



陆相油储 地球物理学导论

刘光鼎 李幼铭 吴永刚 等著

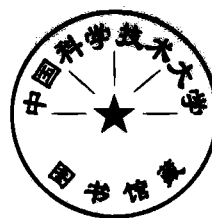
科学出版社

陆相油储地球物理学导论

刘光鼎 李幼铭 吴永刚 等著

国家自然科学基金委员会
中国科学院
中国石油天然气总公司
大庆石油管理局

联合资助项目



科学出版社

1998

内 容 简 介

本书集中反映我国“八五”重大基金“陆相薄互层油储地球物理理论和方法研究”项目的理论性成果。其中也包括对该项目百余项正在油田运用的实用化成果的理论性论述。

油储地球物理学是近十年脱颖而出的一门新的分支学科,一直为国内外油气工业界和学术界所关注,并形成热点研究领域,旨在直接研究油气储层,力求在服务于油气勘探开发过程中发挥作用。

本书内容主要介绍近年兴起的油储地球物理的岩石物性、地球物理测井、高分辨率反射地震、多波多分量地震、井中地震和地震数据精度及油气储层,同时还阐述“油储”项目理论性成果的论证。

书中也涉及对油储地球物理学已开展或尚未进行的各相关理论及方法,提出应进一步深化研究的思路和科学问题。基于国民经济发展的重大需求,油储地球物理学研究必将在近期处于一个快速发展并逐步完善的阶段。本书的出版对促进油储地球物理学研究和我国石油工业的进一步发展将起到极其重要的作用。

本书可供应用地球物理学专业、石油勘探与开发的研究及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

陆相油储地球物理学导论 / 刘光鼎等著. —北京:科学出版社,1998.7
ISBN 7-03-006614-6

I. 陆… II. 刘… III. 陆相-油气藏-储集层-地球物理学 IV. P618.130.2
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 06273 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998年7月第一版 开本:787×1092 1/16

1998年7月第一次印刷 印张:17

印数:1—1 000 字数:415 000

定价:68.00 元

序

由国家自然科学基金委员会、中国科学院、中国石油天然气总公司和大庆石油管理局联合资助,并由刘光鼎院士主持的国家自然科学基金“八五”重大项目——陆相薄互层油储地球物理理论和方法研究,于1997年6月18日至19日在北京通过国家自然科学基金委员会组织的项目结题验收。

该重大项目共有7个二级课题,144个子课题,历时5年,先后有中国科学院、国家教委、中国石油天然气总公司和地矿系统40余个单位的500多位专家紧密合作,取得了丰富的成果,达到了预期的研究目标,公开发表400余篇学术论文,一批方法软件已形成科学版本,并有百余项实用化成果已在油田运用。项目还培养了一批“油储”人才,在研究进程中先后接纳博士后11人,培养博士51人,硕士152人,其中直接为大庆培养硕士30人。为我国油储地球物理学科的发展及我国石油工业的发展,特别是大庆油田的持续稳产,培养了一批新生力量。

该项目所取得的成果,主要得益于从不同角度对“油储”发展十分关注的产、学、研诸多科学工作者组成理论联系实际、紧密团结协作的研究群体。这个群体具有相当的科学洞察力,勤于实践的勇气,善于理论联系生产实际的胆略,并具有为解决国民经济发展中重大问题的历史使命感。

油储项目验收专家组认为,本项目的一些理论性和实用性的成果针对我国地质目标的特殊性而体现出研究的独创性,对于油储地球物理学的学科发展和大庆油田乃至我国石油工业的发展都有较大的促进作用,圆满地完成了预定的研究目标和内容,一致同意通过结题验收。

该重大项目取得的主要成果包括:

1. 岩石物性测量和规律研究,应用自行研制测试设备,进行200多块样品测试过程中,得到了自然条件下大庆目标区的油气储层参数与地球物理参数间的定量关系,为利用地球物理数据推测储层位置、空间变化和含油气性打下了坚实的物理基础。

2. 在薄互层油储地球物理测井方法和应用方面,针对单一测井方法的局限性,利用综合地球物理测井方法,对薄互油层水淹层可自动划分30cm的砂岩厚度和有效厚度并判断其水淹程度。经2000多口井验证,及1995~1996年40多口探井验证,解释符合率由以往60%提高到85%,为大庆西部地区油气勘探提供了重要依据。

3. 在储层追踪的反射地震理论与方法研究方面,通过野外数据采集方法研究,提高了采集主频,频带宽为15~150Hz,最高主频达80Hz。通过微分方程反演,非线性地震混沌反演及三维地震偏移等软件的上万公里剖面的处理,在大庆探区1500m以内储层预测精度最高可达到5m左右。

