

前 言

裂缝在碳酸盐岩、火山岩及非常规储层中普遍发育，是控制油气储层渗流能力、力学性质、压裂改造效果以及产能分布的重要地质因素。相比孔隙度、砂体厚度等传统储层属性，裂缝往往呈现更强的非均质性和方向性，其几何结构、展布规模、张开度及充填状态对流体运移具有决定性影响。由于裂缝尺度通常远小于地震波长，直接成像困难，且井中观测具有局限性，而裂缝对地震波速度、振幅、方位响应及衰减特征的影响却在叠前资料中普遍存在并可被识别。因此，依托叠前地震资料开展地下裂缝的几何参数、走向特征、裂缝密度及充填性质等关键储层参数的反演，是复杂与非常规储层勘探开发中的核心科学问题之一，也是近年来储层地球物理研究的重要发展方向。

等效介质理论为建立裂缝系统与地震响应之间的定量联系奠定了坚实基础。通过将微观尺度的裂缝网络等效为宏观尺度的各向异性介质，可使其地震响应具有可解析的数学形式，从而为裂缝识别与反演提供理论支撑与可计算框架。尤其是在静态、准静态和动态三个域中，裂缝对介质弹性参数、流体压力交换以及能量衰减的影响各不相同，使得不同域的等效介质理论分别适用于描述裂缝诱导的弹性响应、流体效应及衰减效应。本书正是在这一总体理论框架下，围绕裂缝诱导的三类等效介质理论展开系统论述，并在此基础上研究方位叠前地震响应的数学建模与反演方法，旨在建立一套从物理机理、方位敏感属性到多参数联合反演的完整技术体系，为裂缝储层的定量评价和油气勘探开发提供可靠而具有可实施性的地球物理技术支撑，推动裂缝预测从经验解释走向基于机理的定量反演。

本书的主要特色在于从理论建模、反演方法到工程应用构建了一个相互衔接、层次递进的完整体系。全书共六章，主要内容和结构安排如下：

第 1 章 绪论。介绍本书研究的目的与意义，阐述裂缝介质等效介质理论及叠前地震反演方法的发展背景。综述国内外在裂缝介质地震响应机理、等效介质建模及裂缝参数反演方法等方面的研究现状，指出现有研究中存在的主要问题及进一步研究的必要性，为后续章节的研究内容奠定理论背景和研究基础。

第 2 章 裂缝介质等效介质理论研究。本章从地震各向异性的产生机理出发，系统阐述裂缝诱导的静态、准静态与动态等效介质理论模型。其中，静态等效介质理论部分重点研究 Hudson 裂缝模型和 Schoenberg 线性滑动模型；准静态等效介质理论部分分析 Thomsen 含等径孔隙裂缝模型和 Gurevich 饱和流体含孔隙裂缝模型；动态等效介质理论部分探讨修正的 Schoenberg 线性滑动模型及频率相关的 Chapman 多尺度裂缝模型。通过对前人研究的梳理与拓展，本章为后续裂缝介质地震反演的理论推导与方法研究奠定了坚实基础。

第 3 章 基于静态等效介质理论的裂缝介质方位叠前地震反演。以 Schoenberg 线性滑动静态等效介质理论模型为基础，推导单组与多组裂缝诱导的地震波反射系数弱各向

异性近似方程,并进一步推导基于裂缝准弱度参数的方位弹性阻抗弱各向异性近似方程。在此基础上,发展了贝叶斯框架下的正则化约束方位弹性阻抗迭代反演方法,实现了静态域下裂缝发育强度、走向及充填特征的定量反演与预测。

第 4 章 基于准静态等效介质理论的裂缝介质方位叠前地震反演。结合低频条件下的各向异性 Gassmann 方程与静态线性滑动模型,考虑裂缝与基质孔隙间的流体流动效应,推导准静态等效介质的地震波反射系数弱各向异性近似方程。进一步提出基于贝叶斯框架的正则化约束角度域方位振幅迭代反演方法,实现准静态域下裂缝特征参数与流体指示参数的联合反演与预测,揭示裂缝介质中流体流动对地震响应特征的影响规律。

第 5 章 基于动态等效介质理论的裂缝介质方位叠前地震反演。结合复数形式的各向异性 Gassmann 方程与修正的 Schoenberg 线性滑动动态等效介质模型,综合考虑裂缝岩石背景本征衰减与裂缝诱导衰减效应,推导单组或多组垂直裂缝介质的动态地震波反射系数与方位弹性阻抗弱各向异性近似方程。基于此,发展贝叶斯框架下的方位衰减弹性阻抗反演方法,实现流体指示参数、裂缝发育参数及衰减参数的联合反演与定量预测,为裂缝油气藏的地震衰减响应解释提供新的方法途径。

第 6 章 结论与展望。总结本书基于等效介质理论的裂缝介质叠前地震反演方法的主要研究成果与创新点,归纳不同频率域下裂缝介质反演的适用条件与优缺点,并对未来裂缝介质叠前地震反演的研究方向进行展望。

