

测井低对比度油层 成因机理与评价方法

欧阳健 毛志强 修立军 石玉江 李长喜 等著

石油工业出版社

测井低对比度油层 成因机理与评价方法

欧阳健 毛志强 修立军 石玉江 李长喜等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从岩石物理理论与成因机理研究出发,系统研究了油藏中电测井的响应,建立测井解释油气层的模型与方法,并进一步总结了它们的分布规律与油藏模式。

对于构造油藏与低孔渗砂岩的岩性油藏分别建立了油藏中饱和度—电阻率分布规律,在此基础上,建立黏土附加导电与电化学束缚水及钻井液侵入油、水层的系统岩石物理模型与数值分析,及相应解释与定量评价方法。介绍了正在发展的低渗透砂岩复杂孔隙结构与电性质关系研究,包括具微裂缝的低渗透砂岩电各向异性双侧向测井的响应与三维正、反演计算方法,西部山前泥岩电测井反映挤压地应力与储层发育的岩石物理研究认识。

本书可供石油勘探技术人员及大专院校相关师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

测井低对比度油层成因机理与评价方法 / 欧阳健等著.
北京:石油工业出版社,2009.6
ISBN 978-7-5021-6388-4

I . 测…

II . 欧…

III . 油气测井—油气藏—地质解释—研究

IV . TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 190118 号

测井低对比度油层成因机理与评价方法

Cejing Diduibidu Youceng Chengyin Jili Yu Pingjia Fangfa

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) 64523736 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

2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:23

字数:587 千字 印数:1—2000 册

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

序

据全国油气资源评价结果统计到 2000 年底, 中国陆上剩余油气资源主要分布在中低丰度岩性地层油气藏领域, 岩性地层油气藏的石油量占剩余资源总量的 58%, 天然气占剩余资源总量的 52%。低丰度岩性地层油气藏成藏机理复杂, 油气富集规律不清, 尚未建立有效指导勘探实践的地质理论。由于岩性油气藏勘探难度大, 急需创新与开发有效的勘探技术与方法, 包括相适应的测井技术、装备与对岩性地层油气藏勘探目标的岩石物理研究及油、气层的测井识别与评价方法。

进入高成熟精细勘探阶段渤海湾盆地, 在各富油凹陷的中浅层低幅度圈闭、复杂断裂带等存在较多测井识别困难的低阻油层, 西部各油田亦发现规模性低阻油层, 这些, 都给测井技术和解释提出了挑战。

“十五”期间, 中国石油组织了《岩性地层油气藏地质理论与勘探技术》科技项目攻关, 在岩性地层油气藏区带与圈闭、四类盆地油气富集规律、中低丰度岩性地层油气藏大面积成藏、系统建立勘探程序与技术系列以及实现大规模勘探和工业化应用等方面, 都取得了地质理论与技术的突破与创新, 中国石油的岩性地层油气藏在“十五”期间取得了重大发现。

1997 年, 中国石油在渤海湾地区开展了低阻油层的测井技术攻关, 2000 年之后继续组织渤海湾、松辽盆地及西部有关各油田, 开展了低阻油层与岩性油藏的低孔渗砂岩油层的测井岩石物理研究与解释方法的攻关。各油田与有关单位经过近十年的努力, 取得了较大成绩与创新。《低阻油气藏测井识别与评价方法研究及其应用》获得 2006 年中国石油天然气股份有限公司技术创新一等奖, 低孔渗砂岩油层的测井岩石物理研究与解释方法的攻关也取得重要进展。

经过近十年的持续攻关, 中国石油对低阻油层与低孔渗砂岩油层测井解释具有如下特点: 以油田重点勘探区块为攻关的目标与依托、发挥油公司优势到从油藏出发开展多学科结合的成因机理研究技术路线、发挥学科带头人与各油田技术骨干的积极性、坚持长年攻关与技术积累。在中国石油勘探与生产分公司有效的组织下, 各油田研究院与中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院为主的攻关做到“协同共享与持之以恒”。由此, “测井低对比度油层”攻关取得了创新的技术与地质成果:

(1) 应用毛管压力理论, 在物性较好砂岩的构造油藏中建立了饱和度—电阻率分布规律, 即驱替力—饱和度(电阻率)关系, 并明确了规模低阻油层分布在驱替力小于 0.05MPa 的低幅度圈闭内的油藏地质背景。

(2) 对泥质砂岩黏土附加导电与电化学束缚水进行科学与系统的岩石物理实验研究, 并结合低阻油层的实践深入开展应用。

系统研究钻井液侵入油、水层的岩石物理模型、数值分析与实测的电测井响应变化规律, 结合盐水钻井液与淡水钻井液侵入油、水层的测井实践, 建立相应识别与定量评价的岩石物理研究模型和解释方法。

实测与研究表明, 泥质砂岩中蒙脱石等黏土与钻井液侵入油、水层对电测井影响之大,

超出人们的一般认识。

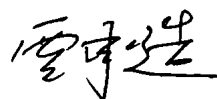
(3) 对低孔渗砂岩岩性油藏,应用生油岩排烃与运聚理论,在松辽盆地与鄂尔多斯盆地发现了排烃剩余压力(与油源层运移距离相关)与油层饱和度(电阻率/孔隙结构)密切相关。基本明确了剩余排烃压力(距油源层运移距离)控制低孔渗砂岩油藏中低对比度油层的分布范围。

(4) 正在开展的低孔渗砂岩复杂孔隙结构与电性质关系的岩石物理实验与三维数值模拟研究,包括具微裂缝低孔渗砂岩电各向异性双侧向测井响应与三维正、反演计算方法,已取得重要进展。这为进一步更准确地评价复杂孔隙结构低孔渗砂岩油层的饱和度奠定了可靠的基础。此外,西部山前泥岩电测井反映挤压地应力与储层发育的岩石物理研究,都取得了较好的进展。