4. 在多波多分量地震勘探方面,研究了含孔隙流体各向异性和横向各向同性介质中的地震波传播,以及裂缝介质中弹性波积分解和双相介质中弹性波方程及速度问题。建立了多波勘探的反演,偏移理论和方法。

5. 在跨孔地震和 VSP 方面,进行了大量的方法研究和软件编制,已经形成了一套方法系列。由于大庆缺少跨孔实际资料并考虑到当时地震技术动向,随后调整了研究方向,将其运用于地面地震资料,证明了其理论的正确性,并在固体格子气、二维叠前深度偏移和三维可视化方面取得了实际成效。

6. 在数据综合处理解释方面,形成了适用于陆相薄互层油储特点的大型油储描述处理解释系统软件。该系统集地震和测井资料的构造解释和储层描述于一体,具有三维可视化、系统开放性能好、集成能力强、定向目标处理与解释一体化等特点,充分利用多窗口管理技术,建立多工作台性质的工作窗,有利于多种方法、多种参数处理解释同时实施。本系统的完成为陆相薄互层油气储层的描述提供了基本功能,为集成有关软件提供了一个较好的基础平台。

7. 在反射地震数据精度改进方面进行了深入研究,地震子波具有独创性,能广泛使用。

为集中反映油储项目理论性成果,特出版此专著(实用化成果专题将另行发表),以获取学术界、石油工业界专家学者们的广泛批评和建议,促进我国油储地球物理学的进一步发展。

由于本专著全面反映“油储”项目的研究进展,涉及面甚广,特邀请数位学者分别执笔。具体分工如下:

第一章 吴永刚, 陈凤友, 李幼铭,

第二章 徐果明,

第三章 李舟波,

第四章 杨文采, 范尚武,

第五章 俞寿朋, 周兴元,

第六章 马在田,

第七章 刘 洪, 李幼铭,

第八章 管叶君, 乌达巴拉,

第九章 吴永刚, 李幼铭。

全书由刘光鼎主持,李幼铭、吴永刚负责组织及统调,并由马在田院士、丁贵明教授和高瑞琪教授审订。

刘光鼎 李幼铭 吴永刚

1997年12月

RESERVOIR GEOPHYSICS IN CHINA

LIU Guang-ding, LI You-ming, WU Yong-gang *et al.*

This project is funded by
National Natural Science Foundation of China ,
Chinese Academy of Sciences ,
China National Petroleum Corporation ,
Daqing Petroleum Administration Bureau

Science Press

1 9 9 8

目 录

第一章 前言	(1)
1.1 油储地球物理学的提出	(1)
1.1.1 能源工业发展的需求	(1)
1.1.2 相关学科发展已提供研究条件	(2)
1.1.3 学科发展的需求	(2)
1.2 油储地球物理学研究目标及学科内涵	(3)
1.3 油储项目地质目标的选择	(3)
1.4 陆相薄互层油储的地质特征	(4)
1.5 陆相薄互层油储研究成果	(5)
第二章 岩石物性测量和规律性研究	(6)
2.1 储层条件下岩石油储参数的测定和规律	(6)
2.1.1 储层条件下岩石孔隙度的测量和规律	(6)
2.1.2 储层条件下岩石渗透率的测量与规律	(9)
2.2 储层条件下岩石地震参数的测定和规律	(11)
2.2.1 储层温压条件下油储岩样波速的测定及规律	(11)
2.2.2 储层温压条件下油储岩样地震波衰减的测定和规律	(14)
2.3 储层条件下岩石电参数的测定和规律	(15)
2.3.1 岩石的导电机制和影响因素	(15)
2.3.2 储层温压条件下砂岩电阻率的测定和规律	(16)
2.3.3 储层温压条件下砂岩极化率的测定和规律	(18)
2.4 储层条件下岩石热参数的测定和规律	(18)
2.4.1 非金属刚性材料导热系数的测定方法	(18)
2.4.2 砂岩岩样导热系数与温度压力间关系	(19)
第三章 薄互层油储地球物理测井方法的研究和应用	(20)
3.1 电磁波组合测井理论与方法	(20)
3.1.1 多层混合介质电磁波测井正演模拟及新的认识	(21)
3.1.2 地层介电常数与电阻率反演计算	(25)
3.1.3 岩石复介电常数的实验研究	(27)
3.2 全波声测井的理论与应用	(28)
3.2.1 井孔声波理论研究的进展	(29)
3.2.2 井孔声波全波列正演数值模拟	(33)

