

文章编号:0253-9985(1999)04-0361-04

四维地震及其实施要求^{*}

庄东海¹, 许云², 乌达巴拉²

(1. 江汉石油学院地球物理勘探系, 湖北荆州 434102; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 四维地震, 即时延三维地震, 是近年来发展起来的一项储层开发和管理新技术。该技术研究的是地下储层中流体变化所引起的时延三维地震资料的差异, 要求其资料的采集和处理具有重复性或一致性; 它与井资料和开发史等资料(例如从开发井中获得的压力、声波和温度等)综合可以十分精确地测量地下反射系数、压力、温度、储层的生产能力和储层流体变化; 并通过对泄油路径和剩余油的成像, 提高钻井成功率, 大大增加油气开采率。四维地震技术并非适用于所有储层, 只有孔隙流体和岩石的压实变化大、温度变化大、压力变化大、净超负荷压力小且储层埋深浅, 以及储层所有变化的综合效应在给定的地震分辨率范围内存在地震差异时, 才能成功地应用四维地震技术。为取得应有的经济效益, 四维地震实施应分可行性研究、现场先导试验和油田大规模应用三个阶段进行。目前, 四维地震的成功实例都集中在“现场先导试验”阶段。

关键词: 四维地震; 实施; 重复性; 储层; 流体变化

第一作者简介: 庄东海, 男, 37岁, 副教授(博士), 开发地震

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A

石油工业从二维过渡到三维已经大大改进了油气开采效率^[1-3], 四维的出现将使储层整个开发期间的效益达到最大, 使地下原有储量的开采率增加到前所未有的水平。四维地震在三维地震的基础上进一步获得宝贵的时间延迟信息, 经过测井资料和开发史信息的标定, 可识别出泄油模式和剩余油区位置, 进而可优化新井的位置、减少干井和增加新的可采储层。来自不同环境和条件的四维地震的成功实例有力地说明四维地震可望在下个世纪使储层的开采率达到70%^[4-7]。

1 概述

地震油藏监测技术属油藏管理技术之一, 它运用地震资料来监测油藏的內部特征。时延地震是地震油藏监测技术的一种, 它强调地震勘探的位置重复, 突出随时间变化的与储层有关的地震信息(如时延地震井间勘探、时延垂直地震勘探和时延二维地震勘探等等)。四维地震技术, 即时延三维地震监测技术, 是近年来发展起来的一项储层开发和管理新技术, 它既突出了随时间变化的储层地震

信息, 又充分利用了三维地震的全部优点。通过分析差异信息把储层中的流体前缘界面作为时间的函数进行追踪, 对开发过程中发生的变化作出预报, 从而延长生产井的寿命或加快开发进度, 优化油藏管理, 提高采收率。

四维地震技术是三维地震技术在时间上的延伸。该技术要求以适当的时间间隔对同一油气藏进行多次三维地震测量。为了研究地下储层流体变化所引起的时延三维地震资料的差异, 四维地震资料必须在储层范围外(特别是储层之上)要具有重复性或一致性。重复性是四维地震成败的关键。尽管两次三维地震资料的采集和处理方式都一样, 但由于一些非储层变化因素(如激发条件)的影响, 仍会使两次测量在非储层范围内的地震特征有差异。因此, 要求四维地震资料必须进行相对振幅保持处理、高信噪比处理和一致性处理, 其中一致性处理的难度较大, 但也最关键。

四维地震监测处理在同一油、气田重复采集的多次三维地震资料, 观察由储层中油、气和水的运动所引起地震变化。它与井和开发史等资料(例如从开发井中获得的压力、声波和温度等)综合可以十分精确地测量地下反射系数、压力、温度、储层的生产能力和储层流体变化; 并通过对泄油路径和剩余油的成像, 钻新井以从老油田开产出新油, 为

^{*} 中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金资助项目(97 科字 138 号)。

收稿日期: 1999-06-25

老油田的充分发挥提供有效手段。该技术的充分发展将全面消除传统勘探、开发领域的界限,使油气藏的勘探、开发进入一个崭新的时代。

四维地震的引入,将使油藏的管理模式发生变化^[8]。在过去的油藏管理中,地震数据只是一次性地参与油藏的管理。而四维地震油藏管理模式将地震资料不断地加入到油藏管理中。因为在油田的实际开发过程中,油气储层是动态变化的(即油藏本身就是随时间在三维空间中连续变化的),因此这种管理模式更符合油田开发需要。与常规的油藏管理模式相比,四维地震油藏管理模式能更加合理地改进油田储层模型,设计或修改油田开发方案,延长油田的生命期。

