

声发射技术在钢桥面系疲劳损伤监测中的应用与研究

孟乐乐 张浩浩

江苏现代路桥有限责任公司，江苏 南京 210046

[摘要]通过正交异性钢桥面板与铺装结构体系足尺试验模型进行疲劳试验，结合声发射传感器、电阻式应变片和位移计多种传感技术监测分析钢桥面系足尺模型疲劳损伤状况，同时评估声发射技术对钢桥面系结构疲劳损伤性能监测效果。结果表明：声发射 AE 传感器能够有效捕捉钢桥面系急剧变化或衰减敏感信号，足尺模型加载 200 万次后钢桥面板挠度变形自 0.5mm 增加至 0.8mm，钢桥面系肋间刚度损失约 60%，关键细节部位应变由 $250\mu\varepsilon$ 减少至 $45\mu\varepsilon$ ；且通过取芯验证钢桥面系层间粘结强度减少 30%，对比 AE 峰值能量信号增加 40%~50%，AE 累积信号由初始松散稀疏分布逐渐趋于紧密集中，表明钢桥面系结构出现疲劳损伤状态，结合相控阵及超声检测验证结果验证信号集中处为疲劳开裂位置，证实 AE 信号能够实现钢桥面系层间黏结损伤基础定位，追踪钢板与铺装结构体系的疲劳损伤扩展状态。

[关键词]声发射；钢桥面系；足尺结构；疲劳损伤

DOI: 10.33142/sca.v8i9.17963

中图分类号: U443

文献标识码: A

Application and Research of Acoustic Emission Technology in Fatigue Damage Monitoring of Steel Bridge Deck System

MENG Lele, ZHANG Haohao

Jiangsu Xiandai Road and Bridge Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210046, China

Abstract: Fatigue tests were conducted on a full-scale experimental model of an orthotropic steel bridge deck and pavement structure system. Multiple sensing technologies, including acoustic emission sensors, resistance strain gauges, and displacement sensors, were used to monitor and analyze the fatigue damage status of the full-scale model of the steel bridge deck system. At the same time, the monitoring effect of acoustic emission technology on the fatigue damage performance of the steel bridge deck system structure was evaluated. The results show that the acoustic emission AE sensor can effectively capture the sharp changes or attenuation sensitive signals of the steel bridge deck system. After loading the full-scale model for 2 million times, the deflection deformation of the steel bridge deck increased from 0.5mm to 0.8mm, and the rib stiffness loss of the steel bridge deck system was about 60%. The strain of key details decreased from $250\mu\varepsilon$ to $45\mu\varepsilon$; Through core testing, it was verified that the interlayer bonding strength of the steel bridge deck system decreased by 30%, while the peak energy signal of AE increased by 40%-50%. The cumulative signal of AE gradually tended to be tightly concentrated from the initial loose and sparse distribution, indicating that the steel bridge deck structure was in a fatigue damage state. Combined with phased array and ultrasonic testing verification results, it was verified that the signal concentration was the location of fatigue cracking, confirming that AE signals can achieve the basic positioning of interlayer bonding damage in the steel bridge deck system and track the fatigue damage propagation state of the steel plate and pavement structure system.

Keywords: acoustic emission; steel bridge deck system; full scale structure; fatigue damage

引言

近二十年来，我国的大跨钢桥建设经历了一个跨越式的发展，大规模正交异性板钢桥面投入建设，但随着交通量的日益增长及高速、重型车辆的出现，使得钢桥正交异性板结构疲劳损伤和桥面铺装耐久性问题日益凸显，严重

影响桥梁的安全性和长期使用性能。因此，准确监测和定位桥梁早期疲劳裂纹是保证桥梁安全的关键。

声发射作为一种被动的无损检测方法，不需要借靠外加信号源，仅凭材料自身的应力波释放，通过声发射采集设备对其进行监测，可以实现对物体的实时监测。

并且经过几十年的发展，声发射现已广泛地应用于多个领域，但应用于钢桥上的应用较少^[1-6]。本文基于此通过正交异性钢桥面板与铺装结构体系足尺试验模型进行疲劳试验，结合声发射传感器、电阻式应变片和位移计多种传感技术监测分析钢桥面系足尺模型疲劳损伤状况，同时评估声发射技术对钢桥面系结构疲劳损伤性能监测效果。

