

文章编号: 0253-9985(2004)01-0081-07

油藏动态监测技术: 时延(四维)地震述评

崔永谦¹, 刘池洋¹, 张以明^{1,2}

(1. 西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 陕西西安 710069;

2. 中国石油华北油田分公司勘探公司, 河北任丘 062552)

摘要: 近年来, 时延地震(又称四维地震)油藏动态监测技术发展迅速, 已成为一种新的油藏管理工具, 在许多油田, 尤其是海上大油田已进行了多方面的应用, 取得了良好效益。岩石物理研究的深化和相关技术的发展, 促使时延地震的应用领域不断扩大, 精度日益提高。目前, 时延地震除监测采油变化和驱油效果及流体前缘、寻找死油区外, 还用来监测断层封堵或渗漏性。其资料采集的关键是提高可重复性和信噪比。为了确保最终的地震差异是由储层中流体的变化所引起, 资料处理中进一步发展和应用了互均化、归一化和面元重组等技术和新老数据同步处理原则。资料解释在直接解释、反演与属性分析基础上, 发展了地震史匹配和动态油藏描述, 并与其他学科和技术有机结合、综合分析, 以减少解释的多解性。在降低项目投资风险与可行性分析方面, 也有明显进展。在开展时延地震项目时, 应充分考虑该技术的应用条件和局限性。随着研究的深入、技术的进步和应用实践的增多, 时延地震将会显示出更加美好的应用前景。

关键词: 时延(四维)地震; 油藏监测; 可重复性; 岩石物理; 流体移动; 互均化处理; 差异图像

中图分类号: P631.445.92

文献标识码: A

Reservoir dynamic monitoring: a commentary on time-lapse (or 4-D) seismics

Cui Yongqian¹ Liu Chiyang¹ Zhang Yiming²

(1. Northwest University, Xi'an, Shaanxi; 2. Huabei Oilfield Company of PetroChina, Renqiu, Hebei)

Abstract: Time-lapse seismic (4D seismic) technology, a reservoir dynamic monitoring technology rapidly developed in recent years, has become a new tool for reservoir management, and has widely been applied in many oilfields, especially offshore oilfields. The application of this technology is continuously enlarging and the accuracy is continuously increasing with the deepening of study on petrophysical properties and the development of relevant technologies. Currently, time-lapse seismic technology is used to monitor changes of oil recovery, oil displacement efficiency and fluid front, to identify areas with bypassed oil, as well as to monitor sealing capacity or leakage of faults. The key to seismic acquisition is to improve repeatability and signal-to-noise ratio. New technologies, such as cross equalization, normalization and bin parameter recombination and the principle of synchronous processing of new and old data, are applied so as to ensure that the final seismic differences are the only results of fluid flow changes in reservoirs. Based on direct interpretation, reversion and property analysis, seismic history match and dynamic reservoir description are developed as seismic interpretation technologies and are used in combination with other subjects and technologies to reduce non-uniqueness of interpretation. Remarkable progresses have also been made in respect of lowering investment risk of projects and feasibility study. The application conditions and limitations of the technology should be considered when carrying out time-lapse seismic projects. With the deepening of research on time-lapse seismic techniques and enriching of experiences, time-lapse seismic reservoir monitoring will progress more rapidly and will more widely be applied.

Key words: time-lapse (4D) seismics; reservoir monitoring; repeatability; petrophysical properties; fluid flow; cross equalization; differential images

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040808)

第一作者简介: 崔永谦, 男, 36岁, 高级工程师(在职研究生), 油气地球物理勘探

收稿日期: 2003-09-18

1 概念 功能及意义

时间延迟地震(time-lapse seismic), 简称时延地震, 也可译作时(间间)隔地震、时(间推)移地震。时延地震油藏监测技术是指油藏开发过程中, 在同一位置、不同时期的重复采集地震数据, 并对这些数据进行互均化处理, 研究不同时期与油藏流体变化有关的地震反射之间的差异, 依此对产层中流体的流动效应进行观测成像。由于每次地震观测一般都是三维的, 该技术增加了时间维, 即具有一定的延迟或推移的时间间隔, 故又称其为四维(4D)地震技术。此外, 还有一些其他的时延地震监测方法, 如时延二维地震、时延VSP和井间地震等^[1,2]。在非地震监测技术方面, 如时延电法、磁测和重力测量等近年也有新进展^[3]。

