



CHOUYOU YOUTIAN
CHUCENG JINGXI MIAOSHU JISHU

稠油油田 储层精细描述技术

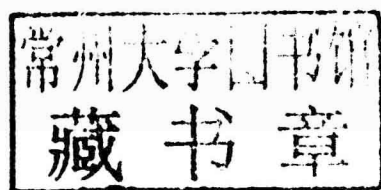
○ 夏庆龙 沈章洪 等著



石油工业出版社

稠油油田储层精细描述技术

夏庆龙 沈章洪 等著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统总结了针对渤海海域新近系河流相砂岩复杂油田的精细储层描述技术研究和应用的成果。主要论述了储层与非储层差异的地球物理基础研究、储层可预测性的实用判定方法研究、精细储层描述技术适应性研究、油藏描述—地质建模—油藏数值模拟一体化方法探讨等技术和方法的新进展。精细储层描述技术的应用成效主要体现在勘探目标评价、储量评价、海上油田开发井随钻调整、剩余油研究和调整井部署等方面。

本书可供从事石油、天然气行业的勘探、开发科研人员和相关院校的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

稠油油田储层精细描述技术/夏庆龙, 沈章洪等著.

北京: 石油工业出版社, 2010. 1

ISBN 978 - 7 - 5021 - 7592 - 4

I. 储…

II. ①夏…②沈…

III. 高黏度油气田—储层—油藏描述

IV. P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 244792 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

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 328 千字

定价: 80.00 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

渤海油田，经过 40 多年艰苦卓绝的勘探和开发，已成为我国重要的原油生产基地。在这个过程中，从 20 世纪 90 年代开始的新近系稠油油田大发现吹响了渤海油田进军国内大油田的号角。渤海已经发现的石油储量，60% 以上蕴藏在河流相砂岩储层中，基本属于稠油。河流相稠油油田是渤海勘探开发的主角，搞好了这类油田，渤海的发展大局可定。

在渤海海域开展新近系稠油油藏的勘探和开发，既要面对河流相砂岩储层具有单层厚度薄（很少超过 8m）、砂泥岩交替频繁，横向上变化大的地质复杂性，又要面对海上石油勘探开发高成本而导致的不得不少打井（探井井距一般都大于 2000m，开发井井距在 500m 左右）的独特行业特点。这二者叠加在一起就形成了挡在渤海海域新近系油气勘探开发工作者面前并且无法回避的巨大困难。为了攻克这个困难、促进渤海油田勘探开发事业的发展，中国海洋石油总公司设立了综合科研项目并联合国内各方力量进行攻关。

经过数年努力，终于在探讨河流相稠油油田储层地球物理特点的规律性、寻找适应此类储层的预测和描述技术方法、建立基本满足勘探开发关键需求的技术流程等方面取得重大进展，使河流相稠油油田储层预测和描述水平显著提高，应用领域显著拓展，支撑和推进了河流相稠油油田的勘探开发，获得了极好的勘探开发成效。

就技术方法而言，主要进展包括：发现密度是渤海河流相稠油油田区分储层和非储层最敏感的地球物理性质，奠定了储层预测和描述的坚实物理基础；建立了“相控属性”的分析方法并由此预测有利微相，从而预测有利储层的技术和方法，研发了相控属性提取程序；筛选出了适应渤海河流相稠油油田的反演技术（CSSI、EMERGE、StatMod、弹性反演具有较好的适应性），建立了有效的应用方法（包括 3 项储层预测技术指南，以及质量控制体系）；形成了以“井

点找规律，地震提信息，外推做解释”所概括的精细储层预测描述流程，使成果被国土资源部油气储量办公室（以下简称国家储委）接受，从而此类油田的储量计算更加接近实际；创建了河流相油藏开发随钻反演流程，极大提升了河流相油田的开发效益；掌握了储层预测—地质建模—油藏模拟综合贯通的工作流程，探讨并研发了油藏描述和油藏数值模拟双向迭代技术方法及配套的应用程序。

重大应用成果包括：开发井随钻反演为降低油田开发方案（ODP）实施过程中的地质油藏风险作出不可取代的贡献，已经成为渤海油田开发随钻的基本工作方法；通过精细储层描述，成功地向国家储委申报超过4亿吨的探明石油储量；应用勘探目标钻前储层预测技术，支持了一批新油田的发现和评价；应用于调整井研究，对于提高采收率和减缓产量递减发挥作用。

参加本书编写的人员还有：梁雪梅、滕彩虹、吕丁友、明君、田立新、刘春成、滕玉波、徐长贵、霍春亮、张迎春。除了参加本书编写的人员外参加本项研究工作的人员还有：周东红、彭刚、姜培海、王国栋、杨庆红、迟树根等。

在本书的编写过程中要感谢中国石油大学（华东）、成都理工大学、斯伦贝谢技术服务有限公司等院校和公司给予的技术合作。同时，本书也凝结了渤海油田勘探开发研究院众多研究人员的有关研究成果。

