

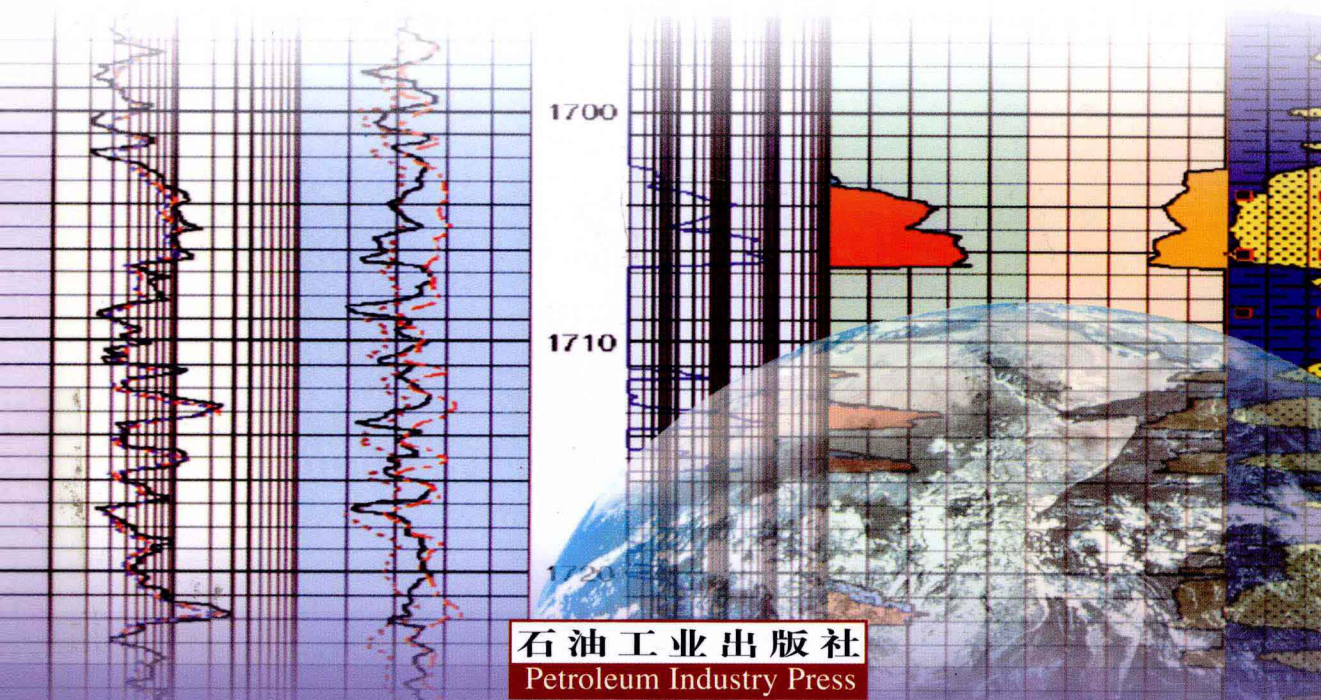


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

地球物理测井

宋延杰 陈科贵 王向公 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校石油天然气类规划教材

地球物理测井

宋延杰 陈科贵 王向公 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面介绍了地球物理测井的各种方法和综合解释方法,主要包括电法测井、声波测井、放射性测井、成像测井、工程测井与地层测试、生产动态测井和地层倾角测井的基本原理和应用,常规录井技术、综合录井技术、录井新技术及其应用,纯岩石、泥质砂岩、碳酸盐岩地层评价方法以及测井资料数据处理的基本方法。

本书是为石油高等院校资源勘查工程、石油工程等专业的全日制本科设置的地球物理测井课所编写的教材,也可作为这些专业及其他有关专业的科技人员在职培训或进修选用的教材。

图书在版编目(CIP)数据

地球物理测井/宋延杰,陈科贵,王向公主编.
北京:石油工业出版社,2011.5
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材·高等院校石油天然气类规划教材)
ISBN 978-7-5021-8267-0

- I. 地…
- II. ①宋…②陈…③王…
- III. 测井-高等学校-教材
- IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 017770 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)64523574 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

2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:26.25

字数:672 千字

定价:42.00 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

地球物理测井是应用地球物理学的一个分支,简称测井(well logging)。它是在勘探和开采石油、天然气、煤、金属矿等地下矿藏的过程中,利用各种仪器测量井下地层的物理参数和井眼的技术状况,以解决地质和工程问题的一类工程技术的总称。它是应用物理学原理解决地质和工程问题的一门边缘性技术学科,是石油工业发展中的重要学科之一。长期以来,测井技术在石油勘探开发中发挥着重要的作用,勘探测井被称为寻找油气田的“眼睛”,生产测井被称为油气田开发的“医生”。

随着油气勘探开发的发展,不断出现一些复杂难题。勘探方面,油田总体规模变小,储集层条件变差、类型增多、岩性复杂,储集层非均质性严重,物性变化范围大,薄互层及低孔、低渗储集层普遍存在;开发方面,由于长期注水,储集层岩性、物性、含油性、电性等都发生了较大的变化。这些难题的解决推动着地球物理测井方法与技术不断向前发展。电缆测井技术经历了模拟测井、数字测井、数控测井和成像测井四个阶段,在每个阶段均推出了许多测井新方法、新技术和新装备。特别是20世纪90年代以来,声成像、电成像、核磁共振测井的出现,使得测井数据的应用范围不断拓宽,应用水平不断提高,已经从最初的井间地层对比发展到油气藏综合描述、生产动态监测和工程问题的整体描述与解决。

