

土木工程结构损伤 声发射监测及评定 ——理论、方法与应用

李冬生 杨伟 喻言 著



科学出版社

土木工程结构损伤声发射监测 及评定——理论、方法与应用

李冬生 杨 伟 喻 言 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书讲述声发射技术在土木工程结构损伤监测中的基本理论、方法及工程应用,重点介绍土木工程结构损伤声发射传播规律及数值模拟技术、土木工程常见结构损伤声发射监测及安全评定方法。全书分为8章,包括土木工程结构损伤声发射监测基本原理、土木工程结构损伤声发射传播规律及数值模拟、板状结构损伤声发射波束成型定位方法、桥梁拉索损伤演化声发射监测及评价方法、桥梁拉索腐蚀损伤声发射监测及模式识别、纤维混凝土损伤演化声发射监测及破坏机理、往复荷载下FRP-钢管约束混凝土柱损伤声发射监测、声发射技术在拱桥吊杆损伤监测中的应用等。

本书既可作为从事土木工程结构损伤检测和声发射技术领域研究的工程技术人员参考用书,也可作为高等院校相关专业硕士、博士研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构损伤声发射监测及评定——理论、方法与应用/李冬生,杨伟,喻言著. —北京:科学出版社,2017.9

ISBN 978-7-03-054453-7

I. ①土… II. ①李… ②杨… ③喻… III. ①土木工程—工程结构—损伤(力学)—声发射监测—研究 IV. ①TU317

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第221831号

责任编辑:赵敬伟/责任校对:张凤琴
责任印制:肖 兴/封面设计:耕者工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年9月第一次印刷 印张:14 1/4 彩插:12

字数:276 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

土木工程结构在建造、运营全寿命过程中，将遭受地震、风、环境侵蚀、疲劳荷载与冲击荷载、暴雨、洪水、火灾等作用，严重威胁运营与服役安全，因此发展土木工程结构损伤监测具有重要的意义。重大土木工程结构往往构造复杂，荷载效应具有时变特征，损伤随机性强，隐蔽性高，性能退化机理还不完善，结构失效前兆不明显。仅依靠动力识别方法理论还不能完全解决这一关键科学问题，波动损伤监测技术是动力识别方法理论的极大补充。

土木工程结构损伤波动监测根据监测方式可分为两种：主动监测和被动监测。被动监测与主动监测相比，不需要激励源，仅通过特殊传感器拾取结构本身损伤释放的能量（应力波），判断结构的损伤。声发射技术属于典型的被动监测技术，传感器布设简单，对构件的几何形状不敏感，能够整体探测和评价整个结构中活性缺陷的状态。声发射技术在石油化工行业、电力行业、材料实验、航空航天损伤监测中得到了广泛的应用，并且形成了相应的行业标准和国家标准，已成为一种常规的无损检测手段。由于土木工程结构具有单体个性，开放式的服役环境，所以声发射技术在土木工程结构损伤监测中具有较强的挑战。其表现为：声发射源在土木工程结构中的传播机理较复杂；土木工程结构庞大，声发射源具有较高的频率和较短的波长，为了得到足够精度的解，传统有限元的系统矩阵以及求解方程的次数都非常大，应发展一种快速的模拟声发射源在土木工程中传播的有限元方法；不同的工程材料具有不同的声发射信号，如何标准化这些信号，基于监测信号定量判断结构损伤程度及剩余寿命；强噪声环境中去噪方法及有效声发射信号的提取；结构损伤定位方法等。本书对声发射源在土木工程中的传播规律数值模拟方法、摆脱时差定位方法缺陷的波束成型算法、桥梁拉索损伤演化声发射监测及评价方法和不同损伤源的模式识别、纤维混凝土损伤演化声发射监测及破坏机理、往复荷载下 FRP-钢管约束混凝土柱损伤声发射监测、声发射技术在拱桥吊杆损伤监测中的应用等几个方面进行了详细论述，系统介绍了作者近十年的声发射相关方面的研究成果。

本书在编写过程中得到了研究生都方竹、丁穗坤、冯全明、胡倩、曹海、王平光等的大力协助，没有他们的辛勤付出，不可能得到最终成稿。本书得到了国家“十三五”重点研发计划“高性能组合结构体系研究与示范应用”和大连理工大学研究生教改基金项目的资助，在此表示诚挚的感谢！

