

· 四维地震 ·

# 衰竭开采式气藏的四维地震研究方法

黄军斌\*<sup>①</sup> 高利军<sup>②</sup> 王德发<sup>①</sup> 于兴河<sup>①</sup>

(①中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; ②哈里伯顿公司,北京 100004)

黄军斌,高利军,王德发,于兴河. 衰竭开采式气藏的四维地震研究方法. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 642~646

**摘要** 衰竭开采式气藏在开发过程中通常只是降低储层孔隙压力,产生微弱四维地震效应,制约了四维地震技术在气田开发生产中的应用。针对此难题,本文利用南海 A 气田两期三维地震资料,进行了四维地震监测试验。通过细致研究模型、精细一致性振幅补偿处理和精心地选取地震参数,发现该区气层在开采 5 年后,其储层顶面某些振幅类属性减弱 5%,显示衰竭式开采气藏存在四维效应,因此可利用四维地震方法监测油气藏开采动态,为油气田开发部署提供依据。

**关键词** 四维地震 衰竭开采 一致性补偿 四维差异 四维效应

## 1 引言

四维地震勘探技术自 20 世纪 90 年代推出以来,仅有十余年的发展历史。众所周知,四维地震的机理是,在油气开采过程中会造成储层孔隙流体和压力变化,改变储层岩石物性,进而引发地震响应特征变化,这种变化可由多次地震勘测资料的属性差异检测出来<sup>[1~3]</sup>。因此利用两次(或多次)在不同时期采集的三维地震资料,可以研究油层或气层变化,评估油气藏开采动用程度,为油气田下一步开发部署提供依据。

一般而言,油藏开采有注水和注汽两种方式,在此过程中对储层孔隙流体产生置换或取代作用,改变了储层声阻抗等属性,引起明显的地震信息变化,因此可应用四维地震技术监测注采动态<sup>[4,5]</sup>,研究油水界面移动和寻找剩余油藏<sup>[6~8]</sup>。近年来,四维地震技术逐步成为油藏开发管理中的一项关键技术<sup>[9,10]</sup>。鉴于气田开发主要采用衰竭方式,这种开发方式通常不会造成油水界面移动,只是降低储层孔隙压力,引发微弱压实作用,导致储层厚度减薄和声波速度增加,从而引起较小的地震时间和振幅变化<sup>[11]</sup>,即其四维地震效应明显弱于油藏。因此,应用现今的四维地震技术进行气藏开发管理的难度较

大,国内外有关这方面的应用实例鲜有报道。为此,本文以南海 A 气田两期三维地震资料为研究对象,探讨了衰竭开采式气藏的四维地震方法。

## 2 四维地震研究资料基础

所选气田位于中国南海,目标储集体是一西高东低的半背斜构造圈闭,发育北西—南东走向和近东西走向两套断裂系统,其断距小、发育晚,不控制气水分布,但影响开采井之间的连通性。主力气层为古近系渐新世三角洲相砂岩,平均厚度约 200m,净毛比为 80%~90%,孔隙度约 13%,埋深在 3000~4000m。该气田于 20 世纪 90 年代初首次采集了三维地震资料,在 90 年代中开始采用衰竭开采方式产气,开采 5 年之后再次采集三维地震资料,从而为探索和研究四维地震技术在气田开发中的应用提供了条件。

该区主力含气砂岩由下而上物性趋好,特别是顶部约 20m 砂岩段物性最好,速度和密度比平均值约低 10%,与上覆泥岩波阻抗相差甚大,形成巨大负反射系数,在地震剖面上显示为强波谷。此波谷强度与所含流体关系密切,含气时强,含水时变弱,振幅差异可达 1/3。在常规偏移剖面上可见到与井中钻遇气水界面对应的平点,平面图上可见与气水界面构造线相吻合的振幅异常(图 1)。

