

# 桥梁复合钢桥面板剪力钉焊缝疲劳断裂损伤的动态监测

张玉玲<sup>1)</sup>✉ 赵体波<sup>1)</sup> 孔德连<sup>2)</sup> 汪文有<sup>2)</sup> 许凤旌<sup>2)</sup> 董卫平<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>中国铁道科学院铁道建筑研究所, <sup>2)</sup>美国物理声学公司北京代表处  
✉ zyl@rails.com.cn

**摘要** 本文主要介绍在对桥梁复合钢桥面板剪力钉焊缝的疲劳试验中采用声发射技术对裂纹萌生、位置、扩展与断裂过程的动态监测跟踪。文中阐述了最新的声发射监测技术与数据分析处理方法,展示了声发射技术在断裂损伤动态监测应用中的可行性与有效性。试验的试件为复合钢桥面板,上面焊接四个剪力钉,其焊缝作为钢桥面板附连件的疲劳构造。本文描述在疲劳试验过程中,声发射信号如何动态地反映裂纹出现的时刻及相应疲劳次数、最先出现裂纹的部位、各剪力钉裂纹扩展的相关性、裂纹扩展方向、裂纹扩展的剧烈程度以及裂纹扩展的长度等;通过采用声发射波形流技术对完整的疲劳周期进行的监测,分析裂纹在一个疲劳周期内的变化规律。研究表明,采用声发射监测与信号分析处理技术,可有效实现对材料或结构的裂纹萌生、扩展及断裂损伤进行动态监测。

**关键词:** 疲劳, 裂纹, 断裂, 损伤, 声发射, 动态监测

## Dynamic Process Monitoring of Fatigue Damage of Shearing Nail Welds of Compound Steel Bridge Plate

Yuling Zhang<sup>1)</sup>✉ Tibo Zhao<sup>1)</sup> Delian Kong<sup>2)</sup> Wenyong Wang<sup>2)</sup> Fengjing Xu<sup>2)</sup> Weiping Dong<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>China Academy of Railway Science, <sup>2)</sup>Physical Acoustics Corporation Beijing Office  
✉ zyl@rails.com.cn

**ABSTRACT** This paper aims to introduce acoustic emission (AE) technology for dynamic process monitoring of fatigue damage of shearing nail welds of compound steel bridge plate. The dynamic process of the crack includes crack initiation, crack propagation and crack location. The advanced AE technology with signal processing methods is introduced, it demonstrates the feasibility and effectiveness of using AE for the monitoring of fatigue damage process. The tested specimen is a compound steel bridge plate with four shearing nails welded. Fatigue test is done on the plate so that the crack developing process, e.g. in how many fatigue cycle that the crack is initiated? where is the initial crack located? what is the crack propagation direction? how intensive is the crack and how long is the crack length, is dynamically monitored? With the help of AE waveform steaming technique, information on full complete fatigue cycles are acquired and analyzed. The paper finally concludes that AE is a very effective technology for dynamic process monitoring of crack development.

## 1. 引言

尽管应变测试已成为通用的、常规的材料力学性能测试手段,但其所能提供的材料疲劳裂纹与断裂损伤的发生、发展动态变化过程的信息是有限的。在材料实验与实际应用中,裂纹的萌生与发展均有一定的过程。在许多情况下,不仅应力、应变本身的变化值得关注,而且裂纹的萌生时刻、出现位置、扩展速率、剧烈程度、断裂前症状等都是更加值得关注的特征。尤其是对现场监测的大型结构来说,局部应变的变化无法反映实际裂纹的发展变化状况。因此,无论是在实验室或是在现场都十分有必要采用能够对裂纹及断裂损伤的动态过程进行实时跟踪监测的技术以对应变监测的不足进行互补。

