

矿场地球物理测井技术

测井资料解释

第二版

陈一鸣 朱德怀 任康 刘子云 编

石油工业出版社

矿场地球物理测井技术

测井资料解释

第二版

陈一鸣 朱德怀 任康 刘子云 编

石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书共分三篇。第一篇为测井方法原理及解释,比较详细地介绍了各主要测井方法的原理和解释方法。第二篇为测井资料的储集层评价,着重介绍了测井资料综合解释的基本方法和储集层评价中的几种常用的数理统计方法,供读者在选择解释方法时参考,最后,简要介绍了测井多井评价。第三篇为其它测井方法及资料应用,介绍了地层倾角测井和重复式地层测试器资料的应用。

为便于读者自学,本书尽量少用复杂的数学推导和公式,而着力于阐述物理概念,深入浅出。

本书侧重于油气勘探工作中所使用的测井方法和解释技术,对于生产测井、地层倾角测井也作了简要介绍。气测井、数学处理等内容均未编入。

本书由江汉石油学院以下同志编写:陈一鸣(前言、第七、八、九、十章)、朱德怀(第一、二、三、四、五章)、任康(第六、十三、十四章)、刘子云(第十一、十二章),陈一鸣同志任主编。

本书可供测井解释工作者和油田地质人员阅读,也可供院校测井和地质专业学生、钻井和开发地质工作者参考。

矿场地球物理测井技术

测井资料解释

第二版

陈一鸣 朱德怀 任康 刘子云 编

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本24¹/₄印张 593千字 印1—1500

1994年9月北京第2版 1994年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-1108-5/TE·1026

定价:19.00元

前 言

在油、气田的勘探与开发中，地球物理测井是发现和评价油、气层的重要手段。岩层有各种物理特性，如电化学特性、导电特性、声学特性、放射性及中子特性等，岩层的这种特性称地球物理特性，以区别于岩层的其他物理性质，如孔隙度、渗透率等。采用专门的仪器设备，沿井身（钻井剖面）测量地球物理参数的方法称地球物理测井（简称测井）。

测井从本世纪20年代产生，60年代中期开始数字化，70年代后测井技术有了飞速的发展。目前，不同的测井方法已达几十种，在测井资料的解释技术上也日趋完善。

绝大多数测井方法只是间接地、有条件地反映了岩层地质特性的一个侧面，所以，要全面地认识和掌握岩层规律，进而发现和评价油、气层，往往需要综合使用几种测井方法（采用优选的测井系列），并重视有关录井的第一性资料。

测井虽然是研究岩层地质特性的间接方法，但它与其他录井方法相比，仍具有许多重要优点，主要是效率高、成本低、效果好。只需要很短的时间就能采集到大量的测井信息，而且这些资料是在岩层的自然条件下测量的，这就更接近于岩层的真实情况。尽管每种测井方法具有局限性，但采用多种测井资料的综合解释，仍能解决石油勘探与开发中的一系列问题，其中有些问题是其他录井方法所难以解决的。

目前，在油、气田的勘探与开发中，测井解释所能解决的问题主要是：

1. 详细划分岩层，准确地确定岩层的深度和厚度；
2. 确定岩性和孔隙度，当采用几种孔隙度测井方法组合时，能得出岩性百分含量和孔隙度曲线；
3. 划分储集层并对其含油性作出评价，这包括确定油（气）层有效厚度、含油（气）饱和度、可动油含量、油气密度和估计渗透率等；
4. 进行地层对比，研究构造和地层沉积问题等；
5. 在油田开发中，提供油层动态的部分资料；
6. 研究井内技术情况，如井斜、井径、固井质量等。

测井解释的主要任务是运用测井资料去认识储集层的岩性、物性和含油性。测井解释的基本方法是综合分析，它包括定性、定量和半定量（快观）解释。随着测井技术的发展和计算机应用的普及，测井资料解释工作中的资料整理和大量的计算工作已由计算机完成，测井分析工作者将有更多的时间和精力用于资料分析和有关科研工作上。

我国的测井工作基本上是《新中国成立以后开始的，在党的领导下，经过广大测井工作者的努力，我国的测井技术有了很大的发展。特别是70年代末以来，由于国家实行改革开放政策，先进的测井装备和技术的引进和消化，使国内的测井技术水平有了显著的提高。当前，广大测井工作者正期待着更多更好的优质国产仪器来装备测井队伍，从而使我国的测井技术更快地赶上世界先进水平。

本书1981年9月第1版，先后印刷2次，受到广大读者的好评和鼓励。这是第二版，出版

前由作者根据目前国内外测井技术发展状况，对本书作了大量的修改和补充，不少章节是重写或增补的，删去了一些已经过时的内容。由于我们水平所限，书中一定会存在不少错误和不妥之处，恳请读者提出批评和指正。编写本书时引用了各油田测井解释站、兄弟院校测井教研室和原规划院勘探室所提供的资料，引用了一些教材、专著和论文中的图件或实例，在此，谨向提供资料的有关单位和同志以及有关著作的作者表示衷心的感谢。

