化; 声发射技术; 宏微观分析

中图分类号 U213.2⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.028

Interlayer Cracks Evolution in Slab Ballastless Track Based on Acoustic Emission Technology

CHEN Jialu, HE Yuelei, LU Hongyao

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Slab ballastless track is a typical layered structure system, and the bonding state of its interlayer interface directly affects the safety of train operation. Therefore, it is necessary to study the interlayer evolution of slab ballastless track by combining micro and macro methods. [Method] Concrete-mortar composite specimens are made and partial are anchored with embedded bars. Acoustic emission technology is used to carry out interface normal performance tests on the composite specimens. The entire failure process of composite specimens is monitored by the acoustic emission monitoring system, and the macroscopic load-time curve during the evolution of interlayer interface cracks and the microscopic acoustic

emission cumulative ringing count index of the cracks are obtained respectively. [Result & Conclusion] The interlayer interface debonding failure process can be divided into three stages: the interface engagement stage, the crack stable expansion stage, and the interface instability break stage. After rebar implantation, both the displacement value of the composite specimen interlayer interface debonding failure and the corresponding acoustic emission ringing count during the debonding failure process are increased significantly. The acoustic emission technology can be used to evaluate the state of the interlayer interface scientifically, and it is verified from both the macro and micro levels that the rebar implantation can effectively increase the bonding performance of the composite specimen interface.

Key words rail transit; slab ballastless track; interlayer crack evolution; acoustic emission technology; macro-micro analysis

CRTS II型板式无砟轨道为一种具有界面属性的层状结构物, 主要由轨道板、CA(水泥沥青)砂浆层、支承层组成, 具有高平顺性、高稳定性及综合性能优异等特点, 为我国高速铁路常用的轨道结构形式。CRTS II型无砟轨道长期服役于自然环境中, 其轨道板与CA砂浆层间离缝病害多发, 严重威胁了列车安全运行。由此可见, 对无砟轨道层间状态进行有效评估并科学养护维修, 是保证高速铁路安全运营的重要前提。

为研究无砟轨道的离缝宏观演化行为, 相关学者进行了大量理论研究, 文献[1]以内聚力单元表征层间界面, 分析了温度梯度荷载作用下无砟轨道板与砂浆层层间界面损伤特性。文献[2]建立了层间内聚力模型, 研究了不同服役状态下轨道板与CA砂浆层离缝病害的伤损演变机理。文献[3]通过建立无砟轨道缩尺模型, 分析了离缝在温度循环作用下的演化规律。文献[4]建立了三维有限元分析模型, 认为提高界面断裂韧度和剪切强度能有效

^{*} 上海市科委项目(20dz1203104)

地控制层间离缝的发生。上述研究主要关注无砟轨道宏观状态下的开裂特性,而未从微观层面阐述无砟轨道的损伤演化过程。

在应用声发射技术研究混凝土断裂的微观过程方面,文献[5]通过对不同岩石进行单轴压缩下的声发射试验分析了不同破坏模式下岩石声发射特征与损伤变量之间的关系。文献[6]通过研究混凝土试件全过程的声发射特征探讨了声发射特征参数与试件失稳破损过程各阶段的对应关系。文献[7]开展蒸养混凝土试件冻融循环试验和单轴压缩-声发射试验,分析了冻融循环作用后不同蒸养制度混凝土加载损伤破坏声发射过程。文献[8]采用声发射技术对复合梁的弯拉损伤过程进行了监测,并采用高斯混合模型对声发射参数进行聚类分析。文献[9]对早期受冻混凝土在劈裂抗拉破坏过程中的声发射特性进行试验研究。文献[10]通过三点弯曲试验确定混凝土构件的断裂韧性,并利用声发射技术监测试样的断裂形成过程。

现阶段国内外学者对无砟轨道的损伤机理与混凝土结构断裂过程开展了一系列的研究,但采用声发射技术对无砟轨道层间离缝演化过程进行无损检测的研究工作相对较少。为从宏微观结合角度获得服役状态下无砟轨道的离缝演化过程,本文开展基于声发射技术的混凝土-砂浆复合试件的法向力学性能试验,验证采用宏微观方法对层间离缝演化过程表征的可行性,并在此基础上,结合植筋前后复合试件的声发射特征参数来分析植筋作业的有效性,以期服役状态下的无砟轨道层间状态科学评价与开裂预警提供一种新的方法与思路。

