

# 钻遇断层阵列侧向测井响应特性正演研究

杨勇<sup>1,2</sup>, 李亨<sup>1,2</sup>, 杨多<sup>1,2</sup>, 杜双军<sup>1,2</sup>, 彭杰<sup>1,2</sup>, 陈坤<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:** 通过建立直井钻遇断层三维正演模型, 采用有限元算法实现了阵列侧向测井响应的数值模拟。分析了钻遇断层时不同断层倾角、断距及围岩电导率对阵列侧向测井响应特征的影响。研究表明: 在钻遇到破碎带时, 断层倾角越大, 视电阻率反映出的破碎带宽度越小。随着阵列侧向测井仪器浅测模式到深探测模式, 断距越大( $\leq 4$  m)测得的视电阻率也会越接近破碎带及围岩的电阻率。相同探测模式下随着下围岩电阻率不断增大, 视电阻率也会不断增大。在探测模式及围岩电阻率相同时, 钻遇断层下盘的视电阻率会随着围岩电阻率的增大而减小。

**关键词:** 阵列侧向测井; 断层; 有限元; 三维地质建模

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

## Forward simulation of response characteristics of the array lateral logging in drilling process of fault

Yang Yong<sup>1,2</sup>, Li Heng<sup>1,2</sup>, Yang Duo<sup>1,2</sup>, Du Shuangjun<sup>1,2</sup>, Peng Jie<sup>1,2</sup> and Chen Kun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

**Abstract:** Firstly, we established a 3D forward model of the vertical well when drilling in faults, the response of the array lateral logging was numerically simulated by the finite element method. And then, we analyzed the effects of different fault dip angles, fault distances, and surrounding rock conductivity on the characteristics of array lateral logging response in the drilling process of fault. The results showed that when in the drilling process of the fracture zone, the larger the fault dip angle was, the smaller the width of the fracture zone would be reflected by the apparent resistivity. As the array lateral logging equipment went deeper and the fault distance ( $\leq 4$  meters) got greater, the measured apparent resistivity would be closer to the resistivity of the fractured zone and surrounding rocks. When under the same detection mode, the apparent resistivity would increase with the increasing of the resistivity of lower surrounding rocks. When the detection mode and the surrounding rock resistivity were the same, the apparent resistivity would decrease with the increase of the resistivity of the surrounding rock while drilling the footwall of fault.

**Key words:** array lateral logging, fault, finite element, 3D geological modeling

随着石油勘探开发及解释技术的进步, 国内油气田公司对于钻遇小型断层的解释提出了更高的要求<sup>[1-4]</sup>。

目前, 阵列侧向测井仪器的正演研究已做的较成熟, 在阵列侧向测井仪器的数值模拟研究, 如刘振华等关于阵列侧向测井的计算及其特征<sup>[5]</sup>; 作杰等阵列侧向测井的正演响应分析<sup>[6]</sup>。对阵列侧向测井仪器在不同储层条件下的研究, 如邓少贵等的阵列侧

向测井仪器在裂缝性储层中的响应特征<sup>[7]</sup>; 邓少贵等的阵列侧向测井仪器在倾斜非均匀地层的响应特征<sup>[8]</sup>; 冯玲伟等的阵列侧向测井仪器在薄互层和倾斜地层的响应计算分析<sup>[9]</sup>。对钻遇断层的研究, 目前公开发表的文献较少, 有作杰对钻遇断层水平井的阵列感应测井响应特性进行了正演模拟研究<sup>[10]</sup>。钻遇断层的阵列侧向测井仪器研究暂时还没有公开发表的文献, 因此, 进行钻遇断层的阵列侧向测井仪器响

