

致密砂岩储层岩电参数实验研究

周改英¹, 刘向君²

1. 中海油研究总院, 北京 100027

2. 西南石油大学石油工程学院, 成都 610050

摘要 目前致密砂岩油气藏的储层评价与试油气效果不好, 测井解释符合率低, 根本原因是没有准确求取储层的含油气饱和度。目前对致密砂岩进行储层饱和度求取, 基本沿用以前评价常规砂岩储层的方法, 这些方法的关键都在于高质量岩电参数的获取。由于致密砂岩孔隙度较小、孔隙结构复杂, 该类储层的岩电参数获取比较困难, 一般都借用同区域渗透率、孔隙度较高储层。本文根据致密砂岩的特点, 选用气驱实验研究其岩电参数的变化规律。研究发现, 在本文研究的致密砂岩岩心中, 岩性系数 b 、饱和度指数 n 与中高孔渗储层差别较大。在孔隙度为 5%—10% 的致密砂岩岩心中, 不同含水饱和度范围内其 b 、 n 不同, 在高含水段, b 基本在 1 左右, n 在 1.3—14.1 之间; 在低含水段, b 在 1.4—2.9 之间, n 在 0.5—1.7 之间。由于高含水段的含水饱和度均大于 90%, 因此解释时应重点关注低含水饱和度的 b 、 n 选取。利用实验结果对该岩心所在气田的 4 口井进行解释, 证实本次实验结果更符合测试结果。

关键词 致密砂岩; 含水饱和度; 岩电实验; 饱和度指数; 岩性系数

中图分类号 TE135

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.18.004

Experimental Research of Rock Electrical Parameters for Tight Sandstone

ZHOU Gaiying¹, LIU Xiangjun²

1. China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing 100027, China

2. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610050, China

Abstract The current evaluation and testing for tight sandstone reservoirs is not as satisfactory as for conventional sandstone, with a low well log interpretation coincidence rate. The fundamental reason is that the reservoir hydrocarbon saturation can not be determined accurately. The calculating methods for the conventional sandstone reservoir saturation are used for the tight sandstone reservoirs and the key of these methods is to obtain high-quality rock electrical parameters. The rock electric parameters for a tight sandstone reservoir are more difficult to obtain because of the small porosity and the complex pore structure, so one often uses the rock electric parameters of a reservoir of higher porosity and permeability in the same area. According to the characteristics of tight sandstone, the gas drive experiments were carried out to study the variations of electric parameters. It is found that a big difference exists in the b , n values between reservoirs of high porosity and permeability and tight sandstone reservoirs. The values of b , n vary in different ranges of water saturation of the cores of 5% to 10% porosity. Under a high water saturation, the value of b is nearly 1 and the value of n is within a range of 1.3 to 14.1; under a low water saturation, the value of b is within a range of 1.4 to 2.9, the value of n is within a range of 0.5 to 1.7. Since the water saturation is greater than 90% in the high water section, the selection of b , n values of low-water saturation should be careful in well log interpretation. With experimental results being used in a few wells, these results are shown to be consistent with the test results.

Keywords tight sand; water saturation; rock-electricity experiment; saturation exponent; lithology factor

0 引言

目前低渗透油气藏的储层评价与试油气效果并不令人满意, 测井解释符合率低, 致密砂岩油气藏更是如此^[1]。造成

这些问题的根本原因是低渗透油气藏的储层特征比较复杂且对电阻率的影响大^[2], 而目前该类储层的评价方法基本沿用常规砂岩储层的评价方法, Archie 公式及其扩展形式、

收稿日期: 2011-03-07; 修回日期: 2011-05-10

作者简介: 周改英, 工程师, 研究方向为测井资料综合解释和储层描述及储层岩石物理等, 电子信箱: zhougy3@cnooc.com.cn



Waxman-Smith 模型、双水模型等。这些方法的关键都在于高质量岩电参数的获取。

岩电参数的获取依据著名的 Archie 公式:

$$F=\frac{R_0}{R_w}=\frac{a}{\phi^m} \tag{1}$$

$$I=\frac{R_l}{R_0}=\frac{b}{S_w^n} \tag{2}$$

式(1)、式(2)两边取对数,可得

$$\lg F=\lg(R_0/R_w)=\lg a-m\lg\phi \tag{3}$$

$$\lg I=\lg(R_l/R_0)=b-n\lg S_w \tag{4}$$

其中, F 为地层因素; R_0 为岩石 100%被地层水饱和时的电阻率; R_w 为岩石所含地层水的电阻率; ϕ 为岩石有效孔隙度; a 为与岩石性质有关的岩性系数; m 为胶结指数,与岩石的胶结情况和孔隙结构有关; I 为地层电阻率增大系数; R_l 为含油气岩石的电阻率; S_w 为岩石含水饱和度; b 为与岩性相关的系数; n 为饱和度指数,与油、气、水在孔隙中的分布情况有关。

目前研究均通过岩电实验测量 ϕ 、 R_w 、 R_0 、 R_l ,进而确定 m 、 n 、 a 、 b 参数。

有关岩电参数的研究一直是测井界关注的重点,原海涵^[3]、曾文冲^[4]、周荣安^[5]等研究总结了中高孔储层的岩电参数与储层物性(渗透率 K 和孔隙度 ϕ)的关系。2000 年以后国内研究主要集中在岩石润湿性及温度、压力等对岩石电学性质的影响,刘堂宴等^[6]、高楚桥等^[7]和欧阳健^[1]通过研究发现,影响储层岩电参数的因素较多,但主要还是储层物性和岩石性质对

其影响较大,因此,对于不同区块和不同物性、岩性的储层必须通过岩电实验确定岩电参数。由于致密低渗透砂岩孔隙度更小,孔隙结构更复杂,以及研究条件的限制,至今对岩电参数的研究大多还是针对孔隙度较高的岩心,对致密岩石的电学性质的研究还未系统展开,因此,本文根据致密砂岩的特点,选用气驱实验研究其岩电参数的变化规律。

1 实验方法

致密砂岩具有低孔低渗、微孔微裂隙发育、非均质性强等特点,因此,应根据其储层物性和孔隙结构特征选择恰当的岩电实验方法^[8]。考虑实验所用致密砂岩岩心均为致密砂岩气层岩心,渗透率极低,因此选用气驱法进行岩电实验。

气驱实验仪器为西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室自行研制的 SCMS-B2 型高温高压岩心多参数测量仪。本文共选取 24 块致密砂岩岩心(表 1),在 5MPa 的围压和 25℃恒定温度下进行气驱实验,本次实验地层水选取心地层的分析结果配置,其中矿化度为 24.506g/L,地层水电阻率 R_w 为 0.125Ω·m。同时为了验证实验的可靠性,在相同实验条件下,选取同区 4 块高孔高渗砂岩岩心进行气驱实验。

由表 1 可以看出,所选致密砂岩岩心的孔隙度一般小于 10%,平均 6.71%;渗透率范围为 (0.023—0.057)×10⁻³μm²,平均 0.04×10⁻³μm²。所选中高孔渗砂岩岩心的孔隙度一般大于 20%,平均 21.48%;渗透率范围为 (251—561)×10⁻³μm²,平均

表 1 实验岩心物性特征
Table 1 Summary of experimental cores

组别	岩心编号	取心深度/m	岩心长度/cm	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
I	1-61(1)-1	1922.96—1926.58	6.26	6.56	0.048
	1-61(1)-2		5.26	7.02	0.053
	1-61(1)-3		3.49	6.77	0.040
	1-61(1)-4		6.02	6.60	0.048
	1-61(1)-5		6.60	7.11	0.057
	1-61(1)-6		6.08	6.54	0.049
	1-61(1)-7		4.60	6.45	0.044
II	3-44(40)-1	2417.58—2420.96	5.07	7.94	0.036
	3-44(40)-2		5.01	7.85	0.032
	3-44(40)-3		6.57	7.59	0.035
	3-44(40)-4		5.06	7.30	0.023
	3-44(40)-5		6.26	8.07	0.036
	3-44(40)-6		3.68	7.99	0.028
III	5-69(8)-1	2686.49—2689.02	5.79	3.64	0.041
	5-69(8)-2		6.47	3.66	0.031
	5-69(8)-3		5.20	3.40	0.033
	5-69(8)-4		6.23	3.46	0.032
IV	6-30(7)-1	2707.60—2711.13	6.23	9.07	0.051
	6-30(7)-2		5.84	8.53	0.042
	6-30(7)-3		5.77	8.65	0.037
V	S217-PF-6	—	5.49	22.45	561
	T1-205-2		5.52	21.13	251
	T225-43-1		5.61	20.94	525
	T225-41-3		4.76	21.41	479

