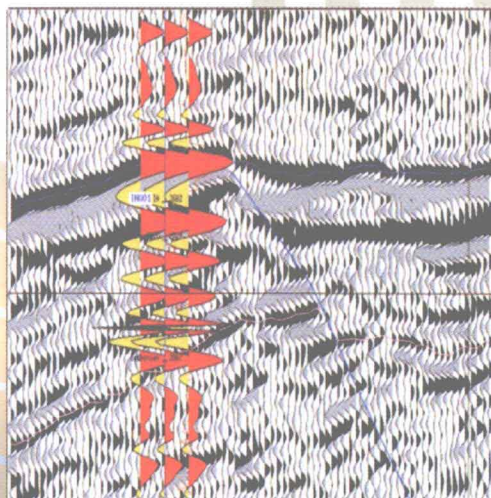
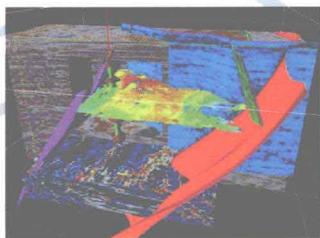
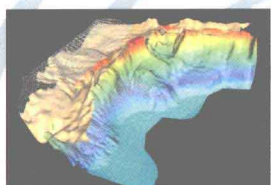


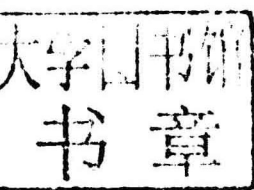
杜世通 宋建国 孙夕平 著

地震储层 解释技术



地震储层解释技术

杜世通 宋建国 孙夕平 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书在介绍基础地震勘探知识的基础上,系统论述了各项地震储层解释技术,包括地质统计法、地震参数统计法、储层参数转换滤波技术、地震反演技术及声波测井与地震反射波资料联合反演技术等。

本书可供石油地球物理勘探及解释人员使用,也可作为大专院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地震储层解释技术 / 杜世通, 宋建国, 孙夕平著.

北京: 石油工业出版社, 2010.6

ISBN 978-7-5021-7570-2

I. 地…

II. ①杜… ②宋… ③孙…

III. 地震勘探 - 储集层 - 地质解释

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 234968 号

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.cn

编辑部: (010) 64523562 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 15.5

字数: 392 千字

定价: 86.00 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

前 言

20 世纪 80 年代中期,在国际石油工业中出现了一个新的研究方向,这就是地质、地球物理、油藏工程专家联合组队,利用多学科资料做各种规模的综合研究,对油藏进行精细描述,精确评价油气藏,评价储层物性,目的是在成熟探区增加油田储量、提高采收率,降低油气生产成本。诱发产生这一需求的原因有两个:一是为开发一个新油田的决策要求对油气资源、采收率以及二次采油的潜力作准确评价。这些新油田一般比已找到的成熟探区的油田小,地质结构复杂,勘探开发成本高。自 1979 年以来,油气开发、勘探成本、开发与勘探投资比不断上升。二是原油供应不确定因素多,价格极不稳定。在这种情况下,许多石油公司致力于成熟探区油田的精确描述、精细表征,以增加储量。因开发成熟探区油田重要性的增加,而导致了地质、地球物理、石油工程数据综合应用和多学科专家联合研究决策的产生。

多学科综合研究的目的是做好油藏描述。油藏描述面临的两项任务是:① 实现油气储层的物性、流体性质、岩性及其连通性在空间分布的早期表征和准确的表征;② 改进油层动态监视技术,对生产状态下的油田作准确的监视和充分的管理。只依靠常规的工程数据,如岩心分析、测井、采油数据是不能为油藏描述和油层监视提供完整信息的。在这个领域,地球物理至少应能在以下两个方面做出贡献:① 发现和识别尚未开采的新油层,增加资源量;② 利用地球物理信息合理布井,减少干井和低产井钻井成本。改进油藏描述和油层监视的关键是使用高分辨率地球物理数据(主要是地震数据)与常规数据集成,建立油藏地质模型,为油藏模拟提供精确信息。

油藏的研究涉及多尺度目标。地质、地球物理、工程测试的研究尺度,从孔隙微结构对流体效应的影响,到限定油藏范围的断裂系统的研究,跨越了厘米到几十米的垂直和水平分辨率,甚至整个油田。所以,必须采用多学科信息的集成,才是最有效的、成本最低的研究方法。历史上主要用于地质勘探的地震勘探技术,在油藏描述和油层监视中,向开发延伸,发展了崭新的研究方向,即开发地震技术,包括高分辨率三维地震及地震数据分析技术、时移地震、井间地震、多波多分量地震等,均取得了重大进展。

在学科的综合研究中使用的地球物理技术主要是三维地震技术,它对储层空间分布的研究至关重要,是其他方法(如测井、钻井)不可替代的。它所能解决的问题有三个方面即储层的几何形态、储层的物性分布和储层的物性在采油过程中的变化,即动态监视。

在地震勘探实现数字化以后的 30 多年间,地震技术得到了飞速发展,解决地质勘探和储层预测问题的能力不断提高。石油地震勘探技术的巨大进步为解决油藏工程提出的研究任务提供了有力的工具。高分辨率三维地震勘探,多波多分量地震勘探,井下、井间地震勘探正在发展成为实用的开发地震技术。但是,由于油藏研究涉及尺度范围很大,地球物理方法研究存在着颇多的争议和多解性。解决这一问题的合理途径是综合解释及研究。地震资料定性、定量解释,配合以地球物理测井、钻井地质、岩石物性测定、采油数据等进行综合研究才有可能使问题获得初步解决。这一研究方向尽管难度很大,但因其具有重要的经济意义,所以它是地球物理工程师面临的重大挑战。

