



基于线源的套后储层监测系统与影响规律研究

郝希宁 李中 党博 王宇 盛磊祥 李梦博

Post-Casing Reservoir Monitoring System and Influence Law Based on Line Sources

HAO Xining, LI Zhong, DANG Bo, WANG Yu, SHENG Leixiang, LI Mengbo

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2025018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海油田液压控制智能分注优化关键技术

Key Optimization Technologies of Intelligent Layered Water Injection with Hydraulic Control in Bohai Oilfield

石油钻探技术. 2022, 50(1): 76–81 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021125>

基于大地电磁监测方法的水力裂缝响应模拟

Simulation of Hydraulic Fracture Responses Based on a Magnetotelluric Monitoring Method

石油钻探技术. 2023, 51(6): 115–119 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023018>

基于储层物性时变的稠油底水油藏高含水期精细挖潜技术

A New Potential Fine Trapping Technology for High Water Cut Stage in Heavy Oil Reservoirs with Bottom Water Based on Physical Properties of the Reservoir Varying over Time

石油钻探技术. 2020, 48(4): 111–117 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020021>

深水油气开采风险评估及安全控制技术进展与发展建议

Technical Progress and Development Suggestions for Risk Assessment and Safety Control of Deep-Water Oil and Gas Exploitation

石油钻探技术. 2023, 51(4): 55–65 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023036>

渤海特高孔渗储层控水防砂一体化完井技术

Integrated Completion Technology of Water and Sand Control in Reservoirs with Extra-High Porosity and Permeability in Bohai Oilfield

石油钻探技术. 2024, 52(1): 107–113 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024015>

裂缝性致密油藏注水吞吐转不稳定水驱开发模拟

Simulation of Transformation from Water-Injection Huff and Puff to Unstable Water-Flooding in Developing Fractured Tight Reservoirs

石油钻探技术. 2022, 50(1): 89–96 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021135>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2025018

引用格式: 郝希宁, 李中, 党博, 等. 基于线源的套后储层监测系统与影响规律研究 [J]. 石油钻探技术, 2025, 53(2): 175–180.

HAO Xining, LI Zhong, DANG Bo, et al. Post-casing reservoir monitoring system and influence law based on line sources [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(2): 175–180.

基于线源的套后储层监测系统与影响规律研究

郝希宁¹, 李 中¹, 党 博², 王 宇¹, 盛磊祥¹, 李梦博¹

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 西安石油大学电子工程学院, 陕西西安 710065)

摘 要: 为实现油水界面等储层参数的实时监测和井筒生产的在线精确控制, 基于瞬变电磁理论, 建立了基于线源的套后储层监测系统。通过数值模拟, 分析了套后储层监测系统的基本特性和不同因素对线源套后储层探测性能的影响规律。模拟结果表明, 将套管作为线源可施加更大的电流, 二次场信号强度与线源电流呈正相关; 线源适宜发射长度在 300 m 左右, 套管壁厚越大, 电场响应幅值越高。研究结果表明, 基于线源的套后储层监测系统在 15 m 范围内有较好的油水界面识别能力, 可为油气井在线监控和稳油控水提供有效的技术手段。

关键词: 线源; 储层监测; 油水界面; 稳油控水; 智能控制; 瞬变电磁; 注水; 套后监测

中图分类号: TP23; TE357.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2025)02-0175-06

Post-Casing Reservoir Monitoring System and Influence Law Based on Line Sources

HAO Xining¹, LI Zhong¹, DANG Bo², WANG Yu¹, SHENG Leixiang¹, LI Mengbo¹

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100028, China; 2. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China)

Abstract: In order to achieve real-time monitoring of reservoir parameters such as oil-water interface and online precise control of wellbore production, a post-casing reservoir monitoring system based on line sources was established according to the transient electromagnetic theory. Through numerical simulation, the basic characteristics of the post-casing reservoir monitoring system and the influence law of different factors on the post-casing detection performance of the reservoirs based on line sources were analyzed. The simulation results show that using the casing as a line source can apply a greater current, and the strength of the secondary field signal is positively correlated with the line source current. The suitable emission length of the line source is around 300 m. A larger wall thickness of the casing indicates a higher amplitude of the electric field response. The results show that the post-casing reservoir monitoring system based on line sources has good oil-water interface recognition ability within a range of 15 m, which can provide effective technical means for online monitoring and stable oil and water control of oil and gas wells.

