

矿场地球物理测井技术

测井资料解释

江汉石油学院测井教研室编



石油工业出版社



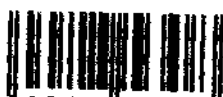
200354222

620

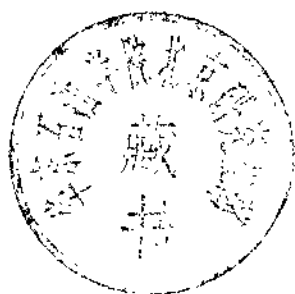
矿场地球物理测井技术

测井资料解释

江汉石油学院测井教研室编



00285308



5864/10

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分两篇。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,对于国内正在试验中的一些方法也作了简要介绍。第二篇为测井资料综合解释,着重介绍了测井资料综合解释的基本方法,供读者在选择解释方法时参考。同时还结合当前国内状况,对砂泥岩剖面、膏盐剖面和碳酸盐岩剖面分别加以讨论。作为应用实例,最后一章介绍了含泥质地层的测井解释。

为便于初中以上文化程度读者自学,本书尽量少用数学公式而着力于阐述物理概念。

本书侧重于油气田勘探工作中所使用的测井方法,对于生产测井只作简单介绍。气测井、地层倾角测井、数字处理等内容也均未编入。

本书由江汉石油学院测井教研室以下同志编写:陈一鸣(前言、第五、八、九、十章)、朱德怀(第一、二、三、七章)、任康(第四、六章)、刘子云(第十一章),钟兴水同志参加了一部分审稿工作。

本书可供测井解释工作者阅读,也可供院校测井和地质专业学生、钻井地质工作者参考。

矿场地球物理测井技术

测井资料解释

江汉石油学院测井教研室编

•

石油工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

•

开本787×1092 1/16印张22 字数450千字印数1—5.800

1981年9月北京第1版 1981年9月北京第1次印刷

书号15037·2215 定价1.80元

前 言

在油、气田的勘探与开发中,地球物理测井是发现和研究油、气层的重要手段之一。岩层有各种物理特性,如电化学特性、导电性、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,以区别于岩层的其它物理性质,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)。

国外,测井从二十年代产生,六十年代中期开始数字化,特别是进入七十年代后测井技术有了飞速的发展,目前,各种测井方法已达四十种左右,并正在继续朝着“三化一深”(系列化、组合化、数字化和深井或超深井)方向发展。

绝大多数的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,进而发现和研究油、气层,往往需要综合使用几种测井方法(组合测井)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,但它与其它录井方法相比,仍具有重要优点,主要是效率高、成本低、效果好。只需要很短的时间就能取得大量的测井资料,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,其中有些问题是其它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。

测井解释是运用测井资料,结合钻井地质及有关情况去认识岩层的岩性、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、定量和半定量解释。随着测井技术的发展,测井解释工作中的资料整理和大量的计算工作将由计算机完成,解释工作者将有更多的精力与时间用于资料分析和有关科研上。

我国的测井工作基本上是从解放以后开始的,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。当前,全国测井工作者正在实行测井技术改造,不断完善测井方法和系列,提高定量解释水平,积极采用快速直观解释技术,为早日实现以数字化为目标的测井技术现代化而努力奋斗。

应石油工业出版社的要求,我们编写了本书。由于我们水平所限,编写时间仓促,书中一定存在不少错误和不妥之处,望读者提出批评和指正。编写本书时引用了各油田测井解释组、兄弟院校测井教研室和规划院勘探室所提供的资料,在此谨向提供资料的有关单位和同志们表示衷心的感谢。

目 录

前 言

第一篇 测井方法原理及解释

第一章 自然电位测井

§1 自然电位的成因	1
一、电化学电动势	1
二、动电学电动势	3
§2 自然电位曲线	3
§3 自然电位曲线的解释	7
一、判断岩性和划分渗透层	7
二、求地层水电阻率	9
三、估计粘土含量	18
§4 自然电位测井的干扰	18
一、电极电位	16
二、电泳电位	17
三、重锤电蚀的干扰	17
四、工业迷散电流的干扰	19
五、绞车磁化干扰	19
六、矩形波电流的干扰	20
七、缆皮电位不稳的干扰	21

第二章 普通电阻率测井

§1 岩石电阻率	22
一、影响岩石电阻率的因素	22
二、岩石电阻率与地层水电阻率的关系	23
三、岩石电阻率与孔隙度和孔隙形状的关系	25
四、岩石电阻率与含油气饱和度的关系	29
五、岩石电阻率与岩性的关系	32
§2 视电阻率及其测量	35
一、测量岩样电阻率的原理	35
二、均匀介质的电阻率测量	35
三、非均匀介质中的电阻率测量——视电阻率测井	37
四、影响视电阻率的因素	37
五、电极系	38

