

石油测井

在地质解释中的应用

主 编 吕桂友 刘玉萍 刘炳勤

哈尔滨地图出版社

石油测井在地质解释中的应用

SHIYOU CEJING ZAI DIZHI JIESHI ZHONG DE YINGYONG

吕桂友 刘玉萍 刘炳勤 主编

哈尔滨地图出版社

• 哈尔滨 •

内 容 提 要

本教材较系统地介绍了石油测井原理和方法及石油测井在生储盖层解释上的应用。全书共分九章,内容包括自然电位测井、普通电阻率测井、侧向测井、声波测井、放射性测井、注入剖面测井技术、产出剖面测井技术、工程技术测井以及这些测井方法在生储盖层解释上的应用。

本书可作为高职高专测井、钻井工程技术专业,石油开发与开采技术专业以及物探等专业教材,也可作为职工培训及工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

石油测井在地质解释中的应用/吕桂友,刘玉萍,刘炳勤主编.—哈尔滨:哈尔滨地图出版社,2008.7
ISBN 978-7-80717-910-8

I.石… II.①吕… ②刘… ③刘… III.油气测井—应用—地质解释 IV.P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 109336 号

哈尔滨地图出版社出版发行
(地址:哈尔滨市南岗区测绘路2号 邮政编码:150086)
哈尔滨理工大学东区印刷厂印刷
开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:9.75 字数:243 千字
2008年7月第1版 2008年7月第1次印刷
ISBN 978-7-80717-910-8
印数:1~1 000 定价:28.00 元

前 言

本教材编写的指导思想是:突出职业教育特色,强调知识内容丰富、层次清楚、论述准确、理论联系实际,力求图文并茂和具有科学性、系统性、完整性、针对性及实用性;同时,对当前国内外石油地球物理测井及解释的有关新成就、新动向,给予了适当反映。

本教材内容涵盖了普通地球物理测井原理和方法及地球物理测井解释在生储盖层上的应用。其任务是引导测井、钻井工程技术专业、油气开发与开采技术专业以及物探等专业学生初步了解地球物理测井原理及方法,以及测井资料的解释在生储盖层上的应用。为学习后续专业课以及毕业后从事相关工作打好基础。

本书为适应高职高专学生学习需要,在每章前有基本要求,章后有练习题,并对每章的主要知识点、重点和难点予以强调,以便于学生学习。

本书由大庆职业学院吕桂友副教授担任主编。前言及第十章由大庆职业学院刘玉萍编写;概述及第七章、第八章、第九章由大庆职业学院刘炳勤编写;第一章、第二章、第三章、第四章、第五章、第六章由吕桂友编写。全书由吕桂友统稿。

本书在编写过程中得到了哈尔滨地图出版社、大庆职业学院及大庆油田相关部门的大力支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 3 月

目 录

第一章 自然电位测井	(1)
第一节 井内自然电位产生的原因	(1)
第二节 自然电位测井曲线的形状	(4)
第三节 影响渗透层自然电位的主要因素	(6)
第四节 自然电位曲线的应用	(8)
练习题	(10)
补充资料	(11)
第二章 普通电阻率测井法	(12)
第一节 岩石电阻率与岩性、储油物性和含油性的关系	(12)
第二节 普通电阻率测井	(18)
第三节 视电阻率曲线的分析	(22)
第四节 视电阻率曲线的影响因素	(26)
第五节 微电极测井	(29)
练习题	(33)
补充资料	(34)
第三章 侧向测井	(35)
第一节 三电极侧向测井	(35)
第二节 微侧向测井	(39)
第三节 高分辨率三侧向测井	(40)
练习题	(41)
补充资料	(42)
第四章 声波测井	(43)
第一节 岩石的声学特性	(43)
第二节 声波速度测井	(46)

