

桥梁结构疲劳损伤声发射信号的特征研究

杨剑锋¹, 汪文有¹, 孔德连¹, 许凤旌²

(北京化工大学-美国物理声学公司 (PAC) 联合实验室 北京 100029)

摘要: 采用声发射技术对已开裂的焊缝进行检测, 在复杂的环境噪音中找到裂纹活动信号。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。这篇文章主要介绍了如何从复杂环境噪音中识别和分离疲劳裂纹信号, 关于疲劳裂纹信号的规律请参考文献“桥梁结构疲劳损伤声发射信号的规律”

关键词: 声发射; 裂纹损伤; 实时监测

0 引言

图 1 是荆岳长江公路大桥索一塔锚固结构钢锚梁模型, 这次实验的目的是采用声发射技术对该结构左侧出现的宏观裂纹进行监测, 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。该锚固结构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



图 1. 实验结构图.

得了有价值的数据。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。

1 疲劳损伤声发射监测原理及监测系统

1.1 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。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。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。

1.2 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 MSPS。

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，裂纹位于角焊缝头部，具体位置见图 2 所示。



图 2. 疲劳裂纹位置。

2.2 开裂原因

由于疲劳试验机压力轴与钢结构锚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

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 3 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 4 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 4 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。

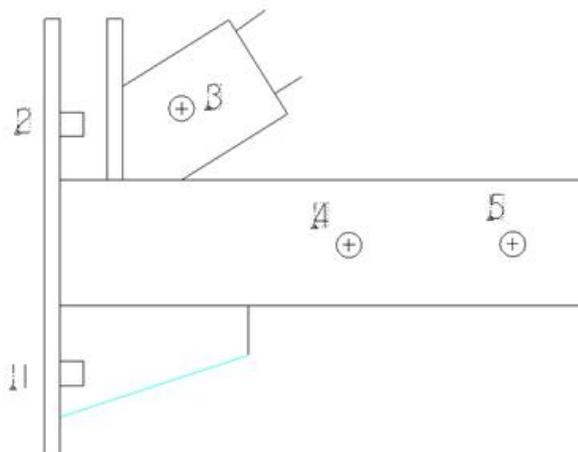


图 3 噪音检测传感器布置图

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。

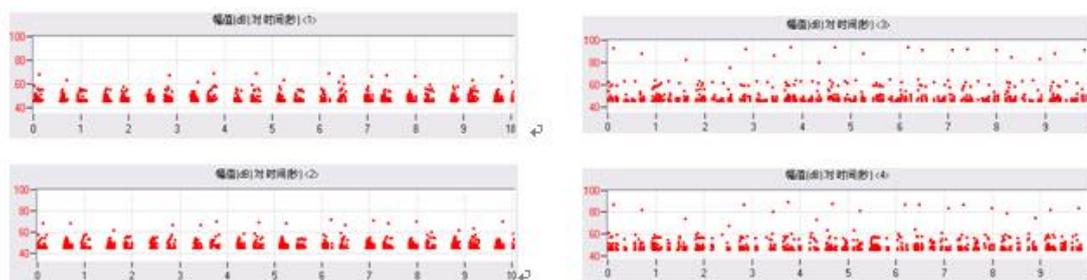


图 4 钢架横梁左端焊缝裂纹处的信号“幅值-时间”图

3.2 波速测量

在疲劳载荷停止的情况下做衰减与声速测量，两探头间距 800mm，每 100mm 处做 3 次断铅实验。分别在距 1 探头 100、200、600、700 处计算距离差和到达时间差、计算声速在 2.8m/ms—3.7m/ms 间，取波速为 3.5m/ms。通过断铅实验测

得距探头 800mm 处，信号衰减了 20db.

3.3 裂纹信号的提取

图 5 是锚固结构左侧前端探头布置图

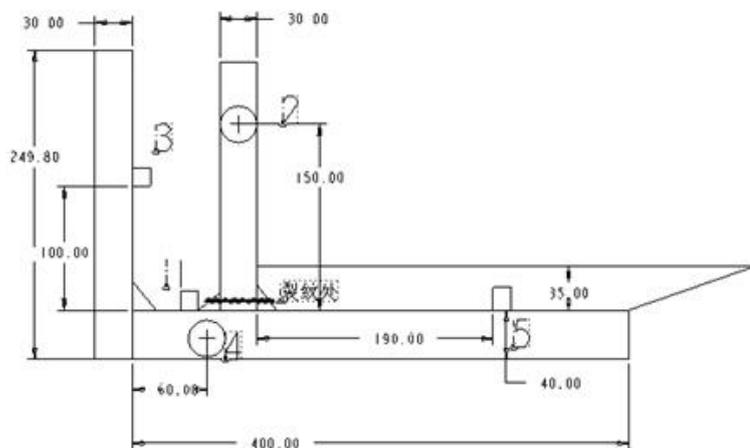


图 5 探头布置简图

对 1 通道波形采集部分的数据做一个区域撞击事件分析，发现波形为图 6 的信号占绝大多数，波形为图 7 的信号占小部分。根据以往对裂纹信号的认识，裂纹信号一般是突发型信号，猜测图 6 所示信号为噪音信号，图 7 所示信号为裂纹信号。