20世纪初, 物理学的研究已表明, 只有时间与空间统一成四维才能真正认识客观世界。爱因斯坦广义相对论的产生就得益于此学术思想。利用多次重复地震来监测油藏动态变化的思想产生较早^[4,5]。但在近10年, 4D地震油藏监测技术才得到大量商业性应用并取得快速发展^[1,6]。

目前, 时延地震油藏监测的技术路线, 是对油气生产过程中由于注入和开采而造成的油藏或储层中流体的流动过程进行观察成像。在一般情况下, 油藏开采期间岩石的骨架等地质特性可以认为不随时间而变化; 只有油藏的特性, 如流体性质、温度、压力、流体饱和度和孔隙度等反映流体流动的参量, 会随油藏开发时间的推移而发生相对较大的变化, 从而引起地震反射特性的相应变化。4D地震正是利用两次或多次观测的三维数据体, 把后一次与前次或前几次基础数据相比较, 研究油藏部位的地震反射特征变化, 消除静态地质特征的影响, 找出油藏内流体随时间发展而变化所造成的地震场之差异, 获得差异图像。这就使得利用时延地震进行油藏监测成为可能。

实践证明, 与以往油藏管理中的油藏模拟不同, 4D地震是直接观测地下流体的动态流动, 而不仅是理论模拟或简单预测^[7]。随着重复采集时间间隔和工作周期的缩短, 4D地震监测技术已经在应用广泛的3D地震基础上发展成为一种新的油藏工程管理工作。目前, 时延地震的主要功能表现在以下4个方面: (1) 在注采作业中监测注入

的流体, 如水、蒸汽、CO₂等的前缘移动情况, 监测驱油效果, 调整注入井和采油井, 优化注采程序, 减少不必要的浪费; (2) 分辨油水、油气界面随时间的变化, 对采油过程中流体界面的移动、孔隙流体饱和度和体积压力空间变化情况进行地震成像, 以便修改和优化开采方案, 延长生产井寿命; (3) 寻找和确定油藏内的死油区, 识别未开发区块, 优化、调整加密井、扩边井等新井井位以及老井重新作业方案; (4) 可用于监测断层的封堵性及其作用(是否存在流动屏障或渗漏现象), 限定油藏边界和模型, 预测流体单元, 合理确定生产方案和钻井位置^[8]。在目前技术条件下, 大油田, 特别是深水海域开发的大油气田是4D地震监测的主要场所^[9]。

2 岩石物理学基础

根据波动理论, 地震反射的振幅、传播速度等特性, 受控于岩石物性及其所含流体性质和相态等。所以说, 岩石物理学为连接地震与油藏工程的纽带, 是把地震反射时间、振幅、相位、频率及速度等属性转换为油藏特征属性的基本方法条件, 也是时延地震能否实现的物理基础。通过岩石物理学研究, 确定在油藏采油过程中, 由于流体变化而引起岩石物理特征的改变量(集中表现在速度和密度上), 以及它们对地震反射结果的影响^[10,11]。目前, 开展岩石物理学研究的方法主要有实验室岩心测定、测井资料分析、理论计算等3种。在描述和模拟孔隙流体对岩石密度、地震速度影响时常用Gassmann理论和Biot双相介质理论^[12]。

研究表明, 岩石物性、流体性质和环境等的不同, 都会对地震反射产生影响, 但直接影响4D地震的最主要岩石物理参数是岩石骨架弹性特征和孔隙流体压缩系数差。另外, 开采方式不同和油藏参数的差异, 也会影响油藏物性和地震响应特征, 并对地震数据产生微小影响。因此, 需要根据油田实际, 在岩石物理研究基础上建立油藏、岩石物理特征和地震观测之间的关系^[12~15], 分析岩石物性与流体变化能否引起稳定而可识别的地震反射差异。

早在20世纪70年代之始, 已进行了大量岩石物理实验和与油、气、水三相流体流动有关的物理理论研究, 进而探讨压力、温度、孔隙饱和度与P波S波速度的岩石物理关系, 流体流动与地震振

