

地层界面处双侧向测井视电阻率 曲线极化角影响因素分析

倪小威^{1,2},徐观佑^{1,2},徐思慧^{1,2},冯加明^{1,2},别康³,刘迪仁^{1,2*}

(1.长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 武汉 430100; 2.长江大学 地球物理与石油资源学院,湖北 武汉 430100; 3.中国石油塔里木油田公司 勘探开发研究院,新疆 库尔勒 841000)

摘要:常规双侧向测井视电阻率曲线在地层界面处常会出现极化角现象,造成视电阻率曲线畸变并产生“伪薄层”现象,对准确划分地层及准确求取地层真电阻率造成严重影响。基于有限元数值模拟技术,建立双侧向测井数理模型,研究围岩电阻率、地层厚度、储层各向异性、井径以及井斜角对双侧向测井视电阻率曲线极化角形态及幅值的影响程度。研究表明:目的层与围岩电阻率对比度越大,双侧向测井视电阻率曲线极化角现象越明显;地层厚度对极化角的影响比较复杂,当地层厚度小于仪器纵向分辨率时,极化角现象消失;储层各向异性会造成极化角幅值发生变化,但对极化角形态的影响较小;随着井径增大,极化角现象趋于消失;井斜角越大,极化角越平缓。双侧向测井视电阻率曲线极化角是多种因素共同作用的结果,在极化角校正工作时应对各影响因素进行综合考虑。

关键词:有限元数值模拟 双侧向测井 视电阻率曲线 极化角 影响因素

中图分类号:P631.821

文献标识码:A

Analysis of influencing factors of polarization angle of dual laterolog apparent resistivity curves at stratigraphic interface

NI Xiaowei^{1,2}, XU Guanyou^{1,2}, XU Sihui^{1,2}, FENG Jiaming^{1,2}, BIE Kang³, LIU Diren^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 2. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: The apparent resistivity curves of conventional dual laterolog often present polarization angle at the stratigraphic interface, resulting in distortion of the curve form and occurrence of “pseudo thin layer” phenomenon, which seriously affects the accurate division of the stratigraphic interface and the accurate calculation of the true resistivity of the strata. Based on the finite element numerical simulation technique, the mathematical model of dual laterolog was established. The effects of surrounding rock resistivity, layer thickness, reservoir anisotropy, well diameter and well inclination on polarization angle and amplitude of dual laterolog apparent resistivity were studied. The results show that the difference between the resistivity of the target layer and the resistivity of the surrounding rock is larger, and the polarization angle of the dual laterolog is more obvious. The effect of layer thickness on the polarization angle is complicated. When the thickness of the strata is thinner than the thickness resolved by instrument measurement, the polarization angle disappears. The anisotropy of the reservoir will cause the amplitude of the polarization angle to change, but the influence on geometry of the polarization angle is small. As the well diameter becomes larger, the polarization angle tends to disappear. The larger the well inclination is, the gentler the polarization angle is. The polarization angle of dual laterolog apparent resistivity curve is the result

收稿日期:2017-11-21。

作者简介:倪小威(1995—),男,湖北荆州人,在读硕士研究生,从事电法测井正反演研究。联系电话:13986189442, E-mail:737190269@qq.com。

*通讯作者:刘迪仁(1965—),男,湖北监利人,教授,博士。联系电话:13807216263, E-mail:liudr666@163.com。
基金项目:国家自然科学基金项目“地层条件下富有有机质页岩电磁响应机理与应用基础研究”(U1562109)。

influenced by many factors. In the work of polarization angle correction, all factors should be considered comprehensively.

Key words: finite element numerical simulation; dual laterolog; apparent resistivity curve; polarization angle; influencing factors

