绪　　论

一、测井学和测井技术的发展

测井学是一个边缘小科学，是应用地球物理的一个分支，它是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、工程及水文地质等许多方面得到应用。30年代首先开始电阻率测井，到50年代普通电阻率发展的比较完善，当时利用一套长短不同的电极距进行横向测井，用以较准确地确定地层电阻率。60年代聚焦测井理论得以完善，孔隙度形成了系列测井，各类聚焦电阻率测井仪器也得到了发展，精度也相应得以提高。测井资料的应用也有了长足的发展，随着计算机的应用，车载计算机和数字测井仪也被广泛的应用。到现在又发展了各种成像测井技术。

二、测井技术在勘探及开发中的应用

无论是金属矿床、非金属矿床、石油、天然气、煤等，在勘探过程中在地壳中只要富集，就具有一定特点的物理性质，那我们就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，确定出那段地层能出油，打开地层就可以开采。由于用测井资料可以解决岩性，即什么矿物组成的岩石，它的孔隙度如何，渗透率怎么样，含油气饱和度大小。沉积时是处于什么环境，是深水、浅水、还是急流河相，有无有机碳，有没有生油条件，能不能富集。在勘探过程中，可以解决生油岩，盖层问题，也可以对储层给予评价，找到目的层，解释出油、气、水。

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，用流体密度，持水率都可以说明。注水开发过程中，分层的注入量，有没有窜流，用注入剖面测井都可以解决。生产过程中，套管是否变形，有没有损坏、脱落或变位，管外有无窜槽，射孔有没有射开，都需要测井来解决。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。

三、储层分类及需要确定的参数

1. 储集层的分类及特点

石油、天然气和有用的流体都是储存在储集层中，测井解释的大量工作是解决储层的性质，在地层中能作为储层的岩石种类很多，习惯上储层的分类方法以岩性或储集空间结构来分类。什么是储集层呢？具有储集空间，储集空间又相互连通的岩层。不连通的空隙称为死孔隙。

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。

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。控制岩石储集性质是以粒径大小、分选好坏、磨圆度以及胶结物的成分，含量和胶结形式有关。一般粒径大，分选和磨圆度好，胶结

需要全本请访问 www.ertongbook.com

物少，则孔隙空间大，连通性好，为储集性质好。

2）碳酸盐岩储集层

世界上油气 50%的储量和 60%的产量属于这一类储集层。我国华北震旦、寒武及奥陶系的产油层，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，鲕状或钟孔状孔隙，生物腔体孔隙、裂缝、溶洞等。从储层评价和测井解释的观点出发，将碳酸盐岩储集层的储集空间归为二类：一类为原生孔隙，如晶间、粒间、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、裂缝型和溶洞型等。

（1）孔隙型碳酸盐岩储集层。它是粒间、晶间、生物腔体孔隙等，还有石灰岩白云岩化后重结晶形成的均匀分布的孔隙。它们都是孔隙性的碳酸盐岩储集层。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，故孔隙度和渗透率也可能有很大变化，油气分布也不规律，裂缝发育带渗透率高。

（3）洞穴型碳酸盐岩储集层。这类储集层主要由溶蚀作用产生的。洞穴形状大小不一，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

除碎屑和碳酸盐岩以外的岩石所形成的储集层，如岩浆岩，变质岩、泥岩等。这些岩石的裂缝、溶洞、破碎带、风化壳都可能形成储层。

2.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层厚度、孔隙度、油气饱和度和渗透率。

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。有效孔隙指互相联通的孔隙。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，孔隙度又分原生孔隙度，次生孔隙度。

2）饱和度

孔隙中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_{wirr}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）岩层厚度

主要指储集层的岩层厚度，指的是有效孔隙，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 1×10^{-3} Pa·s 的流体，在单位时间 1s 钟内，两端压差 1atm❶ 时，通过岩石单位截面 $1cm^2$ 的流体

❶ 1atm=101325Pa=101.325kPa。

体积为该岩石的渗透率为 $1\mu m^2$。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。有效渗透率为岩石孔隙存在二种或二种以上的流体时，对其中某一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。

四、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问题，层厚、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。

1. 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的进行泥质解释。最常用的是自然伽马、自然电位和微电极。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的划分钻井剖面的岩性，能够准确的确定孔隙度，能够确定地层的含水饱和度，或油气饱和度。如碳酸盐岩地层，三种孔隙度测井确定孔隙度，微球形聚焦确定冲洗带电阻率，双侧向确定深浅电阻率，井径和自然伽马确定泥质含量。再如湖泊相河流相的沉积地层，至少有一种孔隙度，微电极，深浅三侧向，加井径和自然电位，有时加自然伽马。

2. 电阻率测井方法的选择

由于钻井后测井是在井眼中进行，井眼的大小。钻井液性能的差别，使得渗透层受不同程度的污染，存在冲洗带、侵入带和原状地层的电阻率上的差异。电阻率测井应能反应冲洗带、浅、中、深的电阻率数值上的变化。岩层的电阻率高低，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一八侧向、微球形聚焦。对高电阻率地层一般选用，双侧向一邻近侧向、微侧向电阻率系列。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的解决地质问题。

