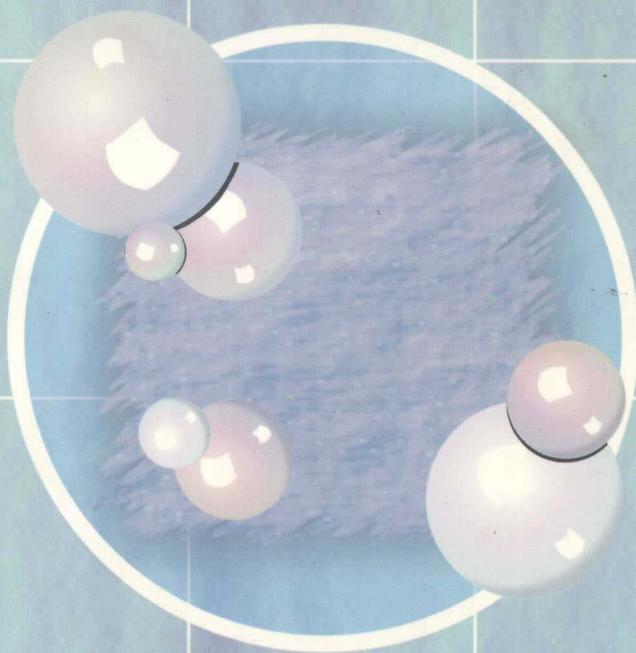


碎屑岩储集层 测井评价技术

谭成仟 宋子齐 编著



 SSTP 陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

碎屑岩储集层测井评价技术/谭成任,宋子齐编著.
西安:陕西科学技术出版社,2001.7

ISBN 7-5369-3327-4

I. 碎… II. ①谭…②宋… III. 碎屑岩—储集层—测井评价 IV. TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 044637 号

出 版 者 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话 (029) 7211894 传真 (029) 7218236
网址 <http://www.snstp.com>

发 行 者 陕西科学技术出版社
电话 (029) 7212206 7260001

印 刷 西安地质矿产研究所印刷厂

规 格 787 mm×1092 mm 16 开本

印 张 14.75 印张

字 数 320 千字

印 数 1—1000

版 次 2001 年 10 月第 1 版
2001 年 10 月第 1 次印刷

定 价 22.00 元

(如有印装质量问题,请与承印厂联系调换)

前 言

地球物理测井（简称测井）是应用地球物理学的一个重要分支学科，它是用多种专门仪器放入井内，沿井身测量钻井地质剖面上的各种物理参数，研究地下岩石物理性质与渗流特性，寻找和评价油气及其它矿藏资源的一门应用技术学科，现已广泛地应用于油气、金属矿、煤田、工程及水文地质等许多方面。测井技术包括测井方法、测井仪器、数据采集以及测井资料应用等相互区别又相互联系的四个部分。测井资料的应用是测井技术最后的、也是直接体现技术经济效益的最重要的组成部分。

测井资料在油气田勘探、开发中的应用非常普及，从油气勘探、开发、调整方案的制订、钻井工程等工作都离不开测井资料的应用，本书将重点介绍测井资料在储层评价中的应用，主要包括以下几个方面：碎屑岩储集层测井解释模型和油气评价技术，神经网络技术和灰色系统理论在油气储层评价及产能预测中的应用，不同类型碎屑岩储集层岩石物理相、流动单元分析和实际应用，以及储层、水淹层测井评价解释和剩余油分布描述，从方法原理、计算机技术到各类油气藏的实际应用和效果，都进行了详细的论述，力求读者能够灵活地应用于自己的工作和研究之中。

《碎屑岩储集层测井评价技术》是我们多年来从事科研工作的总结，与阐述理论相比，它更偏重于介绍实用方法和技术。作者意图通过本书介绍一些利用测井资料进行油气储集层评价的新思想、新技术和新成果，以促进我国有更多的石油、地质和油田开发工作者了解该领域的进展。希望本书能为从事石油测井、地质、油田开发等专业的技术工作者提供有益的参考，以推动测井地质和油田开发工作的进展，并拓宽其应用领域。

本书共分9章，第1章系统阐述了测井资料储集层评价基础，包括储集层的特点及评价储集层的测井系列、测井响应方程和相应储集层参数的测井解释模型。第2章阐述储集层油气评价和方法，主要介绍储集层含油气的定性解释、定量解释和快速直观显示解释方法。第3章介绍神经网络技术在测井储层评价中的应用，阐述了神经网络理论、分析方法和基本算法，开发并改进了神经网络模型及算法流程。通过应用实例，阐明了神经网络技术在确定油气储集层参数和储集层特征识别中的效果。第4章介绍灰色系统理论在测井储层评价中的应用，重点阐述了灰色系统理论精细评价油气储层的标准、权系数、分析准则和自动处理方法。通过辽河小洼~海外河油田和新疆克拉玛依油田八区克上组砾岩油藏实际应用，阐明了评价指标、处理过程、方法技术和实用效果。第5章介绍储层油气产能的测井预测模型和方法，阐述了油气储层产能的理论方程及影响因素，分析了产能预测的神经网络和灰色系统模型。通过新疆克拉玛依油田八区克上组砾岩油藏和辽河滩海地区海南构造带储层产能预测分析，阐明了产能等级划分、参数标准、评价处理及效果。第6章介绍储层岩石物理相研究，阐述了表征岩石物理相的参数及其灰色系统理论与模糊优化理论分析研究方法。通过胜利孤岛油田渤21断块和辽河油田沈84块实际应用，分别阐明了渤21断块馆陶组储层岩石物理相特征、

