

缺陷岩体 纵波传播特性分析技术

QUEXIAN YANTI ZONGBO CHUANBO TEXING FENXI JISHU

俞 缙 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

013045455

P583
05

缺陷岩体 纵波传播特性分析技术

俞 缙 著



北 京
冶金工业出版社
2013



北航

C1653883

P583
05

内 容 提 要

本书主要介绍缺陷岩体中纵波传播规律及分析方法。全书共分7章, 主要包括: 节理非线性变形对弹性纵波在单节理和平行多节理处多重透射和反射规律的影响, 节理岩体双重非线性弹性介质中的纵波传播规律, 含缺陷岩体声波实验, 含缺陷岩体声波信号处理技术与时频分析, 含缺陷岩体的卸荷敏感及声学反应等。

本书可供土木、地质、石油、采矿、水利水电、交通、国防等领域从事岩土工程和工程物理探测及相关专业的生产、科研和教学人员阅读参考, 也可作为大专院校工程地质、地球物理、石油工程、采矿工程、水利工程、岩土工程等专业高年级本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

缺陷岩体纵波传播特性分析技术/俞缙著. —北京: 冶金工业出版社, 2013. 5

ISBN 978-7-5024-6250-5

I. ①缺… II. ①俞… III. ①岩体—纵波—波传播—研究
IV. ①P583

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 093802 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 廖 丹 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6250-5

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京慧美印刷有限公司印刷

2013 年 5 月第 1 版, 2013 年 5 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 15.5 印张; 304 千字; 240 页

45.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100010) 电话: (010)65289081 (兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

岩体作为一种天然的非均匀材料，其内部富含各种地质缺陷，包括微裂纹、孔隙以及节理裂隙等宏观非连续面。这些缺陷严重影响着岩体中应力波的传播速度和衰减特性。在工程地质物探与勘探、岩石爆破工程、防护工程等领域中，探究应力波在含缺陷岩体中的传播规律具有重要意义。鉴于含缺陷岩体的复杂性，当前单纯从数学力学角度解决岩石工程中的实际问题有较大困难，而仅采用定性描述的方法又不能满足工程要求。因此，结合理论分析、数值模拟以及物理实验等手段，开展系统深入的含缺陷岩体中纵波传播规律的研究，具有十分重要的经济价值和社会效益。本书对节理非线性变形对纵波在单节理和平行多节理处多重透射和反射规律的影响，节理岩体双重非线性弹性介质中的纵波传播规律，含缺陷岩体声波实验，含缺陷岩体声波信号处理技术与时频分析，含缺陷岩体的卸荷敏感及声学反应等，做了较为深入的研究与探讨。

全书共分7章。第1章是绪论；第2、3章介绍了纵波法向穿越弹性非线性变形单节理和平行多节理时的传播特性；第4、5章介绍了双重非线性岩石介质中的纵波传播规律；第6章介绍了缺陷岩石声学特征及其小波时频分析；第7章介绍了卸荷敏感岩体与岩芯卸荷扰动的声学反应。本书主要以作者在攻读博士学位期间以及工作以来的研究成果和工程咨询项目为基础撰写。在撰写过程中，注意学科体系的完整和概念描述的准确。为了便于读者阅读，书中对一些重要的公式进行了较详细的推导，也给出了部分计算程序的源代码。

衷心感谢钱七虎院士在作者进行博士后研究阶段给予的悉心指导，

II 《《《 前 言

本书正是在他的鼓励和支持下完成的。书中的研究工作获得了国家自然科学基金项目(51109084)的资助,也得到了中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLG DUEK1012),中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室开放基金资助项目(Z012002)、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(SKLG P2013K014)以及大连理工大学承担的973国家重点基础研究发展计划子课题(2011CB013503)的委外科研经费的资助。书中的研究成果都是作者所在的研究团队共同努力的结果,其中蔡燕燕博士、潘树来博士(澳门),宋博学、张亚洲硕士研究生做了重要工作,郑春婷、戚志博、胡舜娥、陈旭、穆康、江文放、江浩川、俞凯木、张建智等硕士研究生也都有一定贡献,在此向他们表示衷心的感谢。

本书在撰写过程中,得到了解放军理工大学王明洋教授、重庆大学周小平教授、中国科学院武汉岩土力学研究所陈卫忠研究员、南京大学李晓昭教授和赵晓豹副教授、大连理工大学李宏教授、江西理工大学中国生教授、南京水利科学研究院明经平高级工程师、中国地质大学吴文兵博士后等专家给予的大力支持和无私帮助,在此向他们表示诚挚的感谢。此外,作者还参阅了国内外相关专业的大量文献,已全部列入书后的参考文献中,向所有文献的作者一并表示衷心的感谢!

