

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2019134

## 近井眼洞穴型地层双侧向测井敏感因素分析

谢关宝<sup>1,2</sup>, 李永杰<sup>1,2</sup>, 吴海燕<sup>1,2</sup>, 黎有炎<sup>3</sup>

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 3. 中石化西南石油工程有限公司临盘钻井分公司, 山东临邑 251500)

**摘要:** 洞穴、裂缝及缝洞组合体是火成岩、碳酸盐岩储层的重要存储空间, 具有各向异性明显、非均质性极强的特点, 测井识别及定量评价难度大。为了给洞穴型地层测井识别与评价提供理论依据, 基于有限元法, 采用数值模拟方法分析了井径、钻井液电阻率、基岩电阻率、洞穴半径、洞穴填充物及洞穴与井壁的距离等因素对双侧向测井响应的影响。结果表明: 在近井眼洞穴型地层中, 由于洞穴的存在使双侧向电阻率明显减小, 且随着洞穴半径增大, 双侧向电阻率的减小幅度也增大; 洞穴中心处的双侧向电阻率最小, 随着洞穴半径增大, 深、浅侧向电阻率都减小; 双侧向电阻率随着洞穴与井壁的距离增大而增大, 且浅侧向电阻率的增大程度明显高于深侧向电阻率。研究结果可为洞穴型地层双侧向测井资料的解释提供理论指导。

**关键词:** 洞穴型地层; 双侧向测井; 敏感因素; 有限元法; 数值模拟

中图分类号: P631.8<sup>+</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)01-0120-07

## Analysis of Sensitive Factors in Dual Laterologs for Cavernous/Karst Formations Near the Borehole

XIE Guanbao<sup>1,2</sup>, LI Yongjie<sup>1,2</sup>, WU Haiyan<sup>1,2</sup>, LI Youyan<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 3. Linpan Drilling Company, Sinopec Southwest Oilfield Service Corporation, Linyi, Shandong, 251500, China)

**Abstract:** Igneous and carbonate reservoirs consist of formations characterized by containing extensive fractures, caverns (karst), and fractured karst. The challenges exist in the fact that there is obvious anisotropy and strong heterogeneity, resulting in huge difficulty in logging identification and quantitative evaluation. In order to provide a theoretical basis for the logging identification and evaluation of karst/cavernous formations, the numerical analysis has been used to analyze the effects of hole diameter, drilling fluid resistivity, matrix resistivity, cave size, cave fillings. Further, the distance between cave and borehole is calculated based on the response of dual laterolog using the finite element method. The results showed that the dual laterolog resistivity was significantly reduced due to the existence of near-borehole cave formation. With an increase of cave size, the reduced amplitude of dual laterolog resistivity could be increased as well. The dual laterolog resistivity is the smallest at the center of cave, and as the cave radius increases, both the deep and shallow lateral resistivity decrease. The dual laterolog resistivity increases with the increase of distance between the cave and the well wall, and the increase rate of shallow lateral resistivity is significantly faster than that of deep lateral resistivity. The research results can provide theoretical guidance for the interpretation of dual laterolog data in cavernous/karst formation.

**Key words:** cavernous formation; dual laterolog; sensitivity factors; finite element method; numerical simulation

洞穴、裂缝及缝洞组合体是火成岩、碳酸盐岩储层的重要存储空间, 其各向异性明显、非均质性极强, 尤其是洞穴型地层, 洞穴直径、填充物类型、填充程度和洞穴近井眼边界与井壁的距离(以下简称洞穴与井壁的距离)等复杂多变, 利用测井资料识别和定量评价该类储集体的难度较大<sup>[1-7]</sup>, 双侧向测井是评价分析洞穴型地层的有效手段之一, 国内

收稿日期: 2019-05-05; 改回日期: 2019-10-22。

**作者简介:** 谢关宝(1977—), 男, 山东济宁人, 2001年毕业于石油大学(华东)应用地球物理专业, 2004获石油大学(华东)地球探测与信息技术专业硕士学位, 2013年获中国石油大学(华东)地质资源与地质工程博士学位, 高级工程师, 主要从事测井方法研究、地球物理正反演及测井资料解释等工作。E-mail: baoupc@163.com。

**基金项目:** 国家重点研发计划“干热岩能量获取及利用关键科学问题研究”(编号: 2018YFB1501802)资助。

学者在该方面进行了许多有益的尝试。谢关宝等人<sup>[2, 8-11]</sup>分析了双侧向测井在不同地层中的响应特征;谭茂金、范宜仁和刘玺等人<sup>[5-6, 8, 12-13]</sup>采用物理试验与数值模拟相结合的方法,研究了过井眼洞穴型地层双侧向测井响应的变化;苏俊磊等人<sup>[14]</sup>分析了塔河油田洞穴型储层不同填充物、不同填充程度洞穴的常规测井响应特征;王晓畅等人<sup>[7, 9, 15]</sup>探讨了缝洞型储集体的常规测井识别方法及利用双侧向测井计算洞穴填充物电阻率的方法。目前针对近井眼洞穴型地层电测井模拟及分析的研究相对较少,洞穴型地层的测井识别与评价缺少理论依据。因此,笔者基于近井眼洞穴型地层模型,采用三维有限元数值模拟方法,分析了井径、钻井液电阻率、基岩电阻率、洞穴尺寸、洞穴填充物及洞穴与井壁的距离等因素对双侧向测井响应的影响,以期对洞穴型地层测井识别与分析提供理论指导。

