

裂缝性储层裂缝的阵列侧向测井响应数值模拟

邓少贵, 李智强

中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东青岛 266555

摘要: 为了研究裂缝性储层裂缝的阵列侧向测井响应, 采用裂缝组平板裂缝模型, 利用三维有限元方法, 进行不同裂缝参数条件下的高分辨率阵列侧向测井响应数值模拟。表明阵列侧向视电导率和裂缝孔隙度与裂缝流体电导率成线性关系; 低角度裂缝的阵列侧向深浅视电阻率呈现负差异特征, 高角度缝呈现正差异; 相同裂缝孔隙度下, 裂缝密度增加可使得阵列侧向视电阻率增加, 当裂缝密度足够大时, 测井响应特征基本不随裂缝密度发生变化; 交叉缝的测井响应与具有相同角度的平行裂缝组差异明显, 且不同倾角组合的交叉缝的测井响应之间差异明显。阵列侧向测井对裂缝有较强的敏感性, 根据其测井视电阻率大小可以评价裂缝孔隙度, 根据深浅视电阻率的幅度差异可以研究裂缝的产状, 这些为将阵列侧向测井用于裂缝性储层裂缝评价有指导意义。

关键词: 裂缝储层; 裂缝组; 裂缝倾角; 裂缝张开度; 裂缝孔隙度; 孔隙流体; 阵列侧向。

中图分类号: P631.811

文章编号: 1000-2383(2009)05-0841-07

收稿日期: 2009-02-01

Simulation of Array Laterolog Response of Fracture in Fractured Reservoir

DENG Shao-gui, LI Zhi-qiang

Faculty of Georesources & Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China

Abstract: To understand the response of array laterolog to fracture in the fractured reservoir, based on the plane model of parallel fractures with equal space, the three-dimensional finite element method is used to simulate the responses of the high-definition array laterolog in fractured formation with different fracture parameters. The results show that conductivities of array laterolog are linearly related to the porosity of fracture and the conductivity of pore fluid. A negative separation between the deep and shallow resistivity appears in the low-angle fractured formation, the positive appears in high-angle conditions. Apparent resistivity increases gradually with fracture density increasing under the same porosity of fracture conditions. If fracture density is large enough, the log response will not vary with essentially fracture density. Log response of crossing fracture is apparently different from that of the parallel fracture group with the same angle, and log response of crossing fracture is different under the different dip grouping system. Accordingly the array laterolog is sensitive to the fracture and its apparent resistivity can be used to determine the fracture porosity and the separation between the deep and shallow apparent resistivity can be used to study the fracture attitude. The above researches have contributions to the application of array laterolog in the fractured reservoir evaluation.

Key words: fracture reservoir; fracture group; fracture dip; fracture aperture; porosity of fracture; fracture fluid; array laterolog.

0 引言

裂缝性储层的储集空间主要是裂缝和孔隙, 裂缝既是储集空间又是渗流通道, 裂缝可使孤立的孔、洞连通, 使储渗能力较差的致密储层形成裂缝性储层。因此, 对于裂缝性储层, 裂缝发育与否对储层产能有着控制作用(陈清华等, 2002; 蒋凌志等, 2004;

曾联波等, 2007)。进行裂缝的识别和评价和有效性分析是裂缝性储层测井评价的关键。常规测井项目中, 双侧向测井由于仪器较好的聚焦能力和探测效果, 被广泛用于研究裂缝的发育程度和确定裂缝孔隙度(Sibbit and Faivre, 1985; 李善军等, 1996; 欧阳建和李善军, 2001; 邓少贵等, 2006)。但双侧向测井只能提供两种不同探测深度的深浅视电阻率。因

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2008ZX05035-02); 山东省自然科学基金(No. Y2007F25)。

作者简介: 邓少贵(1972-), 男, 副教授, 主要从事电法测井理论计算及岩石物理的教学和科研工作。E-mail: dengshg@mail.hdpu.edu.cn