§3 视电阻率曲线	40
一、高阻层的梯度曲线	40
二、高阻层的电位曲线	44
三、高阻邻层的屏蔽影响	47
§4 视电阻率曲线的干扰	48
一、漏电干扰	48
二、交流电干扰	50
三、感应干扰	52
四、地面电极的接地干扰	56
§5 标准测井	58
一、井径曲线的应用	58
二、标准测井曲线的应用	59
§6 微电极测井	61
一、微电极测井的原理	61
二、微电极测井曲线的应用	63

第三章 感应测井

§1 感应测井的原理	67
§2 感应测井的特性	68
一、双线圈系的探测特性	69
二、改善双线圈系探测特性的方法	74
三、0.8米六线圈系的各种特性	75
§3 感应测井曲线	78
一、上下围岩相同的高电导率岩层	78
二、电导率介于上下围岩之间的岩层	78
§4 根据感应测井读数求地层电导率	79
一、视电导率曲线的分层和取值	79
二、无限均匀介质传播效应校正(均质校正)	79
三、厚度-围岩校正	80
四、侵入影响校正	84
五、校正图版的选择	87

第四章 侧向测井

§1 三侧向测井	89
一、三侧向测井原理	89

二、影响三侧向测井特性的因素	91
三、三侧向测井曲线	93
四、三侧向测井曲线的应用	94
§2 七侧向测井	100
一、七侧向测井原理	100
二、影响七侧向测井特性的因素	101
三、七侧向测井曲线	103
四、七侧向测井曲线的应用	104
§3 双侧向测井	106
一、双侧向测井原理	106
二、影响双侧向测井的因素	106
三、双侧向测井曲线的应用	106
§4 聚焦型冲洗带电阻率测井	107
一、微侧向测井	107
二、邻近侧向测井	110
三、微球形聚焦测井	111
第五章 声波测井	
§1 岩石的声学特性	113
一、声波在岩石中的传播	113
二、声波在介质分界面上的传播	117
§2 声速测井	118
一、声速测井原理	119
二、声速测井曲线的应用	127
§3 固井声幅测井	131
一、基本原理	131
二、固井声幅测井曲线及应用	132
§4 声波全波测井	134
一、声波全波测井原理	134
二、声波全波测井图的解释	135
第六章 放射性测井	
〔预备知识〕：核物理的基本知识	
§1 自然伽马测井	141
一、沉积岩的放射性	141

二、自然伽马测井原理	142
三、自然伽马测井曲线	142
四、自然伽马测井曲线的影响因素	144
五、自然伽马测井曲线的应用	146
§2 中子测井	152
一、中子源及岩石的中子特性	152
二、中子伽马测井	154
三、中子-中子测井	164
〔附录1〕自然伽马测井刻度	170
〔附录2〕中子测井刻度	172
§3 密度测井	173
一、密度测井原理	173
二、影响密度测井曲线的因素	178
三、用密度测井资料求孔隙度	179
§4 脉冲中子测井	182
一、脉冲中子源	182
二、能谱测井	183
三、中子寿命测井	186
四、活化测井	193

第七章 生产测井

§1 放射性同位素测井	196
一、同位素悬浮液法测定吸水剖面	196
二、检查压裂及酸化效果	198
三、确定出水位置和管外窜槽	199
四、检查水泥封堵效果	200
§2 人工电位测井	200
一、岩石的人工电位	200
二、人工电位测井曲线的应用	202
§3 介电测井	204
§4 油井综合测试仪	205
一、工作原理	205
二、测井资料解释	206

第二篇 测井资料综合解释

第八章 测井原图的质量要求及标准	
§1 测井原图的质量要求及检查方法	208
一、测井原图上各种线条的识别	208
二、一般要求	209
三、深度要求和检查方法	209
四、幅度要求和检查方法	210
§2 测井原始资料质量标准	211
第九章 测井资料综合解释的基本方法	

§1 测井资料解释基础	213
一、需要确定的储集层参数	213
二、泥浆侵入	215
三、确定电阻率	218
四、确定岩性和孔隙度	221
五、确定地层水电阻率	223
六、确定饱和度(纯地层)	225
七、估计渗透率	226