在本书编写的过程中，参考了大量的参考文献，难免有疏漏，在此谨向这些文献的作者表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

李冬生
大连理工大学
2017年8月

目 录

第 1 章	土木工程结构损伤声发射监测基本原理	1
1.1	引言	1
1.2	声发射波的研究	2
1.2.1	声发射波产生机理及物理效应	2
1.2.2	声发射产生的条件	3
1.2.3	声发射信号的特征参数	5
1.3	土木工程结构损伤常见的声发射技术分析方法	7
1.3.1	声发射特征参数分析方法	7
1.3.2	声发射信号的波形分析方法	8
1.3.3	基于声发射特征参数评价土木工程结构损伤	10
第 2 章	土木工程结构损伤声发射传播规律及数值模拟	14
2.1	声发射信号的波型效应及其影响	14
2.2	柱面导波的基本理论	17
2.2.1	导波的常用概念	17
2.2.2	导波的频散特性和多模态特性	18
2.2.3	柱面导波频散方程	19
2.3	柱面导波频散曲线的编程	24
2.4	声发射波型效应的数值模拟	25
2.4.1	导波数值模拟的优越性	25
2.4.2	导波数值模拟的优化方法	26
2.4.3	导波数值模拟的处理方法	28
2.4.4	数值模拟的结果分析	30
2.5	声波在板中传播的频域分析	40
2.5.1	谱有限元方法简介	40
2.5.2	基于傅里叶变换的频域分析	43
2.5.3	基于拉普拉斯变换的频域分析	46
第 3 章	板状结构损伤声发射波束成型定位方法	52
3.1	引言	52
3.2	波束成型基本原理	53
3.2.1	原理简介	53
3.2.2	线性阵列稳定性分析	54

3.3	铝板声发射源定位有限元仿真	56
3.3.1	系统模型与激励模型	56
3.3.2	有限元模型	56
3.3.3	声发射源模型	58
3.3.4	信号处理	59
3.3.5	响应信号叠加	59
3.3.6	希尔伯特变换	60
3.3.7	定位结果	61
3.3.8	算法影响因子分析	62
3.3.9	概率诊断成像	64
3.4	声发射源定位实验验证	68
3.4.1	实验系统和方案	68
3.4.2	铝板源定位实验	70
3.5	钢筒源定位实验	73
3.5.1	钢筒实验方案	73
3.5.2	损伤定位成像	74
3.6	多损伤定位成像	76
第4章	桥梁拉索损伤演化声发射监测及评价方法	77
4.1	引言	77
4.2	钢绞线应力损伤的声发射特征	77
4.2.1	钢绞线应力损伤的声发射监测实验设计方案	78
4.2.2	实验结果与讨论	78
4.3	基于声发射监测数据桥梁拉吊索临界损伤判断与预测	80
4.3.1	钢绞线拉伸损伤声发射过程的分形特征	80
4.3.2	钢绞线损伤演化声发射过程的分形分析	81
4.4	钢绞线损伤演化的声发射特征参数表征	82
4.4.1	声发射累积能量与拉伸变形的关系	82
4.4.2	声发射特征参数表征的钢绞线损伤演化模型	83
4.5	多龄期桥梁拉索疲劳损伤声发射监测	85
4.6	多龄期桥梁钢拉索疲劳损伤实验	85
4.6.1	实验方案与装置	85
4.6.2	疲劳实验结果及其分析	86
4.6.3	多龄期桥梁钢拉索疲劳损伤演化过程分析	87
4.7	多龄期钢拉索各阶段损伤声发射特征波形损伤类型判别	88
4.8	多龄期桥梁钢拉索疲劳断丝信号确定	94
4.8.1	常用故障诊断指标	94
4.8.2	多龄期桥梁钢拉索断丝信号确定及其评价	94