由于作者水平所限，不妥之处敬请指正。

夏庆龙

2009年10月10日

目 录

ξ1 绪论	(1)
1.1 渤海海域油气勘探和开发的基本现状和存在的问题	(1)
1.2 渤海海域精细油藏描述技术综述	(1)
1.3 主要工作量	(5)
1.4 典型应用成果	(6)
ξ2 储层地球物理基础研究	(7)
2.1 岩石物理实验研究	(7)
2.2 岩石中饱和流体对地震反射的影响及检测方法	(19)
2.3 储层与非储层地球物理识别方法研究	(40)
2.4 基于储层模型的地震资料分辨能力分析	(42)
ξ3 精细构造表征技术	(45)
3.1 多数据体三维可视化构造描述方法	(45)
3.2 地震及其衍生数据体的时深转换方法	(46)
3.3 地质格架模型的构建方法	(48)
ξ4 沉积微相表征技术	(50)
4.1 判别沉积微相的实用方法	(50)
4.2 单井测井地层评价及沉积微相划分	(51)
4.3 沉积微相与地球物理属性的关系研究	(56)
4.4 沉积微相及岩相的确定性描述方法	(65)
4.5 沉积微相及岩相的随机模拟方法	(69)
ξ5 储层定量表征技术	(72)
5.1 地震资料目标处理技术	(72)
5.2 地震反演技术	(74)
5.3 储层形态及内部结构定量描述方法	(100)
5.4 储层分布及三维可视化研究	(112)
5.5 储量计算	(113)
ξ6 地质建模与油藏数值模拟一体化技术	(115)
6.1 地质建模方法	(115)

6.2	地质建模与油藏数值模拟软件一体化技术	(126)
6.3	地质建模与油藏数值模拟双向迭代技术	(135)
§7	动静态数据共同约束的油藏模型调整技术	(138)
7.1	思路和方法	(138)
7.2	技术实现	(138)
7.3	方案优选及剩余油分布预测	(157)
§8	典型应用实例	(167)
8.1	秦皇岛 32-6 油田开发井随钻精细油藏描述技术	(167)
8.2	南堡 35-2 油田精细油藏描述及其在开发井随钻中的应用	(172)
8.3	精细油藏描述技术在渤中 25-1 南油田中的应用	(184)
§9	结论与认识	(193)
	参考文献	(195)

§1 绪 论

1.1 渤海海域油气勘探和开发的基本现状和存在的问题

我国东部渤海湾盆地新近系发育着相当数量的河流相沉积砂体，它们在中国东部的油气储量和产量中占据着十分重要的地位，但是由于河流相沉积砂体单层厚度薄、砂泥岩交替频繁，横向上变化大，给进一步的勘探和开发带来了很大的困难，特别是在砂体厚度的定量解释和河道分布边界的精确圈定等方面难度更大。

近几年来，渤海海域相继发现了秦皇岛 32-6、渤中 25-1 南、蓬莱 19-3、南堡 35-2、曹妃甸 11-1 等大型海上新近系河流相油田，这些油田大都具有储层横向变化快等特点。目前，这些油田已经相继进入油田开发阶段。与陆地油田相比，海上油田作业成本高，加上海上钻井的数量有限，不可能像陆地油田那样钻探许多评价井和开发井，海上油田滚动勘探开发的能力受平台位置和钻井控制范围的限制。一般来讲，在勘探评价阶段，一个亿吨级的油田其预探及评价井在 10 口左右。在开发阶段，一旦平台就位，就只能在一定范围内寻找开发井位。所有这些都要求在平台就位前，对地下地质情况有更清楚、更细致的掌握。对于河流相储层分布而言，仅凭少量几口评价井很难控制储层的分布，因此，在开发井钻探过程中滚动跟踪钻头钻进轨迹是提高开发井成功率和开发效益的关键。与陆上油田相比，在海上利用地震方法展开精细油藏描述进行滚动储层横向预测更彰显出其重要性和紧迫性。

针对渤海海域河流相稠油油田储层横向变化强的特点，在秦皇岛 32-6、渤中 25-1 南、南堡 35-2 等油田开展了以储层地球物理方法为主的精细油藏描述。在这些油藏描述研究中，注重多学科交叉综合，动静态结合，使用了大量的新方法、新技术——如相控技术、地球物理新技术、地质建模与数值模拟的双向迭代技术、动静态数据共同约束的油藏模型调整技术等。在进行油藏描述现代技术攻关的同时，该项目也开展了一些基础性研究，如岩石地球物理实验基础研究等。同时将近年来新兴的地球物理技术（如地震切片技术、多属性分析技术、三维可视化技术及地震属性反演、地震随机反演、测井约束三维地震反演、拟波阻抗反演等各种地震反演技术）与渤海海域具体地质情况相结合，推广应用到精细油藏描述中，使以地球物理资料为主的油藏描述与地质建模以及数值模拟实现了一体化研究与联动。

这些技术的应用收到了良好的效果，在取得良好效益的同时也形成了渤海海域河流相稠油油田精细油藏描述的技术储备。结合典型油田的勘探、评价和开发实例，总结并介绍以储层地球物理方法为主的储层精细描述研究工作的思路、方法及流程，对于整体提高渤海油田油气勘探开发的水平，以最少和最佳的井位获得最大的勘探和开发效果，具有现实的指导意义。

