

黏结滑移试验中的声发射评价方法

汪家送¹,徐 建¹,顾建祖²

(1. 中铁城市规划设计研究院有限公司, 芜湖 241000;
2. 江苏大学 土木工程与力学学院, 镇江 212013)

摘要:介绍了声发射技术在黏结滑移试验中的应用。首先利用小波包信号分析技术对黏结滑移过程中的声发射特征信号进行分解与重构,再利用互相关定位方法对声发射源进行定位;然后通过声发射信号特征进行黏结滑移过程分析;最后分析与总结了黏结破坏的声发射评价方法。进一步验证了该方法可作为构件宏观破坏过程的声发射评价方法。

关键词:声发射;黏结滑移试验;源定位;评价方法

中图分类号: TU528.31; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)03-0024-04

Acoustic emission evaluation method in bond-slip test

WANG Jiasong¹, XU Jian¹, GU Jianzu²

(1. China Railway Urban Planning & Designing Research Institute Co., Ltd., Wuhu 241000, China;
2. College of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The paper expounded the application of acoustic emission (AE) technology in bond-slip test. Firstly was used wavelet packet signal analysis technology to decompose and synthesize the AE signals during the bond-slip process. After that, the method of cross-correlation was applied to the synthesized signals to locate the source. Then, through the characteristics of AE signals to study process of bond-slip process. Lastly the AE evaluation method for the macroscopic fracture of bond was analyzed and summarized.

Key words: acoustic emission; bond-slip test; source location; evaluation method

黏结滑移试验是反映钢筋与混凝土界面处局部黏结应力与滑移关系的重要途径,也是进一步实现钢筋混凝土结构有限元分析的试验基础。在受力状态下,钢筋与混凝土的黏结部位出现微裂纹直至宏观破坏时,往往伴随着声发射现象的出现。声发射本质上是一种弹性波,它是以瞬态弹性波的形式迅速释放其内部积累的应变能的过程。声发射技术可以检测材料内部微裂纹,近年来大量用于混凝土材料裂纹成核及其损伤研究。利用声发射技术对钢筋与混凝土的黏结破坏特征信号进行分析,可以得到

大量关于试件的破坏过程与条件的重要信息。因此该技术不仅能对裂纹形成位置进行准确定位,而且在一定的假设下能对矩张量进行反演,从而能进一步揭示破坏模式、能量释放率、应力场分布及破裂面位置^[1]。

目前采集和处理声发射信号的方法可分为两大类。一类是以多个简化的波形特征参数来表示声发射信号的特征,然后对其进行分析和处理;另一类方法是存储和记录声发射信号的波形,对波形进行频谱分析^[2]。文章分别利用这两种分析方法对螺旋肋钢丝与混凝土的黏结滑移过程的声发射信号进行分析,初步建立两种材料黏结界面的力学过程与声发射特性的相关关系,以及对构件损伤过程的声发射源进行定位,最后分析总结黏结破坏的声发射评价方法。进一步验证了该方法可作为构件宏观破坏过程的声发射评价方法。

收稿日期:2023-08-02

基金项目:安徽省住房和城乡建设科学技术计划项目(2023-RK010)

作者简介:汪家送(1980—),男,硕士,高级工程师,一级注册结构工程师,主要从事结构性能分析与声学研究

通信作者:汪家送,514311434@qq.com

1 试验设计

1.1 声发射检测系统

声发射检测系统主要由传感器、前置放大器、多通道声发射采集处理系统及计算机组成。

(1) 传感器。选用声华科技公司研制的 SR15 高频谐振式传感器, 其频率为 50~400 kHz, 谐振频率为 150 kHz, 灵敏度峰值不小于 65 dB。

(2) 前置放大器。检测系统采用声华科技公司研制的 PAV 宽带前置放大器, 增益为 40 dB, 带宽为 10 kHz~2 MHz, 具有自标定和低噪声等特点。

(3) 数据采集卡。采用 SWAVES 全波形声发射数据采集卡, 其最高采样速率为 20 MHz, 有 12 个通道。

1.2 试件制作

制作边长为 100 mm 的 C40 混凝土立方体试件, 在立方体中心位置预埋一根 $\phi 5$ mm 的螺旋肋钢丝, 受力端长度为 355 mm, 自由端长度为 80 mm, 局部黏结区为 50 mm。在钢丝表面黏结区两端附近分别对称粘贴 2 组 BE120 型电阻应变片。试验前, 先将试件固定在预先制作好的拔出试验装置内, 然后与装置一起固定在电子万能试验机上, 将试验机下夹头夹住钢丝受力端, 上夹头夹住装置拉杆以带动混凝土立方体受力。待固定好后, 在混凝土立方体 3 个自由侧面分别布置 5 个声发射传感器, 各传感器坐标分别为 (10, 0, 10), (90, 0, 90), (90, 100, 90), (90, 10, 100), (10, 90, 100), 其与计算机等设备连接组成的声发射检测系统如图 1 所示。

