

钢结构桥梁结构疲劳裂纹损伤声发射监测

付尧, 孔德连, 许凤旌

(美国物理声学公司 (PAC) 北京代表处, 北京 100029)

摘要: 采用声发射技术对焊缝处裂纹的进行监测, 在复杂的疲劳试验环境噪音中监测到裂纹活动信号。分析疲劳裂纹损伤产生的原因以及材料在交变载荷作用下产生声发射的机理, 得到表征焊缝裂纹活动过程的信号特征。利用声发射技术监测裂纹损伤的活度、强度, 实现对裂纹损伤状态的实时监测。

关键词: 声发射; 裂纹损伤; 实时监测

Fatigue Crack Damage of Acoustic Emission Testing For Steel Bridge Weld

FU Yao KONG De Lian XU Feng Jing

(Physical Acoustics Corp. Beijing Office, Beijing 100029, China)

Abstract: The activity signals of crack could be picked out in complex noisy environment by using acoustic emission technique to test welding cracks. Analyzed the causes of fatigue crack and the acoustic emission mechanism of material with alternate loads. Got the signal character of welding cracks which identify the active course of it. Realize the Real-time monitoring of crack state by monitor the activity and intensity of crack using acoustic emission tests.

Keywords: Acoustic emission; Crack damage; Real-time monitoring

引言

某钢结构锚梁在疲劳测试过程中, 锚梁一端焊缝出现裂纹, 采用声发射技术对裂纹处进行重点检测, 得到裂纹损伤的疲劳活动规律, 为今后的深入研究提供重要依据。钢结构锚梁预定疲劳测试次数为 200 万次, 采用压-压疲劳加载, 最大加载载荷-1714KN, 最小加载载荷-124.6KN, 加载频率为 1.1 次/秒。随着疲劳加载次数的增加, 锚梁横梁段与底部支撑板焊缝连接处出现宏观裂纹。当疲劳次数达到 77 万次的时候, 采用声发射技术对钢梁进行疲劳监测, 采集裂纹活动过程的声发射信号。经过 10 天的监测, 一直跟踪至疲劳测试结束, 获得了有价值的的数据。通过对数据的处理分析, 得到裂纹损伤活动过程的信号特征。数据分析表明, 裂纹在张开与闭合阶段均产生声发射信号, 且具有不同的参数特征, 只有经过一定的疲劳周次, 才会发生真正的裂纹扩展, 裂纹扩展具有随机性。图 1 为疲劳测试钢架结构图, 图中左端红点处为已发现的焊缝裂纹处。

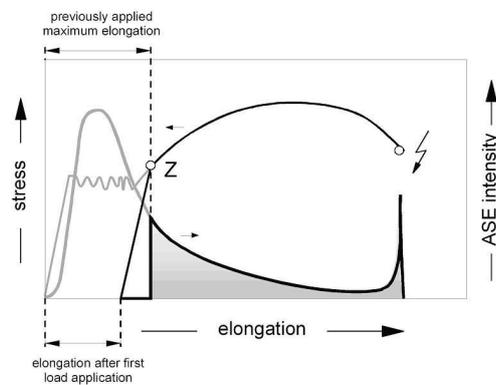
1 疲劳损伤声发射监测原理及监测系统

1.1 声发射

声发射，是指材料中局域源快速的释放能量产生瞬态弹性波的现象^[2]。对于材料的微观形变和开裂以及裂纹的发生和发展，就可以利用声发射来提供他们的动态信息，声发射源往往是材料灾难性破坏的发源地，由于声发射现象往往在材料破坏之前就会出现，因此只要及时捕捉这些信息，根据其声发射信号的特征及其发射强度，就可以推论得知声发射远的目前状态，以及它形成的历史并对其发展趋势进行预报。

