

# 一种新的石油储层高分辨自然电位测井电极系

王伟男<sup>1,2</sup>, 余钦范<sup>1</sup>, 丁柱<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083, wangwn005@cnpc.com.cn;

2. 大庆钻探工程公司测井一公司, 大庆 163412)

**摘要:** 针对目前使用的自然电位测井电极系仍采用原始的地面参考电极, 存在测量干扰大、测井曲线分辨率低等长期未能解决的问题, 设计一种井下参考电极的高分辨自然电位测井电极系, 电极系采用阵列式结构, 电极之间彼此绝缘, 仪器在上提过程中, 通过单片机自动识别经过泥岩地层的参考电极, 然后以泥岩电位为参考电位进行自然电位测量. 现场试验结果令人满意, 其抗干扰能力和曲线分辨率均较原有的自然电位测井电极系明显提高.

**关键词:** 自然电位; 测井; 分辨率; 电极系

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)08-1332-04

## A new kind of high-resolution SP logging electrode array for oil reservoir

WANG Wei-nan<sup>1,2</sup>, YU Qin-fan<sup>1</sup>, DING Zhu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Geo-detection, Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China, wangwn005@cnpc.com.cn; 2. The First Well Logging Company of Daqing Drilling & Exploration Group, Daqing 163412, China)

**Abstract:** Aimed at the problems of high interference in measurement and low logging curve resolution for the logging electrode array used at present which still adopts original surface reference electrode, this paper designs a high-resolution SP logging electrode array of downhole reference electrode. The electrode array adopts array structure. It is insulative between the electrodes each other. The tool identifies the reference electrode of shaly formation automatically through singlechip when it is lifted, then it takes shale potential as the reference potential to measure SP. The field test results are satisfactory. The capacity of resisting disturbance and curve resolution are improved obviously compared with original SP logging electrode array.

**Key words:** spontaneous potential; well logging; resolution; electrode array

原有的自然电位测井方法采用地面参考电极, 通过大地形成回路, 记录井下连续移动的测量电极 M 相对于地面参考电极 N 之间的电位变化<sup>[1]</sup>, 如图 1 所示. 这种测量方法分辨率低, 信号幅度受围岩影响大, 而且易受井场电磁场干扰.

近年来, 为了解决上述问题, W. J. Maciejewski 等人的方法是采用两个相互绝缘的井下电极, 分别相对于地面参考电极进行测量, 然后将同一深度的两次测量结果进行平均处理作为自然电位值<sup>[2]</sup>. 这种方法仍然采用地面参考电极, 与原有

的测井方法没有本质区别. 前苏联有人采用井下梯度电极进行微分测量, 然后作积分处理的方法测量裸眼井中的自然电位, 以期提高测井曲线的分辨率<sup>[3]</sup>. 这种方法需要有井下积分参考点, 如果参考点在电位稳定的泥岩上, 测量结果是正确的, 否则还是梯度电位; 此外, 这种测量方法干扰大. 国内江汉测井研究所曾采用井下氯化银电极和地面参考电极的方法测量自然电位, 这种方法对于提高井下电极电位的稳定性方面应该是有益处的, 缺点是氯化银电极在测井过程中容易损坏. 国内还有人试验过贴井壁自然电位测井方法, 这种方法从电场强度的角度看对测量是有利的, 但需要解决摩擦电位、接触电位和震电电位的干扰问题. 由于在资料采集方面存在诸多的问题, 近年

收稿日期: 2009-10-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49894190/43).

作者简介: 王伟男(1956—), 男, 博士研究生;

余钦范(1936—), 男, 教授, 博士生导师.

来在数据资料处理方面做了大量工作<sup>[4-7]</sup>. 迄今为止,还没有一种切实可行的方法,大量的研究工作仍在进行中.

