

高等学校教学用书

电法测井

上册

张庚骥 主编



石油工业出版社



| | |
|-----|---------|
| 登录号 | 086460 |
| 分类号 | P631.81 |
| 种次号 | 015 |

(3)

52169/06

电 法 测 井

上 册

张庚骥 主编



200399513



石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书比较全面地介绍了目前国内外正在使用的各种电测井方法,包括早在30年代就发展起来的自然电位测井和视电阻率测井,以及后来陆续出现的侧向测井、感应测井和介电测井。对于各种方法的理论基础做了尽可能详细的论述。近年来在侧向测井响应计算中得到广泛应用的有限元素法,本书也有所涉及。在感应测井一章中介绍了对Doll几何因子理论的一种改进方法。

本书为有关高等院校测井专业的教科书,亦可供测井技术人员参考。

电 法 测 井

上 册

张庚骥 主编

*

石油工业部教材编译室编辑(北京902信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

煤炭出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 11 $\frac{1}{2}$ 印张 288千字 印5,001—7,000

1984年11月北京第1版 1989年8月北京第2次印刷

ISBN 7-5021-0390-2/TE·379 (课)

定价: 2.05元

前 言

在各种测井方法中，电法测井是最早发展起来的。直到今天，它仍然不失为一种基本的测井方法。它的内容在不断地更新。目前所见的有关电法测井的参考书只有50年代Дакно^В所著的几本书（均未译成中文）以及译成中文的车列明斯基的《油矿地球物理》。这些书对电法测井理论做了详尽的论述，是这方面的重要参考文献。但是从今天的观点看来，有些内容过分陈旧繁杂。而且时隔将近30年，这些书早已绝版。因此急需一本系统阐述电法测井理论，并反映最新成就的书。本书就是为此目的而写的。

本书是在作者们多年讲授《电法测井》课程的基础上写出来的。讲授的对象是学过普通物理和电磁场论的大学高年级学生。由于电子计算机的发展，电法测井中所涉及的计算方法越来越复杂，有些内容超出了本课程教学大纲的范围。为了既能反映这方面的最新进展，又不使学生感到内容过分繁杂，我们人为地把这本书分成两册。上册作为测井专业必修课的教科书，内容包括各种方法的基本理论。近年来在侧向测井响应的计算中得到广泛应用的有限元素法，在这一册中也略有涉及。下册则包括近年来发展起来的各种计算方法，如有限元素法，积分方程法，逐次逼近法等。它可以作为选修课或研究生课程的参考书。

书中单位，除个别情况外，一律采用目前国际上通用的国际单位制（简称SI制），并且采用惯用的拉丁字母或希腊字母代表符号。这些符号中的大部分读者是熟悉的。它们的中文名称在附录中给出。

本书第一章和第二章由丁次乾执笔，第三章由李忠荣执笔，第四章和第五章由张庚骥执笔。全书由张庚骥作了统一的修改。

本书承江汉石油学院的朱德怀副教授主审，并提出宝贵意见。最后两章的图是华东石油学院测79级的焦翠华同学编制程序绘制的。在此一并致谢。

由于作者水平所限，缺点和错误是难以避免的。欢迎读者批评、指正。

编 者

1983年7月22日

目 录

| | |
|--------------------------------------|----------------|
| 第一章 自然电位测井 | 1 |
| 第一节 井内岩石的自然极化特点——自然电场产生的原因 | 1 |
| 第二节 影响自然电位的因素 | 9 |
| 第三节 自然电位曲线及其应用 | 10 |
| 第二章 普通电阻率法测井 | 19 |
| 第一节 普通电阻率测井的基本概念 | 19 |
| 第二节 普通电阻率测井的基本理论 | 24 |
| 第三节 实测的视电阻率曲线及其应用 | 56 |
| 第四节 标准测井 | 61 |
| 第五节 横向测井 | 82 |
| 第六节 微电极测井 | 67 |
| 第七节 岩石电阻率与岩性、孔隙度和含油饱和度的关系 | 72 |
| 第三章 侧向测井 | 83 |
| 第一节 三电极侧向测井 | 83 |
| 第二节 七电极侧向测井 | 93 |
| 第三节 双侧向测井 | 101 |
| 第四节 微侧向测井 | 107 |
| 第五节 邻近侧向测井 | 110 |
| 第六节 微球形聚焦测井 | 111 |
| 第七节 电阻率测井方法组合 | 113 |
| 第八节 侧向测井视电阻率的理论计算 | 115 |
| 第四章 感应测井 | 128 |
| 第一节 感应测井的原理 | 128 |
| 第二节 视电导率和几何因子 | 131 |
| 第三节 复合线圈系 | 137 |
| 第四节 感应测井仪刻度原理 | 144 |
| 第五节 感应测井视电导率曲线 | 145 |
| 第六节 均匀介质中感应测井响应的严格解法 | 149 |
| 第七节 几何因子理论的改进 | 155 |
| 第八节 感应测井曲线的解释 | 161 |
| 第五章 电磁波传播测井 | 170 |
| 第一节 原理 | 170 |
| 第二节 仪器 | 176 |
| 第三节 EPT曲线和解释原理 | 178 |

第一章 自然电位测井

在早期的电阻率测井过程中，常发现在供电电极不供电时，仍可在井内测量到电位变化。这个电位是自然存在的，故称之为自然电位。使用图1-1所示电路，沿井提升M电极，同时地面仪器即可测出自然电位变化曲线。根据自然电位曲线研究井内地质剖面的方法叫做自然电位测井。

自然电位曲线的变化与岩性有密切关系，特别是能以明显的异常显示出渗透性地层，这对于确定砂岩储集层有重要意义。在实测曲线上，泥岩井段的自然电位曲线比较平直，解释中就以泥岩井段的曲线作为基线（相对零线）来计算渗透层井段自然电位异常幅度（mV）。异常偏向负方向，叫负异常，如图1-1中砂岩井段的异常；相反，异常偏向正方向则叫正异常。