1.2 凯赛尔效应—声发射理论基础

凯赛尔效应是德国学者凯赛尔在 1963 年研究金属声发射特性时发现的。材料被重新加载期间，在应力值达到上次加载最大应力之前不产生声发射信号。



凯赛尔效应

1.3 疲劳损伤声发射监测原理

疲劳损伤是指材料或结构在交变载荷作用下由于机械、物理、化学等因素导致其力学性能、微观结构产生劣化的结果^[4]。工程结构中钢梁焊缝连接处由于交变载荷作用容易产生疲劳损伤，其发生、发展历程由位错-滑移-微观裂纹-裂纹扩展-断裂等阶段组成。根据损伤力学与断裂力学原理可知，裂纹萌生、稳定、扩展直至最后断裂的过程是一个能量累积和快速释放的过程^[5]。能量的释放包括表面能、热能、弹性能等形式，其中的弹性能以应力波的形式释放出来，产生声发射。声发射信号包含了信号源处的有效信息，通过监测分析裂纹损伤在疲劳载荷作用下的声发射信号，有助于了解裂纹及结构的变化情况，进而对材料或结构构件进行损伤评价。



图 1 疲劳试验结构图

1.4 监测系统

采用美国物理声学公司的 SAMOS PCI-8 声发射系统, 150kHz 谐振传感器, 前置放大器增益 40 dB, 采样频率为 1 MHz。

2 疲劳裂纹损伤位置及开裂原因

2.1 裂纹位置

钢梁左端部与底板支撑搭接处的角焊缝由于疲劳载荷、焊接缺陷、应力集中等原因产生两条裂纹。一条位于钢梁底板与底部支撑上表面板焊缝处, 另一条位于横梁左端部加强板底部焊缝, 裂纹源位于角焊缝头部。

2.2 开裂原因

由于疲劳试验机压力轴与钢结构横梁侧向中面不完全重合, 横梁两端与底部支撑板的连接焊缝既承受复合拉压应力, 又承受复合扭剪应力。因此钢结构横梁两端焊接处在每一次循环都要承受拉-压-剪三种状态的复合应力作用。在焊缝区, 焊条金属与本体金属的熔融区往往产生金属原子的位错, 在外应力作用下位错原子数目不断增加, 大量的位错部位相互通连, 形成了原子尺度的滑移带, 当滑移带在周期载荷作用下继续发展, 便形成微裂纹。微裂纹的端部往往造成应力集中, 随着疲劳次数的增加, 裂纹不断扩展, 形成肉眼可见的宏观裂纹。图 1 中传力三角梁为不对称三角形, 主压力点分别距离横梁左右两端支撑处 260mm 和 420mm, 从而使钢架横梁左端焊缝处承受较大的载荷。开裂处为角焊缝焊接, 由于施焊部位空间狭窄, 影响焊接质量, 焊接端部易产生应力集中, 引起较大残余应力, 造成该端出现宏观裂纹。

3 监测结果及数据分析

3.1 噪音分析

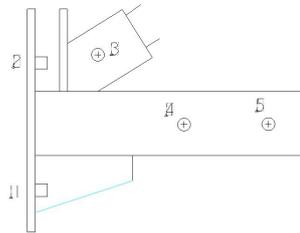


图 2 噪音检测传感器布置图

疲劳试验现场噪音主要来自于油缸冲击、金属塑性变形、金属板表面之间的挤压摩擦、加载金属压头对三角梁顶端产生的周期性冲击。图 2 为噪音检测过程中传感器布置图, 将传感器布置在钢梁各段, 距离左端焊缝处较远, 由于钢板结构搭接、角接情况复杂, 声波衰减加剧。因此, 传感器基本接收不到裂纹处的声发射信号。图 3 为不同传感器接收到的噪音信号的幅值对时间图, 图中数字 1、2、3、4 表示不同通道的传感器, 分别对应图 2 中的安装位置。图 3 中噪音信号分析可知, 1、2 通道贴于左侧侧壁, 最高幅值达到 70db 左右, 具有明显的周期性, 其信号出现的频率等于加载频率的两倍, 表明每次疲劳循环的加载段与卸载段都会产生信号。3、4 号传感器分别贴于三角梁与横梁上, 其信号具有高幅值 (90db 左右), 且 3 通道接收到信号幅值高于 4 通道, 但 3、4 通道低幅值信号的周期性已经不明显。这说明噪音信号主要来自于传力三角梁与底部横梁相接平面的摩擦以及钢板的塑性变形和液压缸的冲击噪音, 噪音信号首先传到 3 通道, 依次传给 4、1、2 通道。3、4 通道接收到高幅值信号, 同时接收到大量的反射波、折射波, 因此使得周期性的加载信号趋于模糊, 不再具有周期性。随着传播路径的增长以及钢结构连接形式的复杂性, 信号的衰减使得 1、2 通道只能接收到低幅值、低频率信号, 一些反射波、折射波衰减到门槛以下, 因此 1、2 通道不受回波干扰, 其信号表现出明显的周期性。