此,在具有复杂裂隙系统的裂隙性储层裂缝参数评价中存在困难.阵列化是测井仪器发展趋势,斯伦贝谢公司 1998 年推出高分辨率新型阵列侧向测井仪(HRLA),能提供 6 种不同探测深度电阻率信息(Chen *et al.*, 1998; Smits *et al.*, 1998; Griffiths *et al.*, 1999);阿特拉斯 1998 年推出高分辨率阵列侧向测井仪(HDLL),能提供 8 种不同探测深度电阻率(Hakvoort *et al.*, 1998; Rabinowitz and Zhou, 2007).与前者不同,后者采用软聚焦方式确定地层电阻率.相对于双侧向测井,阵列侧向测井具有更高的纵向分辨率和聚焦效果,并提供更多的地层信息,在复杂储层评价中具有明显的信息优势和应用前景(刘振华和张霞, 2005; 仵杰等, 2008).因此,进行裂隙性地层裂缝的阵列侧向测井响应模拟分析,研究裂缝的阵列侧向测井响应规律和特征,对于裂隙性储层评价具有一定指导意义.

1 裂隙性储层裂缝的三维有限元正演模型

1.1 阵列侧向测井基本原理

以斯伦贝谢公司推出的高分辨率阵列侧向测井仪(HRLA)为例,研究其在裂缝的测井响应特征.仪器中间是发射主电流的 A0 电极,两侧分别布置 6 对对称短路的有限长屏蔽电极(A1, A2, ..., A6),在 A0 和 A1 电极之间有 2 对监督电极(M1, M2).电极排列关于主电极对称(图 1).阵列侧向测井能够同时提供 6 个不同探测深度的视电阻率响应值(R_{LA}),当 A0 发射电流,其他屏蔽电极为回路电极时,构成 R_{LA0} ,主要用于测量井眼泥浆的电阻率,不作为本文研究对象;从 A0 向两侧每增加 1 对屏蔽电极为发射电流电极,其余屏蔽电极为回路电极,可



图 1 阵列侧向测井仪

Fig. 1 Array lateral log

依次构成 R_{LA1} 、 R_{LA2} 、 R_{LA3} 、 R_{LA4} 和 R_{LA5} ,它们反映径向不同深度的地层电阻率分布,由此形成 6 种不同探测深度的测井响应,为测井解释提供了丰富的信息.

1.2 裂缝的阵列侧向测井响应有限元计算

裂隙性储层的裂缝发育具有明显的非均匀特点(罗利等, 2001; 付晓飞等, 2007),通常以裂缝带形式发育,按裂缝的形态,将裂缝分为高角度缝、低角度缝和斜交缝.假设裂缝地层由裂缝和基块两部分组成,平板裂缝是较简单的裂缝带模型.假设裂缝布满整个探测范围,则阵列侧向测井响应是包括裂缝、基块在内的一定探测范围内的所有介质的共同效应.在三维笛卡尔坐标系下建立平板裂缝模型(图 2),裂缝倾向为 x 轴负方向,裂缝走向为 y 方向, z 为井轴方向, σ_b 、 σ_f 分别为基块和裂缝流体的电导率, h 、 d 分别为裂缝的张开度和裂缝间的垂直距离, Ω 为裂缝倾角(裂缝法向与井轴的夹角),裂缝孔隙度为:

$$\phi_f = \frac{h}{d+h}, \tag{1}$$

裂缝张开度和裂缝密度决定了裂缝孔隙度的大小.

假设阵列侧向测井仪在周围产生的电位、电场强度、电流密度分布为 U 、 E 和 J ,有 $E = -\nabla U$, $J = \sigma E$.在基块中裂缝面处的电场强度法线和切线分量 E_{bn} 和 E_{bt} 分别为:

$$E_{bn} = (-\nabla U \cdot e_n)e_n = (U_x \sin\Omega - U_z \cos\Omega)e_n, \tag{2}$$

$$E_{bt} = (-\nabla U \cdot e_t)e_t = -\nabla U + (\nabla U \cdot e_n)e_n, \tag{3}$$

式(2)、(3)中, e_n 为裂缝的法线方向, e_t 为裂缝的切线方向, U_x 、 U_z 分别为 U 对 x 和对 z 的偏导数.基块中裂缝面处电流密度的法线和切线分量(J_{bn})和(J_{bt})分别为:

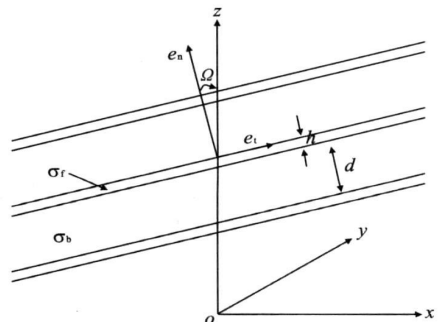


图 2 裂缝的平板模型

Fig. 2 Plane model of fracture

$$J_{bn} = \sigma_b E_{bn} = \sigma_b (-\nabla U \cdot e_n) e_n, \quad (4)$$

$$J_{bt} = \sigma_b E_{bt} = \sigma_b [-\nabla U + (\nabla U \cdot e_n) e_n], \quad (5)$$

令裂缝部分的电场强度和电流密度分别为 E_f 和 J_f , 由在裂缝面两侧电流法线分量及电场切向分量的连续条件 $J_{fn} = J_{bn}$ 和 $E_{ft} = E_{bt}$, E_{ft} 为裂缝部分电场强度的切线分量; 得到裂缝部分的电流密度在裂缝面法向分量 J_{fn} 和切向分量 J_{ft} 分别为:

$$J_{fn} = \sigma_b E_{bn} = \sigma_b (-\nabla U \cdot e_n) e_n, \quad (6)$$

$$J_{ft} = \sigma_f E_{bt} = \sigma_f [-\nabla U + (\nabla U \cdot e_n) e_n]. \quad (7)$$

利用三维有限元方法, 建立能量泛函, 计算裂缝的阵列侧向测井响应. 将偏微分方程的定解问题转化成泛函的极值问题(张庚骥, 1984), 其能量泛函的物理意义为求解区的功耗减去电极所提供的功率, 如:

$$\Phi = \frac{1}{2} \iiint_V E \cdot dxdydz - \sum_E U_E I_E. \quad (8)$$

式(8)中, V 为求解区, 是三维空间除去电极系后剩下的部分, U_E, I_E 分别为阵列侧向测井仪的电极电位及供电电流, 求和是对所有的电极进行的. 由式(2)~(7), 在裂缝性地层中, 阵列侧向测井的泛函则可写为:

$$\Phi = \Phi_b + \Phi_f - \sum_E U_E I_E, \quad (9)$$

其中:

$$\Phi_b = \frac{1}{2} \iiint_{V_b} E_b \cdot dV_b = \frac{1}{2} \iiint_{V_b} \sigma_b (\nabla U)^2 dV_b, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Phi_f &= \frac{1}{2} \iiint_{V_f} E_f \cdot dV_f = \frac{1}{2} \iiint_{V_f} \sigma_f E_{fn}^2 + \sigma_f E_{ft}^2 dV_f \\ &= \frac{1}{2} \iiint_{V_f} [\sigma_b^2 / \sigma_f (\nabla U \cdot e_n)^2 + \sigma_f (\nabla U \cdot e_t)^2] dV_f \\ &= \frac{1}{2} \iiint_{V_f} [\sigma_b^2 / \sigma_f - \sigma_f] (\nabla U \cdot e_n)^2 + \sigma_f (\nabla U)^2 dV_f, \end{aligned} \quad (11)$$

式(10)、(11)中, E_{fn} 为裂缝部分电场强度的法向分量; Φ_b, Φ_f 的积分分别在基块体积 V_b 和裂缝体积 V_f 内进行, $V_f = V\phi_f, V_b = V(1 - \phi_f)$, 结合式(2)将式(11)改写为:

$$\begin{aligned} \Phi_f &= \frac{1}{2} \iiint_{V_f} [\sigma_b^2 / \sigma_f - \sigma_f] (-U_x \sin \Omega + \\ &U_z \cos \Omega)^2 + \sigma_f (\nabla U)^2 dV. \end{aligned} \quad (12)$$