自然电位测井方法简单，实用价值高，是划分岩性和研究储集层性质的基本方法之一。下面将分别介绍自然电场是怎样产生的、它与岩性有何关系以及在勘探工作中的应用情况。

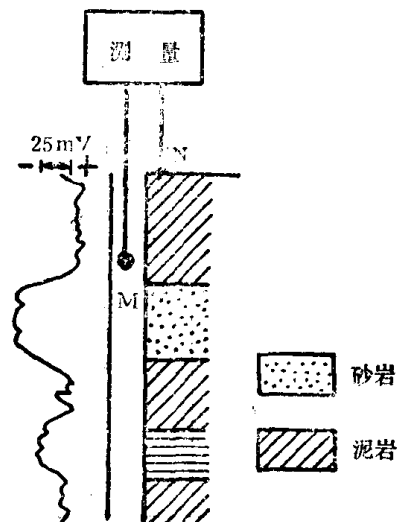


图 1-1 自然电位测井原理

第一节 井内岩石的自然极化特点 ——自然电场产生的原因

在井中由于泥浆和地层水的含盐量不同，地层压力和泥浆柱压力不同，在井壁附近产生电化学反应，结果产生自然电动势，造成自然电场。

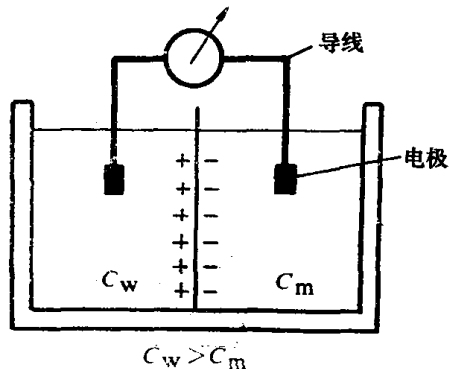


图 1-2 扩散电动势产生示意图

一、扩散电动势 (Ed) 的产生

现在来观察一个电化学反应。用一个渗透性的隔膜把玻璃缸分隔成两部分，两边分别装上浓度为 C_w 及 C_m ($C_w > C_m$) 的NaCl溶液，并且在两边分别各放入一只电极，如图1-2所示。此时表头指针偏转，这是因为两种不同浓度的NaCl溶液接触时形成一个液体-液体结，象半导体中的P-N结一样，产生一种电动势。两种不同浓度的NaCl溶液接触时，存在着一种企图使浓度平衡的自然趋势，即高浓度溶液中的离子受渗透压的作用要穿过渗透性隔膜迁移到低浓度溶液中去，这种现象叫扩散现象。在扩散过程中，各种离子的迁移率不同。从表1-1可以看出，氯离子迁移率大于钠离子迁移率。扩散结果使低浓度溶液中氯离子相对增多，形成负电荷富集，而高浓度溶液中钠离子相对增多，形成正电荷富集。这就在两种不同浓度的溶液间产生了电动势。此时氯离子受到高浓度溶液中的正电荷的吸引和低浓度溶液中的负电荷的排斥，其迁移速度减慢；相反钠离子的迁移速度加快，这就使电荷富

集速度减慢。当接触面的电动势增加到使正、负离子迁移速度相同时，电荷富集便停止了。但离子还在继续扩散，这叫动平衡。这时电动势将保持一定值，这个电动势称为扩散电动势，用 E_d 表示。

表 1-1 在无限稀释溶液中常见离子迁移率及盐溶液的 K_d 值(18°C时)

| 溶质化学成分 | 正离子 | 迁移率 l_+ $\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$ | 负离子 | 迁移率 l_- $\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$ | 溶液的扩散电动势 系数, mV |
|------------------------------------|------------------|--|-------------------------------|--|--------------------|
| NaCl | Na | 4.35 | Cl | 6.55 | -11.6 |
| KCl | K | 6.46 | Cl | 6.55 | -0.4 |
| CaCl ₂ | $\frac{1}{2}$ Ca | 5.16 | Cl | 6.55 | -19.6 |
| MgCl ₂ | $\frac{1}{2}$ Mg | 4.50 | Cl | 6.55 | -22.5 |
| CaSO ₄ | $\frac{1}{2}$ Ca | 5.16 | $\frac{1}{2}$ SO ₄ | 6.79 | -7.9 |
| MgSO ₄ | $\frac{1}{2}$ Mg | 4.50 | $\frac{1}{2}$ SO ₄ | 6.79 | -11.7 |
| CaCO ₃ | $\frac{1}{2}$ Ca | 5.16 | $\frac{1}{2}$ CO ₃ | 6.00 | -4.4 |
| Ca(HCO ₃) ₂ | $\frac{1}{2}$ Ca | 5.16 | HCO ₃ | 4.67 | -12.3 |
| H ₂ CO ₃ | H | 3.15 | HCO ₃ | 4.67 | 46.6 |
| NaOH | Na | 4.35 | OH | 17.4 | 34.7 |

扩散电动势可由Nernst方程求出。假设 C_w 和 C_m 相当小，因此分子全部电离。在两溶液接触面附近的区域内渗透压力 P 和浓度 C 沿 x 轴方向变化（见图1-3）。现在研究这一区域内面积为 S 厚度为 dx 的一块体积元。这个体积元包括有 $NCS dx$ 个溶质分子。每个分子分成 v_+ 个正离子和 v_- 个负离子。对于正离子，作用于该体积元左右两壁上的力分别为 SP_+ 和 $-S(P_+ + dP_+)$ ，因此这个体积元所受的力为 $-SdP_+$ 。作用于每个正离子的力为

$$f_+ = -\frac{S dP_+}{v_+ NCS dx} = -\frac{1}{v_+ NC} \cdot \frac{dP_+}{dx}$$

同理，作用在每个负离子上的力为

$$f_- = -\frac{S dP_-}{v_- NCS dx} = -\frac{1}{v_- NC} \cdot \frac{dP_-}{dx}$$

式中 N ——Avogadro常数。

在这个力的作用下，在 dt 时间内，通过截面 S 的正、负离子个数 n^+ 和 n^- 分别是

$$n^+ = Nv_+ u_+ SC f_+ dt = -u_+ S \frac{dP_+}{dx} dt$$

$$n^- = Nv_- u_- SC f_- dt = -u_- S \frac{dP_-}{dx} dt$$

式中 u_+ 和 u_- 分别为正、负离子迁移率。它们代表在单位力作用下，正、负离子的平均迁移速度。

当 $u_+ \neq u_-$ 时，则产生电场。该电场对离子造成附加作用。当电位梯度为 du/dx 时，具有 z_+ 和 z_- 价的正、负离子所受的力分别为 $-z_+ e \frac{du}{dx}$ 和 $+z_- e \frac{du}{dx}$ ，在这个力的作用下，在 dt 时间内，

