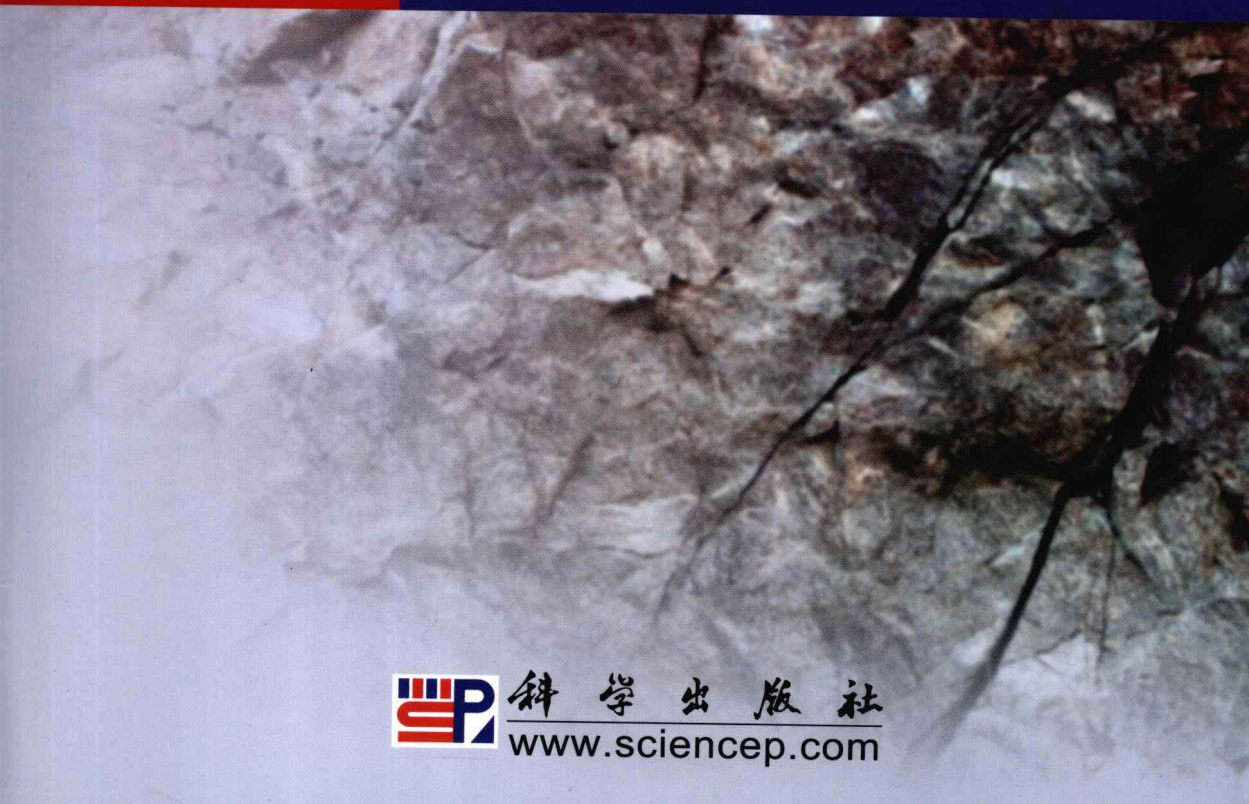




赵明阶 著

受载岩石混凝土的声学特性及其应用



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

受载岩石混凝土声学特性是研究荷载作用下岩石和混凝土介质中的声波传播特性以及声学参数随应力的变化规律的课题,它涉及岩石混凝土力学、波动理论、数字信号处理、实验力学及计算数学等方面的知识。本书是作者近 10 年来在受载岩石混凝土声学特性及其应用方面的最新研究成果总结,内容包括绪论、固体连续介质中的超声波、岩石中的超声波及其影响因素分析、岩石在受载条件下的声学特性试验研究、岩石声学参数与应力相关性理论模型研究、裂隙岩体的波动参数与应力相关性理论模型研究、声信号处理技术及波谱参数随应力的变化规律研究、混凝土在受载条件下的声学特性试验研究、混凝土声学参数与应力相关性的影响因素分析、裂隙岩体强度与变形参数的超声波预测研究、高边坡预应力锚固荷载的超声波测试技术研究等。

本书可供土木建筑、岩土工程、地质工程、地球物理勘探、水利水电等专业的教师、工程技术人员、研究生及高年级本科生阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

受载岩石混凝土的声学特性及其应用/赵明阶著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-023526-8

I. 受… II. 赵… III. ①超声波—应用—岩石—应力测定②超声波—应用—混凝土—应力测定 IV. TU45 TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 187002 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 2 月第一次印刷 印张: 15

印数: 1—2 500 字数: 288 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新蕾))

前 言

超声波测试技术是近 40 年来发展起来的一种新技术,目前主要通过测定超声波穿透岩石或混凝土后的声波波速和衰减系数了解岩体或混凝土的物理力学特性及结构特征。与静力学方法相比,超声波测试技术具有简便、快捷、可靠、经济及无破损等特点,因而这种测试技术已得到国内外土木工程界的广泛重视,目前已经较成功地用于岩石混凝土动弹性参数测试、简单岩石或混凝土结构模型参数和岩石混凝土质量评价等问题。