幅、反射波旅行时的关系等^[12, 16, 17]。到20世纪80年代,通过在实验室对重油饱和岩心样品的测量,发现稠油被加热时岩石的地震传播速度大为降低,如果在注蒸汽中存在游离气时,这种热效应会进一步加强,降低幅度可达40%。在重油热采区与未产区之间,振幅差异可达6倍之多^[1]。实验和模拟还发现,即使没有温度变化,油藏内存在游离气时也能大大降低岩石的地震速度和波阻抗^[17, 18]。

上述结论随后被现场实际蒸汽驱4D地震监测试验所证实^[5, 19~21]。到20世纪90年代后期,时延地震应用得到迅速发展,涌现出一批较成功的监测实例,如北海气顶膨胀、巴黎盆地储气和得克萨斯注CO₂等项目^[19, 20, 22]。

根据实验室研究与现场实际资料,从岩石物理和油藏特征角度看,能成功地进行油水系统监测的条件主要有4条^[1, 11, 13, 15, 22]:(1)储层岩石疏松、孔隙度大,最好是未固结高孔砂岩;(2)油藏内的气油比高;(3)水的含盐度高且流体饱和度变化大;(4)埋藏浅且油层厚度大。监测最困难的是死油以及流体储存在刚性低孔岩石(如碳酸盐岩)中,因为这时地震反射几乎不受孔隙流体的影响^[11, 18, 23]。不同的油田在实际监测中可能还会遇到其他一些不同的问题。

以上研究表明,4D地震技术有坚实的物理基础,能够用于监测气-油(水)界面的变化或空气、甲烷、CO₂等气体的移动情况。

3 资料采集、处理与解释

3.1 资料采集

成功的4D地震成像不仅不可重复的噪音比地震有效信号要弱,而且对于重复性的干扰也要进行有效控制,否则就会掩盖油藏中产生的变化。所以,如何提高信噪比和改善其可重复性是时延地震资料采集的关键。

近年来,通过不断的对比和实践,地震采集重复性大大改进,同时也进一步提高了4D地震数据的信噪比。通过对干扰的分析发现,震源、接受器、定位器所受到的微小干扰以及潮汐、潜水面、环境噪音、近地表特性等微小变化都会对4D地震数据产生不利影响^[4, 13, 24]。目前,致力于改进海上及陆上采集设计,以及通过安置永久性震源、检

波器等来减少这些不利的采集效应^[25]。以某海上作业为例,最近通过安装新的定位和操舵控制系统,包括装在拖缆上的操舵设备和内置高精度声波测距系统,大大提高了对拖缆的有效控制;在接受器的干扰控制方面,设计了一种用于资料自适应相干噪音衰减的数字组合及滤波技术,大大压制了波浪噪音;同时,使用高规格检波器基本解决了灵敏度变化问题;在震源干扰控制方面,为减少炮与炮之间的差异和组合中的方向特性,也采取了许多有效办法。通过这些改进,由海底电缆和拖缆勘探得到的地震资料都具有了高的信噪比和好的重复性,但由于海底电缆位置固定,其获得的资料的重复性更好^[24, 25]。由于拖缆地震采集效率提高,仍是目前4D地震采集的有效方法。

地震采集中,目前还存在一些仅仅依靠采集设计本身所难于控制和压制的干扰,需要在数据处理中加以消除。

3.2 资料处理

数据处理是4D地震中一个非常重要的环节。处理中必须采取有效措施,科学选择处理参数和流程,甄别有用信号与各种噪音,消除干扰信号,得到每个3D地震数据体的准确成像,使地下没有变化的非油藏部分具有最佳的时延重复性,并使油藏部分的地震差异具有稳定性和可靠性。为此,在时延地震资料处理中,关键是对几次采集的资料进行可重复性处理,此技术称作互均化处理(cross equalization)。互均化处理主要包括对反射时间、振幅、频带和相位等的校正和归一化处理。其目的使频谱带宽、相位、振幅增益变化、不同的静校正以及同相轴定位等达到均等,从而优化4D地震差值异常,消除时延地震中不需要的随时间的变化,只保留与油藏开发有关的反射变化响应^[12, 13, 26, 27]。在实际处理中,主要步骤包括多个三维数据体的预处理、道集编辑和互均化处理^[28]。针对叠后处理的数据、采集参数差异较大的数据和叠前处理的数据之差异,分别采用不同的处理方案。