含缺陷岩体波动力学是一门正在发展着的边缘性交叉学科,有许多理论和实际应用问题尚需进一步研究和完善。由于作者水平及经验有限,书中难免有不足或不妥之处,敬请同仁和广大读者批评指正。

作 者

2013年1月于杏林湾畔

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 节理非线性变形特性及本构模型	4
1.2.2 节理、裂隙及孔隙等岩体缺陷对应力波传播的影响	6
1.2.3 含缺陷岩石的声波测试及信号分析	12
1.3 本书主要内容	14
第2章 纵波法向穿越弹性非线性变形单节理时的传播特性	17
2.1 岩体节理法向单调加载变形本构模型	18
2.1.1 以往模型简述及其数学缺陷分析	19
2.1.2 统一指数模型概述	22
2.2 岩石节理法向变形本构关系的改进	23
2.2.1 新模型的建立	23
2.2.2 新模型数学性质分析	26
2.2.3 试验数据模拟	27
2.3 岩体节理法向循环加载本构模型	30
2.3.1 以往模型简述	30
2.3.2 统一节理法向循环加载本构模型	31
2.3.3 模型验证与分析	33
2.3.4 试验结果拟合	34
2.4 改进的节理弹性非线性模型及动态推广	34
2.5 改进模型的节理透射、反射系数近似解析解	37
2.5.1 线性位移不连续模型透射、反射系数解析解	37
2.5.2 线性位移不连续模型理论解	37
2.5.3 改进模型节理透射、反射系数近似解析解	39
2.5.4 近似解析计算及参数研究	42
2.6 半数值半解析计算	45

IV 《《《 目 录

2.6.1 一维波动方程特征线法与位移不连续模型	45
2.6.2 透射波、反射波质点速度数值差分格式	47
2.6.3 线性位移不连续模型计算	50
2.6.4 非线性位移不连续模型计算及参数研究	51
2.6.5 半数值解与近似解析解误差分析	57
2.6.6 半数值解与 UDEC 模拟结果对比分析	60
第3章 纵波法向穿越弹性非线性变形平行多节理的传播特性	64
3.1 半数值半解析计算方法	65
3.2 计算分析	68
3.2.1 线性位移不连续模型计算分析	68
3.2.2 非线性位移不连续模型计算	71
3.3 不同脉冲传过大间距多节理时的透射特性	85
3.3.1 节理条数对透射波形和透射系数的影响	85
3.3.2 节理条数对透射波能量的影响	88
3.3.3 节理条数对透射波频率组成的影响	89
3.3.4 节理条数对透射波时间延迟的影响	90
3.4 地震 P 波传过大间距多节理时的透射特性	92
3.4.1 地震 P 波数据分析	92
3.4.2 参数研究	92
3.4.3 地震 P 波传过单节理时的透射特性	94
3.4.4 地震 P 波传过 5 条节理时的透射特性	94
3.4.5 地震 P 波传过 10 条节理时的透射特性	95
3.5 尾波效应分析	97
3.5.1 尾波概念的提出	97
3.5.2 尾波效应初探	98
第4章 纵波在双重非线性岩石中传过单节理时的传播规律	100
4.1 基于非线性波动方程及其近似位移波解的计算理论	100
4.1.1 理论分析	100
4.1.2 计算结果与分析	104
4.2 基于岩石本构模型及有限差分法的计算理论	109
4.2.1 非线性岩石模型	109
4.2.2 理论分析	109
4.2.3 参数研究和结果分析	113