过去,人们对岩石混凝土的声学特性的理论研究主要集中在岩石混凝土不受荷载作用时的声波传播规律方面,目前大量的工程应用,如岩石工程中的完整性系数、风化系数、裂隙系数、松动层厚度确定、岩体稳定性评价、岩体加固质量的检测以及混凝土工程中的密实程度评价和裂缝检测等,都是依据这一理论基础。然而不论是工程岩石还是混凝土结构在工程施工和运营中,都是处于一定的荷载作用下,并且这些荷载可能受到各种因素影响而发生改变,此时应用超声波测试技术来评价岩石混凝土的工程特性就必须有相应的理论支撑,该理论来源于对受载岩石混凝土声学特性的研究。

由于对受载岩石混凝土声学特性的研究,有利于应用声波测试技术解决岩石混凝土工程中与应力状态相关的较复杂问题,如岩石工程中各种应力(天然应力、围岩应力、支承压力等)的测量与评价、工程岩石与混凝土的变形与强度预测、混凝土构件的受力状态与损伤评定以及边坡锚固荷载的动态预测等,因此受载岩石混凝土声学特性的研究成为近年来国内外学者研究的一个热点问题。目前在受载岩石混凝土声学特性的研究方面还缺乏系统的研究和完善的理论,特别是对于岩石混凝土的声学特性与应力状态的相关性、对于与应力状态相关联的加载和卸载过程、对于声波信号中的信息如何应用等,还是尚未解决的问题,因而目前的声波测试还难以解决声波与岩石力学特性相关的较复杂问题,而这正是岩石工程中最关心的,这就阻碍了超声波测试技术在岩土工程领域的更广泛的应用。

针对实际工程岩石和混凝土均处于一定的应力环境且在施工过程中对其应力环境造成扰动这一现象,作者近十年来对受载岩石混凝土声学特性进行了较系统的研究,同时基于理论成果初步开展了一些应用研究,提出了裂隙岩体的超声波分类及强度与变形参数预测方法、高边坡预应力锚固荷载的声波测试技术等。为便于交流,作者将近十年来在受载岩石混凝土声学特性及其应用方面的最新研究成果进行了详细总结,并撰成此书,希望本书不仅能为进一步完善岩石混凝土的超声

波理论、促进超声波测试技术逐步进入定量化起到重要的推动作用,同时也为超声波测试技术在边坡工程、地下工程等施工过程中的超声监测、稳定性评价以及岩体强度预测、地应力测量等方面的应用提供可参考的理论依据。

研究过程中分别得到教育部重点科技项目、重庆市科技攻关项目的资助。重庆交通大学刘洋博士、林军志博士、杨洪武硕士承担了部分试验研究工作。在此,著者对他们一并表示衷心的感谢和诚挚的谢意。

由于著者学识所限,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2008 年 12 月于重庆交通大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石及混凝土工程中的超声波测试技术	1
1.2 岩石声学特性研究现状	4
1.3 混凝土声学特性的研究现状	11
1.4 受载岩石混凝土声学特性的研究内容	13
参考文献	17
第 2 章 固体连续介质中的超声波	22
2.1 固体连续介质的本构方程	22
2.2 连续介质中的超声波与弹性参数的关系	27
2.3 超声波传播过程中的能量衰减	31
2.4 超声波的反射和折射	33
参考文献	38
第 3 章 岩石中的超声波及其影响因素分析	39
3.1 引言	39
3.2 岩石介质中的微裂隙	39
3.3 岩石超声波速的影响因素分析	41
3.4 裂隙对超声波传播的影响	44
3.5 岩石超声波与应力相关性的机理分析	47
3.6 本章小结	52
参考文献	53
第 4 章 岩石在受载条件下的声学特性试验研究	54
4.1 试验系统及测试设备	54
4.2 超声波波速与衰减系数的测定	55
4.3 岩石在单轴加卸荷过程中的声学特性	56
4.4 岩石在三轴加卸荷过程中的声学特性	62
4.5 岩石在劈裂受拉过程中的声学特性	66
4.6 本章小结	67
参考文献	68

第 5 章 岩石声学参数与应力相关性理论模型研究	69
5.1 引言	69
5.2 单轴受荷条件下含微裂隙岩石的变形特性	70
5.3 岩石的孔隙率及其等效弹性参数	84
5.4 单轴受荷条件下微裂隙岩石的声学特性	87
5.5 三轴受荷条件下微裂隙岩石的变形特性	92
5.6 三轴受荷条件下微裂隙岩石的声学特性	104
5.7 理论模型与试验结果的对比	107
5.8 本章小结	112
参考文献	113
第 6 章 裂隙岩体的波动参数与应力相关性理论模型研究	114
6.1 引言	114
6.2 裂隙岩体的地质概化模型	114
6.3 裂隙岩体的等效弹性参数与波动参数研究	115
6.4 裂隙岩体在受荷条件下的变形特性研究	118
6.5 裂隙岩体在受荷条件下的波动特性的理论模型	128
6.6 裂隙岩体在受荷条件下的波动特性的试验研究	133
6.7 本章小结	140
参考文献	141
第 7 章 声信号处理技术及波谱参数随应力的变化规律研究	142
7.1 引言	142
7.2 傅里叶变换与声波信号处理	143
7.3 小波变换理论与声波信号处理	145
7.4 岩石超声波波谱参数随应力的变化规律	151
7.5 本章小结	159
参考文献	160
第 8 章 混凝土在受载条件下的声学特性试验研究	162
8.1 引言	162
8.2 混凝土材料声脉冲速度影响因素	162
8.3 模型试验方案设计	166
8.4 受载混凝土试件的超声波测试	170
8.5 混凝土材料声学参数随应力的变化规律分析	173
8.6 本章小结	182
参考文献	183

