

doi: 10.11720/wtyht.2019.0233

肖占山,赵云生,赵宝成,等.基于岩石电性参数频散特性的储层参数评价方法[J].物探与化探,2019,43(5):1105-1110.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0233

Xiao Z S, Zhao Y S, Zhao B C, et al. The evaluation method of reservoir parameters based on the rock's electrical parameter dispersion properties[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1105-1110. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0233

基于岩石电性参数频散特性的储层参数评价方法

肖占山¹, 赵云生², 赵宝成¹, 李强¹, 胡海涛¹, 邵琨¹, 姚春明¹

(1. 中国石油集团测井有限公司 测井技术研究院, 北京 102206; 2. 浙江大学 地球科学学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 基于岩石电性参数频散特性的物理机理, 构建了新的岩石电频散特征参数——频散率 P , 通过模拟油藏条件下的储层岩石和人工岩样对比电频散实验分析, 建立起频散率 P 与饱和度、孔隙度、渗透率、阳离子交换量 Q_v 等储层参数的响应关系。研究表明: 频散率 P 与含水饱和度、孔隙度具有较好的线性关系, 频散率 P 与渗透率、阳离子交换量 Q_v 具有较好的幂律关系。与模值频散率 P_z 和实部频散率 P_R 相比, 相位频散率 P_ϕ 和虚部频散率 P_L 能够更好的表征岩石的电频散特征; 频散率 P 和储层参数具有良好的相关性和指示性, 可作为电频谱测井的储层评价参数。

关键词: 频散特性; 实验分析; 物性参数; 激发极化; 电频谱测井

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)05-1105-06

0 引言

岩石电性参数频散特性与含水饱和度、润湿性、孔隙度、渗透率等储层参数关系密切^[1-11], 基于岩石电性参数频散特性与储层参数的响应关系, 有望突破传统认识, 构建新的储层测井评价思路和新的测井方法。姜恩承等^[12]、关继腾等^[13]、于华等^[14]通过构建等效复电阻率导电模型的方式, 建立起岩石电频散与储层参数的关系; 陈序三等^[2]利用双频电极型复电阻率测井高低频(8.96 kHz, 70 Hz)的差值、差比值、比值等参数定性或半定量地评价水淹层和低阻油层的含油性; 肖占山等^[8]利用相位频散率 P 与饱和度关系曲线的斜率 k 定性评价岩石的润湿性; 赵云生等^[9]利用电抗和相位频散曲线的斜率 k 评价岩石的孔隙度和渗透率; 柯式镇等^[15]、李鹏飞等^[16]通过 Cole-Cole 模型、Dias 模型等反演极化率、时间常数等参数, 利用模型参数进行储层参数评价。由初步的岩石电频散物理机理可知, 低频岩石电频散

主要与激发极化效应有关^[17-20]。因此, 本文在低频定义了一个表征激发极化效应的频散率计算公式, 并在岩石频散特性的实验分析基础上, 建立起频散率与含水饱和度、孔隙度、渗透率、阳离子交换量等储层参数之间的响应关系。

1 岩石电性参数频散特征曲线

图 1 给出了 12 Hz~100 kHz 频率范围内岩石的电性参数频散特征曲线。随着频率的增加, 复电阻率模值和电阻率(实部)逐渐减小, 而相位和电抗率(虚部)则随着频率的增加先减小后增大, 出现了极值点(截止频率)。这是因为在频率小于截止频率(图 1 的截止频率为 10 kHz)时, 激发极化(IP)效应是岩石电频散的主要因素, 随着频率增大, 电磁耦合(EM)效应逐步增强^[19]。因此, 定义复电阻率模值频散率 P_z 如下:

$$P_z = \frac{\rho_{f1} - \rho_{f2}}{\rho_{f1}} \quad (1)$$

收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-07-02

作者简介: 肖占山(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩石物理研究、测井理论方法及数值计算工作。Email: lh_xiaozs@cnpc.com.cn

