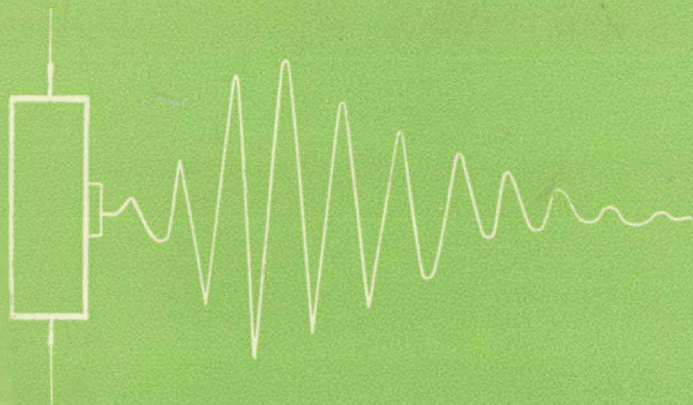


岩石声发射技术概论

AN INTRODUCTION TO ACOUSTIC EMISSION
TECHNIQUES IN ROCKS

秦四清 李造鼎 张倬元 邓荣贵 著



西南交通大学出版社

岩石声发射技术概论

An Introduction to Acoustic Emission
Techniques in Rocks

秦四清 李造鼎 张倬元 邓荣贵 著

本项研究受国家博士后科学
基金和自然科学基金资助
本项研究受国家教委博士点
基金资助

西南交通大学出版社

(川)新登字 018 号

内 容 提 要

本书内容包括:声发射技术的基础知识、岩石破裂的微观过程与声发射、岩石声发射活动的分维特征与地震预报意义、岩石断裂特性的声发射试验研究、岩石声发射凯塞效应的试验研究、应用岩石声发射的凯塞效应测定地应力的实验研究及声发射技术在岩体稳定性监测中的应用。

本书可供从事岩石声发射研究、工程材料研究及无损检测的科技工作者使用。

岩石声发射技术概论

秦四清 李造鼎 张倬元 邓荣贵 著

责任编辑 李太熙 杨 怡

西南交通大学出版社出版发行

(成都 九里堤)

成都理工学院印刷厂印刷

开本:850×1168 毫米 $\frac{1}{32}$ 印张:5.1875

1993年12月第1版 1993年12月第1次印刷

印数:1000册 字数:130千字

ISBN 7-81022-575-8/P·011

定价:8.00元

目 录

导 言	(1)
第一章 声发射技术的基础知识	(7)
第一节 声发射条件	(7)
第二节 岩石声发射源	(8)
第三节 声发射波传播特征	(9)
第四节 声发射信号的表征参数	(11)
第五节 声发射检测仪器	(14)
第二章 岩石破裂的微观过程与声发射	(16)
第一节 概 述	(16)
第二节 声发射测试原理	(18)
第三节 塑性变形及微裂纹成核产生的声发射	(20)
第四节 脆性岩石中晶粒断裂产生的声发射	(24)
第五节 低脆性岩石裂纹尖端塑性变形过程产生的声发射	(27)
第六节 脆性岩石中裂纹扩展产生的声发射	(33)
第七节 岩石声发射的损伤模式及其在地震研究中的初步应用	(36)
第八节 影响岩石声发射特性的因素	(43)
第九节 岩石的应力应变特性与声发射	(47)
第三章 岩石声发射活动的分维特征与地震预报意义	(53)
第一节 概 述	(53)
第二节 岩石声发射事件的强度分维模型	(54)
第三节 岩石变形过程中的分维特征与地震预报意义	(56)
第四章 岩石断裂特性的声发射试验研究	(60)
第一节 概 述	(60)