3. 孔隙度测井方法的选择

孔隙度测井一般探测深度较浅，对于储集层一般仅限于冲洗带。声速测井方法适用于粒间和晶间孔隙，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。

4. 裸眼井测井系列的选择

表 1 中给出一般情况。

表 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、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}	微球形聚集测井（MSFL）或微侧向测井（MLL）或微电极测井
	ϕ—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、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
	ϕ—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
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
	ϕ—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、井斜测量
空井	岩性	自然伽马，伽马能谱，岩性—密度测井
	S_w—R_w	感应测井
	ϕ—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

第一章　　自然电位测井

在生产实践中发现，在没有人工供电的情况下，测量电极 M 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：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；地层压力与钻井液柱压力不同时，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钻井液的物理化学性质。

实践证明：油井的自然电位主要由扩散作用产生的，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 C_1 和 C_2 的氯化钠溶液。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，这种现象叫做扩散。对于氯化钠溶液来说，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则是氯离子 Cl^- 相对增多，形成负电荷的富集。就在两种不同浓度 NaCl 溶液的接触面上，产生了自然电场，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。

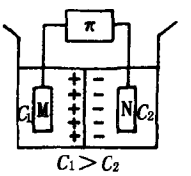


图 1－1　不同浓度盐水接触面上的扩散作用

C_1，C_2—NaCl 溶液浓度；π—测量仪器

扩散电动势 E_d 可用下式表示：

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

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。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，在温度为 25℃时，$K_d = -11.6$mV，代入式(1－1)，得：

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

需要全本请访问 www.ertongbook.com

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：

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

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，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。假定钻井液溶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钻井液溶液的浓度，这样扩散作用的结果，地层水内富集正电荷，钻井液溶液内富集负电荷，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用式（1－4）近似表示：

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

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。

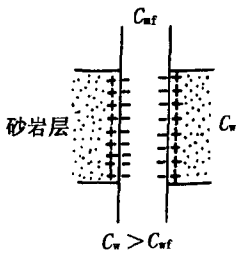


图 1－2 砂岩与钻井液接触面上的电荷分布

图 1－2 表示出，在钻井液与砂岩层的接触面上的电荷的分布，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壁上产生的扩散电动势，是泥岩内地层水与井壁钻井液滤液相接触的产物。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有选择吸附负离子的能力，因此当浓度不同的 NaCl 溶液扩散时，粘土矿物颗粒表面吸附 Cl^- 离子，使其扩散受到牵制，只有钠离子 Na^+ 可以在地层水中自由移动。因此在泥岩的井壁上主要是钠离子的扩散作用。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} 可由下式表示：

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

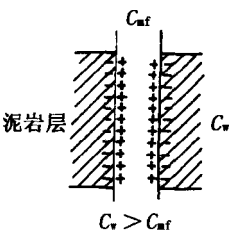


图 1－3 泥岩与钻井液接触面上的电荷分布

式中 C_w——砂岩地层水含盐浓度；

C_{wf}——钻井液滤液含盐浓度；

K_{da}——扩散吸附电位系数，它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，$K_{da} = 59.1\text{mV}$，代入上式，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，如图 1－4 所示。

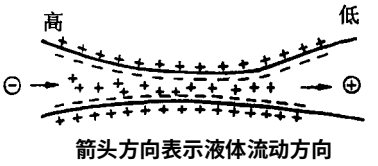


图 1－4　过滤电位形成示意图

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，这样在井壁附近聚集大量负离子，在地层内部富集大量正离子，其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，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。可由下式表示：

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

式中　Δp——压力差，atm；

R_{mf}——过滤溶液电阻率，Ω·m；

μ——过滤溶液粘度，10^{-3}Pa·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钻井液柱压力很悬殊时，而且在泥饼未形成以前，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。

一、井内自然电场的分布

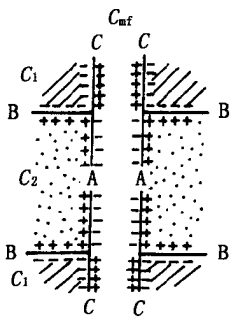


图 1－5　砂泥岩交界面处自然电场的分布

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}，设 $C_1 \geqslant C_2 > C_{mf}$，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，由于扩散作用产生扩散电动势 E_d 为：

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

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}：

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

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}：

$$E_{da} = K_{da}\lg\frac{C_1}{C_2} \tag{1-9}$$

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。

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

式中　$K = (K_d + K_{da})$ —— 自然电位系数。

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℃ 时，$K = 59.1 + 11.6 = 70.7$，代入式(1-10)，

$$E_s = 70.7\lg\frac{C_2}{C_{mf}} \tag{1-11}$$

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：

$$E_s = 70.7\lg\frac{R_{mf}}{R_2} \tag{1-12}$$

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

井轴上各点自然电位的数值 U_M 可以计算出来，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，定性的对自然电位曲线形状进行分析。

