

微地震反演研究

常旭 王一博 编著



科学出版社

微地震反演研究

常 旭 王一博 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以非常规油气开发储层压裂形成的微地震为研究对象, 基于地震学、岩石力学和勘探地震学的基本方法原理, 从微地震的形成、微地震事件的识别、信号的处理、震源定位、震源机制反演以及与微地震相关的岩石物理实验出发, 论述微地震的研究方法, 同时给出研究实例。

本书可供地球物理和岩石物理研究领域的学者、工程技术人员、高校和科研院所的教师和研究生在科研工作和生产实践中参考。

图书在版编目(CIP)数据

微地震反演研究/常旭, 王一博编著. —北京: 科学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-03-060753-9

I. ①微… II. ①常… ②王… III. ①地震反演-应用-变密度测井-研究 IV. ①P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 042848 号

责任编辑: 周 丹 沈 旭/责任校对: 杨聪敏

责任印制: 师艳茹/封面设计: 许 瑞

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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 268 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

美国页岩油气的成功开采颠覆了油气储层需要满足必要的孔隙度和渗透性的基本认知，学术界和工业界经过研究和实践获得油气储层是可以改造的这一共识。油气储层改造利用水力压裂使储层岩石破裂，改变了岩石的孔隙度和渗透性，从而使吸附和溶解在纳米级空隙中的油气被开采出来。类似于地球深部的断裂引发天然地震，储层岩石的破裂会引发微小的地震，即微地震。微地震会在自然界和许多工业活动中发生，例如火山喷发、地热开发、二氧化碳封存、水库蓄水等自然和工业活动都会改变地下应力的平衡，从而诱发微地震。

微地震的震级一般在-3级到3级之间，研究微地震震源的空间分布、震源的破裂类型、震源的能量差异可以对产生微地震的地下介质进行评价，进而对形成微地震的各类自然现象和工业活动进行评价。近年来，微地震越来越受到科学界的重视。作者及其研究团队将近年来在微地震研究中取得的科研认识编辑成书，并与关心微地震研究的同行分享。全书内容涉及的研究成果得到国家自然科学基金项目41390455、41230317及中国科学院战略性先导科技专项XDB10030500的资助。

第1章主要对学术界和工业界在微地震研究方面的进展进行回顾和综述，对微地震的基本概念、微地震的形成和微地震研究的发展进行简要叙述，同时提出本书后面章节涉及的研究问题的意义和难点。

第2章主要介绍微地震研究中地震波场的正演计算。微地震波场的正演计算与反射地震勘探的地震波场计算最大的不同是要加入震源模型，而反射地震勘探的正演数据往往只需要给出某一主频的雷克子波(或其他类型的子波)。加入震源模型一方面是为了能更好地模拟实际观测的微地震数据，另一方面是要在微地震数据的反演中获取震源破裂的机制。因此，本书专门为微地震数据的正演计算安排了一章。

第3章主要介绍微地震信号的识别。这一章从观测系统的优化设计到有效微地震信号的提取方法都进行了介绍。在反射地震勘探中，关于低信噪比数据的噪声消除和有效信号的保真处理有很多有效的方法。本书对于信号的噪声处理并不进行系统性的论述，在这一章中，主要是把作者在科研工作中的一些做法介绍给读者。

第4章主要介绍微地震震源定位的方法。震源定位的研究源自地震学方法。近年来，在地震学研究领域有很多十分先进的震源定位方法得以发表。本章介绍

的内容重点集中在如何实现发震时刻未知的震源定位方法，这些方法也是作者近几年来的研究成果。震源定位是微地震监测中最先在现场实时提供的数据，定位数据可快速地、直接地检测出压裂储层改造的范围，但基于走时的定位方法受到观测方位的限制，方法本身存在不可避免的误差。作者在这一章中介绍的方法即使尚未做到实时处理，但从提高精度的角度来看，仍有很多可借鉴之处。

第5章主要介绍震源机制的反演方法。与震源定位相同，震源机制的反演研究同样源自地震学。微地震的震源机制反演可以提供储层破裂的方式、反演储层的应力分布、评价储层的脆性与含油气性和估算裂缝的体积。这些参数是非常规油气储层改造中非常重要的数据，通过震源机制的反演获取与储层物理性质相关的参数，是微地震监测方法日益深入研究所必须面对的问题。