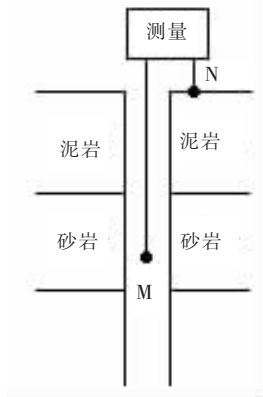


图1 原有的自然电位测井原理示意图

## 1 电极系结构及工作原理

### 1.1 电极系结构及工作原理

本文给出的适用于薄差储层测井的高分辨率自然电位测井电极系如图2所示. 电极系中有一个测量电极 M, 有若干个参考电极(根据理论考察结果采用 15 个参考电极  $N_1 \sim N_{15}$ , 电极之间距离为 1 m), 电极之间相互绝缘. 该电极系采用井下阵列式结构, 仪器通过单片机自动识别经过泥岩地层的参考电极, 然后以泥岩电位为参考电位进行自然电位测量. 因为泥岩地层的自然电位值是相对稳定的, 泥质砂岩地层的自然电位测井曲线反映的是不同地层相对于泥岩地层的电位变化. 井下仪器由单片计算机控制多路选择开关, 依次记录测量电极 M 相对于参考电极  $N_1 \sim N_{15}$  间的电位差, 经比较选出经过泥岩地层的电极  $N_i$ , 测量并记录 M 与  $N_i$  之间的电位差, 即可得到该记录点相对于泥岩地层的自然电位值; 在电缆上提过程中连续测量, 即可得到地层的自然电位变化曲线. 由于电极系放到井下, 缩短了测量电极与参考电极之间的距离, 地层之间的相互影响减小了, 能使测井曲线的纵向分辨率得到提高; 取消了地面参考电极以后, 可以增强仪器的抗干扰能力.

### 1.2 泥岩选择依据

泥岩的选择依据是实验室分析结果<sup>[8]</sup>. 根据实验室的岩心分析结果, 泥质砂岩地层的自然电位主要是扩散吸附电位, 纯砂岩地层只能形成扩散电位, 其扩散电位系数在 18 °C、NaCl 溶液条件下是 -11.6 mV; 纯泥岩地层只能形成吸附电位, 其吸附电位系数是 59 mV; 其他泥质砂岩地层既有扩散电位又有吸附电位, 其扩散吸附电位系数

值介于 -11.6 mV 和 59 mV 之间. 只要电极系足够长, 电极足够多, 就一定有经过泥岩地层的电极, 而此时测量电极 M 与经过泥岩地层的电极  $N_i$  之间的电位差一定最小, 选择  $N_i$  为参考电极, 就可测得实际地层的自然电位值.

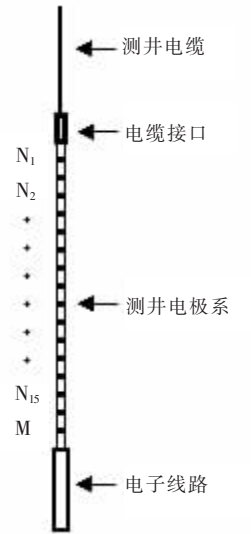


图2 新型自然电位测井电极系示意图

## 2 电极系探测特性分析

### 2.1 径向探测深度分析

关于自然电位测井的探测深度问题, 一直没有一个统一认识. 为解决这一问题, 需借助于作者提出的一个新的裸眼井中自然电场分布模型<sup>[9]</sup>.

在只考虑扩散吸附电位的情况下, 传统的观点认为地层的自然电场分布在井剖面上(图3(a)), 这种模型显然不符合电化学理论. 作者提出的新的裸眼井中自然电场分布模型能较好地解释一些理论上的问题, 见图3(b). 新模型认为, 地层的自然电场分布在泥浆侵入带中, 沿泥浆侵入方向形成电位梯度, 越接近井剖面电位越高, 在侵入带末端电位消失.

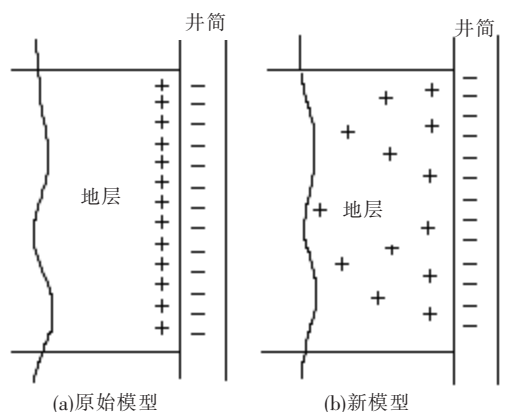


图3 裸眼井剖面的自然电场分布模型

根据静电场理论,沿泥浆侵入方向的电位梯度为

$$dU(r) = K(r) \frac{dC(r)}{C(r)} \tag{1}$$

对式(1)两端积分得

$$\int_0^{r_n} dU(r) = \int_0^{r_n} K(r) \frac{dC(r)}{C(r)} \tag{2}$$

新模型的扩散吸附电位系数变化如图 4 所示.

