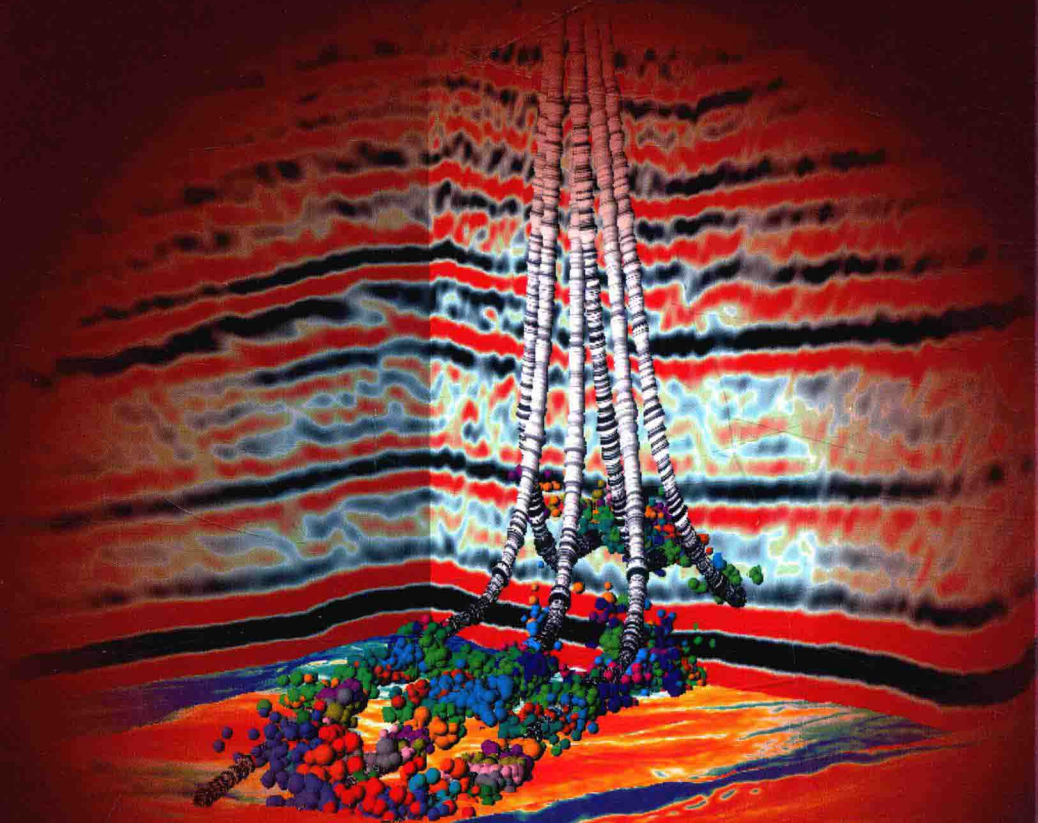


非常规储层水力压裂 微地震成像

MICROSEISMIC IMAGING OF HYDRAULIC FRACTURING : IMPROVED ENGINEERING OF UNCONVENTIONAL SHALE RESERVOIRS

[加] Shawn Maxwell 著
李彦鹏 王熙明 徐刚 储仿东 译



石油工业出版社

非常规储层水力压裂微地震成像

[加] Shawn Maxwell 著

李彦鹏 王熙明 徐 刚 储仿东 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书概述了各种活动诱发的微地震和压裂基础知识；对包括与水力压裂有关的相关环境问题进行了讨论；介绍了微地震技术的演变和数据的工程应用；对观测系统设计和基本处理、为获得可靠微地震成果而采取的质量控制措施、水力压裂的地质力学和微地震源理论、微地震资料解释准则，以及微地震成像的工程应用进行了系统描述。附录包含了有关微地震可交付成果和报告方面的建议，同时介绍了启动某个项目所需的资料清单。本书强调了数据的局限性和其潜在的缺陷。

本书作为微地震水力压裂裂缝监测采集设计、质量控制、解释和应用的指南，可供从事非常规油气勘探开发的科技人员参考，也可作为大中专院校及科研院所相关专业的课外参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

非常规储层水力压裂微地震成像/[加]麦克斯韦(Maxwell, S.)著;李彦鹏等译. —北京:石油工业出版社, 2015. 12

书名原文: Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs
ISBN 978-7-5183-0871-2

I. 非…

II. ①麦… ②李…

III. 油气藏-储层-水力压裂-微地震裂缝成像

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 234637 号

Translation from the English language edition: “Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs” by Shawn Maxwell

Copyright © 2014 Society of Exploration Geophysicists, All rights reserved.

The work is available in English for purchase from SEG

本书经 Society of Exploration Geophysicists 授权石油工业出版社有限公司翻译出版。版权所有，侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2015-7633

出版发行：石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址：www. petropub. com

编辑部：(010) 64523533 图书营销中心：(010) 64523633

经 销：全国新华书店

印 刷：北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：10

字数：250 千字

定价：78.00 元

(如出现印装质量问题，我社图书营销中心负责调换)

版权所有，翻印必究

作者的话

It is a great honor to see the textbook associated with my 2014 SEG Microseismic DISC tour translated into Chinese. The DISC tour provided a fantastic opportunity to travel the globe and interact with geophysicists attempting to utilize microseismicity in a variety of settings. I was repeatedly reminded that while the technology is relatively mature in North America, there can be significant challenges applying in different geologic conditions. Particularly in China, it seems that utilizing microseismicity is challenged by tectonically deformed reservoirs with complex geology, along with operational difficulties. Interpretation of microseismicity also appears to be more complicated in China due to high tectonic stress. Nevertheless, I understand that the microseismicity is increasingly being used and adapted within China to improve hydraulic fracturing operations for an effective unconventional reservoir exploitation. I look forward to learning more of Chinese innovations and technology improvements as the technology adaption increases and hope that the DISC textbook is of some use.