第 5 章 桥梁拉索腐蚀损伤声发射监测及模式识别	96
5.1 引言	96
5.2 钢绞线的腐蚀断裂实验	96
5.3 钢绞线腐蚀损伤演化机制	97
5.4 桥梁拉索腐蚀损伤声发射源智能识别技术	98
5.5 粒子群算法改进的聚类分析	103
5.6 实验结果与讨论	108
5.6.1 桥梁拉索腐蚀损伤声发射参数分析	108
5.6.2 梁拉索应力腐蚀声发射信号聚类分析	109
5.6.3 基于主成分分析技术的声发射粒子群聚类算法	110
5.6.4 桥梁拉索应力腐蚀损伤源声发射特征参数分析	112
5.7 基于 SOFM 的声发射信号模式识别	113
5.7.1 SOFM	113
5.7.2 SOFM 拓扑结构	113
5.7.3 SOFM 竞争学习过程	114
5.7.4 SOFM 训练过程	114
5.7.5 SOFM 特征映像 U 矩阵	115
5.8 基于 SOFM 的模拟损伤数据的可视化聚类	117
5.8.1 实验数据特征提取	117
5.8.2 模拟数据的 SOFM 数据挖掘分类过程	119
第 6 章 纤维混凝土损伤演化声发射监测及破坏机理	130
6.1 引言	130
6.2 实验方案	130
6.2.1 试件制备	130
6.2.2 加载设备与方法	131
6.2.3 实验数据采集设备	132
6.3 实验结果与分析	132
6.3.1 PVA 纤维混凝土抗弯强度实验分析	132
6.3.2 PVA 纤维混凝土三点弯曲荷载作用下声发射特征参数分析	133
6.4 PVA 纤维混凝土材料损伤演化过程评价	136
6.4.1 NDIS—2421 损伤评价准则	136
6.4.2 裕度指标评价 PVA 纤维混凝土损伤演化	137
6.4.3 基于声发射事件的强度分析	138
6.5 温度疲劳条件下 PVA 纤维混凝土声发射特性研究	140
6.6 实验方案	140
6.6.1 试件制备	140
6.6.2 荷载工况	141

6.6.3	声发射信号采集系统	141
6.7	PVA 纤维混凝土温度疲劳荷载下声发射信号特征参数分析	141
6.7.1	基于声发射信号特征参数的损伤演化分析	141
6.7.2	基于声发射信号幅值-时间的损伤劣化过程描述	144
6.8	温度疲劳荷载下 PVA 纤维混凝土损伤劣化过程分析评价	146
6.8.1	裕度指标评价 PVA 纤维水泥胶砂损伤演化	146
6.8.2	Kurtosis 指标评价 PVA 纤维水泥胶砂损伤演化	147
6.8.3	b 值评价 PVA 纤维水泥胶砂损伤演化	148
第 7 章	往复荷载下 FRP-钢管约束混凝土柱损伤声发射监测	150
7.1	引言	150
7.2	FRP-钢管约束混凝土柱损伤过程分析	150
7.2.1	FRP-钢管约束混凝土柱往复轴压实验	151
7.2.2	FRP-钢管约束混凝土柱低周往复拟静力实验	158
7.3	FRP-钢管约束混凝土柱损伤程度评定	164
7.3.1	FRP-钢管约束混凝土柱往复轴压实验	164
7.3.2	FRP-钢管约束混凝土柱低周往复拟静力实验	167
7.4	FRP-钢管约束混凝土柱损伤模式识别	169
7.4.1	声发射信号聚类分析法	170
7.4.2	FRP-钢管约束混凝土柱往复轴压实验	175
7.4.3	FRP-钢管约束混凝土柱低周往复拟静力实验	179
7.5	FRP-钢管约束混凝土柱损伤信号频谱分析	183
7.5.1	小波变换理论	183
7.5.2	FRP-钢管约束混凝土柱损伤信号小波分析	186
第 8 章	声发射技术在拱桥吊杆损伤监测中的应用	193
8.1	引言	193
8.2	四川峨边大渡河拱桥工程概况	194
8.3	拱桥吊杆损伤的声发射监测	194
8.4	拱桥吊杆损伤声发射测试方案	195
8.5	声发射测试结果分析与讨论	197
参考文献		215

第 1 章 土木工程结构损伤声发射监测基本原理

1.1 引言

随着科学技术的发展,“声发射”这一术语已日益为人们所熟悉。一般讲,声发射不同于一般的可听声,它是指“应力波发射”。当材料或结构受力时,首先发生弹性变形,此变形以弹性应变能储存在材料中,使其内部存在微观结构的改变,导致局部应力集中,造成不稳定的应力分布,当这种不稳定应力分布状态下的应变能积累到一定程度时,不稳定的高能状态一定要向稳定的低能态过渡,材料就出现了快速相变、裂纹等现象,并在此过程中释放应变能,这就是声发射现象产生的原因。

