文章编号:1673-5005(2017)02-0088-06 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.02.010

地层水矿化度对含水饱和度精度的影响分析

申辉林[1], 张立旭[1,2], 谢莹峰[1], 丁 磊[3], 黄洪奎[1], 史安平[1]

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580; 2. 中石化华北石油工程有限公司测井分公司,河南新乡 453000; 3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057)

摘要:精确确定地层混合液电阻率和阿尔奇参数是剩余油饱和度评价的核心技术,但是在注水开发过程中地层混合液电阻率是动态变化的,同时当地层水矿化度变化较大时,胶结指数 m 和饱和度指数 n 随地层水矿化度的增大而增大,影响了由阿尔奇公式确定的含水饱和度的计算精度。提出首先采用变倍数物质平衡法得到地层混合液电阻率,再利用 W-S 模型和阿尔奇公式建立动态 m、n 值计算公式,在求准一系列地质参数的基础上再进行含水饱和度的计算。结果表明:采用变倍数物质平衡法能够得到精度较高的混合液电阻率;采用随地层水矿化度变化的 m、n 值能够显著提高含水饱和度的计算精度。

关键词:地层水矿化度; 混合液电阻率; 阿尔奇公式; 含水饱和度

中图分类号:P 631.84 **文献标志码**:A

引用格式:申辉林,张立旭,谢莹峰,等. 地层水矿化度对含水饱和度精度的影响分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017,41(2):88-93.

SHEN Huilin, ZHANG Lixu, XIE Yingfeng, et al. Analysis for effect of variable formation water salinity on accuracy of water saturation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(2):88-93.

Analysis for effect of variable formation water salinity on accuracy of water saturation

SHEN Huilin[1], ZHANG Lixu[1,2], XIE Yingfeng[1], DING Lei[3], HUANG Hongkui[1], SHI Anping[1]

(1. *School of Geosciences in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *Well Logging Company of North China Petroleum Engineering Company of SINOPEC*, *Xinxiang* 453000, *China*;
3. *Zhangjiang Branch*, *China National Offshore Oil Corporation*, *Zhanjiang* 524057, *China*)

Abstract: Determining the formation resistivity of mixed fluid and the Archie's parameters precisely is the core technique for the evaluation of remaining oil saturation. During the water-flooding development, the formation resistivity of mixed fluid is however a dynamic parameter. In addition, when the water salinity varies in a wide range, the cementation exponent (m) and the saturation exponent (n) increase with increasing water salinity, affecting the accuracy in calculating water saturation using the Archie formula. In this paper, a method to obtain high-precision formation resistivity of mixed fluid is proposed using the theoretical simulation material balance method of variable multiple injected water. Based on the W-S model and Archie's formula, the formulas to calculate the dynamic cementation exponent (m) and saturation exponent (n) are derived, that potentially provides a series of geologic parameters for the calculation of water saturation. The study shows that the method can improve the accuracy of the resistivity of mixed liquid; and using dynamic values of the m and n can improve the accuracy of water saturation significantly.

Keywords: formation water salinity; formation resistivity of mixed fluid; Archie formula; water saturation

目前,中国大部分油田采用注水开发方式。由于注入水矿化度不同于原生地层水矿化度,并且原始地层水被注入水不断驱替,加上地层含水饱和度的不断增加,多种因素导致地层混合液电阻率和地

收稿日期:2016-03-25

基金项目:中海石油(中国)有限公司项目(YXKY-2014-ZJ-01)

作者简介:申辉林(1962-),男,副教授,硕士,研究方向为测井方法及测井资料综合评价。E-mail:hlshen@upc.edu.cn。

层电阻率发生变化[1-4]。研究表明,地层水矿化度的变化会引起岩电参数的变化,泥质岩石的视孔隙度指数 m_a 值和视饱和度指数 n_a 值随地层水矿化度升高而增大[5-6]。因此水驱过程中地层水矿化度的复杂变化是引起储层电性参数变化的直接原因,从而影响了由阿尔奇公式确定的含水饱和度的计算精度,有学者研究了利用变岩电参数饱和度解释模型获取更精确的含水饱和度[7-8]。笔者采用变倍数物质平衡法来获得较高精度的地层混合液电阻率,并应用 W-S 模型和阿尔奇公式建立动态 m、n 值计算公式,以此提高含水饱和度 S_w 的计算精度。