4.2.4	线性岩石与非线性岩石中非线性节理的比较	113
4.2.5	节理参数对 P 波透射特性的影响	114
4.2.6	节理位置对透射系数的影响	118
4.2.7	岩石非线性系数对透射系数的影响	118
4.2.8	频谱分析	119
第 5 章	纵波传过双重非线性成组节理时的传播规律	122
5.1	计算理论	122
5.2	计算参数	127
5.2.1	节理条数对透射波形的影响	127
5.2.2	节理间距对透射波形的影响	129
5.2.3	岩石非线性系数对透射波形的影响	131
5.2.4	节理间距对透射波能量的影响	131
5.2.5	透射波形整体分析	135
5.2.6	P 波传过 9 条小间距成组节理后的透射波	136
第 6 章	缺陷岩石声学特征及其小波时频分析技术	139
6.1	岩芯及钻孔声波测试工作原理和特性	139
6.1.1	实验用探头及分析仪工作原理	139
6.1.2	激发信号特征	141
6.1.3	声波测井及换能器工作原理	142
6.2	缺陷岩石材料中声波信号衰减机理	143
6.2.1	黏滞吸收机理	144
6.2.2	声衰减与频率的关系	145
6.3	缺陷岩石声波实验思想	147
6.3.1	实验思想	147
6.3.2	声波信号的提取	148
6.3.3	波谱分析的范围与精度	149
6.4	缺陷岩石声波信号处理方法	149
6.4.1	Fourier 谱计算	149
6.4.2	小波变换理论及分析方法	152
6.5	小波变换程序实现和激发信号的小波分析	160
6.6	工程应用	162
6.6.1	工程背景	162
6.6.2	测井岩体及特征	164

VI 目 录

6.6.3 岩体超声波分级及波谱特征分析	167
6.6.4 多参数岩体超声波分级法	172
6.7 饱水对缺陷岩石声学特性的影响	175
6.7.1 岩样特征和试验方法	175
6.7.2 试验结果及分析	178
第7章 岩芯卸荷扰动的声学反应与卸荷敏感岩体	183
7.1 岩芯卸荷扰动特征及其影响因素	184
7.1.1 岩芯卸荷扰动特征	184
7.1.2 岩芯卸荷扰动影响因素	185
7.2 岩芯声波信号的波谱及小波分析	190
7.3 卸荷敏感岩体的工程对策	194
附录	195
附录 A MATLAB 单节理处纵波透射的差分计算程序	195
附录 B MATLAB 快速小波变换计算程序	197
附录 C 基于非线性波动方程及近似位移波解的 P 波透射波 MATLAB 计算程序	200
附录 D 基于岩石本构模型及有限差分法计算 P 波透射波的 MATLAB 计算程序	203
附录 E 含成组节理的双重非线性岩石介质中 P 波传播的 MATLAB 计算程序	212
附录 F 岩石声波信号小波时频分析 MATLAB 计算程序	223
参考文献	226

第1章 绪 论

1.1 引言

岩石（体）是天然形成的，性质十分复杂的地质介质，与实验室内制作的普通人造固体材料显著不同。岩石（体）有其特有的形成过程，经历了漫长的、不同程度和不同形式的地质构造运动，是赋存于一定地质环境之中，受地应力、地温和地下水影响的，内部存在各种缺陷（包括孔洞、孔隙、裂隙、节理、层理、断层和其他软弱结构面以及褶皱、不整合接触面等地质构造）的，含固、液、气三相物质的地质体。天然岩体具有非连续性、各向异性、非线性、非均质性等特征（见图1-1），这就使岩石工程较其他工程形式更加难以掌控（Goodman, 1980）。这其中，岩体内的缺陷对岩体的力学、水力学及工程性质的影响起至关重要的作用。岩石力学家 Brown（1987）就曾说过：考虑节理、裂隙及孔隙等地质缺陷对岩石影响的研究和模型化方法，已经成为岩石力学与岩石工程领域区别于其他工程领域的一大特色。

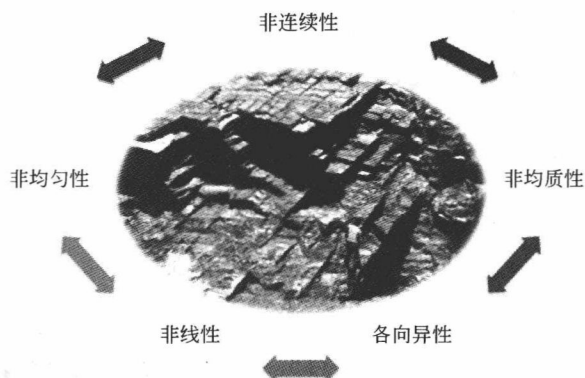


图 1-1 岩体的特征

天然岩体中的固有缺陷多种多样，大小和层次不同，形状和分布各异。图1-2~图1-6分别显示了不同岩石在宏观、细观和微观下的孔隙及裂隙分布情况。其中，图1-2为天然砂岩、灰岩、玄武岩的典型宏观成组节理图；图1-3为砂岩试样细观孔隙结构图；图1-4和图1-5分别为电镜下砂岩试样微孔隙和花岗岩试样微裂隙的微观照片；图1-6所示为两种典型的裂纹形式。