Key words: line source; reservoir monitoring; oil water interface; stable oil and water control; intelligent control; transient electromagnetic; water injection; post-casing monitoring

我国大多数油田以注水开发为主, 精细注水是油田稳油控水的主要手段^[1-3]。随着高强度注水开发的进行, 储层非均质性日臻明显, 层间、层内和平面渗透率变化大^[4-6], 注入水总沿高渗透带推进, 导致油井产量下降, 严重影响油气田的开发和经济

效益^[7-9]。因此, 需实时监测储层参数, 及时掌握储层动态变化^[10], 为调整开采策略和提高采收率提供支撑。套后地层电阻率是储层评价的重要物理量之一, 目前常用的测量方法有井间电位探测、低频电磁探测和过套管瞬变电磁探测等^[11-14]。然而, 金属

收稿日期: 2024-05-10; 改回日期: 2025-02-04。

作者简介: 郝希宁 (1983—), 男, 安徽怀宁人, 2005 年毕业于中国石油大学 (华东) 过程装备与控制工程专业, 2010 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事钻井技术及装备相关的研究工作。E-mail: haoxn@cnooc.com.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目“多气合采复杂结构井钻井技术及装备” (编号: 2021YFC2800904)、中海石油 (中国) 有限公司科技项目“海上油气井在线监控关键技术研究” (编号: 2021-YXKJ-007) 联合资助。

套管对电磁信号具有屏蔽效应,上述方法存在监测效率低、径向探测距离有限等问题^[15-17]。瞬变电磁套后储层监测系统结构简单,通过磁性线圈式接收天线能够采集微弱磁场信号,实现地层电阻率分析,受到越来越多研究人员的关注^[18-21]。但对于射孔或布置筛管的产层段,电磁感应受套管非均匀性影响,探测距离精度严重受损。考虑线源激励在远距离探测中的强激励场优势以及瞬变电磁法的微弱信号采集优势,将二者结合可实现过套管探测的强磁场激励与弱信号采集,有利于增大探测距离。

现有线源探测方法主要用于探测井底或井间的异常体^[22-23],在单井探测领域鲜少发现相关应用。为此,建立了基于线源的套后储层监测系统,并开展了模拟分析,将套管视为一段线源,在套管中设置电极形成激励,分析了套后磁场分布,优化了线源长度及电极的排布位置,以期对单井套后储层远距离探测提供理论依据。

1 基于线源的套后储层监测理论

基于线源的套后储层监测系统如图1所示(E 为电场强度, V/m; H 为磁感应强度, T)。该系统通过激励电极将电流导入套管或筛管,间隔一段距离设置回路电极,在套管上形成线电流源,通过调整激励电极和回路电极间距,改变探测距离以适应不同井况和储层。在基于线源的套后储层监测系统中,线源沿井轴方向(z 方向)布设,因此,其激励的一次电场仅存在 E_z 分量,由该交流激励产生的磁场则包括 H_x 分量和 H_y 分量,相对于线源方向为水平极化波。

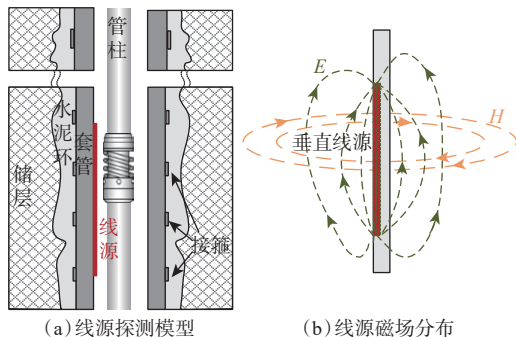


图1 基于线源的套后储层监测系统

Fig.1 Post-casing reservoir monitoring system based on line sources

套管直径远远小于套管长度,因此在利用线源发射过程中可将套管作为线电流源处理。基于线源

的套后储层监测系统通过向地下发射电磁波并接收其产生的二次场来反映地下目标的物理参数。该系统由发射线源和接收部分2个部分构成。对发射体施加交流电,使电磁波在地层中传播并产生电动势,根据电磁感应原理,电动势在接收线圈中被感应。接收元件采集到激发出的二次场,进而确定井周介质信息,有效区分套后介质的电性差异,反演出生产过程中储层动态变化或水油分布情况。

