

岩石声发射

基础理论及试验研究

张 茹 艾 婷 高明忠 张国强 周 成 著

YANSHISHENG
FASHE

JICHU LILUN JI SHIYAN YANJIU



四川大学出版社

YANSHISHENG
FASHE
JICHU LILUN JI SHIYAN YANJIU

岩石声发射

基础理论及试验研究

张 茹 艾 婷 高明忠 张 国 成 著



四川大学出版社

特约编辑:胡晓燕
责任编辑:蒋姗姗
责任校对:周 艳
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

岩石声发射基础理论及试验研究 / 张茹等著. —成都: 四川大学出版社, 2017. 3
ISBN 978-7-5690-0424-3

I. ①岩… II. ①张… III. ①声发射技术—定位—应用—岩石力学—研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 056390 号

书名 岩石声发射基础理论及试验研究

著 者 张 茹 艾 婷 高明忠 张国强 周 成
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5690-0424-3
印 刷 虎彩印艺股份有限公司
成品尺寸 170 mm×240 mm
印 张 16.5
字 数 319 千字
版 次 2017 年 5 月第 1 版
印 次 2018 年 8 月第 2 次印刷
定 价 65.00 元



- ◆ 读者邮购本书,请与本社发行科联系。
电话:(028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码:610065
- ◆ 本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。
- ◆ 网址:<http://www.scupress.net>

版权所有◆侵权必究

前 言

广义而言，声发射（acoustic emission, AE）是指材料局部因能量的快速释放而发出瞬态弹性波的现象，是材料内部由于不均匀的应力分布所导致的由不稳定的高能态向稳定的低能态过渡时产生的应力松弛过程，有时也称应力波发射。AE波可看作是机械波的一种，它的产生必须具备两个条件：一是要有产生振动的物体，即波源；二是有能够传播振动波的介质。除此之外，它的传播、接收、辐射等一系列过程遵循声波的规律。固体介质局部变形时，不仅产生体积变形，而且产生剪切变形，因此将激起两种波，即纵波（压缩波）和横波（剪切波），产生这种波的部位称为AE源。纵波、横波以不同的速度在介质中传播，遇到不同介质的界面时产生反射和折射，在固体自由表面还会出现沿表面传播的表面波（瑞利波）。纵波和横波通过材料介质自身向周围传播，一部分通过介质直接传播到安装在固体表面的传感器，形成AE信号，还有一部分传到固体表面后产生折射，其中的一部分形成折射波返回材料内部，另一部分则形成表面波沿着介质表面传播，通过传感器形成AE信号。所以传入传感器的信号是多种波相互干涉后形成的混合信号，与地震情况相同，首先到达的是纵波，其次是横波，最后到达的是表面波。因此AE信号包含了波源特征、材料特性和检测设备特点的综合信息。

AE是一种常见的物理现象，各种材料的AE频率范围很宽，从次声频、声频到超声频，可包括数赫兹到数兆赫兹。若释放的应变能足够大，可产生听得见的声音，如在耳边弯曲锡片可听见噼啪声。但大多数材料的AE信号强度很弱，需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来。AE技术就是借助灵敏的电子仪器检测材料微弱的AE信号，并利用AE信号推断AE源和材料内部的变化。AE检测系统一般是由传感器（或换能器）、前置放大器、滤波器、主放大器、计算机系统等部门组成，总体而言分为信号接收、信号处理和信号显示三大部分。

AE技术最早应用于地震学方面，而现代AE开创性工作是由德国科学家Kaiser在1950—1953年开始进行的。Kaiser发现了材料形变时AE的不可逆

现象,即“Kaiser效应”,目前广泛应用于岩石地应力测量领域。20世纪50年代后期,AE研究的重点由德国转移至美国,并在60年代出现研究高潮。美国的Schofield、Tatro、Dunegan、Pollock等在AE基础理论和技术应用方面做了大量工作。60年代后期出现了商品AE仪器。70年代AE技术研究在日本掀起热潮,欧洲许多国家也开展了相应的研究工作。我国AE技术的研究工作开始于1973年,至今已有大量关于AE技术的论文发表,其中不乏高水平学术论文,尤其是近年来AE理论与试验研究得到了我国学术界的高度重视。与此同时,AE仪器也经历了由简易到复杂、由模拟到数字的发展阶段。在现代AE技术中,随着数学、计算机等学科与AE领域的交叉发展,AE信号处理也开始多样化和方便化,AE已经被广泛地解释并在金属、岩石、混凝土等众多领域得到研究和应用。

