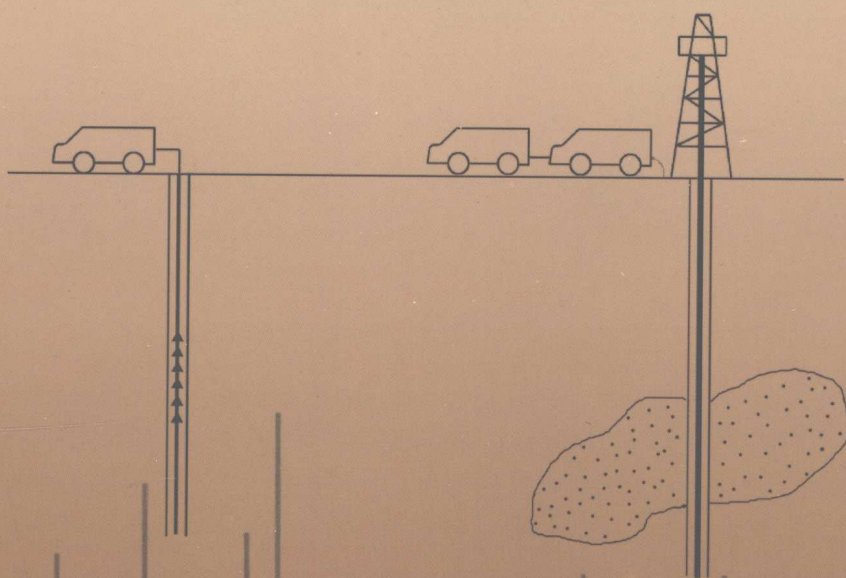


油气田勘探开发中的 微震监测方法

梁 兵 朱广生 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

内 容 提 要

微震监测是一种主要用于油气田开发的新的地震方法。它用的不是专门人工震源产生的地震波,而是利用水力压裂,油气开采,常规注水或热驱等石油工程作业而产生的地震波。这种诱生地震很微弱,须在井中进行观测。对观测到的微震资料进行处理和解释,可给出水力压裂裂缝空间图像,以及裂缝发育过程的详细信息;或对油气田开发过程中孔隙流体的运动前缘,热驱时被加热区空间范围的变化进行监测。并可为优化井身结构设计,延缓油井损坏提供地下应力场相关数据。最终达到提高采收率,降低油气田开发成本的目的。书中,系统叙述了微震监测方法的技术发展史、基本原理、诱生微震特点、数据采集、数据处理及资料解释方法,给出了各种典型实例。

本书是为石油物探专业学生编写的教材,也可供石油地质和石油工程专业的生产、科研人员及相关专业的师生参考,并可供采矿业应用声发射技术的工程师、核废料处理安全监测的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气田勘探开发中的微震监测方法/梁兵,朱广生编著.

北京:石油工业出版社,2004.11

ISBN 7-5021-4794-2

I. 油…

II. ①梁…②朱…

III. ①微震-监测-应用-油气田

②油气勘探:地震勘探

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 097922 号

油气田勘探开发中的微震监测方法

梁 兵 朱广生编著

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.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心

印 刷:北京晨旭印刷厂

2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:7.25

字数:186 千字 印数:1-800 册

定价:28.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

油气田的微震监测实际上是利用岩石声发射现象的一种技术方法。岩石声发射现象最先是在采矿业中获得应用的,20世纪40年代南非金矿中开始试验应用岩石声发射方法,继而一些国家在煤矿里应用这一方法进行监测。采矿业应用所关心的是采矿时地下岩层的稳定性。我国也曾在煤矿中作过有关的应用研究。在石油工业里,尽管早在20世纪20年代就已发现油气开采会诱发微震,但直到20世纪70年代初才开始水力压裂微震监测试验,目的是确定水力压裂生成的裂缝方位和走向。到20世纪80年代末,水力压裂微震成像方法已发展成一套实用技术,其可靠性和精度已得到石油业界的广泛承认。在水力压裂微震成像技术成功的带动下,90年代初,微震监测开始应用于油气田开发并取得迅速进展。裂缝成像关心的是水力压裂生成裂缝的空间图像,油气田开发关心的是储层孔隙流体的运动方向和范围。石油业界的微震监测开展的虽然比采矿业晚得多,但却进展快,应用领域广。21世纪初提出的“仪表化油田”的概念,其核心技术之一就是微震监测。目的是对油气田开发实行全程的,经济的实时监测。“微震监测方法”一书是作者搜集研究了散见在各种杂志和会议论文集里的大量有关文献,结合自己部分研究成果写成的。这本书系统地阐述了微震监测的方法原理、数据采集方法和仪器装备以及微震资料的处理和解释方法,并给出了各种典型实例,是国内第一本全面介绍微震监测方法的书。

国外石油业界的微震监测的研究和应用已有30多年历史了,但国内迄今还没有开展实际生产试验,这正是本书中没有国内实际资料的原因,也是这本书的不足之处。尽管如此,本书有助于读者全面系统地了解微震监测方法。此外,书中每一节内容都明确注明了文献源,为读者的进一步研究提供了方便。

相信这本书将对国内开展微震监测技术研究应用起到有益的作用。

中国科学院院士

王德林
2004年4月8日
成都

前 言

微震监测(microseismic monitoring 或 microearthquake monitoring),或叫无源地震(passive seismics 或 sourceless seismics),有时也称三轴地震法(triaxial seismic method)或声发射(acoustic emission)法,指的是利用水力压裂、油气采出,或常规注水、注气,以及热驱等石油工程作业时引起地下应力场变化,导致岩层裂缝或错断所产生的地震波,进行水力压裂裂缝作图,或对储层流体运动进行监测的方法。“无源地震”这一称谓似乎悖理,实际上这一名词是要强调所用的地震波不是常规地震法中人工专门激发的地震波,而是石油工程作业诱生的地震波。因这种地震是很微弱的,故多称之为“微震”。广义讲,石油业界力图利用的微震也包括天然地震中的微小地震,但不包括地面上人类各种活动及风吹草动等各种扰动引起的微震,像常规地震法一样,这些扰动是被当作噪音处理的。

