

高等学校教学用书

电 法 测 井

张庚骥 主编



(北京)
71
1

石油大学出版社

| | |
|-----|----------|
| 登录号 | 124003 |
| 分类号 | P631.811 |
| 种次号 | 001 |

高等学校教学用书

电 法 测 井

张庚骥 主编

5477/14



石油0114988

石油大学出版社

内 容 提 要

本书较全面地介绍了目前国内外正在使用的各种测井方法,包括早在20世纪30年代就发展起来的自然电位测井和视电阻率测井,以及以后陆续问世的侧向测井、感应测井和介电测井,对各种电测井方法的理论基础做了详细描述。同时也介绍了DOLL几何因子理论的改进理论。

本书为有关高等院校测井专业的教材,也可供测井技术人员参考。

电 法 测 井

张庚毅 主编

*

石油大学出版社出版

(山东省东营市)

新华书店发行

山东电子工业印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 12.5 印张 2 插页 322 千字

1996年6月第1版 1996年6月第1次印刷

印数 1—1000 册

ISBN 7-5636-0759-5/TE · 140

定价:12.50 元

前 言

在各种测井方法中,电法测井是最早发展起来的,电法测井理论探讨的是不均介质中的场与波。测井的发展促使科学家们将注意力转到这方面。几个经典问题,例如径向阶跃介质或轴向阶跃介质中的场与波,都是在物理学家和数学家的参与之下得到解决的。这些问题的解决,也丰富了物理和数学的内容。但是这些经典问题只是几种最简单的特例,测井所面临的介质情况,其复杂程度远远超过它们。于是在计算机发展的基础上,出现了数值方法。目前在这方面已经取得了很大的进展。其中通用性最高的,是有限元素法。本书力图使学生在有限的学时内学习到这些个方法的要点,尽量避免过于复杂的数学推算。

本书是以石油工业出版社 1984 年出版的《电法测井(上册)》为基础编写而成。为了反映 1984 年以来技术上的进展,增加了一些内容。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修改。

由于编者水平有限,缺点和错误难以避免。欢迎读者批评指正。

编 者

1996 年 4 月 29 日

目 录

| | |
|---|----|
| 第一章 自然电位测井 | 1 |
| 第一节 自然电场产生原因 | 1 |
| 一、扩散电动势的产生 | 1 |
| 二、扩散吸附电动势的产生 | 4 |
| 三、过滤电动势(动电电动势) | 6 |
| 第二节 自然电位测井及 SP 曲线 | 6 |
| 第三节 影响自然电位的因素 | 11 |
| 一、地层水和泥浆滤液中含盐浓度比值(C_w/C_m)的影响 | 11 |
| 二、岩性的影响 | 11 |
| 三、温度的影响 | 11 |
| 四、地层水和泥浆滤液中所含盐的性质的影响 | 11 |
| 五、地层电阻率的影响 | 12 |
| 六、地层厚度的影响 | 12 |
| 七、井径扩大和泥浆侵入的影响 | 12 |
| 第四节 SP 曲线应用 | 12 |
| 一、判断渗透性岩层 | 13 |
| 二、估计渗透性岩层厚度 | 13 |
| 三、估计泥质含量 | 14 |
| 四、确定地层水电阻率 R_w | 14 |
| 五、判断水淹层 | 20 |
| 习题 | 22 |
| 参考文献 | 23 |
| 第二章 普通电阻率法测井 | 24 |
| 第一节 岩石电阻率与岩性、孔隙度及含油饱和度的关系 | 24 |
| 一、岩石电阻率与岩性的关系 | 24 |
| 二、岩石电阻率与地层水性质的关系 | 26 |
| 三、岩石电阻率与孔隙度的关系 | 28 |
| 四、岩石电阻率与含油饱和度的关系 | 31 |
| 第二节 普通电阻率法测井的基本概念 | 33 |
| 一、普通电阻率法测井测量原理 | 33 |
| 二、电极系 | 36 |
| 三、泥浆侵入和视电阻率 | 38 |
| 第三节 普通电阻率法测井的基本理论 | 40 |
| 一、均匀各向同性介质中,点电源电场的分布及其视电阻率 | 40 |
| 二、均匀各向异性介质中,点电源场的分布及视电阻率公式 | 40 |
| 三、纵向阶跃介质中,点电源电场的分布及视电阻率公式 | 43 |