第三节 高分辨率声波测井	(52)
第四节 声波幅度测井	(53)
练习题	(59)
补充资料	(60)
第五章 放射性测井	(61)
第一节 放射性测井基础知识	(61)
第二节 自然伽马测井	(62)
练习题	(67)
补充资料	(68)
第六章 注入剖面测井技术	(69)
第一节 注入剖面测井常用仪器及其方法原理	(69)
第二节 注入剖面测井资料解释方法	(74)
第三节 注入剖面测井资料应用	(79)
练习题	(82)
补充资料	(83)
第七章 产出剖面测井技术	(84)
第一节 产出剖面集流型测井仪器及其方法原理	(84)
第二节 产出剖面非集流型测井仪器及其方法原理	(90)
第三节 产出剖面测井资料的解释方法	(92)
第四节 产出剖面测井资料的应用	(107)
练习题	(117)
补充资料	(117)
第八章 工程技术测井及应用	(118)
第一节 工程测井常用仪器、方法及其原理	(118)
第二节 井径系列仪器方法及原理	(119)
第三节 磁法测井系列仪器、方法及原理	(122)
第四节 热学测井仪的结构及测量原理	(125)
练习题	(128)

补充资料	(128)
第九章 生油层及储盖层的测井解释	(129)
第一节 泥质生油层的地质特征	(129)
第二节 泥质生油层的测井响应特征	(131)
第三节 盖层的测井解释	(135)
第四节 泥质岩盖层的测井响应特征	(136)
第五节 应用测井信息研究泥质岩盖层的封闭能力	(138)
第六节 其他岩性盖层的测井资料特点	(140)
第七节 储盖组合测井解释	(141)
练习题	(150)
参考文献	(151)

第一章 自然电位测井

基本要求

1. 熟练掌握自然电位的产生;自然电位曲线的应用(划分渗透层界面,确定泥质含量,渗透性判断水淹层)。
2. 掌握自然电位大小的影响因素。
3. 了解地层水电阻率的确定方法。
4. 自学自然电流测井。

自然电位测井测量的是自然电位随井深变化的曲线。其原理线路如图 1-1 所示。在井内放一个测量电极 M , 地面放一个测量电极 N , 将 M 电极沿井筒移动, 即可测出一条井内自然电位变化的曲线。

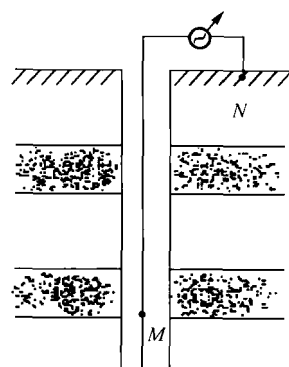


图 1-1 自然电位测量原理

自然电位测井方法简单,而且实用价值高,是划分岩性和研究储层性质的基本方法之一。其资料应用贯穿于油田勘探和开发的全过程。

自然电位是怎样产生的? 它的值的大小与地层哪些性质有关? 受哪些因素的影响? 只有先弄清这些问题,才能利用测量的自然电位曲线来解释有关的地质问题。

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很复杂,对于油井来说,主要有以下两个原因:一是地层水含盐浓度和泥浆含盐浓度不同,引起离子的扩散作用和岩石颗粒对离子的吸附作用;二是地层压力与泥浆柱压力不同时,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泥浆的物理性质。

实践证明:油井的自然电位主要由扩散产生的,只有在泥浆柱和地层的压力差很大的情况下,过滤作用才成为较重要的因素。

一、扩散吸附电位

首先观察这样一种电化学现象,如图 1-2 所示,在一个玻璃容器内,用一个半透膜将容器内部空间一分为二,半透膜两侧分别盛有不同浓度 C_1 和 C_2 的 NaCl 溶液。我们观察发现,经过一段时间之后用极棒和导线连接时电流表显示有电流通过。

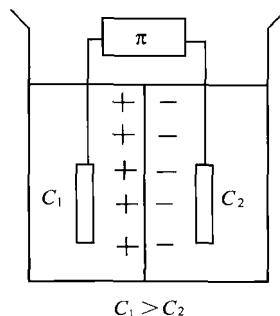


图 1-2 $C_1 > C_2$ 时 NaCl 溶液扩散

分析原因如下:半透膜的作用是防止浓度不同的溶液混合起来,只能使离子自由穿过。离子在渗透压的作用下,高浓度溶液的离子要穿过半透膜移向较低浓度的溶液,这种现象叫做扩散。对于 NaCl 溶液来说,由于氯离子 Cl^- 的迁移率大于钠离子 Na^+ 的迁移率,于是在低浓度的溶液中氯离子 Cl^- 相对增多,形成负电荷的富集。高浓度的溶液中则是钠离子 Na^+ 相对增多,形成了正电荷的富集,就在两种不同浓度 NaCl 溶液的接触面上,产生了自然电场,当离子扩散达到动态平衡时,形成一个稳定的电动势,称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 可用公式(1-1)表示:

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

式中: C_1, C_2 ——溶液盐类的浓度,单位为 g/L;

K_d ——扩散电位系数。它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 溶液接触时,在温度为 25℃ 时, $K_d = -11.6 \text{ mV}$,代入(1-1)式,得:

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

当溶液浓度不高时,溶液浓度与电阻率成反比关系,则(1-2)式可写成:

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

和上述实验现象一样,井内自然电位的产生,也是两种不同浓度的溶液相接触的产物。地层被井钻穿后,泥浆滤液和地层孔隙中的地层水直接接触,由于泥浆滤液的浓度不同于地层水溶液的浓度(通常称矿化度),它们之间就产生了离子的扩散作用。假定泥浆滤液和地层水溶液所含的盐类都是氯化钠(NaCl),且地层水溶液的浓度大于泥浆滤液的浓度,在砂岩层处扩散作用的结果是:地层水内富集正电荷,泥浆滤液内富集负电荷。根据理论分析和实验结果,对于纯水砂岩,井壁上产生的扩散电动势可用(1-4)式近似表示:

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

式中: C_w, C_{mf} ——地层水和泥浆滤液的浓度;

R_w, R_{mf} ——地层水和泥浆滤液的电阻率。

如图 1-3 所示,当地层水矿化度大于泥浆滤液矿化度时,在泥浆与砂、泥岩层的接触面上的电荷的分布为泥浆带负电荷,而砂岩层带正电荷。

与纯水砂岩相邻的泥岩所含的地层水,其成分和浓度一般与相邻的岩层中的地层水是一样的。但由于泥岩的结构、化学成分与砂岩不同,所以在泥岩的井壁上形成的自然电动势与砂岩相比,不但数值差别很大,而且符号也相反。这是因为黏土矿物表面具有选择吸附负离子的能力,因此当浓度不同的溶液扩散时,黏土矿物颗粒表面吸附负离子,使其扩散受到牵制,只有正离子可以在地层水中自由移动。因此在泥浆的井壁上主要是钠离子的扩散作用。当 $C_w > C_{mf}$ 时,在泥浆和泥岩的接触面上,泥浆带正电荷,泥岩带负电荷,如图 1-4 所

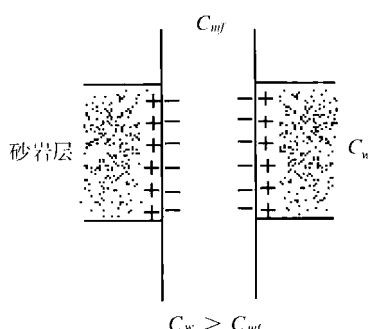
示。这时形成的电动势称扩散吸附电动势,以 E_{da} 表示。根据实验结果和理论分析,在泥岩井壁上产生的扩散吸附电动势 E_{da} 可由下式表示:

$$E_{da} = K_{da} \lg \frac{C_w}{C_{mf}} = K_{da} \lg \frac{R_{mf}}{R_w},$$

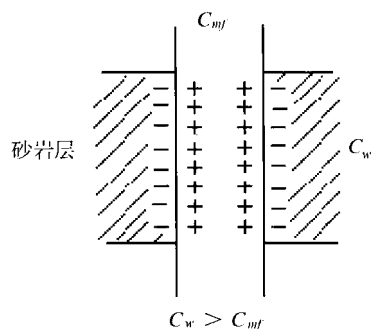
式中: K_{da} ——扩散吸附电位系数,它的大小和符号主要取决于岩石颗粒的大小及其化学成分,也和溶液的化学成分、温度比等因素有关。可用实验求出。