分布和沈 84 块沙河街储层岩石物理相划分,建立了相应的渗透率解释模型,提高了测井资料预测渗透率的精度。第 7 章介绍储层流动单元研究,阐述了储层流动单元分析的基本理论和划分的主要方法技术。通过新疆克拉玛依油田八区克上组砾岩油藏和吐哈盆地温米油田油藏流动单元类型、指标分析,阐明了区块各层段流动单元及剩余油分布和特征。第 8 章介绍水淹层测井评价解释及剩余油分布研究方法,主要阐述水淹层的地质及测井响应特征,分析剩余油饱和度的方法技术,以及水淹层的定性和定量评价解释。通过辽河沈 84 块和中原文 33 块油藏应用,阐明了方法技术及实用效果。第 9 章介绍测井储集层分布描述的方法技术,对测井资料校正、标准化、关键井研究、油田参数转化到储集层参数分布以及储量计算等关键技术进行了详细描述。

本书由谭成仟、宋子齐撰写,谭成仟负责全书的统稿和定稿工作。本书在编写过程中,引用了一些教材、专著和论文中的图件和实例,在此,谨向有关著作的作者表示衷心感谢。同时在工作中,得到了辽河油田勘探部、油气开发部、油田勘探开发研究院、沈阳采油厂、测井公司和新疆油田油气开发部、油田勘探开发研究院、采油二厂、测井公司以及华北油田二连勘探开发公司、胜利油田孤岛采油厂、中原油田勘探开发研究院等各级领导和同志们的关怀、指导和帮助,作者在此表示感谢。

由于作者水平有限,缺点和错误在所难免,欢迎读者批评、指正。

作者

2001 年 4 月 25 日

目 录

第 1 章 测井资料储集层评价基础

1.1 储集层的特点及其评价要点	(1)
1.1.1 储集层的地质特点	(1)
1.1.2 储集层的基本参数	(2)
1.1.3 划分岩性与储集层	(5)
1.1.4 储集层的评价要点	(8)
1.2 测井系列的选择	(10)
1.2.1 储集层的侵入特征	(10)
1.2.2 测井方法的探测深度	(13)
1.2.3 测井系列的选择	(16)
1.3 岩石体积模型及其测井响应方程	(21)
1.3.1 岩石体积物理模型	(22)
1.3.2 单矿物岩石体积模型及测井响应方程	(22)
1.3.3 双矿物岩石体积模型及测井响应方程	(30)
1.3.4 三矿物岩石体积模型及其测井响应方程	(31)
1.4 储集层参数测井解释模型	(32)
1.4.1 孔隙度	(32)
1.4.2 渗透率	(33)
1.4.3 泥质含量	(34)
1.4.4 粒度中值	(36)
1.4.5 孔隙喉道半径中值	(37)
1.4.6 含水饱和度	(38)
1.4.7 束缚水饱和度	(46)
1.4.8 油、水相对渗透率	(47)
1.4.9 含水率	(48)
1.4.10 其它相关参数	(49)

第 2 章 储集层油、气、水层识别

2.1 储集层油、气、水层的定性识别	(57)
2.1.1 标准水层对比法	(57)

2.1.2	油层最小电阻率法	(57)
2.1.3	径向电阻率法	(58)
2.1.4	邻井曲线对比法	(59)
2.2	储集层含油性的定量解释	(59)
2.2.1	纯地层含水饱和度的计算	(59)
2.2.2	泥质地层含水饱和度的计算	(60)
2.3	储集层油、气、水层的快速直观显示识别方法	(61)
2.3.1	双孔隙度法	(62)
2.3.2	视地层水法	(64)
2.3.3	径向电阻率法	(66)
2.3.4	电阻率—孔隙度交会图法	(67)
2.3.5	可动水分析法	(69)
2.3.6	气层识别方法	(70)

第3章 神经网络技术在测井储层评价中的应用

3.1	概述	(73)
3.1.1	神经网络综述	(73)
3.1.2	神经网络技术应用于测井解释的研究现状	(74)
3.2	神经网络基本理论	(75)
3.2.1	神经网络模型及基本算法	(75)
3.2.2	神经网络模型算法及分析	(76)
3.2.3	神经网络模型算法的改进及流程	(79)
3.2.4	用于测井解释的神经网络模型建立原则	(81)
3.3	神经网络技术在储层评价中的应用	(84)
3.3.1	神经网络技术确定油气储层参数	(84)
3.3.2	神经网络技术在储层特征识别中的应用	(88)
3.3.3	神经网络模型在测井储层评价解释中的特点	(90)

第4章 灰色系统理论在测井储层评价中的应用

4.1	概述	(93)
4.1.1	系统及其分类	(93)
4.1.2	灰色系统理论的产生与发展	(94)
4.1.3	灰色系统理论在储层评价中的应用特点	(95)
4.2	灰色系统理论分析处理方法	(95)
4.2.1	灰色系统理论储层精细评价标准、权系数及准则	(95)
4.2.2	灰色系统理论储层评价的自动处理方法	(96)
4.3	储层评价的地区性参数选择和评价标准的建立	(98)
4.3.1	建立工作区地层岩性的测井评价参数、标准及权系数	(98)

4.3.2	建立工作区储层物性的测井评价参数、标准及权系数	(99)
4.3.3	建立该区不同物性储层含油性的测井评价参数、标准及权系数	(100)
4.4	灰色系统理论在储层评价中的应用指标及处理过程	(101)
4.4.1	自动提取地层岩性、物性、含油性的评价参数、标准及权系数	(101)
4.4.2	地层岩性、物性、含油性的灰色处理过程	(103)
4.5	应用实例及效果分析	(106)
4.5.1	克拉玛依油田八区克上组砾岩油藏灰色系统精细评价参数、标准及权系数	(106)
4.5.2	克拉玛依油田八区克上组砾岩油藏评价解释的实际应用及效果	(108)