(5) 立足松辽南部、渤海湾与鄂尔多斯等西部盆地,初步建立了低阻油藏与低孔渗砂岩油藏低对比度油层的测井饱和度典型模式与分布规律,有利于提高测井对低对比度油层解释与评价的能力,以及勘探预测能力。

本书从低对比度油藏成因机理、油藏模式研究出发,结合大量实践资料总结了低阻油层与低孔渗砂岩油层测井低对比度响应规律并给出了宝贵的典型实例,在20世纪90年代推行的“岩心刻度测井”精细测井解释方法基础上进一步系统提出岩石物理研究型的测井解释方法与用好先进、适用的测井技术。本书反映了这一阶段攻关的重要进展。多学科结合的岩石物理研究是发展中国石油天然气股份有限公司核心技术的基础之一,他们的做法与成果应该提倡。

希望从事解释与评价油气层的技术干部,以及勘探领域的地质与油藏研究的技术干部仔细了解和阅读本书。



2007年5月28日

前 言

中国石油天然气总公司勘探局（2000年之后为中国石油天然气股份有限公司勘探与生产公司）组织渤海湾、松辽及西部有关各油田，自1997年至今开展了低阻油层与低孔渗油层的测井岩石物理研究与解释方法的攻关。前者指以中浅层低幅度圈闭的粒间孔隙为主砂岩油、水层电测井差别小，甚至比值小于2，测井识别油层困难。后者指前古近系或前白垩系构造—岩性与岩性油藏的复杂孔隙结构低孔渗油层与水层、低产油层干层的电测井、孔隙度测井之间的差别小，且水层与干层的电测井数值可达 $10 \sim 30 \Omega \cdot m$ ，测井识别油层困难。本书用“低对比度油层”概括上述两类不同的勘探目标，目前，已取得很大成果与进展。在近十年的持续攻关与推广的实践中，我们深感它有如下特点：

（1）以勘探目标为攻关的出发点，同时，也是要求见地质效果的归宿。

（2）测井岩石物理研究，即成因机理研究是解释攻关的基本技术路线。

（3）岩石物理研究决非简单理解为实验研究，它是针对目标油藏开展多学科结合的研究，当然，对测井解释来讲，更要突出油层电性质与电测井响应的独特点。首先，它需要从油藏地质理论出发，大量观察测井响应及地质、测试等结果，并总结其规律。岩心样品的各种科学严密的实验方案与方法以及科学的分析与研究必不可少，最终，落实到低对比度油层成因机理分析。

（4）在“八五”、“九五”甚至更前的中国石油测井岩石物理研究与解释的技术成果基础上开展攻关，注意技术积累。

（5）按低阻油层与低孔渗油层两个课题分别组织渤海湾、松辽与西部攻关，每一题目4—5家油田，有能力的大学与中国石油勘探开发研究院都参加，定期与经常内部交流，技术与资料共享。同时，跟踪国外岩石物理研究水平。达到“既明确目标区块，又能相互交流，开阔视野并尽可能把握技术方向”的目的。

（6）每一课题都坚持攻关5年以上，并适时转为推广与深入攻关阶段。这种“目标明确、技术路线正确并持之以恒”是取得成绩的重要保证。

简要回顾中国石油测井解释的发展：（1）20世纪60年代以前，用横向测井（非聚焦电测井）求准地层电阻率为主（大庆长垣、胜坨、孤岛等油田）；（2）70—80年代，聚焦电测井—孔隙度测井，基本直接用聚焦电测井视电阻率，并用体积模型应用计算机定量解释孔、渗、饱等参数（渤海湾地区各油田如曙光、任丘、孤东等）；（3）90年代，采用质量可靠的数控测井，应用关键井岩心，包括毛管压力资料应用、半渗透隔板法岩电联测实验以及深入研究钻井液侵入的影响等，开展测井精细解释与饱和度评价，即岩心刻度测井方法（西部：塔里木、新疆、川东等油气田，1996年之后推广）；（4）2000年以来，采用高精度的数控测井与成像测井，针对低幅度圈闭—低阻油层，低渗透砂岩岩性油藏的测井解释攻关。立足勘探目标成因机理的岩石物理研究与测井饱和度分布规律，开展多学科结合的测井评价已取得较大进展（各油田中浅层的精细勘探与前古近系的低渗透砂岩油藏为代表）。目前，非均质更为严重的复杂岩性与复杂孔隙结构（次生的孔洞缝）的碳酸盐岩（塔里木下古生界为代表），火山岩（新疆、松辽深层为代表）的岩石物理研究与测井评价

攻关开展不久。

总结近十年的低阻油层与低渗透砂岩岩性油藏测井解释的攻关，低对比度油层测井解释与评价取得了下述创新的技术与地质成果：

(1) 对物性较好砂岩的构造油藏，在毛管压力理论指导下建立了油藏中饱和度—电阻率分布理论，即驱替力—饱和度（电阻率）关系，并明确了低阻油层分布在驱替力小于 0.05MPa 的低幅度圈闭内。在此基础上，建立黏土附加导电与电化学束缚水及钻井液侵入油、水层的系统岩石物理模型与数值分析，及相应识别与定量评价的解释方法。初步估计，各油田老井复查与精细勘探的规模低阻油层探明地质储量达到 $4 \times 10^8 \sim 6 \times 10^8 \text{t}$ 。