对 NaCl 溶液在 25℃ 时, $K_{da} = 59.1 \text{ mV}$, 代入上式,得:

$$E_{da} = 59.1 \lg \frac{R_{mf}}{R_w}. \quad (1-5)$$



C_w —砂岩地层水含盐浓度;
 C_{mf} —泥浆滤液含盐浓度。



C_w —砂岩地层水含盐浓度;
 C_{mf} —泥浆滤液含盐浓度。

图 1-3 砂岩与泥浆接触面上的电荷分布 图 1-4 泥岩与泥浆接触面上的电荷分布

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离子,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。

当泥浆柱的压力大于地层的压力时,由于岩石颗粒的选择吸附性,孔道壁上吸附泥浆滤液中的负离子,仅正离子随着泥浆滤液向地层中移动,这样在井壁附近聚集大量负离子,在地层内部富集大量正离子,因此地层和泥浆接触面两端形成的电位称为过滤电位。以 E_f 表示。

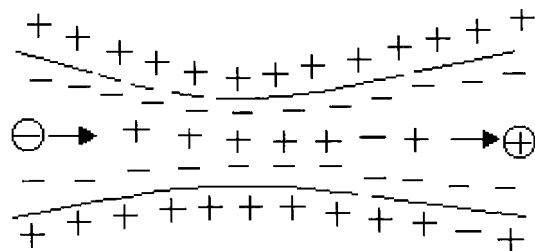


图 1-5 过滤电位形成示意图箭头方向表示液体流动方向

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

式中: ΔP ——压力差,单位为 Pa;

R_{mf} ——过滤滤液电阻率,单位为 $\Omega \cdot m$;

μ ——泥浆滤液黏度,单位为 m/s ;

K_f ——过滤电位系数,与溶液的成分浓度有关。

过滤电位只有在地层压力与泥浆柱压力相差很悬殊时,而且在泥饼未形成前,过滤电位才能较大地显示。由于油井的泥浆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,地层水与泥浆相接触,产生扩散吸附作用,在泥浆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。

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 ,泥浆滤液的矿化度为 C_{mf} ,设 $C_1 \geq C_2 > C_{mf}$,井内自然电场的分布如图 1-6 所示。

在砂岩和泥浆的接触面上,由于扩散作用产生扩散电动势 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:

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

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流电动势的代数和:

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

式中: $K = (K_d + K_{da})$ ——自然电位系数。

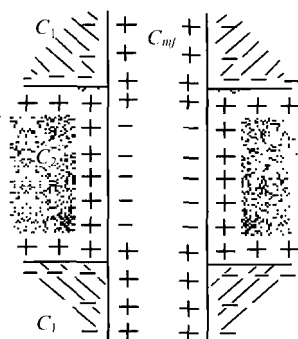


图 1-6 砂泥岩交界面处自然电场的分布

对于纯砂岩和泥岩地层,其地层水和泥浆滤液的盐类为 NaCl,在 25℃ 时, $K = 59.1 + 11.6 = 70.7$,代入(1-10)式:

$$E_s = 70.1 \lg \frac{C_2}{C_{mf}} \quad (1-11)$$

在溶液的浓度不高时,可以认为电阻率与浓度成反比。则(1-11)式可写成:

$$E_s = 70.1 \lg \frac{C_{mf}}{C_2} \quad (1-12)$$

式中: R_{mf} ——泥浆滤液电阻率;

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,不能按上式计算砂泥岩接触面上回路的总自然电动势。

二、自然电位的曲线形状

自然电位理论曲线,如图 1-7 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。

前面已经介绍过,当井钻穿后,在砂岩井壁,泥岩井壁以及砂、泥岩接触面上,存在着自然电动势。而砂岩、泥岩和泥浆具有导电性,因此可以与自然电动势构成闭合回路,从而形成自然电流。自然电位测井记录的是自然电流在井内的电位降。

下面分析 SP 曲线在砂泥岩剖面上的形状特点:在离开砂岩较远的泥岩上(如 a 点以上),自然电流甚小,几乎没有什么变化,所以大段泥岩上的自然电位曲线基本上是一条直线。过了 a 点,电流强度逐渐增加,当 $C_w > C_{mf}$ 时,井内自然电位逐渐降低,曲线向负的方向偏转。在地层中心 c 点附近,电流强度最小,电位值基本保持不变,自然电位曲线几乎与井轴成平行的直线。在砂岩层的下部,由于接近下部泥岩,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 b, d 两点处,电流密度最大,自然电位值在井轴方向上变化大(因为 $\Delta U = I \times R$),因此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曲线接近直线。