看到我的 2014 年 SEG 杰出讲师短训课程 (DISC) 教材有了中文译本,感到非常骄傲与自豪。DISC 巡回讲座给我提供了周游世界,与许多微地震地球物理专家相互交流的极好机会。人们多次提醒我,尽管微地震在北美相对成熟,但在其他不同地质条件下,技术应用仍面临巨大挑战。在中国尤为明显,复杂地质构造形变的储层给微地震带来了挑战,同时工程作业也存在困难。较高的构造应力微地震解释也更加复杂。然而,我了解到中国为了有效开发非常规油气藏,提高水力压裂工程作业水平,正越来越多地应用微地震技术。随着在中国的应用增加,我期望这项技术得到较多的改进和创新,也希望这本 DISC 教材能够对大家有所帮助。

It was a truly a pleasure visiting China during my DISC tenure and I am grateful to my many hosts for their generous hospitality, the attention of the many students who attended the course and of particularly the dedication and patience of my translators. Microseismic has become my personal passion in addition to a professional career and I hope that the reader is able to find some inspiration from the book.

在 DISC 授课期间,对中国的访问非常愉快。感谢东道主们的盛情接待,感谢广大学员的认真专注,尤其感谢翻译者的奉献和耐心。除了职业原因外,微地震已经成为我个人的挚爱,我希望读者能够从本书获得一些灵感和启迪。



(Shawn Maxwell)

2015 年 10 月 12 日

序 言

Foreword

进入 21 世纪,世界经济进入了一个新的发展周期,对化石能源的需求日益高涨,油气生产显得相对不足。在此情况下,非常规油气进入了人们的视野,肇始于美国巴奈特页岩的一系列工程技术如水平钻完井技术、大规模体积压裂技术及微地震监测技术等得到飞速发展,形成了席卷全球的“页岩气之风”,国际能源格局也因此发生了深刻而彻底的变化。

我国的经济经过多年的快速发展,能源对外依存度越来越高,因此也更加期待在页岩气等非常规油气技术方面的突破。尽管我国的致密气、页岩气和煤层气等非常规油气资源丰富,但与美国的非常规油气盆地相比,无论是地表条件还是地下构造均更为复杂,开发难度比美国困难许多。这意味着我们无法照搬国外的技术。近年来,经过持续不断的自主研发和技术引进,在国内基本形成了从水平钻完井、大规模体积压裂到微地震监测的完整的工程技术序列。在整个工程序列中,微地震监测对于指导水平井设计及压裂方案的优化起到了非常积极的作用,也是目前最为可行的压裂效果评估技术。

微地震监测使我们不仅能够听到压裂的声音,更加能够看到压裂所产生的裂缝形态和规模。然而,非常规油气开发技术是一项复杂的系统工程,各工程技术之间的相互渗透显得尤为重要。目前国内较为综合的微地震方面的技术类书籍较少,加拿大著名微地震技术专家 Shawn Maxwell 的《非常规储层水力压裂微地震成像》一书的翻译出版为非常规油气开发工程师和高等院校及科研机构的技术人员提供了一本内容充实、图文精美的微地震专业技术著作。该书不仅涵盖了微地震采集处理和解释应用的全过程,对于压裂工程也进行了介绍,相信各相关领域的读者一定会从中获益。

吴奇

2015 年 10 月 26 日

前言

Preface

微地震监测是水力压裂裂缝成像的关键技术。随着近期石油行业对非常规油气资源的重视和对用于增产而进行的有效水力压裂施工的有关需求的增长,微地震监测已经成为地球物理界一种常用的技术。微地震是一种适用于裂缝成像的地球物理技术,过去 10 年该项技术的发展速度是显而易见的。这主要体现在大量增加的相关专题研讨会和各种出版物中相关论文的数量上,包括《前缘》(The Leading Edge)、《地球物理》(Geophysics)杂志,以及 SEG 年会论文集集中的专题论文。

微地震技术的快速发展还体现在各种工程及地质会议上经常讨论这一技术。在推动非常规油气资源开发时,油气公司投资者的报告中也会提到该技术。微地震快速发展的动力一直来源于储层改造工程师们的需求——能够追踪水力压裂裂缝的生长。事实上,微地震监测在某种程度上可以说是一种很独特的地球物理方法,因为它最初的试验和技术开发都是直接由工程及最终用户推动的。

本书是关于微地震水力压裂裂缝监测的采集设计、质量控制、解释和应用的实用用户指南。本书为微地震水力压裂裂缝成像提供了一项综合的教育资源,并致力于为实施成功的微地震项目提供实用技巧。全书自始至终都强调了数据的局限性和其潜在的缺陷。

本书首先描述了由各种活动诱发微地震的研究历史,特别介绍了在地热和油气藏改造中的水力压裂诱发的微地震;还介绍了微地震的技术演变和数据的工程应用,包括与水力压裂有关的相关环境问题的讨论。由于对地球物理学家来说水力压裂并非常用技术,本书概述了压裂的基础知识。然后对微地震采集进行了综述,包括观测系统设计和基本处理。特别介绍了为获得可靠微地震成果而采取的质量控制措施。接着介绍了水力压裂的地质力学和微地震震源理论,从而解释了微震的产生。最后介绍了微地震资料解释准则,并对压裂工程应用进行了讨论。附录介绍了有关微地震可交付成果和报告方面的建议,同时介绍了启动某个项目所需的资料清单。