第5章 储层产能测井预测模型和方法

5.1	油气储层产能的理论方程及影响因素分析	(111)
5.1.1	储层产能的理论方程	(111)
5.1.2	影响储层产能的主要因素分析	(113)
5.1.3	测井资料预测油气储层产能的基本思想	(113)
5.1.4	产能预测参数选择	(113)
5.2	用于储层产能预测的神经网络模型和灰色系统模型	(114)
5.2.1	神经网络模型	(114)
5.2.2	灰色系统理论模型	(115)
5.3	实际应用	(116)
5.3.1	神经网络技术在新疆克拉玛依八区克上组油气储层产能预测中的应用	(116)
5.3.2	灰色系统理论在辽河滩海地区油气储层产能预测中的实际应用	(118)
5.4	结束语	(119)

第6章 储层岩石物理相研究

6.1	储层岩石物理相的研究方法	(121)
6.1.1	岩石物理相的定义	(121)
6.1.2	表征岩石物理相的参数	(121)
6.1.3	储层岩石物理相的划分方法	(122)
6.2	孤岛油田渤21断块储层岩石物理相研究	(124)
6.2.1	各类岩石物理相的特征	(124)
6.2.2	孤岛油田渤21断块馆陶组储层岩石物理相分布	(125)
6.3	基于岩石物理相的渗透率解释模型	(128)
6.3.1	基于岩石物理相的渗透率解释模型建立方法	(128)
6.3.2	应用实例	(129)
6.4	结束语	(132)

第7章 储层流动单元研究

7.1 概述	(133)
7.1.1 流动单元研究的背景	(133)
7.1.2 国内外研究现状	(134)
7.2 储层流动单元的基本理论	(136)
7.2.1 储层流动单元的定义	(136)
7.2.2 储层流动单元的影响因素	(137)
7.2.3 储层流动单元的研究方法	(137)
7.3 实际应用	(141)
7.3.1 克拉玛依油田八区克上组储层流动单元研究	(141)
7.3.2 吐哈盆地吉桑—米登油田三间房组流动单元研究	(144)

第8章 水淹层测井解释与剩余油分布

8.1 概述	(147)
8.1.1 水淹层和剩余油饱和度的概念	(147)
8.1.2 水淹层分类	(147)
8.2 水淹油层的特征	(149)
8.2.1 水淹油层的地质特征	(149)
8.2.2 水淹油层的地球物理特征	(152)
8.3 用常规测井定性识别水淹层	(154)
8.3.1 水淹层的测井定性识别方法	(154)
8.3.2 测井资料定性识别水淹层实例	(156)
8.4 用常规测井资料定量评价水淹层	(162)
8.4.1 地层水(混合液)电阻率研究	(162)
8.4.2 水淹层剩余油饱和度解释方法	(165)
8.4.3 水淹层其它参数分析计算及水淹层分类	(167)
8.5 水淹层分类识别的神经网络模型	(168)
8.5.1 测井录井信息对水淹级别的反映	(168)
8.5.2 水淹层分类识别的神经网络模型	(169)
8.5.3 实际应用	(170)
8.6 灰色系统理论水淹层测井评价参数研究	(170)
8.6.1 建立工作区水淹层的测井评价参数、标准及权系数	(171)
8.6.2 应用实例	(172)
8.7 用碳氧比测井确定剩余油饱和度	(173)
8.7.1 碳氧比能谱测井基本原理	(176)
8.7.2 碳氧比能谱测井资料解释	(176)
8.7.3 碳氧比能谱测井资料的应用	(179)

8.8 剩余油分布研究	(180)
8.8.1 剩余油的形成及分布形式	(180)
8.8.2 影响剩余油分布的主要因素	(182)
8.8.3 剩余油分布的基本特征	(183)
8.8.4 剩余油分布的研究方法	(186)
8.8.5 高含水期剩余油挖潜措施	(192)

第9章 测井储集层分布描述

9.1 原始测井资料的校正与标准化处理	(193)
9.1.1 测井曲线的深度校正	(193)
9.1.2 测井资料的环境影响校正	(196)
9.1.3 测井资料标准化	(196)
9.2 关键井研究	(203)
9.2.1 关键井应具备的条件	(203)
9.2.2 关键井的研究内容	(204)
9.2.3 建立测井解释模型与油田储层参数转换关系	(204)
9.3 储集层基本参数转换与集总	(207)
9.3.1 单井综合测井评价	(207)
9.3.2 地层对比	(208)
9.3.3 油层有效厚度物性参数下限的确定	(209)
9.3.4 储集层参数集总	(211)
9.4 油田构造与储集层参数空间分布研究	(211)
9.4.1 井间参数预测方法	(212)
9.4.2 储集层参数分布规律描述	(217)
9.4.3 油气储量计算	(217)

第 1 章 测井资料储集层评价基础

1.1 储集层的特点及其评价要点

1.1.1 储集层的地质特点

自然界中的岩石种类虽然很多,但并不是所有岩石都能储存石油和天然气。能够储存石油和天然气的岩石必须具备两个条件:一是具有储存油气的孔隙、孔洞和裂缝(隙)等空间场所;二是孔隙、孔洞和裂缝(隙)之间必须相互连同,在一定压差下能够形成油气流动的通道。我们把具备这两个条件的岩层称为储集层。就是说,储集层就是具有连通孔隙,既能储存油气,又能使油气在一定压差下流动的岩层。岩石具有由各种孔隙、孔洞和裂缝(隙)形成的流体储存空间的性质称为孔隙性;而它在一定压差下允许流体在岩石中渗流的性质称为渗透性。孔隙性和渗透性是储集层必须同时具备的两个最基本的性质,这两者合称为储集层的储油物性。储集层是形成油气层的基本条件,因而是应用测井资料进行地层评价和油气分析的基本对象。