双侧向测井是获取地层电阻率信息的重要测井方法之一,在中国各大油田均被广泛应用^[1-3]。由于双侧向测井仪器的固有工作方式及原理,在地层边界附近,双侧向测井视电阻率曲线往往出现极化角现象^[4]。极化角现象会严重影响视电阻率曲线的形态及幅值,在测井解释工作中经常将其误判为薄层特征^[5],因此必须对极化角进行校正。前人针对双侧向测井视电阻率曲线形态已进行了一定的研究,但目前尚未有对于双侧向测井视电阻率曲线极化角影响因素的相关研究。范晓敏等通过对具有不同侵入特征地层的双侧向测井视电阻率理论曲线的计算,研究了双侧向测井视电阻率曲线的形状与泥浆侵入地层状态的关系^[6]。柯式镇等从理论上考查了泥浆、井径、围岩、地层厚度、侵入深度、侵入带电阻率和仪器常数等因素对双侧向测井视电阻率曲线幅度差的影响,并分析了引起“双轨”现象的三大因素^[7]。邓少贵等研究发现,电性各向异性倾斜地层不仅造成电阻率曲线形态的变化,且其深、浅侧向电阻率曲线的幅度差异更为复杂^[8]。范晓敏等通过数值模拟技术研究了井眼、地层厚度和侵入带对双侧向测井视电阻率曲线形状的影响^[9]。为此,笔者基于有限元数值模拟技术,研究围岩电阻率、地层厚度、储层各向异性、井径、井斜角对双侧向测井视电阻率曲线极化角形态及幅值的影响,由于深、浅侧向测井视电阻率曲线的极化角受各因素的影响规律一致,因此以浅侧向测井为例进行极化角影响因素分析。研究成果对极化角校正工作具有一定的参考价值。

1 有限元数值模拟

1.1 模型建立

基于有限元数值模拟技术,分别建立双侧向测井直井模型和斜井模型,模型参数见文献[10]。研究围岩电阻率、地层厚度、储层各向异性、井径、井斜角对双侧向测井视电阻率曲线极化角形态及幅值的影响。

引用储层电性各向异性系数来衡量地层电阻率各向异性的大小^[11-16],其表达式为

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_v}{R_h}} \quad (1)$$

在各向异性储层中,一般采用的坐标系为 x 轴和 y 轴均平行于地层层理方向, z 轴垂直于地层层理方向。储层岩石的电阻率张量可以表示为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_h & 0 & 0 \\ 0 & R_h & 0 \\ 0 & 0 & R_v \end{pmatrix} \quad (2)$$

1.2 有限元正演模拟

由于侧向类测井普遍采用频率比较低的交流电,因此可以近似当作直流电来处理^[17]。确定阵列侧向测井的响应,就是要求出一个连续而光滑的电位函数^[18],利用有限元数值模拟技术计算双侧向测井响应,并归结为求泛函数的极值问题^[19]。

在实际模拟过程中,双侧向测井的2种探测模式的电场可以由3个分场叠加形成。即通过对每个分场分配不同的加权系数,然后进行电场叠加,进而合成总电场。3个分场分别为只有主电极 A_0 发射单位电流形成的分场、只有屏蔽电极 A_1 和 A_1' 发射单位电流形成的分场以及只有屏蔽电极 A_2 和 A_2' 发射单位电流形成的分场。

其中各探测模式下的总电场为

$$\mu_z = \mu_0 + c_1 \mu_1 + c_2 \mu_2 \quad (3)$$

假设电极 A_0 流出的单位电流为1 A,以合成浅侧向测井响应为例,浅侧向测井模式满足的电位和电流条件分别为

$$\mu_{M_1} = \mu_{M_2} \quad (4)$$

$$1 + I_1 + I_2 = 0 \quad (5)$$

因此,式(4)和式(5)可以分别转化为

$$\mu_{0M_1} + c_1 \mu_{1M_1} + c_2 \mu_{2M_1} = \mu_{0M_2} + c_1 \mu_{1M_2} + c_2 \mu_{2M_2} \quad (6)$$

$$1 + c_1 + c_2 = 0 \quad (7)$$

根据式(6)和式(7)可以求解出 c_1 和 c_2 ,代入式(3)得到浅侧向测井对应的总电场分布,进而可以求得浅侧向测井的视电阻率,即

$$R_{LIS} = \frac{K_s \mu_{SM_1}}{I_0} \quad (8)$$

2 极化角影响因素分析

2.1 围岩电阻率

采用直井模型,目的层为各向同性储层,储层电阻率(R_i)为 $20 \Omega \cdot m$,地层厚度为1 m,井径为0.2 m,围岩厚度为无限大,泥浆电阻率为 $1 \Omega \cdot m$,仪器