对于裂缝性油气藏, 泥浆通常侵入较深, 探测范围内可认为裂缝流体只与泥浆性质有关, 裂缝性致密储层一般具有很高的基块电阻率, 则 $\sigma_f \gg \sigma_b$, 式(12)改写为:

$$\Phi_f = \frac{1}{2} \iiint_{V_f} -\phi_f \sigma_f (-U_x \sin \Omega + U_z \cos \Omega)^2 +$$

$$\phi_f \sigma_f (\nabla U)^2 dV. \quad (13)$$

一般裂缝孔隙度 $\phi_f \ll 1$, 则 $V_b \approx V$, 将式(10)和式(13)代入式(9)得到:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma_b + \cos^2 \Omega \sigma_f \phi_f) (U_x)^2 + (\sigma_b + \\ &\sigma_f \phi_f) (U_y)^2 + (\sigma_b + \sigma_f \phi_f \sin^2 \Omega) (U_z)^2 + \\ &2\sigma_f \phi_f \sin \Omega \cos \Omega U_x U_z dx dy dz - \sum_E U_E I_E. \end{aligned} \quad (14)$$

利用式(14)并施加特定的边界条件(刘振华和张霞, 2005; 件杰等, 2008), 采用改进的前线解法(张庚骥, 1984), 可计算任一倾角、裂缝孔隙度和基块电阻率的裂缝地层的阵列侧向测井响应. 可以看出, 在特定的井眼条件下, 裂缝性地层裂缝的阵列侧向测井响应主要受到裂缝孔隙度与裂缝内流体电导率乘积、裂缝的倾角以及基块电导率的影响.

2 单一裂缝的阵列侧向测井响应

2.1 张开度不同的单一裂缝的阵列侧向测井响应

张开度不同的单一裂缝的阵列侧向测井响应如图 3, 其计算条件为: 岩石基块电阻率为 $5000 \Omega \cdot m$, 裂缝流体电阻率为 $0.1 \Omega \cdot m$, 井眼直径为 $0.2 m$, 泥浆电阻率为 $0.1 \Omega \cdot m$. 如图 3a、图 3c 和图 3e 所示, 随裂缝张开度增加, 阵列侧向视电阻率降低, 且裂缝在不同倾斜条件下, 深浅视电阻率具有不同的差异特征, 裂缝张开度较大时, 水平缝的深浅视电阻率为明显的负差异(深电阻率小于浅电阻率), 而垂直缝的深浅视电阻率为明显正差异, 当裂缝张开度较小时, 除 R_{LA1} 外, 其他深浅电阻率间的差异较小.

将阵列侧向视电阻率转化成电导率并减去基块电导率, 得到修正的阵列侧向视电导率(σ_{CLA}), 如图 3b、图 3d 和图 3f 所示, 除探测很浅的曲线(σ_{LA1})外, 其余修正的电导率与张开度基本成线性关系, 这种现象可以推广到任意倾角情形, 随着裂缝张开度增大, 阵列侧向视电导率增大. 由式(14)知, 阵列侧向修正的视电导率与裂缝张开度之间的关系, 可以看成是与裂缝孔隙度与孔隙流体电导率乘积($\sigma_f \cdot \phi_f$)的关系.

2.2 不同倾角的单一裂缝的阵列侧向测井响应

不同倾角单一裂缝的阵列侧向测井响应如图 4, 其计算条件为: 井眼直径为 $0.2 m$, 泥浆电阻率为 $0.1 \Omega \cdot m$, 裂缝流体电阻率为 $0.1 \Omega \cdot m$. (图 4)表明倾角小于 40° 的低角度裂缝的阵列侧向测井响应受倾角变化的影响较小, 裂缝倾角较大时, 阵列侧向