地质上常按成因和岩性把储集层划分为三类:碎屑岩储集层、碳酸岩储集层以及其它岩类储集层。前二者是主要的储集层。不同类型的储集层具有不同的地质特征,本书以碎屑岩储集层为主要研究对象,因此这里主要介绍碎屑岩储集层的地质特征。

碎屑岩主要由各种岩石碎屑、矿物碎屑、胶结物以及孔隙空间组成。最常见的矿物碎屑为石英、长石和云母;岩石碎屑由母岩的类型决定;胶结物有泥质、钙质、硅质和铁质等。按岩石颗粒的大小(即粒径),可把碎屑岩分为砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩等(表 1-1)。

在这些碎屑岩中除泥质岩类(泥岩、页岩、粘土等)。其余都具有一定的储集性。目前世界上已发现的储量中大约有 40% 的油气储集于这一类储集层。该类储集层也是我国目前最主要、分布最广的油气储集层。

碎屑岩的粒度、分选性、磨圆度以及胶结物的含量和性质,控制着碎屑岩的储集性质。一般来说,粒度越大、分选性和磨圆度越好、孔隙空间充填的胶结物越少,则孔隙空间越大、连

表 1-1 碎屑颗粒的粒度分类表

碎屑名称		颗粒直径 (mm)
砾岩	巨砾岩	大于 1000
	粗砾岩	1000~100
	中砾岩	100~10
	细砾岩	10~1
砂岩	粗砂岩	1.0~0.5
	中砂岩	0.50~0.25
	细砂岩	0.25~0.10
粉砂岩	粗粉砂岩	0.10~0.05
	细粉砂岩	0.05~0.01
泥岩	粘土	小于 0.01

通性越好。

在碎屑岩剖面中，砂质岩为主要储集层，每组砂质岩之间，沉积有厚度较大的泥岩隔层（在测井解释中称为上、下围岩），这是碎屑岩剖面最基本的岩性特点。

碎屑岩储集层基本上就是砂岩和粉砂岩储集层，砾岩储集层较少，泥岩储集层（有裂缝才具储集性质）更少。一般砂岩储集层的储集性质（孔隙度和渗透率）主要取决于砂岩颗粒大小，同时还受颗粒均匀程度（分选程度）、颗粒磨圆程度和颗粒之间胶结物的性质及含量的影响。从理论上计算如果是同样直径的圆球颗粒，当相邻四个球心构成正方形时，则不论颗粒直径大小，其孔隙度都是 47.6%；如果相邻四个球心构成斜菱形（最紧排列），则孔隙度降为 25.9%，渗透性也变差，且颗粒愈细，渗透性愈差。砂岩胶结物一般是泥质的，也有灰质的，以泥质对储集性质影响最大。在测井中认为泥质是粘土、细粉砂与束缚水的混合物。当泥质含量较低时，它一般是分散在砂岩颗粒的表面，因而使砂岩粒间孔隙截面和孔隙体积减小，使其储集性质变差，泥质含量愈大影响愈大。这种泥质称为分散泥质，其含量不超过粒间孔隙体积的 40%。当泥质含量较高时，除了分散泥质，还会有层状泥质，即在砂岩中呈条带状分布的泥质。此外，在砂岩碎屑中还有泥质颗粒，它们将不改变砂岩粒间孔隙的结构，这种泥质称为结构泥质。研究泥质的含量、性质、分布形式及其对储集层性质和测井解释方法的影响，是现代测井解释的主要课题之一。

1.1.2 储集层的基本参数

在储集层评价中，需要由测井解释确定的基本参数包括反映储集层物性的孔隙度和渗透率，反映储集层含油性的含油气饱和度、含水饱和度、束缚水饱和度以及储集层的厚度等。用测井资料进行储集层评价及油气分析，就是要通过测井资料数据处理与综合解释来确定这些储集层参数，并对储集层的性质给以综合评价。

1. 孔隙度

储集层的孔隙度是指其孔隙体积占岩石总体积的百分数，它是说明储集层储集能力相对大小的基本参数。测井解释中常用的孔隙概念有总孔隙度、有效孔隙度和缝洞孔隙度。

总孔隙度 Φ_t 是指所有孔隙空间（无论孔隙的大小、形状和连通与否）占岩石体积的百分数；

有效孔隙度 Φ_e 表示彼此连通的、液体和气体可以在其中运移的那部分孔隙的体积占岩石体积的百分数；

缝洞孔隙度（次生孔隙度） Φ_2 是指有效缝洞孔隙体积占岩石体积的百分数。它是表征裂缝性储集层储集物性的重要参数，因为缝洞是岩石次生变化形成的，故常称为次生孔隙度或次生孔隙度指数。

一般来说，未固结的和中等胶结程度的砂岩，其 Φ_e 与 Φ_t 接近；但胶结程度高的砂岩，特别是碳酸盐岩，其中 Φ_e 通常比 Φ_t 大很多。同时，随着地层的埋藏深度增加，胶结和压实作用增强，砂岩的孔隙度也降低。砂岩的总孔隙度一般在 5%~30%；储油砂岩的有效孔隙度一般变化在 10%~25%。孔隙度低于 5% 的储油砂岩，除非其中有裂缝、孔穴之类，一般可认为无开采价值。

一般地说，孔隙度测井所提供的孔隙度是总孔隙度 Φ_t 。具体地讲，测井计算的声波孔隙度 Φ_s 、密度孔隙度 Φ_d 和中子孔隙度 Φ_N 等于总孔隙度 Φ_t 。对纯砂岩地层，通常认为总孔隙度