收稿日期: 2018-8-31。

第一作者简介: 杨勇(1992—), 男, 在读硕士研究生, 电法测井正反演。

应模拟分析,研究小型断层的阵列侧向测井响应规律和特征,对于小型断块油气藏的评价有一定的指导意义。

通过有限元正演,研究阵列侧向测井仪器的响应特征。实现了直井情况下钻遇断层地层模型中阵列侧向测井响应的三维数值模拟,在此基础上分析了钻遇断层地质模型中的断层倾角、断距、围岩等影响因素的测井响应变化规律,并对直井情况下钻遇断层阵列侧向测井响应特征进行了总结。

## 1 仪器工作原理及地层建模

### 1.1 仪器工作原理

所用阵列侧向测井仪器的仪器结构原理图如图1所示。 $A_0$ 为主电流发射电极,且置于仪器的中间。在 $A_0$ 的两侧对称分布着 $A_i(A'_i)(i=1,2,3,4,5,6)$ , $M_i(M'_i)(i=1,2,3,4,5,6)$ ,其中 $A_i(A'_i)(i=1,2,3,4,5,6)$ 为六对屏蔽电极, $M_i(M'_i)(i=1,2,3,4,5,6)$ 为六对监督电极,相邻电极之间由绝缘体隔开。阵列侧向仪器工作时,每对电极除监督电极外均发出一道电流,且互不干扰,形成六种 $R_0$ 到 $R_5$ 逐渐加深的探测模式,其中 $R_0$ 主要反映的是井眼及泥浆的电阻率, $R_1$ 到 $R_5$ 主要反映地层电阻率<sup>[11-14]</sup>。主要研究的是这种阵列侧向测井仪器 $R_1$ 到 $R_5$ 五种探测模式

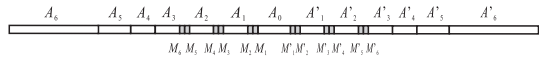


图1 阵列侧向测井仪器结构

Fig. 1 Structure of array lateral logging equipment

的测井响应变化规律。

### 1.2 地层模型

模型中将地层简化为三层均匀介质地层,分别是上围岩、储集层及下围岩;并设有井眼、破碎带及阵列侧向仪器;储集层即为断层,分为断层上盘、破碎带及断层下盘三部分;阵列侧向测井仪器位于井眼中部,且井眼垂直穿过上下围岩及断层,具体的井眼分布如表1所示<sup>[15-17]</sup>。实际中断层破碎带是由断面填充物和派生裂缝组成,断面复杂,结构多样<sup>[18-19]</sup>,所以对断层破碎带进行了简化处理,设置为均匀介质。具体地层模型如图2所示。