第6章主要介绍微地震震源参数与储层介质参数的联合反演方法。在微地震反演方法中，无论是震源位置反演还是震源机制反演都与储层介质参数密切相关，在微地震监测需要的精度上，储层介质的非均质性对震源参数的反演影响十分直接。本章的重点是介绍储层介质的速度模型、各向异性参数与震源参数，包括震源位置、震源振幅、震源发震时刻的联合反演方法，从而减少震源参数反演中介质参数扰动带来的误差。

第7章主要介绍与微地震密切相关的岩石物理水力压裂实验中声发射数据的相关研究。本章的内容主要从实验样品的制备、水压致裂的实验装置与流程以及对压裂过程中得到的声发射事件的数据处理。其中，作者利用声发射数据重点研究了介质的衰减和各向异性对于震源机制反演产生的影响，旨在为研究人员处理非常规油气压裂微地震监测数据时提供对照和参考。

第8章主要介绍了作者及其团队在研究工作中对现场实际观测的微地震数据资料进行反演时得到的结果，包括震源定位、震源参数和介质模型参数联合反演实例、井中监测的微地震数据以及地面监测的微地震数据的震源机制反演实例，还有利用震源机制反演获取的地震学参数进行储层解释的实例。

本书的主要内容来自作者及其研究团队的研究工作实践，在这里特别感谢翟鸿宇、李晗、王璐琛、王鹏、薛清峰、武邵江、周熙焱、郑忆康、李政、朱维10位同学，他们为本书的编写和出版做出了重要的贡献。由于本书的内容是作者研究团队近年来的研究工作，有些研究方法尚不十分完善，难免存在错误，希望大家批评指正。

常旭

2018年9月

目 录

前言	
第 1 章 微地震研究概述	1
1.1 微地震的基本概念	1
1.2 微地震的形成	1
1.3 微地震研究的发展	2
1.4 微地震研究的意义与难点	4
第 2 章 微地震波的传播与正演	8
2.1 微地震波传播与正演计算概述	8
2.2 基于广义反射透射系数矩阵方法的理论记录正演	9
2.2.1 方法原理	9
2.2.2 地面和井中观测的理论记录的计算	13
2.3 基于三维弹性波各向异性介质波动方程的理论波场正演	15
2.3.1 三维弹性波各向异性波动方程	17
2.3.2 各向异性介质波动方程旋转交错网格有限差分	19
2.3.3 正演计算中地震矩张量震源模型	21
2.4 三维弹性波中的纵横波波场	22
2.4.1 基于速度-应力方程的纵横波解耦波场分离公式	23
2.4.2 三维数值计算及对比分析	24
第 3 章 微地震事件的识别	30
3.1 微地震事件识别概述	30
3.2 基于观测系统优化的有效信号获取	31
3.2.1 观测系统的优化设计	32
3.2.2 井中观测微地震事件初至预测	33
3.2.3 井中观测微地震信号极化特征预测	35
3.3 低信噪比微地震事件的识别	39
3.3.1 时频稀疏性分析方法	39
3.3.2 低信噪比微地震事件的恢复	41
3.4 基于 POC 分析方法的低信噪比微地震信号识别	44
3.4.1 POC 方法原理	45