本书是为石油高等院校中资源勘查工程、石油工程等专业的全日制本科设置的地球物理测井课所编写的教材。由于资源勘查工程、石油工程等专业的工程技术人员在生产实践中主要应用测井资料解决地质、生产、工程等方面问题,因此,在教材的编写中,编者按照基本原理和应用并重的原则,注重加强教材的实用性。基本原理部分做到阐述清楚、明了,能够使不同专业和不同层次的人都易于接受;应用部分则进行全面和详尽的阐述,充分满足现场工程技术人员需要。同时,在保留经典内容的基础上,编者十分注重技术的更新,将本学科及相关学科发展的最新技术引入教材中,如引入成像测井技术、现代录井技术、新的测井解释方法等。本书几乎涵盖了测井技术的方方面面,从测井原理到测井解释,从裸眼井测井到生产测井,从常规测井技术到成像测井技术,从常规的碎屑岩储集层测井解释方法到碳酸盐岩储集层测井解释方法等等,是一本内容丰富的教材。

在本书编写过程中,参考了多部教材和专著,在此向这些教材和专著的作者表示衷心的感谢。

本书由宋延杰(东北石油大学)、陈科贵(西南石油大学)、王向公(长江大学)主编。本书第一章和第九章第一节、第二节、第四节由宋延杰编写;第六章第二节、第七章和第八章第一节由陈科贵编写;第二章由王向公编写;第四章由蔺景龙(东北石油大学)编写;第五章由李鹏举(东北石油大学)编写;第八章第二节和第九章第三节由李雪英(东北石油大学)编写;第三章由徐德龙(东北石油大学)编写;第六章第一节由邱春宁(西南石油大学)编写。全书由宋延杰统校。

由于编者水平有限,教材中一定还有不当之处,在此诚请使用本教材的广大师生和阅读本书的读者提出宝贵意见,以便教材再版时修改。

编者

2010年12月

目 录

第一章 储集层评价基础	(1)
第一节 储集层分类和特点	(1)
第二节 储集层的基本评价参数	(3)
第三节 油气水层特征	(6)
第二章 电法测井	(11)
第一节 自然电位测井	(11)
第二节 普通电阻率测井	(19)
第三节 侧向测井	(35)
第四节 冲洗带电阻率测井	(43)
第五节 感应测井	(51)
第三章 声波测井	(61)
第一节 岩石的声学特性	(61)
第二节 声波速度测井	(65)
第三节 声波幅度测井	(77)
第四节 长源距声波全波列测井	(83)
第四章 放射性测井	(89)
第一节 放射性测井核物理基础	(89)
第二节 自然伽马测井	(96)
第三节 自然伽马能谱测井	(99)
第四节 密度测井	(103)
第五节 岩性密度测井	(105)
第六节 中子测井	(108)
第五章 成像测井	(120)
第一节 井壁成像测井	(120)
第二节 其他声电成像测井	(141)
第三节 核磁共振测井	(151)
第六章 工程测井与地层测试	(166)
第一节 常用工程测井方法	(166)
第二节 电缆地层测试器	(196)

第七章 生产动态测井	(209)
第一节 涡轮流量计及其工作原理	(209)
第二节 连续流量计测井	(212)
第三节 集流式流量计测井	(217)
第四节 示踪流量计	(219)
第五节 电磁流量计	(221)
第六节 流体持水率计	(223)
第七节 流体密度计	(227)
第八节 产出剖面综合解释	(230)
第九节 吸水剖面解释	(241)
第八章 地层倾角测井与录井技术	(243)
第一节 地层倾角测井	(243)
第二节 录井技术	(267)
第九章 测井资料综合解释与数据处理	(292)
第一节 纯岩石地层评价方法	(292)
第二节 泥质砂岩地层评价方法	(324)
第三节 碳酸盐岩地层评价方法	(379)
第四节 测井资料数据处理	(408)
参考文献	(413)

第一章 储集层评价基础

石油和天然气储藏在地下具有连通的孔隙、裂缝或孔洞的岩石中。自然界中存在着各种各样的岩层,例如沉积岩层、火成岩层、变质岩层等,但并不是所有的岩层都能储集油气。在石油地质中,把能够储存和渗滤流体的岩层称为储集层。由此可见,储集层必须具备两个基本条件:一是孔隙性,即具有储存石油、天然气、水等流体的孔隙、裂缝、孔洞等空间场所;二是渗透性,即这些空间场所必须是连通的,能够形成油气水等流体的流动通道。用测井资料划分并剖面的岩性和储集层,评价储集层的岩性、物性、含油性、生产价值和生产情况等,是测井技术最基本和最重要的应用,也是测井技术其他应用的基础。

第一节 储集层分类和特点

世界上能够储集石油和天然气的岩石有许多,按其岩石的性质来划分,主要有碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层和其他岩类储集层。世界上近 95% 的油气田都发现在前两种储集层中,而其他岩类储集层的岩石类型尽管很多,但在世界油气总储量中只占很小的比例,故其意义远不如碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层。