第二节	试件尺寸及其制备	(61)
第三节	试验系统与方法	(62)
第四节	试验结果及其讨论	(64)
第五章	岩石声发射凯塞效应的试验研究	(73)
第一节	概 述	(73)
第二节	岩石声发射凯塞效应存在性的试验研究	(74)
第三节	凯塞效应存在的应力水平	(76)
第四节	围压对凯塞效应的影响	(81)
第五节	应力变化对凯塞效应的影响	(85)
第六节	凯塞效应保持时间的试验研究	(92)
第七节	加工应力、水与温度对凯塞效应的影响	(96)
第八节	结 论	(103)
第六章	应用岩石声发射的凯塞效应测定地应力的实验研究	(104)
第一节	概 述	(104)
第二节	凯塞效应测试技术问题	(108)
第三节	应用凯塞效应测定鱼田堡煤矿地应力	(114)
第四节	应用凯塞效应测定五龙金矿地应力	(130)
第七章	声发射技术在岩体稳定性监测中的应用	(135)
第一节	概 述	(135)
第二节	在边坡工程监测中的应用	(135)
第三节	在岩爆、顶板与矿柱稳定性监测中的应用	(141)
参考文献	(153)

CONTENTS

Introduction	(1)
Chapter 1 Basic Knowledge of Acoustic Emission Techniques	(7)
1. 1 Acoustic emission conditions	(7)
1. 2 Acoustic emission sources in rocks	(8)
1. 3 Propagation characteristics of acoustic emission waves...	(9)
1. 4 Symbolizing parameters of acoustic emission signals ...	(11)
1. 5 Acoustic emission testing instruments	(14)
Chapter 2 Microprocess of Rock Fracture and Acoustic Emission	(16)
2. 1 Introduction	(16)
2. 2 Acoustic emission testing principles	(18)
2. 3 Acoustic emission produced during plastic deformation and microcrack nucleation	(20)
2. 4 Acoustic emission generated during crystal grain fracture in brittle rocks	(24)
2. 5 Acoustic emission produced in the process of crack—tip plastic deformation in low—brittleness rocks	(27)
2. 6 Acoustic emission produced in the process of crack propa- gation in brittle rocks	(33)
2. 7 A damage model of acoustic emission in rocks and its ini- tial applications in seismological research	(36)
2. 8 Factors to influence acoustic emission characteristics in rocks	(43)
2. 9 Stress—strain characteristics of rocks and acoustic emis- sion	(47)

Chapter 3	Fractal Dimension Characteristics of Acoustic Emission Activity in Rocks and Their Earthquake Prediction Significances	(53)
3. 1	Introduction	(53)
3. 2	Fractal dimension model of acoustic emission events of rocks in magnitude	(54)
3. 3	Fractal dimension characteristics in the process of rock deformation and their earthquake prediction significances	(56)
Chapter 4	Experimental Research of Acoustic Emission on the Rock Fracture Characteristic	(60)
4. 1	Introduction	(60)
4. 2	Specimen size and preparation	(61)
4. 3	Testing system and method	(62)
4. 4	Experiment results and discussion	(64)
Chapter 5	Experimental Research on the Kaiser Effect of Acoustic Emission in Rocks	(73)
5. 1	Introduction	(73)
5. 2	Experimental study on the Kaiser effect existence of acoustic emission in rocks	(74)
5. 3	Stress level of the Kaiser effect existence	(76)
5. 4	Influences of confining pressures on the Kaiser effect	(81)
5. 5	Influences of stress variation on the Kaiser effect	(85)
5. 6	Experimental research on the Kaiser effect retention time span	(92)
5. 7	Influences of processing stress, water and temperature on the Kaiser effect	(96)

5. 8	Conclusion	(103)
Chapter 6 Experimental Study on Measurement of Geostresses by		
Applying the Kaiser Effect of Acoustic Emission in Rocks		
	(104)
6. 1	Introduction	(104)
6. 2	Testing technique problems by the Kaiser effect	(108)
6. 3	Determination of geostresses in Yutianbao coal mine by use of the Kaiser effect	(114)
6. 4	Evaluation of geostresses in Wulong gold mine by use of the Kaiser effect	(130)
Chapter 7 Applications of Acoustic Emission Techniques in Mo-		
onitoring of Rockmass Stability		
		(135)
7. 1	Introduction	(135)
7. 2	Applications in monitoring of slope engineering	(135)
7. 3	Applications in monitoring of rock outbursts, roof and pillar stability	(141)
References	(153)