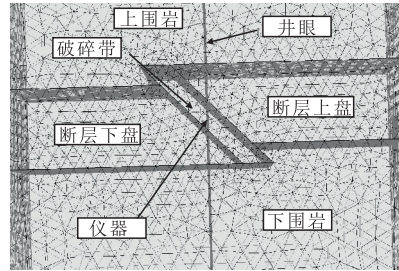


图2 断层模型与网格剖分

Fig. 2 Fault model and mesh division

数值模型分别对不同的断层倾角、断距、围岩响应特征等影响因素进行了阵列侧向测井响应特征的研究。阵列侧向测井仪器于井眼内居中测量,无泥浆侵入、井眼等的影响。

## 2 断层倾角影响

地层模型中各初始参数如下:上围岩与下围岩

表1 钻遇断层不同井眼位置介绍  
Table 1 Different hole locations in drilling of fault

| 井段序号 | 不同井眼位置   |
|------|--|
| 1    | 仪器经上围岩穿过断层的下盘到达下围岩;仪器水平距离断层破碎带中心点15 m                  |
| 2    | 仪器经上围岩,并穿过小段的破碎带,又经一小段上围岩,再到断层下盘及下围岩;仪器水平距离断层破碎带中心点6 m |
| 3    | 仪器经上围岩、断层上盘一角、破碎带、断层下盘及下围岩;仪器水平距离断层破碎带中心点3 m           |
| 4    | 仪器经上围岩、断层上盘、破碎带、断层下盘及下围岩;仪器水平距离断层破碎带中心点2 m             |
| 5    | 仪器经上围岩、断层上盘、破碎带、断层下盘及下围岩;仪器水平距离断层破碎带中心点1 m             |
| 6    | 仪器经上围岩、断层上盘、破碎带、断层下盘及下围岩;仪器垂直穿过破碎带中心点                  |
| 7    | 仪器经上围岩、断层上盘、破碎带、断层下盘及下围岩;仪器水平距离断层破碎带中心点1 m             |
| 8    | 仪器经上围岩、断层上盘、破碎带、断层下盘及下围岩;仪器水平距离断层破碎带中心点2 m             |
| 9    | 仪器经上围岩、断层上盘、下围岩、穿过一小段破碎带穿到下围岩;仪器水平距离断层破碎带中心点6 m        |
| 10   | 仪器经过上围岩、断层上盘到下围岩;水平距离断层破碎带中心点15 m                      |

电阻率相同且为  $0.2 \Omega \cdot \text{m}$ , 井眼电阻率为  $1 \Omega \cdot \text{m}$ , 断层电阻率为  $20 \Omega \cdot \text{m}$ , 断层破碎带电阻率为  $17 \Omega \cdot \text{m}$ , 储集层上下盘断距为  $2 \text{ m}$  的逆断层, 断层倾角为  $45^\circ$ 。分别对断层倾角为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $80^\circ$  阵列侧向测井仪器的测井响应特征进行了分析, 响应特征如图 3 所示, 其中横坐标  $x$  为不同的钻遇位置 (m), 纵坐标  $R_a$  为不同的视电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ ), 图为同一倾角下不同探测模式的响应曲线。

由数据分析可知: 1) 通过图 3c 可知在断层倾角不断增大时, 断层上下盘的电阻率响应曲线也渐渐

趋于平缓, 且视电阻率曲线反映出的破碎带宽度不断减小。因为断层倾角越大, 破碎带长度就越小, 破碎带对储集层的影响就越小, 这时越能反映出断层上下盘的视电阻率; 2) 在钻遇到破碎带位置时, 断层倾角越小的断层测得的电阻率越大。且在此,  $30^\circ$  倾角不符合该规律, 出现这种情况是因为  $30^\circ$  倾角的破碎带会比  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  及  $80^\circ$  倾角的破碎带要长, 导致测量得出的电阻率滞后; 3) 在同一断层倾角下, 不同探测模式的视电阻率响应曲线也有差别, 从浅探测模式到深探测模式视电阻率也在不断减小。

### 3 断层断距影响

模型参数设置: 断层倾角, 围岩电阻率等均与初始模型一致, 对不同断层断距下断层断距对阵列侧向测井仪器的影响进行了分析; 五种断距不同的情况分别进行了分析研究 (图 4), 分别是正断层断距为  $4 \text{ m}$ 、正断层断距为  $2 \text{ m}$ 、正断层断距为  $1 \text{ m}$ 、逆断层断距为  $1 \text{ m}$ 、逆断层断距为  $2 \text{ m}$ 。图 4 为同一探测模式下不同断距及同一断距不同探测模式的响应曲线, 部分数值响应特征如图 4 所示, 其中横坐标  $x$  为不同的钻遇位置 (m), 纵坐标  $R_a$  为不同的视电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )。

通过数据分析可知: 1) 在围岩电阻率小于目的层电阻率时, 各个断距测得的断层上盘视电阻率由浅探测模式到深探测模式不断减小的; 而探测模式为  $R_1$  时不满足这个规律; 在探测模式为  $R_1$  的图中测得的视电阻率规律符合其他探测模式测得的视电阻率规律。出现这种现象是因为  $R_1$  探测模式较浅导致的; 2) 在相同探测模式及相同钻遇位置下, 断层上盘测得的视电阻率会随着断距的增大而减小; 出现这种规律是因为仪器在井中的测量半径是固定的, 随着断距的增大, 破碎带长度也在增大, 模型中破碎带设置电阻率为  $17 \Omega \cdot \text{m}$ , 且随着探测模式距离的增加, 断距越大, 测得的视电阻率受到破碎带及围岩电阻率影响越大; 3) 如图 4d 所示, 当断距增大到  $4 \text{ m}$  时, 测得的断层上盘的视电阻率趋近于围岩电阻率。这是因为仪器在井眼中的位置是固定的, 而随着断距增大, 仪器没有随着断距增大改变位置。