1.2 渤海海域精细油藏描述技术综述

在长期的勘探与开发实践中，针对渤海海域储层特点和特殊环境摸索出了一套行之有效

的、系统的精细油藏描述技术。这套技术充分利用各种资料，尤其是地球物理资料，采用多学科综合交叉和动静态相结合的思路，充分利用储层地球物理研究手段，从基础地质研究和实验入手，将三维地震资料的叠前叠后反演、地震属性提取和模式识别、AVO 分析处理、可视化地质体搜索、沉积相及岩相识别技术等引入到精细油藏描述中来，取得了很好的经济效益和科研意义。尤其是对于复杂强非均质的河流相储层稠油油田来讲，形成了完整的特色技术系列。

1.2.1 储层地球物理研究新进展

(1) 储层地球物理的基本概念。

储层地球物理 (Reservoir Geophysics)，也可以译成油藏地球物理。其内涵和范畴目前还没有标准的定义，其基本含义是指：以油气储层为研究对象，基于对地震信息和测井信息的分析，发现储层区别于非储层的地球物理特征，并设法将其从地震资料中提取出来，据此解释和描述与油气藏有关的地质性状，比如：储盖组合、储层几何形态（展布和厚度）、储层物性及其非均质性、孔隙体积等。

储层地球物理研究的应用领域几乎覆盖了从油气田发现到废弃之前的各个阶段，比如：目标评价阶段的钻前预测，储量评价阶段的油藏形态、物性、烃类体积描述，油田开发阶段的随钻开发井优化调整，油田挖潜阶段的剩余油预测和调整井设计等。

储层地球物理研究的具体技术包括各种反演、地震属性提取和模式识别、AVO 分析处理、可视化地质体搜索等。

(2) 储层地球物理研究的基本过程——“三步曲”。

总结近 10 年的实践经验，储层地球物理研究基本可以划分成 3 个任务明显不同的步骤。第一步是储层地球物理基础的研究，主要通过现有资料（特别是井和井旁地震资料）分析，发现储层区别于非储层的最显著的地球物理特征，确定把这种特征从地震资料中提取出来的处理方法、确定现有资料对研究对象的识别能力（如分辨率、资料品质横向变化）、井震标定（确定“两关系一子波”，即地震剖面的峰谷与反射界面正负的对对应关系和时深关系、子波）；第二步是储层地球物理特征处理，把前面找到的可以区分储层和非储层的地球物理特征信息从地震资料中提取出来；第三步是储层解释与评估，依据差异信息解释储层的空间展布形态和储层内部的非均质性（砂体追踪、物性预测）并进行应用（储量估算、流体预测、井位井型井网优化等）。

其中，储层地球物理特征处理的方法非常多（包括各种反演、地震属性提取和模式识别、AVO 处理以及可视化地质体搜索等都属于此范畴），渤海目前从组织形式、技术装备、技术流程和规范等诸方面来看，比较成熟的配套的主要是几种反演技术方法。

在储层地球物理研究的“三步曲”中，储层解释与评估是出地质成果的阶段，成果优劣极大地依赖于储层地球物理基础研究所确定的工作基础。储层地球物理特征处理是按照基础研究阶段确定的处理方法完成巨大运算量的阶段，市面上有各种成熟软件和固定在软件中的基本流程可供使用，操作过程相对固定，如同“标准处方，按方抓药”即可。这一步主要是完成工作量，并不保证研究结果一定符合实际地质情况。所以，做好储层地球物理研究的前提是基础研究。

储层地球物理基础研究阶段要达到发现规律的目的，设定可以达到的研究目标，选择合适的处理方法，确定储层解释的基本依据等关键内容。这一步与具体研究对象紧密相关，每个对象的特点不同，解决方案就不同，需要研究人员的能动性发挥主导作用。

(3) 储层研究技术新进展。

渤海海域河流相稠油油田精细油藏描述中运用了各种反演、地震属性提取和模式识别、AVO 分析处理、可视化地质体搜索等储层地球物理新技术及地质建模油藏数值模拟技术,这些工作的开展一方面使新技术迅速转化为生产力,从而创造了良好的勘探开发效益,另一方面也促进了储层研究技术的发展。

地震属性技术由传统的单一属性分析发展到了多属性提取与优化及多属性聚类分析,这些技术的运用为地质研究人员更好地通过地震属性研究地质规律提供了有力工具。

30 年来,地震反演技术从提出到现在发展迅速,它的发展不但体现在新的反演理论的不断提出,更体现在不同反演方法地质适用条件的研究上。地震反演作为渤海海域储层地球物理研究的关键技术,其进展正是体现在后者。本次研究以渤海海域不同地质条件下的典型油田为试验区,总结出了近年来相对波阻抗反演、测井约束波阻抗反演、地震属性反演、神经网络属性反演、叠前弹性波波形反演、储层物性随机反演以及地震资料的叠前反演等反演技术的地质适用性,这不但有力地指导了渤海海域油田今后的勘探开发,而且也为相同地质条件下其他油田的勘探开发提供了宝贵的可借鉴经验。

长期以来,沉积微相和岩相研究都是依赖于岩心观察和录井测井资料进行的。将地震资料反演和岩相模拟技术引入沉积微相和岩相研究,作为一项技术创新,对钻井稀少的海上油田沉积微相研究具有重要意义。