四维地震储层监测需要许多现有的技术和新技术,以实现四维地震的价值。如:海底电缆技术,4D/三分量横波地震,4D 振幅随偏移距的变化(AVO),多侧向方向钻井,套管井测井-电阻率,声波以及核测井,4D 重力梯度仪和储层动态模拟技术。

2 要求

四维地震监测的是储层流体的流动或驱替。储层流体驱替期间岩石与孔隙流体之间的相互作用引起开采流体和压力的变化,这些变化又与同一流体流动驱替过程产生的声波变化有关。地震特性对这些变化的响应因油田而异,因储层而不同(如水驱与衰竭驱储层之间)。只有储层的所有变化的综合效应在给定的地震分辨率范围内存在地震差异时,才能成功地应用四维地震技术。因此,四维地震技术并非适用于所有储层。四维地震技术的实施要考虑储层特点、流体特性和地震资料质量,对储层、开采过程和地震技术也有一定的要求。

2.1 对储层的要求

首先要求储层的岩石骨架的弹性要低。研究表明,储层岩石骨架的弹性性质与地震属性有着密切的联系。随着岩石骨架刚度的增加,地震异常的幅度减少。因此未固结或固结差的岩石、具有连通裂缝的岩石、孔隙纵横比较小的岩石、粒间接触的岩石和净超负荷压力小的岩石都有利于四维地震技术的应用^[9~11]。

此外,储层孔隙流体的压缩差异要大。由于四维地震技术研究的是储层流体的变化,只有储层流体压缩差异较大时,地震属性上才有明显的反映。

表 1 给出孔隙流体压缩差异较大的 6 种情况。

表 1 孔隙流体可压缩性差异大的几种情况

Table 1 Some cases of compressible difference for reservoir pore fluid

储层流体	变化	储层流体
液体(油、水)	← →	气
油/水	← →	CO ₂ (液体或气)
活油	← →	水/淡水
油	← →	高矿化度淡水
活油	← →	死油
低温油	← →	高温油

因此,四维地震技术对储层的要求是:孔隙流体和岩石的压实变化大,温度变化大,压力变化大,净超负荷压力小且储层埋藏浅。新的、未固结的砂岩是开展四维地震监测最好的油田。

2.2 对开采过程的要求

通常,储层地震特性的变化受开发/开采过程的影响。因此,充分认识开发过程与储层地震特性变化之间的关系对四维地震的实施也显得特别重要。

蒸气注入(steam injection)是最常见的热力开采方法。在热力开采期间,储层被加热,其孔隙流体的粘度降低。储层的温度增加,使得岩石及岩石孔隙流体的压缩性增大,从而导致储层地震速度的大大减少。因此,重油砂层的蒸汽注入开采过程有利于四维地震技术的实施。

由于注入流体(CO₂ 或气态氢)的可压缩性远远高于储层流体,因此,在溶解驱或非溶解驱开采过程中,注入到储层的 CO₂ 或气态氢使孔隙流体粘度减小并驱替储层孔隙流体,这也有利于四维地震技术的实施。

在水驱开采过程中,如果储层孔隙中是轻油或活油,则由于轻油与水的压实差异较大,有利于四维地震技术的实施;如果储层孔隙中含有重油或死油,则由于重油与水的压实差异较小,不利于四维地震技术的实施。此外,一次采油或油藏枯竭引起储层压力下降,进而使得地震速度/波阻抗大大增加,亦利于四维地震技术的实施。

注入压力和注入速度较高时,可能导致储层岩石破裂。地震速度对岩石裂缝特别敏感(特别是当地震波的极化方向与岩石裂缝垂直时),故也适合应用四维地震技术。

四维地震适用于水驱和溶解气驱储层。在碳酸盐岩地区,四维地震适用于气驱、CO₂ 驱和蒸汽

驱和溶解气驱储层。

2.3 对地震技术的要求

地震资料对储层监测的价值取决于它的分辨率和信噪比,而分辨率和信噪比又取决于资料的采集和处理参数以及特定储层的特殊地质环境。

四维数据分析对现代地震资料的要求是:随机噪声的水平低,信号重复性好,导航和测量精度高。对地震技术的要求反映在地震资料采集、处理和解译的各个阶段,其总的要求是地震分辨率要高,重复性要好。因此,在评估储层参数(干燥岩石的可压缩性、流体压缩比、流体饱和度变化和孔隙度)的基础上,要评估地震参数(地震采集及处理参数的重复性、地震成像质量及分辨率和地震流体接触的可见性)。