3.4.2	数值计算实例	46
第4章	微地震震源定位方法	50
4.1	微地震震源定位研究概述	50
4.2	干涉走时法微地震震源定位	52
4.2.1	干涉走时定位方法原理	52
4.2.2	干涉走时定位数值算例	56
4.3	干涉成像法微地震震源定位	59
4.3.1	干涉成像定位方法原理	59
4.3.2	干涉成像定位数值算例	60
4.4	频率衰减补偿法微地震震源定位	68
4.4.1	频率衰减补偿定位方法原理	68
4.4.2	地层品质因子 Q 值的计算	70
4.4.3	频率补偿定位反演方法	70
4.5	反褶积偏移成像法微地震震源定位	71
4.5.1	反褶积偏移成像定位方法原理	71
4.5.2	反褶积偏移成像定位数值算例	74
第5章	微地震震源机制反演方法	77
5.1	微地震震源机制反演概述	77
5.2	微地震震源机制的求解	78
5.2.1	微地震震源的力学类型	79
5.2.2	微地震研究中常用的震源模型	79
5.3	不同震源模型之间的关系	83
5.3.1	剪切位错震源模型与矩张量震源模型的关系	83
5.3.2	一般位错震源模型与矩张量震源模型的关系	84
5.3.3	震源破裂参数的确定	86
5.4	一般位错模型震源机制反演	87
5.4.1	一般位错模型震源机制反演基本原理	87
5.4.2	一般位错震源机制反演数值算例	88
5.5	地震矩张量模型震源机制反演	90
5.5.1	波形匹配震源机制反演方法原理	90
5.5.2	与震源机制反演同步的震源位置成像	91
5.5.3	波形匹配反演地震矩张量	92
5.5.4	三维模型震源机制反演数值算例	92

第 6 章 微地震多参数联合反演方法	96
6.1 微地震多参数联合反演概述	96
6.2 震源位置、发震时刻联合反演方法	97
6.2.1 震源位置成像	98
6.2.2 发震时刻反演	103
6.2.3 震源位置与发震时刻联合反演	104
6.2.4 数值算例	105
6.3 震源位置与速度模型联合反演	110
6.3.1 方法原理	110
6.3.2 数值算例	111
6.4 震源位置与介质各向异性参数联合反演	115
6.4.1 VTI 各向异性介质控制方程	115
6.4.2 介质各向异性参数反演方法	116
6.4.3 震源与介质各向异性参数联合反演方法	117
6.4.4 数值算例	118
第 7 章 微地震与岩石物理实验	131
7.1 适用于微地震研究的岩石水力压裂实验方法	131
7.1.1 水力压裂实验设计	132
7.1.2 岩石样品制备	134
7.1.3 水力压裂实验流程	136
7.1.4 岩石压裂前后的 CT 成像	137
7.2 声发射信号的预处理	142
7.3 声发射事件的定位	144
7.3.1 声发射事件定位可信度分析方法	144
7.3.2 声发射事件定位与岩心 CT 图像的对比	146
7.4 声发射事件震源机制反演	152
7.4.1 声发射事件的震源机制解	152
7.4.2 声发射事件震源机制反演结果分析	153
7.4.3 声发射事件震源机制反演结果验证	156
7.4.4 不同类型声发射事件震源机制反演偏差分析	159
第 8 章 微地震研究的应用	168
8.1 震源多参数联合反演的应用实例	168
8.1.1 震源位置与发震时刻联合反演的应用	168
8.1.2 震源位置与速度模型联合反演的应用	170

8.2	地面微地震震源机制反演的应用实例	176
8.2.1	一般位错模型震源机制反演	176
8.2.2	矩张量模型震源机制反演	179
8.3	井中微地震震源机制反演的应用实例	180
8.4	微地震震源参数的储层解释应用实例	183
8.4.1	微地震震源参数的储层解释依据	184
8.4.2	微地震震源参数储层解释实例	185
	参考文献	190

第 1 章 微地震研究概述

1.1 微地震的基本概念

顾名思义，微地震是发生在地下的小震级地震。目前，地震仪器可以观测到的最小震级是-3 级，因此，微地震研究针对的是震级在-3 级到 0 级之间的地震。一般情况下，人类对 3 级的天然地震刚刚可以感受到，但 3 级地震对建筑物并不构成破坏，所以，微地震研究针对的地震震级可以扩展为-3 至 3 级这一区间。地震是地下应力集中与能量释放的过程，岩石物理实验证明了岩石破裂时的声发射 (acoustic emission) 现象与地震的关系 (陈颢, 1977, 1989; 陈颢和于小红, 1984; Lei et al., 1993)，地震的发生伴随着地下岩石构造的断裂，同样，微地震的发生也伴随着局部范围岩石结构的破坏。自然界中各种天然的和人为的原因引起的岩石的局部破裂现象非常多，岩石的破裂与微地震的发生一一对应，因此，对微地震进行观测和研究，可以获得我们不可能直接看到的地下岩石破裂的证据。不论是大地震还是微地震，在地震学意义上都遵循频度-震级指数关系，对于一次大规模构造断裂或是局部范围的岩石破裂，震级越小，事件的频度就越高，因此，微地震可以提供足够多的地震数据，从而使科学家和工程技术人员利用微地震数据对地下岩石结构及其变化进行研究。在这个意义上，微地震的监测可指导各类大型地下工程的方案设计，提供工程与地质灾害预警的科学依据，拓宽和发展地震学的研究方法。