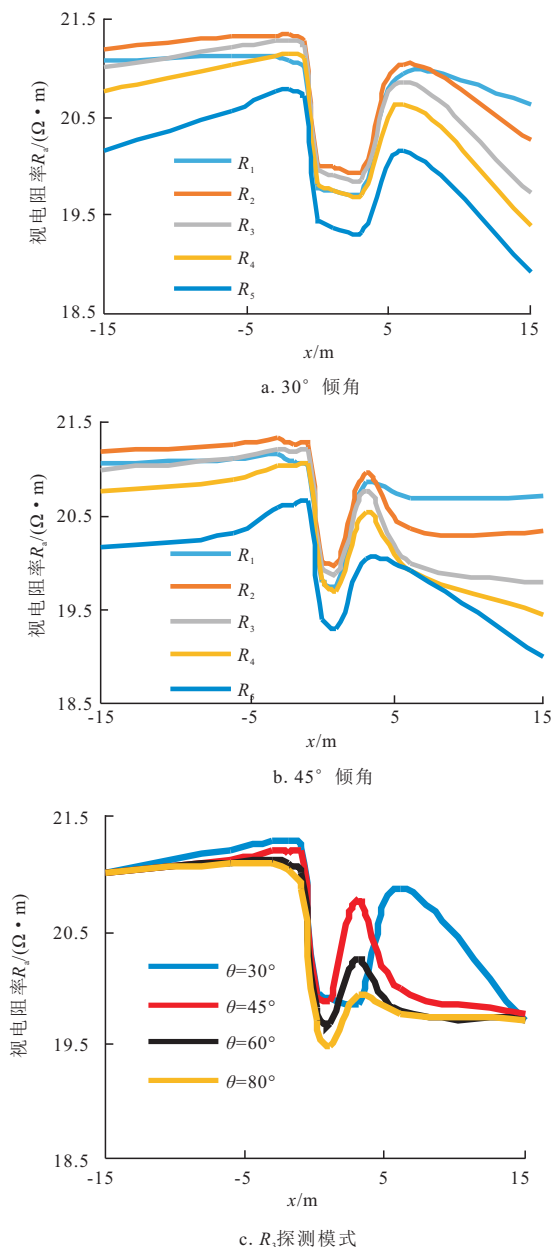


图 3 断层倾角响应曲线

Fig. 3 Response curve of dip angle of fault

### 4 围岩的影响

模型断距为逆断层断距为  $2 \text{ m}$ , 断层倾角为

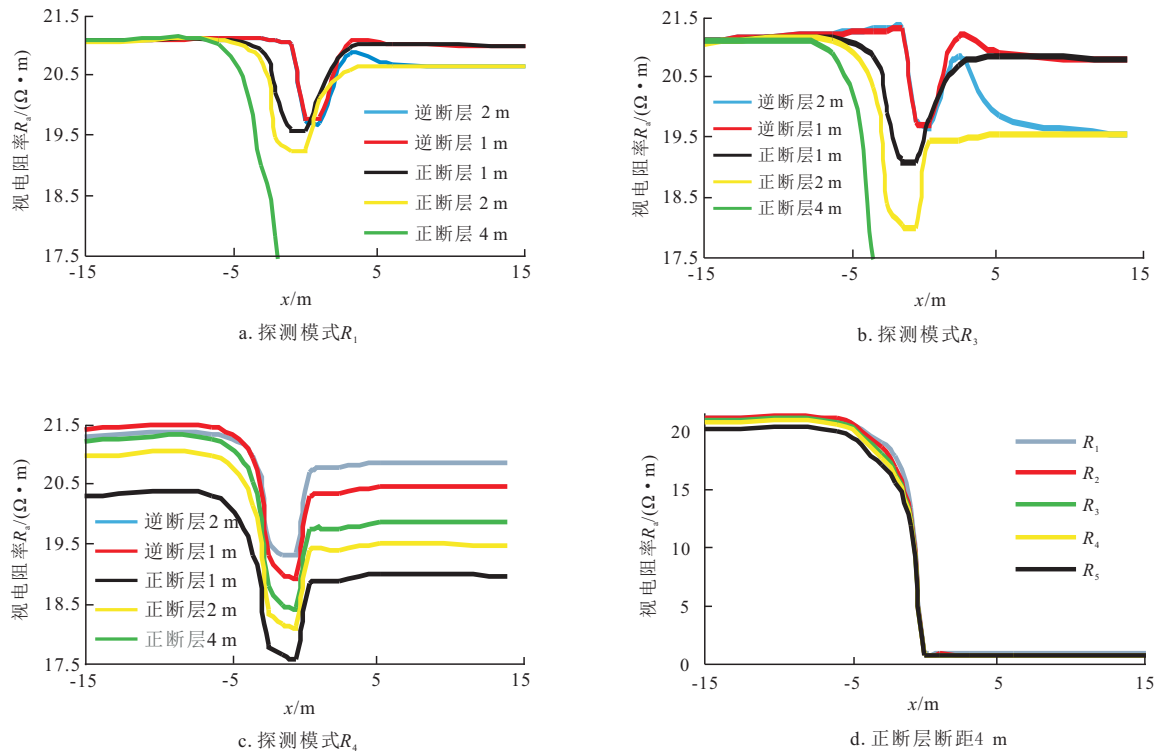


图4 断层断距响应曲线

Fig. 4 Response curve of fault interval

45°,将围岩分为上围岩与下围岩并针对三种情况进行了分析。

#### 4.1 上围岩的影响

模型地层参数:下围岩电阻率参数固定,上围岩与下围岩电阻率之比分别为1、10、50、200、500,分析了这五种上围岩与下围岩电阻率之比的响应曲线;图5为同一探测模式下不同上围岩电阻率的响应曲线,部分数据响应特征如图5所示,其中横坐标 $x$ 为不同的钻遇位置(m),纵坐标 $R_a$ 为不同的视电阻率( $\Omega \cdot m$ )。