本书内容主要源于笔者自博士研究生阶段以来持续开展的系统研究,是对裂缝等效介质理论、方位属性分析与叠前反演方法的全面总结与深化。在研究和写作过程中,笔者得到了众多老师和同行专家的悉心指导与大力支持。在此,谨向中国石油大学(华东)储层地球物理实验室的印兴耀教授、吴国忱教授、孙成禹教授、张繁昌教授、曹丹平教授、宗兆云教授、张佳佳教授、王保丽副教授、梁锴副教授、李坤副教授,帝国理工学院王仰华教授,中南大学戴前伟教授、崔益安教授、郭振威教授、任政勇教授、王珣副教授,以及中南大学地震教研室的张大洲副教授、王璞副教授、李磊副教授、孙娅教授、李国良教授、陈彦钧副教授,同济大学陈怀震教授,中国石油大学(北京)张峰教授,电子科技大学李林副教授等诸位专家学者表示衷心感谢。特别感谢中石化石油物探技术研究院许凯教授级高工,中石油勘探开发研究院西北分院高建虎教授级高工、杜炳毅高工、常德宽高工,以及中南大学曾勇坚高工在实际地震资料处理与解释方面给予的宝贵指导。

同时,也感谢国内外众多同行在油气储层地球物理反演与预测领域所做的开创性工作,为本书的构思形成、理论深化和方法发展提供了重要参考。本书研究工作得到国家自然科学基金项目(编号:42595551、42474172、U23B6010-02)和湖南省自然科学基金项目(编号:2025JJ20036)的资助,在此一并致以诚挚的谢意。书稿完成过程中,多位同事在数据处理、正演模拟、反演编程与图件制作等环节给予了大力支持,也一并表示感谢。由于时间和能力所限,书中仍可能存在不足之处,恳请读者批评指正,以期在后续研究与再版中不断完善提升。

潘新朋

2025 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究进展	2
1.2 存在问题	5
第 2 章 裂缝介质等效介质理论研究	7
2.1 地震各向异性物理诱因	7
2.2 裂缝诱导静态等效介质理论	9
2.3 裂缝诱导准静态等效介质理论	15
2.4 裂缝诱导动态等效介质理论	23
2.5 小结	29
第 3 章 基于静态等效介质理论的裂缝介质方位叠前地震反演	31
3.1 裂缝诱导静态等效介质弱各向异性近似理论	31
3.2 等效介质刚度与地震反射间的定量关系	38
3.3 静态等效介质地震反射弱各向异性近似方程	41
3.4 基于静态等效介质理论的裂缝介质方位叠前地震反演方法	44
3.5 应用实例	48
3.6 小结	59
第 4 章 基于准静态等效介质理论的裂缝介质方位叠前地震反演	61
4.1 裂缝诱导准静态等效介质弱各向异性近似理论	61
4.2 准静态等效介质地震反射弱各向异性近似方程	73
4.3 基于准静态等效介质理论的裂缝介质方位叠前地震反演方法	76
4.4 应用实例	79
4.5 小结	92
第 5 章 基于动态等效介质理论的裂缝介质方位叠前地震反演	93
5.1 裂缝诱导动态等效介质各向异性精确理论	93
5.2 裂缝诱导动态等效介质弱各向异性近似理论	99
5.3 动态等效介质地震反射弱各向异性近似方程	106
5.4 基于动态等效介质理论的裂缝介质方位叠前地震反演方法	111

5.5 应用实例	114
5.6 小结	127
第 6 章 结论与展望	128
参考文献	130

第1章 绪 论

地震学以地球介质模型为基础假设,利用地震波动理论研究地下实际介质,是固体地球物理学的重要分支。其发展历程经历了从简单的均匀、单相、各向同性、完全弹性等效介质模型,逐步向复杂而更符合实际的非均匀、多相、各向异性及非完全弹性等效介质模型逼近的过程(吴国忱,2006;王赟等,2017)。地壳岩石在成岩作用及后期构造运动形成的原生与次生应力场共同作用下,非均质岩体中往往发育定向排列的单组或多组裂缝,使地震波传播的运动学与动力学特征呈现明显的方向性(Thomsen,2014)。

含裂缝岩石中横波分裂现象的发现,引发了裂缝诱导各向异性研究的热潮(Crampin,1978,1981,1984)。由于地下裂缝尺度通常远小于勘探地震波的波长,传统地震勘探数据难以直接呈现裂缝的空间展布与几何特征。等效介质理论为利用地震观测数据描述含裂缝介质特征提供了理论基础。在长波假设条件下,即当裂缝尺度远小于地震波长时,具有定向裂缝分布的非均质介质可等效为均匀各向异性介质,其宏观弹性参数与微观裂缝体系的平均弹性性质相一致(魏修成等,2008;刘喜武等,2015)。裂缝是碳酸盐岩及非常规油气储层的重要储集空间与渗流通道,对储层中油气的分布和渗流系统具有决定性控制作用。准确刻画地下裂缝介质,不仅可指导裂缝性油气藏的勘探与产能评价,也能为压裂开发的可行性研究提供依据,因此对裂缝油气藏的勘探与开发具有重要意义(刘成斋,2003;穆龙新等,2009;撒利明等,2010;Sayers,2010)。鉴于裂缝预测方法在横向分辨率及空间展布识别方面的优势,裂缝介质叠前地震反演在裂缝储层预测与精细描述中占据关键地位(Liu and Martinez,2012)。因此,构建合理的等效介质理论模型,探索多类型各向异性介质的参数化方法,建立微观裂缝特征参数(如裂缝密度、方位、纵横比及流体性质等)与宏观地震响应之间的数学解析关系,研究基于等效介质理论的裂缝介质叠前地震反演理论和方法,对于实现裂缝介质的定量预测与表征具有重要意义。