编者

目 录

第一篇 测井方法原理及解释

第一章 自然电位测井.....	(1)
第一节 自然电位的成因.....	(1)
第二节 自然电位测井曲线.....	(4)
第三节 自然电位测井曲线的应用.....	(7)
第二章 普通电阻率测井.....	(15)
第一节 岩石电阻率.....	(15)
第二节 普通电阻率测井原理.....	(25)
第三节 地层的视电阻率曲线.....	(30)
第四节 普通电阻率测井曲线的应用.....	(37)
第五节 微电极测井.....	(44)
第三章 侧向测井.....	(48)
第一节 三电极侧向测井.....	(48)
第二节 七电极侧向测井.....	(54)
第三节 双侧向测井.....	(59)
第四节 微聚焦电阻率测井.....	(63)
第五节 深、浅微聚焦电阻率测井组合.....	(67)
第四章 感应测井.....	(69)
第一节 感应测井的原理.....	(69)
第二节 感应测井的特性.....	(70)
第三节 感应测井曲线.....	(70)
第四节 根据感应测井读数求地层电导率.....	(81)
第五章 电磁波传播测井.....	(92)
第一节 岩石的介电常数.....	(92)
第二节 电磁波传播测井原理.....	(94)
第三节 EPT资料的应用.....	(99)
第六章 声波测井.....	(103)
第一节 岩石的声学特性.....	(103)
第二节 声波速度测井.....	(107)
第三节 声波全波列测井.....	(116)
第四节 环形声波测井.....	(126)
第五节 固井声幅测井及变密度测井.....	(129)

第六节	声波电视测井	(132)
第七章	放射性测井	(137)
第一节	自然伽马测井和自然伽马能谱测井	(137)
第二节	密度测井和岩性密度测井	(146)
第三节	中子测井	(163)
第四节	脉冲中子测井	(178)

第二篇 测井资料的储集层评价

第八章	测井资料综合解释基础	(195)
第一节	储集层的分类及需要确定的储集层参数	(195)
第二节	储集层的泥浆侵入特性	(200)
第三节	测井系列的选择	(203)
第四节	确定地层水电阻率	(209)
第五节	纯地层的测井解释基本方程	(211)
第六节	估计地层渗透率	(212)
第七节	确定储集层的泥质含量	(215)
第九章	用测井资料评价储集层岩性和孔隙度的基本方法	(218)
第一节	岩性的定性解释	(218)
第二节	储集层岩性和孔隙度的定量解释	(224)
第三节	储集层岩性和孔隙度的快观解释	(229)
第十章	用测井资料评价储集层含油性的基本方法	(243)
第一节	储集层含油性的定性解释	(243)
第二节	储集层含油性的定量解释	(246)
第三节	储集层含油性的快观解释	(254)
第十一章	数理统计方法在储集层评价中的应用	(276)
第一节	计算机自动分层	(276)
第二节	利用概率统计判断岩性	(289)
第三节	地层对比	(293)
第四节	判别油水层的几种数理统计方法	(302)
第十二章	测井多井评价	(319)
第一节	测井资料的编辑校正与标准化	(319)
第二节	关键井研究与单井常规解释	(325)
第三节	测井相分析	(332)
第四节	多井研究	(342)
第五节	多井评价数据库系统	(349)

第三篇 其他测井方法及其资料的应用

第十三章	地层倾角测井资料在研究地层和构造方面的应用	(357)
第一节	地层倾角测井的基本原理	(357)

第二节 地层倾角测井资料在研究地质构造中的应用.....	(365)
第三节 地层倾角测井资料在研究沉积相中的应用.....	(373)
参考文献.....	(380)

第一篇 测井方法原理及解释

第一章 自然电位测井

在井中未通电的情况下，发现放在井中的电极M与位于地面的电极N之间存在电位差。这个电位差是自然电场产生的，称为自然电位。测量自然电位随井深的变化叫做自然电位测井。

第一节 自然电位的成因

在油井中的自然电场一般是由地层和泥浆间发生的电化作用 and 动电学作用产生的，所产生的电动势分别称为电化电动势和动电学电动势。

一、电化电动势

为了说明电化电动势形成的原因，以一个位于厚层泥岩中的砂岩为例来说明（见图1-1）。

若砂岩中的地层水和泥浆滤液均为氯化钠溶液，地层水的电化活度 a_w 与泥浆滤液的电化活度 a_{mf} 不同，且 $a_w > a_{mf}$ ，在活度较大的地层水中的钠离子 Na^+ 和氯离子 Cl^- 将向活度小的泥浆中移动，这种现象叫做扩散作用。由于 Cl^- 周围平均带有2.5个水化分子，移动速度较快（例如 18°C 时，在1伏特/厘米的电场中为 65.5×10^{-5} 厘米/秒）， Na^+ 周围平均带4.5个水分子，移动速度较慢（ 43.5×10^{-5} 厘米/秒），于是在活度小的泥浆中就有较多的 Cl^- ，泥浆便带负电，而活度较大的地层水中则有较多的 Na^+