1986年,由石油工业部科技局组织领导、胜利油田主持,联合其他油田和石油院校共同承担的国家“七五”科技攻关项目“油藏描述技术研究”立项。它是我国首次由地质、地球物理、油藏工程专家联合组队启动的大规模的多学科综合研究。笔者有幸参加了这次科技攻关。作为物探工作者,当时我的研究任务是“探索用地震参数研究油藏参数的技术”(四级子课题)。从那时起,经历了20年的油藏描述地震技术研究历程。

对用地震参数研究油藏参数的技术探索,根据综合研究思路,从提取多项地震信息及随后的综合利用做起。三维地震解释的规律是,数据总是不足的;试图求解的地震解释问题,多是欠定的;单一确定三维工区地下地质情况,资料总是不足。如果不去使用收集到的每一道的全部资料,那将会损失数据中的分辨率和可能有的控制。工作中应力图提取地震道中尽可能多的有关信息加以利用,因此,研究了地震波反射特征和地震介质吸收特征及参数提取方法,开发了多项地震信息综合处理和应用的数学工具,引入了模式识别、数字滤波等算法做储层预测和参数转换,初步实现了用地震参数研究油藏参数的目标。20世纪90年代,在国内外的石油物探领域广泛推广使用了地震属性分析和地质统计学方法。实际上,用地震参数研究油藏参数的研究目标与这些技术是一致的,研究内容包含了这些技术的基本理论和实际的应用算法。用地震参数研究油藏参数课题为地震属性分析和地质统计学方法推广使用作了前导性的预研究。

模式识别(包括神经网络)储层预测的结果误判率高,可靠性不大。专家评论毁誉参半。实际上,方法中使用的样本学习不确定性大;预测的物理原理也经常是说不清楚的。油藏研究目标的尺度小,经常在地震分辨率之下。在使用地震记录不能直接圈定油气储层目标的情况下,仅凭地震参数或它们的组合做直接预测,不易获得可靠的地质结果。关键是要提高地震数据识别小尺度油藏的能力。在多学科综合研究领域,测井约束地震反演最先取得明显效果,率先成为储层研究中普遍采用的地震技术。“声波测井与地震数据联合反演”是我们在“探索用地震参数研究油藏参数的技术”结束后启动的研究课题。研究目标是通过地震反演扩展地震有效频带,提高地震数据的分辨能力,力求直接识别小尺度油气藏,或者通过阐明地质规律间接圈定油气储层,从而提高储层预测的可靠性。地震反演通常是将地震数据体转换为波阻抗数据体,并经测井数据标定得到地震速度及其他与之相关的储层参数空间分布。另一方面,在地震反演过程中,可利用分解后的反射系数和子波,通过褶积模型来扩展地震有效频带,实现地震高分辨率处理,提高地震数据分辨小尺度油藏的能力。

随着地震分辨率的提高,研究尺度变小,地震资料的复杂性也加大了许多。一个地质(年代或岩性)分界面,在中、低频地震资料中表现为一个连续的、光滑的镜面反射界面,而在高分辨率资料中,却显示出了它的复杂结构。必须建立一个适合于高分辨率地震资料的解释模型,以期获得可靠的地质解释结论。当前广泛使用的地震褶积模型,它以分界面为基本研究单元,是适合中、低频地震勘探需要的。当研究尺度已经移向了高频层序时,必须根据地层沉积规律建立地震解释模型。解释模型的选择应与当前使用的技术和研究尺度相适应。合理的方法是采用地震层序地层模型。在层序地层框架下的地震数据解释方法应力图使用层序地层学有关地层沉积规律对高分辨率地震资料做出合理解释。储层预测中使用层序地层模型限制了储层预测数学方法(又称为软科学方法)的不确定性,有助于预测结果可靠性的提高。

按地质现象分级结构的规律,层序地层学中组成剖面的层序体具有分级特征。层序体

的级别不连续，且不同级别（或称高频、低频层序体）相互镶嵌。其内部结构都是相似的，差别在于尺度的大小。发育在层序体不同部位（如低位、高位或海进体系域）的油气藏，也具有与所在层序体相对应的不同级别和尺度，是多尺度的。使用于储层研究的地震技术，理想的是要有识别多尺度目标的能力。由于技术条件的限制，一项地震数据不可能包含工区内所有级别的地质信息，但也不会是只含有一个单一级别的地质信息。对高分辨率地震数据做储层解释时，研究识别多尺度目标是必要的。与研究目标尺度相关性最强的应是地震波频率特征。我们探索了地震技术识别多尺度储层目标的可能性，用频率域的解释性处理技术有可能研究不同尺度的油气藏目标。

多年来，在研究油藏描述地震技术中，从起步探索到有目的的研发某些实用技术，经历了多个阶段，取得了初步成效。在 20 世纪 80 年代中期，我们在“探索用地震参数研究油藏参数的技术”过程中研制和开发的地震反射特征分析以及相应的地震储层预测技术，因其适应了 90 年代国际石油界开始推广应用的地震属性分析技术而在国内一些油田被采用，曾经无人认可的用地震参数研究油藏参数的技术终于为物探界所接受。90 年代初，通过邀请俄罗斯全俄地球物理研究院穆申教授来华讲学及随后的合作科学研究，学习了地震数据的时频分析技术，并把它应用到层序地层学研究中去。当时，地质人员发展了层序地层学理论，但因缺少地震资料层序地层学解释的计算机工具，在实际应用方面受到限制。应用声波测井与地震数据的联合反演方法，发展了提高地震分辨率的处理技术，应用地震数据的时频分析方法，研究、开发了地震资料的层序地层学解释，推进了我们所做的油藏描述方法研究，使前期的储层预测地震技术有了地质依据和可靠的地质约束。我们试图对上述各阶段的研究工作做出整理和总结，本书各章节分别汇总了各阶段的研究成果，这些成果资料所涉及的学科范围，在物探界称之为“开发地震”或者“储层地球物理”。