在实际地下介质中,裂缝与基质孔隙共同构成了裂缝性储层的储集体系。此类岩石可更准确地视为一种含基质孔隙的裂缝介质,其流体充填的裂缝与基质孔隙相互连通。地震波在此类介质中传播时,不仅表现出速度频散特征,也伴随一定的能量衰减(Thomsen,1995;Hudson et al.,1996,2001;Gurevich et al.,2009)。因此,在裂缝等效介质的参数化过程中,应充分考虑裂缝与基质孔隙间流体流动效应,进而探讨饱和流体条件下含孔隙裂缝介质的各向异性与衰减特征。本书以裂缝介质的等效介质理论为研究基础,系统探讨单组及多组裂缝诱导的静态、准静态与动态三类弱各向异性近似理论,推导裂缝等效介质的地震波反射系数及方位弹性阻抗的弱各向异性近似方程,建立微观裂缝、流体及衰减等敏感参数与宏观地震响应之间的定量关系。在此基础上,利用不同观测方位的叠前地震资料,在贝叶斯反演框架下开展正则化约束的裂缝介质叠前反演,实现地下裂缝介质的定量化、精细化描述,为裂缝性油气藏的勘探与开发提供可靠的地球物理依据。

1.1 研究进展

1.1.1 裂缝等效介质理论研究进展

等效介质理论 (equivalent medium theory, EMT) 是在长波长假设条件下, 将非均匀裂缝介质等效为均匀各向异性介质, 从而建立裂缝特征参数与地震反射特征之间的定量关系模型。Hudson (1980, 1981) 提出的孤立硬币型裂缝模型, 是最常用的裂缝诱导静态等效介质理论模型之一。该模型基于平滑化方法, 对薄硬币状椭球裂缝中地震波场的散射进行平均分析, 推导出孤立裂缝岩石的等效弹性参数方程, 可用于描述裂缝密度与取向对稀疏裂缝介质速度各向异性特征的影响。Schoenberg (1980, 1983) 提出的线性滑动模型是另一类裂缝诱导静态等效介质理论模型, 其将裂缝理想化为零厚度平面, 忽略裂缝的几何形态和微观结构, 并假设跨越裂缝面的应变相较于未扰动岩体存在显著差异 (即位移不连续), 裂缝面上的位移与作用应力呈线性关系。Bakulin 等 (2000a) 和 Chichinina 等 (2006) 比较了这两种静态模型的关系, 研究表明, 在低频假设下二者具有等效性。

地下含裂缝岩石本质上是一种含基质孔隙的裂缝介质, 裂缝内的流体与岩石基质孔隙相互连通。由于背景基质孔隙及裂缝-孔隙流体流动效应的存在, 裂缝介质的平均弹性属性介于气饱和 (干) 裂缝与流体饱和 (湿) 孤立裂缝之间 (Bakulin et al., 2000a)。在此类介质中, 地震波传播不仅引起完全饱和流体裂缝间的流动和部分饱和裂缝内的流体运动, 同时会压缩基质孔隙形成压力梯度, 促使裂缝与孔隙间的流体交换, 从而导致速度各向异性具有明显的频率相关性 (Galvin et al., 2007; Gurevich et al., 2009)。在低频条件下, 流体压力有足够时间在裂缝与基质间达到平衡, 因此不考虑孔隙的传统裂缝介质模型将不再适用 (Thomsen, 1995; Hudson et al., 2001)。由于地震频率通常 (但不总是) 低于含孔隙裂缝岩石的特征频率, 低频 (即“准”静态) 等效介质理论足以解释含孔隙裂缝介质中流体流动效应引起的地震观测各向异性变化。

Thomsen (1995) 提出的含等径孔隙裂缝模型是典型的含孔隙裂缝等效介质理论模型, 首次考虑了球状等径孔隙与定向裂缝间的流体流动效应, 并定量描述了低频与中高频条件下流体交换对弹性参数与各向异性特征的影响。在低频下, 该“准”静态模型考虑裂缝与背景孔隙受地震波挤压产生的流体交换, 介质内部压力可达平衡; 而在中高频条件下, 流体流动效应可忽略。Hall 和 Kendall (2000) 采用类似模型预测裂缝储层中的流体替换效应。然而, Thomsen 模型建立在理想化的几何假设 (硬币型裂缝) 和低裂缝密度的前提下。为克服其局限性, Cardona (2002) 结合 Brown 和 Korrington (1975) 的流体替换理论与线性滑动模型, 推导了饱和流体含孔隙裂缝岩石的流体替换方程。研究发现, 当岩石中存在背景孔隙时, 与 Thomsen (1995) 理论相比, 其解析结果略有差异, 但数值模拟结果高度一致。在此基础上, Gurevich (2003) 结合各向异性 Gassmann 方程与线性滑动理论, 提出了更具普适性的饱和流体含孔隙裂缝介质“准”静态等效模型, 推导了单组平行裂缝的流体饱和和水平横向各向同性 (horizontal transversely isotropic, HTI) 介质刚度矩阵解析式, 揭示了刚度矩阵非零元素与干背景弹性属性、基质模量、孔隙

