

肖占山,曾志国,朱世和等. 基于岩石电性参数频散特性评价润湿性的实验方法研究. 地球物理学报, 2009, **52**(5):1326~1332, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.022

Xiao Z S, Zeng Z G, Zhu S H, et al. An experimental study of wettability evaluation based on frequency dispersion property of rock electric parameters. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(5):1326~1332, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.022

基于岩石电性参数频散特性评价润湿性的实验方法研究

肖占山,曾志国,朱世和,桑九波,马 静,王志强

长城钻探工程有限公司测井公司, 盘锦 124010

摘 要 岩石电性参数频散特性与润湿性之间存在着密切的关系,在油驱水、水驱油的岩石电性参数频散特性的实验中,不同润湿性岩石,其复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_φ 随含水饱和度变化曲线的斜率 k 不同,亲油岩石的斜率 k 最大,中性润湿的岩石次之,亲水岩石的斜率 k 最小,其中油驱水相位频散率 P_φ 的斜率 k 与岩石润湿性的关系表现得最为明显.因此,可以利用油驱水相位频散率 P_φ 的斜率 k 定性的评价储层岩石的润湿性.

关键词 润湿性,频散特性,复电阻率模值,相位,斜率 k

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.022

中图分类号 P631

收稿日期 2008-05-20,2009-04-09 收修定稿

An experimental study of wettability evaluation based on frequency dispersion property of rock electric parameters

XIAO Zhan-Shan, ZENG Zhi-Guo, ZHU Shi-He, SANG Jiu-Bo, MA Jing, WANG Zhi-Qiang
Greatwall Drilling Company Holewire Services Company, Panjin 124010, China

Abstract A close relationship exists between the rock wettability and the rock's electrical parameter dispersion properties. In the tests of studying rock's electrical parameter dispersion properties in both processes of oil displacing water and water displacing oil, it is found that for rocks with different wettabilities, the slopes k of curves P_ρ versus S_w and P_φ versus S_w are variable, where P_ρ refers to complex resistivity modulus dispersion ratio, P_φ refers to phase dispersion ratio, and S_w represents water saturation. The maximum k is acquired in oil-wet rocks, the minimum k is appeared in water-wet rocks, and k with medium values exist in intermediate wettability rocks. The most obvious relationship is shown between k of P_φ and rock wettability. In oil displacing water process. Therefore, the slope k of phase dispersion ratio P_φ in oil displacing water process could be used to qualitatively evaluate reservoir rock wettability.

Keywords Wettability, Frequency dispersion property, Complex resistivity model, Phase, Slope k

1 引言

润湿性是指一种流体在其他非混相流体存在条件下,在固体表面展开或粘附的趋势.岩石润湿性是控制流体在孔隙中的位置、微观分布及流动的重要因素之一,是油藏工程的一个重要参数.润湿性对岩石的电性参数、毛管压力、相对渗透率、束缚水饱和度、残余油饱和度等都有着较大的影响,它是岩心分析中重要的测量参数.岩石的润湿性分为亲油、亲水和中性三种.润湿性与岩石电性参数之间有着非常密切的关系,孔隙流体的空间分布随着润湿性的改变而变化,这些变化影响着孔隙流体的导电路径,造成了相同含水饱和度和地层水电阻率下,亲油岩石与亲水岩石的电阻率相差很大.很早的实验中发现,阿尔奇公式的饱和度指数 n 随着润湿性的变化,存在着较大的差异,亲油岩石的饱和度指数 n 大于亲水岩石的饱和度指数 n ^[1~6].润湿性变化引起的岩石电性参数的变化,一直是影响储层油气测井评价的重要因素.因此,在电法测井资料储层含油饱和度的测井评价和岩石导电模型的建立上,需要充分考虑岩石润湿性的影响^[7~11].初步的研究成果表明,可以通过岩石电学特性进行储层岩石润湿性的评价^[12~14].