国外石油业界在 20 世纪 70 年代初就开始了水力压裂微震监测的野外试验,微震监测的理论基础可追溯到声发射理论,而早在 20 世纪 40 年代,采矿业已在研究和应用声发射技术了。国内从 20 世纪 70 年代中期以来也有不少声发射的研究成果,并曾于 80 年代在煤矿作过初步应用试验。采矿业利用声发射关心的是地下岩层的稳定性,以保证安全生产,其传感器的安装和数据采集方法比较简单易行。石油业界利用微震,感兴趣的是获取地下人造裂缝图像,或石油工程诱生微震所携带的地下应力场变化和储层流体运动特征等信息,石油业界微震传感器的安置及数据采集方法比采矿业要复杂得多,对传感器技术性能的要求也严格得多。

今天,通过对微震数据的处理和解释,可获得水力裂缝的准确走向,以及裂缝的空间形状、尺寸等数据,还可给出水力裂缝带中流体通道的图像。此外,可给出水力裂缝随时间发育过程的图像,为水力压裂方法的理论研究和科技发展提供了无可替代的资料。油气田开发微震监测可在油气采出,或注水、注气时,对储层里流体运动前缘进行监测,或给出热驱时储层中被加热区范围及其随时间变化的资料;也可对断层结构特征进行三维描述,以认识那些隔断储层的断层,或起流体通道作用的导致过早水窜的断层,这对那些断层被气云完全遮掩的油气田尤为重要。微震监测还可提供地下应力场变化、储层上方地层变形和沉降资料,预测油井套管损害危险区,为油井稳定性设计和延缓油井破坏提供基础数据。这些,对井网优化,EOR 方案的设计和调整无疑都是重要的,对降低油气田开发成本,提高采收率的意义不言自明。目前,随着仪表化油田技术的提出和发展,微震监测正朝着对油气田开发实行全程实时监测的方向发展,其技术和经济潜力可能是巨大的。

本书引用了许多文献资料,我们衷心感谢这些文献的作者,并对他们为发展微震监测技术作出的贡献表示敬意。

本书的编写得到了辽河石油勘探局物探处、东方地球物理公司等单位的朋友们,以及江苏油田地质科学研究院、江汉石油学院(现长江大学)的同事和朋友们的鼓励 and 大力帮助,在此表示衷心的感谢。

特别感谢中国科学院院士刘光鼎先生为本书写了序。

江苏油田地质科学研究所的陆明华工程师,长江大学的李谋杰老师为本书绘制了部分插图,在此一并致谢。

本书得到教育部油气资源与勘探技术重点实验室资助,特表谢意。

限于水平,书中的不足之处敬请读者批评指正。

梁 兵 朱广生

2004年4月于扬州

目 录

1 微震监测技术发展简况	(1)
2 水力压裂微震监测	(5)
2.1 水力压裂微震监测原理	(5)
2.2 水力压裂诱生微震的特点	(9)
2.3 数据采集方法	(24)
2.4 数据采集的仪器装备	(29)
2.5 数据处理与解释方法	(31)
2.6 应用实例	(50)
2.7 诱生微震研究揭示的水力压裂裂缝生长特点	(67)
2.8 水力压裂微震监测精度	(74)
3 油气田开发微震监测	(81)
3.1 油气田开发诱生微震史例	(81)
3.2 油气田开发微震监测基础	(84)
3.3 油气开采诱生微震的特点	(87)
3.4 油气田开发微震监测数据采集方法	(91)
3.5 微震监测在油气田开发管理上的应用	(95)
3.6 油气田开发微震监测史例	(97)
3.7 现状、问题、前景	(100)
后记	(103)
主要参考文献	(104)

1 微震监测技术发展简况

地震实际上是地球介质的一种声发射现象。岩石变形时,局部地区应力集中,可能会发生突然的破坏,从而向周围发射出弹性波,这就是岩石的声发射现象(陈颢等,1984)。20世纪50年代初以来,人们对岩石的声发射现象作了大量的实验室观测和系统的理论研究。由于天然地震是一种巨大的自然灾害,长期以来,人们一直在探索天然地震的预报方法,但至今仍在努力之中,岩石声发射的研究就是这种努力的一部分。

工业中的地震勘探方法,无论是反射波法、折射波法,还是井间地震等,都是利用人工激发的地震波研究地球浅层结构,寻找各种矿藏,或解决工程地质问题的。人工激发地震波不仅耗费大量资金和时间,还会破坏环境。有时因各种地表和环境的限制而使地震勘探无法实施。因此,人们很早就设想利用普遍存在的微弱天然地震实现工业地震勘探目的,并在20世纪70年代初(或更早)就进行过野外试验(Baskir等,1974),然而直到今天也没取得进展。

另一方面,在油气田开发工程中,如油气采出、注水、注气、水力压裂作业等都会诱生地震,这种现象一直受到人们的关注。早在1926年,Pratt和Johnson就发表了关于美国得克萨斯州的Goose Greek油田在1917—1925年间因采油而引起地面下陷,并诱发地震的报道。此后,陆续发表了一些类似的论文。P. Segall(1989)对这些报道进行了综合研究,并提出自己的理论。20世纪80年代末以来我国的地震学者也报道了几例油气田注水诱发地震的史例(刁桂苓等,1982;刁守中,1989;赵根模等,1990;程式等,1992),并进行了理论研究(刁守中等,1990;刘元生等,2000)。这类诱生地震的发现,自然引发人们利用诱发地震的思想。

事实上,采矿业从20世纪40年代以来一直在作微震(震级小于0)监测,并进行相关研究。Thill(1972)根据实验室的岩心测试得出结论:脆性岩石里微震发射是小裂缝生成触发的。尽管采矿业界关心的是预测岩石破坏,与区域构造及天然地震无关的人类活动对构造稳定性的影响,但Thill的这个结论也成了石油工业微震监测的理论依据之一(Walker, 1997)。