度、干裂缝柔度及流体模量的关系。Sil 等(2011)进一步分析了流体替换对介质弹性与反射系数的影响。针对垂直横向各向同性(vertical transversely isotropic, VTI)介质, Mavko 和 Bandyopadhyay(2009)推导了与 Thomsen(1986)弱各向异性参数 δ 相关的垂向速度校正方程。Huang 等(2015)基于 Gurevich 理论, 推导了 HTI 介质及含两组垂直裂缝的正交(orthorhombic, ORT)各向异性介质的流体替换解析式, 评估了流体替换对地震各向异性的影响。Chen 和 Zhang(2017)在此基础上, 基于小裂缝弱度与低孔隙度假设, 推导了含气裂缝等效 HTI 介质纵波反射系数的弱各向异性近似方程。Pan 等(2018a)及 Pan 和 Zhang(2018a)结合各向异性 Gassmann 方程与 Schoenberg 线性滑动模型, 提出了单组及多组裂缝诱导的 HTI 与 ORT 介质弱各向异性流体替换方程, 并结合逆散射理论(Shaw and Sen, 2004)推导了对应的纵波反射系数弱各向异性近似式。

以上模型均属于静态或准静态等效介质理论, 其假设与频率无关, 仅能反映裂缝发育强度与方向信息, 而无法区分裂缝尺度特征。实际中, 裂缝介质的弹性响应与频率相关, 地震波传播表现出速度频散与能量衰减。因此, 需要在考虑基质孔隙微观结构、裂缝多尺度发育特征及流体流动机制差异的基础上, 发展全频段动态等效介质理论, 以动态、精细地描述含裂缝储层的地震波传播特征, 定量表征裂缝几何与流体属性, 进而预测储层渗透率(Ali and Jakobsen, 2014; 刘喜武等, 2015)。

针对 Hudson(1980)静态模型, Hudson(1988)进一步考虑了裂缝内流体流动效应, 分析了部分饱和裂缝中流体流动引起的波速各向异性与衰减特征。Hudson 等(1996)研究了平行裂缝间及裂缝-孔隙的流体流动效应。Pointer 等(2000)综合分析了三种主要机制: 裂缝间流动、裂缝内多相流动及裂缝-基质孔隙流动, 揭示定向或随机裂缝体系均会在地震频率范围内影响波速各向异性与衰减特性。Hudson 等(2001)基于流体扩散方程推导了裂缝-孔隙流体流动的动态刚度矩阵, 但其低频极限与各向异性 Gassmann 方程不一致。Parra(2000)考虑局部“喷射流”效应, 研究了声波与超声波频段下的速度频散与衰减, 但其模型低估了地震频段的影响。Chapman 等(2002)和 Chapman(2003)综合孔隙、微裂缝与定向裂缝多尺度流动机制, 提出频率相关的动态等效复刚度矩阵, 表明模型在低、高频极限下分别与各向异性 Gassmann 模型和 Hudson 模型一致。Maultzsch 等(2003)利用横波双折射频率依赖性反演裂缝密度与尺度。Jakobsen 等(2003)采用 T 矩阵方法模拟复杂孔隙介质的弹性响应, 其结果与 Brown 和 Korrinda(1975)的理论一致。Jakobsen 和 Chapman(2009)进一步基于 T 矩阵理论, 统一描述“全局流”(达西流)与“局部喷射流”效应, 完善了 Chapman 多尺度动态模型。唐晓明(2011)基于毕奥(Biot)理论, 引入“挤喷流”效应, 提出了含孔隙裂缝介质的弹性波统一理论。Kong 等(2013)研究了不同流体充填对裂缝介质波速频散与衰减的影响。Brajanovski 等(2006)探讨了纵波衰减与裂缝法向弱度及频率的关系。Chichinina 等(2006, 2009a)通过引入复数裂缝弱度参数, 提出修正的线性滑动动态模型, 用以描述裂缝介质的衰减各向异性, 其结果与 Zhu 和 Tsvankin(2006)的平面波衰减因子一致。Carcione 等(2012)进一步推导了裂缝诱导 HTI 介质与 ORT 介质中复柔度与刚度矩阵的关系。Chen 和 Innanen(2018)在此基础上考虑背景介质的本征衰减, 改进了修正线性滑动模型。Pan 和 Zhang(2018b)则进一步将流体流动效应与裂缝预测结合, 但尚未考虑背景衰减及裂缝诱导衰减对各向异性的综合影响。

1.1.2 裂缝介质方位叠前地震反演研究进展

在油气储层地震勘探中, 振幅随偏移距/角度变化 (amplitude versus offset/angles, AVO/AVA) 属性蕴含了反映目标储层物理性质的关键信息。在多数实际应用中, 各向同性等效介质假设通常是合理且有效的, 因此传统叠前属性分析与 AVO/AVA 叠前地震反演研究均建立在各向同性等效介质理论模型的基础上 (Bortfeld, 1961; Richards and Frasier, 1976; Ostrander, 1984; Shuey, 1985; Buland, 2002; Downton, 2005; 陈建江, 2007; 杨培杰, 2008; 张广智, 2008; 印兴耀等, 2010, 2015; 宗兆云, 2013)。然而, 当储层岩石中发育有定向裂缝时, 地震波在介质中的传播将表现出显著的速度各向异性特征 (Thomsen, 2014)。其中, VTI 介质是最常见的各向异性类型, 而含定向裂缝的 HTI 介质具有明显的振幅随偏移距和方位变化 (amplitude versus offset and azimuth, AVOAz) 响应特征, 可用于识别裂缝几何属性 (如裂缝发育强度、方位及充填物性质等), 为裂缝识别与描述提供了重要依据 (Mallick et al., 1998; Gray and Todorovic-Marinic, 2004; Downton and Gray, 2006; Bachrach et al., 2009; 杜启振和杨慧珠, 2003; 朱兆林和赵爱国, 2005; 曾联波等, 2008)。精心设计的三维地震采集方案应具备充足的方位覆盖, 以便进行 AVOAz 分析。随着三维三分量 (3D3C) 地震观测技术的广泛应用以及横波勘探的日益发展, 地震波在各向异性等效介质中的传播特征研究得到了极大拓展 (Li, 1998; Jilek, 2002; Grechka et al., 1999; Tsvankin and Larner, 2004; 李录明等, 2010)。但由于横波勘探成本较高且资料品质相对较低, 当前裂缝介质叠前反演仍主要基于常规纵波方位地震资料及纵波地震各向异性理论 (潘新朋, 2019)。