(2) 对低孔渗砂岩的构造—岩性油藏，应用生油岩排烃与运聚理论，在松辽盆地与鄂尔多斯盆地发现了排烃剩余压力（与油源层运移距离相关）与油层饱和度（电阻率—孔隙结构）密切相关。基本明确了低对比度油层在排烃力（距油源层运移距离）控制低孔渗砂岩油藏的分布范围。在此基础上，正在发展复杂孔隙结构与电性质关系研究，包括较成熟的微裂缝低孔渗砂岩电各向异性双侧向测井响应与三维正、反演计算方法，并需改进立足于均匀粒间孔隙砂岩的阿尔奇公式岩电关系与钻井液侵入等岩石物理研究及测井解释方法。统计大庆油田、吉林油田 2001—2005 年探井各 1000 余试油层（段）的成功率，分别由 1995—2000 年的 30%、17% 提高到 38% 与 30%，表明“十五”期间，测井技术与解释能力提高后为勘探效率作出了重要贡献。

(3) 在构造油藏中饱和度—电阻率分布理论与构造—岩性油藏中排烃压力（与油源层运移距离相关）与油层饱和度（电阻率—孔隙结构）关系的指导下，立足松辽南部、渤海湾与鄂尔多斯等盆地初步建立了低阻油藏与低对比度油藏的典型模式与分布规律，有利于低对比度油层解释与评价，以及勘探预测。

本书是作者在参加中国石油组织的科研与生产应用攻关中理论与实践经验的阶段总结，力图从岩石物理理论与机理研究出发，建立测井解释油气层的模型与方法。由于作者水平所限以及中国石油组织的攻关还在进行，本书的目的是有助于攻关的深入和持续，并希望更多有志的岩石物理研究者去发展。我们要感谢近十年来各油田及有关单位，包括中国石油天然气股份有限公司勘探生产公司的技术与管理干部的同心协力，本书包含了他们的努力。特别要提到塔里木油田、新疆油田和冀东油田，他们对塔中志留系低渗透油层复杂孔隙结构与电性质及陆梁白垩系、高尚堡等新近系低阻油层黏土阳离子交换量与电化学束缚水的科学设计与岩石物理实验是十分成功的。中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司已于 2006 年编写了一部内容丰富与实例翔实的《低阻油气藏测井识别评价方法与技术》培训教材，本书将是它的补充。考虑到本书的完整性，前面五章有部分内容与培训教材存在重复。

本书第一章第一、二、三节由欧阳健、李长喜编写，第四节由修立军编写；第二章由毛志强编写；第三章由欧阳健、李长喜编写；第四章由毛志强、欧阳健编写；第五章由欧阳健、毛志强、李长喜、石玉江编写；第六章由李长喜、修立军、石玉江、欧阳健编写；第七章由修立军、石玉江、欧阳健编写；第八章第一节由毛志强、李长喜编写，第二节由欧阳健、李善军编写；第九章由欧阳健、宋惠珍、王贵文、李军编写。全书由欧阳健统稿。

目 录

绪言	1
第一章 毛管压力理论分析油藏中饱和度(电阻率)分布规律	4
第一节 毛管压力理论分析油藏中驱替力与饱和度(电阻率)	4
一、毛管压力理论	4
二、低幅度油藏中电测井反映饱和度(电阻率)分布实例	11
第二节 中国 I 类砂岩储层油气田饱和度(电阻率)与驱替力关系	17
一、中国 I 类砂岩储层油气田饱和度(电阻率)变化实际观察研究	17
二、低幅度油藏中有效驱替力与规模低阻油层形成分析	19
第三节 构造油藏中饱和度—电阻率分布理论在低阻油层解释中的应用	21
一、规模低阻油层分布区域研究并指导测井识别低阻油层	21
二、建立低幅度油藏饱和度分布与钻井液侵入影响电测井的正演模型与评价方法	31
第四节 低渗透岩性油藏的油气排烃力与油层饱和度(电阻增大率)研究	32
一、烃源岩异常高压与油气的二次运移与聚集	32
二、烃源岩剩余异常高压与油层含油饱和度(电阻增大率)分布模式	35
第二章 泥质砂岩中黏土附加导电性质与电化学束缚水研究	39
第一节 黏土矿物的基本性质	39
一、黏土矿物的基本结构	39
二、黏土矿物的电荷	40
三、阳离子交换性吸附	40
四、阳离子交换容量	40
五、扩散双电层理论	41
第二节 黏土矿物导电性质及泥质砂岩导电模型	42
一、黏土矿物的附加导电性质	42
二、泥质砂岩导电模型	43
三、国内关于黏土附加导电作用的实验研究成果	47
第三节 低矿化度条件下蒙脱石等黏土矿物的电化学束缚水	50
一、多矿化度液体相对渗透率实验	50
二、多矿化度半渗透隔板毛管压力实验	50
三、多矿化度核磁共振测井横向弛豫时间 T_2 实验结果	52
四、具有扩散双电层的毛细管渗流特性分析	53
第四节 测井解释黏土附加导电与束缚水	54
一、指数 m^* 的确定	54
二、指数 n^* 的确定	55
三、 B 值的确定	55
四、 Q_v 值的确定	55