1.2 微地震的形成

微地震可以通过天然过程形成，也可以通过人类许多类型的工程活动诱发形成。火山喷发属于天然过程，当岩浆冲破地层直达地表时，伴随着一定范围的岩层破裂，岩石破裂的传播即可形成微地震。不同的人工过程可形成的微地震非常多，矿山开采以及地下开挖的工程中，地下地层的应力发生变化，导致岩层中新生裂缝的出现和原有裂缝的活化，裂缝的生长可产生岩爆或称作微地震 (Gibowicz and Kijko, 1994)；水库和大坝的蓄水会使库区和坝区地表质量发生变化，地表的应力失衡使岩石破裂形成微地震；近年来，为了减少温室气体排放实施的二氧化碳封存，以及非常规油气储层改造等向地下注入高压流体的工程，都会引起局部

应力改变而引发岩石破裂，形成微地震。地下岩石的破裂现象是一种能量释放，是岩石的应力变化产生的形变，这一形变的辐射和传播构成了地震波，形变的起始点就是震源位置。

1.3 微地震研究的发展

本书主要关注的是非常规油气开发储层改造形成的微地震。早期的涉及石油天然气压裂诱发微地震的研究是 1965 年由美国宾夕法尼亚州岩石力学实验室开始的，该实验室根据岩石物理和野外实验开展了声发射和微地震技术(acoustic emission / microseismic techniques, AE/MS)的研究，研究内容涉及硐室稳定性、矿山与隧道顶板稳定性、边坡稳定性以及天然气储集层的稳定性等多个领域(Hardy, 1994)。当时根据对天然气储层的研究实验结果，科学家和工程技术人员确认水力压裂会诱发微小地震，因此试图通过在地面布设微地震观测仪器，记录这些微小地震事件，分析研究水力压裂产生的裂缝问题。但由于地面噪声大于压裂诱发的微地震的能量，加上硬件的动态范围和数据处理方法的局限，没能在观测记录中提取到有效的微地震事件(Smith et al., 1978)。研究人员认为，水力压裂诱发的微地震具有能量弱、频率高、衰减快和观测背景噪声强等特点，因此确立了近距离的井下观测方法(Schuster, 1978)。可以说，20 世纪 70 年代关于水力压裂微地震监测方法的研究和实验，主要是寻找适合于压裂诱发微地震特点的观测方式(梁兵和朱广生，2004)。

20 世纪 80 年代，利用水力压裂诱发的微地震信息识别裂缝的方法得到深入的研究，其可行性引起了更加广泛的关注和认同(Albright and Pearson, 1980, 1982; Batchelor et al., 1983)。由于微地震监测方法可以给出水力压裂裂缝的空间分布，比其他基于应力应变测试仪器给出的结果更直观、更经济，微地震监测专用仪器、观测方法、数据处理方法以及水力压裂裂缝空间分布的研究得到长足的发展(Veatch and Moschovidis, 1986; Gidley, 1989)。与此同时，模拟水力压裂微地震发生的岩石物理实验也在同步发展，岩石压裂实验获得的声发射数据与储层水力压裂获得的微地震数据物理过程最为相似，通过对岩石物理实验中声发射数据的研究，为微地震的研究提供了重要的参考(陈颀和于小红，1984)。到了 20 世纪 80 年代末，国际上已将微地震监测方法视为确定水力压裂裂缝方位和形状的一种重要的实用方法。

20 世纪 90 年代之后，在发达国家政府和国际组织关于微地震监测研究各类资助计划下，地球物理研究领域的学者和工程技术人员开始了微地震定位和震源机制的研究，使微地震监测理论、方法和技术都得到更加广泛和更加深入的发