1　注入水对地层混合液电阻率的影响

岩石的导电性是孔隙中可动水与束缚水并联导电的结果,因此在注水初期地层混合液电阻率主要取决于孔隙中的原生水和束缚水,随着原始地层水不断被注入水驱替,地层混合液电阻率逐渐趋于注入水电阻率。

图 1(a)为模拟实际地层岩电实验中注入淡水条件下地层混合液电阻率 R_{wz} 随含水饱和度 S_w 的变化曲线。注淡水初期,R_{wz} 随 S_w 变化的幅度较小,随着原始地层水被注入水不断驱替,当出口端见水后,R_{wz} 随 S_w 增大而迅速增大,最后 R_{wz} 趋于稳定,等于注入水电阻率 R_{wj}。图 1(b)为注入盐水条件下地层混合液电阻率 R_{wz} 随含水饱和度 S_w 的变化曲线。如图 1 所示,注盐水初期 R_{wz} 随 S_w 增大而明显下降,随着原始地层水不断被注入水驱替,R_{wz} 的下降速度变缓慢,最后保持接近于注入水电阻率 R_{wj}。无论是在注淡水还是注盐水的条件下,注入水电阻率与原始地层水电阻率的差异越大,R_{wz} 随 S_w 的变化率就越大。

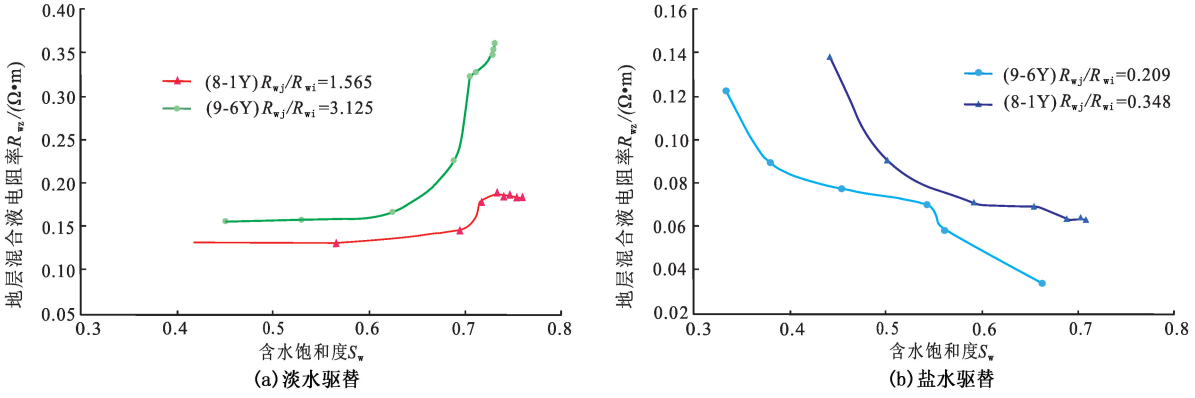


图 1　岩心 8-1Y 和岩心 9-6Y 不同注入水条件下混合液电阻率随含水饱和度变化规律

Fig. 1　Crossplot of R_{wz} and S_w under different water injection for cores 8-1Y and 9-6Y

能否准确确定地层混合液电阻率是提高储层含油饱和度计算精度的关键。若不考虑流体和岩石骨架的弹性变化影响,认为注入水是地层流体产出的直接原因,且假设注入水与原始地层水间进行了充分的混合和离子交换。根据流体并联导电原理,采用变倍数物质平衡理论模拟方法计算地层混合液电阻率[9]:

$$\frac{S_{wi}+k(S_w-S_{wi})}{R_{wz}}=\frac{S_{wi}}{R_{wi}}+\frac{k(S_w-S_{wi})}{R_{wj}}. \tag{1}$$