| | |
|---|-----|
| 四、径向阶跃介质中,点电源电场的分布 | 60 |
| 五、全非均匀介质电场的电阻网络模拟 | 65 |
| 第四节 实测的视电阻率曲线及其应用 | 71 |
| 一、实测视电阻率曲线及其影响因素 | 71 |
| 二、视电阻率曲线的应用 | 75 |
| 第五节 标准测井 | 78 |
| 第六节 微电极系视电阻率测井 | 79 |
| 一、微电极测井原理 | 80 |
| 二、微电极系视电阻率测井曲线 | 81 |
| 三、微电极系测井资料应用 | 82 |
| 第七节 地层微电阻率扫描测井(FMS)及全井眼地微成像仪(FMI)简介 | 84 |
| 一、地层微电阻率扫描测井 | 85 |
| 二、全井眼地层微成像仪简介 | 89 |
| 习题 | 92 |
| 参考文献 | 94 |
| 第三章 侧向测井 | 95 |
| 第一节 三电极侧向测井 | 95 |
| 一、三电极侧向测井原理 | 95 |
| 二、三电极侧向测井方框图 | 97 |
| 三、三电极侧向测井视电阻率曲线 | 99 |
| 四、三电极侧向测井资料的应用 | 100 |
| 五、视电阻率曲线校正 | 100 |
| 第二节 七电极及八电极侧向测井 | 105 |
| 一、七电极侧向测井原理 | 105 |
| 二、七电极侧向测井方框图 | 107 |
| 三、七电极侧向测井视电阻率曲线 | 109 |
| 四、七电极侧向测井资料的应用 | 109 |
| 五、七电极侧向测井视电阻率校正 | 110 |
| 六、八电极侧向测井 | 112 |
| 第三节 双侧向测井 | 113 |
| 一、双侧向测井原理 | 113 |
| 二、双侧向视电阻率曲线及校正 | 114 |
| 三、双侧向测井资料的应用 | 115 |
| 四、双侧向和三电极侧向、七电极侧向测井的比较 | 119 |
| 第四节 微侧向测井原理 | 120 |
| 一、微侧向测井原理 | 120 |
| 二、微侧向测井资料的应用 | 121 |
| 第五节 邻近侧向测井 | 123 |
| 第六节 微球形聚焦测井 | 124 |
| 一、球形聚焦测井原理 | 124 |
| 二、微球形聚焦测井资料的应用 | 126 |
| 第七节 电阻率测井方法组合 | 127 |

| | |
|----------------------------|-----|
| 第八节 侧向测井视电阻率的理论计算 | 129 |
| 一、三侧向的径向几何因子 | 129 |
| 二、利用有限元素法计算视电阻率 | 133 |
| 习题 | 140 |
| 参考文献 | 140 |
| 第四章 感应测井 | 141 |
| 第一节 感应测井的原理 | 141 |
| 第二节 视电导率和几何因子 | 144 |
| 一、横向几何因子 | 146 |
| 二、纵向几何因子 | 147 |
| 第三节 复合线圈系 | 148 |
| 第四节 感应测井仪刻度原理 | 154 |
| 第五节 感应测井视电导率曲线 | 155 |
| 第六节 均匀介质中感应测井响应的严格解法 | 159 |
| 第七节 几何因子理论的改进 | 164 |
| 第八节 阵列感应 | 171 |
| 附录 | 176 |
| 习题 | 178 |
| 参考文献 | 179 |
| 第五章 介电测井 | 180 |
| 第一节 原理 | 180 |
| 第二节 仪器 | 185 |
| 第三节 EPT 曲线和解释原理 | 187 |
| 第四节 三线圈系法 | 189 |
| 习题 | 191 |
| 参考文献 | 191 |

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。经研究表明这个电位是在钻开岩层时,在井壁附近产生一系列电化学反应的结果,为与人为供电造成的人工电场相区别,称其为自然电场。自然电场的分布和岩性有密切的关系,特别是在砂/泥岩剖面中能以明显的曲线异常变化显示出渗透性地层。因此,通过研究井眼内的自然电场中的电位变化即可反映井壁岩性,这种测井方法叫自然电位测井。自然电位测井具有方法简单、实用价值高等特点,是划分岩性和研究储集层性质、求取测井参数以及其它地质应用中不可缺少的基本方法之一。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自然电位测井资料的应用。

第一节 自然电场产生原因

为了安全钻进和获取全面测井资料,一般钻井时均使泥浆柱压力稍大于地层压力,并且使用淡水泥浆,即泥浆的矿化度 C_m (即溶液的盐浓度) 小于地层水的矿化度 C_w 。当钻头钻开岩层时,在井壁附近两种矿化度不同的溶液——泥浆和地层水——接触,于是产生各种电化学反应过程,其结果造成了自然电场。在石油井中的自然电场主要是由扩散、扩散吸附等电化学反应形成的。

一、扩散电动势的产生

首先让我们做个实验,实验装置见图 1-1。在玻璃缸内,放入一个渗透性隔膜把玻璃缸分隔成两部分,并分别装入矿化度为 C_w 和 C_m 的 NaCl 溶液,且 $C_w > C_m$ 。然后在两种溶液中各插入一只电极,并用导线将两个电极和电压表串连起来。这样,我们可以观察到电压表指针偏转。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,像半导体中的 P-N 结一样,产生一个电动势。其电化学反应过程是当两种浓度不同的溶液接触时,存在着一种企图使两种溶液浓度达到平衡的自然趋势,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,各种离子的迁移速度不同(见表 1-1)。从表 1-1 可以看出,NaCl 溶液中的 Cl^- 迁移速度大于 Na^+ 迁移速度。随着扩散过程的延续在液体接触面附近低浓度溶液中 Cl^- 相对增多,形成负电荷富集,而高浓度溶液中 Na^+ 相对增多,形成正电荷富集。这样在两种不同浓度的溶液间产生了电位差异。此时, Cl^- 、 Na^+ 虽然仍然继续扩散,但 Cl^- 因受到高浓度溶液中的正电荷吸引和低浓度溶液中的负电荷的排斥作用而使其迁移速度减慢;相反 Na^+ 的迁移速度加快,从而使接触面两侧的电荷富集速度减慢。当接触面两侧富