位于井眼居中测量。对于低阻和高阻围岩电阻率(R_s),均分别模拟 R/R_s 值为0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 2, 5, 10和20时对双侧向测井视电阻率曲线极化角的影响。结果(图1)表明,极化角受围岩电阻率影响较大,围岩电阻率与目的层电阻率对比度越大,极化角现象越明显。当目的层电阻率与围岩电阻率的差异达到2倍时,电阻率曲线开始表现出一定的极化角现象,低阻围岩电阻率对极化角的影响程度比高阻围岩电阻率更大。对于低阻围岩,随着围岩电阻率的减小,极化角幅值变得越来越大,当 R/R_s 值大于10,极化角幅值急剧增大,造成电阻率曲线严重失真;且极化角形态受围岩电阻率的影响也较大,随着围岩电阻率的减小,极化角变得越来越尖锐,表现出的“伪高阻薄层”特征越明显;高阻围岩电阻率变化也会引起极化角形态发生变化,但对极化角幅值影响较小, R/R_s 值越大,极化角特征越明显。

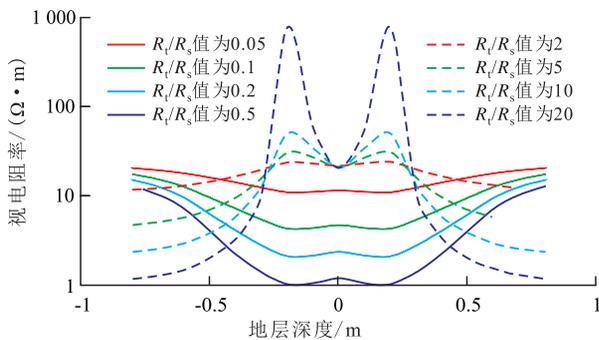


图1 围岩电阻率对浅侧向测井视电阻率曲线极化角的影响

Fig.1 Effect of surrounding rock resistivity on polarization angle of apparent resistivity curve of shallow laterolog

2.2 地层厚度

采用直井模型,目的层为各向同性储层, R_h 为 $20 \Omega \cdot m$,井径为0.2 m, R_s 为 $5 \Omega \cdot m$,围岩厚度为无限大,泥浆电阻率为 $1 \Omega \cdot m$,仪器位于井眼居中测量。模拟地层厚度分别为0.5, 1, 2和3 m时对双侧向测井视电阻率曲线极化角的影响。结果(图2)表明,地层厚度的变化与极化角幅值的变化没有明显的规律,这主要是因为是在直井条件下地层厚度对双侧向测井响应的影响比较复杂。地层厚度对极化角的影响主要表现在极化角形态方面,目的层厚度越小,极化角越尖锐,目的层厚度越大,极化角越向两边偏移,且2个极化角之间的平台区域越大,即反映储层真实信息的电阻率曲线区间越长,越有利于准确求取储层的真电阻率。同时,当地层厚度小于双侧向测井的纵向分辨率(约为0.8 m)时,极化角现象则会消失。

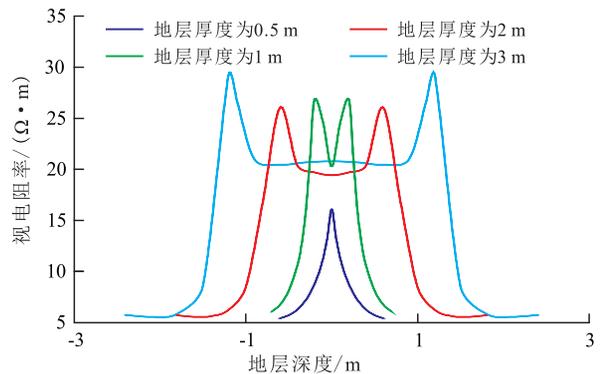


图2 地层厚度对浅侧向测井视电阻率曲线极化角的影响

Fig.2 Effect of strata thickness on the polarization angle of apparent resistivity curve of shallow laterolog

2.3 井径

采用直井模型,目的层为各向同性储层, R_h 为 $20 \Omega \cdot m$,地层厚度为1 m, R_s 为 $5 \Omega \cdot m$,围岩厚度为无限大,泥浆电阻率为 $1 \Omega \cdot m$,仪器位于井眼居中测量。模拟井径分别为0.2, 0.4和0.6 m时对双侧向测井视电阻率曲线极化角的影响。结果(图3)表明,井径对极化角的影响较大。随着井径增大,地层界面处的极化角幅值迅速减小,且形态变得更加平缓。即井径越大,极化角现象越不明显,表明随着井径越来越大,电流更多流入井眼,而流入围岩的电流变得较少,因此使得极化角变得越来越不明显。

