

# 洞穴型地层双侧向测井响应数值模拟与特征分析

范宜仁<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>1,2</sup>, 李虎<sup>1,2</sup>, 丛云海<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学 CNPC 测井重点实验室, 山东青岛 266580;  
3. 中国石油集团长城钻探工程有限公司地质研究院, 辽宁盘锦 124010)

**摘要:**基于有限元素法,采用边界局部加密技术,实现对球形、椭球形洞穴的精确剖分与双侧向测井响应快速数值模拟,分析不同洞穴尺寸、填充类型及不同填充程度条件下双侧向测井响应特征,对比纵向、径向延伸椭球形洞穴与球形洞穴响应异同,从而研究洞穴发育形状对双侧向响应影响。结果表明:洞穴的存在导致双侧向测井响应明显降低且存在正差异,深侧向受洞穴尺寸及围岩影响严重,一定程度上可反映洞穴发育规模与填充情况,浅侧向测井可较好反映洞穴内填充物电阻率;椭球形洞穴的长轴若沿纵向延伸,其响应由球形洞穴过渡为类似侵入带特征,若沿径向延伸,其响应由球形洞穴过渡为类似薄层特征。

**关键词:**洞穴型地层; 双侧向; 填充物; 填充程度; 椭球形洞穴

**中图分类号:** TE 122

**文献标志码:** A

**引用格式:**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.

## Numerical simulation and corresponding characteristic analysis of dual laterolog for cave reservoirs

FAN Yiren<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, LI Hu<sup>1,2</sup>, CONG Yunhai<sup>3</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. CNPC Key Laboratory for Well Logging, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
3. GWDC Geology Research Institute, CNPC, Panjin 124010, China)

**Abstract:** Finite element method was utilized to fast simulate logging responses with the help of local refinement mesh generation. Caves with different sizes, infill material, and various infill level were simulated and analyzed. In addition ellipsoids with different radial and vertical distribution were simulated to further study the effects of cave structure on the dual laterolog response. The results can be summarized as follows: the dual laterolog response decreases significantly when cave exists; although the deep laterolog is affected by the cave size and surrounding bed, in some degree it can indicate the cave size and infill condition; the infill resistivity of the cave can be derived with the help of shallow laterolog response; lastly, when the ellipsoidal cave develops in the major axis direction, dual laterolog response converts to invasion zone response; if ellipsoidal cave develops along the minor axis, dual laterolog response converts to folium layer response gradually.

**Key words:** cave formation; dual laterolog; infill material; infill level; ellipsoidal cave

洞穴、裂缝及缝洞组合体是碳酸盐岩、火成岩储层的重要存储空间与渗流空间,但洞、缝发育往往具

收稿日期:2014-03-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41474100);中石化国家科技重大专项(2011ZX05005-006);中国石油大学(华东)研究生自主创新项目(13CX06024A)

作者简介:范宜仁(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事岩石物理与测井新方法研究。E-mail:fanyiren@upc.edu.cn。

有强非均质性与各向异性,特别是洞穴型地层,其发育形状、填充物类型、填充程度等多样,使得测井响应复杂,测井识别与定量评价难度大<sup>[1-2]</sup>。传统电测井具有探测深度深、对井周异常体敏感等特征,被大量用于缝洞识别和评价<sup>[3]</sup>,电成像测井可直观显示井壁裂缝发育情况与洞穴纵向展布,但受其探测深度限制,电成像测井难以反映裂缝延伸与洞穴的径向发育特征。双侧向测井很早就被应用于裂缝的评价与参数计算,Wang等<sup>[4-11]</sup>在裂缝型地层测井响应模拟与裂缝参数计算方面做了大量研究,为井周裂缝评价提供了理论依据。目前对洞穴发育地层电测井响应模拟与分析研究较少,洞穴的识别与评价缺少理论依据。笔者引入局部加密网格剖分技术,对过井眼球形、椭球形洞穴双侧向响应进行数值模拟,并考察不同尺寸、填充物类型与填充程度条件下双侧向测井响应特征,以期为洞穴的识别与评价提供理论指导。