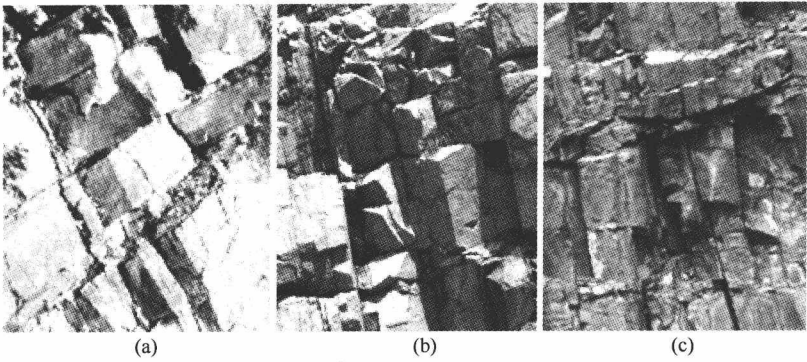


图 1-2 典型宏观成组节理图
(a) 砂岩; (b) 灰岩; (c) 玄武岩

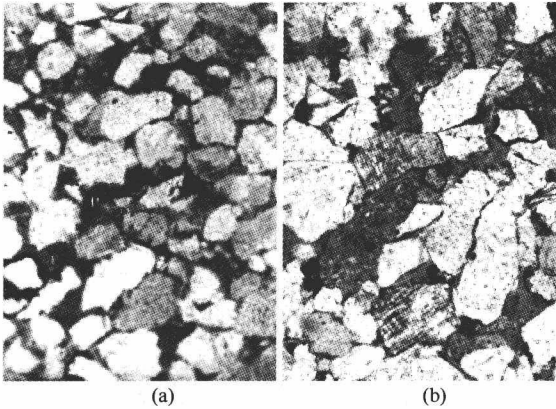


图 1-3 砂岩试样细观孔隙结构图

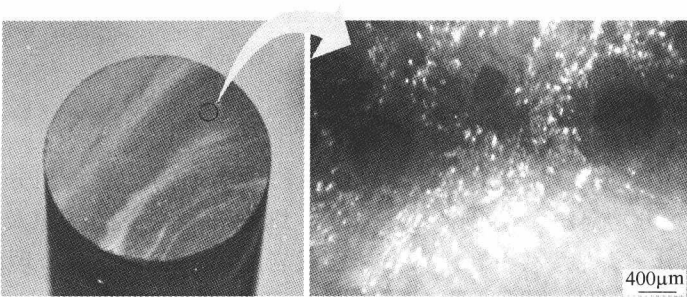


图 1-4 砂岩及砂岩试样在电镜下的微孔隙图

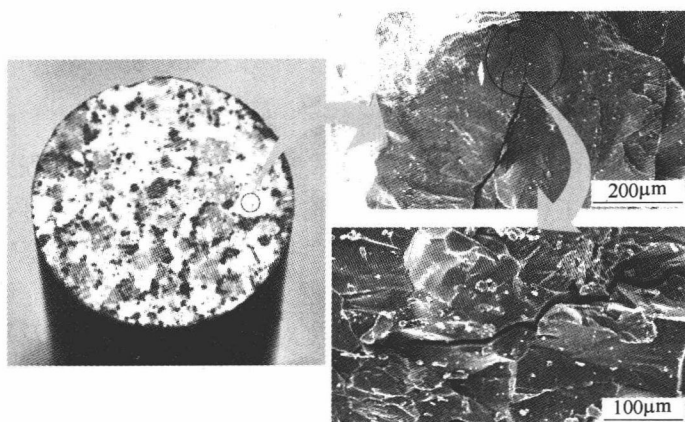


图 1-5 花岗岩及花岗岩试样在电镜下的微裂隙图

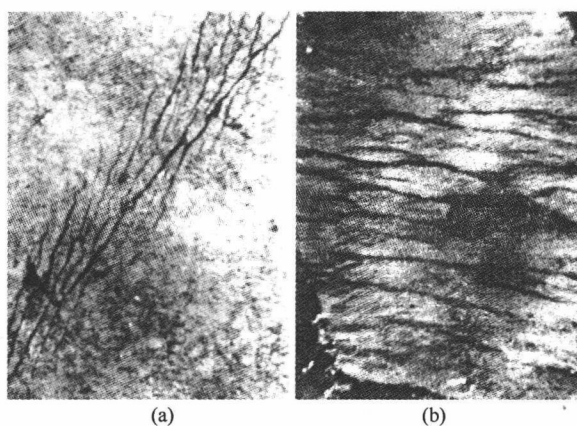


图 1-6 裂纹形式

(a) 雁列式裂纹; (b) 横裂纹

节理、裂隙以及孔隙等缺陷结构对岩体的力学性质以及岩体中应力波的传播有很大影响。通常认为,节理、裂隙等缺陷结构会导致岩体中波的振幅衰减及波传播速度减慢。由于岩体的破坏准则往往是根据波振幅的阈值(如位移峰值、质点速度或加速度峰值)来确定的,因此在解决防灾减灾与防护工程和岩土工程(岩体动力学及其与结构相互作用)问题时,缺陷结构对爆破波、地震波等多种类型应力波衰减的影响成为学者们最为关心的问题(Mohanty, 1998)。另一方面,鉴于含缺陷岩体材料的复杂性,当前单纯从数学力学角度解决岩石工程的实际问题有较大困难,而仅采用定性描述的方法又不能满足工程设计、施工的要

求。为解决有关问题,人们提出了岩石(体)地震勘探方法,如声波测井技术。值得一提的是,岩石材料声学特性研究轨迹与近几十年来岩体力学的发展动向是一致的,但相关研究还十分欠缺。

应力波在节理、裂隙岩体中的传播问题,除了在岩石工程学、防灾减灾与防护工程学、声学学科领域中受到广泛重视,还涉及地球物理、工程力学、地下工程、固体力学、地质工程、采矿工程、结构工程、材料科学、信号处理、应用数学与计算数学等众多的学科领域,属于多学科间高度交叉的科学范畴。