美国宾州岩石力学实验室自1965年开始声发射和微震研究,称为AE/MS技术(Acoustic Emission/Microseismic Techniques)。水力压裂微震监测技术是在地热开发研究中开始的,首次现场试验工作最迟1973年就开始了,这次现场试验研究是AMOCO公司等在美国科罗拉多州的Wattenberg油田进行的。目的层为含气致密砂岩,深约2440m。当时人们已经确知水力压裂会诱发地震,并企图记录和分析这些微地震来研究水力压裂裂缝问题。但是,当时人们沿袭传统的地震勘探数据采集方法,采用布置在地面的检波器排列来监测水力压裂裂缝的发展。这些检波器从井口开始布置成放射状和直线状。然而,由于地面噪音太高而诱发微震的水平很低,加之那时的记录仪器及数据处理方法水平都不高,无法从这种低信噪比的记录中识别出微震信号来。试验没有成功(Smith等,1978)。

随后,美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory)在橡树岭做了水力压裂裂缝地震作图试验,也是采用地面观测方式。1976年美国著名的国家实验室桑地亚国家实验室(Sandia National Laboratory)在Wattenberg油田做了大量工作,试验用地面地震观测方式记录水力压裂诱发微震。试验结果证明,由于水力压裂诱发微震的能量,频率等特点,以及地层吸

收因素等,在地面是不能可靠检测到的,因而也就不能用地面观测的方法确定水力裂缝方位和几何形状,而是应该在靠近这种裂缝附近记录诱发微震。在多年的野外试验和理论研究取得的成果基础上,桑地亚国家实验室开始发展自己的井下地震记录系统(Schuster, 1978)。在稍早些时候(1976年3月),美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory)已开始了井下微震观测研究的现场工作,在 Fenton 山热干岩中进行了3年现场试验(1976, 1977, 1979),获得了大量资料。研究结果证明:水力压裂时,发生大量的可记录水平的微震,利用这些微震可以确定水力裂缝的方位。

人们从1973年以来的一系列试验的失败中,终于摆脱了几十年来地面地震勘探方法的影响,确立了水力压裂诱发微震的井下观测方法(Schuster, 1978; Albright 等, 1980, 1982)。同时改进和发展了井下记录仪器,以及相关的资料处理和解释方法。约在20世纪70年代末,用水力压裂诱发微震研究裂缝方法的可行性得到了人们的承认。此后,更多的石油公司和大学、科研单位陆续加入这项研究,如 ARCO, SHELL, CHEVRON, 以及 SCHLUNBERGER, CGG 等著名石油公司,地球物理公司,美国麻省理工学院, WISCONSIN 大学, PENNSYLVANIA 大学,英国的 Camborne 矿业学校,日本 TOHOKU 大学等高校,法国石油研究院,美国芝加哥天然气研究院等,使这一技术得到持续、稳定的发展,并逐渐实用化。这项技术研究还得一些政府部门的支持,例如美国能源部长期资助微震监测研究(Schuster, 1978; Albright 等, 1980; Warpinski 等, 1995; Peterson 等, 1996; Branagan 等, 1996),并正在考虑对一个有关微震监测大型项目的资助(Lumley, 2001),英国能源部和当时的欧洲经济共同体曾联合资助过地热项目的微震监测研究(Batchelor 等, 1983),日本的政府部门也曾资助有关储层描述的微震监测方法研究(Fehler 等, 2001)。

20世纪70年代末之前,石油工业中微震监测方法的探索除理论研究外,主要在寻找适合于诱生微震特点的观测方法。

20世纪80年代,微震监测研究集中在利用水力压裂诱生微震,建立水力压裂裂缝空间图像的方法上,包括微震观测方法的完善,数据处理方法的发展及专门仪器的改进。根据诱生微震绘制出水力压裂裂缝的空间图像,比水力压裂工程中原有的方法要精确得多,并可给出其它方法无法得到的信息,如裂缝随时间发育过程等。因此,到80年代中期,水力压裂裂缝的微震成像方法已得到石油工程专家的充分肯定,认为微震监测法可以给出水力裂缝明确的图像,并且比其它各种方法(地面测斜仪,现场应力松弛,差分应变曲线分析,井下电视,印模封隔器法等)都更加准确,也更加经济(Griffin 等, 1985; Veatch Jr. 等, 1986)。1989年美国石油工程师协会(SPE)推出了一部重要专著“Recent Advances in Hydraulic Fracturing”(Gidley 等, 1989)(中译本“水力压裂技术新发展”,蒋阅等译,石油工业出版社1995年版),其中第十六章“裂缝方位和几何形状的确定”,专门讨论确定裂缝方位和形状的方法。书中列出三种裂缝方位测定方法,第二种便是“三轴地震法”(即这里的微震监测法)。值得注意的是,这本书是SPE理事会选定的23位作者分章撰写的,作者们都是站在水力压裂各项技术发展前沿的专家,每个人都是学有所长,硕果累累,并富有实践经验,由此不难知道该书的权威性。可见,在20世纪80年代末,国外已将微震监测法视为确定水力裂缝方位和形状的一种重要的实用方法了。

水力压裂微震监测近10年来的研究主要集中在裂缝成像数据处理方法,资料解释方法及相关理论上,使利用诱发微震的裂缝成像技术有不少重要进展,不仅使得裂缝方位和形态的确

定更加准确,能提供水力压裂时裂缝的发育过程的详细资料,还可以提供储层中流体通道图像,甚至提供渗透率参数,地层应力参数等(Audigane 等,2002;Shapiro 等,2002)。促进了水力压裂技术的进步,起到了别的方法起不到的作用。近十年的工作使微震监测技术在仪器装备方面也有了更大的提高。