受处理技术和地质认识的影响,以往处理中会将有些信号当作噪音或把噪音当作信号。由于在时延地震采集时,有些信息会重复出现,为反复对比、重新认识提供了可能。所以,4D地震处理的另一个原则是新老数据同步处理,以井的标定为核心进行严格的质量控制,确保最终的地震差

异是由储层中流体的变化所引起^[1, 29]。

3.3 资料解释

4D地震解释可分为以下4步。(1)准确标定:根据测井、岩心和其他生产数据模拟地震数据,分析4D地震差异变化反映的是油藏变化还是因非重复性采集、处理造成的假象,据此把4D地震时延变化与油藏时延变化联系起来^[29, 30]。(2)确定时延地震差异的地质涵义:定性地判别4D地震多数据体(multicube)中时延地震差异是否由油、气、水的变化所引起^[1, 20]。因除了流体性质的变化外,油藏开发方式、储层改造措施(如压裂)、压实变化等有时也会导致孔隙度等地质特性的变化,从而产生时延地震变化,加之地震的分辨率远小于地层尺度,故时延变化常常具多解性^[15, 31]。(3)综合反演:结合测井等资料对地震数据进行反演,以减小时延地震数据的多解性和解释的模糊性^[32]。反演得到的地震速度、波阻抗要比振幅特性等,更容易与地层的岩性、孔隙度、饱和度、温度和压力等直接建立联系。所以,通过反演可以更准确地把地震数据转换成油藏数据。与基础观测和时延观测求差相对应,在对4D地震数据反演得到动力学特性后,也要对其求差,得到差异或变化图像,然后进行定量解释。国外各大石油公司所采用的反演方法各有特色,一般包括对油藏深度、面积、容积、含油(气、水)饱和度、流体边缘以及盖层条件的反演等^[1]。有的还进一步得到蒸汽驱的温度-蒸汽饱和度图^[33]。反演技术目前依然是地球物理界的研究热点^[34]。(4)结论与建议:就是根据4D地震分析结果提出油藏管理建议,这也是4D地震最终成果的体现^[35]。

为了从多方面刻画流体变化,4D地震解释中还需要提取地震属性进行研究。经过地震属性的提取、特征优化和标定后,可以利用地震属性进行聚类分析,借助神经网络和地质统计等手段,确定多种4D地震属性及其差异与储层及油藏流体的关系^[36]。根据这一关系,进而得到油、气、水的饱和度和图^[23]。储层动态描述是近几年发展的一项新技术,主要是综合时延地震和生产数据等其他资料对储层进行动态描述。因为各种方法都存在多解性,所以解释中有时还结合其他手段,如用时延AVO反演研究流体变化,用油藏模拟和地震正演相互结合、彼此验证,以减少解释的多解性,并进

行不确定性分析等^[1, 15, 30]。

目前,可视化技术的发展又为4D地震数据的解释增加了新的手段。

实际应用表明,在符合条件的地区,利用4D地震数据确能监测油藏流体流动,用于油藏管理和油藏工程决策。如根据4D地震解释结果,在蒸汽驱项目中,优化、调整了生产井和注入井配置,优化了注蒸汽的布局,在提高采收率方面发挥了重要的作用^[20];还可发现死油区,指导设计水平井避开水淹层进行开采^[37]。类似成功的实例,可见各类文献^[22, 26, 27, 32]。

4 应用的风险和可行性分析

4.1 风险分析

在此方面,Lumley等人^[38]开发的用于4D地震监测项目的表格式风险评价表具代表性。该表制定了一套较完整的技术风险评价体系。在参与评价的内容中,包括油藏特征、岩石物性、油气水特性、时延流体变化和地震特征等方面的参数,并选择关键参数制定量化评分标准。油藏方面的关键参数是孔隙度、流体压缩系数、饱和度变化、地震波阻抗或传播时的变化、构造倾角。地震方面的关键参数是垂直和横向分辨率、震源和检波器以及整个测量的可重复性、成像孔径范围、成像质量、流体接触面成像等。这种方法在德克萨斯、墨西哥湾、西非、北海、印尼等许多4D地震项目评价中发挥了较好的作用。