Contents

目 录

第一章 绪言	(1)
第一节 微地震应用史	(1)
第二节 微震水力裂缝成像史	(3)
第三节 水力压裂中微地震的作用	(6)
第四节 水力压裂的环境影响	(8)
第五节 挑战和技术演变	(10)
第二章 水力压裂概述	(12)
第一节 水力压裂的原理	(12)
第二节 压裂材料	(15)
第三节 野外作业	(15)
第四节 注入监控	(16)
第五节 钻完井设计	(18)
第六节 储层改造设计	(19)
第七节 裂缝成像与诊断	(19)
第八节 影响裂缝生长的地质学和地质力学因素	(20)
第九节 微地震的作用	(24)
第三章 微地震采集和勘探设计	(25)
第一节 采集工作流程	(26)
第二节 观测系统和波场采样	(26)
第三节 信号保真度	(33)
第四节 信号频宽	(35)
第五节 记录系统的动态范围	(37)
第六节 噪声	(37)
第七节 监测诱发地震活动	(38)
第八节 勘探设计注意事项	(39)
第九节 选择阵列配置和记录系统的工作流程规范	(42)

第四章	微地震震源位置的估计	(43)
第一节	监测用观测系统和检波器方位	(43)
第二节	速度模型的建立与校准	(45)
第三节	信号预处理	(50)
第四节	微地震事件的检测	(51)
第五节	震源定位	(52)
第六节	定位置信度和质量控制属性	(57)
第七节	处理质量控制与检查	(60)
第八节	附加处理	(64)
第五章	微地震形变地质力学	(66)
第一节	震源参数	(66)
第二节	微地震和水力压裂形变的关系	(69)
第三节	震源机制	(70)
第四节	水力压裂形变的模式	(78)
第五节	使用震源特征描述提高解释效果	(81)
第六节	微地震形变解释的陷阱	(83)
第六章	微地震裂缝成像的解释	(84)
第一节	评估监测偏差	(85)
第二节	选择解释数据	(90)
第三节	整合注入数据	(91)
第四节	裂缝几何形状解释	(93)
第五节	时空分布模式识别	(96)
第六节	地质框架	(99)
第七节	地质力学框架	(101)
第八节	解释陷阱	(105)
第七章	微地震裂缝成像的工程应用	(107)
第一节	验证和优化水力压裂设计	(108)
第二节	完井设计的验证和优化	(115)
第三节	验证和优化井的设计	(121)
第四节	验证和优化油气田设计	(123)
第五节	生产优化	(127)
第六节	确定微地震项目的价值	(128)
附录 A	项目准备	(131)
附录 B	CSEG 发布的水力压裂微地震监测标准可交付成果指南	(133)
附录 C	震源强度的震级估计	(138)
参考文献		(139)

第一章 绪 言

随着 2000 年前后对美国得克萨斯州 Fort Worth 盆地巴奈特 (Barnett) 页岩气经济开采的成功, 所谓的“页岩气之风” (Shale Gale) 横扫北美及全球, 将人们的注意力转移到了页岩和致密地层开发上。过去 10 年, 这些非常规资源的开发在北美取得了令人难以置信的成功, 改变了美国的能源格局。由此产生的石油生产加速首先显著影响了天然气市场, 最近影响到整个石油市场。沿水平井段进行多次大型水力压裂施工已经成为打开非常规储层、促进压裂液流动并在非渗透性岩石内建立水力传导通道的关键。非常规资源开发对经济的影响是革命性的。尽管在石油和天然气作业的区域已经进行了开发, 但公众对于安全, 特别是对水力压裂作业方面安全的关注显著提升。同时, 也有与页岩气有关的正面新闻, 丰富廉价的页岩气鼓励美国电厂使用天然气发电来代替煤炭, 从而降低美国的二氧化碳总排放量。最重要的是水力压裂的广泛应用产生了优化改造措施的技术需求, 这种需求将微地震监测从一种专门技术提升为非常规页岩气开发的关键作业程序。

微地震监测涉及微地震或声波发射的被动地震采集。微地震被定义为小震级地震, 也指微地震事件或微地震活动。微地震这一术语偶尔与微地震事件的含义相同, 但也曾被正式定义为由几赫兹频带的海浪产生的背景噪声。

微地震事件与天然产生的或人工诱发的裂缝运动有关。裂缝活动会导致非弹性地质力学裂缝形变并从源点向外传播弹性波。微地震形变是一种与水力压裂有关的地质力学应变成分。由于微地震与人工改造裂缝的对应关系, 使其可以对裂缝生长提供唯一的解释。通常情况下, 被动地震记录用来检测微地震事件并估计震源的位置和属性, 采用的地震处理方法类似于构造地震所采用的方法。

通常情况下, 根据地震等级大小测量的震源强度来区分微地震与大地震。美国地质调查局 (USGS) 将微地震定性为震级小于 3 级, 即能够感觉到但不太可能导致损害的程度。实际上, 微地震活动往往不到 0 级, 最大事件不仅感觉不到, 而且对地面检测都会成为一种挑战。像天然地震一样, 微地震遵循相同的频度—震级指数关系, 即每减小 1 个震级单位, 事件数会有大约数十倍到成百倍的增加。因此, 尽管大地震是罕见的, 微地震却是数量众多而且无处不在的。

第一节 微地震应用史

微地震可通过各种人类活动产生, 包括能改变岩石应力状态或孔隙压力的某些工业活



动 (McGarr 等, 2002)。这些地质力学变化可以导致新裂缝的形成或已存在裂缝的形变。根据裂缝形变的具体细节, 这些变化可能导致微地震的产生。在极少数情况下, 诱发的微地震可能大到足以造成潜在的破坏性。若不考虑震级因素, 诱发地震活动确实有助于我们深入了解触发岩石破裂的地质力学过程。