微震观测设备的关键部分是井下观测仪器,即井下地震检波器。由于诱生微震能量非常弱,频率很高(频带约为 100~1500Hz),传播方向复杂,以及井下高温、高压、高腐蚀性的恶劣环境,要求微震监测用井中检波器是高灵敏度、高频、体积小的三分量检波器,其本身及有关连接件、信号传输线等应具有耐高温、高压和耐腐蚀的性能。在 20 世纪 70 年代初的早期试验时,微震观测检波器用的是普通井中检波器或 VSP 测井用检波器,其技术性能低。到 20 世纪 90 年代初,已发展到高性能多级检波器串,即每口观测井中可一次安置多个三分量检波器,如每口井中放置 50 个三分量检波器(即 50 级检波器串)(Wills 等,1992)。今天已发展出多种性能良好的多级检波器串,记录到的微震主频可达 1000Hz 以上,可耐 200℃ 高温,承受 69MPa 高压(Walkar 等,1997),这可以使永久性检波器安置在 3000m 深井中长期工作。此外,井下检波器的连接件和电缆或光缆可满足多级(如 50 级)三分量检波器同时观测的高速数据流(如达 4Mb/s 以上)的要求。1991 年,法国 CGG 公司及其合作者 EAP、GDF、及 TOTAL 等在其合作研究项目中,首次在井中使用永久性检波器(Deflandre 等,1994;Deflandre 等,1995),即将检波器永久性固定在井中观测点上(如用水泥胶结在井壁中),目前已可将多达约 50 个三分量检波器胶结在井壁中,但目前多级永久性检波器在安装过程中损坏率较大(Walker 等,1997;Rutledge 等,2003),永久性检波器下井及固定技术尚需提高。

数据处理和解释方法从 30 年前简单粗糙的纵横波时差法,到现在的多种精细处理解释方法。从最终资料解释图件和数据处理可以看出,早期的解释成果上,微震位置分布很分散。现在人们知道,微震位置这种大的离散性并非是应有的(尤其是俯视图上),而是微震定位误差较大所致。在 20 世纪 90 年代后期,微震绝对定位误差仅为 12~40m,裂缝走向方位角精度为 2°~6°。到 21 世纪初,绝对定位误差已降到 10m 以下(Rutledge 等,2003)。并可从微震能量、频谱、波形特征等参数,以及微震位置时空变化等数据得到有关微震发震机制、水力压裂裂缝发育过程的可靠信息,促进了水力压裂理论和技术的发展,这是传统的水力压裂裂缝诊断方法所无法实现的。

今天,水力压裂裂缝成像技术也许还不是很成熟,其软硬件的商业化程度还不高,但无疑已是一种可靠的实用方法了。

在 20 世纪 20 年代,人们已注意到油气开采会诱发地震,但直到过了近 70 年,才将微震监测用于油气田开发研究。受到水力压裂微震监测成功的鼓舞,1991 年开始以来,人们将水力压裂微震监测的经验用于油气田开发,利用采油(气)、注水、注气、热驱等诱生微震,监测油气田开发过程或有关油田工程活动(Deflandre 等,1995;Talebi 等 1997;Snell 等 2000),在北海等地区进行了一些成功的试验(Jupe 等,1998;Dyer 等,1999;Kristiansen 等 2000)。1991 年在法国 Germigny-sous-Coulombs 天然气储层微震监测中,首次将检波器“永久”地固定在井中(Deflandre 等,1995),这种永久性井下检波器的发展与应用有力地支持并加速了油气田开发微震监测的研究进展。2000 年,仅 OYO Geospace 公司一家在美国和中东就完成了 27 项微震测量工程(OYO Geospace 2000 Annual Report)。2001 年,Lumiley 提出了“仪表化油田”(“in-

strumented oil field”)的概念,主张在大量井中安置永久性多级地震检波器和其它地球物理仪器,及永久性工程传感器(如压力计、温度计、流速计等),以便对油气田开发全过程实施全程微震监测以及实施多种井中和地面的有源地震的重复测量。将有源地震与微震监测相配合并以油藏工程测量数据进行标定,对油气田开发动态实施有效的实时监测与管理,其技术潜力和经济效益将是巨大的(Hottman 等,2001;Lumley,2001;Maxwell 等,2001)。实际上,“仪表化油田”的概念不仅关系到微震监测技术本身的发展方向和潜力,它已涉及到未来油气田开发管理技术的发展方向了。

2 水力压裂微震监测

2.1 水力压裂微震监测原理

水力压裂时,大量高粘度高压流体被注入储层,这样使孔隙流体压力迅速提高。一般认为高孔隙压力会以两种方式引起岩石破坏。第一,高孔隙流体压力使有效围应力降低,直至岩石抵抗不住被施加的构造应力,导致剪切裂缝产生;第二,如孔隙流体压力超过最小围应力与整个岩石抗张强度之和,则岩石便会形成张性裂缝。水力压裂作业初期,由于大量的超过地层吸收能力的高压流体泵入井中,在井底附近逐渐形成很高压力,其值超过岩石围应力与抗张强度之和,便在地层中形成张性裂缝。随后,带有支撑剂的高压流体挤入裂缝,使裂缝向地层深处延伸,同时加高变宽。这种加压的张开的裂缝,在它周围的高孔隙压力区引起剪切破裂。岩石破裂时发出地震波。这是储存在岩石中的能量以波的形式释放出来。容易理解,由于岩石这种破裂规模有限,释放出的能量很小,这种地震波是很微弱的,震级在0级以下。人们普遍认为,水力压裂诱发微震里的绝大多数,尤其是其中较大者,是由岩石的剪切破裂引起的,而不是张性破裂引起的。

尽管石油业界在20世纪70年代初已实际记录到水力压裂诱生微震,而从理论上证明水力压裂可诱发微震是在80年代初。C. Pearson(1981)利用简单裂缝滑动模型计算了岩石产生破裂必需的最小孔隙压力增长,利用微震源分布的一维扩散模型计算了孔隙压力分布,并对这种分布进行比较,结果证明,高孔隙压力是能够产生这些微震的。

20世纪80年代后期以来,特别是近10年来,随着微震观测装备和方法的进步,微震记录质量越来越高,使人们有可能对水力压裂诱生微震的研究更加深入。人们不仅可以研究波至时间和极化特征,还深入研究了微震的波形、频谱、能量等,进而计算和分析了地震矩、震级、地震能量、应力降等震源参数,探讨了震源机制。目前,关于这类诱生微震的震源机制仍众说纷纭,没有统一看法,下面谈的是其中几种重要的震源机制理论。