第 9 章 混凝土声学参数与应力相关性的影响因素分析	184
9.1 引言	184
9.2 粗骨料粒径对混凝土声学参数与应力相关性的影响分析	184
9.3 粗骨料种类对混凝土声学参数与应力相关性的影响分析	187
9.4 水灰比对混凝土声学参数与应力相关性的影响分析	189
9.5 砂率对混凝土声学参数与应力相关性的影响分析	192
9.6 本章小结	194
参考文献	195
第 10 章 裂隙岩体强度与变形参数的超声波预测研究	196
10.1 引言	196
10.2 微裂隙岩石的损伤特性及其强度预测	197
10.3 裂隙岩体的超声波分类及参数预测	200
10.4 三峡工程船闸高边坡岩体的超声波分类及强度与变形参数的 估计	205
10.5 本章小结	207
参考文献	207
第 11 章 高边坡预应力锚固荷载的超声波测试技术研究	209
11.1 引言	209
11.2 高边坡预应力锚固的物理效应	209
11.3 预应力锚固体系的力学特征及影响因素	213
11.4 锚固荷载的超声波测试技术	216
11.5 超声波测试技术的工程应用	218
11.6 本章小结	228
参考文献	229
结束语	230

第 1 章 绪 论

1.1 岩石及混凝土工程中的超声波测试技术

1.1.1 岩石工程中的超声波测试技术

1821 年法国学者纳维尔(Navier)建立的弹性固体动力平衡方程,奠定了固体内弹性波传播理论的基础,随后菲涅尔提出的用弹性波传播理论中的横波解释光的偏振现象,又对弹性波理论有很大的促进作用^[1]。1911 年 Love 解释了质点运动平行于边界面的 Love 面波^[2],弹性波传播的数学理论便趋完善,形成了经典的弹性波动理论。到第二次世界大战后,随着电子技术的长足发展,新材料的出现引起了工程界对非弹性体的力学理论的兴趣,波动理论成为研究新材料力学特性的强有力的工具,人们对波动领域里的兴趣空前增长,出现了许多实验和理论上的创造性论文;从单层介质发展到多层介质,从均匀弹性介质发展到非均匀、非完全弹性介质,从单相介质发展到多相介质,从正演到反演,所解决的问题越来越符合实际,研究的程度越来越深入,手段和方法亦越来越完善^[3,4]。

波动理论在岩石工程中的应用,最初主要是针对工程地质勘测中基岩面、风化层确定,采用浅层地震勘探法^[5];后又用于确定岩体或岩块的动弹性参数。到 20 世纪 60 年代末,由于超声波技术的发展,在岩石工程中形成了超声波测试技术,与地震法相比,超声波测试技术具有频率高、分辨率好、振源易控制、完全无破损等优点,因而受到岩石工程界的青睐,已被广泛应用于地质、水电、煤炭、交通、石油、建筑等各个行业的岩石工程中。

1. 岩石(体)弹性参数测定

利用声波测试技术记录声波的走时,测得岩石(体)的纵、横波速,对于各向同性岩石介质,其动弹参数由下式计算^[6]:

$$\begin{cases} E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - 2V_s^2} \\ \nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \end{cases} \quad (1.1)$$

式中: E_d 、 ν_d 为岩石动弹性模量和动泊松比; V_p 、 V_s 为岩石的纵、横波速; ρ 为岩石的密度。

对裂隙岩体,由于其各向异性特征,式(1.1)不再适用。此时可将岩体视为正交各向异性或横观各向同性介质,利用各主轴方向上的波速与弹性参数的关系进行岩体宏观力学参数的超声波测定。如李海波等对龙门石窟区的波动测试就是横观各向同性情况^[7];李建林对三峡船闸花岗岩体的宏观力学参数的声波测定则采用了正交各向异性模型^[8]。对于各向异性的岩体,由于要获得特殊方向上的波速,从而给实际工程中的波动测试带来困难,因此目前波动理论在各向异性岩体中的应用实例尚不多见^[9]。

2. 岩体结构分类^[10]

目前在岩体分类中,声波法已成为一种必不可少的手段。用声波进行岩体分类的主要参数有波速、完整性系数、风化系数、裂隙系数等。

一般而言,岩体中波传播速度快,表明岩体致密、坚硬、完整、风化轻;反之波速低,表明岩体疏松、软弱、破碎、结构发育、风化严重。以中科院地质所的分类法为例:当岩体波速小于 2m/ms 时,岩体为散体结构;当岩体波速为 2~3.5m/ms 时,岩体为整体结构。除此之外,国内外还有许多不同的分类方法和标准。

岩体的完整性系数是由岩体波速与岩块波速的平方比确定的,用 K_w 表示,其定义为 $K_w = (V_{\text{岩体}}/V_{\text{岩石}})^2$ 。当 $K_w < 0.1$ 时,岩体为散体结构;当 $0.1 < K_w < 0.3$ 时,岩体为碎裂结构;当 $0.3 < K_w < 0.6$ 时,岩体为层状结构;当 $K_w > 0.6$ 时,岩体为整体块状结构。