导 言

材料或结构受力作用时发生变形或断裂,以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射(Acoustic Emission,简称 AE)。各种材料声发射的频率范围很宽,从次声频、声频到超声频,所以声发射也称为应力波发射。大多数材料的声发射信号强度很弱,需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器检测分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。

声发射现象是自然界的普遍现象,地震、锡鸣就是其例。第一次观察到金属中产生的声发射是锡鸣,时间约在公元前 2650—2550 年之间^[1]。有文献记载的声发射,可追溯到八世纪,阿拉伯炼丹术士 Geber^[2]在他的《完美概要》书中写道:锡发出一种刺耳的声音,铁在锻造时,发出的声音很响亮。1882 年, Worthington^[3]这样描述:锡鸣是由微小晶体的相互摩擦产生。1916 年, Czochralski^[4]第一个在文献中报道了锡和锡鸣与孪晶之间的联系。Classen^[5]在 1924 年报道:在岩盐晶体和锌单晶剪切变形过程中,伴随有很规则的卡嗒声。1935—1937 年, Bridgeman^[6]观察到:在循环压缩载荷下,一些金属和许多非金属循环发出各种噪音,他认为最重要的噪音是“劈啪声”,这是由于塑性滑动产生的普遍现象。1947 年, Charles^[7]报道:与锡或锰的孪晶形成和马氏体形成时一样,锂的面心立方形式变形也伴随有一系列的卡嗒声。

由偶然观察到的锡鸣到详细研究声发射的转变是由三个分开和不相关的实验组成的。在这三次实验中,首次应用专门的测试仪器探测、放大和记录试样中产生的声发射信号。第一次声发射实验是在德国进行的,1936 年, Friedrich 和 Erich^[8]公布了实验结果,他们记录的信号是 29% 镍钢中由于马氏体的形成引起的。1948 年, Warren、Mcskimin 和 Shockley^[9]在美国完成了第二次声发射实验。

根据 Shockley 的建议,实验主要是借助于纯锡样品中产生的应力波来观察运动位错,此次实验测试设备能够测定在 10^{-6} s 时间内产生的 10^{-7} mm 的位移。1950 年,Millard^[10]在英国 Bristol 大学完成了第三次实验,他使用四水酒石酸钾钠盐传感器探测镉单晶金属线孪晶变形产生的声发射。

早期对可听见声音的观察和三次有测试设备的实验并不是直接研究声发射现象本身,研究人员也没有对声发射现象的物理本质进行进一步的调查。近代声发射技术的起源主要来自于德国科学家 Kaiser 的工作。

1950 年,Kaiser^[11]发表了她的博士论文,他应用常规工程材料拉伸实验来决定:(1)试样内产生了什么样的噪音;(2)牵涉的声学过程;(3)频率水平;(4)应力应变曲线和试样承受不同应力时频率的关系。Kaiser 具有重大意义的发现是声发射的不可逆现象,即“Kaiser 效应”。他还得出了如下结论:声发射的产生起因于多晶体材料颗粒的相互摩擦和颗粒的断裂。Kaiser 的研究工作一直到 1958 年 3 月逝世^[12]为止,他的工作促进了各国对声发射技术的进一步研究。

50 年代后期,声发射研究工作的重点转移到美国,60 年代在美国出现了声发射技术的研究高潮。1954 年,Schofield^[13]开始实施在材料工程领域应用声发射技术的研究计划,主要目的是要证实 Kaiser 的发现和测定声发射源。通过广泛的调查,他得出了一个重要的结论:声发射主要来自于“体效应”而不是“面效应”。1957 年,Tatro 和 Schofield^[14]开始合作,主要研究:(1)产生声发射的物理机理;(2)把声发射作为一种工具来研究某些工程材料性质的复杂问题。1963 年 Dunegan^[15]开始研究把声发射技术应用于压力容器检测。1969 年,Dunegan 和 Knauss^[16]组建了第一家专门生产声发射仪器的公司。Pollock^[17]特别对应用声发射技术探测裂纹生长感兴趣,在 1970 年,他开始把声发射技术应用于无损检测。