1 试验方案设计

足尺试验模型尺寸为：长 4.3m×宽 2.9m×高 0.8m。纵向单跨 2 道横隔板、横向 5 个 U 肋；顶板：厚度 14/18mm、U 肋：U280mm×8mm×300mm、中心间距 600mm；横隔

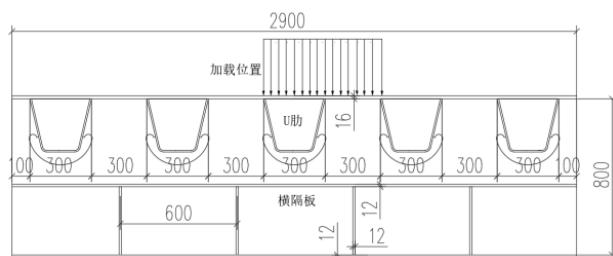


图 1 足尺模型横、纵截面尺寸

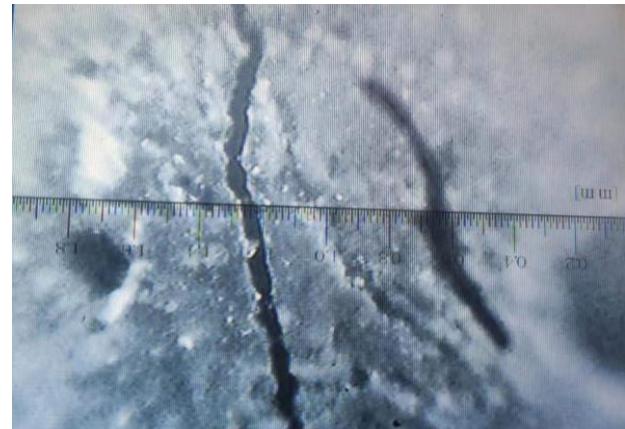
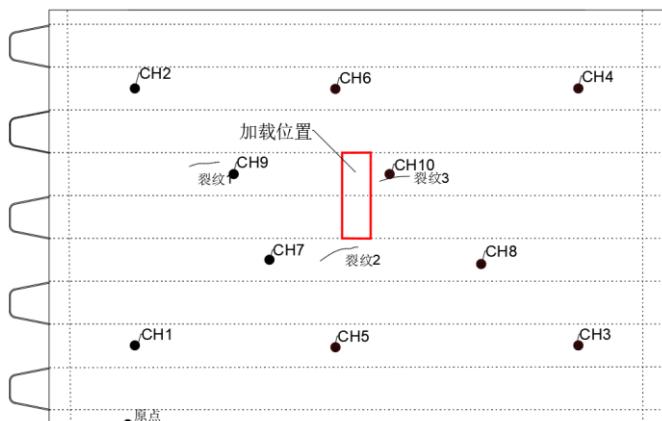
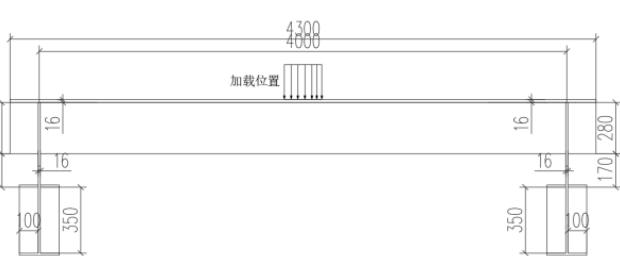


图 2 声发射传感器布置及表面铺装裂纹示意图

表 1 各通道坐标

通道	坐标	通道	坐标	通道	坐标	通道	坐标
CH1	(50,550)	CH2	(50,2350)	CH3	(3150,550)	CH4	(3150,2350)
CH5	(1450,550)	CH6	(1450,2350)	CH7	(990,1150)	CH8	(2470,1120)
CH9	(740,1750)	CH10	(1830,1750)				