目前测量岩石润湿性的实验方法有接触角法、Amott 法、USBM 法、相对渗透率曲线法、核磁共振弛散法等^[15~19],这些方法操作流程复杂,实验周期较长,并且有些方法需要使用专门的设备才能完成.本文在不同驱替过程中的岩石电性参数频散特性的实验研究基础上,提出了一种基于岩石电性参数频散特性定性评价储层岩石润湿性的新方法.

该方法实验过程简单,实验周期短,可操作性强,不需要特殊的实验装置,可以在常温常压下进行,也可在模拟油藏条件的高温高压下进行.本文的研究成果为利用电法测井资料评价储层润湿性奠定了初步的岩石物理基础.

2 实验方法

实验采用二极法,实验的测量仪器为高温高压三轴岩心多参数测量仪和 ZL5-LCR 智能阻抗分析仪,测量电流的频率范围为 12 Hz~100 kHz,测量电极为不锈钢电极.选择辽河油田某区块 4 块渗透性泥质砂岩岩心进行实验研究,岩心的泥质含量在

5%~15% 之间,孔隙度为 10%~25%,渗透率为 $(65\sim 153)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$.将岩心制备成直径为 2.54 cm,长度为 5 cm 的实验岩样.对岩心进行洗油、洗盐、烘干等常规实验预处理,并把岩心真空饱和 0.5% 的司盘溶液,烘干后饱和 6000 mg/L 的 NaCl 溶液,用 Amott 法(自吸法)测量岩样的润湿性,重复上面步骤,测量饱和 5% 的十二烷基苯磺酸钠溶液岩样的润湿性.司盘溶液可使岩心的润湿性向亲油方向转变,十二烷基苯磺酸钠溶液可使岩心的润湿性向亲水方向转变.岩石经过司盘和十二烷基苯磺酸钠溶液处理后,可得到不同润湿性的岩心.在用 Amott 法(自吸法)进行岩石润湿性测量时,需要完成油驱水、吸水排油、水驱油、吸油排水、油驱水、吸油排水等实验过程,在进行油驱水、水驱油的实验过程中,利用 ZL5-LCR 智能阻抗分析仪测量出不同含水饱和度下的水驱油和油驱水岩石电性参数频散特性曲线.通过计算润湿性指数对岩石的润湿性进行定量评价,润湿性指数的计算方法以及岩石润湿性的界定判别参见文献^[15].

3 实验结果与分析

图1给出了油驱水不同含水饱和度下,中性润湿岩石的复电阻率模值和相位的频散特性曲线.从图 1a 可以看出,随着频率的增加,复电阻率模值逐渐减小,在 5~10 kHz 的频率范围,复电阻率模值变化缓慢,此后随着频率的增大,复电阻率模值继续减小;在图 1b 中,相位随着频率的增加逐渐减小,在 5~10 kHz 的频率范围,出现极小值,此后随着频率的增大,相位逐渐增大.由初步的岩石电性参数频散特性的机理研究可知^[20~23],频率低于 10 kHz 的频散现象主要与电化学起因的激电效应有关,而 10 kHz 以上频段的频散现象主要反映电磁感应效应.因此选择 12 Hz~5 kHz 频率范围,对岩石电性参数频散特性与润湿性之间的关系进行实验研究.对比分析不同润湿性下的油驱水和水驱油岩石电性参数频散曲线,发现岩石的润湿性与复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_φ 的斜率之间存在着良好的线性关系.

复电阻率模值的频散率 P_ρ 的定义

$$P_\rho = \frac{\rho_{f_1} - \rho_{f_2}}{\rho_{f_1}}, \quad (1)$$

其中, ρ_{f_1} 、 ρ_{f_2} 分别为低频 f_1 与高频 f_2 的复电阻率模值.