## 1 双侧向测井响应有限元数值模拟

### 1.1 洞穴型地层模型

本文中采用二维过井眼球形洞穴地层模型(图1),且洞穴为半径大于0.2 m的大型溶蚀洞穴。双侧向仪器居中放置,仪器轴、井轴和球形洞穴球心三者重合,洞穴可被多层不同电阻率的填充物任意填充,洞穴外为高电阻率基岩,双侧向仪器、球形洞穴、地层以及井眼相对井轴具有旋转对称特征。

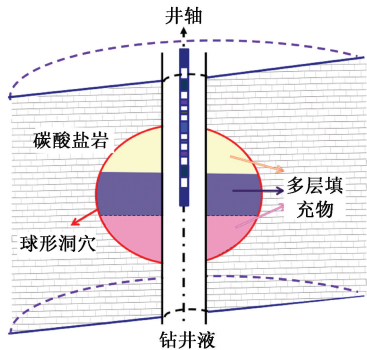


图1 轴对称洞穴型地层模型示意图

Fig.1 Schematic drawing of axisymmetric cave formation model

### 1.2 双侧向测井响应有限元计算

双侧向测井响应正演模拟可归结为稳流场计算问题,双侧向测井的电场问题可由微分方程描述。若用 $U$ 表示电位, $\sigma$ 表示介质的电导率,则在柱坐标系 $(r, \phi, z)$ 下有

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

二维轴对称地层条件下,式(1)可简化为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0. \quad (2)$$

利用有限元方法,建立能量泛函,将偏微分方程定解问题转化成泛函取极值问题,所用到的泛函为

$$\Phi(U) = \Phi_1(U) - \Phi_2(U). \quad (3)$$

其中

$$\Phi_1(U) = \pi \iint \sigma \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] r dr dz, \quad (4)$$

$$\Phi_2(U) = \sum_E I_E U_E. \quad (5)$$

式中, $\Phi_1(U)$ 为求解区消耗的功率; $\Phi_2(U)$ 为电极所提供的功率; $I_E$ 和 $U_E$ 分别为电极E的电流和电位。

对图1中所示球形洞穴型地层模型进行离散,利用式(3)结合边界条件,运用“前线解法”,实现双侧向测井响应快速求解<sup>[12-13]</sup>。

### 1.3 局部加密技术

为对井眼、仪器结构与地层进行快速剖分,在电测井仪器正演模拟过程中往往采用结构化网格剖分方法<sup>[14-17]</sup>。结构化网格剖分方法具有网格生成速度快、数据结构简单、易于实现等特点,但是难以精细剖分圆(球)形洞穴(图2(a))等复杂地层边界;非结构化网格剖分适用于复杂结构模型和任意连通区域的网格生成,但程序复杂、网格生成速度慢,同时会造成有限元求解的刚度矩阵自由度较大,存贮与计算成本较高。为快速精确剖分洞穴边界,提高计算效率,本文中采用局部加密技术。首先计算洞穴边界与结构化网格交点,将交点添加到已有网格中,并采用局部换边方法对新增节点的局部区域进行检测和变换,以保证元素的稳定性与矩阵收敛(图2(b))。

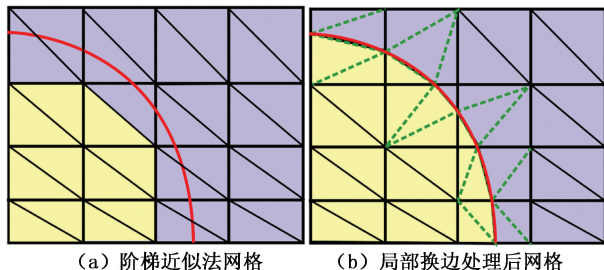


图2 阶梯近似方法与局部加密方法网格示意图

Fig.2 Schematic drawing of ladder approximation mesh and local refinement mesh

为验证局部加密方法计算精度与计算效率,对比了不同加密程度条件下结构化网格剖分与局部加密方法计算结果(表 1)。其中井眼直径为 20.32 cm,洞穴半径 10 m,钻井液电阻率和基岩电阻率分别为  $1\ \Omega\cdot\text{m}$  和  $20\ \Omega\cdot\text{m}$ ,洞穴被钻井液完全填充。