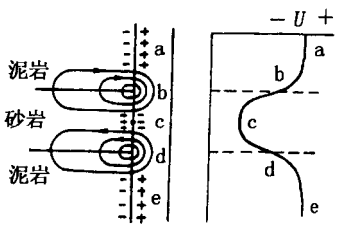


图 1-6　井内自然电场的分布和自然电位曲线形状

在砂岩井壁，泥岩井壁以及砂泥岩接触面上，存在着自然电动势。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（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，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面处 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 c 点，电流强度最小，自然电位曲线几乎是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 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，后者定为砂岩线。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。当地层水矿化度小于钻井液滤液的矿化度时，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时，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：

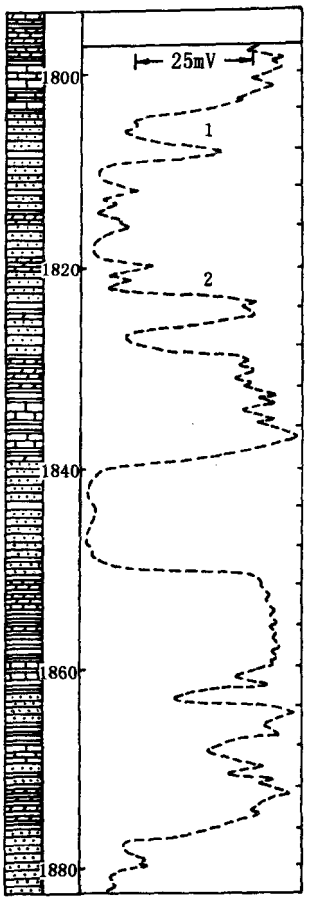


图 1－7　砂泥岩剖面 SP 测井曲线

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

(2) 渗透性在地层顶底界面处，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，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、泥岩、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_r 为砂岩的等效电阻，回路的电流强度由下式决定：

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

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：

$$U_{SP} = Ir_m = \frac{E_s}{r_m + r_{sh} + r_t} \cdot r_m = \frac{E_s}{1 + \frac{r_{sh} + r_t}{r_m}} \tag{1-14}$$

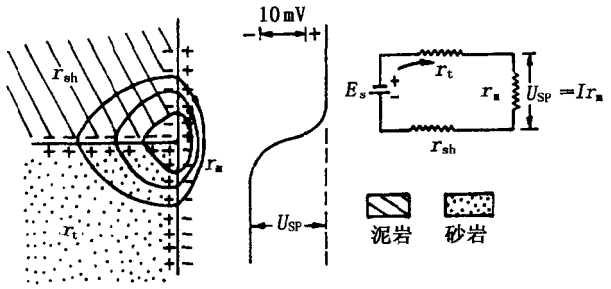


图 1-8　自然电流的等效电路

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。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）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 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_t 增大，井内钻井液电阻 r_m 减小，所以 U_{SP} 减小。若地层厚度一定时，井径减小，h/d 增大，井内钻井液电阻 r_m 增大，则 U_{SP} 增大。

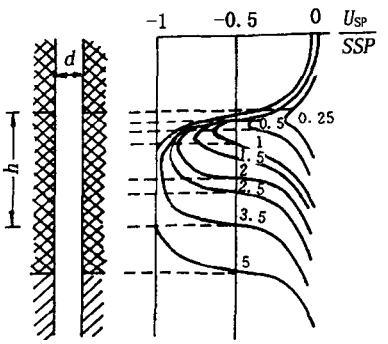


图 1-9　不同地层厚度的自然电位曲线号码 h/d

（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_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），r_t 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。

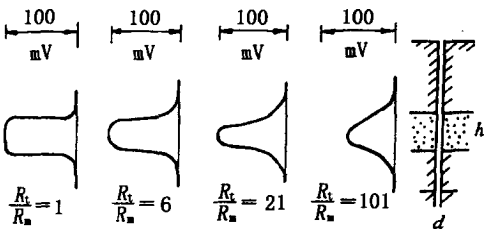


图 1－10　不同 $\frac{R_t}{R_m}$ 值的自然电位曲线

(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个距离。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，随着钻井液侵入的增大，自然电位异常幅度值减小。

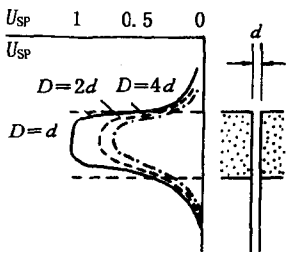


图 1－11　钻井液侵入带对自然电位曲线的影响

U_{SP}—有钻井液侵入测出的异常幅度值；U_{SP}—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间，高电阻率地层对自然电流分布影响很大。如图 1－12 所示，由泥岩流向渗透性地层的自然电流，大部分被限制在对应于高电阻率地层的井眼中，使其自然电流强度保持不变，则自然电流在井眼内的电位降为常数，自然电位曲线是一条倾斜的直线。在这类地层中，自然电流只能从渗透层或泥岩层进入或离开井眼，使自然电位曲线上有不同斜率的直线段，直线段斜率变化处相应为渗透层和泥岩层段。在这样的高电阻率岩层的剖面中，难以从曲线上确定渗透层的界面。