展,并在指导压裂设计和压裂监测的实践中得到不断提高(Warpinski, 1994; Warpinski et al., 1995; Peterson et al., 1996; Branagan et al., 1996a; 1996b, Fehler et al., 2001; Rutledge and Phillips, 2003)。方法技术的进步使得微地震裂缝成像技术越来越多地用于实际生产,相应的理论方法研究也快速发展,不仅裂缝方位和形态的确定更加准确,而且可以提供裂缝发育过程的详细资料,还可以提供储层中流体通道的图像,甚至提供渗透率参数、地层应力参数等更多的信息(Audigane et al., 2002; Shapiro et al., 2002)。在强大的需求牵引下,我国的学术界也开始了微地震方法研究,如微地震诱发的岩石破裂过程以及在矿山开采中的应用研究(姜福兴等, 2006),强噪声背景下弱信号处理、微地震定位以及在水力压裂监测方面的应用研究(张山等, 2002; 刘建中等, 2004; 刘继民等, 2005; 刘百红等, 2005; 宋维琪等, 2008)等。

2010年以来,微地震研究得到全方位开展(Foulger and Julian, 2011)。在微地震信号识别、数据处理方法、震源定位方法、裂缝成像方法、震源机制反演、微地震资料的综合解释方法等诸多方面得到广泛的研究。随着数据处理技术的改进和仪器精度的提高,微地震观测方法已经不限于井中观测,而是推广到可显著降低成本的地面观测。2010年,欧洲地球科学家与工程师学会(European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE)主办的专业学术期刊 *Geophysical Prospecting* 出版了关于被动源地震监测(passive seismic monitoring)的研究专辑(Eisner et al., 2010a)。2011年,国际勘探地球物理学家学会(Society of Exploration Geophysicists, SEG)主办的专业期刊 *Geophysics* 也发表了微地震研究专辑(Michael et al., 2011)。国际地球物理勘探研究领域的这两个专辑的出版,推动了微地震方法的学术研究。与非常规油气开发相关的研究工作涵盖了微地震井中和地面观测系统对微地震反演不确定性的研究(Eisner et al., 2009)、微地震地面观测的尝试和三维观测设计的研究(Vesnaver et al., 2010; Eaton and Forouhiden, 2011; 王鹏等, 2016)、微地震信号噪声处理方法的研究(Moriya, 2011; 宋维琪和杨晓东, 2011; 王鹏等, 2014, 2015; Zhang et al., 2015; Wu et al., 2016)、地震干涉成像方法用于微地震震源定位的研究(Poliannikov et al., 2011; 王晨龙等, 2013; 李振春等, 2014; 王璐琛等, 2016)、利用类偏移(migration-like)方法进行微地震定位的研究(Artman et al., 2010; Wu et al., 2018)、利用频率衰减补偿进行震源定位的研究(常旭等, 2018)、利用微地震震源再定位误差同时求解速度模型的研究(Bardainne and Gaucher, 2010; Meng et al., 2018)、微地震事件的形成机制、震源机制和震源参数的反演研究(Godano et al., 2010; Li et al., 2011; 翟鸿宇等, 2016; Pesicek et al., 2016; 李晗和姚振兴, 2018)、利用波形反演求解震源机制的研究(Li et al., 2011; Song and Toksöz, 2011)、利用微地震进行页岩储层特性和各向异性分析的方法研

究(Wuestefeld et al., 2010; Grechka and Duchkov, 2011)、与微地震反演相关的岩石物理实验研究(Zhai et al., 2017)、基于微地震参数进行裂缝解释的研究(Chen et al., 2018)等。微地震方法在非常规油气开发的研究中发挥着越来越重要的作用。

1.4 微地震研究的意义与难点

Maxwell 等学者在微地震方法研究的初期就曾经指出,微地震在油气开发中的潜在应用包括:注水与流体运移一致性检测、压实应变检测、注入热蒸汽前缘的检测以及追踪储层压力变化的检测等(Maxwell and Urbancic, 2001)。根据微地震在非常规油气资源勘探开发研究领域的发展,可以判断,微地震研究正从最初走时和波速的利用向振幅、能量、频率、衰减、波形等更多信息的利用快速发展。但是,根据目前国外非常规油气储层压裂改造的有效性分析,在微地震监测的实际应用中,水平井压裂形成的有效裂隙仍然有限,远未达到储层改造的预期水平(Cipolla et al., 2010)。我国的情况也不例外,虽然石油公司已在致密砂岩和页岩油气储层实施了大规模压裂工程,但储层改造效果仍然有待提升,微地震作为储层压裂评价的重要依据,其理论方法和技术研究的重要性不容忽视。