传统的地质建模以基础地质研究结果为输入,进行地层格架及参数模型的确定性的构建或随机模拟。在研究中针对渤海海域地质情况及以地球物理资料为主的特点,将地震资料反演结果作为地质建模的软约束,成功解决了海上钻井稀少情况下河流相油藏的地质建模问题,大大提高了精细油藏描述的精度。

地质模型的调整对油藏数值模拟的影响一直是滚动勘探开发中油藏数值模拟的难题,在渤海海域研究中随着新井数量不断增加,这个问题更加突出。地质建模与油藏数值模拟双向迭代技术的运用实现了建模与数模的一体化,展示出了良好的应用前景。

(4) 储层地球物理研究在渤海油气勘探开发中的应用。

近 10 年来,经过持续不断的探索和实践,储层地球物理研究在渤海海域的油气勘探和开发中逐步走出了一条基本适合渤海勘探开发主战场的地质条件的路子,形成了独具特色的工作方法和应用原则,在目标评价(钻前预测储盖组合以及储层发育情况,如旅大 10-1、绥中 36-1 北、渤中 25-1 南等),储量评价(描述油藏形态、物性、烃类体积,如渤中 25-1 南、南堡 35-2、渤中 34-1 等),油田开发(随钻调整油藏形态和优化井位,如旅大 10-1、秦皇岛 32-6、渤中 25-1 南、南堡 35-2 等),油田挖潜(调整井设计,如绥中 36-1 等)这样一个相当广泛的领域进行应用,取得了显著的成效,对提高地质成功率和经济效益做出了广为认同的贡献。

旅大 10-1 油田成功评价获得探明地质储量 $4150 \times 10^4 \text{ m}^3$; 旅大 10-1 油田开发井随钻调整促使单井钻遇油层平均厚度达到 50 多米,高于 ODP 设计的 40 多米,钻后储量约 $5000 \times 10^4 \text{ m}^3$ (含开发井加深发现的新油层); 目前该油田产量喜人。

渤中 25-1 南油田一期 B、C、D 等 3 个平台共打开发井 84 口,由于储层变化而改变 ODP 设计井位井型的超过 60%; 单井钻遇油层平均厚度达到 22.1m,高于 ODP 设计的 19.6m (钻后反推 ODP 设计的只有 10.7m); 射开厚度 17.9m,与 ODP 设计的 17.7m 相当; 随钻调整竭尽全力实现了 ODP 射开油层的目标。尽管该油田由于天然能量不足,目前产能

偏低,但储层预测获得巨大成功是经得起生产实际考验的。

1.2.2 河流相储层精细描述方法和技术

(1) 河流相储层预测的对策。

针对油田存在的地质—地球物理难点,采取处理、反演、解释一体化的工作模式,从改善原始地震资料品质和提高地震资料分辨率入手,以地震反演为基础,综合运用多种地震储层预测技术,围绕着沉积相带分布、砂体形态、厚度和物性分布、河道边界及发育史等环节,分层次、分尺度进行精细油藏描述。

(2) 地震资料处理技术。

在油田勘探评价、储量评价和开发设计阶段,根据地质任务的要求不同,地震资料处理的侧重点也不同。在油田勘探评价阶段,关注的是精细构造解释,地震资料处理追求的是波组特征明显和横向可连续对比性,以常规处理流程为主;在油田储量评价和开发阶段,关注的是砂体的厚度和储层的横向变化,地震资料处理追求的是横向和纵向识别能力,处理流程以提高分辨率和信息保真为主。这种有针对性的资料处理方法取得了满意的应用效果,为后续的地震反演和储层预测打下了坚实的资料基础。

(3) 地震资料反演技术。

勘探程度的不同,地震反演工作的深度也不同。油田勘探评价阶段,以寻找油气,落实储量规模为重点,钻井数量有限,反演方法以相对波阻抗(或拟相对波阻抗)反演技术为主,储层预测以砂层组为单元,配合精细构造解释,提供评价井位;储量评价阶段以进行精细的储量计算为目的,反演方法以测井约束反演为主,储层预测以单砂体为单元,为精细描述岩相分布、砂体形态、厚度、物性变化等信息奠定基础;油田开发实施阶段以追求开发井的成功率为目标,反演方法以高精度随钻和滚动地震反演为主,精确刻画单砂体厚度和物性横向变化,指导开发井的轨迹设计。

(4) 储层精细描述技术。

在油田勘探和开发的不同阶段,地质任务要求的精度和尺度不同,储层精细描述的侧重点也有所区别,在勘探阶段,主要解决以下4个问题:①沉积相带的平面分布特征如何;②储层是否存在,如果存在,其空间分布如何;③能否将其形态进行定量化描述;④其厚度如何。而在储量评价和油田开发实施阶段,主要解决以下4个问题:①物性怎样;②河道(地质体)边界的准确刻画;③河流发育史或沉积微相演化史研究;④储层内流体性质及其分布研究。对河道边界、物性、沉积微相纵横向变化及流体分布规律的正确认识对开发井井位的选取和水平井的成功实施是至关重要的。

在渤中25-1南油田储层精细描述工作中,围绕解决上述部分问题,摸索总结了一套适合油田自身特点的技术对策与思路,可归纳为:

① 利用波形分类、三维可视化、地震数据体层拉平等技术来确定沉积相带的平面分布特征、储层宏观分布形态,预测砂体富集区带,建立储层分布宏观概念,用于指导砂体追踪解释;