本书针对应力波在节理、裂隙岩体中传播的若干问题,主要包括岩石节理非线性法向变形本构关系,节理非线性变形及其非线性程度对弹性纵波在单节理及平行多节理中法向传播的影响,裂隙岩石(体)声波测试及其信号处理方法等,作了较为深入的研究与探讨。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 节理非线性变形特性及本构模型

岩体通常由岩石和不连续结构面两部分组成。这些不连续面包括小的微裂隙、微孔隙和大的节理、断层(以下统称为节理)。与微裂隙和微孔隙不同,宏观节理的存在会使应力波传播至节理时,节理两侧的位移场不连续。此外,节理在应力作用下产生的变形直接影响岩石的裂隙分布、接触面分布及裂隙空间连通等特性,这些特性的改变是岩体材料变形、破坏及导水特性发生变化的主要力学机制。因此岩石节理法向变形本构关系成为节理岩体力学及岩体水力学研究中的基础课题。目前对节理岩体变形本构模型的研究大致分为如下两类:

(1) 理论法:该方法以接触力学理论、损伤力学理论以及概率论等理论为基础,依据一定的假设条件,从理论上推导出法向应力与变形、剪应力与剪切位移之间的函数关系,从而进一步进行实验验证。这种方法所建立的模型形式较为复杂,代表性模型如 Desai 等(1992)提出的 DSC 模型。

(2) 半经验半理论法:该方法以节理面本身为研究对象,将其视作位移不连续体,先进行节理闭合实验,得到节理闭合变形曲线,分析其不同受力条件下的接触状态和本构关系,然后利用数学力学方法唯象地对实验结果进行拟合,建立节理闭合变形模型。这种方法形式较为简单,更适合于动力学问题的研究。本书主要侧重于第二类问题的讨论。

节理法向变形可由法向应力-应变曲线来描述。Goodman 等(1968)最早引入了“法向刚度”和“切向刚度”的概念来分别描述法向应力对于法向位移的变化率和剪切应力对于剪切位移的变化率,并认为刚度值取决于节理面特性,如初始接触面积、粗糙峰分布情况及其强度与变形特性、表面粗糙程度、充填物