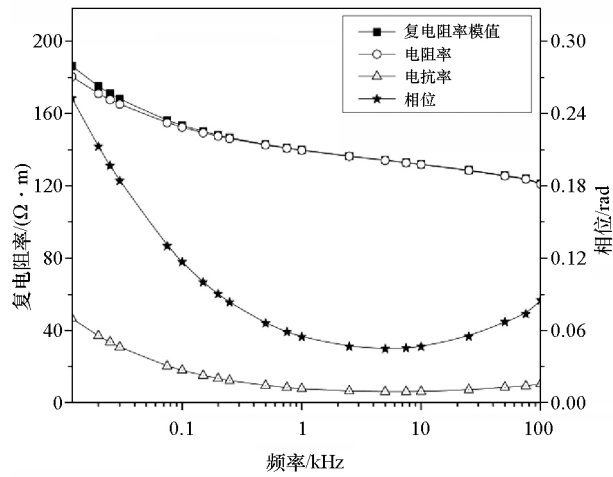


图 1 岩石电性参数频散特性曲线

Fig.1 Rock's electrical parameter dispersion properties

其中: ρ_{f1} 为低频复电阻率模值, ρ_{f2} 为截止频率的复电阻率模值。电抗频散率(虚部频散率) P_L 和相位频散率 P_ϕ 的定义与公式(1)相同。

通过大量的岩石物理实验数据分析可以看出,截至频率 f_2 的范围在 5 kHz~10 kHz 之间,在小于这个截至频率的频率范围,激发极化效应占主导地位,并且岩石模值、实部、虚部、相位的电频散曲线都随着频率的增加而减小。因此,本文定义的频散率 P 主要表征激发极化效应的频散特征。结合低频电极型电频谱测井仪器设计需求, f_1 和 f_2 分别取值为 16 Hz 和 5 kHz。

与模值和实部相比,相位和虚部信息能够更好地表征岩石电频散特征。因此,选择电抗频散率 P_L 和相位频散率 P_ϕ 进行实验数据分析。

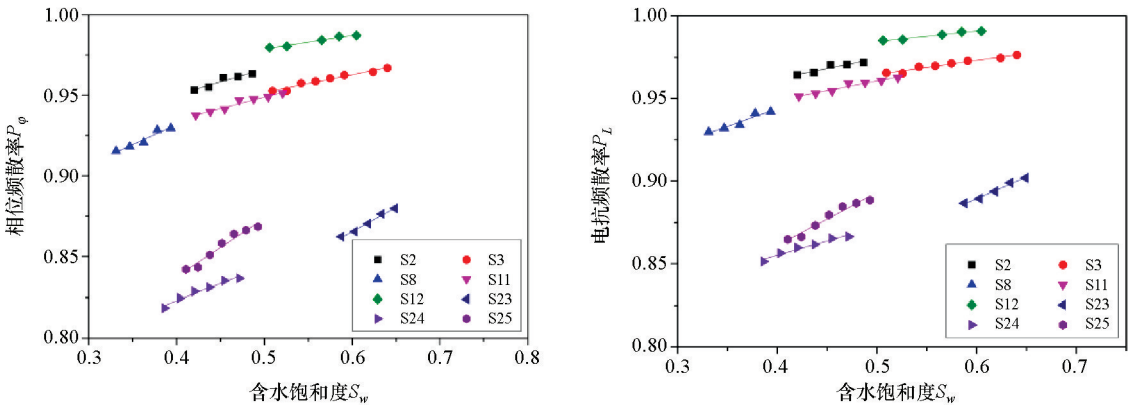
2 实验方法

实验测量仪器为 SCMS-E 型高温高压多参数测量系统和 ZL5-LCR 智能阻抗分析仪,测量电流的频率范围为 12 Hz~100 kHz,测量电极为不极化电极,采用两极法测量。选择不同区块、不同岩性的岩心进行实验研究,将岩心制备成直径为 2.54 cm、长度为 5 cm 的实验岩样,并制备砂岩人工岩心进行对比实验分析。对岩心进行洗油、洗盐、烘干等常规实验预处理,并完成岩心孔隙度、渗透率等物性参数测量,将岩心真空饱和 2 000 mg/L 的 NaCl 溶液待用,并完成油驱水、水驱油等驱替实验。采用人工岩样对比实验,是因为在人工岩样制备过程中,可以对岩性、矿物成分、泥质含量等因素进行人为控制。

