

随钻电阻率成像测井在裂缝地层中的响应模拟

蔡亚琳^{1,2}, 柯式镇^{1,2*}, 康正明^{1,2}, 李新³, 李铭宇^{1,2}, 马雪瑞^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249

3 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

* 通信作者, wksz@vip.sina.com

收稿日期: 2019-09-16

国家科技重大专项“低渗透储层高精度随钻成像技术研究”(2016ZX05021-002)资助

摘要 随着石油勘探的深入发展, 随钻测井技术已成为及时准确获取钻井和地质资料的重要手段。其中, 随钻电阻率成像测井在实时井场数据采集、解释、现场决策以及指导地质导向钻井中起着关键作用。然而, 目前关于随钻电阻率成像测井影响因素的研究较少。针对随钻电阻率成像仪在裂缝地层中的测井响应及其影响因素尚不明确的问题, 本文基于三维有限元法, 利用COMSOL MULTIPHYSICS有限元仿真平台, 对单一裂缝地层及网状裂缝地层中的随钻电阻率成像测井响应进行了模拟, 分析了井眼尺寸、泥浆电阻率、电阻率对比度、裂缝张开度、裂缝倾角及延伸距离等因素对测井响应的影响。模拟时, 采用有限元局部网格细化技术, 以达到求解精度, 提高求解速度。数值模拟结果表明, 井眼泥浆的电阻率会影响裂缝分辨率, 而由于泥浆的存在, 当井眼尺寸较小且仪器纽扣电极距离井壁较近时, 仪器对裂缝的分辨率较高。当井眼尺寸保持在7 in以内时, 视电阻率曲线效果较好。井眼环境对不同尺寸纽扣电极影响不同。当裂缝的张开度小于纽扣电极的分辨率时, 随裂缝张开度增加, 裂缝处的视电阻率逐渐接近真实值。而当裂缝张开度大于纽扣分辨率时, 随钻电阻率成像测井受其张开度的影响较大。裂缝的延伸距离对成像结果的影响有限, 当该延伸距离超过0.3 m时, 该影响可以忽略。应用斯伦贝谢解释模型考察异常电流面积 A 与裂缝张开度的关系, 两者呈较好的线性正相关关系, 而 A 与电阻率对比度呈负相关关系。裂缝倾角会影响成像时的视张开度, 随倾角增大, 成像图上裂缝的视张开度增大, 且倾角对低角度裂缝的视张开度大小的影响小于高角度裂缝。研究结果对随钻电阻率成像测井仪在复杂裂缝地层中的测井解释及模型建立具有一定指导意义。

关键词 随钻电阻率成像; 测井响应; 有限元法; 数值模拟; 复杂裂缝

Logging response simulation of a LWD resistivity imaging tool in fractured formations

CAI Yalin^{1,2}, KE Shizhen^{1,2}, KANG Zhengming^{1,2}, LI Xin³, LI Mingyu^{1,2}, MA Xuerui^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

Abstract With the development of petroleum exploration, logging-while-drilling (LWD) technology has become an important means

引用格式: 蔡亚琳, 柯式镇, 康正明, 李新, 李铭宇, 马雪瑞. 随钻电阻率成像测井在裂缝地层中的响应模拟. 石油科学通报, 2020, 03: 327-336
CAI Yalin, KE Shizhen, KANG Zhengming, LI Xin, LI Mingyu, MA Xuerui. Logging response simulation of a LWD resistivity imaging tool in fractured formations. Petroleum Science Bulletin, 2020, 03: 327-336. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.028

to obtain timely and accurate drilling and geological data. Resistivity imaging logging-while-drilling plays a key role in real-time well site data acquisition, interpretation, field decision-making and guidance of geological steering. However, there are few studies into the factors influencing resistivity imaging logging while drilling. The factors influencing the logging response of resistivity imaging while drilling in fractured formations are not well understood at present. This paper uses the finite element simulation platform COMSOL MULTIPHYSICS based on a 3D finite element method (3D FEM) to simulate the response of resistivity imaging while drilling in single crack and reticular fractured formations. The influence of borehole size, mud resistivity, resistivity contrast, fracture opening, fracture dip angle and extension distance on logging response are analyzed. In the simulation, local mesh refinement technology is adopted to improve the solution accuracy and the solution speed. The numerical simulation results show that the resistivity of borehole mud will affect the fracture resolution, and due to the existence of mud, when the borehole size is small and the button electrode of the instrument is close to the borehole wall, the resolution of the instrument to the fracture is higher. When the borehole size is kept within 7 inches, the effect of the apparent resistivity curve is credible. The influence of the borehole environment on button electrodes with different sizes is different. When the fracture opening is less than the resolution of the button electrode, the apparent resistivity at the fracture gradually approaches the true value with an increase of crack opening. When the fracture opening is greater than the resolution, the resistivity imaging logging while drilling is greatly affected by the opening degree. The influence of fracture extension distance on imaging results is limited, and the influence can be ignored when the extension distance exceeds 0.3 m. The Schlumberger interpretation model is used to investigate the relationship between the abnormal current area A and the fracture opening degree, which shows a good positive linear correlation and a negative correlation with resistivity contrast. With an increase in the dip angle, the apparent opening of a fracture on the image increases, and the influence of the dip angle on the apparent opening of a low angle fracture is less than that of a high angle fracture. The research results have certain guiding significance for logging interpretation and model establishment of resistivity imaging with drilling tools in complex fracture formations.

Keywords LWD resistivity imaging; logging responses; 3D FEM; numerical simulation; complex fractures

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.028

0 引言

随着石油勘探的深入发展,随钻测井技术已成为及时准确获取钻井和地质资料的重要手段^[1]。其中,随钻电阻率成像测井在实时井场数据采集、解释、现场决策以及指导地质导向钻井中起着关键作用^[2]。在进行电法测井仪器数值模拟时,针对具体情况,根据灵活性、计算精度和速度的需要采用合适的数值方法^[3-4]。国外, S.Gianzero 等人^[5]将螺绕环等效为磁流环,利用二维有限元法推导了径向阶跃地层测井响应的公式。Bittar 等^[6]利用三维有限元法模拟了 Baker Hughes 的随钻电阻率测井仪器 Startrak 在单条倾斜裂缝地层中的测井响应。然而,该地层模型只包含了单条裂缝,缺少对复杂裂缝组合的有效考察。此外,由于 Startrak 采用电极装置,因此严格意义上基于螺绕环结构或者考虑频率的简化激励源的三维复杂地层的测井响应数值模拟工作尚未开展。国内,刘得军等^[7]利用有限元法研究了井旁的含油气洞穴对线圈型随钻电阻率测井幅度比和相位差的影响。