一、碎屑岩储集层

碎屑岩主要是由各种岩石碎屑、矿物碎屑、胶结物(泥质、灰质、硅质和铁质)及孔隙空间组成。碎屑岩颗粒最常见的矿物有石英、长石、云母及重矿物,其中,石英、长石在碎屑岩中占 95% 以上。碎屑岩的岩石类型包括从砾岩、砾状砂岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩到粘土岩各种粒级的岩石,表 1-1 给出了常用的碎屑颗粒的粒度分级。世界各地的碎屑岩储集层以砂岩为主,其次为砾岩。其中,以中、细砂岩和粉砂岩为主,砾岩、砾状砂岩、粗砂岩储集层在一些盆地都不同程度地出现。目前,碎屑岩储集层是我国最主要和分布最广的储集层。世界上已发现的油气储量中,大约 58% 的石油和 75% 的天然气储存在碎屑岩中。

表 1-1 碎屑颗粒的粒度分级表

碎屑名称		颗粒直径,mm
砾	巨砾	>1000
	粗砾	1000~100
	中砾	100~10
	细砾	10~2
砂	巨砂	2~1
	粗砂	1~0.5
	中砂	0.5~0.25
	细砂	0.25~0.1
粉砂	粗粉砂	0.1~0.05
	细粉砂	0.05~0.01
粘土(泥)	粘土(泥)	<0.01

碎屑岩储集层中最常见的孔隙空间主要是碎屑颗粒之间的粒间孔隙,影响储集层性质的主要因素有:

(1)碎屑颗粒的排列方式和大小。碎屑颗粒的排列方式主要有紧密排列、不紧密排列、中等紧密排列。其中,紧密排列排列密,孔隙度小,连通性较差,渗透率低,储集物性差;不紧密排列排列疏松,孔隙度大,连通性好,渗透率高,储集物性好;而中等排列介于两者之间。

颗粒近于球形且大小均等时,孔隙度与颗粒大小无关。但随着颗粒减小,孔隙连通变差,流体与孔隙内壁之间的吸附力增大,有效孔隙度和渗透率随之降低。

(2)碎屑颗粒的分选程度和圆球度。岩石的分选程度差,大颗粒之间会被小颗粒充填,小颗粒之间会被更小的颗粒充填,孔隙度、渗透率低,物性变差;圆球度差,颗粒凸凹不平,形状不规则,常常互相镶嵌,彼此咬合,从而使颗粒间孔隙度减小、渗透率降低、物性变差。

(3)胶结物的含量、类型和成分。胶结物的含量、类型和成分对储集物性有明显的影响。胶结物含量高,粒间孔隙多被充填,孔隙体积、半径变小,孔隙连通性变差,导致储集物性变差。胶结物的多少直接决定着胶结类型,胶结物含量高,一般为基底或孔隙—基底式胶结,储集物性差;胶结物含量低,多为接触或接触—孔隙式胶结,储集物性较好。胶结物成分对储集物性好坏也有直接影响,硅—铁质或铁质或钙质胶结的岩石较致密,储集物性差;泥质或泥质—钙质胶结的岩石较疏松,储集物性好。

二、碳酸盐岩储集层

碳酸盐岩储集层包括石灰岩、白云岩、生物碎屑灰岩等,这一类储集层在世界上占有很重要的地位。碳酸盐岩储集层中的油气储量占世界油气总储量的一半,而产量占总产量的60%以上。中东的高产油气田,我国华北的震旦系、寒武系和奥陶系的产油层,我国四川的震旦系、二叠系、三叠系的油气层,均属于这一类。

碳酸盐岩的基本化学成分是碳酸盐,如 CaCO_3 , MgCO_3 等。矿物组成主要为方解石和白云石,此外,还有文石、菱铁矿、菱锰矿以及铁白云石等,还含有一些非碳酸盐矿物,如粘土矿等。矿物成分以方解石为主的称为石灰岩,而矿物成分以白云石为主的称为白云岩。

碳酸盐岩一般比较致密,其原生孔隙很小,一般只有1%~2%,但其性脆,化学性质不稳定,容易形成各种各样的裂缝、孔洞。一般认为,只要碳酸盐岩的总孔隙度(包括原生和次生孔隙)大于5%,就具有渗透性。

碳酸盐岩的储集空间具有多样性、分布不均匀等特点,储集空间类型主要有三种:

(1)孔隙性储集空间。孔隙性储集空间主要由颗粒、生物骨架和结晶颗粒支撑的粒间孔隙、晶间孔隙、鲕状孔隙、生物体腔形成的粒内孔隙组成,它们一般是在岩石成岩过程中形成的原生孔隙。而晶间孔隙可以是沉积时期形成的,但更多的是在成岩后生阶段由于白云岩化作用及重结晶作用等形成的。具有这种储集空间的储集层物性、油气水分布、钻井液侵入特性等与砂岩储集层类似,适用的测井方法与解释方法也基本相同。

(2)裂缝性储集空间。裂缝性储集空间主要是由构造裂缝组成,其特点是:岩石致密,平均孔隙度很小;由于裂缝的数量、形状和分布极不均匀,致使裂缝性储集空间的孔隙度、渗透率变化大,油气水分布不规律;主要裂缝发育带厚度很小,一般为1m左右;裂缝性储集空间的渗透率高,钻井液侵入较深。对于裂缝异常发育而原生孔隙又很低,以致在通常的测井探测范围内可以认为裂缝是均匀分布的裂缝性储集层,测井解释效果比较好;对于裂缝不太发育、分布又不均匀、裂缝孔隙度很小、粒间孔隙度也很低的孔隙—裂缝性储集层,目前测井解释还存在很多困难。