裂纹从产生、发展到最后的断裂损伤伴随着材料内部晶体结构从微观的位错、分离到宏观的断裂过程。这个过程也同样伴随有瞬态的能量释放，而瞬态能量释放产生的应力波即为声发射波或称之为声发射现象。在材料的疲劳试验过程中，跟踪监测声发射的发展过程亦即跟踪监测了疲劳裂纹的萌生、发展与断裂损伤的发展过程。为此，声发射技术于近年来已成为一种越来越引起人们注意并不断增长的用于材料疲劳断裂损伤动态过程监测的技术<sup>[1-6]</sup>。然而，在以往的声发射疲劳监测试验中，主要采用的往往是人为加工的带有 V 型裂纹尖端切口的试件<sup>[2-6]</sup>。其结构形状相对简单，裂纹位置也比较集中，相对来说比较容易进行声发射监测。但对于象在剪力钉处具有焊缝的桥梁复合钢桥面板试件来说，裂纹的萌生发展过程就可能不那么单纯。首先，裂纹的疲劳次数有可能大大加长，需要跟踪监测更长的时间。其次，裂纹的起始部位是不可预知的，它有可能是在焊缝或钉板上的任何位置。再者，由于结构的复杂性与尺寸远大于简单的板条或杆状试件，疲劳过程中有可能不止一个裂纹源同时存在。因此，能够对实际的裂纹起始时刻、裂纹源的位置、裂纹源的个数、裂纹的动态发生、发展趋势过程进行全面监测就显得十分重要。然而，如此复杂的结构与裂纹发展过程监测是应变及其它的技术方法难以有效实现的。这恰巧让声发射技术显现了用武之地，声发射技术可在复杂的结构与试验条件下实现对裂纹动态发展过程进行有效监测。

本文主要介绍在对桥梁复合钢桥面板剪力钉焊缝的疲劳试验中采用声发射技术对裂纹萌生、位置、扩展与断裂过程的动态监测跟踪。文中阐述了最新的声发射监测技术与数据分析处理方法，展示了声发射技术在断裂损伤动态监测应用中的可行性与有效性。试验的试件为复合钢桥面板，上面焊接四个剪力钉，其焊缝作为钢桥面板附连件的疲劳构造。本文描述在疲劳试验过程中，声发射信号如何动态地反映裂纹出现的时刻及相应疲劳次数、最先出现裂纹的部位、各剪力钉裂纹扩展的相关性、裂纹扩展方向、裂纹扩展的剧烈程度以及裂纹扩展的长度等；通过采用声发射波形流技术对完整的疲劳周期进行的监测，分析裂纹在一个疲劳周期内的变化规律。研究表明，采用声发射监测与信号分析处理技术，可有效实现对材料或结构的裂纹萌生、扩展及断裂损伤进行动态监测。