## 1 双侧向响应数值模拟

### 1.1 近井眼洞穴地层模型

近井眼洞穴型地层模型由高阻基岩、井眼、钻井液、测井仪器、球形洞穴和填充物组成,如图 1 所示。模型具体参数如下:井眼半径为  $r_h$ , 洞穴为球形,半径为  $r_a$  (且  $r_a \geq 0.20$  m), 内部充满不同电阻率的填充物, 洞穴中心与井轴的距离为  $r_{off}$ , 且  $r_{off} \geq r_a + r_h$ ; 双侧向测井仪器在井眼内居中放置, 仪器轴与井轴重合; 设定井轴的方向为  $z$  轴, 选择  $x$  轴方向, 使  $zx$  所在的平面与井轴线和地层法线所在的平面重合。

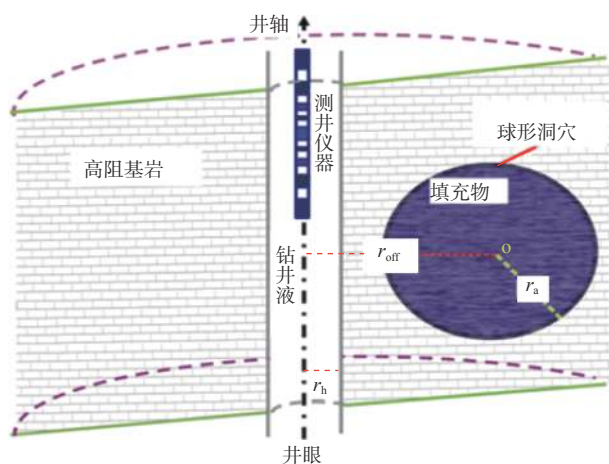


图 1 近井眼洞穴型地层模型

Fig.1 Model of near-borehole cave formation

### 1.2 三维有限元计算

双侧向测井的正演问题可归结为稳流电场的计算,在柱坐标系下可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\sigma}{r} \frac{\partial U}{\partial \phi} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

式(1)的定解问题可归结为泛函取极值问题,可表示为:

$$\Phi(U) = \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} \sigma \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial U}{\partial \phi} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] dr d\phi dz - \sum_E I_E U_E \quad (2)$$

式中:  $U$  为地层中任意一点电势, V;  $\sigma$  为地层电导率, S/m;  $I_E$  为发射电极  $E$  的电流, A;  $U_E$  为发射电极  $E$  的电势, V。

针对双侧向测井的三维计算模型,无限远地层边界满足 Dirichlet 边界条件:

$$\begin{cases} U|_{z \rightarrow \infty} = 0 \\ U|_{\rho \rightarrow \infty} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

在仪器的绝缘环及电极表面,电势满足 Neumann 边界条件:

$$\begin{aligned} (\sigma \nabla U) \cdot \mathbf{e}_n|_{\Gamma_I} &= 0 \\ (\sigma \nabla U) \cdot \mathbf{e}_n|_{\Gamma_C} &= j_s \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $j_s$  为恒流电极表面的电流密度, A/m<sup>2</sup>。

针对上文的近井眼洞穴型地层三维模型,可在模型网格化离散后,令  $\Phi(U)$  对  $U$  的导数为零,可得到大型线性稀疏有限元刚度矩阵:

$$\mathbf{K} \tilde{\mathbf{U}} = \mathbf{b} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{K}$  为有限元刚度矩阵;  $\mathbf{b}$  为电流, A。

结合边界条件式(3)和式(4),对单电极激发的电场分布进行求解;在求得仪器不同发射电极激发测量电极的电位后,聚焦合成深、浅侧向模式,将电压信号转换为地层视电阻率( $R_a$ ),得到双侧向电阻率。

## 2 影响因素分析

影响洞穴型地层双侧向测井响应的因素主要包括井径、钻井液电阻率、基岩电阻率、洞穴半径、洞穴内填充物、洞穴与井壁的距离等<sup>[3-6]</sup>。在模拟计算中,假设洞穴中心与测井仪器主电极在纵向上处于同一位置,其中,  $R_b$  为基岩电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $R_{mf}$  为钻井液电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $R_{fill}$  为洞穴内填充物的电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $D_h$  为井径, mm;  $r_a$  为洞穴半径, m;  $r_{off}$  为洞穴中心与井轴的距离, m;  $r_b$  为洞穴与井壁的距离, m;  $R_{LLS}$  为浅侧向电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $R_{LLD}$  为深侧向电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。