五、Waxman-Smits 模型评价低阻油气层应用实例	57
六、岩石束缚水饱和度与地层水矿化度的关系以及与粒度的关系	59
七、低孔低渗油气层不动水(束缚水)饱和度评价方法及推荐图版	60
第三章 钻井液侵入油气层电测井响应特征研究	62
第一节 钻井液滤液侵入油、水层机理研究及电测井响应数值模拟	63
一、钻井液侵入油、水层机理研究及电测井响应数值模拟	63
二、钻井液侵入储层的径向电阻率分布特征	67
三、低阻环带简化电阻率剖面模型	70
第二节 钻井液侵入油、水层电测井响应特征研究	70
一、淡水钻井液侵入油、水层双感应测井、双侧向测井响应特征研究	70
二、盐水钻井液侵入油、水层双侧向测井响应特征研究	82
第三节 钻井液侵入油气层电测井岩石物理经验校正	92
一、开展低幅度圈闭—低阻油层成因分析与钻井液侵入影响电测井的岩石物理研究	92
二、开展低幅度圈闭—低阻油层的测井识别方法	92
三、在岩石物理研究的基础上建立钻井液侵入校正方法	92
第四章 油气层饱和度等储层参数定量评价方法和技术	94
第一节 岩心刻度测井建立解释模型与方法	95
一、前期研究与可行性分析	95
二、测井解释模型建立	96
三、测井计算储层参数的成果检验	99
四、应用实例与效果	100
五、含气砂岩的测井孔隙度模型	109
第二节 粒间孔隙砂岩油层与孔隙性灰岩测井饱和度评价简介	115
一、评价油层含油气饱和度的几种主要方法	115
二、测井解释饱和度方法	116
三、测井解释饱和度应用实例与效果	122
四、储量参数中对油层有效厚度的主要影响因素研究	125
第三节 测井解释的体积模型	129
一、孔隙度体积模型	129
二、泥质含量模型	131
三、渗透率统计模型	133
四、最优化方法计算储层参数简介	138
第五章 低阻油层的测井识别与评价方法	140
第一节 盐水钻井液侵入形成低幅度—低阻油层的测井识别与评价	140
一、盐水钻井液侵入的低阻油气层成因机理分析与岩石物理研究	141
二、盐水钻井液侵入低幅度—低阻油层测井识别方法	144
三、盐水钻井液侵入低幅度—低阻油气层测井定量评价方法	149
第二节 淡水钻井液侵入形成低幅度—低阻油层的测井识别与评价	152
一、淡水钻井液侵入的低阻油气层的成因机理分析与岩石物理研究	153
二、淡水钻井液侵入低幅度—低阻油层的测井识别方法	158

三、淡水钻井液侵入低幅度—低阻油层的测井定量评价方法	160
第三节 蒙脱石等黏土形成低幅度—低阻油层的测井识别与评价	163
一、蒙脱石等黏土形成低阻油层的岩石物理研究	163
二、蒙脱石等黏土形成低阻油层的测井识别方法	165
三、蒙脱石等黏土形成低阻油层的测井定量评价方法	169
第四节 天然水淹油层的测井识别与评价	172
一、测井解释 TZ4 油田天然水淹油藏	172
二、测井解释 X 区块 AG 组 1—2 油组天然水淹油藏	176
第六章 低孔低渗油层岩石物理与电性研究	180
第一节 低孔低渗储层复杂孔隙结构分析与电性研究	180
一、低孔低渗复杂孔隙结构砂岩油层测井低对比度特点	180
二、低孔低渗油层的复杂孔隙结构分析与储层分类	183
三、国内外研究低孔低渗砂岩及复杂孔隙结构储层岩电特征及进展	193
第二节 低孔低渗复杂孔隙结构储层电学性质数值模拟	212
一、国内外数值模拟方法简介	212
二、基于复杂孔隙结构的地质模型、导电模型建立和混合介质电性的数值计算方法	213
三、数值模拟计算结果检验	214
四、计算结果分析	215
附录 1 粒间孔隙等球形颗粒含水纯砂岩的电学性质计算	219
附录 2 Maxwell—Garnett (M—G) 模型—低频电流场的双重孔隙介质的简化模型评价	220
附录 3 裂缝—粒间孔隙双重孔隙介质电导率模型 (Rasmus 理想模型) 评价	221
附录 4 混合介质电学性质的时域有限差分计算方法	222
附录 5 塔里木油田与吉林油田低渗砂岩样品半渗透隔板法岩电实验与常规实验对比	225
第七章 低对比度油层的油藏模式与低孔渗油层测井解释方法	229
第一节 低幅度圈闭—低阻油层的油藏分布模式	229
一、较大构造油藏中规模低阻油层的分布模式	230
二、低幅度油藏中低阻油层的分布模式	230
第二节 低渗透构造—岩性和岩性油藏模式及分布	239
一、吉林油田低渗透岩性及构造—岩性油藏中低对比度油层的油藏模式	239
二、长庆油田低渗透岩性油藏中低对比度油层的油藏模式	242
第三节 岩性油藏的生油岩排烃力与低孔渗复杂孔隙结构油层的测井解释	245
一、分地区与油层组按孔渗性质与孔隙类型对砂岩油层分类解释方法	246
二、岩性油藏生油岩排烃力—饱和度 / 电阻增大率 (复杂孔隙结构) 模式的研究	261
三、岩性油藏低孔低渗复杂孔隙结构油层的测井解释方法研究	266
四、低孔低渗复杂孔隙结构油层测井仪器适应性研究	269
第八章 低孔渗油层核磁共振测井与双侧向测井解释方法	281
第一节 复杂孔隙结构的低孔低渗油层核磁共振测井解释方法研究	281