通过 S 截面的正、负离子数分别为

$$n_E^+ = -u_+ SCv_{+,z_+} e \frac{du}{dx}$$

$$dt = -u_+ SCv_{+,z_+} F \frac{du}{ux} dt$$

$$n_E^- = u_- SCv_{-,z_-} e \frac{du}{dx} dt = u_- SCv_- F \frac{du}{dx} dt$$

式中 $F = Ne$ ——克当量离子的电量，即 Farady 常数， $F = 96500 C \cdot \text{equiv}^{-1}$ 。

当达到动平衡时，在渗透压的作用和附加电场的作用下，在 dt 时间内通过 S 截面的正、负离子所携带的电荷应当相等

$$z_+(n^+ + n_E^+) = z_-(n^- + n_E^-)$$

$$\text{即} \quad -z_+ u_+ S dt \left(\frac{dP_+}{dx} + z_+ v_+ CF \frac{du}{dx} \right) = -z_- u_- S dt \left(\frac{dP_-}{dx} - z_- v_- CF \frac{du}{dx} \right)$$

经整理得

$$\frac{du}{dx} = \frac{\left(z_- u_- \frac{dP_-}{dx} - z_+ u_+ \frac{dP_+}{dx} \right)}{(z_+^2 v_+ u_+ + z_-^2 v_- u_-) CF} \quad (1-1)$$

因为假设溶液是很稀的，渗透压应满足理想气体公式

$$P_+ = \frac{v_+ RT}{V} = v_+ RTC$$

$$P_- = \frac{v_- RT}{V} = v_- RTC$$

式中 R ——克分子气体常数，等于 $8.313 J \cdot (\text{°K})^{-1}$

T ——绝对温度， °K ；

V ——1 克分子体积。

因此，有

$$dP_+ = v_+ RT dC$$

$$dP_- = v_- RT dC$$

将这两个式子代入式 (1-1)，整理得到

$$\frac{du}{dx} dx = - \frac{z_+ v_+ u_+ - z_- v_- u_-}{z_+^2 v_+ u_+ + z_-^2 v_- u_-} \cdot \frac{RT}{F} \cdot \frac{dC}{C}$$

经积分得

$$U(x_m) - U(x_w) = - \frac{z_+ v_+ u_+ - z_- v_- u_-}{z_+^2 v_+ u_+ + z_-^2 v_- u_-} \cdot \frac{RT}{F} \ln \frac{C_m}{C_w}$$

上式左端是达到动平衡时两溶液的电势差，称为扩散电动势 E_d 。右端的迁移率 u_+ 和 u_- 的定义是：在单位力作用下粒子的平均迁移速度，单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$ 。对于正、负离子这样的带电粒子，定义一种“电化学迁移率” u'_+ 和 u'_- ，它们是正负离子在单位场强作用下的平均

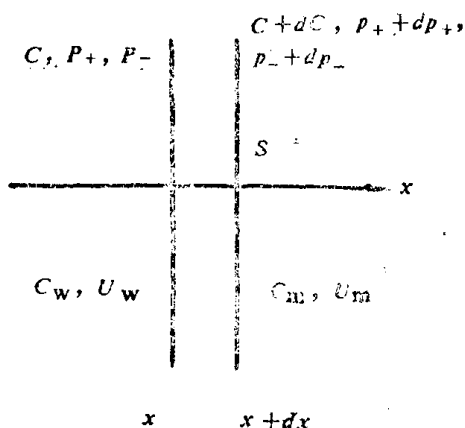


图 1-3 扩散电位产生的机理

迁移速度。 u_{\pm} 和 u_{\pm} 之间有下列关系

$$u'_{\pm} = z_{\pm} e u_{\pm}$$

u'_{\pm} 的单位是 $m^2 \cdot s^{-1} \cdot V^{-1}$ 。 u_{\pm} 和正负离子对电导率的贡献有密切关系。令 l_{\pm} 为每克当量浓度的正负离子对电导率的贡献。则显然

$$l_{\pm} = F u'_{\pm} = F z_{\pm} e u_{\pm}$$

l_{\pm} 的单位是 $m^2 \cdot \Omega \cdot equiv^{-1}$ ，或 $\Omega \cdot m^{-1} \cdot N^{-1}$ ①，有时 l_{\pm} 也称为迁移率。表1-1给出的就是这种迁移率。将上面 E_d 表达式中的 u_{\pm} 改成 l_{\pm} 便得：

$$E_d = -2.3 \frac{v_+ l_+ - v_- l_-}{z_+ v_+ l_+ + z_- v_- l_-} \cdot \frac{RT}{F} \lg \frac{C_m}{C_w}$$

在地层水和泥浆中，最常见的溶质是NaCl，对于NaCl，则有

$$v_+ = v_- = 1, \quad z_+ = z_- = z = 1$$

所以 E_d 的表达式简化为

$$E_d = -2.3 \frac{l_+ - l_-}{l_+ + l_-} \cdot \frac{RT}{zF} \lg \frac{C_m}{C_w} \quad (1-2)$$

式(1-2)适用于低浓度和中等浓度溶液的自由接触面附近产生的电动势，在纯砂岩附近所测的扩散电动势与公式计算值差别很小。溶液浓度很大时，不能满足理想气体方程，如仍用式(1-2)计算 E_d 值，它将比实际值偏高。

因为溶液的电阻率和溶液的浓度成反比，上式可改写为

$$E_d = -2.3 \frac{l_+ - l_-}{l_+ + l_-} \cdot \frac{RT}{zF} \lg \frac{R_w}{R_{mf}}$$

式中 R_w 和 R_{mf} 分别为地层水电阻率和泥浆滤液电阻率。

令
$$K_d = 2.3 \frac{l_+ - l_-}{l_+ + l_-} \cdot \frac{RT}{zF} \quad (1-3)$$

K_d 叫扩散电动势系数。则 E_d 表达式可进一步简化为

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

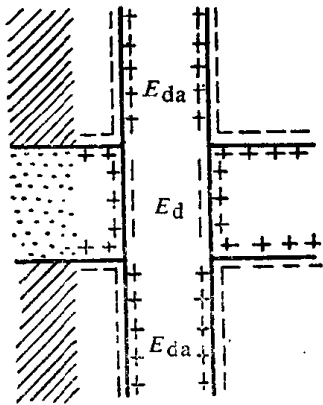


图 1-4 井内自然电位分布示意图

当温度为18℃时，对于NaCl溶液 $K_d = -11.6mV$ 。其它温度下的扩散系数可以根据式(1-3)推算出来。

在井内纯砂岩井段所测量的自然电位即是扩散电动势造成的。这就是由于浓度为 C_w 的地层水和浓度为 C_m 的泥浆滤液在井壁附近接触产生扩散现象的结果。通常 $C_w > C_m$ ，所以一般扩散结果是地层水内富集正电荷，泥浆中富集负电荷。如图1-4所示：