一、采矿诱发的地震活动

20 世纪初, 采矿工程师们开始探测与采矿作业有关的地震活动。Gibowicz 和 Kijko (1994) 对采矿地震活动进行了广泛的讨论。地下巷道周围的应力变化可能导致已存在裂缝产生滑移。在某些情况下, 这些变化增加了坑道壁的岩石应力, 可能导致矿山巷道发生岩爆。

这些诱发地震或岩爆的危害给矿工们造成了重大安全风险。这种风险的存在导致人们进行地震调查, 包括进行地质力学预测等。全球许多矿区都存在岩爆问题, 这个问题在南非的深层金矿格外显著 (Gibowicz 和 Kijko, 1994)。南非已知采矿诱发的最大地震为 5 级。岩爆导致的安全问题促使人们开发了采矿诱发地震活动监测系统。这些系统能够帮助工程师们认识该问题, 并为在矿区什么位置部署救援队提供信息。

除了检测大级别地震活动外, 在井巷内使用地下传感器来提高监测系统灵敏度, 可以检测出更多微弱的微地震。微地震活动为矿山提供了应力和地质力学方面的信息, 有助于识别断层和破坏机理 (Young 等, 1992)。与地下工程有关的地震活动研究已发展成为一种地质应用技术, 用于调查巷道周围的裂缝, 包括用于地下核废料储存库的监测 (Collins 和 Young, 2000)。

二、流体诱发的地震活动

流体也可诱发地震, 例如, 与水坝大量地表水蓄积或者与地下流体注入有关的活动可诱发地震。在水坝建成后, 水库充水时超负荷的地表质量和过大的孔隙压力可能诱发地震活动 (Simpson, 1976)。例如, 1967 年, 在印度向一个水库储水时诱发了 6.3 级地震。流体注入也可能诱发地震, 20 世纪 60 年代, 由于落基山 Arsenal 的废液注入, 在丹佛首次诱发了 4.8 级地震 (Healey 等, 1968)。人们对丹佛地震的科学兴趣促使其进行了地震防治范围试验, 成功地表明地震活动可以通过注入流体的启动和停止来控制 (Raleigh 等, 1976)。

三、流体注入的微地震监测

对水力压裂改造等流体采出和注入产生微地震进行监测的先进技术始于 20 世纪 70 年代, 作为对增强型地热系统 (EGS) 的监测技术而发展起来。注入流体形成裂缝网络, 促进液体循环和供热, 从而获得地下地热能 (关于增强型地热系统项目的全面回顾, 见 Evans 等, 1999)。微地震监测一般包括部署地震检波器, 检测并记录地震信号。地震信号经处理, 用于确定信号源位置及有关的其他属性。在已知时间内产生的微地震事件的集合 (在此称为一幅“微震图像”) 可以用来解释与 EGS 改造有关的裂缝网络的扩展和生长情况。利用微震图像对改造裂缝系统提供钻井目标, 确保良好的井间连通性。

因此, 微地震监测是一种功能强大的裂缝成像工具。目前, 它是唯一能够对改造裂缝

的几何形态进行描述的技术。EGS 的微地震监测使用两种方式：一种类似于区域地震监测的基于地面地震网络的方法；有时也使用灵敏的井下传感器进行监测。井下传感器与微地震目标源区更接近，能够提高记录小级别微地震事件。

井下阵列（Maxwell 等，2010b）和地面阵列（Duncan 和 Eisner，2010）用来记录各种石油和天然气作业中的微地震事件。微地震监测用于观察与储层压实、开采，以及与注入蒸汽、水或天然气等二次开采有关的裂缝或断裂。微地震还可用来监测油气工业之外的废料处理的注入情况。

迄今为止，在油气行业内最常见也是最重要的应用是水力压裂监测，这是本书的重点。现已证明（King，2010），水力压裂施工的微震图像对于裂缝方位和分布范围的成像是非常宝贵的。微地震还可以为简单的水力压裂裂缝或组成多个连通裂缝段的复杂裂缝网的形成提供细节描绘。可以使用微地震资料解释裂缝几何结构、控制工作流程并优化水力压裂作业。

第二节 微震水力裂缝成像史

一、早期试验

20 世纪 60 年代末和 70 年代初，研究人员开始讨论水力压裂裂缝微地震监测的潜在优势。早期的试验主要是用单个传感器采集，用于证明微地震事件的存在并确定信号特征。后来逐渐开始用传感器网络对微地震的震源进行精确定位，这促成了 1974 年 Pinedale 油田第一个水力压裂裂缝微震成像案例的发表（Power 等，1976）（图 1-1）。

微地震监测在 EGS 的应用开始于 20 世纪 70 年代的热干岩项目。人们认为，最早公布的井下微地震监测案例来自于美国新墨西哥州的一个与地热有关的水力压裂项目（Albright 和 Hanold，1976）。在证明“增强型地热系统”基本概念的试验中，广泛使用微地震监测水力压裂裂缝的生长，并识别改造裂缝系统用于目标井的钻探部署。随着采集和处理方法的不断进步，与注入作业有关的地震活动成像更加准确。这种趋势延续至今，在许多 EGS 中继续用微地震监测刻画改造效果（Evans 等，1999）。

20 世纪 80 年代和 90 年代开始了对油气井微地震水力压裂成像的精确应用。1983 年至 1996 年，在美国科罗拉多州 Piceance 盆地 M 矿场进行了一系列试验，旨在通过钻穿微地震云并识别采集的岩心中的裂缝来验证水力压裂裂缝的微震成像（Warpinski 等，1998）。在