3 实验分析

3.1 含油饱和度与岩石电性参数频散特性的关系

图 2、表 1、表 2 给出了油驱水过程中,两个不同区块的泥质砂岩的相位频散率 P_ϕ 和电抗频散率 P_L 与含水饱和度 S_w 的关系曲线,随着含水饱和度的增加,相位频散率和电抗频散率增大,频散率与含水饱和度之间有着非常好的单调线性关系。孔隙流体特性与岩石电性参数频散特性之间的这种响应关系,是最初低频电极型复电阻率测井仪器提出的最重要的岩石物理基础。关于孔隙流体特性与岩石电性参数频散特性的关系,中国学者做了很多先导性的研究,并且取得了比较一致的研究结论。从实验分析结果来看,相位频散率和电抗频散率可作为评价储



a—相位频散率与含水饱和的关系曲线;b—电抗频散率与含水饱和度的关系曲线

a—the relationship between the frequency dispersivity of phase and water saturation;b—the relationship between the frequency dispersivity of reactance and water saturation

图 2 频散率与含水饱和度的关系曲线

Fig.2 The relationship between the frequency dispersivity and water saturation

表 1 相位频散率与含水饱和度相关系数
Table 1 Correlation coefficient between frequency dispersivity of phase and water saturation

岩心编号	相关系数	公式
S2	0.88498	$y = 0.16187x + 0.88550$
S3	0.95841	$y = 0.11023x + 0.89666$
S8	0.92648	$y = 0.24873x + 0.83240$
S11	0.94573	$y = 0.14145x + 0.87812$
S12	0.97086	$y = 0.08333x + 0.93713$
S23	0.98577	$y = 0.30078x + 0.68497$
S24	0.96025	$y = 0.20792x + 0.73988$
S25	0.95208	$y = 0.36025x + 0.69354$

表 2 电抗频散率与含水饱和度相关系数
Table 2 Correlation coefficient between frequency dispersivity of reactance and water saturation

岩心编号	相关系数	公式
S2	0.86846	$y = 0.12237x + 0.91303$
S3	0.95412	$y = 0.08528x + 0.92189$
S8	0.91625	$y = 0.21519x + 0.85778$
S11	0.94242	$y = 0.11816x + 0.90153$
S12	0.96747	$y = 0.06242x + 0.95331$
S23	0.98618	$y = 0.26022x + 0.73328$
S24	0.95792	$y = 0.17449x + 0.78540$
S25	0.95254	$y = 0.32160x + 0.73247$

层含水饱和度的特征参数之一。

3.2 孔隙度与岩石电性参数频散特性的关系

选择孔隙度分布范围为 9.42%~33.73%的天然砂岩岩心和孔隙度分布范围为 35.84%~42.76%的人工岩心,岩心饱和矿化度 2 000 mg/L 的 NaCl 溶液,测量其频散特征曲线,并计算其相位频散率 P_φ 和电抗频散率 P_L 。图 3、表 3、表 4 给出了孔隙度 φ 与相位频散率 P_φ 和电抗频散率 P_L 的关系,可以看出,相位频散率和电抗频散率与孔隙度呈良好的线