岩体的裂隙系数又称岩体的龟裂系数,通常用 L_m 表示,其定义为 $L_m = (V_{\text{岩石}} - V_{\text{岩体}})/V_{\text{岩石}}$,它反应了岩体的裂隙化程度;而风化系数 $K_f = (V_{\text{新鲜}} - V_{\text{风化}})/V_{\text{新鲜}}$,则反应岩石的风化程度。它们在岩体分类中均被广泛地采用。除此之外,亦可用纵横波速比,如当 V_p/V_s 为 1.732 时为完全弹性介质;当 $V_p/V_s > 2.5$ 时为破碎岩体;当 $2.0 < V_p/V_s < 2.5$ 时为中等岩体。

3. 岩体松动层厚度确定及岩体稳定性评价

在岩体开挖过程中,开挖扰动了原岩应力状态,使岩体表面的应力释放,从而在岩体表面附近出现一个由松弛到集中的层状分布,工程中称为松散层,对于地下开挖称为围岩松动圈。它们的厚度直接影响到岩体的稳定性,必须对其作定量测定,声波测试方法主要测试声波波速随深度的变化,取岩体原始状态(未扰动)的波速为划分标准。凡低于此值均为松动圈或松散层,由此圈定出松散岩体的范围,为岩体的稳定性评价及其支护设计提供依据。目前岩石工程中这方面的应用甚多^[11~13]。

4. 岩体加固质量的检测

为了提高岩体的弹性模量,降低渗透率,提高隔水性能及岩体的完整性和稳定

性,常对工程岩体进行灌浆、充填等加固处理。为了了解这种加固处理的效果,超声波测试技术成为一种行之有效的方法,目前已广泛应用于水电工程施工中^[14~17]。

5. 围岩支承压力及地应力测试

由于应力与波速的关系到目前仍无一个完善的理论模型,因而在地应力测试中的应用实例尚不多见。一些学者通过现场声波测试岩体中的破碎区、塑性区及弹性区来确定岩体的应力松弛区和应力集中区,从而定性分析出岩体所处的应力状态,如吴少武等^[18]、周楚良等^[19]的工作,这种分析不能给出定量结果;另一些学者则首先对现场岩芯试件进行实验标定,取得波速与应力的拟合关系,然后对现场进行声波测试,运用测试曲线与标定曲线反求围岩压力或岩体地应力,这种方法可以给出地应力测量的定量结果^[20,21]。

1.1.2 混凝土工程中的超声波测试技术

在混凝土工程中,超声检测是最主要无损检测方法之一。在国外始于20世纪40年代末,我国于20世纪50年代后期开始进行这项技术的研究与应用,并取得了相当的进展,近几年来发展尤为迅速。水电、交通、建筑、铁道、冶金等部门均广泛地开展应用研究,包括葛洲坝水利枢纽工程在内的众多工程都曾采用超声检测技术进行检测,取得了很好的技术经济效益。交通部颁发的《港口工程混凝土试验方法》、水利电力部颁发的《水工混凝土试验规范》均已将超声检测混凝土强度和裂缝的方法编入试行。目前,超声波可应用于混凝土以下几个方面的检测:

(1) 检测混凝土强度^[22]。这包括混凝土结构物在线强度、强度发展与变化有关的检测。超声波检测混凝土强度,是根据测定的混凝土试件的平均脉冲速度与混凝土试件的破坏抗压强度数理统计的相关性来推定同等级混凝土的强度(表1.1)。

表 1.1 不同质量混凝土传播速度对照表

传播介质	传播速度/(m·s ⁻¹)
质量差的混凝土	3000
质量一般的混凝土	4000
质量好的混凝土	5000

由于水化作用 and 环境影响,混凝土强度会随着时间增长而增加,因此通过连续的脉冲速度的测定,也可对混凝土早期强度进行确定。

(2) 检测混凝土材料厚度^[23,24]。如混凝土路面板厚度检测、隧道喷锚支护层

厚度等。超声波在不同密度的介质中传播速度不同,当它通过两种不同介质的分界面时,会产生折射和反射现象。在远场范围内,超声波的波形可以视为平面波,超声波折射和反射现象遵循的规律类似于光波的折射和反射规律。

(3) 检测混凝土裂缝。探测混凝土受荷过程中裂缝的出现、变化过程,判断受荷的极限,探测结构物上裂缝的深度、走向^[25]。另外,也可利用检测裂缝的类似方法检测混凝土接缝质量以及灌浆、浸渍处理效果等。

(4) 探测混凝土内部缺陷(空洞、架空、疏松区)的部位及其大致范围,评价新老混凝土黏结质量^[25]。用超声法来进行混凝土内部缺陷、密实度的检测,主要是基于超声波在真空或空气中的传播速度远远小于在混凝土中的传播速度,因此当超声波在混凝土中传播遇到缺陷或不密实区域时产生绕射或直接穿过缺陷低速介质时,其声时会发生变化而进行的定量测量。

基于此原理,刘金伟认为,当超声波穿过新老混凝土结合不好的区域时也会发生声时变化,所以可以利用这种方法来评价新老混凝土结合面的质量^[26]。

(5) 测定混凝土动弹性模量。为估算动弹性模量 E_d ,罗骥先^[27]提出了采用常规纵波超声换能器,以表面平测法测定混凝土表面波速来确定其动弹性模量 E_d 和泊松比 μ 的新方法,可在各种混凝土结构物上直接测得其动弹性模量。

