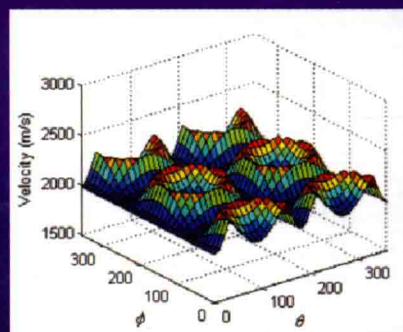
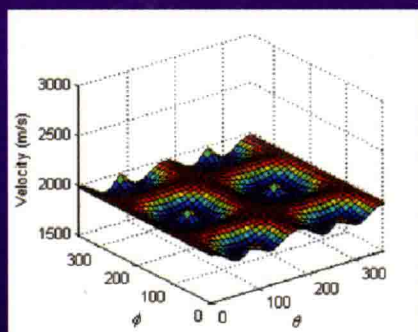
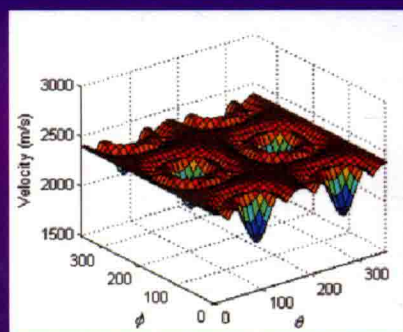
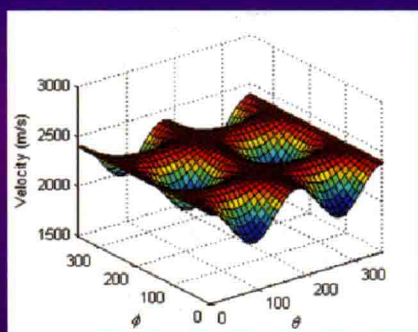


SEISMIC EQUIVALENT
MEDIUM THEORY FOR
FRACTURED ANISOTROPY

裂缝各向异性 地震等效介质理论

■ 王 赞 刘媛媛 张美根 著



科学出版社

裂缝各向异性地震等效介质理论

王 赞 刘媛媛 张美根 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了地震各向异性领域近 30 年来发展相对成熟的四种裂缝诱导地震各向异性的等效介质理论,即 Hudson 扰动理论、Thomsen 等径孔隙理论、Schoenberg 线性滑移理论和 Chapman 多尺度裂缝等效介质理论;并通过典型裂缝介质建模与地震波场的有限元数值模拟、分析,对比了四种理论的异同及裂缝介质的地震波场特征,重点讨论了地震波在多组多尺度裂缝介质中的传播。

本书可作为固体地球物理地震专业本科生、研究生的教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

裂缝各向异性地震等效介质理论 / 王赟, 刘媛媛, 张美根著. —北京: 科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-052023-4

I. ①裂… II. ①王… ②刘… ③张… III. ①地震波场-地裂缝-介质物理学 IV. ①P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 047129 号

责任编辑: 张井飞 韩 鹏 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 10

字数: 231 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

随着我国构造圈闭油气藏的开发殆尽，岩性、裂缝、碳酸盐岩缝洞型储层成为油气资源勘探开发的主要目标；尤其随着致密储层油气和页岩气等非常规油气的勘探开发兴起，在向第二深度空间探查与发现深层油气资源的过程中，强非均质性和各向异性储层的勘探，以及高精度勘探、高分辨率数据采集和精细岩相与结构的刻画需求，使得基于各向同性简单声学介质的地震技术面临疑难和挑战，强化对各向异性弹性波多分量地震技术的研究工作逐渐走向生产实践。

近些年来随着地球深部动力学观测与研究的发展和积累，壳幔精细结构和各向异性已成为该领域的研究热点。大量勘探实践与研究表明，上地幔和下地壳可能存在明显的速度各向异性；同时也有研究关注地壳各向异性强弱对地幔各向异性的影响。在甚低频天然地震的长波长尺度下，上地壳广泛发育的断裂和断层系统是否也会表现为裂缝或地应力场的各向异性，从而使得深部与浅层地壳的各向异性叠加在一起也是回答地幔各向异性的重要问题。

各向异性的广泛存在性，以及地震学发展所遵循的逐渐逼近真实地球介质的技术路线，使得多分量观测与各向异性研究成为地震学科发展的必然。虽然我国对于各向异性问题的讨论起步晚于国外同行，但自 Crampin 发现横波双折射现象后进而推动了裂缝各向异性研究的理论、方法、应用的蓬勃发展，我国对地震各向异性的研究与国外相差也就只有 10 年左右的时间；而现有的介质属性和裂缝各向异性研究中尚有许多问题有待深化认识与探索。基于地震各向异性的重要性，《裂缝各向异性地震等效介质理论》一书论述四种等效介质理论及其在其理论模型设定、建模，物理与数值模拟及验证方面尚存在的许多值得推敲和发展，并需不断完善的内容。