三、自然电位校正图版

由上面讨论，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。图板左部适用于无侵入或侵入不明显的地层，图板右部适用于有侵入，且侵入带直径与井径的比值 $D/d=5$ 左右的地层，图板的纵坐标是校正系数 U_{SP}/E_s（或 U_{SP}/SSP），横坐标是地层厚度与井径的比值 h/d，其他参数如图版所示。

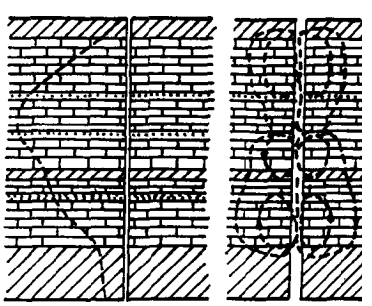


图 1－12　高电阻率地层中 SP 曲线形状示意图

自然电位的校正方法如下：

(1) 选择最符合实际 R_s/R_m 值的横排图版；

(2) 选择无侵入或者比较符合 R_{xo}/R_t（R_{xo} 为冲洗带电阻）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_t/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 SP/SSP。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

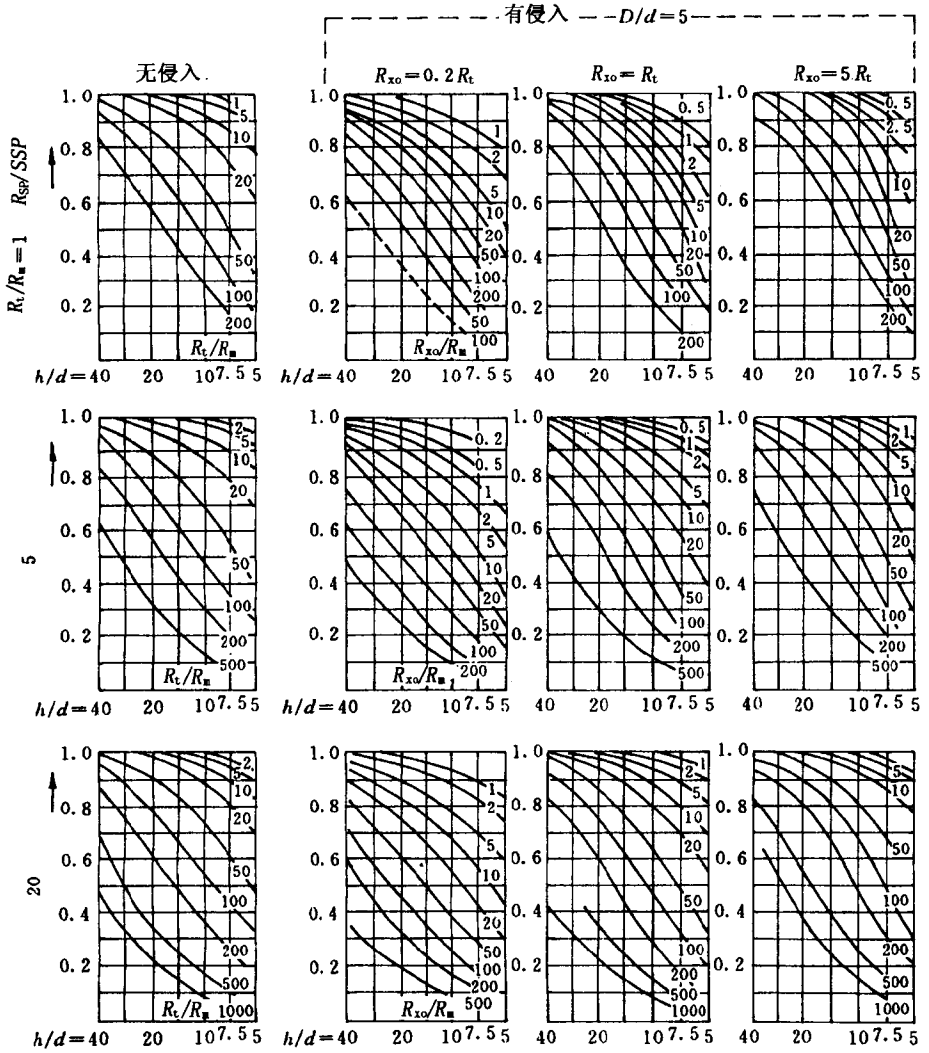


图 1－13　自然电位校正图版

第四节　　自然电位曲线的应用

目前自然电位测井主要有以下几个方面的应用。

一、判断岩性，确定渗透性地层

自然电位主要是离子在岩石中的扩散吸附作用产生的，而岩石的扩散吸附作用与岩石的成分、组织结构、胶结物成分及含量有密切关系。所以可根据自然电位曲线的变化判断岩性和分析岩性的变化。在砂泥岩剖面中，以泥岩的自然电位为基线，如果砂岩地层的岩性由粗变细，泥质含量增加，表现为自然电位幅度值降低。根据自然电位曲线可以清楚的划出泥岩、砂岩、泥质砂岩。自然电位曲线异常幅度的大小，可以反映渗透性好坏。通常砂岩的渗透性与泥质含量有关，泥质含量越小，其渗透性越好，自然电位曲线异常幅度值越大。图 1