等于有效孔隙度,因此测井计算的孔隙度就认为是储层的有效孔隙度;对含泥质砂岩地层,总孔隙度 Φ_t 包含有效孔隙度 Φ_e 和泥质孔隙两部分,则储层的有效孔隙度 $\Phi_e = \Phi_t - V_{sh} \cdot \Phi_{sh}$, 其中 V_{sh} 和 Φ_{sh} 分别为泥质含量和泥质孔隙度,即有效孔隙度等于测井计算孔隙度减去泥质校正量。

2. 渗透率

为了评价储集层的生产能力,应了解油气流过岩石孔隙系统的难易程度。在有压力差的条件下,岩层允许流体流过其孔隙孔道的性质称为渗透性。岩石的渗透性的大小是决定油气藏能否形成和油气层产能大小的重要因素。常用渗透率来定量表示岩石的渗透性。渗透率就是在压力差作用下,岩石能通过石油和天然气的能力。根据达西定律,岩层孔隙中的不可压缩流体,在一定压力差条件下发生的流动,可由下式表示:

$$Q = K \frac{A \Delta P}{\mu L}$$

$$K = \frac{Q \mu L}{A \Delta P}$$

式中: Q ——单位时间通过岩样的流体或气体的体积, cm^3/s ; A ——垂直于流体流动方向的岩石横截面积, cm^2 ; L ——流体渗滤路径的长度, cm ; ΔP ——压力差, Pa ; μ ——流体或气体的粘度, $\text{MPa} \cdot \text{s}$; K ——岩石的渗透率, μm^2 。

在压力梯度为 101325 Pa/cm 条件下,粘度为 $1 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ 的流体在孔隙中作层流运动时,在 1 cm^2 横截面积上通过流体的流量为 $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ 时的岩石渗透率为 $0.987 (\approx 1) \mu\text{m}^2$ 。实际工作中,这个单位太大,常用它的千分之一作单位,即用 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为渗透率的单位。

达西定律只适用层流以及流体与岩石无相互作用的情况,实践证明,当只有一种流体通过岩样时,所测得的渗透率与流体性质无关,只与岩石本身的结构有关;而当有多种流体(如油和气、气和水以及油气水)同时通过岩样时,不同的流体则有不同的渗透率。因而渗透率有绝对渗透率、有效渗透率和相对渗透率之分。

(1) 绝对渗透率:绝对渗透率是岩石孔隙中只有一种流体(油、气或水)时测量的渗透率,常用符号 K 表示。其大小只与岩石孔隙结构有关,而与流体性质无关。因为常用空气来测量,故又称空气渗透率。测井解释通常所说的渗透率,就是指岩石的绝对渗透率。根据岩石绝对渗透率大小,按经验可把储集层分为:小于 1 到 $15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的,属差到尚可; $(15 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的,属中等; $(50 \sim 250) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的属好; $(250 \sim 1000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的,属很好;大于 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的,属极好。

(2) 有效渗透率:当两种以上的流体同时通过岩石时,对其中某一流体测得的渗透率,称为岩石对该流体的有效渗透率,岩石对油、气、水的有效渗透率分别用 K_o 、 K_g 、 K_w 表示。有效渗透率大小除与岩石孔隙结构有关外,还与流体的性质和相对含量、各流体之间的相互作用以及流体与岩石的相互作用有关。由试油资料求得的渗透率是有效渗透率。

多种流体同时通过岩石时,各单相的有效渗透率以及它们之和总是低于绝对渗透率的。这是因为多相共同流动时,流体不仅要克服自身的粘滞阻力,还要克服流体与岩石孔壁之间的附着力、毛细管力以及流体与流体之间的附加阻力等等,因而使渗透能力相对降低。

实践证明,流体的有效渗透率与它在岩石中的相对含量有关,当流体的相对含量变化时,其相应的有效渗透率随之改变。为此,引入相对渗透率的概念。

(3) 相对渗透率：岩石的有效渗透率与绝对渗透率之比值称为相对渗透率，其值在 0~1 之间变化。通常用 K_{ro} 、 K_{rg} 、 K_{rw} 分别表示油、气、水的相对渗透率。

在多种流体同时通过岩石的情况下，可用相对渗透率的大小来衡量某种流体通过岩石的难易程度。图 1-1 是亲水地层内仅含油和水的相对渗透率曲线示意图。从图 1-1 可以看出，当含水饱和度很低而含油饱和度很高时，水的相对渗透率接近于零，地层产油不出水。这时的含水饱和度叫做束缚水饱和度 S_{wb} 。当含水饱和度很高，而含油饱和度很低时，油的绝对渗透率接近于零，此时地层只出水不出油。这时的含油饱和度叫残余油饱和度 S_{or} 。

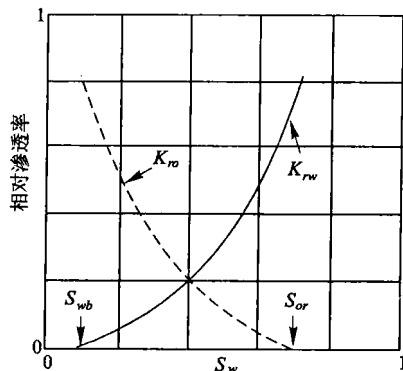


图 1-1 相对渗透率与饱和度的关系

3. 饱和度

储集层的含油性可由其饱和度来度量。孔隙中油气所占孔隙的相对体积称为含油气饱和度，通常用百分比(%)表示。显然，储集层孔隙中的含油气饱和度 S_h 与含水饱和度 S_w 之和为 1(或 100%)。因此，通常用含水饱和度 S_w 来描述储集层的含油性。