2 基于COMSOL的套后储层监测系统

2.1 线源法储层监测系统构建

线源法将套管作为线源,可以施加更大的电流,紧贴于套管内壁的双电极将金属套管作为激励,形成一段线电流源;接收阵列位于套管内,通过观测不同位置的接收电极响应,实现套后储层远距离监测。该线源结构的优点是可以进一步提高识别套后储层电阻率的准确性。与传统的电磁发射方式相比,将双电极灵活地放置在待监测井段的双电极体系,施加在套管上的电流更大,形成的磁场更有聚焦性,有利于提升探测的有效性和可靠性。对应COMSOL中的三维线源模型如图2所示。

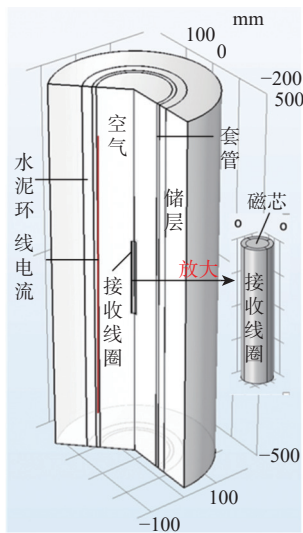


图2 COMSOL中三维线源模型

Fig.2 Three-dimensional line source model in COMSOL

在COMSOL构建的柱状模型中,初步设定了1 m长的套管作为线源,储层电导率设置为1 S/m,套管的电导率为 1.12×10^7 S/m,磁芯的电导率为1 S/m,空气的电导率为 1×10^{-7} S/m。

2.2 网格剖分

套后储层监测系统主要包含套后的多层介质模

型和双层管柱模型, 模型网格划分时遵循由内到外、由密到疏的原则, 套管作为模型最薄的区域应首先进行剖分。对于产层段双层管柱, 由外到内分别是水泥环、套管、井液和管内空气等多层介质。随后添加水层与油层, 建立油水界面三维模型。将地层作为长方体, 圆柱水层与油层相邻, 设定水层半径 20 m, 设定油层半径为 5 m、高 50 m, 与线源保持一致, 油层电导率设置为 2 mS/m, 水为 0.2 S/m, 接收探头置于管柱内部, 探头参数与以上相同。6 个面仍然设置为无限元域, 具体设置和网格划分如图 3 所示。

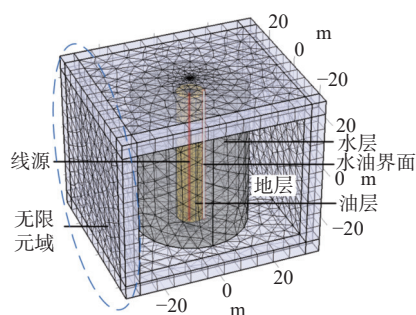


图 3 基于线源发射的油水界面剖分模型

Fig.3 Oil-water interface dissection model based on line source emission

2.3 激励源的加载与求解

在 AC/DC 模块中, 选择时域磁场, 在磁场中设置线源激励电流, 模拟电极发射电流施加在套管上, 从而形成一段线电流, 研究步骤选择瞬态, 信号为阶跃信号, 设置关断时刻为 0.5 s, 幅值为 2 A。模型外部边界条件设置为磁绝缘, 初始值磁矢势为 0。

根据以上激励设置, 首先验证均匀全空间垂直线源电磁场分布情况。设定整个全空间地层电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$, 线源供电为 2 A, 垂直线源居中放置, 线源端点分别距离上下地层边界 15 m, 求解后的三维空间的磁场分布如图 4(a) 所示, 二维横向切面磁场线的分布如图 4(b) 所示。