固体材料的动弹性模量与其表面波速之间的关系为

$$E_d = \frac{2(1 + \nu)^3}{(0.87 + 1.12\nu)^2} \rho V_y^2 \quad (1.2)$$

式中: ρ 为固体的密度; V_y 为表面波速度; ν 为泊松比。

(6) 其他方面应用,如测定预应力混凝土结构中混合材料充填程度、锚固荷载监测等^[28,29]。

1.2 岩石声学特性研究现状

岩石的声学特性是岩石超声波测试技术的理论基础,对岩石声学特性的研究有利于运用超声波测试技术解决岩石工程中的复杂力学问题。国内外广泛深入地开展岩石声学特性研究是在 20 世纪 60 年代初才开始的,总结起来可分为两个方面,即岩石的超声波速研究和岩石的超声衰减理论研究。这两个课题的研究便形成了后来的两种超声波测试技术,即波速测量法和衰减测量法。岩石超声波速法是通过测定超声波在岩石内的传播速度反映岩石工程质量的好坏、岩石材料的损伤程度、岩石的各向异性及其受力状态。因此对岩石超声波速的研究又分为岩石动弹性参数研究、岩石各向异性特征研究及岩石声速与应力的相关性研究等三个方面。岩石超声波衰减法是通过测定超声波在岩石中传播时的能量耗散来反映岩石的内部结构及力学特性,但由于对衰减理论研究的不足,因而目前对岩石超声波

衰减的研究成果远不如岩石超声波速的研究成果丰富。为此本节从下面几个方面对近 40 年来国内外学者在岩石声学特性上的研究成果进行综述。

1.2.1 岩石(体)超声波速的各向异性特征

对岩石工程中研究的对象是岩石(体),都有一个基本特征,即介质中存在节理和裂隙,且这些节理、裂隙均具有一定的方向性,从而使得岩石(体)呈现各向异性特征^[30],岩石的力学特性在不同方向上的差异极其明显^[31,32]。在岩石介质中传播的超声波也将由于岩石本身的各向异性而呈现出方向性,岩石(体)超声波速的各向异性特征研究就是为了弄清超声波速的方向性与岩石(体)的各向异性特征之间的关系,以达到利用超声波速的测试结果确定工程岩体的结构特征的目的。

较早对岩石超声波速的各向异性特征进行专门研究的是 Thill,他首先研究了声波纵波速度随岩石中裂纹方向的变化规律;后来又提出了确定岩石波速各向异性的方法^[33]。中国科技大学席道瑛等对砂岩的变形各向异性研究表明^[34],由波速的各向异性特征推测的变形各向异性与实验吻合良好,同时得到了波速随裂纹方向变化规律是一个椭圆。为了对岩石中超声波速各向异性进行定量化理论研究,荷兰学者 Sayers 引入了极图反演理论:1965 年 Roe^[35]在研究多晶体材料的微晶结构时,采用 X 射线穿透晶体,运用波速各向异性定义波速方向分布函数,同时微晶的排列方向亦可用一方向分布函数表示,然后将两种方向分布函数展开成球面调和级数,根据勒让德多项式的性质及角动量守恒原理,建立两种方向分布函数之间的关系,从而以运用波速方向分布函数来计算晶体方位极图。1966 年 Roe^[36]在上述理论上计算了立方对称晶体的极图。在 Roe 的研究基础上 Sayers^[37~40]将该理论引入到金属材料的超声检测中,并建立起弹性常数与分布函数的关系。1988 年 Sayers^[41]开始将这一理论引入岩石的超声波测试中,通过数值计算发现声波极图与裂纹极图具有良好的对应关系;后来 Sayers^[42~45]进一步研究了裂隙岩体的力学机制及损伤过程,通过不同压力后岩石声速的各向异性特征,反推岩石在加载过程中的力学特性的变化规律,即所谓的极图反演理论,极图反演理论完全是一种数学处理方法,虽然它仅能作半定量分析,解决裂隙方位问题;但对应用声波了解岩体的结构特征已基本满足工程应用的要求。

对节理岩体波速各向异性研究的另一方法是 Oda 提出的,他首先从岩体节理,裂隙的角度出发提出了用裂隙张量表示岩体中裂隙的几何形态(裂隙密度、尺寸、方位),并指出如果把岩体看作各向异性来处理,必须首先考虑裂隙的几何形态^[46,47],1986 年 Oda 进一步建立裂隙张量与波速各向异性之间的关系,引入一表征波速随各向异性体的方向而变化的张量 V_{ij} ,在实验的基础上建立了裂隙张量 F_{ij} 与 V_{ij} 之间的经验关系^[48]。1988 年 Oda 对裂隙岩体的弹性特性进行实验研究,运用裂隙张量计算了裂隙岩体的宏观力学参数^[49];在此基础上 Sayers 建立了

横观各向同性裂隙张量计算了裂隙岩体(页岩)的裂隙张量的波速计算方法^[50],这种方法要求测定特殊方向上的波速,并且对裂隙张量的计算并不能完全由波速确定,因为计算过程中仍需要已知裂隙的尺寸参数,故而在实际应用中遇到困难,同时这种方法假设无裂纹的相互作用,仅对小裂纹密度适用。