3.2.3	慢速地层声波全波测井的分波提取方法	(34)
3.2.4	利用声波测井资料求取渗透率的方法	(36)
3.3	薄层电阻率测井反演方法	(39)
3.3.1	电法测井模型	(40)
3.3.2	反演方法	(41)
3.4	薄互层测井综合解释方法	(44)
3.4.1	提高测井曲线分辨率的理论与方法	(45)
3.4.2	测井曲线统一分层与岩性识别	(49)
3.4.3	储层参数计算与油水层综合识别	(49)
3.5	测井与地震资料结合进行井间外推的解释方法	(51)
3.5.1	测井曲线的反演及与地震道匹配	(51)
3.5.2	地震数据反演方法研究	(52)
第四章	基于声波方程的油储反射地震	(57)
4.1	薄互层油储反射地震总述	(57)
4.2	薄互层介质的地震波传播与地震剖面合成	(59)
4.2.1	声波方程与拟微分算子	(59)
4.2.2	声波散射过程的奇性分析	(60)
4.2.3	模拟复杂介质中地震波场的格子气自动机模型	(61)
4.3	叠前偏移与三维偏移	(66)
4.3.1	波场能量归位与地震偏移	(66)
4.3.2	叠前深度偏移方法	(67)
4.3.3	波动方程三维深度偏移方法	(71)
4.4	声波方程反演的理论与方法	(83)
4.4.1	反演理论概述	(83)
4.4.2	声波方程反演新方法	(84)
4.4.3	逆散射地震反演	(90)
4.4.4	一类双曲型方程不适定问题的数值方法	(93)
4.5	非线性地震反演	(97)
4.5.1	非线性问题的一般特征	(97)
4.5.2	非线性地震道混沌反演	(98)
4.5.3	其它非线性地震反演方法	(106)
4.5.4	非线性反演系统的自组织	(107)
第五章	地震数据精度的改进	(108)
5.1	消除近地表影响	(108)
5.1.1	地表一致性振幅校正	(108)
5.1.2	地表一致性相位校正	(109)
5.1.3	全差分折射波静校正	(110)

5.1.4	可控震源地表一致性反褶积	(113)
5.2	提高信噪比处理技术	(117)
5.2.1	$f-x, y$ 域预测衰减随机噪声 (3D RNA)	(117)
5.2.2	$f-x$ 域预测算子的频域外推	(118)
5.3	道内插技术	(120)
5.3.1	新的 $f-x$ 域道内插技术	(120)
5.3.2	$f-x$ 域道内插	(126)
5.4	提高地震数据的保真度	(126)
5.4.1	动校正和叠加中的保真问题	(127)
5.4.2	提高分辨率处理中的保真问题	(134)
5.4.3	波动方程偏移的保真问题	(143)
第六章	多波多分量地震勘探的理论与方法	(146)
6.1	波场分离	(150)
6.1.1	波场分离的必要性	(150)
6.1.2	波场分离方法	(150)
6.1.3	共炮点道集的波场分离	(153)
6.1.4	共炮检距道集的波场分离	(157)
6.2	P-SV 型反射转换波的水平叠加处理方法	(158)
6.2.1	P-SV 反射波时距曲线	(159)
6.2.2	共转换点道集	(159)
6.2.3	速度分析	(160)
6.2.4	动校正时差计算	(162)
6.2.5	转换波多次覆盖数据的水平叠加	(163)
6.3	P-SV 转换反射波的偏移和倾角时差校正 (DMO)	(165)
6.3.1	P-SV 反射波偏移成像的特点	(165)
6.3.2	P-SV 反射波的叠前偏移	(165)
6.3.3	P-SV 转换反射波的倾角时差校正 (DMO)	(172)
6.3.4	P-SV 反射波的叠后偏移	(177)
6.4	层状介质弹性参数反演	(177)
6.4.1	层状介质弹性参数反演基本原理	(177)
6.4.2	层状各向同性介质多参数有限带宽反演	(181)
6.5	各种介质条件下地震波传播的理论及模拟研究	(185)
6.5.1	研究各向异性的意义	(185)
6.5.2	各种介质中地震波传播的数值模拟	(188)
6.5.3	横波分裂与裂隙研究	(192)
第七章	井中地震方法	(198)
7.1	理论问题	(200)