3 基于线源的套后储层监测影响因素分析

3.1 线源电流影响

在实际储层探测中, 对于不同的套管井, 研究不同的线源电流对探测性能的影响。设置储层电导率为 1 S/m, 线源长度 L 为 50 m, 当线源电流 I 分别

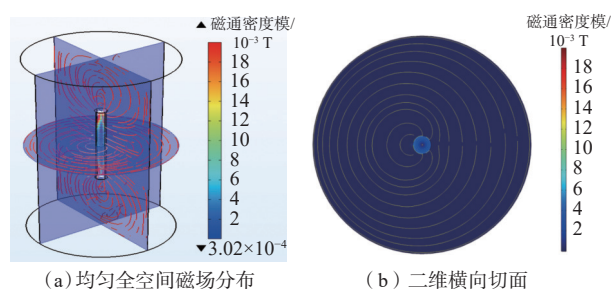


图 4 线源发射磁场分布

Fig.4 Distribution of magnetic field emitted by line sources

为 10, 20, 30, 40 和 50 A 时, 距离线源 5, 10, 15 和 20 m 处的磁场强度如图 5 所示。

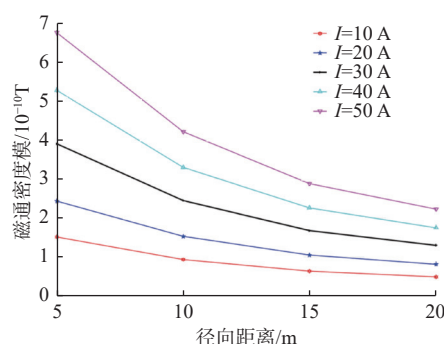


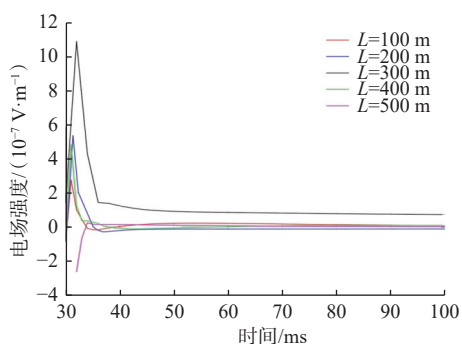
图 5 线源电流与磁场强度的对应关系

Fig.5 Correspondence between line source current and magnetic field strength

磁场强度与电流成正相关趋势, 以距离线源 5 m 为例, 当电流为 10 A 时, 磁场强度约为 1.51 nT; 当电流增至 2 倍即 20 A 时, 磁场强度大小为 2.3 nT, 磁场强度增大至 1.5 倍; 电流增加至 3 倍即 30 A 时, 约为 10 A 电流时的 2.5 倍。以此类推, 当电流为 50 A 时, 磁场强度约为 10 A 电流的 4.5 倍, 即发射电流越大, 在同一位置所接收磁场强度越高, 信噪比也就越高。

3.2 线源长度影响

线源的长度即设置的 2 个触点之间的距离。在实际测井中, 可通过下放工具任意改变发射线源的长度, 以此调整信号的传输效果, 找到最适合的测井参数。首先建立基本的线源长度变化正演模型, 固定一个发射电极的位置, 设置线源起始点, 将其坐标记为 $(x, z)=(0, 550)$, 改变每段线源的长度 L 为沿起始点下延, 依次为 100, 200, 300, 400 和 500 m, 观测线始终为每段线源的 $z=L/2$ 处。发射电流为 10 A, 计算时间范围为 0~100 ms, 步长为 1 ms, 不同线源长度时 $z=L/2$ 处电场 E_x 分量随时间变化的响应如图 6 所示。

图6 不同线源长度下对应的 E_x Fig.6 Corresponding E_x for different line source lengths

从图6可见,随着线源发射长度不断增加, E_x 分量瞬变响应的幅值呈先上升后下降的趋势,并在300 m处达到峰值;随着线源发射长度继续增大, E_x 分量最大值响应有减小的趋势, E_x 分量的大小可反映线源长度对横轴径向距离的探测能力。因此实际测井时,在兼顾成本的情况下应加大线源长度,线源长度优选值为300 m左右。

3.3 套管厚度对套后储层监测性能的影响

选取外径为139.7 mm的套管,套管的厚度分别为7.72, 9.17和10.54 mm,套管长度均为50 m,电导率为 1.12×10^7 S/m,分析套管厚度对径向探测距离的影响。不同套管厚度参数条件下接收的电场响应幅度曲线如图7所示。

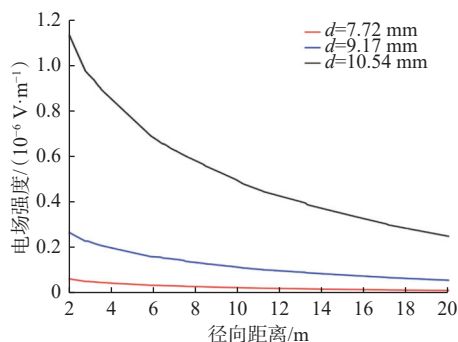


图7 套管厚度与电场强度的对应关系

Fig.7 Correspondence between casing thickness and electric field strength

保证其他条件不变,只改变套管厚度,在套管径向距离2~20 m处,每个壁厚对应不同的衰减曲线。当套管壁厚增大时,同一径向距离下对应的电场强度值升高。由于线电流施加在套管上,壁厚的增大意味着同样的电流可以激发更大的电磁场,使得二次电流在套管内的衰减速度下降,因此电场值上升;与之相反,随着套管壁厚减小,感应电场幅值

