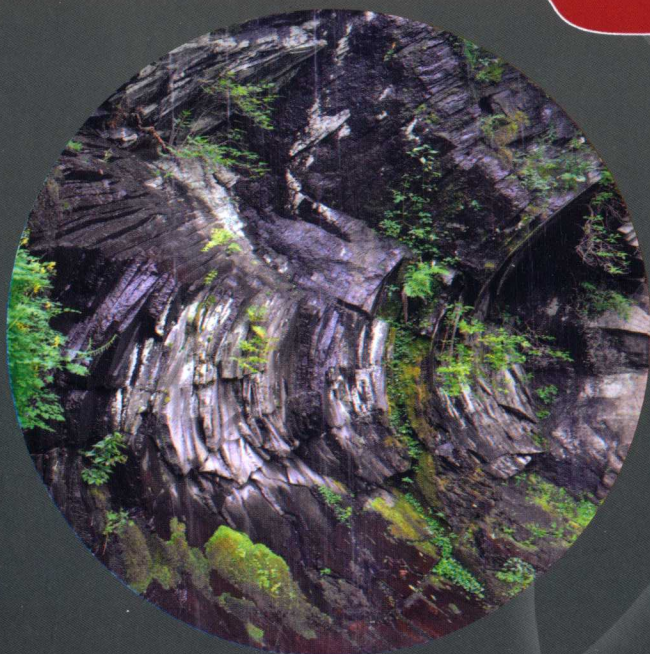


周期荷载作用下 岩石非线性变形与损伤特性

许江 李树春 尹光志 程立朝 著



科学出版社

周期荷载作用下岩石非线性 变形与损伤特性

许 江 李树春 尹光志 程立朝 著

科学出版社

北 京

xy

内 容 简 介

本书以试验手段为依据,采用理论与试验相结合的研究方法,研究了单调及周期荷载作用下岩石的宏观变形及损伤特性、岩石损伤破坏过程中的声发射特性及其 CT 细观损伤演化规律,并结合相关试验结果,运用非线性理论进行了系列有益的探讨。

本书可供地质、采矿、岩土工程及相关领域的科研人员、工程技术人员、研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

周期荷载作用下岩石非线性变形与损伤特性/许江等著. —北京:科学出版社, 2012. 10

ISBN 978-7-03-035687-1

I. ①周… II. ①许… III. ①岩石变形-研究 IV. ①TU454

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 235056 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:刘小梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

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

*

2012 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 10 月第一次印刷 印张: 8 1/2

字数: 164 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

改革开放以来,我国国民经济持续高速发展,科学技术水平不断提高,大量大型基础设施(包括交通、能源、水利、建筑、工业等)相继建设。在其工程施工及运营阶段,这些基础设施经常会受到周期性荷载作用的影响,导致岩土体失稳破坏而引发重大灾难。因而,周期荷载作用下岩石的变形特性日益受到众多专家学者的关注。

本书以岩石单调加载、周期荷载和岩石细观损伤 CT 试验为基础,详细阐述了岩石的宏观变形和损伤特性,以及不同含水状态、变形速率、荷载水平对声发射活动的影响,分析了岩石单调加载破坏和疲劳破坏的声发射规律,探讨了岩石在疲劳破坏过程中的 CT 数、密度及标准差变化规律。运用耗散结构理论研究了岩石疲劳破坏的宏观过程,利用突变、分形及混沌理论探讨了岩石在疲劳破坏过程中各参数序列的非线性特征。初步建立了周期荷载作用下岩石损伤破坏的非线性理论体系。

本书共 6 章。第 1 章介绍了本书研究背景、学科进展及主要内容,第 2 章论述了单调加载及周期荷载作用下岩石的宏观变形及损伤特性,第 3 章论述了单调加载及周期荷载作用下岩石的声发射特性,第 4 章论述了岩石变形破坏过程的细观损伤演化过程,第 5 章论述了岩石损伤破坏过程的非线性特征,第 6 章为结论。

本书得到国家自然科学基金(50574108)和教育部博士点基金(20060611006)的资助,并得到科学出版社的大力支持,在此一并致谢!

限于作者水平,书中难免有欠妥之处,恳请读者不吝指正。

作 者

2012 年 9 月于重庆

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及意义	1
1.2 研究进展	2
1.2.1 岩石损伤力学研究进展简介	3
1.2.2 周期荷载作用下岩石宏观变形规律及损伤特性研究进展	4
1.2.3 基于声发射及 CT 的岩石损伤检测研究进展	6
1.2.4 非线性科学在岩石力学中的应用研究进展	10
1.3 本书主要内容	12
第 2 章 周期荷载作用下岩石的宏观变形特性	14
2.1 试验概述	14
2.1.1 加载设备	14
2.1.2 岩样制备	16
2.1.3 岩样 SEM 图像及基本物理性质	17
2.2 单调加载条件下岩石的宏观变形特性	19
2.2.1 变形特性	19
2.2.2 破坏特征	22
2.3 周期荷载作用下岩石的宏观变形特性	23
2.3.1 变形特性	23
2.3.2 破坏特征	31
第 3 章 基于声发射的岩石损伤破坏规律	33
3.1 试验概述	33
3.1.1 声发射系统	33
3.1.2 降噪措施	35
3.1.3 其他措施	35
3.2 单调加载条件下岩石的声发射特性	36
3.2.1 声发射参数	36
3.2.2 不同条件下单调加载岩石声发射特征比较	40
3.3 周期荷载作用下岩石的声发射特性	44
3.3.1 不同条件下周期荷载岩石声发射特征比较	44
3.3.2 周期荷载作用下岩石损伤破坏声发射规律	47

