

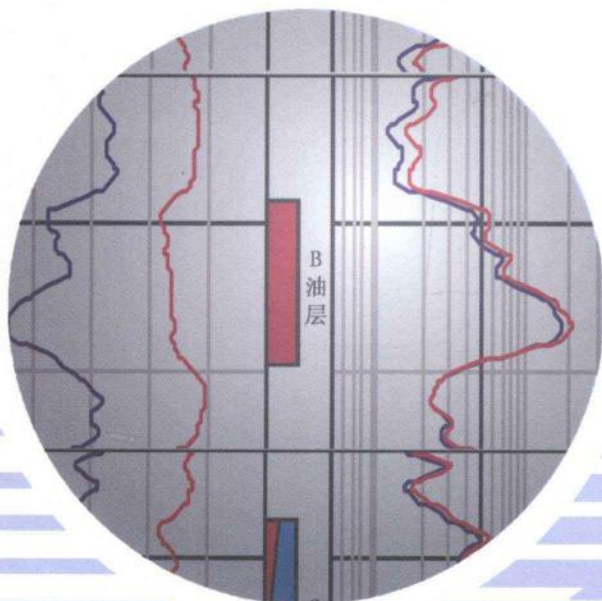


中国石油勘探工程技术攻关丛书

ZHONGGUO SHIYOU KANTAN GONGCHENG JISHU GONGGUAN CONGSHU

低阻油气藏测井 评价技术及应用

○ 中国石油勘探与生产分公司 著



石油工业出版社

中国石油勘探工程技术攻关丛书

低阻油气藏测井评价 技术及应用

中国石油勘探与生产分公司 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是中国石油 2006—2008 年低阻油气藏测井评价技术攻关成果的总结, 主要介绍了低阻油气藏的成因机理、分布规律, 以及用测井资料识别评价低阻油气层的主要方法, 并辅以实例, 解剖了低阻油气藏测井评价的思路与方法。

本书适合从事油气勘探开发工作的地质、测井、油藏工作者使用, 也可作为大专院校相关专业师生参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

低阻油气藏测井评价技术及应用/中国石油勘探与生产分公司著.
北京: 石油工业出版社, 2009. 11

(中国石油勘探工程技术攻关丛书)

ISBN 978 - 7 - 5021 - 7403 - 3

I. 低…

II. 中…

III. 低阻层 - 油气测井

IV. TE15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 173930 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) 64523736

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

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.5

字数: 300 千字 印数: 1—2000 册

定价: 60.00 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

中国石油作为我国能源行业的特大型骨干企业，在保障国家能源安全方面具有义不容辞的光荣使命。经过半个多世纪的大规模勘探开发，国内油气勘探已进入一个新的发展阶段，特别是随着勘探开发的不断深入，勘探领域发生了很大变化。从地面条件看，勘探对象已从平原向山地、沙漠、滩海大幅度延伸；从地质条件看，低渗透、复杂碳酸盐岩、火山岩等复杂储层和稠油等复杂油藏所占比例大幅度增加。在这种情况下，如何继续大幅度增加储量以满足油气产量持续增长的需要成了摆在我们面前的迫切问题。

为了积极应对这种挑战，2005 年我们明确提出了“油气勘探必须走技术发展之路”的要求，并按照“突出重点探区、依托重点项目、注重实际效果”的思路，设立专项投资，发挥中国石油整体优势，分物探、钻井、测井、试油四个专业，重点在塔里木、四川、准噶尔、渤海湾、柴达木、松辽、鄂尔多斯等盆地组织了以现场为主体的工程技术攻关。通过几年的不懈努力，一大批制约油气勘探的瓶颈技术得以攻克，针对复杂地表和高陡构造的地震采集、处理和解释一体化技术取得明显突破，发现了一批具有战略意义的勘探目标；以欠平衡钻井、垂直钻井等为主的低压储层保护和高陡构造防斜打快技术极大地提升了钻井能力，保障了勘探发现；以成像测井为主的采集技术和以复杂油气藏饱和度研究为主的解释技术研发成功，较好地保障了火山岩、低渗透等复杂储层识别与评价的需要；以大型酸化和压裂改造为主的增产技术，提升了低渗透油气层的商业价值。一大批工程技术的突破不仅提高了其在油气勘探中的保障能力，也增长了工程技术服务队伍的竞争能力，更为重要的是拓展了新的油气勘探领域，开阔了找油找气的视野，进一步坚定了我们不断寻找大油气田的信心和决心。

伴随着工程技术的进步，近年来我们已经进入新的油气储量增长高峰期，连续六年探明石油地质储量大于 5 亿吨，连续三年探明天然气地质储量大于 3000 亿立方米。新发现并落实了长庆苏里格、塔里木库车等储量规模万亿立

方米的气田和目标区，发现并落实了长庆姬塬和西峰、塔里木塔北、准噶尔西北缘等一批储量规模 5 至 10 亿吨的规模储量区。由于勘探的快速发展，油气资源基础不断夯实，油气田开发也进入了快速发展的新阶段，原油产量从 2006 年开始连续三年创历史新高，天然气产量从 2005 年开始连续五年换“百”字头。

《中国石油勘探工程技术攻关丛书》系统总结了这几年来技术攻关的丰硕成果，凝聚了攻关单位数百名科技工作者的辛勤劳动。相信这套《丛书》的出版，必将对提高技术人员的业务素质和管理人员的驾驭能力、提升勘探技术应用水平起到带动和促进作用，也必将为推动中国石油上游业务的发展起到重要作用。

认识没有止境，攻关永不停步。随着勘探难度的增加，许多新的问题需要解决，大量技术难题有待攻克。我们必须继续坚定走技术发展之路不动摇，继续狠抓技术攻关不松劲。只有这样，才能持续推动工程技术进步，才能更好地为“储量增长高峰期工程”和“稳定并提高单井日产量工程”提供技术保障。

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Song Zhen' (宋震), written in a cursive style.

