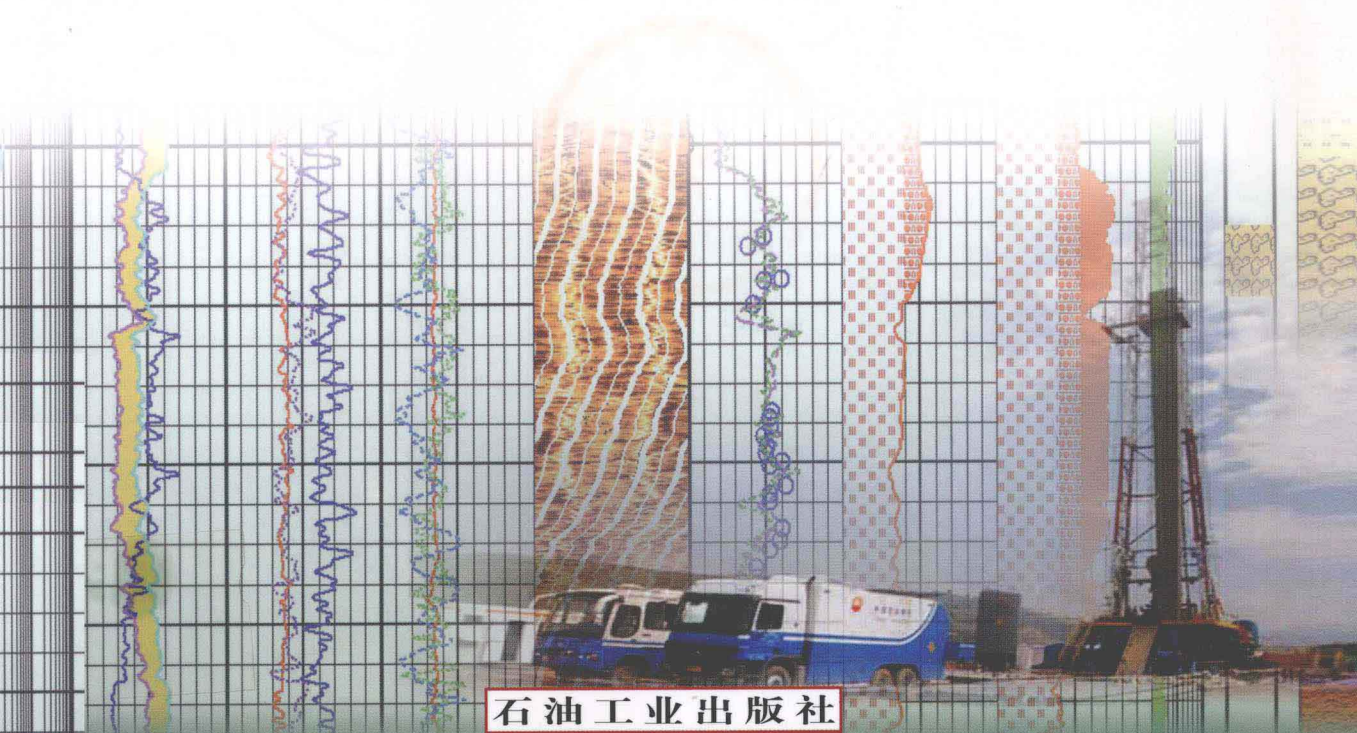


高等学校教材

地球物理测井概论

王群 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等学校教材

地球物理测井概论

王 群 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及综合解释的简单应用,主要内容包括自然电位测井方法、电阻率测井方法、声波测井方法、放射性测井方法、工程测井方法、生产测井(即套管井测井)方法以及综合解释方法及其应用。本书的内容力求少而精、博而宽,既反映当前现场使用的各种方法,又介绍了当前的先进技术。

本书可作为资源勘查专业、石油工程专业的本科教材,也可作为科技人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地球物理测井概论/王群主编.
北京:石油工业出版社,2010.8
高等学校教材
ISBN 978-7-5021-7948-9

- I. 地…
- II. 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(2010)第 153040 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

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京华正印刷有限公司

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:14

字数:356 千字

定价:24.00 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

本教材是编者在多年为资源勘查专业、石油工程专业学生教学的基础上,通过现场调查和与地球物理测井工程师的交流,对内容反复增减,力求使学生尽量掌握各种方法的最基本原理、主要的影响因素和主要应用。本书适合于石油工程、石油地质和煤田地质等专业的本科及大专院校学生使用,也可供相近专业的教师、研究生、工程技术及研究人员参考。

本书是地球物理专业地球物理测井课程教材,在编写过程中,还适当考虑了其他专业的地球物理测井课程需要。本书主要包括裸眼井测井系列、套管井测井系列和地球物理测井综合应用三大部分。为了让学生能够掌握每章重点和难点,在每章后面附有思考题。

本书主线明确,条理清晰,注重基本概念、基本理论、基本原理及应用。相关知识前后衔接清楚,“理论—基础—方法—应用”各部分章节明确,便于理解和学习。本书图文并茂,实例丰富,不仅介绍了测井的方法、理论,而且给出了较多的应用实例。

本书由王群对整体内容进行取舍、架构,并执笔了绪论、第二章第五节、第三章第一节、第五章第一节、第六章第一节、第七章第六节及每章的思考题;王敬岩执笔了第一章第二节、第三节、第四节和第二章第一节、第二节、第三节、第四节、第六节;韩刚执笔了第三章第二节、第三节、第四节和第四章;王敬瑞执笔了第五章第二节、第三节、第四节、第五节、第六节和第六章第二节;冯翠菊执笔了第一章第一节和第七章第一节至第五节的内容。