\* 北京市海淀区中国地质大学(北京)能源学院,100083

本文于 2009 年 11 月 3 日收到,修改稿于 2010 年 3 月 17 日收到。

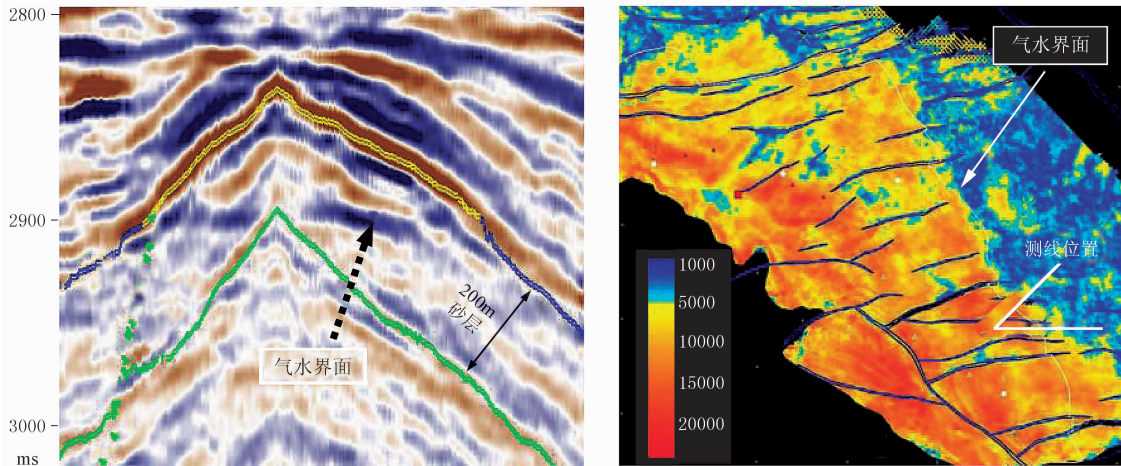


图 1 常规偏移剖面(左)和储层顶面均方根振幅(右)

### 3 四维地震理论模型研究

该气田采用衰竭方式开采,边水规模小、能量弱,随着开采时间增加不会发生气水界面移动,只会造成孔隙压力下降。理论认为,地层所承受上覆压力等于内部颗粒支撑压力与孔隙支撑压力之和。当孔隙中气体随开采时间增加而逐渐减少时,孔隙压力随之降低,而颗粒间支撑压力就会补偿性地渐渐增加,从而引发微弱的压实作用,岩石声学特性随之增强,表现为纵、横波阻抗加大。这一地震效应可在实验室岩心数据标定下,利用测井资料建立的数学模型反映出来。

实验室岩心数据研究结果表明,随着颗粒间支撑压力(有效压力)增加,会导致弹性(体积和剪切)模量增大。实际上,岩石沉积后固结成岩的过程既是排出孔隙水的过程,也是增加颗粒间支撑压力即有效压力的过程。开始阶段岩石未固结,孔隙体积快速减小,大量孔隙流体排出,有效压力迅速增加,导致弹性模量急剧增大;岩石固结后,孔隙体积压缩难度加大,只有少量孔隙流体缓慢排出,导致有效压力慢速增大,也就决定了弹性模量也只能缓慢增大。而衰竭式开采过程,也是缓慢减小孔隙流体压力的过程,势必造成岩石有效压力缓慢增大,从而引发弹性模量缓慢增大。利用岩石这种弹性模量变化规律,结合地层水、纯气和地层气(65%气+35%水)等流体的声学特性,进行正演模拟研究。当孔隙压力降低时,可以研究相应的速度和密度变化规律(图2)。随着孔隙压力降低,地层水、纯气和地层气