微地震的研究一是可提供储层压裂改造评价的依据,透视储层改造效果,从而达到降低开发成本的目的;二是可根据非常规油气储层孔隙的多尺度结构、流体流动的物理机制、岩石力学性质,研究微地震波的动力学特征和发生机制,拓展地震学理论方法的研究范畴;三是通过地面、井间联合观测与研究方法的相互结合,使主动源地震与被动源地震方法相关联,实现传统地震学方法与勘探地震学方法的融合,提升储层评价的可靠性。

鉴于水力压裂微地震监测方法的复杂性,在研究中借鉴地震学和相关学科的研究方法非常重要。微地震监测方法在一定程度上沿用了地震学中利用地震走时、地震波形反演震源位置和震源机制的方法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)。由于非常规油气储层的页岩或致密砂岩受压力作用产生形变,诱发的地震波频率一般比常规天然地震频率高得多,在 100~1500Hz 范围内,因此微地震波在地层中衰减较快,观测距离受到一定限制。微地震波以临界角入射到观测井可形成套管波,当目的层较围岩速度低时还可形成导波,因此微地震波场除复杂构造和高频衰减的影响外,还存在自身特殊的复杂性。

1) 微地震有效信号识别

微地震在常规的主动源地震勘探中被认为是噪声,微地震波频率高、能量衰减快,将微地震作为有用的信号来研究,其有用信息的提取非常困难。但是由于

同源微地震产生的纵波和横波在等间隔检波器排列中按一定规律分布,这一前提使一贯被当作噪声的微地震的利用成为可能。由于水力压裂微地震监测工程场地存在强噪声背景,各种自然的和人为的噪声与水力压裂形成的岩石破裂混杂在一起,使得微地震记录中的有效信号难以被识别,常规的噪声消除方法很难满足微地震监测越来越高的精度要求(Schaff, 2008),微地震波场中有效信号的提取需要理论方法的创新和改进。

2) 微地震震源位置反演

水力压裂形成的微地震是多源的,它与大地震主震发生后的余震既相似又不同。天然地震余震一般沿断层分布,次数可达上万次(刘宇平等, 2008),余震震群与地震构造有密切关系,分布的空间范围较大(百公里级)。而水力压裂微地震震群的分布是在油气储层中,分布的空间范围一般较小(百米级)。天然地震余震位置的反演方法可用于微地震的定位,但在微地震观测中,检波器位置受井筒空间的限制,一般是等距离线状分布的,且检波点间距较小,这些限制都不利于非常规油气储层改造微地震震源位置的精确反演。另外,由于微地震监测的目的之一是在压裂施工过程中指导压裂方案的调控,震源位置反演的实时性非常必要,因此反演计算的速度也是微地震反演的难点。

3) 微地震震源机制反演

从物理机制上考虑,水力压裂产生的裂缝除沿着实时生成的微小裂缝发生剪切破裂外,还产生沿裂缝法线方向的张性破裂。天然地震的震源模型除剪切位错震源模型外,还有地震矩张量震源模型。剪切位错震源的假设无法描述微小地震张性破裂情况,虽然地震矩张量震源模型在天然地震研究中已是常用的震源模型(Helmberger, 1983; Yao and Harkrider, 1983),但这一震源模型不能描述裂缝张开的尺度(He et al., 2003),因此,在微地震震源机制的研究中,震源模型的研究非常重要。另外,微地震记录的信噪比低,纵波初动方向不易识别,较高的频率也使微地震波在传播过程中快速衰减,导致地震波形发生变化,介质参数对波形的影响引起震源机制反演中的不确定性增加,给震源机制的高精度反演造成困难。速度模型也是影响震源机制反演的重要因素。近年来,越来越多的研究发现,非常规油气储层介质的各向异性在震源机制反演中不可忽视。这些问题提示我们微地震震源机制的高精度反演,需要从理论上发展更能解决实际问题的方法。