图1-1 砂岩与泥岩的自然电位分布

①实践中发现带电荷的离子与不带电荷的分子对溶剂性质的影响不同，离子相互间的静电力改变了它应有的作用，例如异性离子间的吸引力影响了离子运动的速度，使其导电性能减弱，有人便提出了活度的概念。

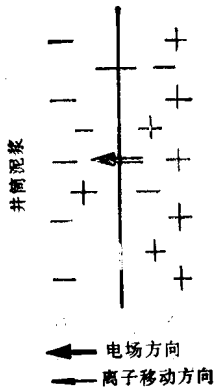
所谓活度 a 就是将它们的浓度 c 乘上一个因素—活度系数 f —使它适用于各方面完全从理论出发的理想溶液公式，用它代替浓度后在各方面的计算结果与实验结果符合，所以活度又称为有效浓度。

活度系数与溶液的粘度，溶剂的介电常数，离子的价数及离子强度等有关。

通常 $f < 1$ ，只有溶液无限稀释（或浓度 ≈ 0 ）时，离子相互间无影响，活度系数才等于1。

地层水便带正电，地层和泥浆间就出现了电位差。

随着扩散作用不断进行，泥浆中多余的负离子和地层水中多余的正离子将不断增多，它们之间的电位差将越来越大，但不会无限增大。因为离子扩散作用产生的电场对正在扩散的离子也有作用（见图1-2）。这种作用使 Na^+ 移动的速度加快（电场对 Na^+ 作用力与 Na^+ 移动方向相同）， Cl^- 移动的速度减慢（电场对 Cl^- 作用力与 Cl^- 移动方向相反），当电位差达到某一定数值时， Cl^- 和 Na^+ 的移动速度相等，这时尽管离子还在继续扩散，但是在泥浆中多余的负离子量不再增多，两溶液间的电位差保持一定。我们把这个因电化



学活度不同发生离子扩散作用产生的电势叫做扩散电势，或称扩散电位，用 E_d 表示。

扩散电位的数值主要决定两溶液活度的比值，此外还与溶液的温度和离子的成分有关。如果直接接触的是不同活度的同一种溶液（例如泥浆滤液和地层水都是 NaCl 溶液），扩散电位 E_d 用下式计算：

图1-2 扩散电位的形成

$$E_d = K_d \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (1-1)$$

式中， K_d 称为扩散电位系数，毫伏。

从上式不难看出， K_d 在数值上等于活度比为10的两种溶液直接接触时产生的扩散电位值。当温度为 18°C 时其值为 -11.7 毫伏，负号表示活动小的溶液带负电，正号则表示活动小的溶液带正电。

以上讨论的是砂岩与泥浆接触处发生的情况，即不同活度的两种溶液直接接触的情况。当两种不同活度溶液被泥岩隔开，或者说通过泥岩扩散时，实验证明产生的电动势与式(1-1)所计算的数值大不相同。因泥岩由颗粒很细的粘土组成，粘土晶格中价数较高的正离子被溶液中价数较低的正离子所取代，使得粘土表面带负电，表面带负电的粘土又以库仑力吸引溶液中的正离子组成双电层。当泥岩两端溶液的活度不同时，在渗透压力差的作用下孔道中的正离子则从活度大的一方向活度小的一方移动，而负离子则受到粘土表面负电荷库仑力的排斥作用不能移动，扩散结果在活度小的一方便多余正离子而带正电，活度大的一方则带负电，与扩散电位的极性刚好相反。从电位的形成来看，负离子不能移动，好象岩石具有选择吸附性，于是把这种电位叫做吸附电位，用 E_a 表示。也有人称为薄膜电位，因为泥岩好象一个离子选择薄膜，只让正离子通过。

吸附电位的大小用下式计算：

$$E_a = K_a \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (1-2)$$

式中， K_a 称为吸附电位系数，其值与粘土的成分^①、溶液的化学成分和温度等因素有关，

①发生阳离子取代作用的能力与粘土的成分有关：蒙脱石 $(\text{Al}_2\text{Mg}_3)(\text{Si}_4\text{O}_{10})[\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 晶格中三价的铝很容易被溶液中二价的镁取代，而伊利石 $\text{K}_{71}\text{Al}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 晶格中四价的硅被溶液中三价的铝取代的能力则不如蒙脱石，高岭石 $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 则几乎无离子取代现象。