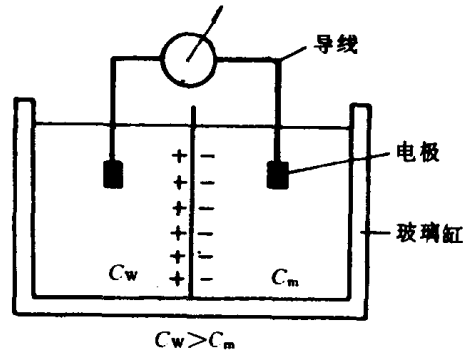


图 1-1 扩散电动势产生示意图

集的电势形成的电势增加到使正、负离子迁移速度相同时,电荷富集便停止了,但离子扩散仍在继续,这种状态叫动态平衡。这时接触面处的电势保持一定值,我们把它叫做扩散电势,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℃时)

| 溶质化学成分 | 正离子 | 迁移率 l_+ [m ² · S/mol] | 负离子 | 迁移率 l_- [m ² · S/mol] | 溶液的扩散电势 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 ²⁺ | 5.16 | Cl ⁻ | 6.55 | -19.6 |
| MgCl ₂ | $\frac{1}{2}$ Mg ²⁺ | 4.50 | Cl ⁻ | 6.55 | -22.5 |
| CaSO ₄ | $\frac{1}{2}$ Ca ²⁺ | 5.16 | $\frac{1}{2}$ SO ₄ ²⁻ | 6.79 | -7.9 |
| MgSO ₄ | $\frac{1}{2}$ Mg ²⁺ | 4.50 | $\frac{1}{2}$ SO ₄ ²⁻ | 6.79 | -11.7 |
| CaCO ₃ | $\frac{1}{2}$ Ca ²⁺ | 5.16 | $\frac{1}{2}$ CO ₃ ²⁻ | 6.00 | -4.4 |
| Ca(HCO ₃) ₂ | $\frac{1}{2}$ Ca ²⁺ | 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。在浓度不同的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 1-2)。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 ν_+ 个正离子和 ν_- 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 $-SdxP_-$ 。作用于每个正离子的力为:

$$f_+ = -\frac{SdP_+}{\nu_+ NCSdx} = -\frac{1}{\nu_+ NC} \frac{dP_+}{dx}$$

同理,作用在每个负离子上的力为:

$$f_- = -\frac{SdP_-}{\nu_- NCSdx} = -\frac{1}{\nu_- NC} \frac{dP_-}{dx}$$

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:

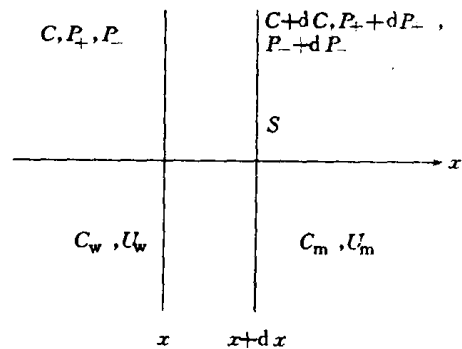


图 1-2 扩散电势产生的机理

$$n^+ = N\nu_+ U_+ SCf_+ dt = -u_+ S \frac{dP_+}{dx} dt$$

$$n^- = N\nu_- U_- SCf_- dt = -u_- S \frac{dP_-}{dx} dt$$

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:

$$n_E^+ = -u_+ SCN\nu_+ z_+ e \frac{du}{dx} dt = -u_+ SC\nu_+ z_+ F \frac{du}{dx} dt$$

$$n_E^- = u_- SCN\nu_- z_- e \frac{du}{dx} dt = u_- SC\nu_- z_- F \frac{du}{dx} dt$$

式中 $F = Ne$ —— 1mol 离子的电量,即 Farady 常数, $F = 96500C/mol$ 。

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

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

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

经整理得:

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

因为假设溶液是很稀的,渗透压应满足理想气体公式:

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

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

式中 R —— 克分子气体常数,等于 $8.314J/(mol \cdot K)$

T —— 绝对温度, K ;

V —— 1mol 理想气体体积。

因此,有:

$$dP_+ = \nu_+ RTdC$$

$$dP_- = \nu_- RTdC$$

将这两个式子代入式(1-1),整理得:

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

经积分得:

$$E_d \stackrel{\text{def}}{=} U(x_m) - U(x_w) = - \frac{z_+ \nu_+ u_+ - z_- \nu_- u_-}{z_+^2 \nu_+ u_+ + z_-^2 \nu_- u_-} \frac{RT}{F} \ln \frac{C_m}{C_w}$$

上式左端是达到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:在单位渗透压力作用下粒子的平均迁移速度,单位为 $m^2/(S \cdot mol)$ 。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 $\text{m}^2/(\text{S} \cdot \text{V})$ 。 u'_\pm 和正负离子对电导率的贡献有密切关系。令 l_\pm 为每摩尔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 $\text{m}^2 \cdot \text{S}/\text{mol}$,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:

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

由于我们实验用的溶质为NaCl,对NaCl溶液则有:

$$\nu_+ \nu_- = 1, z_+ = z_- = z = 1$$

所以 E_d 的表达式简化为:

$$E_d = -2.3 \frac{l_+ - l_-}{l_+ + l_-} \frac{RT}{zF} \lg \frac{C_m}{C_w}$$

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。自然界中地层水和钻井使用的泥浆中所含盐类主要是NaCl,所以在砂岩井段所测的扩散电动势与公式计算值差别很小。其表达式可写为:

$$E_d = -2.3 \frac{l_+ - l_-}{l_+ + l_-} \frac{RT}{zF} \lg \frac{C_{mf}}{C_w}$$

式中 C_w ——地层水矿化度;

C_{mf} ——泥浆滤液矿化度。

当溶液浓度很大时,则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。

又因为低浓度溶液的电阻率和溶液的浓度成线性反比关系,上式可改写为:

$$E_d = -2.3 \frac{l_+ - l_-}{l_+ + l_-} \frac{RT}{zF} \lg \frac{R_w}{R_{mf}} \quad (1-3)$$

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:

$$K_d = 2.3 \frac{l_+ - l_-}{l_+ + l_-} \frac{RT}{zF} \quad (1-4)$$

K_d 叫扩散电动势系数。则 E_d 表达式可进一步简化为:

$$E_d = K_d \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-5)$$

当温度为 18°C 时,对于NaCl溶液, $K_d = 11.6\text{mV}$ 。其它温度下的扩散电动势系数可以根据式(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_{mf} 的泥浆滤液在井壁附近接触产生扩散现象的结果。通常 $C_w > C_{mf}$,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。

二、扩散吸附电动势的产生

按照图1-3所示装置,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

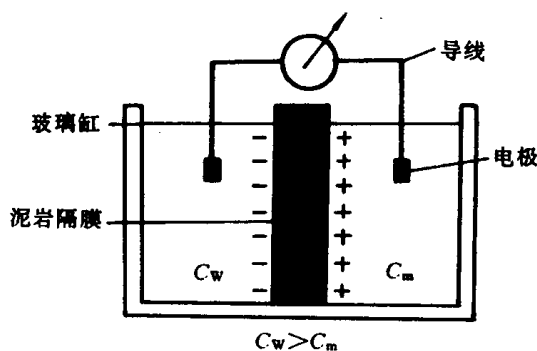


图 1-3 扩散吸附电动势产生示意图

平衡离子数,单位是 mmol/cm^3 或 mol/L 。 Q 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:

$$E_{da} = K_{da} \lg \frac{C_w}{C_m} \quad (1-6)$$

同样,上式也可写为:

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

式中 K_{da} 称为扩散吸附电动势系数。和 K_d 不同, K_{da} 不是常数,随 C_w 和 C_m 不同而改变。

在 $Q \rightarrow \infty$ 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} :

$$K_{da} = 2.3 \frac{RT}{zF} \quad (1-7)$$

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 ($Q=0$) 到 58mV ($Q \rightarrow \infty$) 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 1-4。

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(低矿化度范围内),扩散吸附电动势可用下式表示:

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

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 来表示,它是每单位孔隙空间中

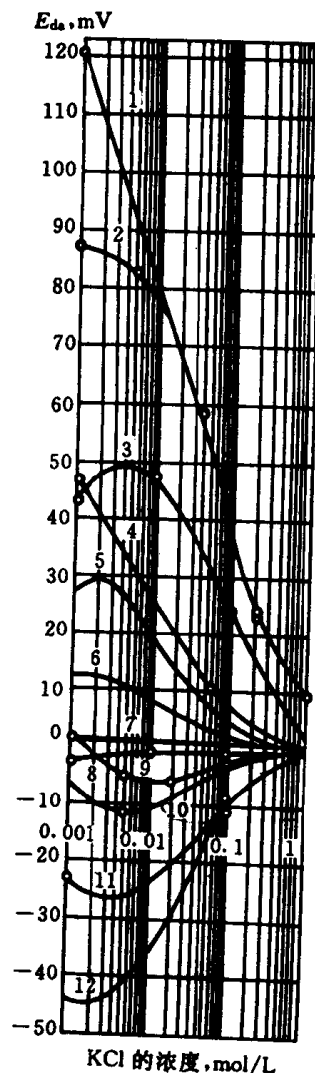


图 1-4 不同岩石中 E_{da} 与 KCl 溶液浓度的关系曲线

- 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

三、过滤电动势(动电电势)