(3) 洞穴型储集空间。洞穴型储集空间主要是由溶蚀作用、结晶作用或其他次生变化形成的比较大的孔洞。这类孔洞形状不一,大小悬殊。这是富集油气的一种重要的孔隙类型,常是钻遇高产油气层的一种显示。目前,测井解释只考虑较小的洞穴,并认为它们在测井探测范围内是均匀分布的。

三、其他岩类储集层

这类储集层包括岩浆岩、变质岩和泥岩等。它们都很致密,由于成岩作用以后的风化作用、剥蚀作用或其他强烈的构造运动作用,可以形成次生孔隙和裂缝。如果靠近油源,这些次生的孔隙和裂缝有可能储集油气。

第二节 储集层的基本评价参数

储集层是形成油气层的基本条件,是应用测井资料进行地层评价和油气分析的基本对象,因而了解储集层岩石的物性和含油性好坏具有十分重要的意义。在油气田的勘探开发阶段,通过探井、评价井和开发井的岩心分析、测井解释和现场试井,所取得的储集层岩石物性和含油性资料,是进行油气藏评价、射孔完井的产能分析和计算的重要参数。本节重点介绍孔隙度、渗透率等描述储集层岩石物性好坏的参数,介绍含油饱和度、含水饱和度、束缚水饱和度等描述储集层岩石含油性好坏的参数。

一、孔隙度

岩石的孔隙性是衡量岩石的孔隙空间储集油气能力的一个重要度量,岩石的孔隙性一般用孔隙度来表示。储集岩石的孔隙度定义为岩石本身的孔隙体积和岩石体积之比值。它是一个量纲为1的量,它可以用小数或百分数表示,定义式为:

$$\phi = \frac{V_p}{V}$$

式中 ϕ ——孔隙度,小数;
 V_p ——岩石孔隙体积, cm^3 ;
 V ——岩石体积, cm^3 。

对于任何实际的储集层,并不是所有的孔隙都是连通的,而只有那些相互连通的孔隙才具有储油气的能力。因此,通常又将孔隙度划分为总孔隙度、有效孔隙度、缝洞孔隙度。总孔隙度定义为岩石中总孔隙体积与岩石体积之比,用 ϕ_t 表示;有效孔隙度定义为岩石中连通孔隙体积与岩石体积的比值,用 ϕ_e 表示;缝洞孔隙度定义为岩石中缝洞孔隙体积与岩石体积的比值,用 ϕ_2 表示。大量的实验研究表明,纯砂岩储集层的总孔隙度和有效孔隙度基本上是同一数值。

岩石孔隙是指组成岩石的各种颗粒间的空间场所,按其生成和形成过程可分为:

(1) 原生孔隙:在沉积过程中形成的孔隙,如碎屑沉积(包括砂岩、砾岩等)颗粒间的粒间孔隙、岩层层理、层面间的层间孔隙等。它由颗粒形状、分选程度、排列方式和胶结程度等因素决定。

(2) 次生孔隙:岩石生成后由次生作用形成的孔隙。它由溶解过程、盐类和胶结物的重新沉淀以及岩石的白云化、构造运动产生裂缝等因素决定。

岩石的孔隙度越大,说明岩石中孔隙空间越多。在自然条件下,岩石中孔隙的大小不同,孔隙间连通程度不同,对流体的储存和流动所起的作用是不相同的。实践证明,储集层的性质在很大程度上是由孔隙、孔道的大小来决定的。所以根据孔隙的大小和它们对流体的作用,可把岩石孔隙分为三类:

(1)超毛细管孔隙:孔隙直径大于0.5mm,裂缝宽度大于0.25mm。在自然条件下,此类孔隙中除岩石颗粒表层有一层不能流动的束缚水(薄膜滞水)外,在重力作用下其他流体(油气和水)可在毛细管中自由流动。一些胶结疏松的砂岩和未胶结的砂岩中的孔隙均属于此类。

(2)毛细管孔隙:孔隙直径为0.5~0.0002mm,裂缝宽度为0.25~0.0001mm。此类孔隙中除颗粒表面的束缚水之外,某些毛细管弯曲较大的地方也有不能流动的滞水,油气和水由于受到毛细管阻力作用在毛细管孔道内不能自由流动。只有当外部的压力作用大于本身的毛细管阻力时,它们才能在其中流动,一般的砂岩孔隙属于此类。

(3)微毛细管孔隙:孔隙直径小于0.0002mm,裂缝宽度小于0.0001mm。由于孔隙极其微小,毛细管对流体的束缚力很大,在通常压力下,流体在其中不能流动。此类孔隙中的流体通常是成岩过程中形成的地层水,其他地层生成的油气不可能进入此类孔隙。一般粘土层和泥岩的孔隙均属于此类,这类岩层是非储集层,即生油层或是盖层。

根据岩石孔隙的三种类型,可更清晰地理解岩石有效孔隙的概念。有效孔隙指除去粘土束缚水、“死孔隙”(指不与总的孔隙系统连通的孔隙)的岩石孔隙。

二、渗透率

岩石的渗透性是指岩石允许流体通过的能力,一般用渗透率来表示。渗透率是衡量流体通过相互连通的岩石孔隙空间难易程度的尺度。很多岩层,如粘土、页岩、硬石膏和一些胶结程度较高的砂岩,即使是多孔的,但是水、石油或天然气也不能在其中流动。