由于编者水平有限,本书在内容选材、系统结构等方面难免有错误及不妥之处,希望同行对本书批评指正。

编 者

2010年7月

目 录

绪论	(1)
第一节 测井学和测井技术的发展	(1)
第二节 测井技术在勘探及开发中的应用	(1)
第三节 储集层分类及需要确定的参数	(1)
第四节 测井系列的选择	(3)
思考题	(4)
第一章 自然电位测井	(5)
第一节 井内自然电位产生的原因	(5)
第二节 自然电位测井曲线的形状	(8)
第三节 影响渗透层自然电位曲线的主要因素	(10)
第四节 自然电位曲线的应用	(13)
思考题	(20)
第二章 电阻率测井	(21)
第一节 普通电阻率测井	(21)
第二节 视电阻率曲线的影响因素	(27)
第三节 侧向测井	(33)
第四节 冲洗带电阻率测井	(39)
第五节 感应测井	(43)
第六节 核磁共振测井	(45)
思考题	(54)
第三章 声波测井	(56)
第一节 岩石的声学特性	(56)
第二节 声速测井	(58)
第三节 长源距声波全波列测井	(64)
第四节 声波幅度测井	(69)
思考题	(78)
第四章 放射性测井	(79)
第一节 放射性测井基础知识	(79)
第二节 自然伽马测井	(84)

第三节	自然伽马能谱测井	(89)
第四节	密度测井	(92)
第五节	中子测井	(95)
思考题	.....	(102)
第五章	工程测井	(104)
第一节	油井井身结构及井口装置	(105)
第二节	工程测井常用仪器测量原理	(106)
第三节	地层倾角测井	(113)
第四节	录井及气测井	(122)
第五节	成像测井技术	(125)
第六节	电缆地层测试器	(128)
思考题	.....	(134)
第六章	生产测井	(136)
第一节	注入剖面测井	(136)
第二节	产出剖面测井	(147)
思考题	.....	(160)
第七章	测井资料综合解释	(161)
第一节	确定岩性	(161)
第二节	含油气纯岩石地层测井解释的基本方程	(173)
第三节	岩石电阻率与岩性、物性和含油性的关系	(177)
第四节	泥质砂岩的测井解释方法	(191)
第五节	复杂岩性解释简介	(211)
第六节	实际应用	(214)
思考题	.....	(216)
参考文献	.....	(218)

绪 论

第一节 测井学和测井技术的发展

测井学是一个边缘学科,是应用地球物理的一个分支。它应用物理学的原理解决地质学的问题,并已在石油、天然气、金属矿、煤田、各种工程建设及水文地质等许多方面得到应用。20世纪30年代首先应用的是电阻率测井,到20世纪50年代普通电阻率测井发展得比较完善,当时利用一套长短不同的电极距进行横向测井,利用电模拟计算图版准确地确定地层电阻率。20世纪60年代聚焦测井理论得到了长足发展,精度也相应得到提高,同时出现了孔隙度测井,形成了孔隙度测井系列和工程测井系列。近十几年,成像测井技术、小信号测井技术(如套管井电阻率等)也得到了发展和应用。

第二节 测井技术在勘探及开发中的应用

在勘探领域中,无论是金属矿床,还是非金属矿床,在地壳中只要富集,就具有一定特点的物理性质,就可以用测井技术来解决;特别是在油气勘探中,配合重、磁、电、航拍,使得构造、旋回、地层层序等方面问题都可以得到解决。

在油气田开发过程中,用测井可以监测生产动态,解决工程方面的问题。井中产出的流体性质是油还是水,出多少水,油水比例如何,用流体体积密度、持水率等测井方法都可以监测。在注水开发过程中,分层的注入量,有没有窜流,用注入剖面测井可以解决。在生产过程中,套管是否变形,有没有损坏、脱落或变形,管外有无窜槽,射孔有没有射开,都需要用测井来确定。对于设计开发方案,计算油层有效厚度,寻找剩余油富集区都离不开测井。测井对石油天然气勘探开发来说,自始至终都是不可缺少的,是必要的技术。它服务于勘探开发的全过程。

在其他工程建设中,如建立涵洞、水坝、隧道时,需要了解岩石强度、孔隙度和流体性质,可以用地球物理测井的方法检测出来。

特别是石油和天然气,往往埋藏很深,只要具有储集性质的岩石,就有可能储藏有流体矿物。它不用像挖煤一样,而是只要打一口井,确定出哪段地层能出油,打开地层就可以开采。由于用测井资料可以解决岩性问题,即岩石由什么矿物组成,它的孔隙度如何,渗透率怎么样,含油气饱和度大小,沉积时处于什么环境,是深水、浅水,还是急流河相,有无有机碳,有没有生油条件,油气能不能富集。因此在勘探过程中,测井可以解决生油岩、盖层问题,也可以对储集层给予评价,找到目的层,解释出油、气、水。

第三节 储集层分类及需要确定的参数

一、储集层的分类及特点

石油、天然气和有用的流体都储存在储集层中,测井解释的大量工作是解决储集层的性质。在地层中能作为储集层的岩石种类很多,习惯上储集层以岩性或储集空间结构来分类。

所谓储集层,就是具有储集空间,储集空间又相互连通的岩层。不连通的孔隙称为死孔隙。

1. 碎屑岩储集层

它包括砾岩、砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩等。世界上有 40% 的油气储集在碎屑岩储集层中。

碎屑岩由矿物碎屑、岩石碎屑和胶结物组成。最常见的矿物碎屑为石英、长石和其他碎屑颗粒;胶结物有泥质、钙质、硅质和铁质等。岩石储集性质与其粒径大小、分选好坏、磨圆度、胶结物的成分、胶结物的含量和胶结形式有关。一般粒径大,分选和磨圆度高,胶结物少,则孔隙空间大,连通性好,为储集性质好的储集层。