在本书整理、编写过程中，因资料有限，以描述技术、方法为主。书中涉及的个别地质实例仅仅是为了说明方法实际效果而引用的局部图片，不能表达完整地质成果。这些研究成果在不同时期，笔者曾以合作研究项目形式与油田生产单位或研究院所交流过，或者在不同形式的培训班、研究生班授过课，但多数都未在公开刊物上署名发表过。此次，将这批研究报告和讲稿按研究课题的时间先后重新整理刊出，可为同行提供一些可资借鉴的参考资料。

在本书所涉及的研究中，有多位我所指导的硕士、博士研究生参与工作。他们在校学习期间都在不同时期、不同课题中做出了贡献。其中，宋建国博士、孙夕平博士还参与了课题研究成果的集成，研发了地球物理数据分析工作站程序包，对方法研究和成果推广使用起了重要作用。

中国石油天然气集团公司科技管理部副主任方朝亮教授对本书的出版给予了很大支持和帮助，中国石油天然气股份有限公司石油勘探开发研究院徐树宝教授在本书成稿和准备出版过程中给予了热情指导和帮助。笔者对以上单位和个人特致诚挚谢意。

杜世通

目 录

第一章 地震储层参数预测的物理基础	1
第一节 与油藏有关的物性分布	2
第二节 油气藏地震异常目标	5
第三节 岩石孔隙度与地震参数的关系	6
第四节 薄层结构反射特征	7
第五节 储层裂缝发育方向与分布密度预测	8
第六节 储层参数预测的自动化系统	9
第二章 储层研究中的地震技术综述	10
第一节 三维油藏描述与表征地震技术概述	10
第二节 储层研究中的高分辨率地震技术	12
第三节 井约束三维地震波阻抗反演和标定	14
第四节 精细三维解释的重要方法——地震属性分析	22
第五节 利用地震属性测定储层岩石孔隙度	24
第六节 储层参数转换技术	25
第七节 油藏地质数字模型的建立	26
第八节 地震层序分析储层预测技术	27
第九节 关于油气的直接预测	28
第三章 地震属性分析	30
第一节 地震属性分析概述	30
第二节 地震属性的拾取与分类	32
第三节 地震属性设计——复合属性及数学属性的应用	34
第四节 建立地震属性与储层物性关系的试验数据导出法	35
第五节 正确使用地震属性分析	37
第六节 地震属性分析使用中的陷阱	38
第七节 地震属性分析应用实例	39
第八节 地震属性列表	46
第四章 地震反射特征分析	52
第一节 地震属性剖面	52
第二节 波场特征属性及其测定方法	53
第三节 地震介质特征属性	60
第四节 地震记录的自回归分析	63
第五章 地质统计学方法概要	67
第一节 多元统计分析	67
第二节 相关滤波技术	70
第三节 克里金预测技术	71

第四节	人工神经网络预测技术	73
第五节	用于储层孔隙度预测的地震参数	74
第六节	声波时差属性的拾取方法	76
第六章	储层预测中的地震多参数统计处理技术	78
第一节	随机过程相关分析	79
第二节	地球物理异常信号检测	82
第三节	多项信息的综合参数分析	90
第四节	储层横向预测中的判别分析	94
第七章	储层参数转换的滤波技术方法原理	102
第一节	参数转换的滤波原理	102
第二节	储层参数预测中的克里金方法	108
第三节	孔隙度参数预测的协克里金技术	113
第四节	储层参数预测的算法、流程与实例	116
第八章	声波测井与地震反射波资料联合反演技术	121
第一节	声波测井与地震反射波资料联合反演技术概述	121
第二节	声波测井资料统计整理	123
第三节	声波测井资料与井旁地震记录的迭代拟合算法	130
第四节	地震剖面的宽带约束反演	137
第五节	无井条件下联合反演算法的应用	141
第六节	联合反演方法的应用	144
第九章	地震分界面频率属性分析	152
第一节	分界面的频率属性	152
第二节	频率扫描滤波器的设计	154
第三节	时频分析数据体	156
第四节	时频分析数据体时间剖面显示	160
第五节	三维数据体的频率属性分析	164
第六节	时频分析技术的应用	168
第七节	关于地震频率属性研究	170
第十章	层序地层框架下的地质地球物理模型	171
第一节	层序地层学基本概念与名词解释	171
第二节	层序结构及其组成成分	172
第三节	开发地震研究中的地质地球物理模型	173
第四节	时频分析柱状剖面图的解释	184
第五节	储层预测	185
第十一章	地震技术识别与描述超薄储层的潜力	187
第一节	介质的不均质尺度	188
第二节	适应小尺度目标的地质地球物理模型	189
第三节	地震数据对层序体的分辨能力	191
第四节	储层目标地震信号的频率选择	192
第五节	多尺度地质目标识别的依据	194

第六节	高分辨率开发地震技术	196
第七节	层序框架下的地震解释思路	198
第八节	储层表征与描述方法的局限性	199
第十二章	用地震反演技术实现资料高分辨率处理	201
第一节	地震资料提高分辨率处理的可能性	201
第二节	高分辨率地震处理设计	203
第三节	地震反射系数反演	204
第四节	实验模型	206
第五节	方法的应用效果	207
第十三章	层序框架下的地震高分辨率资料解释	212
第一节	层序地层学地震解释的基本方法	212
第二节	层序地层学地震解释技术及工作流程	215
第三节	地震资料识别层序体及其内部结构	218
第四节	研究工作中采用的地震解释性处理应用技术	222
第五节	地震资料识别层序体及其内部结构的应用实例	225
第六节	地震识别小尺度储层目标试验	230
参考文献		236