－14为砂泥岩地层的自然电位曲线的实例。

对于碳酸盐岩地层，其渗透层多为次生孔隙性裂缝带，它出现在致密的碳酸盐岩地层中，上下没有泥岩隔层。碳酸盐岩中的钙质成分对正离子有选择吸附性。因此，碳酸盐岩剖面的渗透层与砂泥岩剖面有完全不同的电性特征，自然电位曲线在致密碳酸盐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把碳酸盐岩剖面中的渗透层划分出来。如图 1－15 所示。

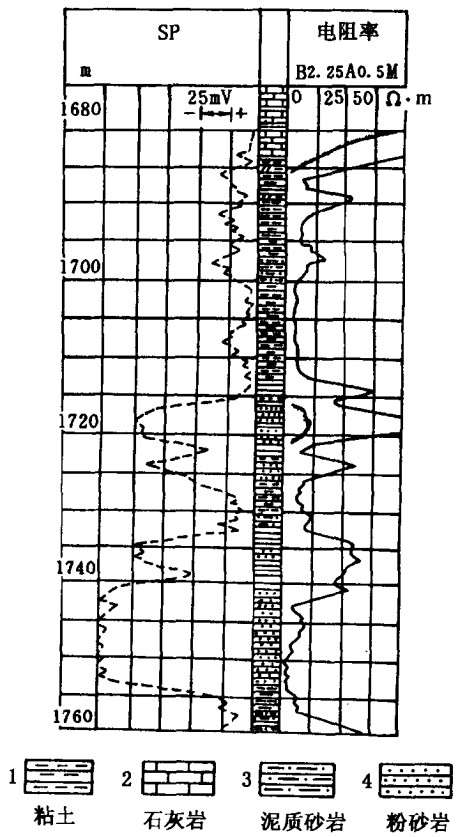


图 1－14 砂泥岩自然电位测井曲线实例

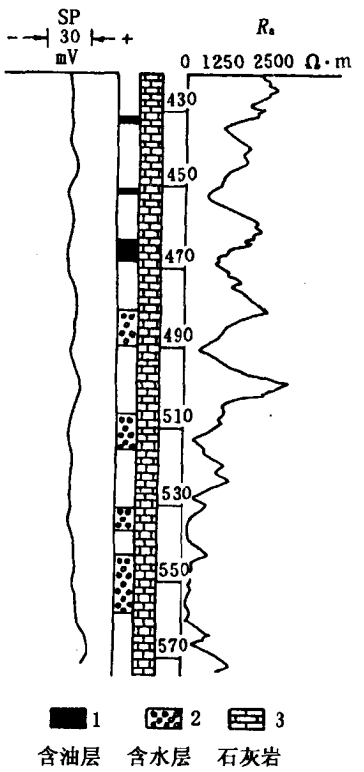


图 1－15 自然电位曲线在碳酸盐岩剖面上的显示

碳酸盐岩地层中的泥质成分对自然电位有很大影响，在其他条件相同时，随着泥质含量的增加，自然电位异常幅度值减小。泥质含量大的碳酸盐岩地层，其自然电位可能与粘土层差不多。因此，对碳酸盐岩地层而言，自然电位的异常幅度主要反映地层中的泥质含量，图 1－16是用自然电位曲线划分碳酸盐岩剖面中含泥质地层的实例。

对于膏盐剖面，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。这些地层处的自然电位曲线与围岩相同。

二、计算地层水电阻率

利用自然电位曲线确定地层水电阻率时，假定自然电位只是由扩散吸附作用产生的。根据已知的岩层电阻率、地层厚度、钻井液电阻率、围岩电阻率和侵入带等数据，把自然电位异常幅度 U_{SP}，校正到自然电流回路的总电动势 E_S （即静自然电位），然后利用关系式 （1

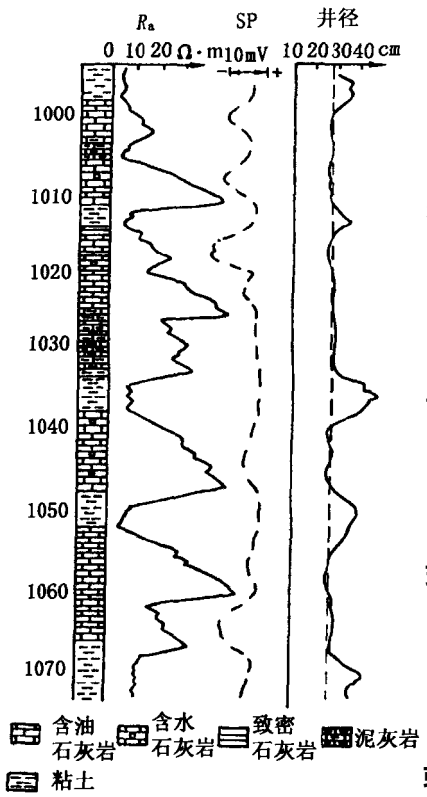


图 1－16　用自然电位曲线划分碳酸盐岩剖面中含泥质地层的实例

－10）和已知的钻井液滤液电阻率 R_{mf}和自然电位系数 K，便可求出地层水电阻率。

对于含水纯砂岩，确定地层水电阻率的方法如下：

（1）从自然电位曲线读出幅度值 U_{SP}，然后利用图 1－13，根据已知的地层厚度 h，井径 d、地层电阻率 R_t 和钻井液电阻率 R_m，求出校正系数 v。则静自然电位为：