性变化关系,并且具有较高拟合精度,随着孔隙度的增加,频散率增大。

实验研究所选取的频率范围的岩石电性参数频散,主要是由激发极化效应引起的。王宏建等^[21]、关继腾等^[22]讨论了时间域激发极化效应与孔隙度、孔隙结构、渗透率、阳离子交换量等的响应关系。从时间域和频率域激发极化的等效性来看,岩石的物性参数孔隙度、渗透率、阳离子交换量等同样影响着岩石电性参数的频散特性,岩石的孔隙特征与双电层形变极化和浓差极化都有着密切关联,致使随着岩石孔隙特征的变化,岩石电性参数频散特性也发生变化。因此,利用相位频散率 P_φ 和电抗频散率 P_L 评价储层孔隙度,具有微观岩石物理基础。式(1)定义的相位频散率 P_φ 和电抗频散率 P_L 可作为评价储层孔隙度的特征参数之一。

表 3 相位频散率与孔隙度相关系数
Table 3 Correlation coefficient between frequency dispersivity of phase and porosity

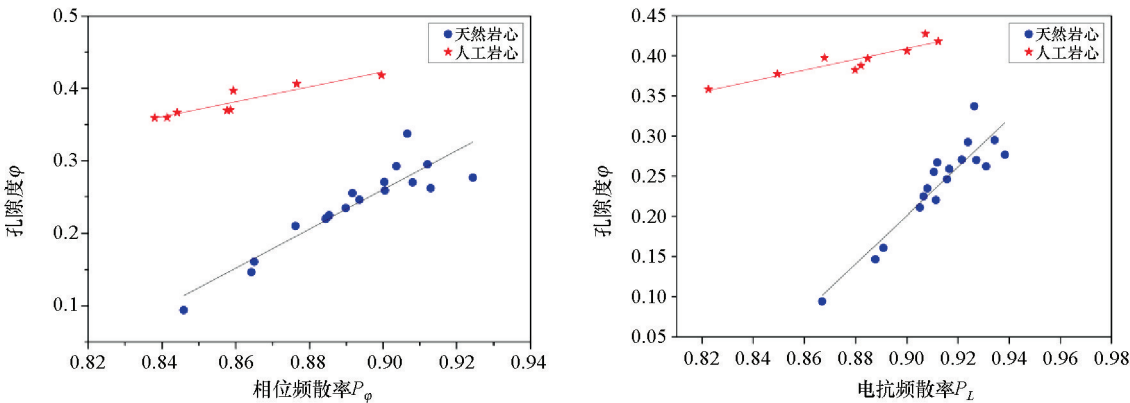
岩心类型	相关系数	公式
天然岩心	0.83109	$y = 2.69448x - 2.16503$
人工岩心	0.83358	$y = 1.30250x - 0.50644$

表 4 电抗频散率与孔隙度相关系数
Table 4 Correlation coefficient between frequency dispersivity of reactance and porosity

岩心类型	相关系数	公式
天然岩心	0.83691	$y = 3.01455x - 2.51200$
人工岩心	0.82062	$y = 0.67804x - 0.20083$

3.3 渗透率与岩石电性参数频散特性的关系

选择渗透率分布范围为 $(0.38 \sim 760) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的天然砂岩岩心和渗透率分布范围为 $(276 \sim 1\,420)$



a—相位频散率与孔隙度的关系曲线;b—电抗频散率与孔隙度的关系曲线
a—the relationship between the frequency dispersivity of phase and porosity φ ;b—the relationship between the frequency dispersivity of reactance and porosity φ

图 3 频散率与孔隙度的关系曲线
Fig.3 The relationship between the frequency dispersivity and porosity φ

$\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的人工岩心。将岩心饱和地层水(矿化度 2 000 mg/L),测量其频散特征曲线,并计算其相位频散率 P_φ 和电抗频散率 P_L 。

图 4、表 5、表 6 给出了渗透率 K 与相位频散率
表 5 相位频散率与渗透率相关系数

Table 5 Correlation coefficient between frequency dispersivity of phase and permeability		
岩心类型	相关系数	公式
天然岩心	0.82689	$y=165516x^{58.6155}$
人工岩心	0.81357	$y=3355.0x^{9.28497}$