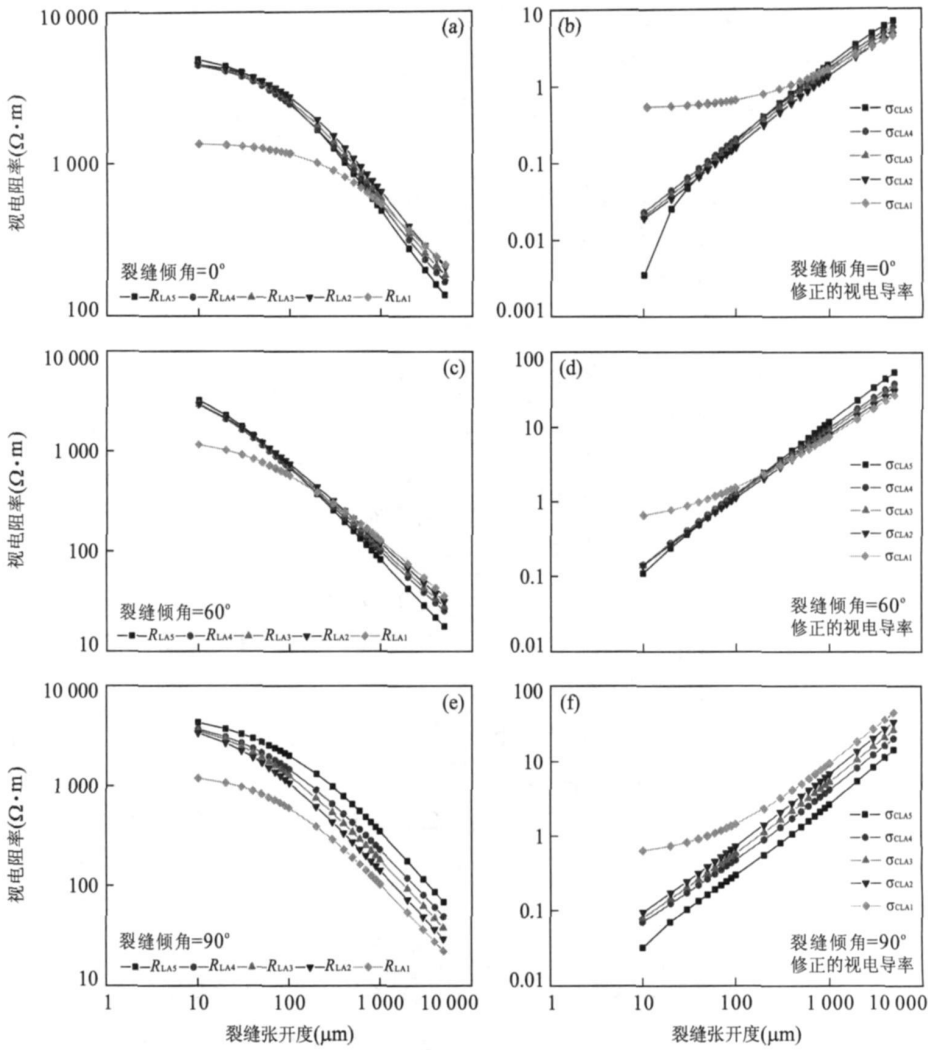


图 3 单一裂缝的阵列侧向测井响应与张开度的关系

Fig. 3 Array laterolog response of single fracture with different fracture aperture