该书通过对比和数值模拟相结合的方式，介绍了四种裂缝各向异性等效介质理论，有助于该领域有关科技人员快速掌握这些理论模型的细节和优缺点，进而有利于在使用或发展相关理论方法时正确使用或厘定正确的攻关方向。同时，该书也必将会有助于推动地震各向异性理论与多波多分量地震技术的发展，并逐渐逼近地下真实介质的结构与属性。

是为序，愿与该领域广大科技工作者共勉！

滕吉文

2016 年 7 月 1 日

前言

对于裂缝的描述，包括裂缝与原生孔隙的关系是裂缝介质物理模型建立的核心。从 1978 年 Crampin 发现横波双折射现象开始，Hudson、Schoenberg、Thomsen 围绕着单个裂缝的理想、简化表述进行了长期探索；至 Crampin 的学生 Chapman 提出了原生孔隙介质中另一不同尺度裂缝的存在及其表述方式的确立，以及他所预测的不同尺度裂缝的频率效应被物理实验所验证，裂缝介质模型的研究出现了四种较经典的理论体系，即 Hudson 扰动理论、Thomsen 等径孔隙理论、Schoenberg 线性滑动理论、Chapman 多尺度裂缝等效介质理论。在国际地震各向异性研究领域，这四种理论的提出和发展都是长期的，也是均由国外不同专家学者创立的。但由于发展的周期较长，每种理论的系统性阐述较缺乏，还散落在不同时间、不同刊物上，且这些理论尚在不断地接受着物理实验和实践的检验。因此，本书的目的之一是将这四种理论进行高度的概括和总结，并以对比的方式来说明它们之间的异同点，以便读者通过一本书就可以相对完整地了解整个裂缝介质各向异性研究的脉络；并期望能通过读者的努力实践，继续检验这些理论的合理性和适用性，使之更趋完善。

对于经济高速发展的中国来说，能源问题占据举足轻重的战略地位。目前，我国的能源探明率和采收率都远低于国际领先水平。因此，深入发展地球物理探测理论与方法技术，提高复杂非简单构造油气藏的识别能力和探测精度，是保障我国能源部分自主供给和能源安全的唯一途径。

截至目前，在油气和煤田地震勘探中，地震资料处理解释时大都假设地下介质是各向同性的。但是理论与勘探实践已经证实实际地层中地球介质波动各向异性是普遍存在的。地震波在各向异性介质中的传播要比在各向同性介质中更为复杂，主要表现在地震参数随传播方向的变化而变化，如体波速度、偏振方向、振幅和衰减等，包括体波间的耦合与解耦、横波分裂现象。因此，当生产实践对地震技术精度要求提高到一定程度时，就必须考虑地震各向异性的影响；如果忽略各向异性的影响，将会对后续地震资料的处理带来不可忽视的误差，从而影响地震解释成果的正确性和精度。

随着油气藏勘探开发程度的提高，由于具有非均质性强、孔隙率低且分布复杂等特点，裂缝型油气藏成为我国油气地震勘探开发技术的主攻对象，也是目前面临的一类最为重要的、最难预测的非常规油气藏（Palag and Marfurt, 1997；周文，1998；孙

建库等, 2005; 熊翥, 2006)。据统计, 这种类型储层的油气含量已占到了世界剩余油气总量的 60% 以上, 是世界剩余油气资源的主要来源。在这类油气藏中, 裂缝是油气的重要储集空间和运移通道, 是控制油气分布和决定油气采收率的重要因素。在现代油气储层勘探开发中, 裂缝在储层描述中扮演着越来越重要的角色 (董敏煜, 1996)。因此, 对裂缝隙介质各向异性的研究, 利用地震波属性特征来确定地下裂缝的空间展布、密度、充填物特性等结构与物性特征具有十分重要的意义。然而, 一切正演研究都是反演的前提和基础, 正演结果的好坏直接影响反演结果的正确与否。因此, 裂缝介质模型正演, 即在一定地质条件下, 给定裂缝模型, 研究裂缝参数 (走向、密度、尺度、开度、充填物特性等) 变化对地震波的具体响应特征, 是研究裂缝型油气储层各向异性、裂缝介质 AVO (amplitude versus offset) 反演及裂缝检测方法等的前提和基础。反之, 也可以利用地震波属性特征来识别裂缝隙的参数特征, 为更大限度地提高地震勘探精度及有效应用各种地震波属性特征来检测裂缝隙、提高裂缝型储层的刻画精度提供理论依据。