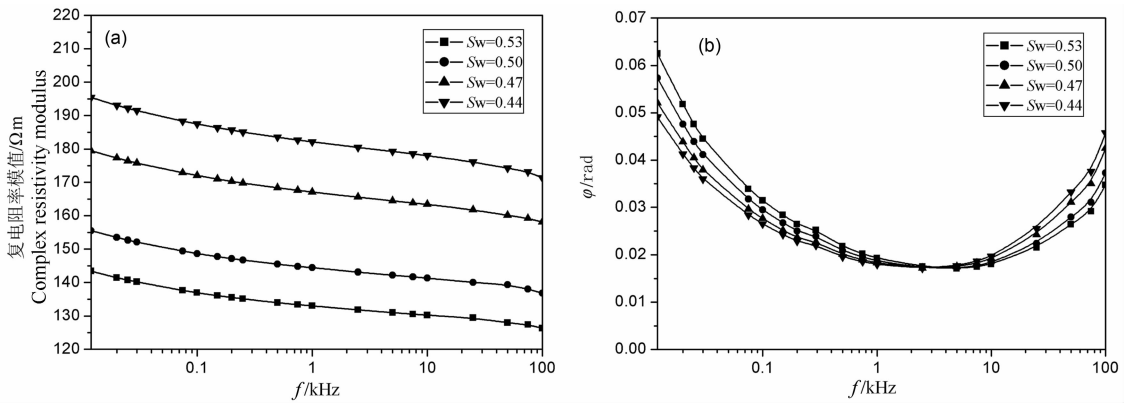


图 1 岩石电性参数的频散曲线

(a)复电阻率模值的频散曲线;(b)相位的频散曲线.

Fig. 1 Frequency dispersion curves of rock electrical parameters

(a)Frequency dispersion curves of complex resistivity modulus; (b)Frequency dispersion curves of complex resistivity phase.

相位频散率 P_ϕ 的定义与(1)式相同. 在本次实验中, 低频 f_1 为 20 Hz, 高频 f_2 为 5 kHz.

3.1 不同润湿性岩石频散率与含水饱和度的关系曲线

图 2 给出了不同岩石在水驱油时, 含水饱和度 S_w 与复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_ϕ 的关系曲线. 从图中可以看出, 在水驱油过程中, 随着含水饱和度 S_w 的增大, 岩石复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_ϕ 随之减小, 亲油岩石的复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_ϕ 随含水饱和度 S_w 减小的速度, 比中性润湿岩石和亲水岩石要快. 复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_ϕ 与含水饱和度 S_w 的关系曲线近似为直线, 在 Origin 软件中对每条曲线进行线性拟合, 求取其斜率 k , 并取为绝对值, 见表 1, 发现亲油岩石频散率的斜率 k 最

大, 中性润湿岩石次之, 亲水岩石频散率的斜率 k 最小.

表 1 水驱油不同润湿性岩石频散率的斜率 k

Table 1 The curve slope k of dispersion ration for different wettability in water displacing oil rocks

	复电阻率模值频散率的斜率 k_ρ	相位频散率的斜率 k_ϕ
弱亲油	0.1365	1.2653
中性	0.1191	1.0305
弱亲水	0.0291	0.4173
亲水	0.027	0.2434

图 3 给出了不同润湿性岩石在油驱水时, 含水饱和度 S_w 与复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_ϕ 的关系曲线. 从图中可以看出, 在油驱水过程中, 随着含水饱和度 S_w 的增大, 复电阻率模值频散