但AE仍是少数几个理论研究落后于实践的工程学科之一,在AE机理、理论研究、试验标准制定等方面均不够系统和完善。虽然近年来关于AE的文献大量发表,但是相关的专著、书籍却较为少见,专门针对岩石AE理论和试验研究的专著或书籍更是少之又少。本书作者多年致力于岩石AE试验、AE在岩土工程中的应用及AE机理的研究工作,这本书可以说是对作者多年在该领域工作成果积累的一个系统的整理和收集。与以往的AE专著相比,本书具有以下特点:第一,内容新颖,代表性强。书中主体内容是依据近几年的工作和研究成果整理而成,很多地方都可以体现一个“新”字。本书重点讲述AE定位技术在实验岩石力学中的应用。虽然AE定位方法已在众多著作文献中出现,但像本书这样系统地、大量地给出岩石AE三维定位试验实例的是首次;书中所进行的AE试验不仅包括常见的单轴、拉伸实验,而且以往较少见的岩石三轴、三轴卸荷实验在本书中同样涉及,代表了最新的AE研究成果;本书中引入分形非线性理论,联合分析岩石破裂过程中AE时间和空间演化分形特征,这在以往的成果中也是较为少见的。第二,系统性强,信息量大。本书中岩石AE试验都是基于其研究目的进行系统开展的,所以层次清晰,目的性强。以研究AE影响因素一章为例,AE影响机理复杂,对每一种可能影响AE的因素,作者都单独进行了试验。同时,本书不仅进行了大量的AE试验,还引入了损伤、分形非线性理论,将理论与试验相结合,涵盖的信息量较大。

从内容体系上来说,本书共分为7章。第1章为绪论部分,通过综合大量书籍、文献研究内容,对AE的含义及该技术的发展和进行了系统性概括,同时重点整理了近年来岩石AE试验与理论的研究现状与成果;第2章从AE波、AE信号、AE源、AE测试系统四个方面介绍了AE的基础理论知

识；第3章通过大量AE定位试验，分别研究了岩石在单轴多级加载、单轴压缩、直接拉伸、巴西劈裂、三轴压缩、三轴卸荷试验条件下的微细观破裂过程及AE时空演化特征和AE破坏前兆；第4章开展系统试验，探讨了加载速率、加载方式、围压、温度、岩性、层理各类影响因素对岩石AE试验的影响及机制；第5章建立基于AE的损伤模型，并给出具体试验实例对其进行合理性验证，研究了岩石损伤演化与变形破坏过程；第6章引入非线性分形理论，研究了岩石试验过程中AE时空演化的分形特征；第7章围绕AE对岩石破坏的预警作用展开，讨论了AE前兆特征，介绍了基于AE的时空参数、基于AE的神经网络、基于AE的突变理论等多种预测岩石破坏的方法，并结合工程实例，对岩爆动力灾害的预测进行初步应用。

本书是作者在AE基础理论及试验研究方面的阶段性研究成果，随着AE技术的发展，新理论、新技术、新方法不断出现，需要开展更多样、更深入的研究工作。由于作者精力有限，有一些内容只是一笔带过，没有进行深入研究，希望能在今后的研究工作中逐渐扩充完善。另外，书中难免存在一些错误和不当之处，恳请读者批评指正。

作者
2016年12月

目 录

1 绪 论	(001)
1.1 声发射的含义	(001)
1.2 声发射技术的发展和应 用	(002)
1.3 岩石声发射试验和理论 研究现状	(007)
2 声发射理论的基础知识	(024)
2.1 声发射波	(024)
2.2 声发射信号	(031)
2.3 声发射源	(037)
2.4 声发射检测系统	(043)
3 岩石损伤演化与变形破坏全 过程的声发射试验研究	(052)
3.1 单轴多级加载声发射试 验的声发射特性	(053)
3.2 单轴压缩全过程声发射 定位试验	(057)
3.3 直接拉伸全过程声发射 定位试验	(069)
3.4 巴西劈裂试验全过程声 发射定位试验	(080)
3.5 三轴压缩全过程声发射 定位试验	(097)
3.6 三轴卸荷全过程声发射 定位试验	(118)
4 基于不同损伤模式的岩石声 发射特征研究	(132)
4.1 加载速率对岩石声发射 的影响	(132)
4.2 加载方式对岩石声发射 的影响	(143)
4.3 围压对岩石声发射的影 响	(152)
4.4 温度对岩石声发射影响	(163)
4.5 岩性对岩石声发射的影 响	(176)
4.6 层理对岩石声发射的影 响	(181)