$$SSP = \frac{U_{SP}}{v}$$

（2）根据地层温度和已知的自然电位系数 $K^{18°}$，按下式计算出相应地层温度的自然电位系数。

$$K_t = \frac{273 + t}{273 + 18} K_{18°} \qquad (1-15)$$

式中　$K_{18°}$——是 18℃时自然电位系数；

K_t——地层温度为 t°时自然电位系数。

当地层水溶解的主要盐类为 NaCl时，$K_{18°} = 69.6$。

（3）根据已知的 K_t，可以按公式 $SSP = \frac{R_{mf}}{R_w}$，计算或利用图板 1－17，求出比值 R_{mf}/R_w。

图板的横坐标为静自然电位，纵坐标为 R_{mf}/R_w，曲线模数为地层温度。根据已知的静自然电位，在横坐标上找出对应的点，由该点引垂线向上，与相应温度的曲线相交，由交点引平行横坐标的直线，与纵坐标交点的读数即为 R_{mf}/R_w 的比值 X。

（4）根据经验关系 $R_{mf} = 0.75R_m$，求出 R_{mf}，则：

$$R_w = \frac{R_{mf}}{X}$$

需要注意，只有对浓度不太高的 NaCl 溶液电阻率才和浓度成反比，在这个条件下，式（1－2）才可写成式（1－3）。在浓度较高或含有其他盐类时，浓度和电阻率之间就不能保持线性的反比关系。于是引用“等效电阻率”R_{we}（地层水等效电阻率）和 R_{mfe}（钻井液滤液等效电阻率）的比值。