3.3.3	岩石声发射的 Felicity 效应	49
3.3.4	岩石破坏过程中卸载时的 AE 活动性	53
3.4	岩石破坏过程的声发射三维定位及影响因素分析	56
3.4.1	定位试验概述	58
3.4.2	定位试验结果	58
第4章	岩石变形破坏过程的细观损伤演化分析	65
4.1	试验概述	65
4.1.1	试验设备与岩样参数	65
4.1.2	CT 扫描数据与试样密度关系	67
4.2	单调加载变形破坏的 CT 细观试验	68
4.2.1	CT 数据分析	68
4.2.2	力学关系	71
4.3	循环荷载作用下岩石变形破坏过程 CT 实时扫描	72
4.3.1	加、卸载路径及 CT 扫描点选择	72
4.3.2	试验结果	73
4.4	循环荷载作用下岩石 CT 细观损伤演化分析	75
4.4.1	CT 图像分析	75
4.4.2	试验分析	75
4.4.3	损伤演化分析	79
第5章	岩石损伤破坏过程的非线性特征	81
5.1	从无序到有序——耗散结构理论对岩石损伤破坏规律的解释	81
5.1.1	岩石破坏过程中耗散结构的形成机制	81
5.1.2	用耗散结构理论解释周期荷载作用下岩石损伤破坏规律	83
5.2	岩石破坏过程的突变	85
5.2.1	试验过程中加载系统的突变	86
5.2.2	岩石损伤演化过程中的突变	90
5.3	岩石损伤破坏过程中的分形和混沌	94
5.3.1	分形与混沌	95
5.3.2	相空间重构	99
5.3.3	岩石损伤破坏过程中 AE 序列关联维数演化分析	105
5.3.4	声发射时间序列的混沌特征	109
5.4	采动影响下采场边坡位移的非线性分析	113
5.4.1	变形与位移分形	113
5.4.2	岩质边坡位移的非线性分析	114
第6章	结论	119
	参考文献	121

第 1 章 绪 论

1.1 背景及意义

岩石在单调加载条件下的力学特征已为多数人所认识,而在复杂加载路径与受荷历史情况下的力学机制方面的研究却相对较少,其中,周期荷载(本书即指循环荷载,下同)是最常见也是最简单的力学现象之一。岩石在周期荷载作用下的疲劳现象很少引人注意,但这一现象对于岩土工程稳定却十分重要^[1]。在岩土工程施工及其工程运营阶段,经常会遇到周期性循环荷载的作用,由于未能掌握周期性荷载作用下的岩土体失稳破坏规律而引发重大灾害的例子不少,如广为熟知的意大利 Vajont 水库岩坡滑动、法国 Malpasset 拱坝坝基位移导致整个拱坝坍塌、中国梅山连拱坝坝基(花岗岩)滑动等灾害的形成都涉及了岩体在周期性荷载作用下的长期稳定性问题^[2~4]。此外,三峡水库蓄水以来,三峡地区微震活动频度明显增加,库区大小地震上千次,崩塌滑坡 4000 多处。微震活动主要集中在巫山—秭归—长阳一带,强度虽未突破正常状态,但地震周期性作用造成的库岸松散堆积物、塌岸和局部滑移也会危及部分居民点的安全,而且三峡库区是否发生强震仍然是相当长时间内需要特别关注和预防的关键问题。因此,开展对周期性荷载作用下岩石的非线性变形特征及损伤演化规律的研究既是岩石力学与工程领域的专家学者所关注的前沿课题之一,同时也有助于正确认识岩体在周期性荷载作用下的破坏机理,进而科学地评价工程岩体的长期稳定性^[1~4]。其研究成果特别对解决诸如三峡水利枢纽工程、南水北调工程等国家能源工程及西部大开发建设中存在的包括大坝坝基、水库及其库岸边坡、库区道路和路堑边坡、库区港口等在反复排、蓄水过程中的长期变形和稳定性以及岩体在频繁发生的不可预料的地震荷载作用下的响应等在内的问题具有重要的科学意义和广泛的推广应用前景。

众所周知,岩石(体)是赋存于自然界中的十分复杂的介质,它是天然地质作用的产物,是自然界中多种矿物的集合体,不同岩石(体)在其形成的过程中经历了不同的地质作用,包括地应力变化、各种风化作用以及人类各种营力的作用,这些作用的综合使各种岩石甚至是同一种岩石的成分和结构特征都各有差异,从而使岩石呈现明显的非线性、不连续性、不均质性和各向异性等特征^[5]。可见,岩石(体)较其他人工材料的力学属性有很大的复杂性,全面认识它们的力学属性有很大难度。走出这一困境的一条有效途径是运用非线性理论来研究复杂的岩石(体),将

岩石(体)或岩石工程看做一个由多因子、多层次组合而成的,具有很强不确定性和随机性的复杂系统,利用非线性理论研究岩石变形与损伤过程中的演化规律或对岩石力学系统所表现出的非线性特征进行分析。所以,岩石力学的重要研究领域之一就是在传统研究方法的基础上综合利用非线性科学相关理论,正确、深入地认识岩石的上述特征和比较正确地把握岩石在各种荷载作用下,以及在各种因素影响下的动、静态力学响应。