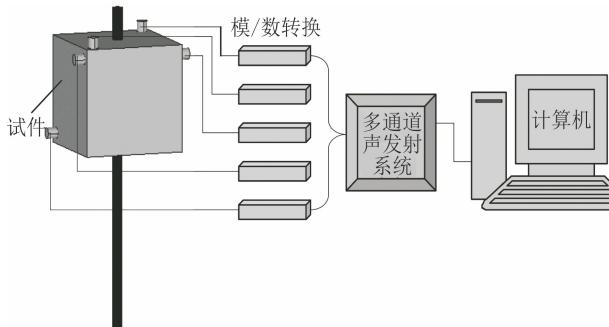


图 1 试件与声发射检测系统

试验时试件沿钢筋方向拔出, 试验机加载速率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 荷载与位移量由加载系统控制, 最终结果通过数字与图像表示出来; 同时静态电阻应变仪记录钢筋表面应变量; 加载过程的声发射数据由声发射检测系统实时记录。

2 声发射源定位

2.1 定位方法

传统的时差定位方法操作简便, 通过计算信号的到达时差, 再运用时差定位公式即可对声源进行定位。但是由于影响信号波形特征的因素较多, 波的衰减及波形的畸变等现象无法避免, 因此该定位方法存在一定误差。而基于小波包分析互相关的定位方法能有效地减小定位误差, 其基本的定位思想为: ① 利用正交小波对声发射源特征信号进行小波包分解后, 结合频谱分析结果所测得的衰减曲线对信号进行补偿衰减处理, 然后实行小波包重构; ② 利用互相关定位技术对各个通道的重构信号进行相关分析, 得出时间差, 然后用三维时差定位方法确定声发射源的位置^[3]。

2.2 定位过程

直接提取特征信号进行小波包分解与重构。原始信号 S 的长度为 2^{11} , 故分解层数 N 可取为 6 ($N < 11$), 通道 2 信号与其经分解重构后的信号如图 2 所示。互相关定位方法^[4]认为声发射波源传播到两个传感器间的时间差就是互相关系数最大值 $R_{xy}(m_{\text{peak}})$ 对应的时间延迟 τ , 即

$$\tau = (N - \phi)/f_s \quad (1)$$

式中: N 为试验过程中设置的采样点, 与采样数据 x 相关; f_s 为采样频率; ϕ 为互相关系数最大值 $R_{xy}(m_{\text{peak}})$ 对应的采样点, 如图 3 所示。

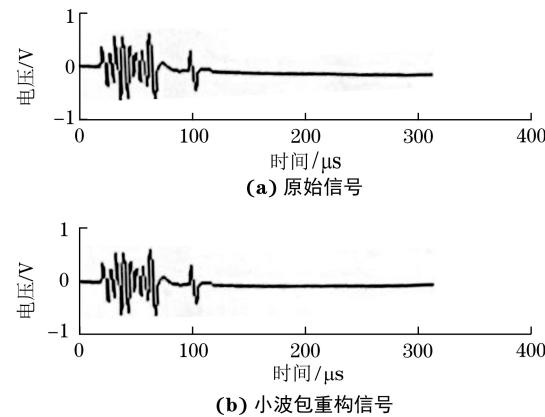


图 2 通道 2 原始信号与小波包重构信号

据此对处理后的信号进行互相关分析, 得出时间差, 结果如表 1 所示。三维时差源定位公式为^[5]

$$v\Delta_{ij} = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (2)$$

式中: $v = 3128 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (x_i, y_i, z_i) 和 (x_j, y_j, z_j)