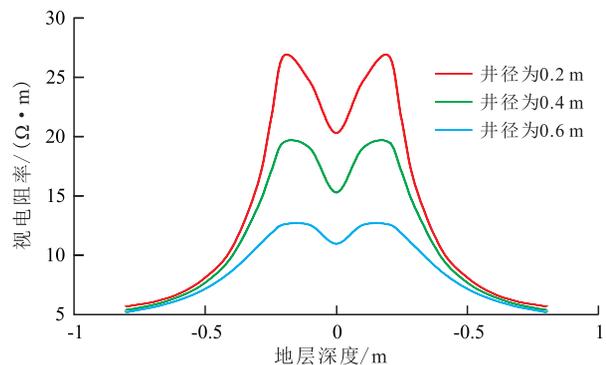


图3 井径对浅侧向测井视电阻率曲线极化角的影响

Fig.3 Effect of well diameter on the polarization angle of apparent resistivity curve of shallow laterolog

2.4 储层各向异性

采用直井模型,目的层为各向异性储层, R_h 为 $20 \Omega \cdot m$,地层厚度为1 m, R_s 为 $5 \Omega \cdot m$,围岩厚度为无限大,泥浆电阻率为 $1 \Omega \cdot m$,仪器位于井眼居中测量。模拟 λ 分别为1, 2, 3和4时对双侧向测井视电阻率曲线极化角的影响。结果(图4)表明,储层各向异性对深、浅侧向测井视电阻率曲线极化角的影响规律和程度存在差异。对于浅侧向测井,随着储层各向异性系数的增大,极化角的幅值增大,但增幅并不明显;对于深侧向测井,随着储层各向异性系数的增大,极化角的幅值减小,且当储层为各向

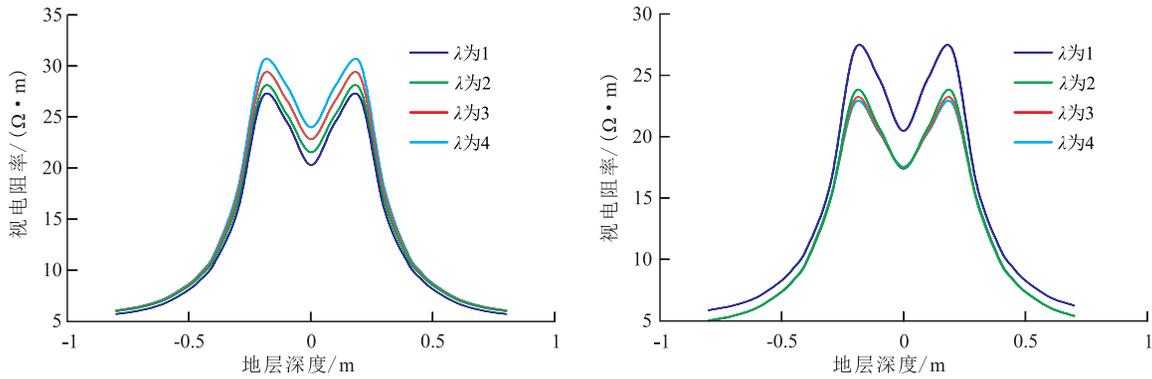


图4 储层各向异性对双侧向测井视电阻率曲线极化角的影响

Fig.4 Effect of reservoir anisotropy on the polarization angle of apparent resistivity curves of dual laterolog

同性时幅值最大,其他不同储层各向异性系数对应的电阻率曲线基本重合,表明储层各向异性系数小于2时,对极化角幅值具有一定的影响。对于深、浅侧向测井,储层各向异性系数增大对极化角的形态特征基本无影响。

2.5 井斜角

采用斜井模型,目的层为各向同性储层, R_v 为 $20 \Omega \cdot m$, 井径为 $0.2 m$, 地层厚度为 $1 m$, R_h 为 $5 \Omega \cdot m$, 围岩厚度为无限大,泥浆电阻率为 $1 \Omega \cdot m$, 仪器位于井眼居中测量。模拟井斜角分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 和 90° 时对双侧向测井视电阻率曲线极化角的影响。结果(图5)表明,井斜角越小,双侧向测井视电阻率曲线极化角现象越明显。对于浅侧向测井,当井斜角小于 15° 时,随着井斜角的增加,极化角特征基本无改变;当井斜角大于 15° 时,随着井斜角的增大,极化角越来越平缓,且幅值也越来越小;当井斜角大于 60° 时,浅侧向测井视电阻率曲线极化角现象基本消失,这是由于随着井斜角的增加,越来越多的电流直接进入目的层,流入围岩的电流减少所导致的。对于深侧向测井,井斜角对其极化角的影响规律与浅侧向测井基本相同,但深侧