1856年,法国工程师 H. Darcy 根据实验,导出了一种用于描述流体通过多孔岩石流动的关系式,即达西定律。达西定律说明,通过某一给定岩石的流量与岩石的横截面积和所施加的压力差成正比,而与岩石的长度和流体的粘度成反比,其比例系数为岩石的渗透率,表达式为:

$$K = \frac{q\mu L}{A\Delta p} \quad (1-1)$$

式中 q ——流量, cm^3/s ;

A ——流体流动的岩石横截面积, cm^2 ;

μ ——粘度, cP ($1\text{cP} = 0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$);

L ——流体流动的岩石长度, cm ;

Δp ——流体流动的岩石两端的压差, atm ($1\text{atm} = 101325\text{Pa}$);

K ——渗透率, D 。

岩石渗透率的单位为达西 D (或平方微米 μm^2)。1 D 的岩石渗透率定义为长度是1 cm 、横截面积为1 cm^2 的岩石,两端的压力差为1 atm ,有粘度为1 cP 的流体通过,而且每秒钟流量为1 cm^3 。实际应用中,由于达西单位比较大,一般用 mD (或 $10^{-3}\mu\text{m}^2$) 表示岩石的渗透率, $1D = 1000\text{mD}$ 。

在实验室中,用不同的流体可以测量几种渗透率(常用的试验流体是空气、石油、天然气和盐水)。工程师和地质学家定义了以下几种渗透率,以便在用实验资料对储集层性能评价时作出区别。

(一)绝对渗透率

当岩心孔隙被一种流体 100% 饱和时,只有该种流体通过岩心时的岩石渗透率称为岩石的绝对渗透率,用 K 表示。它反映了岩石本身的性质及其特有的孔隙空间形态。岩石绝对渗透率大小只与岩石本身的性质及岩石孔隙结构有关,而与流体的性质无关。如果岩石被其他流体饱和并实验时(假定所饱和的流体不与岩石发生化学反应,从而不改变岩石的孔隙空间),岩石的绝对渗透率不变。岩心分析或测井解释给出的渗透率一般是指岩石的绝对渗透率。

(二)有效渗透率

当有两种或两种以上的流体通过岩石的孔隙时,对其中某一种流体测得的渗透率称为该种流体的有效渗透率,也称相渗透率,通常用 K_o, K_w, K_g 分别表示岩石对油、水、气的有效渗透率。有效渗透率除和岩石结构有关以外,还与流体的性质和相对含量以及流体和岩石的相互作用有关,一般由试油资料确定的渗透率为有效渗透率。

(三)相对渗透率

某种流体的相对渗透率是同一岩石某种流体的有效渗透率和该岩石绝对渗透率的比值,其值在 0 ~ 1 之间。通常用 K_{ro}, K_{rw}, K_{rg} 分别表示油、水、气的相对渗透率,相对渗透率是饱和度的函数。它可以衡量多种流体通过岩石时某种流体通过岩石的难易程度。除受岩石的性质、孔隙结构影响外,它还受润湿性、流体类型和分布及含量等影响。

三、饱和度

饱和度用来表示岩石孔隙空间所含流体的相对含量,其定义是某种流体(油气或水)所充填的孔隙体积占有效孔隙体积的百分数。岩石含水孔隙体积占有效孔隙体积的百分数称为含水饱和度,用 S_w 表示;岩石含油气体积占有效孔隙体积的百分数称为含油气饱和度,用 S_h 表示,且 $S_w + S_h = 1$ 。当地层只含油和水时,用 S_o 表示含油饱和度, $S_w + S_o = 1$;当地层只含气和水时,用 S_g 表示含气饱和度,且 $S_w + S_g = 1$ 。岩石孔隙总是含有地层水的,其中被吸附在岩石颗粒表面的薄膜水和狭窄孔隙喉道中的毛细管滞留水在自然条件下是不能自由流动的,称之为束缚水。岩石含束缚水孔隙体积占有效孔隙体积的百分数称为束缚水饱和度,用 S_{wi} 表示。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,孔隙孔道越窄,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,往往需要将地层的含水饱和度 S_w 与束缚水饱和度 S_{wi} 进行比较。当 S_w 小且 $S_w \approx S_{wi}$ 时,储集层为只含束缚水的油(气)层;反之,当 S_w 很高且 $S_w \gg S_{wi}$ 时,储集层为水层;介于这两者之间的储集层则为油水同层。

束缚水饱和度的大小还受岩石的润湿性的影响。润湿性定义为当两种非混相流体同时呈现于固相介质表面时,某一流体优先润湿某一固体表面的能力。它是两种流体和固体之间的表面能力作用的结果。一般认为,天然气对岩石是非润湿性的,而油和水对岩石都有一定的润湿性。岩石表面的润湿性不是亲水就是亲油,或者是既不亲水也不亲油的中性,这取决于流体和岩石的化学成分、油藏的饱和历史。润湿性是储集层岩石的一个重要物理性质,它既影响毛细管的压力状态,又影响地层流体的驱替效率。基于油气二次运移和油气藏形成理论考虑,一