表 1 阶梯近似与边界局部加密方法对比

Table 1 Comparison between ladder approximation and local refinement method

| 阶梯近似方法     |        |         |         |          | 局部加密方法     |       |         |         |          |
|------------|--------|---------|---------|----------|------------|-------|---------|---------|----------|
| 剖分洞穴面积比例/% | 节点自由度  | 深侧向误差/% | 浅侧向误差/% | 相对计算时间/s | 剖分洞穴面积比例/% | 节点自由度 | 深侧向误差/% | 浅侧向误差/% | 相对计算时间/s |
| 85         | 3 614  | 25.60   | 15.87   | 0.023    | 90         | 1 864 | 8.75    | 6.73    | 0.013 7  |
| 90         | 4 309  | 3.53    | 3.94    | 0.033    | 95         | 2 409 | 2.62    | 1.65    | 0.020 5  |
| 95         | 9 730  | 1.21    | 1.54    | 0.238    | 96         | 3 587 | 2.24    | 1.10    | 0.032 2  |
| 98         | 20 895 | —       | —       | 1.000    | 98         | 4 410 | 0.17    | 0.23    | 0.042 7  |

2 双侧向测井响应特征分析

2.1 洞穴尺寸的影响

为研究不同洞穴尺寸对双侧向测井响应的影响,分别模拟了洞穴半径为 0.2、0.5、1、2、5、10 m 的双侧向测井响应,结果见图 3。模拟条件:井眼直径为 20.32 cm,钻井液电阻率为  $1\ \Omega\cdot\text{m}$ ,基岩电阻率

为  $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ ,洞穴被钻井液完全填充。由图 3 可以看出,当洞穴半径小于 0.5 m 时,双侧向响应对洞穴不敏感;随着洞穴半径增大,深、浅侧向测井视电阻率值迅速下降,且深侧向电阻率值大于浅侧向呈明显正差异;当洞穴半径大于 5 m 时,深、浅侧向电阻率值保持不变,且浅侧向可较好反映洞穴电阻率真实信息。

为  $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ ,洞穴被钻井液完全填充。由图 3 可以看出,当洞穴半径小于 0.5 m 时,双侧向响应对洞穴不敏感;随着洞穴半径增大,深、浅侧向测井视电阻率值迅速下降,且深侧向电阻率值大于浅侧向呈明显正差异;当洞穴半径大于 5 m 时,深、浅侧向电阻率值保持不变,且浅侧向可较好反映洞穴电阻率真实信息。