第一章 地震储层参数预测的物理基础

油藏描述的重要地质任务之一是确定油气储集体岩石物性参数,如岩石孔隙度、渗透率、含油气饱和度等。地震工程师参与油藏描述科研工作就是要探索用地震资料研究油藏参数的可能性,讨论主要储层物性参数与地震参数之间的关系,研究进行参数转换的原理和可能性;储层物性的改变与油藏本身的存在有直接的关系,讨论与油藏有关的物性分布、油气藏引起的地震异常目标、岩石孔隙度与地震参数的关系、薄层结构反射特征、储层裂缝发育方向与分布密度预测原理等,系统分析用地震参数研究油藏参数的物理基础;提出设计计算机自动化系统设想,用以确定地震参数、实现地震参数到储层物性参数的转换及储层物性参数空间分布预测。

油田发现初期,通过少量钻井地质资料和测井资料,估算油田的线性储量 V_1 ,以确定油田开发的经济价值。估算油田线性储量的公式是

$$V_1 = h \phi k_p \quad (1-1)$$

式中 h ——油层有效厚度;
 ϕ ——储层岩石孔隙度;
 k_p ——含油气饱和度。

为了估算油气储量,还要求圈定油气分布范围、确定油藏边界。地面地球物理方法一般是不能直接测定这些参数的,必须通过地球物理参数,即用地球物理方法直接测量或间接计算的参数来研究储层参数。为实现由地球物理参数 F_i 到储层参数的转换,必须首先阐明地球物理参数与待测储层参数 H 的对比关系

$$H = A(F_i) \quad (1-2)$$

参数转换的基础是确定算子 A ,再根据算子 A 将地球物理参数 F_i 或它的集合 F_i ($i=1, 2, \dots, I$), 变换为所研究的储层参数。其中, I 为参数集合中参数的个数。 H 在已知的数据标准空间为给定值,这个值经常来自地质或测井资料,可与相应的地面地球物理资料或参数对比,找出算子 A ;根据地面地球物理资料或参数使用算子 A 在预测空间预测储层参数 H 。这里使用的是已知数据标准空间和预测空间的相似原则,这是由已知到未知的分析方法。

储层参数转换的精度与可靠性和所使用的地球物理参数与待测储层参数对比关系 A 及地球物理参数本身有关。多年来,地震勘探及资料处理的巨大进步,为直接研究油气储层、确定油藏参数提供了可靠数据。高分辨率三维地震、声阻抗反演技术、井间地震观测及地震层析成像技术、多波多分量地震观测及地震各向异性特征的研究等正在被用来作油藏描述,并在一些地区取得了可喜的进展。尽管如此,在地震勘探技术发展的现阶段,它所面临的油藏参数研究任务难度依然很大。地面地震资料分辨率不够,油藏参数改变引起的地震波场微小变化,在干扰背景中不能准确确定;同一地震参数受多种地质因素影响增加了地质解释的多解性。这样,将地震参数转换为油藏参数往往存在着较多的争议。在使用对比关系 A 做储层参数转换时,地震参数误差及对比关系拟合误差将传递到储层参数,使其

精度降低。要解决这个问题,必须:①改进地震勘探观测方法,提高地震资料的分辨率和信噪比,发展精确的地震数据反演技术,提高确定地震参数和地质参数的精度;②发展地质、地球物理资料综合处理技术,实现地震资料配合地球物理测井、钻井地质、岩石物性测定及采油数据等的综合研究,实现地震多参数综合处理,取得符合程度较高的地质解释结论。

为了论证用地震资料研究储层、确定储层物性参数方法的物理原理,将首先讨论地震参数与储层参数的关系,建立储层参数预测的地质、地球物理基础。

第一节 与油藏有关的物性分布

过去,根据地震资料研究油区构造条件,发现了许多与构造背景有关的油气田。现在使用地球物理方法对油气藏进行直接研究,发现许多油气藏与构造背景并无直接联系,属各种类型的非背斜油藏。用地球物理方法直接预测储层含油气饱和度是石油地质勘探工程师们多年来不断研究、希望得到解决的一个重要课题。在长期的研究中积累了丰富的经验,加深了对油气藏的认识。地震技术的发展也为我们提供了越来越多的研究油气藏的可靠资料。油气预测、储层含油气饱和度预测的基础是储层孔隙中所含饱和液体成分的差异及由此产生的地球物理场的变化。为了解决这个问题,我们首先应分析与油气藏有关的物理性质的分布,研究与油气藏有关的地球物理异常。从地震资料中拾取这些异常信息来预测油藏特征、类型、油藏分布,圈定油藏边界,估计油藏参数,监视油层动态等。

在对油气藏的研究中,我们假定地球介质为横向均匀层状介质,而作为均匀层状介质中一个孤立物性异常体——油气藏的存在,使地球物理场发生变化。因此,可以根据实测与油气藏直接有关的地球物理异常来预测它的存在。地震亮点技术、AVO技术就属于这一类。但是,经验告诉我们,油气藏的存在连同其周围环境介质具有复杂的物理性质变化。油气藏本身引起的地球物理异常经常是很微弱的,与油气藏周围介质的物性变化带有关的地球物理异常不可忽略,有时后者超过了油气藏本身造成的异常。因此,研究油气藏及周围环境介质的物性分布对油气预测十分重要。

如图1-1所示,为一典型的背斜油藏地质模型。在油藏周围,根据岩石物性变化,可以划分出六个区,这就是:Ⅰ—油储;Ⅱ—在烃类物质作用下岩石次生变化带,在油藏底面以下形成的封闭层;Ⅲ—烃类化合物侵入圈(这三个区内岩石的物性变化直接与油藏的存在有关);Ⅳ—构造顶部岩石变疏带;Ⅴ—岩石不均匀的应力分布区;Ⅵ—与油藏有关的反射标准层(这三个区内岩石物性变化则与油藏存在的构造背景有关)。图中各区内岩石物性变化方向用 $\pm$ 符号表示: + 表示增加; - 表示减少;其中 σ 为密度, v 为地震速度, ρ 为电阻率, α 为吸收系数。