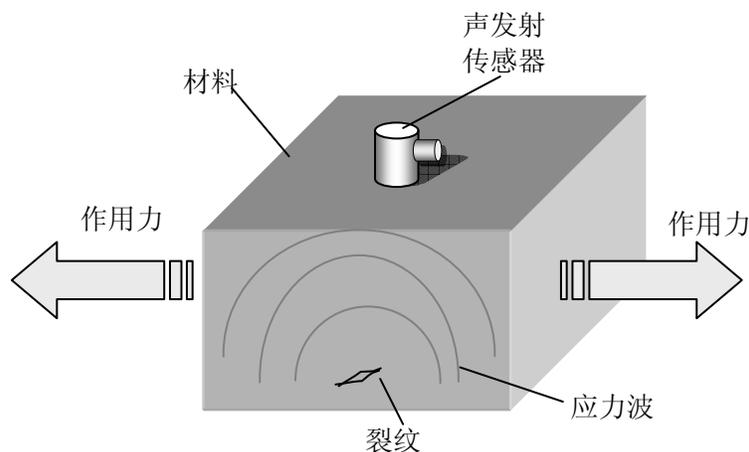


图 1. 裂纹扩展及声发射传播与检测示意图

## 2. 声发射疲劳断裂损伤动态过程监测原理概述

图 1 给出了一个材料内部缺陷，如裂纹，在载荷作用下产生声发射应力波及应力波被检测的示意图。在裂纹静止或者不继续扩展状态下，裂纹本身不产生声发射现象。但如果在外力作用下，裂纹继续扩展，则由于瞬态能量释放产生的应力波或声发射波将向各个方向传波。根据材料的不同，此应力波或声发射波的频率可达 20 – 1000 KHz。如此高频率的信号可被安装在物体表面的高灵敏度的声发射传感器检测到。在裂纹萌生或材料达到断裂破坏前，每一次的裂纹扩展位移往往在材料晶粒尺度的范围内，每一次裂纹扩展或应力波的释放都是在微秒至毫秒级的瞬时完成的，与之相应的声发射信号也呈现如图 2 所示的突发脉冲波形。每一个传感器接收到的突发脉冲信号在声发射技术中亦称之为—

个‘撞击’或‘Hit’。声发射疲劳断裂损伤动态过程的监测即为捕捉瞬态的稍踪即逝的裂纹突发脉冲信号并对其进行特征化处理以剔除噪声，获取有用的、能够反映裂纹动态发展过程的信息。

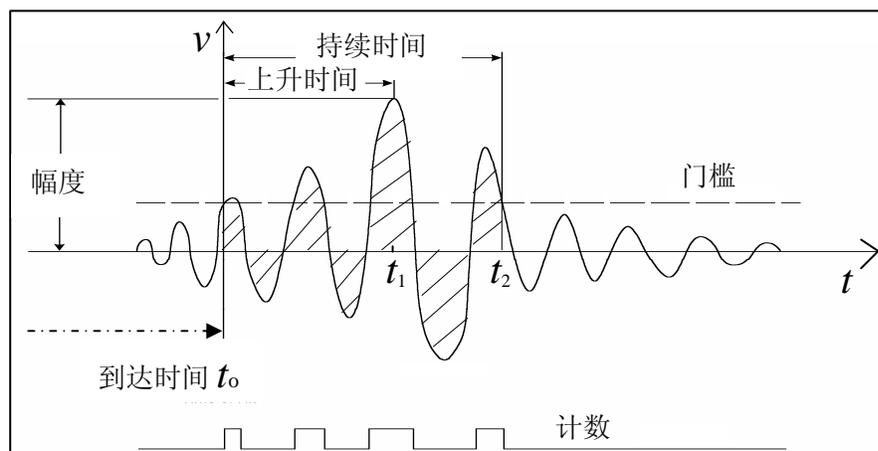


图 2. 声发射突发脉冲（撞击）主要特征参数定义

在实际应用中，对于裂纹的发展状态及裂纹信号的识别可由如下的几个主要特征来表达，

- 撞击： 每一个传感器接收到的某一个突发脉冲信号  $v(t)$
- 撞击率： 一个或多个传感器在单位时间内接收到的撞击个数
- 撞击数： 一个或多个传感器在一定的时间范围内接收到的累积的撞击个数
- 撞击到达时间 ( $t_0, \mu s$ ): 每个撞击第一次超过阈值时的相对于检测开始的时间
- 幅度 (dB): 每个撞击的最大幅值  $V_{max}$  (单位为伏) 对应的分贝值，即

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_{\max}}{10^{-6}} \right) - (\text{前放增益 } dB)$$

- 上升时间 ( $t_1 - t_0, \mu s$ ): 每个撞击从第一次过阈值到最大值时的时间
- 持续时间 ( $t_2 - t_0, \mu s$ ): 每个撞击从第一次过阈值到最后一次低于阈值时的时间
- 计数 (个): 每个撞击过阈值的次数
- 能量 (无量纲): 在每个撞击的持续时间范围内的信号包络下的面积
- 峰值频率 (KHz): 每个撞击波形功率谱的最大值所对应的频率
- 质心频率 (KHz): 每个撞击波形功率谱一阶矩的重心
- 定位: 由多个传感器的撞击到达时间差确定突发脉冲源的位置
- 事件: 每一被定位的一次裂纹扩张
- 事件率: 单位时间内所检测到的事件数
- 事件数: 在一定的时间范围内所检测到的累积的事件个数