对岩石(体)的声速各向异性的研究除了了解岩体的结构特征外,亦可对岩石(体)的渗透性进行预测,如 Gibson^[51]、King 等^[52]的工作,但在理论上仍不够完善。

1.2.2 岩石(体)弹性参数的超声波速预测

运用超声波波速预测岩石(体)的动弹性参数,对岩体工程中宏观力学参数的提取具有重大的实际意义。岩石(体)弹性参数的超声波速研究就是解决岩石弹性参数与超声波速之间的关系问题。对于均匀各向同性的岩石介质可以应用式(1.1)计算出介质的弹性常数(E, ν, G)或拉梅常数,由于该式理论严密,计算简单,因而目前的工程应用大多数是将岩石看作均匀各向同性介质处理。

对于各向异性的裂隙岩体,超声波速与介质的力学参数之间的关系变得复杂,许多学者在这方面已做了大量的研究工作。Walsh 从断裂力学的裂隙应变能释放率和裂隙能量平衡原理出发,建立了裂隙密度与介质的有效弹性参数之间的关系^[53];同时 Connell^[54], Hudson^[55] 和 Kemeny^[56] 等亦作了类似的研究;1976 年 Budiansky 和 O'Connell 又从能量原理出发提出了自一致理论(the self consistent method)^[57],1985 年 Zimmerman 运用修正的自一致理论研究了裂隙与弹性常数之间的关系^[58];1993 年 Hu 和 Huang 在此基础上建立起横观各向同性裂隙岩体和具有平行及正交裂隙组的岩体的等效弹性参数与裂纹密度之间的关系^[59]。1995 年王宏图引入弹性平面波,建立了裂纹密度、等效弹性参数以及波速三者之间的理论关系,从而解决了各向同性、横观各向同性、正交各向异性岩体介质力学参数的波速计算问题^[21]。除上述研究外,对各向异性的裂隙岩体的等效弹性参数亦可运用应变的体积平均进行研究,如 1991 年 Sayers 等从单一裂隙的变形特性出发采用应变体积平均并考虑裂纹间的相互作用,建立了裂隙张量与等效弹性参数之间的关系^[60];1995 年他又建立了波速、裂纹张量以及等效弹性参数之间的关系^[50]。这些理论关系的建立为裂隙岩体有效弹性参数的超声波波速预测奠定了理论基础。

由超声波波速获得的裂隙岩体动力弹性参数与静力弹性参数之间的关系,国内许多学者作过大量的实验对比研究,获得了许多经验关系。一般而言,岩石的动弹性模量大于静弹性模量,动、静弹性模量之比一般在 1.2~1.8 之间;但对于不同的地区和不同的岩石,其经验关系不尽相同。图 1.1 是 Coon 对岩石动、静弹性模量实验结果对比^[9];图 1.2 是现场岩石动、静弹性模量测试结果对比^[9];1990 年云

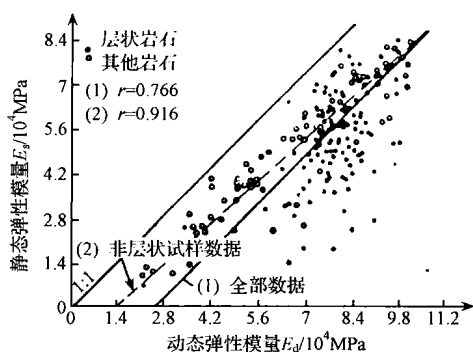


图 1.1 岩石动静弹性模量比较

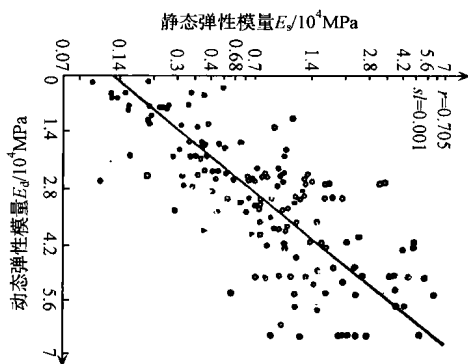
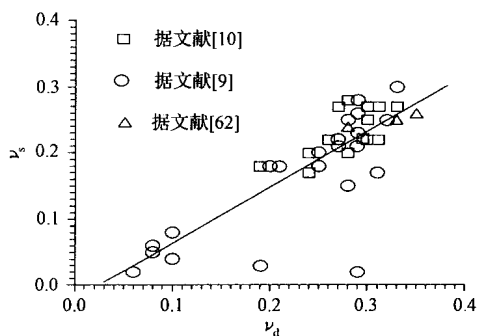


图 1.2 现场岩石动静弹性模量比较

南省水电设计院的阮福对云南省部分岩石作了动、静弹性模量对比分析,其实验结果表明^[61]:砂岩为 $E_s = 0.079 + E_d$; 板岩为 $E_s = 1.032E_d + 0.089$; 灰岩为 $E_s = 1.07E_d - 0.953$; 泥岩为 $E_s = 1.088E_d - 0.487$ 。除此之外,类似的研究还有许多,如文献[9]给出的动、静弹性模量的回归方程:花岗岩、闪长岩类为 $E_s = 1.162E_d + 1.692$; 大理岩类为 $E_s = 1.05E_d + 5.4$; 磁铁矿类为 $E_s = 1.235E_d - 4.79$; 玄武岩类为 $E_s = 0.9E_d - 4.8$; 合镍橄榄岩类为 $E_s = 0.91E_d + 5.068$; 混合岩、变质岩类为 $E_s = 0.99E_d - 1.963$; 片岩、千枚岩、凝灰岩、长石砂岩类为 $E_s = 0.73E_d + 7.83$ 。这些结果表明:动、静弹性模量之间可以用一个线性关系表示。与弹性模量的动、静分析相比,对泊松比的动、静对比分析研究较少,本文收集了 40 个实验结果经回归分析如图 1.3 所示,可以看出动、静泊松比之间仍然可用线性关系来近似描述。