2009 年 11 月 2 日

前 言

大量勘探开发实践表明,低阻油气层广泛存在于复杂砂岩油气藏中,成因的复杂性和特征的隐蔽性使其常常被忽视甚至漏失,因此,这类油气藏的准确识别与评价不论是在新区勘探还是老区挖潜中都具有十分重要的现实意义,历来受到勘探开发专家的重视。

中国石油自 1997 年对低阻油气层测井解释评价进行规模研究以来,低阻油气层的成因机理逐渐明朗,测井识别与评价技术也日臻成熟,为冀东、华北、大港和辽河等油田增储上产作出了十分积极的贡献,地质效果十分突出。在 2006 年由中国石油勘探与生产分公司组织编写、石油工业出版社出版的《低阻油气藏测井识别与评价技术》一书中,对低阻油气层(藏)的成因机理、测井识别与评价方法进行了详细地叙述。

但低阻油气层(藏)的成因机理十分复杂,虽然我们花了近十年时间,研究总结了一整套识别与评价方法和技术,但仍然存在两方面的问题:一方面,这套技术更多的是理念和方法,需要油田现场技术人员熟练掌握和应用才能转化为生产力;另一方面,技术本身也还存在一些有待完善和发展的地方,必须继续深入研究,以适应更多的现场实际。

基于上述原因,2006 年初,按照中国石油“油气勘探必须走技术发展之路”的总体要求,勘探与生产分公司以“立足重大领域,依托重点项目,攻克关键问题,形成配套技术”为原则,采用“股份公司统一组织,油田院所联合攻关”的模式,组织勘探开发研究院、冀东油田、长庆油田、大港油田、华北油田和中国石油大学等单位,在充分吸收前期研究成果基础上,针对近期出现的新问题,深入开展了低阻油气层(藏)测井技术完善与规模推广工作,经过三年不懈的努力,取得了显著的成效:

(1) 低阻油气藏测井评价技术在中国石油所属油田得到广泛的推广。通过技术培训和实战锻炼,多数油田的测井技术人员已经基本掌握了这套思想和方法,并能结合自身特点在生产实践中自觉加以应用和提高。

(2) 低阻油藏测井解释符合率显著提高。冀东南堡油田、大港歧口凹陷中浅层和长庆姬塬地区长 2 段等攻关重点领域,建立了针对不同区块不同层位的油气层识别图版 12 张,测井解释符合率较攻关前提高了 10% 左右。

(3) 低阻油气藏测井评价基础理论的实用化和有形化研究取得实质进展。通过软件模块开发,实现了如何在低阻油气层众多成因中挖掘主控因素,再根据主控因素筛选低阻油气层(藏)识别评价方法的工作流程。

(4) 低阻油气藏形成的主要地质规律研究取得重要进展。明确了低阻油气层(藏)的主要岩石物理成因与构造、沉积和成岩作用的关系,为低阻油气层测井识别评价技术由“层”向“藏”发展奠定了坚实的基础。进而针对不同勘探阶段提出了不同类型低阻油气层(藏)分布的预测思路、流程和方法,明确指出了低阻油气层可能发育的地质背景。

本书是中国石油近三年来低阻油气藏测井评价技术攻关的阶段成果总结与提炼。为了技术描述的完整性,部分内容借鉴了前期的研究成果。全书共七章,分为两个部分。第一部分由第一章到第四章组成,是低阻油气藏测井识别与评价技术攻关成果,其中,第一章介绍了

低阻油气藏主要成因机理及测井特征的最新研究成果；第二章描述了低阻油气藏的主要地质成因规律；第三章介绍了低阻油气藏识别评价技术；第四章初步提出了低阻油气层（藏）的预测方法。第二部分由第五章到第七章组成，主要介绍了近三年低阻油气层（藏）测井攻关中技术应用比较成功的三个典型实例，即冀东南堡油田、大港歧口凹陷中浅层和长庆姬塬地区长2段的应用和发展。

本书编写历时近一年。2008年7月、9月、12月和2009年3月、7月，中国石油勘探与生产分公司先后五次组织研讨，确定编写提纲，落实责任单位和编写人，审查编写文稿。前言由张国珍、李国欣和刘国强编写，第一章由周灿灿、刘国强、程相志、李长喜和王昌学编写，第二章由王贵文、周灿灿、周凤鸣和周海民编写，第三章由程相志、周灿灿、刘国强和刘忠华编写，第四章由王贵文、周灿灿、徐敬领和赵贤正编写，第五章由周凤鸣、司兆伟、程相志和周灿灿等编写，第六章由周灿灿、刘忠华、程相志、宋连腾、柴细元和邵维志等编写，第七章由杨春梅、周灿灿、石玉江和程相志编写。张国珍、周灿灿和刘国强负责全书统稿。