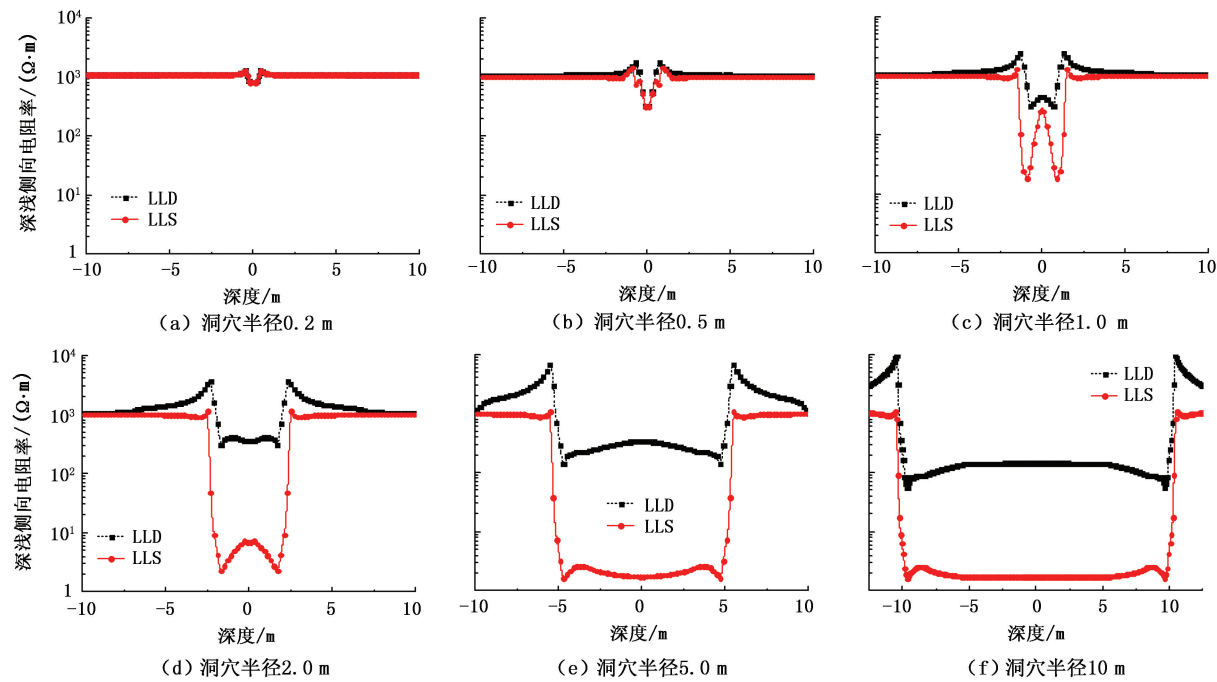


图 3 不同洞穴尺寸条件下双侧向测井响应

Fig.3 Dual laterolog responses of different cave sizes

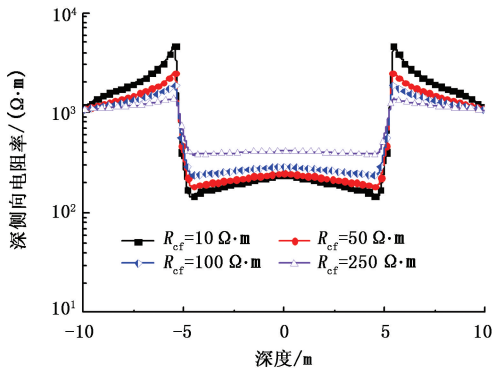
当基岩电阻率与洞穴电阻率固定,双侧向测井仪器靠近洞穴时,受球形洞穴边界影响,在洞穴与基岩纵向交界面处,深侧向测井响应明显大于基岩电阻率值,且随着洞穴半径的增大而增大,洞穴半径小

于 1m 时,交界面处深侧向测井值随洞穴半径的变化基本保持不变;浅侧向测井探测深度受洞穴边界影响较小,边界处不同洞穴半径的浅侧向测井响应基本保持不变。仪器进入洞穴后深浅侧向响应均快

速减小,据此可用于确定洞穴上下边界。

2.2 填充物电阻率的影响

填充物电阻率是洞穴发育的重要参数,也是影响双侧向响应的重要因素。假设洞穴完全填充,基岩电阻率  $1000\ \Omega\cdot\text{m}$ ,井眼直径为  $20.32\ \text{cm}$ ,钻井液电阻率为  $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 。洞穴半径为  $5.0\ \text{m}$ ,洞穴内填充物电阻率  $R_{\text{cf}}$  分别为  $10$ 、 $50$ 、 $100$  和  $250\ \Omega\cdot\text{m}$  时,不同洞穴填充物电阻率条件下的双侧向测井响应如图 4 所示。



由图 4 可以看出,洞穴半径固定,填充物电阻率变化时,双侧向测井响应曲线形态不变,洞穴内深浅侧向视电阻率值均随填充物电阻率增大而增大;仪器靠近洞穴时,洞穴与地层纵向交界面处深侧向测井响应明显大于基岩电阻率值,且随着填充物电阻率增大,即基岩电阻率与填充物电阻率对比度减小,深侧向测井值迅速变小,当基岩电阻率与填充物电阻率对比度小于 10 时,交界面处深侧向测井值随填充物电阻率变化基本保持不变。

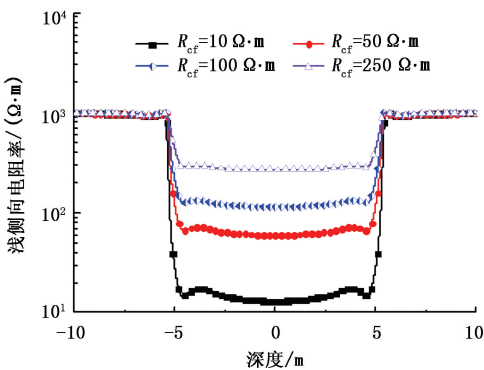


图 4 洞穴半径固定不同洞穴电阻率时双侧向测井响应

Fig. 4 Dual laterolog responses of different cave resistivity with fixed cave radius