2.1.1 裂缝尖端效应和漏泄效应

根据现场试验的大量证据,大多数研究者认为,水力压裂诱生微震是因水力压裂裂缝附近岩石的剪切破裂引起的(Albright, 1982; Dobecki, 1983; Warpinski, 1994)。岩石中总是存在岩层层面或节理,以及微小的天然裂隙,或其它低强度的构造,水力压裂诱生了沿这些薄弱构造的剪切破裂,激发出地震波。在震源物理研究中,一般认为摩尔—库伦摩擦定律可很好描述这种剪切运动(郭增建等, 1979; 刁桂苓等, 1982; 刁守中等, 1989),根据摩尔—库伦摩擦定律,当岩层中任意截面上的剪切力 τ 达到临界值,即摩擦力

$$F = F_0 + \sigma \tan \varphi$$

时,则截面两边岩石就会发生剪切错动。式中, F_0 是截面两边岩石颗粒间的粘结强度; σ 是作用在截面上的有效正应力; φ 是内摩擦角。

根据哈伯特—若比(Hubbert—Robey)孔隙压力理论,有效正应力

$$\sigma = p - p_k$$

式中, P 为作用在截面上的正应力; P_k 为孔隙压力。于是有

$$F = F_0 + (p - p_k)\tan\varphi$$

截面两边岩石发生剪切错动的条件就是

$$\tau \geq F_0 + (p - p_k)\tan\varphi$$

由上式可以看到,引起剪切破裂有下列几种可能途径:

(1)增大剪应力 τ ;(2)提高局部孔隙压力 p_k ;(3)减小正应力 p ;(4)降低粘结强度 F_0 。Warpinski(1994)指出有两种不同机制可引起前三种变化,这两种机制就是裂缝尖端效应和漏泄效应。

2.1.1.1 裂缝尖端效应(Crack tip effects)

根据 Westergaard 和 Sneddon 的二维及放射状裂缝周围应力的解析解,可以知道水力压裂时因孔隙压力的增大,在裂缝尖端附近剪应力明显增大,并在裂缝尖端前引发一个向外的张应力,因而降低了任意滑动面上的正应力 p 。这样,在裂缝尖端附近区域引起剪切破裂,并发出诱生微震,这就是裂缝尖端效应。Warpinski(1994)指出,岩层里的天然裂隙等薄弱构造的 F_0 明显地较小,是易于发生剪切破裂的位置。他做了一个模型计算,模型参数如表 2.1,这些参数对应约 1500m 埋深地层的水力压裂处理情况。计算结果示于图 2.1。图中坐标零点为水力压裂裂缝尖端位置,图中曲线上所标数据是岩石中天然裂隙等薄弱面的方位角,即天然裂隙的方向与水力压裂裂缝方向夹角。每条曲线圈起的面积表示,当 F_0 (裂隙两边岩石的粘结强度)等于 0.7MPa 时,这个范围内的这个方向的裂隙面可能发生剪切滑动。由图可见,对这个具体的模型讲,最易发生剪切滑动的天然裂隙的方位角为 $30^\circ \sim 45^\circ$,当方位角大于 75° 时,可能产生剪切活动的区域很小。还可看到,在距裂缝尖端 5~6m 处的天然裂隙也可能发生剪切滑动。这表明,水力压裂裂缝在尖端附近区域岩石会发生剪切破裂而发出微震信号。这个区域具有一定宽度,宽度的大小取决于水力压裂参数,岩石的剪切强度,以及原地应力等参数,通常为数米宽。随着水力压裂裂缝的扩展,这个微震区将随裂缝尖端向前延伸而向前发展。这意味着水力压裂裂缝周围约有数米宽的范围,因裂缝尖端效应而产生一个微震活动带。

表 2.1 Warpinski 裂缝尖端效应模型参数

$p_{\max}$	34.5MPa
$p_{\min}$	27.6MPa
p_0	5.5MPa
a	61m
$\tan\varphi$	0.6
p_k	15.2MPa

表中 p_0 为水力压裂净处理压力; a 为裂缝半长度。

2.1.1.2 漏泄效应(Leakoff effects)

随水力压裂裂缝里的高压流体压力升高,孔隙流体压力 P_k 值升高,漏泄到岩石天然裂隙,节理等薄弱构造里,引起剪切滑动,发出微震信号,这就是漏泄的微震效应。漏泄诱生微震活动区沿整个水力压裂裂缝分布,具有一定宽度,并随漏泄扰动向地层中扩散而变宽。就诱生剪切滑动讲,漏泄效应比尖端效应更有效。一方面,这是因为漏泄效应作用的岩体体积数量级较大;另一方面是漏泄效应的扰动力大得多。裂缝尖端应力变化约相当于净破裂压力,一般小于 6.9MPa;扰动漏泄参数是孔隙压力增加值,实际上是处理压力的增加值,通常有数十兆帕。漏泄诱生微震活动区宽度除取决于水力压裂参数,地层参数外,还取决于漏泄参数。孔隙流体不同,这类微震活动区的宽度很不相同。在天然气储层中,漏泄微震活动区是很窄的,除非裂缝的渗透率很大,这是因为这种状况下漏泄扰动不能扩展到较远处;而对含油、含水储层,漏泄微震活动区可能较宽,除非储层渗透率特别低。

Warpinski(1994)用模型计算进一步研究了漏泄效应,模型参数同尖端效应模型(表 2.1);另外补充了 6 个新参数(见表 2.2),计算结果表明,在天然气储层里漏泄微震活动区是很窄的,而在油或水的储层里,微震活动区宽度可达 100m 以上。根据越来越多的水力压裂微震监测资料显示,100m(甚至更大)的微震活动区宽度的估计是偏大了。然而微震沿水力压裂裂缝分布有一定宽度是无疑的。

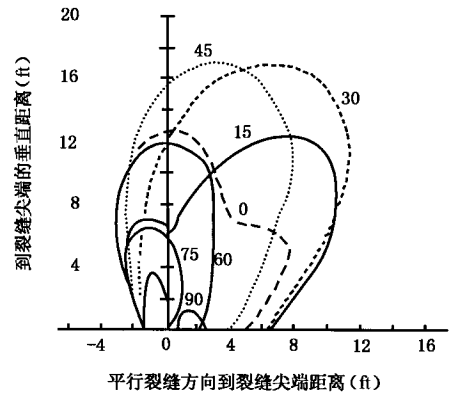


图 2.1 在水力压裂裂缝尖端附近区域,几种不同方向角的滑动面(天然裂隙等)对应的诱生微震活动区(Warpinski, 1994)