7.1.1	井中地震的分辨率	(200)
7.1.2	不完全投影问题	(201)
7.1.3	振幅信息	(203)
7.1.4	辐射花样	(205)
7.2	井间地震成像技术	(207)
7.2.1	射线追踪方法	(208)
7.2.2	Maslov 地震图	(214)
7.2.3	波场奇性与小波分析	(216)
7.2.4	纵波衍射层析	(217)
7.3	VSP 资料的非线性反演及迭代层析偏移	(220)
7.3.1	VSP 资料波动方程非线性反演	(221)
7.3.2	VSP 迭代层析偏移	(223)
7.4	井间地震实际资料研究	(225)
7.4.1	走时自动拾取	(225)
7.4.2	波场分离方法	(227)
7.4.3	走时资料层析成像	(229)
7.4.4	反射波归位叠加成像	(229)
第八章	薄互层油气储层的圈定与描述	(232)
8.1	油储描述资料处理和人机交互解释系统	(232)
8.1.1	系统结构	(232)
8.1.2	系统功能	(235)
8.1.3	软件技术特点	(241)
8.2	油储描述的方法系列	(242)
8.2.1	构造描述	(242)
8.2.2	储层预测	(244)
第九章	关于“油储”研究的思考	(249)
参考文献		(251)
索引		(259)

第一章 前言

80年代中期以来,我国和世界发达国家石油天然气勘探面对日益复杂的地质勘查目标和直接找油气的挑战,都开始酝酿“油储地球物理学”(Reservoir Geophysics)相关内容的研究思路及地质目标的选择。1988年8月,美国勘探地球物理协会(SEG)和欧洲勘探地球物理学家协会(EAEG)联合资助召开了第一次油储地球物理研讨会,宣告了油储地球物理学已成为从勘探地球物理中脱颖而出的一门新的分支;从而引起国内外油气工业界和学术界的广泛关注,并立即形成一个热点研究领域,旨在于直接研究油气储层,力求在服务于油气勘探开发过程中发挥作用。

近10年来,我国各石油单位基于油气生产的迫切需求,普遍开展油气储层描述的研究工作。这也就为油储地球物理学在我国的发展提供了良好的社会背景、地质目标选择和实用化需求。我国地球物理学者,自1986年起联合物理学,应用数学,计算数学和地质学等方面的专家,不失时机地在国家自然科学基金委资助下立项预研,不谋而合地与大庆油田对全国相关研究力量及思路开展的调研同期进行。从而促成全国跨部门、跨学科的数十个研究集体和大庆油田的专家一起,于1989年5月在大庆油田聚会,共商在我国开展油储地球物理研究的产、学、研一体化的研究方案,并向国家自然科学基金委提出“八五”立项建议。经项目论证及审批后,国家自然科学基金委于1992年6月批准设立“陆相薄互层油储地球物理理论和方法研究”(简称“油储”)“八五”重大项目,并会同中国科学院、中国石油天然气总公司和大庆石油管理局对“油储”项目联合资助。

“八五”“油储”项目现已结题。无论从研究内容、意义、规模(涉及学科之多、研究队伍之庞大)看,还是从取得的成果、产生的社会影响看,该项目都堪称为一大的科研系统工程,并形成油气储集体地球物理分支学科的研究轮廓。油储项目执行的5年实践表明,国民经济建设重大关键问题的基础性研究是学术界和企业界的共同需求,科研项目是学术界和企业界沟通的一个重要渠道,学术界和企业界的紧密结合是促进理论研究更快向技术开发转化的重要条件,也促进了基础研究不断地向实用化迈进,以及“油储”项目课题的研究内容的不断完善。

1.1 油储地球物理学的提出

勘探地球物理学是随油气与煤炭等矿产资源,在地面没有露头的情况下,应用物理学的理论方法及技术进行地球内部探测的过程中,逐步发展并形成地球物理学的一门分支学科。半个多世纪以来它已在油气勘探中起到了不可替代的重要作用。自80年代后期提出的油储地球物理学是基于以下3个背景:

1.1.1 能源工业发展的需求

到目前为止,全世界大而简单的油气勘探已基本结束,若要进一步维持对油气增长的

需求,勘探目标则面临着更为复杂的条件,其中包括地表条件复杂(沙漠、冻土、森林和沼泽等),以及地下介质十分复杂(如断块、岩性、油气藏、风化壳及火成岩等特殊油气储集体)。面对,这样复杂的勘探目标,传统技术所依托的理论基础已无法满足。在技术急需更新的情况下,勘探的高投入加之其高风险性,令全球的油气经营者都渴望技术的大跨度进步。

预计本世纪末我国国民经济发展每年至少需 2.5 亿吨石油,也就是说每年应有 20 亿吨探明储量才有保障。因此,在勘探开发新区的同时,力求避免中晚期油气田过早衰竭也都需要更新勘探思路、方法和技术,这也就必然涉及传统勘探技术理论的一些根本问题。油储地球物理则着重从基础理论入手,以促进当代以复杂地质体为目标的勘探技术的发展,作为学科自身发展的基本动力。