图 5 为洞穴填充物电阻率不同时洞穴中心处双侧向测井响应,其中洞穴内填充物电阻率分别为  $20$ 、 $50$ 、 $100$ 、 $150$  和  $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 。可以看出:洞穴内填充物电阻率变化对深侧向影响较小,随填充物电阻率降低、洞穴半径增大,深侧向呈降低趋势;当洞穴半径小于  $1\ \text{m}$  时,填充物电阻率变化对浅侧向响应

影响较小;随洞穴半径的增大,浅侧向电阻率不仅受洞穴半径的影响,还受填充物电阻率的影响,且在洞穴半径为  $1\sim3\ \text{m}$  时,从各曲线的斜率来看,其受填充物电阻率的影响更严重;当洞穴半径大于  $5\ \text{m}$  时,浅侧向响应几乎不受洞穴半径的影响,基本反映填充物电阻率。

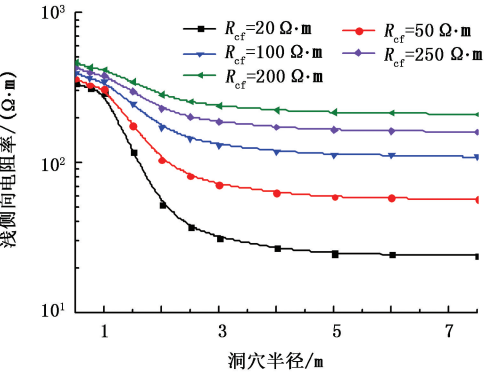
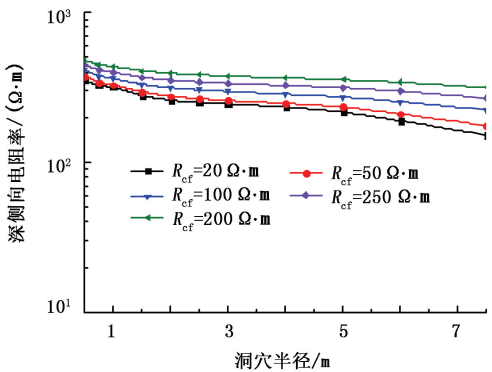


图 5 不同洞穴电阻率时洞穴中心双侧向测井响应

Fig. 5 Dual laterolog responses of different cave resistivity in cave center

2.3 不同填充程度的影响

当洞穴未被完全填充或被多层填充时,其不同填充层段双侧向测井响应存在明显差异。为研究不同洞穴填充程度条件下的双侧向测井响应,以洞穴半径为  $5\ \text{m}$ ,洞穴内双层填充为例,分别模拟了填充

程度为  $0$ 、 $20\%$ 、 $40\%$ 、 $60\%$ 、 $80\%$  和全填充时双侧向测井响应(图 6)。其中井眼直径为  $20.32\ \text{cm}$ ,井内钻井液、洞穴内填充物以及基岩电阻率分别为  $1$ 、 $50$  和  $1000\ \Omega\cdot\text{m}$ ,假定填充物自底部开始填充,未填充部分被钻井液充填。