- 5 基于声发射的岩石损伤演化规律初探 (194)
 - 5.1 岩石变形破坏过程中的损伤演化规律 (194)
 - 5.2 岩石声发射损伤模型及验证 (202)
- 6 岩石声发射时空演化的分形特征研究 (213)
 - 6.1 声发射时间序列和空间定位分维数的计算原理和方法 (213)
 - 6.2 岩石声发射时空演化的分形特征及机理 (218)
- 7 基于声发射的岩爆预测 (240)
 - 7.1 基于声发射时空演化的岩石破坏前兆特征 (241)
 - 7.2 基于声发射分形和突变理论的岩爆预测研究 (243)
 - 7.3 工程应用举例 (247)

1 绪 论

1.1 声发射的含义

声发射 (acoustic emission, AE), 其字面意思是声音放出, 一般是指材料受到外力或内力后发生断裂或变形时释放出弹性应变能的现象, 有时也被称为应力波发射。微震 (micro-seismicity, MS) 是 AE 发展早期出现的专业术语, 广义而言, 可认为它是 AE 现象的一种。MS 和 AE 这两种手段在监测技术和分析理论方面基本是一致的, 所以国内外文献中常将二者并举 (AE/MS), 而不刻意区分这两个名词。

如果 AE 释放的应变能足够大, 可产生人耳听得见的声音。早在公元前 3700 年, 人们开始冶炼铜和锡, 锡弯曲时发生“锡鸣”, 是人们首次在金属材料中听到的 AE, 这也是进行 AE 研究时被举得最多的一个例子。同时, AE 是一种常见的自然现象, 几乎每天都在大自然及人们的生活中发生。岩石的破碎声, 铅笔芯折断的声音, 树枝折断的声音, 骨头断裂的声音, 玻璃打碎的声音, 等等, 都是生活中人耳能听到的 AE。地震也是典型的 AE 现象, 它是由于地球内岩石破坏造成“声音”的放出, 声音波动频率为数赫兹到几十赫兹。随着 AE 在新的研究和应用领域的扩展, 其研究频率和尺度不断发生变化, 而含义则更加广义化。

但是, AE 并非单纯是一种发声现象。Liptai 等给出了更为严格的定义^[1], “Acoustic emission maybe defined as the stress or pressure waves generated during dynamic processes in materials”。材料的塑性变形、材料中裂纹的发生与扩展、材料的断裂、金属的马氏体相变等都是这里所说的“dynamic processes”, 概括起来, AE 现象具有以下两个特征: ①AE 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; ②AE 信号具有较宽的频率范围, 而其声级却较低。

早期的 AE 理论落后于实际应用, 随着近年来 AE 理论的发展, 以及 AE

实验室研究成果的不断增多，现在的 AE 带域实际上已达到了兆赫兹级别的超声波领域。前面说 MS 是广义 AE 的一种，它与现在的 AE 本质区别在于研究频率和尺度的不同。现在的 AE 侧重于高频，而 MS 侧重于低频。AE 对应的频率范围如图 1-1 所示。在 AE 试验研究中，可以根据不同的研究对象选择合适频率范围的传感器，从而达到最佳的测试效果。

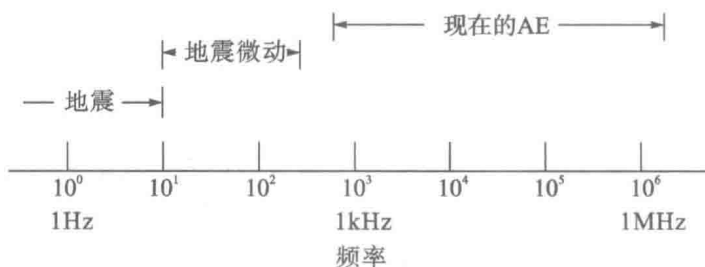


图 1-1 AE 现象与频率带^[2]

1.2 声发射技术的发展和应

1.2.1 AE 技术的起源和发展

大多数情况下，材料断裂变形释放出的应变能较小，声音极其微弱，不能直接被人耳听到，只能通过灵敏的仪器去检测从而得到它的信息。用仪器探测、记录、分析 AE 信号和利用 AE 信号推断 AE 源的技术称为 AE 技术，人们将 AE 仪器形象地称为材料的听诊器。