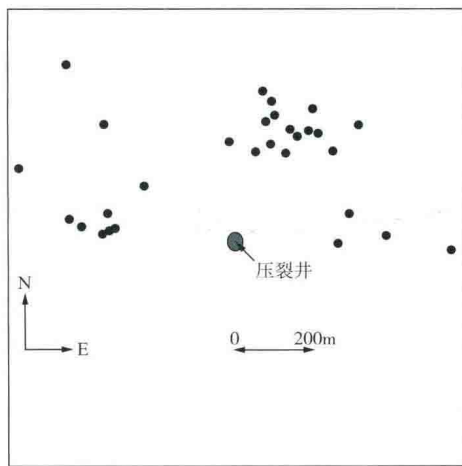


图 1-1 1974 年于怀俄明 Pinedale 油气田记录的第一个已知的微地震水力压裂裂缝平面图

据 Power 等，1976，图 13，版权归 SPE 所有，经 SPE 许可转载



这些试验之后，在得克萨斯州东部的棉花谷砂岩中又进行了广泛的研究（Rutledge 等，2004；Walker，1997）。这一系列的试验成功地证明，微地震数据可以采集并通过处理产生水力压裂裂缝图像（图 1-2）。

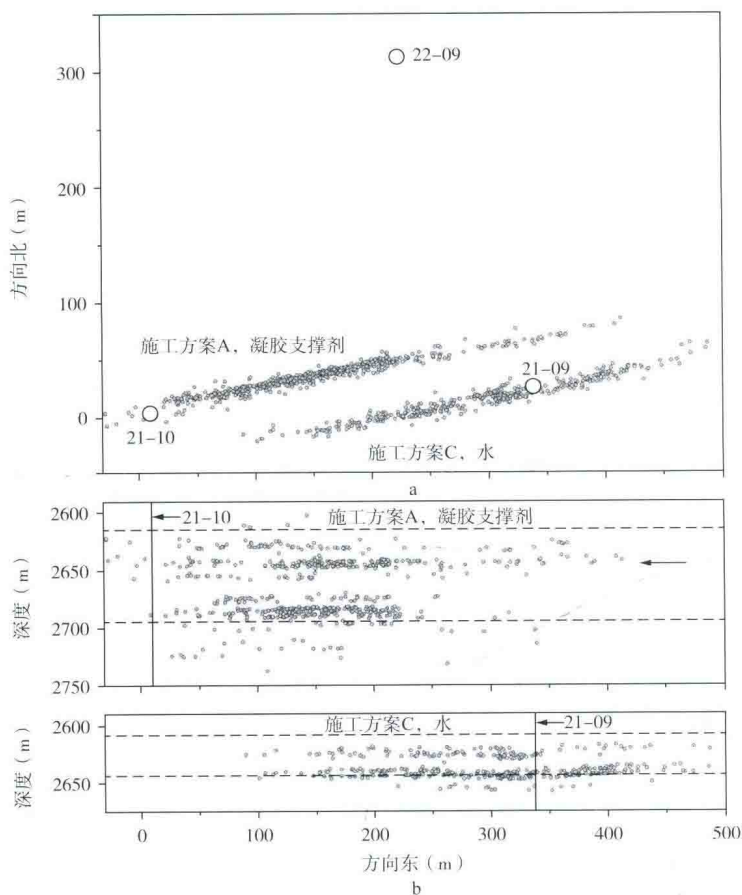


图 1-2 1997 年棉花谷砂岩中两口直井水力压裂改造的平面图 (a) 和剖面图 (b)

图 b 用水平虚线显示了射孔深度段。可以使用微地震事件云解释施工井中的裂缝方位、长度和高度 [据 Rutledge 等，2004，图 2，由美国地震学会（www.seismosoc.org）特许转载]

二、商业水力裂缝成像

继棉花谷试验之后，就棉花谷砂岩启动了商用微地震成图服务（Maxwell 等，2000），紧接着对巴奈特页岩进行了第一次微震成像处理（Maxwell 等，2002）。巴奈特页岩的微震图像（图 1-3）显著改变了完井工程师们对水力压裂裂缝的看法（Mayerhofer 等，2006）。以前，人们认为大多数水力压裂裂缝具有简单的平面特征，但是，通过巴奈特页岩的微地震监测认为存在更加复杂的裂缝网络（图 1-4）。

微地震定位精度一直无法分辨简单平面水力压裂裂缝的较窄（几毫米）宽度，但能够分辨相对较宽的复杂裂缝网络。

由于存在多种含义的微地震复杂裂缝网络的证据，出现了一种工程模式的转变。业内

设计专门用来模拟平面裂缝的软件包已经非常普遍，而且这些软件包可以根据微地震定位结果的分布对裂缝高度和长度进行确认。但对于更加复杂的裂缝几何形状，这些裂缝模型并不适用。工程师们开始推导产量和根据微地震云的范围确定的储层改造体积（SRV）之间的经验关系式，而不是使用现有软件对裂缝几何形态的正演模型进行校正。直观地看，较大的储层改造体积与更大范围的裂缝网络和增加的产量相关。对于特定储层，可以观察到微地震反映的改造体积与之后的井产量之间存在正相关关系。