油气藏的物理性质在很大程度上决定于储层的岩石性质,如岩石颗粒的矿物成分、粒度、岩石骨架的结构特征、胶结物质和骨架的力学性质、渗透率、孔隙度、孔隙水及其矿化度等。热动力学性质(温度和压力)和岩石类型(碎屑沉积和碳酸盐岩沉积)对产生物性差异具有重要意义。此外,在油气藏的作用下,储层岩石性质还可发生次生变化,这些变化表现为次生胶结、岩石致密化,在孔隙和裂隙中产生新的矿物,如氢氧化铁、方解石、黄铁矿、石英等,它们降低了储层的孔隙度和渗透率。

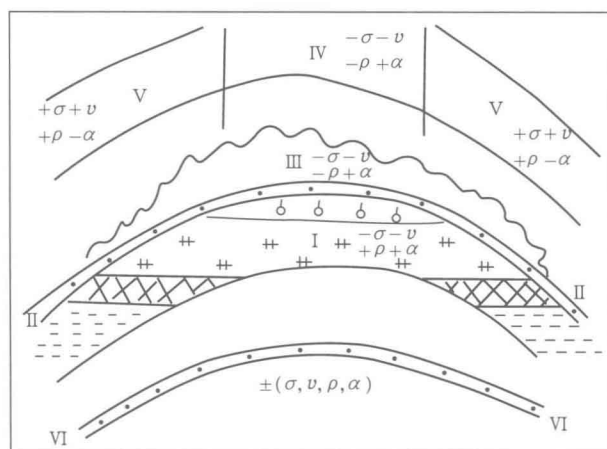


图 1-1 油藏地质模型及其周围物性变化

油储部分的岩石密度 σ 主要决定于储层岩石的性质、所含矿物成分和孔隙度。含油气部分和含水部分的密度差异称为有效密度 ($\Delta \sigma$)，决定于油气、水密度 (σ_{pg} 、 σ_w) 和储层次生变化两个因素

$$\Delta \sigma = (\sigma_w - \sigma_{pg}) \phi k_p \quad (1-3)$$

式中 ϕ ——孔隙度；

k_p ——含油气饱和度。

第一个因素使油藏密度降低，第二个因素使油藏密度升高。有时，第二个因素的影响还超过了第一个因素的影响。此外，油藏埋藏深度的影响也不可忽视。随深度的增加，周围静压力加大，孔隙度减少，密度增加。油气藏的存在经常引起负重力异常，数量级为百分之几到十分之几毫伽。

油藏电阻率 ρ 主要决定于孔隙空间结构、含油气饱和度、地层水矿化度、胶结物类型、热动力学条件等。含油部分的电阻率可以超过含水部分的 10 倍。根据矿化度的不同，这个比例还有 3 ~ 5 倍的变化。电阻率随地温增加而降低，随压力增大而加大。总体上看，电阻率随深度增加而减少，这里温度因素的影响超过了压力因素的影响。整体评价油藏电性，当油层厚度超过 50m 时，含油部分和含水部分的电阻率相差 2 ~ 5 倍；当油层厚度减少到 20 m 时，其间差别约降低 30% ~ 50%。气藏的电阻率略高于油藏。油气藏的存在引起电测正异常。

油藏部分的地震速度和吸收系数主要决定于储层岩石骨架的弹性性质。其他影响因素还有岩石成分、胶结物质、孔隙度及孔隙的可压缩性、孔隙中饱和液体成分以及热动力学条件等。在自然埋藏条件下，含油部分与含水部分相比，速度降低约 0.5km/s 或 15% ~ 20%；个别情况可达到 1km/s 或 30% ~ 35%；吸收系数可高出 10 倍以上，即含水部分 $\alpha = 10^{-4} \text{m}^{-1}$ ，含油部分 $\alpha = 10^{-3} \text{m}^{-1}$ ；在人工储气构造上的试验表明，储气前后的吸收系数可相差几十倍。岩石颗粒的矿物成分和胶结物质对地震速度和吸收系数有很大影响。坚固的胶结物质（如硅质胶结物）与泥质相比，地震速度增加，吸收系数减少。随深度增加，岩石所受地层静压力加大，地震速度随之增加，吸收系数减少。地层温度升高使地震速度降低，在含油气饱和和岩石中这种地震速度随温度的变化可达 30% 或更多。油藏部分弹性性质的改变可引起一系列地震波场异常，如产生油水界面反射，可能出现亮点与暗点等。

地层磁性决定于岩石中含铁磁物质成分的多少。油藏一般为弱磁性物质构成，磁异常显示不大。当储层中含有铁磁物质时，可能有较大变化。

油藏部分的物性特征可能受到其周围介质物性分布的影响而变得模糊，规律性变差。由于地层水化学性质活跃，在油藏底面油水分界面以下，受烃类物质作用产生储层次生变化带，形成油藏下方的一个封闭层。其物理性质与油藏形成时间、油气充填延续时间、储层类型和埋藏深度、岩石的矿物成分和粒度有关。烃类物质引起含油气和含水部分储层岩石物性发生变化。在与油藏的接触面上，原有矿物发生溶解，形成新的矿物，充填储层岩石孔隙，使岩石密度增加，孔隙减少，实际上形成了一个不渗透层。与此同时，由于石油在化学性质上的惰性，含油部分储层物性基本保持不变。这个次生变化带的厚度由几厘米到几十米不等，其物性特征是密度升高、地震速度增大、电阻率增加、吸收系数降低。这些变化减弱了油藏本身引起的地球物理异常。在油藏上方的泥岩盖层内，由于受到来自下部的高温、高压地层水的作用和油气作用，形成一个烃类物质侵入圈。烃类物质的侵入引起一系列的物性变化。其主要特点是产生一个异常高压带，其地层压力一般超过正常地层压力的 10% ~ 20%。异常高压带产生的原因较多，最可能的是构造因素，如岩石重力加固作用和泥岩盖层裂隙增加，使流体渗入量大于从泥岩中的流出量，流体运移发生障碍。盖层中的高压异常引起岩石物性的变化表现为孔隙度增大、密度降低、地震速度和电阻率降低、吸收系数增加。应该特别指出的是异常高压层的存在不仅仅是对盖层的影响，对油藏本身也有影响，主要反映在储层岩石孔隙度加大。这种影响在不同地区对不同类型油藏各不相同，其一系列特点与岩石的矿物成分、沉积速度、地热环境或热动力条件有关。侵入圈物性分布增强了油藏地球物理异常的显示。