可由实验确定。当地层为纯泥岩时，吸附电位大约为纯砂岩处扩散电位的五倍。

对于砂、泥质混合的岩石，既有因离子移动速度不同产生的扩散电位，也有由于粘土存在产生的吸附电位，称为扩散—吸附电位，用 E_{da} 表示。

$$E_{da} = K_{da} \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (1-3)$$

式中， K_{da} 称为扩散—吸附电位系数，其数值和符号介于纯砂岩和泥岩之间，取决于岩石内双电层中阳离子的数量。由于这种阳离子与溶液中的其他自由的阳离子可以进行当量交换，通常用单位体积孔隙中可交换阳离子数 Q_v 来表示，单位为毫克当量/立方厘米。对于NaCl溶液，地层水电阻率 $R_w = 0.1 \Omega \cdot m$ ， $25^\circ C$ 时，不同 Q_v 岩石的 K_{da} 值见表1-1。

表1-1 砂泥岩的 K_{da} 值

岩 性	Q_v	K_{da} (mV)
纯 砂 岩	0	-11.6
含泥质砂岩	0.1	-3.0
泥质砂岩	0.15	0
含砂泥岩	1	33
微含砂质泥岩	2	48
纯 泥 岩	MAX	59.1

不难看出，扩散电位和吸附电位也是扩散—吸附电位，只不过是岩石中不含粘土和全是粘土的两种极端情况。

二、动电学电动势

动电学电动势是泥浆柱与地层间存在压力差时液体发生过滤作用产生的，因此也称为过滤电势。

一般泥浆柱压力略大于地层压力，如果地层具有一定的渗透性，泥浆滤液将通过井壁流入地层孔道。由于岩石中存在双电层，过滤液体中正离子较多，在压力差的作用下，有较多的正离子随着泥浆滤液进入地层，于是在地层内便多余正电量而带正电，泥浆中带负电，产生负的过滤电势。

过滤电势(E_k)的大小与压力差(Δp)和过滤液体的电阻率(R_{mf})成正比，与液体的粘度(μ)成反比，关系式如下：

$$E_k = A \frac{\Delta P \cdot R_{mf}}{\mu} \quad (1-4)$$

式中， A 称为过滤电势系数，与过滤液体的矿化度及化学成分有关。当 μ 的单位为厘泊， R_{mf} 的单位为 $\Omega \cdot m$ ， Δp 的单位为大气压时， A 的单位为mV。对渗透性地层，其平均值约为0.77。

一般在渗透层处的过滤电势是很小的。这是因为实际上泥浆柱和地层之间的全部压力差都消耗在渗透性很差的泥饼上，加在地层上的剩余压力差一般不足以产生明显的过滤电势。因此在一般情况下可忽略过滤电势的影响，只有在泥浆电阻率很高，压力差异大时才考虑过滤电势的影响。

第二节 自然电位测井曲线

当井中存在自然电位时，用M电极在井中移动测得的自然电位曲线具有什么特点呢？下面仍以夹在厚层泥岩中的砂岩为例，并在只考虑电化学电动势的条件下来讨论。

设 $a_w > a_{mf}$ ，砂岩与泥浆直接接触产生的扩散电势为 E_d ，砂岩中地层水的离子通过泥浆的泥浆扩散产生的吸附电势为 E_a ，各电动势的极性见图1-3。

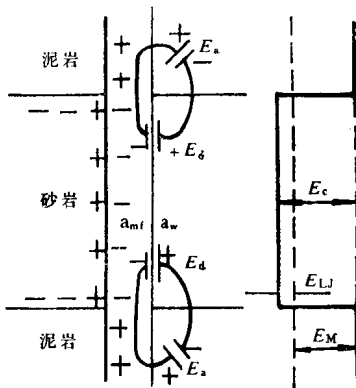


图1-3 砂泥岩交界面的回路总电势和 E_c 曲线

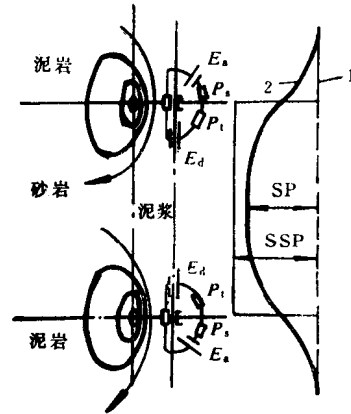


图1-4 自然电场的电流分布

各电动势所在介质（砂岩、泥岩、泥浆）都是导电的，组成电流回路，如图1-3中所示。回路总电动势 E_c 可由下式求得：

$$\begin{aligned} E_c &= E_d + E_a = K_d \lg \frac{a_w}{a_{mf}} + K_a \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \\ &= (K_d + K_a) \lg \frac{a_w}{a_{mf}} = K \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中， $K = K_d + K_a$ ，称为自然电位系数，其值与岩性，温度，溶液的化学成分有关。当温度为 25°C (77°F)，地层界面两侧为纯泥岩和纯砂岩，地层水和泥浆滤液均为NaCl溶液的情况下，式(1-5)中 K_d 等于 -11.6 ， K_a 约等于 59.1 ，当二者串联时自然电位系数 K 的绝对值为 70.7 。在自然电位测井中一般以泥岩处的电位为基值，作为计算电位变化的相对零线。由于在砂岩处的自然电位比泥岩低，因此一般将砂、泥岩界面附近的回路总电动势写为

$$E_c = -K \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (1-5a)$$

从式(1-5a)看出，回路总电动势等于扩散电动势和吸附电动势之和，它相当于回路中

没有电流时井中地层上下界面的自然电位差，我们称为静自然电位，用SSP表示，SSP曲线如图1-3所示。正对砂岩处电位降低，我们称为负常，降低的数值叫做异常幅度。图中静自然电位曲线的异常幅度值等于 E_0 。