② 建立储层追踪准则,采用自动追踪、常规剖面解释等技术手段对砂体进行追踪解释,揭示其空间分布范围,对其形态进行定量描述,形成数字化工作成果,这是储层描述最重要和基础的研究成果;

③ 采用地震波阻抗、孔隙度反演和钻井标定色标及多属性综合分析技术对储层厚度、物性或岩性变化进行定量或半定量预测;

④ 利用方差数据体,多属性相干和多属性综合分析技术准确确定地质体边界;利用波形分类、多属性聚类、层拉平多属性切片及地层切片对沉积相和沉积微相及其发育过程进行研究。

总之,采用上述技术,针对不同阶段的地质任务要求,对储层进行分层次、分尺度的地震精细描述,取得了良好的应用效果。

1.3 主要工作量

本研究共分9个专题进行,分别为:多属性神经网络地震反演方法研究、渤海稠油油田的岩石物理参数与地球物理特征关系研究、相控技术研究及在渤海浅层油田的应用研究、秦皇岛32-6油田明化镇组勘探开发一体化研究、秦皇岛32-6油田反演技术研究、地震和动态资料约束下的模型调整技术研究、拟波阻抗反演方法研究、渤海叠前正反演与叠前叠后联合反演技术研究、秦皇岛32-6油田储层建模与油藏数值模拟双向迭代技术研究,具体工作量如下:

(1) 地震资料高分辨率处理共 919km^2 。

具体为:秦皇岛32-6三维地震资料 140km^2 ;渤中25-1南三维地震资料 280km^2 ;绥中36-1三维地震资料 170km^2 ;南堡35-2三维地震资料 240km^2 ;渤中34-1三维地震资料 89km^2 。

(2) 地震资料精细解释共 919km^2 26层。

具体为:秦皇岛32-6三维地震资料 140km^2 6层;渤中25-1南三维地震资料 280km^2 4层;绥中36-1三维地震资料 170km^2 4层;南堡35-2三维地震资料 240km^2 7层;渤中34-1三维地震资料 89km^2 5层。

(3) 地震反演和属性计算共 659km^2 。

具体为:秦皇岛32-6油田 70km^2 ;渤中25-1南油田 180km^2 ;绥中36-1油田 80km^2 ;南堡35-2油田 240km^2 ;渤中34-1油田 89km^2 。

(4) 测井资料处理、解释及沉积微相划分721口井。

具体为:秦皇岛32-6油田177口井;渤中25-1南油田175口井;绥中36-1油田247口井;南堡35-2油田103口井;渤中34-1油田19口井。

(5) 岩石物理实验和分析共完成1927块岩心。

具体为:秦皇岛32-6油田67块岩心;渤中25-1油田381块岩心;绥中36-1油田1294块岩心;南堡35-2油田102块岩心;渤中34-1油田83块岩心。

(6) 以地球物理属性分析为基础的沉积微相分析和研究共41层 590km^2 。

具体为:秦皇岛32-6三维地震资料 70km^2 14层;渤中25-1三维地震资料 280km^2 20层;南堡35-2三维地震资料 240km^2 7层。

(7) 精细地震层序分析 200km^2 。

(8) 以岩石物理实验为基础的正演研究和分析。

(9) 岩相随机模拟。

(10) 地质建模和动静态数值模拟。

(11) 共追踪和描述砂体131个(464km^2)。

具体为:秦皇岛32-6油田描述和追踪砂体17个(100km^2);渤中25-1油田描述和

追踪砂体 63 个 (126km^2)；绥中 36-1 油田描述和追踪砂体 7 个 (130km^2)；南堡 35-2 油田描述和追踪砂体 17 个 (45km^2)；渤中 34-1 油田描述和追踪砂体 27 个 (63km^2)。

1.4 典型应用成果

通过对旅大 10-1 油田钻前储盖组合以及储层发育情况预测,获得探明地质储量 $4150 \times 10^4\text{m}^3$,开发井随钻调整促使单井钻遇油层平均厚度达到 50 多米,高于 ODP 设计的 40 多米,钻后储量约 $5000 \times 10^4\text{m}^3$ (含开发井加深发现的新油层)。目前该油田产量喜人。

渤中 25-1 南油田一期 B、C、D 等 3 个平台共打开发井 84 口,由于储层变化而改变 ODP 设计井位井型的超过 60%；单井钻遇油层平均厚度达到 22.1m,高于 ODP 设计的 19.6m (钻后反推 ODP 设计的只有 10.7m),射开厚度 17.9m,与 ODP 设计的 17.7m 相当,随钻调整竭尽全力实现了 ODP 射开油层的目标。