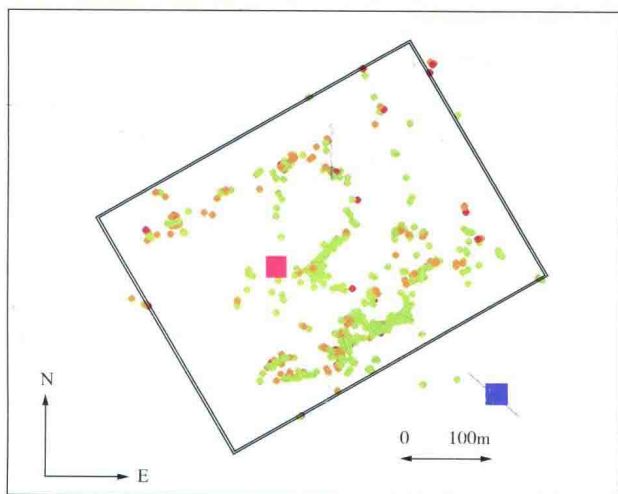


图 1-3 2000 年监测到的巴奈特页岩内一条水力压裂裂缝的平面图

红色方块表示作业井，蓝色方块表示监测井。微地震符号的颜色表示不同瞬时震级（圆圈）（浅绿色震级小于-1.9，橙色震级在-1.9 到-1.5 之间，红色圆圈震级大于-1.5）。灰色框代表地震活跃区范围。此明显裂缝与图 1-2 显示的相对简单的裂缝形成对比（据 Maxwell 等，2002，版权归 SPE 所有，经 SPE 许可转载）

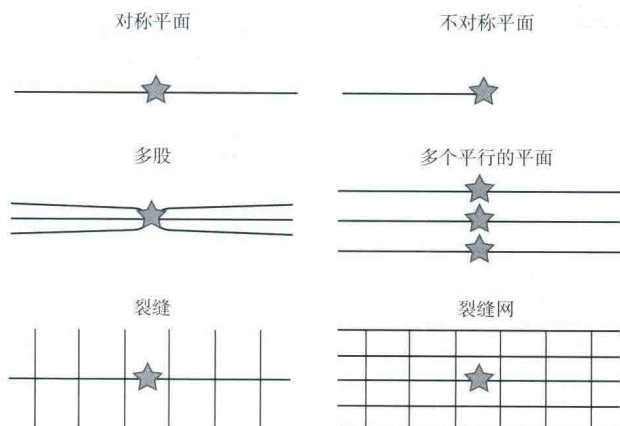


图 1-4 一口水平井从简单平面裂缝到复杂裂缝网的各种水力压裂裂缝的几何结构简图

对改造体积的研究发现：非常规油气藏的改造过程中裂缝往往很复杂，这也是裂缝网络积极的一面，因为储层的接触面积提高了（以后的章节将进一步描述和讨论如何测量）。因此，当非常规页岩气开发在北美不断扩大并在后来扩展到全世界时，微地震裂缝成像成了一种可行且重要的商业服务。



第三节 水力压裂中微地震的作用

一、非常规油气田评价

最近对非常规油气藏的开发（地下水保护委员会，2009），特别是对页岩和非渗透性致密岩石中的天然气和石油的开发，已经证明在技术上是可行的。随着这一以往从未开发的非常规资源的大量开采，从根本上改变了能源格局。有效开发某一常规油气藏要求对内部连通孔隙空间进行研究和描述。然而，非常规油气藏在本质上是非渗透性的，在裂缝、微裂缝和微孔隙中含有彼此孤立的烃类物质。因此，对非常规油气藏进行评价不仅要求对有利的油气藏进行描述，而且还要评估能否经济有效地使用水力压裂技术，形成用来从井眼中开采这些孤立烃类的表面积和渗流通道。对非常规油气田进行评价一般遵循以下基本步骤：

- (1) 识别一个有潜力的含油气储层。
- (2) 通过垂直导眼井水力压裂对储层进行评估。
- (3) 使用沿井眼长度方向延伸的多条水力压裂裂缝评价水平钻井的可行性。
- (4) 使用单一钻探平台钻探多口水平井来优化商业性开发。
- (5) 进行大规模油气田开发。

评价和开发阶段都需要通过有效水力压裂裂缝来连通油气藏，还需要许多专有技术用于检测作业井周围的水力压裂裂缝（King，2010），包括示踪剂、分布式温度或声学测量，以及声波测井等。然而，只有测斜仪或微地震监测能实现远场裂缝几何形态的成像。测斜仪对水力压裂裂缝周围的微小岩石形变作出响应，可以用于解释裂缝方位（Wright 等，1997），但不能检测裂缝生长、尺寸和复杂程度细节。时移 VSP（Willis 等，2012）、井间地震和反射地震（Grossman 等，2013）都不能分辨水力裂缝的几何形态。因此，要了解油气藏内水力压裂裂缝如何发展，微地震监测是获得基本情况的关键技术。这种知识可以提升非常规储层评价每个阶段的改造工程设计。

工程师们在评价水力压裂改造的钻完井计划时需要思考诸多基本问题。其中包括：

- (1) 什么是主裂缝方向？
- (2) 裂缝要向上和向下纵向生长多少？水力压裂裂缝能终止并保留在某一特定层中吗？
- (3) 裂缝会生长到离井多远？
- (4) 裂缝会向井的各个方向对称生长吗？
- (5) 会形成简单平面裂缝、多条密集裂缝还是会形成一个方向不同的多个部分组成的复杂裂缝网络？
- (6) 最佳注入液量、流量和压力是多少？
- (7) 最佳井身结构是什么？
- (8) 应采用多少个压裂段？
- (9) 每段需要多少个裂缝起裂点（即套管射孔点），布设在哪里？
- (10) 是否存在可影响压裂造缝的已有裂隙带或断层？
- (11) 油气藏在纵横向上是否均匀和各向同性？

- (12) 是否有要避开的水或酸气区?
- (13) 钻水平井段的最佳深度是多少?
- (14) 最佳井间距是多少?