表 2 发现裂纹位置及描述

裂纹号	裂纹位置	裂纹描述
裂缝 1	(537,850)	4.8 日首次发现于铺装上方，裂缝长宽为 200mm×0.08mm；4.12 日发现裂缝长度发展至 620mm
裂缝 2	(2150,1600)	4.8 日首次发现于铺装上方，裂缝长宽为 100mm×0.06mm；4.12 日发现裂缝长度前后发展至 450mm 和 740mm
裂缝 3	(2300,1650)	4.12 日首次发现于 (2300,1650) 处铺装上方，裂缝长宽为 80mm×(0.02~0.08) mm

2 结果分析

2.1 加载频率及绝对位移与波形关联分析

本次足尺试验荷载作用频率为 1.6Hz 如图 3 所示, 获取所有超过阈值的 AE 撞击波形数据, 其中波形最大幅度与加载频率及钢桥面板绝对位移之间的关系如图 4 和图 5 所示, 并验证了动载过程中声发射的波形峰值出现频率与加载频率一致性以及声发射波形信号的幅值与加载载荷变化速率成正相关关系。

2.2 钢桥面系疲劳损伤监测发展历程分析

通过声发射 AE 传感器能够捕捉钢桥面系急剧变化或衰减敏感信号, 获取所有超过阈值的 AE 撞击信号进行分析。如图 6 所示, 结合声发射监控数据、现场人工

检查以及超声相控阵监测成果对钢桥面系疲劳损伤监测发展历程, 结果显示声发射技术在早期动载次数分别在 41.15 万次和 84.04 万次都监测到了声发射裂纹信号, 以及裂纹信号源位置进行了定位, 中期通过在该位置进行相控阵及超声检测确认了裂纹存在, 并分别在 133.33 万次、141.18 万次、155.27 万次、170.35 万次、178.5 万次、196 万次发现裂纹扩展信号, 最终经过检查验证裂纹长度确实在发展增大。因此表明声发射技术能够有效捕捉钢桥面系急剧变化或衰减敏感信号, 实现对钢桥面系裂纹的形成和发展的实时监测, 而且对钢桥面系损伤点进行有效定位, 追踪钢板与铺装结构体系的疲劳损伤扩展状态。