二、扩散吸附电动势

按照图1-5所示，将两种不同浓度(C_w 和 C_m ，且 $C_w > C_m$)的NaCl溶液用泥岩隔膜分开。实验结果证明：浓度大的一方富集了负电荷，浓度小的一方富集了正电荷。这种现象起因于泥岩的一种特殊性质。泥质颗粒基本上是由含有硅或铝的晶体组成。由于晶格中的硅或铝离子被低价的离子所取代，泥质颗粒表面带负电。为了达到电平衡，必须吸附正离子。这部分

① N是浓度的单位，等于 $equiv \cdot liter^{-1}$ 。

被吸附的正离子称为平衡离子。有水时,在外电场作用下平衡离子也会移动。平衡离子的多少常用 Q_v 来表示,它是每单位孔隙空间中平衡离子的克当量数,单位是 $\text{meq}\cdot\text{cm}^{-3}$ 或 $\text{eq}\cdot\text{liter}^{-1}$ 。 Q_v 也称为泥质的阳离子交换能力。在泥岩的孔隙中,孔隙壁带负电,而溶液则由于平衡离子的存在而带正电。由于正离子数超过负离子数,扩散的结果使得浓度低的一方带正电而浓度高的一方带负电。由上述过程产生的电动势叫扩散吸附电动势 E_{da} ,或称为薄膜电势。提出后一个名称是因为泥岩选择性地让正离子通过,其作用有如化学中的半透膜。将扩散吸附电动势表示为

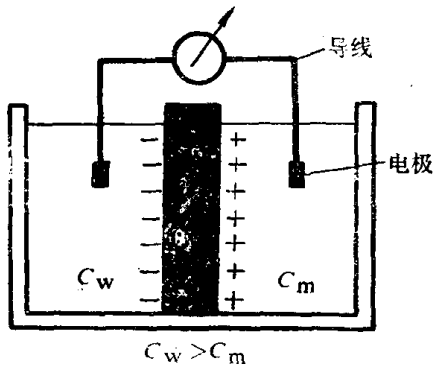


图 1-5 扩散吸附电动势示意图

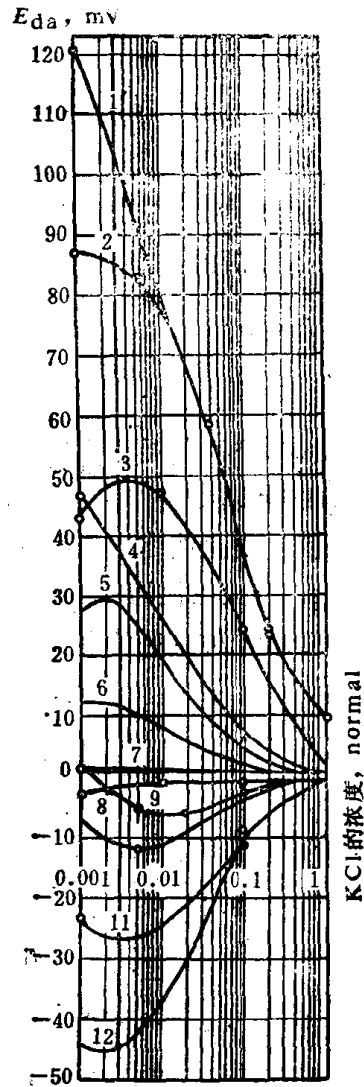


图 1-6 不同岩石中 E_{da} 与KCl溶液浓度的关系曲线

1—泥质页岩; 2—粘土; 3、11—泥质含量不同的砂岩;
4—石灰岩; 5—砂岩; 6—无烟煤; 7—泥灰岩; 8—铝土矿;
9—石英砂; 10—白云岩; 12—高岭土

$$E_{da} = K_{da} \lg \frac{C_w}{C_m} \quad (1-5)$$

式中 K_{da} 称为扩散吸附电动势系数。和 K_d 不一样, K_{da} 不是常数,而是随 C_w 和 C_m 而改变。

在 $Q_v \rightarrow \infty$ 的极端情况下,岩石孔隙中全部是正离子。因此参加扩散的也只有正离子。令式(1-3)中的 $l_- = 0$,就得到在此极端情况下的 K_{da}

$$K_{da} = 2.3 \frac{RT}{zF} \quad (1-3')$$

这是扩散吸附电动势系数 K_{da} 的上限,在温度为 18°C 时,它的数值是 58mV 。在一般情况下 K_{da} 的数值在 -11.6mV ($Q_v = 0$)到 58mV ($Q_v \rightarrow \infty$)之间变化。

在相同条件下,不同岩石,扩散吸附电动势和溶液浓度的关系曲线见图1-6。

在砂泥岩剖面的井内,在泥岩井壁附近,如果用溶液电阻率代替溶液浓度,扩散吸附电动势可用下式表示

$$E_{da} = K_{da} \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-6)$$

实际测井中，夹在泥岩中的砂岩层的自然电位幅度，不仅与砂岩本身的 E_d 有关，而且和它的围岩——泥岩处的 E_{da} 有关。井内砂岩和泥岩接触面附近的自然电位异常可由图1-7

(a) 的等效电路求得。在此等效电路中， E_d 和 E_{da} 是相互叠加的，在相当厚的砂岩和泥岩接触面处的自然电位幅度基本上是产生自然电场的总电动势 SSP。 $SSP = E_d - E_{da}$ 。

即

$$SSP = (K_d - K_{da}) \lg \frac{R_{mf}}{R_w} = -K \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-7)$$