除了岩石介质的复杂性以外,我们更应该看到,岩石(体)在自然界或实际工程中具有复杂的受载路径与受载历史,然而迄今为止,这方面的研究成果并不多。在岩石的复杂受载路径与受载历史中,周期荷载的疲劳过程是最常见也是最简单的力学现象,并且与岩石的单调荷载方式密切相关,因此,周期荷载的疲劳问题研究可以作为复杂受载路径与受载历史下岩石力学研究的“重要突破口”。疲劳是指材料或结构在循环荷载的反复作用下性能逐渐劣化直至失稳破坏的过程。土木工程领域对疲劳问题的研究始于20世纪20年代,主要包括钢结构、混凝土、土体和岩石几个方面,对钢结构、混凝土的疲劳研究较多,而随着大规模交通建设,高速公路、飞机跑道、过江隧道、铁路等的地基土体疲劳问题逐渐引起人们的重视。然而岩石领域疲劳问题的研究国内外开展很少,一方面由于大家对这方面的研究没有引起普遍注意;另一方面由于岩石的离散性很大,为疲劳研究工作带来了很大困难^[4]。

本书研究内容是为了深入认识岩石在单调及周期性循环荷载条件下的变形、损伤规律与破坏机制,为解决公路、铁路基础及其路堑边坡、隧道、大坝坝基、露天采矿边坡平台、矿山周期性顶板来压、岩石的钻进和岩体的抗震等工程的长期稳定性,并针对三峡库区面临频繁地震活动以及周期蓄、排水而带来的重大工程实际和理论问题而提出。国内外在有关岩石宏、细观损伤破坏及周期荷载作用下岩石的变形方面已有不少研究成果,但并未见到不同条件下岩石变形基本阶段及其相应特征点的系统性的周期荷载试验研究成果,也未见到周期荷载下岩石损伤演化规律与非线性特征的系统研究成果以及有关岩石的多级疲劳损伤与破坏的CT细观研究方面的报道。因此,结合非线性理论系统地开展周期荷载作用下岩石的变形与损伤演化规律方面的研究不仅具有重要的工程指导意义,也具有较高的理论研究价值。

1.2 研究进展

本书以试验手段为依据,采用理论和试验相结合的研究方法,研究内容涉及单调及周期荷载下岩石的变形与损伤检测及其非线性特征等诸多方面,由于岩石在单调加载条件下的力学试验是岩石力学常规试验,不再赘述,其研究进展主要体现

在试验手段的更新上(如CT方法、声发射法等),故结合具体检测方法予以探讨。本书将简要介绍岩石的损伤力学基础及研究进展,重点介绍周期(循环)荷载作用下岩石宏观变形特性及损伤破坏规律,基于声发射及CT细观试验的岩石损伤破坏以及非线性科学在岩石力学中的应用等方面的研究进展。参考文献主要以近10年文献为主,重点是近5年来的文献,兼顾10年前有影响的研究成果。

1.2.1 岩石损伤力学研究进展简介

岩石可视为一种非均质的多相复合结构,而且存在大量的天然缺陷,且这些缺陷的分布完全是随机的。岩石在受到外界力作用以后,弥散在岩石内部的微缺陷不断变化,在部分区域内出现贯通,进而形成宏观裂缝导致岩石失稳破坏。岩石的破坏过程是非常复杂的,如果只是单纯地用经典弹塑性力学或断裂力学的方法来描述,将难以获得理想的结果,因此,有必要将损伤理论引入到对岩石的研究中。岩石的损伤过程可以看做是连续的,并且在很小的应力、应变下就已发生,至于外界力作用以前就存在的缺陷可以作为初始损伤处理。岩石损伤力学着重考察的是损伤对材料宏观力学性质的影响以及材料的损伤演化过程和规律。这与传统破坏理论只注重变形至破坏的起点-终点式的研究方式截然不同,损伤力学的研究方法使得对岩石力学特性的认识更加深刻和全面^[6]。

关于岩石类材料损伤力学的研究,文献[7]~[9]中已经进行过总结,文献[9]侧重于岩石损伤力学的起源、经典理论以及当时的研究成果,而文献[7]则更多关注岩石断裂及损伤力学的最新成果、研究动态和发展现状。一般认为,岩石损伤力学模型的研究方法从其立足点和研究尺寸大致分为微观的、细观的和宏观的三类。

微观模型是在分子、原子层次上研究材料的物理过程以及物质结构对损伤的影响,然后用经典或用量子统计力学方法来推测其宏观力学效应。微观的方法因理论不够完善,且统计量太大,使之仅能定性而有限度地预测某些损伤现象^[9],而且由于微观涉及的尺度较小,目前的试验手段还满足不了。因此到目前为止,对岩石等脆性材料的损伤理论研究主要集中在宏观和细观两个尺度范围内^[10]。

宏观损伤模型即通常所说的连续介质损伤力学(CDM),基于宏观尺度上的连续介质力学与不可逆热力学理论,把包含各种缺陷的材料看成是一种有“微损伤场”的连续体,引进了在物体内连续变化的损伤变量来描述损伤状态,然后在满足力学、热力学基本公设和定理的条件下,唯象地确定损伤体的本构方程和损伤演化规律。Krajcinovic^[11]运用热力学等理论对岩石类脆性材料的本构方程进行了较为全面的研究。Ortiz^[12]提出了建立在微裂纹损伤基础上的连续损伤模型,该模型被Yazdani等^[13]加以发展和推广。Costin^[14]提出了建立在微裂纹损伤基础上的连续损伤模型,其等效宏观损伤标准表征微裂纹的扩展。Marigo、Lemaitre、Murakami、Shen、邵建富等也提出了不同的连续介质损伤力学模型^[8]。近年来,各向