1 无砟轨道层间性能力学试验

1.1 复合试件制备方法

为模拟 CRTS II 型无砟轨道的层状结构,制作 2 组共 6 块混凝土-砂浆复合试件,每组 3 块。其中混凝土层用来模拟轨道板,水泥乳化沥青砂浆用来模拟 CA 砂浆层,两者的尺寸都为 $75\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ^[11]。为进一步对比混凝土-砂浆两相介质和混凝土-锚固钢筋-砂浆三相介质的层间离缝演化过程,在试件养护完成后对其中的 3 个试件进行植筋锚固。未植筋复合试件称为“普通复合试件”,植筋锚固复合试件称为“植筋复合试件”,复合试件制作如图 1 所示。

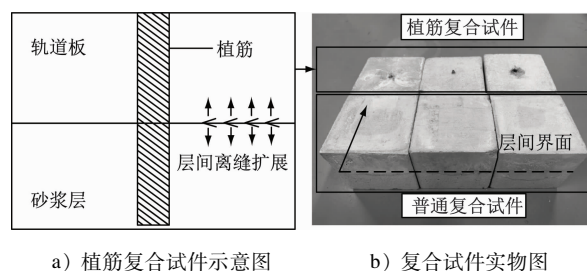
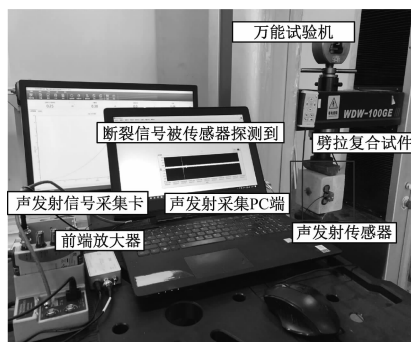


图 1 复合试件制作

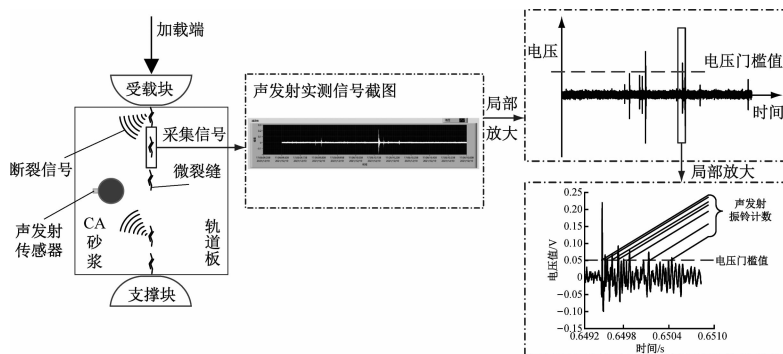
Fig. 1 Composite specimens production

1.2 试件界面法向性能试验

试件界面法向性能试验所用的声发射检测系统及试验加载系统如图 2 所示。试验时将养护完成的复合试件放置于万能试验机的工艺装备上固定,保持混凝土-砂浆复合界面、支撑块、受载块和加载端头处于同一垂线上,使加载界面处于受拉状态。在正式加载前,利用耦合剂及工艺装备将声发射传感器固定于复合试件砂浆一侧,以便于采集数据。



a) 试验实景图



b) 试验过程示意图

图 2 声发射检测系统及试验加载装置

Fig. 2 Acoustic emission detection system and test loading device

加载时,万能试验机位移加载速率控制为 0.50 mm/min ,通过受载块将试验机的垂向荷载转变为试件界面法向荷载。在加载过程中利用裂缝综合测试仪对复合试件界面处裂缝宽度进行测量,以获取层间界面处离缝的宏观演化情况。

声发射现象是材料局部区域发生损伤,快速释放应变能而产生瞬间弹性波的现象。每一个超过阈值的电信号振荡波被称为一个声发射振铃计数,这是试件结构破坏的外在声学表现。据此,可采用声发射振铃计数分布来表征试件声发射活动的强弱程度与试件层间界面的损伤演化过程^[12]。复合试件层间界面为试验中的薄弱受力界面,由此可认为试验中声发射振铃计数均来自于复合试件层间界面处。为避免环境噪声的影响,声发射检测系统的门槛值设为 40 dB ,前置放大器增益设为 40 dB ,采样率为 1 MHz 。

2 复合试件离缝演化行为

2.1 普通复合试件的离缝演化

试件界面法向性能试验结果表明,普通复合试件破坏属于脆性破坏范畴。由法向性能试验结果,普通复合试件的声发射振铃计数分布与试验荷载-时间曲线如图3所示。其中 P_{\max} 为最大试验荷载。