特性等。之后岩石节理法向非线性变形特性在静态单调加载条件下得到了广泛研究: Shehata (1971) 首先采用半对数函数模型进行模拟; 随后 Goodman (1975) 建议用双曲线模型来描述节理法向闭合量 d_n 和节理法向压应力 σ_n 的关系; 接着 Kulhaway (1975) 提出了另一种形式更为简洁的双曲线模型。在对闪长岩、石灰岩、砂岩、泥质粉砂岩等不同岩性岩石进行大量室内试验的基础上, Bandis 等 (1983) 指出节理法向变形与法向应力对数值在整个应力域中并非呈线性关系, 并和 Barton 等 (1985) 共同修正了 Goodman 模型, 建立了一种新的双曲线模型——BB 弹性非线性模型 (以下简称为“BB 模型”)。该模型简洁直观且参数易通过试验直接获得, 并能较好地反映节理变形的非线性特征, 在岩石力学与工程领域中被广泛运用。国内, 周建民等 (2000) 在石灰岩、辉绿岩、板岩试验数据基础上, 基于双曲线模型和对数模型提出了一种新的幂函数模型。Swan (1983)、Sun 等 (1985)、Matsuki 等 (2001)、Xia 等 (2003) 基于 Hertzian 接触理论, 也各自提出了能够反映岩石节理非线性变形特征的模型。与前述模型不同, 此类模型利用接触面积增大和接触体数量增加来反映变形的非线性, 但仍假设粗糙微粒经历线弹性变形。近年来节理动态加载条件下的变形特性研究也有所进展: Cai (2001) 在采用动态单轴压力实验机的节理岩石加载试验中, 在应变率为 $10^{-1} \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ (准静态) 以下时, 将静态 BB 模型推广至准静态条件。尤其值得一提的是, Cai (2001) 还在节理应变率为 $10^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ (动态) 时, 采用动态单轴压力实验机对岩石节理法向动态力学特性进行了更为广泛的实验研究, 发现 $\sigma_n - d_n$ 关系仍符合双曲线规律, 提出了 K_{ni} (节理初始切线刚度) 与 d_{ma} (节理最大允许闭合量) 随应变率变化的经验公式, 推广建立了动态 BB 模型并将其嵌入 UDEC 程序中。Yang 等 (2005) 利用灰泥材料人工制备节理, 进行 $10^{-1} \sim 10^3 \text{ MPa/s}$ 加载速率下的室内试验, 进一步验证了动态 BB 模型。Wang (2007) 基于试验拟合发现双曲线、指数函数、幂函数的拟合结果稍好, 半对数函数拟合结果很差, 同时建立了考虑率效应的节理动态经验本构模型。Zhao 等 (2000) 和 Zhao (2004) 认为天然岩石节理在地质历史中一般都经历多次变形, 故也采用 BB 模型研究纵波在具有非线性法向本构关系的单一及平行节理处的传播特征。俞缙等 (2007) 分别利用 BB 模型和经典指数模型研究了不同非线性节理变形行为下纵波的传播规律。目前学者们对准静态条件下 K_{ni} 与 d_{ma} 的物理意义和确定方式已基本达成共识, 但是随着对岩石节理法向变形特性研究的不断深入和试验仪器精密化程度的提高, 人们逐渐认识到以往模型对 $\sigma_n - d_n$ 曲线非线性程度的描述还很不完善。Malama 等 (2003) 对 Arizona 闪长岩、花岗闪长岩岩样进行节理法向加载试验时就发现, 在中应力水平条件下, 以往模型模拟结果与试验结果发生显著偏离, 并在经典指数模型基础上提出了统一指数模型 (generalized exponential model)。

对于法向循环荷载作用,最初 Goodman (1989) 假定卸载曲线与加载曲线重合,从而对于卸载过程和重新加载过程无需定义新的本构方程,适用于强度较高的岩体结构面,如较硬岩石的无充填节理。Jing 等 (1994) 假定卸载阶段的应力位移特性为线性关系,沿加载曲线的切线方向线性卸载,重新加载时仍采用双曲线函数,适用于断层、软弱夹层等强度较低的岩体结构面。Makurat 等 (1995)、Huang 等 (2002)、Xia 等 (2003) 对人工裂隙和天然岩石裂隙进行了法向循环加载试验。结果表明:卸载曲线也可以用双曲线函数较准确地模拟,同样以法向最大压缩位移为渐近线;初次卸载时法向应力位移卸载曲线急剧下降;循环加载将产生较大的残余位移;每次加载-卸载循环过程中,卸载刚度高于加载刚度;循环加载过程中整体呈现硬化的特征,并逐渐接近为非线性弹性模型。此外,Bandis (1990)、Boulon 等 (2002)、Souley 等 (1995) 都采用双曲线模型建立法向循环加载本构关系。但由于对卸载过程和重新加载过程法向起始刚度的假定各不相同,因此尚未能提出统一的法向循环加载本构方程。例如,对于重新加载过程,Boulon 等 (2002) 假定在法向应力为 0 时,重加载曲线的起始刚度按法向初始刚度取值,而 Souley 等 (1995) 假定这一刚度为前一循环的加、卸载曲线起始刚度的平均值。尹显俊等 (2005) 也对岩体结构面法向循环加载本构关系进行了相关研究,王光纶等 (2005) 对岩体结构面三维循环加载本构关系进行了研究。