式中,S_{wi} 为束缚水饱和度;S_w 为当前含水饱和度;R_{wz} 为地层混合液电阻率;R_{wi} 为地层原生水电阻率,Ω·m;R_{wj} 为注入水电阻率,Ω·m;k 为注入水倍数。

岩心 8-1Y 水驱油试验参数为:地层水矿化度 $15\,640\times10^{-6}$,注入水矿化度 $45\,000\times10^{-6}$,地层水电阻率 0.131 Ω·m,注入水电阻率 0.061 Ω·m,岩样束缚水饱和度为 0.44。根据变倍数物质平衡法进行理论模拟,其理论模拟与水驱试验得到的地层水电阻率变化规律如图 2 所示,可见地层水电阻率理论模拟值与实验实测数据十分逼近。

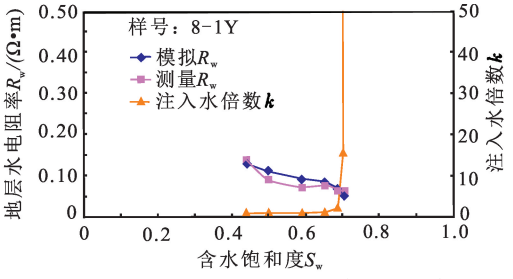


图 2　B 井理论模拟与实际测量的地层水电阻率随含水饱和度和注入水倍数变化关系

Fig. 2　Theoretical simulations and formation water resistivity of actual measurements of water saturation with water injection and fold change graph for well B

2　不同岩电参数对含水饱和度的影响

研究表明,利用阿尔奇公式计算泥质砂岩油层的含油饱和度时,孔隙指数 m 和饱和度指数 n 并非为固定值,它们同时会受到地层温度、压力、岩石润湿

性、地层水矿化度、阳离子交换容量等因素的影响。一般令 $a=1$、$b=1$,从而使得 m 值、n 值分别成为与各种地质因素相关的单一因素,易于确定其相关性。

$$S_w=[abR_w/(\varphi^m R_t)]^{1/n}. \tag{2}$$

式中,a、b 为岩性系数;R_w 为地层水电阻率,Ω · m;φ 为孔隙度;R_t 为地层电阻率,Ω · m。

表 1 为 W 油田 B 井 5 块岩样在 109 ℃、33 MPa 时的岩电参数及含水饱和度误差分析。由表 1 可以看出,胶结指数 m 和饱和度指数 n 均随地层水矿化度的增大而增大,即随着地层水电阻率的增大而减小。表 1 给出孔隙度指数 m 和饱和指数 n 的变化对含水饱和度计算值的影响。根据实际计算结果可知,岩性系数 a、b、孔隙度 φ、地层水电阻率和地层电阻率 R_t 一定时,当 m、n 值各自增大 5% 引起的含水饱和度 S_w 计算值相对误差均值分别为 10.37%、2.1%,m 值的变化对 S_w 的计算值影响较大;当 m、n 值同时增大 5% 引起的含水饱和度 S_w 计算值相对误差均值为 12.17%。在注水开发过程中,当地层水矿化度变化较大时,将导致 m、n 值随地层水矿化度变化较大,此时若采用阿尔奇公式计算地层含水饱和度,应考虑 m、n 值变化对含水饱和度计算精度的影响。

表 1 B 井 5 块岩样的岩电参数及含水饱和度误差分析

Table 1 Error analysis of rock electrical parameters and water saturation of five samples for well B

矿化度/10^{-6}	R_w/(Ω · m)	m	n	m 增加 5% 时 S_w 相对误差均值/%	n 增加 5% 时 S_w 相对误差均值/%	m、n 同时增加 5% 时 S_w 相对误差均值/%
45 000	0.061	1.988 0	1.778 0	9.60	2.10	11.50
15 000	0.131	1.884 9	1.586 6	10.50	2.30	12.50
5 000	0.366	1.838 1	1.486 7	11.00	1.90	12.50