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,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:

$$E_f = A_f \frac{R_{mf}}{\mu} \Delta P \quad (1-9)$$

式中 R_{mf} ——泥浆滤液电阻率, $\Omega \cdot m$;
 μ ——泥浆滤液的粘度, $10^{-3} Pa \cdot s$;
 ΔP ——泥浆柱与地层之间的压力差, $atm (= 1.013kPa)$;
 A_f ——过滤电动势系数, mV ,

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

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_f 平均值均等于 $0.77mV$,

过滤电动势 E_f 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。但一般在石油井中 ΔP 不能很大,故 E_f 可忽略不计。

第二节 自然电位测井及 SP 曲线

现在以砂/泥岩剖面的石油井为例说明自然电位测井原理。钻井时,一般采用淡水泥浆钻

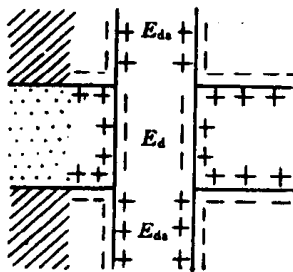


图 1-5 井内自然电场分布示意图

进,所以在测井时遇到的多为 $C_w > C_{mf}$ 情况,因此在砂岩层段井内富集有负电荷,而在泥岩层段井内富集正电荷。由扩散电动势和扩散吸附电动势形成的自然电场分布特点如图 1-5 所示。

进行自然电位测井时,将测量电极 N 放在地面,电极 M 用电缆送至井下,沿井轴提升电极 M 测量自然电位随井深的变化,所记录的自然电位随

井深的变化曲线叫自然电位测井曲线(常称之为 SP 曲线),参见图 1-6。实际测井时,自然电位测井并不是单独进行的,而是与普通电阻率测井(亦叫视电阻率测井)同时测量,其测量原理电路如图 1-7 所示。此时,井下的电极 M 是普通电阻率测井和自然电位测井的公用测量电极。也就是说电极 M 同时接收两个电场的电位信号,它既接收视电阻率测井时由供电电极 A、B 供电所造成的低频脉动直流电场中的电位 U_M ,同时也接收自然电场的直流电位 U_n ,这样就要在视电阻率 R_s 测量道适当加一个隔直元件——电容 C,阻隔自然电位进入该道而不受干扰;同时

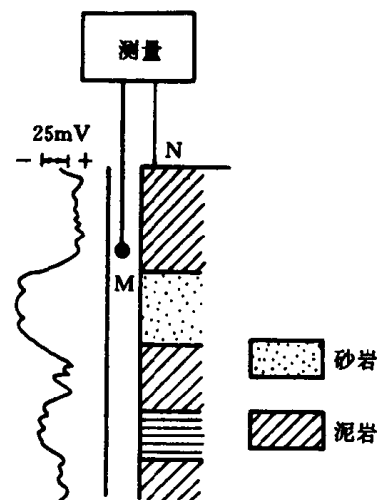


图 1-6 自然电位测井原理图

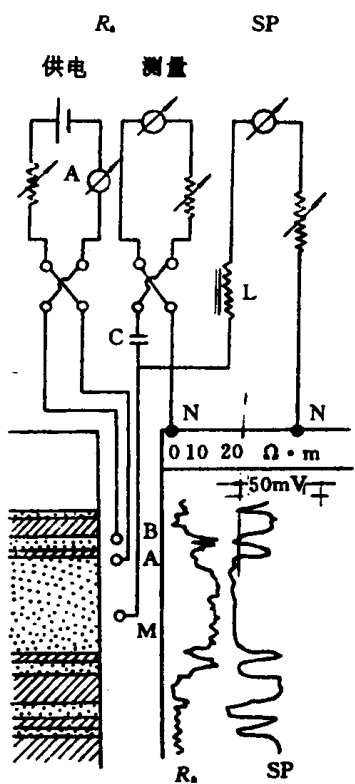


图 1-7 自然电位与视电阻率同时测量原理图

在自然电位测量道上加一个隔交元件——电感线圈 L ，它只允许自然电场中的直流电位信号通过，而阻断了研究视电阻率的脉动直流电场的信号干扰。从而使电极 M 同时接收到的两个电场的电位信号彼此分离，记录出两条不同的测井曲线。单独进行自然电位测井是极少的。

由自然电场分布特征可以看出，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幅度可由图 1-8(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，这就是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 的原因。其值为 $SSP = E_d - E_{da}$ 。将式(1-5)和式(1-8)代入则得：

$$SSP = (K_d - K_{da}) \lg \frac{R_{mf}}{R_w} = K \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-10)$$

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 。

为了使用方便，实际 SP 曲线上不设绝对零线，而是以大段泥岩对应的自然电位曲线作为 SP 曲线的相对基线（即零线）。这样，巨厚的纯砂岩部分的自然电位幅度就是静自然电位值 SSP。SSP 的变化范围，由含淡水岩层的 $+50\text{mV}$ 到含高