§2 岩性和孔隙度的综合解释方法·····230	§3 碳酸盐岩剖面的测井资料解释·····304
一、岩性的定性解释·····230	一、碳酸盐岩剖面的地质特点·····304
二、岩性、孔隙度的定量解释·····230	二、测井解释特点·····306
三、岩性和孔隙度的半定量解释·····234	第十一章 含泥质地层的测井解释
§3 油(气)、水层的综合解释方法·····247	§1 泥质砂岩的基本特性·····315
一、油(气)、水层的定性解释·····247	一、泥质的基本性质及分布形式·····315
二、油(气)、水层的定量解释·····251	二、泥质对测井参数的影响·····316
三、评价储集层含油性的快速直观 方法·····258	§2 泥质砂岩的测井响应方程·····318
第十章 测井资料综合解释	一、物理体积模型简介·····318
§1 砂泥岩剖面的测井资料解释·····285	二、含水泥质砂岩的测井响应方程·····323
一、砂泥岩剖面的地质特点·····285	三、含油气泥质砂岩的测井响应方程·····326
二、测井系列的选择·····287	四、混合状泥质砂岩体积模型及电阻率测 井响应方程·····330
三、测井解释特点·····288	§3 地质参数的确定·····335
§2 膏盐剖面的测井资料解释·····299	一、泥质含量的确定·····335
一、膏盐剖面的地质特点·····299	二、含油(气)饱和度的确定·····338
二、测井系列的选择·····299	三、油、水层的直观解释方法·····339
三、测井解释特点·····301	专业符号及意义·····341

第一篇 测井方法原理及解释

第一章 自然电位测井

在未向井中通电的情况下，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。显然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。

§ 1 自然电位的成因

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

一、电化作用电动势

为了说明电化作用电动势形成的原因，以一个位于厚层泥岩中的砂岩为例，见图1-1。

若砂岩中的地层水和泥浆滤液均为氯化钠溶液，地层水的电化作用活度 a_w 与泥浆滤液的电化作用活度 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^- ②将向活度较小的泥浆中移动，这种现象叫做扩散作用。由于 Cl^- 移动速度比 Na^+ 快，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^+ ，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加，它们之间的电位差将越来越大。会不会无限增大呢？不会的。因为离子扩散作用产生

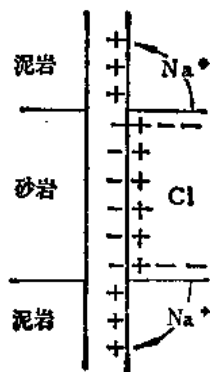


图1-1 砂岩与泥岩的自然电位分布

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，离子相互间的吸引力阻止或改变了它应有的作用。例如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。

$$a = f \times C$$

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。

② 晶体氯化钠是由带正电的钠离子和带负电的氯离子靠强烈的静电引力结合在一起的，不能自由移动。当 $NaCl$ 晶体溶于水时，由于水分子的作用，静电引力大大减弱，彼此分开，并能在水中自由移动。

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)。

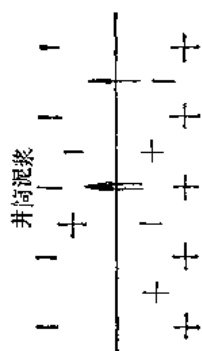


图1-2 扩散电位的形成

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。我们把这个因扩散作用产生的电动势叫做扩散电动势, 或称扩散电位, 用 E_{LJ} 表示。

扩散电位的数值主要决定两溶液的活度的比值, 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(例如泥浆和地层水都是 NaCl 溶液), 扩散电位 E_{LJ} 用下式计算

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

式中 K_{LJ} 称为扩散电位系数, 单位为毫伏。

从上式不难看出 K_{LJ} 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, 负号表示活度小的溶液带负电, 正号则表示活度小的溶液带正电。

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将与(1-1)式所计算的数值大不相同。泥岩由颗粒很细的粘土组成, 粘土品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要以库仑力吸引溶液中的正离子组成偶电层。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, 泥岩好象离子选择薄膜一样, 所以又把通过泥岩扩散产生的电位称为薄膜电位。

薄膜电位 E_M 的大小可用下式计算

$$E_M = K_M \lg \frac{a}{a_{mf}} \quad (1-2)$$

式中 K_M 称为薄膜电位系数, 其值与粘土的含量和成分①、溶液的化学成分、温度等因素有关, 可由实验确定。当地层为纯泥岩时, 薄膜电位大约为纯砂岩处扩散电位的五倍。

① 发生阳离子交换作用的能力与粘土的成分有关。蒙脱石 $(\text{Al}_2\text{Mg}_3)[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 具有很强的阳离子交换能力, 很容易发生离子取代现象, 即品格中四价的硅被溶液中三价的铝所取代, 品格中三价的铝被溶液中二价的镁取代。高岭石 $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 的阳离子交换能力较差, 而伊利石 $\text{K}_{>1}\text{Al}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 则介于二者之间。

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, 泥浆滤液通过井壁流入地层孔道。如果地层是渗透性砂岩, 在井壁处存在泥饼。泥饼中有偶电层, 能移动的离子中正电量较多, 在压力差的作用下, 有较多的正电量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, 泥饼上带负电, 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

$$E_K = A \frac{\Delta P \cdot R_{mf}}{\mu} \quad (1-3)$$

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} 的单位为欧姆-米, ΔP 的单位为大气压时, A 的单位为毫伏。对渗透性地层来说平均值约为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。因此在一般情况下过滤电势的影响可以忽略不计, 只有在泥浆电阻率很高、压力差异常大时, 才考虑过滤电势的影响。