多年来,许多国内外专家学者一直在致力于此方面的研究。20 世纪 50 年代初,德国学者 Josef Kaiser 观察到铜、锌、铝、锡、黄铜、铸铁和纯金属或合金在变形过程中都有声发射现象,并提出了声发射的不可逆效应,被称为 Kaiser 效应^[1]。后来, Rusch, McCabe 等通过实验证实,混凝土材料的声发射过程也具有 Kaiser 效应,复合材料、有损伤的金属材料、混凝土、岩石等循环加载过程中, Kaiser 效应点的应力值往往并不完全等于材料先前所受的最大应力,而是比先前的最大应力值稍小,这也就是所谓的费利西蒂(Felicity)效应^[2]。美国 Scnofiekd 对声发射现象进行了大量的研究,认为声发射信号来源于材料的内部机制,连续型声发射信号对应变速率敏感,主要来源于位错钉扎和交错滑移,突发型声发射信号与堆垛层错的形成、材料断裂和机械孪晶等变形有关^[3]。此后, Dunegan 把声发射测试频率范围从声频范围提高到超声频段,有效地排除了外界噪声干扰,这一举动打开了声发射技术付诸实际应用的大门^[4]。

由于声发射现象有两个重要特征:①声发射信号起源于材料内部,是局部发生的非稳定状态导致的瞬态事件;②声发射信号具有较宽的频率范围,涵盖了次声频、声频到超声频整个频率范围,信息量大,而其声级却比较低。所以,在研究声发射时就需要采用一些不同于研究一般声学现象的方法。

本章节主要简单地介绍声发射现象产生的条件、原因,声发射波形的传播特点以及声发射信号处理的方法。

1.2 声发射波的研究

1.2.1 声发射波产生机理及物理效应

引起声发射的材料局部变化称为声发射事件，而声发射源，是指声发射事件的物理源点或发生声发射波的机制源^[5]。声发射源的机制具有多样性，包括固体内裂纹的形成和扩展（如升载时裂纹的扩展、恒载时裂纹的扩展、疲劳时裂纹的扩展、应力腐蚀裂纹的扩展和氢脆裂纹的扩展等）、塑性形变（位错运动、滑移、孪晶变形和边界移动等）、相变（马氏体相变）、压力泄漏、摩擦与磨损、裂缝面闭合与摩擦、撞击、磁畴壁运动、燃烧、沸腾、凝固与融化、氧化膜、锈皮和熔渣开裂等。尽管不同的源机制产生不同的声发射信号，但其共同点都是由于外界条件变化时，材料局部或部分区域变得不稳定并通过释放出能量以达到新的稳定平衡的过程^[6]。

由于材料内部存在各种缺陷及不均匀性，材料受到外界作用时将出现应力集中且局部分布不均匀。一旦这种不均匀稳定性所积累的应变能达到一定程度，必然造成应力的重新分布，在这个过程中常常伴随着位错移动、滑移、裂缝的产生和发展、微观龟裂等，并最终使得材料到达新的平衡状态。这一过程实际就是应变能释放以达到新的平衡过程。

正是基于上述机理，我们可以利用声发射信号和声发射技术来监测材料在受载情况下的微观形变和开裂以及裂纹的发生和发展来获得它们的动态信息。各种灾难性的破坏，比如钝化膜破坏引起的点蚀直至最后穿孔，微裂缝的扩张直至拉索的断裂，均会产生声发射信号。材料破坏前往往就有声发射现象，因此如果能够获得这些早期声发射现象并进行分析，不但能判断声发射源的当前状态，甚至对其形成的原因以及未来的发展走向都能有所了解，从而能够进行状态监测和故障诊断^[6]。