## 2.1 井径

考察井径对洞穴型地层双侧向电阻率的影响,需同时考虑洞穴与井壁的距离、洞穴半径等因素,其中,  $R_b$  为  $1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ ,  $R_{mf}$  为  $1\ \Omega\cdot\text{m}$ ,  $R_{fill}$  为  $1\ \Omega\cdot\text{m}$ ,

$r_a$  为 0, 1.00, 2.00, 3.00 和 5.00 m,  $r_b$  为 0.05, 0.25 和 0.75 m,  $D_h$  为 152.4, 203.2, 250.4, 304.8, 355.6 和 406.4 mm, 模拟不同井径下双侧向电阻率, 结果如图 2 所示。

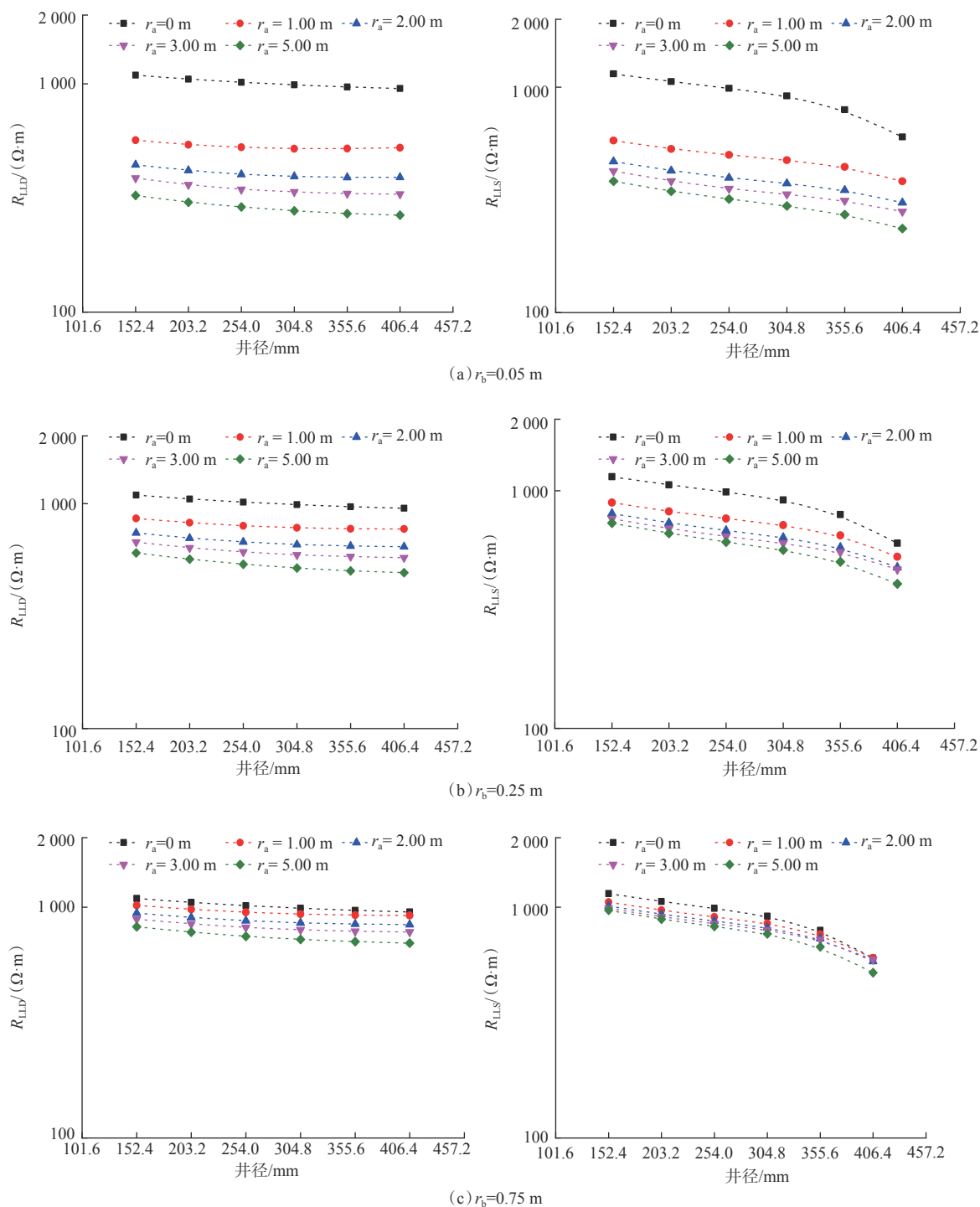


图 2 不同井径下近井眼洞穴型地层双侧向电阻率

Fig.2 Dual laterolog resistivity of near-borehole cave formation under different hole diameters