本书主要是在各向异性介质弹性波理论基础上, 简单介绍截至目前发展相对成熟的四种等效介质理论——Hudson 扰动理论、Thomsen 等径孔隙理论、Schoenberg 线性滑动理论、Chapman 多尺度裂缝等效介质理论的基本概念、假设条件; 重点是通过有限元数值模拟裂缝波场与特征对比, 定量分析裂缝参数与地震波运动学和动力学特征之间的关系, 以加深读者对这四种理论模型及裂缝波场特征的认识, 系统地了解裂缝各向异性介质理论的发展过程, 以便于更好地应用它们。

本书首先对 Hudson、Thomsen、Schoenberg、Chapman 四种等效介质理论及其假设条件进行阐述, 建立裂缝介质模型, 推导出相应的等效弹性系数矩阵, 利用 Christoffel 方程得到地震波的相速度、群速度、偏振方向等, 分析这些地震属性随裂缝参数和入射角、方位角、频率的变化规律, 研究地震波的运动学响应特征。其次, 本书利用有限元数值模拟方法对具体的裂缝介质模型进行波场模拟, 通过两种模型——均匀模型和层状模型, 分析裂缝方向和尺度发生变化时, 地震波振幅、主频等属性的变化规律, 研究地震波的动力学响应特征。最重要的一点是, 本书考虑了裂缝的多组与多尺度效应, 对这四种理论的多组多尺度裂缝介质模型的地震波场进行了对比分析, 在尝试描述裂缝的尺度、密度、方向、充填物等与地震波速度、衰减、振幅、频率等的关系的基础上, 探索哪种裂缝各向异性等效介质理论更适合中国的复杂裂缝介质。

裂缝隙介质中地震波响应特征的主要研究方法包括: 岩石物理实验、数值模拟 (张美根、李小凡, 2010)。岩石物理实验通过在实验室对实际或人工样品进行测试和分析, 研究地震波响应与岩石样品内部结构和物性的关系, 可以较准确地测定地震波在样品中的传播特征, 是认识复杂岩石弹性性质的重要手段。但是该方法只能在实验室对小块标本进行超声波测定, 测试时的环境也与地下介质的真实情况不太一样,

实验频率高,与勘探地震波频率相差很大,其成果和认识一般不能直接应用于勘探频段的波动问题;另外,实验成本也比较高。在数值模拟研究中,有两类裂缝介质地震波响应的数值模拟方法,第一类是基于均匀各向异性等效介质理论的方法(张中杰、何樵登,1989;汪和杰、董敏煜,1994; Zhang *et al.*, 1999; 傅旦丹、何樵登,2001; Vlastos *et al.*, 2003; 王一博、杨慧珠,2006; 刘恩儒等,2006a; 石双虎等,2007; Prioul *et al.*, 2007; 朱光明等,2008),这种方法是通过等效介质理论模型建立所需的等效弹性系数矩阵;另一类是将裂缝介质看成是基质和裂缝充填物组成的非均匀复合介质的确定性数值模拟方法(刘恩儒,2000; Groenenboom and Falk, 2000; Wu *et al.*, 2005; 韩开锋、曾新吾,2006; 张美根、李小凡,2010),其可以模拟任意复杂的裂缝系统中地震波的传播,对裂缝形状、尺度、取向、密度等没有限制,考虑了裂缝间的多次散射及流体作用,能较可靠地研究地震波场的衰减信息,有助于数学物理模型的相互验证和岩石物理实验结果分析。然而,由于实际地下裂缝隙的规模一般比较小,裂缝的开度远远小于地震波的波长,模拟网格离散化时就要求对模型进行精细剖分,从而带来海量的计算和内存需求,目前无法有效开展大量裂缝低频地震波场(勘探频段)的模拟研究。本书主要针对四种裂缝各向异性等效介质理论通过数值模拟分析展开讨论。

本书主要由张美根副研究员、刘媛媛工程师参与了编写,其中数值模拟的主体部分由三年前作者和张美根博士共同指导的硕士研究生的学位论文组成,张美根博士提供了有限元模拟的程序。芦俊、石瑛两位博士参加了编辑整理工作,其中石瑛博士对图文的编辑进行了认真仔细的校对,芦俊博士对本书的公式进行了仔细的核对和校正。