在采集方面,震源主频要高,每次的采集设计和参数(如接收点、震源位置、震源信号、方向性以及环境的耦合效应等)尽量相同。同时,要优化采集参数,如震源能量、震源和接收器定位的精确性、网格方向、面元大小、偏移距和方位分布、震源和接收排列等参数,以加强四维资料采集的重复性。

在处理方面,根据地质特点选择不同的处理方法和处理流程以补偿地震采集带来的不一致,加强重复性,提高四维地震分辨率。特别要增强叠前地震资料的重复性,保持相对真振幅信息,减少处理多个三维地震资料的周转时间,在解释前三维地震成像数据体要进行相互均衡处理^[12,13]。

在解释方面,根据测井资料模拟地震道,并与岩芯测量结合起来作为岩性、流体饱和度、压力和温度的函数(先决条件),计算时间延迟三维合成地震成像作为详细储层模型和流体模拟的函数,确定是否在时延剖面上存在有效变化,更好地理解可能的地震变化与储层变化的联系。

3 实施

四维地震并非适应所有的油田,要想四维地震取得应有的经济效益,对四维地震勘探必须合理设计、精心组织。通常,四维地震勘探是分三步进行的,即可行性研究、现场先导试验和油田大规模应用。

3.1 可行性研究

分析现有资料以确定在生产过程中储层条件和预期发生的变化。估算由这些储层变化而引起

的地震响应的变化并与本地区现有的资料所观测的噪声水平比较。

(1)进行储层、岩石物性、盖层和强化采油的生产机制的调查。表2列出部分需要调查的参数,其重点是了解在各种储层条件下(压力、温度、饱和度和应力)地震速度的变化情况。这些参数通过实验室岩芯测量或利用 Boit-Gassmann 方程理论计算获得。

表2 可行性研究需要调查的一些参数
Table 2 Some parameters needed in feasibility study

参 数	说 明
深度	浅层更有利,地震频率高,并对未固结岩石的流体变化更敏感
骨架压力	当骨架压力低时,储层物性参数受流体饱和度和压力变化的影响更大
泡点	指在特定的条件下,溶解气开始汽化的压力,大于泡点的储层有利于四维地震勘探
温度	在高温条件下储层的油比水更具可压缩性,因而有利于四维地震
储层厚度	为了能垂向检测储层流体的变化,储层厚度应大于地震主波长的一半
岩石	指孔隙形状、胶结方式和岩石组分
干燥体积模量	低干燥体积模量有利于四维地震
孔隙度	高孔隙度有利于四维地震
汽油比	高汽油比的储层有利于四维地震
流体饱和度变化	开发初期的饱和度与要监测的饱和度的比越大越好
流体可压缩性比	$(K_2 - K_1)/K_1$ 其值越大越有利于四维地震

(2)分析波阻抗随时间的变化,制作一维合成地震记录预测强化采油引起地震响应的变化。研究信噪比对地震监测的影响。有条件的话,可进行三维动态地震模拟和生产史资料的匹配研究^[12]。

(3)对现存三维地震资料的采集方式、处理流程和用其所做的静态油藏描述的结果进行充分的了解和评价。

(4)进行极少量的地震采集工作,主要进行野外施工设备及方法的试验。在此基础上做地震采集和处理的重复性研究工作,了解地震资料的主频、分辨率和噪声水平。

3.2 现场先导试验

将可行性研究中所确定的一整套参数和方法用于油田中具有良好成功前景的储层,这样既可提供最好的机会来精细地调整勘探变量,又可减少资金的投入。目前,四维地震的成功实例都集中在“现场先导试验”阶段。在此阶段,要继续做四维地震资料重复性的研究工作,同时要对四维地震资料的成像质量、旅行时间变化和波阻抗变化进行分

析,确定合理而有效的四维地震处理和解释方法。

3.3 油田大规模应用

在现场先导试验中调整过的一套参数和方法用于整个油田,这样做无论是从技术观点出发还是从经济观点出发,其成功的可能性大大增加。

在此还必须强调四维地震储层监测必须对现代油田工程的时间限制有所响应,即四维地震储层监测必须对新信息有迅速分析和响应的能力。由于四维地震要处理大量的地球物理的、地质的和工程的数据,因此四维地震在油田大规模运用时,必须要有一套软件系统的支持,使其具有实效性。同时,还须地球物理学家、地质学家和油藏工程师的协同配合。