图 1-8 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

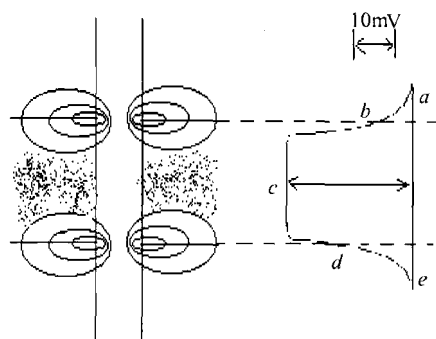


图 1-7 井内自然电场的分布

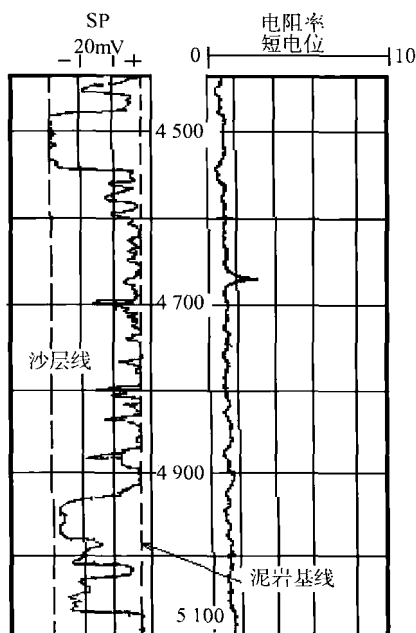


图 1-8 自然电位曲线

然电位曲线偏离泥岩基线。在足够厚的地层中,曲线达到一定的偏转幅度,称为自然电位曲线的异常幅度,即地层中点的自然电位与泥岩基线对应的电位的差值。

综上所述,自然电位曲线具有如下特点:

1. 当地层、泥浆分布均匀,上下围岩岩性相同时,自然电位曲线关于地层中心对称;
2. 在地层顶、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,为自然电流在井内产生的电位降,它永远小于自然电流回路总的电动势;
4. 渗透性砂岩的自然电位异常幅度,对泥岩基线而言,可向左或向右偏转,异常幅度的偏转方向主要取决于地层水和泥浆滤液的相对矿化度。

第三节 影响渗透层自然电位的主要因素

一、渗透层自然电位异常幅度的计算

井内自然电流的等效电路图如 1-9 所示。图中 r_m 为井筒泥浆的等效电阻, r_{sh} 为泥岩的等效电阻, r_i 为砂岩的等效电阻,回路的电流强度由下式决定:

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

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泥浆电阻上的电位降,即:

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

根据上式可以看出,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。将纯水层砂岩的总电动势称为静态自然电位,简称自然电位,用 S_{sp} 表示。

二、自然电位曲线的影响因素

由(1-14)式可以看出,测量的自然电位幅度值 U_{sp} 与进井内泥浆电阻 r_m 、泥岩电阻 r_{sh} 、砂岩电阻 r_i ,以及总的自然电动势 E_s 有关。下面根据(1-14)式,讨论影响自然电位异常幅度的主要因素。

1. 自然电位异常幅度值 U_{sp} 与总自然电位 E_s 成正

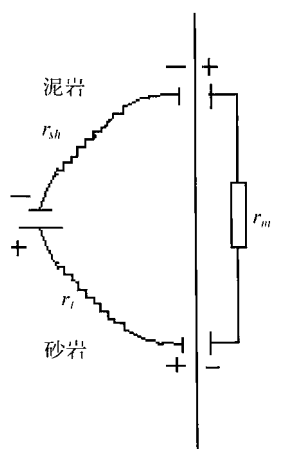


图 1-9 自然电流的等效电路

比,而 E_s 决定于地层的岩性和泥浆滤液电阻率 R_{mf} 与地层水电阻率 R_w 的比值 (R_{mf}/R_w)。因此岩性、地层水矿化度与泥浆滤液矿化度的比值直接影响自然电位的异常幅度,地层水矿化度越大 U_{sp} 越大。