正确分析地层介质对仪器响应的影响,对提高测井资料解释精度具有重大的意义。然而,目前关于随钻电阻率成像测井影响因素的研究较少。本文针对复杂裂缝地层,基于 3D 有限元法,利用 COMSOL MULTI-

PHYSICS 有限元仿真平台进行模拟,研究了井眼、地层和裂缝的相关参数对随钻电阻率成像响应的影响。

1 测量原理及数值模拟方法

1.1 随钻电阻率成像测量原理

随钻电阻率成像测井仪器有两种激励机制,一种是直接向电极施加电流,另一种是通过螺绕环激励在钻铤上产生相等的电位实现聚焦,以获得地层电阻率^[8-14]。本文的方案正是基于后者。电流从发射器下方的钻铤发射,流经井眼和地层,然后返回到发射器上方的钻柱中。通过采集纽扣电极表面电流,代入欧姆定律公式即可实现将电流转换为地层视电阻率。

图 1 所示为本文研究的一种随钻电阻率成像测井仪器结构,钻铤上有 1 个发射螺绕环 T、直径为 0.010 m、0.0254 m 的纽扣电极阵列 B₁、B₂(称为四象限电极,即在轴向相隔 90° 各分布 4 个纽扣)和 2 个接

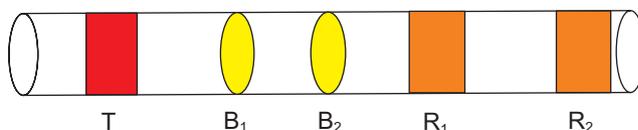


图 1 仪器结构示意图

Fig. 1 Schematic of tool structure

收螺绕环 R_1 、 R_2 。

1.2 数值模拟方法

本文考察的仪器结构和地层模型较为复杂,无法简化为二维轴对称模型,因此建立了三维模型(如图2),该模型在纵向上为三层地层。在模拟复杂地层响应时,为了减小计算量,简化了仪器结构,即忽略了螺绕环的线圈结构。将钻铤看作完美导体时,在发射螺绕环T上部钻铤和下部钻铤分别形成正负等量电压。电流一部分从下部钻铤出发,经过井眼和地层,最后回到上部钻铤,这与传统的电缆侧向测井测量方式十分类似;另一部分从钻头出发,流向钻头下方地层,用于测量钻头前方的电阻率。在不考虑频率影响情况下,螺绕环在钻铤和地层中产生的电流方式可以等效为一个长圆柱状的电压电偶极子。这样可以减少80%的模型网格节点数,改善网格疏密分布的合理性,确保了裂缝附近网格密度要求,从而大大提高了计算速度和计算精度。基于COMSOL软件AC/DC模块建立了如图2所示的三维模型。在模型中,对不同层设置相应的电导率及相对介电常数,对最外层地层的外边

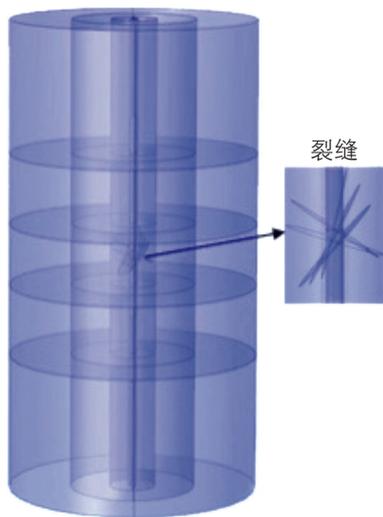


图2 裂缝模型
Fig. 2 The fracture model of simulation

界设置为接地,将钻铤表面赋予给定的电势值。在研究裂缝参数对测井响应的影响时,设置裂缝为多个与井眼相交的斜平面,且限制其径向延伸长度。

模拟过程中,对模型进行区域分解,针对不同区域设置不同的网格尺寸,并控制彼此区域网格剖分精度,以达到求解精度要求,提高求解速度。本文采用了有限元局部网格细化技术。对于纽扣、钻铤、井眼、裂缝等表面,采用三角形网格进行加密,能显著提升电流采集的精度。对于裂缝而言,网格加密是对研究对象本身进行,此外增加了一个全新的柱状体域,将裂缝全部包含在内,并对整个柱状体域进行网格加密。图3为纽扣表面和单裂缝网格加密的结果。

2 数值模拟结果

影响随钻电阻率成像测井响应的因素主要有井眼、裂缝和背景地层等^[15-19],为此建立了分别含单裂缝和网状裂缝的两种地层模型,分析了井眼尺寸、裂缝的各项参数和基岩电阻率与视电阻率的关系。在研究某个影响因素时,固定其他参数,只改变该研究的参数。为简化各实验中对参数的说明,表1和表2列出每次模拟时设置的各参数范围。2.1~2.4、2.6及2.7应用了单裂缝模型,其他应用的则是多裂缝模型。

表1为单裂缝地层的测量信号影响因素模拟参数列表,固定裂缝倾向为正北方位。本文考察了裂缝张

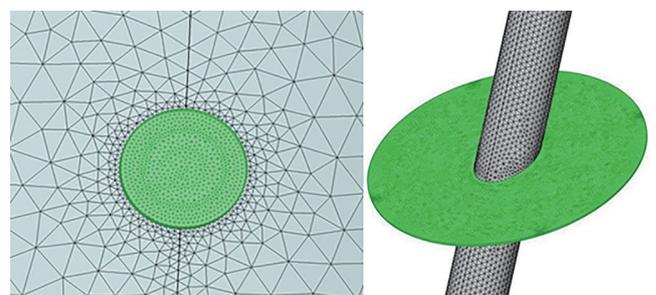


图3 纽扣电极和单裂缝网格剖分结果
Fig. 3 Results of button electrode and single fracture mesh

表1 单裂缝模型各模拟参数

Table 1 Parameters of single fracture

影响因素	张开度/mm	延伸距离/m	裂缝电阻率/($\Omega \cdot m$)	倾角/ $^\circ$	泥浆电阻率/($\Omega \cdot m$)	背景电阻率/($\Omega \cdot m$)
泥浆电阻率	5	0.5	1	0	0.1~20	100
井眼尺寸	5	0.5	1	0	1	100
裂缝张开度	0.05~2	0.5	1	0~75	1	100
延伸距离	5	0.1~0.5	1	0	1	100
电阻率对比度	5	0.5	1	0	0.1~20	100
倾角	5	0.5	1	0~75	1	100