当填充物与钻井液电阻率存在差异时,深、浅侧向在填充界面处会有明显的变化,且深、浅侧向形态均能很好地指示洞穴填充程度,受基岩的影响,深侧

向视电阻率无法反映填充物电阻率,但浅侧向可有效反映洞穴内填充部分或未填充部分电阻率。

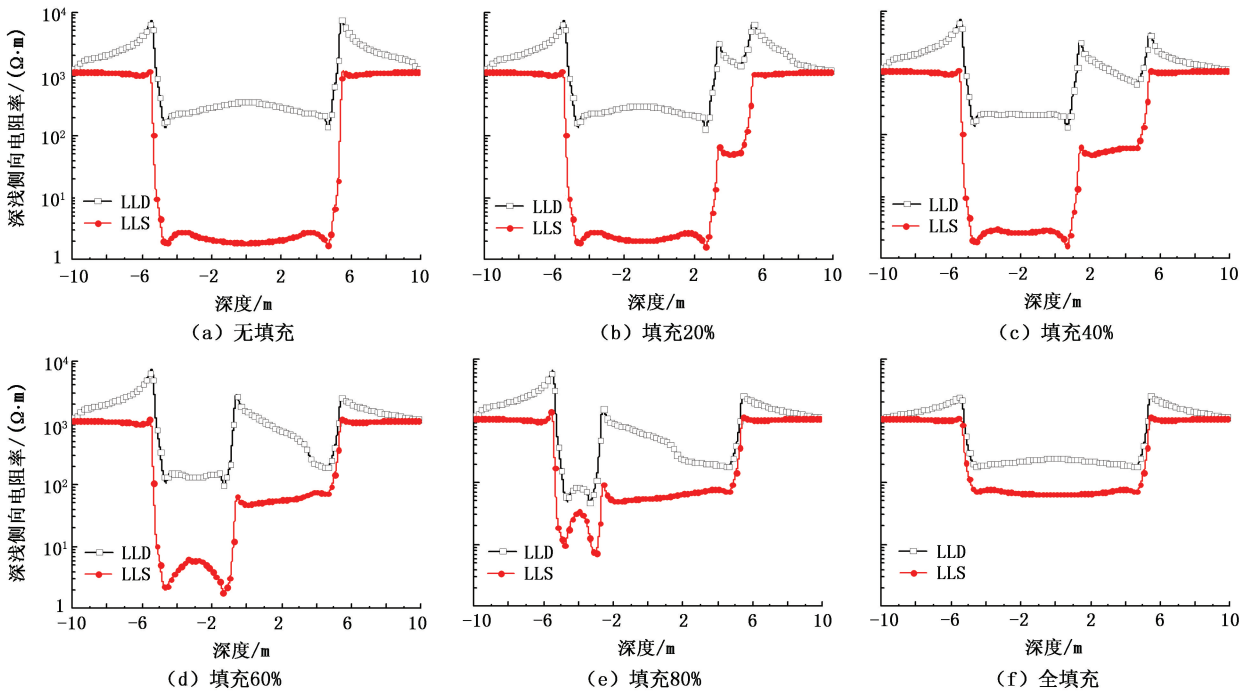


图 6 不同填充程度时双侧向测井响应

Fig. 6 Dual laterolog responses of different infill levels

2.4 洞穴形状的影响

实际地层条件下洞穴发育情况复杂,形状不规则,为研究不同洞穴发育形态的双侧向测井响应特征,建立椭球形洞穴模型(图 7),设椭球形洞穴的纵

向半径为  $r_a$ , 径向半径为  $r_b$ , 井眼直径为 20.32 cm, 钻井液电阻率为  $1 \Omega \cdot m$ , 基岩电阻率为  $1000 \Omega \cdot m$ , 洞穴被泥浆完全填充, 分别研究径向、纵向延伸的椭球形洞穴双侧向响应特征。

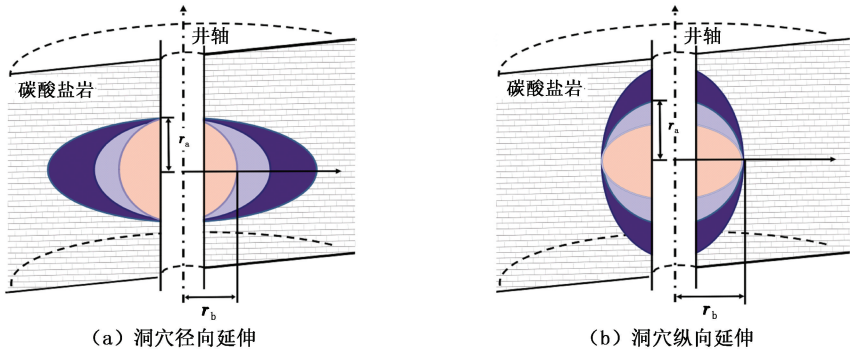


图 7 椭球形洞穴模型

Fig. 7 Ellipsoidal cave model

若椭球形洞穴纵向半径固定(图 8(a)和(b)), 随着径向半径的增加,深、浅侧向视电阻率明显下降,且深侧向下降速度明显大于浅侧向,径向半径足够大时双侧向响应特征类似于低阻薄层。若椭球形