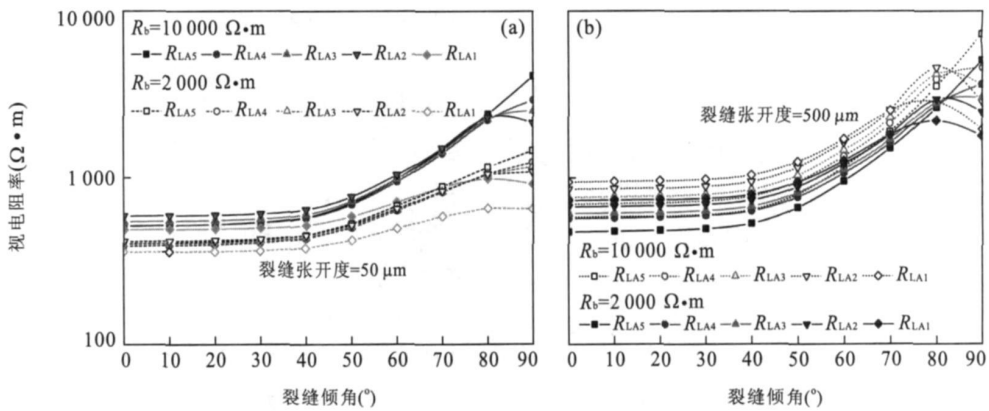


图 4 单一裂缝的阵列侧向响应与裂缝倾角的关系

Fig. 4 Array laterolog response of single fracture with different fracture angle

测井响应才明显变化. 当裂缝倾角小于某一角度(称之为临界角)时, 除探测深度很浅视电阻率(R_{LA1})外, 深浅阵列视电阻率表现为负差异特征, 大于临界

角时, 深浅电阻率的差异关系发生变化, 直角缝的深浅阵列视电阻率为明显的正差异.