3 地层水矿化度对 m、n 值影响的理论分析

W-S 模型假设泥质砂岩的导电性是自由电解液和阳离子交换并联导电的结果,Waxman 和 Smits[10] 根据大量泥质砂岩样品的实验室测量结果得到含水泥质砂岩电导率的经验方程:

$$C_0=\frac{1}{F^*}(BQ_v+C_w). \tag{3}$$

式中,C_w 为地层水电导率,s · m^{-1};F^* 为地层水电导率足够高时泥质砂岩的地层因素;B 为交换阳离子的当量电导率,s · cm^3/(mmol · m);Q_v 为泥质砂岩的阳离子交换容量,mmol/cm^3。

当地层水矿化度较低时,黏土表面的可交换阳离子几乎处于被吸附状态,产生的阳离子交换电导率很小。随着地层水矿化度的升高,黏土附加导电性明显增强;当地层水矿化度增加到一定值时,黏土附加导电性达到一个稳定值,此后泥质砂岩电导率呈线性增加。实验结果如图 3 所示。

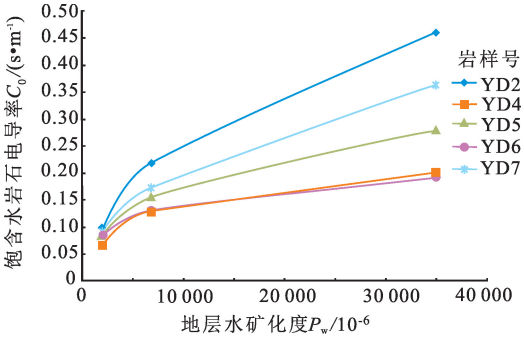


图 3 B 井 5 块岩样的饱含水岩石电导率与地层水矿化度的关系

Fig. 3 Relationship of water-saturated rock conductivity and formation water salinity of 5 rock samples of well B

由 W-S 模型得到含水泥质砂岩电导率的经验方程:

$$C_0=(BQ_v+C_w)/F^*=\varphi^{m0}(BQ_v+C_w). \tag{4}$$

根据阿尔奇公式:

$$F=R_0/R_w=C_w/C_0=1/\varphi^m. \tag{5}$$

联立式(4)、(5)经推导有:

$$m=m_0+\lg(1+BQ_v/C_w)/\lg\varphi, \tag{6}$$

$$B=3.83[1-0.83\exp(-C_w/2)]. \tag{7}$$

由 W-S 模型得到含油气泥质砂岩电导率的经验方程:

$$C_t=S_w^{n0}/F^*(BQ_v/S_w+C_w)=S_w^{n0}\,\varphi^{m0}(BQ_v/S_w+C_w). \tag{8}$$

根据阿尔奇公式:

$$I=R_t/R_0=C_0/C_t=1/S_w^n. \tag{9}$$

联立式(8)、(9)经推导有:

$$n=n_0+\lg\left(\frac{C_wS_w+BQ_v}{C_wS_w+S_wBQ_v}\right)\Big/\lg S_w. \tag{10}$$

式中,C_0、C_w 和 C_t 分别为 100% 含水泥质砂岩电导率、地层水电导率和含油气泥质砂岩电导率,s/m;m_0 和 n_0 为泥质砂岩消除了泥质附加导电性而与 C_w 无关的胶结指数和饱和度指数;m 和 n 为阿尔奇公式用于泥质砂岩时随 C_w 变化的胶结指数和饱和度指数,即动态胶结指数和饱和度指数;B 为阳离子交换的当量电导率,s · cm^3/(mmol · m);Q_v 为泥质砂岩的阳离子交换容量,mmol/cm^3。

由以上的理论推导过程可知,胶结指数 m 与饱和度指数 n 受到多种因素的影响,为探索泥质砂岩 m、n 与 C_w 之间的单相关关系,可根据实际地层情况将其他因素设为定值[11]。先令式(6)、式(10)中 $\varphi=0.18$、$S_w=0.08$、$Q_v=0.3$、$m_0=2$、$n_0=2$,理论数值模拟得到 m、n 值分别与单因素 C_w 的关系(表 2),并与实测值进行比较。如图 4 所示,B 井理论模拟得到的 m、n 值与实测值十分逼近,m、n 均随 C_w 的增大而增大,当增大到一定程度后趋于稳定。