其中扩散吸附电位系数

$$K = \begin{cases} K_1, 0 < r \leq r_1, \\ K_2, r_1 < r \leq r_2, \\ K_3, r_2 < r \leq r_3, \\ \dots \\ K_n, r_{n-1} < r \leq r_n. \end{cases}$$

矿化度分布

$$C(r) = \begin{cases} C_m, r = 0, \\ C_{w1}, r = r_1, \\ C_{w2}, r = r_2, \\ \dots \\ C_w, r = r \end{cases}$$

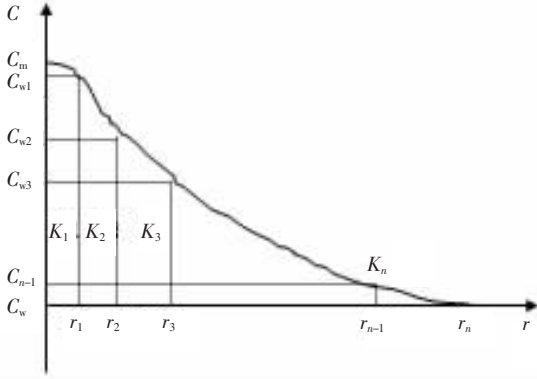


图 4 沿径向分布的矿化度和扩散吸附电位系数

①当地层径向非均质时,假设在某一非常小的局部区域内扩散吸附电位系数为常数,并且在泥浆侵入带末端  $C_{wn} = C_w$ ,对式(2)进行积分得

$$U(r) - U(0) = K_1 \log \frac{C_{w1}}{C_m} + K_2 \log \frac{C_{w2}}{C_{w1}} + \dots + K_n \log \frac{C_w}{C_{w_{n-1}}}$$

式中:  $U(r)$ 、 $U(0)$  分别为侵入带末端和泥浆与地层接触面上的电位, mV;  $K$  为扩散吸附电位系数, mV;  $C_w$  和  $C_m$  分别代表地层水和泥浆滤液的离子质量浓度, g/L.

根据新理论模型,侵入带半径  $r_n$  处的  $U(r) = 0$ ,有

$$U(0) = - \left[ K_1 \log \frac{C_{w1}}{C_m} + K_2 \log \frac{C_{w2}}{C_{w1}} + \dots + K_n \log \frac{C_w}{C_{w_{n-1}}} \right] \tag{3}$$

②当地层径向均质时,扩散吸附电位系数为常数,即

$$K_1 = K_2 = K_3 = \dots K_n = K.$$

则式(3)变为

$$U(0) = - K \log \frac{C_w}{C_m} \tag{4}$$

式(4)就是著名的 Nernst 公式.

裸眼井地层中的扩散吸附电位,是因为侵入带中正负离子的扩散速度不同而产生局部离子富集、形成离子势垒,以及离子的吸附作用所致;而离子的扩散和吸附都发生在泥浆侵入带中,在侵入带以外的地层中没有离子扩散,也没有能够形成电位的离子吸附,也就没有电位产生,因此,自然电位测井的探测深度就是泥浆滤液的侵入深度.

### 2.2 纵向分辨率分析

关于自然电位测井的纵向分辨率,也没有一个公认的评价方法.根据文献[10]给出的分析方法,地层的自然电位与砂岩和泥岩地层的电阻成反比关系<sup>[10]</sup>,即

$$U_{sp} \propto \frac{R_m}{R_m + R_{ad} + R_{sh}} \tag{5}$$

式中:  $U_{sp}$  为地层的自然电位, mV;  $R_m$ 、 $R_{ad}$ 、 $R_{sh}$  分别表示自然电流流经泥浆、砂岩和泥岩层段的电阻,  $\Omega$ .

由式(5)知,地层层段越长,其电阻就越大、自然电位幅度值就越小.本文给出的高分辨率自然电位测井电极系全部放在井下,无地面参考电极,测量电极与参考电极之间的距离小于 16 m,远小于原有的自然电位测井电极系中井下测量电极与地面参考电极之间的距离,因此,纵向分辨率有了明显提高.

经 20 多口井的现场试验资料证明,该电极系的性能、指标明显优于原有的自然电位测井方法.根据图 5 的岩性剖面资料定性分析,高分辨率自然电位测井曲线(高分辨 SP)的纵向分辨率能达到 0.2 m、对 0.1 m 的地层也有显示,可以用来划分薄差储层;而且曲线幅度变化与岩性剖面吻合,说明能真实地反应地层的自然电位信息,可以用来划分岩性、确定渗透性储层.而原有的自然电位测井曲线(CSU-SP)对薄层几乎没有显示,近似一条直线.该电极系已经取得国家发明专利<sup>[11]</sup>.