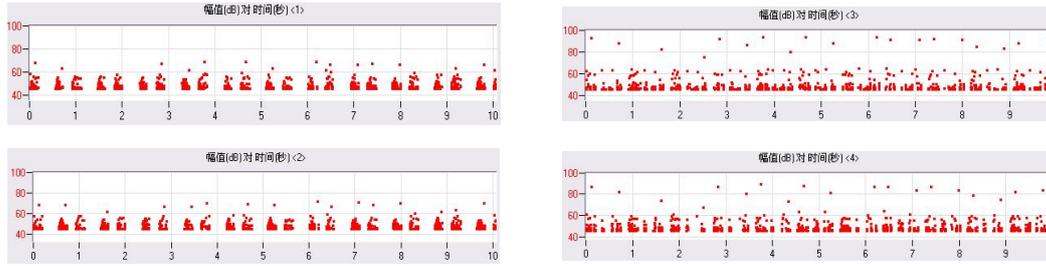


图3 钢架横梁左端焊缝裂纹处的信号“幅值-时间”图

由图2可知3通道位于传力三角梁与横梁凸台接触面附近，因此3通道的信号波形频谱特征可以有效表征加载端传来的噪音信号。由于加载和卸载过程平稳，其疲劳加载曲线示意图如图4，每个加载周期中3号传感器都会接收到两次高幅值信号，且两次信号的声发射特征参数的差别具有规律性。图4中T0至T为一次加载周期（此试验加载频率1.1Hz），图中T1和T2分别为两次高幅值信号出现的时间，其间隔时间约占每个周期的40%，两次信号的上升时间分别位于300-600微秒和11000-16000微秒之间。进一步分析可得：加载段由于载荷持续加大，应变能迅速聚集，达到最大作用应力前（T1）材料屈服或结构达到塑性极限而释放能量并产生声发射；卸载段由于载荷作用的减小，金属构件具有恢复原状的弹性将得到释放，由于释放过程没有外加应力的强制作用，使得卸载过程均匀平稳，高幅值信号的上升时间和持续时间较长。分析两次信号的频谱图发现，加载段信号的高频信号比率较大，这表明加载段由于外载的强制作用使得信号的应变速率较大，而卸载段能量的释放较为自由，应变速率较小，因此信号的频率较低。图6、图7分别为不同载荷历程的信号波形、FFT变换以及功率谱图。由以上分析可得：图5幅值图中1、2、3分别表示为加载段信号，1'、2'、3'表示卸载段信号。