目前, 各向异性介质中地震波传播研究的核心问题包括两方面: ①地震波传播特征的分析, 如相速度、群速度及偏振方向 (Tsvankin, 1996; Pšenčík and Gajewski, 1998); ②反射/透射系数的推导及其线性化参数研究。Fryer 和 Frazer (1984) 基于应力与应变特征向量矩阵, 计算了一般各向异性介质固体-固体界面的反射/透射系数。Mallick 和 Frazer (1991) 推导了固体-液体界面或液体-固体界面处的反射系数方程, 揭示了方位各向异性对反射特征的影响。Schoenberg 和 Protázio (1990) 将各向同性佐普利兹 (Zoeppritz) 方程推广至各向异性介质, 但所得精确非线性解析式较为复杂, 难以直接揭示介质参数对反射响应的影响。Thomsen (1986) 首次提出“弱各向异性”等效介质模型, 为不同类型弱各向异性介质界面的近似反射/透射系数推导提供了理论基础。基于精确反射系数的一阶扰动展开, 并结合弱弹性参数差与弱各向异性假设, 可进一步推导裂缝等效介质的反射/透射系数近似方程 (Jech and Pšenčík, 1989; Thomsen, 1993; Rüger, 2002; Golikov and Stovas, 2010)。Rüger (1997, 1998) 在平面波拟 Zoeppritz 方程的基础上, 结合弱各向异性近似与相似介质假设, 推导出 VTI、HTI 及 ORT 介质的反射/透射系数近似公式。Ikelle (1996, 1997) 提出基于方位傅里叶级数展开的任意各向异性介质纵波反射系数弱各向异性近似方程。基于一阶扰动理论, Pšenčík 和 Vavryčuk (1998)、Vavryčuk 和 Pšenčík (1998)、Vavryčuk (1999) 及 Pšenčík 和 Martins (2001) 等进一步推导了任意对称弱各向异性介质的纵波反射系数解析式。Zillmer 等 (1997, 1998) 研究了弱各向异性介质中纯 PP 波与纯 SS 波的反射响应。Jilek (2002) 则给出了 VTI、HTI 及 ORT 介质中转换 PS 波的弱各向异性近似反射方程。梁锴 (2009)、Ivanov 和 Stovas (2017) 及 Wang 等 (2017)

基于纵波入射的平面波动方程,推导了倾斜横向各向同性(tilted transversely isotropic, TTI)介质的拟 Zoeppritz 精确方程,并在弱各向异性与相似介质假设下给出其反射/透射系数的近似解。上述推导的代数表达式通常较为复杂,计算中往往需借助符号处理软件进行公式化简。

与此同时,地震波场的逆散射理论研究也取得了重要进展。地震散射波偏移成像与反演常采用博恩(Born)近似或雷托夫(Rytov)近似(Eaton and Stewart, 1994; Stolt and Weglein, 2012)。Clayton 和 Stolt(1981)以及 Keys 和 Weglein(1983)率先利用 Born 近似反演声波反射数据。Hudson 和 Heritage(1981)、Wu 和 Aki(1985)研究了任意弹性非均质体的散射特征。Coates 和 Chapman(1990, 1991)指出 Born 积分中包含了几何射线效应(如旅行时扰动、射线弯曲及聚焦),并扩展了 Born 散射理论至各向异性介质。Beylkin 和 Burridge(1990)研究了线性化逆散射理论,提出散射函数可用于刻画散射波振幅的空间分布,并与界面反射系数成角度相关的比例关系。Nicoletis 等(1998)进一步建立了转换 PS 波散射函数与线性化反射系数的联系。基于逆散射理论,Shaw 和 Sen(2004)利用 Born 积分与稳相法,从各向同性背景介质出发,推导了 HTI、TTI、ORT 及单斜(monoclinic, MON)各向异性介质的纵波与转换 PS 波反射系数弱各向异性近似方程。数值模拟结果表明,其纵波反射系数与一阶扰动理论推导结果高度一致,但转换 PS 波方程仅在小入射角条件下适用。印兴耀等(2013)从逆散射理论出发,将非均质弹性介质等效为背景介质与一阶扰动叠加体,推导了包含流体/孔隙参数的纵波反射系数近似方程。考虑裂缝-孔隙流体流动效应,Xue 等(2017)基于 Gurevich 准静态等效介质理论,引入广义裂缝弱度参数,用于表征饱和和流体含孔隙裂缝介质的裂缝与流体特征,并采用散射理论建立了纵波反射系数弱各向异性近似模型,在贝叶斯框架下提出模型约束反演方法。Zong 等(2015)及 Chen 等(2018)进一步推导了各向同性黏弹介质的 PP 波与转换 PS 波反射系数近似方程,发展了弹性参数与衰减参数联合反演方法。Pan 等(2018b)及 Pan 和 Zhang(2018c)利用一阶散射波稳相理论,推导了 HTI 介质与 ORT 介质纵波反射系数弱各向异性近似方程,并开展了裂缝介质叠前地震反演的应用研究。