秦皇岛 32-6 油田主要含油层段分成 6 个油层组,存在多个油水系统。油藏受构造和岩性双重控制,地质条件比较复杂。含油面积 39.7km^2 ,探明储量 $17034 \times 10^4\text{t}$ 。每一轮随机模拟所提供的地质模型成果包括:时间域和深度域的岩性体、孔隙度体、有效储层孔隙度体共 6 个三维数据体。自 1999 年 9 月中旬至 2000 年 11 月,伴随开发井实施过程,修正油藏地质模型 16 轮,在开发井随钻地质监测和井位调整方面发挥了重要作用;全油田共调整设计井位 25 个,特别是其中的 6 个重大调整,反演结果起了关键作用,包括取消设计井 4 口,调整水平井轨迹 1 口,调整常规开发井井位 1 口,直接经济效益巨大;高精度油藏模型为成功完成 3 口大位移水平井打下了良好的资料基础;为油藏数值模拟提供了可靠的油藏地质模型;探索并初步形成了随钻油藏模型调整的有效方法,积累了一些应用经验。对于埋深 1200m 左右的油层,最终模型预测的顶深与实钻顶深的误差基本不超过 2.7‰,所以最终模型是可靠的。

锦州 9-3 油田精细油藏描述研究中依据新地震资料重新对构造进行了解释,不仅小断层的解释更加合理可靠。而且发现八下油组顶面构造形态较老的构造图有较大变化,构造幅度变陡,含气范围缩小,使得原计划钻探的调整井 W10-4 落在了气水界面以下,根据新构造图对 W10-4 井的井位进行了调整,避免了 1 口低效井的钻探。

§2 储层地球物理基础研究

地球物理勘探所获得的物理量与地下储层参数的对应关系通常是相当复杂的,它们之间的关系通常是通过间接途径获得的,这二者的对应关系的确定程度必然影响到地球物理探测结果的储层解释能力及其效果,对于地震勘探来说确定地震波特点的因素除激发、接收条件外,主要受岩石的弹性模量、密度和吸收特性等影响。而这些特性又是与岩石成分、孔隙度、埋深、孔隙内流体性质、压力、岩层的不均匀性以及其他的地质特性密切相关的,因此,了解岩石物性与地震波特性的关系可以更好地研究储层性质(孔隙度、渗透率)及其状态(饱和度、孔隙压力等)。储层研究的复杂性是它的非均质性,因此,单从试井、测井或岩心分析不能得到满意的储层空间分布情况,最好的方法就是结合钻井、测井或岩心分析资料从地震资料中来获取这些信息。渤海海域的储层地球物理研究的基础就是岩石物理研究。

2.1 岩石物理实验研究

储层岩石是一种多相复合介质,影响岩石波速的因素众多,可将其分为内在本征参数(如岩石矿物成分、孔隙度和孔隙几何形状、密度、胶结和压实情况等)和外部环境参数(如原地应力和孔隙压力、温度、孔隙流体类型、饱和度和声波频率等)。通过实验测量来研究岩石波速与各种因素的关系,是岩石物理实验的主要内容。

根据疏松砂岩稠油岩样弹性波测试的要求,建立了实验装置并提出了实验方法,采用的单轴应变实验条件接近疏松砂岩储层地下实际受载条件。对于水层岩样,分别测量其饱和前后的波速,对储层岩样,测量洗油前后岩样的纵波速度、横波速度及饱和后的速度。并研究疏松砂岩弹性波速随应力、温度、流体类型等因素的变化规律,从而得出研究层位在原地条件下的岩石物理特性参数,如纵波速、横波速、弹性模量和泊松比等。

2.1.1 弹性波速测试方法

岩石物理测试的实验是在中国石油大学(华东)岩石力学实验室进行的。实验设备主要包括三轴高压釜、声波测试系统、压力控制系统、流体饱和系统、计算机伺服控制系统、孔隙压力控制系统、加温及温控系统。

2.1.1.1 系统对零

声波的发射探头和上压头之间、下压头和接受探头之间、上压头和下压头之间等都会由于接触不紧密而造成声波传播时间的延迟,所以在测试之前,必须对测试系统进行对零时间的矫正。一般情况下,借助于波速已知的标准件来对系统进行校正。实验中使用的标准件是:有机玻璃、钢和铝,每种标准件都有三四种不同的长度,它们分别长约25mm、40mm和80mm。具体操作为:对一种标准件分别测得几种不同长度下声波的传播时差,以标准件的长度为横坐标,声波传播时差为纵坐标作正交图,对得到的几个测试点进行线性拟合,所得直线斜率的倒数是相应的标准件的声波速度,直线的截距(即长度为零时的时差值)为波速测试系统的对零时差。对于有机玻璃,纵波探头对零时间为 $2.564\mu\text{s}$ 。仿此,可以得到

其他两种标准件的对零时间。系统对零时间取 3 个对零时间的算术平均值，即：

$$t_0 = \frac{t_{\text{Glass}} + t_{\text{Al}} + t_{\text{Fe}}}{3}$$

式中 t_0 ——系统对零时间， μs ；

t_{Glass} ——玻璃对零时间， μs ；

t_{Al} ——铝对零时间， μs ；

t_{Fe} ——钢对零时间， μs 。

2.1.1.2 减少摩擦

实验中，随着压力的不断增加，样品与筒壁之间的摩擦力越来越大，为了确保样品受单轴应力，同时也为了使筒壁不受磨损，必须使摩擦力减到最小。把较厚较软的塑料，涂上润滑剂，贴在圆筒内壁以减少摩擦力，实验证明该方法有效。

为了饱和进一定的流体，在抽真空时，必须给压头加上 O 形圈从而使整个系统保持密封，但当压头加上 O 形圈后，O 形圈与筒壁的摩擦力就不能忽略了，为了较为精确地得到该摩擦力，采取了如下的方法：首先将压头放入岩心筒少许，在压头的外壁上标上明显的记