随着声发射技术应用范围的扩大,在60年代后期出现了商品声发射仪器。经不断改进后,已由单通道发展到多通道,由简单的信号处理方法发展到采用电子计算机进行声发射源定位。这一事实说明,声发射技术已开始进入比较广泛的应用阶段。

70年代,声发射技术的发展热潮传到了日本,后来,欧洲的许多国家也相应开展了声发射技术的研究工作。

我国声发射技术的研究工作是从1973年开始的,其特点是首先着眼于应用,到目前为止,在材料研究、压力容器评价、焊接过程监视及地应力测量方面已取得了显著效果。在扩大应用范围的基础上,已生产出七、八种商品声发射仪器。

岩石声发射现象的观测,最早起源于地震的探查和记载,以后在矿山塌陷时也观测到这种现象^[18]。50年代前后,国外首先应用声发射技术对各种金属矿和煤矿以及隧道工程的安全稳定问题进行监测和预报。60年代后,继美国、苏联、联邦德国之后,南非、日本、波兰等许多国家,都开展了岩石声发射技术的研究工作。其研究内容还扩大到边坡稳定、岩爆等方面。与此同时,实验室内岩石试样声发射的研究也受到应有的重视,特别是利用声发射技术研究岩石脆性破坏的过程和机理,许多学者都做了不少试验。Mogi^[19]等发现:声发射的振幅—频度关系与天然地震的振幅—频度关系十分相似。Scholz^[20]用一组声发射探头组成阵列,确定每个声发射事件的位置。Armstrong^[21]分析了声发射的频谱,指出岩石破裂时声发射的高频成分多。Barron^[22]利用声发射率的急剧增长判断岩石破裂的开始。此外,对多轴压力下声发射活动特性以及岩石声发射的凯塞效应(Kaiser Effect)研究等,都做了不少工作。声发射技术的应用领域,也从原来的采矿工业扩大到石油、地质、地震、水利、土建等部门。国际间有关岩石声发射研究的学术交流活动的越来越频繁。1975、1979和1981年,美国连续三次召开了地质结构与材料声发射学术讨论会,会上宣读了近百篇有关岩石声发射

的论文。1980年,美国试验和材料学会(ASTM)还专门出版了声发射技术在地质工程中应用的专辑。日本从70年代开始多次召开岩石声发射学术讨论会。国际性的声发射学术刊物《Journal of Acoustic Emission》也于1982年创刊^[23]。上述表明,岩石声发射技术的研究与应用已进入了一个迅速发展的新阶段。

在岩石力学研究中,一个十分重要的问题就是岩石或岩体稳定性问题。为此,人们在实验室和野外对岩石力学性质做了大量实验,以求了解在岩石破坏之前其力学性质的变化。然而,由于岩石力学性质的测量(例如岩石内部应力应变的测量)是十分困难的,同时影响岩石力学性质的各种环境因素太多,往往造成结果的不确定性。因此在研究这类问题时,广泛使用着像岩石超声波检测、声发射观测等声学方法。声学方法的优点主要是:声和弹性波容易传播而且传播的速度快,这可以保证监视系统的实时性和监视范围的扩大;声发射直接反映了结构的变化;受外界干扰较小^[24]。

应该指出,研究岩石力学性质的声学方法有两类:一类叫做超声探测法,即向岩石发射声信号,信号在介质中传播后再被接收,比较发射与接收信号的到时、相位、振幅等就可以探知介质情况。另一类叫做声发射技术,即不向岩石发射声信号,只接收岩石本身产生的声信号。我们知道,声发射是在岩石受力和发生形变过程中产生的,因此,根据岩石声发射的多少、大小、频率等可以了解到岩石的变形破坏过程。