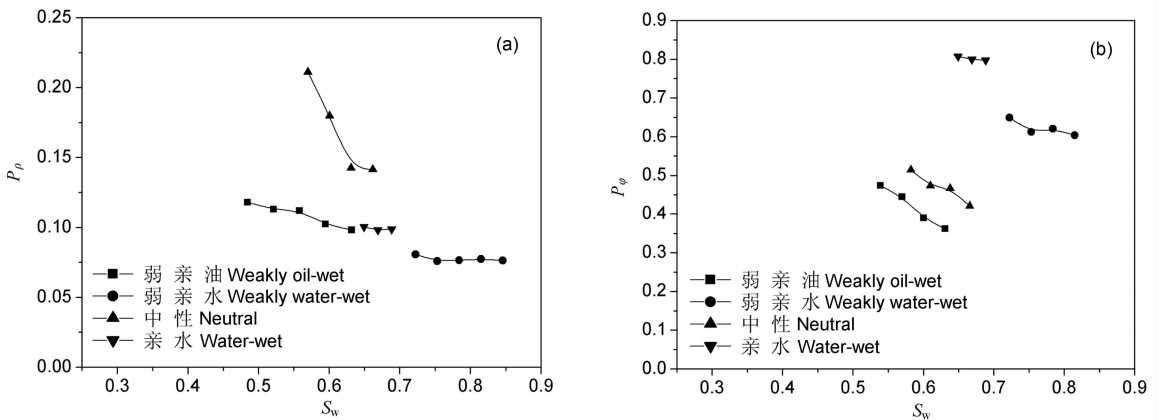


图 2 水驱油岩石电性参数频散率与含水饱和度的关系曲线

(a)水驱油岩石复电阻率模值频散率与含水饱和度的关系曲线;(b)水驱油岩石相位频散率与含水饱和度的关系曲线.

Fig. 2 The relationship of rock electrical parameter dispersion ratio and water saturation in water displacing oil rocks

(a)The relationship of complex resistivity modulus dispersion ratio and water saturation in water displacing oil rocks;

(b)The relationship of complex resistivity phase dispersion ratio and water saturation in water displacing oil rocks.

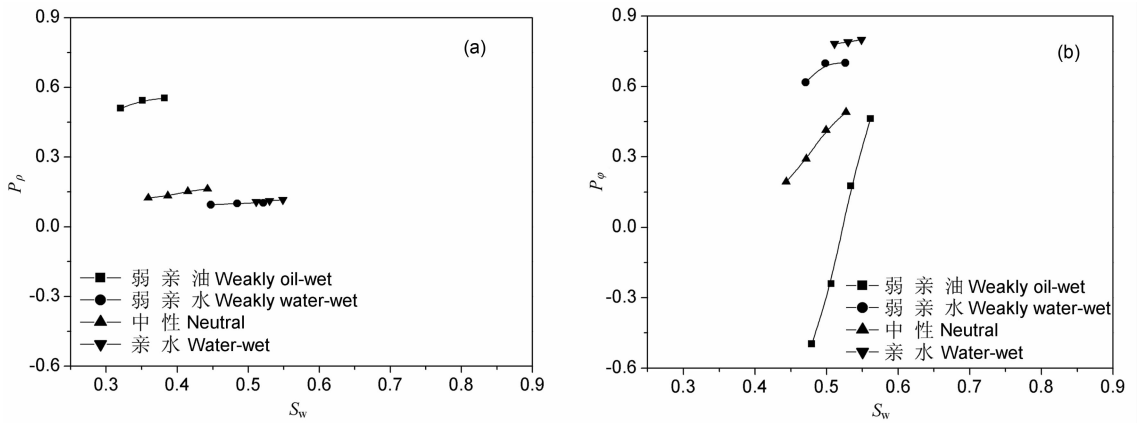


图 3 油驱水岩石电性参数频散率与含水饱和度的关系曲线

(a)油驱水岩石复电阻率模值频散率与含水饱和度的关系曲线;(b)油驱水岩石相位频散率与含水饱和度的关系曲线。

Fig. 3 The relationship of rock electrical parameter dispersion ratio and water saturation in oil displacing water rocks

(a) The relationship of complex resistivity modulus dispersion ratio and water saturation in oil displacing water rocks;
(b) The relationship of complex resistivity phase dispersion ratio and water saturation in oil displacing water rocks.