一、利用核磁共振测井资料进行储层孔渗性质分类	281
二、核磁共振测井在低孔低渗砂岩中有利储层分析	282
三、核磁共振测井评价岩石孔隙结构的理论基础	284
第二节 裂缝性灰岩与裂缝性低孔渗砂岩油层的双侧向测井响应研究与解释方法	289
一、裂缝性灰岩的双侧向测井定量解释简介	290
二、裂缝性砂岩的地层电各向异性的地质模型和电导率模型研究	296
三、裂缝性砂岩的双侧向测井定量解释	300
第九章 山前电测井解释挤压应力与储层的关系	309
第一节 山前局部构造与挤压应力关系简述	309
一、构造应力场概念与分类	309
二、构造应力场定量分析方法	313
三、构造应力场分析的地质模型	314
四、构造应力场的数值模拟与定量分析	315
第二节 复杂构造带灰岩和泥岩电阻率与声速反映挤压应力	315
一、局部挤压带内碳酸盐岩层段的电阻率与应力分布	315
二、中国西部山前挤压构造带泥岩层段的电阻率、声波时差与应力分布	321
第三节 山前泥岩电阻率反映挤压应力机理与定量评价探讨	326
一、泥岩性质研究	326
二、泥岩黏土矿物的性质	327
三、泥岩黏土矿物的导电实验研究	329
四、山前挤压地应力与泥岩导电性的初步认识	332
五、塔里木盆地测井计算地应力的统计模型	333
第四节 山前挤压地应力与储层发育的关系	338
一、塔里木盆地库车山前挤压地应力与砂岩储层发育的关系	339
二、吐哈盆地、柴达木盆地挤压地应力与砂岩储层发育的关系	339
三、复杂构造挤压带碳酸盐岩储层与地应力(邻近灰岩测井电阻率)的关系	342
附图	350
参考文献	353

绪 言

20 世纪 90 年代开始,我国石油勘探目标发生了很大变化。随着低幅度的构造—岩性油藏甚至岩性油藏的广泛勘探,中国石油平均每年的低孔低渗油层(孔隙度小于 15%、渗透率小于 50mD)约占当年新增石油储量 60% 以上,它主要分布在松辽盆地白垩系、西北地区的白垩系、侏罗系与古生界及渤海湾深层古近系等地层。因其含油饱和度相对较低,加之复杂的孔隙结构与钻井液侵入对不同电测井的影响各异,造成各种电测井与孔隙度测井对于油层、油水同层、水层、低产油层与干层的响应差别(即对比度)明显减小,甚至无法区别,测井识别与评价它们比较困难。可能漏失了油藏,同时也增大了无效的试油工作量。90 年代,从试油成果宏观分析,各油田低孔渗油层勘探中每年试油获得工业油流的成功率少数较好的可达 30%,差的则小于 20%,可见,其评价难度较大。1999 年至今,中国石油组织了主要油田进行生产性攻关,提高了技术装备升级换代与人员的岩石物理研究能力与素质,已见明显成效,例如“十五”期间,松辽盆地“萨、葡、高层组”的探井试油成功率已提高到 30%(吉林油田)与 38%(大庆油田),长庆油田为 38% 左右,但是,仍存在需要提高的空间。对于松辽盆地孔渗更差的扶—扬油层组与外围盆地的勘探,仍存在更多困难。

与此同时,渤海湾盆地已进入高成熟精细勘探阶段,在各富油凹陷中,复杂断裂带、构造岩性与岩性油藏等已成为主要勘探目标。近十年,中国石油仍持续平均每年获得探明石油地质储量 1×10^8 t 左右,油藏规模日益减小、个数明显增加。实践令我们认识到,渤海湾盆地特别在中浅层存在为数众多的低阻油层(定义低阻油层也可称为低对比度油层的测井电阻率与相邻水层的比值小于 2,甚至与水层相近),这类油层以往大多被遗漏。1998 年开始,组织渤海湾四个油田对低阻油层研究与攻关,对七个目标区块的统计,它们约占油层总数的 30% ~ 50%。1997—2002 年勘探部门不完全统计(不包括采油厂),对 40 个小区块老井复查取得了数千万吨低阻油层储量规模。2000 年以来,西部地区新疆油田、吐哈油田的浅层白垩系与长庆油田也陆续发现低阻油层,特别前者 Lu9 井区总的规模为亿吨级(由多个低幅度油藏组成),吐哈油田也在胜北凹陷找到若干低幅度—低阻油藏,累计储量达数千万吨,长庆油田在姬塬地区主力油层长 6—8 油组之上的长 2 油组发现若干低幅度—低阻油藏,累计储量达 1000×10^4 t 以上。松辽盆地吉林油田勘探发现的 9 个油气田的低幅度—低阻油气藏储量规模较大,累计探明石油地质储量近 1.7×10^8 t,约占目前吉林油田总储量的 20% 左右。此外,海外 S6 区 AG 组等进行精细勘探的区带大多为小圈闭、低对比度的稀油油层。近年来,渤海湾滩海的勘探进一步表明了低阻油层解释的重要。可见,低阻油层已成为中浅层隐蔽油藏的重要勘探领域,它也是老井复查的主要目标。

上述勘探目标的油层与水层、低产油层的岩石物理参数和响应(包括电测井与孔隙度测井)的对比度比 20 世纪 80 年代以前勘探的中—较大型油藏有明显减小,目前采用常规测井与解释方法识别与评价这种低对比度油层已较困难。

东部前古近系古潜山、西部古生代碳酸盐岩及山前的复杂岩性与复杂孔隙结构油层也

是近些年勘探的重点,它们呈严重非均质分布,其储层与流体性质识别与评价的困难程度超过前二者。近年来,主要靠引进的成像测井结合常规测井对储层进行定性与半定量评价。测井研究发现,山前的储层发育程度与测井分析的构造挤压应力相关,而且变化较大。由于前些年西部山前发现的气藏规模较大,含气饱和度较高,故掩盖了孔隙结构复杂与储层非均质分布影响识别与评价气层的矛盾。当勘探的气藏变小、储层物性变差(挤压应力较大部位)时,其测井识别与评价的困难增大。