该表经过修改后还用于时延VSP项目。

4.2 可行性研究

由于实际油水系统的时延流体信号比较微弱,所以在可行性分析方面,除上述油藏、地震方面的内容外,还要补充测井、岩石物理和根据油藏流体流动进行的地震模拟资料^[7]。在测井和岩石物理研究中,需要选取有代表性的井、层位和岩心,而且还要符合油藏饱和度、压力和温度条件的要求。根据地质模型、开发生产历史及流动模拟、岩心资料等,进行二维或三维地震模拟,计算和预测地震的速度、密度变化及AVO特性等。对油藏开采过程实施监测的可行性通过先验研究和模拟,才能对时延项目做出较可靠的评估^[15, 23]。在此基础上,还要有针对性地进行野外数据采集、时延数据处理等项目实施方案的设计,以保证得到高品质的4D地震数据。

除了技术上的可行性研究外,还要根据成本与效益的关系,确定经济上的可行性。

5 局限性与应用前景

5.1 局限性

任何一种可应用的技术,都有其本身特有的优越性和难以避免的局限性^[39]。时延地震虽是一种较好的油藏监测和管理工具,但仍存在以下不足或局限性。

5.1.1 岩石和流体性质多变与有限测试的矛盾

深入研究岩石物理性质和油藏流体变化及其对地震观测的影响,是4D地震监测成功的基础。由于不同油藏的结构和岩石特性各异,只有对具体油藏的岩石物性进行实测,才可能获得可用的有效信息。但用于测试的岩石样品数量有限,在平面和剖面上分布极为不均,然而同一油藏的储层通常又是非均质的;加之实验环境与地下实际情况的差别,以及岩石物理本身存在的速度弥散和频率问题,就会使该技术的应用精度受到限制,甚至有可能导致错误的结论^[11]。

在实践中发现,对实际的油水系统进行监测在技术上还存在一定难度。如对含低气油比的原油,因其密度相对较高,由注水等引起的地震振幅变化相对较低,只有在地震资料很好的情况下才可能进行动态监测^[16]。再如最常见的油饱和与气饱和岩石,它们之间与游离气或重油效应相比,其地震波阻抗差变化非常小,难于区分^[37]。

5.1.2 对刚性岩石为储层的油藏难以发挥作用

理论分析、室内模拟以及实际研究均表明,对以常见的碳酸盐岩、砾岩、火成岩、致密砂岩等刚性低孔隙岩石为储层的油藏,4D地震目前尚力不从心。但这类油藏数量众多。

5.1.3 松散地层再压实的影响

如前所述,未固结的高孔砂岩油藏,有利于通过4D地震成功地进行油水系统监测。但由于储层岩石疏松、孔隙度大、未固结,在油藏开采过程中,除了引起孔隙压力变化外,还会引起再压实而使孔隙度降低^[15],从而影响4D地震动态监测油藏流体变化的精度和量值。

5.1.4 可重复性难度大

可重复性是4D地震应用的前提,也是目前开展4D地震的最大技术风险。因要确保4D地震资料采集、处理各个环节的条件和环境之可重复性

是非常困难的。以环境噪音为例,哪怕是风吹草动、潮汐波浪的不同变化,都可能给不同次采集的资料留下不同的背景噪音,如果处理不当,极有可能被误认为是油藏变化产生的信息。根据我国的初步试验可知,在陆上特别是人文繁华区实施4D地震监测比海上难度更大^[29,40]。

5.1.5 及时动态监测和地震分辨能力的矛盾

油藏在采油过程中随时发生变化,及时监测此动态变化过程极为必要。但由于地震勘探自身的分辨能力,以及资料采集、处理和解释的周期等原因,目前4D地震还不能同气象观测一样做到及时观测、处理和预报。这无疑会影响利用4D地震及时发现和处理油藏或井下相关重要问题的时效。换言之,周期太短,4D地震难以分辨出油藏的细微变化;但监测间隔时间太长,即使有新的重要发现,也许仅是亡羊补牢而已。

5.1.6 油藏数据的一体化和可视化的实现

4D地震的一个重要要求是数据的一体化和可视化,不仅要集4D地震、岩石物理、油藏生产等数据一体化,而且要使4D地震和油藏数据可视化,以便能更好地从三维空间研究油藏的变化。目前3D地震数据的可视化已经基本实现,但在虚拟现实环境里4D时延地震以及油藏管理的可视化还需要开发相应的计算机软、硬件支持。