这些特征在突发信号识别、噪声滤波、裂纹源定位、裂纹扩展与断裂过程动态监测等方面起着关键性作用。与许多其它类型的信号，如振动与应变，分析方法不同的是，声发射有着更高速度的采样率，通常为 3 - 40 MHz，每秒钟需要能识别并捕捉成百甚至上千个突发脉冲信号。故声发射试验的信息量是巨大的。然而，随着数字声发射技术的发展，基于声发射特征参数的前端逻辑滤波技术可以有效地用于疲劳断裂过程监测，在采集过程当中实时摒弃不符合特征逻辑关系的数据，声发射系统只

保留那些符合信号特征逻辑关系的数据，由此大大地减少了数据量，提高了数据采集存储效率，增加了信号分析与疲劳状态识别的可靠性。极为重要的是，声发射检测有别于其它技术，如振动与应变检测，的一个特别的技术手段是声发射技术可以对裂纹源进行定位。根据每一个突发脉冲或撞击的到达时间差，可采用不同的定位算法（如线性，平面，立体）<sup>[7]</sup>实现对裂纹源的定位。该技术不仅仅是用于定位，而且更为重要的是可对无法实现定位的信号进行有效滤波以提高信号分析处理的可靠性。

### 3. 桥梁复合钢桥面板剪力钉焊缝疲劳断裂监测试验

在复合钢桥面板剪力钉焊缝疲劳断裂试验中的试件为一 460×170×18（长×宽×厚，mm）的复合钢板如图 3 所示。其中复合钢板中不锈钢板厚 3mm，板上焊接有四个钉头，绿色数字为钉头编号，钉头直径 18mm。

试验中，疲劳试验机的位移变化为±0.34mm，疲劳加载频率为 4.5Hz，拉力范围为 10 至 418 KN，因此复合钢板承受着拉-拉疲劳载荷。

在声发射监测过程中使用了 5 个美国物理声学公司的带有内置 40 分贝前放的，150 KHz 共振频率的 R15I 传感器。传感器的布局及相对于剪力钉焊缝的位置见图 4，其中黑圈为传感器的位置与编号，红圈为剪力钉的位置。所使用的声发射系统为美国物理声学公司的装有高性能 CPU 与 WindowsXP 操作系统的智能声发射主机 Microll，系统的操作、运行通过以太网线连接实现远程操控。由于疲劳初期裂纹萌生的可能性较小，声发射监测在疲劳 18 个小时，即约 29 万个疲劳周期后开始进行。