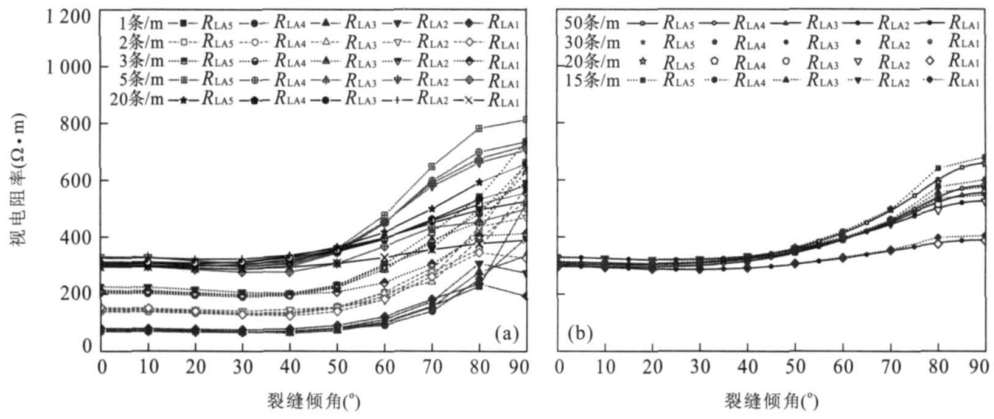


图 5 裂缝组的测井响应与裂缝角度的关系

Fig. 5 Array laterolog response of fracture group with different fracture angles

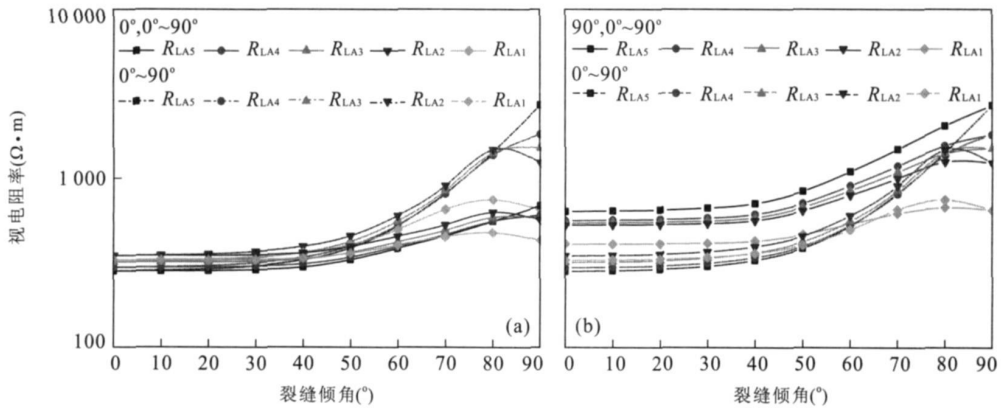


图 6 交叉缝的阵列侧向测井响应

Fig. 6 Array laterolog response of crossing fracture

3 等间距裂缝组的阵列侧向测井响应

保持裂缝孔隙度不变, 裂缝组的阵列侧向测井响应如图 5, 其计算条件为: 裂缝密度分别是 1 条/m、2 条/m、3 条/m、5 条/m、15 条/m、20 条/m 和 30 条/m, 裂缝孔隙度为 0.05%, 基块电阻率为 $10\ 000\ \Omega \cdot m$, 井眼直径为 0.2 m, 泥浆电阻率为 $0.1\ \Omega \cdot m$, 裂缝流体电阻率为 $0.1\ \Omega \cdot m$. 图 5 表明裂缝密度较小时, 随裂缝密度增加, 阵列侧向测井响应增大; 当裂缝密度由 5 条/m 增大为 20 条/m, 低角度裂缝组的测井响应变化已经较小, 如图 5a; 裂缝密度大于 20 条/m 时, 在整个倾角范围内, 不同密度的裂缝组的阵列测井响应基本重合, 如图 5b; 裂缝组表现为宏观各向异性特征 (李善军等, 1996). 除探测很浅的电阻率 (R_{LA1}) 外, 倾角较小时, 裂缝组的阵列侧向深电阻率一般小于浅电阻率; 倾角较大时, 深侧向电阻率一般大于浅电阻率。

4 交叉缝的阵列侧向测井响应

裂缝带经常以交叉缝形式出现, 本文只讨论两条交叉缝情况, 其测井响应如图 6, 计算条件为: 裂缝的张开度相等, 均为 $50\ \mu m$, 基块电阻率为 $10\ 000\ \Omega \cdot m$, 裂缝流体电阻率为 $0.1\ \Omega \cdot m$, 井眼直径为 0.2 m, 泥浆电阻率为 $0.1\ \Omega \cdot m$. 图 6a 中实线是水平裂缝与任意角度裂缝相交时的阵列侧向测井响应, 将其与具有相同倾角的两条平行缝的响应 (虚线) 对比, 在裂缝倾角较小时, 两者曲线形态相似, 在高角度时, 两者差异较大. 图 6b 中实线是垂直缝与任意角度裂缝相交时的阵列侧向测井响应, 除较高的裂缝倾角外, 交叉缝的阵列侧向测井响应与平行缝差异较大, 且阵列侧向深浅电阻率为正差异特征. 因此, 裂缝的不同组合对阵列侧向测井响应影响很大, 将交叉组合裂缝等价于平行裂缝, 其条件是相当复杂的, 只在特定条件下吻合.

5 结论

阵列侧向测井对裂缝有较强的敏感性,其测井响应与裂缝的张开度或裂缝孔隙度密切相关,用来评价裂缝孔隙度参数。一般低角度裂缝的阵列侧向深浅视电阻率呈现负差异,高角度缝呈现正差异,根据深浅阵列电阻率幅度的正负差异,可用于评价裂缝的产状。裂缝组的阵列侧向测井响应受到裂缝密度的影响,相同裂缝孔隙条件,裂缝密度增大造成阵列侧向测井视电阻率增大,裂缝密度较大的裂缝组在一定地质尺度下呈现电阻率宏观各向异性。交叉缝的组合复杂性决定了阵列侧向测井响应的差异,其响应不同于平行缝情况。阵列侧向测井提供了丰富的地层信息,在裂缝识别和裂缝性储层的裂缝评价方面具有良好的应用前景。

References

Chen, Q. H., Liu, C. Y., Wang, S. X., et al., 2002. Study on carbonate fracture cavity system—Status and prospects. *Oil & Gas Geology*, 23(2): 196–202 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. H., Chew, W. C., Zhang, G. J., 1998. A novel array laterolog method. *The Log Analyst*, 39(5): 23–32.

Deng, S. G., Wang, X. C., Fan, Y. R., 2006. Response of dual laterolog to fractures in fractured carbonate formation and its interpretation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 846–850 (in Chinese with English abstract).

Fu, X. F., Su, Y. P., Lü, Y. F., et al., 2007. Fractal characteristic and geological meaning of fault and fracture. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 227–234 (in Chinese with English abstract).

Griffiths, R., Smits, J. W., Faivre, O., et al., 1999. Better saturation from new array laterolog. In: Society of Professional Well Log Analysts, Houston, TX, United States. *Transactions of the SPWLA Annual Logging Symposium*, 40: 1–14.

Hakvoort, R. G., Fabris, A., Frenkel, M. A., et al., 1998. Field measurements and inversion results of the high-definition lateral log. In: Society of Professional Well Log Analysts, Houston, TX, United States. *Transactions of the SPWLA Annual Logging Symposium*, 39: 1–12.