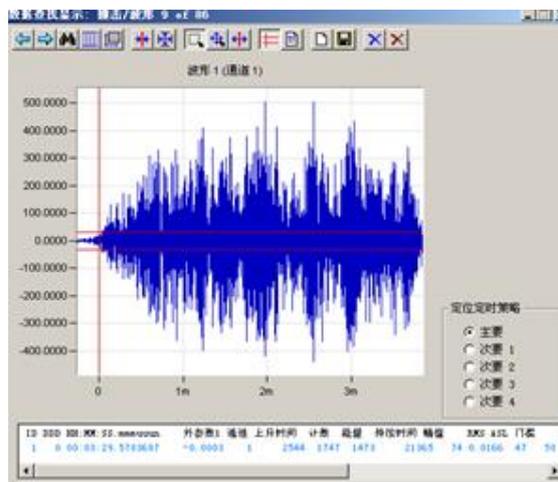


图 6

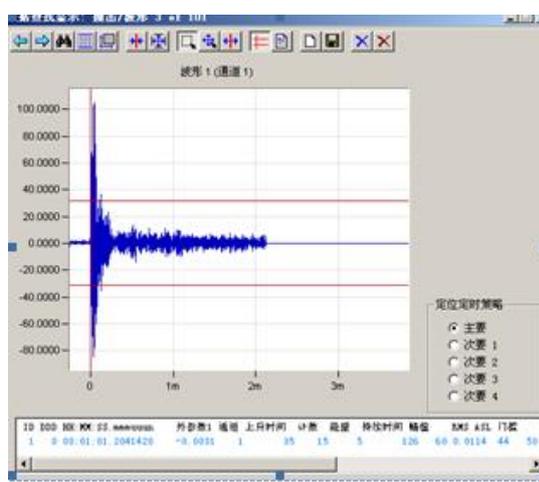


图 7

分析若干个波形为图 7 的撞击信号到达各个通道的时间差，如表 1 所示。（数据整数部分相同，略去不写）

表 1

1 通道	2 通道	3 通道	4 通道	5 通道
.2921303		.2921663	.2921457	.2922347
.1970053		.1970413	.1970250	.1970947
.1298933		.1299293	.1299093	.1299920
.0385997		.0386357	.0386193	.0386890
.8659053	.8659657	.8659520	.8659253	.8659967
.3944857	.3945513	.3945228	.3945077	.3945777

分 析：

(1) 信号每次都能被 1、3、4、5 收到，2 不一定能收到，可能是因为裂纹所在的焊缝使信号衰减过快；

(2) 信号每次都是先到达 1 通道，其次是 4、3、5 通道，这与裂纹与各个通道的距离顺序相同，所以这些信号可能是裂纹信号，波形为图 6 的信号没有这个特征，并且这类信号每次都是先到达 2 通道和 5 通道；

(3) 信号到达各个通道的时间差基本相同，例如信号到达 4、5 通道的时间差为 0.07ms，乘以波速 3.5m/ms，与 4、5 通道之间的距离基本相等，所以这些信号可能是裂纹信号；

(4) 用 POCKET-AE 检测另外一端没有裂纹的焊缝处，没有发现波形如图 7 的信号，因此这些信号可能是裂纹信号；

通过上述分析，证明波形为图 7 的信号为裂纹活动时的信号。

3.4 裂纹信号特征

取一部分裂纹信号和噪音信号进行分析。发现如下规律，如表 2 所示。

表 2

	能量	上升时间	计数	持续时间	幅值
裂纹信号	小于 10	小于 20	小于 20	80-200	56-59
噪音信号	大于 100	大于 500	大于 450	大于 500	40-70
	有效值电压	平均信号电平	绝对能量	中心频率	
裂纹信号	0.0028-0.0094	32-42	小于 1000	198-202	
噪音信号	0.0032-0.0086	32-41	大于 9999	143-153	

分析：

裂纹信号的能量、上升时间、计数、持续时间、绝对能量都远小于噪音信号；RMS 和 ASL 值基本相同，裂纹信号的幅值和中心频率很稳定。因此可以通过以上各个特征参数来进行前端滤波和图形滤波。

4 结论

- (1) 根据以往对裂纹信号的认识，第一步我们从复杂噪音环境下提取出了裂纹活动的信号。
- (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。

- (4) 更多关于裂纹活动信号的规律请查看文献“桥梁结构疲劳损伤声发射信号的规律”

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