向测井响应受井斜角的影响更大,这与深侧向测井较深的探测特性有关。

3 结论

围岩电阻率变化对双侧向测井视电阻率曲线极化角的影响较大,尤其是低阻围岩。当目的层与低阻围岩电阻率的比值大于10时,极化角幅值急剧增加,对视电阻率曲线形态造成严重影响。地层厚度、储层各向异性、井径和井斜角等因素对极化角也有一定影响,尽管与围岩电阻率相比对极化角的影响相对较小,但在进行极化角校正时同样需要考虑。实际测井资料中极化角的形成是受多种影响因素共同作用的结果,在进行校正工作时应综合考虑极化角的各种影响因素,进行合理的校正处理。笔者仅针对双侧向测井视电阻率曲线极化角的影响因素进行探讨,未提出明确的极化角校正方法,对极化角校正方法有待于进行更深层次的研究。

符号解释:

λ —— 储层电性各向异性系数; R_v —— 岩石垂直方向的电阻率, $\Omega \cdot m$; R_h —— 岩石水平方向的电阻率, $\Omega \cdot m$; R —— 岩石的电阻率张量, $\Omega \cdot m$; μ_z —— 各探测模式下的总电场, V ; μ_0, μ_1, μ_2 —— A_0 发射单位电流、 A_1 和 A_1' 发射单位电流、 A_2 和 A_2' 发射单位电流形成的分场, V ; c_1, c_2 —— 各分场的加权系数; μ_{M_1}, μ_{M_2} —— 监督电极 M_1, M_2 上的电位, V ; M_1, M_2 —— 不同的监督电极; I_1, I_2 —— 从电极 A_1, A_2 流出的电流, A ; R_{lls} —— 浅侧向测井视电阻率, $\Omega \cdot m$; K_s —— 浅侧向测井电极系数, m ; μ_s —— 浅侧向测井的总电场, V ; I_0 —— 主电流, A 。

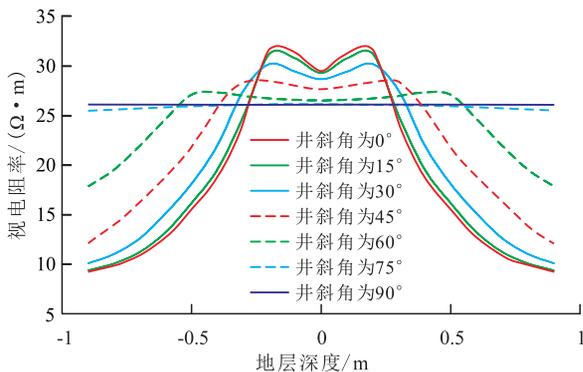


图5 井斜角对浅侧向测井视电阻率曲线极化角的影响

Fig.5 Effect of well inclination on the polarization angle of apparent resistivity curve of shallow laterolog

参考文献:

[1] 李智强,陈中权,张克.高分辨率双侧向测井数值分析[J].地球

- 物理学进展, 2016, 31(4): 1 614-1 619.
- LI Zhiqiang, CHEN Zhongquan, ZHANG Ke. Analysis of numeric simulation of high-resolution dual laterlog response [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4): 1 614-1 619.
- [2] 向立宏, 赵铭海, 郝雪峰, 等. 济阳拗陷东营组沉积体系新认识 [J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 8-13.
- XIANG Lihong, ZHAO Minghai, HAO Xuefeng, et al. New understanding on sedimentary system of Dongying Formation in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 8-13.
- [3] 李丽. 青东5块沙四段上亚段沉积类型及储层发育主控因素 [J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 62-66.
- LI Li. Study on sedimentary type and main controlling factors of reservoir development in upper Es₄ submember of Qingdong5 Block [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 62-66.
- [4] 范晓敏. 双侧向测井曲线形状与地层侵入关系研究 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 142-146.
- FAN Xiaomin. Investigation on the relation between form of laterologs and invasion state of reservoir [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(1): 142-146.
- [5] 范宜仁, 巫振观, 王磊, 等. 大斜度井各向异性地层双感应测井响应特征研究 [J]. 测井技术, 2016, 40(3): 262-269.
- FAN Yiren, WU Zhenguan, WANG Lei, et al. Response characteristics of dual induction logging in anisotropic formation and high deviated wells [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(3): 262-269.
- [6] 范晓敏, 莫修文. 双侧向测井曲线形状与侵入剖面的关系研究 [C]. 吉林: 中国地球物理学会年会, 2005.
- FAN Xiaomin, MO Xiwen. Study on the relationship between the shape of the dual laterlog curve and the invasion profile [C]. Jilin: Annual Meeting of the Chinese Society of Geophysics, 2005.
- [7] 柯式镇, 冯启宁, 孙艳茹, 等. 双侧向测井幅度差的影响因素与“双轨”现象 [J]. 测井技术, 1999, 23(2): 123-126.
- KE Shizhen, FENG Qining, SUN Yanru, et al. The influence factors of dual laterolog separation and its dual-track phenomenon [J]. Well Logging Technology, 1999, 23(2): 123-126.
- [8] 邓少贵, 仝兆岐, 范宜仁. 各向异性倾斜地层双侧向测井响应数值模拟 [J]. 石油学报, 2006, 27(3): 61-64.
- DENG Shaogui, TONG Zhaoqi, FAN Yiren. Numerical simulation of dual laterolog response in tilted anisotropic formation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 61-64.
- [9] 范晓敏, 吕蕾. 双侧向测井曲线形状的影响因素研究 [J]. 世界地质, 2005, 24(4): 396-401.
- FAN Xiaomin, LÜ Lei. Investigation on influence factors of laterolog curve form [J]. Global Geology, 2005, 24(4): 396-401.
- [10] 祝鹏, 林承焰, 李智强, 等. 水平井和大斜度井中阵列侧向测井响应数值模拟 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45(6): 1 862-1 869.
- ZHU Peng, LIN Chengyan, LI Zhiqiang, et al. Numerical simulation of array laterolog response in horizontal and highly deviated wells [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(6): 1 862-1 869.
- [11] 孙向阳, 聂在平, 赵延文, 等. 用矢量有限元方法模拟随钻测井仪在倾斜各向异性地层中的电磁响应 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1 600-1 607.
- SUN Xiangyang, NIE Zaiping, ZHAO Yanwen, et al. The electromagnetic modeling of logging-while-drilling tool in tilted anisotropic formations using vector finite element method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1 600-1 607.
- [12] 沈金松, 苏本玉, 郭乃川. 裂缝性储层的电各向异性响应特征研究 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2 903-2 912.
- SHEN Jinsong, SU Benyu, GUO Naichuan. Study on the anisotropic characteristics of the electric response to fractured reservoir [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(11): 2 903-2 912.
- [13] 沈金松. 用有限差分法计算各向异性介质中多分量感应测井的响应 [J]. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 101-107.
- SHEN Jinsong. Modeling of the multi-component induction log in anisotropic medium by using finite difference method [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(1): 101-107.
- [14] 汪益宁, 李洪, 曹淑慧, 等. 各向异性底水油藏长水平井产能公式 [J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(4): 108-111, 116.
- WANG Yining, LI Hong, CAO Shuhui, et al. Productivity formula of long horizontal well in anisotropic bottom-water reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 108-111, 116.
- [15] 李昂, 张丽艳. 裂缝介质弹性波场数值模拟及波场特征 [J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(2): 127-133.
- LI Ang, ZHANG Liyan. Numerical modeling and characteristic analyses of the elastic wavefields in the fracture media [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 127-133.
- [16] 李玉梅, 柳贡慧, 李军, 等. 页岩储层各向异性对裂缝起裂压力的影响 [J]. 特种油气藏, 2014, 21(6): 133-137.
- LI Yumei, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Impacts of anisotropy to fracturing pressure in shale reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(6): 133-137.
- [17] 刘迪仁, 万文春, 夏培, 等. 不同井眼条件下的水平井双侧向测井响应 [J]. 物探与化探, 2012, 36(3): 422-425.
- LIU Diren, WAN Wenchun, XIA Pei, et al. The response of dual laterolog to different borehole conditions in the horizontal well [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(3): 422-425.
- [18] 张庚骥. 电法测井(上册) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- ZHANG Gengji. Electrical logging (1) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.
- [19] 夏培, 刘迪仁, 万文春, 等. 水平井各向异性地层双侧向测井响应数值模拟 [J]. 石油天然气学报, 2011, 33(8): 104-106.
- XIA Pei, LIU Diren, WAN Wenchun, et al. Numerical simulation of dual laterolog response to anisotropic formation of horizontal wells [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(8): 104-106.