表 2.2 漏泄模型计算补充参数(Warpinski, 1994)

天然裂缝渗透率	$500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
天然裂缝孔隙度	0.2
漏泄流体粘滞度	$0.001 \text{Pa} \cdot \text{s}$
漏泄流体压缩系数	$4.8 \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$
泊松比	0.2
上覆压力	34.5MPa

2.1.2 混合破裂机制

现在尽管大多数人认为水力压裂诱生微震是剪切破裂所致,但仍有一些学者认为岩石的拉张破裂在诱生微震中发挥了重要作用。

Withers 等(1996)认为,未裂开岩石的拉张破裂是水力压裂主裂缝产生期间出现的;当保持流体不漏泄,将注入流体带来的能量储存在系统里,直到再次拉张破裂,注入井附近的地震活动是对岩石扩张破裂的补偿作用。或因主裂缝网络分叉,在较大裂缝长度上,剪切破裂开始发生,随裂缝发展,地震活动也向前移动。

对美国的 Cotton Valley 气田,法国 Mayet - de - Montagne 地区及北海的 Ekofisk 油田微震研究发现,计算出的地震矩相对震源半径很小,这意味着岩石破裂时没有多少能量发出 (Tamebi, 1986; Rutledge 等, 1994; Urbancic 等, 1998)。根据微震具有的相似性和非相似性标定特征,推测水力压裂存在两种破裂机制。Cotton Valley 气田的微震纵横波能量计算结果指出, S 波能量 E_S 与 P 波能量 E_P 之比 E_S/E_P 在略小于 2 到稍高于 30 之间变化,其中有 2/3 微震的 E_S/E_P 值小于 10。理论研究指出,纯剪切微震的 E_S/E_P 在 20~30 之间,纯拉张微震的 E_S 与 E_P 应近似相等。因此,这些小 E_S/E_P 值的微震被认为是“非剪切破裂”。这里的“非剪切破裂”指的是以剪切为主,附加上拉张的剪切—拉张混合型破裂。换句话说,水力压裂引起的岩石破裂一部分是纯剪切破裂,大部分是以剪切为主附加拉张的混合破裂。在空间分布上, E_S/E_P 最低的微震 ($E_S/E_P=0\sim10$) 发生在水力压裂井附近,随离压裂井距离增大, E_S/E_P 值有增大趋势。这说明,在压裂井附近发生的大多是混合型破裂,而在离压裂井远的地方,岩石破裂主要是纯剪切破裂。

然而, Rutledge 等 (2003) 在对同一套微震数据 (即上文 Urbancic 等 (1998) 使用的 Cotton Valley 气田微震数据) 研究后认为,在整个水力压裂裂缝范围内,是两种相似的双力偶剪切机制引起沿裂缝走向的剪切滑动,激发出地震波。Rutledge 等 (2003) 指出, P 波和 S 波的极性变化,波形相似性,诱生微震分布,天然裂缝的几何形态等资料都支持这种解释。

水力压裂诱发微震是大量的,有时达每小时数百次,虽然震源机制众说不一,但有一点是相同的,就是这些微震发生在包围着水力压裂裂缝面的相对较窄的区域内 (见图 2.2)。因此,测定微震源空间分布区,即确定了裂缝的方位和几何形态,包括裂缝的长度、高度、宽度、倾向和倾角。

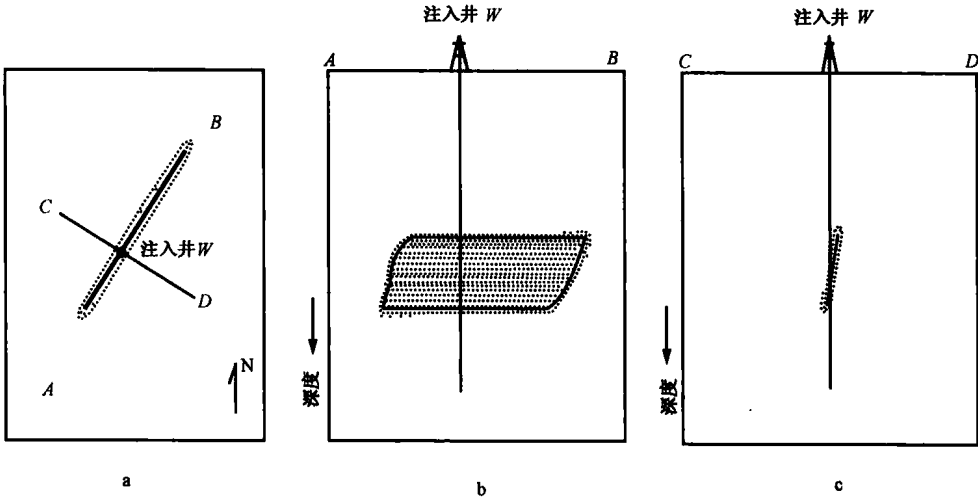


图 2.2 被微震震源包围着的水力压裂裂缝图

图中每个小黑点表示一个微震震源位置, a. 俯视图; b. 沿裂缝走向 (图 a 中的 AB 方向) 的剖面图, 图中实线圈出的范围是水力压裂生成的裂缝; c. 垂直裂缝走向 (图 a 中 CD 方向) 的剖面图

由于微震是随水力压裂裂缝发展过程而发生的,所以研究微震源空间位置随时间变化情况,可了解水力压裂生成裂缝的发育过程,为水力压裂理论和技术发展提供了其它方法所不能提供的资料。

2.2 水力压裂诱发微震的特点

2.2.1 微震的波型

井中观测到的微震波型有体波(包括 P 波和 S 波两种)和导波两类。体波包括直达波、反射波、折射波,以及沿套管滑行的套管折射波等。其中最重要的是直达波,即从发震点(震源)直接传播到检波器(包括穿过若干地层分界面后传播到检波器)被接收到的微震,它在记录到的微震总数中占绝大多数。其特点是:在三分量检波器记录上,每个分量上 P 波和 S 波成对出现,并且三个分量上的 P 波波至时间和 S 波波至时间分别相同。