与声发射波现象有关的物理效应有三种：Kaiser 效应、Felicity 效应和波型效应，分别如下。

（1）Kaiser 效应。材料重新加载到上次加载的最大荷载以前不发生明显声发射的这种不可逆的性质即为 Kaiser 效应。由于很多物理现象诸如裂纹的生成和断裂、界面的分离、位错和滑移等均是不可逆的，所以这些现象产生的声发射现象也是不可逆的，其实验证明如图 1-2-1 所示。从图上可看出，相同的荷载加载所产生的声发射信号完全不相同。利用 Kaiser 效应，我们可以通过预先加载的方式去除夹具噪声的干扰，推断岩体以前所受的最大荷载应力，定期检测裂纹新生等^[5]。

（2）Felicity 效应，也可以称为反 Kaiser 效应，是指材料重复加载到达原先所加最大荷载前发生明显声发射的现象。再次加载时重新产生声发射信号的开始荷载（ P_{AE} ）与上次加载对应的最大荷载（ P_{max} ）之比（ P_{AE}/P_{max} ）称为 Felicity 比，

该效应的示意图如图 1-2-2 所示。对复合材料（如纤维）的监测而言，Felicity 比是一个重要的技术参数，纤维在再次加载到上次加载的最大荷载时，可能由于应力的重新分布，某些新的地方会出现新的变形和裂缝扩展，最终导致声发射信号的提前出现。Felicity 效应是 Kaiser 效应的补充，而 Felicity 比是 Kaiser 效应失效程度的量度^[5]。

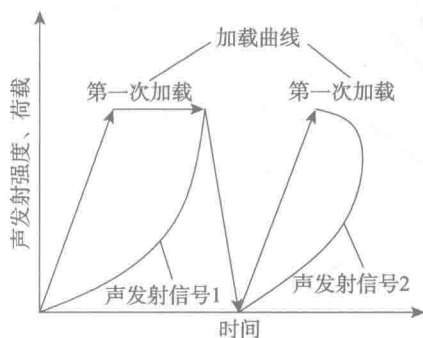


图 1-2-1 Kaiser 效应

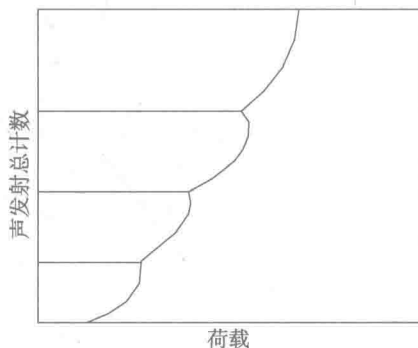


图 1-2-2 Felicity 效应

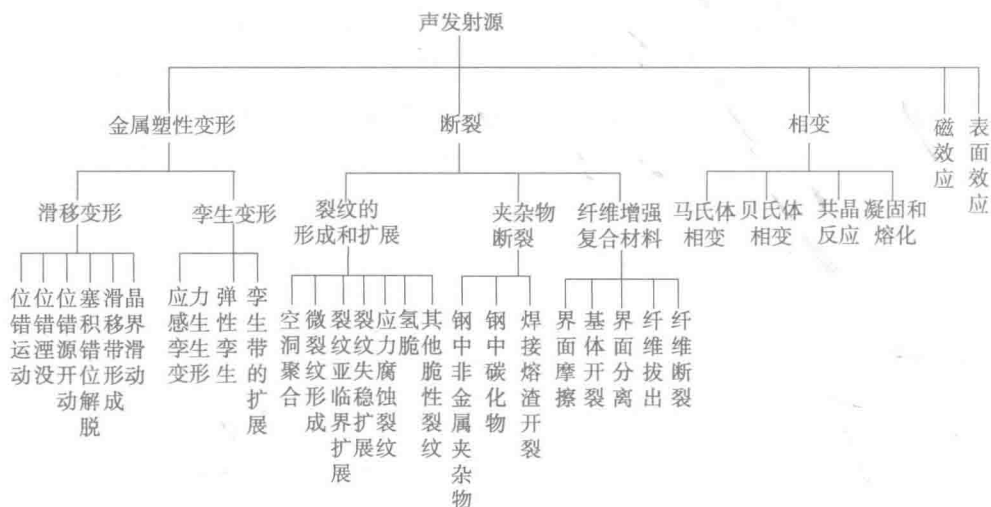
（3）波型效应。声发射源处释放的应力波往往为宽频带尖脉冲，不是单一频率，而是由不同频率（则不同的波速）的波组成的一组波（即波群或波包），在这组波被传感器接收前，由于传输介质的耦合作用，其传播中的畸变非常复杂。由于介质的传播特性和传播介质的几何形状，必定使信号波形不断地反射、折射和发生波型转换。波型效应（频散特性）使波包的宽度变宽（从而不同波包之间相互叠加），波峰幅值下降，这必然造成传感器接收到的信号与源信号相差甚远，甚至面目全非。