异性损伤理论及各类耦合模型^[15,16]的建立已成为 CDM 的核心和发展前沿。

细观模型,略去了某些损伤的物理过程细节,从颗粒、晶体、孔洞等细观结构层次研究各类损伤的形态、分布及其演化特征,从而预测物体的宏观力学特征。细观损伤力学的一方面主要是研究细观损伤结构与力学之间的定量联系。较多的是以数值方法或者分析方法去分析一个确定的体积 V , 确定体积内含有一个或几个孔洞或者裂纹,然后假设损伤材料是由这样的确定体积堆筑而成^[8]。Gurson^[17]假设基体为刚塑性体,对确定体积中有孔洞情况进行了系统的研究。Nemat-Nasser 等^[18,19]假设基质为各向同性弹性体对确定体积中有裂纹情况采用分析方法进行了研究建模。Tu 等^[20,21]对脆弹性体裂纹处于各向异性的情况进行了研究建模。

细观损伤力学的另一个方面主要是研究细观损伤结构的演化和发展,其中比较热门的是用统计物理数学理论研究细观损伤的演化和发展,俗称统计细观损伤力学^[8]。严格说来,用统计方法进行岩石类材料的损伤研究是把微观、细观和宏观结合起来的一种方法,统计损伤方法的最大优点是模型简洁、计算量小、模型参数易于取得。所以,岩石统计损伤模型在最近 10 年中得到大量关注^[7],三种统计模型得到发展:基于连续损伤力学统计模型^[22]、微元统计模型^[23]和网络统计模型^[24]。同时,岩石统计损伤理论在工程中也得到很好应用^[25,26],而基于岩石统计损伤理论的有限元软件 RFPA 则被越来越多的人所认识和使用。

总之,在岩石损伤理论和应用研究中,微观、细观、宏观理论均得到发展,但微观理论的应用受到限制,而细观和宏观损伤模型理论和应用的发展则更深入一些。由于岩石材料力学性质的复杂性,目前还没有哪种损伤本构模型能够精确地对其进行表达,任何一种方法都只是一种近似。所谓模型的“精确”,只是模型对客观实际的某种程度能够接受的“逼近”,目前,理论分析中的岩石损伤模型越来越复杂,参数越来越多,而工程应用中则更多注重参数较少、计算简单、应用方便。此外,由于岩石损伤过程的复杂性,对其进行准确的宏观描述往往比较困难,不得不借助统计分析以及非线性分析等手段^[6]。

1.2.2 周期荷载作用下岩石宏观变形规律及损伤特性研究进展

对周期性循环荷载作用下岩石类材料的宏观变形特性方面的研究,最初主要体现在对混凝土材料方面的研究,并初步形成了一些较为成熟的理论和试验方法,其研究对象从单轴压缩到多轴压缩,从压缩、弯曲到拉伸、劈裂和抗剪,从等幅、变幅到随机等^[27~30]。而对岩石材料,其相关方面的研究成果却相对较少,Grover、Dehlinger 和 McClure 最早开展了岩石的疲劳试验,Burdin、Hardy 和 Chrdin、Hardy 和 Chugh、Hainmson 和 Kin、Attewell 和 Farmer、Cain 和 Peng 均对岩石的疲劳问题进行了试验研究^[1]。

近年来,葛修润、蒋宇等^[3,4]对循环荷载作用下岩石的变形与疲劳破坏做了一些系统的研究工作,如其与 Müller 于 1983 年指出在循环荷载作用下的岩石不可逆变形发展存在着三个阶段,提出以变形来度量岩体的强度和破坏,于 1987 年又提出了循环荷载作用下岩石是否发生破坏与应力门槛值有关,并认为岩石疲劳门槛值接近常规屈服值。山下秀等^[31]做了单轴压缩转移试验,得出了疲劳破坏和蠕变破坏变形上的相似性。McCall 等^[32]将由不同成分组成的非均匀材料模型的宏观弹性性质与许多细观的滞回弹性单元联系起来,基于滞后细观特性弹性单元的假设,讨论了准静态应力-应变状态方程等,岩石的滞后非线性弹性的基本原因在于岩石含有大量诸如裂纹、孔洞等细观结构特征,这些细观弹性单元控制了准静态的状态方程和弹性波的响应。Holcomb^[33]对辉绿岩和花岗岩进行了循环差应力试验,当差应力大于或等于破坏强度的85%时,体积膨胀,这是非弹性行为的表现,在某些方面,它们又显示更典型的准弹性行为,由闭合的滞回曲线证明了岩石的记忆性。Tutuncu 等^[34]在循环单轴应力状态下,对饱和沉积岩的频率和应变振幅效应进行了研究,在经过 4 种不同饱和和溶液浸泡过的 Berea 砂岩中均观测到应力-轴向应变曲线较大的滞回环,还探讨了在沉积的颗粒状岩石中衰减的机制,即衰减的黏滑滑动和颗粒接触黏着滞后,孔隙空间中饱和液体的类型与在颗粒接触中对 σ - ϵ 曲线滞后有一个较大的影响。刘云平等^[35]研究了在频率为 0.05~4Hz 的循环应力作用下大理岩、砂岩的衰减、弹性(杨氏)模量、泊松比的动态响应。席道瑛等^[36]在频率为 0.05~4Hz 时,对干燥、饱水、饱泵油和泵油加沥青 4 种类型的砂岩、大理岩进行了垂直层理和平行层理两个方向的正弦波加载试验,研究了饱和砂岩的各向异性和非线性黏弹性行为。陈运平等^[37,38]通过对饱和砂岩和大理岩的循环荷载试验,分析了饱和岩石在循环荷载下的应力-应变滞回曲线、瞬时泊松比的“X”形变化曲线,以及弹性模量随应变振幅的增加而减少等滞后现象,探讨了饱和岩石在循环荷载下的滞后和衰减现象的微观机理,并研究了不同孔隙流体和不同性质的岩石在循环荷载试验条件下应力-应变曲线的细微差异。Bagde 等^[39]利用 MTS816 岩石力学试验系统对静、动态循环单轴荷载作用对砂岩力学特性及其损伤的影响展开了研究。许江等^[40,41]利用 MTS815 岩石力学试验系统对不同加载速率、不同含水状态、不同应力水平等不同试验条件的循环荷载作用下岩石滞回曲线演化规律等展开了深入系统的讨论。