般认为多数油气藏是亲水的。但是,由于岩石表面活性组分的吸附或有机物质的沉淀作用(特别是很多附着在岩石表面的粘土矿物的影响)以及人为处理对岩石表面的影响,也会改变岩石的润湿性。对于亲水储集层,束缚水饱和度增高。

四、储集层的厚度

通常用岩性变化(如砂岩到泥岩或碳酸盐岩到泥岩)或孔隙性与渗透性的显著变化(如巨厚致密碳酸盐岩中的裂缝带)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。

第三节 油气水层特征

油层、气层和水层等名称是在石油勘探开发过程中,人们根据试油的结果对储集层下的几种结论,也是测井解释中采用的结论。在测井解释中,根据试油的结果,一般把解释的结论分为6种(各油田的规定可能有不同)。

油层:产油,不含水或含水小于10%;

气层:产气,不含水或含水小于10%;

油水同层:油水同出,含水10%~90%;

含油水层:产水大于90%或见油花;

水层:完全出水,有时也把含油水层划为水层;

干层:产液量小于某一规定值的层。

从油气水层划分标准可以看出,测井计算的产水率参数最适合划分油气水层。对于油水共渗体系,地层的产水率可近似表示为:

$$F_w = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o} \quad (1-2)$$

式中 Q_w, Q_o ——水、油的分流量, m^3 ;

F_w ——地层产水率,小数。

根据式(1-1)的达西定律,可得油和水的分流量表达式为:

$$Q_o = K_o \frac{A \Delta p}{\mu_o L} \quad (1-3)$$

$$Q_w = K_w \frac{A \Delta p}{\mu_w L} \quad (1-4)$$

式中 K_w, K_o ——水、油的有效渗透率, D;

μ_w, μ_o ——水、油的粘度, cP。

将式(1-3)和式(1-4), $K_w = K \times K_{rw}, K_o = K \times K_{ro}$ 代入式(1-2),得:

$$F_w = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro} \mu_w}{K_{rw} \mu_o}} \quad (1-5)$$

式中 K_{rw}, K_{ro} ——水、油的相对渗透率, 小数。

由式(1-5)可知, 对于油水共渗体系, 地层产水率与油水的相对渗透率和粘度有关。而油水的相对渗透率除与岩石的性质、孔隙结构有关外, 还与含水饱和度、束缚水饱和度等有关, 故对于某一地区或层位, 当岩性、束缚水饱和度和油水粘度比一定时, 地层产水率随含水饱和度的增大而增大, 因而可用含水饱和度参数划分油水层, 但其界限值随地区或层位不同而不同。在测井定性解释中, 对含泥质较少、孔渗较高的砂岩, 可将含水饱和度小于 50% 的储集层解释为油气层, 将含水饱和度在 50% ~ 70% 之间的储集层解释为油水同层, 将含水饱和度大于 70% 的储集层解释为水层。

一、孔隙饱和和特性

在储集层孔隙中存在油水两相流动的情况下, 当含水饱和度很低而含油饱和度很高时, 水的相对渗透率 K_{rw} 接近于零, 而油的相对渗透率 K_{ro} 很高。此时, 地层孔隙中的水以束缚水形式存在, 主要分布于流体不易在其中流动的微小毛细管孔隙内或被亲水岩石颗粒表面所吸附, 而油则主要占据较大的孔道或孔道内流动阻力较小的部位, 形成只有油流动而水不流动状态, 故地层将只产油而不产水。此时的含水饱和度为束缚水饱和度, 用 S_{wi} 表示。当含水饱和度很高而含油饱和度很低时, K_{ro} 接近于零, 而 K_{rw} 很高。这时, 地层孔隙中或者被水完全充满(不含油), 或者只有处于孤立状态的残余油, 形成只有水能够流动的状态, 故地层将只产水而不产油。此时的含油饱和度称为残余油饱和度, 用 S_{or} 表示。由此可见, 油气层和水层在孔隙饱和特性上的区别为: (1) 油气层为含油气且只含束缚水的储集层, 即 $S_w = S_{wi}$; (2) 水层是一点不含油(纯水层)或只含残余油的储集层; (3) 油水同层是介于上述二者之间的储集层。

图 1-1 分别给出亲水岩石和亲油岩石的油或水的相对渗透率与含水饱和度的关系曲线, 说明了油或水的相对渗透率随含水饱和度的变化关系。此外, 该图还表明, 岩石的润湿性对储集层的油或水的相对渗透率和孔隙饱和特性有较大的影响。在亲水储集层中, S_{wi} 较高, 一般大于 20%, 而残余油饱和度 S_{or} 较低, 油和水的相对渗透率相等点的含水饱和度较高, $S_w > 50%$, 见图 1-1(a) 中的 A 点。在亲油岩石中, S_{wi} 较低, 一般小于 15%, 而 S_{or} 较高, 油和水的相对渗透率相等点的含水饱和度较低, $S_w < 50%$, 见图 1-1(b) 中的 A' 点。计算油水相对渗透率的一般关系式为:

$$K_{rw} = \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right)^m$$

$$K_{ro} = \left(1 - \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \right)^n \left[1 - \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \right)^h \right]$$

式中 m, n, h ——地区经验系数, 与岩性、润湿性等因素有关, 一般取 $m = 3 \sim 4, n = 1 \sim 2, h = 1 \sim 2$ 。