表 6 电抗频散率与渗透率相关系数

Table 6 Correlation coefficient between frequency dispersivity of reactance and permeability		
岩心类型	相关系数	公式
天然岩心	0.83375	$y=63447.88x^{61.5588}$
人工岩心	0.80756	$y=3083.053x^{9.9419}$

P_φ 和电抗频散率 P_L 的关系。在本文的实验中,相位频散率 P_φ 和电抗频散率 P_L 与渗透率呈良好的幂律变化关系,并且具有较高的拟合精度。从频率域激电效应和时间域激电效应等价性来看,岩石的渗透特性影响着浓差极化特性,进而对岩石电性参数频散特性产生影响。因此,利用相位频散率 P_φ 和电抗频散率 P_L 评价储层渗透率也具有微观岩石物理基础。公式(1)定义的相位频散率 P_φ 和电抗频散率 P_L 可作为评价储层渗透率的特征参数之一。

3.4 阳离子交换量与岩石电性参数频散特性的关系

选择泥质含量不同的泥质砂岩岩心,真空饱和 NaCl 溶液(矿化度 2 000 mg/L),测量其频散特征曲线,计算其相位频散率 P_φ 和电抗频散率 P_L ,并在实验室内完成岩心的阳离子交换量 Q_v 测定。

图 5 给出了阳离子交换量 Q_v 与相位频散率 P_φ

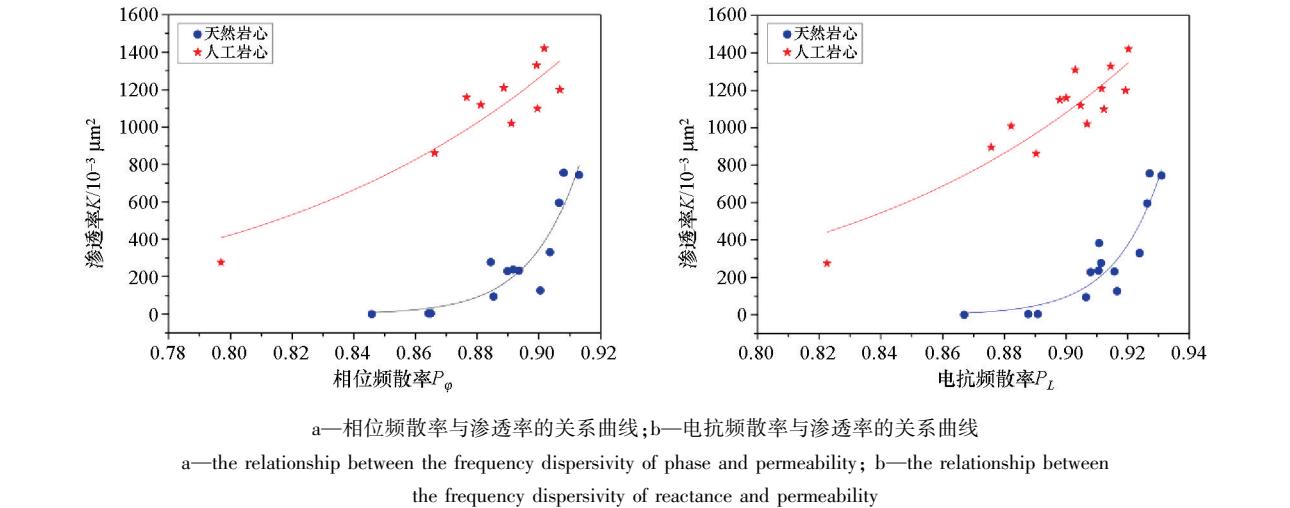


图 4 频散率与渗透率的关系曲线
Fig.4 The relationship between the frequency dispersivity and permeability