2. 地层厚度和井径的影响:图 1-10 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下,地层厚度 (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, S_{sp} 为静自然电位,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:当地层厚度减小(相当于 r_i 的横截面积变小)时,地层电阻 r_i 增大,从公式(1-14)分析可知 U_{sp} 值将减小。若地层厚度一定时,井径减小(相当于 r_m 的截面积变小),则井内泥浆电阻 r_m 增大,则 U_{sp} 增大。

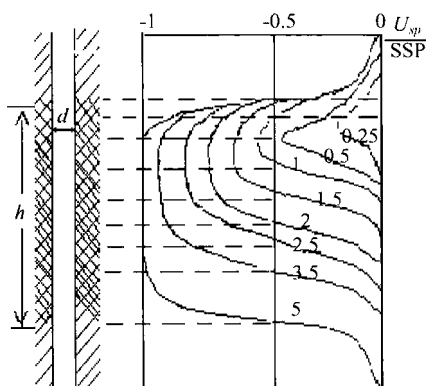


图 1-10 不同地层厚度的自然电位
曲线图中数字 h/d

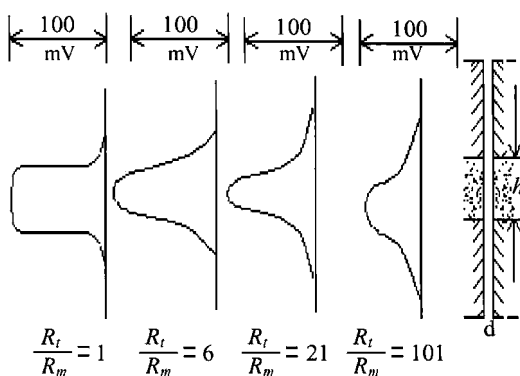


图 1-11 不同 $\frac{R_t}{R_m}$ 值的自然电位曲线

3. 地层电阻率、泥浆电阻率以及围岩电阻率的影响:图 1-11 表示不同 R_t/R_m 值的自然电位曲线,从曲线变化可以看出,随着 R_t/R_m 的增大,自然电位幅度值降低。这是由于 R_t 增大(或 R_m 减小),使 r_i 增大(或 r_m 减小分流能力强),则 U_{sp} 减小。

围岩电阻率 R_s 的变化,同样对自然电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。

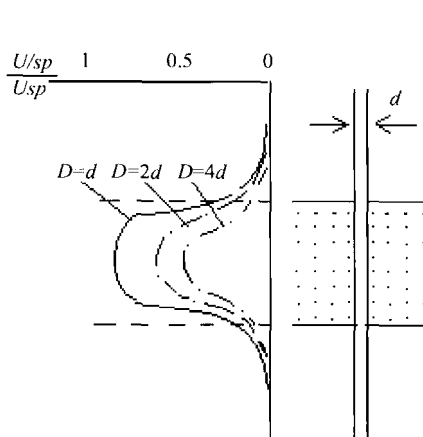
4. 泥浆侵入带的影响:在渗透性地层,泥浆滤液渗入到地层孔隙中,使泥浆滤液与地层水的接触面向地层方向移动了一段距离。泥浆侵入带的存在,相当于井径扩大,因而使自然电位异常幅度值降低,图 1-12 为不同泥浆侵入带情况下所测的自然电位曲线。随着泥浆侵入半径的增大,自然电位异常幅度值减小。

在砂岩交互层地区,渗透性砂岩中薄的泥岩夹层使自然电位曲线上有小的回返,回返幅度的大小与泥质夹层的厚度及夹层电阻率的大小有关。

三、自然电位校正图版

由上面讨论可知,渗透性地层的自然电位曲线受很多因素的影响,同样岩性的地层,由于影响因素的不同,测量的自然电位幅度值不同,为了利用自然电位曲线来解释有关地质问

题,必须对测量的自然电位进行校正。图 1-13 是自然电位校正图版,它考虑了侵入带直径、冲洗带电阻率、地层厚度、地层电阻率和围岩电阻率的影响。图版左部适用于无侵入或侵入不明显的地层;图版右部适用于有侵入,且侵入带直径与井径的比值 $D/d=5$ 左右的地层。图版的纵坐标是校正系数 U_{sp}/E_s (或 U_{sp}/S_{sp}) ,横坐标是地层厚度与井径的比值 h/d ,其他参数如图 1-13 所示。