中国后汉时期（公元 132 年）张衡发明了世界上最早的预测 AE（地震）的地动仪。1932 年，美国科罗拉多矿业学院的 Hailand^[3]考虑了用反射镜的振动来转换声音的振动的地声探测器，属于光学地音测量方法。而之前的地声探测器是采用耳朵来听铅、云母、镍的薄膜振动的方式。1936 年，Forster 用测量仪器测量了马氏体相变中的 AE。美国矿山局的 Obert 用测量仪器测量了岩体的 AE。从那时起，便真正开始了有意识地测量伴随破坏的弹性波，但还不叫 AE，而是被称为具有各专业特征的术语，如应力波发生、微震活动等^[3]。

20 世纪 50 年代初，缪汉工科大学的 Kaiser 在德国所做的 AE 研究工作标志着现代 AE 技术的开始。他观察到铜、锌、铝、铅、锡、黄铜、铸铁和钢等金属和合金在形变过程中都有 AE 现象。他最有意义的发现是材料形变 AE 的不可逆效应——Kaiser 效应，即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 AE 信号。同时，他提出了连续型和突发型 AE 信号的概

念。Kaiser 的一系列研究工作不仅在金属领域，而且在岩石、混凝土领域都有极大影响。继 Kaiser 之后，Dunegan 将 AE 试验频率由原来的不超过 60 Hz 扩展到几百千赫兹到兆赫兹的范围，使 AE 技术付诸实际应用。1964 年，美国对北极星导弹舱成功地进行了 AE 检测，这是 AE 在工程结构上成功应用的第一个实例。同年，美国研制成功了实用的 AE 监测系统并用于纤维增强塑料 (FRP) 制造的固体燃料火箭发动机壳体的水压试验，显示了 AE 技术作为断裂力学研究手段和结构健全性评估工具的生命力，也引起了材料科学研究者和工程界的广泛兴趣。1965 年，Dunegan 等研制并首次推出 AE 商业仪器。70 年代，AE 技术的研究和应用领域在日本也得到了高速的发展，尤其在 AE 仪器制造技术方面。欧洲各国，如英国、德国、苏联、波兰等，对 AE 技术也逐渐予以重视。

我国 AE 领域的研究始于 20 世纪 70 年代初，开始研究的技术领域是核工业部门。1978 年，我国成立了中国无损检测学会，下设 AE 专业委员会。由此，一批科研单位、高等院校在 AE 领域就不同课题（如断裂力学试验，金属材料、非金属材料及复合材料性能，压力容器完整性评价，磁声发舱地震波，金属切削过程监测及泄漏检测等）进行了试验研究，并取得了一定成果。此外，我国也自行研发了各类 AE 仪器，可以作为专用 AE 检测系统研究的平台。

AE 仪器的发展与 AE 技术的发展息息相关。AE 技术发展的一大关键是 AE 信号处理技术，AE 信号处理技术的发展也在 AE 仪器发展中得到了体现。从 1965 年首次推出 AE 商业仪器至今的 50 年中，从 AE 信号处理技术方面而言，AE 仪器的更新变化可以概括为 3 个阶段。

(1) 第一阶段：1965—1983 年

这一阶段主要是参数式 AE 仪器的发展。这其中包括 AE 传感器、前置放大器、模拟滤波技术以及参数提取的硬件技术等完善与发展。这些仪器在进行 AE 参数提取时，是通过模拟电路输出模拟参量，然后通过后续电路的高速模/数转换器(A/D)或计数器转换成为数字参量来实现的。这种 AE 仪的特点是采集数据的信息比较直观，能给后续的数据处理提供便利。但是，由于系统完全采用模拟电路来获取 AE 信号特征参数，采集系统的抗干扰能力不强，可靠性差，集成度低。而且，由于各个通道的信号采集、传递、计算、存储和显示都要增加中央处理单元的时间，所以这类仪器不但速度慢而且系统极易出现闭锁状态。这种早期的 AE 仪现在已逐步被淘汰。