周尚志等^[42]根据岩石类材料裂纹形成阶段的疲劳曲线(S-N),描述疲劳发展的损伤演变方程,提出了疲劳裂纹扩展的数值计算方法;建立了扩展阶段中裂纹尺寸与荷载循环次数之间的关系,从而将裂纹萌生与扩展这两个独立过程纳入一个统一的理论体系。樊秀峰等^[43]对砂岩在循环荷载作用下的疲劳损伤特性进行实时超声波速的跟踪研究,研究结果表明:穿透砂岩试样的横向超声波速随着荷载的循环次数发生明显的三阶段衰减,即初始迅速衰减、稳定衰减与临近破坏的急速衰

减三个阶段。王德玲等^[44]认为塑性应变的累积是低周疲劳破坏的主要原因,并在岩石疲劳试验的基础上建立了岩石疲劳扰动模型。此外,Zhang 等^[45]、Kowalski^[46]也对岩石的疲劳问题进行了研究。

随着大量工程实践和理论研究的深入,关于周期性循环荷载作用下岩石类材料非线性弹塑性特征及损伤的研究大致经历了极限理论阶段和过程理论阶段^[4]:所谓极限理论阶段即采用唯象学描述方法,以宏观试验为基础,重点关心的是循环荷载作用下岩石破坏时一点的应力、应变状态与外界因素之间的关系;所谓过程理论阶段是以整个循环加载过程中各点状态为研究对象,从其损伤破坏的演变和发展,损伤破坏机理,损伤裂纹的发生和扩展这些更为本质的方面去探讨循环荷载作用下岩石类材料的破坏问题,进而提出相关的损伤与断裂理论。

以上研究成果表明,岩石在周期性循环荷载作用下的强度和变形规律与常规试验条件下的强度和变形规律有显著的不同,强度方面表现出劣化性,破坏强度低于常规峰值试验强度;在变形方面则表现为记忆性,破坏点的位置受到常规应力-应变全过程曲线的控制^[4,47]。但是,需要注意的是,以上所述“非线性弹塑性特征”大多仅研究了岩石在周期循环荷载过程中的塑性滞回特性,并未深入涉及广义的非线性科学理论范畴,而应用非线性理论对周期性循环荷载下岩石的变形与损伤规律进行研究则是本书的主要研究内容之一。

1.2.3 基于声发射及 CT 的岩石损伤检测研究进展

岩石损伤的检测方法有光学显微镜法、扫描电子显微镜法(SEM)、声波探测法、红外辐射探测法、声发射法、CT 方法以及传统的力学性能测试法等。例如,许江等^[48]采用带有加载装置的光学显微镜进行了砂岩在不同加载阶段的损伤裂纹分析。赵永红等^[49]对含预制缺陷的大理岩平板施加单轴压缩,在扫描电子显微镜下即时观察并记录了试件表面微破裂的发育及演化过程。中国矿业大学岩石混凝土破坏力学重点实验室以及清华大学先后与日本岛津制作社合作研发了 SEM 加载试验系统,可在各种温度、各种荷载下实时观测试样表面的损伤演化情况,即边加载边观测。通过这些研究,可以捕捉到岩石在损伤演化过程中表面细观结构的变化,有助于对岩石损伤机理的分析^[6]。蒲传金等^[50]通过测试爆破前后的声波速度变化情况,研究了 5 种不耦合装药结构爆破对孔壁岩石的损伤情况,并得出了一些有益的规律,可为边坡开挖、隧道掘进和石材切割爆破等提供参考。Luong 等^[51]进行了岩石破裂过程中的红外辐射现象的观测研究,并把内部损伤所引起的热能作为研究的参数,从作用过程的力-热耦合出发,分析了损伤过程和破坏机理。

力学性能测试法实质上描述的是岩石破坏前及破坏时变形的宏观表现形式,并非对岩石破损细观状况的真实表达。我们知道,通过各种实验室力学试验以及原位力学试验,可以详细测试岩石在各种荷载下的力学响应,岩石损伤的影响也必