由图 2 可看出,随着井径增大,双侧向电阻率明显减小,且浅侧向电阻率( $R_{LLS}$ )减大幅度更大。引

起此现象的原因是,浅侧向探测深度较浅,更易受井眼环境的影响。洞穴与井壁距离较近时,不同半

径洞穴地层的深、浅侧向电阻率差异较为明显(见图2(a));随着洞穴与井壁距离增大,其差异变得越来越小(见图2(b)、和图2(c)),当洞穴与井壁的距离大于0.75 m时,不同半径洞穴地层的深、浅侧向电阻率基本重合。引起此现象的原因是,随着洞穴与井壁的距离增大,受双侧向测井径向探测深度的限制,洞穴对双侧向电阻率的影响逐渐减小。

## 2.2 钻井液电阻率

考察钻井液电阻率对近井眼洞穴型地层双侧向电阻率的影响,  $R_{mf}$  的取值范围  $0.1 \sim 2.0 \Omega \cdot m$ , 其中  $R_b$  为  $1\,000.0 \Omega \cdot m$ ,  $R_{fill}$  为  $1.0 \Omega \cdot m$ ,  $r_a$  为  $0, 0.50, 1.00, 2.00, 3.00$  和  $5.00$  m,  $r_b$  为  $0.10$  m,  $D_h$  为  $203.2$  mm, 模拟不同钻井液电阻率下近井眼洞穴型地层双侧向电阻率, 结果如图3所示。

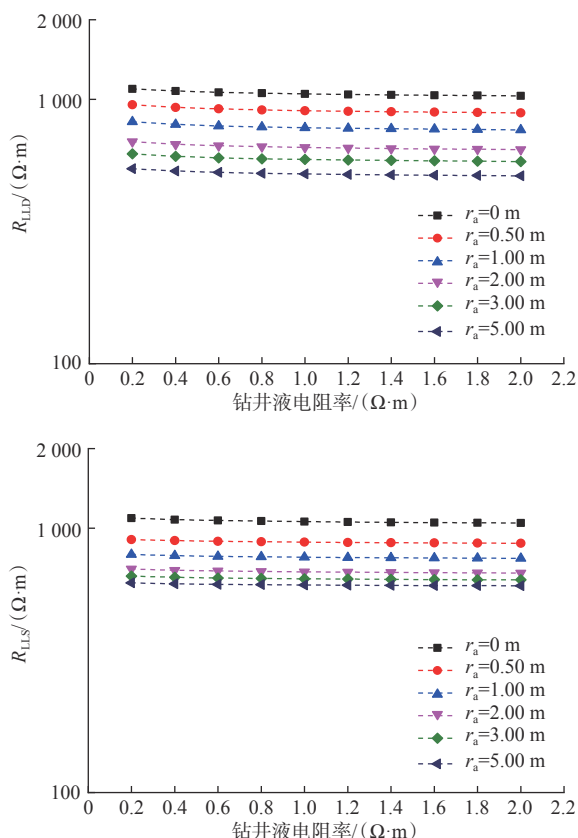


图3 不同钻井液电阻率下近井眼洞穴型地层双侧向电阻率

Fig.3 Dual laterolog resistivity of near-borehole karst formation under different drilling fluid resistivities

由图3可知, 洞穴半径一定时, 随着钻井液电阻率增大, 双侧向电阻率基本保持不变, 说明近井眼洞穴型地层双侧向电阻率受钻井液电阻率的影响较小; 钻井液电阻率保持不变时, 随着洞穴半径增大, 双侧向电阻率减小。其原因主要是, 随着洞穴半径

增大, 洞穴内填充物电阻率对双侧向电阻率的影响增大。

## 2.3 基岩电阻率

考察基岩电阻率对近井眼洞穴型地层双侧向电阻率的影响,  $R_b$  的取值范围  $100 \sim 5\,000 \Omega \cdot m$ , 其中  $R_{mf}$  为  $1 \Omega \cdot m$ ,  $R_{fill}$  为  $1 \Omega \cdot m$ ,  $r_a$  为  $0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 5.00$  m,  $r_b$  为  $0.25$  m,  $D_h$  为  $203.2$  mm, 模拟不同基岩电阻率下近井眼洞穴型地层双侧向电阻率, 结果如图4和图5所示。