(1) 含水饱和度：岩石含水孔隙体积占总孔隙体积的百分数，称为含水饱和度，用 S_w 表示。岩石孔隙中的地层水分为束缚水和可动水两类：

束缚水是指被吸附在岩石颗粒表面的薄膜水和无效孔隙及狭窄孔隙喉道中的毛细管滞留水，在自然条件下不能自由流动的部分水。

可动水是指离颗粒表面较远，在一定压差下可以流动的地层水，亦称为自由水。

相应地有束缚水饱和度与可动水饱和度的概念：

束缚水饱和度：岩石中束缚水孔隙体积占总孔隙体积的百分数，称为束缚水饱和度，用 S_{wb} 表示。

可动水饱和度：岩石中可动水孔隙体积占总孔隙体积的百分数，称为可动水饱和度，用 S_{wm} 表示。

显然有以下关系式

$$S_w = S_{wb} + S_{wm}$$

储油层的各个部分均含有束缚水。在含油(气)部分，油(气)与束缚水共存；在含水部分，可动水与束缚水共存；在油—气过渡带，油、气与束缚水三相共存。

在储集层含油性评价中，束缚水饱和度是一个重要的概念。一般认为，储集层最初都是 100% 含地层水的，油气是后来由生油层系经运移进入储集层并挤出一部分地层水，最后在一定的保存条件下，油气与残留地层水即难以自由流动的束缚水共处于储集层孔隙中。

理论和实践均证明，储集层的束缚水含量取决于它的岩性。地层的泥质含量越多，岩石颗粒越细、孔隙喉道越窄，其束缚水饱和度越大。因此，不同岩性的储集层，它们的油、水层饱和度界限也是不同的。为了准确评价储集层的含油性，往往需要将地层水的含水饱和度 S_w 与束缚水饱和度 S_{wb} 进行比较。当 S_w 小，且 $S_w \approx S_{wb}$ 时，即只含束缚水时为油(气)层；反之，当 S_w 很高，且 $S_w \gg S_{wb}$ 时为水层；界于这两者之间的则为油水同层。储集层中的束缚水饱和度 S_{wb} 一般在 20%~50%， S_{wb} 低于 10% 的情况很少。但当油气聚集在天然裂缝或洞穴中

时, S_{wb} 值很低。

储集层中的束缚水含量直接影响着油气的最终采收率, 对油层的电阻率也有重要的影响。低电阻率油气层在很多情况下就是束缚水的含量过高造成的。研究束缚水的影响是当前电阻率测井资料解释的重要课题之一。

(2) 含油气饱和度: 岩石含油气体积占有效孔隙体积的百分数, 用 S_h 表示。

目前, 在测井解释中常用的含油气饱和度概念有以下几种:

原状地层的含油气饱和度 S_h : $S_h = 1 - S_w$ 。如果用 S_o 表示含油饱和度, S_g 表示含气饱和度, 则 $S_h = S_o + S_g$ 。按定义, 对于含油、气、水的储集层, 显然有 $S_o + S_g + S_w = 1$;

冲洗带中残余油气饱和度 S_{hr} 是指冲洗带中在井筒条件下, 不能被泥浆滤液所驱替的那部分油气体积含量, $S_{hr} = 1 - S_{xo}$; (其中 S_{xo} 是指冲洗带中的含水饱和度)

可动油气饱和度 S_{mo} 是指冲洗带中在井筒条件下, 被泥浆滤液所驱替的那部分油气体积含量, 在数量上等于冲洗带含水饱和度相对于原状地层含水饱和度增加的部分, 即 $S_{mo} = S_{xo} - S_w$ 或 $S_{mo} = S_h - S_{hr}$;

在评价油气层的生产能力时, 可动油饱和度 S_{mo} 是一个非常重要的参数。一般认为, 冲洗带内所含的油是不可动的残余油。因此, 冲洗带含水饱和度 S_{xo} 与原状地层含水饱和度 S_w 的差值, 为可动油饱和度 S_{mo} 。可动油饱和度 S_{mo} 的大小, 在一定程度上取决于原油的粘度, 粘度增大则可动油饱和度减小。显然, 可动油饱和度越大, 可采出的油气数量越多, 采收率也可能越高。可动油相对体积为 $\phi S_{mo} = \phi (S_{xo} - S_w)$ 。

4. 储集层的厚度

通常用岩性变化或孔隙度、渗透率的显著变化来划分储集层的界面。储集层顶底界面之间的厚度即为储集层的厚度。

在油气储量计算中, 要用油气层有效厚度, 它是指在目前经济技术条件下能够产出工业性油气流的油气层实际厚度, 即符合油气层标准的储集层厚度扣除不合标准的夹层 (如泥质夹层或致密夹层) 剩下的厚度。

目前, 常用自然电位、自然伽马、微电阻率、井径曲线来确定储层的有效厚度。

1.1.3 划分岩性与储集层

1. 定性划分岩性

定性划分岩性是利用测井曲线形态特征和测井曲线值相对大小, 从长期生产实践中积累起来的划分岩性的规律性认识。解释人员首先要掌握岩性区域地质特点, 如井剖面岩性特征、基本岩性特征、特殊岩性特征、层系和岩性组合特征及标准层特征等。其次, 要通过钻井取心和岩屑录井资料与测井资料作对比分析, 总结出用测井资料划分岩性的地区规律。表 1-2 为砂泥岩剖面上主要岩石的测井特征, 在应用表中总结的特征时不能等量齐观, 而应针对某一具体岩性找出有别于其他岩性的一二种主要特征。例如在淡水泥浆砂泥岩剖面, 目前的测井方法中微电极、自然电位、密度测井、中子测井以及自然伽马测井曲线是划分岩性的主要方法。而在盐水泥浆砂泥岩剖面中, 自然伽马和中子伽马变得非常有用, 电阻率和井径也可作一般参考。