通过分析可知:1)在相同的探测模式下,断层上盘测的电阻率不会随着上围岩电导率的变化而变化,而是很稳定。出现这种规律是因为断层为逆断层,上盘相对于下盘上升,测井仪器更多的是受到断层上盘电阻率的影响,而断层上盘在这里是一个定值,所以测得的电阻率变化不明显;2)从浅探测模式到深探测模式,由图5可知断层上盘之间的测得的视电阻率在增大。在仪器探测模式增大时,得到的视电阻率受围岩的影响增大,所以深探测模式中,断层下盘之间的电阻率比浅探测模式变化大;3)在上围岩设置的电导率不变的情况下,断层下盘之间测得

的电阻率会随着探测模式的加深而不断变大。可以观察到在上围岩电阻率与下围岩电阻率之比为500时,不同探测模式测得的下盘电阻率变化不大,而上围岩电阻率与下围岩电阻率之比为1时,不同探测模式测得的电阻率会随着浅探测模式到深探测模式不断减小。

#### 4.2 下围岩的影响

模型地层参数:上围岩电阻率参数固定,下围岩与上围岩电阻率之比分别为1、10、50、200、500,分析了这五种下围岩与上围岩电阻率之比的响应曲线;图6为同一探测模式下不同下围岩电阻率的响应曲线,部分数据响应特征如图6所示,其中横坐标 $x$ 为不同的钻遇位置(m),纵坐标 $R_a$ 为不同的视电阻率( $\Omega \cdot m$ )。