本书的研究内容曾得到了中华人民共和国科学技术部 973 项目“深部煤炭资源关键地质体与多相介质的地球物理响应”(编号:2006CB202207)、863 项目“多分量地震技术识别裂缝与流体”(编号:2013AA064201),国家科技重大专项“十一五”计划“多分量地震资料处理的关键技术与模块”(编号:2008ZX05-08-06-04)、“煤层气储层的地震波场响应数值模拟技术”(编号:2008ZX05-035-01-03)、“煤层气地震数据的散射成像技术研究”(编号:2008ZX05-035-03-06HZ),国家科技重大专项“十二五”计划“碳酸盐岩储层多分量资料成像与裂缝属性预测技术”(编号:2011ZX05008-006-22)、“煤层气储层的地震波场响应数值模拟技术”(编号:2011ZX05035-01-003)、“十三五”计划“薄层地震波场特征与反演研究”(编号:2016ZX05002-005-003),国家自然科学基金项目(编号:41425017; 41374131; 41574126; 41504107),中国科学院仪器装备专项“高温高压条件下含油气流体多相态岩石弹性波测量系统”(编号:YZ201207),中国石化“多分量地震数据的向量叠前深度偏移技术研究”,中国石油“弹性波地震成像技术合作研发”,中国海油“多分量地震数据处理的关键技术模块”等项目的资助。

本书的出版更要感谢北京多分量地震技术研究院长期以来对本研究组在地震各向异性理论和多分量地震技术攻关方面所给予的经费、数据和技术上的支持。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

“多波多分量”（MWMC）地震研究组



2015 年 12 月 31 日于中国地质大学（北京）

目 录

序

前言

绪论	1
0.1 裂缝与等效介质理论	1
0.2 国内外研究现状及存在的问题	2
0.2.1 国内外研究现状	2
0.2.2 存在的问题	4
第 1 章 各向异性介质的理论基础	5
1.1 各向异性介质弹性波的波动方程	5
1.1.1 弹性力学基本假设	5
1.1.2 本构方程	7
1.1.3 运动微分方程	8
1.1.4 几何方程	8
1.1.5 一般均匀完全弹性介质中的波动方程	8
1.2 各向异性介质的波动理论基础	9
1.2.1 相速度和群速度	10
1.2.2 偏振向量	13
1.2.3 衰减	14
1.3 常见的各向异性介质类型	14
1.4 弹性矩阵的坐标变换	17
第 2 章 Hudson 理论	19
2.1 模型假设及基本方程	20
2.2 位移间断 U_{kl} 的表达式	21
2.2.1 完全填充介质的孤立裂缝	22
2.2.2 部分填充流体的孤立裂缝	23
2.2.3 连通裂缝与等径孔隙	23

2.3	Hudson 含裂缝介质模型	24
2.3.1	含平行裂缝岩石的有效柔度系数	24
2.3.2	裂缝法向与裂纹法向不平行裂缝模型	26
2.4	Hudson 多组裂缝系统	26
2.5	包含裂缝的各向异性介质	27
2.6	数值算例	27
2.6.1	Hudson 一阶与二阶近似理论对比	27
2.6.2	TTI 裂缝介质模型	34
2.6.3	单组单尺度裂缝介质模型	44
2.6.4	单组多尺度裂缝介质模型	45
2.6.5	多组单尺度裂缝介质模型	46
2.6.6	多组多尺度裂缝介质模型	47
第 3 章	Thomsen 理论	49
3.1	Thomsen 参数的提出	49
3.2	HTI 介质的各向异性参数	50
3.3	TI 介质的 Thomsen 参数表征	51
3.4	Thomsen 参数的求取	51
3.5	数值算例	52
3.5.1	各向异性参数的物理意义	52
3.5.2	精确公式与近似公式的误差分析	58
3.6	Thomsen 近似公式在强各向异性条件下的误差分析	80
第 4 章	Schoenberg 理论	83
4.1	多组裂隙系统	83
4.2	旋转不变性裂隙组	84
4.3	数值算例	87
4.3.1	相速度随入射角的变化规律	87
4.3.2	Schoenberg 模型下的有限元波场模拟	88
4.4	三种理论参数之间的关系	92
第 5 章	Chapman 理论	95
5.1	单组裂缝理论	95
5.2	多组裂缝理论	100
5.3	数值算例	102

5.3.1 单组单尺度裂缝介质模型	102
5.3.2 单组多尺度裂缝介质模型	113
5.3.3 多组单尺度裂缝介质模型	114
5.3.4 多组多尺度裂缝介质模型	122
5.4 确定性有限元裂缝数值模拟	131
5.4.1 有限元模拟简介	131
5.4.2 均匀裂缝介质模型及其波场	132
5.4.3 层状裂缝介质模型	134
5.4.4 小结	136
参考文献	137
后记	144