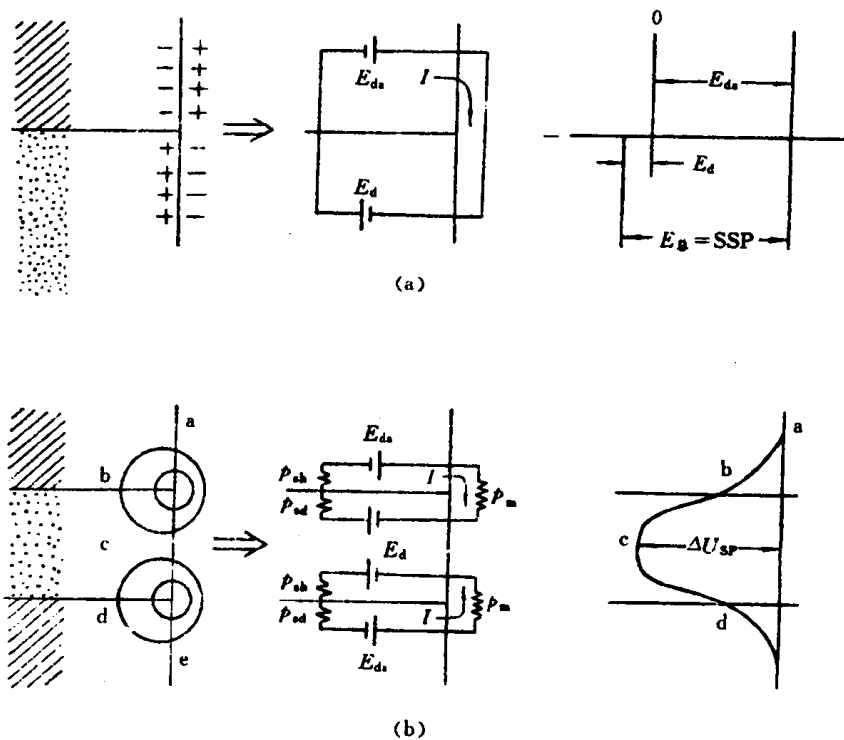


图 1-8 计算 SSP、 ΔU_{sp} 值的等效电路图

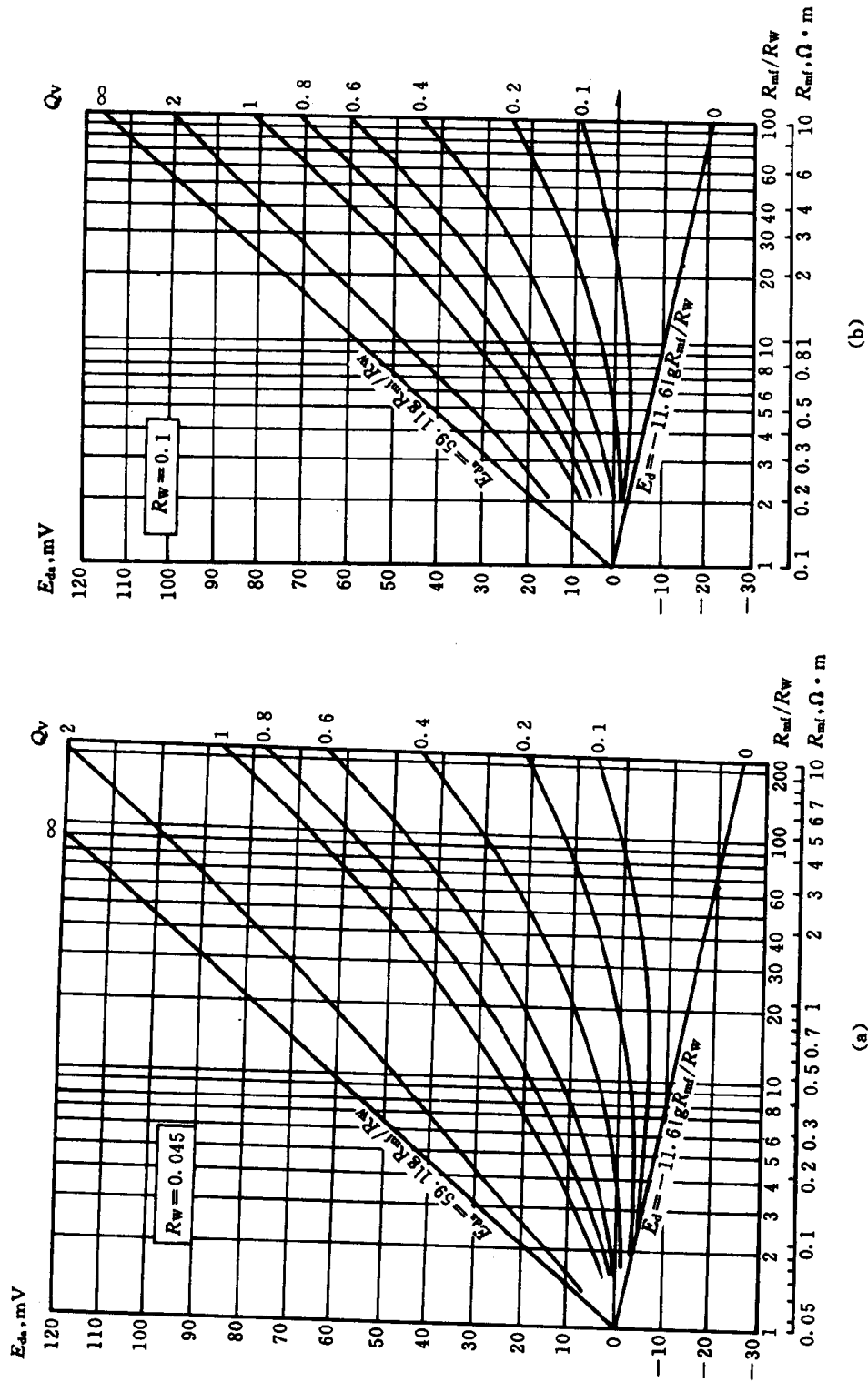


图 1-9 泥质砂岩中 E_{da} - R_{mf}/R_w 关系曲线

矿化度盐水层的 -200mV 。而实际上,在井中所寻找的砂岩储集层大部分是夹在泥岩层中的有限厚的砂岩,如图 1-8(b)所示。此时,砂岩层处的自然电位异常幅度不等于 SSP,我们用 ΔU_{sp} 表示,一般 $\Delta U_{sp} < \text{SSP}$ 值。我们令自然电流 I 所流经的井身、砂岩、泥岩各段电阻分别是 ρ_m 、 ρ_{sd} 、 ρ_{sh} ,按图 1-8(b)中等效电路,由 Kirchhoff 定律得:

$$\text{SSP} = I\rho_m + I\rho_{sd} + I\rho_{sh}$$

自然电流为:

$$I = \frac{\text{SSP}}{\rho_m + \rho_{sd} + \rho_{sh}} \quad (1-11)$$

在有限厚的砂岩井段的自然电位幅度 ΔU_{sp} 定义为自然电流 I 在流经泥浆等效电阻 ρ_m 上的电位降,即 $\Delta U_{sp} = I\rho_m$,将式(1-8)代入得:

$$\Delta U_{sp} = I\rho_m = \frac{\text{SSP} \cdot \rho_m}{\rho_m + \rho_{sd} + \rho_{sh}}$$

整理得:

$$\frac{\Delta U_{sp}}{\text{SSP}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{sd} + \rho_{sh}}{\rho_m}} \quad (1-12)$$