5.1.7 高额费用与可行性评价

在目前的技术条件下,4D地震高额的成本也是制约该项技术广泛应用的因素之一。在风险与可行性评价中,许多不确定性因素也会影响评价结果的准确性和可信度,所以对4D地震技术的具体实施应谨慎。

5.2 发展方向和应用前景

尽管有以上诸多局限性,但随着近几年采集设备和计算机技术的进步,4D地震作为一项极具潜力和前景的油藏管理新技术发展迅速。可以预见,未来油藏管理对其依赖会越来越强^[41]。

目前正在研究及今后需要发展的技术和方向主要体现在仪器设备的改进和时延方法的研究上。如永久性震源及检波器、实时油藏监测仪器以及海底和井中同时地震、时延横波技术、时延非地震技术(如电、磁、重力等)、具有不确定性分析功能的流体流动特性反演技术、油藏数据综合技术、地震史匹配和油藏模型修改技术等。

5.2.1 岩石物理性质研究有待深入

储层和岩石的物性是油藏与地震之间的桥梁,故应深化岩石物性的研究。目前,许多大学持续致力于岩石物性参数测试分析、岩石物理学模型建立、储层流体特性研究、裂隙与各向异性探讨等方面的工作。后者无疑将对裂缝性非均质储层的开发和监测产生积极的影响。

地震观测对应的储层和岩石物性的尺度要比测井、岩心测量的尺度大得多,已有人通过相关转换来解决尺度问题。如借助声波测井与岩石物性关系,将地震频带、速度、储层厚度及其他与流体有关的灵敏性分析范围加大,用导出的关系将反演结果转化到岩石物性上,从而把岩石物性扩大到地震监测范围之内。

5.2.2 4D地震装备技术正在全面发展

4D地震成功的实例将吸引和扩大市场需求,进而激励科技人员加快开发和制造高性能设备。随着高精度定位系统和高性能激发、接受装置的发展,海上拖缆以及陆上4D地震的可重复性将大大增强。但更可能的是永久固定的激发、接受装置和数据处理设备的使用^[25]。受光纤技术和成像技术发展的影响,传感器将采用光纤技术来克服电子系统长期稳定性和可靠性问题。从而就可能在油区的海底或陆上的地面和井下固定设置多个可成像的永久性监测传感器^[37]。监测数据几乎实时连续,油藏管理人员可以根据监测结果及时做出决策,利用及时的反馈信息,反过来还可以跟踪、监视决策的实施效果。

随着计算机和网络技术的发展,从采集、处理到解释的时间间隔和周期将大大缩短,并可及时提供图像。与此同时,应加强提高地震分辨率和监测灵敏度等技术的研究。

5.2.3 多波多分量时延地震的发展

多波多分量时延地震不仅可以提供即时的油藏数据和图像,还可以更好地解决储层非均质性问题,和区分流体界面,提供更准确的含流体饱和度和流体成像^[42,43]。与时延VSP、井间地震等相结合,以岩石物理研究为基础,将逐步探讨裂缝型储层的时延监测^[44]。

5.2.4 及时、动态、多维油藏监测相关技术的开发

与仪器等硬件设备发展相配套,从采集到解释周期的缩短和对监测精度要求的提高,必将要求进一步开发处理、反演、解释和分析软件,发展

用于实时4D地震监测的地震差异和油藏数据可视化技术。目前数据银行的建立和可视化技术的发展,将使得能在“数字油田”中,在虚拟环境下实现油藏数据的一体化和可视化。

5.2.5 将使地震史与油藏生产史融为一体

综合利用4D地震数据和油藏模拟实现定量地震史匹配,是一种用生产数据作约束的时延地震定量分析工具,为油藏动态监测提供了一种新的研究方法。其基本步骤是:先用初始地震数据与测井、生产数据相结合建立初始油藏模型,然后合成地震监测记录,再用最优化算法使合成的数据与实测时延数据之间差异最小。进行匹配合成时,生产史中模拟井的流量要与实测井的产液量相吻合,地震史中合成的地震数据要与实际的地震数据相一致。若二者不吻合,则需修改模型或数据,直到匹配达到最佳。