然会在力学响应中有所体现,如弹性模量的变化、弹性应变的变化、蠕变速率的变化、循环应力幅或应变幅的变化等,测量这些变化并进行分析也可得到对损伤的描述。在岩石损伤检测中,应用最多的是基于弹性模量变化的损伤变量描述。先前采用这一描述的是 Lemaitre 用无损弹性模量和损伤弹性模量定义的损伤变量^[9],鞠扬、谢和平院士^[52]详细讨论了该方法的适用条件,对其进行了修正。而在混凝土或岩石的疲劳损伤研究中,潘华等^[53]、蒋宇^[4]以累积残余塑性应变来表达疲劳损伤变量,但其损伤变量表达式有待商榷。

材料受外力或内力作用时,由于其局部因能量的快速释放而发出的瞬态弹性波现象,称为声发射(acoustic emission, AE)。声发射是一种常见的物理现象,大多数材料变形和断裂时都有声发射发生,如果释放的应变能足够大,就能产生可以听见的声音。但许多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。这种用声发射仪器探测、记录声发射信号,并利用声发射信号进行相关分析和推断声发射源的技术称为声发射技术。声发射检测技术的主要优点是:不受被检测体外部形状和大小制约,不必进行繁杂的扫查操作,可提供对缺陷的实时、动态和连续监测,适于在其他方法难以或不能接近环境(如核辐射、易燃易爆、有毒及极端温度等)下的检测。

声发射检测是一种动态无损检测方法,即在材料的内部缺陷或潜在缺陷处于动态变化的过程中进行无损检测,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程度。此外,不同材料在外部应力作用下的响应机制及效果不同,其声发射信号也有所不同,因此研究声发射要紧密结合材料自身的物理力学特性。总之,对于声发射的研究有助于揭示材料内部微破裂萌生、扩展和断裂的演化规律,可广泛应用于岩石类材料的微破裂机制、地震序列、原岩地应力以及岩体稳定性等领域的研究^[54]。

在岩石力学与岩石工程研究领域,目前对岩石声发射的理论研究主要集中在岩石受载破坏过程中的声发射规律、Kaiser 效应及声发射损伤理论等方面。李庶林^[55]和谢强等^[56]对单轴压缩岩石破坏全过程进行了声发射试验,分析了岩石破坏过程中的力学特性和声发射特征。蒋宇等^[47]则对岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性进行了初步研究。Li 等^[57]通过 8 种岩石试验发现除了铁矿石以外的大部分岩石都具有 Kaiser 效应。李元辉等^[58]通过试验提出岩石材料在受压变形过程中产生的塑性变形是出现 Felicity 效应的主要原因。张明等^[54]利用累积声发射数与损伤变量一致的观点,建立了准脆性材料声发射的损伤模型,得到了声发射率和 Kaiser 效应的一般表达式。在岩石声发射的应用研究方面,张立杰等^[59]基于声发射的煤岩动力失稳行为试验与现场相关测试的比较,综合分析了复杂变化环境下煤岩的失稳声发射定量规律。姜永东等^[60]应用弹性力学理论推导出地下岩体测点处的地应力表示和地应力椭圆基本方程,研究了声发射 Kaiser 效应测

定岩体地应力的原理、方法和测试技术。赵奎等^[61]将小波分析技术应用到岩石声发射测量地应力信号处理分析中,为研究岩石声发射测量地应力机制提供了新的研究思路和方法。

在地震研究领域,岩石模拟试验研究可以为地震预报提供强震前兆信息。随着声发射记录仪器及计算分析方法的发展,地震前兆模拟试验研究取得了丰硕成果^[62,63],同时,通过试验证实了障碍物、宏观结构(节理、层面等)的存在对声发射率和 b 值的影响^[64,65]。值得关注的是,加卸载响应比理论(LURR)^[66,67]是我国尹祥础教授提出的一种能够利用从地下岩石圈得到的有限信息对地震进行预测的新方法。加卸载响应比值的异常变化直接反映了地震发生前孕震区介质临界敏感性的增加,是基于临界点理论的一种重要地震前兆现象,当响应比值较小且变化较稳定时(约为1),表示孕震区介质处于稳定阶段,大的地震不会发生;当响应比值开始出现明显异常变化时,表示孕震区介质接近临界状态;而当响应比值超过峰值 $Y_{\max}$ 之后会出现回落,通常大地震就是在响应比值出现回落之后发生的。

尽管对岩石声发射理论与应用的研究已经取得不少成果,但这些研究成果不能完全反映岩石在整个加载过程中其内部微裂纹孕育、萌生、扩展、成核和贯通的三维空间演化过程。赵兴东等^[68]在前人研究成果的基础上,应用声发射及其定位技术研究了单向加载条件下含不同预制裂纹以及完整的花岗岩样破裂失稳过程中其内部裂纹孕育、萌生、扩展、成核和贯通的三维空间演化过程,并分析了随应力-应变变化岩石的声发射活动特性。这一形象化的研究成果增加了对岩石破裂过程中声发射特征的新认识。但是赵兴东等的研究成果对不同种类及不同结构的岩石来说没有普适性。由于岩石声发射影响因素较多,且受声发射仪器限制,很多结论有待进一步证实。从目前声发射研究现状来看,单调加载破坏过程的声发射特性研究成果较多,而循环荷载下岩石疲劳破坏过程的声发射特性研究成果却较为少见,因此需要探讨的问题还很多。