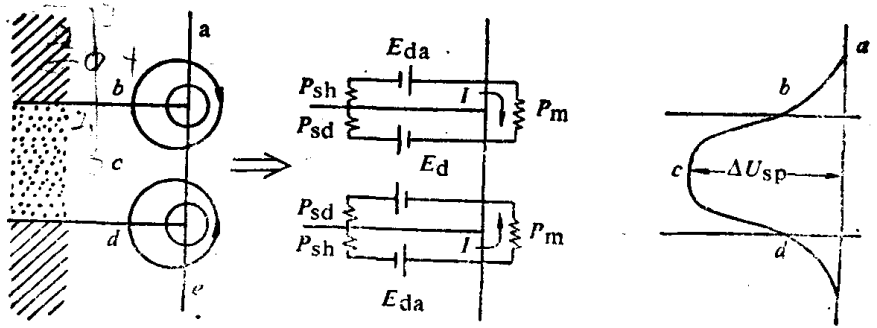
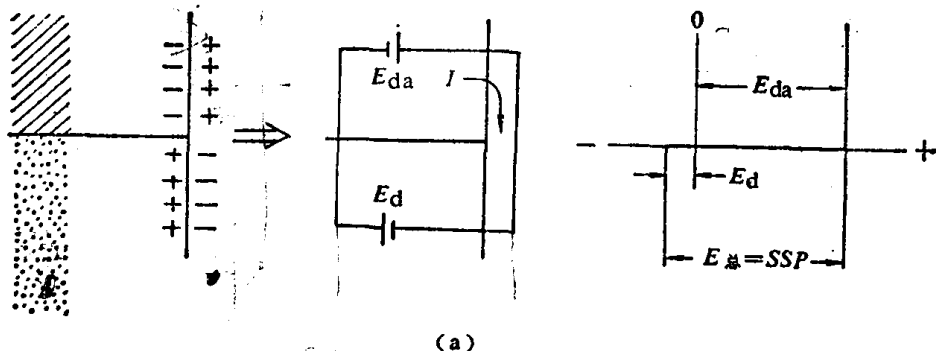
SSP 称为静自然电位。在温度为 18°C 时，极限情况下， K 等于 69.6mV 。

在实测曲线上以泥岩作基线，则巨厚的纯砂岩部分的自然电位幅度就是静自然电位 SSP。 SSP 的变化范围，由含淡水岩层的 $+50\text{mV}$ 到含高矿化度盐水层的 -200mV 。

而实际上，当夹在泥岩中的砂岩层的厚度有限时，它的自然电位异常幅度 ΔU_{sp} 不用于 SSP。令自然电流 I 所流经的井身、砂岩、泥岩各段电阻分别是 P_m 、 P_{sd} 、 P_{sh} ，其等效电路见图1-7(b)。

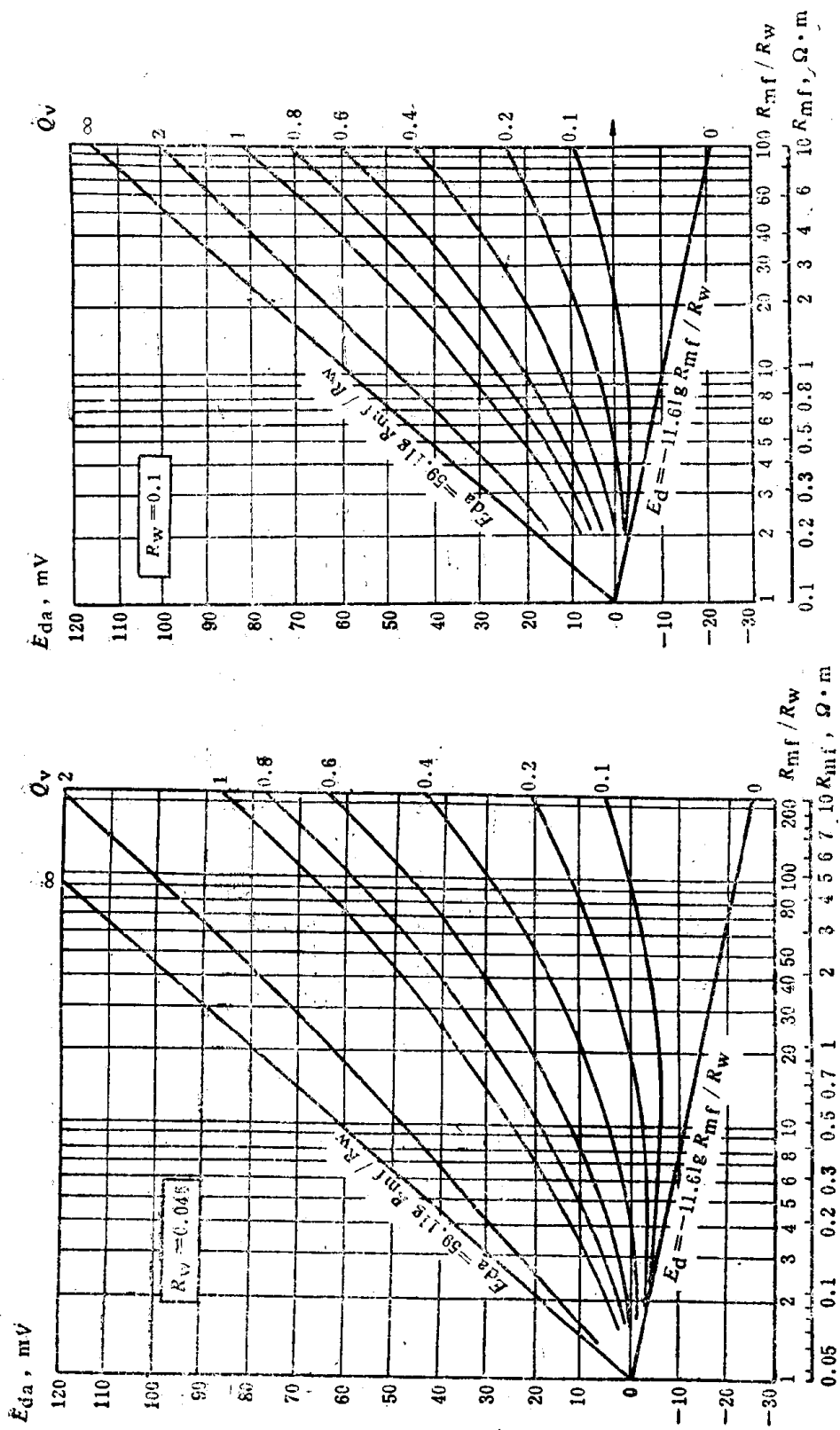
由 Kirchoff 定律得

而 $\Delta U_{sp} = IP_m$ 因此， $SSP = IP_m + IP_{sd} + IP_{sh}$



$U_c = I(P_m + P_{sd} + P_{sh}) + E_d$
 $U_b = I(P_m + P_{sd}) + E_d$
 $\Delta U_{sp} = U_c - U_b = I(P_{sh})$

图1-7 等效电路



(b)

(a)

图 1-8 泥质砂岩中 $E_{da} - R_{mf}/R_w$ 关系曲线

$$\frac{\Delta U_{SP}}{SSP} = \frac{P_m}{P_m + P_{sd} + P_{sh}} \quad (1-8)$$

对于厚层来说，砂岩和泥岩层的截面积比井的截面积大得多，所以 $P_m \gg P_{sd}$ ； $P_m \gg P_{sh}$ 。因此 $\Delta U_{SP} \approx SSP$ 。而对于薄层 ΔU_{SP} 比 SSP 小得多。