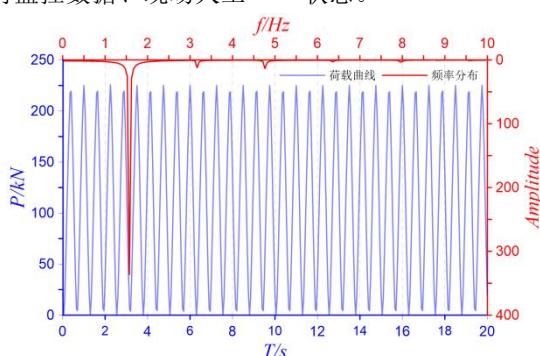


图 3 动载试验时间-荷载和频谱曲线

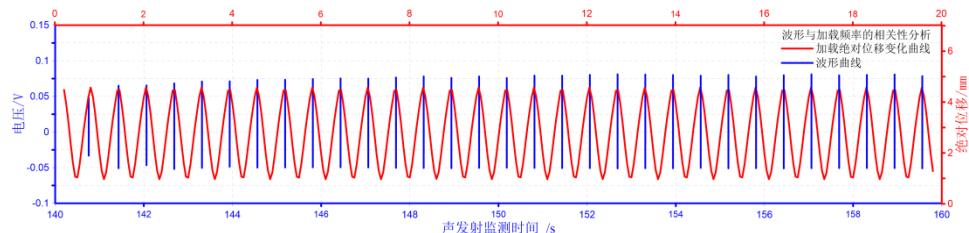


图 4 声发射波形信号最大幅度与加载频率

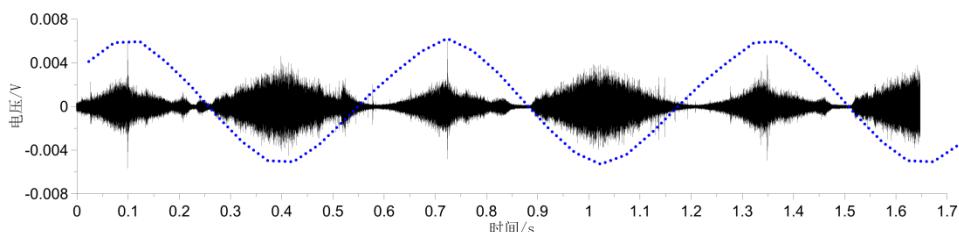


图 5 声发射波形信号最大幅度与钢桥面板绝对位移

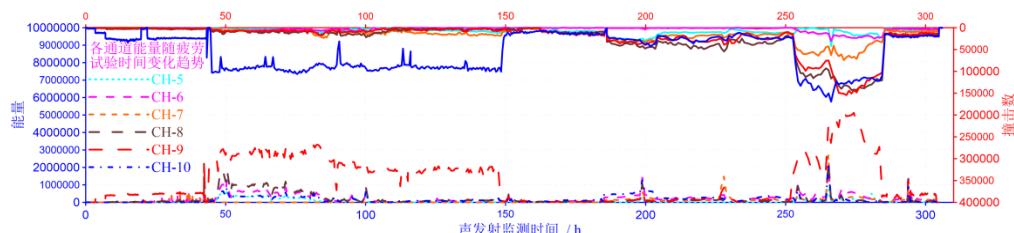


图 6 钢桥面系疲劳损伤监测声发射能量与撞击数变化趋势图

2.3 静载数据分析

为评估足尺模型在长期动载作用下钢桥面系承载能力的变化,故在动载期间进行了多次静载试验。静载试验,采用分级加载的方法,利用钢桥面系各部位与控制截面在各级试验荷载作用下的挠度、应力、裂缝、横向分布系数等特性的变化,将测试结果与初始状态荷载作用下的初始值作比较,从而进行钢桥面系损伤状况的评价。如图7和图8所示分别为钢桥面系经170w次和200w次动载试验后静载试验声发射监测结果图(图7由200kN逐级加载至500kN,每级加载25kN;图8由50kN逐级加载至500kN,每级加载50kN)。由图7表明钢桥面系静载试验在逐级加载过程中声发射信号的撞击数和能量也会快速增加,在级间歇时间内声发射信号的撞击数和能量回快减小直至施加下一次荷载。

2.4 声发射信号频谱分析

通过对不同铺装结构的足尺模型声发射信号进行频

谱分析,结果如图10所示。表明了不同铺装结构下声发射信号的频谱范围也不同,其中RBPC铺装结构声发射信号频谱主要分三部分,分别是[峰值频率20kHz、信号能量主要分布频带范围15kHz~26kHz];[峰值频率65kHz、信号能量主要分布频带范围26kHz~90kHz]、[峰值频率160kHz、信号能量主要分布频带范围150kHz~170kHz]。高韧树脂铺装结构频谱主要包含一部分为[峰值频率50kHz、信号能量主要分布频带范围30kHz~70kHz]。表明不同铺装结构的声发射监测信号的频谱分布特性也不相同,其中RBPC铺装结构的频谱范围更宽,而通过不同时间段的声发射信号频谱分布性质可知,在持续荷载的作用下,声发射信号各频率峰值的幅度也在不断增大,这也表明各频率峰值处的声发射信号主要为钢桥面板各体系的疲劳损伤信号,因此通过不同铺装结构的频谱分布特性对声发射信号进行分析,对声发射信号中的损伤信号和噪声信号能够有效地区分和以及对后续的滤波处理具有重要的指导意义。