§ 2 自然电位曲线

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进行讨论。

设 $a_w > a_{mf}$, 砂岩与泥浆直接接触处产生的扩散电势为 E_{LJ} , 砂岩中地层水的离子通过泥岩向泥浆扩散产生的薄膜电势为 E_M , 各电势的极性见图1-3左。

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

$$\begin{aligned} E_c &= E_{LJ} + E_M = K_{LJ} \lg \frac{a_w}{a_{mf}} + K_M \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \\ &= (K_{LJ} + K_M) \lg \frac{a_w}{a_{mf}} = K \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 $K = K_{LJ} + K_M$ 称为自然电位系数, 其值与岩性, 温度, 溶液的化学成分有关。

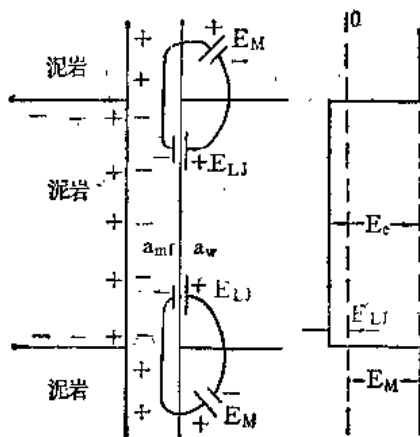


图1-3 砂泥岩交界面的回路总电势和 E_c 曲线

当温度为25℃(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,(1-4)式中 K_{LJ} (相当 $\frac{a_w}{a_{mf}}=10$ 的 E_{LJ})等于-11.7, K_M 约等于 K_{LJ} 的

5倍,其值为正,当二者串联时自然电位系数 K (相当于 $\frac{a_w}{a_{mf}}=10$ 的回路总电势)的绝对值为71。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势比泥岩低71毫伏,因此一般将砂、泥岩界面附近的回路总电势写为

$$E_c = -K \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (1-4')$$

从(1-4)看出,回路总电势等于扩散电势和薄膜电势之和,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右所示。正对砂岩处电位降低,我们称为负异常,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_c 。

由于泥岩岩性一般变化不大,电化学特性大致一定,所以薄膜电势比较稳定,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,这个值大约可由淡水地层的+50毫伏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左。在井中电流从泥岩流向砂岩,在地层界面附近电流线密集,界面处全部电流都在井中,电流线最密,由于电位值沿电流方向降低,电流最大(电流线密集)处电位变化最大,反映井中自然电位变化的自然电位曲线将如图1-4右方曲线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)减少了,界面处曲线不是突变而是逐渐变化的。

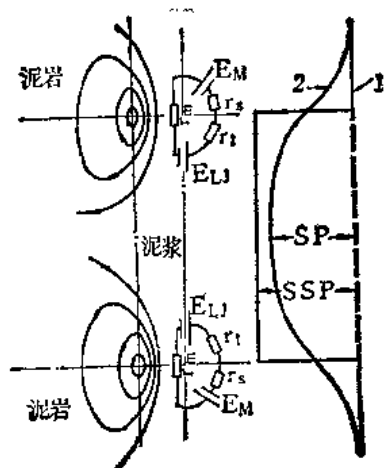


图1-4 自然电场的电流分布

SP与SSP有什么关系?这是一个很主要的问题。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的数值,而SSP又是无法测定的,因此有必要讨论从自然电位曲线得到的SP值与SSP值的关系,即影响SP的因素,以便根据SP求出SSP值。

从图1-4左看出自然电流回路包括泥浆、地层和围岩三部分介质,设它们的有效电阻分别为 r_m 、 r_t 、 r_s ,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

$$I = \frac{SSP}{r_m + r_t + r_s} \quad (1-5)$$

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

$$SP = I \cdot r_m = \left(\frac{r_m}{r_m + r_t + r_s} \right) SSP \quad (1-6)$$

从式(1-6)看出SP与SSP成正比, 并与回路中各介质的有效电阻有关, 只有地层、围岩的有效电阻比泥浆的有效电阻小很多时, 自然电流的电位降才主要在泥浆中, 测得的SP才近似等于SSP, 通常情况下都是 $SP < SSP$ 。

泥浆的电阻决定于井眼直径 d_h 和泥浆电阻率 R_m , R_m 越大、 d_h 越小, r_m 越大, SP越接近于SSP。

地层(砂岩)的电阻率 R_t 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 r_t 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_t 增大, SP减小; R_t 减小, SP增大。