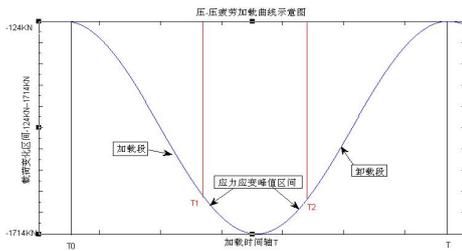


图4 压-压疲劳加载曲线示意图

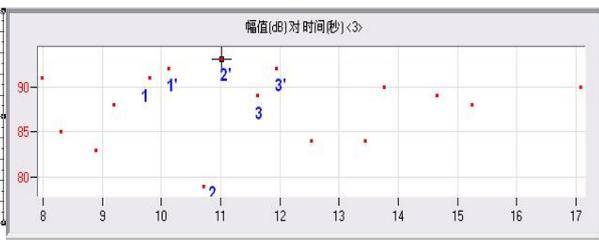


图5 3通道幅值对时间特征参数图

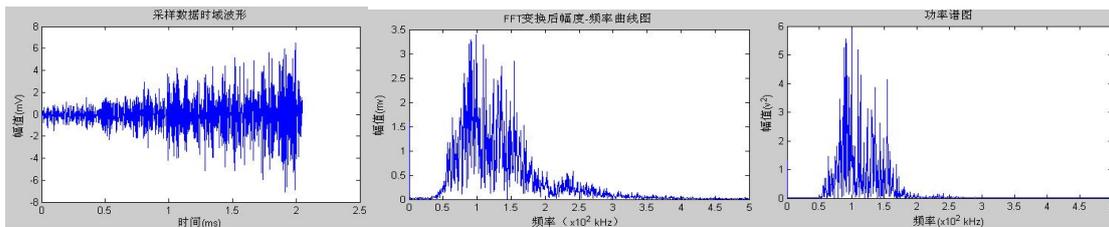


图6 1' /2' /3' 处信号的波形、FFT 变换、功率谱图

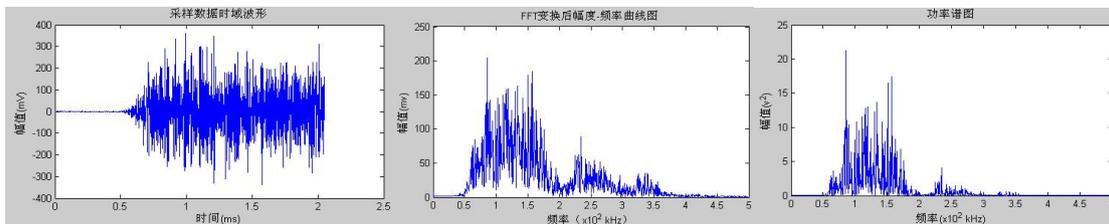


图7 1/2/3 处信号的波形、FFT 变换、功率谱图

3.2 钢梁两端信号对比分析

将传感器布置于钢架横梁两端进行信号采集，图8为无裂纹端信号的波形、FFT变换、功率谱图，图9为裂纹端突发型信号波形、FFT变化、功率谱图。两端低幅值信号出现的频率接近于加载频率的2倍，即在一次循环的加载与卸载过程均产生低幅值噪音。无裂纹端的信号时域波形具呈连续型，信号经过快速傅

里叶变换处理后，其具有较宽的频带范围(50Hz-350Hz)，低频成分(80Hz-160Hz)占主要成分，且分布较为均匀。裂纹端突发型特征信号只出现在该端，因此判断此信号可以表征裂纹的活动状态，此信号具有明显突发性，其频谱图与功率谱图频率成分集中，位于150kHz左右，因此以突发型信号作为裂纹活动的表征信号，总结其参数特征，作为与噪音信号参数的对比列入表1。

表1 信号特征参数表

类型	上升时间(微秒)	计数	能量计数	持续时间(微秒)	质心频率(kHz)
连续型信号	>800	>800	>400	>16000	<150
突发型信号	<100	<100	<40	<500	>180