表 1-2 主要岩石的测井特征

岩性	自然电位	自然伽马	微电极	电阻率	井径	声波时差
泥岩	泥岩基线	高值	低、平值	低、平值	大于钻头直径	大于 300
页岩	近于泥岩基线	高值	低、平值	低、平值较泥岩高	大于钻头直径	大于 300
粉砂岩	明显异常	中等值	中等正幅度差异	低于砂岩	小于钻头直径	260~400
砂岩	明显异常	低值	明显正幅度差异	中等到高, 致密砂岩高	小于钻头直径	250~380
煤层	异常不明显	低值	无幅度差异	高阻	接近钻头直径	350~450

例如在淡水泥浆钻的井内, 地层剖面由砂岩、粉砂岩、煤层和泥岩四种岩石组成。如果测井资料有自然电位、自然伽马、微电极、密度和电阻率曲线, 则可按下列步骤区分它们:

(1) 用自然电位和微电极测井曲线把渗透层和非透层区分开: 砂岩和粉砂岩的自然电位有明显负异常, 微电极有正幅度差, 而煤层和泥岩自然电位无异常, 微电极无幅度差。

(2) 利用自然电位、自然伽马和微电极测井曲线区分砂岩和粉砂岩: 砂岩的自然电位、自然伽马测井曲线的异常幅度大于粉砂岩的曲线异常幅度, 在微电极测井曲线砂岩异常幅度差大于粉砂岩异常幅度差。

(3) 利用电阻率和密度曲线可区分泥岩和煤层, 煤层为高阻, 泥岩为低阻; 泥岩密度测井值较高而煤层密度测井值在剖面上看则很低。

2. 储集层的划分

碎屑岩剖面中的储集层, 主要是砂岩、粉砂岩以及少数砾岩。通常, 在储集层的上下围岩都是厚度较大而稳定的泥岩隔层。这类储集层在测井资料上具有相当明显的特征标志, 以目前所采用的测井系列, 可准确地将渗透层划分出来。比较有效而常用的测井资料是自然电位 (或自然伽马)、微电极和井径, 如图 1-2。

①在井壁上存在一定厚度的泥饼, 这是碎屑岩储集层最重要的标志。在测井曲线上表现为井径缩小, 即实测井径小于或接近钻头直径; 在微电极曲线上表现为中等视电阻率, 曲线变化平缓, 具有明显的正幅度差。

②泥浆侵入储集层, 形成侵入带, 因而用不同探测深度的电阻率法测井曲线 (长、短梯度电极系; 深、浅侧向测井; 深、浅感应测井) 求得的地层电阻率, 出现明显的差异, 即存在径向电阻率梯度变化。

③碎屑岩剖面上的储集层中泥质含量都较低, 在自然电位曲线上表现为明显的负异常 ($R_{mf} > R_w$), 或在自然伽马曲线上显示为明显的低值。

以上是碎屑岩储集层在一般正常情况下所具有的特征标志。在非正常情况下, 特别是在泥浆性能变坏、泥浆不均匀、或测井曲线质量较差时应特别注意。这是应综合分析孔隙度测井曲线, 如中子测井曲线, 声速测井曲线, 密度测井曲线来划分储集层。

一般来说, 先用自然电位 SP 、自然伽马 GR 、微电极 ML 曲线及井径曲线确定渗透层位置后, 再用微电极 ML 曲线准确确定渗透层上下界面, 图 1-2 示出我国砂泥岩剖面中常用的测井系列及综合测井图, 并用上述方法划分出渗透层如图所示。