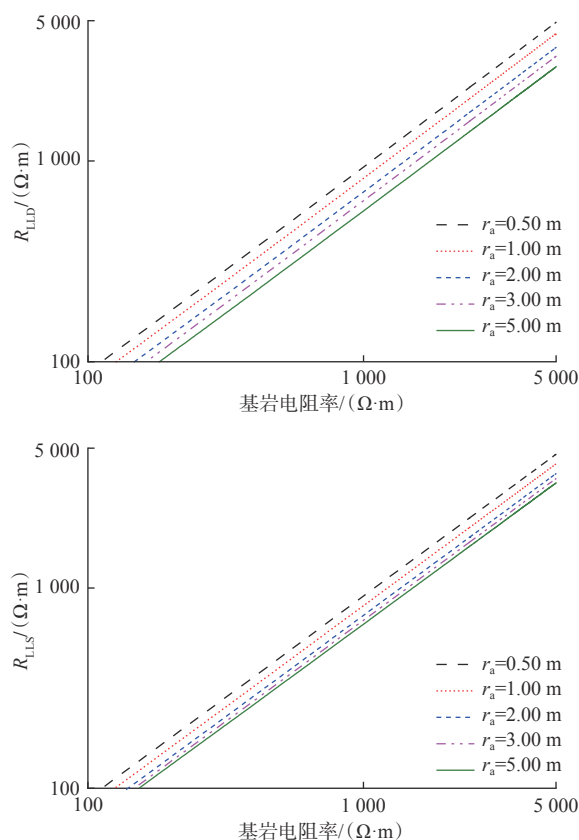


图4 不同基岩电阻率下洞穴型地层双侧向电阻率

Fig.4 Dual laterolog resistivity of karst formation under different matrix resistivities

由图4可知, 随着基岩电阻率增大, 双侧向电阻率呈线性增大, 且洞穴半径越大, 双侧向电阻率越小。由图5可知, 随着基岩电阻率增大, 深侧向电阻率与基岩电阻率的比值增加幅度较大, 浅侧向电阻率与基岩电阻率比值增加幅度较小。

## 2.4 洞穴半径

实际地层条件下, 洞穴的大小不一, 设洞穴半径  $r_a$  为  $0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 5.00$  m, 其中  $R_b$  为  $1\,000 \Omega \cdot m$ ,  $R_{mf}$  为  $1 \Omega \cdot m$ ,  $R_{fill}$  为  $1 \Omega \cdot m$ ,  $r_b$  为  $0.10$  m,  $D_h$  为  $203.24$  mm, 模拟不同洞穴半径下近井眼洞穴型地层双侧向电阻率, 结果如图6所示。

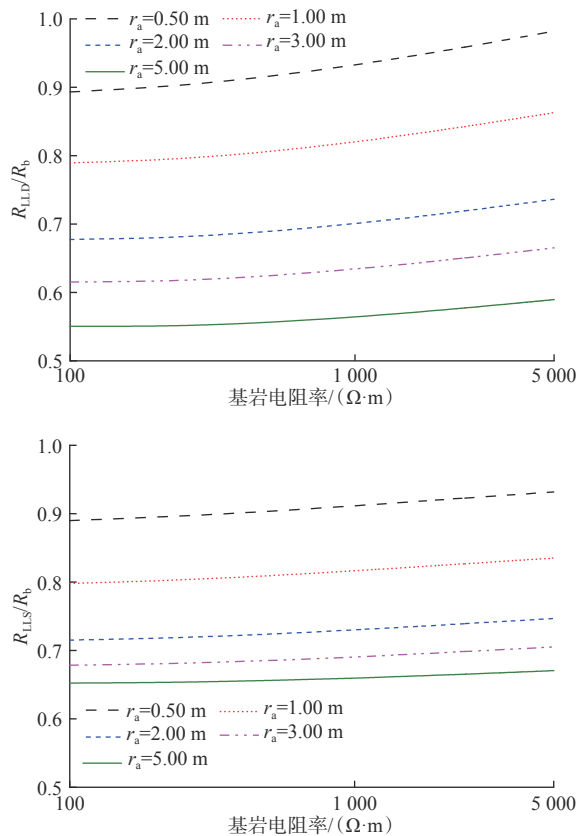


图5 基岩电阻率对双侧向测井电阻率与基岩电阻率比值的影响

Fig.5 Effect of matrix resistivity on the ratio of dual laterolog resistivity to matrix resistivity

由图6可知: 洞穴中心处的双侧向电阻率最小; 洞穴半径较小时, 深、浅侧向电阻率基本重合; 随着洞穴半径增大, 深、浅侧向电阻率都减小, 当洞穴半径增大到一定值时( $r_a$ 约2.00 m), 深、浅侧向电阻率出现负差异, 这主要是由深浅侧向的探测深度不同引起的。

## 2.5 洞穴填充物

洞穴型地层洞穴的填充情况异常复杂, 设洞穴填充物电阻率 $R_{fill}$ 的取值范围为1~1 000  $\Omega \cdot m$ , 其中 $R_b$ 为1 000  $\Omega \cdot m$ ,  $R_{mf}$ 为1  $\Omega \cdot m$ ,  $r_a$ 为3.00 m,  $r_b$ 为0.05, 0.25, 0.75, 1.05 m,  $D_h$ 为203.2 mm, 模拟不同洞穴填充物(即洞穴填充物的电阻率不同)下近井眼洞穴型地层双侧向电阻率, 结果如图7所示。