在局部构造范围内，构造顶部疏松带发生的岩性和岩相变化引起了岩石物理性质的改变。变化的规模与沉积类型、岩石互层结构性质、厚度变化等有关。对碎屑岩而言，在大多数情况下，从构造翼部到顶部，岩石颗粒逐渐变粗，即所谓砂岩化。而碳酸盐岩沉积，往往在构造翼部为白云岩，顶部为石灰岩。经常见到沿古海盆地分布着不同的沉积，泥岩一般聚集在低洼处，石灰岩则在高处聚集。研究岩石物性变化表明，从构造翼部到顶部密度减小、电阻率和地震速度降低、吸收系数增加。在很多情况下，顶部岩石变疏松与油藏存在对物性分布影响相似，使油气解释工作发生困难。

在构造翼部存在着岩石不均匀应力分布区，即高应力分布区和低应力分布区。由于构造翼部承受着最大的静压力，导致不均匀应力分布区的存在。与之相应的物性改变，与构造顶部相比较，主要表现为岩石密度和孔隙度的变化。拉伸应力与应变引起岩石破碎，可提高岩石孔隙度和裂隙，使岩石密度降低、电阻率减小、地震速度减小、吸收系数增加，而压缩应力与应变则使岩石致密、坚固，使孔隙与裂隙减少，使岩石密度、地震速度和电阻率增加，吸收系数减小。在这个部位上若有热流存在，则油藏上方构造顶部岩石变疏松区有较多烃类化合物流出，使放射性物质、磁性物质含量变化，降低了氧化—还原电位，在一些地球物理场中表现出异常，如重磁力异常场中正负异常交替分布、电场异常；放射性物质溢出则引起 γ 射线分布异常；地震资料中可见到吸收系数增加与减小交替分布异常等。

此外，在沉积层中还有一系列反射标准层，与不同地层年代分界面、物性分界面相应，是地震勘探研究的对象。这些分界面在横向上延伸很广，经常有一定的彼此符合性，在波场特征的形成中起主要作用，对直接预测油气聚集带模糊、困难。有些重要的油气藏分布

于一些特殊构造附近，与复杂的地质现象有关，如盐丘、珊瑚礁。对这类油藏物性分布的研究还远远不够。

以上分析的各种与油藏有关的物性分布都影响着地球物理场特征，使得直接预测油气很困难。目前在实际工作中主要使用一些间接特征。应该说，在这方面的研究工作还不充分，对油藏类型及相应的物性分布的研究还应深入，油气预测的根据研究得远远不够。根据已知油藏物性分布与油藏地球物理异常目标研究，将常见的油气藏地震异常目标归纳如下。

第二节 油气藏地震异常目标

振幅异常：与储层和盖层波阻抗关系有关，可能出现亮点型和暗点型振幅异常或伴有极性转换，一般对埋深在 3.0km 以内的天然气藏这个特征是明显的。近年来利用气藏反射波振幅随炮检距而变化的 AVO 技术也是利用了气藏振幅异常特征来做预测的，即气藏反射波振幅随炮检距增大而增大的特征。

能量异常：含油气储层与周围区域相比，一般具有较高的吸收系数。与这种吸收异常有关，可能在油藏部位上出现地震反射能量降低的现象。

频率异常：受油藏异常吸收作用的影响，地层频率响应变化可引起反射波频率成分的改变，出现低频异常。含油气饱和度影响着反射波频率成分、频谱形状和宽度；储油层速度的减小可能引起频率的降低，降低幅度一般为 15% ~ 20%。但在另外一些情况下油储的反射频率也可能升高，这与薄层反射特征有关。

速度异常：储层岩石弹性性质的改变将引起油藏部位上出现速度异常和纵横波速度比的改变。在孔隙砂岩中，从含饱和水到含饱和气，其周围压缩模量显著减小，密度稍许降低，而剪切模量无变化。若储层岩石骨架成分不变，在含饱和气时，纵波速度与含水部分相比显著减小；相反，周围压缩模量不影响横波速度，而饱和液成分又不影响剪切模量，从含饱和水到含饱和气，只有密度稍许减少而影响到横波速度。这个现象经常使用于亮点剖面解释，用以排除亮点振幅异常的多解性。纵横波速度比参数对确定孔隙中所含流体成分、直接预测油气有重要意义。对高孔隙度储层岩石而言，由于饱和液含量高，增加了纵横波速度比参数对饱和液成分的分辨率。对含气砂岩而言，纵横波速度比不大于 1.73，相当于泊松比为 0.25，与含水部分相比是一个低值异常。追踪纵横波速度比参数的横向变化，可以预测储层含饱和液的成分，是烃类的直接预测指标。