在项目攻关和本书的编写过程中，得到了中国石油天然气股份有限公司赵政璋副总裁和贾承造院士的大力支持，得到了董月霞、吴永平、杨华、梁世君和邹才能等有关领导的大力帮助，得到了勘探与生产分公司有关处室的大力配合，工程技术与监督处做了大量具体的组织和技术指导工作。高瑞祺、欧阳健和陆大卫等专家提出了许多宝贵的意见，石油工业出版社相关人员对出版样稿进行了详细地审查与修改。值此本书正式出版之际，谨向他们表示衷心的感谢！

限于作者水平，书中存在的不足，敬请读者提出宝贵意见。

目 录

序

前言

第一章 低阻油气层成因机理及测井特征	(1)
第一节 高不动水含量引起的低阻油气层	(1)
第二节 黏土附加导电作用形成的低阻油气层	(7)
第三节 钻井液侵入造成的低阻油气层	(10)
第四节 油气层与水层矿化度不同造成的低阻油气层	(12)
第五节 砂泥岩薄互层导致的低阻油气层	(14)
第二章 低阻油气藏的主要地质成因规律	(18)
第一节 低阻油气层的主要油藏类型	(18)
第二节 低阻油气储层的沉积成因规律	(30)
第三节 低阻油气储层的成岩作用成因规律	(39)
第四节 影响低阻油气藏的黏土矿物变化规律	(45)
第三章 低阻油气层识别评价技术	(52)
第一节 低阻油气层定性分析技术	(52)
第二节 图版技术识别低阻油气层	(54)
第三节 测井新技术识别低阻油气层	(56)
第四节 低阻油层饱和度的定量评价技术	(69)
第五节 紧密结合地质和油藏工程的低阻油气层综合判断技术	(74)
第四章 低阻油气层(藏)的预测方法	(77)
第一节 黏土附加导电型低阻油气层的预测	(77)
第二节 高束缚水型低阻油气层的预测	(82)
第三节 低幅度构造型低阻油气层的预测	(87)
第四节 薄互层型低阻油气层的预测	(91)
第五节 油水层矿化度差异型低阻油气层的预测	(93)
第六节 不同勘探阶段低阻油气层预测方法与流程	(95)
第五章 低阻油层识别评价技术在南堡油田的应用和发展	(104)
第一节 地质概况	(104)

第二节	油气层测井评价的难点和对策	(105)
第三节	低阻油气层识别评价技术在南堡油田的完善	(109)
第四节	低阻油气层识别评价技术的应用效果	(119)
第六章	低阻油层识别评价技术在歧口凹陷中浅层的应用和发展	(124)
第一节	地质概况	(124)
第二节	油层测井评价难点与测井评价技术对策	(126)
第三节	中浅层油气层主控因素和测井系列	(129)
第四节	复杂油气层识别评价方法	(134)
第五节	油气层识别评价技术现场应用效果及总结	(146)
第七章	低阻油层识别评价技术在姬塬地区长 2 段的应用和发展	(153)
第一节	储层特征	(153)
第二节	低阻油层主要类型	(158)
第三节	低阻油层识别评价方法	(163)
第四节	低阻油层饱和度分布规律	(169)
参考文献		(172)

第一章 低阻油气层成因机理及测井特征

石英、长石和干黏土等矿物的岩石骨架电阻率极高，几乎不具备导电能力，决定储层导电能力的关键是充填在岩石孔隙中水的变化。在没有金属导电矿物存在的情况下，储层岩石中的水（地层水，包括不动水和自由水）是储层电阻率大小的决定性因素。它从两个方面控制着储层电阻率的大小，即地层水的数量（含水饱和度）和性质（水溶液浓度，即矿化度）。含水饱和度的升高和矿化度的增大都可导致储层中导电离子浓度的增加，从而引起储层电阻率降低。

对油气层而言，其孔隙空间存在烃和不可动水两种流体，而烃类是不导电的，因此，油气层的导电性几乎完全取决于其孔隙中不动水的导电性。不动水的数量及其离子浓度直接控制着油气层电阻率的高低。影响不动水饱和度增加和不动水浓度增大的因素有许多，由储层岩石本身的属性而导致不动水饱和度增加和浓度增大，进而引起油气层电阻率降低。这种因素称为内在因素，即内因，如岩石的岩性、泥质成分、黏土类型以及孔隙结构等。与内因有所区别的、作用于油气储层岩石属性以外、影响不动水数量和浓度并导致油气层电阻率降低的其他因素，统称为外在因素，即外因。最重要的外因主要有钻井液侵入、测井仪器分辨率和成藏潜力等。此外，导电矿物的存在，如黄铁矿等，可导致储层电阻率大幅度降低，但其导电机理属于电子导电，与离子导电因素在导电机理上存在差异。本节只讨论离子导电引起的储层电阻率降低的主要因素，而不讨论电子导电引起的储层电阻率降低的因素。

影响油层电阻率降低的因素有多种，只有知道了这些影响因素才能够准确识别和评价油气层（尤其是低阻油气层）。因此，对低阻油气层准确性和合理分类是低阻油气层识别和评价的基础。