4) 微地震形成的裂缝的空间尺度

在微地震研究中,获取压裂诱发储层裂缝的空间尺度最为重要。常规的微地

震监测方法可根据微地震的振幅简单估算储层破裂辐射的地震波能量,即微地震的震级。由于影响微地震震级的因素很多,包括压裂时注入流体的体积、速率、压力,还包括地层压力和储层的物理性质,因此微地震震级的计算方法需要不断改进,以满足精度需要(Daniel et al., 2013)。另外,对于致密储层的改造,不仅需要得知岩石破裂所需的能量,更需要得知裂隙的空间尺度。微地震频率很高,在传播过程中能量衰减很快,提高微地震震源能量的计算精度是一个难点。另一方面根据微地震能量求解裂缝空间尺度,最终获取致密储层裂缝带精细结构的研究还在探索阶段。

5) 微地震形成的裂缝的连通性

常规的微地震监测方法能够根据震源位置的空间定位给出再生裂隙的空间分布,但是无法得知裂隙的连通性,难以实现对于储层改造的有效评价(Boullenger et al., 2013)。水力压裂在岩石破裂的过程中,裂缝中会充填压裂液体,根据纵横波在流体中传播规律的区别有可能识别裂缝的动态变化(Cipolla et al., 2012),进而分析裂缝的连通性。但是,三分量弹性波成像的研究也有很多问题尚未解决,纵横波场解耦的精度以及被动源地震成像精度的研究都有待提高。只有这些与之相关联的理论方法和技术得到更加充分的研究,利用微地震波实现裂缝连通性评价才会成为可能。

6) 微地震震源参数与介质参数的联合反演

非常规油气储层,特别是页岩油气储层,具有分层沉积的特点,表现为明显的各向异性特征。地震波在各向异性介质中的传播表现为在不同的方向上具有不同的相速度,这使得地震波场更加复杂,正演模拟更加困难。另一方面,页岩油气储层泥质含量相对较高,根据实际观测资料可知地震波的衰减特征十分明显,地震波的衰减对振幅和频率具有较大的影响。在震源各参数反演中,如果不考虑衰减的影响将导致波形拟合的错误认识,降低震源位置、发震时刻、震源机制各参数的反演的可信度。在微地震研究中,震源各参数的反演与介质参数总是耦合在一起,互相影响、互相牵制,因此,震源参数与介质参数的联合反演方法的研究显得十分重要,在反演中同时获取合理可靠的震源参数和介质参数也是微地震方法研究的难点。

7) 微地震与岩石物理实验中声发射的对比研究

声发射是一种常见的物理现象,它是材料或岩石中出现应力集中破裂时产生的弹性波能量信号。在非常规油气储层水力压裂过程中,岩石破裂产生的微地震信号也属于声发射现象的一类。在微地震研究中,通过对实际资料的反演研究,

我们能够获得震源群的时空分布、震源机制以及储层介质参数的信息,对于反演方法的可靠性评价只能通过数值计算在理想条件下验证,而实际储层介质和观测数据都比理论计算更加复杂,往往使研究人员在现场得到的反演结果并不符合实际情况,这是地球物理反演方法的共性难点,微地震反演当然也不例外。但是,储层水力压裂的整个过程可以在室内的岩石物理实验中模拟,物理模拟能够利用比数值模拟更符合实际情况的介质去实现,因此可以说岩石物理实验给反演方法提供了更加可靠的检验手段。另外,利用CT技术,可以分别在压裂实验前后对岩石样品进行内部结构的高精度成像,根据压裂实验前后的CT扫描图像,判定反演方法获得的声发射事件的时空分布、震源机制以及介质参数的可靠性和精度。因此,在微地震反演中,可以利用岩石物理实验和数值计算共同建立微地震反演的评价方法。