绪 论

作为固体地球物理学的一个重要分支，地震学对地球介质的研究是依赖于介质模型假设的。因此，地震学的发展历程是假设的介质模型不断逼近实际介质的过程。作为地震学的核心、基础理论，地震波动理论的发展也遵循从简单的均匀、单相、各向同性、完全弹性向非均匀、多相、各向异性、非完全弹性的地球介质逐步逼近的路线。其中的各向异性是指介质的弹性性质随方向变化，一般称为地震各向异性。这是一宏观的各向异性概念，并非指组成物质的晶体或矿物组分的定向排列所产生的微观结构或宏观物理性质上的各向异性，而是相对于人类所使用或观测的地震信号频带所限，相对于地震波长尺度地球介质所表现出的弹性特征的方向性变化，是一相对概念。由于地震学研究目标体的物性、结构等的复杂性，一般倾向于认为，不论是不同沉积岩性、不同压实作用、不同孔隙结构、不同层理、不同割理所引起的，还是晶体矿物定向排列所引起的，或是裂缝的定向排列引起的地震各向异性，从地震学研究的地球介质受影响的角度更应该分为两种类型——沉积差异所引起的地震各向异性与应力（含成岩过程中的原生应力和后期构造运动改造形成的构造应力）作用所产生的缝隙、节理等诱导的各向异性，即分别对应着薄互层各向异性与裂缝各向异性。而本书主要介绍与应力场分布的非均匀性相关的，由于应力作用所产生的断裂、断层、裂缝、裂隙、节理、割理等所引起的、呈现一定规律的对称性的裂缝诱导产生的地震传播的各向异性。由于 Crampin (1978, 1981, 1984a, 1984b, 1984c) 发现的横波分裂现象是一里程碑式的物理成果，引发了裂缝各向异性研究的热潮，一般也统称这一类型的各向异性为裂缝各向异性。

0.1 裂缝与等效介质理论

裂缝各向异性，或裂缝诱导各向异性是指地壳中的岩层由于受到构造应力场的作用而产生具有一定主排列方向的、近似定向的断裂、断层、裂缝或裂隙、裂纹、节理等，这些裂缝的存在使得岩石的整体弹性性质表现出方向特性。当地震波在这种岩层中传播时，动力学和运动学特征会随着传播方向的变化而变化。因此，裂缝诱导是产生地震各向异性的重要成因之一，裂缝各向异性也是最重要的地震各向异性类型之一。

等效介质理论是指长波长条件下, 即当入射波的波长远大于裂缝半径或裂缝间距, 可以把地下裂缝介质看成等效的均匀介质; 它能够建立裂缝介质本构关系的数学物理模型, 构建中观或微观裂缝参数与宏观地震波响应之间的桥梁, 是利用地震波资料定量检测地下裂缝系统的基础(魏修成等, 2008)。截至目前关于裂缝介质的等效介质理论已有很多, 应用最广泛的、主要的裂缝等效介质理论模型包括 Hudson 模型(Hudson, 1980, 1981, 1986)、Thomsen 模型(Thomsen, 1995)、Schoenberg 模型(Schoenberg, 1980; Schoenberg and Douma, 1988; Schoenery and Sayers, 1995)、Chapman 模型(Chapman, 2002, 2003, 2009; 刘媛媛, 2012)。

0.2 国内外研究现状及存在的问题

0.2.1 国内外研究现状

裂缝介质模型的研究基础是介质的各向异性理论。关于地震各向异性的研究, 可以追溯到 19 世纪中叶(张美根, 2000)。1856 年, Kelvin 发表了《弹性理论的数学基础》一文, 提出了用无坐标表示法的弹性张量来描述介质的各向异性, 这是第一篇以现代形式发表的关于弹性各向异性的论文。1863 年, Kraut 研究了各向异性介质中 Green 函数并得到了一些定性的波场解。1877 年, Christoffel 提出了与 Kelvin 一样的特征体系方程, 后来人们将各向异性波动方程称为 Christoffel 方程。1892 年, Love 首次提出了横向各向同性这一术语(Love, 1892)。1911 年, Rudzki 讨论了横向各向同性这一术语, 对各向异性弹性波做了定量计算。1927 年, Love 推导了应变与应力在横向各向同性介质中的关系。1935 年, Bruggeman 计算了层状固体介质的平均弹性常数, 指出需要 5 个弹性常数来确定具有轴对称性的层状介质的性质, 成为周期性薄互层理论模型(periodic thin layer, PTL)的奠基人。1944 年, Love 对横向各向同性介质与面波、体波的关系进行了研究。1949 年, Rignichenko 研究了地震拟各向异性, Stoneley 研究了地震各向异性在陆棚结构探测中的意义(Stoneley, 1949)。1955 年, Postma 阐述了小于地震波长的 PTL 介质可以看成横向各向同性介质(Postma, 1955)。1956 年, Krey 和 Helbig 研究了反射波在各向异性介质中的传播规律(Krey and Helbig, 1956)。1962 年, Backus 的研究表明薄互层组合能够引起拟各向异性(Backus, 1962)。这一时期的研究主要是针对薄互层介质的拟各向异性展开, 即本章第一段所介绍的与沉积有关的各向异性。