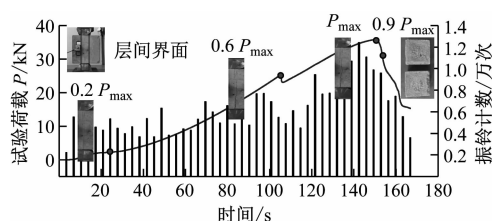


图3 普通复合试件的声发射振铃计数分布与荷载-时间曲线
Fig.3 Acoustic emission ringing count distribution and load-time curve of common composite specimens

由图3可见,普通复合试件在界面法向性能试验中的离缝演化明显可分为3个阶段。

1) 界面咬合阶段。加载初期,随着荷载-时间曲线的缓慢上升,层间界面处材料间化学胶合力协同颗粒间交错排列,产生摩擦阻力和机械咬合力,共同抵抗界面外荷载。试验荷载达到 4.50 kN 后,试件界面端部出现肉眼可见的初始宏观裂缝,离缝宽度为 0.33 mm ,说明界面间的机械咬合力被逐渐破坏。此时可视作复合试件的起裂点。随着荷载的增大,在荷载-时间曲线斜率发生突变之前,声发射振铃计数出现大量波峰,说明声发射活动较强。

2) 离缝稳定扩展阶段。荷载-时间曲线率出现陡增,声发射活动开始活跃,表明试件界面有效黏结面积正在逐渐减少,化学胶合状态逐渐破坏。此时界面离缝宽度达到 0.82 mm ,可视作复合试件的初始失稳破坏点。这一阶段中,复合试件层间界面出现裂缝,声发射振铃计数波峰出现次数增多,并且峰值大于界面咬合阶段中的振铃计数峰值。

3) 界面失稳破坏阶段。进入加载的后段,裂缝随着法向荷载的持续增加逐步变宽,试件的声发射活动更加剧烈。在试件破坏前,声发射振铃计数波峰出现的次数达到顶峰。当声发射振铃计数波峰出现次数达到一定程度时,试件也即将进入界面失稳破坏状态,应力水平也达到层间界面的极限承载力。因此,可以将声发射振铃计数在峰值应力之前出现大量峰值的情况作为试件脱黏破坏的先兆信息。在界面法向承载能力达到极限后,荷载-时间曲线急剧下降,复合试件分裂为完整的混凝土块和砂浆块,破坏发生在最薄弱的层间界面处。

2.2 植筋复合试件的离缝演化

植筋复合试件的声发射振铃计数分布与荷载-时间曲线如图4所示。

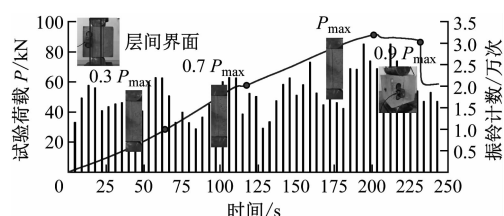


图4 植筋复合试件的声发射振铃计数分布与荷载-时间曲线
Fig.4 Acoustic emission ringing count distribution and load-time curve of rebar-planted composite specimens

由图4可见,植筋复合试件的离缝演化也可分为3个阶段。

1) 界面咬合阶段。该阶段植筋复合试件与普通复合试件的声发射振铃计数分布相似。在加载初期,荷载达到 5.55 kN 时,层间出现明显开裂,界面破坏状态与普通复合试件同阶段界面破坏状态相似,可视作试件的起裂点。经分析,植筋胶的黏结作用使得试件界面黏结性更好,因此声发射活动更为活跃。

2) 离缝稳定扩展阶段。该阶段,植筋复合试件与普通复合试件的声发射振铃分布也相似。在荷载-时间曲线陡增后,层间离缝达到 1.43 mm ,界面离缝出现贯穿,可视作植筋复合试件的初始失稳破

坏点。该阶段,在植筋锚固作用下,植筋与黏结处材料共同抵抗荷载。

3) 界面失稳破坏阶段。随着法向荷载的进一步增加,植筋复合试件层间界面出现小颗粒松散脱落的现象,说明试件开始进入界面失稳破坏阶段。此时荷载-时间曲线迅速下降,但试件并未分离,锚固钢筋在荷载作用下逐渐屈服。在锚固钢筋屈服开始破坏时,植筋复合试件的声发射振铃计数出现短暂时平静期;在平静期过后,声发射振铃计数出现大量峰值。