由图6可知:在相同探测模式下,阵列侧向仪器测得的视电阻率会随着下围岩电阻率的增大而增大。因为随着下围岩电阻率的增大,下围岩电阻率对于断层的影响也会变大,造成测得的电阻率也在不断增大;在下围岩视电阻率不变的情况下,随着浅探测模式到深探测模式,断层下盘不同下围岩测得的视电阻率之间的差不断增大。这是因为随着浅探

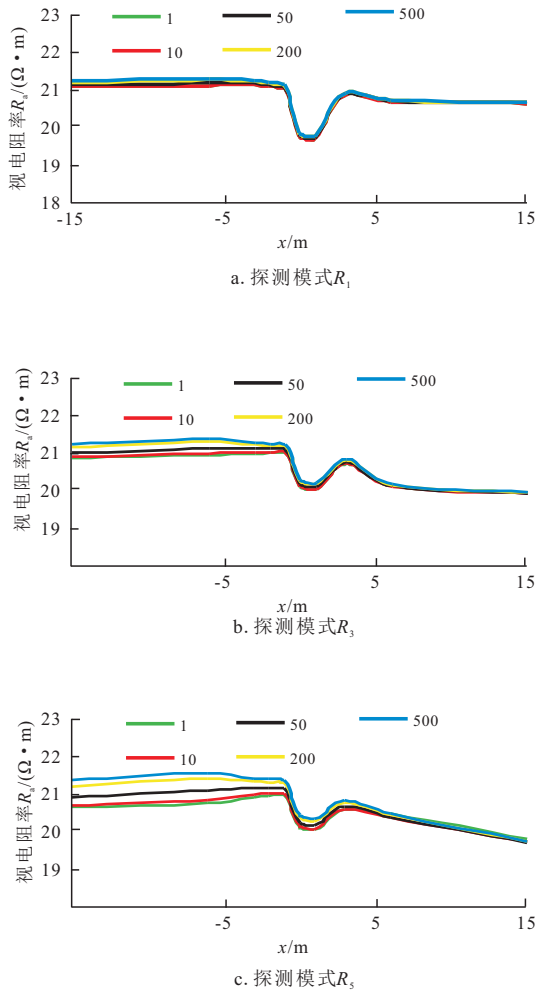


图5 断层上围岩响应曲线

Fig. 5 Response curve of upper surrounding rock of fault

测模式到深探测模式,仪器的探测半径在加大,这时下围岩的电阻率也在增大,所以造成测得的电阻率不断增大。

#### 4.3 上下围岩电阻率相同时的影响

模型地层参数:上围岩电阻率与下围岩电阻率设置的相同,分别是 $0.2 \Omega \cdot m$ 、 $2 \Omega \cdot m$ 、 $10 \Omega \cdot m$ 、 $40 \Omega \cdot m$ 、 $100 \Omega \cdot m$ ,分别分析对比了这五种围岩电阻率响应曲线;图7为同一围岩影响因素下不同探测模式的响应曲线,部分数据响应特征如图7所示,其中横坐标 $x$ 为不同的钻遇位置(m),纵坐标 $R_a$ 为不同的视电阻率( $\Omega \cdot m$ )。

通过数据分析可知:1)在探测模式相同及钻遇到断层下盘时,仪器测得的视电阻率会随着围岩电阻率的增加而减小;2)在围岩电阻率在 $10 \sim 40 \Omega \cdot m$ 之间时,测得的 $R_1$ 到 $R_5$ 之间电阻率之差不超过 $1 \Omega$ 。