由于泥岩岩性一般变化不大，电化学特性大致一定，吸附电位比较稳定，在自然电位曲线上常显示为一条数值不变的直线，我们将它作为自然电位的基线，为此异常幅度可视为地层中点的自然电位与基线的差值，这一个值大约可由淡水地层的+50mV变化到高矿化度盐水地层的-200毫伏。

必须指出静自然电位曲线是无法测定的。因为地层和泥浆都具有导电性，图1-3中所示的地层（砂岩）、围岩（泥岩）及泥浆将组成闭合电路而产生自然电流，自然电流的方向及分布见图1-4。

在井中电流从泥岩流向砂岩，电位值沿电流方向降低，界面处全部电流都在井中，电流线最密，电位变化最大，反映井中自然电位变化的自然电位曲线将如图1-4曲线2所示。将此曲线与静自然电位曲线（曲线1）比较，共同点是在砂岩处仍是负异常，不同点是异常幅度（用SP表示）减小了，界面处曲线不是突变而是逐渐变化的。

SP与SSP有什么关系？这是一个很重要的问题。因为在应用自然电位曲线解决有关地质问题时需要知道SSP值，而SSP又是无法测定的，因此有必要讨论影响SP的因素，以便根据SP求出SSP值。

从图1-4看出自然电流回路包括泥浆、地层和围岩三部分介质，设它们的电阻分别为 r_m 、 r_1 、 r_2 ，自然电流回路的等值电路则如图1-4中所示。自然电流强度 I 可由下式求得：

$$I = \frac{SSP}{r_m + r_1 + r_2} \quad (1-6)$$

用M电极在井中测得的自然电位曲线异常幅度值SP只是自然电流在泥浆中产生的电位降，即

$$SP = I \cdot r_m = \left(\frac{r_m}{r_m + r_1 + r_2} \right) SSP \quad (1-7)$$

从式(1-7)看出SP与SSP成正比，并与回路中各介质的电阻有关，只有地层、围岩的电阻比泥浆的电阻小很多时，自然电流的电位降主要在泥浆中，测得的SP才近似等于SSP，通常情况下都是 $SP < SSP$ 。

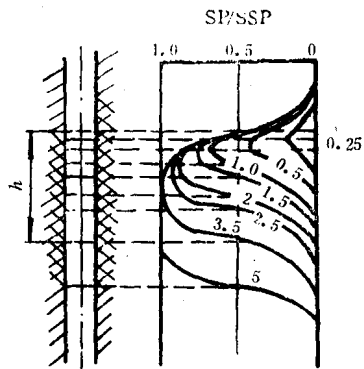
地层（砂岩）的电阻率 R_1 特别是厚度 h 对SP有很大的影响。地层变薄或电阻率增大，则 P_1 变大，SP减小。图1-5是不同厚度地层的理论自然电位曲线，从图上看，在导电均匀的情况下，厚度小于井径的3.5倍时， h 越小，SP比SSP小得越多。

图1-6是不同电阻率地层的理论自然电位曲线，从图上看， R_1 增大，SP减小； R_1 减小，SP增大。

当泥浆滤液渗入地层时，泥浆滤液与地层水的接触面向地层方向推移，冲洗带存在相当于井径扩大，使得SP降低。冲洗带直径 d_f 越大，影响越大，SP减小越多（见图1-7）。

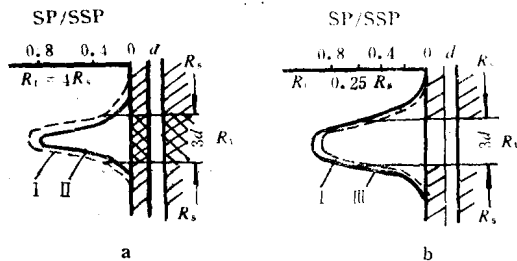
一般来说，围岩（泥岩）很厚，且导电性较好，所以 r_2 较小，对SP影响不大。当 R_2 比 R_m 大得较多时，其影响不可忽视， R_2 越大，SP较SSP小得越多，见图1-8。

以上各因素对SP值的影响综合反映在图1-9上，根据各影响因素的数值可从图上求得，这些因素对SP综合影响的大小，即SP与SSP的比值。例如，已知参数 $R_m = 0.5$ 欧姆米，



曲线参数: h/d_n

图1-5 不同厚度地层的自然电位理论曲线
(曲线参数: h/D_n)