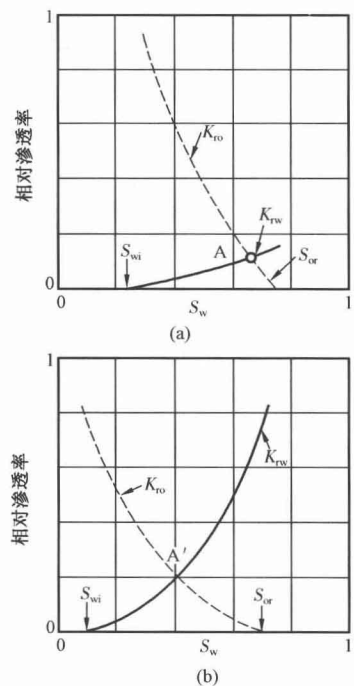


图 1-1 相对渗透率与含水饱和度的关系
(a) 亲水储集层; (b) 亲油储集层

二、钻井液侵入特性

钻井破坏了地层压力平衡。为了平衡地层压力,保证钻井正常进行,要不断地往井内注入钻井液,并随时根据地层压力的变化调整钻井液密度,使井底压力始终与地层压力保持平衡,并使钻井液柱压力略大于地层压力,防止发生井喷。在此压差作用下,钻井液滤液向储集层中渗透,这种渗透存在着径向渗透和纵向渗透两种过程。

(一) 径向渗透

钻井液滤液开始向储集层渗透后,在不断渗透过程中,钻井液中的固体颗粒逐渐在井壁上沉淀下来形成泥饼。由于泥饼渗透性很差,因此,当泥饼形成后,钻井液滤液的径向渗透过程基本停止。此时,由于滤液对地层的侵扰,形成了以井轴为圆心的同心环带,见图 1-2。井壁内的环带为泥饼,其电阻率称为泥饼电阻率,用 R_{mc} 表示;井壁附近的岩石孔隙受到钻井液滤液强烈的冲刷,原来孔隙中的自由流体几乎都被挤走,只剩下残余流体(水层为束缚水,油气层则为束缚水和残余油气),这一环带叫冲洗带,其电阻率称为冲洗带电阻率,用 R_{xo} 表示;冲洗带以外是一个过渡带,滤液渐少,原状地层的流体渐多,直到没有滤液的原状地层,这一环带叫过渡带,其电阻率称为过渡带电阻率,用 R_t 表示;过渡带以外为原状地层,其电阻率称为原状地层电阻率,用 R_1 表示。冲洗带和过渡带合称为侵入带,其外径用侵入带直径 D_i 表示。钻井液滤液侵入地层的深浅取决于地层的孔渗性、钻井液性能、钻井液柱与地层之间的压差以及地层被钻井液浸泡的时间。一般在其他条件相同的情况下,地层孔隙度和渗透率越低,钻井液侵入越深。根据 R_{xo} 、 R_t 的相对大小,通常将储集层的侵入特性分为高侵、低侵和无侵(侵入不明显)三种情况。

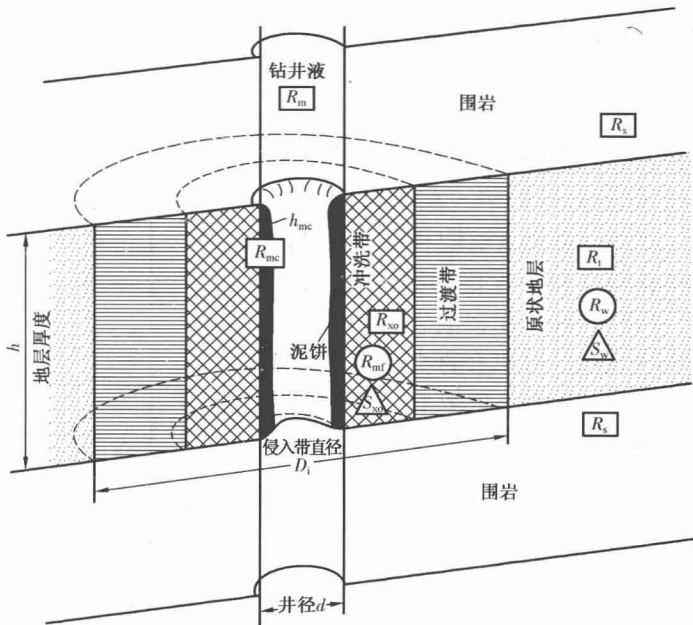


图 1-2 井剖面图

R_s —围岩电阻率

$R_{xo} > R_t$ 称为钻井液滤液高侵,高侵地层电阻率的径向变化称为高侵剖面,见图 1-3。淡水钻井液($R_{mf} > R_w$, R_{mf} 为钻井液滤液电阻率, R_w 为地层水电阻率)的水层一般形成典型的高

侵剖面。

$R_{xo} < R_l$ 称为钻井液滤液低侵,低侵地层电阻率的径向变化称为低侵剖面,见图 1-4。一般油气层具有低侵剖面特征,部分水层($R_{mf} < R_w$)也可能出现低侵剖面,但 R_{xo} 和 R_l 的差别比相应的油气层要小。