1.2.2 节理、裂隙及孔隙等岩体缺陷对应力波传播的影响

应力波穿越岩石节理时会产生波速下降及波幅衰减现象,这已经被众多研究者的实验所验证。Seinov 和 Chevkin 很早就指出应力波衰减取决于裂隙的数量、宽度以及充填物的波阻抗。Morris 等 (1964) 通过现场及室内试验发现横截面有单节理的钻孔墙的声波测井信号振幅下降。Yu 和 Telford (1973) 发现单节理在受载荷情况下仍能反射 60Hz ~ 1kHz 入射波 96% 的能量。Kleinberg 等 (1982) 发现应力波穿越单节理时振幅下降并伴有波形转换。King 等 (1986) 进行了跨孔 (节理间距 0.2 ~ 0.5m) 纵波 (波长约 0.1m) 测试,发现与平行于节理方向应力波相比,穿越节理方向的应力波波速和波幅更小,波频更低。与此同时,相关理论也层出不穷。这些理论主要分为微裂隙的影响;节理 (众多共线微裂隙、微空隙和微接触体的集合体) 的影响两类。

1.2.2.1 微裂隙、微孔隙对应力波传播的影响

微裂隙对波的散射作用已经通过反射、透射系数的测定所证实。Mal (1970)、Martin 和 Wickham (1981, 1983)、Achenbach 等 (1982) 分析了硬币状 (penny-shaped) 单一微裂隙的散射作用。之后 Boström 和 Eriksson (1993) 用弹簧界面验证了双微裂隙的散射作用,Angle 和 Achenbach (1985) 研究了共列裂隙对法向及斜向入射波的散射。此外,Achenbach 和 Kitahara (1986) 对共列球形孔

隙, Angle 和 Achenbach (1987) 对双列裂隙, Achenbach 和 Li (1986a) 对多列裂隙, Achenbach 和 Li (1986b) 对单列斜向掩蔽物情况, Mikata 和 Achenbach (1988) 对单列斜向裂隙情况, Piau (1979)、Sotiropoulos 和 Achenbach (1988)、Zhang 和 Gross (1993)、Eriksson 等 (1995) 对随机分布裂隙等都进行了详细的研究。Rinehart (1981) 指出对于裂隙长度比间距大很多的贯穿裂隙, 可用弹性波在平面界面上的透反射分析方法研究。由于对如此复杂的问题解析解很难得到, 因此数值方法 (如边界元法) 被大量运用。Morris 等 (1979) 对非线性裂隙的影响进行了计算并发现了高频谐振 (higher harmonics) 现象。Hirose 和 Achenbach (1993) 采用时间域边界元法对非线性变形的单裂隙的散射作用进行了计算, 发现高频谐振现象在远场中仍有体现。此外, Capuani 和 Willis (1997) 对一维瞬态波入射线性与非线性变形平面界面进行了比较。钱七虎、王明洋等 (1994) 还利用动力有限元法研究三相介质饱和土自由场中爆炸波的传播规律及其在障碍物上的反射载荷。

除解析与数值方法以外, 等效介质理论 (equivalent medium theories) 也被广泛地运用于波在两相介质和裂隙 (裂隙尺寸远小于入射波长) 介质的传播问题中。该理论中岩块与裂隙共同被等效地看作为连续、均匀、各向异性介质, 通过波动方程, 利用有效弹模 (effective elastic moduli) 建立与波速、衰减的联系, 揭示不同的衰减机制。White (1983) 介绍了对于散射介质的复合模量 (complex moduli) 法 (两个独立复合模量要求各向同性介质, 介质各向异性程度决定模量个数)。

