

冀东油田电化学测井解释模型的建立及应用

周灿灿, 周凤鸣, 马越蛟, 程相志, 曾玉生

(中国石油冀东油田勘探开发研究院, 河北唐山 063004)

摘要: 自然电位是地层在无外界极化状态下由于电化学反应产生的电位, 其大小主要取决于地层水离子浓度和阳离子交换量。利用激发极化测井的自然电位曲线和极化率曲线, 可以逐层计算出地层阳离子交换量及地层水离子浓度, 从而可以求解地层水电阻率, 应用 W- S 模型计算泥质砂岩储层的含油饱和度。冀东油田通过进行大量的岩芯测试, 采用最优化方法, 取得了适合于本区地质解释的待定参数值。实际勘探结果证实, 冀东油田的电化学测井解释模式与实际地质情况基本一致。

关键词: 自然电位; 极化率; 阳离子交换量; 解释模型; 冀东油田

第一作者简介: 周灿灿, 男, 39 岁, 高级工程师, 石油测井

中图分类号: P631. 3 文献标识码: A

W- S 模型是计算泥质砂岩储层含油饱和度的有效公式之一, 阳离子交换量 Q_v 及地层水电阻率 R_w (地层水离子浓度) 是模型中的两个关键参数, 这两个参数与电化学测井 (自然电位和激发极化测井等) 有着极其密切的关系。因此, 研究和利用电化学测井资料求解地层水离子浓度和阳离子交换量的方法是可能和必要的。近几年, 冀东油田进行了大量岩芯样品的极化率和自然电位的测量实验, 以实验数据为基础, 以理论模型为依据, 建立了自然电位与极化率的理论解释模型。

1 理论解释模型

1.1 自然电位

自然电位是地层在无外界极化状态下由于电化学反应产生的电位, 其大小主要取决于地层水离子浓度和阳离子交换量。

泥质砂岩地层中粘土颗粒与孔道内地层水接触后, 粘土表面的负电荷吸附地层水的阳离子, 使孔壁处的阳离子浓度大于自由水离子浓度, 形成离子偶电层。这样粘土表面就可以形成两种电动势, 即由浓度差形成的扩散电动势 E_c 和偶电层形成的吸附电动势 E_z 。在地层导电金属含量可忽略的情况下, 岩样实验测得的薄膜电动势 E , 应由岩样内外溶液离子浓度差形成的扩散电动势 E_c 和偶电层形成的吸附电动势 E_z 组成^[1, 2], 即

$$E = E_c + E_z$$

据电化学理论, 扩散电动势和吸附电动势的理论表达式为

$$E_c = \pm k_0 \frac{RT}{F} \times \frac{V_a - V_k}{V_a + V_k} \times \ln \frac{(V_a + V_k) \sqrt{Q_{v1}^2 + 4C_w^2} - (V_a - V_k) Q_{v1}}{(V_a + V_k) \sqrt{Q_{v2}^2 + 4C_{mf}^2} - (V_a - V_k) Q_{v2}}$$

$$E_z = k_2 (\Phi_0 - \Phi_m)$$

其中, $\Phi_0 = \frac{2RT}{F} \ln(Q_{v1} + \sqrt{Q_{v1}^2 + 1})$

$$\Phi_m = \frac{2RT}{F} \operatorname{arth}(e^{-\Phi_P} \sqrt{F_w} \frac{F \Phi_0}{4RT})$$

$$Q_{v1} = k_1 \frac{Q_v}{\sqrt{C_w}}$$

$$Q_{v2} = k_1 \frac{Q_v}{\sqrt{C_{mf}}}$$

式中 E 为岩芯测量自然电动势, mV; R 为气体常数, $8.313 \text{ J} \cdot \text{eq}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为绝对温度, K; F 为法拉第常数, $96.5 \text{ C} \cdot \text{meq}^{-1}$; V_a, V_k 为阴、阳离子迁移率, 分别为 6.55 和 $4.35 \text{ m}^2 \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{meq}^{-1}$; Φ 为孔隙度; C_w, C_{mf} 为岩样内、外离子浓度, meq/ml; Q_v 为岩样测得的阳离子交换量, meq/ml; k_0, k_1, k_2, P, n 为待定系数。

R, T, F, V_a, V_k 是常数, $E, Q_v, \Phi, C_w, C_{mf}$ 可通过岩芯测试获得。通过大量的岩芯实验测试数据, 利用最优化方法确定的冀东油田的待定参数值为 $k_0 = 1.097 459, k_1 = 208 419.2, k_2 = 65.832 29, P = 8.088 224, n = 1.991 211$ 。