表 2 油驱水不同润湿性岩石频散率的斜率 k

Table 2 The curve slope k of dispersion ratio for different wettability in oil displacing water rocks

	复电阻率模值频散率的斜率 k_p	相位频散率的斜率 k_ϕ
弱亲油	0.7101	12.023
中性	0.4915	3.6316
弱亲水	0.2113	1.4803
亲水	0.2192	0.485

率 P_p 和相位频散率 P_ϕ 随之增大。岩石复电阻率模值频散率 P_p 和相位频散率 P_ϕ 与含水饱和度 S_w 的关系曲线也近似为直线,在 Origin 软件中对每条曲线进行线性拟合,求取其斜率 k ,并取为绝对值,见表 2,同样可以得到亲油岩石复电阻率模值频散率 P_p 和相位频散率 P_ϕ 的斜率 k 最大,中性润湿岩石

次之,亲水岩石频散率的斜率 k 最小的变化关系。

对比分析图 2 和图 3 可以看出,与复电阻率模值频散率 P_p 的斜率 k 相比,相位频散率 P_ϕ 的斜率 k 与岩石润湿性之间的关系更为明显;与水驱油相比,油驱水时岩石复电阻率模值频散率 P_p 和相位频散率 P_ϕ 的斜率 k 与岩石润湿性之间的关系更具有规律性。因此,在利用岩石电性参数频散特性进行储层岩石润湿性评价时,建议使用油驱水时的相位频散率 P_ϕ 的斜率 k 。

3.2 同一岩石在不同润湿性下频散率与含水饱和度的关系曲线

图 4 给出了同一岩石在水驱油时,含水饱和度 S_w 与复电阻率模值频散率 P_p 和相位频散率 P_ϕ 的关系曲线。从图中可以看出,随着含水饱和度 S_w 的

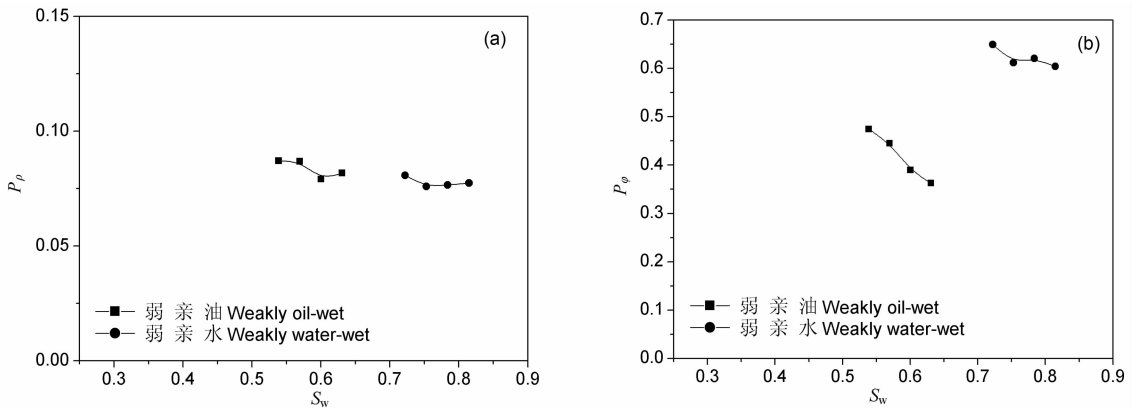


图 4 水驱油岩石电性参数频散率与含水饱和度的关系曲线

(a)水驱油岩石复电阻率模值频散率与含水饱和度的关系曲线;(b)水驱油岩石相位频散率与含水饱和度的关系曲线。

Fig. 4 The relationship of rock electrical parameter dispersion ratio and water saturation in water displacing oil rocks

(a) The relationship of complex resistivity modulus dispersion ratio and water saturation in water displacing oil rocks;
(b) The relationship of complex resistivity phase dispersion ratio and water saturation in water displacing oil rocks.