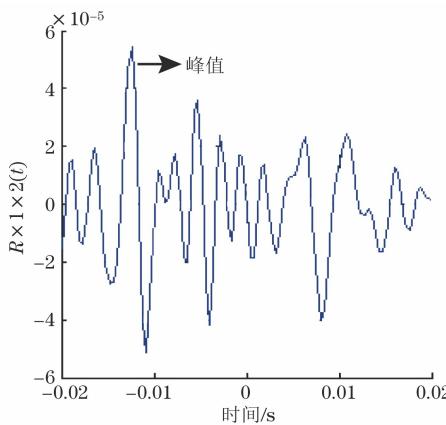


图 3 通道 1 和 2 的小波包重构信号互相关系数图像

表 1 试验测得的三维定位结果

项目	(10,0,10)	(90,0,90)	(90,100,90)	(90,10,100)	(10,90,100)
$\Delta t_2 (\times 10^{-3} \text{ s})$	-12.4	17.2	11.2	-16.4	-9.6
$\Delta t_3 (\times 10^{-3} \text{ s})$	-10.8	9.6	10.0	19.2	-4.4
$\Delta t_4 (\times 10^{-3} \text{ s})$	-7.2	-19.2	-20.0	-10.8	14.4
$\Delta t_5 (\times 10^{-3} \text{ s})$	5.2	-16.4	6.8	-2.4	2.0
x/mm	48.54	50.49	55.62	47.56	54.31
y/mm	52.38	44.23	50.96	46.79	52.17
z/mm	17.16	5.23	14.68	43.25	34.35

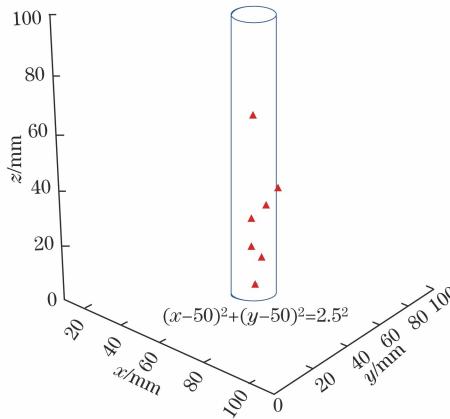


图 4 声发射源定位的三维图像

3 声发射信号特征与破坏过程分析

根据试件从荷载为零直至破坏的各级荷载值及对应的锚筋两端相对滑移量的平均值, 可得到各试件的荷载滑移曲线如图 5 所示。经试验观察及曲线特征分析, 试件损伤过程可划分为以下几个阶段, 相应的声发射特征信号频谱分析如图 6 所示。

(1) 初滑移段: 加载后受力端开始出现滑移, 但不明显, 待自由端出现滑移时才十分明显, 此时锚长范围内的胶结力全部丧失。表现为图 6(a)中的振幅很小, 主频集中在 150~350 kHz。

(2) 线性滑移段: 随荷载增加平均滑移线性增

为第 i 个传感器和第 j 个传感器的坐标, Δ_{ij} 为声发射信号从 $G(x, y, z)$ 点到达第 i 个传感器和第 j 个传感器的时间差, 若传感器数量超过 5 个, 则可用最小二乘法对超定方程组进行求解。

2.3 定位结果分析

声发射源坐标定位的三维图像如图 4 所示, 从笛卡尔坐标系可直观地看出声发射源点大部分集中于公式为 $(x-50)^2 + (y-50)^2 = 2.5^2$ 的柱面附近, 即围绕受力钢筋表面周围分布。经分析可知, 钢筋肋部局部应力较大导致了声发射明显; 局部黏结破坏主要是钢筋肋部混凝土压碎所造成^[6]。

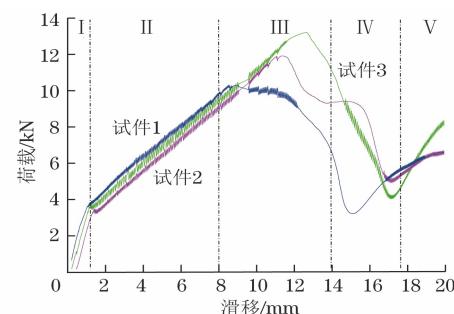


图 5 各试件的荷载滑移曲线

大, 主要受力部位为螺旋肋与肋间混凝土。表现为图 6(b)上的振幅仍然很小, 但频率相对集中, 主要在 350 kHz 附近。

(3) 非线性滑移段: 滑移发展到一定程度后曲线转折呈非线性态, 滑移明显转快。表现为图 6(c)上的振幅很大, 约是前两阶段的 5~6 倍, 频带也相对较宽, 频率主要集中在 150~450 kHz。