应用这套理论解释模型,在地层流动电位可忽略的情况下,井下自然电位(SP)^[3]可由下式表示

$$SP = E_c(C_{mf}, C_w, Q_v) + E_z(C_{mf}, Q_v) - E_z(C_w, Q_v) + E_z(C_w, Q_{vsh}) - E_z(C_{mf}, Q_{vsh})$$

式中 $E_c(C_{mf}, C_w, Q_v)$ 为地层水和泥浆滤液间的离子扩散电动势; $E_z(C_{mf}, Q_v)$ 为泥浆滤液离子在地层井壁形成的吸附电动势; $E_z(C_w, Q_v)$ 为地层水离子在地层井壁形成的吸附电动势; $E_z(C_{mf}, Q_{vsh})$ 为泥浆滤液离子在泥岩(围岩)井壁形成的吸附电动势; $E_z(C_w, Q_{vsh})$ 为地层水离子在地层与泥岩(围岩)界面形成的吸附电动势; Q_{vsh} 为泥岩(围岩)阳离子交换量; C_w, C_{mf} 分别为地层水、泥浆滤液离子浓度。将相应的电动势表达式代入该式即可计算井下自然电位。

1.2 极化率

与自然电位一样,极化率的大小也同样受地层水离子浓度和阳离子交换量的制约。

地层极化后,其极化的效果一方面改变了孔隙中离子浓度的局部变化,造成离子的局部积累,形成所谓“浓差电位”,另一方面产生偶电层形变,破坏偶电层原来的离子分布规律,形成所谓“偶电层形变电位”。当外电场断掉后,由于离子扩散作用,离子浓度梯度逐渐消失,恢复到原始离子分布状态,产生二次衰减电位。对于砂泥岩沉积地层,可忽略其金属极化电位,则极化电位 U_{ip} 应由呈衰减状态的浓差电位 U_c 和偶电层形变电位 U_z 组成^[2],即

$$U_{ip} = U_c + U_z$$

于是极化率为

$$\eta = \frac{U_{ip}}{U_p} = \frac{U_c}{U_p} + \frac{U_z}{U_p} = \eta_c + \eta_k$$

其中, U_p 为激发电场电位。

两种极化电位的理论描述类似于薄膜电位的扩散电位和吸附电位原理,不同之处只是离子浓度的不同,因此,两种极化率的理论表达式可描述为

$$\eta_c = k_o \frac{RT}{F} \times \frac{V_a - V_k}{V_a + V_k} \times \ln \frac{(V_a + V_k) \sqrt{Q_{v3}^2 + 4C_0^2} - (V_a - V_k) Q_{v3}}{(V_a + V_k) \sqrt{Q_{v1}^2 + 4C_w^2} - (V_a - V_k) Q_{v1}}$$

$$\eta_k = k_3 (\Phi_0 - \Phi_m)$$

$$\text{其中, } \Phi_0 = \frac{2RT}{F} \ln(Q_{v3} + \sqrt{Q_{v3}^2 + 1})$$

$$\Phi_m = \frac{2RT}{F} \operatorname{arth}(e^{-\Phi_p} \sqrt{C_w} \operatorname{th} \frac{F \Phi_0}{4RT})$$

$$Q_{v1} = k_2 \frac{Q_v}{\sqrt{C_w}}$$

$$Q_{v3} = k_2 \frac{Q_v}{\sqrt{C_0}}$$

$$C_0 = \frac{k_1 Q_v^m}{C_w^L \Phi^\beta} + C_w$$

式中 η 为岩芯测量极化率; η_c, η_k 为浓差极化率、偶电层形变极化率; Φ 为孔隙度, Φ_0, Φ 为地层极化前、后的离子浓度, meq/ml; R 为气体常数, $8.313 \text{ J} \cdot \text{eq}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为绝对温度, K; F 为法拉第常数, $96.5 \text{ C} \cdot \text{meq}^{-1}$; V_a, V_k 为阴、阳离子迁移率, 分别为 6.55 和 $4.35 \text{ m}^2 \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{meq}^{-1}$; $k_0, k_1, k_2, k_3, L, \beta, m, n, P$ 为待定系数。

在这个理论模型中, R, T, F, V_a, V_k 是常数, η, Q_v, Φ, C_w 由岩芯测试获取。据大量的岩芯实验测试数据,通过最优化方法确定冀东油田待定系数 $k_0 = 0.8805923, k_1 = 17.2, k_2 = 1552.038, k_3 = 0.3466313, \beta = -1.965863, L = 5.7, P = 0.007, m = 5.197725, n = 0.3367$ 。

2 溶液离子浓度与阳离子交换量

自然电位和极化率理论解释模型,都包含了阳离子交换量(Q_v)和地层水离子浓度(C_w)两个未知参数。在常规测井与激发极化电位测井组合的前提下,采用两个模型联立就可求解出这两个未知参数。因此,利用激发极化测井的自然电位曲线和极化率曲线,可以逐层计算地层阳离子交换量 Q_v 及地层水离子浓度 C_w ,而对于求解出的地层水离子浓度又可通过一系列的经验关系式换算为地层水电阻率 R_w 。