表 2　W 油田 B 井 m、n 与 C_w 的理论分析关系

Table 2　Theoretical relation between of m, n and C_w for well B in oilfield W

C_w	m 值	n 值	C_w	m 值	n 值
0.10	1.28	1.12	7.63	1.92	1.64
0.50	1.65	1.28	9.00	1.93	1.67
1.00	1.74	1.35	11.00	1.94	1.71
2.00	1.80	1.42	13.00	1.95	1.74
2.73	1.83	1.46	15.00	1.96	1.76
3.00	1.84	1.48	16.39	1.96	1.78
5.00	1.89	1.56	17.00	1.96	1.78

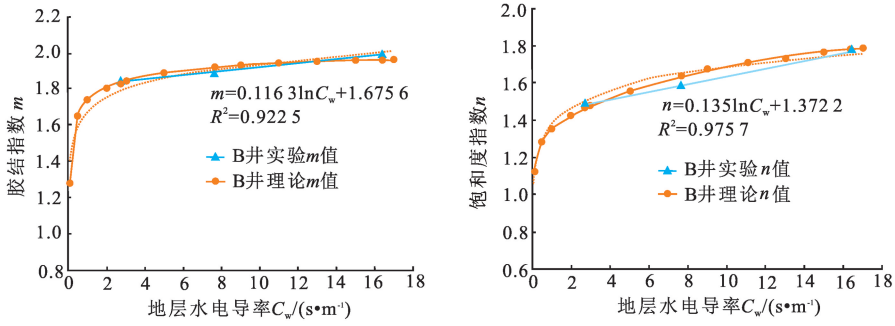


图 4　B 井地层水电导率 C_w 与实验测量和理论分析的胶结指数 m、饱和度指数 n 值关系

Fig. 4　Relationship of formation water resistivity C_w with cementation exponent m, saturation exponent n value of experimental measurements and theoretical values of well B

由此得到 m、n 关于地层水电导率 C_w 的经验拟合公式:

$$m=0.116\,3\ln C_w+1.675\,6, \tag{11}$$

$$n=0.135\ln C_w+1.372\,2. \tag{12}$$

油田注水开发过程中,注入水与原始地层水的混合导致地层水电导率 C_w 处于一个不断变化的过程,从而也引起了岩电参数 m、n 的变化。上文的论证可知,若采用阿尔奇公式计算地层含水饱和度,应考虑 m、n 值变化对含水饱和度计算值的影响。

对 W 油田 B 井岩心 8-1Y 采用阿尔奇公式来计算岩心的含水饱和度,其中根据 B 井实际地层水矿化度变化,分别采用由模型(11)、(12)确定的动态 m、n,而固定 m、n 取自常规岩电实验数据($m=1.945$、$n=2.024$),将上述两组参数计算的含水饱和度与岩心实测含水饱和度进行对比,对比结果如图 5 所示,采用动态 m、n 计算得到的含水饱和度精度更高。

以 W 油田 A4 井的实际处理结果为例,将利用动态和固定岩电参数 m、n 计算的含水饱和度与岩心分析含水饱和度进行对比,对比结果图6和表3所示。对比结果表明,动态 m、n 含水饱和度绝对误差的平均值为 0.057,固定 m、n 含水饱和度绝对误差的平均值为 0.093;采用动态 m、n 值计算的含水饱和度(图 6 中动态 m、n 含水饱和度)更接近于岩心分析含水饱和度,计算精度明显高于固定 m、n 计算的含水饱和度。