裂缝介质中地震波传播相关理论和机理的深入研究, 以及研究利用地震波检测地下裂缝分布兴起于 20 世纪 80 年代。Crampin 指出地壳中地震各向异性的主要原因之一是裂缝诱导各向异性, 首次发现了各向异性介质中的地震横波分裂现象, 并提出了广泛扩容各向异性(extensive dilatancy anisotropy, EDA)介质模型, 带来了地震各向异性理论的巨大发展(Crampin, 1978, 1981, 1984a, 1984b)。在此基础上, Hudson

导出了裂缝介质中应力应变的本构关系,提出了以稀疏且互不作用的薄的扁球体来表征裂缝隙的模型,裂隙间没有流体流动(Hudson, 1980, 1981, 1986),推导出了由于裂缝隙存在而产生的一阶和二阶扰动量,给出了含定向裂缝介质的有效弹性模量的近似计算方法,一般被认为是高频理论。Thomsen 引入了一套弱各向异性参数,简化了相速度、群速度的精确表达式,给出了线性近似表达式(Thomsen, 1986, 1995);提出了等径孔隙理论,假设在各向同性介质中包含了一套与等径孔隙液压相连通的裂隙,且假定在岩石骨架周围裂隙和等径孔隙之间存在压力平衡,因而局限于低频理论。Hudson 等(1996a, 1996b), Tod 和 Hudson(2001)试图推广 Thomsen 的理论到整个频率范围内,考虑了包括不同取向裂隙间,以及断裂和岩石骨架之间的各种流动机制,但是仍假定裂缝是孤立的,只能在波长远远大于裂隙尺度时才有效。Schoenberg 在位移不连续和旋转不变性的假设下,忽略了裂缝的形状和结构,提出了线性滑动理论模型(Schoenberg, 1980; Schoenberg and Sayers, 1995)。2011 年,Chapman 提出了没有裂缝存在的孔隙尺度喷射流模型(Chapman, 2001),之后 Chapman 又提出了含孔隙和裂缝两种尺度的裂缝模型,形成与频率有关的新的等效介质理论,较好地描述了依赖频率的裂缝各向异性(Chapman, 2002, 2003, 2009)。

我国在各向异性领域的研究起步较晚,但是也开展了很多工作,并且越来越引起关注。席道瑛等(1995)研究了砂岩样的各向异性;姚陈等(1992)研究了反射率法合成技术;董敏煜和汪和杰(1992)研究了各向异性裂隙介质的差分模拟方法;梁非和杨慧珠(1993)研究了确定方位各向异性介质中各向异性系数的方法;张中杰和滕吉文(1999)通过研究 EDA 介质中应力与应变的关系,建立了 EDA 介质中的地震波波动方程组;刘恩儒和曾新吾(2001)设计了三种不同裂缝表面的模型,并在这三种模型条件下给出了裂缝微结构的裂缝柔度系数的解析表达式;桂志先等(2001a, 2001b)研究了含两组斜交的垂直排列裂隙介质中的相速度,并给出了其解析表达式,并对裂隙含气和流体介质分别进行了波场模拟;贺振华等(2001)对垂直定向裂隙模型进行了物理模拟实验研究。桂志先和贺振华(2003)在 Hudson 理论的基础上,通过数值计算,分析了描述裂缝隙介质的主要参数对纵波速度的影响,以及研究利用纵波属性来检测裂隙发育带是否可行;韩开锋和曾新吾(2006)基于 Hudson 理论,研究了含分布裂缝介质中地震波的传播特征及 Hudson 理论中裂隙参数的适用范围;李磊(2008a, 2008b)讨论了横向各向同性介质 Thomsen 公式的适用范围;梁锴(2009)基于 Thomsen 理论,研究了 TI 介质地震波传播特征与正演方法;方勇(2005)和孙武亮(2006)基于 Hudson 和 Thomsen 理论,对 EDA 介质进行了研究,并对两种理论结果进行了对比分析;杨德义等(2007)在 Schoenberg 理论下,使用有限元各向异性弹性波模拟系统,对 HTI 介质二维二分量煤层裂隙介质进行了数值模拟;王赟等(2008)基于 Schoenberg 理论,将弱度比应用于大庆汪家屯气田中的裂隙检测;刘百红等(2010)基于 Schoenberg 理论,研究了上覆为均匀各向同性介质,下伏为 HTI 介质时裂缝密度、纵横比、填充物等对 AVO 的影响;李佩等(2010)基于 Schoenberg 模