1.2.2 声发射产生的条件

假设物体中所有的点在同一时间发生运动变化，当这个物体作为一个整体而运动时，这个过程就不会产生波，当只有振动作用局部时，物体各部分有速度变化，才会出现波的过程。因此，声发射是材料受外力或内力作用产生变形或断裂时，应力-应变以弹性波的形式向外释放的一种现象。图 1-2-3 表示了工程材料中声发射源形成的机理过程^[7]，从图中可以看出能够导致声发射源形成的因素有很多，涉及的范围也非常广泛，且各种声发射源交织作用，这就为研究声发射源的形成机理带来了很大的困难。一般情况下，对于金属材料而言，它的声发射源涉及很多，如裂纹扩展、移位、滑移、孪晶、晶界滑动和断裂脱附，而合成材料的声发射源分为模型裂纹、纤维剥离和断裂等。

1. 缺陷运动和塑性变形

固体物理指出^[8]，金属材料中的每个晶粒相当于一个晶体且各向异性，实际上，



在不同的材料或不同外界条件下的同一材料中可以产生不同性质的声发射源。对于塑性材料而言,当受到外力作用时,由于其中第二相硬质点与基体材料变形不一致,往往在两者的界面上形成微孔,当外力增大时,微孔得以长大,相邻微孔连接在一起形成初萌裂纹,在裂纹尖端由于应力集中而形成塑性区域,在外力作用下,

塑性区域产生微观裂纹,使得其进一步发展成为宏观裂纹,所以由塑性变形引发的声发射频率高且密集,形成连续声发射信号;相比之下,脆性材料则不产生明显的塑性变形,一般认为,位错塞积是脆性材料形成微裂纹的基本机理,裂纹尖端的塑性区较小,裂纹扩展较为迅速,使得其声发射频率低,而每次发射的强度大,易形成突发型声发射信号。

1.2.3 声发射信号的特征参数

声发射监测会得到大量的特征参数,这里介绍声发射信号中常用的几个特征参数。特征参数可用于不同损伤源的识别与分析,重要的声发射信号特征参数包括幅值、能量、计数、撞击、持续时间、上升时间和信号强度等。典型的声发射信号特征如图 1-2-4 所示。

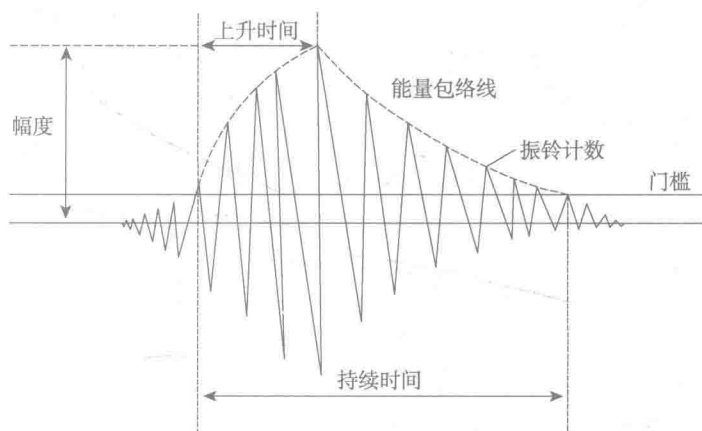


图 1-2-4 典型的声发射信号特征示意图

图 1-2-4 给出了典型声发射信号的电压-时间曲线。时域信号参数可以用来描述声发射的波源机制,确定裂纹扩展及其严重程度等。声发射信号特征的复杂性,有利于组合这些参数来建立声发射信号与波源机制之间的关系。一些通常用于信号分析的参数描述如下^[5,9]。