表2 网状裂缝模型各模拟参数

Table 2 Parameters of network fracture simulation

影响因素	张开度/mm	延伸距离/m	裂缝电阻率/($\Omega \cdot m$)	倾角/ $^\circ$	泥浆电阻率/($\Omega \cdot m$)	背景电阻率/($\Omega \cdot m$)
延伸距离	5	0.1~0.5	1	45	1	100
倾角	5	0.5	1	15~75	1	100

开度、延伸距离、电阻率对比度和裂缝倾角对测量信号的影响。

表2为网状裂缝地层的影响因素模拟参数。对5条裂缝设置相应的张开度、延伸度、电阻率对比度和裂缝倾角来考察这些因素的影响。

图4为网状裂缝模型的展开示意图,裂缝1和2倾向为正东,裂缝3、4、5倾向为正西。

2.1 泥浆电阻率的影响

为了考察影响成像分辨率的因素,建立了水平单裂缝地层模型,裂缝位于坐标原点处。设置井眼直径为8.5 in,地层电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 。图5为不同泥浆电阻率下仪器的测井响应。可以看出,当泥浆电阻率越大时,仪器在裂缝处的视电阻率越小,仪器对裂缝的分辨率越高。但是在该泥浆电阻率范围内,仪器对裂缝的分辨率较差,根据曲线的半幅点估算的裂缝视

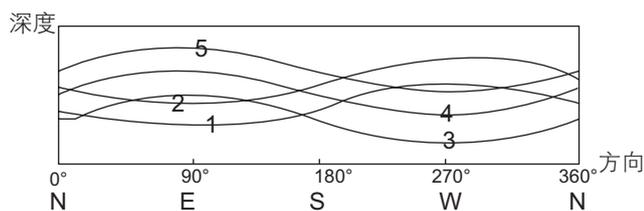


图4 网状裂缝模型的2D展开示意图

Fig. 4 Schematic of the network fracture model expansion

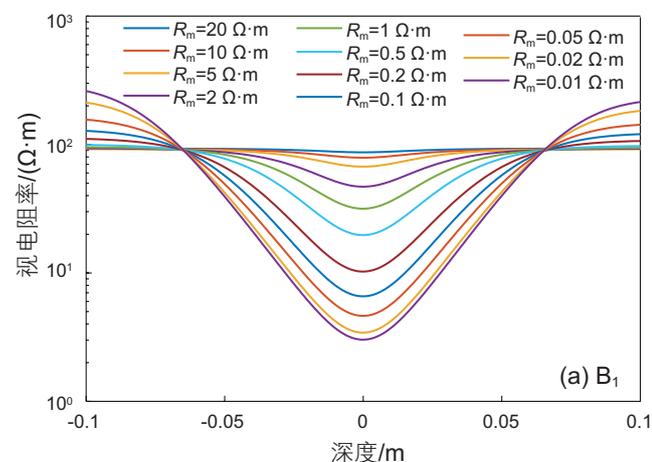


图5 泥浆电阻率对成像分辨率的影响

Fig. 5 The effect of mud resistivity on the imaging resolution

张开度与真实值5 mm相差较大,而且直径为10 mm、25.4 mm的小纽扣 B_1 和大纽扣 B_2 对裂缝的分辨率较接近。总而言之,泥浆电阻率会影响裂缝分辨率。

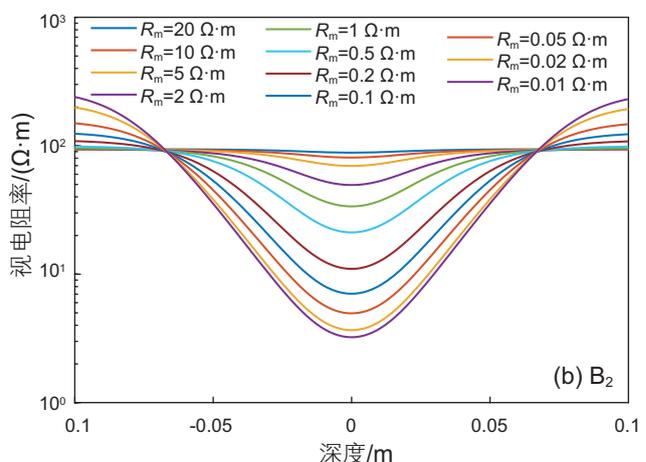
2.2 井眼尺寸的影响

设置井眼尺寸分别为6.75 in、6.80 in、7.00 in、7.50 in、8.00 in、8.50 in,模拟结果如图6所示。可以看出,随着井眼尺寸的减小,井壁与纽扣距离减小,视电阻率曲线逐渐趋近于理论值,裂缝处视电阻率越接近真电阻率,仪器对裂缝的分辨率越高。通常在随钻电阻率成像仪器设计中,纽扣电极会从钻铤向外延伸几毫米的距离,而在测量中,井径的变化导致纽扣电极不会一直贴在井壁上。由模拟结果可以看出,当井眼尺寸保持在7 in以内时,视电阻率曲线可以得到较好的效果。纽扣 B_2 与纽扣 B_1 结论类似。根据上述研究结果,后文模拟时井眼尺寸设置为7 in。

纽扣电极与井壁的距离和测量信号强度的关系如图7所示。可以看出,对 B_1 而言,当纽扣电极与井壁距离大于1 mm时,测量信号开始变小,相比而言,当纽扣电极与井壁距离大于3 mm时, B_2 的测量信号开始变小,说明 B_1 受到井眼环境影响大于 B_2 。