(2) 第二阶段：1983—1994 年

该阶段以美国物理声学公司 (PAC) 于 1983 年开发的国际上第一套参数

型 AE 系统 SPARTAN-AT 为代表。该系统采用专用模块组合式，第一次引入了计算机技术，把采集功能、存储及计算功能相分离，并且利用 IEEE488 标准总线和并行处理技术解决实时采集和数据处理。这类仪器实际上为每两个通道形成一个单元，配有专用微处理器，形成独立通道控制单元（ICC），完成实时数据采集的任务，而数据处理的任务则比较合理地分配给一些并行的计算单元，仪器的实时性得到增强。该类仪器是模拟和数字电路结合的模式，使得 AE 仪的可靠性大大提高，由此也推动了 AE 应用技术的发展，使得 AE 在许多领域，如压力容器、油罐、管道、复合材料、航空、航天、建筑、桥梁等的应用也由起步阶段发展到了完善阶段。随后，许多国家颁布了 AE 在特定检测领域的国家标准。

（3）第三个阶段：1994 年至今

在这个阶段，全数字式 AE 仪器产生并得到广泛应用。数字化仪器是在高速 A/D 转换及有关集成电路（IC）芯片性能大幅度提高，同时价格又大幅度下降的背景下形成的。全数字化 AE 仪器的问世标志着 AE 仪器的研制进入一个全新的阶段，它在系统结构和软件配置上保留了前面产品的优点，但放大后的 AE 信号不必再经过一系列的模拟和数字电路形成数字特征量，而是直接进行高速 A/D 转换，提取相应特征量。这样做的好处是数字信号有良好的抗干扰特性，信息能够准确地发送、传递而无畸变，没有模拟器件因存在噪声或饱和带来的失真以及因器件离散等因素产生的数据不一致，从而使仪器的可靠性得到更好的保证。数字技术的运用使这类仪器有很高的信噪比、良好的抗干扰性、宽的动态范围。另外，由数字化的 AE 信号中提取特征量比模拟方法容易实现，如采用模拟方法很难在严格的意义上给出 AE 信号的能量和有效值，而在数字信号的基础上却容易实现。数字化后的信号保留了更多的 AE 信息，也为信号分析和特征量提取提供了更大的开发潜力。尤其进入 21 世纪以来，全波形全数字化多通道 AE 检测系统开始面世并迅猛发展，为国内外科研人员开展 AE 试验研究提供了良好的条件。

概括而言，现代 AE 仪器相对传统 AE 仪器具有以下优势和特点：①全数字、全波形；②高速采集和传输；③良好的可扩展性；④应用方便。从硬件上说方便用户使用，其发展主要体现在四个方面：第一，系统的集成度高，紧凑轻便，现场搬运摆放容易；第二，能自动对安装的各个通道在任意需要的时刻进行标定；第三，采用无线通信技术，减少传输电缆的安装和运输；第四，抗干扰能力强，能适应现场复杂的检测环境。

1.2.2 AE 技术的应用

在工程应用方面,国外早期主要将 AE 技术用于金属矿山、煤矿及隧道工程的安全性问题,后来随着技术的完善和发展,应用研究扩大到边坡稳定和岩爆监测与预报、岩石破裂机理研究、地震序列研究、地应力测试等方面,且对于深埋地下工程如高放废物地质处置等的围岩变形损伤及破坏特征的监测也具有广泛的应用前景。AE 技术的应用从原本的采矿工业扩大到石油、化工、航天、水利、地质、地震、土建、国防、机械等工业和部门。具体而言,AE 技术主要应用于以下几个方面。

(1) 压力容器的 AE 检测与评价

压力容器的 AE 检测与评价主要是针对容器中的活性缺陷的检测。具体方法是在水压试验或其他加载试验过程中,利用少量固定不动的 AE 传感器,获得活性缺陷的动态信息,并可通过时差定位、区域定位及次序冲击等方法来确定活性缺陷的位置。美国 MANSANTO 公司应用 AE 技术成功地检测了数千台大型金属和复合材料压力容器,该项技术在中国、日本、意大利、澳大利亚等国家也得到了广泛研究和应用。

(2) 转动设备的故障诊断

故障诊断 AE 技术主要应用于滚动轴承和滑动轴承的故障诊断。在机械零件所用材料的评价方面,主要用于滚动轴承和滑动轴承所用材料的评价。其中,AE 定位在探明 AE 与轴承滚动疲劳的相关关系上有特别意义,用 AE 测量方法可获得关于疲劳裂纹的发生、扩展的有关信息。