型,采用有限差分高阶交错网格波动方程数值模拟方法,对 HTI 裂隙介质的地震波场进行正演模拟研究,分析了垂直裂缝分别在不同密度和不同充填物下的波场特征;在滕吉文、何樵登老师的指导下,基于 Chapman 新等效介质模型,石双虎(2007)研究了 HTI 介质中裂缝尺度、各向异性及其与频率之间的依赖关系;牛滨华、李向阳指导学生基于 Chapman 理论,提取了与频率有关的一种新的地震属性,可用来指示由裂缝和流体的存在而引起的衰减(张铁强,2010)。

0.2.2 存在的问题

由于在理论上和实际地震资料处理上存在一定的难度,且考虑生产成本,在假定地下存在单组垂直或水平定向裂缝且是单尺度的前提下,人们对裂缝介质的地震波响应与裂缝检测问题做了许多研究工作。然而,由于地下岩层在不同的地质历史时期会遭受不同强度和方向的构造应力场的作用,并且由于应力场的局部变化和岩性的变化,岩层中裂缝排列具有多个优先方位,裂缝尺度从微米至米级均有一定分布,且各具不同的形状,并且它们之间可以相互连通;介质中同时还存在着微小孔隙(即原生孔隙),且充填各种不同的流体。因此,实际地下介质中的裂缝系统是一个非常复杂的地震波响应系统。地下裂缝的尺度和方向特征对实际生产有重要意义。例如,在油气开采中,大尺度、主要方向的裂缝控制油气的流动,而小尺度裂纹或微裂隙主要起油气储存空间的作用。总之,为了建立相对完整的各向异性理论体系,能够更真实地刻画在各向异性介质中地震波的传播特征,必须考虑地下裂缝的多组性和多尺度性,逐步建立与地下储层实际情况更接近的裂缝介质模型,否则会存在较大误差甚至导致错误结果,无法满足实际生产的需要。

由以上国内外研究现状和分析可知,地球介质各向异性在理论和实践上都有很大的发展和应用,裂缝介质的地震波响应及其理论方法也有一定程度的研究,但是仍然存在一些问题有待解决。

(1) 对于复杂裂缝系统,如我国常见的网状裂缝系统、裂缝介质的尺度效应及多组裂缝的耦合效应尚需进一步探索。

(2) 对于相同的裂缝介质模型,四种等效介质理论的数值模拟结果是存在差异的,哪种更适用尚需要物理实验的不断检验。

(3) 裂缝系统的特征参数(尺度、主方向、裂缝密度、充填物)与地震波响应的特征参数(运动学、动力学)之间的关系尚不明晰,异常大小是否在地震可检测的范围内尚无明确的结论,还需要大量物理与数值模拟的工作。

第 1 章 各向异性介质的理论基础

1.1 各向异性介质弹性波的波动方程

弹性波波动方程是地震波传播理论中的核心内容（王宝昌、张伯军，1986），许多地震波场建模仿真和实际的反演工作都与波动方程息息相关。地震波传播依赖于介质的弹性形变，根据弹性动力学基本原理（胡德绥，1989），得到三个基本方程，分别为本构方程、运动微分方程、几何方程，它们描述了弹性介质内部应力、应变、位移三个场变量及其相互关系。这三个方程是弹性波传播理论中的基础方程，是建立波动方程的基础。

1.1.1 弹性力学基本假设

在材料力学实验中，一旦对一个标准杆状体两端施加一拉力时，此杆体将发生长度上的拉伸和截面积的缩小。研究发现此时作用在杆件两端的应力与杆件发生的变形存在一定关系；根据实验结果可绘制如图 1-1 所示的应力与应变关系曲线。