明显下降。

实际探测时,由于井下复杂环境及金属套管的存在,可能会导致探测信号局部异常,从而影响解释结果的准确性。当前研究的主要目的是验证利用金属套管构建瞬变电磁线源激励,并利用磁性接收天线进行信号采集的探测方法可行性研究。在后续的研究工作中,还需进一步优化分析,提升探测性能及解释结果的可靠性。

4 线源法套后储层油水界面监测模拟与试验

4.1 油水界面模拟分析

储层开采过程中的流体运移会导致套后储层的孔隙流体和电阻率发生变化,瞬变信号在衰减时与均匀地层衰减情况区别明显,尤其是在油气开采的产层段,开采过程中也会造成油水界面的移动,因此,有必要研究响应信号的衰减过程。

根据油水界面模型,保持水层与油层的坐标不变,只改变油层的半径,依次设置为 r 为5, 10和15 m,以此来模拟油水界面的移动。在激励关断后的同一个时间范围内观察接收到的电压信号值,油体半径变化时对应的观测电压值如图8所示。

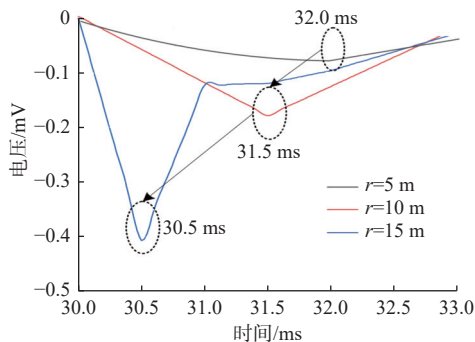


图8 油水界面移动与观测电压值的对应关系

Fig.8 Correspondence between oil-water interface movement and observed values

在激励电流关断后的同一时间范围内,油体半径增大造成界面移动, $r=5$ m时,最小接收信号的幅值出现在32.0 ms; $r=10$ m时,最小接收信号幅值出现在31.5 ms; $r=15$ m时,最小接收信号幅值出现在30.5 ms。以上研究表明,接收到的电压信号随着水油界面的移动而产生相应的偏移。

4.2 水体远近识别测试

拼接2根长度为1 m的试验套管,作为试验线

源横置于试验场地中。移动探测线源, 固定水池位置, 同步改变套管、探头与水池距离, 在此过程中, 探头始终放置在套管内部不动, 保持稳压电源输出电流不变, 以此模拟不同的油水界面、注水突进前沿和电阻率变化情况。试验过程中, 线源探头以 1 m 为单位进行移动, 线源每隔水池 n m ($n=1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20$ 和 30) 放置一个水瓶标志, 观察信号的变化。通过移动线源, 调整线源与水池间距离, 模拟实际试验环境中线源与监测层间不同距离。

分别对线源每隔水池 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 和 30 m 所测信号进行精细化处理, 并对比处理结果与传统的线圈式探测工具探测结果, 如图 9 所示。当线源或常规测试工具与水池相距较远, 20~30 m 过程中, 线源方法和常规方法的接收信号几乎无变化; 从 20 m 移动至 15 m, 再推进至 10 m 时, 线源方法的接收信号强度逐渐增强, 而常规方法接收信号仍无变化; 当线源距水池较近, 在 0~10 m 范围内时, 随距离变近, 信号幅值明显增强, 而常规测试工具距水池距离 8 m 时, 测试信号才开始出现变化。此外, 当线源与水池的距离与常规测试工具与水池距离相等时, 线源测试信号均大于常规方法测试信号, 验证了线源系统的可靠性。