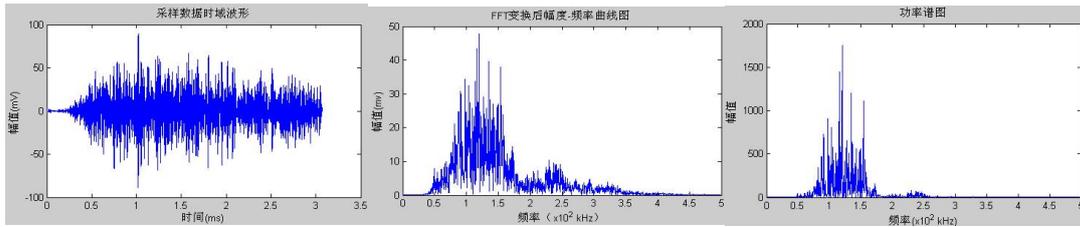


图8 无裂纹端噪音信号波形、FFT变化、功率谱图

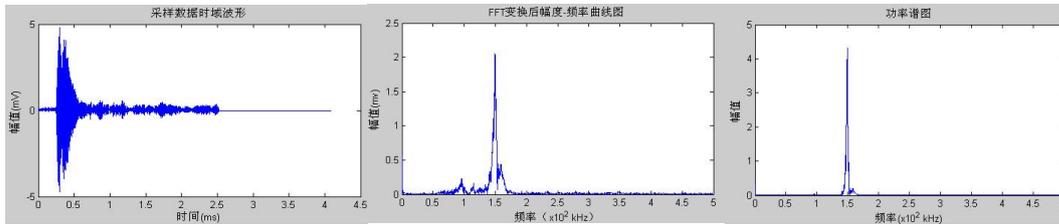


图9 裂纹端突发型信号波形、FFT变化、功率谱图

3.3 裂纹活动信号分析

由3.2可知，裂纹端信号具有突发型特征，因此进一步在已知裂纹处布置多个传感器，进行检测，传感器布置如图10。利用表1的突发型信号参数特征进行数据滤波，得到了以突发型信号为主的有效数据。数据分析表明，信号的接收以1通道为主，具有周期性的规律，其出现频率是加载频率的2倍，幅值分布在60db左右，即在一次循环过程中，裂纹具有两次活动信号，且其两次信号的间隔时间为整个加载周期的40%，因此判断出裂纹在张开(卸载)与闭合(加载)过程均产生突发型信号。根据声波传播机理，距离声源越近，接收到的信号时间越早，幅值较高。通过对五个通道接收到突发型信号的时间进行统计，表明一次循环过程中突发型信号被各通道采集到的顺序依次为1、4、5、2，因此声源位置在1通道附近。由于信号传播衰减使得5通道、2通道只能接收到一部分突发型信号，声波在经过焊缝处引起严重的衰减，3通道接收不到。根据疲劳加载频率与信号接收时间的先后关系，确定此突发型信号来自于1通道附近的裂纹，且裂纹处于活性状态，周期性的产生突发型声发射信号。

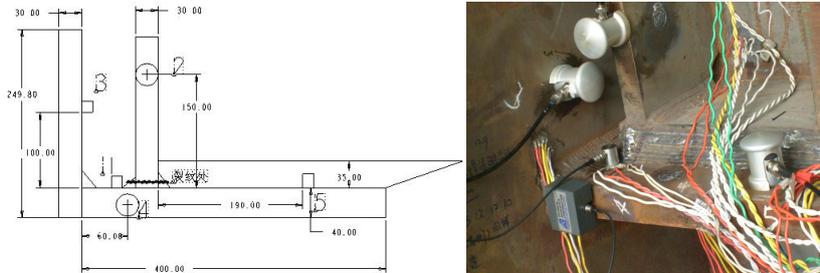


图10 钢架横梁左端焊缝裂纹处传感器布置图

分析表明焊缝裂纹在疲劳载荷作用下，其裂纹接合面不断相互挤压、摩擦产生周期性低幅值突发型信

号。根据断裂力学原理，对于疲劳应力产生的裂纹扩展，当交变载荷施加在金属结构体上时，在裂纹尖端形成应力集中，当尖端应力达到疲劳应力强度极限时，尖端以 r 为半径的圆周范围内屈服，释放出 AE 信号，屈服后的裂纹尖端向前延伸并硬化，应力在新的尖端范围 (r_0') 内集中。由于交变载荷幅值不变，尖端应力上升到一定值 σ_a 时，不再上升。 σ_a 虽然不变，但是由于疲劳使金属强度极限下降，当金属强度 σ_s 降到 σ_a 时，尖端前部以 r_0' 为半径的圆周区域内屈服开裂，裂纹扩展， r_0' 区域内的应力被松弛掉，松弛掉的应力向前传递给 r_0' 区域前端的 r_1 的微小范围内的非屈服区域，该区域进而形成应力集中。上述过程的持续进行会产生位错滑移，位错雪崩，释放 AE 信号，裂纹不断扩展。当裂纹尖端的应力不断集中，最后失稳扩展并释放能量，产生高幅值突发型声发射信号。根据同一次疲劳循环中 1、5 通道接收同一信号时间差，由已测声速与时间差的乘积确定信号源位于裂纹附近。