2. 碳酸盐岩储集层

世界上油气 50% 的储量和 60% 的产量存储于这一类储集层中。我国华北震旦、寒武系及奥陶系的产油层,四川的震旦系、二叠系和三叠系的油气层,均属于这类储集层。

碳酸盐岩属于水化学沉积的岩石,主要的矿物有石灰石、白云石和过渡类型的泥灰岩。它的储集空间有晶间孔隙、粒间孔隙、鲕状或针孔状孔隙、生物腔体孔隙、裂缝、溶洞等。从储集层评价和测井解释的观点出发,可将碳酸盐岩储集层和储集空间归为两类:一类为原生孔隙,如晶间、鲕状孔隙等;另一类为次生孔隙,如裂缝、溶洞等。前者孔隙较小,分布均匀;后者孔隙较大,形状不规则,分布不均匀。按孔隙结构特点,碳酸盐岩储集层可分为三类:孔隙型、裂缝型和溶洞型。

(1) 孔隙型碳酸盐岩储集层。这类储集层的储集空间主要是粒间孔隙、晶间孔隙、生物腔体孔隙等,还有石灰石白云岩化后重结晶形成的均匀分布的孔隙。它们适用的测井方法和解释方法与碎屑岩储集层基本相同,也是目前测井资料应用最成功的一类储集层。

(2) 裂缝型碳酸盐岩储集层。这类储集层的储集空间主要由构造裂缝和层间裂缝组成,由于裂缝的数量、形状和分布可能极不均匀,故孔隙度和渗透率可能也有很大变化,油气分布也不规律,裂缝发育带渗透率高。

(3) 溶洞型碳酸盐岩储集层。这类储集层主要是由溶蚀作用产生的,溶洞形状大小不一,分布不均匀,往往具有偶然性,用常规测井方法进行解释有很大困难。

3. 特殊岩性储集层

除碎屑岩和碳酸盐岩以外的岩石,如岩浆岩、变质岩、泥岩等,所形成的储集层为特殊岩性储集层。这些岩石的裂缝、溶洞、破碎带、风化壳等都可能形成储集层。

二、储集层的基本参数

在储集层的评价中,需要测井解释确定的参数有储集层的孔隙度、饱和度、厚度、渗透率。

1. 孔隙度

岩石在形成过程及后期作用中会有粒间孔隙、晶间孔隙、裂缝及洞穴等。根据孔隙流体在孔隙中能否流动,孔隙可分为总孔隙、有效孔隙。有效孔隙指互相连通的孔隙。总孔隙指所有的孔隙空间。孔隙度是指岩石中孔隙所占的体积与岩石的体积之比,通常用百分数表示。另外,孔隙度又分为原生孔隙度和次生孔隙度。

2. 饱和度

油气所占孔隙的相对体积称为含油气饱和度,通常也用百分数表示。饱和度又分为原状地层含烃饱和度、冲洗带残余烃饱和度、侵入带含烃饱和度、可动烃饱和度等。

束缚水饱和度 S_{wir} 是另一个重要的饱和度概念。通过它与总含水饱和度的关系,可以知

道储集层是否能出水。

3. 厚度

厚度主要是指储集层的岩层厚度,是有效孔隙和含烃饱和度下限所确定的顶底界厚度。

4. 渗透率

为了评价储集层的生产能力,应了解油气水流过岩石孔隙的难易程度。当粘度为 $1 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 的流体,在单位时间 1s 内,两端压差为 1atm^① 时,通过单位截面积为 1cm^2 岩石的流体体积为 1cm^3 ,则该岩石的渗透率为 $1\mu\text{m}^2$ 。渗透率分绝对渗透率、有效渗透率和相对渗透率。绝对渗透率为岩石孔隙中只有一种流体存在时对岩石所测量的渗透率。岩石孔隙中存在两种或两种以上的流体时,对其中某一种流体所测量的渗透率,为该流体在这种岩石中的有效渗透率。相对渗透率为有效渗透率与绝对渗透率的比值,它表示某种流体流过岩石的难易程度。

第四节 测井系列的选择

合理和完善的测井系列是保障测井解释准确的先决条件。合理的测井系列可以解决岩性、厚度、孔隙度、渗透率、饱和度及泥质含量问题。不同的地质条件,需要不同的测井系列组合。

一、泥质指示和确定岩性的测井方法选择

泥质指示应能划分泥岩和非泥岩,并能确定泥质含量。基本上各种测井方法都能不同程度地进行泥质解释。最常用的是自然伽马测井、自然电位测井和微电极测井。另外,岩性测井和自然伽马能谱测井也能解决这个问题。个别的地区,由于沉积速度快,自然电位不稳,也可以用其他测井方法解决泥质问题,在以后的泥质砂岩解释中有详细说明。测井系列选择的标准是能准确地划分钻井剖面的岩性,能够准确地确定孔隙度,能够确定地层的含水饱和度或油气饱和度。例如,碳酸盐岩地层,用三种孔隙度测井确定孔隙度,用微球形聚焦测井确定冲洗带电阻率,用双侧向测井确定深、浅电阻率,用井径测井和自然伽马测井确定泥质含量。再如湖泊相河流相的沉积地层,至少要进行一种孔隙度测井、微电极测井、深浅三侧向测井,加井径测井和自然电位测井,有时加自然伽马测井。