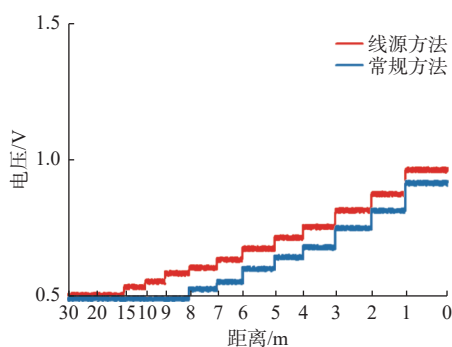


图 9 精细化处理后不同方法信号强度对比图

Fig.9 Comparison of signal strengths between different methods after fine processing

5 结 论

1) 将套管作为线源, 能够施加更大的电流激励, 产生的二次场信号强度与线源激励电流呈正相关, 套管壁厚越大, 电场响应幅值越高。

2) 地面模拟试验表明, 在距离线源 15 m 范围内, 基于线源的套后储层监测系统对水质远近识别具有较好的区分能力。

3) 后续还需进一步分析复杂环境下线源的优

化构建方式及接收天线的优化设计, 并结合适用于套管井中复杂环境的信号处理方法, 提升探测性能及解释结果的可靠性。

参 考 文 献

References

- [1] 贾德利, 刘合, 张吉群, 等. 大数据驱动下的老油田精细注水优化方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 629–636.
JIA Deli, LIU He, ZHANG Jiqun, et al. Data-driven optimization for fine water injection in a mature oil field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 629–636.
- [2] 王静, 杨彬. 精细注水在渤海某油田 J 区的应用研究[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2023, 25(2): 11–16.
WANG Jing, YANG Bin. Application of fine water injection in block J of an oilfield in bohai sea[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2023, 25(2): 11–16.
- [3] 孙福街, 徐文江, 姜维东, 等. 中国海油低渗及非常规油气藏储层改造技术进展及展望[J]. 中国海上油气, 2024, 36(1): 109–116.
SUN Fujie, XU Wenjiang, JIANG Weidong, et al. Progress and prospects of CNOOC's low permeability and unconventional oil and gas reservoir stimulation technologies[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(1): 109–116.
- [4] 吴飞鹏, 李娜, 孙德旭, 等. 脉动水驱孔隙压力传输规律数学模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(4): 94–101.
WU Feipeng, LI Na, SUN Dexu, et al. Mathematical model of pore pressure transmission law in pulsating water flooding[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2022, 46(4): 94–101.
- [5] 刘会峰, 贾婉婷, 崔龙连, 等. 考虑储层非均质性的限流筛管完井设计及应用[J]. 石油机械, 2023, 51(4): 97–104.
LIU Huifeng, JIA Wanting, CUI Longlian, et al. Design and application of limited entry liner completion considering reservoir heterogeneity[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(4): 97–104.
- [6] 邵晓岩, 杨学武, 孟令为, 等. W 油田 C₆ 低渗透油藏水驱后储层特征变化规律[J]. 特种油气藏, 2022, 29(5): 107–112.
SHAO Xiaoyan, YANG Xuewu, MENG Lingwei, et al. Change law of reservoir characteristics after water flooding of C₆ low permeability reservoir in W Oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(5): 107–112.
- [7] 石立华, 师调调, 廖志昊, 等. 低渗致密砂岩油藏水驱储层变化规律[J]. 特种油气藏, 2024, 31(3): 106–115.
SHI Lihua, SHI Diaodiao, LIAO Zhihao, et al. The variation law of water flooding reservoir in low permeability tight sandstone reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(3): 106–115.
- [8] 骆晨, 刘慧卿, 柏宗宪, 等. 低渗透油藏空气驱氧化特征及驱油效果评价[J]. 特种油气藏, 2024, 31(4): 109–117.
LUO Chen, LIU Huiqing, BAI Zongxian, et al. Oxidation characteristics and oil displacement effect evaluation of air flooding in low permeability reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(4): 109–117.
- [9] 张岩, 冯海顺, 翟勇, 等. 低渗透稠油油藏 CO₂ 压驱提高采收率机理及规律研究[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(6): 97–106.
ZHANG Yan, FENG Haishun, ZHAI Yong, et al. Mechanism and law of CO₂ pressure flooding in enhancing oil recovery in low-per-