(4) 下降段: 咬合齿破碎到一定程度后, 承载力下降, 滑移发展更快。表现为图 6(d)上的振幅变小, 与线性滑移段的接近。

(5) 残余段: 当滑移较大, 达到 15 mm 左右时, 混凝土内部产生拥塞效应, 荷载不再下降而滑移却不断发展。表现为图 6(e)的振幅很小, 但偶尔也会出现振幅较大的信号。

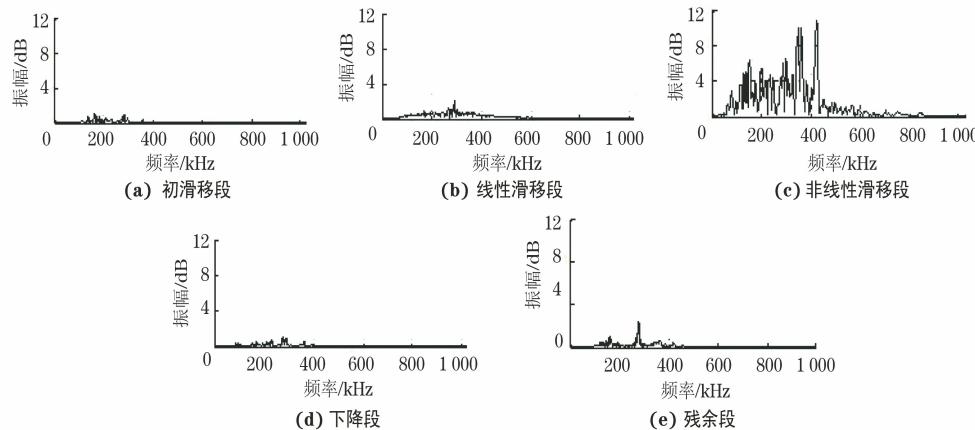


图 6 试件各受力阶段的声发射信号频谱分析

4 黏结破坏的声发射评价方法

KUKSENKO 等^[7]根据裂纹在第一阶段累积而在第二阶段加速扩展的规律, 提出了基于动力学能量原理的非均质材料二阶段破坏模型, 并通过大量工程中的声发射技术应用, 验证了该模型的广泛适用性, 从而建立了适于宏观破坏的合理评价方法。声发射能量-时间曲线如图 7 所示。

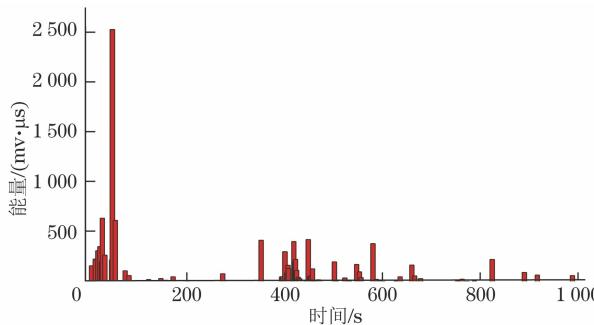


图 7 声发射能量-时间曲线

对比荷载滑移曲线与声发射能量-时间曲线发现, 加载力的变化同声发射能量的变化趋势基本一致。可以看出, 加载开始不久声发射信号便出现, 其明显特征是声发射能量随时间微弱地增加, 这与破坏模型第一阶段裂纹累积的观点相吻合, 而随后在极限破坏前的某一段时间内, 声发射能量突然增大, 这与破坏模型第二阶段裂纹扩展的观点相符合。在第二阶段中, 混凝土表面的应力是随钢筋埋置位置稳步变化的, 当黏结应力达到极限状态时黏结破坏就会发生, 试验表明当滑移量达到 10 mm 时, 试件已基本接近极限黏结强度。同时试验观察发现, 在加载力很小的情况下声发射信号就出现了, 表明黏结界面在一开始加载时就出现了微裂纹, 然而一开始的局部微裂纹对整个试件的黏结性能不构成大的

影响, 但随着裂纹的逐渐累积, 这些微裂纹会引起试件黏结应力的逐步退化从而扩大裂纹影响区域, 而较大裂纹可导致局部应力集中, 使得裂纹进一步核化与扩展。

试验结果表明, 可利用该模型的主要特征对黏结界面宏观破坏过程进行分析, 以及对其破坏过程进行预报。通过加载过程可以观察到黏结破坏之前声发射信号无明显异常, 即表明试件宏观上没有破坏。因此, 可以将破坏前某一时刻声发射能量的急骤增大作为判断其破坏临界状态的一个重要依据。