由图7可知: 洞穴填充物电阻率小于100  $\Omega \cdot m$ 时, 随着洞穴填充物电阻率增大, 洞穴中心双侧向电阻率基本保持不变, 深、浅侧向电阻率呈负差异特征; 洞穴填充物电阻率大于100  $\Omega \cdot m$ 时, 洞穴中心双侧向测井电阻率迅速增大, 深、浅侧向电阻率基本重合, 深、浅侧向电阻率远大于洞穴填充物电阻率。

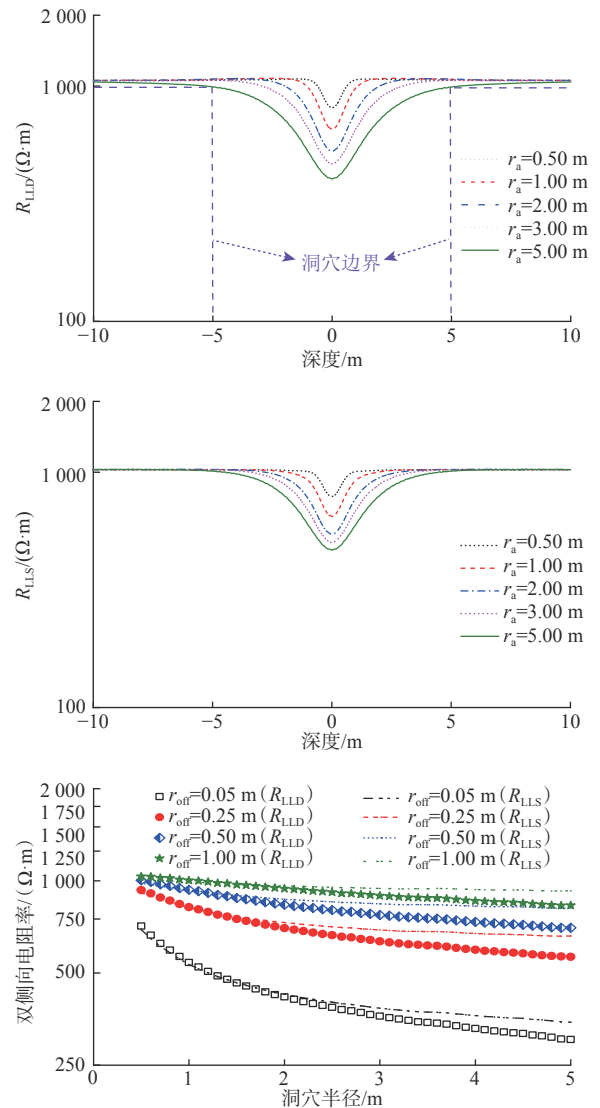


图6 不同洞穴半径下近井眼洞穴地层双侧向电阻率

Fig.6 Dual laterolog resistivity of near-borehole karst formation with different cave radii

这是由于双侧向电阻率是近井洞穴填充物电阻率、基岩电阻率和钻井液电阻率共同作用的结果, 洞穴内填充物电阻率对双侧向电阻率的影响较小, 因此, 根据双侧向电阻率无法准确求取洞穴填充物的电阻率。

## 2.6 洞穴与井壁的距离

近井眼洞穴型地层双侧向测井响应主要受洞穴半径、洞穴内填充物电阻率的影响, 在分析测井资料时, 还需考虑洞穴发育位置与井壁距离的影响。设定洞穴与井壁的距离 $r_b$ 的取值范围为0~5.00 m, 其中 $R_b$ 为1 000  $\Omega \cdot m$ ,  $R_{mf}$ 为1  $\Omega \cdot m$ ,  $R_{fill}$ 为1  $\Omega \cdot m$ ,  $r_a$ 为0.50, 1.00, 2.00, 3.00和5.00 m,  $D_h$ 为203.2 mm, 模拟不同洞穴与井壁的距离下近井眼洞穴型地层双侧向电阻率, 结果如图8所示。

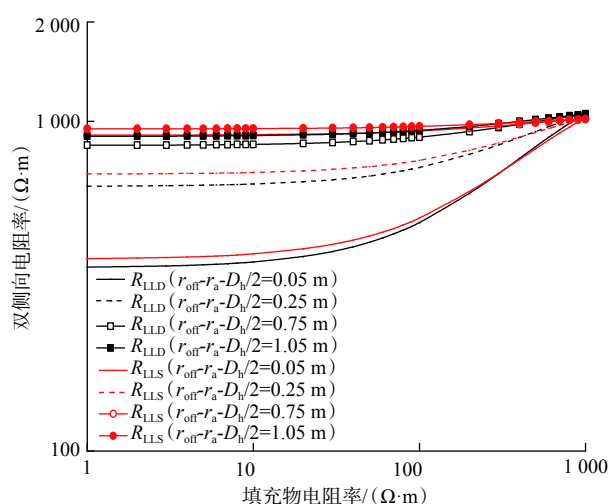


图 7 不同洞穴填充物下近井眼洞穴地层双侧向电阻率

Fig. 7 Dual laterolog resistivity of near-borehole karst formation with different cave fillings