2.3 不同植筋状态下试件离缝演化对比

试验结果表明,植筋复合试件破坏属于延性破坏范畴。界面破坏时,已植筋复合试件界面的脱黏破坏位移值较普通复合试件界面的脱黏破坏位移值提高 74.39%,界面抵抗相对变形的性能在植筋锚固作用下大幅度提高,由此可见,对服役状态下的无砟轨道进行植筋加固可以有效提高界面的力学性能。与普通复合试件相比,植筋复合试件的脱黏荷载和振铃计数都更高,说明复合试件植筋后界面延性和黏结强度均更优,多层结构共同受力特征更明显,有效地抑制了层间离缝的产生与扩展。

3 微观数据与宏观数据

不同试件的脱黏荷载如图 5 所示。从宏观角度来看,植筋复合试件比普通复合试件抵抗外部荷载作用的能力提升超过 150%。

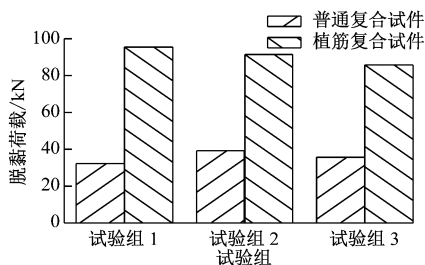


图 5 不同试件的脱黏荷载变化

Fig. 5 Debonding load variation of different specimens

累计振铃计数可表征不同破坏模式及植筋锚固前后试件的声发射活跃状态及试件离缝演化情况^[13]。绘制不同复合试件累计振铃计数与试验荷载所占脱黏荷载比例的对应关系,如图 6 所示。由图 6 可进而分析宏观界面法向性能试验中混凝土-砂浆复合试件离缝开展过程与微观累计振铃计数之间的对应关系。

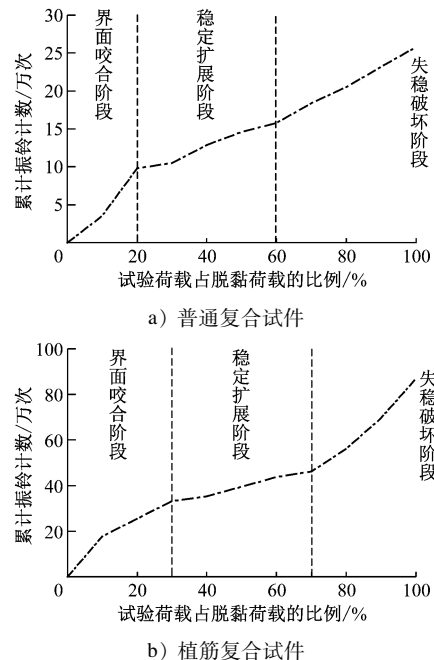


图 6 累计振铃计数随试验荷载所占脱黏荷载比例变化曲线
Fig. 6 Cumulative ringing count change curve with the proportion of the test load to the debonding load

普通复合试件在试验荷载达到脱黏荷载的 20% 及 60% 时,其累计振铃计数曲线斜率发生突变,试件层间界面由界面咬合阶段进入离缝稳定扩展阶段再进入界面失稳破坏阶段;而植筋复合试件则分别在试验荷载达到脱黏荷载的 30% 及 70% 时进入相对应破坏阶段。其主要原因是植筋锚固作用增加了界面黏结性能,延缓了试件层间界面的破坏速率。对于累计振铃计数而言,普通复合试件的平均破坏累计振铃计数为 25.7 万次,植筋复合试件的平均破坏累计振铃计数为 86.5 万次,从微观层面而言,植筋复合试件较普通复合试件抵抗外部荷载性能有效提升。

复合试件脱黏荷载和累计振铃计数在植筋锚固后增加的本质是复合试件界面黏结性能获得提升,宏观裂缝扩展所需要开裂的微裂缝数量进一步增多,因此微观层面的累计振铃计数也可以表征试件界面离缝的演化情况。

4 结语

本文采用宏微观结合的方法对复合试件法向黏结性能试验结果进行分析,利用声发射技术获得了植筋锚固前后层间界面离缝的扩展规律,主要结论如下:

1) 无论是宏观上的荷载-时间曲线,还是微观

上的声发射振铃计数分布曲线,层间界面的离缝扩展过程均可有效表征为3个阶段。

2) 宏观上,植筋复合试件界面脱黏破坏位移(即试件离缝宽度)和荷载值均大幅提高,说明采用有效植筋工艺可抑制无砟轨道的层间离缝扩展。

3) 微观上,植筋后层间界面的脱黏过程声发射的累计振铃计数增加了236.57%,植筋锚固后层间界面脱黏破坏所需的能量显著提高。

本文研究为无砟轨道层间离缝损伤演化过程及状态评价提供了一种宏观与微观相结合的分析方法,可进一步指导无砟轨道的养护维修工作。

参考文献

- [1] 许玉德, 缪雯颖, 严道斌, 等. 基于改进混合模式内聚力模型的无砟轨道层间损伤分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(4): 125.
XU Yude, MIAO Wenying, YAN Daobin, et al. Analysis of interlayer interface damage in ballastless track based on improved mixed-mode cohesive zone model[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(4): 125.
- [2] 赵国堂, 刘钰. CRTS II 型板式无砟轨道结构层间离缝机理研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 117.
ZHAO Guotang, LIU Yu. Mechanism analysis of delamination of CRTS II slab ballastless track structure[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 117.
- [3] 周凌宇, 张广潮, 余志武, 等. 循环温度荷载下无砟轨道结构模型试验研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(1): 82.
ZHOU Lingyu, ZHANG Guangchao, YU Zhiwu, et al. Model experiments of ballastless track-bridge structure under cyclic temperature load[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(1): 82.
- [4] 钟阳龙, 高亮, 王璞, 等. 温度荷载下 CRTS II 型轨道板与 CA 砂浆界面剪切破坏机理[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 230.
ZHONG Yanglong, GAO Liang, WANG Pu, et al. Mechanism of interfacial shear failure between CRTS II slab and CA mortar under temperature loading[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(2): 230.
- [5] 吴贤振, 刘建伟, 刘祥鑫, 等. 岩石声发射振铃累计计数与损伤本构模型的耦合关系探究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 28.
WU Xianzhen, LIU Jianwei, LIU Xiangxin, et al. Study on the coupled relationship between AE accumulative ring-down count and damage constitutive model of rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 28.
- [6] 赖于树, 熊燕, 程龙飞. 混凝土受载试验全过程声发射特性研究与应用[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3): 380.

- LAI Yushu, XIONG Yan, CHENG Longfei. Study of characteristics of acoustic emission during entire loading tests of concrete and its application[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3): 380.
- [7] 陈波, 袁志颖, 陈家林, 等. 冻融循环后蒸汽养护混凝土的损伤—声发射特性[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 143.
CHEN Bo, YUAN Zhiying, CHEN Jialin, et al. Damage-acoustic emission characteristics of steam-cured concrete after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2): 143.
- [8] 陈徐东, 郭玉柱, 胡良鹏, 等. 岩石-混凝土复合梁弯拉损伤的声发射参量聚类识别[J]. 振动与冲击, 2022, 41(19): 274.
CHEN Xudong, GUO Yuzhu, HU Liangpeng, et al. Cluster identification of acoustic emission parameters for bending-tensile damage of rock-concrete composite beams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(19): 274.
- [9] 屈春来, 高月坤, 胡宝文, 等. 渡槽混凝土早期受冻劈裂抗拉声发射特性[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 153.
QU Chunlai, GAO Yuekun, HU Baowen, et al. Tensile acoustic emission characteristics of aqueduct concrete during early freezing splitting[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(8): 153.
- [10] DENG H S, FU H L, ZHAO Y B, et al. Using acoustic emission parameters to study damage and fracture characteristics of concrete with different pour intervals cold joints[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 122: 103601.
- [11] 何越磊, 黄自鹏, 路宏遥, 等. 温度荷载作用下高铁无砟轨道界面性能演变规律研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(4): 47.
HE Yuelei, HUANG Zipeng, LU Hongyao, et al. Study on the evolution law of interface performance of high-speed railway ballastless track under temperature load[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(4): 47.
- [12] 李京军, 闫珺, 牛建刚. 冻融作用对自密实轻骨料混凝土声发射特性影响[J]. 工程力学, 2022, 39(9): 133.
LI Jingjun, YAN Jun, NIU Jiangang. Effect of freeze-thaw action on acoustic emission characteristics of self-compacting lightweight aggregate concrete[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(9): 133.
- [13] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, CORRADO M, et al. Crackling and crackling in concrete-like materials: a dynamic energy balance[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 155(April): 130.

· 收稿日期:2023-01-07 修回日期:2023-02-22 出版日期:2025-04-10

Received:2023-01-07 Revised:2023-02-22 Published:2025-04-10

· 第一作者:陈家璐,硕士研究生,573229616@qq.com

通信作者:路宏遥,实验师,luhongyao1@163.com

· ©《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