第一节 高不动水含量引起的低阻油气层

在目前所发现的低阻油气层中，高不动水饱和度是低阻油气层广泛发育的最主要成因之一，其在低阻油气层成因研究中占有十分重要的地位。

一、不动水的概念

为了研究低阻油气层的成因，本书使用不动水饱和度概念。不动水饱和度与常说的束缚水饱和度之间存在着一定的区别。所谓不动水是指在一定的生产压差条件下储层孔隙中不可流动的水，它与试油或投产时的生产条件和工艺条件有直接的联系。与束缚水饱和度的绝对性相比，不动水饱和度是一个相对的概念，随着生产和工艺条件的变化不动水饱和度是变化的。一般情况下，不动水由岩石颗粒（包括非黏土颗粒和黏土颗粒）表面被吸附的薄膜滞水和毛管孔隙中的毛管滞水两部分组成。即束缚水是不动水的一部分，如图 1-1-1 所示。薄膜滞水（图 1-1-1a、b）就是严格意义上的束缚水，不能为一般外力作用而流动。毛管滞水（图 1-1-1c）能否流动取决于作用在毛管两端的外界压力差，当外界压差不能克服毛管力时，毛管滞水不可流动，此时的毛管滞水与薄膜滞水一起组成不动水。当外界压差能

够克服毛细力时, 毛细滞水将与以游离状存在于孔隙和喉道内的自由水一起组成可动水。

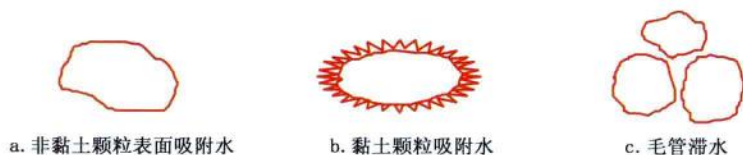


图 1-1-1 不动水各种成因组分分布概念模型示意图

可见, 不动水的概念是严格意义上束缚水概念的延伸。它既包含严格意义上的束缚水, 也包含由于外界压差不能克服毛细力而产生的毛细滞水, 一旦外界条件发生变化, 由毛细滞水形成的不动水就可能转化为可动水。

二、不同成因的不动水

1. 岩性细导致的不动水

储层岩性的粗细往往通过岩石中非黏土颗粒的粒度中值来体现, 岩性细, 则粒度中值小。曾文冲等曾对我国东部多个盆地砂岩储层的束缚水饱和度做过大量统计分析工作, 他通过对油层岩心分析数据的统计研究发现, 束缚水饱和度与岩石颗粒粒度之间存在很好的统计关系, 如图 1-1-2 所示。

岩石的比表面积与岩石颗粒的大小有直接的关系, 它可以表征储层岩性的粗细。岩性细, 岩石颗粒小, 岩石比表面积大。岩石中非黏土颗粒表面吸附水的含量与岩石的比表面积有直接的关系, 岩石的比表面积大, 则这部分吸附水的体积也大。因此, 细岩性储层中, 颗粒表面吸附水含量就高, 依据不动水的概念, 这部分吸附水属于束缚水, 导致储层具有较高的束缚水含量。图 1-1-3 较好地反映了束缚水饱和度与比表面积的关系, 二者之间存在很好的非线性正相关关系。

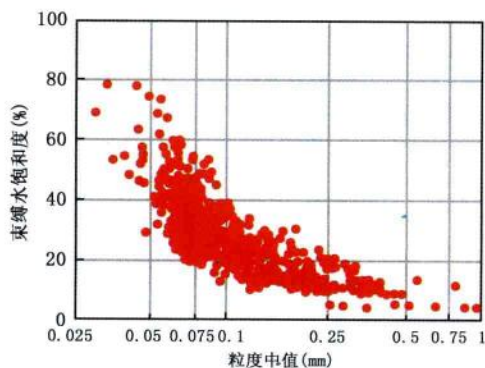


图 1-1-2 粒度中值与束缚水饱和度的关系
(据曾文冲, 1991)

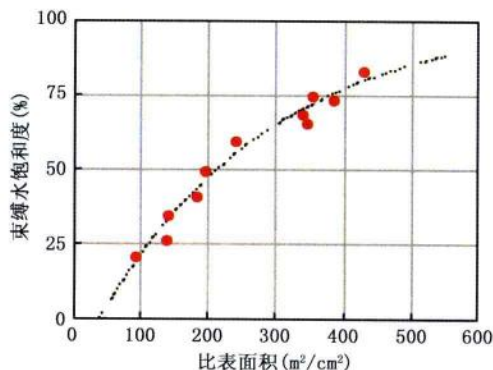


图 1-1-3 束缚水饱和度与比表面积的关系
(据 Hamada, 2001)

2. 泥质重引起的不动水

泥质成分中包括细粉砂和黏土, 这两种泥质成分产生高不动水的机理是有差别的。细粉砂作为非黏土颗粒其颗粒较细, 具有较大的比表面积, 颗粒表面由于润湿性而吸附大量的

水,即所谓的薄膜滞水。黏土颗粒表面吸附水相对比较复杂。黏土矿物的种类有多种,对测井来说,有重要意义的黏土矿物主要有高岭石(K)、蒙皂石(I)、伊利石(S)、绿泥石(C)。由于它们分子结构的差异和物理性质的不同,它们所产生高不动水的机理也不尽相同。按照双电层理论模型,吸附于黏土颗粒表面的阳离子周围也会吸附一层水分子,这部分水在双电层中称水合水(hydration water)。水合水与平衡阳离子一起构成岩石黏土颗粒表面吸附水,吸附水的含量取决于地层水矿化度和岩石的阳离子交换能力。蒙皂石在储层孔隙空间中以包裹或孔桥的形式存在,表面积较大,具有强吸水特性而导致不动水饱和度较高。伊利石黏土质点小,呈网状分布于岩石孔隙中,或包裹在岩石颗粒表面,呈絮状、桥状、发丝状,比表面积大,具有蜂窝状微孔隙,其间吸附大量水,使岩石不动水含量增高。高岭石在储层孔隙空间中以分散颗粒形式存在,比表面积小,对不动水的影响较小。绿泥石在储层孔隙空间中以包裹或孔桥的形式存在,表面积中等,对不动水饱和度的贡献较小。