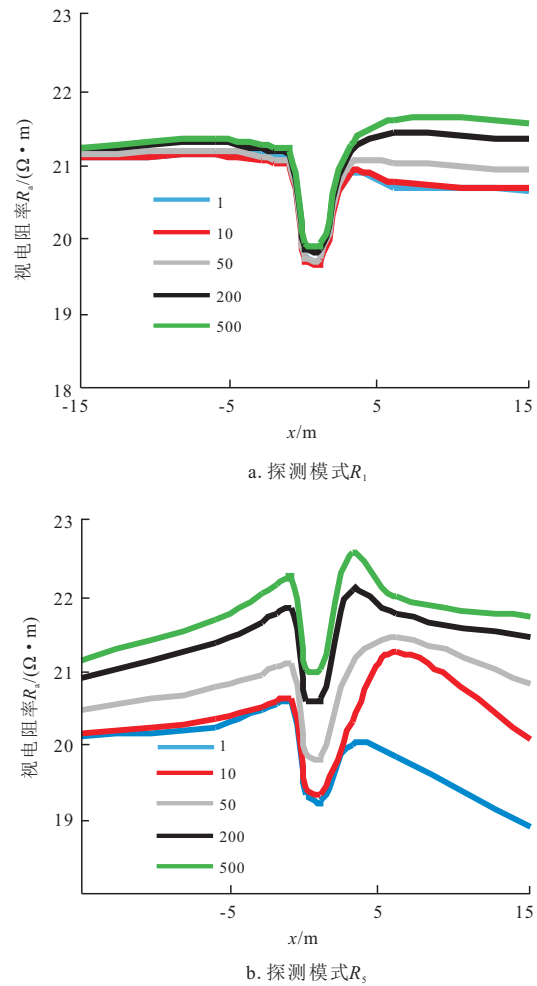


图6 断层下围岩响应曲线

Fig. 6 Response curve of lower surrounding rock of fault

## 5 结论

1) 在断层倾角不断增大时,断层上下盘的电阻率响应曲线也渐渐趋于平缓。钻遇到破碎带位置时,断层倾角越小的断层测得的破碎带视电阻率越大。

2) 在相同探测模式及相同钻遇位置下,断层上盘测得的视电阻率会随着断距的增大而减小;出现这种规律是因为仪器在井中的测量半径是固定的,随着断距的增大,破碎带长度也在增大,模型中破碎带设置电阻率为 $17 \Omega \cdot m$ ,且随着探测半径的增加,断距越大,测得的视电阻率受到破碎带及围岩电阻率影响越大。