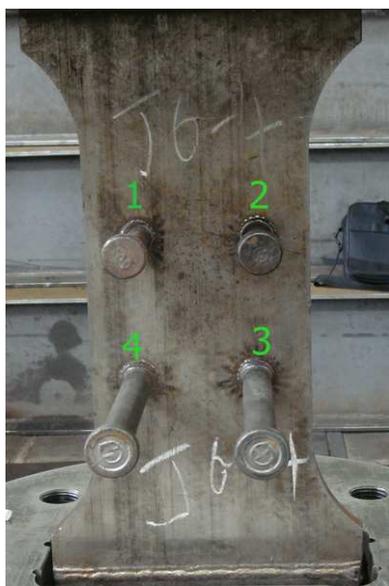


图 3. 复合钢桥面板剪力钉照片

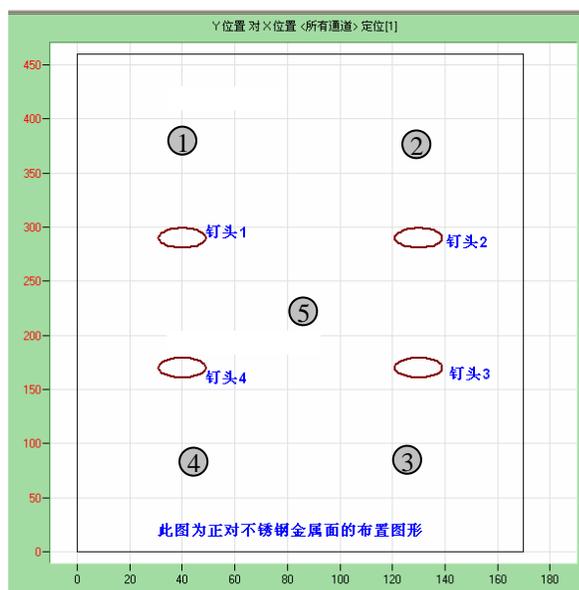


图 4. 传感器与剪力钉相对位置图

### 4. 疲劳断裂损伤动态变化过程数据分析

在剪力钉疲劳过程动态监测中，首要关注的是什么时候或多少疲劳周期下裂纹开始萌生扩展以及最早出现裂纹的位置。图 5 显示了从约 29 万次疲劳后开始监测到钉板断裂时的声发射事件即声发射定位信号的发展过程。在 49 万次疲劳之前的大部分时间内，声发射系统未检测到裂纹定位事件，亦即未有显著的裂纹萌生与扩展。首次监测到疲劳裂纹定位的时间为大约疲劳 19 小时或 30 万疲劳周期，但之后十几小时内只观测到零星的疲劳裂纹扩展信号。直到疲劳周期约 49 万次（疲劳 30.5 小时）后开始出现明显的、逐渐增加的疲劳定位事件。定位数据中，随着疲劳次数的增加，疲劳损伤不断增加，

因此缺陷处的能量在疲劳过程中不断累积，当缺陷尖端达到损伤极限时，便会以尖端扩展的方式释放多余的能量，产生较大幅度的突发脉冲声发射信号，形成新的缺陷尖端和开裂表面，分离后的金属断面在疲劳载荷作用下相互作用，使得新生表面趋于钝化状态，期间会产生钝化塑性变形过程的低幅度的声发射现象，而新生裂纹尖端处在疲劳载荷作用下再次累计能量，等待下一次的扩展-释放能量的过程，如此周而复始的变化，使得焊缝缺陷不断扩展。由于新生的裂纹面在疲劳开闭过程中不断挤压、塑变，使得接触面较为光滑，形成了海滩条纹状的疲劳纹特征如图 6 所示。

在一个疲劳周期内的裂纹动态变化状况或相应的声发射表现特征可以由图 7 所示的声发射波形流数据看出。图中显示的是以 5 兆采样率得到的约 0.6 秒长的连续声发射波形，它包括了至少两个完整的疲劳周期。由图可见，每个疲劳过程存在两个阶段。第一阶段为拉伸，在该阶段裂纹尖端受到重复的超过应力极限的拉应力作用，造成裂纹扩展，局部应力释放，因而出现瞬态的幅度较大的突发脉冲信号。第二阶段为松弛，该阶段裂纹弥合，出现表面磨合挤压，声发射也呈现出低幅值的连续信号，相应地在材料断裂截面也产生了图 6 所示的海滩条纹。