5 结论

(1) 利用小波包分析技术对源信号进行分解与重构, 再利用互相关技术计算各个通道的信号相对时差, 最后根据时差定位公式计算源位置的方法能较好地对源信号进行处理与分析, 定位结果精度较高。

(2) 分析荷载滑移曲线, 可将黏结滑移过程划分为若干个受力段, 每一阶段都具有不同的声发射信号特征, 声发射信号频谱图基本与各个受力阶段的特征相吻合, 这表明可以利用声发射信号对受力过程进行分析。

(3) 二阶段破坏模型可很好地对黏结破坏过程的声发射特征进行评价, 可作为构件宏观破坏过程的声发射评价方法。

参考文献:

- [1] GROSSE C U, REINHARDT H W, FINCK F. Signal-based acoustic emission techniques in civil engineering [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(3): 274-279.

(下转第 48 页)

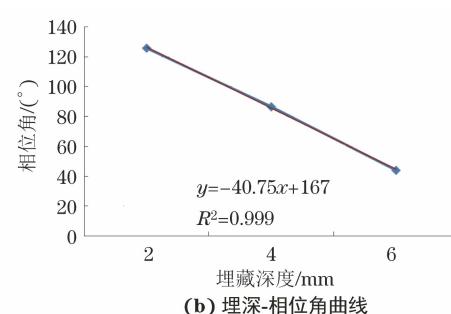
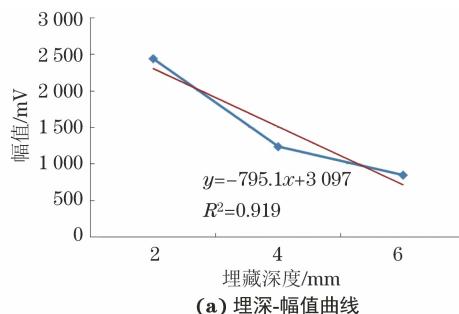


图 9 0.6 mm 深人工裂纹缺陷埋深与检测信号的关系曲线(检测频率为 800 Hz)

参考文献:

- [1] 汪存显,高豪迈,龚煦,等.航空铆钉连接件的抗冲击性能[J].航空学报,2019,40(1):284-296.
- [2] 李政鸿,徐武,张晓晶,等.多孔多裂纹平板的疲劳裂纹扩展试验与分析方法[J].航空学报,2018,39(7):149-157.
- [3] 李小丽,陈新波,时建云,等.飞机多层结构内层腐蚀损伤的远场涡流检测与评估[J].无损检测,2020,42(7):35-40.
- [4] 田云飞,曹宗杰.红外检测在老龄飞机蒙皮搭接结构腐蚀检测中的应用分析[J].飞机设计,2013,33(3):31-35.

- [5] 徐矛,黄华斌,王竹林.疲劳试验中飞机蒙皮裂纹的检测方法研究[J].结构强度研究,2014(2):4.
- [6] 赵本勇,宋凯,宁宁,等.飞机铆接件隐藏缺陷的远场涡流检测探头优化与试验[J].航空学报,2020,41(1):266-276.
- [7] 宋凯,方志泓,崔西明,等.飞机铆接构件 PRFECT 探头的线圈夹角影响[J].航空学报,2021,42(10):399-408.
- [8] 谭晓明,张丹峰,贺小帆,等.军用飞机结构腐蚀防护与控制技术[M].北京:航空工业出版社,2021.

(上接第 27 页)

- [2] 沈功田,耿荣生,刘时风.声发射信号的参数分析方法[J].无损检测,2002,24(2):72-77.
- [3] 李晓梅,朱援祥,孙秦明.基于小波包分析的声发射源定位方法[J].武汉理工大学学报,2003,25(2):91-94.
- [4] 黄晓红,孙国庆,张凯月.基于全相位多次互相关的 Geiger 声发射源定位方法[J].岩土力学,2018,39(4):1362-1368.
- [5] 王新沛,李远洋,刘常春,等.基于互相关时间延迟估计的心音源定位方法[J].计算机工程,2010,36(20):

- 7-9.
- [6] GROSSE C, REINHARDT H, DAHM T. Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques[J]. NDT & E International, 1997,30(4):223-230.
 - [7] KUKSENKO V S, TOMILIN N G, MAKHMUDOV K F, et al. Predicting the loss of stability of loaded structural elements using the method of acoustic emission[J]. Technical Physics Letters, 2007,33(1):62-64.