图 2.3 是 1979 年 3 月在美国新墨西哥州的 Fenton Hill 水力压裂现场记录到的一个微震,它的三个分量都表现出体波(P 波和 S 波)特征,尽管质量不是很好(Albright,1980)。

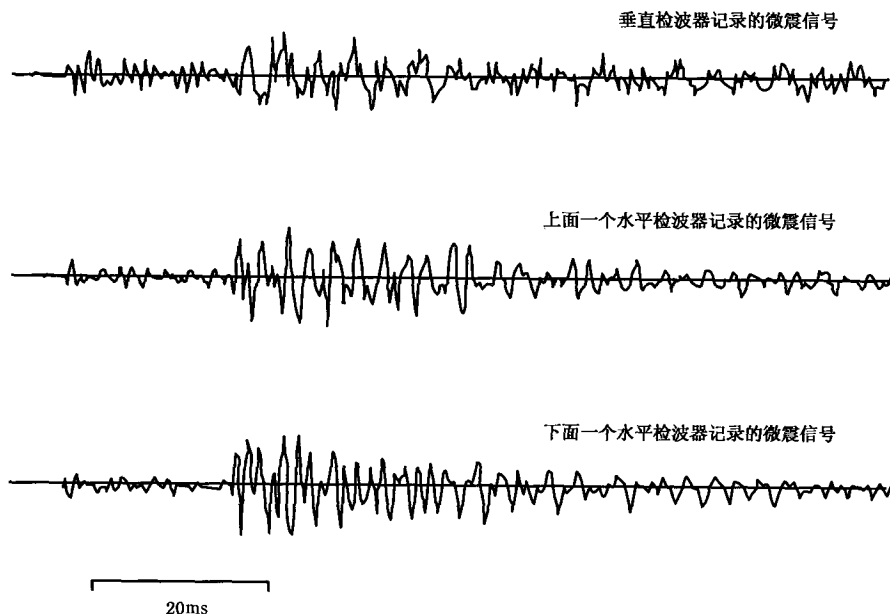


图 2.3 水力压裂诱发微震实例,三分量检波器记录
美国 New Mexico 州 Fenton Hill,1979 年 3 月。据 Albright 等,1980

图 2.4 是 1992 年 10 月在美国加利福尼亚州中部一口水力压裂井 Newlove 110 井口观测到的两个微震波形图(Schemeta 等,1994)。图 2.5 是在日本磐田的 Higashi-Hachimatai 热干岩试验场一口监测井中记录到的水力压裂诱发微震(H. Niitsuma 等,1991)。从图 2.3 和图 2.4 三个例子可以看到,每个微震分量上,P 波后面紧跟着一个 S 波,并且在这三幅图中都可以看到,每个图里的三个分量上的 P 波波至时间和 S 波波至时间分别相同。在这三个例子里还有一个共同特征:S 波比 P 波强得多,不仅这几个例子如此,在其它地方的微震监测中几乎都观测到相同现象。S 波明显比 P 波强的主要原因被解释为水力压裂产生的小裂缝主要是剪切破裂,因此发射出能量主要是剪切波。另一个可能的原因是 P 波衰减比 S 波强烈。