- meability heavy oil reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(6): 97–106.
- [10] 薄其众, 戴涛, 杨勇, 等. 胜利油田樊 142 块特低渗透油藏 CO₂ 驱油储层压力动态变化研究 [J]. 石油钻探技术, 2016, 44(6): 93–98.
- BO Qizhong, DAI Tao, YANG Yong, et al. Research on the changes in formation pressure performance of CO₂ flooding in the ultra-low permeability oil reservoir: Block Fan 142 of the Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(6): 93–98.
- [11] 毕昕瑶. 双踪组合测井技术在 G45-16C 井区的应用分析 [J]. 石油管材与仪器, 2018, 4(3): 62–65.
- BI Xinyao. Application effect analysis of double tracer combination logging technology in G45-16C Well Area[J]. *Petroleum Instruments*, 2018, 4(3): 62–65.
- [12] PARDO D, MATUSZYK P J, PUZYREV V, et al. Chapter 3-Modeling of resistivity geophysical measurements[M]//PARDO D, MATUSZYK P J, PUZYREV V, et al. Modeling of resistivity and acoustic borehole logging measurements using finite element methods. Amsterdam: Elsevier, 2021: 77–113.
- [13] DAVLATSHOEV S K. Evaluation of the quality of strengthening cementation of an enclosing sandstone massif under tensile stresses[J]. *Power Technology and Engineering*, 2022, 56(1): 46–51.
- [14] FAN Jilin, ZHANG Feng, TIAN Lili, et al. A method of monitoring gas saturation in carbon dioxide injection heavy oil reservoirs by pulsed neutron logging technology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(6): 1420–1429.
- [15] 孙歧峰, 倪虹升, 岳喜洲, 等. 基于深度残差网络的随钻方位电磁波电阻率测井反演方法 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(5): 97–104.
- SUN Qifeng, NI Hongsheng, YUE Xizhou, et al. Inversion of azimuthal electromagnetic wave resistivity LWD based on deep residual network[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(5): 97–104.
- [16] 秦文娟, 康正明, 张意, 等. 模块化随钻电磁波测井仪器结构对测量信号的影响 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 137–145.
- QIN Wenjuan, KANG Zhengming, ZHANG Yi, et al. Influence of structure of modular electromagnetic logging while drilling instrument on measurement signals[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(3): 137–145.
- [17] 许孝凯, 赵伟娜, 张晋言, 等. 三轴各向异性层状介质磁偶极子源电磁场递推算法及应用 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(1): 130–139.
- XU Xiaokai, ZHAO Weina, ZHANG Jinyan, et al. Recursive algorithm for electromagnetic fields from magnetic dipole in layered triaxial anisotropic medium and its application[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(1): 130–139.
- [18] 刘鹏程, 沈建国, 沈永进. 瞬变电磁测井的过套管地层电导率探测 [J]. 石油物探, 2020, 59(4): 655–664.
- LIU Pengcheng, SHEN Jianguo, SHEN Yongjin. Measuring formation conductivity by transient electromagnetic logging through casing[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(4): 655–664.
- [19] 刘思慧, 臧德福, 张守伟, 等. 瞬变电磁法过套管电阻率测井技术综述 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(3): 1088–1094.
- LIU Sihui, ZANG Defu, ZHANG Shouwei, et al. Review of the technology of transient electromagnetic resistivity logging through casing[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(3): 1088–1094.
- [20] 党瑞荣, 刘丹, 贾惠芹, 等. 基于线源的三维地电响应模型分析与仿真 [J]. 电气应用, 2014, 33(5): 54–58.
- DANG Ruihong, LIU Dan, JIA Huiqin, et al. Analysis and simulation of three-dimensional geoelectric response model based on line source[J]. *Electrotechnical Application*, 2014, 33(5): 54–58.
- [21] 康正明, 秦浩杰, 张意, 等. 基于 LSTM 神经网络的随钻方位电磁波测井数据反演 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 116–124.
- KANG Zhengming, QIN Haojie, ZHANG Yi, et al. Data inversion of azimuthal electromagnetic wave logging while drilling based on LSTM neural network[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(2): 116–124.
- [22] 郭晨, 陈晓亮. 各向异性地层有限长线源电磁场响应研究 [J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(5): 631–638.
- GUO Chen, CHEN Xiaoliang. Electromagnetic field response of finite length line source in anisotropic formation[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 41(5): 631–638.
- [23] 李亭亭, 王佳, 朱凯光. 井地电磁法勘探深度研究 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 373–379.
- LI Tingting, WANG Jia, ZHU Kaiguang. Research on the exploration depth of the borehole-surface electromagnetic field[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(1): 373–379.

[编辑 曹耐]