I - 均匀介质; II - 高阻层; III - 低阻层;

图1-6 不同电阻率地层的自然电位理论曲线

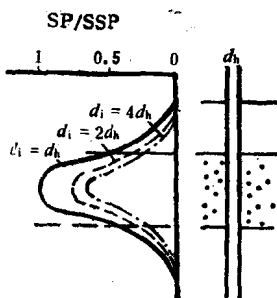


图1-8 围岩电阻率对自然电位曲线的影响

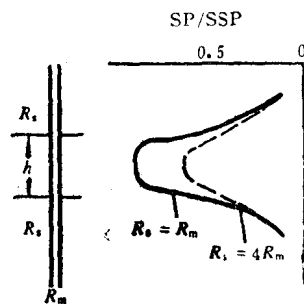


图1-7 冲洗带直径对自然电位曲线的影响

冲洗带电阻率 $R_x = 10$ 欧姆米; $R_i = 50 \Omega \cdot m$, $d_n = 0.2$ 米, $d_i = 1.0$ 米, $h = 2$ 米, $SP = -70$ mV, 计算得各参数之比值为 $R_x/R_m = 20$, $R_x/R_i = 0.2$, $R_s/R_m = 1$, $d_i/d_h = 5$, $h/d_h = 10$, 则查图1-9上部从左向右数第二图, 在横坐标为10处向上作垂线与读数为20的曲线相交, 交点的纵坐标值0.35即为测得的SP与SSP的比值, 求得 $SSP = -70/0.35 = -200$ mV。

根据以上讨论可以看出夹在厚层泥岩中的渗透性地层(砂岩)的自然电位曲线具有以下特点: 在泥岩处自然电位曲线平直(基线), 正对砂岩处为负异常($a_w > a_{mf}$ 或 $R_{mf} > R_w$ 时), 当地层较厚且 R_i 与 R_s 接近时在地层界面处自然电位异常值(相对基线)为异常幅度的一半, 称为半幅点。若地层较薄, 异常幅度减小, 半幅点向界面外移动。根据上述特点可由自然电位负异常从泥岩中划分出渗透性砂岩, 用曲线上的半幅点确定较厚地层的界面。

当井剖面中除渗透性砂岩与泥岩外还有很多高阻致密地层时, 由于它们影响自然电流的分布, 所得SP曲线形状与厚层泥岩中夹砂岩的曲线有很大不同(见图1-10左部)。这是因为从泥岩流向砂岩的电流几乎都被限制在高阻层所对应的井中, 由于这个井段中电流强度不变, 电位变化的速度相同, 自然电位呈现为一条倾斜的直线。

从图1-10看出, 自然电流在砂岩处离开井眼进入地层, 自然电流减小, 电位变化速度减慢, 曲线开始变缓; 在泥岩处自然电流进入井眼, 自然电流增大, 电位变化速度加快, 曲