二、电阻率测井方法的选择

由于钻井后测井是在井眼中进行的,井眼的大小、钻井液性能的差别,使得渗透层受不同程度的影响,存在冲洗带、侵入带和原状地层在电阻率上的差异。电阻率测井应能反应冲洗带及不同地层探测深度(浅、中、深)的电阻率数值上的变化。岩层的电阻率高低和岩层的厚薄影响地层真电阻率数值,所以选用的测井方法也不尽相同。这需要掌握各种方法的线性范围、探测半径、聚焦的强弱、围岩和井的影响大小。对低电阻率地层,一般选用双感应—八侧向、微球形聚焦测井;对高电阻率地层,一般选用双侧向—邻近侧向、微侧向电阻率测井系列。对于较薄的地层,微电极、三侧向或普通电阻率测井也可以很好地解决地质问题。

三、孔隙度测井方法的选择

孔隙度测井一般探测深度较浅,对于储集层仅限于冲洗带。声速测井方法适用于粒间孔隙和晶间孔隙,不能反映次生孔隙中的裂缝溶洞,适用于均匀分布的孔隙度。中子孔隙度测井只反

① 1atm = 101325Pa = 101.325kPa。

映岩层的含氢量的大小,并随含氢量的增加探测深度减小。密度测井反映的是岩石的总孔隙度,分不清原生孔隙和次生孔隙。天然气对三种孔隙度都有影响,岩性对孔隙度也有影响。

四、裸眼井测井系列的选择

表 0-1 中给出了裸眼井系列的一般情况。

表 0-1 裸眼井测井系列

井内流体	研究参数	推荐的测井项目
淡水钻井液	岩性	自然电位、自然伽马、自然伽马能谱、岩性—密度测井
	$S_w - R_w$	感应测井或侧向测井或电位—梯度电极系测井
	$S_{xo} - R_{mf}$	微球形聚焦测井 (MSFL) 或微侧向测井 (MLL) 或微电极测井
	$\phi - V_{clay}$	密度测井、中子测井和 (或) 声波测井
	$K - p$	地层测试器 (RFT)
	几何参数	地层倾角测井、四臂井径测井、井斜测量
盐水钻井液	岩性	自然伽马、自然伽马能谱、岩性—密度测井、自然电位
	$S_w - R_w$	双侧向测井
	$S_{xo} - R_{mf}$	微球形聚焦测井或微侧向测井
	$\phi - V_{clay}$	密度测井、中子测井和 (或) 声波测井
	$K - p$	地层测试器 (RFT)
	几何参数	地层倾角测井、四臂井径测井、井斜测井
油基钻井液	岩性	自然伽马、伽马能谱、岩性—密度测井
	$S_w - R_w$	感应测井
	$\phi - V_{clay}$	密度测井、中子测井和 (或) 声波测井
	$K - p$	地层测试器 (RFT)
	几何参数	四臂井径测井、井斜测井
空井	岩性	自然伽马、自然伽马能谱、岩性—密度测井
	$S_w - R_w$	感应测井
	$\phi - V_{clay}$	密度测井、中子测井
	$K - p$	温度测井
	几何参数	四臂井径测井、井斜测井

思考题

名词解释

储集层	总孔隙度	有效孔隙度
次生孔隙度	含水饱和度	含油饱和度
侵入带含水饱和度	冲洗带含水饱和度	可动油饱和度
可动水饱和度	束缚水饱和度	绝对渗透率
相对渗透率	岩层厚度	有效厚度
测井系列		

第一章 自然电位测井

生产实践过程中发现,在没有人工供电的情况下,测井电极在井内移动时,仍能测量到与岩性有关的电位变化。由于这个电位是自然产生的,所以称为自然电位,用 SP 表示。

第一节 井内自然电位产生的原因

井内自然电位产生的原因是复杂的,对于油井来说,主要有以下两个原因:(1)地层水含盐浓度和钻井液含盐浓度不同,引起离子的扩散作用和岩石颗粒对离子的吸附作用;(2)地层压力与钻井液柱压力不同,在地层孔隙中产生过滤作用。这些作用主要取决于岩石成分、组织结构以及地层水和钻井液的物理化学性质。

实践证明,油井的自然电位主要是由扩散作用产生的。只有在钻井液柱和地层间的压力差很大的情况下,过滤作用才成为较重要的因素。在黄铁矿含量高的地层,还有氧化还原电位。

一、扩散吸附电位

首先观察这样一种电化学现象,如图 1-1 所示。在一个玻璃缸内,用一个渗透性的薄膜将其隔开,分别盛有两种不同浓度的 NaCl 溶液。渗透性薄膜的作用是防止两种溶液混合起来,但能使离子自由穿过。离子在渗透压力的作用下,高浓度溶液的离子要穿过渗透薄膜移向低浓度的溶液,这种现象叫扩散。对于 NaCl 溶液来说,由于 Cl^- 的迁移率大于 Na^+ 的迁移率,于是在低浓度的溶液中 Cl^- 相对增多,形成负电荷的富集;在高浓度的溶液中则是 Na^+ 相对增多,形成正电荷的富集。这样就在两种不同浓度 NaCl 溶液的接触面上产生了自然电场,因此能测量到电位差。离子继续扩散时, Cl^- 受到正电荷的吸引和负电荷的排斥作用,其扩散速度减慢; Na^+ 受到正电荷的排斥和负电荷的吸引作用,其扩散速度加快,因而使离子的富集速度减慢。当自然电场的电动势增加到使正、负离子的扩散速度相同时,电荷的富集停止,但离子的扩散作用还在进行,溶液达到动平衡状态,电动势保持为一定值。这个电动势,因为是离子扩散作用产生的,称它为扩散电动势或扩散电位。实验证明,扩散电位的大小决定于溶液的浓度差,另外还与溶液的温度和溶液所含离子的种类有关。