$454 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 结果与分析

由实验结果分析发现,岩性系数 b 和饱和度指数 n 与常规砂岩储层的差别较大。图 1—图 5 分别为 5 组岩心中其中 1 块的电阻率增大系数 I 与含水饱和度关系图。同一组岩心的实验结果都是一致的。

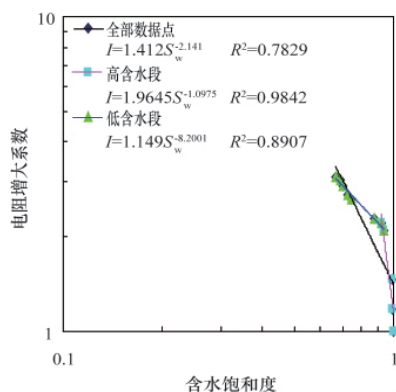


图 1 岩心 1-61(1)-5 驱替岩电实验结果
Fig. 1 Rock-electricity experiment results of core 1-61(1)-5

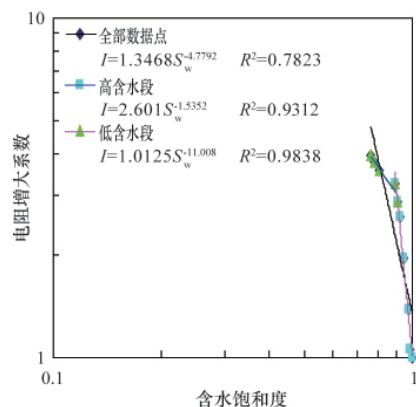


图 2 岩心 3-44(40)-2 驱替岩电实验结果
Fig. 2 Rock-electricity experiment results of core 3-44(40)-2

通过对上述实验结果的分析,得到以下结论。

(1) 与中高孔渗砂岩相比,气体驱替法得到的致密砂岩的最终含水饱和度一般比较高,岩心表现出较高的束缚水饱和度,一般在 70% 左右。

(2) 4 组致密砂岩岩心中有 3 组(I、II、IV 组,孔隙度为 5%—10%)直接拟合 b 、 n 相关性较差,相关系数 R^2 为 0.7745。进行分段拟合相关性大大提高,高含水段相关系数 R^2 为 0.9273,低含水段相关系数 R^2 为 0.9151。这与常规中高孔渗砂岩实验结果以及前人的研究成果有很大差别。而致密砂岩中另外一组(III 组,孔隙度 <5%)直接拟合的相关性很好,相关系数 R^2 均在 0.94 以上,平均 0.9505。为了验证实验的可靠性,选择 4 块中高孔渗砂岩岩心在同样的实验条件下进行气体驱替实验,这 4 块岩心实验结果(图 5)与前人的大量研究一致。因此

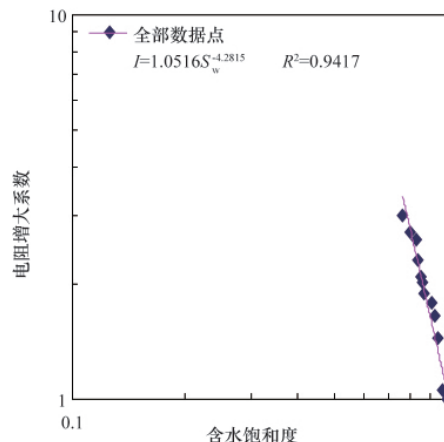


图 3 岩心 5-69(8)-3 驱替岩电实验结果
Fig. 3 Rock-electricity experiment results of core 5-69(8)-3