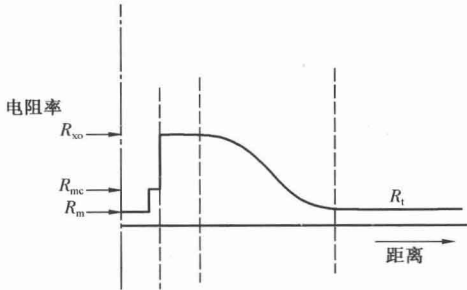


图 1-3 高侵剖面

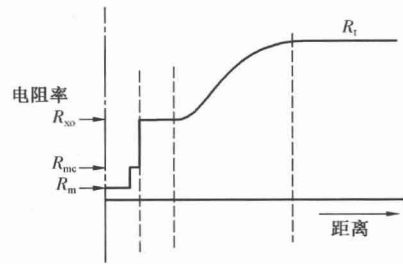


图 1-4 低侵剖面

下面以高渗透油气层的淡水钻井液滤液低侵为例,说明钻井液滤液侵入油气层后径向电阻率的变化情况。在泥饼形成以前,钻井液滤液以径向渗滤为主,其地层电阻率的径向变化与低侵剖面相似,见图 1-5(a)。在最后泥饼形成时,在油气层中,由于油气的相对渗透率大于地层水的相对渗透率,在滤液径向渗透的过程中,油气会被排走得更快些,以致在未侵入带之前形成一个地层水饱和度相对较高的环形空间,其电阻率低于 R_l ,称为低阻环带,其电阻率为 R_{an} 。与此同时,当形成泥饼时,滤液的纵向运移加强,滤液将向下移动,可动油气将去替代它们,这就有可能在低阻环带之前形成一个含油气饱和度相对高、地层水较少而滤液较多的高阻环带,其电阻率大于 R_l ,见图 1-5(b)。油气层能够形成低阻环带,但并不是所有油气层都能够形成低阻环带。

(二) 纵向渗透

当泥饼厚度达到最大时,由于泥饼的渗透率很小,这时钻井液滤液的纵向运移占优势。在重力的作用下,油气层侵入带中的滤液和低阻环带中的地层水都要向下移动。可动油气将取代它们,以致低阻带将逐渐消失,冲洗带范围将缩小。而高阻环带将向冲洗带方向扩大,最后达到平衡状态。此时,地层将分为 4 个带,泥饼有限的渗透性所维持的冲洗带厚度很薄。高阻环带径向范围大约是冲洗带的最大范围。此范围内所含的水一部分为束缚水,大部分是钻井液滤液,侵入带和未侵入带(即原状地层)见图 1-5(c)。固井以后,井眼周围所有可能移动的地层水和滤液将继续向下往油水接触面分散,可动油气则向上代替它们,最后,井眼周围地层的含油气饱和度仍接近于未侵入前的地层含油气饱和度,但这时的水为地层水和滤液的混合物,见图 1-5(d)。

测井解释的主要目的是判断油气、水层,而油气、水层的侵入特性又有较大的差别,所以深入研究侵入带(特别是冲洗带)与未侵入带特征对测井解释是十分重要的。表 1-2 列出了油气层和水层在侵入特性上的一些主要差别,它们是定性判断油气水层的重要依据之一。

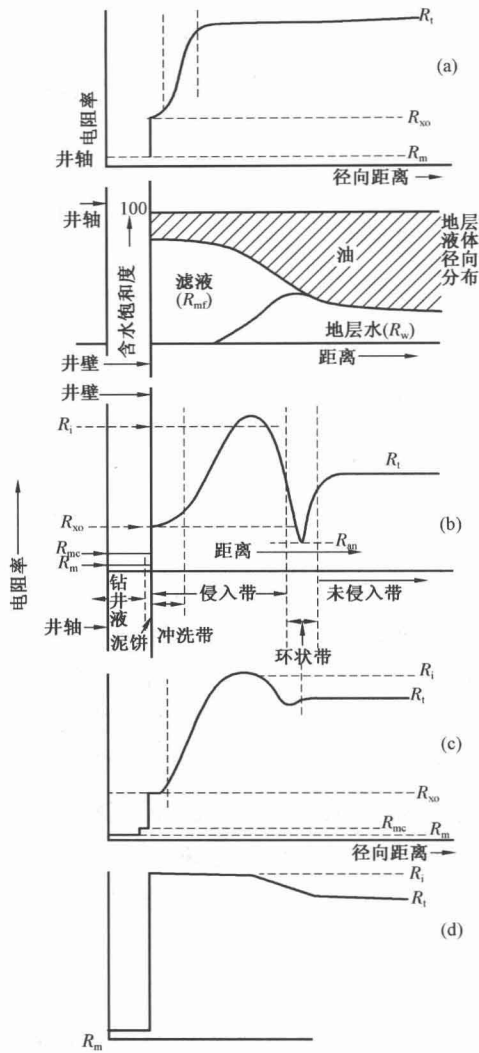


图 1-5 高渗透油气层侵入剖面随时间的变化

(a) 泥饼形成以前; (b) 最后泥饼形成时; (c) 纵向渗透期间; (d) 固井以后

表 1-2 油气层和纯水层在侵入性质上的差别 (淡水钻井液)

		油 气 层	纯 水 层
孔隙流体	冲洗带	含盐量低的滤液, 束缚水和残余油气	含盐量低的滤液, 束缚水
	未侵入带	油气为主, 少量含盐较高的地层水	含盐量较高的地层水
含水饱和度	冲洗带	大于 50%	100%
	未侵入带	一般小于 40%	100%
电阻率		$R_{so} \leq R_t$	$R_{so} > R_t$
侵入性质		钻井液低侵或侵入不明显	钻井液高侵