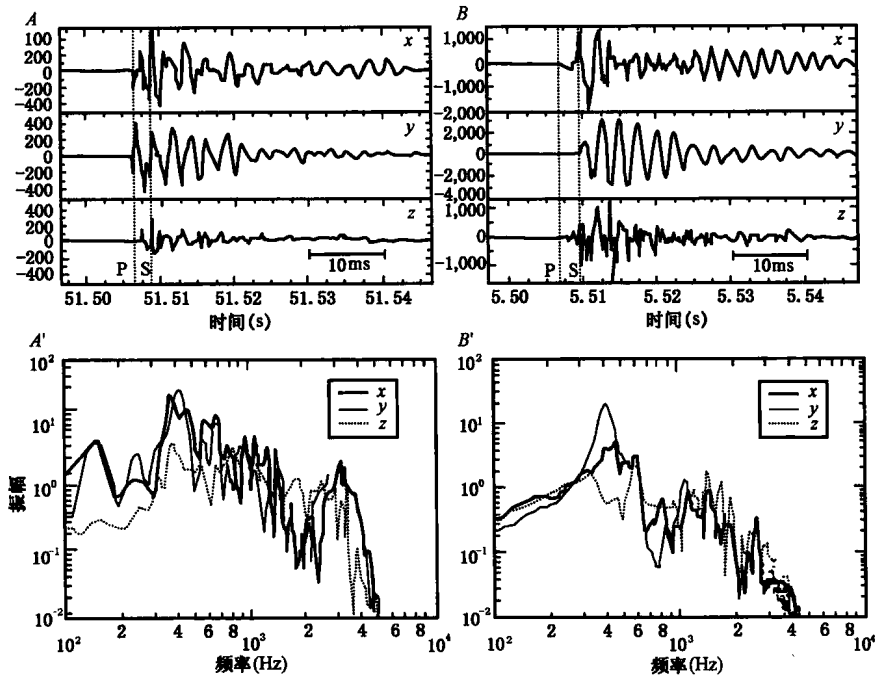


图 2.4 上图:美国 UNOCAL 公司和日本国家石油公司在加利福尼亚州中部一口水力压裂井(Newlove 110 井)记录到的两个诱发微震波形。

时间:1992 年 10 月。下图:为对应的振幅谱图

据 Schemeta 等,1994

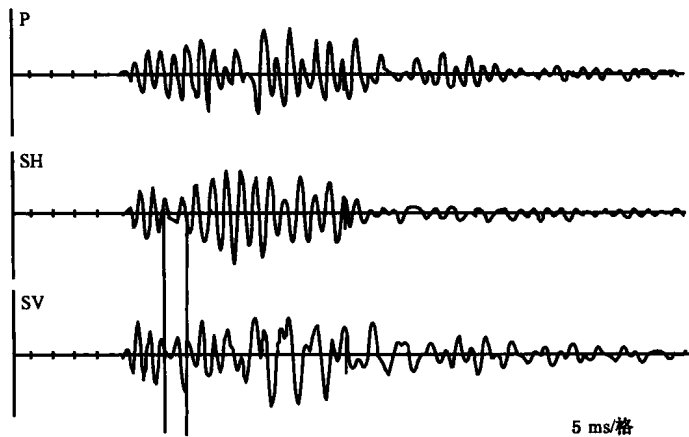


图 2.5 在日本磐田热干岩试验场一口井中记录到的水力压裂诱发微震记录

据 H. Niitsuma 等,1991

微震反射波是指微震源发出的波先传播到地层分界面(或其它反射界面)上,经反射再传到井中检波器被记录下来,微震反射波也可被用来确定微震位置,研究水力压裂裂缝(Phillips 等,1996)。微震折射波是在地层中存在地震折射界面时,微震源发出的波以临界角入射到折射界面,产生折射波被井中检波器记录下来。这里说的套管折射波是因套管中 P 波(或 S 波)的波速通常明显高于地层中波速,当微震源发出的波以临界角入射到套管上时,产生沿套管滑行的波,有的文献称其为套管折射波(Casing refracted wave)(Sarda 等,1988)。P 波或 SV 波入射角达临界角时可产生沿套管滑行的 P 波,也会产生沿套管滑行的 S 波;套管折射波最明显

的特点是： z 分量(沿井轴方向)的波至时间与 x 分量和 y 分量(与井轴方向垂直)的波至时间不相同； z 分量的初至先到； x 分量与 y 分量波至时间相同，并且都落后于 z 分量初至。图 2.6 就是沿套管传播的折射波实例，是在美国新墨西哥州 Fenton Hill 的一口斜井中记录到的，可以看到 z 分量初至先到(Sarda 等, 1988)。这是由于，沿套管传播的折射 P 波质点振动方向平行于井的轴线方向，这正是井中三分量检波器(不包括安装在万向支架上的三分量检波器)的 z 分量方向，这就是说沿套管传播的折射 P 波的质点运动方向与检波器 z 分量一致，而垂直于 x 分量和 y 分量，因此，沿套管传播的折射 P 波只有 z 分量而无 x 分量和 y 分量。相反，沿套管传播的 S 波虽其传播方向也与井轴线平行，但其质点振动方向垂直于井的轴线，在 xy 平面内振动，即它只有 x 分量和 y 分量，而无 z 分量。在此情况下，井中三分量检波器的 z 分量只记录到沿套管传播的折射 P 波，而 x 分量和 y 分量只记录到沿套管滑行的折射 S 波(图 2.6)。斜井中的检波器易记录到沿套管传播的折射波。

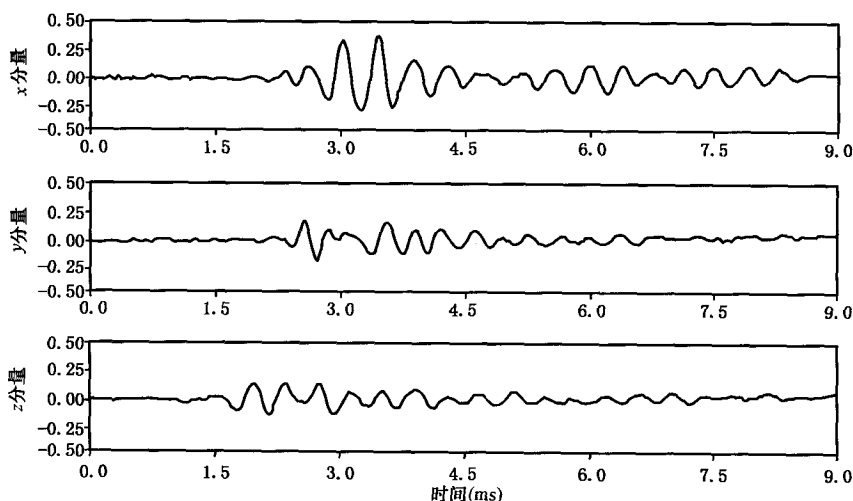


图 2.6 在美国新墨西哥州 Fenton Hill 的一口斜井中观测到的沿套管滑行的套管折射波

注意 z 分量的波至时间与 x 分量和 y 分量的明显不同。据 Sarda 等, 1988

导波主要包括正常频散瑞雷波，勒夫波(M. Lou 和 S. Crampin, 1992, 1993; M. Lou 和 J. A. Rial 等, 1997)，而由多个国家研究者联合研究项目“超越微震云”(More Than Cloud)的成果之一指出，沿充满流体裂缝传播的导波类似于井孔中的斯通利波(Fehler 等, 2001)。

图 2.7 和 2.8 是在美国 California 州 Coso 地热田上记录(20 世纪 90 年代初)的导波实例。它是向地层中注水时诱发微震，当震源和观测点都位于低速波导层(裂缝带)时便可形成并记录到导波。它是微震能量被封闭在裂缝带内传播时形成的。图 2.7 a, b 是测点 S1(位于裂缝带内)记录的 9 个微震，上面 5 个(149, 129, 217, 130, 159)的震源位于裂缝带内，其余 4 个震源在裂缝带外。a 图是垂直传播方向的水平分量，b 图是平行传播方向水平分量。由图可见，上面 5 道信号振幅异常大，并具有频散性，这是导波典型特征。进一步研究证明这 5 个微震属正常频散瑞雷型导波，其余 4 个都是体波。图 2.8 a, b 是五个相邻测点(S1, S2, S4, S7, S8)记录下的 149 号微震(震源位于裂缝带内)，其中只有测点 S1(最上面)位于裂缝带内，其余皆在裂缝带外。a 图是垂直传播方向的水平分量，b 图是平行传播方向的水平分量。上面一道(S1 点记录)具有典型导波特征：振幅异常大的和频散波列的特征。进一步研究证明这道信号是正常频散瑞雷型导波(Min Lou 等, 1997)。