1.1.2 相关学科发展已提供研究条件

科学进步对技术发展全过程的先导性促进作用已深得社会理解,而技术进步对学科发展的巨大推动则是新学科发展的背景条件。计算机技术 80 年代的巨大发展,已为油储地球物理的提出具备了付诸社会实践的可行性。

众所周知,叠前深度偏移的基本理论已于 20 年前提出,但其明显的社会效益则是近几年才显现出来的。究其原因有两点,一是计算技术的飞速发展提供了其实现的可能性;其二,在实践的过程中才可能不断地提出新问题,从而促进研究工作不断得以深化。尤其是近代数学物理方法也为地球物理问题的解决提供了在复杂条件下求出更精确解的条件。其中,非线性系统的研究成果、元胞自动机及耦合映像格子模型的提出和积分流形算法的出现等,都为地球物理问题进入油气勘探及储集体细节的评价,提供了可直接应用的数学物理基础。另外,地质理论也已从早先定性的模糊研究进入了定量的确定性的分析阶段,可以提供数字化的信息为地球物理技术的发展服务。总之,相关学科的进步都为油储地球物理学的发展提供了十分重要的条件。

1.1.3 学科发展的需求

地球物理许多研究工作有赖于资料观测条件和测得物理量的精度,并以少数物理参数为表征进行地球介质结构的推断。从因果关系看,可以说地球物理研究是由结果出发来推断原因的。也可以说地球物理的研究属于反问题的研究范畴。无怪乎,反问题的命题在地球物理研究中几乎是无所不在的。可是,实际研究工作是倒过来从假设地球介质模型出发,研究各种地球物理场的传播,而进行门类众多的正问题研究。最后以正问题的理论值与观测值逼近程度为基本判据而进行反演地球介质模型的研究。这样,正问题研究则构成了地球物理学理论研究的极为重要的部分。而反问题则相反。不论物理量及对象有众多类别与差异,地球物理反问题大都归结为最优逼近问题,反问题的结果也就终止于简化的(甚至假设的)物理参数模型。再而,传统地球物理反问题不论采用那种方式陈述,其在数学上都常表现为不适定的问题。显然,地球物理所研究对象的客观实在性,远不是简单的模型参数假定和与之相适应的观测技术所能包容的。经过多年努力之后,一些学者因跳不出传统反问题命题的弊病而改辕换辙另谋生计。更有一批人则不再囿于传统研究,进而思索我们历来习惯运用的地球介质模型本身到底对地球介质的地球物理场响应

能有多强的表达能力,也就是说致力于更深层次地寻求地球物理正问题本身的研究命题及方法。油储地球物理学也正基于此作为发展重要理论的出发点。这些问题的解决不仅是完善油储地球物理学的必需,也必将极大地促进勘探地球物理学基本理论的飞跃发展。

1.2 油储地球物理学研究目标及学科内涵

就研究学科的目标而言,油储地球物理学直接针对油气储集体,跨越从油气的储层评价、开采过程直至强化开采 3 个阶段。

基于此,其研究内容就不仅需要涉及油气储集体的空间位置及几何形态,而且还应给出和油气藏勘探与开发有关的储层参数及地层压力、温度等空间分布的图像。这样界定研究内容是既考虑石油勘探开采的地质需要,同时也估计到当前地球物理方法发展的可实现性。因此,油储地球物理与传统勘探地球物理的区别在于,学科研究范围域的外延大为缩小而内涵却扩展甚巨。可见,油储地球物理是在传统勘探地球物理传统理论和技术继承和发展。也就是说,油储地球物理学科的生成与发展是社会需求和生产力发展的产物,是油气科学技术发展新阶段的一个标志。

油储地球物理学的学科内涵,应涉及与油气储集体勘查及描述相关连的全部理论方法和技术系列,以及其它凡可用于油气储集体研究的各种深化的地球物理勘探方法及其高层次的综合。

“八五”“油储”项目的研究以合成孔径及相阵向量地震场观测为主要手段,结合其它地球物理方法、地质和油藏工程,对油储结构及物理参数进行静态描述和动态监测,为油气储量计算、储层描述及强化采油提供准确的资料,这也有利于促进油田采收率的大幅度提高。主要研究内容包括:储层岩石物性研究,薄互层测井方法研究和应用,高分辨反射地震研究,多波多分量地震采集处理和解释方法研究,跨井和垂直地震剖面成像理论和方法研究,地震采集处理精度分析控制研究,油储综合解释系统研究。