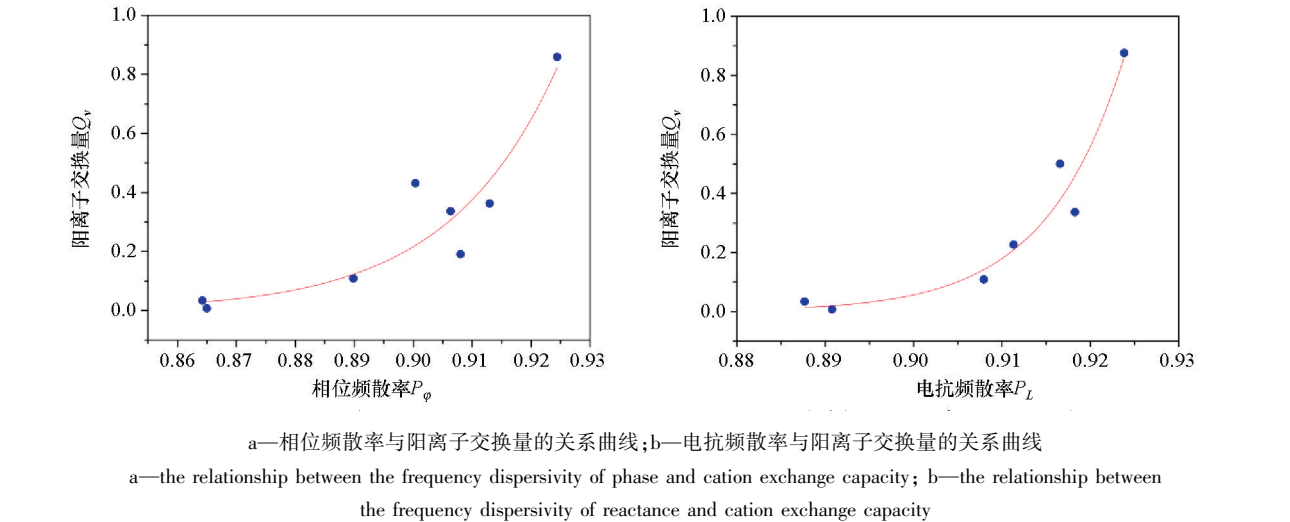


图 5 频散率与阳离子交换量的关系曲线
Fig.5 The relationship between the frequency dispersivity and cation exchange capacity

和电抗频散率 P_L 的关系曲线。从实验数据分析可以看出,相位频散率 P_ϕ 和电抗频散率 P_L 与阳离子交换量 Q_v 呈良好的幂律变化关系,并且具有较高的拟合精度。从岩石电性参数频散特性的机理分析来看,阳离子交换量 Q_v 与岩石双电层形变有着密切的关系,岩石的阳离子的交换吸附能力,主导着岩石的双电层形变极化。从图 5 中可以看出,随着阳离子的增加,频散率增大,并具有单调性。与孔隙度、渗透率一样,本文提出的相位频散率 P_ϕ 和电抗频散率 P_L 也可以作为储层阳离子交换量 Q_v 的评价参数。

表 7 相位频散率、电抗频散率与阳离子交换量相关系数
Table 7 Correlation coefficient of frequency dispersivity of phase, frequency dispersivity of reactance and cation exchange capacity

类型	相关系数	公式
相位频散率	0.83796	$y = 41.5601x^{49.8970}$
电抗频散率	0.93315	$y = 3344.5514x^{104.2788}$

4 结论及建议

1) 在岩石电频散的物理机理和实验研究基础上,本文给出了一个能够表征激发极化效应的新的频散率定义,该频散率定义在低频电极型电频谱测井仪器的频率范围。

2) 利用定义的频散率 P ,在岩石电频散特性的实验研究基础上,构建其与储层参数之间的响应关系。相位频散率 P_ϕ 和电抗频散率 P_L 与含水饱和度及孔隙度之间呈线性关系;相位频散率 P_ϕ 和电抗频散率 P_L 与渗透率及阳离子交换量 Q_v 之间呈幂律数关系,频散率 P 与储层参数之间具有良好的指示性和表征性。但对于实际非均质储层,孔、渗、饱等储层参数都同时影响着测井电频散信息,而本文只是进行单因素的实验规律讨论,对于实际测井资料处理时,需要针对不同目标区块,结合岩石物理实验,找出影响岩石电频散特性的主控因素。