由地层水离子浓度换算为地层水矿化度 SC_w 的公式为

$$SC_w = 1000 C_w FL$$

式中 FL 为地层水盐分的分子量,对于 NaCl 型地层水 FL 为 58.4 。

关于地层水电阻率 R_w 可通过下面一系列的理论和经验公式^[2]进行求取

$$\Lambda_t = [\Lambda_t^0 - \frac{B_2 \sqrt{C_w}}{1 + Ba \sqrt{C_w}}] [1 - \frac{B_1 \sqrt{C_w}}{1 + Ba \sqrt{C_w}} F(ka)]$$

$$F(ka) = 1 + 0.146446609 Ba \sqrt{C_w} + 0.014297739 (Ba)^2 C_w$$

$$\Lambda_1^0=76.34[1+0.0194(t-25)]+50.11[1+0.0208(t-25)]$$
$$B=0.8842944\times10^{-6}t^2+0.000151368t+0.32421052$$
$$B_1=2.31592\times10^{-6}t^2+0.000292631t+0.221178947$$
$$B_2=0.006187134t^2+1.107929825t+29.53567251$$
$$a=4e^{-(10^{-6}SC_w-0.001783293t+0.032099274)}$$
$$R_w=\frac{10}{\Lambda_tC_w}$$

式中 t 为温度, 由该地区的经验公式计算; R_w 为 NaCl 溶液电阻率; C_w 为地层水离子浓度; 其它均

为中间参数。

3 应用效果

对于地层水矿化度变化频繁的泥质砂岩地层, 利用自然电位和极化率理论解释模型逐层计算地层阳离子交换量 Q_v 和地层水矿化度 SC_w , 进而计算储层的含油饱和度, 评价储层的含油性。实践证明该模型的应用效果良好。

图 1 是利用自然电位和极化率两个模型进行数字处理的成果图, 图中的阳离子交换量和地层水矿化度是通过极化率和自然电位曲线进行优化处理后的结果, 储层含油饱和度(S_o)是在求得 Q_v 和 R_w 后, 通过 W-S 模型计算所得。