在超声检测法中,发射的声波遇到裂纹等缺陷被反射回来,从而可以探知裂纹的存在和位置。在声发射技术中,这些裂纹在外力作用下主动发射声波,不但能使我们了解发声地点的具体情况,而且能够揭露它的更为深入的矛盾和实质;不但能够了解缺陷的目前状态,还能够了解缺陷的形成历史和发展的趋势^[24]。陈颀^[25]认为:超声 P 波速率 V_P 和声发射率是两个性质很不相同的参数,前者与应力水平有关,后者不仅与应力水平有关,而且还与加载的方

式即压机刚度有关。因此,可以称 V_p 为岩样的应力状态参数,称声发射率为过程参数,因为声发射率不仅与岩石内部的微裂纹有关,而且还与微裂纹形成的过程有关。由此可以看出,声发射技术应比超声波检测法更能反映岩石的损伤演化过程,其应用价值也较大。

声发射检测也是声学无损检测中的重要方法,它必须有外部条件的作用,使材料或构件发声,如力、温度等因素的作用。另一方面,由于这些因素的作用,使材料内部结构发生变化,如晶体结构变化、滑移变形、裂纹扩展等,发声是在材料内部结构变化过程中产生的。因此,声发射检测是一种动态无损检测方法,即使构件或材料的内部结构、缺陷或潜在缺陷处于运动变化的过程中进行无损检测。声发射检测的这一特点使其区别于超声、X 射线、涡流等其它无损检测方法^[26]。

声发射检测是一种动态无损检测方法,而且声发射信号来自缺陷本身,因此,用声发射法可以判断缺陷的严重性。一个同样大小、同样性质的缺陷,当它所处的位置和所受的应力状态不同时,结构或材料的损伤程度也不同,所以它的声发射特征也有差别。明确了来自缺陷的声发射信号,就可以长期连续地监视缺陷的演化繁衍过程,这是其它无损检测方法难以实现的。

除极少数材料外,金属和非金属材料在一定条件下都有声发射产生,所以声发射检测不受材料的限制。

由于材料变形、裂纹扩展等不可逆性质,声发射也有不可逆性。因此,要进行声发射检测,必须知道材料的受载历史,或者在材料第一次受力时进行检测。

深入研究岩石破坏过程中的声发射特性及其规律有着重要的意义。不但使我们有可能弄清岩石破坏机制,而且还可能提出新的强度和断裂判据。

近些年来,声发射技术已广泛应用于岩石破裂机理研究、地震序列研究,地应力测试及岩体稳定性监测等方面,其发展相当迅

速,有关这方面的文献很多。但在岩石声发射机理研究、理论研究、试验标准制订等方面,尚嫌不够系统和完善;在断裂试验开裂点判定、凯塞效应机理认识方面,尚有许多不同的观点;如何根据室内声发射试验规律指导岩体稳定性监测等,这些都是有待开拓的新领域。本书是在笔者博士论文^[95]及发表论文^[96-106]的基础上,经修改、补充和吸收同行们的某些观点而著述的。本书的目的是与同行们共同探讨和研究,加深对某些问题的认识,把岩石声发射技术的研究和应用向前推进一步,以便更好地运用它为工程建设服务。

限于著者水平,书中难免有谬误之处,热情欢迎读者批评指正。

在本书出版之际,谨向东北大学林韵梅教授、徐小荷教授、朱毅副教授和中国科学院地质研究所姚宝魁副研究员,能源部成都勘测设计院张承娟高级工程师,中国科学院金属研究所朱祖铭副研究员,成都理工学院李太熙副编审、李志侃助工(描图),致以衷心感谢。