可以通过对微地震资料进行解释来直接回答许多问题,与其他资料联合可以回答剩下的问题(Cipolla等,2012)。事实上,微地震成像的快速发展正是由于压裂工程师们能够用地球物理结果直接回答这些问题。

二、微地震成像的压裂工程应用

对水力压裂裂缝的生长、方位和面积进行微地震成像,出现了若干截然不同的压裂工程应用(Cipolla等,2011)。在沿水平井方向进行多段水力压裂时,可以使用微地震确定破裂形状是否均匀并覆盖整个水平井井段,这些应用技术需求更旺盛(图1-5)。可以使用微地震实时检测裂缝是否切割某个断层或延伸到了设计区域之外。这两种情况对水力压裂的成功都是有害的,所以往往使用实时微地震来修改甚至终止注入程序。

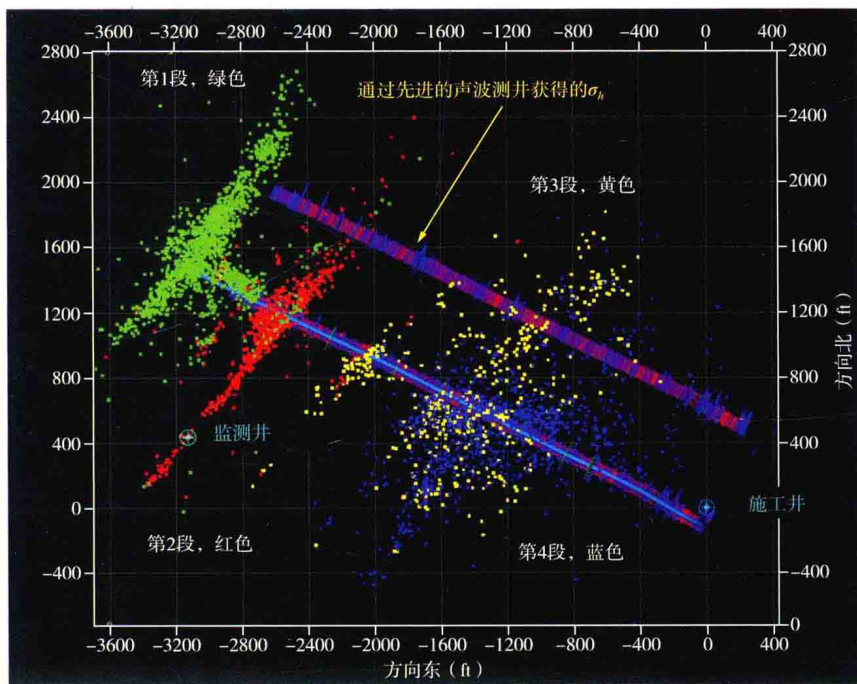


图 1-5 一口水平井四级水力压裂裂缝的平面图

每个压裂段都使用彩色编码。注意该井带微地震活动狭窄通道的一端绿色和红色压裂段之间的变化,与重叠的蓝色和黄色压裂段形成了鲜明对比,同时证明了一种更具扩散性的模式,表明与已存在裂缝相互作用形成了复杂的压裂缝网(据 Rich 和 Ammerman 等, 2010, 图 3, SPE 版权所有, 经 SPE 许可转载)

显然,微地震裂缝几何形状往往用于压裂后评价,包括对比不同注入或完井策略获得的裂缝几何结构。一个简单的例子是使用某口井内最后压裂段的微震图像确定要射孔和压裂的下一个井段。最后,还可以使用微地震估计与井内裂缝有关的改造体积,并确定相邻井的间距。从根本上讲,水力压裂设计是为了优化井的产量。微地震为评价压裂的有效性



提供了独特的信息，有时与井的生产动态结合或配合生产测井还可以测量沿水平井长度方向的流体流动贡献率。

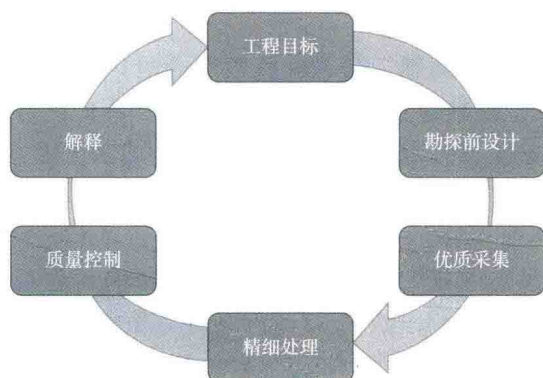


图 1-6 某有效的微地震项目的工作流程图

从工程目标的定义出发，理想的监测成果包括用于提高后续水力压裂作业的工程建议

微地震项目的目标不是开展一项地球物理调查工作，而是用于优化压裂工程的手段，记住这一点非常重要。因此，一个微地震项目要想获得成功，必须采取以下关键步骤（图 1-6）：

- (1) 确定工程目标；
- (2) 进行采集前设计；
- (3) 采集；
- (4) 处理；
- (5) 质量控制；
- (6) 解释；
- (7) 为未来储层改造做出工程决策和

建议。

第四节 水力压裂的环境影响

一、浅含水层污染

过去几年，公众对水力压裂作业变得非常关注，其中两个方面与微地震有内在关系。公众起初关注的重点似乎与压裂可能延伸到浅部含水层有关。国际能源协会介绍了水力压裂可能污染含水层的 3 种不同方式：地表溢流、套管破裂，以及从储层生长到含水层的水力压裂裂缝（国际能源署，2012）。对后者的研究可以通过考虑各种微地震项目构成的大型数据库所揭示的水力压裂裂缝顶底界来实现。众所周知，当遇到地质基底或水平分层岩层时，水力压裂裂缝和天然裂缝的高度受到控制。对各种微地震项目进行的研究表明（图 1-7），水力压裂过程中裂缝相对纵向生长在 1200ft 以内（Maxwell，2011；Fisher 和 Warpinski，2012）。因此，对于大多数储层深度大于 4000ft 的水力压裂作业，含水层往往会被很好地隔离在水力压裂裂缝的上方使其免受污染。但是，当存在相对较浅的储层或相对较深的含水层时，压裂作业需要谨慎。