上述研究须解决以下关键科学问题:

- (1) 地震及测井参数与储层参数之间的定量关系和规律;
- (2) 建立利用钻孔的测井资料提高反射地震资料处理分辨率的理论和方法;
- (3) 利用多分量资料研究储层参数;
- (4) 利用跨井及地表地震资料等大幅度提高储层描述分辨率。

综上所述,油储地球物理学具有以下 4 个特点,即地质目标明确、多学科高层次综合、理论与实践的统一和科研与生产的紧密结合。

1.3 油储项目地质目标的选择

前已述及,油储地球物理学的研究是直接针对油气储集体,而油气储集体则有复杂断块碳酸岩、礁体和古潜山裂隙孔洞等多种类型。显然,对不同的储集体,研究的核心内容必各有侧重,技术方法也相距甚远。由此可见,油储地球物理学的相关技术体系自然也是十分丰盛的。在我国的具体条件下,发展油储地球物理学,若单纯地为建立学科体系而开展研究,则势必因面面俱到而难以奏效。“油储”项目针对我国地质任务且需求迫切的陆

相薄互层型的油储为起点,着眼于现实国民经济发展的迫切性和可行性,而选择了目前的有限地质目标。

我国东部地区主力油气田都面临持续稳产的迫切需要。这些油气田基本上都属于或接近于陆相薄互层油气藏类型,即使对西部新区开发而言,也有很强的可比性。因此,“油储”项目选择陆相薄互层油气藏作为我国建立油储地球物理学基本体系的典型储集体,既有利于学科建设的发展,也可直接为我国石油工业发展作出有益的贡献。

近 30 多年来,我国已经对这类油气田的勘探开发积累了诸多成功的经验,获得了丰富的地质认识,相应地在地球物理勘探方法上也有长足的进步,为建立油储地球物理学的学科体系提供了客观的需求和实现的可能性。

1.4 陆相薄互层油储的地质特征

目前,我国开创的陆相生油理论是具有世界影响的重要基础理论。它为我国石油工业的发展奠定了理论基础,也为油储地球物理学的发展提供了坚实的背景条件。

陆相薄互层油气藏具有自身的特点。其储层属湖相—三角洲相—河流相沉积砂体。其中河流相砂体具有单层厚度薄,横向延展面积小且泥质含量相对较高的特点。此外,河流相砂体在垂向上大部呈薄互层状,即河流相单砂体与河间洼地泥质沉积出现交互叠错的现象。这也就是油储项目所指的薄互层储层的基本沉积特征。松辽盆地(即油储项目研究的目標区)中的三肇凹陷和古龙凹陷都是典型的陆相薄互层岩性油气藏的分布区。三肇凹陷目前主要勘探的储层属河流相砂体型。其单层砂体的平面展布,长轴方向为几公里,短轴方向为几百米,而厚度一般为 2~10m,最薄的仅 1m 左右。然而,该地区的薄互层层组厚度一般为 20~30m。其储层条件,孔隙度一般为 17% (大庆长垣一般为 25%),渗透率一般为几至几十毫达西¹⁾ (大庆长垣一般为几百至上千毫达西)。而古龙地区油气主要储层为高泥 (20%) 高钙 (15%) 低渗透薄互层,储层非均质性强,单砂层厚度多小于 2m。

“油储”项目选择三肇及与其有相类似特点的地区,并要求对储层应能提供高精度的刻划;对储层的定量描述不仅要给出几何形态,更重要的是储层参数图像。也就是说,在大庆油田的大面积岩性含油区内,寻找相对高丰度的高产区块。这既是油储项目的研究难点,也是大庆稳产的迫切需求。

针对油储项目上述地质目标的特点,油储项目相应地开展了以下研究:

(1) 通过岩石物性测定,研究我国陆相薄互层油储参数和地球物理参数的规律,并建立相应数据库,为地震和测井的结果解释提供物理基础;

(2) 建立薄互层油气综合测井正反演的理论、方法和解释系统,为求得准确储层参数和了解薄互层的结构特征提供手段,从而为地震高分辨处理解释和井孔之外储层的追踪与描述,提供准确的基础资料和约束条件;

(3) 建立以纵波方程为基础的高分辨地震处理解释理论和方法,并利用地震测井资料反演储层波速或阻抗,用以描述井间储层;

(4) 建立矢量地震处理解释理论方法体系,用多分量资料研究储层饱和度和渗透率;