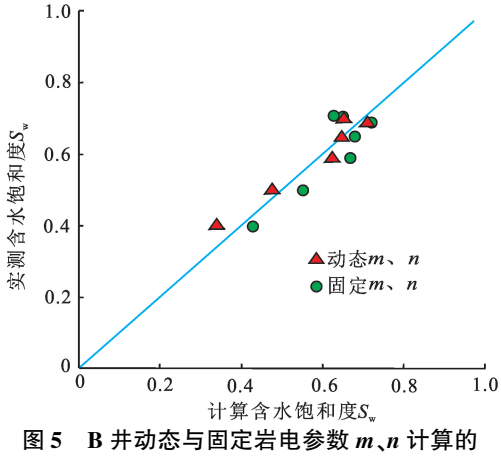


图 5　B 井动态与固定岩电参数 m、n 计算的 S_w 与实验测量值对比

Fig. 5　Comparison diagram of water saturation calculations calculated by dynamic and fixed m, n of well B

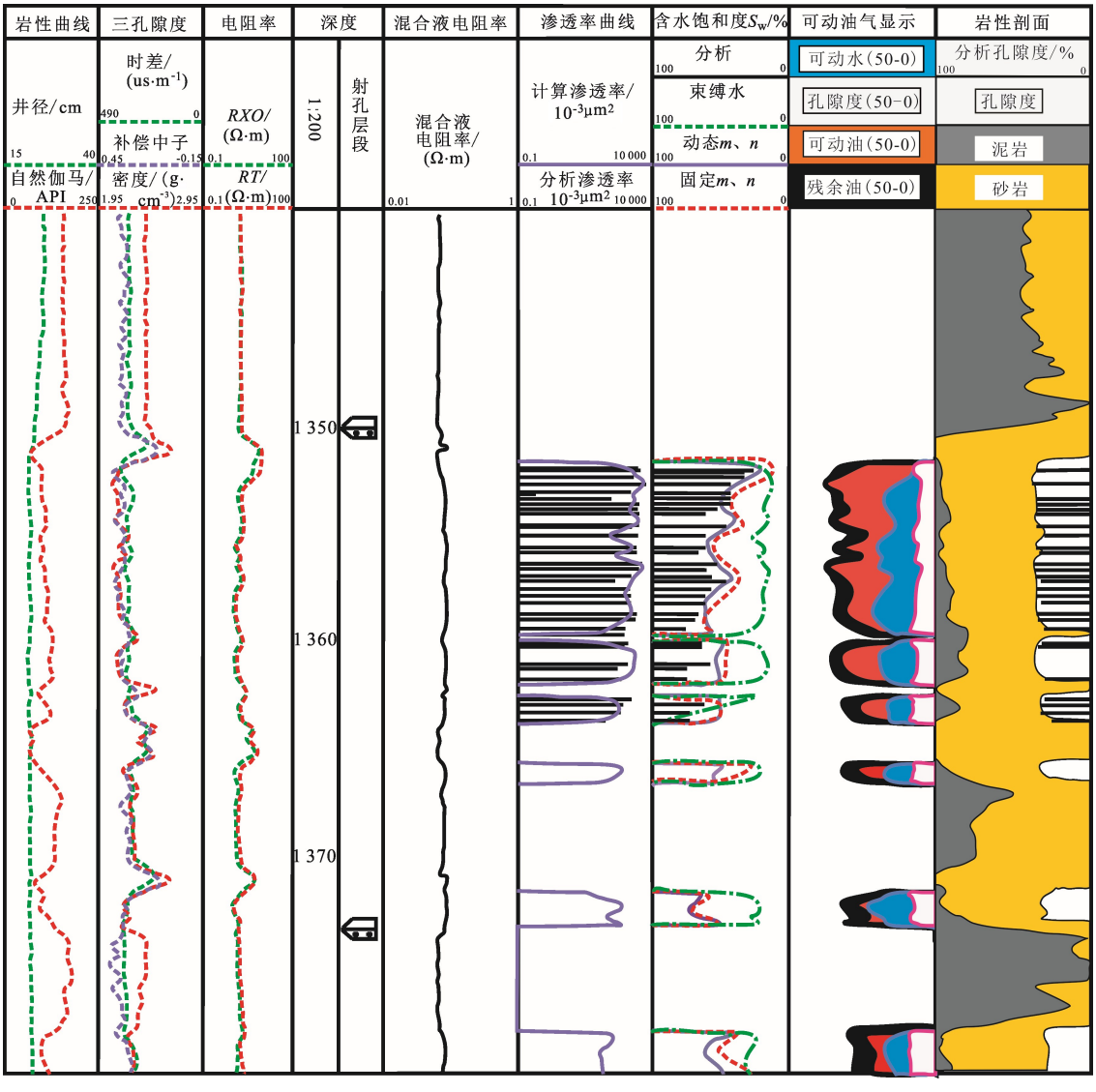


图 6　A4 井动态和固定 m、n 计算的含水饱和度对比

Fig. 6　Comparison diagram of water saturation calculations calculated by dynamic and fixed m, n of well A4

表 3　A4 井动态和固定 m、n 计算的含水饱和度误差分析

Table 3　Error analysis of calculating water saturation by dynamic and fixed m, n for well A4

序号	岩心深度/m	取心含水饱和度	测井深度/m	动态 m、n 含水饱和度	动态 m、n 含水饱和度绝对误差	固定 m、n 含水饱和度	固定 m、n 含水饱和度绝对误差
1	1 351.88	0.261 7	1 351.9	0.217 71	0.044	0.120 86	0.141
2	1 351.98	0.281 3	1 352.0	0.222 23	0.059	0.126 50	0.155
3	1 352.25	0.351 5	1 352.2	0.248 61	0.103	0.149 79	0.202
4	1 352.58	0.371 9	1 352.6	0.376 21	0.004	0.256 99	0.115
5	1 352.96	0.382 4	1 353.0	0.490 74	0.108	0.395 90	0.014
6	1 353.08	0.474 1	1 353.1	0.497 71	0.024	0.414 22	0.060
7	1 353.27	0.438 1	1 353.2	0.497 42	0.059	0.424 76	0.013
8	1 353.48	0.445 6	1 353.5	0.495 84	0.050	0.444 17	0.001
9	1 353.57	0.630 1	1 353.6	0.495 10	0.135	0.448 42	0.182