速度降低,含气地层(砂岩+地层气)速度明显增加(图2a)。而这四种物质的密度变化规律与速度类似(图2b),但幅度很小,对模型波阻抗计算的影响微弱,可忽略。

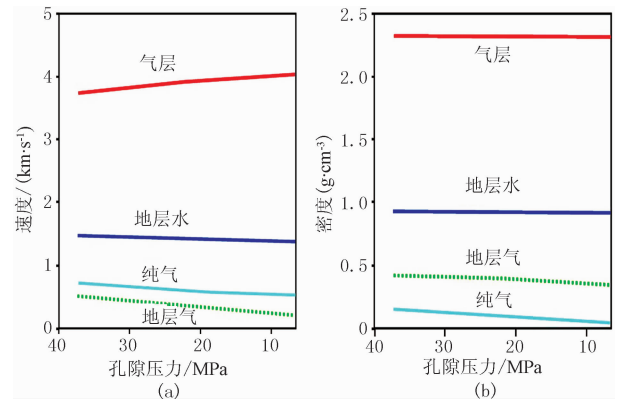


图 2 速度(a)和密度(b)与孔隙压力的关系

利用上述成果建立正演模型,将计算结果绘制波阻抗变化曲线(图3)。当气层孔隙压力由原始压力38MPa下降到10MPa时,波阻抗增加6%。而在第二次采集三维地震资料时,开采区平均孔隙压力为20MPa,波阻抗理应增加4%,则需了解反射振

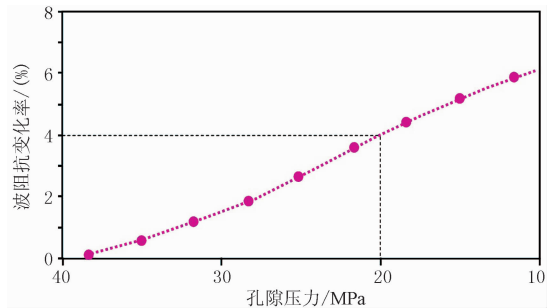


图 3 地层波阻抗变化与孔隙压力的关系

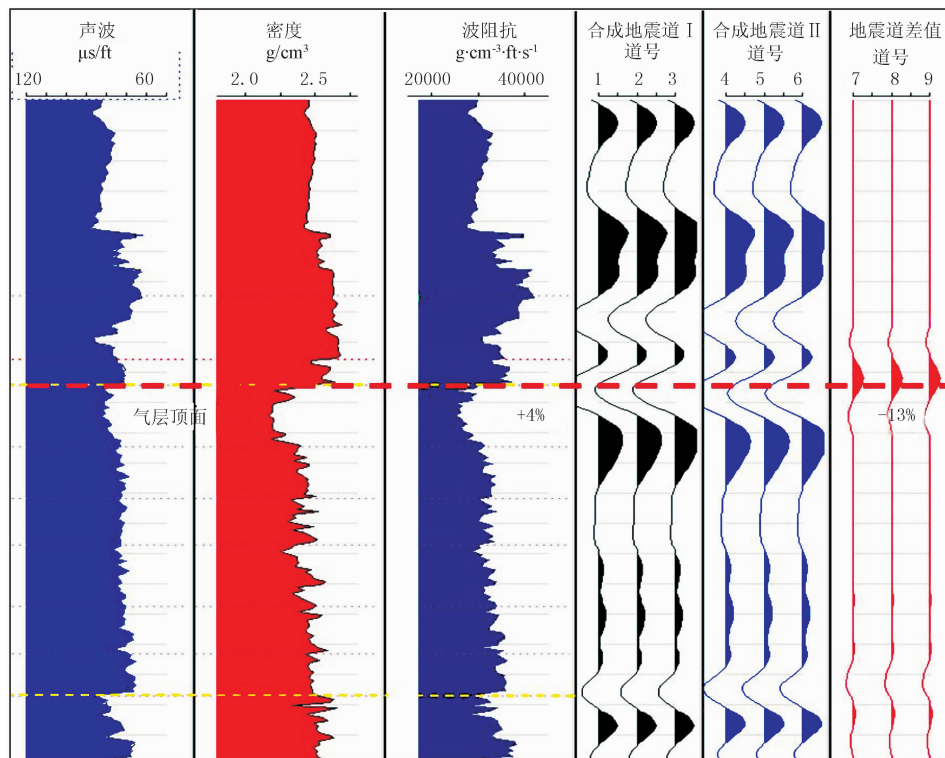


图4 气层顶面处波阻抗增加造成对应地震道反射振幅减弱

幅的对应变化。为此,利用褶积模型计算了不同条件下相应的合成地震记录道。图4中从左到右分别是声波时差、密度、波阻抗、原始孔隙压力条件下的地震道(I)、当前孔隙压力条件下的地震道(II)和两地震道之差值。就地震属性变化最明显的气层顶面而言,当孔隙压力由38MPa降为20MPa时,波阻抗增加4%,强波谷反射振幅减弱了13%。这一结果说明衰竭开采式气田主力气层(特别是气层顶面),存在可解释的四维效应,可应用四维地震技术监测气藏开采动态。