时间厚度异常：储层部分地震速度降低将引起油藏底面反射波旅行时间延长，延迟量与速度相对变化量有关：

$$\delta t_0 = 2\tau (\Delta v/v) \quad (1-4)$$

式中 τ ——油层的时间厚度；

$\Delta v/v$ ——储层地震速度相对变化量。

截取油藏顶面和底面反射波旅行时差，并归算到单位储层厚度，所得单位厚度储层地震垂直旅行时参数，可以用来预测油藏位置、研究油藏参数。考虑到目前的地震技术水平，地震波旅行时参数是唯一可以准确测量的地震参数，利用时间厚度异常做定性分析、预测油气藏的存在，利用单位厚度储层地震垂直旅行时参数预测储层物性参数是可行的。

地震记录特征异常：与油藏物性复杂分布相联系，在油藏部位上可能观测到一系列的地震记录反射特征、记录面貌异常，如在地震记录上波出现规律性变差、信噪比降低；在地震记录上出现水平反射波，有时与倾斜反射界面相交；油藏以下各个深度上各反射层反射波有效速度可以观测到有规律的变化等。

问题在于不是所有异常都能同时观测到。在不同工区、不同地震地质条件下，不同类型油藏，其地震异常目标反映的特点不同，这就增加了预测油气藏的不确定因素。直接预测油气的另一个困难（也许是主要的）是地震资料在信噪比和分辨率上的限制。对埋藏深、厚度薄的油层，其异常经常受到激发、接收条件的改变而畸变以及受多次能量影响，速度异常因素干扰而变得不可识别。为使预测油气取得成功，除了提高地震技术水平外，应提倡利用多种地震信息的综合研究方法，根据由已知到未知的相似原则做模式识别，进行油藏类型分类和油藏空间分布预测。

第三节 岩石孔隙度与地震参数的关系

在实际的沉积岩层中存在着孔隙和裂缝。与致密的岩石相比，孔隙和裂缝及其中饱和液的存在使地震波的传播速度降低。岩石孔隙度与岩石密度、地震速度有着密切的关系。孔隙度越高，则密度越小，地震速度越低。对弱胶结物质，岩石骨架弹性性质差的储层，这种对比关系是十分明显的，这个比例关系的相关系数高达 $0.7 \sim 0.8$ ；对岩性均匀的岩石组（指岩石成分、颗粒形状和大小、分选度等方面的均匀性），这个相关系数可达 0.9 或更高。许多统计分析结果表明，实际资料与理论研究中表达孔隙度 ϕ 与地震速度 v 的时间平均公式相吻合。孔隙度定义为孔隙体积 V_ϕ 与岩石总体积 $V_s + V_\phi$ 之比

$$\phi = V_\phi / (V_s + V_\phi) \quad (1-5)$$

式中 V_s ——岩石骨架体积。

设 v 为岩石地震速度， v_ϕ 和 v_s 分别为岩石孔隙中饱和液地震波传播速度和岩石骨架中地震波传播速度，则在截面积相同情况下，地震波在岩石单位长度上的传播时间等于在骨架部分和孔隙部分传播时间之和

$$1/v = (1 - \phi) / v_s + \phi / v_\phi \quad (1-6)$$

这里是孔隙的总体积起着主要的作用，而不计孔隙的形状和大小。

储层孔隙度通过地震速度影响着地震波沿储层段的旅行时间，通过地震速度和岩石密度影响着储层声阻抗分布及地震反射界面声阻抗差异，是决定反射系数大小的一个因素。建立孔隙度与地震波在储层段的垂直旅行时参数、储层声阻抗参数及与储层有关反射界面反射系数的关系可以预测储层孔隙度。

研究储层孔隙度和孔隙中所含饱和液成分只利用纵波速度是不够的。除孔隙度和饱和液成分外，影响纵波速度的因素还有很多，容易产生多解性。从弹性参数对地震速度的控制可以看到，解决这一问题的途径是纵横波联合应用。研究储层孔隙度和孔隙饱和液成分的一个纵横波参数是纵横波速度比 $r = v_p / v_s$ ，与之相应的弹性参数为泊松比 γ

$$\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{r^2 - 2}{r^2 - 1} \right) \quad (1-7)$$

纵横波速度比 r 随泊松比 γ 增大而增大，可以看成是一个包含 γ 的有意义的参数。 v_p / v_s

参数随孔隙度增加而增加,对高孔隙含水砂岩尤其明显。

求取层速度是一项繁琐的工作,由于精度低,有时是失败的,其中一个原因就是横波速度的各向异性。比较纵向和横向上的横波速度,往往会发现这个问题。特别是对倾斜地层,求得层速度的方向往往不是我们希望测定速度的方向。代替速度,经常使用在储层中波的垂直旅行时间。用横波和纵波在储层中的旅行时间 t_s 和 t_p 之比表示纵横波速度比,即

$$v_p/v_s = t_s/t_p \quad (1-8)$$

若纵波和横波反射界面是同一分界面,且横向保持波形一致,具有一定的稳定性,没有被相邻反射干扰而产生畸变,则可以测定参数 t_s/t_p 或 v_p/v_s , 并做出解释。试验工作表明, v_p/v_s 或 t_s/t_p 参数与储层孔隙度有关,且对含水和含天然气的不同储层部分、不同岩石成分,其间关系也不相同。一般规律是孔隙度增加,纵横波速度比也增加,但对含气砂岩储层这种变化比较平稳,与含水砂岩储层差别较大。对不同孔隙度的含天然气储层其纵横波速度比参数不超过 1.73。建立纵横波速度比与储层孔隙度的关系,不仅可以预测储层孔隙度参数,同时也是预测孔隙所含流体成分、预测岩性的一个标志。在岩性相同、孔隙中所含流体成分相同的条件下,利用纵横波速度比参数与孔隙度参数的对比关系,可以单一测定储层孔隙度。