如果算出的 R_{mf}大于 $0.1\Omega\cdot m$，根据经验可以取 $R_{mfe} = 0.85R_{mf}$，如果小于

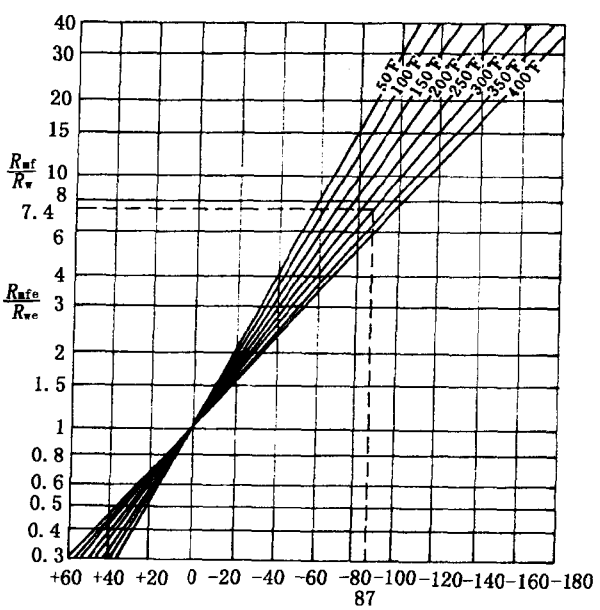


图 1－17　根据 SSP求 R_{mf}/R_w 的图板（纯地层）

0.1Ω·m，可以利用图 1－18 实线部分，由 R_{mf} 找出 R_{mfe}。根据 R_{mfe} 按下式求 R_{we}：

$$R_{we} = \frac{R_{mf}}{X}$$

最后可利用图 1－18 由 R_{we} 求出 R_w。

如果地层水和钻井液中的盐类成分与 NaCl 差别很大，首先应换算为等效的 NaCl 盐类的矿化度，然后再按上述方法求地层水电阻率。

我国大港油田采用了由自然电位求地层水电阻率的方法，效果比声波感应组合法求得的要好，其结果与水样分析相比，绝大部分误差小于 20%。

例如大港油田某井深 2395m，求含水砂岩层的地层水电阻率，见图 1－19。

(1) 地层温度 t（℃）根据该地区温度梯度公式计算：

$$t = 14 + 0.034 \times H = 14 + 0.034 \times 2395 = 75.43℃$$

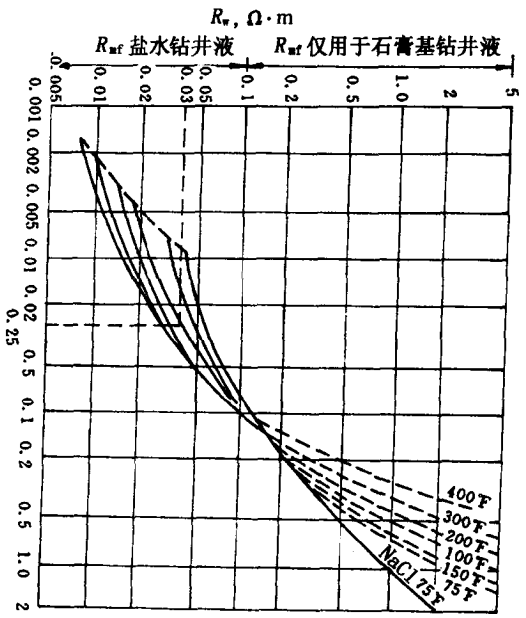


图 1－18 R_w 与 R_{we} 的关系曲线（曲线模数为地层温度）

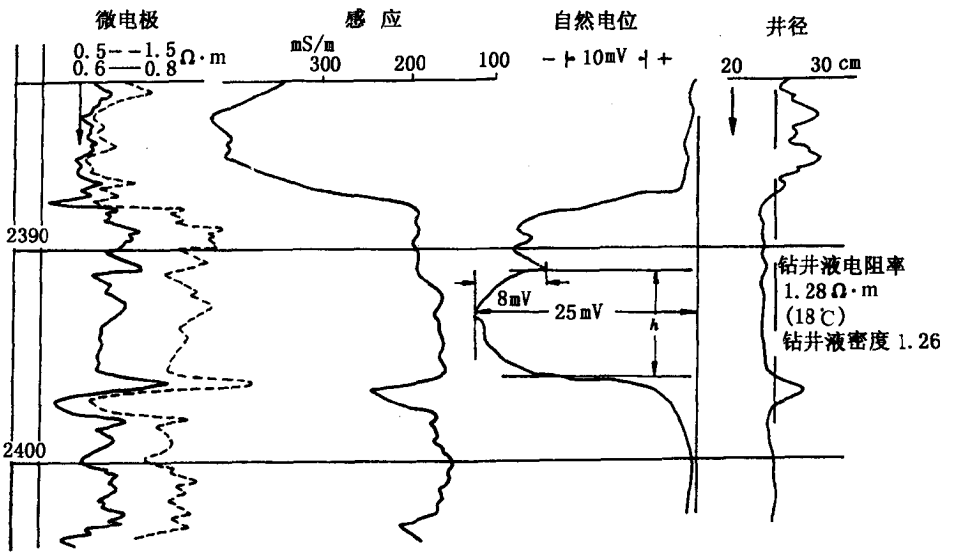


图 1－19 用自然电位求地层水电阻率的实例

(2) 地层温度下的钻井液电阻率由下式计算❶：

$$R_m = \frac{R_m^{18}}{[1 + 0.021 \times (t - 8)]} = \frac{1.28}{[1 + 0.021 \times (95.43 - 18)]}$$
$$= 0.49Ω \cdot m$$

❶ 计算地层温度下的钻井液电阻率公式见第二章第一节。

(3)计算静自然电位 SSP。

由测井曲线上读得 $U_{SP}=-25\text{mV}$。根据微电极和自然电位半幅点确定该层的厚度是 $h=5.0\text{m}$，井径 $d=0.235\text{m}$，$h/d=21.7$，感应测井求得电阻率 $R_t=6.0\Omega\cdot\text{m}$，$R_t/R_m=12.2$，围岩电阻率 $R_s=2.4\Omega\cdot\text{m}$，$R_s/R_m=5$，应用图 1-14 无侵人 $R_s/R_m=5$ 的自然电位校正图版，求得 $U_{SP}/SSP=0.975$，静自然电位 $SSP=U_{SP}/0.975=-25.0/0.975=25.6\text{mV}$。

(4)查图板 1-18 得：

$$\frac{R_{mfe}}{R_{we}}=1.95$$

钻井液滤液电阻率：

$$R_{mf}=0.75R_m=0.75\times0.49=0.37\Omega\cdot\text{m}$$

钻井液滤液等效电阻率：

$$R_{mfe}=0.85R_{mf}=0.85\times0.37=0.31\Omega\cdot\text{m}$$

(5) 地层水等效电阻率：

$$R_{we}=\frac{R_{mfe}}{1.95}=\frac{0.31}{1.95}=0.159\Omega\cdot\text{m}$$

(6)用图版 1-19 求得地层水电阻率：

$$R_w=0.19\Omega\cdot\text{m}$$

该层试水分析结果，地层总矿化度 14460mg/l，主要离子成分为：

$K^+ + Na^+$ 4939mg/l；Mg^{2+} 21mg/l；Ca^{2+} 60mg/l；Cl^- 5477mg/l；SO_4^{2-} 12mg/l；HCO_3^- 3951mg/l。

换成等效的 NaCl 溶液的矿化度为 11588mg/l，地层水电阻率为 $0.186\Omega\cdot\text{m}$。

为了避免在多次使用图板中的人为误差，可以利用更换钻井液的办法求地层水电阻率。譬如第一次使用的钻井液电阻率为 R_{m1}（钻井液渡液电阻率为 R_{mf1}），第二次使用的钻井液电阻率为 R_{m2}（钻井液渡液电阻率为 R_{mf2}），则两次不同钻井液测得的自然电位分别为：

$$U_{SP1}=K_t\lg\frac{R_{mf1}}{R_w} \tag{1-16}$$

$$U_{SP2}=K_t\lg\frac{R_{mf2}}{R_w} \tag{1-17}$$

将两式相除：

$$\frac{U_{SP1}}{U_{SP2}}=\frac{\lg\frac{R_{mf1}}{R_w}}{\lg\frac{R_{mf2}}{R_w}}=\frac{\lg R_{mf1}-\lg R_w}{\lg R_{mf2}-\lg R_w} \tag{1-18}$$