2.3 裂缝张开度的影响

设置模型的裂缝张开度分别为0.05 mm、0.10 mm、



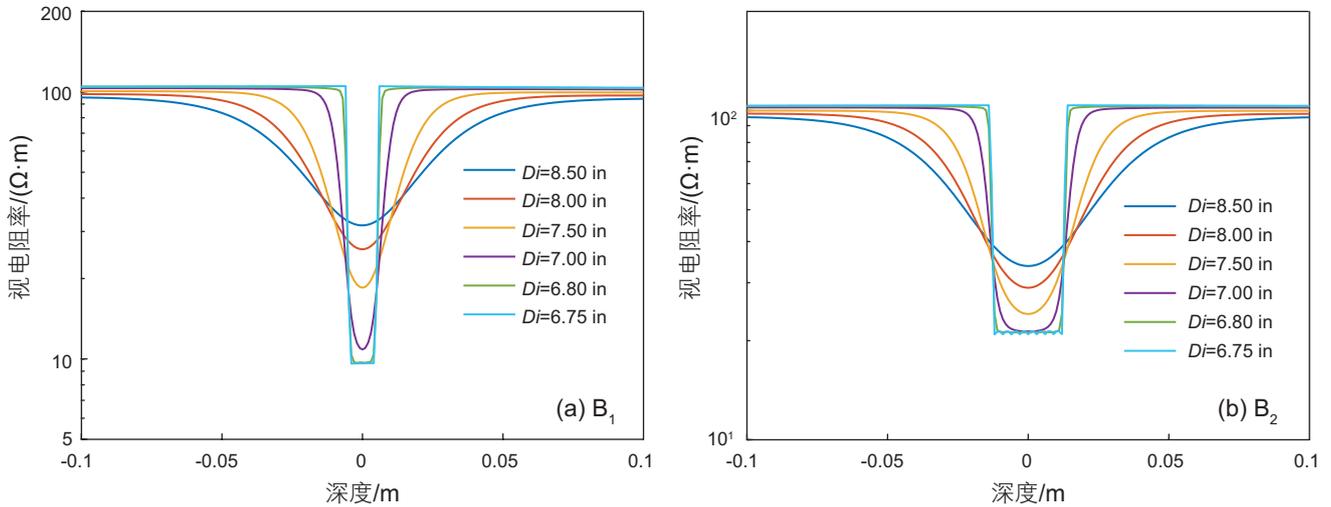


图6 井眼尺寸的影响
Fig. 6 Effects of bore size on the logging response

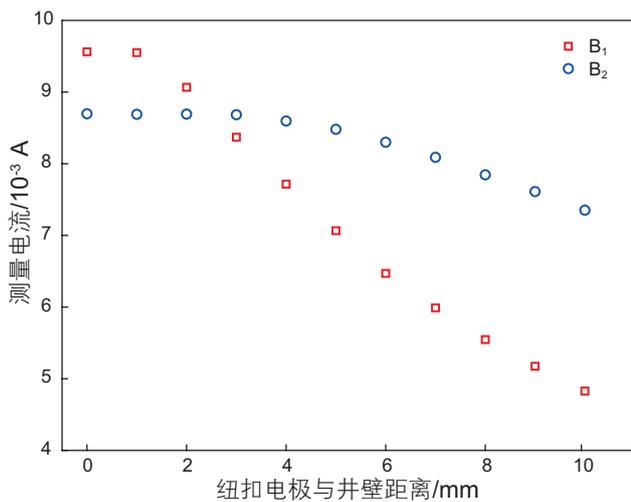


图7 纽扣电极与井壁距离对测量信号影响
Fig. 7 The effect of distance between button electrode and borehole wall on measurement signal

0.20 mm、0.50 mm、1.00 mm、2.00 mm。从图8中可以看出，随着裂缝张开度增加，裂缝处的视电阻率逐渐接近真实值 $1 \Omega \cdot m$ 。由于图中裂缝的张开度均小于纽扣的分辨率，因此裂缝的视张度变化不大，与仪器对裂缝的分辨率接近。这主要是由于当裂缝张开度增加，流经裂缝的电流增加，反映的视电阻率更接近模型值。

电成像测量电极直接探测裂缝的张开度误差较大，需要利用正演方法来建立解释模型。目前比较成熟的模型有斯伦贝谢解释模型、阿特拉斯解释模型和石油大学解释模型^[20]等，其中前两种模型较为常用。下面对斯伦贝谢解释模型进行考察，并尝试将其应用到随钻电阻率测井中。

S.Mluthi 和 P.Souhaite 用三维有限元模型研究了这种响应关系，得到关系式(1)：

$$W = C \cdot A \cdot R_m^b \cdot R_{XO}^{1-b} \quad (1)$$

式中， W 为裂缝张开度，in； A 为由于裂缝存在导致的异常电流面积， m^2 ； b 、 C 为成像仪器常数； R_m 为泥浆电阻率， $\Omega \cdot m$ ； R_{XO} 在此处可理解为背景地层电阻率，因为影响视张开度的地层厚度较为有限，可用冲洗带电阻率表示，其单位为 $\Omega \cdot m$ 。

为了定量考察 A 与裂缝张开度的关系，计算上图中的异常电流面积，并与裂缝张开度的关系进行拟合得到图9。可以看出，随着裂缝张开度的增大，异常电流面积的变化呈现出线性增加，且拟合程度很高。这与柯式镇等模拟的电缆成像测井仪器^[21]中两者之间的线性关系一致。

2.4 裂缝延伸距离的影响

设置模型的裂缝延伸距离分别为 0.10 m、0.15 m、0.20 m、0.25 m、0.30 m、0.35 m、0.40 m、0.45 m、0.50 m，模拟结果如图10所示。可以看出当裂缝延伸距离在 0.10~0.20 m 范围内增加时，视电阻率在裂缝处逐渐接近真实值；当延伸距离继续增加时，得到的视电阻率曲线趋于稳定。由此可以得出，裂缝延伸距离对随钻电阻率测井测量影响较小，这是由于电流在纵向上主要集中在井眼周围的地层，当裂缝延伸距离超出这个范围时，对电流的影响较小。