3) 在断层为逆断层,断距固定且断层倾角固定时,断层上盘的视电阻率受到下围岩电阻率的影响

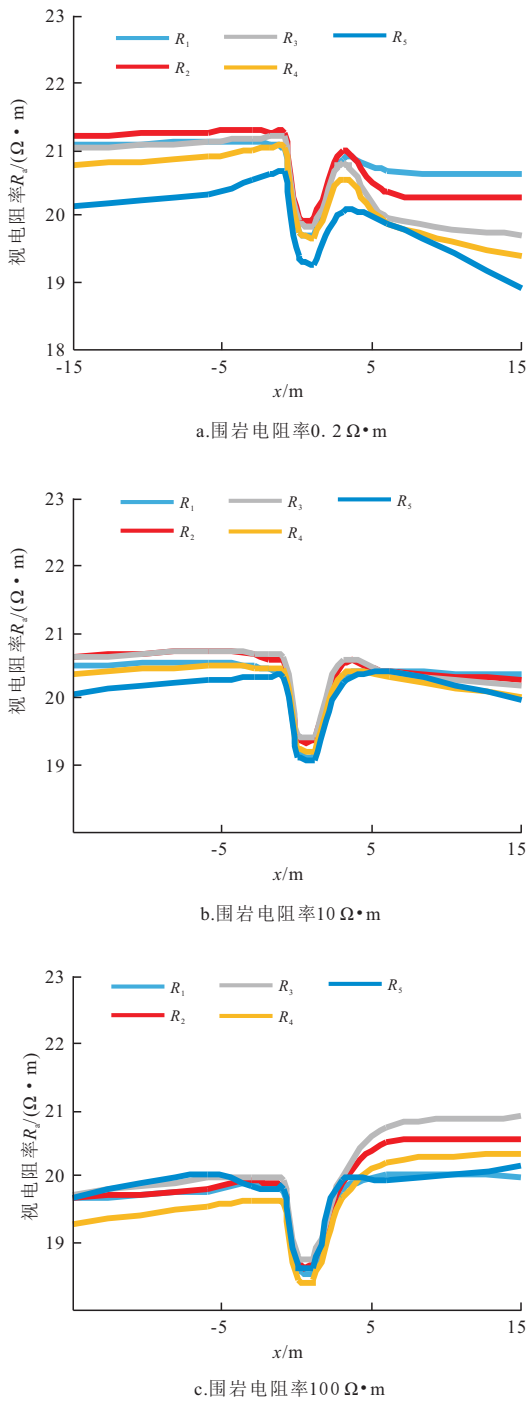


图7 围岩响应曲线

Fig. 7 Response curve of surrounding rock

相对于受上围岩电阻率的影响较大,断层下盘的视电阻率受到上围岩的电阻率影响相对于受下围岩电阻率影响较大。

参考文献

[1] 毛凤鸣,陈安定,严元锋,等. 苏北盆地复杂小断块油气成藏

特征及地震识别技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 827-840.

[2] 关富佳,刘德华,颜明. 复杂小断块油藏立体井网开发模式研究[J]. 断块油气田, 2010, 17(2): 213-215.

[3] 尤启东,周方喜,张建良. 复杂小断块油藏水驱开发效果评价方法[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(1): 82-85+120.

[4] 苏爱芹,郑宇霞,魏广仁,等. 复杂小断块综合研究技术[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 472-474.

[5] 刘振华,胡启. 阵列侧向测井响应的计算及其特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2002, 17(1): 53-57.

[6] 仵杰,谢尉尉,解茜草,等. 阵列侧向测井仪器的正演响应分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(1): 73-76.

[7] 邓少贵,李智强. 裂缝性储层裂缝的阵列侧向测井响应数值模拟[J]. 地球科学, 2009, 34(5): 841-847.

[8] 邓少贵,徐悦伟,蒋建亮. 倾斜井非均匀地层的阵列侧向测井响应研究[J]. 测井技术, 2010, 34(2): 130-134.

[9] 冯琳伟,汪德刚,贺飞,等. 薄互层和倾斜地层阵列侧向测井响应计算分析[J]. 测井技术, 2013, 37(1): 80-84.

[10] 仵杰,李宇腾,付晨东,等. 钻遇断层水平井地层模型的阵列感应测井响应特性数值模拟[J]. 测井技术, 2017, 41(3): 266-271.

[11] 潘克家,王文娟,汤井田,等. 高分辨率阵列侧向测井的数学模型及有限元快速正演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3197-3211.

[12] 潘克家,汤井田,杜华坤,等. 轴对称地层中高分辨率阵列侧向测井信赖域反演法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 3110-3120.

[13] 李智强,邓少贵,范宜仁,等. 裂缝性储层阵列侧向测井响应反演研究[J]. 测井技术, 2010, 34(2): 138-142.

[14] 范宜仁,蒋建亮,邓少贵,等. 高分辨率阵列侧向测井响应数值模拟[J]. 测井技术, 2009, 33(4): 333-336.

[15] 李少华,王利,王军,等. 断层破碎带的建模方法和意义[J]. 断块油气田, 2014, 21(4): 409-412.

[16] 崔廷主,马学萍. 三维构造建模在复杂断块油藏中的应用——以东濮凹陷马寨油田卫95块油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 198-205.

[17] 周密,梁景伟,郭显赋,等. 断块油藏水平井压力动态模型[J]. 断块油气田, 2011, 18(1): 74-78.

[18] 万效国,邬光辉,谢恩,等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩断层破碎带地震预测[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 786-791.

[19] 金强,周进峰,王端平,等. 断层破碎带识别及其在断块油田开发中的应用[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 82-89.

(编辑 常燕)