3.4 裂纹扩展监测

根据以上分析，现场环境恶劣，声发射信号主要来源于机械运动、金属的塑性变形、裂纹开裂面之间的挤压和摩擦、微裂纹的疲劳扩展。因此，如何区分裂纹活动信号与噪音信号显得尤为重要。由于突发型信号能够表征裂纹的活动，根据突发型信号与连续型信号在声发射特征参数上存在的差别，将突发型信号的特征参数作为滤波条件将大部分噪音滤除掉，这样可以得到以表征裂纹损伤变化的突发型信号为主的特征群。经过长时间监测，获得裂纹开闭状态信号特征以及真实裂纹扩展信号特征，既抑制了噪声干扰，又实现了裂纹损伤实时监测功能。

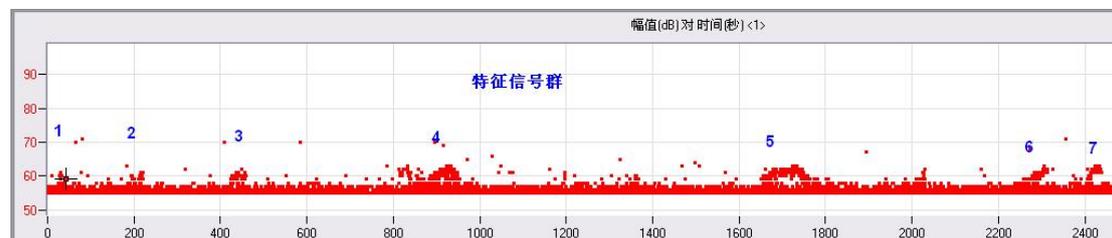


图 11 钢架横梁左端裂纹活动信号特征参数图

图 11 分别为数据滤波后的特征信号群图，大部分高幅值、高能量、长持续时间和上升时间的噪音信号被滤除掉，得到了代表裂纹活动的突发型信号数据。图 11 中标示的特殊信号群出现在监测第 5 天，监测图中随机出现多个突发信号群。各信号群中的点信号 (55db-70db) 出现频率等于加载频率。上述信号群的历程包含了微裂纹萌生、稳定、扩展、稳定等状态过程，裂纹尖端在疲劳过程不断积累能量，应力集中程度增大，当达到裂纹疲劳极限应力时，裂纹尖端的薄弱区发生局部应力屈服，萌生出新的开裂面，新的开裂面再继续上述过程，使得裂纹尖端不断向前发展。突发型信号是由于金属微元在疲劳过程中的位错、滑移、扩展开裂而产生，新的开裂面在相互咬合过程中产生高幅值突发型信号，随着疲劳次数的增加，开裂面不断趋于均匀、平整，声发射信号幅值降低，最后趋于平稳。每次信号群的出现都要经前期能量的不断累积过程，当能量积累到损伤极限，便发生尖端扩展和能量释放过程，能量的释放使得尖端前部应力松弛。因此，每个信号群的出现（即尖端扩展和能量释放）后，尖端应力的松弛使得在一段时间内没有周期性的突发型信号，从而表明信号群代表着裂纹尖端的扩展。利用声发射技术可以实现对裂纹扩展的实时监测。

4 试验结论

- (1) 在复杂的环境噪音中得到表征裂纹活动的信号特征。

- (2) 突发型信号的特征参数可以作为焊缝是否完整的评价依据。
- (3) 实现利用声发射技术对裂纹损伤的变化状况进行监测。

参考文献:

- [1] 耿荣生, 吴克勤, 景鹏, 傅刚强. 全尺寸飞机机体疲劳试验时中央翼与外翼连接区域疲劳损伤的声发射监测. 无损检测, 2008 年第 30 卷第 1 期
- [2] 沈功田, 戴光, 刘时风. 中国声发射检测技术进展学会成立 25 周年纪念. 无损检测, 2003, 第 25 卷第 6 期
- [3] 李光海, 刘正义. 基于声发射技术的金属高频疲劳监测. 中国机械工程, 2004 年第 15 卷第 13 期
- [4] 耿荣生, 景鹏, 雷洪. 飞机主承力构件疲劳裂纹萌生和扩展的声发射评价. 无损检测, 1999, 第 21 卷, 第 4 期
- [5] 刘学文, 林吉中, 袁祖贻. 应用声发射技术评价材料疲劳损伤的研究. 中国铁道科学, 1997, 第 18 卷第 4 期