根据上述结果计算异常电流面积 A ，作裂缝延伸距离与 A 的关系如图11所示。随着裂缝延伸距离增大，视电阻率逐渐增加，而增加幅度逐渐降低。可以

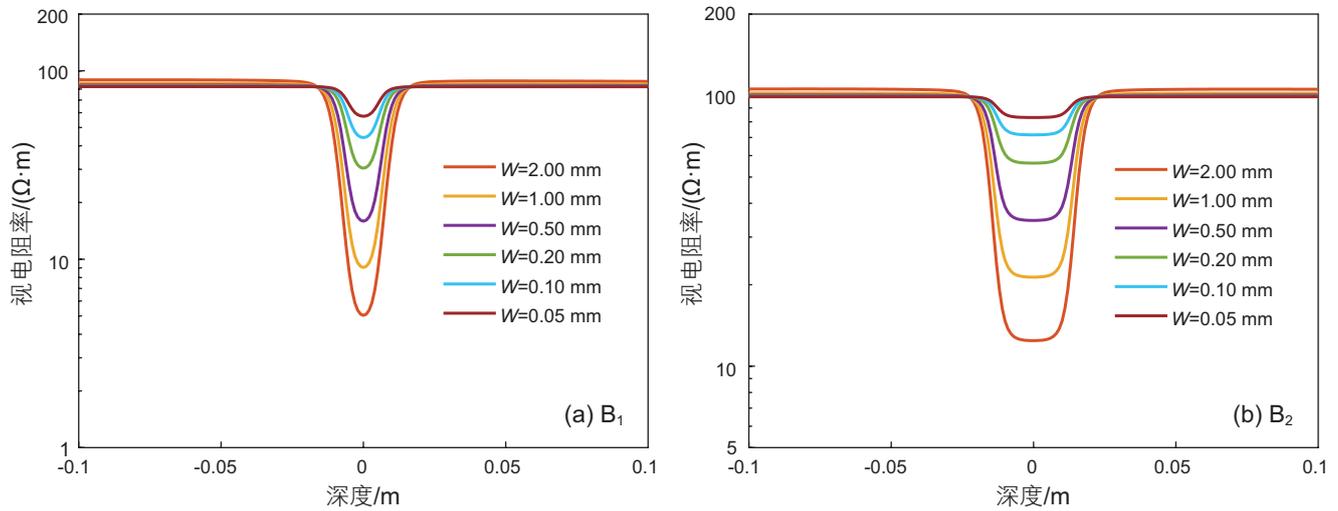


图8 裂缝张开度的影响
Fig. 8 Effects of opening width of fracture on the logging response

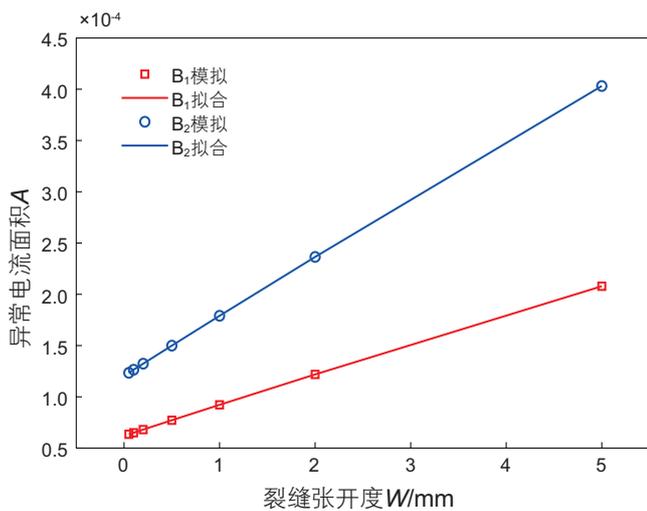


图9 A与裂缝张开度关系
Fig. 9 The relationship between A and fracture opening

直观看出，水平裂缝延伸距离对异常电流密度(可等效为视电阻率)影响有限，特别是延伸距离大于0.3 m后，延伸距离的影响可以忽略。

2.5 裂缝延伸距离对成像结果的影响

本文分析了网状裂缝地层中裂缝的延伸距离对成像结果的影响。模型中5条裂缝张开度为5 mm，裂缝倾角为45°，裂缝和泥浆电阻率为1 Ω·m，地层背景电阻率为100 Ω·m，设置裂缝1到裂缝5的延伸距离分别为0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m。通过图12成像结果发现，对于直径分别为25.4 mm和10 mm的大小纽扣B₂和B₁，裂缝1由于延伸距离较短未能被识别，在图像上未显示，而其他裂缝在图像上均有显

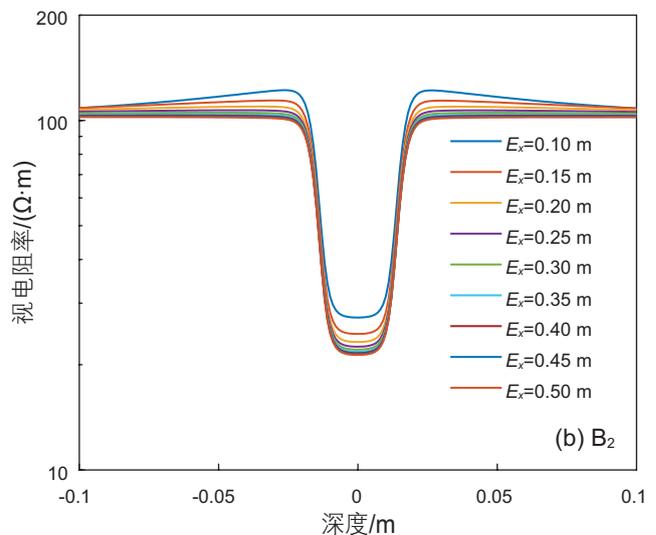
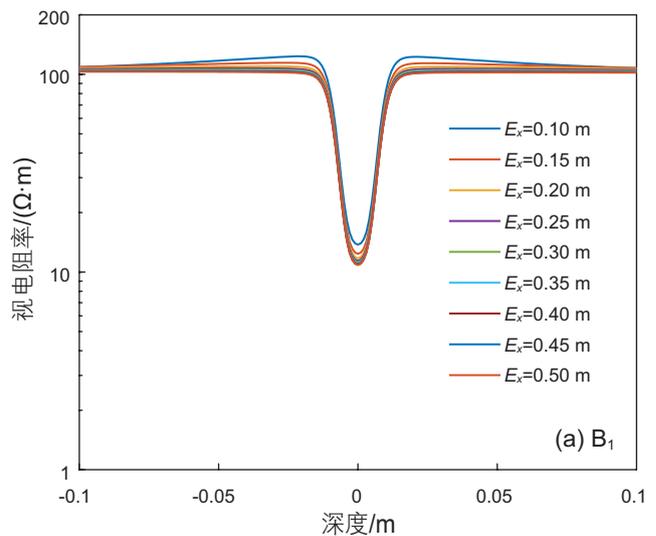