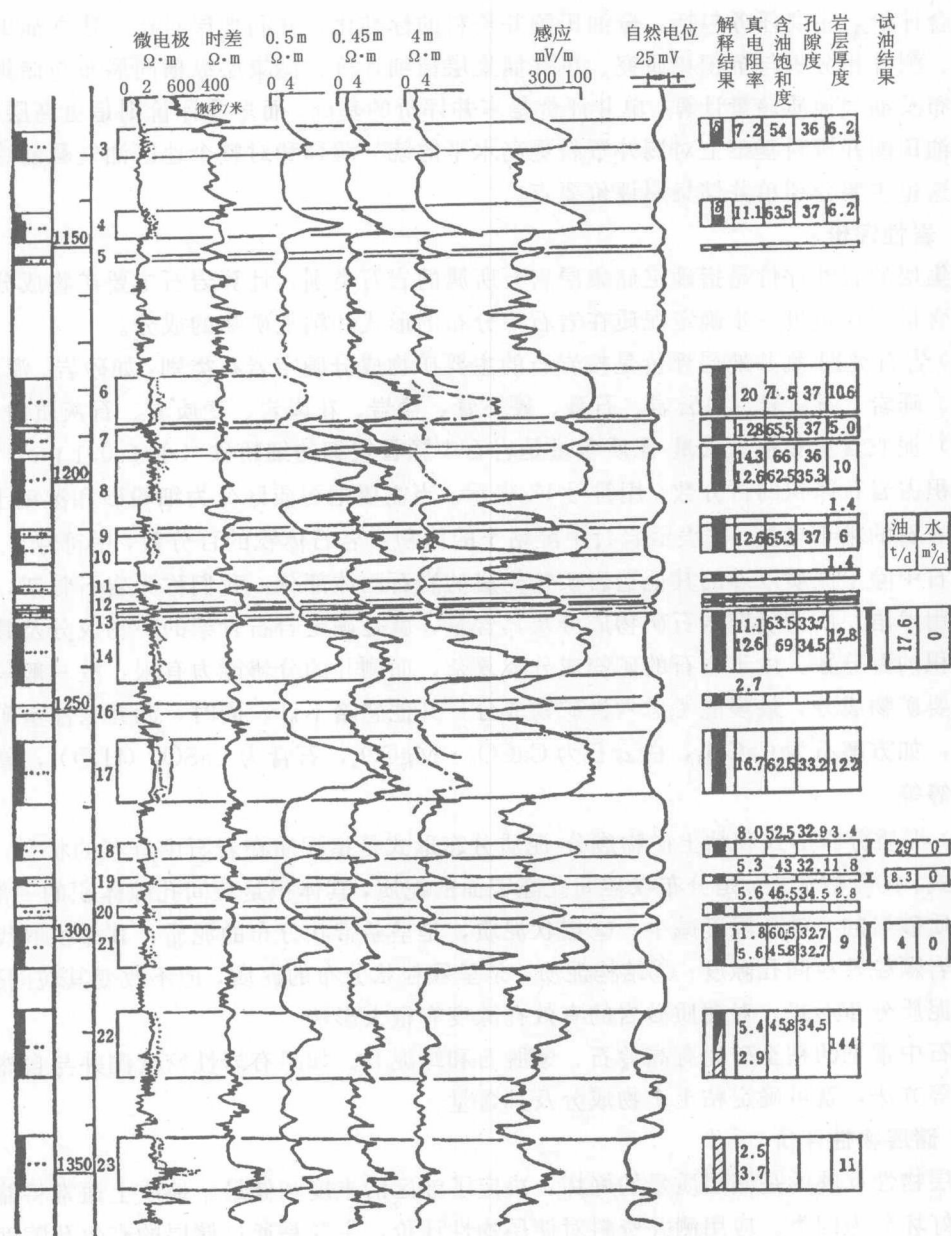


图 1-2 砂泥岩剖面综合测井图实例

1.1.4 储集层的评价要点

储集层评价是测井解释的基本任务，这包括单井评价与多井评价。单井储集层评价就是在油井地层剖面中划分储集层，评价储集层的岩性、物性、含油性以及油气产能。多井评价则是油藏描述的基本组成部分，它是着眼于在面上对一个油田或地区的油气藏整体的多井解释和综合评价，主要任务包括：全油田测井资料的标准化、井间地层对比、建立油田参数转换关系、测井相分析与沉积相研究、单井储集层精细评价、储集层纵横向展布与储集层参数空间分布及油气地质储量计算。单井评价是多井评价的基础，而多井评价则是更高层次发展，是在全油田测井资料基础上对测井资料更高水平的统一解释和对整个地区油气藏的综合地质评价。这里主要介绍单井储集层评价要点。

1. 岩性评价

储集层的岩性评价是指确定储集层岩石所属的岩石类别，计算岩石主要矿物成分的含量和泥质含量，还可进一步确定泥质在岩石中分布的形式和粘土矿物的成分。

(1) 岩石类别 测井地层评价是按岩石的主要矿物成分确定岩石类别，如砂岩、泥质砂岩、粉砂岩、砾岩、石灰岩、白云岩、石膏、硬石膏、盐岩、花岗岩、变质岩、石灰质白云岩等。

(2) 泥质含量和粘土含量 泥质含量是岩石中颗粒很细的细粉砂（小于 0.1 mm）与湿粘土的体积占岩石体积的百分数，用符号 V_{sh} 表示。当需要把泥质区分为细粉砂和湿粘土时，则要计算岩石的粘土含量，它表示岩石中湿粘土的体积占岩石体积的百分数，用符号 V_{clay} 表示。

岩石中除了泥质以外的其他造岩矿物构成的岩石固体部分，我们称为岩石骨架，这是测井的专用术语。所谓确定岩石矿物成分及其含量，就是确定岩石骨架的矿物成分及其体积占岩石体积的百分数。由于岩石的矿物成分较复杂，而测井的分辨能力有限，故一般只考虑一二种主要矿物成分，最多能考虑六种矿物成分，其他忽略不计。同时，测井只注重矿物的化学成分，如方解石为 CaCO_3 ，白云石为 $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ，石膏为 $\text{CaSO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})_2$ ，硬石膏为 CaSO_4 等等。

(3) 泥质分布形式和粘土矿物成分 泥质分布形式是指泥质在岩石中分布的状态，一般有三种形式：①分散泥质，是分布在粒间孔隙表面的泥质，其体积是粒间孔隙体积的一部分，故它使泥质砂岩的有效孔隙度减少；②层状泥质，是呈条带状分布的泥质，其体积取代了相应的纯砂岩颗粒及粒间孔隙度；③结构泥质，是呈颗粒状分布的泥质，但不改变其粒间孔隙度。因此，泥质分布形式，对泥质砂岩的有效孔隙度有很大影响。

岩石中常见的粘土矿物有高岭石、蒙脱石和绿泥石。如果有岩性密度测井与自然伽马能谱测井等方法，就可确定粘土矿物成分及其含量。

2. 储层物性评价

储层物性反映的是储层质量的好坏，决定了油区的丰度和储量。地质上通常将储层根据物性的好坏分为四类。应用测井资料对储层物性评价，主要是通过储层的有效孔隙度、绝对渗透率、有效渗透率、孔渗关系等进行储层的评价分类。

测井计算反映储层物性的参数主要有孔隙度、渗透率、泥质含量以及粒度中值，甚至颗粒分选系数等，显然储层孔隙度高、渗透率大、泥质含量低、粒度大而均匀则储层物性好，相反，储层孔隙度低、渗透率小、泥质含量高、粒度细或颗粒不均匀则储层物性差。