扩散电动势 E_d 可表示为:

$$E_d = K_d \lg \frac{C_1}{C_2} \quad (1-1)$$

式中 C_1, C_2 ——两种盐类溶液的浓度, g/L;

K_d ——扩散电位系数,与溶液中盐类的化学成分和温度有关。

扩散电动势 E_d 的单位为 mV,例如两种不同浓度的 NaCl 溶液接触,在温度为 25℃ 时, $K_d = -11.6\text{mV}$,代入式(1-1)得:

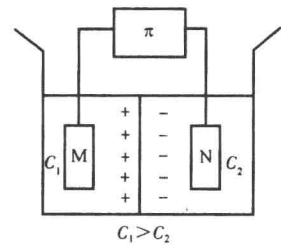


图 1-1 不同浓度盐水接触面上
 C_1, C_2 —NaCl 溶液浓度; π —测量仪器

$$E_d = -11.6 \lg \frac{C_1}{C_2} \quad (1-2)$$

当溶液浓度不很高时,溶液浓度与电阻率成反比关系,则式(1-2)可写成:

$$E_d = -11.6 \lg \frac{R_2}{R_1} \quad (1-3)$$

和上述实验现象一样,井内的自然电位也是两种不同浓度的溶液相接触的产物。地层被钻穿后,钻井液滤液和地层孔隙中的地层水直接接触。由于钻井液滤液的浓度不同于地层水溶液浓度(通常称矿化度),它们之间就产生了离子的扩散作用。假定钻井液滤液和地层水溶液所含的盐类都是 NaCl,且地层水溶液的浓度大于钻井液滤液的浓度,这样扩散作用的结果是地层水内富集正电荷,钻井液滤液内富集负电荷。根据理论分析和实验结果,对于纯水砂岩或砂层,井壁上产生的扩散电动势可近似表示为:

$$E_d = -11.6 \lg \frac{C_w}{C_{mf}} = -11.6 \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-4)$$

式中 R_w, R_{mf} ——地层水和钻井液滤液的电阻率;

C_w ——砂岩地层水含盐浓度;

C_{mf} ——钻井液滤液含盐浓度。

图 1-2 表示出在钻井液与砂岩层的接触面上的电荷分布,钻井液带负电荷,而砂岩层带正电荷。

与纯水砂岩相邻的泥岩井壁上产生的扩散电动势,是泥岩内地层水与井壁钻井液相接触的产物。泥岩所含的地层水,其成分和浓度一般与相邻砂岩中的地层水是一样的。由于泥岩的结构、化学成分与砂岩不同,所以在泥岩的井壁上形成的自然电位与砂岩相比,不但数值差别很大,而且符号也相反。对于 NaCl 溶液,当 $C_w = 10C_{mf}$,在 25℃ 时,钻井液与泥岩的接触面上的电动势达 +59.1mV。这是由于粘土矿物表面选择吸附 Cl^- ,使其扩散受到牵制,只有 Na^+ 可以在地层水中自由移动。因此在泥岩的井壁上主要是 Na^+ 的扩散作用。当 $C_w > C_{mf}$ 时,在钻井液和泥岩的接触面上,钻井液带正电荷,泥岩带负电荷,如图 1-3 所示。这时形成的电动势称扩散吸附电动势,以 E_{da} 表示。根据实验结果和理论分析,在泥岩井壁上产生的扩散吸附电动势 E_{da} 可表示为:

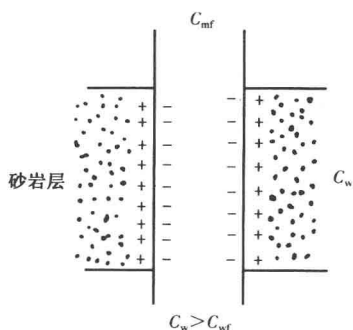


图 1-2 砂岩与钻井液接触面上的电荷分布

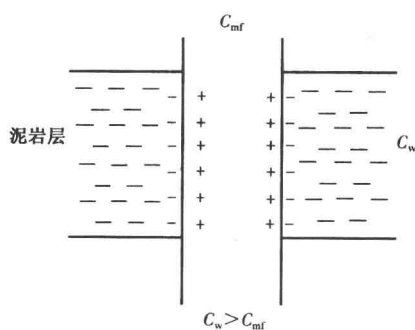


图 1-3 泥岩与钻井液接触面上的电荷分布

$$E_{da} = K_{da} \lg \frac{C_w}{C_{mf}} = K_{da} \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-5)$$

式中 C_w ——砂岩地层水含盐浓度；
 C_{mf} ——钻井液滤液含盐浓度；
 K_{da} ——扩散吸附电位系数。

扩散吸附电位系数的大小和符号主要决定于岩石颗粒的大小及化学成分，也和溶液的化学成分、温度、浓度比等因素有关，可用实验求出。

对 NaCl 溶液在 25℃ 时， $K_{da} = 59.1 \text{ mV}$ ，代入式(1-5)，得：

$$E_{da} = 59.1 \lg \frac{R_{mf}}{R_w}$$

由于泥岩的选择吸附作用，使一种离子容易通过，另一种离子不易通过，它好像离子选择薄膜一样，因此通过泥岩所产生的扩散吸附电位又称为薄膜电位。

二、过滤电位

在压力差的作用下，当溶液通过毛细管时，管的两端产生电位差。这是由于毛细管壁吸附负电子，使溶液中正离子相对增多。正离子在压力差的作用下，随同溶液向压力低的一端移动，因此在毛细管两端富集不同符号的离子。压力低的一方带正电，压力高的一方带负电，于是产生了电位差，如图 1-4 所示。