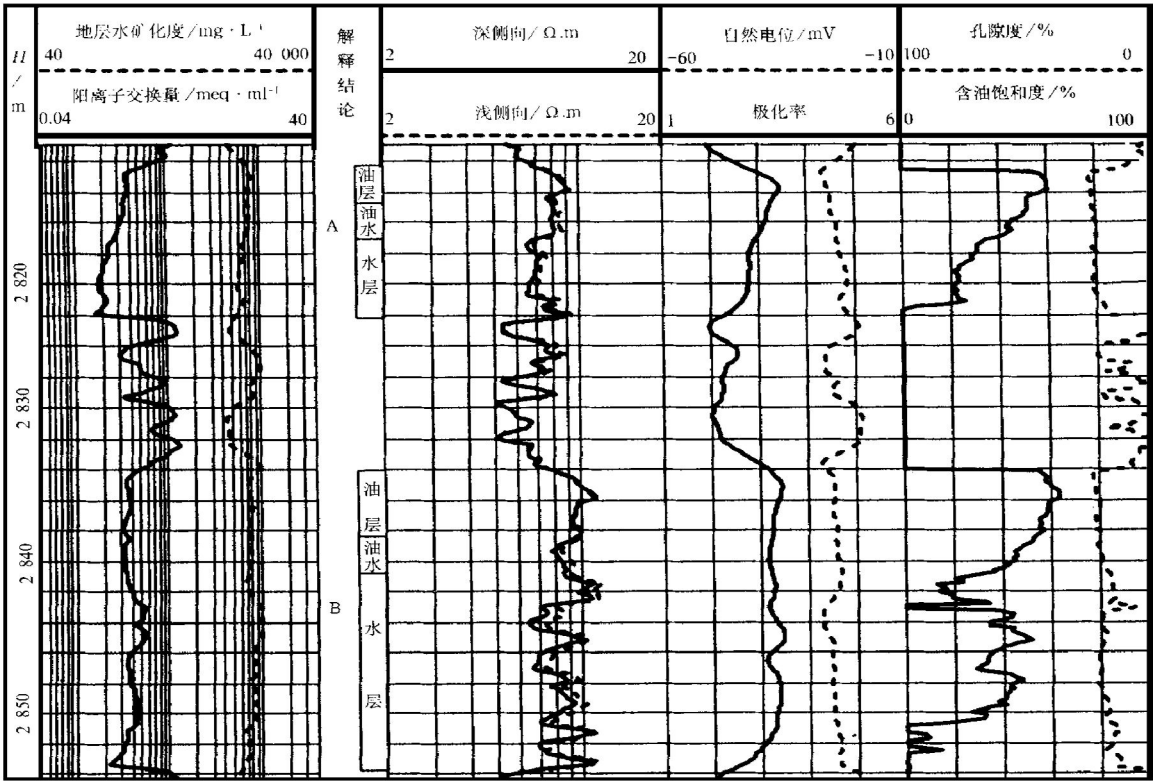


图 1 利用电化学资料计算储层阳离子交换量和地层水矿化度实例

Fig. 1 An example of cation exchange capacity and formation water mineralization using electrochemical data as calculaion

图中 A、B 两层均为钻井取芯层段, 利用自然电位和极化率解释模型进行优化处理得到的阳离子交换量 Q_v 及地层水矿化度 SC_w 与实际岩芯化验、分析资料吻合(表 1)。所以, 利用极化率和自然电位得到的 Q_v 和 SC_w 计算储层含油饱和度是比较合理的。计算结果表明: A、B 两层顶部的含油饱和度均在 53% 以上, 处于该地区油水区解释图版的油层区, 而两层底部的含油饱和度均在 40% 以下, 位于解释图版的水层区。因此, 测井综合解

释两层顶部都为油层, 而底部全为水层。A、B 两层的投产证实了测井解释是准确的。

表 1 计算值与分析值对比表

Table1. Comparison between calculated and analysed values				
参数	A 层		B 层	
	计算值	分析值	计算值	分析值
$\alpha/\%$	21.78	21.67	20.71	20.78
$Q_v/\text{meq. (ml)}^{-1}$	0.2~0.4	0.20~0.33	0.3~0.4	0.15~0.30
$SC_w/\text{mg. (ml)}^{-1}$	7 000~9 000	>7 200	7 000~10 000	>7 200

(下转第 326 页)

PROGRESS OF 2-D SEISMIC EXPLORATION IN ON SHORE, BEIPU REGION

Xie Zhan'an Zhang Guodong Fu Xingshen Fan Huilan
(Jidong Oilfield Company of China Petroleum, Tangshan, Hebei)

Abstract: The land 2-D seismic data of Beipu region in west Nanpu Sag is poor in quality. This is related to complicated surface condition and unique subsurface geological condition: 1. multi-intensive reflecting boundaries and multiple Tertiary waves are the main causes of the poor quality; 2. volcanic rocks of Tertiary System developed well and their shield action is intensive; 3. the major target horizon—the Dongying Formation is of poor lithological combination with less reflecting boundaries. So it is necessary to improve traditional seismic method, decrease random noise and increase the ratio of signal to noise. It has been proved by practice that better results could be obtained when the maximum longitudinal shift distance on Beipu land was regulated to 4 500 m, the shield times increased to 90, exiting depth set at 9 m and detected with 5 linear multiple geophone grouping.

Key Words: seismic wave; signal to noise ratio; method improvement; Beipu land

(上接第 320 页)

参 考 文 献

- 1 测井学编写组. 测井学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. 99~114
- 2 姜恩承, 王敬农, 孙宝佃, 等. 电化学测井理论研究及其应用的

新进展(上、下)[J]. 测井技术, 1999, 23(4, 5): 258~263, 327~333

- 3 周凤鸣, 马越蛟, 王峰轩. 冀东油田低电阻率油层测井解释方法研究[A]. 见: 李斌, 张启隆, 常学军, 等. 油田开发技术——冀东油田科技论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 1999. 340~347

ESTABLISHMENT AND APPLICATION OF INTERPRETATION MODEL FOR ELECTROCHEMICAL LOG IN JIDONG OILFIELD

Zhou Cancan Zhou Fengming Ma Yuejiao Cheng Xiangzhi Zeng Yusheng
(Research Institute of Oil Exploration and Development, Jidong Oilfield Company of China Petroleum, Tangshan, Hebei)

Abstract: Spontaneous potential is the potential resulted from formation's electrochemical reaction under non-polarization state, and its scale is determined by the density of formation water ions and the cation exchange capacity. The density of formation water ions and the capacity of cation exchange of each layer could be calculated according to spontaneous potential curve and polarizability curve of induced polarization log, and the formation water resistivity could be calculated. In addition, the oil saturation of argillaceous sandstone reservoir could also be calculated by using W-S model. Through large amount of core tests, geological interpretation parameters suitable for this area are obtained but remain to be determined. Actual hydrocarbon exploration results proved that the electrochemic log interpretation model is well coincident with practical geological condition.

Key words: spontaneous potential; polarizability; cation exchange capacity; interpretation model; Jidong Oilfield