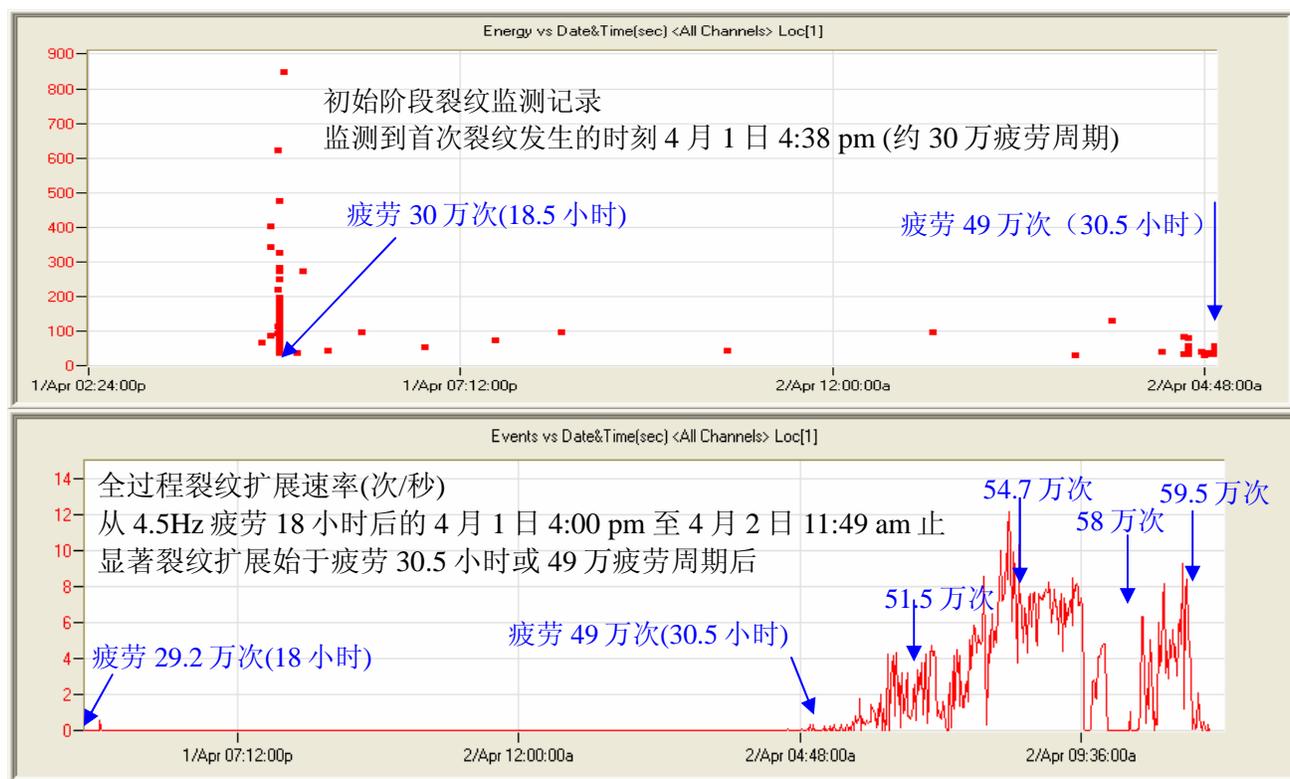


图 5. 从开始监测到疲劳断裂全过程的声发射定位事件率

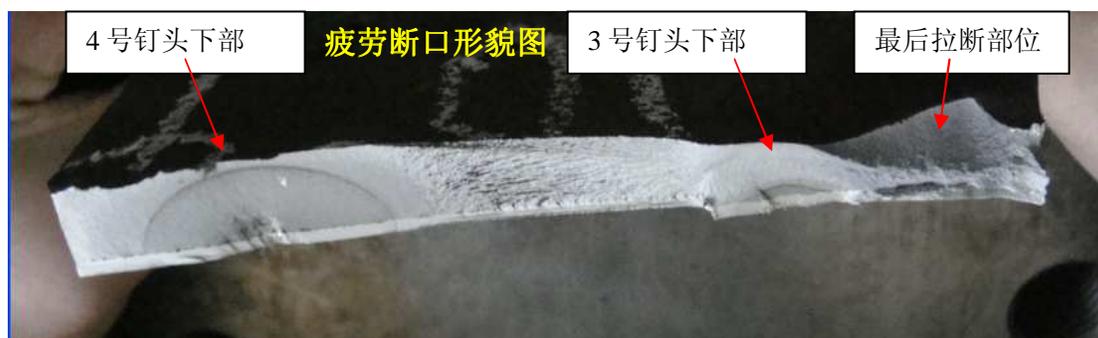


图 6. 钉板断口截面图

图 5 主要展示的是裂纹萌生时刻、阶段发展过程及剧烈程度。它并没有反应出裂纹的萌生位置与扩展方向。而裂纹源的位置，则可由图 8 所示的定位图看出，其中任一红点代表了一次裂纹扩展定位事件。该图展示了在不同的疲劳次数下所检测到的声发射定位事件分布情况。由图可知，裂纹起始于 3 号钉头的下端，随后向钉头 4 方向发展。在一定时刻，多个裂纹源同时存在，即钉头 3 与钉头 4 下的裂纹是独立的，同时存在的，互不相干的裂纹源。由图 8 的定位图还可看出，直到 49 万次疲劳时，裂纹的定位事件并不多。即使是在疲劳 51.5 万次时，钉头 4 下的裂纹也不显著。当疲劳达到 54.7 万次时，钉头 4 下的裂纹定位事件显著增多。及至试件被最终拉断，声发射定位事件充满了钉头 3、4 下的整个横截面。