尽管不同泥质组分形成不动水饱和度的机理不完全相同,但可以明确的一点是,泥质成分含量的增高,都可以导致不动水饱和度的加大。表1-1-1为某油田离心不动水饱和度的实验统计结果,可以看出随着泥质含量的增加,不动水饱和度显著增大。

表1-1-1 不同岩性岩石样品离心不动水饱和度实验统计

岩 性	不动水饱和度(%)
微含泥砂岩	30.86
泥质砂岩	56.80
重泥质砂岩	60.51

图1-1-4展示了来自不同区块的两组不动水含量与泥质含量的关系。虽然两组数据反映的规律存在一定差异,但都表征了同样一个问题,即随着泥质含量的增高,储层岩石的不动水饱和度增大。

3. 复杂孔隙结构形成的不动水

砂岩储层岩石的孔隙结构是由组成岩石骨架的颗粒分布及其排列方式,以及黏土矿物的充填方式决定的。复杂孔隙结构储层形成的高不动水组分比较复杂,包括岩石颗粒薄膜滞水和毛管滞水,但毛管滞水起主导作用。毛管滞水的多少取决于储层平均孔喉半径(孔隙结构)和流体的界面张力,而平均孔喉半径与毛管排替压力密切相关,孔喉半径的大小受岩石颗粒大小的控制。因此,岩石颗粒越细、平均孔喉半径越小、毛管排替压力越大,则储层中毛管滞水越多,不动水饱和度越大。复杂孔隙结构储层岩石颗粒一般较细,泥质成分较重,该类储层岩石具有孔喉半径小、毛管半径小、弯曲度大等特点,从而造成具有较大的毛管排替压力,较高的不动水饱和度。

图1-1-5是两组来源不同的不动水饱和度和孔隙结构指数实验关系图。从图中可以看出不管数据来源如何,随着储层岩石孔隙结构变差(数值低)不动水饱和度增加,且当孔

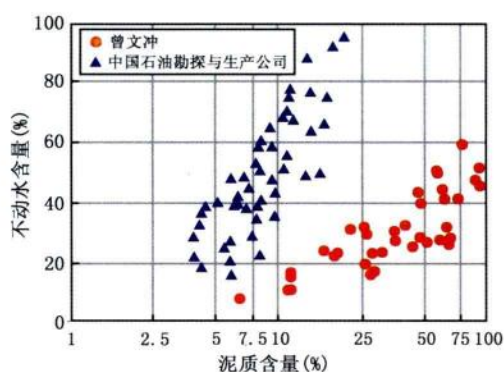


图1-1-4 不动水饱和度与泥质含量的关系
(据曾文冲和中国石油勘探与生产公司)

隙结构指数小于 2 时, 不动水饱和度增高速度较快。

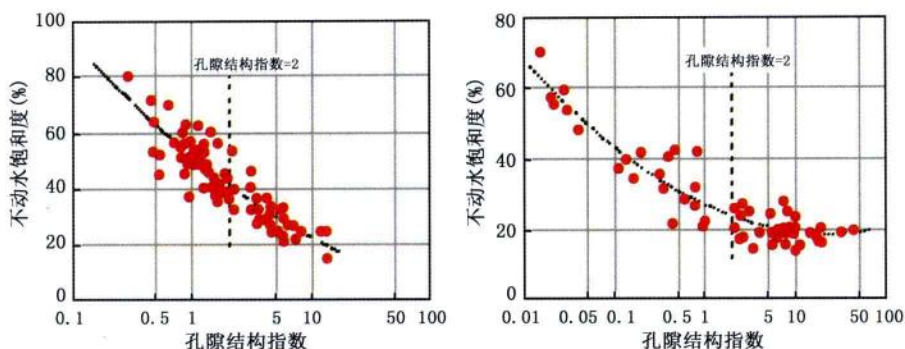


图 1-1-5 不动水饱和度与孔隙结构指数实验关系

不动水成因机理的不同导致其在储层中分布形式也不同。岩石颗粒吸附地层水所产生的束缚水分布于颗粒表面而呈水膜状, 由于孔隙结构变差形成的毛管滞水则分布于储层中微细小孔喉中。

4. 低地层水矿化度引起的高不动水

高不动水饱和度储层往往是岩性细、泥质含量重的泥质砂岩储层, 这种储层中不动水的矿化度与其自由水矿化度是有差别的。这种差别不但可以通过双电层理论来阐述, 也可以由岩心样品实验来证实。