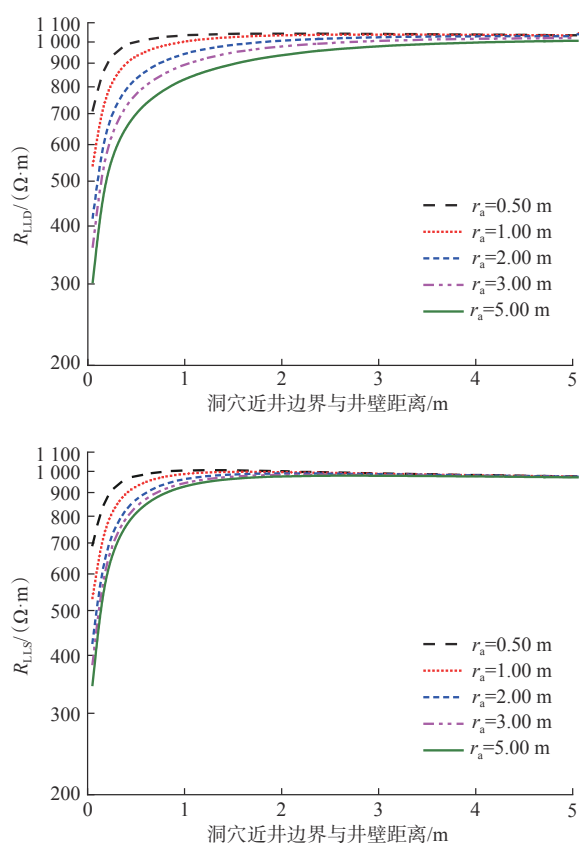


图 8 不同洞穴与井壁的距离下近井眼洞穴地层双侧向电阻率

Fig. 8 Dual laterolog resistivity of near-borehole karst formation under different karst boundary and distance from borehole wall

由图 8 可知: 随着洞穴与井壁的距离增大, 双侧向测井电阻率迅速增大, 且浅侧向电阻率的增大程度明显高于深侧向电阻率。分析认为, 这主要是由

于浅侧向横向探测深度小于深侧向横向探测深度。洞穴与井壁的距离小于 1.00 m 时, 随洞穴半径增大, 浅侧向电阻率减小; 洞穴与井壁的距离大于 1.00 m 时, 随洞穴半径增大, 浅侧向电阻率基本保持不变, 而洞穴与井壁的距离大于 2.00 m 时, 深侧向电阻率基本保持不变, 这主要是因为浅侧向探测深度较浅造成的。

### 3 数值模拟准确性分析

为验证上文三维数值模拟结果, 作如下假设: 洞穴内填充物电阻率与地层电阻率相同, 则可将三维模型视为具有旋转对称性的直井均匀介质模型, 从而将三维问题简化为二维子午面上的问题。

设定洞穴半径为 0.36 和 0.48 m, 洞穴与井壁的距离为 0.70 和 1.10 m, 采用文中所述三维算法及二维算法<sup>[3-4]</sup>计算两者的相对误差, 结果如图 9, 其中纵坐标为二者相对误差, 横坐标为测井仪器主电极中心距洞穴中心的距离。由图 9 可以看出, 各采样点相对误差均小于 1.0%, 说明上文所采用的三维数值模拟算法是可靠的, 得到的结论是可信的。

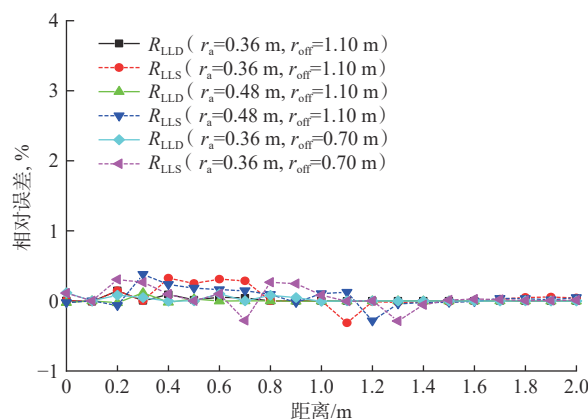


图 9 数值模拟算法相对误差分析

Fig. 9 Analysis of relative error of numerical simulation algorithm

### 4 结 论

1) 随着洞穴半径增大, 双侧向电阻率降低幅度增大; 洞穴半径一定时, 随着钻井液电阻率增大, 双侧向电阻率基本保持不变。

2) 洞穴中心处的双侧向电阻率最小; 洞穴半径较小时, 深、浅侧向电阻率基本重合, 随着洞穴半径增大, 深、浅侧向电阻率都减小; 当洞穴半径不小于

2.00 m 时,深、浅侧向电阻率出现负差异。

3) 洞穴填充物电阻率小于  $100 \Omega \cdot \text{m}$  时,洞穴中心双侧向电阻率基本保持不变,深、浅侧向电阻率呈负差异特征;洞穴填充物电阻率大于  $100 \Omega \cdot \text{m}$  时,洞穴中心双侧向电阻率迅速增大,深、浅侧向电阻率基本重合。