增大,复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_φ 随之减小,亲油岩石复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_φ 的斜率 k 大于亲水岩石复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_φ 的斜率 k (见表 3),在只有润湿性发生变化,其他岩性、物性未发生变化时,同样出现了与图 2 相同的关系曲线及变化规律。

表 3 水驱油不同润湿性岩石频散率的斜率 k

Table 3 The curve slope k of dispersion ration for different wettability in water displacing oil rocks

	复电阻率模值频散率的斜率 k_ρ	相位频散率的斜率 k_φ
弱亲油	0.0779	1.2653
弱亲水	0.029	0.4173

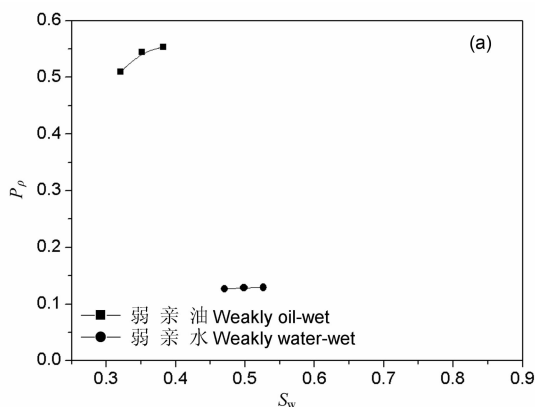


图 5 给出了同一岩石在油驱水时,含水饱和度 S_w 与复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_φ 的关系曲线.从图中可以看出,随着含水饱和度 S_w 的增大,复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_φ 随之增大,亲油岩石复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_φ 的斜率 k 大于亲水岩石复电阻率模值频散率 P_ρ 和相位频散率 P_φ 的斜率 k (见表 4),在只有润湿性发生变化,其他岩性、物性未发生变化时,同样出现了与图 3 相同的关系曲线及变化规律。

3.3 实验结果分析

本文讨论了 12 Hz~5 kHz 频率范围内,岩石电性参数频散特性与岩石润湿性之间的关系.通过

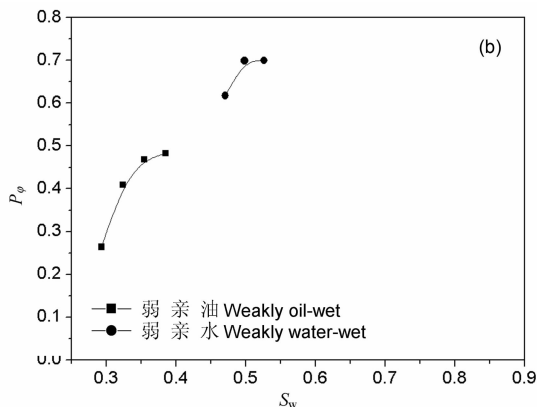


图 5 油驱水岩石电性参数频散率与含水饱和度的关系曲线

(a) 油驱水岩石复电阻率模值频散率与含水饱和度的关系曲线;(b) 油驱水岩石相位频散率与含水饱和度的关系曲线。

Fig. 5 The relationship of rock electrical parameter dispersion ratio and water saturation in oil displacing water rocks

(a) The relationship of complex resistivity modulus dispersion ratio and water saturation in oil displacing water rocks;

(b) The relationship of complex resistivity phase dispersion ratio and water saturation in oil displacing water rocks.

表 4 油驱水不同润湿性岩石频散率的斜率 k

Table 4 The curve slope k of dispersion ration for different wettability in oil displacing water rocks

	复电阻率模值频散率的斜率 k_ρ	相位频散率的斜率 k_φ
弱亲油	0.7101	2.3281
弱亲水	0.0513	1.4803

岩石电性参数频散特性的实验分析和理论研究可知,低频(<5 kHz)时,岩石的电性参数频散特性主要受与电学有关的激发极化效应的影响^[20~23].岩石的电性参数频散特性与岩石骨架颗粒表面的双电层之间存在着密切的关系,振荡电场对双电层的扰动是造成岩石电性参数与频率依存关系的主要机理^[14].一般来说,亲水岩石的颗粒表面被一层水膜覆盖,亲水性越强,水膜的连通程度越高,电流在岩石孔隙网络中传导的迂曲度也越小;亲油岩石颗粒表面被油膜所覆盖,水在孔隙和吼道中呈断续分布