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 $\rho_m \gg \rho_{sd}$; $\rho_m \gg \rho_{sh}$ 。因此 $\Delta U_{sp} \approx \text{SSP}$ 。而对于薄层 ΔU_{sp} 比 SSP 小得多。

必须指出,自然界中的岩层大部分不是纯净的。对于泥质含量不同的岩层,它的阳离子交换能力 Q_v 不同,所产生的 E_{da} 也各不相同。对具有不同 Q_v 值的岩层的 E_{da} 和 R_{mf}/R_w 的定量关系,见图 1-9(a)、(b)。两张图版制作时,选用了不同地层水电阻率。图 1-9(a)中 $R_w = 0.045 \Omega \cdot \text{m}$,图 1-9(b)中 $R_w = 0.1 \Omega \cdot \text{m}$ 。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。

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} 。在这两岩层交界面处的自然电位 ΔU_{sp} 由下式给出:

$$\begin{aligned} \Delta U_{sp} &= E_{da} - E_{da2} \\ &= (K_{da1} - K_{da2}) \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-13) \end{aligned}$$

当为巨厚地层时, ΔU_{sp} 叫静自然电位。

如图 1-10 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°C 时,得到:

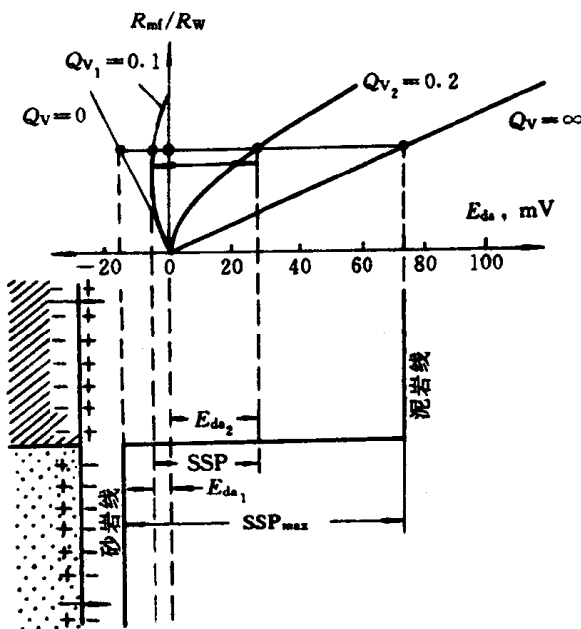


图 1-10 不同 Q_v 岩层的自然电位幅度示意图

$$SSP_{max} = [-58 + (-11.6)] \lg \frac{R_{mf}}{R_w} = -69.6 \lg \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (1-14)$$