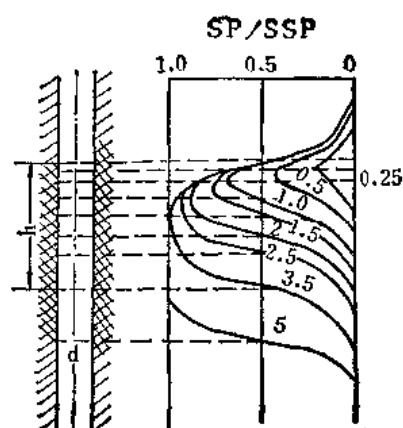


图1-5 不同厚度地层的自然电位理论曲线(曲线参数: h/d_h)

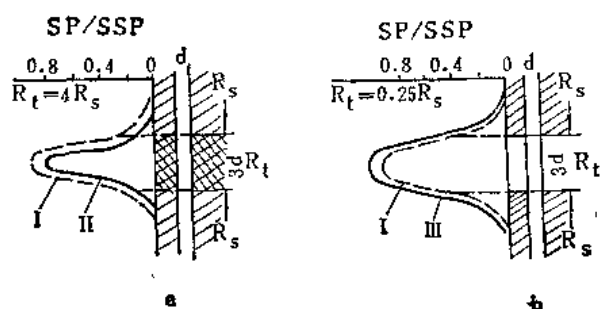


图1-6 不同电阻率地层的自然电位理论曲线

I—均匀介质; II—高层阻层; III—低阻层

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_i 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(即电阻率 R_s 小), 所以 r_s 较小, 对SP影响不大。当 R_s 比 R_m 大得较多时, 其影响不可忽视, R_s 越大, SP较SSP小得越多, 见图1-8。

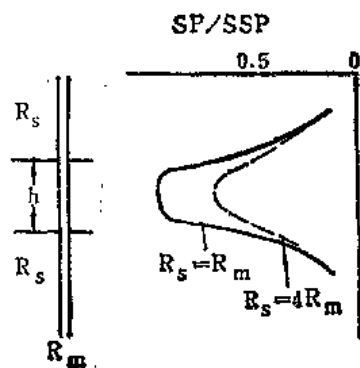


图1-7 冲洗带对自然电位曲线的影响

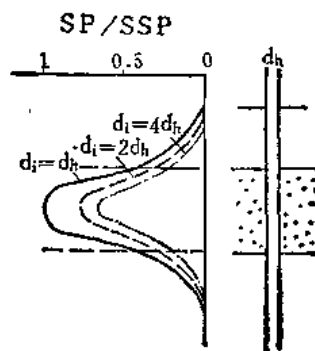


图1-8 围岩电阻率对自然电位曲线的影响

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, 已知参数为 $R_m=0.5$ 欧姆-米, 冲洗带电阻率 $R_{xo}=10$ 欧姆-米, $R_t=50$ 欧姆-米, $R_s=0.5$ 欧姆-米, $d_h=0.2$ 米, $d_i=1.0$ 米, $h=2$ 米, $SP=-70$ 毫伏。计算得各参数之比值为 $R_{xo}/R_m=20$, $R_{xo}/R_t=0.2$, $R_s/R_m=1$, $d_i/d_h=5$, $h/d_h=10$, 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 $SSP=-70/0.35=-200$ 毫伏。