1.2 存 在 问 题

裂缝作为碳酸盐岩储层和非常规储层(如致密油气、页岩油气等)中重要的储集空间与运移通道,其形态、方位及发育特征直接控制着储层的渗流能力与含油气富集规律。利用地震资料开展裂缝介质参数的定量反演与预测,是实现裂缝性油气藏精细勘探与开发的关键技术途径。近年来,国内外学者在裂缝介质等效介质理论与叠前地震反演方法方面开展了大量研究,形成了从静态、准静态到动态等多种理论模型体系。这些研究为认识裂缝诱导各向异性、揭示裂缝特征参数对地震响应的影响规律奠定了重要基础。然而,随着非常规储层勘探精度的不断提高和地震资料多方位获取技术的发展,现有研究仍存在以下主要问题和不足。

(1) 裂缝介质等效理论的适用性与参数可反演性不足。目前常用的等效介质理论模型(如 Hudson 模型、Schoenberg 线性滑动模型、Thomsen 含孔隙裂缝模型、Chapman 频

率相关模型等)多基于特定假设条件,仅能分别刻画静态、准静态或动态频率域下的地震响应特征,模型间缺乏可转换关系,参数物理意义在反演应用中存在不一致性。此外,部分模型中裂缝与基质孔隙的耦合机制、流体流动效应与频率相关性考虑不足,限制了其在地震反演中的适用范围。

(2) 裂缝特征参数与地震反射响应的定量联系尚不完善。现有研究在建立裂缝特征参数(如裂缝密度、方位、充填特征等)与宏观地震属性(如反射系数、弹性阻抗、AVO/AVOAz 响应)之间的解析关系时,往往依赖线性化或近似处理。部分理论仅能定性解释地震响应特征,而缺乏可直接用于反演预测的稳定、可解析的定量方程,限制了裂缝地震识别与表征的精度与可靠性。

(3) 叠前地震反演方法的稳定性与约束能力不足。传统的叠前反演方法多基于 Zoeppritz 方程或其近似形式,参数间存在强耦合,反演的不唯一性显著。在噪声干扰、方位覆盖不完整或资料品质较低的情况下,反演结果易受非线性效应影响而不稳定,缺乏有效的模型约束与先验控制,难以实现裂缝发育强度、走向及流体属性的可靠定量反演。

(4) 裂缝介质的动态响应与流体敏感性研究相对薄弱。裂缝与基质孔隙间的流体流动会引起明显的速度频散与能量衰减,但当前研究多集中于理论模型建立,缺乏结合实测地震资料的验证与反演方法。动态域裂缝衰减参数与地震反射特征之间的解析关系尚未完善,导致裂缝流体指示参数的定量反演仍具挑战性。

综上所述,现有裂缝介质研究在等效介质理论与地震反演方法之间缺乏系统衔接,裂缝特征敏感参数与地震反射响应间的定量解析关系仍不够明确,裂缝发育及流体特征的稳定反演预测方法尚待深化研究。

针对上述问题,本书以裂缝介质叠前地震反演为主要目标,以实现裂缝介质从静态到动态的系统表征与叠前反演,重点开展以下研究工作:

(1) 裂缝介质等效介质理论研究。以裂缝介质地震反演需求为导向,系统研究裂缝诱导的静态、准静态与动态等效介质理论模型,明确不同频率域下裂缝特征参数对地震波反射与衰减响应的影响机制,为反演方法建立提供理论基础。

(2) 裂缝特征敏感参数与地震响应的定量关系研究。基于静态、准静态与动态三种等效介质理论,推导裂缝诱导介质的反射系数与方位弹性阻抗弱各向异性近似方程,建立裂缝特征参数(密度、方位、充填特性等)与地震反射属性之间的数学解析表达式。

(3) 基于贝叶斯框架的正则化约束反演方法研究。结合方位叠前地震资料,发展贝叶斯理论下的正则化约束迭代反演策略,提出方位弹性阻抗及方位衰减弹性阻抗反演方法,实现裂缝发育强度、走向及流体特征参数的稳定反演与预测。

(4) 静态-准静态-动态一体化反演应用研究。在静态域、准静态域与动态域分别开展裂缝介质叠前地震反演,实现裂缝结构、流体流动效应与频率相关衰减特征的综合预测,为裂缝油气藏勘探与开发提供可靠的地球物理依据。

第2章 裂缝介质等效介质理论研究

地震波的波长通常远大于地下自然发育裂缝的尺度。在此条件下,可基于等效介质理论,将微观尺度上非均匀、定向排列的裂缝岩石视为具有各向异性特征的宏观均匀介质。由此,地震波在裂缝介质中的传播规律可通过各向异性等效介质模型进行表征。发展合理有效的等效介质理论模型,并建立宏观地震响应特征与微观裂缝介质参数之间的定量关系,不仅是裂缝介质地震波传播规律(正问题)的理论基础,也是裂缝系统参数反演与预测(反问题)的关键依据。