洞穴沿纵向延伸(图 8(c)和(d)), 洞穴部分深浅侧向曲线形态受纵向半径影响严重,纵向半径大于 4 m 后,洞穴中心处深浅侧向响应基本不变,此时深浅侧向响应类似于低阻侵入带。

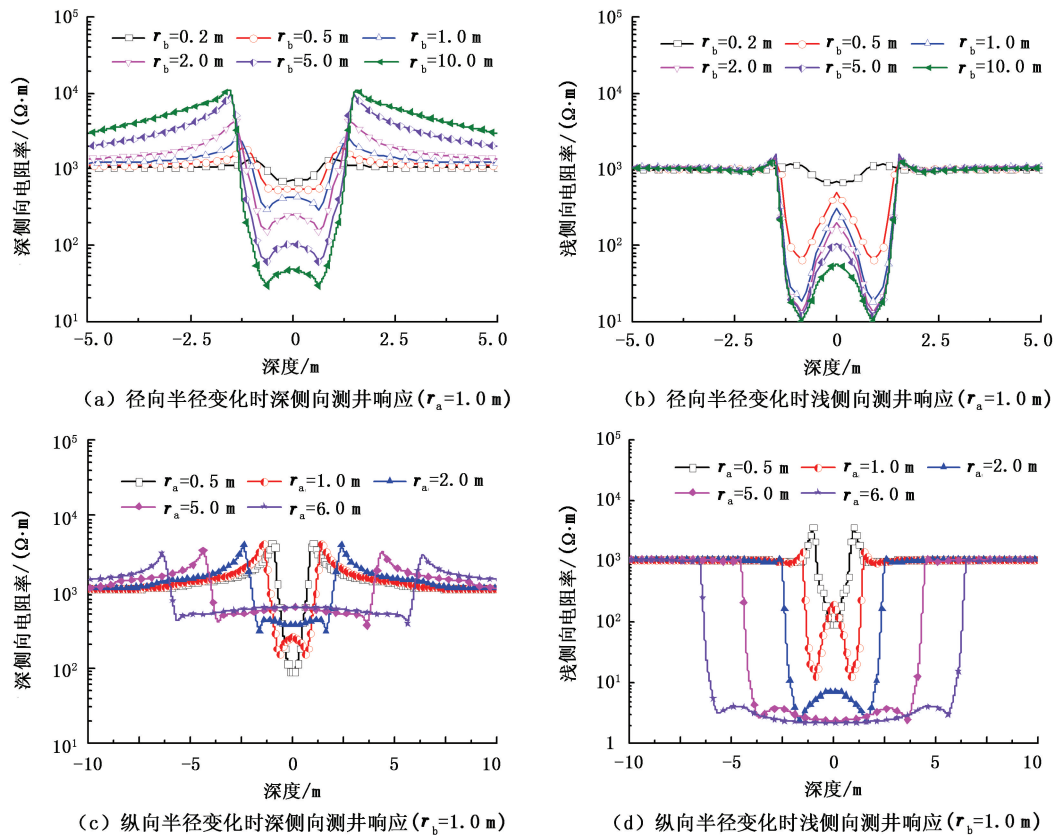


图 8 椭球形洞穴双侧向测井响应

Fig. 8 Dual laterolog responses of ellipsoidal cave

3 结 论

(1) 基于有限元法, 采用局部加密网格技术, 实现了洞穴型地层双侧向响应数值模拟, 在保证计算精度的前提下, 计算时间为结构化网格剖分方法的 10%。

(2) 当洞穴半径小于 0.5 m 时, 双侧向响应对洞穴不敏感, 当洞穴半径大于 5 m 时, 浅侧向视电阻率基本反映洞穴电阻率真实信息; 深浅侧向形态可很好地指示洞穴的填充程度, 浅侧向可有效反映填充物电阻率; 洞穴半径大于 1 m 且基岩与洞穴内填充物电阻率对比度大于 10 时, 洞穴与基岩纵向界面处, 深侧向测井响应明显大于基岩电阻率。

(3) 随椭球形洞穴长轴向径向延伸, 双侧向响应由球形洞穴过渡为类似薄层特征; 随洞穴长轴向纵向延伸, 其响应由球形洞穴过渡为类似侵入带特征。

参考文献:

[1] 景建恩, 梅忠武, 李舟波. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层的测井识别与评价方法研究[J]. 地球物理学进展,

2003, 18(2): 336-341.