第四节 薄层结构反射特征

地震中的薄层是根据地震勘探中使用的最高频率简谐成分的波长来定义的。当薄层厚度小于半波长,则在时间上不能分辨出薄层顶面和底面反射波,两个反射波干涉在一起,形成统一的薄层反射波,这样的反射层称为薄层。砂泥岩剖面中发育的许多岩性油气藏,都是薄层砂体储油或储气的。因此,薄层反射波解释是寻找岩性油气藏的关键。1980年, R.E. 谢里夫教授根据薄层顶面和底面反射波干涉原理,提出调谐振幅的概念。当薄层厚度小于 $1/4$ 波长时,在仔细的振幅标定条件下,可以根据薄层反射波振幅解释薄层厚度,即薄层厚度与薄层反射波振幅成正比。这一原理在利用高分辨率三维地震资料解释砂体油藏中,在有利条件下取得了成功。

研究薄层储集体既要求查清薄层结构,也要求确定薄层参数,我们希望在确定薄层厚度参数以外还要预测薄层物质成分、含油气可能性和边界接触的物质成分。实际工作中经常遇到的亮点型反射振幅异常解释的多解性提示我们要仔细分析薄层反射特征,不仅要利用振幅特征,也要利用其他特征,利用反射波多种参数来判别薄层及其接触边界的物质成分。根据薄层物质成分与其接触边界的物质成分的关系,薄层反射系数的分布及薄层反射波的频谱是不同的。当薄层物质成分与接触边界物质相比,地震速度介于两者之间时,薄层顶面和底面的反射系数符号相同;当薄层为一高速或低速物质成分并夹在一均匀物质成分之中时,则薄层顶面和底面反射系数符号相反。因此,薄层物质成分与薄层厚度一起影响着反射波的频率成分、波形和极性。并且,当地震波倾斜入射时,随着炮检距的变化,薄层反射波的频率、波形、振幅与薄层厚度和物质成分的关系是不同的。这就说明了薄层参数解释仅仅使用调谐振幅关系是不够的,必须使用薄层反射波综合特征,即多参数的分析方法。

当薄层边界两侧物质成分相同,对零相位子波而言,薄层反射波是入射波的微分波形,

频谱极大值频率向高频方向移动，一般要超过原极大值频谱的 16%；当边界物质成分不同时，只有薄层物质成分为低速的煤层和高速的石灰岩层可能使反射系数分布为正负交替，薄层反射波为入射波的微分波形，极大值频率向高频方向移动。并且薄层物质成分为石灰岩时，反射波极性为正，与子波相同；当薄层物质为煤层时，反射波极性为负，与子波相反。由上述分析可见，微分波形、频谱极大值频率及反射波极性等薄层反射波参数是鉴别非含气砂岩亮点型振幅异常的标准。薄层解释中的多参数分析方法利用了薄层反射波四类特征，就是在频率域，利用了薄层反射波频谱极大值频率参数，它是薄层厚度、薄层物质成分、沉积相和接触边界物质成分的函数；在时间域，利用了波形和极性与接触边界物质的关系，根据薄层反射波为子波波形或其微分波形，与子波极性相同或相反，来判断物质成分；第三是薄层反射振幅随炮检距的变化规律，它与薄层物质、含油气饱和度，特别是与含气有关。为了消除以上特征解释的多解性，还可以使用薄层反射波中的转换波（PS）特征进行薄层参数和特征的检测。

第五节 储层裂缝发育方向与分布密度预测

大量试验研究和实际资料表明，在漫长的地质发展过程中，沉积岩层经受了不同的应力作用，而引发了一定方向的裂缝系统。裂缝平面法线指向最弱应力方向。假如我们在一个直角坐标系中讨论地壳应力作用，最大应力作用方向和最小应力作用方向在水平面上则产生一垂直裂缝系统。微裂缝系统可以根据应力作用的变化联成不同形状、开放的或封闭的或合拢的较大的裂缝系统。古老的裂缝系统可能被封闭，现存的裂缝系统总是反映着最新的应力作用。这些裂缝总是和区域性应力作用有关，沿主应力作用方向而排列。为了查清储层裂缝结构，根据地震资料预测应力分布是十分重要的。

储层中存在着的裂缝系统及其方向性排列将导致地震介质弹性性质的各向异性。天然地震观测中发现的速度各向异性反映了下地壳中的玄武岩和上地幔结构中的方向性。上地壳沉积岩中的弹性各向异性性质直到不久以前尚未被认识。地震勘探实际资料表明，地震速度与观测方向有关，观测方向不同，地震速度也不相同，如界面速度与该层中的地震层速度有差别，地震反射波有效速度与炮检距有关等。储层结构研究发现，演示颗粒方向性排列和薄互层结构也引发了弹性性质的各向异性。沉积岩中页岩和页岩 / 砂岩沉积序列存在着层理结构，其单层厚度远小于波长，也是形成地震各向异性重要而广泛的原因。这就是地震波传播中的周期性薄互层结构的各向异性效应，称为准各向异性。在地震勘探中忽略沉积岩中地震速度各向异性性质，可能导致反射地震学中横波褶积模型地震子波的畸变和地震速度测定中的错误。由于横波速度各向异性比纵波要明显得多，忽略各向异性性质也可使横波剖面中记录频率降低，频带变窄，信噪比降低等等。

研究油气储层内部结构中的方向性（如石油和天然气的分布、孔隙与裂缝的方向性排列和孔隙饱和水分分布等），将导致各类地震波，特别是横波传播速度依方向而变化。横波速度各向异性是横波在传播过程中发生波的分裂现象的最普遍原因，传播速度大的横波极化方向是裂缝系统发育方向的指示。地震技术的最新发展为我们研究储层内部结构提供了技术手段，井下和井间地震三分量观测确定横波分裂，研究速度各向异性，可以进行油气预测，储层裂缝系统发育方向和分布密度预测及储层动态监视等。