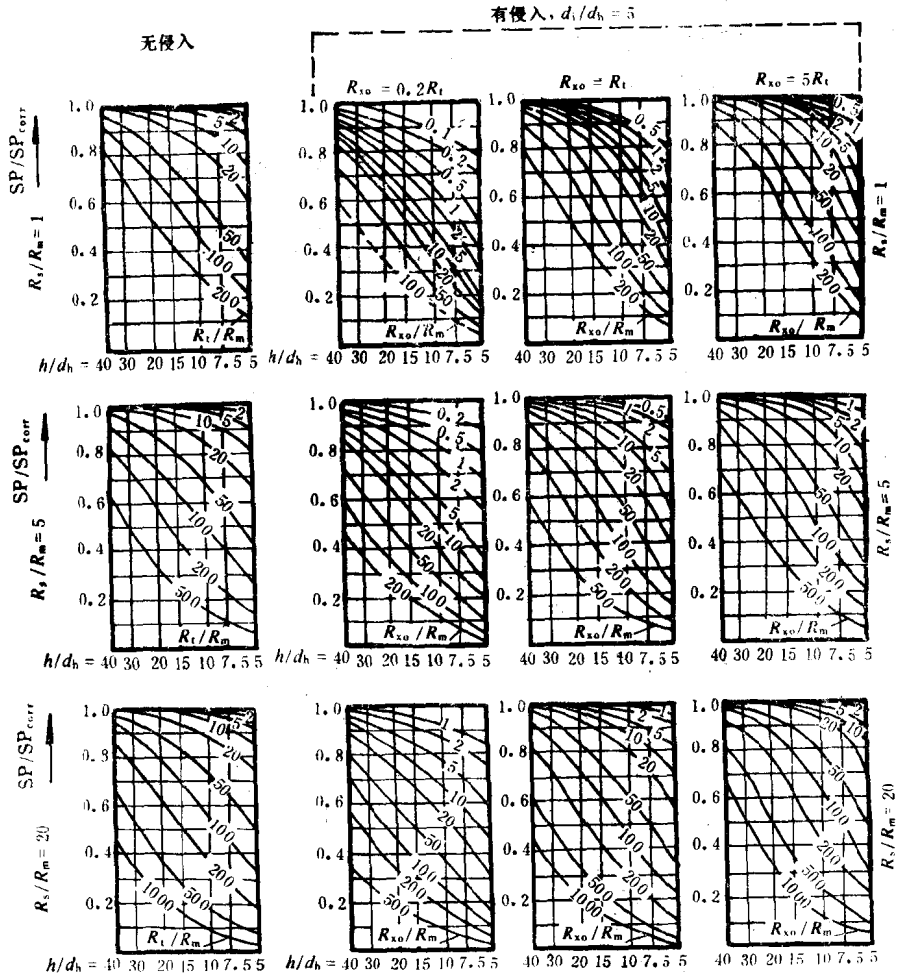


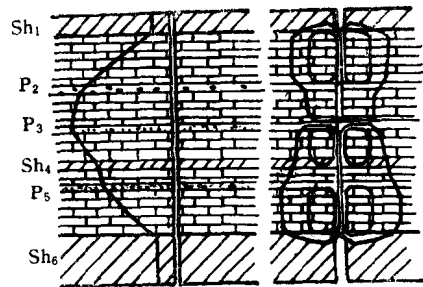
图1-9 SP校正图版

线开始变陡。它说明在高阻剖面中砂岩和泥岩位于自然电位曲线上一系列直线段中的斜率变化处, SP曲线凹进的一边朝着基线处为砂岩, SP曲线凸出的一边朝着基线处为泥岩, 但较难精确地划分其界面。

第三节 自然电位测井曲线的应用

油井中的自然电位主要是电化学作用产生的, 为此我们只考虑电化学电动势, 并且着重讨论砂泥岩剖面中自然电位曲线的应用。

从式(1-5)知在井中电化学作用产生的 E 与地层水和泥浆滤液活度之比的对数成正比



- Sh-泥岩(非渗透层, 导电性较好)
- 致密层(电阻率很高)
- P-渗透层(导电性较好)

图1-10 高阻地层中自然电流分布及自然电位曲线形状示意图

比,其比例系数 K 除与温度、溶液的化学成分有关外,主要决定于岩性。在决定岩性的各种因素中对自然电位有决定性影响的则是粘土的含量;由此可见,自然电位曲线的主要用途是:

- 1) 判断岩性和划分渗透层;
- 2) 求地层水电阻率;
- 3) 估计地层的粘土含量。

一、判断岩性和划分渗透层

1. 砂、泥质地层

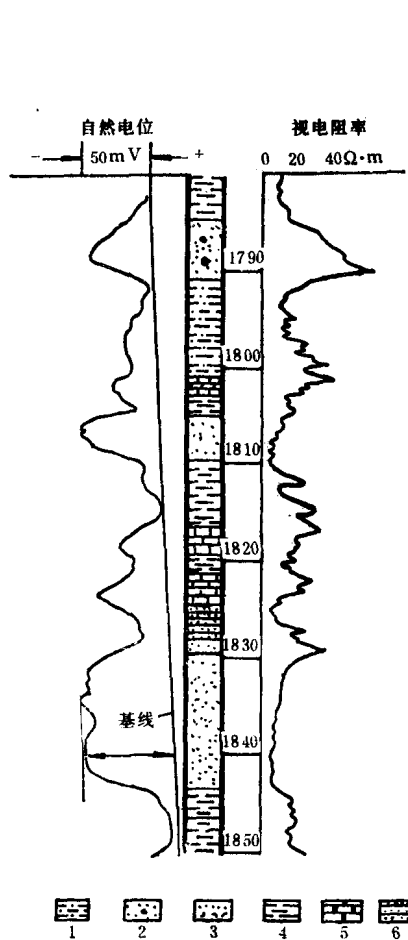


图1-11 砂泥质地层的自然电位曲线实例

- 1—粉砂质泥岩; 2、3—含油和含水的渗透性砂岩;
4—粘土层; 5—致密砂岩; 6—泥质粉砂岩

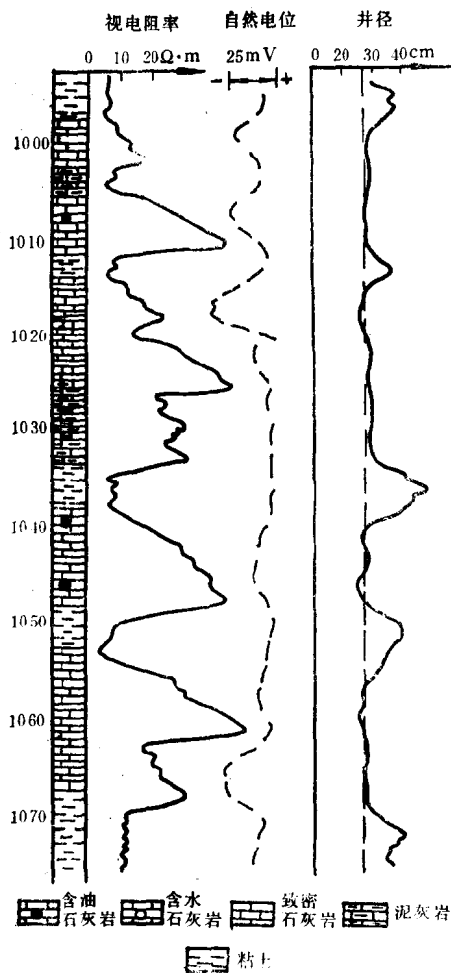


图1-12 用自然电位曲线划分碳酸盐地层中含粘土地层实例

从自然电位的成因知道,当地层水的活度大于泥浆滤液的活度时,正对砂岩的泥浆中有多余负电荷,正对泥岩的泥浆中有多余正电荷,于是在测得的自然电位曲线中泥岩为基线,

砂岩处是负异常。如果砂岩中含有粘土，地层中将有一部分正电荷移向泥浆，使得泥浆中多余负电荷减少，异常幅度减少。砂岩中含粘土量越多，异常幅度越小，因此在其他条件相同的情况下，根据异常幅度的大小可以按岩石中粘土含量对岩性作出判断（见图1—11）。

考虑到砂岩的渗透性与粘土含量有关，粘土含量由少变多，渗透性由好变差，所以，根据自然电位异常幅度值大小可以划分砂泥岩剖面中的渗透性地层。

必须指出，地层的渗透性不仅决定于地层中的粘土含量，在不含粘土的纯砂岩中，由于岩粒粗细不同，渗透性也是不同的。岩粒越细，孔道直径越小，渗透性越差。因此不能认为自然电位异常幅度是渗透性的直接反映，但也不能认为与岩粒粗细无关，因为实际的沉积环境中不同粗细的岩粒并不是截然分开的，而是连续分布的，在细、粉砂岩中往往有较高的粘土含量。总的来说，岩粒越细，粘土含量越高，渗透性越差，自然电位异常幅度越小，粘土含量很高的泥岩则反映为基线。

至于砾岩，则要看它的分选性和胶结情况。分选性好，疏松的砾岩出现较大的负异常，分选性不好，被粘土致密胶结的砾岩自然电位与泥岩的显示相似。

含油、气砂岩与含水砂岩在自然电位曲线上反映相似，均为负异常，在其他条件相同的情况下，含油、气砂岩的幅度要小些，约为含水砂岩异常幅度的70%。这是由于含油、气砂岩含水量较含水砂岩少，地层电阻率较大的原因。

2. 碳酸盐地层

碳酸盐岩剖面中按渗透性可分为孔隙性和裂缝性的碳酸盐岩与致密碳酸盐岩。孔隙性和裂缝性碳酸盐岩的 $\text{E}_{\text{自然}}$ 与渗透性砂岩一样是扩散电势，在地层水活度大于泥浆滤液活度的条件下，正对孔隙性、裂缝性碳酸盐岩的泥浆中带负电。致密的碳酸盐岩孔隙度极小，孔道中几乎没有离子扩散，电阻率很高。在正对致密碳酸盐岩的泥浆中几乎没有多余的电

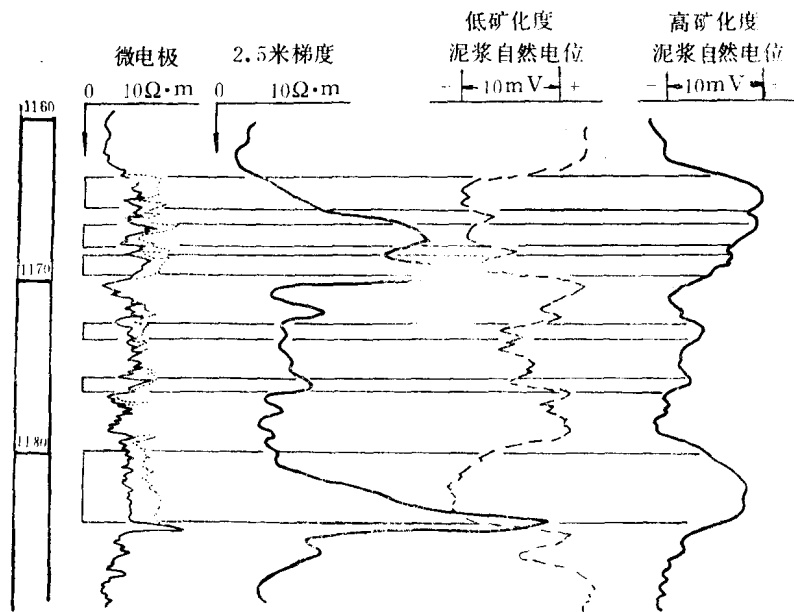


图1 13 高、低矿化度泥浆的自然电位曲线实例