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

$$SSP_{max} = 0$$

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(1-14)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地层的岩性。

根据纯砂岩地层模型, 上、下围岩(泥岩)足够厚, 对6种厚度不同的砂岩目的层进行理论计算得到一组自然电位理论曲线, 如图1-11所示, 它是一组曲线号码为 h/d (地层厚度/井径) 的 $\Delta U_{sp}/|SSP|$ 随深度变化的关系曲线。其特点: 曲线对地层中点对称; 厚地层 ($h > 4d$, d 为井径) 的自然电位曲线幅度值近似等于静自然电位

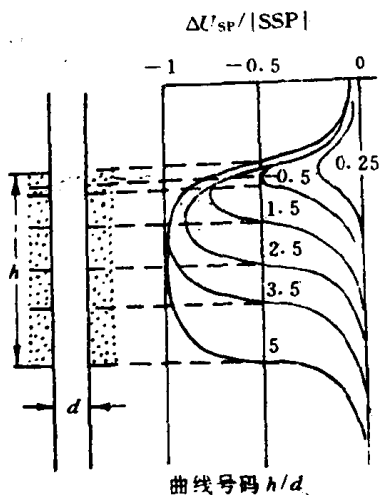


图 1-11 自然电位测井理论曲线

位, 且曲线的半幅点深度正对着地层界面深度, 参见曲线号码 $h/d = 5$ 的曲线, 与横坐标 $\Delta U_{sp}/|SSP| = 0.5$ 的直线相交的两点(即半幅点)正好和对应地层的界面深度一致。随着地层厚度的变薄, 对应界面和自然电位幅度值离开半幅点向曲线的峰值移动; 地层中点取得曲线幅度的最大值, 随着地层变薄极大值随之减小 ($\Delta U_{sp}/|SSP|$ 值接近零), 且曲线变得平缓。

SP 实测曲线与理论曲线的特点基本相同, 但由于测井时受井内环境及多方面因素的影响, SP 实测曲线不如理论曲线变化那么规则, 参见图 1-12 内虚线对应砂岩井段的部分。使用 SP 曲线时应注意: 它没有绝对零点, 而是以大段泥岩处的 SP 曲线作基线; 曲线上方标有带极性符号(+、-)的横向比例尺, 它与曲线的相对位置不影响自然电位幅度 ΔU_{sp} 的读数。自然电位幅度 ΔU_{sp} 的读数是基线到曲线异常极大值之间的宽度用横向比例尺换算出的毫伏数。

在砂/泥岩剖面中, 钻井一般用淡水泥浆 ($C_w > C_{mf}$)。此种情况下, 对着砂岩渗透层井段 SP 曲线出现明显的负异常, 即离开基线向横向比例尺标有“-”号方向偏移的曲线变化; 如果在盐水泥浆井中 ($C_w < C_{mf}$), 则渗透层井段会出现正异常, 即从基线向横向比例尺上标有“+”号方向偏移的曲线变化。因此, SP 曲线是识别渗透层的重要测井资料之一。

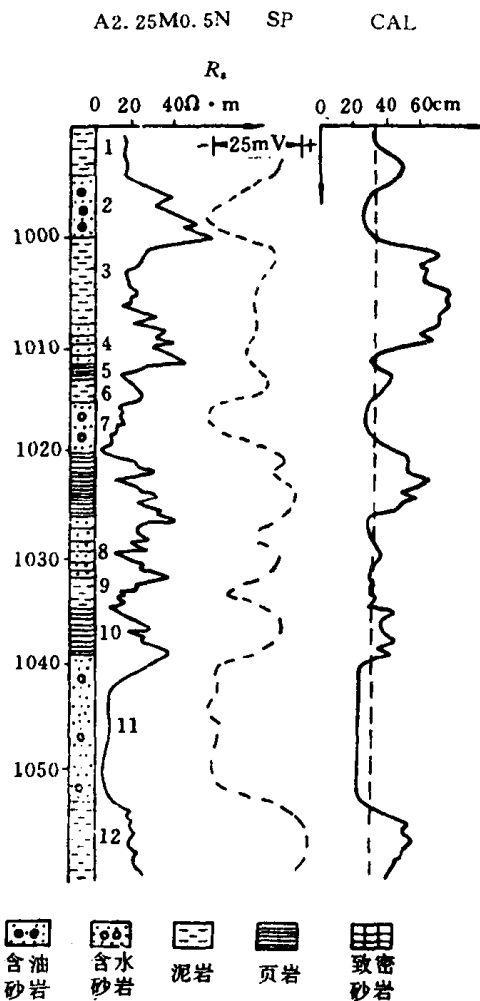


图 1-12 自然电位测井曲线实例