(3) 泄漏检测

泄漏检测是 AE 技术应用的一个重要方面,包括检测各类压力管道、常压储罐罐底、各种阀门和埋地管道的损伤及泄漏。

(4) 复合材料的 AE 特性研究

AE 已成为研究复合材料断裂机理的一种重要手段。目前,采用 AE 技术已能检测每根碳纤维或玻璃纤维丝束的断裂及丝束断裂载荷的分布,从而评价碳纤维或玻璃纤维丝束的质量。AE 技术还可区分复合材料层板不同阶段的断裂特性,如基体开裂、纤维与树脂界面开裂、裂纹层间扩展和纤维丝断裂等。

(5) 在航空航天工业中的应用

早在 20 世纪 80 年代初,有关单位就进行了飞机机翼疲劳试验过程中的 AE 监测研究,在信号处理和识别技术方面积累了宝贵的经验。北京航空工程技术研究中心在飞机的全尺寸疲劳试验(飞行长达 16 h)过程中,用 AE 技术对主梁螺孔和隔框连接螺栓等部位疲劳裂纹的形成和扩展进行了跟踪监测,历

时之长和积累数据之丰富都是前所未有的。他们利用 AE 参数组成多维空间的特征矢量,成功地进行了疲劳裂纹产生的 AE 信号识别。除多参数识别外,他们还利用趋势分析和相关技术进行了信号处理,建立了一套较为完整的信号识别和处理体系。

(6) 生物医学领域

医学检测技术中的耳 AE 信号的发现及骨关节 AE 现象的研究表明,AE 技术在生物医学领域中的应用已经有所发展。以生物为对象的检测技术,不仅是为医学生物学的研究及临床诊断治疗的需要而研究开发的一门技术,同时也作为检测技术的一个课题而受到关注。

(7) 岩土领域

AE 技术在岩土领域的应用主要包括岩石材料 AE 特性研究和岩土工程实际应用两个方面。岩石作为非金属材料的代表,在其 AE 特性理论和试验研究方面已有大量成果发表,1.3 节将对其进行详细阐述。

目前,AE 技术在岩土工程中应用较广泛的是利用 Kaiser 效应测量地应力、进行矿山采场安全等级划分和岩体稳定性监测等。

①利用 Kaiser 效应测量地应力。测量地应力的方法主要有应力解除法、水压致裂法、扁千斤顶法等,但这些方法工艺复杂,测量结果具有不确定性。利用 Kaiser 效应测量地应力,可简便地获得大量实测数据,提高数据的可靠度和准确性,相比其他方法更加经济有效。

②矿山采场安全等级划分。AE 参数体现了岩体从稳定到破坏发展的不同阶段,因此建立矿山微震监测系统跟踪 AE 动态变化过程,根据 AE 参数将采场岩体稳定情况动态划分为不同的安全等级,可为安全生产提供预报信息。

③岩体稳定性监测。岩体在破坏之前,必然持续一段时间以 AE 形式释放积蓄的能量,这种能量释放的强度,随着结构临近失稳而变化,每一个 AE 与 MS 都包含着岩体内部状态变化的丰富信息,对接收到的信号进行处理、分析,可作为评价岩体稳定性的依据。因此,可以利用岩体 AE 与 MS 的这一特点,对岩体稳定性进行监测,判定边坡的失稳状态及其位置,从而预报岩体塌方、冒顶、片帮、滑坡和岩爆等地压现象。

早在 20 世纪 40 年代初,美国就将 AE 技术监测系统用于岩爆预测。自 60 年代以来,苏联、波兰、法国、日本、美国、英国、加拿大、澳大利亚等国在研究和应用以 AE 预测技术为基础的矿山动力灾害监测方法和装备方面做了大量工作,分别开发出了 BA-6 型、SAK 型矿用 AE 监测系统、RBM 系统、AMMS 系统等,在监测煤岩体破坏方面取得了较好的效果。苏联在这方面的研究进行得较早也较多,获得了大量监测数据,积累了丰富的实践经验,还把

AE 监测作为工作面日常冲击危险性预测的方法正式列入了有关安全规程^[4]。此外, AE 技术目前也已在多个边坡工程的稳定性监测和地下工程岩爆监测与预报中得到应用。