在上述勘探实践与攻关中,中国石油提出采用“先进和适用”技术路线与在甲方推进“多学科结合”的测井油气层解释工作方法(以岩石物理研究为基础的精细测井解释与多井测井评价),经过近8年的实践,积累了较丰富的岩石物理研究经验,并形成如下技术认识:

对具体勘探目标进行岩石物理研究—即用一体化多学科结合研究油藏[岩石、孔隙(包括孔隙结构)、流体的统一系统]的岩石物理响应,包括各岩心实验方法与各测井方法,尤其是系统的电性质与各种电测井方法响应的研究,该项岩石物理基础研究技术是油公司提高油气层能力的核心技术。在此基础上,开发各种低阻油层的识别与评价方法,并用它指导研究与评价常规测井技术、新测井技术的方法、精度、分辨率等适应性与施工设计等。

经过近些年的实践与研究,认识到蒙脱石等黏土附加导电与电化学束缚水、盐水钻井液侵入或淡水钻井液深侵入、复杂孔隙结构包括岩性变细与极薄互层等因素都可使油层电阻率降低,甚至成倍下降,但是,它们并不一定都成为识别困难的低阻油层。这些测井电阻率降至与相邻水层的比值近于2,甚至与水层相近的识别困难的低阻油层,其基本地质背景则是低幅度圈闭与较小的油水密度差(即驱替力较小),形成驱替力较小,致使其含油饱和度较低,约为50%~60%。此时,如果再因上述因素影响,甚至由于采用电测井方法不当(如淡水钻井液用双侧向测井),都会形成低阻油层。因此,现在面临的低阻油层与20多年前对较大油藏所讨论的低阻油层,目标已发生极大变化。

本书是作者在参加中国石油组织的科研与生产应用攻关中理论与实践经验的总结,它包括以下内容:

(1) 中浅层物性较好的低阻油层在岩石物理研究(成因机理)与解释技术方面已取得如下五方面比较成熟的成果,并具有创新:①构造油藏中毛管压力理论描述的驱替力与饱和度—电阻率分布研究与低阻油层分布范围分析;②黏土附加导电性质—黏土的电化学束缚水岩石物理实验与研究;③盐水钻井液与淡水钻井液侵入不同饱和度油层的双侧向、双感应等电测井的响应数值分析与时间推移测井实测研究;④建立在岩石物理研究基础上的低阻油层识别与定量评价解释方法;⑤低阻油藏的分布规律与油藏模式建立。

(2) 复杂孔隙结构的低孔渗砂岩油层的岩石物理研究与解释方法取得如下突破性进展:①岩性油藏的烃源岩排烃压力与油层饱和度—电阻率分布,包括低对比度油层分布范围研究;②复杂孔隙结构砂岩(包括裂缝性砂岩)的电性质研究与非阿尔奇饱和度模型探讨以及双侧向测井与核磁共振测井的解释方法;③建立在岩石物理研究基础上的复杂孔隙结构的低孔渗油层的初步解释方法;④测井低孔渗油藏模式与分布规律的初步建立。

(3) 山前测井地应力分析与储层发育关系取得突破性进展:①灰岩与泥岩的测井电阻率反映复杂构造带的挤压应力;②山前挤压应力与储层发育关系的实例。

本书着重从机理与定量方法来阐述和总结低对比度油层(包括低阻油层)的成因、解释方法与规模低阻油层的分布规律及油藏模式,具有以下特点:

(1) 用毛管压力理论分析构造油藏中驱替力(含有效驱替力)、孔隙结构影响饱和度(电阻率)的分布规律,用中国陆上大量油藏实例证明了这一理论分析的正确。从而,奠定了研究中、浅层低阻油层的物理与地质基础。

(2) 系统介绍了黏土附加导电性质—黏土的电化学束缚水岩石物理实验与研究,盐水钻井液与淡水钻井液侵入不同饱和度油层的双侧向、双感应等电测井的响应数值分析与时间推移测井实测研究。大量实践证实,这两类因素都可造成油层测井电阻率成倍下降,对于低幅度油藏形成低阻油层最具影响。在含蒙脱石等黏土的泥质砂岩油层,除了阳离子附加导电作用之外,还由于黏土的电化学束缚水的原因,造成地层水矿化度越淡,电化学束缚水膜厚度越大,油层电阻率进一步降低,这是原来人们始料未及的。

(3) 在上述研究基础上,对油藏的上、中、下不同部位及相应不同孔隙结构的研究,可以建立相应饱和度的若干正演测井解释模型。由此,在相同储层地质条件下,用理论分析与实测结果系统建立黏土、钻井液侵入对不同油层电测井的影响规律,建立了有效的测井解释方法(包括识别与定量评价方法)。

(4) 对主要油田大量发现的规模低阻油层的分布规律进行总结,提出低阻油藏的主要分布模式。规模低阻油层主要分布在盆地主要油气聚集带的上部披覆及斜坡部分以及油气主要运移路径上的低幅度构造—岩性圈闭、低幅度复杂断块等,还分布在较大油藏底部油水过渡带内。

(5) 上述低阻油层研究的成果是在 20 世纪 90 年代中国石油各油田岩石物理研究成果的基础上[1996 年中国石油制定的《探井三个层次测井解释规范》(单井解释、精细解释、多井评价)],欧阳健、王贵文、吴继余、毛志强等(1999)深入开展研究工作的结果。本书把其中重要的部分:以饱和度为核心的“岩心刻度测井”技术重新做了阐述。