(1) 撞击 (hit)。超过阈值的一个独立通道获取数据的任何信号称为一个撞击。它反映了声发射活动的总量和频度,常用于声发射活动性评价。

(2) 事件 (event)。当材料发射应力波时,同一个撞击可能被多个传感器探测到,并可以进行定位,也就是说一个事件可能会引起多个撞击。

(3) 电压阈值 (voltage threshold),即电压门限值,当电压幅值大于这个阈值时,信号将被识别并记录下来。电压阈值是可以调节的,通常有固定或自动浮动的电压阈值。电压阈值经常用来选择性地拒绝低幅值声发射信号,这些信号可能不

会提供有用的信息,因为这些信号与环境 and 电磁等背景噪声相关。背景噪声可以通过声发射数据采集时拒绝那些电压幅值低于设定阈值电压的信号而被有效地过滤掉,故电压阈值通常取稍高于正常背景噪声的电压水平。

(4) 信号幅值 (signal amplitude), 简称幅值, 是从一个声发射事件的信号波形中得到的最大峰值电压, 大小是峰值电压的绝对值。幅值是信号能量大小的重要度量指标之一, 通常以分贝 (decibel, dB) 为单位。分贝是相对量度, 电压可以利用如下方程转换成分贝:

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{V}{V_{\text{ref}}} \right) \quad (1-2-1)$$

式中, A 为幅值 (dB), V 为峰值偏移电压, V_{ref} 为参考电压。

声发射信号的峰值振幅可以指示波源的强度。由于传感器的响应可能受到多种因素的影响, 单个传感器的峰值振幅可能不会提供关于波源有意义的信息, 而当通过统计方法评估幅值相关的数据时, 可能会得到有用的信息。幅值分布的分析也在一定程度上增加了声发射信号数据的可靠程度。

(5) 持续时间 (duration)。声发射信号从开始到结束的时间, 就是信号第一次越过门槛至最终降至门槛所经历的时间间隔。信号的持续时间受到了所选用阈值电压高低的影响。在实验中, 其他的参数也可能影响信号的持续时间, 不同的声发射波源可能会使信号的持续时间不同。机械噪声源通常有较长的持续信号, 而电子脉冲信号的持续时间通常小于 $10 \mu\text{s}$ 。持续时间和幅值的关系是声发射信号波形的主要特征。

(6) 上升时间 (rise time)。声发射信号从开始到信号达到峰值的时间。上升时间提供与持续时间类似的应力波特征信息。

(7) 能量 (energy)。声发射信号波形包络线下的面积, 反映信号的强度。能量参数经常作为材料或结构声发射测试的评价标准。

(8) 计数 (count)。声发射信号超过门槛值的振荡次数, 一般用于声发射活动性评价。计数可以看成超过阈值的参数输出脉冲。一个信号撞击可能只产生很少的计数, 也可能有大量的计数, 这取决于信号的大小和形状, 这也是最简单的声发射测量方法与程序。在声发射研究的早些年里, 计数是描述和报告声发射数量的常用方法。20 世纪 80 年代, 总能量被反映声发射活跃性的计数替代。目前, 计数常与幅值和持续时间一起给出关于信号形状有价值的信息。

(9) 频率 (frequency)。在波动下每秒的振荡周期数。声发射信号波形通常含有几个频率组分。

(10) Kaiser 效应^[1]。Kaiser 效应是德国学者 Kaiser 研究金属声发射特性时发现的。当材料重新加载时, 应力值未达到上次加载最大应力前没有声发射信号产生。

大多数金属材料和岩石中,可观察到明显的 Kaiser 效应。Kaiser 效应可用来推测材料或结构曾受到的最大应力,以及用来监测疲劳裂纹的开裂与扩展。

(11) Felicity 效应^[2]。Felicity 效应是在已经加载的条件下,应力水平未达到上次加载最大值前,就已探测到声发射信号。Felicity 效应是 Kaiser 效应更详细的描述。Felicity 比可以用于指示损伤,较小的 Felicity 比值表明较大的损伤增长水平。

Felicity 比一般定义为

Felicity 比=重复加载时的声发射起始荷载/历史加载最大荷载 (1-2-2)