传统的静态等效介质理论主要用于描述地震波在裂缝介质中传播时的速度各向异性特征,即仅考虑弹性性质的方向性差异。然而,该理论忽略了与频率相关的传播与衰减效应,难以区分不同尺度裂缝的地震响应特征。事实上,在含流体裂缝岩石中,裂缝与基质孔隙之间存在多种流体流动机制,其耦合效应会引起明显的频率相关的各向异性与能量衰减特征。因此,研究裂缝介质中流体流动机制及其对地震波传播的动态影响,建立能够反映真实地下介质特性的动态等效介质理论模型,对于定量描述裂缝几何属性、流体性质以及预测裂缝储层发育特征具有重要意义。

本章首先介绍地震各向异性的主要诱导因素,然后系统梳理并分析了裂缝诱导的三类典型等效介质理论模型:静态等效介质理论模型、准静态等效介质理论模型与动态等效介质理论模型。

- 静态等效介质理论模型部分主要介绍 Hudson 裂缝模型与 Schoenberg 线性滑动模型,重点阐述裂缝几何特征对地震速度各向异性的影响机理;
- 准静态等效介质理论模型部分重点介绍 Thomsen 含等径孔隙裂缝模型与 Gurevich 饱和和流体含孔隙裂缝模型,探讨低频条件下裂缝与基质孔隙流体耦合对地震响应的影响规律;
- 动态等效介质理论模型部分主要分析修正的 Schoenberg 线性滑动模型与 Chapman 频率相关多尺度裂缝模型,从频率依赖性和能量衰减角度揭示多尺度裂缝系统的地震波传播特性。

通过上述研究,本章旨在构建从静态到动态、从干裂缝到含流体裂缝的多层次等效介质理论体系,为后续裂缝介质叠前地震反演方法的推导与参数化提供坚实的理论支撑。

2.1 地震各向异性物理诱因

在地震勘探中,地球介质通常被近似为各向同性体,但实际地层多具有优选取向,其方向性可能源于介质成分中矿物晶体的排列模式,或外在地质应力场与沉积构造条件。大量研究表明,多种物理因素都可能导致岩石介质呈现地震各向异性,其传播特征可通

过不同类型的各向异性模型加以模拟。Crampin(1984)系统总结了导致地震各向异性的五类主要物理机制：

- 优选排列的晶体、颗粒或矿物诱导的本征各向异性；
- 页岩黏土颗粒排列诱导的岩性各向异性；
- 沉积岩精细分层引起的层状各向异性；
- 岩石结构、裂缝或节理系统诱导的结构各向异性；
- 直接应力场作用下的应力诱导各向异性。

本节重点讨论其中对地震勘探最具代表性的几种类型：页岩本征各向异性与定向排列晶体诱导各向异性、精细分层诱导各向异性、直接应力诱导各向异性以及裂缝诱导各向异性。

2.1.1 页岩本征各向异性与定向排列晶体诱导各向异性

当晶体颗粒在空间中呈优选定向排列并形成连续的结构取向时，晶质岩石将表现出显著的本征各向异性。具有相似取向的晶体簇可形成宏观上具有各向异性特征的晶状固体。在高温及构造应力环境下，晶体取向由温度相关的机制所控制，主要包括：

- 熔融体分异与重力沉降；
- 动态重结晶；
- 塑性变形与应力诱导旋转。

当晶体取向与主应力方向一致时，其传播速度沿主应力方向与垂直方向存在显著差异，从而使多晶体介质表现出可观测的地震各向异性。

页岩在沉积盆地中广泛分布，占比常超过 70%，是多种油气藏的重要盖层与封隔体。页岩各向异性是地震资料中最常见的各向异性类型之一(Banik, 1987; Vernik and Nur, 1992; Johnston and Christensen, 1995; Hornby, 1998)。页岩为一种多矿物、多相复合孔隙介质，由黏土矿物、石英、长石、方解石及黄铁矿等颗粒与胶结物组成，其各向异性主要受控于：

- 各矿物相的体积分数与弹性性质；
- 颗粒的形态、取向与分布；
- 各相之间的空间连通性。

这些因素的综合作用决定了页岩的宏观各向异性强度与地震响应特征。

2.1.2 精细分层诱导各向异性

当地层由厚度远小于地震波波长的薄层周期性堆叠组成时，可将其视为一种长波长各向异性介质。在此假设下，地震波的传播特征可用结构更为简化的横向各向同性(transversely isotropic, TI)模型进行描述(Postma, 1955; Backus, 1962)。

Backus(1962)提出的“Backus 平均”方法是计算精细分层介质有效弹性常数的经典手段，该理论为地震勘探中薄层等效研究奠定了基础。对更一般的层状各向异性体，Schoenberg 和 Muir(1989)提出了改进的等效计算公式。研究表明，精细分层所引起的各向异性通常较弱，难以解释沉积岩中部分观测到的较强各向异性现象，但在页岩、碳酸

盐岩互层或泥砂互层等地层中仍具有重要应用价值。

2.1.3 直接应力诱导各向异性

Nur 和 Simmons(1969a, 1969b)以及 Nur(1971)最早观测并证实了应力诱导的地震各向异性。研究表明,原本各向同性的弹性介质在外部应力作用下,其平均弹性常数将呈方向性变化,从而表现出可观测的各向异性特征(Crampin and Zatsepin, 1997; Zatsepin and Crampin, 1997)。