在岩石中，颗粒与颗粒之间有很多孔隙。它们彼此连通，形成很细的孔道，相当于上述的毛细管。当钻井液柱的压力大于地层的压力时，钻井液向地层过滤，钻井液滤液通过井壁在岩石孔道中流过。由于岩石颗粒的选择吸附性，孔道壁上吸附钻井液滤液中的负离子，仅正离子随着钻井液滤液向地层中移动，这样在井壁附近富集大量负离子，在地层内部富集大量正离子。地层和钻井液接触面两端形成的电位称为过滤电位，以 E_f 表示。在钻井液柱压力大于地层压力的条件下，在渗透层处，过滤电位与扩散吸附电位方向一致。过滤电位的数值与地层和钻井液柱之间的压力差及过滤溶液的电阻率成正比，与过滤溶液的粘度成反比。可表示为：

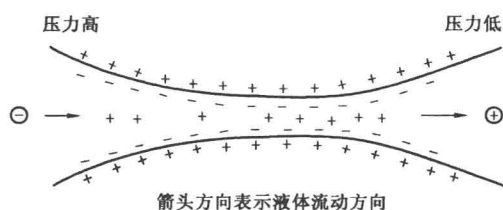


图 1-4 过滤电位形成示意图

$$E_f = K_f \frac{\Delta p \cdot R_{mf}}{\mu} \quad (1-6)$$

式中 Δp ——压力差，atm；
 R_{mf} ——过滤溶液电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；
 μ ——过滤溶液粘度， $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ；
 K_f ——过滤电位系数，与溶液的成分、浓度有关。

只有在地层压力与钻井液柱压力相差很悬殊，而且泥饼未形成以前，过滤电位才有较大的显示。由于油井的钻井液柱压力略高于地层压力，相差不是很大，而且在测井时已形成泥饼，所以过滤电位在油井中的显示一般很小，常忽略不计。

第二节 自然电位测井曲线的形状

在井钻穿地层的过程中,地层与钻井液相接触,产生扩散吸附作用,在钻井液与地层接触面上产生自然电位。下面分析夹在厚层泥岩中的砂岩自然电位曲线的形状。

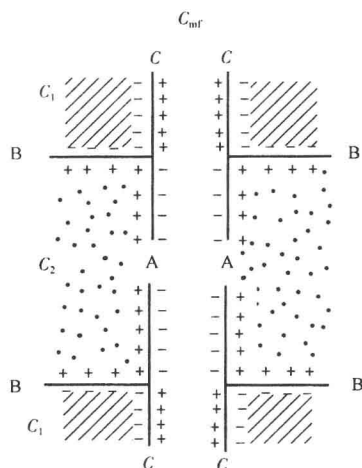


图 1-5 砂泥岩交界面处自然电场的分布

一、井内自然电场的分布

若砂岩的地层水矿化度为 C_2 , 泥岩的地层水矿化度为 C_1 , 钻井液滤液的矿化度为 C_{mf} , 且 $C_1 \geq C_2 > C_{mf}$, 则井内自然电场的分布如图 1-5 所示。

在砂岩和钻井液的接触面上, 由于扩散作用产生的扩散电动势 E_d 为:

$$E_d = K_d \lg \frac{C_2}{C_{mf}} \quad (1-7)$$

在泥岩和钻井液的接触面上, 由于扩散吸附作用产生的扩散吸附电动势 E_{da} 为:

$$E_{da} = K_{da} \lg \frac{C_1}{C_{mf}} \quad (1-8)$$

在泥岩和砂岩的接触面上, 由于扩散吸附作用产生的扩散吸附电动势 E_{da} 为:

$$E_{da} = K_{da} \lg \frac{C_1}{C_2} \quad (1-9)$$

在井与砂岩、泥岩的接触面上, 自然电流回路的总自然电动势 E_s 是每个接触面上自然电动势的代数和, 即:

$$\begin{aligned} E_s &= K_d \lg \frac{C_2}{C_{mf}} + K_{da} \lg \frac{C_1}{C_{mf}} - K_{da} \lg \frac{C_1}{C_2} \\ &= K_d \lg \frac{C_2}{C_{mf}} + K_{da} \left(\lg \frac{C_1}{C_{mf}} - \lg \frac{C_1}{C_2} \right) \\ &= K_d \lg \frac{C_2}{C_{mf}} + K_{da} \lg \frac{C_2}{C_{mf}} \\ &= (K_d + K_{da}) \lg \frac{C_2}{C_{mf}} = K \lg \frac{C_2}{C_{mf}} \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中 K ——自然电位系数, $K = K_d + K_{da}$ 。

对于纯砂岩和泥岩地层, 其地层水和钻井液滤液的盐类为氯化钠, 在 25°C 时, $K = 59.1 + 11.6 = 70.7\text{mV}$, 代入式(1-10), 有:

$$E_s = 70.7 \lg \frac{C_2}{C_{mf}} \quad (1-11)$$

在溶液的浓度不很大时, 可以认为电阻率与浓度成反比。则式(1-11)可写成:

$$E_s = 70.7 \lg \frac{R_{mf}}{R_2} \quad (1-12)$$

式中 R_{mf} ——钻井液滤液电阻率；

R_2 ——砂岩地层水电阻率，以下用 R_w 表示。

如果砂岩含有泥质，或者泥岩不纯，将使总的自然电动势减小，不能按式(1-12)计算砂泥岩接触面上回路的总自然电动势。

二、自然电位曲线的形状

可以计算出井轴上各点自然电位的数值 U_M ，绘制出自然电位理论曲线，如图 1-6 所示。下面根据自然电场的分布，定性地对自然电位曲线形状进行分析。

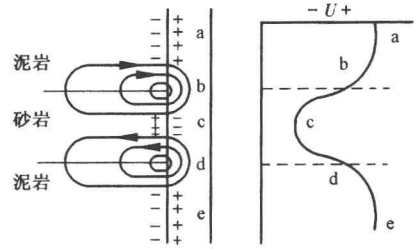


图 1-6 井内自然电场的分布和自然电位曲线形状

在砂岩井壁、泥岩井壁以及砂泥岩接触面上，存在自然电动势。砂泥岩和钻井液具有导电性，它们构成闭合回路，形成自然电流。自然电位测井记录的是自然电流在井内钻井液段的电位降。在离开砂岩较远的泥岩上(图 1-6 中的 a 点以上)，自然电流很小，几乎没什么变化，所以大段泥岩上的自然电位曲线基本上是一条直线。过了图 1-6 中的 a 点，电流强度逐渐增加，当 $C_w > C_{mf}$ 时，自然电位逐渐降低，曲线向负的方向偏转，在泥岩层与砂岩层交界处(图 1-6 中的 b 点)，井内自然电流强度最大，电位变化也最大，自然电位曲线急剧向负方向偏转。过了地层界面，电流密度又逐渐减小，电位继续降低。在地层中心(图 1-6 中的 c 点)，电流强度最小，自然电位曲线几乎与井轴成平行的直线。在砂岩层的下部，自然电流强度逐渐增加，自然电位逐渐增大，曲线向正方向偏转。在砂岩层与泥岩层的交界面处(图 1-6 中的 d 点)，电流密度最大，自然电位曲线急剧向正方向偏转。过了交界面，再向下到泥岩层，自然电位值逐渐增大，在大段泥岩处记录的自然电位接近直线。

图 1-7 是一条实测的自然电位曲线。由于泥岩(或页岩层)岩性稳定，在自然电位测井曲线上显示为一条电位不变的直线，将它作为自然电位的基线，这就是所谓的泥岩基线。在渗透性砂岩地层处，自然电位曲线偏离泥岩基线。在足够厚的地层中，曲线达到固定的偏转幅度，定为砂岩线。自然电位曲线的异常幅度就是地层中点的自然电位与基线的差值。

渗透性地层的自然电位可以偏向泥岩基线的左边(负异常)或右边(正异常)，它主要取决于地层水和钻井液滤液的相对矿化度，当地层水矿化度大于钻井液滤液矿化度时，自然电位显示为负异常；当地层水矿化

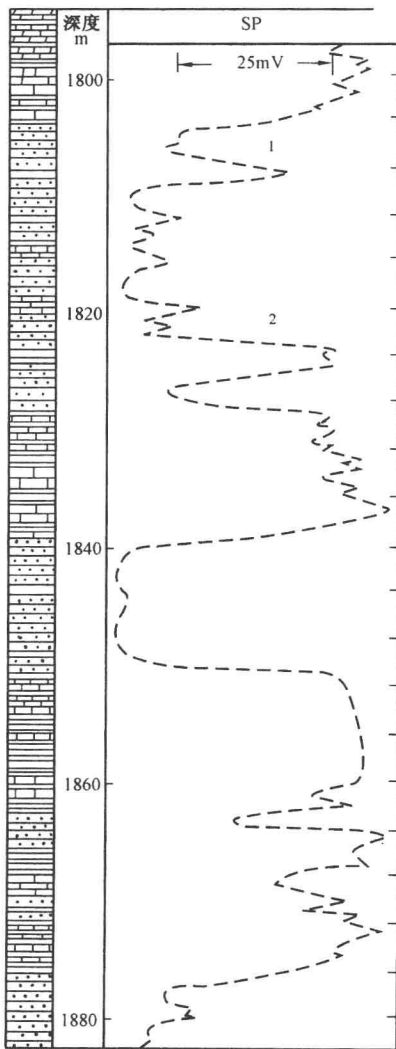


图 1-7 砂泥岩剖面的 SP 测井曲线

度小于钻井液滤液的矿化度时,自然电位显示为正异常。如果钻井液滤液的矿化度与地层水矿化度大致相等,自然电位偏转幅度很小,曲线无显著异常。

综上所述,自然电位曲线具有如下特点:

(1)当地层、钻井液是均匀的,且上下围岩岩性相同时,自然电位曲线以渗透性层中心对称;

(2)在渗透性地层顶底界面处,自然电位变化最大,当地层较厚(大于四倍井径)时,可以用曲线半幅点确定地层界面;

(3)测量的自然电位幅度为自然电流在井内钻井液段产生的电位降,它永远小于自然电流回路的总电动势;

(4)渗透性砂岩的自然电位,对泥岩的基线而言,可向左或向右偏转,它主要取决于地层水和钻井液滤液的相对矿化度。

第三节 影响渗透层自然电位曲线的主要因素

一、渗透层自然电位异常幅度的计算

由图 1-6 可以看出,在砂岩、泥岩和井的接触面上,以及砂岩和泥岩的接触面上,由于扩散吸附作用,产生扩散吸附电动势。砂岩、

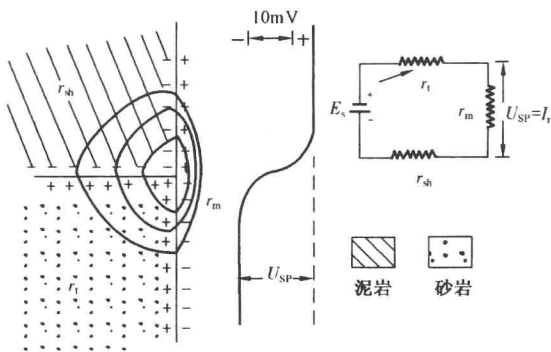


图 1-8 自然电流的等效电路

钻井液具有导电性,它们构成导电回路。其等效电路如图 1-8 所示。图中, r_m 为井筒钻井液的等效电阻, r_{sh} 为泥岩的等效电阻, r_t 为砂岩的等效电阻,回路的电流强度由下式决定:

$$I = \frac{E_s}{r_m + r_{sh} + r_t} \quad (1-13)$$

测量的自然电位异常幅度值 U_{SP} ,实际上等于自然电流流过井内钻井液电阻上的电位降,即:

$$U_{SP} = I r_m = \frac{E_s}{r_m + r_{sh} + r_t} \cdot r_m = \frac{E_s}{1 + \frac{r_{sh} + r_t}{r_m}} \quad (1-14)$$