5.2.6 经济评价技术的发展

随着应用实例增多和数据积累,将会更客观地评价4D地震所带来的经济效益^[41]。

以识别死油区为例。据统计,全世界目前石油采收率在30%左右,未开采的石油储量大部分在死油区;而4D地震预计将可使采收率提高到70%左右^[9]。加之4D地震在油藏管理中体现的价值(包括在钻井、作业中的准确指导等),该技术的应用将会带来巨大的投资回报。

有效的油藏动态监测与管理技术,一直是地球物理学家、地质学家和油藏工程师联合攻关、期盼解决的地学难题。4D地震在技术、应用和经济上的可行,使这种期盼变为现实。随着4D地震设备和配套技术的发展以及自身成本的降低,将会进一步促进该技术的迅速发展和广泛应用。如同当年三维地震给石油勘探开发带来的辉煌成就一样,4D地震将为油气田开发、生产和管理注入新的生机与活力。该技术的应用将贯穿油气藏开采的始终,并为油气(田藏)地质理论研究和油气勘探提供前所未有的翔实资料。

参 考 文 献

- 1 孙建国编译.时延地震的现状与发展方向[A].见:新星石油物探研究所.SEG第68届年会论文摘要[C].北京:石油工业出版社,2000.145~154
- 2 Lee D S. 关于热监测的综合地震研究[J].傅启岳译.国外油气勘探,1997,9(5):622~629