图10 裂缝延伸距离影响
Fig. 10 Effects of elongation of fracture on the logging response

示，而且裂缝延伸距离越大，裂缝颜色越暗，说明视电阻率越低。

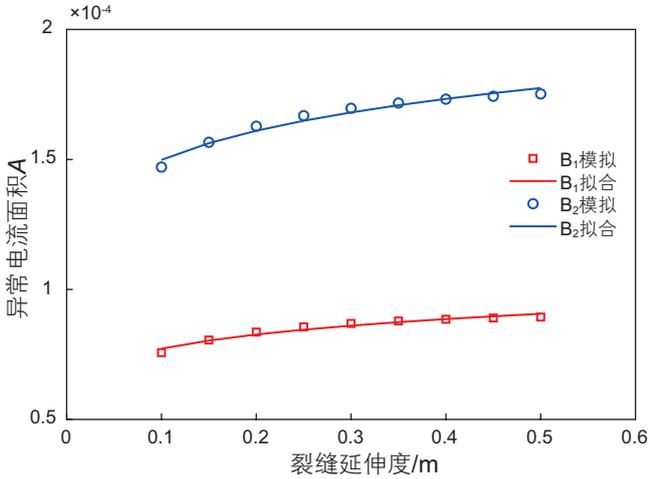


图 11 异常电流面积 A 与裂缝延伸距离的关系曲线
Fig. 11 The relation curve between A and elongation of fracture

2.6 电阻率对比度的影响

泥浆存在于井筒与裂缝中，定量研究泥浆电阻率和背景地层电阻率对比度对成像结果的影响，设置模型的泥浆电阻率分别为 $0.10 \Omega \cdot m$ 、 $0.20 \Omega \cdot m$ 、 $0.30 \Omega \cdot m$ 、 $1 \Omega \cdot m$ 、 $2 \Omega \cdot m$ 、 $5 \Omega \cdot m$ 、 $10 \Omega \cdot m$ 、 $20 \Omega \cdot m$ ，模拟结果如图 13 所示。可以看出，随着泥浆电阻率的增大，电阻率对比度逐渐增加，裂缝处的视电阻率值逐渐降低，但测井曲线的变化幅度较小。

定量研究电阻率对比度与异常电流面积的关系，模拟结果如图 14 所示。可以看出，当电阻率对比度小于 0.02 时，随着电阻率对比度的增加，异常电流面积线性降低，且拟合程度很高。当对比度超过 0.02 时，异常电流面积的下降趋势减缓，受对比度的影响减小。