号；然后将岩心筒放在压机上，缓慢加载，当看见压头匀速移动时，记下压力表的读数。此读数即为 O 形圈与钢筒壁之间的摩擦力数值。如此反复 3 次，再取 3 个数值的算术平均值，这样，就得到了 O 形圈与钢筒壁间的摩擦力值。

2.1.1.3 岩样的清洗与烘干

实验前，必须将岩样中的烃类和其他的流体清洗干净。为此，选用的是溶剂抽提法来清洗岩样，所用的仪器是索氏抽提仪（见图 2-1），它的原理是：将清洗剂在烧瓶中加热，变成蒸汽的清洗剂上行经循环冷水冷凝成液体后进入岩心室，当岩心室的液体达到一定的高度后，根据 U 形管的原理，岩心室中的液体将在大气的压力下，流回下面的烧瓶中，对岩样进行反复清洗，直到用荧光比色法鉴定达到 2~3 级即可。清洗剂的选择根据岩心润湿性而定。对亲油岩心，选用汽油、四氯化碳（岩心内不含水）或石油醚（岩心内含水）；对亲水岩心，常用 1:3 酒精、苯溶液；抽提沥青质原油，可选用甲苯。



图 2-1 索氏抽提仪

清洗干净的样品需要在温度为 60~65℃、相对湿度为 40%~45% 的条件下保持 24 小时后才能使用，因为在此条件下有两个作用：一是岩样中黏土矿物不受到破坏；二是实验样品中颗粒的束缚水不被破坏。

2.1.1.4 堆积密度测量

实验有两种样品：一种是石英砂，实验中取了 3 种粒度不同的砂子，颗粒直径分别为：0.45~0.6mm、0.3~0.355mm、0.22~0.31mm；另一种是岩心，它取自于秦皇岛 32-6 油田的不同井或相同井的不同深度。实验时，取一定量的样品，分别测出它们的体积和质量，以求干岩样的密度；随后将这些样品装入岩心筒中，随着压力的增加，压头的不断下移，可得到岩心体积的减少量，在岩心质量保持不变的情况下，可求得不同压力下岩心的密度。

2.1.1.5 不同条件下的波速测量

装好岩样，盖上压头，即可在压机上进行实验。首先记下上压头的初始位置，接着便可

使压力从零开始缓慢增加,待示波器上出现波形,就可以进行数据记录。每到一定的压力间隔,取一组数据(包括此时的压力、上压头的位移、声波传播时差等),这样就可以得到不同压力、密度和孔隙度下岩样的波速。

若为饱和流体,则在装入岩心后开始抽真空,直至岩心孔隙内的压力为负一个大气压。断开真空泵,打开控制流体的阀门,使流体进入岩心孔隙中,并达到饱和。

开启加温系统,使岩心温度达到其在地下时的温度,再测量波速等其他数据。温度的确定方法按下式计算:

$$T=0.0345H+21$$

式中 T ——温度,℃;
 H ——深度,m。

例如:秦皇岛32-6-4井(以下图中简称QHD32-6-4井),深度为1162.39m处的岩心在实验室模拟储层条件时,温度为61.1℃。

2.1.1.6 粒度分析

实验中对每个岩样分别测得了它在实验前后的粒径分布。将少许岩心放入样品槽,通过Mastersizer分析软件即可得到岩心的平均粒径和粒径的分布情况,即分选情况(图2-2)。

2.1.1.7 矿物分析

X射线衍射法可以定性和定量地鉴定出大部分的成岩矿物(大于4μm)和黏土矿物(小于4μm)。实验装置主要是一台X射线衍射仪,岩样清洗干净,粉碎后即可进行实验(图2-3)。得到了矿物成分及其含量之后,不仅可以得到颗粒的密度,还可计算出岩心的孔隙度。

实验所测得的参数种类见表2-1。

表2-1 实验测量参数

岩样类型	油层岩样				水层岩样			盖层
测试条件	洗油前	洗油后	饱和油	饱和岩样加温	干岩样	饱和水	饱和岩样加温	常温常压
测试参数	$v_p、v_s、M、K、G、Z、\rho、\sigma$	$v_p、v_s、M、K、G、Z、\rho、\phi、\sigma$	$v_p、v_s、M、K、G、Z、\rho、\sigma$	$v_p、v_s、M、K、G、Z、\rho、\sigma$	$v_p、v_s、M、K、G、Z、\rho、\phi、\sigma$	$v_p、v_s、M、K、G、Z、\rho、\sigma$	$v_p、v_s、M、K、G、Z、\rho、\sigma$	$v_p、v_s、M、K、G、Z、\rho、\sigma$

注: v_p 为纵波速度; v_s 为横波速度; M 为纵波模量; K 为流体体积模量; G 为横波模量(剪切模量); Z 为骨架体积模量; ρ 为密度; σ 为泊松比; ϕ 为孔隙度。