U_{sp} —有泥浆侵入时的异常幅度;

U_{sp} —无泥浆侵入时的异常幅度。

图 1-12 泥浆侵入带对自然电位的影响

自然电位的校正方法如下:

1. 选择最符合实际 R_i/R_m 值横排图版;
2. 选择无侵入或者比较符合 R_{xo}/R_i (R_{xo} 为冲洗带电阻率)值的有侵入图版;
3. 在横坐标上找出 h/d 的值,由此垂直向上,与相应的 R_i/R_m (无侵入)或 R_{xo}/R_m (有侵入)曲线相交(或与内插曲线相交),读出交点的纵坐标,即可算出自然电位校正值 S_{sp} 。

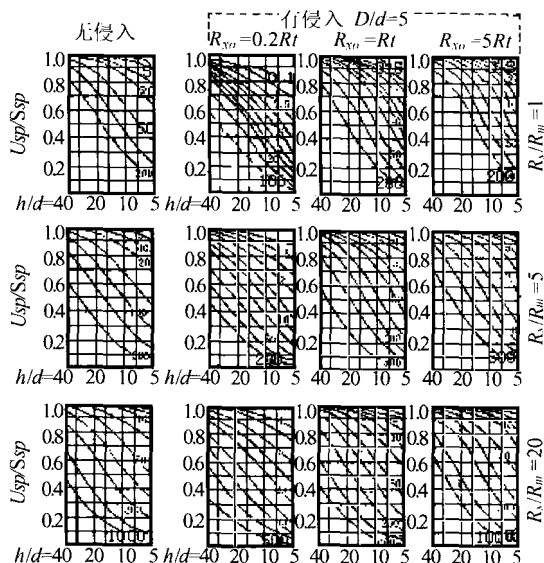


图 1-13 自然电位校正图版

第四节 自然电位曲线的应用

自然电位曲线主要有以下几种应用。

一、判断岩性,确定渗透性地层

在砂泥岩剖面中,泥岩可以作为一条基线,砂岩表现为异常幅度,该异常幅度的大小反映了砂岩的渗透性好坏,砂岩的渗透性越好异常幅度越大。砂岩中含有泥质时异常幅度随泥质含量的增大而减小,当砂岩颗粒由粗变细时,异常幅度由大变小。因此,根据自然电位曲线,可以在砂泥岩剖面中清楚地划分出砂岩、泥岩、泥质砂岩。

碳酸岩地层,其渗透性多为次生裂缝性空隙,它出现在致密的碳酸岩地层中,上下没有泥岩隔层,钙质成分对正离子没有选择吸附性。因此,自然电位曲线在致密碳酸岩地层和裂缝性渗透层处,没有明显的差异,难以应用自然电位曲线划分渗透层。在膏岩剖面中,由于

盐岩、石膏、硬石膏等非常致密,基本上不含地层水,因此不产生扩散吸附电位。

目前,自然电位测井资料除了应用于岩性判别之外,还用于地层沉积相的判别,特别是在精细地质研究中,自然电位曲线是判断河床相与非河床相的主要依据。一般来说,自然电位曲线在渗透层处厚度大于等于 2 m、负异常幅度较大且曲线上没有泥岩夹层回返,就判断为河床相。否则,厚度过于小或有较明显的泥岩夹层回返,都不能判断为河床相。如图 1-14 所示,1~3 层为河床相;4,5,6 层 SP 曲线上虽然有负异常,但由于地层厚度较小、负异常幅度较小且泥质夹层回返明显,因此为非河床相。