2.7 倾角的影响

裂缝产状对成像结果有一定的影响，也是裂缝张度模型建立时需要考虑的重要因素之一。本文主要

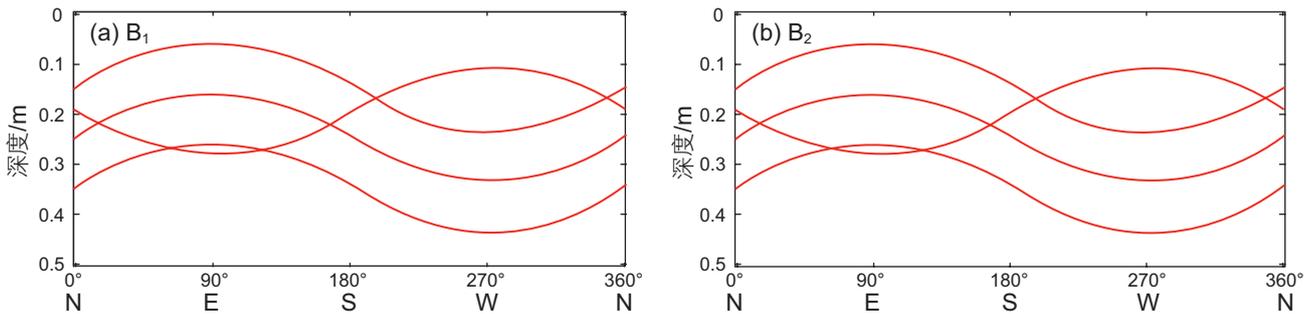


图 12 不同延伸距离裂缝的成像结果
Fig. 12 The imaging results at different fracture extensions

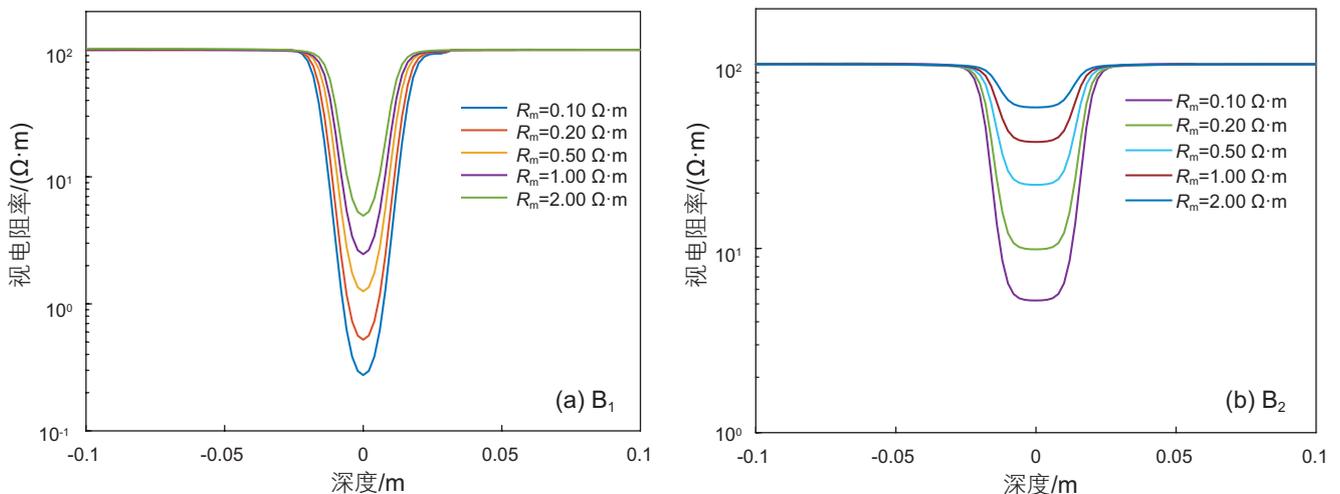


图 13 电阻率对比度的影响
Fig. 13 Effects of R_m/R_b on the logging response

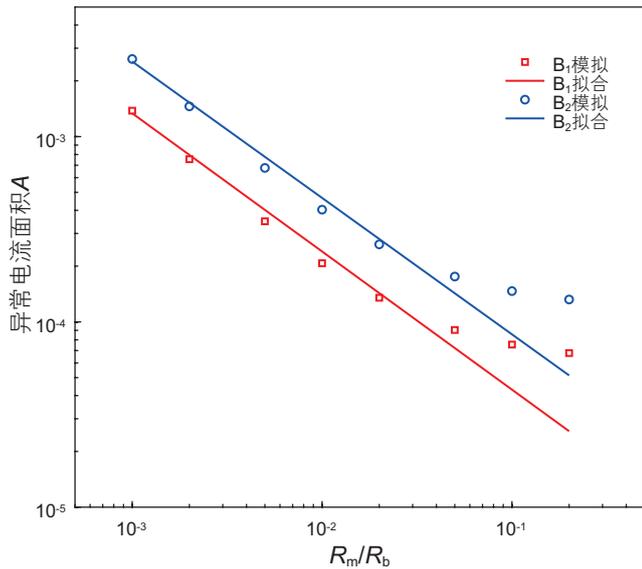


图 14 异常电流面积与电阻率对比度的关系曲线
Fig. 14 The relation curve between A and R_m/R_b

考察了裂缝倾角对测井响应的影响, 模型中裂缝张开度为 5 mm, 泥浆电阻率和裂缝电阻率为 $1 \Omega \cdot m$, 背景地层电阻率为 $100 \Omega \cdot m$, 裂缝倾角从 0° 依次变化至 75° 。图 15 为模拟结果: 当裂缝倾角小于 45° 时, 随着裂缝倾角的增大, 视电阻率测井曲线幅度变化较小; 而当裂缝倾角大于 45° 时, 随着裂缝倾角的增大, 视电阻率测井曲线幅度变宽且变化幅度较为明显。

2.8 倾角对成像结果的影响

本文模拟了网状裂缝模型下倾角裂缝不同时的成像效果。模型中, 裂缝 1 到裂缝 5 倾角分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° , 其他参数与上述单一裂缝一致。通过图 16 能直观地看出, 对于裂缝 1、裂缝 2 和裂缝 3, 其倾斜角度较低, 裂缝在图像上的视张开度变化不大; 裂缝 4 到裂缝 5 相比于裂缝 1、裂缝 2、裂缝 3, 随着裂缝倾角的增大, 裂缝在图像上的视张开度依次

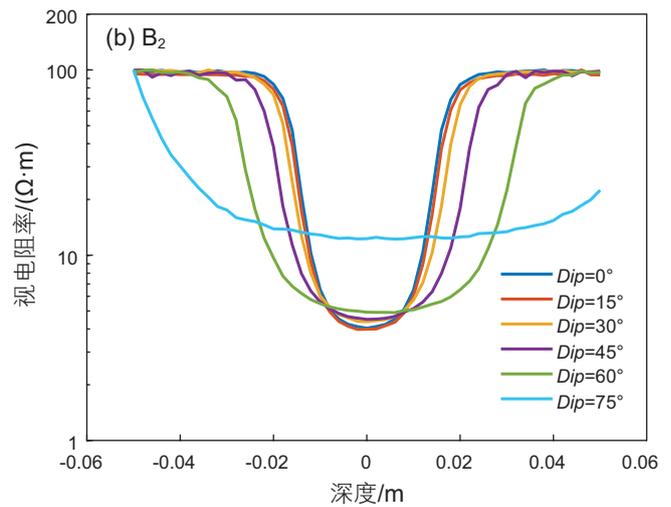
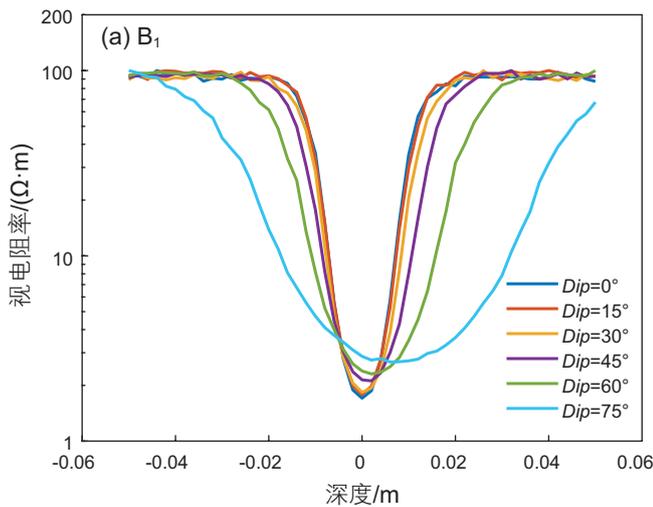


图 15 不同裂缝倾角模拟结果
Fig. 15 The simulated results at different fracture dips

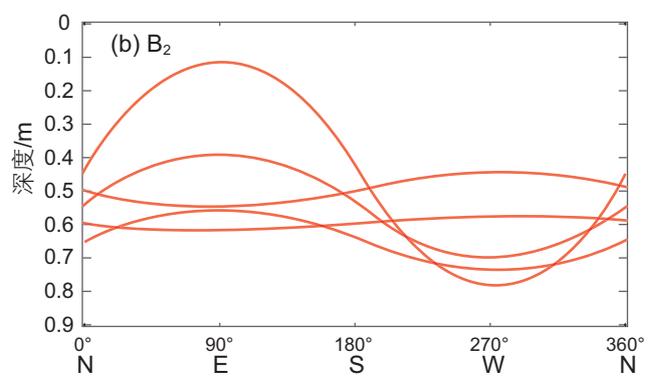
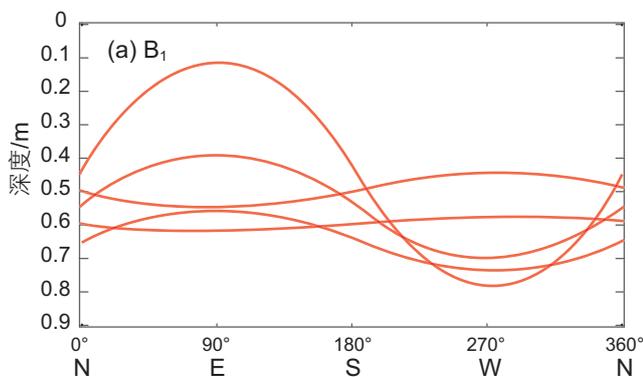


图 16 不同裂缝倾角的张开口度模拟成像结果
Fig. 16 The imaging results at different fracture dips

增大。综合图 15 和图 16 来看, 对于低角度裂缝, 裂缝倾角对视张开度的大小影响较小, 而对于高角度裂缝的视张开度大小影响较大。因此在建立张开度计算模型时, 应该注意裂缝倾角这一关键因素。