随着岩石力学的不断深入,人们逐渐认识到目前已较成熟的一些试验手段的不足。例如,各种显微镜只能观测岩石表面的细观损伤过程,且随放大倍率的增大视野缩小,因而,只能对局部区域进行观测分析。声发射法在探测岩石内部微裂纹成核和扩展方向方面有优势,但声发射事件的统计定量分析结果与细观损伤结果难以严格对应^[6]。随着计算机断层扫描(CT)技术的发展和运用,很多学者开始用CT技术开展对岩石内部进行观测分析和研究。

CT(computerized tomography)技术是通过计算机图像重建,使指定层面上不同密度的材料信息以高分辨率的数字图像显示出来,其以无扰动、可多层面分析和能采用国际标准试件等优点受到岩土力学研究者的关注。CT技术的优势并不在于它的分辨率,而在于其无损探测特性,CT图像的分辨率只有 $0.35\text{mm} \times$

0.35mm, 大大低于光学显微镜或 SEM 的分辨率, 不能观测到岩石中矿物颗粒相互作用和破坏过程。根据 CT 物理理论, 岩石 CT 图像反映矿物颗粒集合体相互作用和破坏的综合效果, 对线状或环状裂纹型破坏效果反映最好^[69]。

CT 方法与 SEM、声发射法相比具有如下优点:

SEM 方法只能观察到非常小区域内的岩石细观结构的变化, 难以追踪裂纹发展过程, 而 AE 方法则不能直观地把岩石裂纹的形态和宽度等特征展现给研究者。CT 技术提供了在任意应力下观测岩石内部细观结构的可能性, 而声发射技术只能根据岩石动态损伤直到破坏时的累积声发射数等数据反推其在某个应力水平下的损伤状况, 如果没有一定的经验, 很难根据声发射确定某个静止状态下岩石的损伤状况。

CT 技术填补了岩石细观裂纹演化过程中由常规 SEM 尺度的细观裂纹到肉眼可见的宏观裂纹之间尺度的细观裂纹演化过程的空白区间, CT 裂纹的重要性在于可以更直接地与岩石试件宏观应力-应变曲线相联系。SEM 尺度的裂纹尺度太小, 其扩展难以与岩石样品宏观应力-应变关系建立直接联系。声发射定位技术对于构造非均匀岩石来说, 是可以推测岩石裂纹演化趋势的; 但对于均匀岩石, 声发射源呈弥散分布, 无法从直观上判断岩石裂纹演化过程。

自从 Withjack^[70]首先在 20 世纪 80 年代后期将计算机 CT 扫描技术应用在地质材料特性研究方面以来, CT 扫描技术便开始广泛地应用于地学和岩土力学领域的研究方面。日本京都大学工学部资源工学专业开发工学研究室最早用自制的弹性波 CT 装置开展岩石力学研究, 其工作具有创新性, 但其忽略了弹性波的折射和波速的不均匀性^[71]。

CT 扫描技术在不能进行实时观测前一般应用于材料的静态细观损伤检测。例如, 杨更社等^[72]对陕西黄陵矿区 4 种不同性质岩石(石灰岩、砂岩、页岩、煤样)的初始细观损伤进行了分析。

对岩石材料加载过程中的实时 CT 检测对 CT 扫描技术应用于岩石力学研究具有重要的划时代意义。葛修润等^[73]利用由其主持设计和研制的与 CT 机配套的专用加载设备, 进行了三轴压缩试验和单轴压缩试验条件下煤岩破坏全过程的细观损伤演化规律的即时动态 CT 试验, 这在国内外尚属首次。试验得到了在不同荷载作用下煤岩中微孔洞被压密→微裂纹萌生→分叉→发展→断裂→破坏→卸载等各个阶段清晰的 CT 图像, 引入了初始损伤影响因子, 定义了一个基于 CT 数的新的损伤变量。结果表明, 利用这套设备进行岩石细观损伤力学特性的研究是可行的。任建喜等^[74]利用以上与 CT 机配套的专用三轴加载试验设备, 在国内外首次完成了岩石卸荷损伤断裂破坏全过程的实时 CT 试验, 得到了岩石卸荷损伤演化过程中从裂纹发育、扩展、贯通到断裂破坏全过程的 CT 图像。通过与岩石连续加载破坏过程细观试验结果的比较发现, 岩石卸荷破坏比连续加载情形下岩石

破坏更具突发性,由静态连续加载岩石细观损伤机理出发,得到了卸荷条件下岩石损伤扩展的初步规律。任建喜等^[75]还完成了单轴压缩荷载作用下岩石细观损伤扩展特性 CT 实时试验,得到了清晰的岩石破坏全过程中微孔洞被压密,微裂纹萌生、发展、贯通破坏和卸荷等不同发展阶段的 CT 图像。基于岩石损伤扩展的细观机理,将岩石应力-应变全过程曲线分为 5 段,为岩石损伤本构模型的建立提供了基础。作彦卿等^[76]对软、硬两种砂岩进行单轴加载试验,同时用高分辨率的螺旋 CT 扫描机进行实时扫描。通过对获得的 CT 图像的分析处理发现,CT 差值图像中的标准差值与小裂纹的扩展速率有密切的关系,建立 CT 差值图像中的标准差值与应力关系曲线,可以直观地看出,岩石样品中小裂纹起裂门槛值:软砂岩样品小裂纹扩展的门槛值为岩石强度的 55%,小裂纹的扩展强度占整个强度的 73%。硬砂岩小裂纹扩展的门槛值为岩石强度的 64.5%,小裂纹的疲劳强度占整个强度的 79%;小裂纹的扩展规律,即在加载的初期岩石中小裂纹的扩展速率缓慢增大,在小裂纹扩展的门槛值出现之前快速下降,小裂纹扩展的门槛值出现之后又快速增加,最后当裂纹长度达到一定值时与长裂纹扩展速率基本一致。