二、水力压裂诱发的地震活动

水力压裂可能引发地震也引起了公众的关注。如上所述，在某些情况下，注入活动与诱发地震活动有一定关联。美国国家研究委员会（2012）对该话题进行了广泛的讨论。注入诱发地震活动的力学机制是众所周知的：注水引起的孔隙压力增大可能导致整个已存在断层的有效应力降低，从而降低滑动摩阻。如果断层上的剪切应力足够高，并存在足够大的滑动断面，就可能发生地震。

区分诱发地震活动（即没有注入流体则不会发生的地震活动）和触发地震活动（即地

震活动本来将会自然发生，注入流体加快了地震活动出现的时间）很有用。如果有某个断层接近破裂，只需要相对较少的压力变化就会触发地震活动，所以区分诱发地震活动与触发地震活动很重要。由于非常规油气藏开发的扩张，使石油和天然气作业进入了新的区域。其中一些地区的构造地震风险增高，如美国大陆中部的新马德里地震带附近。即使在地震发生频率低的区域，因为天然地震与人类活动可能碰巧在同一时间发生（Davis 和 Frohlich，1993），两者之间也难以建立明确的因果关系。

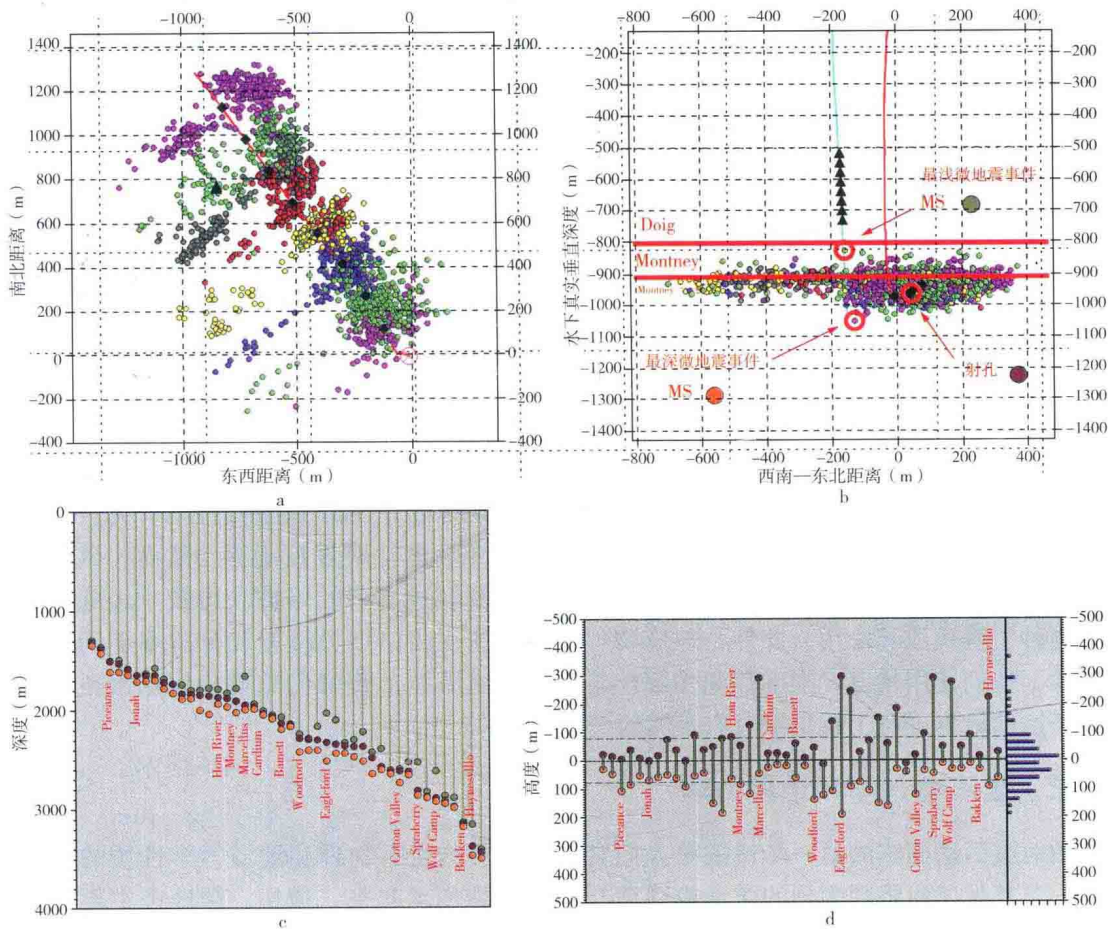


图 1-7 一口水平井水力压裂改造的微震成像的平面图 (a) 和剖面图 (b)。图中显示了射孔深度及最深和最浅的微地震事件。c 图为北美各种油气藏的射孔深度图 (红色) 以及最浅 (绿色) 和最深 (橙色) 微地震事件。d 图显示的是裂缝相对于 c 图显示数据对应的射孔深度向上和向下生长的情况，右侧为综合分布直方图

一般认为，任何诱发地震活动的级别都与总流量成正比（McGarr，1976）。在水力压裂的情况下，注入体积一般较小，注入时间也相对短暂。尽管每年进行数以万计的压裂活动，但仅几个地震活动案例报道与水力压裂有关。其中包括发生在美国俄克拉荷马州（Holland，2011）、英国 Blackpool（de Pater 和 Baisch，2011）和加拿大 Horn River 盆地（BCOGC，2012）的案例。