具有不同 Q_v 值的岩层的 E_{da} 和 R_{mf}/R_w 的定量关系，见图1-8(a)、(b)。两张图版制作时，选用了不同地层水电阻率。(a)图 $R_w = 0.045 \Omega \cdot m$ ，(b)图 $R_w = 0.1 \Omega \cdot m$ 。它可供不同地区选择使用。从图版上可以看出：对于具有不同 Q_v 值的地层，即使 R_{mf}/R_w 值是常数，其扩散吸附电位 E_{da} 也不同。

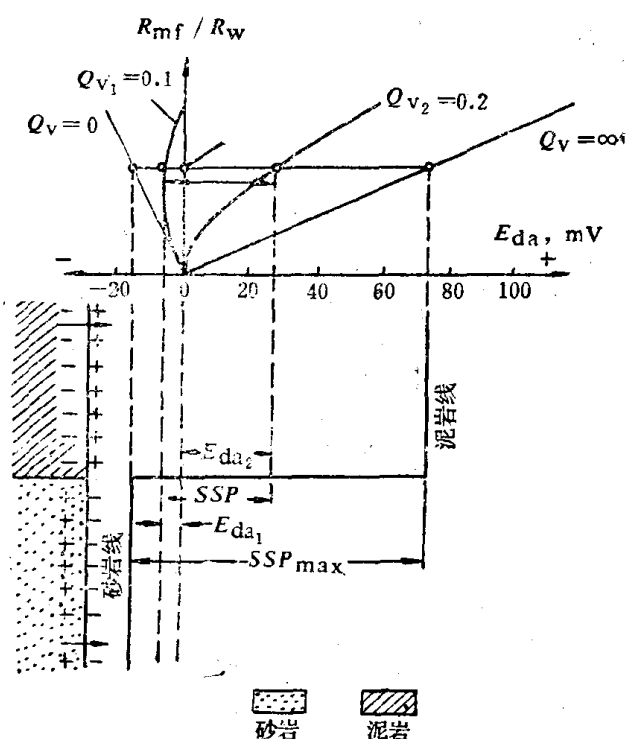


图 1-9 自然电位幅度示意图

如果在井内有两个相邻的岩层，其阳离子交换能力，分别用 Q_{v1} 和 Q_{v2} 表示，两种岩层内地层水电阻率相同，这两个地层附近产生的扩散吸附电动势分别为 E_{da1} 和 E_{da2} 。在这两层交界面处的静自然电位 SSP 由下式给出

$$SSP = E_{da1} - E_{da2} = (K_{da1} - K_{da2}) \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-9)$$

如图1-9所示，当 R_{mf}/R_w 为某一大于1的常数时， $Q_{v1} = 0.1$ 的地层的扩散吸附电动势 E_{da1} 为负值； $Q_{v2} = 0.2$ 的地层的扩散吸附电动势 E_{da2} 为正值，这时的静自然电位 SSP 就是 E_{da1} 和 E_{da2} 之差。

如果 $Q_{v2} \rightarrow \infty$ ； $Q_{v1} = 0$ ，则得到纯泥岩和纯砂岩交界处的静自然电位值，即静自然电位的最大值 SSP_{max} 。当温度在 $18^\circ C$ 时，得到

$$SSP_{max} = [-58 + (-11.6)] \lg \frac{R_{mf}}{R_w} = -69.6 \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-10)$$

如果 $Q_{v1} = Q_{v2}$ ，则 $E_{da2} = E_{da1}$ ，静自然电位得到最小值。

$$SSP_{min} = 0$$

在砂泥岩剖面上，相当厚的纯砂岩井段的自然电位幅度与用式(1-10)计算值相差很小。因此一般认为井内自然电场主要是由扩散吸附活动性造成的。不同性质的岩层所造成的自然电场不同，通过测量井中自然电位变化可判断砂泥岩剖面中岩性。

三、过滤电动势(动电电动势)

在钻井过程中一般均使泥浆柱压力略大于地层压力。在压力差的作用下，泥浆滤液向地层中渗入。由于上面提到的平衡离子，在岩石孔隙中的滤液带有相当多的正离子向压力低的地层一方移动并聚集，而在压力大的一端聚集较多的负离子，产生电位差，这就是过滤电动势，它用 E_f 表示。为了定量地估计过滤电位，应用 Helmholtz 理论得到 E_f 的表达式

$$E_f = A_f \frac{R_{mf}}{\mu} \Delta P \quad (1-11)$$

式中 R_{mf} ——泥浆滤液电阻率, $\Omega \cdot m$;
 μ ——泥浆滤液的粘度, cp;
 ΔP ——泥浆柱与地层之间的压力差, atm;
 A_e ——过滤电动势系数, mV。

$$A_e = \frac{\epsilon \zeta}{4\pi}$$

其中 ϵ 是渗透液体(此处即泥浆滤液)的介电常数, ζ 是与岩石的物理化学性质有关的参数。渗透性岩石的 A_e 平均值均等于0.77mV。

过滤电动势 E_e 值只有在泥浆柱压力和地层压力差 ΔP 很大的情况下,才能造成自然电场中不可忽略的部分。但一般在石油钻井中 ΔP 不能很大,故 E_e 可忽略不计。

第二节 影响自然电位的因素

在石油钻探的砂泥岩剖面中,自然电位的幅度和特点主要决定于造成自然电场的静自然电位SSP,并且受自然电流I分布的影响。SSP的大小取决于岩性、地层温度、地层水和泥浆中所含离子成分和泥浆滤液电阻率与地层水电阻率之比。而自然电场中自然电流I的分布则决定于流经路径中介质的电阻率及地层的厚度和井径的大小。这些因素对自然电位幅度 ΔU_{SP} 及曲线形状均有影响,但影响的主次各异。

一、地层水和泥浆中含盐浓度比值(C_w/C_{mf})的影响

地层水和泥浆中含盐量的差异是造成自然电场中扩散电动势 E_d 和扩散吸附电动势 E_{da} 的基本原因。这两个电动势的大小决定于 C_w/C_{mf} 值,见式(1-4)和(1-5)。以泥岩作基线,当 $C_w > C_{mf}$ 时,砂岩层段则出现自然电位负异常;当 $C_w < C_{mf}$ 时,则砂岩层段出现自然电位的正异常;当 $C_w = C_{mf}$ 时,没有造成自然电场的电动势产生,则没有自然电位异常出现。 C_w 与 C_{mf} 的差别愈大,造成自然电场的电动势愈大。