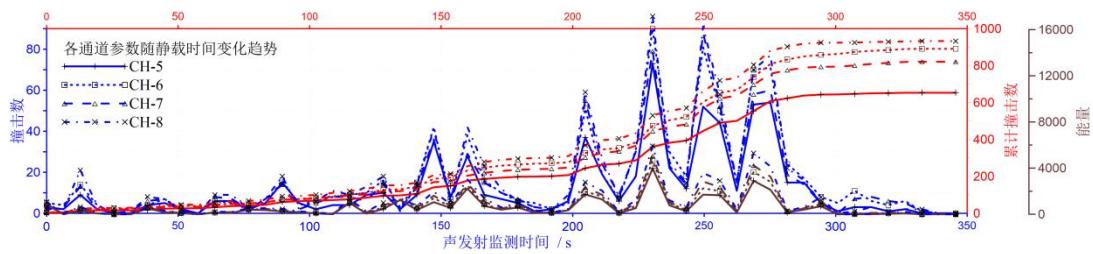


图7 170w次动载试验后静载试验声发射监测结果图

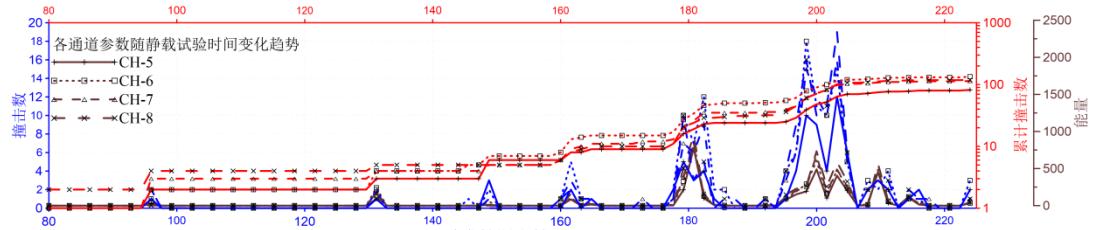


图8 200w次动载试验后静载试验声发射监测结果图

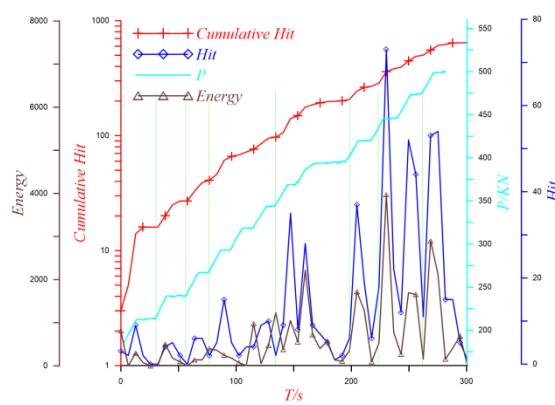


图9 170w次动载试验后静载试验声发射各参数监测结果图

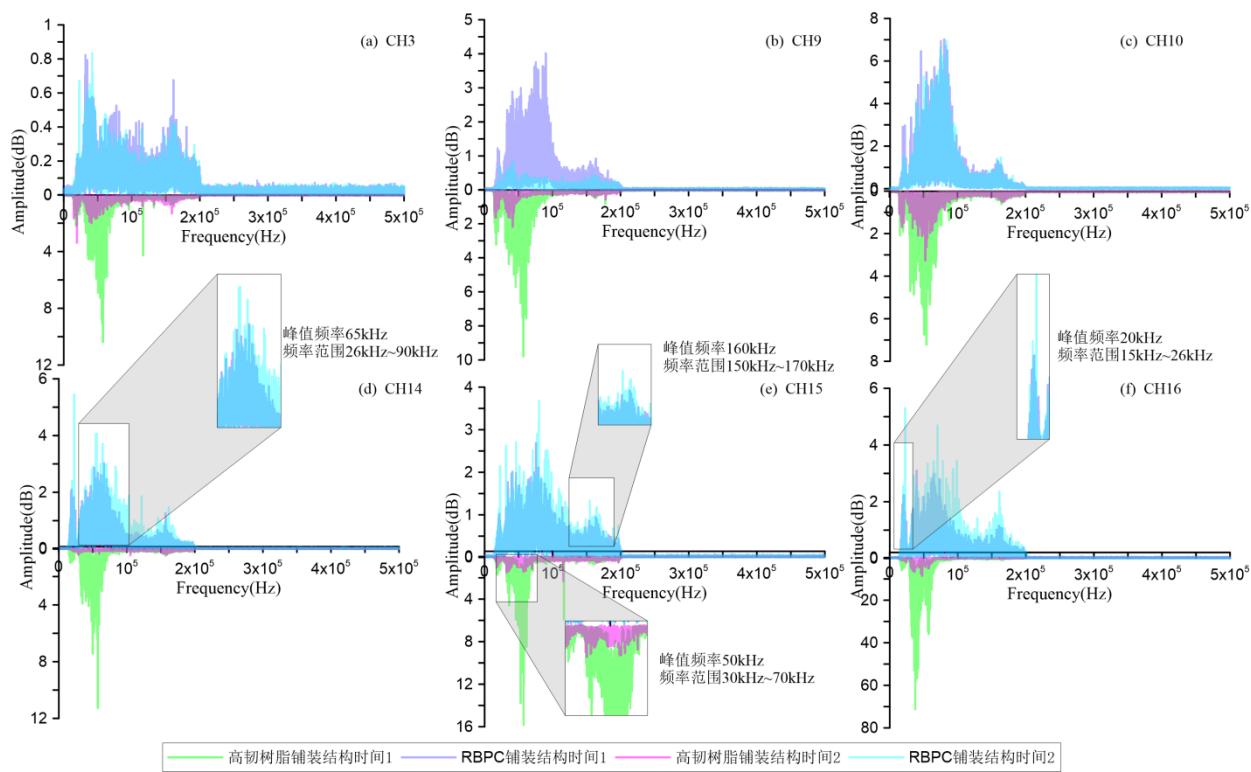


图 10 不同铺装结构的足尺试验声发射信号的频谱分析

2.5 疲劳损伤检测中声发射信号类型分析

为研究声发射信号特征与沥青混合料失效破坏之间的联系,利用傅里叶变换与小波分解对所采集的声发射信号进行处理,得到了信号的频谱图与小波时频图。由于全过程的声发射数据量非常庞大,因此从破坏过程中的每一个阶段,分别选取了连续的30个声发射信号,全过程的信号共有120个信号。通过对数据的整理发现,发现在沥青混合料弯曲破坏过程中产生了3种类型的声发射信号,其所对应的波形、频谱和小波时频图。

3 结论

基于本文对声发射技术在钢桥面系疲劳损伤监测中的应用分析,可得出以下结论:(1)声发射技术在应用于钢桥面系动载试验时,声发射的波形峰值出现频率与加载频率一致性以及声发射波形信号的幅值与加载载荷变化速率成正相关关系;(2)声发射技术能够有效捕捉钢桥面系