3 结论

(1) 在非对称的复杂地层中模拟水平裂缝的随钻电阻率成像测井响应时, 将激励源螺绕环等效为长圆柱状的电压电偶极子, 并在 3D 有限元法的基础上使用有限网格细化技术进行模拟, 这将在很大程度上降低运算量, 并能同时获得较高精度的测量结果。

(2) 当井眼尺寸在 7 in 以内时, 随钻电阻率成像测井响应受泥浆的影响较小, 能够获得较清晰的地层裂缝图像。随钻电阻率成像测井的纵向分辨率受纽扣尺寸影响较大。异常电流面积与裂缝张开度呈线性正相关的关系, 与电阻率对比度呈负相关的关系, 受裂缝延伸距离的影响较小。裂缝的倾角不同, 对其视张开度及相同张开度裂缝地层的视电阻率曲线趋势的影响程度不同。

(3) 本研究采用的模型为单条和多条交叉裂缝地层, 以及简化的随钻电阻率成像测井仪器模型, 该模拟方案简易高效, 但在后续的研究中要考虑更复杂的裂缝以及仪器实际结构的影响时还需进行改进。

参考文献

- [2] 刘得军, 马中华, 张颖颖, 等. 缝洞型储层随钻测井自适应有限元法数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 928-936. [LIU D J, MA Z H, ZHANG Y Y, et al. Numerical simulation of the logging-while-drilling for fracture-vuggy reservoirs using adaptive FEM[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 928-936.]
- [3] 王晓畅, 范宜仁, 张庚骥. 基于双侧向测井资料的裂缝孔隙度计算及其标定[J]. 物探化探计算技术, 2008, 30(5): 377-381. [WANG X C, FAN Y R, ZHANG G J. The calculation of fractured porosity base on dual laterolog data and its calibration[J]. Geophysical and Geochemical Calculation Technique, 2008, 30(5): 377-381.]
- [4] 楚延军. 探究泥岩裂缝地层双侧向测井正演数值的模拟[J]. 化工管理, 2015(4), 51. [CHU Y J. The forward numerical simulation of dual laterolog in fractured mudstone formation is studied[J]. Chemical Enterprise Management, 2015, 11(4): 51.]
- [5] GIANZERO S, CHEMALI R, LIN Y, et al. A new resistivity tool for measurement while drilling[C]. SPWLA 26th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Dallas, 1985.
- [6] BITTAR M S, HU G. The effects of rock anisotropy on LWD toroidal resistivity sensors[C]. SPWLA 45th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Noordwijk, 2004.
- [7] LIU D J, MA Z H, XING X N, et al. Numerical simulation of LWD resistivity response of carbonate formation using self-adaptive hp-FEM[J]. Applied Geophysics, 2013, 10(1): 97-108.
- [8] 南泽宇, 李军, 贾丽华, 等. 低阻碳酸盐岩储层双侧向裂缝响应模拟及定量评价[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2224-2230. [NAN Z Y, LI J, JIA L H, et al. Simulation and quantitative evaluation of double lateral fracture response in low resistivity carbonate reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2224-2230.]
- [9] 康正明, 柯式镇, 李新, 等. 钻头电阻率测井仪器探测特性研究[J]. 石油科学通报, 2017, 2(4): 457-465. [KANG Z M, KE S Z, LI X, et al. The detection characteristics study of the at-bit resistivity logging tool[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(4): 457-465.]
- [10] 李铭宇, 柯式镇, 康正明, 等. 螺绕环激励式随钻侧向测井仪测量强度, 影响因素及响应特性[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 128-134. [LI M Y, KE S Z, KANG Z M, et al. Study on influencing factors of measured signal strength and logging responses characteristics for laterolog resistivity logging-while-drilling tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 128-134.]
- [11] 史盼盼. 水平井中的阵列感应测井响应特性研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016. [SHI P P. The study on response characteristic of the array induction logging in the horizontal wells[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.]
- [12] 童茂松, 宋建华. 0.2m 分辨率双侧向测井仪器数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2251-2257. [TONG M S, SONG J H. Numeric simulation of 0.2m vertical-resolution dual laterolog tool[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2251-2257.]
- [13] 倪卫宁, 张晓彬, 万勇, 等. 随钻方位电磁波电阻率测井仪分段组合线圈系设计[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 115-120. [NI W N, ZHANG X B, WAN Y, et al. The design of the coil system in LWD tools based on azimuthal electromagnetic-wave resistivity combined with sections[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 115-120.]
- [14] AKIMOV O, BAULE A, FULDA C, et al. Real-time imaging while drilling: U. S. Patent 7, 272, 504[P]. 2007-9-18.
- [15] FULDA C, HARTMANN A, GOREK M. High resolution electrical imaging while drilling[C]//SPWLA 51st Annual Logging Symposium, Perth, Australia 2010.
- [16] WANG H M, SHEN L C, ZHANG G J. Dual laterolog response in 3-D environments[C]//SPWLA 39th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1998.

- [17] 王邦伟, 张树东, 吉人, 等. 高分辨率随钻电阻率成像测井在四川盆地碳酸盐岩储层的应用[J]. 测井技术, 2017, 41(3): 358–363. [WANG B W, ZHANG S D, JI R, et al. Application of microscope high resolution LWD resistivity image logging in carbonate reservoirs in Sichuan Basin[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(3): 358–363.]
- [18] ALLOUCHE M, CHOW S, DUBOURG I, et al. High-resolution images and formation evaluation in slim holes from a new logging-while-drilling azimuthal laterolog device[C]//SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [19] 李安宗, 李启明, 朱军, 等. 方位侧向电阻率成像随钻测井仪探测特性数值模拟分析[J]. 测井技术, 2014, 38(4): 407–410. [LI A Z, LI Q M, ZHU J, et al. Numerical analysis of logging responses for LWD azimuthal laterolog resistivity imaging tool[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(4): 407–410.]
- [20] 柯式镇. 井壁电成像测井全三维数值模拟与裂缝评价模型[J]. 中国科学, 2008, 38(1): 150–153. [KE S Z. Full three-dimensional numerical simulation and crack evaluation model for borehole electric imaging logging[J]. Science in China Press, 2008, 38(1): 150–153.]
- [21] 柯式镇, 孙贵霞. 井壁电成像测井资料定量评价裂缝的研究[J]. 测井技术, 2002, 2(62): 101–103. [KE S Z, SUN G X. Study on quantitative evaluation of fractures by borehole electrical imaging logging data[J]. Well Logging Technology, 2002, 2(62): 101–103.]

(编辑 付娟娟)