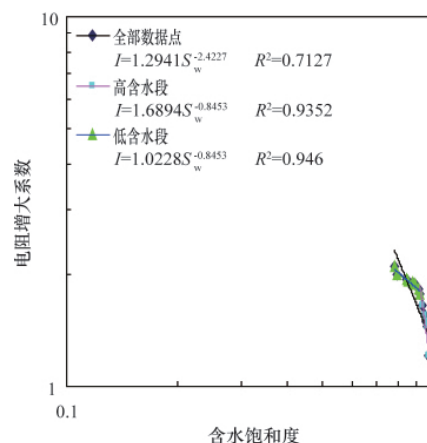


图 4 岩心 6-30(7)-2 驱替岩电实验结果
Fig. 4 Rock-electricity experiment results of core 6-30(7)-2

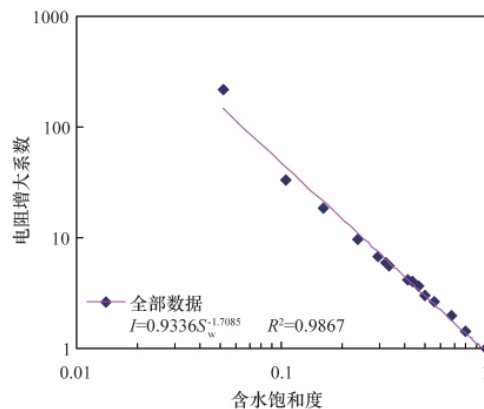


图 5 中高孔渗岩心 T225-41-3 驱替实验结果
Fig. 5 Rock-electricity experiment results of core T225-41-3

这些致密砂岩岩心气驱实验得到的结果是可靠的。

(3) 孔隙度在 5%—10% 范围内的致密砂岩,在双对数坐标系中含水饱和度 S_w 和电阻率增大系数 I 出现分段现象,表明在不同含水饱和度段,饱和度指数 n 和岩性系数 b 不同,高含水段 b 基本在 1 右, n 在 1.3—14.1 之间;低含水段 b 在

1.4—2.9 之间, n 在 0.5—1.7 之间(图 1、图 2、图 4)。这与常规砂岩的岩电特性差别较大, 主要是由于致密砂岩的复杂孔隙结构和它所含黏土矿物在不同含水饱和度段的附加导电性不一样造成的。但由于高含水段的含水饱和度都大于 90%, 在此含水饱和度范围内不同 b 、 n 对计算饱和度的影响意义不大, 因此在解释时应选取 b 在 1.4—2.9 之间, n 在 0.5—1.7 之间。

(4) 当致密砂岩孔隙度小于 5% 时, 实验结果和常规砂岩一样, 即在双对数坐标系中含水饱和度 S_w 和电阻率增大系数 I 的关系为直线关系, b 基本在 1 左右, 平均 0.9505, n 平均为 3.8723(图 3)。

3 应用

根据实验结果, 对该岩心所在气田的 4 口井分别选用本次实验结果和 b 、 n 为 1、2 时进行饱和度解释(图 6), 图中含水饱和度-1 是用 $b=1$ 、 $n=2$ 计算得到的, 含水饱和度-2 是用本次实验结果 $b=2.1$ 、 $n=1.3$ 计算得到的。其中 3960—3992m 处含水饱和度-1 平均值在 75% 左右, 尤其是在 3987—3992m 之间, 大于 80%; 含水饱和度-2 平均值为 50%。该层 3968.0—3996.0m 测试日产油 22.4m³, 气 15.7×10⁴m³, 表明用本次实验结果计算的含水饱和度更符合储层测试结果。