10	1 353.70	0.510 2	1 353.7	0.486 82	0.023	0.444 73	0.065
11	1 353.81	0.501 7	1 353.8	0.467 85	0.034	0.428 89	0.073
12	1 354.50	0.480 9	1 354.5	0.429 79	0.051	0.369 13	0.112
13	1 354.63	0.410 3	1 354.6	0.452 66	0.042	0.393 03	0.017
14	1 355.00	0.617 7	1 355.0	0.566 23	0.051	0.526 76	0.091
15	1 355.59	0.610 3	1 355.6	0.581 90	0.028	0.552 40	0.058
16	1 355.78	0.658 2	1 355.8	0.580 24	0.078	0.554 99	0.103
17	1 356.29	0.532 8	1 356.3	0.530 43	0.002	0.478 61	0.054

续表 3

18	1356.58	0.5986	1356.6	0.47655	0.122	0.41315	0.185
19	1357.07	0.4862	1357.0	0.43007	0.056	0.35024	0.136
20	1357.45	0.5316	1357.5	0.54190	0.010	0.43996	0.092
21	1357.78	0.5829	1357.8	0.58944	0.007	0.50231	0.081
22	1358.13	0.6381	1358.1	0.61372	0.024	0.54194	0.096
23	1358.61	0.6595	1358.6	0.61442	0.045	0.57671	0.083
24	1358.91	0.6892	1358.9	0.61871	0.070	0.60581	0.083
25	1360.94	0.5989	1360.9	0.54647	0.052	0.48146	0.117
26	1362.59	0.6534	1362.6	0.51421	0.139	0.57955	0.074
27	1362.85	0.6218	1362.9	0.51908	0.103	0.51080	0.111

4　结　论

(1)由 W-S 模型和阿尔奇公式推导出胶结指数 m、饱和度指数 n 和地层水电导率 C_w 关系的理论公式,由此计算得到的动态 m、n 和 C_w 的关系与实际岩心实验结果十分逼近。