解出 R_w 得：

$$\lg R_w=\frac{U_{SP2}\lg R_{mf1}-U_{SP1}\lg R_{mf2}}{U_{SP2}-U_{SP1}} \tag{1-19}$$

利用作图法求解上式中的 R_w，比直接计算方便得多，在图 1-20 的半对数坐标纸上，纵轴为普通坐标的自然电位 U_{SP}，横轴为对数坐标的 R_{mf}。根据 U_{RP1}，U_{RP2}，R_{mf1}，R_{mf2}，在图上可以找到两个点 P_1，P_2，连接两点的直线 $\overline{P_1P_2}$ 在横轴上截取的数值 OA，即为所求地层水电阻率 R_w。

此法计算比较简单，并且消除了许多因素的影响，但施工麻烦，成本较高，因此在生产

中往往采用相邻两口井同一地层的自然电位曲线幅度值，近似求出地层水电阻率 R_w 的值。其准确程度，取决于选择邻井同一地层的岩性，含油性和地层水电阻率等的变化情况，若各井这些参数差别不大，其精确度较高，否则，难以估计它们的影响。

三、估计地层的泥质含量

利用自然电位测井，确定地层的泥质含量，是建立在大量实验研究的基础上。在一个地区，根据具体条件，可以利用实验和数理统计方法，直接建立起自然电位和泥质含量之间的关系，或者建立起含泥质地层与纯砂岩层的自然电位比值同泥质含量之间的关系。找出这种关系式或关系曲线，就可直接根据自然电位曲线确定地层的泥质含量。

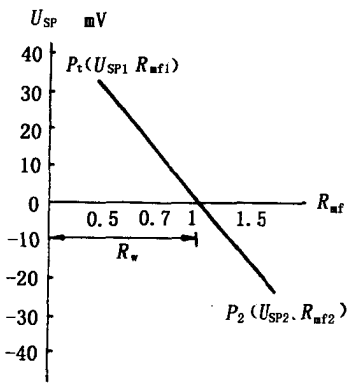


图 1－20 求地层水电阻率的图解法

四、判断水淹层位

为了提高油田采收率，现在大都采取早期分片切割注水采油的方法。由于油层渗透性不同，注入水推进的速度也不一样。如果一口井的某个油层见了水，这个层就叫水淹层。判断水淹层位，是油田开发和测井解释中的一个重大课题。大庆油田、胜利油田等单位利用自然电位曲线判断水淹层位已取得了一定成果。水淹层在自然电位曲线上显示的特点较多，要根据每个地区的实际情况进行分析，但部分水淹层（油层底部或顶部见水）在自然电位曲线上显示的基本特点，是自然电位曲线的基线在该层上下发生偏移，出现台阶，则是一种比较普遍的现象。如图 1－21 所示。这是由于注入水的矿化度与油田水不同造成的。该层射孔后，含水率 99％。

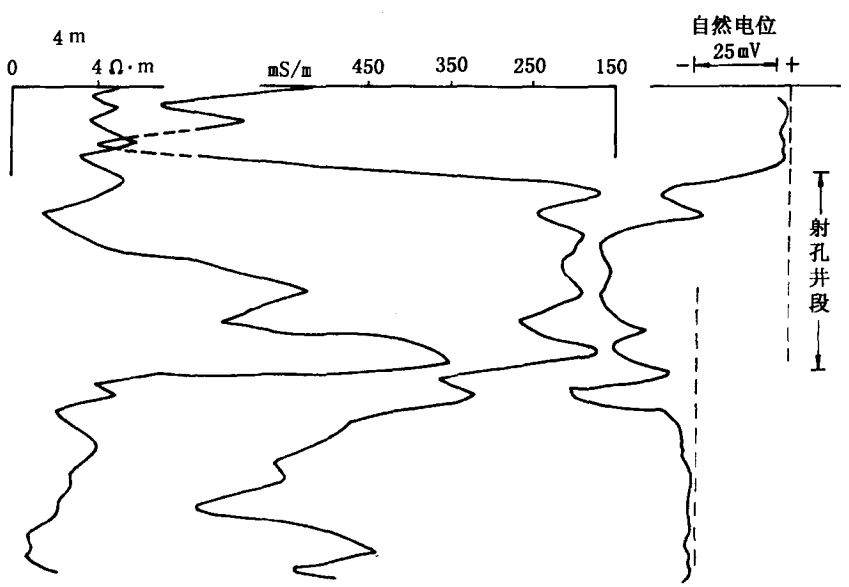


图 1－21 水淹层自然电位曲线

图 1－22 中，R_1 为泥岩地层水电阻率，R_2 为未水淹层地层水电阻率，R_3 为水淹层地

需要全本请访问 www.ertongbook.com