急剧变化或衰减敏感信号,从而实现对钢板与铺装结构体系的疲劳损伤扩展状态追踪;(3)声发射技术在应用于钢桥面系静载试验时,在逐级加载过程中声发射信号的撞击数和能量也会快速增加,在级间间歇时间内声发射信号的撞击数和能量回快速减小趋于稳定状态直至施加下一

次荷载。

[参考文献]

- [1]葛洛瑀.基于声发射的材料损伤监测技术研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2019.
 - [2]张萌谡.基于声发射参数的沥青混合料断裂特性表征方法研究[D].吉林:吉林大学,2019.
 - [3]汪国华.基于改进声发射时差图法的正交异性钢桥面板裂纹定位[D].安徽:合肥工业大学,2020.
 - [4]李权接,赵延明,张泽瑞,等.基于LoRa无线通信的分布式桥梁监测系统设计[J].传感器与微系统,2021,40(1):104-106.
 - [5]徐宁,蒋景东.基于声发射监测的不同加载路径下砂岩破坏前兆信息研究[J].水利与建筑工程学报,2021,19(1):170-175.
 - [6]汪国华.基于声发射技术的结构损伤定位方法综述[J].工程与建设,2020,34(6):1115-1118.
- 作者简介: 孟乐乐(1992.4—),男,毕业院校:中国矿业大学, 所学专业: 地球物理学, 当前就职单位: 江苏现代路桥有限责任公司, 职务: 试验检测师, 职称级别: 中级工程师。