状态^[3,6].因此,不同润湿性岩石,会在岩石颗粒表面产生不同的双电层,其岩石孔隙和吼道的导电路径也将发生较大的变化,从而导致岩石的激发极化效应发生变化,进而致使岩石电性参数在不同润湿性下,其频散特性存在着较大差异,这就是岩石电性参数频散特性评价储层岩石润湿性的岩石物理基础。

4 结论及建议

(1)在水驱油和油驱水实验过程中,岩石电性参数的频散率与含水饱和度之间的变化关系正好相反,在水驱油过程中,岩石电性参数的频散率随着含水饱和度的增加而减小,在油驱水过程中,岩石电性参数频散率随着含水饱和度的增加而增加。

(2)岩石电性参数频散率的斜率与岩石的润湿性之间存在着密切的关系,亲油岩石的斜率最大,中性润湿岩石的斜率次之,亲水岩石的斜率最小。

(3)与复电阻率模值频散率的斜率相比,相位频散率的斜率与岩石润湿性的关系更为明显;与水驱油相比,油驱水时复电阻率模值频散率和相位频散率的斜率与岩石润湿性的关系更具有规律性。

(4)可以通过油驱水岩石电性参数频散特性实验,利用相位频散率的斜率来定性评价储层岩石的润湿性。

(5)尽管由于驱替过程中的含水饱和度的实验数值很难人为控制以及统计数较少,本文结论具有近似性和阶段性,但仍然不失其实际指导意义。

参考文献(References)