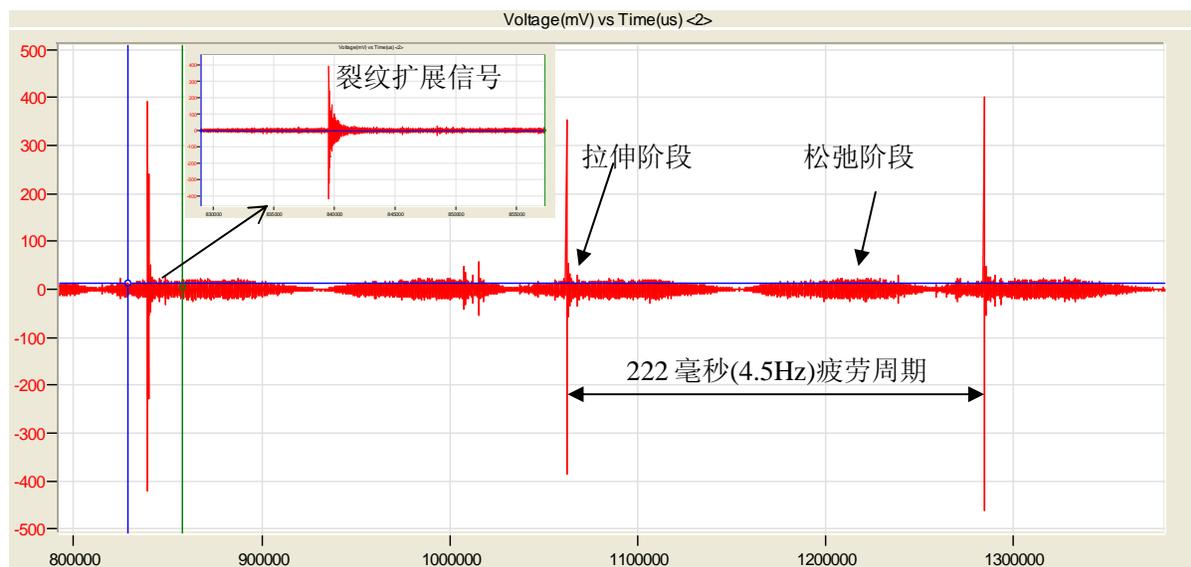


图 7. 疲劳裂纹扩展阶段的声发射波形流信号

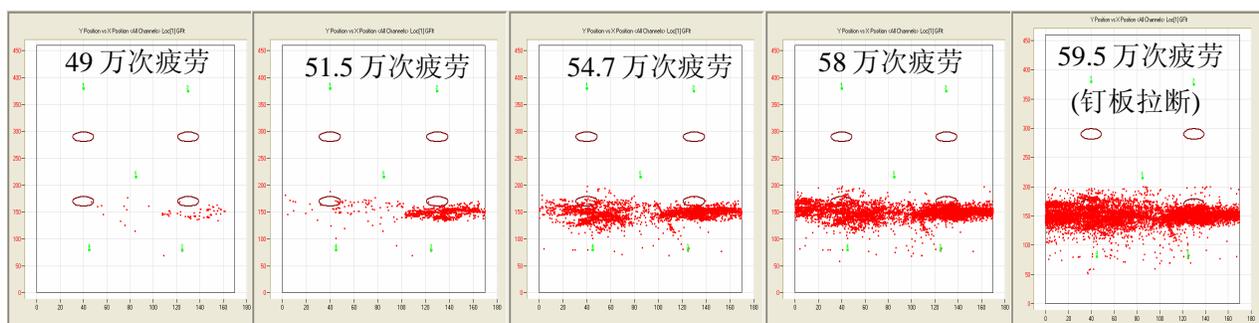


图 8. 不同疲劳次数下的裂纹扩展定位图

图 8 的定位结果与图 6 的断口截面及图 9 所示的试件断裂后的照片有很好的吻合性。钉头 3、4 下端明显的海滩条纹显示了这两个区域疲劳损伤断裂机制，钉头焊缝的缺陷或相对于母材更高的残余应力导致了复合钢板的疲劳断裂。相对于钉头 1、2 的焊缝来说，钉头 3、4 的焊缝可能有更低的强度，因而造成在该处疲劳断裂。由图 5、8 的监测数据可知，声发射信号在不同的时间段具有不同的疲劳裂纹发展过程，期间具有两个重要的阶段。初期的裂纹萌生发展过程缓慢，从开始加载到疲劳 49 万次（30.5 小时）左右，定位信号的出现具有间断性，即不时会出现一些离散的定位信号，随后具有稳定期，直至下一次定位信号的出现。这表明裂纹尖



图 9. 钉板断裂位置照片

端扩展能量的累积并释放需要一个过程的特点，具有萌生、扩展、稳定、再萌生扩展的过程。裂纹萌生初期的过程发展较缓慢，在长期疲劳状态下，裂纹尖端逐渐扩展，减少了相同载荷状态下的承载面积，相对拉应力不断增大，综合表现为一个非线性的损伤累积动态变化过程。当累积损伤达到一定程度，进入裂纹扩展的第二阶段，即材料进入屈服期，裂纹扩展速率显著增加，及至在较短的时间内达到断裂破坏。实际上，材料的多处薄弱环节在同一种疲劳载荷环境下都有可能成为声发射事件源，只是出现的时间和状态不同。数据显示，开始的阶段，定位信号（代表着缺陷源的动态变化）的出现具有间断性，随着开裂面的扩大，开裂面之间的摩压塑变会不断产生信号，形成更多的、连续的定位。在复杂的结构或焊缝中，裂纹源可能不是单一的，有可能多个裂纹源同时存在。当最后疲劳开裂长度达到横断面 2/3 时，试件在短时间内出现脆性拉断，声发射定位事件也迅速增多并且其位置出现在整个断裂的横截面上。

## 5. 结论

本位的实验结果表明，声发射可以对复杂结构的疲劳断裂全过程进行有效的监测。监测结果可以对如下问题提供答案：

- 裂纹在什么时候或多少个疲劳周期下开始萌生？
- 裂纹发生在什么位置？
- 裂纹朝哪个方向扩展？
- 裂纹在一个疲劳周期的详细表现形式？
- 有多少个独立的裂纹源？
- 裂纹的发展过程如何？
- 裂纹扩展的剧烈程度，信号强度如何？
- 材料在什么时候发生断裂？

## 参考文献

- [1]. Carlos M., Acoustic Emission: Heeding the warning sounds from materials, ASTM Standardization News, 2003.
- [2]. Huang M.S., Jiang L. Liaw P.K. et al. Using acoustic emission in fatigue and fracture materials research, JOM, 1998, 50(11), 1
- [3]. Barsoum F. F., Suleman J., Korcak A. and Hill E.V.K. Acoustic emission monitoring and fatigue life prediction in axially loaded notched steel specimens. J. of Acoustic Emission, 2009, 27, 40
- [4]. Vlasic F., Mazal P., Hort F., Comparison of acoustic emission signal and X-ray diffraction at initial stages of fatigue damage, Proceedings of EWAGE 2010, Vienna, 2010
- [5]. Roberts T.M., Talebzadeh M., Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation, Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59, 695
- [6]. Nasibullin A., Urbach A., Banov M.D., Acoustic emission monitoring of fatigue crack origination during titanium specimens tests, Scientific Journal of Riga Technical University, 2010, 34, 61
- [7]. Miller R.K., Hill E.V.K, Nondestructive Testing Handbook, 3<sup>rd</sup> Edition, Volume 6, Acoustic Emission Testing, America Society of Non-Destructive Testing, August, 2005, ISBN: 10: 1-57117-137-1.