(8) 其他材料 AE 特性研究、AE 结构检测及完整性评价

除了以上提到的复合材料、岩石材料, 其他材料如金属材料、混凝土材料等, 其 AE 特性研究方面的成果也都有涉及, 此处不再一一列举。此外, AE 技术作为一种成熟的无损检测方法还应用于: 石油化工行业中压力管道和海洋石油平台的检测和结构完整性评价, 电力行业中汽轮机叶片检测、汽轮机轴承运行状况监测、变压器局部放电检测, 民用工程如楼房、桥梁、起重机、隧道和大坝检测, 水泥结构裂纹开裂和扩展的连续监测, 金属加工中工具磨损和断裂的探测、打磨轮或整形装置与工件接触的探测、修理整形的验证、金属加工过程质量控制、焊接过程监测、振动探测、锻压测试以及加工过程的碰撞探测和预防, 交通运输业中长管拖车、公路和铁路槽车及船舶的检测和缺陷定位、铁路材料和结构的裂纹探测、桥梁和隧道的结构完整性检测、卡车和火车滚珠轴承和轴颈轴承的状态监测以及火车车轮和轴承的断裂探测。

1.3 岩石声发射试验和理论研究现状

1958 年, 日本的佐佐木、山门参考了美国矿山局 Obert 的结果, 开始了岩石中破坏应力的研究^[2], 这是日本岩石 AE 研究的开始。70 年代我国引入 AE 技术后, 陈颀^[5]等学者开始了国内室内岩石 AE 试验的研究。他于 1987 年研究了不同应力途径三轴压缩下岩石的 AE 特征, 得出岩石的 AE 行为不仅与岩石应力状态有关, 还与应力状态的变化有关。90 年代, 人们逐渐意识到岩石破裂过程的 AE 特征还与岩石材料性质、加载条件等密切相关。近年来, 许多科学家和工程技术人员致力于岩石 AE 技术的研究工作。与基础理论、试验研究不同的是, 虽然 AE 在岩土、矿山、边坡工程中的应用已有了几十年的历史, 但仍存在着理论远落后于实际的局面。岩石材料本身结构和破坏过程的复杂性, 使得大多应用基于经验判断, 其准确性有待提高和商榷。所以需要大量、系统的岩石 AE 试验研究, 揭示岩石受力破坏全过程的 AE 参数与岩石破裂之间的关系, 进一步认识岩石的破坏机理, 提出合理的岩石破坏前兆判据, 同时为矿山、水利、交通等领域的岩土工程灾害和失稳问题作一基础研究。因此, 反映岩石损伤演化特征的 AE 基础理论和试验研究的探索工作, 显得非常有必要且意义深远。

近年来, 随着岩石力学、地震学理论的发展及计算机硬件等相关技术的不断

断提高, AE 观测技术也得到了很大的发展。AE 基础理论和试验研究归纳起来主要包括以下几个方面: ①AE 波在固体材料中的传播理论; ②不同 AE 源模式或物理机制的理论与实验研究, 如研究加载速率、试验条件、温度等外在影响条件及岩性、各向异性等内在影响因素对岩石 AE 的影响机制, 裂隙的三维定位、裂隙源机理的识别; ③岩石破裂过程中产生的 AE 信号与材料微观力学特性、断裂特性之间的关系, 如研究岩石破裂过程中损伤演化规律, 建立起基于 AE 的定量描述损伤的合理模型; ④对 AE 参数本身特性的研究以及对 AE 信号处理的新理论、新方法的研究; ⑤AE 技术用于结构完整性评价的经济和可靠性分析, 在技术手段上分为参数法和波形法, 在实验中主要是对岩石破坏的前兆特征进行研究, 对裂隙源进行定位、机理研究, 在实际应用中主要是对岩体结构面破坏趋势进行预测; ⑥AE 检测/监测、评价的新方法及标准; ⑦研制多参量、多功能、高速度和实时分析的数字式新型 AE 检测分析仪(包括新型高灵敏度和多用途传感器的研制); ⑧AE 含义的广义化——扩展新的研究和应用领域。

从研究所具备的硬件条件来讲, 目前国内除了自行研发的试验仪器, 也从国外进口了很多先进的试验仪器, 为岩石 AE 试验的开展创造了良好的条件。除此之外, 也可以以数值的方法来模拟试验的开展。

1.3.1 岩石材料破裂过程中的声发射特性

(1) AE 基础试验

迄今为止, 国内外学者对多种岩石材料开展了 AE 试验研究, 常见岩石种类包括花岗岩、砂岩、泥岩、灰岩、白云岩、煤岩等, 常见试验方式包括单轴压缩、常规三轴压缩、高温三轴、三轴卸荷、拉伸、剪切、巴西劈裂等。由于 AE 受到岩性、加载方式等各种复杂因素影响, 其特性很难得出一般规律。所以, 一般所讲的研究岩石 AE 特性都是研究特定岩石在特定试验条件下的 AE 特性。