- 3 Hordt A. A first attempt at monitoring underground gas storage by means of time-lapse multichannel transient electromagnetics[J]. *Geophysics*, 2000, 48(3): 489~ 505
- 4 Beasley C J, Chambers R E, Workman R L, et al. Repeatability of 3-D ocean bottom cable seismic surveys[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16: 1 281~ 1 285
- 5 Greaves R J, Fulp T J. Three-dimensional seismic monitoring of an enhanced oil recovery process[J]. *Geophysics*, 1987, 52: 1 175~ 1 187
- 6 高林. SEG 第 70 届年会暨 2000 年国际展览会综述[A]. 见: 新星石油物探研究所. SEG 第 70 届年会论文概要[C]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 1~ 9
- 7 Paul J, Hicks J. 油藏模拟在时间推移地震(4D)分析中的应用[J]. 冯弘译. 国外油气勘探, 1998, 10(5): 632~ 635
- 8 Lars S, Signer C, Veire H H, et al. 利用 4D 地震技术检测流动屏障[A]. 王新红译. 见: 新星石油物探研究所. SEG 第 70 届年会论文概要[C]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 239~ 242
- 9 邓辉, 吕威亮(编译). 四维地震及油藏检测中的应用实例[J]. 石油物探译丛, 1998, (2): 38~ 41
- 10 Demshur D M. 4D 需要精确的岩石和流体资料[J]. 范伟粹译. 国外油气勘探, 1997, 11(6): 754~ 756
- 11 Wang Zhijing(Zee). 地震岩石物理学基本准则[J]. 王炳章译. 石油物探译丛, 2001, (4): 1~ 20
- 12 易维启, 李明, 云美厚, 等. 时移地震方法概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 1~ 23, 64~ 78
- 13 邓怀群, 刘雯林, 王晓琦. 时间推移地震技术[J]. 勘探家, 1999, 4(3): 40~ 44
- 14 黄绪德. 油气层的物理特征[J]. 石油物探译丛, 1998, (2): 1~ 16
- 15 云美厚. 油田注水开采地震监测理论研究[J]. 石油物探, 1997, 36(3): 46~ 55
- 16 Domenico S N. Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir[J]. *Geophysics*, 1976, 41: 882~ 894
- 17 Nur A. Four-dimensional seismology and (true) direct detection of hydrocarbons: the petrophysical basis[J]. *The Leading Edge*, 1989, 8(9): 30~ 36
- 18 Johnstad S E, Seymour R H, Smith P J. Seismic reservoir monitoring over the Oseberg field during the period 1989~ 1992[J]. *First Break*, 1995, 13: 169~ 183
- 19 Meunier J, Huguet F. Cere-la-Ronde: a laboratory for time-lapse seismic monitoring in the Paris Basin[J]. *The Leading Edge*, 1998, 17: 1 388~ 1 394
- 20 Waite M W, Sigit R. Seismic monitoring of the Duri steam flood: application to reservoir management[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16: 1 275~ 1 278
- 21 Wang Z, Cates M E, Langan R T. Seismic monitoring of a CO₂ flood in a carbonate reservoir: a rock physics study[J]. *Geophysics*, 1998, 63: 1 604~ 1 617
- 22 Sonneland L, Veire H H, Raymond B, et al. Seismic reservoir monitoring on Gullfaks[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16: 12 47~ 1 252
- 23 Wang Z. Feasibility of time-lapse seismic reservoir monitoring: the physical basis[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16: 1 327~ 1 329
- 24 Emil J. Improving the repeatability for 4D time-lapse seismic[J]. *First Break*, 2001, 19(1): 32~ 37
- 25 Kristiansen P, Christie P, Bouska J, et al. Foionaven 油田的 4D: 二个设计者对 4D 的处理与分析[A]. 赵剑敏译. 见: 新星石油物探研究所. SEG 第 70 届年会论文概要[C]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 230~ 234
- 26 Tucker B. Time-lapse(4D) seismic monitoring of primary production of turbidite reservoirs at South Timbalier Block 295, offshore Louisiana, Gulf of Mexico[J]. *Geophysics*, 2000, 65(2): 351~ 367
- 27 陈小宏, 牟永光. 四维地震油藏监测技术及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(6): 707~ 715
- 28 凌云, 高军, 张汝杰, 等. 随时间推移(TL)地震勘探处理方法研究[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(2): 173~ 179
- 29 张国才, 李清仁, 朱丽波, 等. 时延地震方法初探[J]. 石油物探, 2002, 41(3): 269~ 274
- 30 Johnston D H. 利用老地震资料在墨西哥湾 Lena 油田进行综合时延研究[J]. 吴龙丽, 郭良川译. 石油物探译丛, 2000, (5): 82~ 94
- 31 张山, 刘清林, 赵群, 等. 微地震检测技术在油田开发中的应用[J]. 石油物探, 2002, 41(2): 226~ 231
- 32 Johnston D H, McKenny R S, Verbeek J, et al. Time-lapse seismic analysis of Fulmar Field[J]. *The Leading Edge*, 1998, 17: 1 420~ 1 428
- 33 Jenkins S D, Waite M W, Bee M F. Time-lapse monitoring of the Duri steam flood: a pilot and case study[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16: 1 267~ 1 273
- 34 阎世信, 曾忠. 地球物理勘探技术的发展及需求[J]. 中国石油勘探, 2002, 7(2): 36~ 42
- 35 Parr R S. Development of 4D reservoir management west of Shetland[J]. *World Oil*, 2000, 221(9): 39~ 47
- 36 庄东海, 许云, 乌达巴拉. 四维地震及其实施要求[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 361~ 364
- 37 Wang Z, Hirsche W K, Sedgwick G. Seismic monitoring of water floods: a petrophysical study[J]. *Geophysics*, 1991, 56: 1 614~ 1 623
- 38 Lumley D E, Behrens R A, Wang Z. Assessing the technical risk of a 4D seismic project[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16: 1 287~ 1 291
- 39 刘池洋. 地质学, 即古地质学[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2002, 32(6): 587~ 592
- 40 于世煊, 赵殿栋, 张振宇, 等. C 20 块蒸汽驱试验区的地震监测方法[J]. 石油物探, 2000, 39(1): 1~ 9
- 41 Ian J. The coming of age for 4D seismic[J]. *First Break*, 2001, 19(1): 24~ 28
- 42 Eastwood J, Lebel P, Ridyard D, et al. 4C/4D at Teal South[J]. *The Leading Edge*, 1998, 17: 1 450~ 1 453
- 43 Talley D J, Davis T L, Benson R D, et al. Dynamic reservoir characterization of Vacuum Field[J]. *The Leading Edge*, 1998, 17: 1 396~ 1 402
- 44 Bakulin A, Slater C, Bunain H, et al. 在有横向非均匀性情况下由多方位变井源距 VSP 估算方位各向异性和裂缝参数[A]. 薛亚琴译. 见: 新星石油物探研究所. SEG 第 70 届年会论文概要[C]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 209~ 214