Jiang, L. Z., Gu, J. Y., Guo, B. C., 2004. Characteristics and mechanism of low permeability clastic reservoir in Chi-

nese petroliferous basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(1): 13–18 (in Chinese with English abstract).

- Li, S. J., Xiao, C. W., Wang, H. M., et al., 1996. Mathematical model of dual laterolog response to fracture and quantitative interpretation of fracture porosity. *Acta Geophysica Sinica*, 39(6): 845–852 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Zhang, X., 2005. Multi-parameter inversion of array laterolog responses. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 20(1): 30–33 (in Chinese with English abstract).
- Luo, L., Hu, P. Y., Zhou, Z. Y., 2001. Log identification for fracture in carbonate. *Acta Petrolei Sinica*, 22(3): 32–35 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang, J., Li, S. J., 2001. An interpretation method of identifying and evaluating fractured sand oil reservoirs in deep zone in Bohai Gulf using dual laterolog responses. *Well Logging Technology*, 25(4): 282–286 (in Chinese with English abstract).
- Rabinowitz, P. D., Zhou, Z. Q., 2007. Array processing—A new method to detect and correct. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 25(1): 51–58.
- Sibbit, A., Faivre, O., 1985. The dual laterolog response in fractured rocks. In: Society of Professional Well Log Analysts, Houston, TX, United States. *Transactions of the SPWLA Annual Logging Symposium*, 26(1): 1–34.
- Smits, J. W., Dubourg, I., Luling, M. G., et al., 1998. Improved resistivity interpretation utilizing a new array laterolog tool and associated inversion processing. SPE 49328, New Orleans, Louisiana, 831–843.
- Wu, J., Xie, W. W., Xie, X. C., et al., 2008. Forward response analysis of array lateral logging tool. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 23(1): 73–76, 80 (in Chinese with English abstract).
- Zenf, L. B., Li, Y. G., Wang, Z. G., et al., 2007. Type and sequence of fractures in the second member of Xujiahe Formation at the south of western Sichuan depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 194–200 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. J., 1984. *Electrolog (I)*. Oil Industry Press, Beijing, 1–38 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈清华, 刘池阳, 王书香, 等, 2002. 碳酸盐岩缝洞系统研究现状与展望. *石油与天然气地质*, 23(2): 196–202.
- 邓少贵, 王晓畅, 范宜仁, 2006. 裂缝性碳酸盐岩裂缝的双侧

- 向测井响应特征及解释方法. 地球科学——中国地质大学学报, 31(6): 846—850.
- 付晓飞, 苏玉平, 吕延防, 等, 2007. 断裂和裂缝的分形特征. 地球科学——中国地质大学学报, 32(2): 227—234.
- 蒋凌志, 顾家裕, 郭彬程, 2004. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理. 沉积学报, 22(1): 13—18.
- 李善军, 肖承文, 汪涵明, 等, 1996. 裂缝的双侧向测井响应的数学模型及裂缝孔隙度的定量解释. 地球物理学报, 39(6): 845—852.
- 刘振华, 张霞, 2005. 阵列侧向测井响应的多参数反演. 西安石油大学学报(自然科学版), 20(1): 30—33.
- 罗利, 胡培毅, 周政英, 2001. 碳酸盐岩裂缝测井识别方法. 石油学报, 22(3): 32—35.
- 欧阳健, 李善军, 2001. 双侧向测井识别与评价渤海湾深层裂缝性砂岩油层的解释方法. 测井技术, 25(4): 282—286.
- 仵杰, 谢尉尉, 解茜草, 等, 2008. 阵列侧向测井仪器的正演响应分析. 西安石油大学学报(自然科学版), 23(1): 73—76, 80.
- 曾联波, 李跃纲, 王正国, 等, 2007. 川西南部须二段低渗透砂岩储层裂缝类型及其形成序列. 地球科学——中国地质大学学报, 32(2): 194—200.
- 张庚骥, 1984. 电法测井(上册). 北京: 石油工业出版社, 1—38.