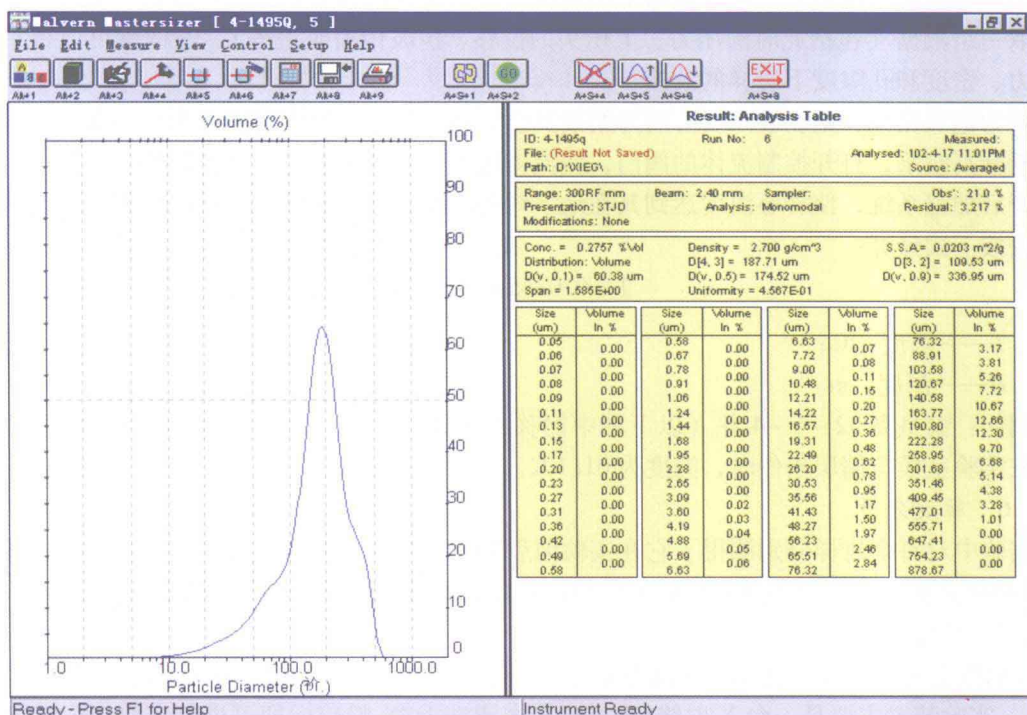
2.1.2 实验结果的处理与分析

2.1.2.1 密度和孔隙度的确定

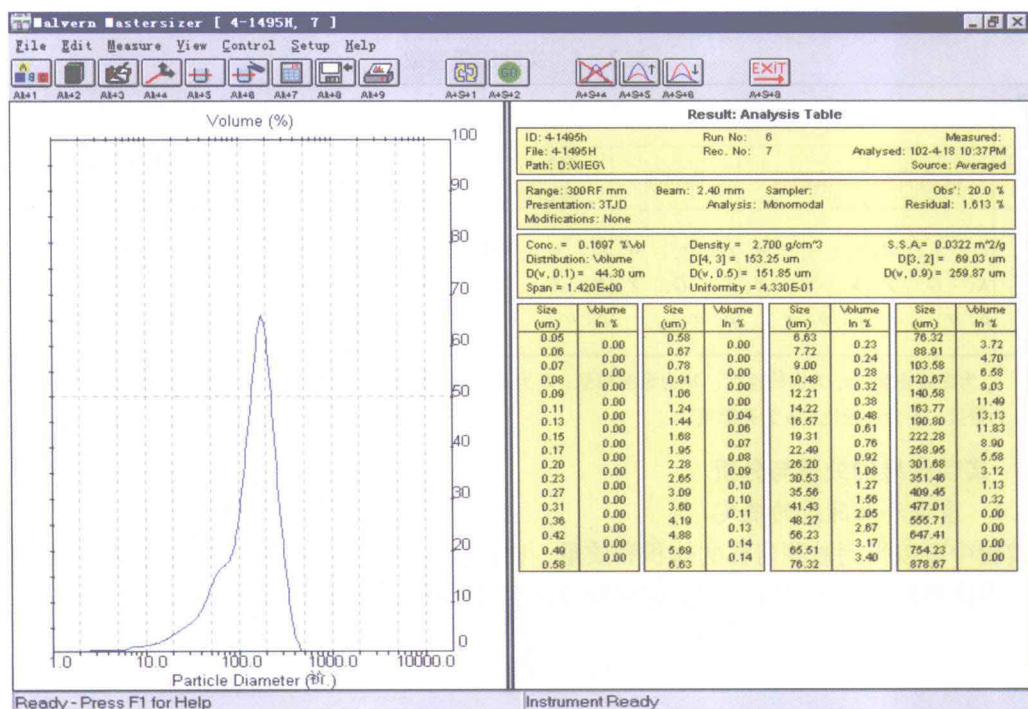
实验中可以得到被测岩样的体积和质量,由公式 $\rho=m/V$ 可计算得到不同压力下岩心的密度。固体颗粒的密度可以根据矿物成分及其含量得到,其表达式为:

$$\rho_s = \sum_{i=1}^n X_i \rho_i$$

式中 ρ_s ——固体颗粒密度, g/cm³;
 ρ_i ——第 i 种矿物密度, g/cm³;
 X_i ——第 i 种矿物体积百分含量。



(a) 实验前



(b) 实验后

图 2-2 岩样粒度分析
(秦皇岛 32-6-4 井, 深度为 1495m)