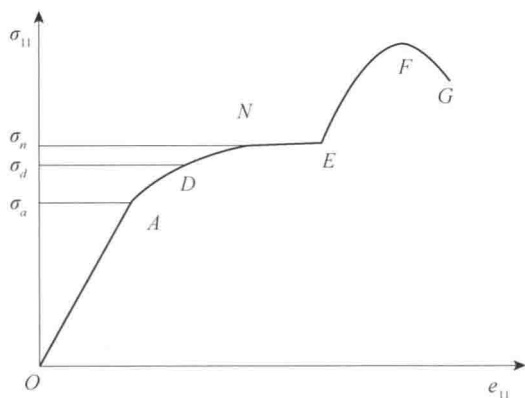


图 1-1 杆件应力与应变的关系

在图 1-1 中可总结出如下分段曲线。

（1）当 $\sigma_{11} < \sigma_a$ 时， σ_{11} 与 e_{11} 保持线性关系，其中 σ_a 称为比例极限。此时应力应变可用式 (1-1) 表示：

$$\sigma_{11} = E e_{11} \quad (1-1)$$

式中， E 为比例因子，常数，也可称为杆件在 x_1 方向的弹性系数。此公式由 Hooke 给出，又称为 Hooke 定律。

（2）当 $\sigma_a < \sigma_{11} < \sigma_d$ 时， σ_{11} 与 e_{11} 不存在线性关系，当外力去除后， σ_{11} 与 e_{11} 按原来的曲线返回零点，此处 σ_d 称为弹性极限。

(3) 当 $\sigma_d < \sigma_{11} < \sigma_n$ 时, 材料失去弹性, 外力去除后, 材料不能恢复原状而留有剩余应变, 即材料已发生了永久的变形; 此时外力所做的功产生的弹性能有部分损耗在材料的永久变形中, 一般称此阶段为弹塑性阶段, 此阶段也类似于黏弹性所描述的变形阶段。但在 $\sigma_{11} \leq \sigma_d$ 阶段, 杆件所发生的变形还可视为小变形, 即应变 e_{11} 很小。

(4) 当 $\sigma_{11} > \sigma_n$ 时, σ_{11} 几乎不增加而 e_{11} 不断增加, 对应图 1-1 的 NE 段, 又称为屈服阶段, σ_n 称为屈服极限。此时杆件发生变形很大, 不再满足小变形假设, 这是有理论力学研究的阶段。在工程力学中, 尤其是煤矿的井工开采力学行为中, 这是最重要的力学基础理论。

(5) 在 EF 段, 当应力增加时, 应变也增加, 此阶段称为硬化阶段; 过了 F 点以后, 应变继续增加而应力减少直至发生断裂。此阶段为断裂力学研究的阶段, 在地震勘探中的爆炸震源机制研究中需要涉及此部分力学特征。

在弹性力学中, 研究的只是第 (1) 种情况的线性弹性阶段, 即假设应力与应变之间存在线性关系。

实际上, 在地震波动理论的基础——弹性力学中还有如下假设是默认的。

(1) 小变形假设, 即 $e_{11} \ll 1$;

(2) 完全弹性假设, 即不存在剩余应变消耗应变位能;

(3) 介质 (或材料力学实验中的杆件) 是连续的, 不考虑介质存在间断面的不连续介质情况, 因为在非连续介质的间断面上应力将重新分布而有可能产生应变的不连续, 需要数学上的特殊处理, 形成边界条件;

(4) 初始应力为 0;

(5) 研究对象位于保守系统中, 与外界没有温度、力的交换, 即系统内能量是守恒的。

这是最基本的弹性力学五点假设, 在弹性力学的不同研究阶段, 还有很多假设是在不断建立与被打破的。例如, 黏弹性就突破了完全弹性的假设, 考虑到了介质由于黏性的存在而损耗了部分弹性能, 一般是以应变随时间变化的导数形式体现的; 当假设应力与应变并非简单的线性关系时, 如图 1-1 中的 DN 段呈现为二阶曲线形态时, 整个弹性力学及后续的波动方程均要发生变化; 但研究的对象并不满足保守系统假设时, 如一个处于注蒸汽开发中的油藏, 它时刻与系统外发生着质量的交换和热能的传递, 此时波动方程推导过程中就要包括质量变化与热能的变化, 能量守恒不再成立。

实际上对于地震学研究的地球介质, 初始应力为零的假设也是不成立的, 而且随着深度的加大, 构造运动的作用使这种离理想状态假设的误差越大。对于此假设的突破也将有可能从另外一个途径给弹性波动力学开辟一个新的局面。

在目前生产中广泛应用的地震技术, 其弹性波动力学的假设共包括 9 条: ①介质连续, 即位移连续; ②介质完全弹性; ③应力与应变关系为线性的; ④介质是均匀的; ⑤介质连续, 即应力是连续的; ⑥介质的弹性是各向同性的; ⑦小变形; ⑧无初始应力; ⑨保守系统。本书将要介绍的突破弹性各向同性假设的各向异性介质理论, 也是当前地震学界研究的热点与前沿。当然, 对于完全弹性和均匀介质假设的突破也