3) 基于岩石电性参数频散特性的储层参数评价方法,突破常规储层参数测井评价模式,形成新的评价体系和新的评价思路。在实际测井中,很难在室内岩心实验的频率范围内测量出纯激电效应,因此,为了进一步促进电频谱测井新技术的发展,需要优化和完善电频谱测井仪器的测量模式、测量频率、信号处理等关键技术,使测井信息的响应特征与岩石物理实验的响应特征相匹配。

参考文献 (References):

[1] 范宜仁,陆介明,王光海,等.岩石电阻率频散现象的实验研究[J].石油大学学报,1994,18(1):17-23.
Fan Y R, Lu J M, Wang G H, et al. Experimental study on the dispersion of rock resistivity [J]. Journal of the University of Petroleum, 1994,18(1):17-23.

[2] 陈序三,赵文杰,朱留方.复电阻率测井方法及其应用[J].测井技术,2001,25(5):327-331.
Chen X S, Zhao W J, Zhu L F. Complex Resistivity Logging and Its Applications[J]. Well Logging Technology, 2001,25(5):324-331.

[3] 刘红岐,邓友明,邱春宁,等.岩芯电容率特征研究及其在流体识别中的应用[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(2):51-54.
Liu H Q, Deng Y M, Qiu C N, et al. Characteristics of permittivity of cores and its application in fluids identification[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011,33(2):51-54.

[4] Knight R, Endres A. Surface conduction at the hydrocarbon/water interface. Society of Professional [C]//Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 32th, Lafayette La, Transactions, 1991:11-120.

[5] Ruffet C, Gueguen Y, Darot M. Complex conductivity measurements and fractal nature of porosity[J]. Geophysics, 1991,56(6):758-768.

[6] Denicol P, Jing X. Estimating permeability of reservoir rocks from complex resistivity data. Society of Professional [C]//Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 37th, USA, Transactions, 1996:XX1-XX11.

[7] Moss K, Jing X D. Wettability of Reservoir Rock and Fluid Systems from Complex Resistivity Measurements[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001,29(6):1-19.

[8] 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[J].地球物理学报,2009,52(5):1326-1332.
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 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009,52(5):1326-1332.

[9] 赵云生,肖占山,田钢,等.不同物性参数的岩石电性参数频散特性实验[J].地球物理学进展,2015,30(1):339-342.
Zhao Y S, Xiao Z S, Tian G, et al. Experiments of rock's electrical parameter dispersion properties with different physical parameters[J]. Progress in Geophysics,2015,30(1):339-342.

[10] 黄理善,张胜业,陈长敬,等.用岩石复电阻率求渗透率的研究[J].工程地球物理学报,2007,4(5):444-449.
Huang L S, Zhang S Y, Chen C J, et al. Research on Calculating Permeability with Complex Resistivity[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007,4(5):444-449.

[11] 王军,胡恒山,徐小蓉,等.基于动电效应的岩芯渗透率实验测量[J].地球物理学报,2010,53(8):1953-1960.
Wang J, Hu H S, Xu X R, et al. Experimental measurement study on rock permeability based on the electrokinetic effect[J].Chinese