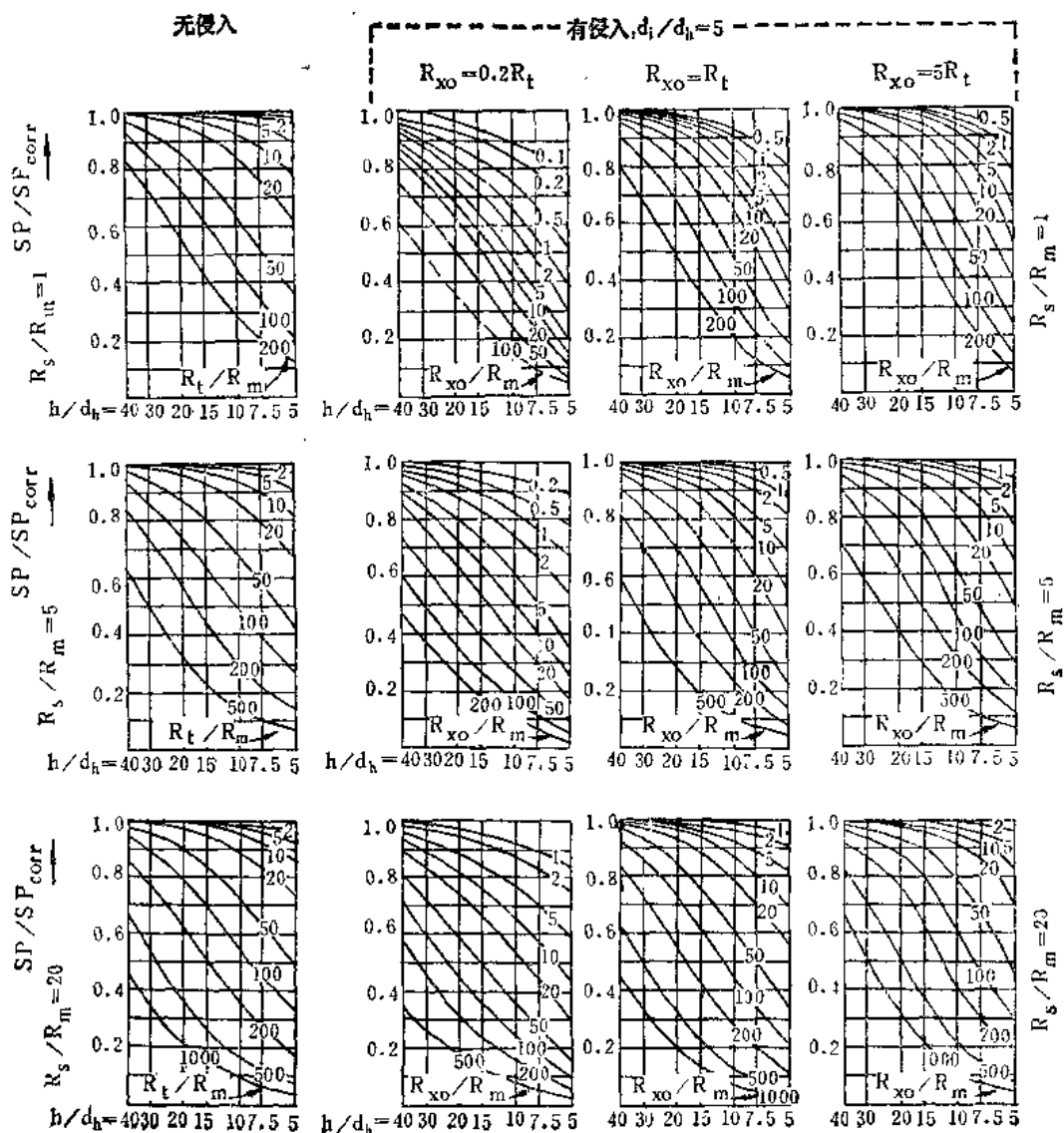


图1-9 SP校正图版

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($R_{mf} > R_w$).

时)。当地层较厚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右看出,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,曲线开始变陡。它说明在高电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。

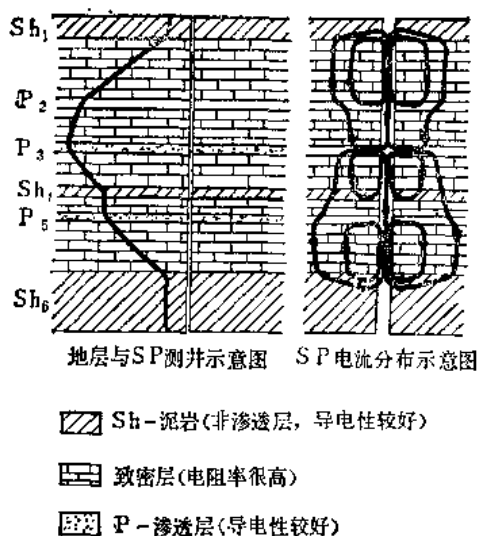


图1-10 高电阻地层中自然电位曲线形状示意图

§ 3 自然电位曲线的解释

知道了自然电位产生的原因及其变化规律后,就要应用测得的自然电位曲线去解决有关的地质问题,这个过程叫做自然电位曲线的解释。

自然电位主要是电化作用产生的,所以我们只考虑电化作用电动势,并且着重讨论砂泥岩剖面中自然电位曲线的解释。

从式(1-4)知在井中电化作用产生的 E 与地层水和泥浆滤液活度之比的对数成正比,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。因此可见,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

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,正对砂岩的泥浆中多余负电荷,在正对泥岩的泥浆中多余正电荷,于是在测得的自然电位曲线中泥岩为基