Felicity 比作为声发射监测手段的定量参数,能够较好地反映材料所受损伤或结构缺陷的程度,是缺陷评定的重要判据。

1.3 土木工程结构损伤常见的声发射技术分析

1.3.1 声发射特征参数分析方法

早期由于声发射检测仪比较简单,只能采集到计数、能量幅度等有限参数,因而以前特征参数的应用多为单参数分析方法,如计数分析法、能量分析法和幅度分析法等。但如今,由于声发射系统的改进,多通道声发射采集系统的强大应用,参数分析方法还包括:声发射信号参数的列表显示和分析,经历图分析方法、分布分析方法和关联分析方法等^[10]。

1. 声发射信号参数的列表显示和分析

声发射信号参数的列表显示和分析是指将每个特征参数按照时间序列排列和显示的分析方法,包括信号的到达时间、各声发射特征参数、声发射源坐标和外变量等。

2. 经历图分析方法

声发射参数经历图,是通过对声发射信号参数随时间或外变量变化的情况进行分析,从而得到声发射源的活动情况和发展趋势,这是最为广泛的声发射活动性显示方式。通过对参数经历图进行分析,可以得到声发射源的活动情况和发展趋势,常见的有计数、能量、幅度、持续时间、上升时间随时间或外变量变化的经历图和累计经历图等。

3. 分布分析方法

分布分析方法,是将声发射信号撞击计数或事件计数按信号参数值进行统计分布分析的一种方法。纵轴代表撞击或者事件计数,而横轴可选择声发射信号的任一参数。横轴选用的某一个参数即该参数的分布图,如持续时间分布、能量分布、上升时间分布,其中幅度分布应用最为广泛。

4. 关联分析方法

通过将任意两个特征参数联系起来做关联图分析的方法即为关联分析方法。关联图的两坐标轴分别表示一个参数,图中每个点对应于一个声发射信号撞击或者事件。通过不同特征参量之间的关联图,可以分析不同声发射源的特征,从而达到鉴别声发射源的目的。例如,某些电子噪声干扰信号通常幅度很高,但能量却很小,通过幅度-能量关联图就可将该噪声区别开来;对于压力容器来说,泄漏信号往往持续时间较长,通过持续时间-能量或持续时间-幅度关联图分析,很容易发现容器的泄漏信号。

作为 20 世纪 50 年代最经典的声发射信号分析方法,由于声发射特征参数分析法对声发射系统的要求较低,分析方式简单、直观,分析速度快,实时性好,而且便于检测人员掌握和操作,所以是工程检测中常使用的方法。声发射简化波形特征参数分析法,虽然还有一些地方不完善,但目前几乎在所有的监测和研究中仍被广泛使用,且几乎所有声发射检测标准对声发射源的判据均采用参数分析法^[11-13]。同时,声发射信号参数,从原来只有一些简单参数开始,到由于研究的需要,越来越多的参数被重新定义和使用,这也给参数分析法带来了新的活力。因而目前所有的声发射信号特征分析当中参数分析都是不可缺少的一个环节。

1.3.2 声发射信号的波形分析方法

早期的声发射监测多使用谐振式、高灵敏型传感器,如 R15 型谐振传感器(频率范围 50~300kHz, 150kHz 灵敏度最大)。这种传感器类似于一个窄带滤波器,从而使得声发射源的本质信息被传感器自身的特点所掩盖或模糊掉,所获得的信号大多为一衰减的正弦波,通过这类波形所获得的参数与外变量(如速度、位移、加速度、疲劳周次等)缺乏必然联系,这是参数分析方法的最大缺陷。基于声发射参数分析的不足,人们很早就认识到波形在识别处理声发射技术中的应用。

由于声发射技术的一个最本质目标就是根据声发射信号来获得有关声发射源或结构损伤的信息,而波形中含有声发射源信号的一切信息,因而理论上波形分析法是最精确的。波形分析法是指通过对所记录的波形信号处理来得到有关声发射源或材料损伤的信息。因此,早在声发射技术的发展初期,人们就意识到波形分析在识别处理声发射故障源及评价材料性能中的重要作用,并对此进行了大量研究,也取得过某些成功^[14]。

1. 模态声发射

作为信号波形分析中非常熟悉的一种方法,模态声发射由于特殊的使用场合和可以有效地识别噪声与声发射有用信号的特点而被人们广泛接受。1991 年,板波声发射(plate wave acoustic emission, PWAE)论文发表(美国学者 Gorman)后,人