壳牌公司的岩石物理学家 Hill 等人在对泥质砂岩导电性质的研究中曾做过这样的实验测量, 他们用不同矿化度的水溶液先后饱和同一块岩样, 分别测量被不同矿化度水溶液饱和后的黏土颗粒表面双电层中不含阴离子的水的含量 (相当于黏土颗粒表面吸附水, 包括水合水和平衡阳离子)。结果发现, 水溶液矿化度越高、不含阴离子的水的重量越高。通过分析具有不同阳离子交换能力的泥质砂岩样品在 1~3 种溶液矿化度条件下的实验测量结果 (图 1-1-6), Hill 等人建立了如下实验关系:

$$S_{wi_Clay} = \left(0.084 \times \sqrt{\frac{58.44}{S_C}} + 0.22 \right) Q_v \quad (1-1-1)$$

式中 S_{wi_Clay} ——黏土吸附水饱和度;

Q_v ——岩石阳离子交换量, meq/mL;

S_C ——水溶液矿化度。

双电层理论认为, 偶电层的吸附层为相界面 (固相与液相) 束缚水膜中的牢固结合水部分, 扩散层为疏松结合水 (可动水的一种表现形式) 部分, 偶电层之外是自由水。因此, 偶电层可以理解为不动水, 但主体是束缚水部分。显然, 偶电层厚度越大, 不动水饱和度越大, 双电层的厚度与地层水矿化度有关, 矿化度越低, 不动水饱和度越高; 而当矿化度大于 20000mg/L 时, 则不动水饱和度与矿化度的变化基本没有关系。对于盐类电解质水溶液, 在温度为 25℃ 时, 偶电层厚度与浓度关系可表达为:

$$\lambda_D = \frac{9.61 \times 10^{-9}}{Z \sqrt{C}} \quad (1-1-2)$$

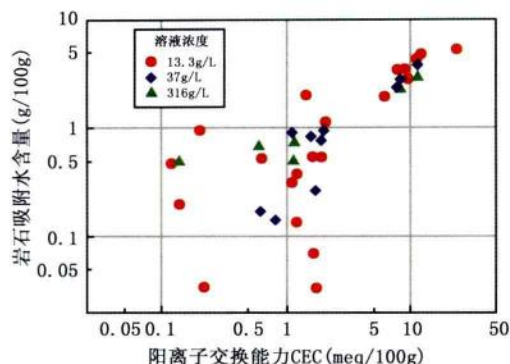


图 1-1-6 不同溶液矿化度条件下岩石吸附水量与岩石阳离子交换量关系 (据 Hill)

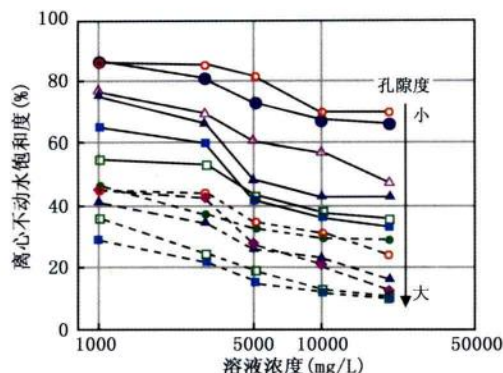


图 1-1-7 离心不动水饱和度与溶液浓度的实验关系

式中 λ_D ——偶电层厚度, m;
 Z ——离子的价数;
 C ——离子的体积摩尔浓度, mol/L。

图 1-1-7 是多块岩石样品在 5 种矿化度条件下进行的离心不动水饱和度与饱和溶液离子浓度实验关系图。通过该实验关系图可以得出两个结论:

(1) 不管岩石样品孔隙度大小如何, 随着溶液离子浓度的增大, 岩石不动水饱和度都是降低的;

(2) 在溶液离子浓度增大到一定值后, 不动水饱和度降低的幅度变得非常缓慢, 也就是说, 再进一步增大饱和溶液离子浓度, 岩石不动水饱和度不再降低。

这不但与 Hill 的实验结果相一致, 而且还与双电层理论的分析结果是一致的, 即双电层厚度随溶液离子浓度的增大而变小, 而且溶液浓度达到一定值后, 扩散层基本消失, 双电层厚度就是吸附层 (Stern) 厚度, 此时双电层厚度就不再随着溶液浓度的增加而减小, 此时的不动水饱和度最低。

总之, 岩石不动水含量主要取决于岩石比表面积、岩石孔隙结构、黏土类型和含量, 以及地层水矿化度。

三、高不动水饱和度对电阻率的影响

不动水对岩石电阻率的影响是通过改善岩石的导电网络来实现的, 在高不动水饱和度情况下, 导电网络变得“四通八达”, 增加了导电路径。本书后面的分析也可以说明不动水饱和度往往具有比自由水更高的矿化度, 也就是说不动水具有更高的导电能力。由于这两方面的原因, 储层的导电能力得到了极大的加强, 使得储层电阻率大大降低, 形成低阻油气层。

图 1-1-8 表明, 随着不动水饱和度的增加, 储层电阻率降低。不动水饱和度大于 45% 时, 储层电阻率受不动水饱和度的影响相对较小; 不动水饱和度小于 45% 时, 储层电阻率受不动水饱和度的影响增大, 甚至可以出现随不动水饱和度的增加, 储层电阻率呈指数规律降低的现象。