二、岩性的影响

在砂泥岩剖面中,自然自位曲线以泥岩为基线,在自然电位曲线上出现异常变化的多为砂质岩层。当目的层为纯砂岩时,它与围岩交界处的SSP达到其最大值 SSP_{max} 。如果地层水和泥浆中只含有NaCl并且地层水的浓度 $C_w >$ 泥浆滤液的浓度 C_{mf} 时,在18°C时, $SSP = SSP_{max} = -69.6 \lg R_{mf}/R_w$,自然电位曲线上出现最大的异常。当目的层含有泥质(其它条件不变)时,SSP降低,因而曲线异常的幅度也减小。

当剖面上有部分泥岩的阳离子交换能力减弱时,往往会产生基线偏移。自然电位异常幅度也会下降。

三、温度的影响

从式(1-3)和(1-3')可以看出, K_d 和 K_{da} 都是和绝对温度 T 成正比的。为了计算方便往往把某一岩层温度为18°C的 K_{da} 求出来。当地层温度为 t °C时,它的扩散吸附电动势系数 K_{da} 按下式求出

$$K_{da} = K_{da} |_{t=18^\circ\text{C}} \frac{273 + t}{291}$$

四、泥浆和地层水化学成分的影响

井内相接触的溶液所含的盐类不同，液体中所含的离子不同，不同离子的离子价及迁移率均有差别，这就直接影响扩散吸附电动势系数，因此影响到 E_{da} 值。

如果在纯砂岩中，水所含的化学成分改变时，扩散电动势系数也随之改变，造成自然电场的电动势也随之改变。在18°C时，几种盐溶液的扩散电动势系数 K_d 列于表1-2中。

表 1-2 18°C时几种盐溶液的 K_d 值

| 溶 质 | NaCl | NaHCO ₃ | CaCl ₂ | MgCl ₂ | Na ₂ SO ₄ | KCl |
|------------|-------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|------|
| K_d (mV) | -11.6 | +2.2 | -19.7 | -22.5 | +5 | -0.4 |

五、地层电阻率的影响

在自然电场产生后，有自然电流 I 在介质中流动。式(1-8)可改写成

$$\Delta U_{sp} = SSP \left(\frac{1}{1 + \frac{P_{sd} + P_{sh}}{P_m}} \right)$$

当地层较厚时，并且各部分介质的电阻率差别不大，由于岩层的截面比井的截面大得多则砂岩和泥岩对自然电流的电阻 P_{sd} 和 P_{sh} 与泥浆柱的电阻 P_m 相比小得多。此时对于纯砂来说 $\Delta U_{sp} = SSP$ ，当地层电阻率增高时， P_{sd} 、 P_{sh} 与 P_m 比较，则不能忽略，则 $\Delta U_{sp} < SSP$ 。地层电阻率越高则 ΔU_{sp} 越低。

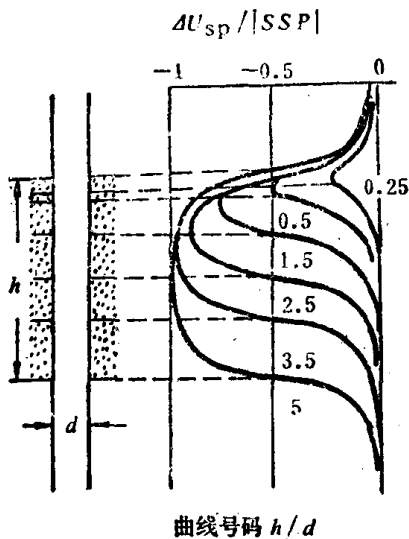


图 1-10 自然电位理论曲线

六、地层厚度的影响

图1-10是对含水砂岩计算出的一组自然电位理论曲线。它是一组曲线号码为 h/d (地层厚度/井径)的 $\Delta U_{sp}/|SSP|$ 随深度的关系曲线。从曲线上可以看出自然电位幅度 ΔU_{sp} 随地层厚度的变薄而降低，而且曲线变得平缓。这是由于地层厚度变小，自然电流经过地层的截面变小，电阻增加， ΔU_{sp} 与SSP差别加大的缘故。

七、井径扩大和侵入带的影响

井径扩大使井的截面加大，自然电流在井内的电位降变小，即 ΔU_{sp} 降低。

当泥浆滤液渗入渗透性地层造成泥浆侵入时，地层水和泥浆滤液的接触面向地层内推移，所产生的效果相当于井径扩大，即 ΔU_{sp} 降低。侵入越深， ΔU_{sp} 越低。

第三节 自然电位曲线及其应用

图1-10表明，当上下围岩很厚且岩性相同时，单个砂岩层的自然电位曲线的形状特点是：曲线对地层中点对称，地层中点处异常值最大；地层愈厚，自然电位幅度 ΔU_{sp} 愈接近于静自然电位SSP，随着地层厚度变小， ΔU_{sp} 也随之变小，且曲线顶部变尖而根部变宽；当地层厚度达到 $h/d > 4$ 时，自然电位异常的半幅点处，对应地层的界面，因此较厚地层可以用半幅点法确定岩层界面。当地层变薄时，对应地层界面的自然电位值向曲线顶部移动，此时则不能

用半幅点法定地层界面。

在判断岩性、地层对比、估计渗透性岩层的厚度、计算地层水电阻率及地层泥质含量等项工作中，都可应用自然电位曲线。

一、判断渗透性岩层

自然电位的产生与岩层性质有密切的关系。这就可以根据自然电位曲线的变化判断岩性。为能较准确地判断岩性，应事先进行岩芯资料和自然电位曲线的对比分析，得出本地区的规律。

一般在砂泥岩剖面中，当 $R_w < R_m$ 时，在自然电位曲线上，以泥岩为基线，在渗透性的纯砂岩层井段出现最大的负异常；含泥质砂岩层具有较低的负异常，而且泥质含量愈多，负异常幅度愈低。在同一井中含水砂岩的自然电位幅度比含油砂岩的自然电位幅度高。图1-11中2161~2179m井段是油层，而最下边一个渗透层是含水层。当砂岩同时含有油和水时，则自然电位曲线有图1-12中所表示的特征。