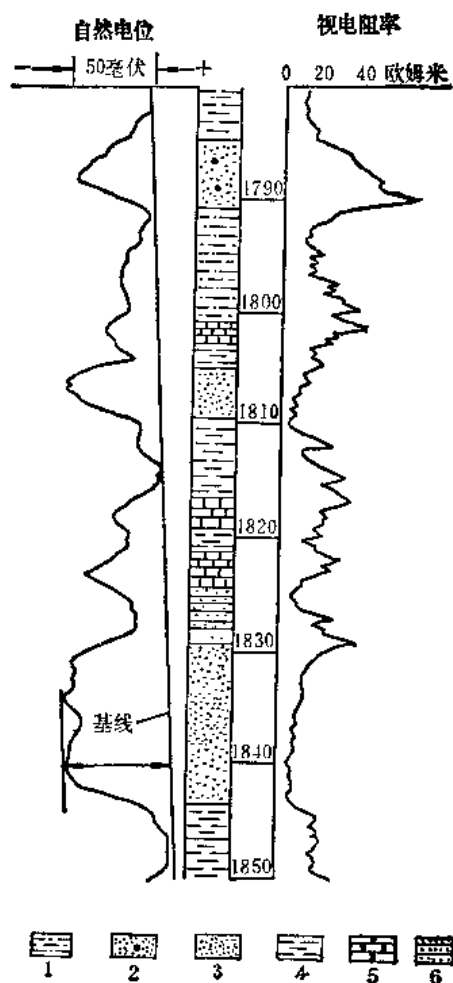


图1-11 砂泥质地层的自然电位曲线实例

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

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（参加扩散的离子数）较含水砂岩少；石油对负离子有吸附作用；含油、气砂岩地层电阻率较含水砂岩大。

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处的电化学生动势与渗透性砂岩一样是扩散电势，在地层水活度大于泥浆活度的条件下，正对孔隙性、裂缝性碳酸盐岩的泥浆中带负电。致密的碳酸盐岩尽管岩粒很细，但是阳离子交换能力很差，阳离子交换作用可以忽略，加以孔隙度极小，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将很少有多

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，异常幅度减小。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也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

余的正（或负）电荷，与其旁的泥岩比较仍是负异常，但异常幅度较小。

碳酸盐岩中的粘土含量对自然电位有很大的影响。在粘土处形成的薄膜电位将使泥浆中带正电荷，从而使该处电位增高。粘土含量越高，该处的自然电位越高，不难看出在碳酸盐岩剖面中自然电位的异常主要是粘土含量的反映，见图 1-12 中。

膏盐地层（石膏，硬石膏，岩盐，钾盐，芒硝等）因地层非常致密不产生电化学电势，这些地层处的自然电位与围岩相同。

必须指出，以上所述各地层在自然电位曲线上的反映都是在地层水活度大于泥浆滤液的假设条件下得出的，如果泥浆的活度大于地层水活度，则电化学电动势的极性及自然电位曲线异常都要改变符号。在淡水地层、水淹层中就可能遇到这种情况，见图 1-13。

在某些岩盐发育地区泥浆中含盐量很高，剖面中各地层的地层水活度与泥浆的活度相同，不发生扩散作用，这时测得的自然电位曲线为一条直线（见图 10-7）。

二、求地层水电阻率

假若自然电位只是电化学作用产生的，且求地层水电阻率的地层为含水纯砂岩。根据前面的讨论在砂岩处的静自然电位是

$$SSP = -K \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (1-4')$$

对浓度不太高的纯 NaCl 溶液，其电阻率与活度成反比（见图 1-14 左部），当溶液的浓度较高就不再保持准确的反比关系了（见图 1-14 右部）。于是引用“等效电阻率”的概念（地层水的等效电阻率 R_{we} 和泥浆滤液的等效电阻率 R_{mf} ）。从图看出溶液的等效电阻率与活度成反比（在 25℃ 时 $R_{we} = 0.075/a_w$ ），从而可将（1-4'）式写为