参 考 文 献

- 1 Anderson R N, Boulanger A, He W, et al. 4D seismic: the fourth dimension in reservoir management, part 1: Initial article of six part series explains what 4D is, using actual seismic responses throughout the life of a producing field[J]. *World Oil*, 1997, 218(3): 43 ~ 49
- 2 Anderson, R N, Boulanger A, He W, et al. 4D seismic: the fourth dimension in reservoir management, part 2: Why 4D now? The information technology revolution has changed the way we do business[J]. *World Oil*, 1997, 218(4): 69 ~ 76
- 3 King C. 4D seismic improves reservoir management decisions, part 1: introduction to two part article that describes how new time lapse 3D technology provides reliable information about fluid distribution in the reservoir[J]. *World Oil*, 1996, 217(5): 75 ~ 77
- 4 Anderson R N, Boulanger A, He W, et al. Gulf of Mexico reservoir management-2: method described for using 4D seismic to track reservoir fluid movement[J]. *Oil & Gas Journal*, 1995, 93(14): 70 ~ 74
- 5 Anderson R N, Boulanger A, He W, et al. 4-D seismic monitoring of reservoir production in the Eugene Island 330 Field, Gulf of Mexico [A]. In: Weimer P, Davis T L, eds. *AAPG Studies in Geology*, 42 and *SEG Geophysical Developments Series*, 5. Tulsa: AAPG/SEG, 1996. 9 ~ 20
- 6 Johnstad S E, Seymour R H, Smith P J. Seismic reservoir monitoring over the Oseberg field during the period 1989 ~ 1992. *First Break*, 1995, 13(5): 169 ~ 183
- 7 Jenkins S D, Waite M W, Bee M F. Time lapse monitoring of the duri steamflood: a pilot and case study[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(9): 1 267 ~ 1 273
- 8 Key S C, Pederson S H, Smith B A. Adding value to reservoir management with seismic monitoring technologies[J]. *The Leading Edge*, 1998, 17(3): 515 ~ 520
- 9 Lumley D E, Behrens R A, Wang Z. Assessing the technical risk of a 4D seismic project[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(9): 1 287 ~ 1 291
- 10 Wang Zhijing. Feasibility of time lapse seismic reservoir monitoring: the physical basis[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(9): 1 327 ~ 1 329
- 11 Watts G F, Jizba T D, Gawith D E, et al. Reservoir monitoring of the Magnus Field through 4D time-lapse seismic analysis[J]. *Petroleum Geoscience*, 1996, 2(3): 361 ~ 372
- 12 庄东海. 四维地震资料处理原则[A]. 见: 中国地球物理学会. 1998 中国地球物理学会年刊[C]. 西安: 西安地图出版社, 1998. 29
- 13 庄东海, 肖春燕, 许云, 等. 四维地震处理及其关键[J]. *地球物理学进展*, 1999, 14(2): 33 ~ 42

4 - D SEISM AND ITS BASIC REQUIREMENTS

Zhuang Donghai¹ Xu Yun² Wu Dabala²

(1. Jiangnan Petroleum Institute, Jingzhou, Hubei; 2. China University of Geosciences, Beijing)

Abstract: 4-D seism, also known as time-delay 3-D seism, is a new technique for reservoir development and management. Its main task is to study the differences between time-delay 3-D seismic data caused by fluid changes in reservoirs. So time-delay seismic data must have repeatability or identity. Be combined with well and development history data, 4-D seismic data can provide more accurate reflection coefficient, temperature, pressure, productivity capacity and fluid changes of reservoirs. This technique can also improve recovery rate and well-drilling success ratio. But it must be pointed out that this technique is not suitable for all reservoirs. It only suitable for the reservoirs whose pore fluid, rock compaction and pressure change considerably, the net-overload pressure is small and reservoirs are buried shallower, and there are seismic differentiae in given range of seismic resolution of reservoirs, synthetic effect. In order to gain its proper economic benefit, the operation of 4-D seism will be carried out into three stages: 1. feasible study, 2. forerunning test in site, and 3. oilfield application on a large scale. At present, all successful examples of 4-D seism focus on forerunning test.

Key Words: 4-D seism; operation; repeatability; reservoir; fluid change