JING Jianen, MEI Zhongwu, LI Zhoubo. Investigation of well logging evaluation and identification methods for carbonate reservoirs with fracture and cave in Tahe oil field [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(2): 336-341.

[2] 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.

[3] 邓少贵, 莫宣学, 卢春利, 等. 缝洞型地层缝洞的双侧向测井响应数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 706-712.

DENG Shaogui, MO Xuanxue, LU Chunli, et al. Numerical simulation of the dual laterolog response to fractures and caves in fractured-cavernous formation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 706-712.

[4] WANG H M, SHEN L C, ZHANG G J. Dual laterolog response in 3-D environments [J]. Petrophysics, 2000, 41(3): 234-241.

[5] 肖加奇, 张庚骧. 水平井和大斜度井中双侧向测井响应的正演[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1996, 20(1): 24-28.

- XIAO Jiaqi, ZHANG Gengji. Computation of dual laterolog response in highly deviated and horizontal wells with 3-D finite element method [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1996, 20(1):24-28.
- [6] SIBBIT A M, FAIVRE O. The dual laterolog response in fractured rocks [C/CD]. SPWLA 26th Annual Logging Symposium, Dallas, USA, Paper T, June, 1985.
- [7] DARREL H. Evaluation of coalbed fracture porosity from dual laterolog [C/CD]. SPWLA 32nd Annual Logging Symposium, Midland, USA, Paper U, June, 1991.
- [8] 汪涵明. 单一倾斜裂缝的双侧向测井响应[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1995, 19(6):21-24.
- WANG Hanming. The dual laterolog response of the single dipping fracture [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1995, 19(6):21-24
- [9] 邓少贵, 王晓畅, 范宜仁. 裂缝性碳酸盐岩裂缝的双侧向测井响应特征及解释方法[J]. 地球科学, 2006, 31(6):846-850.
- DENG Shaogui, WANG Xiaochang, FAN Yiren. Response of dual laterolog to fractures in fractured carbonate formation and its interpretation[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(6):846-850.
- [10] 吴文圣, 陈钢花, 雍世和. 利用双侧向测井方法判别裂缝的有效性[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2001, 25(1):87-89.
- WU Wensheng, CHEN Ganghua, YONG Shihe. Determination of effectiveness of fractures using dual laterolog [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001, 25(1):87-89.
- [11] 邓少贵, 全兆岐, 范宜仁, 等. 致密砂岩储集层裂缝的双侧向测井响应快速计算方法[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2005, 29(3):31-34.
- DENG Shaogui, TONG Zhaoqi, FAN Yiren, et al. Fast computing methods for dual laterolog response of fracture of rigid sandstone reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(3):31-34.
- [12] 张庚骥. 电法测井[M]. 北京:石油工业出版社, 1984.
- [13] 张庚骥. 电测井算法[M]. 北京:石油工业出版社, 2009.
- [14] MARK E E, EUGENE A B, SHEN L C, et al. 3-D finite element analysis of induction logging in a dipping formation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(10):2244-2252.
- [15] CHANG S K, ANDERSON B. Simulation of induction logging by the finite-element method [J]. Geophysics, 1984, 49(11):1943-1958.
- [16] CHEMALI R, GIANZERO S, SU S M. The dual laterolog in common complex situations [C/CD]. SPWLA 29th Annual Logging Symposium, San Antonio, USA, Paper N, June, 1988.
- [17] LI S J, LIU R C, NAVARRO D, et al. Joint inversion of sp and dual laterolog/dual induction data in 2D formation [C/CD]. SPWLA 48th Annual Logging Symposium, Austin, USA, Paper ZZ, June, 2007.

(编辑 修荣荣)