8) 微地震震源参数的综合评价

从储层压裂的物理机制上考虑,水力压裂的力学作用除产生剪切破裂之外还产生沿裂隙法线方向的张性破裂(Helmberger, 1983; Yao and Harkrider, 1983; He et al., 2003; Zhao et al., 2013)。微地震震源机制的求解可以给出储层破裂方位、错动的方向以及张开或挤压的特征,即破裂面走向、破裂面倾角和错动的方向,还可以给出震源局部的应力变化。震源的这些参数可以用来评价压裂对储层改造的效果,可以根据这些参数估算压裂形成的裂缝长度和面积、空间展布形态以及储层的应力分布。储层改造中不同震源机制的形成指示了储层岩石力学性质的不同,特别是在长距离水平井压裂中,储层的横向非均匀性不容忽视,根据不同井段岩石力学特征调整压裂方案非常重要(Jennifer, 2009)。微地震震源机制(震源力学过程)的研究可以确定破裂面的几何和力学特征,并进一步认识这些特征与微地震震源辐射的地震波之间的关系,可以更准确地获得储层破裂的形态和应力信息,更好地评价压裂效果。目前,在基于微地震的储层评价方法中,利用震源空间分布数据进行评价的居多,利用震源机制实施储层评价的方法也刚刚开始(李政等, 2018),其主要原因是微地震震源机制反演的可信度和准确性还不能满足工程评价的需要,适用于水力压裂的震源机制反演理论方法还存在很多问题需要研究。例如介质参数的影响、观测数据的影响、计算方法的误差、实际资料的复杂性,都可能成为震源机制反演的不确定因素。将微地震震源机制与储层岩石力学性质相关联的研究,首先需要实现微地震震源机制的科学表示,其次是建立可定义不同介质模型的弹性波波动方程,并实现岩石力学性质的反演。近年来发展起来的矩张量震源模型和一般位错震源模型(He et al., 2003)的反演可提供与储层力学性质相关的多种参数,综合利用这些参数实现储层评价仍然存在许多尚未解决的问题,也是微地震研究的重要出口。

第 2 章 微地震波的传播与正演

2.1 微地震波传播与正演计算概述

相对于地震勘探中的反射波，微地震波以透射波为主，尽管透射波不能像反射波那样直观地表示地层的结构信息，但是，透射波的走时、振幅、频率和波形都受到地层介质的影响，是地层介质的直接响应。研究微地震波传播可以用于微地震震源定位和震源机制反演，还可以用于介质参数的反演以及震源参数和介质参数的联合反演。在微地震震源定位和震源机制反演中，不仅需要获得微地震波的传播时间，还需要获得波形记录或者微地震波场的全部信息，获得这些信息的方法就是微地震波传播的正演计算。因此，微地震波传播的计算方法在微地震研究中是最基础的，也是为后续研究提供数据的重要环节。

与常规的反射地震波正演计算不同，微地震波的正演计算不仅需要建立介质模型还要给出震源机制模型，定义了介质模型和震源机制模型后，还要选择地震波场的计算方法。地震波传播的理论计算可以分为两大类，一类是基于射线方程的方法，另一类是基于波动方程的方法。基于射线方程类的计算方法可以建立层状介质模型，基于波动方程类的计算方法可以建立具有复杂结构、各向异性或者黏弹性的介质模型。本章在 2.2 节和 2.3 节分别介绍两种微地震波的正演计算方法，第一种是建立在“剪切+张裂”一般位错震源模型(general dislocation source model)基础上的、基于广义反射透射系数矩阵算法的正演方法；第二种是建立在地震矩张量震源模型(seismic moment tensor source model)基础上的、基于 3D 各向异性介质的有限差分波动方程正演方法。关于震源模型的力学解释将在第 5 章震源机制及其反演方法中详述。

在微地震方法研究中，观测到的微地震波的纵横波场是耦合在一起的。在进行震源位置成像或者压裂裂缝成像的计算中，纵横波场的耦合在成像计算中相互影响，对成像目标的清晰度形成严重的干扰。近年来，在弹性波叠前逆时偏移的研究中，发展了很多关于弹性波纵横波分离的计算方法。与弹性波叠前逆时偏移相同，微地震凡是需要进行波场成像的研究，都需要进行纵横波解耦的计算，然后在成像计算中对纵波和横波分别处理。在这一前提下，震源位置成像和压裂裂缝的成像才能获得清晰的成像结果。本章 2.4 节介绍地震波场纵横波解耦的计算方法。