在岩石疲劳损伤的 CT 细观研究方面,葛修润等^[77]利用 CT 机专用三轴加载试验设备,进行了实时的岩石疲劳损伤演化 CT 细观试验。从细观尺度证实了岩石疲劳破坏存在门槛值,研究了循环荷载最大应力值的变化对岩石疲劳破坏的影响机理,得到了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律。郑孝军等^[78]基于对裂隙岩石的细观 CT 试验,对含有单一人为预制裂纹的贵溪红砂岩在单轴疲劳荷载作用下的损伤扩展机理和演化过程进行了初步的试验研究。结果表明,含有预制裂纹的红砂岩的损伤演化和裂纹的扩展受到预制裂纹的影响,破坏裂纹从预制裂纹尖端起裂,并且最终破坏发生于含有最大预制裂纹的层面。

通过以上介绍可以看到,最近 10 年来,CT 方法在岩石力学的研究中取得了良好开端和长足进步,获得了一批有价值的研究成果,但是,CT 方法和声发射法一样均有各自的优点和缺点,如 CT 法成本较高,而且扫描时间长,难以进行连续动态观测。因此,对同一种岩石,采取以上两种方法相结合的研究策略,充分利用以上方法的优势进行检测和分析才可以获得比较满意的效果,本书的主旨正在于此。

1.2.4 非线性科学在岩石力学中的应用研究进展

非线性科学是研究复杂性现象的新学科,非线性观代表的是一种崭新的自然观,它把简单性与复杂性、确定性与随机性、有序性与无序性、必然性与偶然性等统一在新的自然图景之中。近 20 年来,非线性科学在探求非线性现象的规律,发展处理它们的普适方法方面取得了明显的成就:相干结构和孤子揭示了非线性作用引起的惊人的有序性;确定性系统的混沌使人们看到了普遍存在于自然界而人们

多年来视而不见的一种运动形式;分形和分维的研究把人们从线、面、体的常规几何观念中解放出来,而面对更为多样的自然。非线性科学的发展始于20世纪70年代,经过30多年的发展,学科理论体系已基本形成,广义的非线性科学理论体系主要有突变理论、耗散结构理论、分形理论、混沌理论、协同学理论、神经网络理论、重正化群理论及非线性热力学和动力学等。

随着对非线性理论研究的不断深入和推广,非线性理论已经与不同的学科领域结合而产生了新的生命力,如在气象、地震、经济等领域均取得了可喜的成果。那么,非线性理论是否适用于岩石力学与工程,岩石(体)是否具有非线性特征?郑颖人等^[79]的研究回答了这一问题,“非线性是岩石(体)力学行为的本质特征,主要表现在:①岩石在初始阶段,线性特征占主导地位,但当变形进入塑性、断裂、破坏后,非线性因素占主导地位,就会在系统中出现分叉、突变等非线性复杂力学行为;②岩石力学与工程属于自然化工程,属于天、地、生科学范畴,规模大,系统复杂,原始条件和环境信息不确定,通常,岩体的变形、损伤、破坏及其演化过程包含了互相耦合的多种非线性过程,因而决定论的和平衡态的传统力学方法难以描述系统的力学行为;③岩石材料的高度无序分布,岩体内地应力随时空而变,岩石成分与构造的复杂性或多相性,岩体开挖和施工工艺的影响,构成了岩石力学具有高度的非线性;④岩石(体)的变形、损伤、破坏过程是一个动态的非线性不可逆演化过程,各种参数处于变化之中。由此可见,岩石(体)比起其他材料(如金属、混凝土乃至土体),其力学行为的非线性和动态演化的特征显得更为显著和强烈。”

自1983年中国力学学会召开了“分叉、突变和混沌动力学”学术大会后,我国兴起了非线性科学研究的热潮。非线性科学在矿山灾害及控制中已成为工程科学领域重要的资助方向之一^[80],为推进非线性动力学由抽象理论转向工程应用,国家自然科学基金委员会资助了一批相关的项目,如高应力硬岩突变孕育过程的非线性智能力学分析与控制(周辉)、岩体破坏的分维裂隙协同演化模型与计算机实现(于广明)、岩体力学参数智能化位移反分析方法及其应用研究(丁德馨)等。非线性科学的发展和应用将是推进岩石力学等学科达到一个新的高度的希望所在,目前非线性科学在岩石力学与工程领域的研究也已进入一个新的发展阶段(一些理论体系初步确立,开始深化和新的发展),并取得许多重要研究成果。

谢和平等^[81]通过对岩石断口的分析,得到了断口分形维与岩石损伤断裂能的关系。这些研究表明,岩石断裂表面可由分形维得到很好的描述,能量的耗散和微结构形成对断口不规则性有影响。谢和平^[82]的研究认为裂纹扩展速率具有分形特点,并和晶粒尺寸有关。谢和平^[83,84]还用分形理论对岩石类材料的损伤、孔隙和粒子演化分布进行了大量研究,提出了分形损伤的概念,使分形几何在岩石类材料的损伤、孔隙率演化分布、岩石的破碎及岩石节理面的粗糙度等问题上得到了较好的应用,创立了分形-岩石力学这一岩石力学的新的分支学科。秦四清^[85]根据