#### 4 资料解释前地震属性一致性补偿

在据上述理论模型获得四维效应结论的基础上,对两次三维地震资料实施了精细四维处理,也称其为一致性处理,主要目的是尽可能去掉或压制地震数据中的非地质性差异,如不同采集系统和随机噪声产生的差异信息,只留下与开采因素相关的地震信息。理论上,经四维处理后的资料应当是不含采集系统差异信息的四维成果资料,但实际上此类差异是很难消除的,因此在做资料解释之前一定要先细致评估这些非地质信息的残留程度,特别是对

目的层的影响,然后探寻适用方法进行压制,这一过程被称为解释前资料一致性检查和补偿处理。下面简述处理要点。

首先,要排除不可行区域,例如该气田第二次采集中因开发设备等因素而无法采集数据的区域,以及因噪声太大而掩盖四维效应的区域。然后,在可行区域中,进行地震属性一致性检查和补偿处理。

该气田的主力气层上方有一个优质砂体,该砂体物性好、波阻抗低,其顶面与强地震反射波谷对应,且未受开发活动影响,是一致性检查和提取补偿因子的理想标志层。利用该标志层,在两期三维数据体上提取不同的地震属性,计算差异值,发现所有属性均在东南部存在北东向条带状异常(图5a),经查证这是由于两次三维采集方向不同而引起的差异。此外,采集方向完全相同的西北部(图5a)也出现较大的差异值,推测可能由采集随机噪声或处理遗留差所致。这些差异值有正有负,均值接近于0,但正负单向偏差可达9%。经综合考虑,设计压制噪声算法,处理后得到图5b,其差异均值稍上升为1%,但正负偏差减小到5%,这一“噪声”与模型研究得出的四维效应约为13%相比,是次要因素。



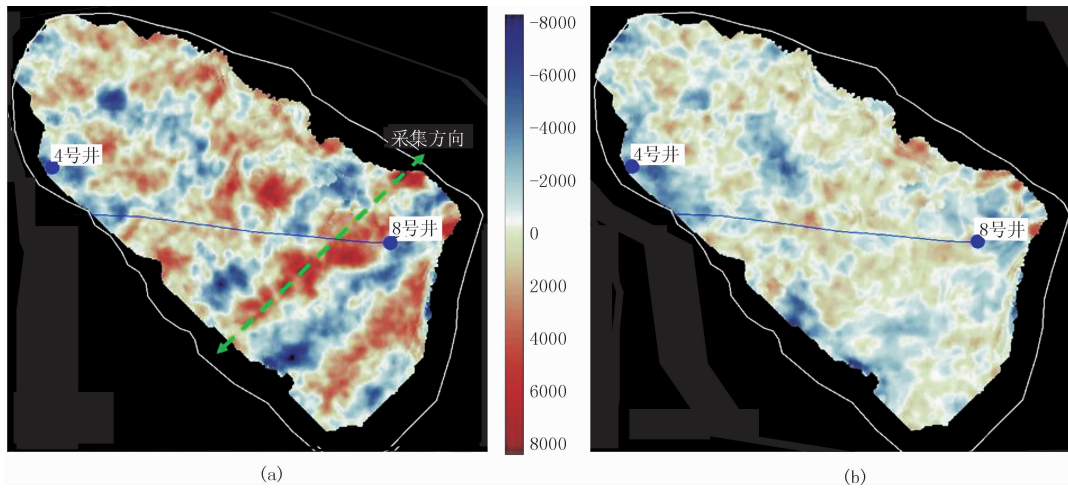


图 5 标志层地震属性一致性补偿前(a)、后(b)的对比

### 5 四维地震属性提取与解释

鉴于微弱的四维效应是由两次三维地震资料属性差异反映出来的,故地震资料属性提取是另一关键环节。又因该气田气层顶面为强波谷,所以主要研究与波谷相关的地震反射振幅类信息,包括均方根振幅、平均负振幅、平均绝对振幅、负振幅及最大