根据式(1-14)可以看出,记录的自然电位幅度值 U_{SP} 是自然电位总电动势的一部分,而自然电位的总电动势 E_s 相当于自然电流回路断路时的电压。对于纯水层砂岩的总电动势,常称为它的静态自然电位,简称静自然电位,用 SSP 表示。

二、自然电位曲线的影响因素

由式(1-14)可以看出,测量的自然电位幅度值 U_{SP} 与井内钻井液电阻 r_m 、泥岩电阻 r_{sh} 、砂岩电阻 r_t 以及总的自然电动势 E_s 有关。下面根据式(1-14)讨论影响自然电位异常幅度的主要因素。

1. E_s 的影响

自然电位异常幅度值 U_{SP} 与总自然电动势 E_s 成正比, 而 E_s 决定于地层的岩性和钻井液滤液电阻率 R_{mf} 与地层水电阻率 R_w 的比值 R_{mf}/R_w 。因此, 岩性、地层水矿化度与钻井液滤液矿化度的比值直接影响自然电位的异常幅度。

2. 地层厚度、井径的影响

图 1-9 为不同地层厚度纯水砂岩的自然电位理论曲线, 主要说明在其他条件完全相同的情况, 地层厚度与井径的比值 (h/d)

对自然电位幅度和形状的影响。 U_{SP} 为记录的自然电位异常幅度值, SSP 为静自然电位。从图中可以看出, 当地层厚度 $h > 4d$ 时, 自然电位异常幅度近似等于静自然电位; 当地层厚度 $h < 4d$ 时, 自然电位异常幅度小于静自然电位, 厚度越小, 差别越大, 异常顶部变窄, 底部变宽, 这时不能用半幅点确定地层界面。其原因是: 地层厚度减小, 地层电阻 r_l 增大, 井内钻井液电阻 r_m 减小, 所以 U_{SP} 减小。若地层厚度一定, 井径减小, h/d 增大, 井内钻井液电阻 r_m 增大, 则 U_{SP} 增大。

3. 地层电阻率、钻井液电阻率以及围岩电阻率的影响

图 1-10 表示不同 R_l/R_m 值的自然电位曲线。从曲线变化可以看出, 随着 R_l/R_m 的增大, 自然电位幅度值降低。这是由于 R_l 增大 (或 R_m 减小), r_l 增大 (或 R_m 减小), 则 U_{SP} 减小。

围岩电阻率 R_s 的变化同样对自然位异常幅度值有影响。围岩电阻率 R_s 增大, 则 r_s 增大, 使自然电位异常幅度值减小。

4. 钻井液侵入带的影响

在渗透性地层, 钻井液滤液渗入到地层孔隙中, 使钻井液滤液与地层水的接触面向地层方向移动了一定距离。钻井液侵入带的存在, 相当于井径扩大, 因而使自然电位异常幅度值降低。图 1-11 为不同钻井液侵入带情况下所测的自然电位曲线, 由图可见, 随侵入带增大, 自然电位异常幅度值减小。

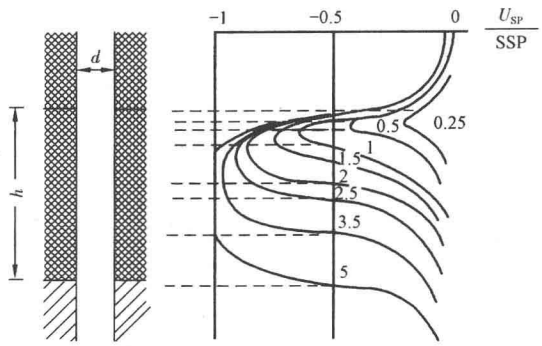


图 1-9 不同地层厚度的自然电位曲线号码为 h/d 值

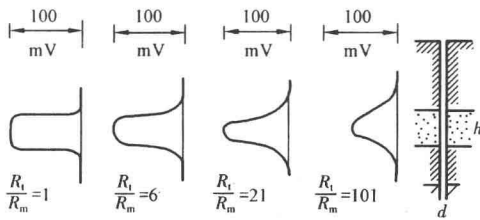


图 1-10 不同 R_l/R_m 值的自然电位曲线

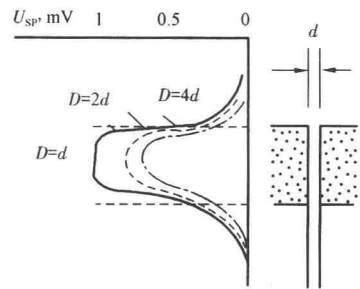


图 1-11 钻井液侵入带对自然电位曲线的影响
虚线—有钻井液侵入测出的异常幅度值;
实线—无钻井液侵入测出的异常幅度值

在砂泥岩交互层地区, 渗透性砂岩中薄的泥岩夹层的存在使自然电位曲线上有小的起伏, 起伏的大小与夹层的厚度和夹层电阻率有关。如果渗透性地层与泥岩夹在高电阻率地层之