图 1-1-9 为一口井中高阻油气层和低阻油气层的电阻率与不动水饱和度对比关系图,

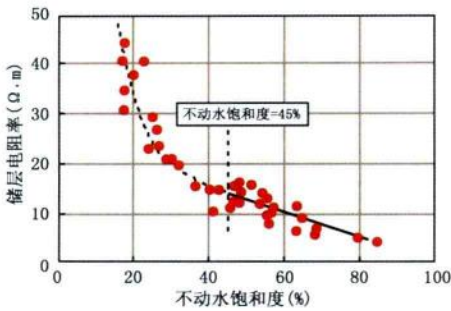


图 1-1-8 储层电阻率与不动水饱和度的关系

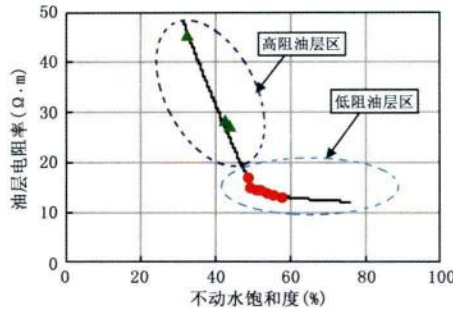


图 1-1-9 不同类型油层电阻率与不动水饱和度的关系

该图说明了两个问题：

- (1) 两类油层的电阻率变化趋势都是随着不动水饱和度的增大而降低的，高阻油层降低的速率较大，低阻油层降低的速率较小；
- (2) 低阻油气层的不动水饱和度明显高于高阻油气层的不动水饱和度。

四、高不动水饱和度低阻油气层测井特征

高不动水饱和度低阻油气层是实际工作中最常见的，但它往往与高阳离子交换量型低阻油气层相伴而生。孔隙结构和黏土含量与储层岩性密不可分，岩性越细，往往黏土含量也越高，相应的孔隙结构越复杂，而黏土含量增加时，也会导致储层孔隙结构的复杂化。这类低阻油气储层的特征是岩性细、泥质含量较高、孔隙结构复杂，这是导致储层具有高不动水饱和度的主要因素。但以蒙皂石、伊/蒙混层等有效黏土矿物为主的泥质成分又是其具有较高附加电导的根本原因。自然伽马、中子—密度测井曲线能够较好地反映储层岩性的变化，高自然伽马、高中子、高密度以及自然电位小幅度异常是这类低阻油气层的基本特征。如果黏土附加电导起主导作用，再加上高不动水饱和度因素，此时的油气层电阻增大率就可能远小于1。

图 1-1-10 为细岩性造成的高不动水低阻油层实例，图中水层（电阻率为 $12\Omega \cdot m$ ）

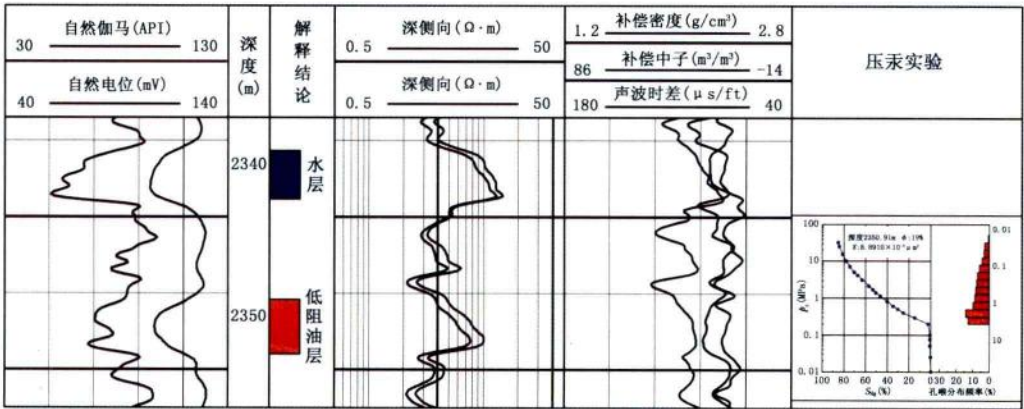


图 1-1-10 岩性细造成的高不动水低阻油层

和油层（电阻率为 $10\Omega \cdot \text{m}$ ）均经试油证实。油层段钻井取心显示岩性较细，岩心分析平均泥质含量为 11.4%、粉砂岩含量为 23%、粒度中值为 0.093mm ，不动水饱和度平均为 35%，而且压汞资料显示孔喉分布基本上没有明显的峰值，从中等孔喉到细小孔喉均有分布，孔喉半径集中分布在 $1.6 \sim 4\mu\text{m}$ 。测井资料显示自然伽马值较高，中子孔隙度和密度孔隙度存在较大的差异，这些都反映了储层岩性较细。

第二节 黏土附加导电作用形成的低阻油气层

目前所遇到的碎屑岩储层基本都存在一定量的填隙物，黏土是一种主要的填隙物，尤其是低能沉积环境下的储层中黏土成分更多。

黏土矿物是构成沉积岩泥质成分的主要组分，按温氏粒度分级，将碎屑岩直径小于 0.005mm 的颗粒称为黏土。黏土是一种层状硅酸盐矿物，常见的黏土矿物主要有四种类型：高岭石、蒙皂石、伊利石和绿泥石。黏土基本构造单元是硅氧四面体和铝（镁）八面体，四面体在平面上联结成片称为四面体片，八面体在平面上联结成片称为八面体片，四面体片和八面体片的相互组合构成黏土矿物的基本结构层。按其配合比例黏土矿物的基本结构层分为 1:1 层型和 2:1 层型两个基本类型，蒙皂石和伊利石属 2:1 层型黏土矿物，高岭石属 1:1 层型黏土矿物。