$$SSP = -K \lg \frac{R_{mf}}{R_{we}} \quad (1-7)$$

图 1-15 是（1-7）式的图解。

用自然电位求地层水电阻率就是以（1-7）式为依据的，大体过程是：根据 SP 求

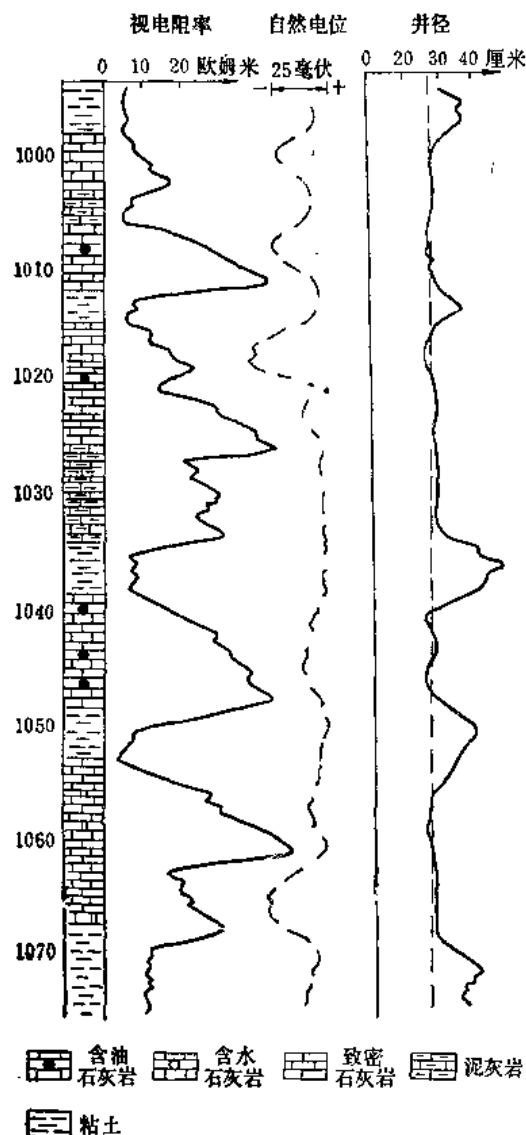


图 1-12 用自然电位曲线划分碳酸盐地层中的含粘土质地层实例

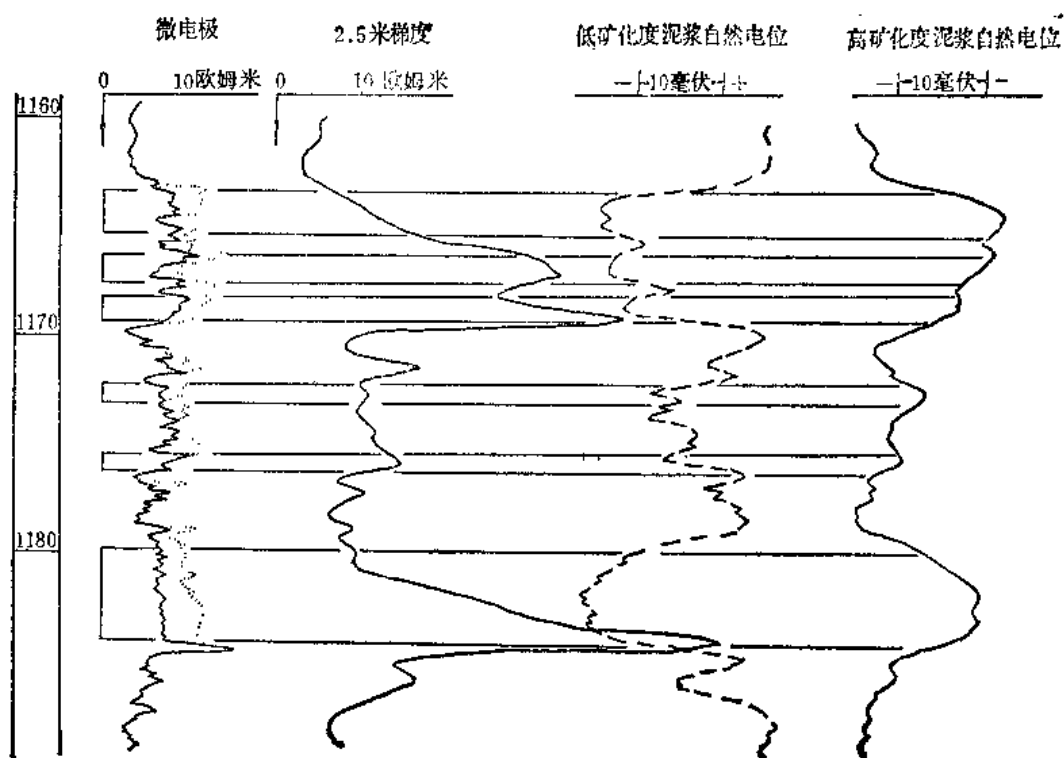
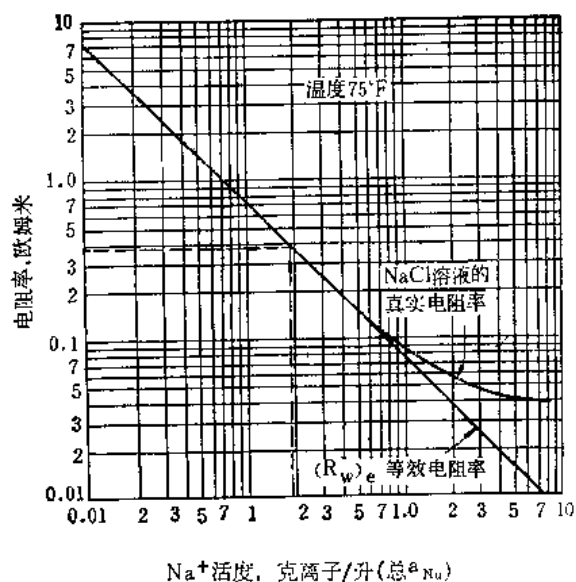


图1-13 高低矿化度泥浆的自然电位曲线实例

图1-14 NaCl溶液电阻率与Na⁺离子的活度关系曲线

出SSP, 根据温度求出K, 根据 R_{mf} 求出 R_{mfc} 后算出 R_{we} , 然后再根据 R_{we} 求出 R_w , 具体求法如下:

1. 求SSP