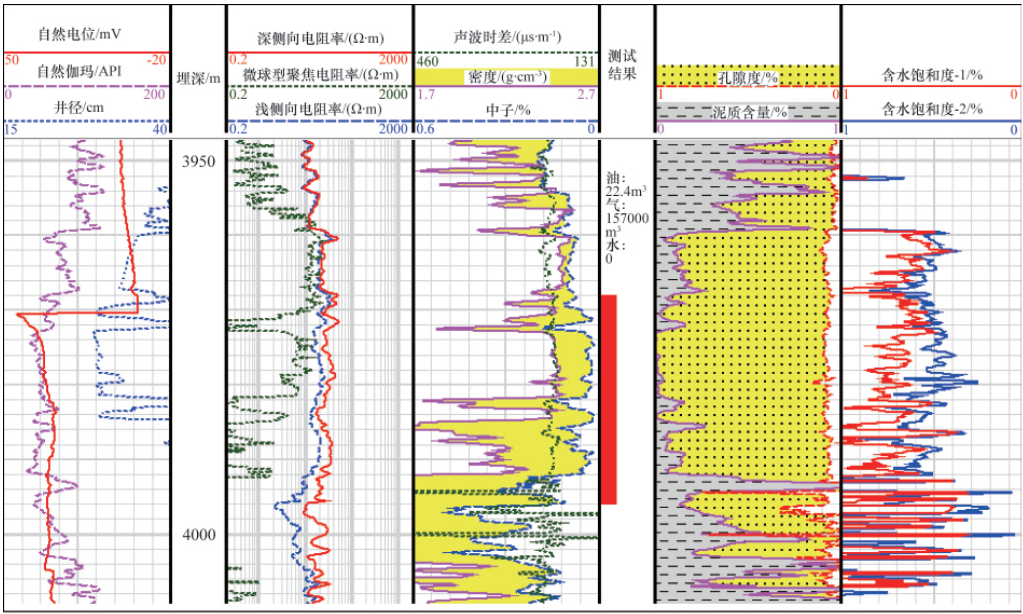


图 6 某井致密砂岩段测井解释成果

Fig. 6 Well logging interpretation results plot in one tight sandstone formation

4 结论与建议

(1) 致密砂岩的 b 、 n 与常规中高孔渗砂岩差别很大, 在孔隙度为 5%—10% 的岩心中, 不同含水饱和度段, 饱和度指数 n 和岩性系数 b 不同, 在解释时应重点关注低含水饱和度和, 也就是油气层的 b 、 n 的选取。

(2) 在本文研究的孔隙度范围内, 发现在大概孔隙度为 5% 处是致密砂岩岩电参数特征发生变化的一个拐点。

(3) 建议在计算致密砂岩含水饱和度时应尽可能进行岩电实验, 根据不同情况选择不同的饱和度指数 n 和岩性系数 b 。

参考文献 (References)

[1] 欧阳健. 加强目标区块岩石物理研究提高测井识别评价油层能力[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(1): 24—30.
Ouyang Jian. China Petroleum Exploration, 2001, 6(1): 24—30.
[2] 张明禄, 石玉江. 复杂孔隙结构砂岩储层岩电参数研究 [J]. 测井技术, 2005, 29(5): 446—448.
Zhang Minglu, Shi Yujia. Geophysical Well Logging, 2005, 29 (5): 446—448.
[3] 原海涵. 阿尔奇公式中 a 、 m 与渗透率的关系——毛管理论在岩石电

阻率研究中的应用[J]. 地球物理测井, 1990, 14(5): 347—357.
Yuan Haihan. Well Logging Technology, 1990, 14(5): 347—357.
[4] 曾文冲. 孔隙结构指数 m 的物理意义及其表达式 [J]. 测井技术, 1979 (5): 6—14.
Zeng Wenchong. Well Logging Technology, 1979, 3(5): 6—14.
[5] 周荣安. 阿尔奇公式在碎屑岩储集层中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(5): 80—82.
Zhou Rong'an. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(5): 80—82.
[6] 刘堂宴, 傅容珊, 王绍民, 等. 考虑岩石润湿性的新导电模型研究[J]. 测井技术, 2003, 27(2): 99—103.
Liu Tangyan, Fu Rongshan, Wang Shaomin, et al. Well Logging Technology, 2003, 27(2): 99—103.
[7] 高楚桥, 李先鹏, 吴洪深, 等. 温度与压力对岩石物性和电性影响实验研究[J]. 测井技术, 2003, 27(2): 110—112.
Gao Chuqiao, Li Xianpeng, Wu Hongshen, et al. Well Logging Technology, 2003, 27(2): 110—112.
[8] 唐文江, 甄廷江, 冯春珍, 等. 浅谈阿尔奇公式中饱和度指数(n)的测定方法[J]. 测井技术, 2005, 29(4): 299—301.
Tang Wenjiang, Zhen Tingjiang, Feng Chunzhen, et al. Well Logging Technology, 2005, 29(4): 299—301.

(责任编辑 刘志远)