Crampin(1987)指出,应力对地震波传播的影响主要体现在近地震区与高应力集中区,而其他各向异性成因(如裂缝系统)在常规条件下往往占主导地位。应力诱导各向异性与裂缝诱导各向异性常难以严格区分,因为许多裂缝本身正是由偏应力场产生的。在一般情况下,若地震各向异性强度小于 5%,多归因于应力诱导;而当观测到的各向异性超过 5%时,通常认为裂缝贡献占主要地位。Nur(1971)、Crampin 和 Zatsepin(1997)、Zatsepin 和 Crampin(1997)、Chapman 等(2002)以及 Madadi 等(2012)提出了多种应力诱导裂缝开闭模型,用于模拟微裂缝响应与弹性参数变化。

2.1.4 裂缝诱导各向异性

在均匀各向同性介质中嵌入一组或多组定向排列的裂缝后,岩石的整体弹性性质将表现出各向异性,其地震响应可用等效均匀各向异性介质加以描述。由于地壳中广泛发育的裂缝通常受非静岩压力控制,并呈现明显的取向一致性,裂缝诱导各向异性被认为是多数碳酸盐岩储层及非常规储层(如致密油气、页岩油气)的主要各向异性来源。

本书所研究的地震各向异性岩石均属于裂缝诱导的各向异性等效介质。后续小节将系统介绍裂缝介质的三类典型等效理论模型:

- 静态等效介质理论模型(Hudson 模型与 Schoenberg 线性滑动模型);
- 准静态等效介质理论模型(Thomsen 模型与 Gurevich 含孔隙裂缝模型);
- 动态等效介质理论模型(修正的 Schoenberg 模型与 Chapman 频率相关多尺度模型)。

这些模型构成了从静态速度各向异性到动态衰减各向异性的完整理论框架,为裂缝储层的叠前地震反演与流体特征识别提供了坚实的物理基础。

2.2 裂缝诱导静态等效介质理论

裂缝诱导静态等效介质理论模型主要包括 Hudson(1980, 1981)提出的孤立裂缝模型与 Schoenberg(1980, 1983)提出的线性滑动模型。Hudson 模型推导了稀疏分布的薄硬币状裂缝介质的有效刚度张量一阶与二阶近似表达式,建立了裂缝微观参数(密度、形状、取向等)与宏观弹性属性之间的定量关系,用于描述和解释地震波速度各向异性特征及裂缝发育强度与走向(Bakulin et al., 2000a)。Schoenberg 模型克服了 Hudson 模型在小裂缝密度与理想几何假设方面的局限性,将裂缝等效为零厚度平面,推导了长波长极限下含

单组或多组定向垂直裂缝的等效 HTI 和 ORT 介质弹性参数矩阵, 并分析了地震波在此类介质中的传播特征 (Schoenberg and Douma, 1988; Schoenberg and Sayers, 1995; Schoenberg and Helbig, 1997; Bakulin et al., 2000a, 2000b)。

2.2.1 Hudson 孤立裂缝模型

Hudson (1980, 1981) 提出的孤立裂缝等效介质理论假设裂缝介质由各向同性的弹性背景岩石与嵌入其中的薄硬币状椭球裂缝组成 (图 2-1)。该模型在长波长假设下, 将裂缝微观几何与宏观地震响应相联系, 给出了裂缝岩石的等效弹性刚度模量, 是第一个成功用于解释裂缝介质速度各向异性特征的等效介质理论模型。

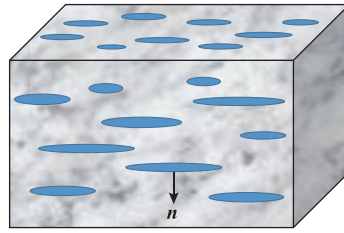


图 2-1 Hudson 孤立裂缝模型

Hudson 孤立裂缝模型的主要假设如下 (Hudson, 1981):

- (1) 裂缝的尺度 (开度与长度) 远小于地震波长, 即满足长波长近似条件;
- (2) 裂缝呈薄硬币状椭球体, 纵横比极小;
- (3) 裂缝平行排列且统计特征在地震波长范围内一致;
- (4) 裂缝密度较小, 裂缝之间相互独立、不连通, 流体流动效应可忽略;
- (5) 裂缝内流体的弹性模量较大, 但远小于岩石基质的弹性模量。

如图 2-2 所示, 裂缝长度为 $2a$, 开度为 $2c$, 其纵横比定义为 $\alpha=c/a$ 。裂缝密度 e 可表示为

$$e = \frac{N_e}{V_e} a^3 = \frac{3\phi_e}{4\pi\alpha} \quad (2-1)$$

式中, N_e/V_e 表征单位体积内的裂缝数量; ϕ_e 表征裂缝孔隙度。

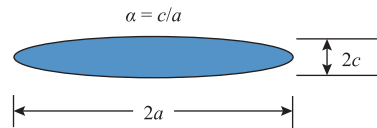


图 2-2 Hudson 椭球裂缝纵横比定义示意图

Hudson 等 (1996) 推导了含薄硬币状椭球裂缝介质的等效刚度张量高阶表达式:

$$\mathbf{C}_{\text{Hudson}} = \mathbf{C}_b + \mathbf{C}^1 + \mathbf{C}^2 + O(e) \quad (2-2)$$

式中, $\mathbf{C}_b$ 为各向同性背景介质刚度矩阵; $\mathbf{C}^1$ 为一阶修正项 (忽略裂缝间相互作用, 仅考