(6) 对岩性油藏,在烃源岩排烃与运聚理论指导下,发现排烃压力与油层饱和度—电阻率的关系,基本明确了低对比度油层在排驱力(与油源层运移距离)及砂岩孔隙结构方面分布范围。

(7) 对复杂孔隙结构砂岩(包括裂缝性砂岩),应用储层地质方法研究复杂孔隙的各种类型,并从理论与实验方面研究其电性质。提出粒间孔隙与微孔隙双组孔隙的地质与物理(电)模型,并进行非阿尔奇饱和度模型探讨。在粒间孔隙与微孔隙双组孔隙的地质与物理(电)模型基础上建立复杂孔隙结构低孔渗油层的初步解释方法,包括应用核磁共振测井等对孔隙结构的解释应用。对渤海湾深层等裂缝性砂岩的电各向异性及双侧向测井的三维正、反演数值计算与响应实例定量解释。

(8) 对低对比度(低阻)油层的测井识别与评价,开创性地提出必须从油藏的驱替力及有效驱替力(构造油藏与岩性油藏各有不同)—饱和度—电阻率—测井电阻率的关系出发进行分析与研究。显然,在驱替力与毛管压力(孔隙结构)之间某一范围内,即有效驱替力在某一范围内容易产生低对比度油层。有效驱替力大于该界限时,含油饱和度(电阻率)较高。有效驱替力小于该界限时,含油饱和度(电阻率)较低。应该讲,这一理论与方法的提出,对低对比度(低阻)油层的测井岩石物理与解释将作出了重大贡献。

(9) 在复杂构造带内,开创性地提出了挤压应力区域灰岩与泥岩的测井电阻率与声速反映的挤压应力大小的现象,并探讨复杂构造带内岩石物理响应机理。研究了山前挤压应力与储层发育关系的实例。

第一章 毛管压力理论分析油藏中饱和度（电阻率）分布规律

构造油藏的形成受油、水—孔隙系统所控制，油气运移到有利圈闭处，在孔渗较好的油藏中，由于重力分异、水动力等作用，油气首先聚集在油藏顶部与较大孔隙喉道连接的大孔隙中，岩石—水—油气三相各个界面张力与油柱质量在油藏中形成压力平衡系统。随着油气驱替力（与油水密度差与油柱高度有关）的增加，油（气）将逐步进入更小的孔隙喉道，因此，油藏中距自由水平面之上越高的地方，含油饱和度 S_o 则越大，反之则越小。显然，油藏内不同处的饱和度受自由水平面之上的高度、孔隙结构及油水密度差等因素控制。用毛管压力理论基本可描述油藏中驱替力控制饱和度的分布规律。

用油藏中驱替力控制饱和度分布的理论，可以在大量勘探实践中观察到：幅度较大的油藏中、上部，由于驱替力较大，含油饱和度较高，孔隙结构（砂岩颗粒粗细）与饱和度相关，即孔隙结构越差（砂岩颗粒越细或微孔隙越多）含油饱和度越低（或解释为束缚水饱和度增高），显然，其电阻率比较孔渗好（砂岩颗粒粗）的油层要低，甚至低很多，这种低阻油层是对比孔渗好的油层而言。当然，油藏中、上部一般是不会有水层的。对油藏的底部（接近油水过渡带）或低幅度油藏，由于驱替力较小，含油饱和度较低，其电阻率比相邻水层已高出不多（可能 3 ~ 6 倍），此时，如果存在黏土附加导电或钻井液侵入等影响，可导致油层的测井电阻率进一步下降并接近相邻水层电阻率，形成规模储量的低阻油层，这就是近十年精细勘探所研究的主要目标。

对低孔渗砂岩的构造—岩性油藏，应用生油岩排烃与运聚理论，在松辽盆地和鄂尔多斯盆地发现了排烃力（与油源层运移距离相关）与油层饱和度（电阻率—孔隙结构）密切相关，基本明确了低对比度油层在排烃力（与油源层运移距离）控制与低孔渗砂岩孔隙结构影响的分布范围。

第一节 毛管压力理论分析油藏中驱替力与饱和度（电阻率）

一、毛管压力理论

多孔介质的砂岩地层中，流体流动的空间可看作是一些大小不等、曲折相通的复杂毛细管孔道。同时，砂岩储层则可看成为一个多维的相互连通的毛细管网络系统，因此，研究油、气、水在毛细管网络系统中分布的特征及其电性质，对于测井岩石物理研究就显得十分重要。

用毛细管理论基本可以描述油、气、水在毛细管网络系统中分布规律（罗蛰潭，王允诚，1986；何更生，1994）。可将毛管压力定义为两相（油和水）界面上的压力差，毛管压力 p_c 只存在两相界面上，并可形成压力突变，可得毛细管平衡理论的基本公式。

1. 毛管压力的基本概念

1) 玻璃毛细管和水—气系统

将一根直径很小的玻璃毛细管一端插入装有自由水液面的容器，液体将在毛细管内上升至一定的高度 h （图 1-1-1a），毛细管越细，则水柱上升高度越大。这是毛细管管壁对