图 1.3 动、静泊松比数值对比(ν_s 为静泊松比, ν_d 为动泊松比)

关于波速预测岩石(体)的弹性参数的理论正趋于完善。但由于在实际工程中测量上的困难,因此许多实际应用问题仍有待进一步的研究。

1.2.3 岩石(体)超声波速与应力的相关性

岩石(体)超声波速与应力的相关性研究,是近年来众多学者研究的热点,亦是理论研究中的难点,但至今未得到理论上的完善的力学模型。早在 20 世纪 60 年代 Birch 在研究岩石处于静水压力状态下弹性波速时指出,弹性波随围压的增大而增加,当围压达到一定值后,波速的增加量减小^[63,64]。Walsh 等的研究亦表明,岩石中微裂隙的变化影响岩石的力学特性,也改变了岩石介质中弹性波的传播速度^[65,66],同时 Simmons 在研究介质的横波波速时也得到相同的结论^[67]。岩石在受压过程中,岩石中的裂纹发生闭合,从而影响其波速的变化。Singh 对岩石在轴向循环荷载下声速的研究结果证实这一点,轴向波速随轴压增加而加大,而横向波速则随轴压增大而减小;在同一应力水平,循环次数的增加,轴向波速变化减小而横向波速变化增大,显然其原因与裂纹的闭合有关^[68]。Nur 和 Simmons 在研究双轴应力状态下波速的各向异性时指出:在一定的双轴应力组合范围内。波速与应力不是单值相关的关系,不同的应力组合在同一方向上可以产生同样的波速^[69]。Sayers 在一般三轴加压力下进行了波速与应力的关系研究(其应力条件为 $\sigma_2 = \sigma_3 < \sigma_1$)^[45]。国内对应力-波速相关性的研究开始于 20 世纪 70 年代,高龙生等对中国大陆岩石标本进行高压压下的超声波速研究^[70],蔡忠理对花岗岩在单轴压缩过程中进行声学特性研究^[71]等都取得了可喜的研究成果。

上述对岩石(体)超声波速与应力的相关性的研究都是在实验基础上进行的定性分析,为了获得理论上的相关关系,许多学者做了大量的工作。如 Nur 从岩石中的微裂纹闭合出发研究了岩石在单轴加载条件下等效柔度系数的各向异性特征随应力的变化规律,并利用声波测试来描述波速与应力的关系^[72],严格地讲这种关系只适于岩石的压密阶段;Mao 等^[73],Su 等^[74]在此基础上将波速随应力的变化关系用一个二次函数来描述,并对多种岩石进行了标定实验,进而利用这种关系发展了岩体应力测量中的超声波速测量方法;黄承贤等^[62]在研究围压下弹性波速时,曾采用 Biot^[75]的增量变形力学理论推出具有初应力状态的岩石波速计算公式,但却无法与岩石的细观力学参数相联系;1995 年王宏图以裂隙密度和有效弹性参数随应力的变化为特征建立了岩石在单轴加载和等围压加载过程中压密阶段声速与应力的理论关系,采用了菱形裂隙模型计算裂隙的闭合体积变形,并将裂隙的闭合体积变形等效为与加载方向垂直的等效裂隙,通过计算等效裂隙密度参数获取不同应力状态下的声速^[21]。由于该裂隙模型是一个菱形,难以对裂隙的扩展进行分析,而实际上岩石在加载过程中,不但有裂隙的闭合发生,而且裂隙要发生扩展,所以该模型未能获得加载全过程的声速与应力的理论关系。

这些研究成果表明岩石(体)超声波速与应力之间的相关性与岩石中的裂隙紧密联系,岩石(体)中的超声波速本身并不受应力的影响,它仅反映岩石内部裂纹的

变化,但由于岩石在应力作用下,其内部裂纹发生改变,从而引起超声波速的变化。目前对岩石(体)超声波速与应力相关性的研究主要还是建立在实验基础上的定性分析;理论上的研究还相当不够,特别是在反映岩石加载的全过程上仍有待进一步研究。