- [1] 黄隆基. 润湿性对岩石电阻率影响的模型估算. 地球物理学报, 1995, **38**(3): 405~410
Huang L J. Model evaluation of wettability effect on rock resistivity. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1995, **38**(3): 405~410
- [2] 毛志强, 章成广, 林纯增. 油层润湿性对测井计算的含水饱和度的影响. 测井技术, 1997, **21**(1): 50~54
Mao Z Q, Zhang C G, Lin C Z. The effect of wettability of reservoir on the log-derived water saturation. *WLT* (in Chinese), 1997, **21**(1): 50~54
- [3] 高楚桥, 章成广, 毛志强. 润湿性对岩石电性的影响. 地球物理学进展, 1998, **13**(1): 60~72
Gao C Q, Zhang C G, Mao Z Q. The effects of wettability on the electrical properties of rocks. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 1998, **13**(1): 60~72
- [4] 朱玉双, 曲志浩, 孔令荣等. 砂岩模型两相驱替实验中油层润湿性的判断. 石油与天然气地质, 1999, **20**(3): 220~223
Zhu Y S, Qu Z H, Kong L R, et al. Determination of oil reservoir wettability in two phase displacement experiment of sandrock model. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 1999, **20**(3): 220~223
- [5] 吕成远, 张金功. 不同润湿性砂岩孔隙度与含油饱和度的定量关系. 西北地质, 2002, **35**(3): 90~93
Lu C Y, Zhang J G. Quantitive relationship between porosity and oil saturation of sandstones with different wettabilities. *North Western Geology* (in Chinese), 2002, **35**(3): 90~93
- [6] 杨春梅, 李洪奇, 陆大卫等. 不同驱替方式下岩石电阻率与饱和度的关系. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, **35**(5): 667~671
Yang C M, Li H Q, Lu D W, et al. The relationship between rock resistivity and water saturation in water-drive-oil and oil-drive-water process. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2005, **35**(5): 667~671
- [7] 郭肖, 杜志敏, 任益群. 润湿性对砾岩油藏剩余油饱和度分布的影响. 西南石油学院学报, 1999, **21**(4): 4~6, 14
Guo X, Du Z M, Ren Y Q. The effects of wettability on the distribution of remaining oil in the conglomerate reservoirs. *Journal of Southwest Petroleum Institute* (in Chinese), 1999, **21**(4): 4~6, 14
- [8] 谢然红, 高国忠, 冯启宁等. 用测井资料预测储层的润湿性. 测井技术, 2002, **26**(4): 265~268
Xie R H, Gao G Z, Feng Q N, et al. Wettability forecast of reservoirs using log data. *WLT* (in Chinese), 2002, **26**(4): 265~268
- [9] 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. 测井技术, 2003, **27**(2): 99~103, 135
Liu T Y, Fu R S, Wang S M, et al. On a new conducting model combining rock wettability. *WLT* (in Chinese), 2003, **27**(2): 99~103, 135
- [10] 鄢捷年. 一种定量测定油藏岩石润湿性的新方法. 石油勘探与开发, 2001, **28**(2): 83~86
Yan J N. A new method for determination of wettability of reservoir rocks. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2001, **28**(2): 83~86
- [11] 韩学辉, 戴诗华, 王雪亮等. 油藏润湿性评价方法研究. 勘探地球物理学进展, 2005, **28**(1): 19~24
Han X H, Dai S H, Wang X L, et al. Review of evaluation on the wettability of reservoir. *PEG* (in Chinese), 2005, **28**(1): 19~24
- [12] Bona N, Rossi E, Capaccioli S. Electrical measurements in the 100 Hz~10 GHz for efficient rock wettability evaluation. *SPE50720*, 1999
- [13] Garrouch A A, Sharma M M. The influence of clay content, salinity, stress, and wettability on the dielectric properties of brine-saturated rocks: 10 Hz to 10 MHz. *Geophysics*, 1994, **59**(4): 909~917
- [14] Moss A K, Jing X D, Archer J S. Wettability of reservoir rock and fluid systems from complex resistivity measurements. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2002, **33**: 75~85
- [15] 中华人民共和国石油天然气行业标准. 油藏岩石润湿性测定(SY/T 5153-1999). 北京: 石油工业出版社出版, 1999
The Standard of Petroleum and Natural gas of P R C. the Measurement Principle of Reservoir Rock Wettability (SY/T 5153-1999) (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1999
- [16] Amott E. Observations relating to the wettability of porous rock. *AIME*, 1959, **216**: 156~162
- [17] Donaldson E C, Siddiqui T K, Lorenz P B. Wettability determination and its effect on recovery efficiency. *SPEJ*, 1969, 13~20
- [18] 李 琴. 相对渗透率法评定储集层岩石表面润湿性. 石油实验地质, 1996, **18**(4): 454~458
Li Q. A relative permeability method for assessing the moistening capacity of reservoir rock surface. *Experimental Petroleum Geology* (in Chinese), 1996, **18**(4): 454~458
- [19] Guan H, Brougham D, Sorbie K S, et al. Wettability effects in a sandstone reservoir and outcrop cores from NMR relaxation time distributions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2002, **34**: 35~54
- [20] 罗延钟, 张桂青. 频率域激电法原理. 北京: 地质出版社, 1988

- Luo Y Z, Zhang G Q. Induced Polarization Principle in Frequency Domain (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1988
- [21] 肖占山,徐世浙,罗延钟等. 岩石复电阻率频散特性的机理研究. 浙江大学学报(理学版), 2006, **33**(5):584~587
- Xiao Z S, Xu S Z, Luo Y Z, et al. Study on mechanisms of complex resistivity frequency dispersion property of rocks. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)* (in Chinese), 2006, **33**(5):584~587
- [22] 肖占山,徐世浙,罗延钟等. 泥质砂岩复电阻率的频散特性实验. 高校地质学报, 2006, **12**(1):123~130
- Xiao Z S, Xu S Z, Luo Y Z, et al. Complex resistivity dispersion properties experiment of shaly sands. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 2006, **12**(1):123~130
- [23] 肖占山,徐世浙,罗延钟等. 泥质砂岩的复电导率模型研究. 科技通报, 2006, **22**(6):607~610
- Xiao Z S, Xu S Z, Luo Y Z, et al. Complex conductivity model research of shal sands. *Bulletin of Science and Technology* (in Chinese), 2006, **22**(6):607~610
- (本文编辑 汪海英)