水的附着张力与毛细管管中液柱的重力平衡的结果。

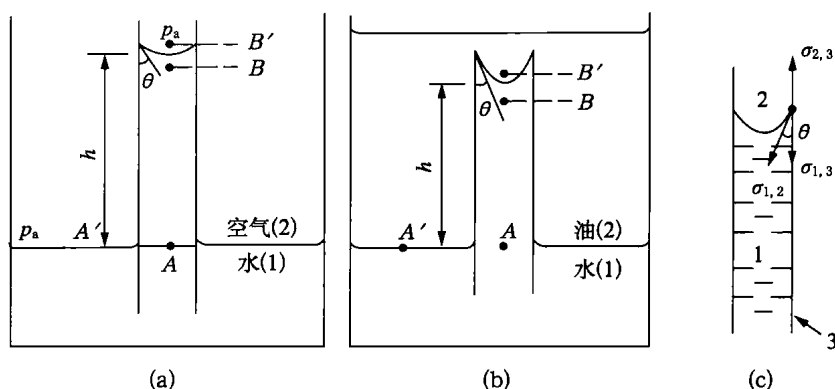


图 1-1-1 毛细管中的液体上升与压力相互关系

作用于三相〔玻璃 (3)、水 (1) 与非润湿相如油 (2)、空气 (2) 等〕周界面上的各个界面张力之间的关系 (图 1-1-1b) 可表示为:

$$\sigma_{2,3} - \sigma_{1,3} = A = \sigma_{1,2} \cos \theta \quad (1-1-1)$$

式中 $\sigma_{1,2}$ ——1, 2 界面间的界面张力;
 $\sigma_{2,3}$ ——2, 3 界面间的界面张力;
 $\sigma_{1,3}$ ——1, 3 界面间的界面张力;
 θ ——接触角;
 A ——附着张力。

A 是固体对水柱产生的作用于单位长度三相周界面上对水柱向上的拉力。由于液柱的重力方向向下, 当液面上升至 h 时, 二者达到平衡, 即:

$$2\pi r \sigma_{1,2} \cos \theta = \pi r^2 \rho g h \quad (1-1-2)$$

式中 $\sigma_{1,2}$ ——水的表面张力;
 θ ——水对管壁的润湿角;
 r ——毛管半径;
 ρ ——水的密度;
 h ——水柱上升的高度;
 g ——重力加速度。

由式 (1-1-2) 得到:

$$h = \frac{2 \sigma_{1,2} \cos \theta}{r \rho g} \quad (1-1-3)$$

或

$$r = \frac{2 \sigma_{1,2} \cos \theta}{\rho g h} \quad (1-1-4)$$

式 (1-1-3) 和式 (1-1-4) 是根据表面张力关系推导出的毛管压力公式。另外, 通过流体力学关系也可以表述上述关系。

在图 1-1-1 中, 根据 U 形管原理知 $p_{A'} = p_A = p_a$; 而 A 点的压力又等于 p_B 加上高度

为 h 的水柱产生的压力:

$$p_{B'} = p_A = p_A = \rho g h + p_B \quad (1-1-5)$$

$$p_{B'} - p_B = \rho g h = p_c \quad (1-1-6)$$

p_c 的物理意义是毛细管中弯液面两侧两种流体 (非湿相流体与湿相流体) 的压力差, 是 A 与界面张力 σ 平衡时在弯液面上产生的附加压力。

毛管压力的大小等于毛细管中水柱的重力; 方向指向弯液面内侧 (毛管压力的作用使弯液面两侧的非湿相流体的压力高于湿相流体的压力)。

将式 (1-1-3) 代入式 (1-6) 得:

$$p_c = \frac{2\sigma_{1,2} \cos \theta}{r} \quad (1-1-7)$$

(2) 玻璃毛细管和油—水系统

玻璃毛细管和油—水系统 (图 1-1-1b) 油水界面两侧的压力差, 即毛管压力为:

$$p_c = p_{B'} - p_B = (\rho_w - \rho_o) g h \quad (1-1-8)$$

同样, 在油水两相处于平衡的情况下, 其上升力应当与重力平衡, 故有式 (1-1-9):

$$p_c = (\rho_w - \rho_o) g h = \frac{2\sigma_{1,2} \cos \theta}{r} \quad (1-1-9)$$

式中 $\sigma_{1,2}$ ——油水界面张力;

ρ_w ——水的密度;

ρ_o ——油的密度。

由式 (1-1-9) 可见, 毛管压力与油水界面张力成正比, 与毛管半径成反比。

由前述各式可见, 当烃类驱替力越大 (即含油高度越高或油水密度差越大), 油气可进入更小的毛细管中, 则含油饱和度越大。此外, 在油藏中相同驱替力条件下, 孔隙结构越好则含油饱和度相对较高, 原油进不了更小的毛细管中, 即饱和度受储层孔隙结构 (毛管大小) 控制。还应看到, 润湿性 (由表面张力与接触角反映) 也影响油水的饱和度分布。

2. 毛管压力资料计算饱和度

用毛管压力曲线计算油藏含油饱和度的前提是获得质量可靠、能代表储层的毛管压力曲线。常用的方法有下列三种, 它们都要用式 (1-1-9) 把 p_c 换算为油藏中自由水平面 (FWL) 之上的高度 h 。

(1) 逐点毛管压力曲线法: 若油藏有足够的取心, 并且有很高精度的毛管压力实验资料, 则可用这种方法计算油藏的饱和度分布。其精度取决于岩样是否具代表性以及毛管压力曲线本身的质量是否可靠。

(2) 平均毛管压力曲线法: 若油藏岩石物性或孔隙结构比较单一, 为克服个别样品随机实验误差影响, 可将全部实验数据进行集总, 求出平均的毛管压力曲线。当油藏岩石孔隙结构类型变化较大时 (通常表现为物性参数有很大的变化区间), 可采用按渗透率 (或孔隙度) 大小分成几类后, 再对每一类求平均毛管压力曲线。

(3) 平均 J 函数法: J 函数法是国内储量计算中通常应用的毛管压力曲线综合处理方法 (杨通佑, 等, 1990), 其表达式为:

$$J(S_w) = \frac{p_c}{\sigma \cos \theta} \sqrt{\frac{K}{\phi}} \quad (1-1-10)$$