负振幅值等。研究发现,若时窗选取适当,这些属性的抗噪性和四维敏感性是不同的,其中负振幅或平均负振幅抗噪性和四维敏感性较好,可作为该气田的主要四维地震效应来研究。

该气田由北而南分为一区、二区、三区 and 四区,第二次采集三维资料时,只有一区有生产气井在,其他三个区均无生产井。图 6 是负振幅和四维差异百分比综合成果图,可见一区和二区振幅均减弱 5%,

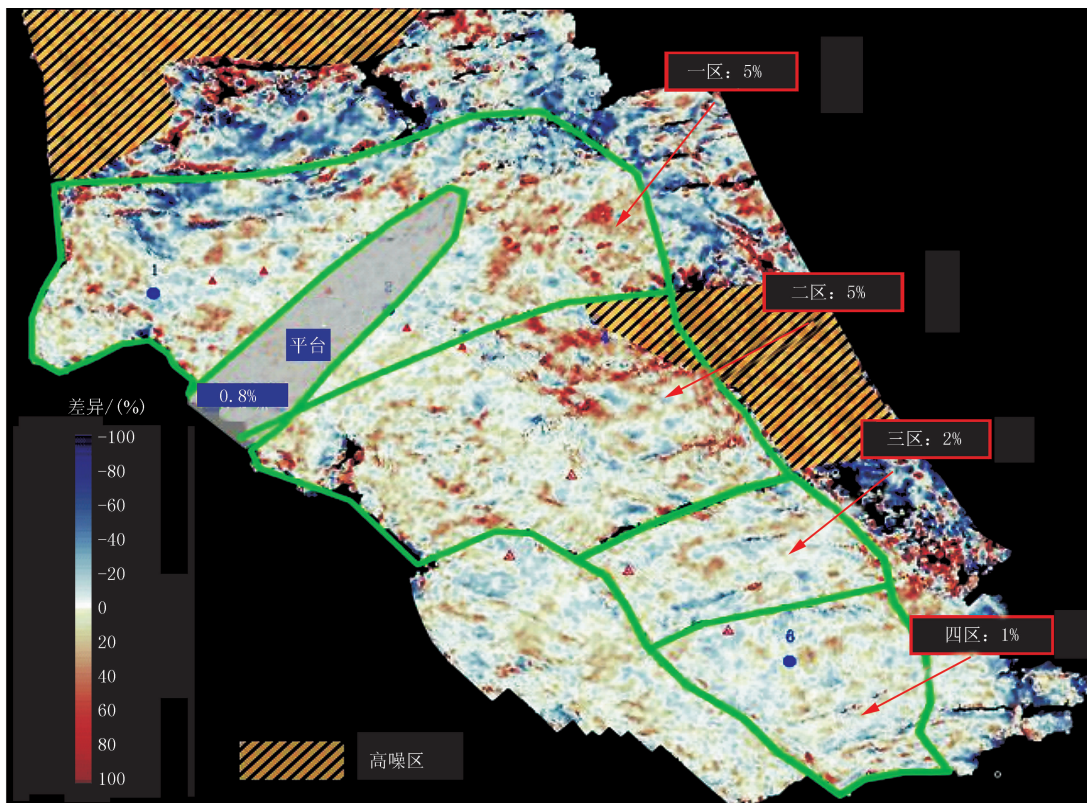


图 6 负振幅和四维差异百分比综合图

三区振幅降低2%,四区振幅减小1%。一区开采5年后,孔隙压力降低,造成阻抗增强,因而振幅减弱;二区没有开采井,振幅减弱程度与一区相当,推测两区完全连通,孔隙压力降幅相同;三区和四区减弱程度低,预测为连通情况较差,孔隙压力降幅较小。同年在二区、三区和四区各钻了一口开采井,发现二区孔隙压力与一区完全一致,都下降了18MPa,三区下降5MPa,四区为原始孔隙压力,从而验证了上述四维效应的可靠性。