1.2.4 岩石(体)超声波衰减特性

在进行超声波速研究的同时,许多学者(Pros 等^[76], Winkler 和 Nur^[77])的研究发现,对相同的岩块在相同的加载情况下,声波衰减的变化量比波速的变化量大,从此人们开始对超声波的衰减进行研究。通常描述岩石(体)超声波衰减特性的衰减量有:衰减系数 α 、对数增量 δ 和耗散因子 Q^{-1} (或它的逆 Q , 称为品质因素)。它们之间的关系为

$$\alpha = \delta f / V = \pi f / QV \quad (1.3)$$

式中: f 为频率; V 为声速。

在各向同性介质中传播的波,其振幅随传播距离远离振源而衰减, Auburger 等^[78]给出衰减系数的计算式:

$$\alpha = 8.686 \ln(A_1/A_2) / (X_2 - X_1) \quad (1.4)$$

式中: A_1 、 A_2 分别为距振源 X_1 、 X_2 处的首波振幅; α 为衰减系数(dB/m)。

声波在介质中传播,随介质和传播条件以及波型的不同,有不同的衰减规律,声波的衰减机理很复杂,因此要对岩石这种结构复杂的介质进行衰减的理论分析则显得相当困难,一般都是以实测结果综合评价岩石的衰减程度,然后在此基础上对岩石介质的衰减的机理做定性解释。

声波在传播过程中的能量衰减的方式主要有三种:声波的几何扩散衰减、声波的散射衰减以及声波的吸收衰减。几何扩散衰减是针对有限面积声波源而给出的,对于理想的平面声波,几何扩散衰减不存在;散射衰减是由于岩石内部空隙、微裂纹等引起声波散射而造成的声波能量损失;吸收衰减主要是由于岩石介质的黏滞性、热传导、热弛豫等原因引起的声波能量损失。由此可见散射衰减和吸收衰减均与岩石介质的微观结构有关,为了反映声波传播中能量耗散与岩石介质内部性质之间的关系,并从理论上对测量中的各种现象作出系统、准确的解释,国外学者做了许多工作,目前已形成了摩擦耗散衰减、空隙流体流动、恒定 Q 值模型和黏弹性衰减等四种理论。我国学者在这方面也做了许多卓有成效的研究工作,如陈耕野等^[79]在研究含有结构面的岩石的声波衰减时得出,在单轴加载下,裂纹的扩展方向对衰减具有不同的影响,平行于传播方向的张裂破坏,破坏前 Q 值逐渐下降,而与传播方向呈 30° 角的剪切破坏,破坏前 Q 值无明显下降,从而表明裂纹界面的黏滞性摩擦耗散是声波衰减的主要机制。对衰减机制研究中除恒定 Q 值模型外,1991 年秦四清等提出了复合 Q 值模型^[80],探讨了 Q 与频率、压力的关系,得出在

干炮岩石中 Q 与频率无关,而含水岩石的 Q 值与频率有关。描述声波衰减量的 Q 值称为岩石的品质因素,它与岩石的裂纹紧密相关,如易南概等^[81]的研究;陈耕野等^[82]利用 Q 值测定岩石中裂缝的方位及其分布范围。

已有的实验研究成果表明,声波的衰减与频率、饱和度及应力相关。Johnston^[83]的研究表明,衰减随频率增加而增加。Toksoz 等^[84]实验研究得出衰减系数和频率在 0.1~1Hz 范围内是线性函数。饱和度对衰减起着重要作用,通常,衰减随饱和度的增加而急剧增加(如 Born^[85]等)。李造鼎^[86]对岩石中流体含量对声波衰减影响的实验研究结果亦表明,纵波衰减随饱和度增加而增加,且有明显的峰值存在,而横波衰减随饱和度增加而减小。在双轴压缩下干燥与饱水岩石中声波的衰减实验得出^[87]:岩石的声波衰减 Q 值是双轴应力差的函数。 Q 值变化取决于岩石的类型,孔隙率的大小和分布及饱和程度。在一定侧压力下, Q 值随主应力增加而增加,当压力达到一定值时,随主应力增加的 Q 值稍有下降,到极限应力时 Q 值趋于稳定。为了进一步研究和应力相关的衰减特性,Rthevskij 推导出在不同应力作用下声波衰减系数式增量的计算公式:^[10]

$$\Delta\alpha = \ln(A_2/A_0)/X \quad (1.5)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为衰减系数随应力变化的增量; A_2 、 A_0 分别为所加应力和零应力的首波振幅值; X 为两换能器间的距离。

由式(1.5)可以看出,岩石的声衰减系数与其所处的应力状态、内部结构有着紧密的联系。但由于岩石的复杂性和衰减特性研究的困难,目前还没有一个反映岩石衰减与应力相关性的理论模型。尽管已有学者采用此式进行应力测量,如1992年孙永联^[88]从耗散介质本构方程,质点运动方程及质点波动方程出发,在Nur^[72]的基础上,建立声波吸收系数与单轴应力之间的关系,通过实验标定证实吸收系数比与应力呈二次函数关系,最后并将其用于在二维地应力测量上;但这种经实验标定的关系由于缺乏理论模型难以解决非均质和各向异性的工程岩体。

超声波透过岩石(体)后携带出丰富的信息,除了声波的波速及衰减系数外,还有更多的参数可从声波信号中提取。因此许多学者开始运用声学中的谱参数进行声学特性研究。1989年蔡忠理等利用声波波谱法研究岩石的破裂特性^[89],通过测定岩石中声波的首波振幅变化对岩石的破裂前兆进行预测;1993年孙永联等研究了声波振幅谱比与全应力过程的关系^[20];类似的研究还有周楚良等^[19]、蔡忠理等^[90]、罗津辉等^[91]。这些成果均为岩石(体)声学特性研究作出了贡献,但对声波的后续波列的研究有待进一步的深入。随着数字信号处理技术及电子计算机技术的发展,岩石声波信号分析技术得到了进一步的研究和应用,必将预示着新的发展方向。