1) 达西 (D) 为非法定计量单位, $1D = 9.86923 \times 10^{-1} \mu m^2$

(5) 建立包括垂直地震剖面、跨井和地面反射地震层析成像的理论体系和方法技术,以求大幅度提高储层描述的分辨力;

(6) 研究反射地震采集、处理各环节精度控制,以最大限度地提供反射地震资料的质量;

(7) 研究并提供油储描述的综合人机交互解释系统。

1.5 陆相薄互层油储研究成果

通过3年预研和5年研究攻关,在油储项目500多名科学家和大庆科技人员的共同努力下,已发表400余篇学术论文,提交121项实用化成果报告。结合研究工作需要,培养博士51名,硕士152名。上述成果于1996年9月24~26日在北京中国科学院地球物理研究所进行展示,受到了学术界和石油行业专家学者的高度赞扬。其主要成果是:经过大量的科学测试,对天然条件下大庆油气储层参数与地球物理参数之间的定量关系已基本查清,这就为利用地球物理方法探测储层位置、空间变化和含油气性打下了基础;利用综合地球物理测井新技术,能划分出厚度仅为30cm的油气储层,并为确定储层渗透率提供了新的方法,其中水淹层测井解释已超过1000口井;利用三维偏移和叠前深度偏移等新方法,正确地揭示了复杂地质构造的面貌,特别是非线性地震反演理论的建立使地面反射地震追踪大庆油气储层的分辨率提高到5m,这就使得利用地面资料描述陆相薄互层的内部结构成为可能,其中微分方程波阻抗反演在大庆已处理10000km以上剖面;在储层地震参数空间变化研究上,建立了多波勘探的反演、偏移理论和方法及相应的地震处理解释系统;储层描述的地震和测井系统软件已经投入使用。

围绕大庆油气勘探开发的实际问题进行的理论与方法研究,具有难度大和方向明确的特点,促进了科学研究与创新。从“油储”项目已发表的学术论文看,大部分是这个领域的研究前沿,具有较高的学术价值。其中混沌反演理论、偏微分方程反演、速度分析和叠前深度偏移、元胞格子固体的地震合成、三维地震波场可视化、弹性波方程反演与偏移、广义拉当变换层析成像新方法等均具国际先进水平。

第二章 岩石物性测量和规律性研究

众所周知,地球物理勘探是刻画油气储集体的基本手段,由其测得的物理量所构成的参数化图像则是复杂地层中油气层及状态的直接反映。一般讲,建立观测物理学与储层参数的对应关系是通过间接途径实现的。问题在于对这二者对应关系的认定程度,必然直接影响对地球物理探测结果的储层解释能力及效果。应该说,通过地球物理测井尽管已可详尽地提供井孔区域岩性及地层的详细地球物理参数及储层参数,且不论由测井获得这些参数时,尚需对井孔本身各项影响进行校正。现已表明,地球物理测井所提供的地层岩性信息、地球物理参数与储层参数的对应关系,已是地球物理与地质结合,由地面测得物理量推断储层参数的有效途径。虽然,由地面测得的物理量通过上述方式直接移用于进行储层描述的方式及可信程度尚待证实,而地表条件与井中温压条件的差异对物性参数的影响本身就值得认定,何况对有限分布的钻探井本身,其各自测得的地层特性的空间展布及连通性也都是令人关注的重要问题。基于此,理应通过实验室的岩样测量,以作为井与地面测得参数连接关系的补充,以便于建立地面地球物理与测井获得信息的关系和规律。

岩石实验表明不同类型的储层环境,其岩样储层参数的测定值及随地层温度压力的变化规律有明显的差异。一般讲,用某油气储层岩石物性实验获得的经验公式,若视为一般性的规律而移用于其它区域,则应慎之又慎。当然,若直接依据地表温压条件的测量结果,套用的描述储层物性则更是不可取。

就油储项目而言,本项研究的中心内容是研究大庆目标区储层条件下岩石物性精细测量的原理、方法技术及装置,旨在于借以对目标区一定数量钻探取芯的岩样,进行地球物理及储层参数变化规律的研究并建立相应的对应关系。从而,利用岩样物性温压条件下的变化规律,配合测井资料,为提高地面勘探资料的处理及解释水准提供坚实的物理基础,以期提高储层定量刻划的可信度。本项研究也服务于油气勘探和开发的不同阶段,使得大量常温常压下测定的物性参数,可借助于相应的变化规律来推断实际储层的物性参数。