岩石单轴压缩的 AE 试验较为常见。连续加载时, 单轴压缩破坏试验得出的岩石类材料 AE 特征的一般规律如图 1-2^[6]所示: ①微裂隙压密阶段 OA, 反映出岩石试件受载后, 内部已存裂隙受压闭合, 应力-应变曲线上凹, 说明在小的应力梯度下所得应变梯度较大。此阶段有小振幅的 AE 产生, 主要是由多数微裂隙的闭合和少量微破裂的产生所引起。②弹性变形阶段 AB, 应力-应变曲线保持线性关系, 服从虎克定律。试件中原有裂隙继续被压密, AE 较为平稳, 甚至没有 AE 产生。③裂隙发生和扩容阶段 BC, 随荷载增加, 曲线偏离直线。裂隙呈稳定状态发展, 受施加的应力控制。AE 有逐渐增加的趋势, AE 振铃总数与应变关系曲线有明显的转折点。主要产生机制是大量的微

裂纹开始形核、成核、汇合和微裂纹的稳定扩展。④裂隙非稳定扩展至破坏阶段 CD ，随着荷载增加试件横向应变明显增大且体积增加，有扩容现象发生。说明试件内斜交或平行加载方向的裂隙扩展迅速且不可控制，进入不稳定发展阶段，AE 活动急剧增多。⑤峰后应变软化阶段 DE 和破坏阶段 EF ，岩石达到峰值强度后，载荷随着变形的增加而减小，岩石内大量的微裂纹产生、扩展、汇合、交接形成滑动面，最终导致岩石的完全破坏。AE 活动主要受压机刚度的控制，刚度愈小，在应力降处产生的 AE 率峰值愈高。图 1-2 是一种典型的 AE 情况，在峰值附近出现大量的 AE， CD 段是岩石主裂隙形成的区间，峰后的 DE 、 EF 段岩石主裂隙发展贯穿岩样，最终导致岩石整体破坏。不过，不同性质的岩石曲线可能不同。对于坚硬致密岩石则可能缺少 OA 段和 DE 、 EF 段，对于结构、成分更为复杂的岩石情况亦会更为复杂，如煤岩。

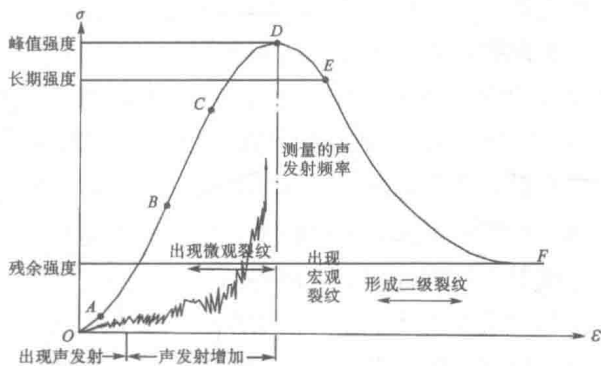


图 1-2 连续加载时岩石单轴压缩破坏过程中 AE 特性^[6]

下面列举国内外众多学者对于岩石等非金属材料 AE 特性研究所做的大量基础试验工作：姚改焕等^[7]研究了单轴压缩条件下石灰岩的 AE 时间序列规律并分析其破坏机理。谢强等^[8]对葡萄牙细晶花岗岩进行单轴压缩条件下的多次循环加卸载 AE 试验，表明此种岩石在高应力状态下 Kaiser 效应明显，累计 AE 能量曲线—时间的拐点比累计 AE 事件数—时间曲线更明显，判断岩石 Kaiser 点更合理。曹树刚等^[9]研究了单轴压缩条件下突出煤体的 AE 特征，选用的 AE 表征参数为 AE 事件率、振铃事件比和累计振铃数，认为 AE 事件率的变化是非均衡过程，局部振动且跳跃性大，AE 振铃事件比能更准确地反映煤体变形破坏过程中的 AE 变化趋势。杨永杰等^[10]进行了煤样压缩破坏过程的 AE 试验，提出了确定煤样破裂预测时间的方法。张晖辉等^[11]进行了大尺度片麻岩（试件尺寸达 1.05 m）破坏 AE 试验，为了模拟日、月潮汐力对地球的加卸载作用，在某一固定水平轴向压力作用下叠加循环荷载，利用 AE 记录研究了预测岩石宏观破坏的两种前兆现象：能量加速释放和加卸载响应比剧增。蒋宇等^[12]研究了循环荷载