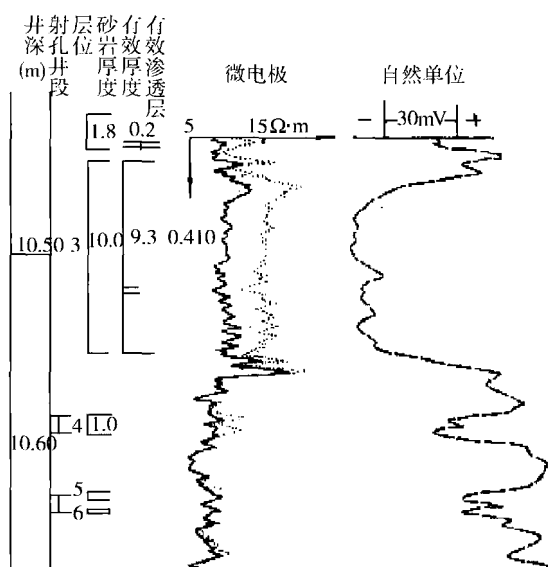


图 1-14 利用自然电位曲线划分河床与非河床

二、计算地层水电阻率

利用自然电位曲线计算地层水电阻率时需要根据已知的岩层电阻率、地层厚度、泥浆电阻率、围岩电阻率和侵入带深度等参数,先把自然电位异常幅度校正到自然电流回路总电动势 E_s (即静自然电位),然后利用下列关系式,以及已知的泥浆滤液电阻率 R_{mf} 和自然电位系数 K ,便可以求出地层水电阻率 R_w 。

$$E_s = K \lg \frac{R_w}{R_{mf}} \quad (1-15)$$

三、估计泥质含量

在一个地区,根据具体条件,利用实验和数理统计的方法直接建立自然电位和泥质含量的关系或者建立泥质地层与纯砂岩的自然电位比值同泥质含量之间的关系。找出这种关系或关系曲线,就可以直接根据自然电位曲线确定泥质含量。

目前,确定泥质含量采用自然电位和自然伽马测井资料相结合的方法。

四、判断水淹

在油田注水开发时,由于渗透性差异必将导致某些油层早见水,这种现象称为水淹。油

层水淹会给油田开采带来很大的困难,为了提高采收率,必须实行早期分片切割注水,因此,水淹测井与解释显得十分重要。油层水淹后在电性、放射性、声波传播特性等方面都发生了较大的变化。在自然电位曲线上主要表现为:泥岩基线偏移或负异常幅度降低。如图 1-15 所示,为油层底部发生水淹引起的泥岩基线偏移。偏移幅度的大小反映了水淹程度的大小。

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_{12} - E_{23} - E_{31} = \\ &K \left[\lg \frac{R_{mf}}{R_2} - \lg \frac{R_{mf}}{R_3} \right] = \\ &K \lg \frac{R_3}{R_2},\end{aligned}\quad (1-16)$$

其中, R_3 为水淹后的地层水电阻率, R_2 为水淹前的电阻率。一般来说注入水的电阻率小于地层的电阻率,因此水淹越严重, R_3 越大,即 ΔE 值越大。

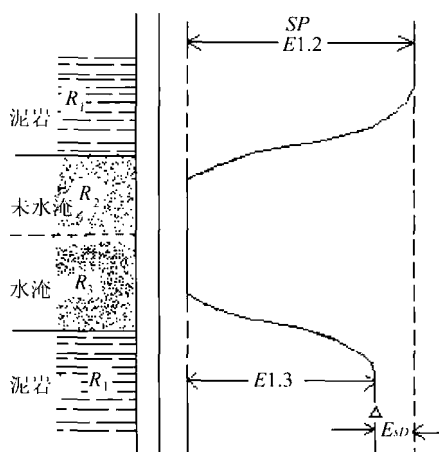


图 1-15 利用自然电位曲线划分河床与非河床

应该说明的是:不是所有的水淹都会引起泥岩基线的偏移;当砂岩层内有奇数个水淹界面时,将发生泥岩基线偏移;当砂岩层内有偶数个水淹界面时泥岩基线不发生偏移,只是异常幅度随水淹程度的严重而减小;当发生强水淹时,负异常幅度完全消失变成一条直线。

练 习 题

一、判断题

1. 油气钻井中自然电位主要是由扩散吸附电动势产生的。
2. 自然电位测井测量井中电极 M 与地面固定电极 N 之间的电位差。
3. 当地层水矿化度大于泥浆滤液矿化度时,夹于泥岩之间的砂岩层自然电位曲线表现