2.1 储层条件下岩石油储参数的测定和规律

油储参数主要是岩石的孔隙度、渗透率和饱和度,储层条件是指在模拟地层温度和压力的条件下进行的测量,并摸清油储参数随温压的变化规律。我们主要研究孔隙度和渗透率这两个最主要参数的变化规律,而饱和度与温压的关系则可以根据岩样孔隙度随温压的变化规律及孔隙流体随温度而膨胀收缩的规律计算求得。

2.1.1 储层条件下岩石孔隙度的测量和规律

孔隙度 是指岩石中孔隙的体积与岩石的总体积之比。能彼此相联通,并一直连

通到岩石表面的孔隙称为连通孔隙,反之称为封闭孔隙。对于石油可采储量的估算和油田的开发生产来说,人们更关心的是连通孔隙度,即指岩石中连通孔隙的体积与岩石的总体积之比。下文阐述的也正是连通孔隙度,并简称孔隙度。

孔隙度的测量原理 孔隙度的测量分为饱和流体法和气体法。饱和流体法是分别对干燥岩样、饱和流体岩样和浸入同质流体的饱和流体岩样的重量进行测量,由计算求得的岩样总体积和孔隙体积,得到岩样的孔隙度。煤油因其表面张力小,易于浸透到岩样极小的孔隙中去,故一般采用它作为流体介质。由于流体易与岩样孔隙中的泥质矿物成份,甚至与岩样的固体颗粒骨架发生作用,因此目前在石油行业已不再使用此种方法。气体法是基于波义耳定律的测量方法,将高压气体参比室与样品室相联通,测量连通前后气体压力的变化,就能算出岩样的孔隙度。一般采用氦气作为工作介质,因为它的化学性能稳定,渗透性好。

温压条件下油储岩样孔隙度的测定和规律 所用岩样主要是从大庆油田钻井中取出的砂岩岩样。工作中我们也对新疆塔里木油田油井岩样的孔隙度和渗透率进行了测量与研究(伍向阳等,1995a)。对岩样在不同温压下孔隙度的测量数据,采用下列公式进行多参数拟合:

$$\varphi(P, T) = \varphi_0 \left[\left(\frac{P}{P_1} \right)^a + b \left(\frac{T}{20} - 1 \right) \right], \quad (2-1)$$

式中 $\varphi(P, T)$ 为有效压力 P (单位 MPa) 和温度 T 下的孔隙度; φ_0 为大气压和常温 (20℃) 下的孔隙度; P 为有效压力 (单位 MPa), 即施加在岩样周围的均匀压力与孔隙中流体压力之差, 以下简称为围压或压力, T 为温度, P_1 为大气压。

拟合的结果表明, 砂岩的孔隙度与压力呈幂指数关系, 与温度为线性关系 (图 2-1)。且所测定的压力和温度系数 a 和 b 数值稳定, 离散度不大。用上述公式可使 a 和 b 均为无量纲的量, a 为幂指数, b 为温度每升高 20℃ 孔隙度变化的百分比。对所测的某矿岩岩样, 得到系数 a 为 -0.025 左右, 而系数 b 为 -0.026 左右。也就是说孔隙度随压力的增加而呈幂指数减小, 随温度的增加呈线性减小; 温度每增加 20℃, 所测砂岩岩样的孔隙度相对变化量为减小 2.6% 左右。由于随着地层深度的增加, 压力和温度都大致呈线性增加, 因此岩样在地层的实际温压条件下的孔隙度要小于目前油田在常温常压下对岩样测定的

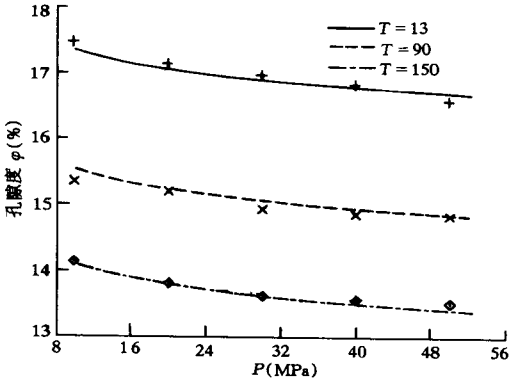


图 2-1 砂岩岩样孔隙度与压力及温度间的关系的测量数据和拟合曲线
结果表明孔隙度随压力增加呈幂指数下降关系, 随温度增加呈线性下降

孔隙度。且温度对孔隙度的影响要大于压力的影响。由于随着围压的增加, 砂岩的孔隙会产生不同程度的闭合, 自然条件下岩样的孔隙度必会减小。我们认为温度对孔隙度变化的影响可能与岩石内部的泥质成分, 特别是粘土矿物有关, 这还有待于今后进一步工作的