(2)当水淹层地层混合液矿化度变化较大时,胶结指数 m 和饱和度指数 n 随地层水矿化度增大而增大,此时应考虑因地层水矿化度变化引起 m、n 值变化对含水饱和度计算精度的影响。

(3)应用动态 m、n 替代阿尔奇公式中固定的岩电参数 m、n,能够显著提高含水饱和度的计算精度。

(4)注水开发过程中,注入水导致地层水矿化度处于一个动态变化的过程,采用变倍数物质平衡法能够得到精度较高的地层混合液电阻率。

参考文献:

[1] 赵文杰. 水淹层岩石电阻率特性的实验研究[J]. 油气采收率技术,1995,2(4):32-39.
ZHAO Wenjie. The experimental study of rock resistivity in water flooding reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 1995,2(4):32-39.

[2] 范宜仁,邓少贵,刘开兵. 淡水驱替过程中的岩石电阻率实验研究[J]. 测井技术,1998,22(3):152-155.
FAN Yiren, DENG Shaogui, LIU Kaibing. Experiment on rock resistivity in the process of fresh water drive[J]. Well Logging Technology, 1998,22(3):152-155.

[3] 田中元,穆龙新,孙德明,等. 砂砾岩水淹层测井特点及机理研究[J]. 石油学报,2002,23(6):50-55.
TIAN Zhongyuan, MU Longxin, SUN Deming, et al. Logging attributes and mechanism study of grit water-flooding reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica,2002,23(6):50-55.

[4] 杨景强,卢艳,马宏宇,等. 水淹层地层水电阻率变化规律研究[J]. 测井技术,2006,30(3):195-197.
YANG Jingqiang, LU Yan, MA Hongyu, et al. On variation regularity of resistivity of mixed formation water in water-flooded zone [J]. Well Logging Technology, 2006,30(3):195-197.

[5] 邓少贵,范宜仁,段兆芳,等. 多温度多矿化度岩石电阻率实验研究[J]. 石油地球物理勘探,2000,35(6):763-767.
DENG Shaogui, FAN Yiren, DUAN Zhaofang, et al. Experiment study of rock resistivity with multi-temperature and multi-salinity [J]. OGP, 2000,35(6):763-767.

[6] 邓少贵,边瑞雪,范宜仁,等. 储层温度对阿尔奇参数的影响[J]. 测井技术,2000,24(2):88-91.
DENG Shaogui, BIAN Ruixue, FAN Yiren, et al. The effect of reservoir temperature on the parameter of Archie formula [J]. Well Logging Technology, 2000,24(2):88-91.

[7] 李跃刚,路中奇,石林辉,等. 基于变岩电参数饱和度解释模型研究[J]. 测井技术,2015,39(2):181-184.
LI Yuegang, LU Zhongqi, SHI Linhui, et al. On the saturation model based on variable rock-electro parameters [J]. Well Logging Technology, 2015,39(2):181-184.

[8] 罗少成,成志刚,林伟川,等. 复杂孔隙结构储层变岩电参数饱和度模型研究[J]. 测井技术,2015,39(1):43-47.
LUO Shaocheng, CHENG Zhigang, LIN Leichuan, et al. Research on saturation model of variable rock-electric parameters for reservoirs with complicated pore struetures [J]. Well Logging Technology, 2015,39(1):43-47.

[9] 申辉林,方鹏. 水驱油地层电阻率变化规律数值模拟及拐点影响因素分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(3):58-62.
SHEN Huilin, FANG Peng. Numerical simulation of formation resistivity variation in water drive process and analysis of influence factor of infletion point [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(3):58-62.

[10] 雍世和,张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营:石油大学出版社,2002.

[11] 孙德明,褚人杰. 含水饱和度指数 n 的理论及实验[J]. 石油学报,1994,15(4):66-72.
SUN Deming, CHU Renjie. A theoretical and experimental study for saturation exponent n [J]. Acta Petrolei Sinica,1994,15(4):66-72.

(编辑　修荣荣)