- Journal of Geophysics, 2010, 53(8): 1953 – 1960.
- [12] 姜恩承, 令狐松, 叶青竹, 等. 频率域复电阻率数学模型研究[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 98 – 100.
- Jiang E C, Linghu S, Ye Q Z, et al. On mathematic model of complex resistivity in frequency domain[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(2): 98 – 100.
- [13] 关继腾, 程媛媛, 于华. 利用等效电路模型研究泥质砂岩复电阻率频散特性[J]. 测井技术, 2011, 35(6): 512 – 517.
- Guan J T, Cheng Y Y, Yu H. On the frequency dispersion characteristics of complex resistivity in shaly sandstone based on equivalent circuit model[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(6): 512 – 517.
- [14] 于华, 关继腾, 陈辉, 等. 储层岩石流动电位频散特性的数学模拟[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 676 – 687.
- Yu H, Guan J T, Chen H, et al. Mathematical simulation on the frequency dispersion characteristics of the streaming potential in reservoir rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(2): 676 – 687.
- [15] 柯式镇, 冯启宁, 孙艳茹. 岩石复电阻率频散模型及其参数的获取方法[J]. 测井技术, 1999, 23(6): 416 – 418.
- Ke S Z, Feng Q N, Sun Y R. A dispersion model of rock complex resistivity and its parameters algorithm[J]. Well Logging Technology, 1999, 23(6): 416 – 418.
- [16] 李鹏飞, 黄诚. 基于富有机质页岩复电阻率的几种导电模型的探讨[J]. 地震工程学报, 2015, 37(12): 240 – 245.
- Li P F, Huang C. Discussion of several conductive models based on the complex resistivity of organic-rich shale[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(12): 240 – 245.
- [17] Vinegar H J, Waxman M H. Induced polarization of shaly sands[J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1267 – 1287.
- [18] 程辉, 底青云, 李帝铨. 频率信号激励下岩石电性参数研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 918 – 925.
- Cheng H, Di Q Y, Li D Q. The discussion electrical properties of rocks base on frequency response characteristics[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 918 – 925.
- [19] 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[J]. 浙江大学学报, 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[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 33(5): 584 – 587.
- [20] 黄理善, 敬荣中, 张胜业, 等. 岩石模型的复电阻率研究[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2657 – 2664.
- Huang L S, Jing R Z, Zhang S Y, et al. Study of the complex resistivity of rocks and ores model[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(6): 2657 – 2664.
- [21] 王宏建, 童茂松. 利用激发极化确定泥质砂岩渗透率的实验研究[J]. 测井技术, 2008, 32(4): 296 – 299.
- Wang H J, Tong M S. An induced polarization method for estimating permeability of shaly sand reservoir[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(4): 296 – 299.
- [22] 关继腾, 于华, 王谦, 等. 储层岩石时间域激发极化效应的数学模拟[J]. 计算物理, 2012, 29(3): 354 – 360.
- Guan J T, Yu H, Wang Q, et al. Mathematical simulation on induced polarization of reservoir rock in time domain[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2012, 29(3): 354 – 360.

The evaluation method of reservoir parameters based on the rock's electrical parameter dispersion properties

XIAO Zhan-Shan¹, ZHAO Yun-Sheng², ZHAO Bao-Cheng¹, LI Qiang¹,
HU Hai-Tao¹, SHAO Kun¹, YAO Chun-Ming¹

(1. CNPC Logging Company Limited Technology Research Institute, Beijing 102206, China; 2. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A new rock electrical dispersion characteristic parameter dispersion rate P is constructed based on physical mechanism of rock electrical parameters dispersion characteristics. By comparing the electric dispersion experimental analysis of reservoir rocks and artificial rock samples under simulated reservoir conditions, the response relationship between the dispersion rate P and the reservoir parameters such as saturation, porosity, permeability and cation exchange capacity Q_v is established. The research shows that the dispersion rate P has a good linear relationship with water saturation and porosity. The dispersion rate P has a good power-law relationship with the permeability and cation exchange capacity Q_v . Compared with the modulus dispersion rate P_z and the real part dispersion rate P_R , the phase dispersion rate P_φ and the imaginary part dispersion rate P_L can characterize the electrical dispersion of the rock better. The dispersion rate P and reservoir parameters have good correlation and indication, and can be used as reservoir evaluation parameters for resistivity spectrum logging.

Key words: dispersion properties; experimental analysis; physical parameters; induced polarization; resistivity spectrum logging

(本文编辑: 沈效群)