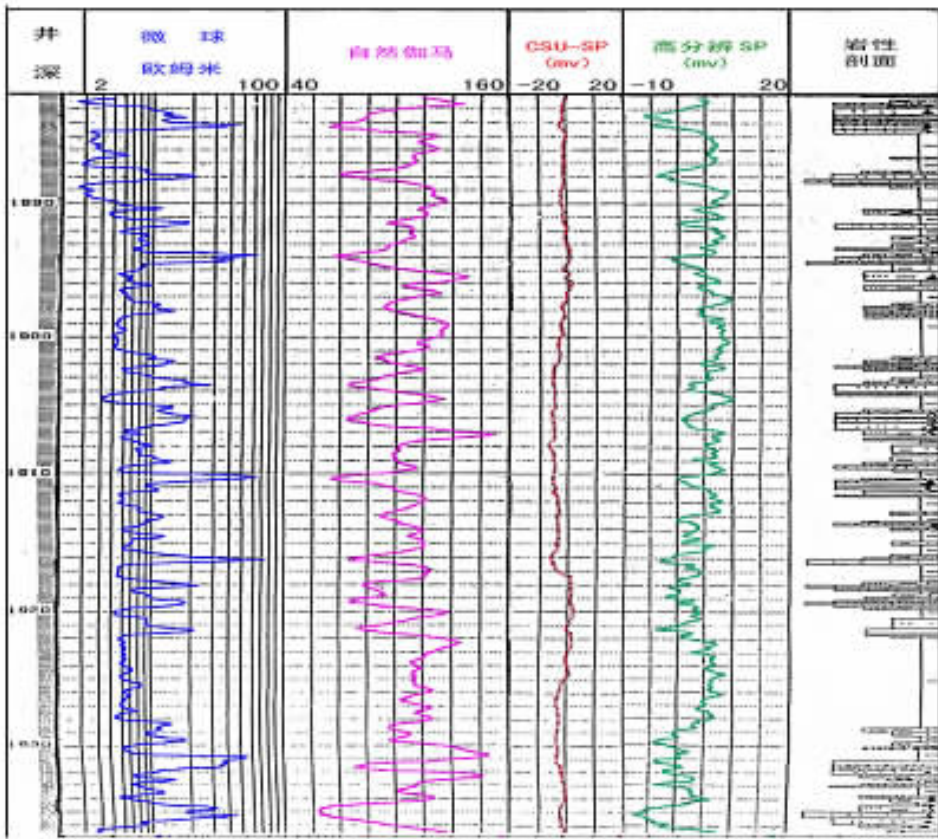


图5 高分辨率自然电位测井曲线图

### 3 结 论

1) 高分辨率自然电位测井电极系采用井下阵列式结构,仪器通过单片机自动识别泥岩地层,然后以泥岩电位为参考电位进行自然电位测量。由于缩短了测量电极与参考电极之间的距离,地层之间的相互影响减小了,测井曲线的纵向分辨率得到明显提高;取消了地面参考电极后,增强了仪器的抗干扰能力。

2) 通过理论分析得出,该电极系的径向探测深度为泥浆滤液侵入深度;经与岩性剖面资料对比分析,该电极系的定性纵向分辨率为0.2 m。

3) 高分辨率自然电位测井曲线能真实地反应地层的自然电位信息,可以用于划分岩性、识别薄差储层、确定渗透性地层。

### 参考文献:

- [1] 楚泽涵. 地球物理测井方法与原理[M]. 北京:石油工业出版社,2007:2-25.
- [2] MACIEJEWSKIL W J. Method and Apparatus for Determining the Spontaneous Earth Potential Log from Down-hole Gradient Measurements; U. S,4523148[P]. 1985-11-6.
- [3] БОРИСЕНКО Г Ф И ДР. Повышение информативности метода потенциаловсамопроизвольной полризации при

измерении производных естественногоэлектрического поля [J]. ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕЛКА,1993(1):138-143.

- [4] 王斌,范晓敏. 用有限差分法模拟自然电位测井的侵入带影响[J]. 测井技术,2008,32(2):164-168.
- [5] SALAZAR J M, WANG Gongli. Combined simulation and inversion of SP and resistivity logs for the estimation of connate water resistivity and archie's cementation exponent[C]//U. S. SPWLA 48th Annual Logging Symposium. 2007; Paper H.
- [6] LI Shanjun, LIU Ce. Joint inversion of SP and dual laterolog/dual induction data in 2D formations [C]//U. S. SPWLA 48th Annual Logging Symposium. 2007; Paper ZZ.
- [7] BASSIOUNI Z A. Development and field applications of shaly sand petrophysical models part II: Spontaneous potential[J]. SPE, 20387, 1990.
- [8] QU Xiancai, WANG Weinan. Experimental investigation on electrical properties of the formation containing laumonic [C]//'94(Xi'an)Transaction of International Symposium on Well Logging. BWLS of SPWLA,1994:4-6.
- [9] 王伟男. 裸眼井自然电场分布规律研究[J]. 测井技术,2006,30(3):211-212.
- [10] 高效增. 测井垂直分辨率探讨[J]. 测井技术,1993,17(1):54-64.
- [11] 王伟男,姜亦忠. 一种高分辨率自然电位测井方法及测井仪器:中国,CN 200964853[P]. 2007-10-24.

(编辑 刘 彤)