二、估计渗透性岩层厚度

渗透性地层在自然电位曲线上具有明显的异常。自然电位曲线与微电极或短电极距的视电阻率曲线配合划分渗透层的界面是十分有效的。

单独用自然电位曲线划分渗透层的界面位置可用半幅点法。

以图1-13来说明半幅点法。地层的上下围岩相同，找出从泥岩基线到异常幅度的中点P，过P点作一条平行于井轴的直线与自然电位曲线相交于a、b两点，a点为渗透层顶界面的深度，记作 z_a ；b点为底界面的深度，记作 z_b 。渗透层的厚度 $h = z_b - z_a$ 。对于 $h/d > 4$ 的厚渗透层可以这样估计，地层越厚精度越高。薄的渗透层如用半幅点法估计岩层厚度会产生偏高的误差，故不能用半幅点法。

三、估计泥质含量

一般把泥质砂岩中的细粉砂和湿粘土的混合物叫做泥质。泥质在砂岩中存在状态有三种：分散泥质——泥质分散在砂岩颗粒间孔隙的表面；层状泥质——泥质在砂岩中呈条带状；结构泥质——泥质颗粒代替了某些砂岩颗粒的位置。泥质的含量和其存在状态对砂岩产生的扩散吸附电动势有直接影响，因而利用自然电位测井曲线可以估计泥质含量。在一个地区欲使用这种方法，必须首先进行大量的试验工作，通过试验建立起自然电位曲线幅度和泥质含量间的定量关系。然后才能利用自然电位曲线估计出岩层的泥质含量。现在介绍两种估计方法：

一种是把本地区存在的各种含泥质的砂岩经过取样测定，直接建立起经过岩层厚度校正和电阻率校正的自然电位幅度 $\Delta U_{sp}^{c;c}$ 和泥质含量 Q_{sh} 的关系曲线 $\Delta U_{sp}^{c;c} = f(Q_{sh})$ 。有了这条曲线，就可以根据 $\Delta U_{sp}^{c;c}$ 求出解释层的泥质含量。或者把岩样测定的资料绘制成自然电位相对值 T_{sp} 与泥质含量 Q_{sh} 的关系曲线，即

$$T_{sp} = \frac{\Delta U_{sp}^{c;c}}{SP_{max}} = f(Q_{sh})$$

式中 SP_{max} ——本地区所选标准层的自然电位幅度，一般可选厚的纯砂岩层或在本地区内泥质含量稳定的厚地层为标准层；

$\Delta U_{sp}^{c;c}$ 的意义和上面相同。

另一种方法是可以利用经验公式估算，当砂岩中所含泥质呈层状分布形成砂泥质交互

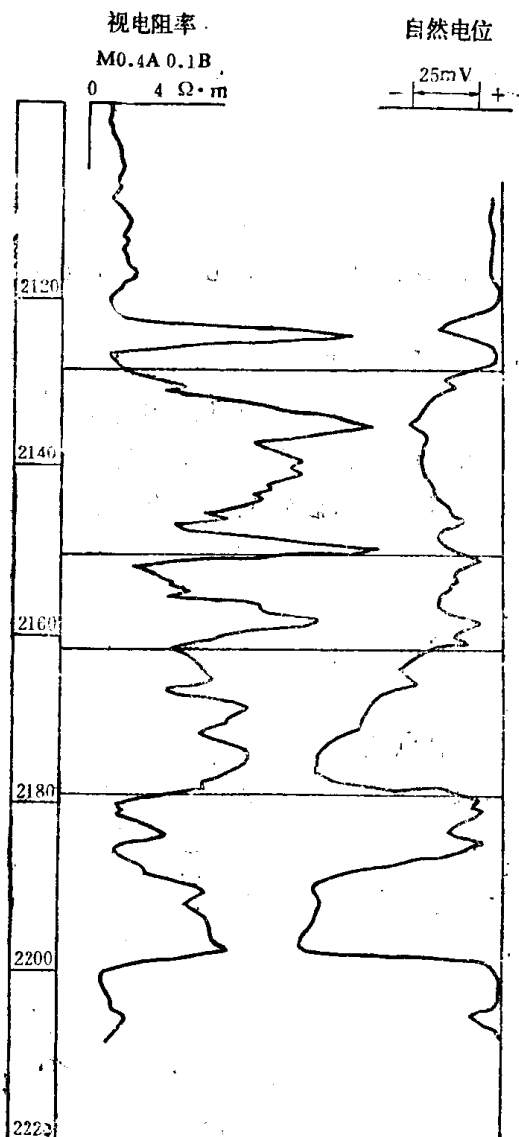


图 1-11 砂泥岩剖面中曲线实例

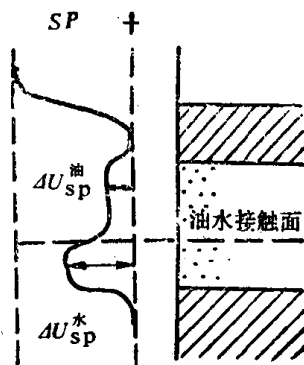


图 1-12 上部含油下部含水的厚砂岩层的自然电位曲线特点

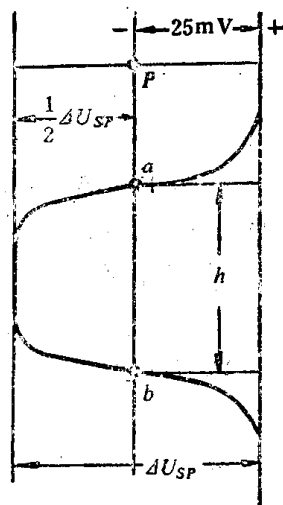


图 1-13 半幅点法示意图

层，且泥质层和砂质层的电阻率相等或差别不大时，这时地层的泥质含量可用下列经验公式估算

$$Q_{sb} = 1 - \frac{PSP}{SSP} \quad (1-12)$$

式中 SSP——本地区含水纯砂岩的静自然电位；
PSP——含泥质砂岩的静自然电位值。

四、确定地层水电阻率 R_w

在评价油气储集层时，经常要用到孔隙度含油饱和度等重要参数。在确定这些参数时，都需要地层水电阻率资料。用自然电位测井资料确定地层水电阻率 R_w 是常用的方法之一。

在求地层水电阻率时，要选择较厚的富含水的纯砂岩层。根据该层的侵入情况，井径、地层厚度等资料把 ΔU_{sp} 校正成静自然电位SSP，并根据泥浆资料确定 R_{mf} ，然后根据式(1-7)可求出 R_w 。这对于低浓度含NaCl的地层水和泥浆是正确的。在高浓度情况下，溶液浓度和溶液电阻率就不能保持严格的反比例关系，因此我们引用“等效电阻率”概念，即不论溶液浓