黏土矿物由于其独特的层状结构和微粒性而具有独特的性质，如吸附性、离子交换性、膨胀性、分散性、凝聚性等。这些特性决定于黏土矿物的不饱和电荷、黏土矿物的大比表面积和存在于其中的水。黏土矿物的这些特性导致了储层具有较高的不动水含量，而且具有高阳离子交换特性的有效黏土还可导致储层具有良好的附加导电性能，大大改善储层的导电能力，从而使得储层具有较低的电阻率，如果这样的储层中含有油气则可形成低阻油气层。

一、阳离子交换量对电阻率的影响

为了了解阳离子交换量对储层电阻率的影响，选择孔隙度和孔隙结构基本一致和阳离子交换量不同的两组岩石样品，在矿化度为 5000mg/L 、温度为 25°C 时进行岩石电阻率实验，研究饱含水岩石电阻率（ R_0 ）与阳离子交换量（ Q_v ）之间的关系。两组实验样品都为泥质砂岩，其中第一组实验配备了一块类似于纯砂岩的人工样品，岩心样品平均孔隙度为 12.3%，阳离子交换量范围为 $0.112 \sim 2.592\text{meq/mL}$ 。第二组岩心样品平均孔隙度为 14.91%，阳离子交换量范围为 $0.15 \sim 1.69\text{meq/mL}$ ，数据见表 1-2-1。

表 1-2-1 阳离子交换量对岩石电阻率的影响

岩 性	ϕ (%)	Q_v (meq/mL)	R_0 ($\Omega \cdot \text{m}$)
人工样品（纯砂岩）	12.3	0.01	58.0
泥质砂岩（第一组）	12.1	0.112	31.4
	12.3	0.2	28.6
	12.7	1.205	18.4
	12.1	2.592	12.1

续表

岩 性	ϕ (%)	Q_v (meq/mL)	R_0 ($\Omega \cdot m$)
泥质砂岩 (第二组)	15.15	1.69	6.66
	14.54	1.58	8.85
	14.57	0.84	15.45
	15.38	0.15	22.73

图 1-2-1 更直观地给出了的上述实验得到的饱含水岩石电阻率与阳离子交换量的实验关系图。由此可以得出两点：

(1) 岩石电阻率随着交换量 Q_v 的增加而显著降低，在其他影响电阻率大小的因素基本一致的情况下，阳离子交换量是影响岩石电阻率的重要因素；

(2) 在 Q_v 较低条件下容易形成高电阻率油气层， Q_v 较高情况下容易形成低阻油气层。

有效黏土矿物的含量是影响黏土阳离子交换量的重要因素之一，若有效黏土矿物的含量增高，则阳离子交换量增大，因此就会直接导致储层岩石电阻率的降低。

图 1-2-2 展示了储层电阻率与有效黏土矿物伊利石含量的相关关系。作为有效黏土矿物的伊利石含量小于 4% 时，电阻率一般大于 $10\Omega \cdot m$ ，但随着伊利石含量的增大，储层电阻率急剧降低；当伊利石含量大于 4% 时，电阻率一般小于 $10\Omega \cdot m$ ，伊利石含量的增大基本不影响储层电阻率。因此，储层中有效黏土的含量影响着储层电阻率的高低，有效黏土含量高则储层电阻率低，较容易形成低阻油气层。

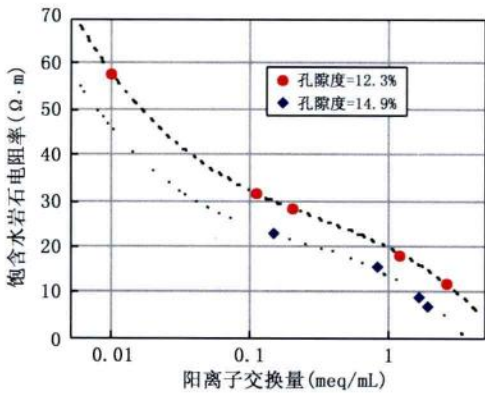


图 1-2-1 阳离子交换量对电阻率的影响

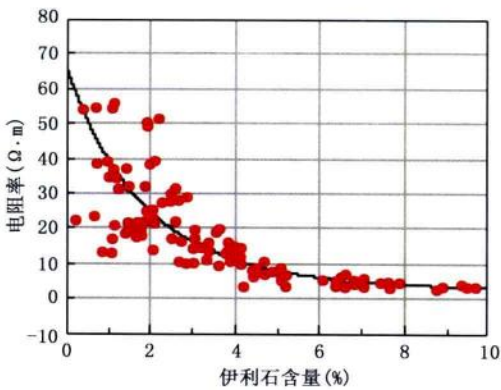


图 1-2-2 电阻率与伊利石含量关系

二、水膜厚度对电阻率的影响

扩散双电层理论认为黏土颗粒表面存在着一个扩散层，这个扩散层与自由水溶液的浓度有很大的关系。相对来说水溶液浓度越小，扩散层的厚度越大，其导致的吸附导电能力越强，则储层岩石电阻率就越低，这种情况下就越容易形成低阻油气层。

为了研究水膜厚度对储层电阻率的影响程度，采用 Wang 和 Sharma 理论模型进行数值模拟，水膜厚度分别取 $0.005\mu m$ 、 $0.01\mu m$ 和 $0.03\mu m$ ，模拟结果如图 1-2-3 所示。数值