## 6 结论

本次研究的气藏四维振幅差异小,理论模型研究结果的差异也只有13%,加上采集方向不同的影响和一致性处理遗留差异,虽然做了资料解释前一致性补偿处理,但最后只得到5%振幅差异。这就要求类似气田的四维地震研究中,要抓好全过程的所有细节;数据采集时除了要求激发、接收条件尽可能保持和第一次地震采集时一致外,采集方向也要确保相同;数据处理过程中,要强调目的层一致性;资料解释前要进行一致性检查,合理补偿采集和处理中的遗漏和不足。虽然气藏的四维效应不如油藏显著,但经过详细模型研究、精细一致性处理、解释前补偿性处理及精心地震参数选取,表明衰竭式开

采气藏存在可解释的四维效应,可应用四维地震技术监测气藏开采动态。

### 参考文献

- [1] 王新红. 四维地震技术研究与应用. 北京:石油工业出版社,2004
- [2] 刘震,王大伟,赵伟等. 薄层时移地震差异波形成因类型分析. 石油地球物理勘探,2007,42(3):290~295
- [3] 金龙,陈小宏. 时移地震互均衡法混合因素处理技术. 石油地球物理勘探,2005,40(4):400~406
- [4] 霍进,张新国等. 四维地震技术在稠油开采中的应用. 石油勘探与开发,2001,28(3):80~82
- [5] 马连山,于连东等编译. 利用三维、四维地震成像优化蒸汽驱效果. 特种油气藏,2000,7(3):44~46
- [6] Furre A K, Nordby L H, Bakken E et al. Time-lapse seismic at the Heidrun Field; advantages of cross-disciplinary work//2006 Offshore Technology Conference, OTC18223
- [7] 杨寿山译. 四维地震数据有助于管理流体界面间有水平井的油藏. 国外油气地质信息,2004,89(1):77~79
- [8] 吕小伟,陈香朋摘译. Valhall 油田地震生涯:即时、永久的四维地震. 油气地球物理,2005,3(1):61~63
- [9] 苏中启摘译. 4D地震在油藏管理中发挥了巨大作用. 世界石油工业,1998,5(1):44~47
- [10] 严建文. 四维地震技术与油藏强化开采. 石油地球物理勘探,1998,33(增刊1):112~121
- [11] Landro M, Stammeijer J. Quantitative estimation of compaction and velocity changes using 4D impedance and travelttime changes. *Geophysics*, 2004, 69(4): 949~957

(本文编辑:朱汉东)

## 欢迎订阅 2011 年《石油地球物理勘探》

《石油地球物理勘探》是一份创刊于1966年、伴随着我国石油工业的飞速发展而迅速成长起来的优秀科技期刊。她分别于1992年、1997年蝉联全国优秀科技期刊一等奖,1999年荣获首届国家期刊奖,2001年进入中国期刊方阵,获“双高期刊”荣誉;2003年、2005年蝉联第二届和第三届国家期刊奖百种重点期刊;2008年被评为“中国精品科技期刊”,2009年荣获“新中国60年有影响力的期刊”等众多奖项。当前已是美国工程引文索引(EI)收录的源刊。

《石油地球物理勘探》主要报道内容有石油物探的新理论、新方法、新技术、新经验,范围涉及地震资料采集、处理、综合解释、非地震勘探、物探仪器及装备的研制等,为从事石油勘探及相关领域的广大科技和生产人员服务。

可通过本刊的邮寄订单或登录本刊网站下载订单按要求完成《石油地球物理勘探》杂志订阅。

联系人:苏丽霞

联系电话:0312-3739320

邮箱:ogpslx@sina.com

《石油地球物理勘探》编辑部