4) 随着洞穴与井壁的距离增大,双侧向电阻率迅速增大,且浅侧向电阻率的增大程度明显高于深侧向电阻率;洞穴与井壁的距离大于 1.00 m 时,浅侧向电阻率基本保持不变;洞穴与井壁的距离大于 2.00 m 时,深侧向电阻率基本保持不变。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 曾义金. 海相碳酸盐岩超深油气井安全高效钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 25–33.  
ZENG Yijin. Key technologies for safe and efficient drilling of marine carbonate ultra-deep oil and gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 25–33.
- [2] 谢关宝. 双侧向测井响应特征分析及环境校正方法[J]. 科技导报, 2014, 32(20): 74–78.  
XIE Guanbao. Analysis of dual laterolog response characteristics and environmental correction[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(20): 74–78.
- [3] 王晓畅, 胡松, 孔强夫. 双侧向测井响应计算洞穴填充物电阻率方法[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(3): 1155–1160.  
WANG Xiaochang, HU Song, KONG Qiangfu. Method of cave fillings resistivity calculation by dual laterolog response[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(3): 1155–1160.
- [4] 袁瑞. 塔河油田复杂碎屑岩岩性识别方法[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(6): 64–67.  
YUAN Rui. Method to identify complicated lithology of elastic rocks in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(6): 64–67.
- [5] 范宜仁, 王磊, 李虎, 等. 洞穴型地层双侧向测井响应数值模拟与特征分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 40–46.  
FAN Yiren, WANG Lei, LI Hu, et al. Numerical simulation and corresponding characteristic analysis of dual laterolog for cave reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 40–46.
- [6] 范宜仁, 王磊, 葛新民, 等. 洞穴型地层双侧向测井响应模拟与特征分析[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 237–243.  
FAN Yiren, WANG Lei, GE Xinmin, et al. Response simulation and corresponding analysis of dual laterolog in cavernous reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 237–243.
- [7] 王晓畅, 李军, 张松扬, 等. 裂缝孔隙参数定量表征和刻度及影响因素分析[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(4): 1393–1399.  
WANG Xiaochang, LI Jun, ZHANG Songyang, et al. Quantitative characterization and calibration of fracture pore parameters and the effect factors analysis[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(4): 1393–1399.
- [8] 刘玺, 张珊珊. 过井眼缝洞地层双侧向电阻率测井敏感性因素分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2018, 15(23): 31–35.  
LIU Xi, ZHANG Shanshan. The analysis on sensitivity of dual lateral resistivity logging for fracture-cavernous formation through the wellbore[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2018, 15(23): 31–35.
- [9] 倪小威, 徐观佑, 敖旋峰, 等. 阵列侧向测井曲线极化角影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 120–126.  
NI Xiaowei, XU Guanyou, AO Xuanfeng, et al. The influencing factors on the polarizing angle of array laterolog curves[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 120–126.
- [10] 李铭宇, 柯式镇, 康正明, 等. 螺旋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 Mingyu, KE Shizhen, KANG Zhengming, et al. Influence factors of measured signal intensity and the response characteristics of the toroidal coil excitation LWD laterolog instrument[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 128–134.
- [11] 倪小威, 徐思慧, 别康, 等. 不同井眼偏心距下水平井阵列侧向测井围岩校正研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 121–126.  
NI Xiaowei, XU Sihui, BIE Kang, et al. Surrounding rock influence correction for array laterolog responses with borehole eccentricities in horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4): 121–126.
- [12] TAN Maojin, GAO Jie, WANG Xiaochang, et al. Numerical simulation of the dual laterolog for carbonate cave reservoirs and response characteristics[J]. Applied Geophysics, 2011, 8(1): 79–85.
- [13] 冯进, 倪小威, 杨清, 等. 基于混合模拟退火算法的阵列侧向测井实时反演研究[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 121–126.  
FENG Jin, NI Xiaowei, YANG Qing, et al. Research on array lateral logging real-time inversions based on hybrid simulated annealing algorithms[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 121–126.
- [14] 苏俊磊, 张松扬, 王晓畅, 等. 塔河油田碳酸盐岩洞穴型储层充填性质常规测井表征[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1264–1269.  
SU Junlei, ZHANG Songyang, WANG Xiaochang, et al. Conventional logging characterization on fillings characteristic of cavernous carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1264–1269.
- [15] 王晓畅, 张军, 李军, 等. 基于交会图决策树的缝洞体类型常规测井识别方法: 以塔河油田奥陶系为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 805–812.  
WANG Xiaochang, ZHANG Jun, LI Jun, et al. Conventional logging identification of fracture-vug complex types data based on crossplots-decision tree: a case study from the ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 805–812.

[编辑 刘文臣]