Biot (1956) 最早研究了波在流体饱和 (fluid-saturated) 孔隙介质中的传播问题, 他就饱和平行圆柱孔隙对波衰减的影响提出了许多重要的假设。他利用液体与固体骨架间的黏性界面来体现非弹性特性, 导出了依赖频率的衰减系数, 并发现其在低频条件下与 f^2 、在高频条件下与 $f^{1/2}$ 成正比。之后, McCann 等 (1985) 将 Biot (1956) 理论扩展到实际大小分布孔隙的液体饱和 (liquid-saturated) 岩体中, 并发现衰减系数在 10Hz ~ 2.25MHz 范围内与频率呈线性关系。Eshelby (1957) 基于能量考虑建立了有效弹模 (effective elastic moduli), 研究了含椭圆体的各向同性介质内部及外部的应力场、应变场。该方法后来被 Nur 和 Simmon (1969)、Nur (1971) 推广到各向异性及裂隙分布的岩石介质中去, 其中波速的各向异性通过考虑随压力变化的裂隙参数的方法来评价。Walsh (1965) 假设裂隙处无应力场相互作用, 提出残余应变能法计算有效弹模, 该法仅适合于小裂隙密度。O'connell 和 Budianski (1974) 提出了一种自相容方法来计算含随机方向性的椭圆裂隙固体的有效弹模, 此时考虑了高度集中裂隙的应力场相互作用, 且是在干性或部分饱和情况下计算波速。O'connell 和 Budianski (1977) 运用同样方法对流体饱和裂隙介质的波衰减作用作了进一步研究。

Garbin 和 Knoff (1973, 1975) 提出在随机分布圆形空裂隙及液体饱和裂隙介质中, 考虑入射角及波偏振现象的波速变化时的有效模量计算方法。Chatterjee 等 (1980) 运用同样方法研究了充填黏性液体的平行硬币状裂隙对波速、波散射及黏性衰减的影响, 并指出在低频情况下, 液态黏性比散射对波的影响更为显著。Hudson (1980, 1981) 提出一种滤波法 (method of smoothing) 计算有效弹模, 进而研究裂隙尺寸与分布集中程度都较小的介质的波速及衰减问题。研究表明波散射造成的衰减不仅与波频有关, 还与裂隙密度、裂隙半径与波长比值的三次方成正比。Hudson (1986, 1990)、Hudson 和 Knopoff (1989)、Peacock 和 Hudson (1990) 将滤波法推广到裂隙密度无序且含多方向裂隙列的介质中。Hudson (1988) 修正了解析表达式来评价部分饱和椭圆裂隙介质的波衰减, 结果显示该情况因液体的流动而不同于完全干性和完全饱和裂隙情况。后来 Xu 和 King (1989, 1990) 的实验证实了 Hudson (1981) 理论, 并指出品质因子比波速对裂隙介质更为敏感。Ass'ad 等 (1993) 进行了随机裂隙分布介质中横波 (S 波) 散射实验, 与 Hudson (1981) 理论计算结果比较后发现在裂隙密度为 7% 时吻合良好, 但在裂隙密度在 10% 以上时偏差很大。Dzhebani 的试验结果与 Knopoff 计算出的平面纵波 (P 波)、横波 (S 波) 传过无限介质中无限薄润滑裂缝的传播系数基本吻合。国内文献中, 张光莹 (2003) 对含分布裂缝岩石的弹性本构及波传播特性做了研究。刘斌等 (1998) 对不同围压下孔隙度不同的干燥及水饱和岩样中的纵横波速度及衰减特性进行了研究。赵明阶 (1998) 进行了裂隙岩体在受荷条件下的声学特性研究。毕贵权 (2004) 进行了裂隙介质中波传播特性试验研究。

Mavko 和 Nur (1975)、O'Connell 和 Budianski (1977) 提出液体喷射理论来解释波在完全饱和裂隙岩体中的衰减现象。后来 Mavko 和 Nur (1979) 又提出气泡在不完全饱和裂隙岩体中的运动机制。Johnston (1978) 又对干性及饱和裂隙岩体中波的衰减 (归结于裂隙面和颗粒边界的滑移摩擦) 作了深入研究。Hudson (1981) 认为裂隙对波的散射及依赖频率的衰减系数与 Chatterjee 等 (1980) 推导出的结果相同。Miksis (1988) 基于孔隙与所含液体的接触线运动 (contact line movement) 研究波的衰减。Murphy (1982a, 1984b, 1984) 通过对颗粒及裂隙边界的滑移实验验证了波的衰减, 之后 Mochizuki (1982) 又将 Murphy 的实验结果与 Biot 模型 (1956) 的理论预测进行比较, 并阐明其中的差异是由于实验频率范围内不同的衰减机制造成的。Johnston 等 (1979) 和 Crampin (1981) 详细讨论了其衰减机制, 并得出摩擦消散主要存在于超声频段, 流体喷射流动主要存在于低频范围, 显然衰减机制的类型还与裂隙特性及饱和条件有关 (例如摩擦更容易发生于窄裂隙, 而气泡运动只发生在部分饱和裂隙中, 喷射流只发生于完全饱和裂隙中)。Spencer (1981)、Jones 和 Nur (1983)、Winkler