第一章 声发射技术的基础知识

第一节 声发射条件

用一个简单的小球—弹簧模型来模拟材料发生的断裂事件。一个断裂事件的出现,会发射应力波,应力波所负载的能量,可看成是弹性应变贮能容器中,某局部释放能量造成的。

如图 1-1 所示,在两个拉长的弹簧中间有一个小球质量块,

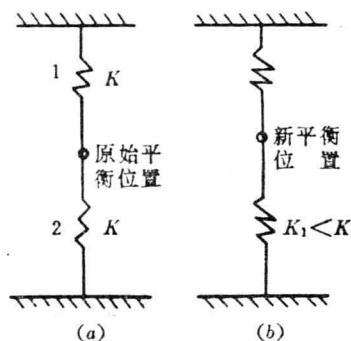


图 1-1 用小球—弹簧模型模拟声发射事件的发生过程

(a)原始状态;(b)新的平衡状态

弹簧的初始刚度是 K ,当拉长 $\frac{1}{2}x$ 时弹簧所受到的初始拉力为 P 。现令弹簧 2 刚度突然降低到 $K-\delta K$,弹簧受到的拉力降低 δP ,相应弹性应变贮能降低 δU 。经推导得到^[26]

$$\delta P = \frac{K \delta K x}{2(2K - \delta K)} \quad (1-1)$$

$$\delta U = \frac{K\delta Kx^2}{4(2K - \delta K)} \quad (1-2)$$

由上两式可看出,小球—弹簧系统所释放的能量与荷载的瞬间降落 δP 成正比,而 δP 与刚度的瞬间减小 δK 成正比(当 $K \gg \delta K$ 时),因而释放的能量也与出现事件的应变成比例。从这里可引出结论:声发射的产生是材料中局部区域快速卸载使弹性能得到释放的结果。如果固体中所有的点在同一时间受到同一机械力作用,那么这个物体在时间和空间上将同时发生运动变化,如果这个物体作为一个整体运动,这个过程就不会产生波的过程。只有在局部作用时,物体各部分有速度变化,才出现波的过程。

大部分材料都是非均质的和有缺陷的,在外应力作用下,内部强度较低微元体在局部应力集中到某一程度时发生破坏(产生塑性变形),使局部应力松弛,产生应力降,造成局部区域快速卸载,因而产生声发射。

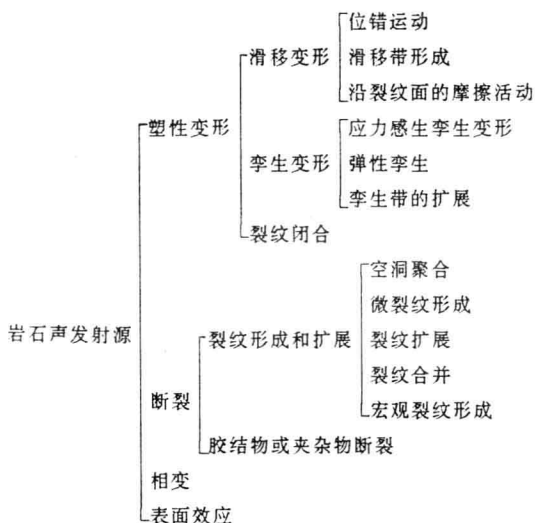
由上面的分析可知,材料产生声发射的必要条件是:(1)局部塑性变形或断裂产生应力降;(2)快速卸载,如果卸载的时间较长,释放的能量减小,就可能使灵敏度较低的检测仪器检测不到声发射信号。此外,仪器能否接收到信号还与材料的性质有关,如果材料的衰减系数很大,也有可能接收不到信号。

第二节 岩石声发射源

通过大量试验及理论分析,发现岩石材料中有许多结构可成为声发射源,概括起来列于表 1-1。

表 1-1

岩石材料的声发射源



第三节 声发射波传播特征

固体介质中局部变形时,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(切变波)。它们以不同的速度在介质中传播。当遇到不同介质的界面时会产生反射和折射。任何一种波在界面上反射时将发生波形变换,各自按照反射与折射定律反射和折射。在全内反射时也会出现非均匀波。在固体自由表面还会出现沿表面传播的表面波。因此,声发射波的传播规律与固体介质的弹性性质密切相关。

1. 固体中的弹性波

在均匀、各向同性的弹性介质中,声波的传播遵循下列弹性方程