

# 井筒完整性监测方法在 CCUS 中的应用探讨

张晶宇<sup>1</sup>, 刘平<sup>1</sup>, 肖波<sup>2</sup>, 李桂山<sup>1</sup>, 王建仁<sup>1</sup>, 王璇<sup>1</sup>

1. 中国石油集团测井有限公司长庆分公司 陕西西安 710200

2. 中国石油长庆油田分公司第五采油厂 陕西西安 710201

通讯作者: Email: zhangjysccj@cnpc.com.cn

项目支持: 中国石油集团测井有限公司科研项目“长庆油田 CCUS 测试技术研究及应用”(FD60122K109)。

引用: 张晶宇, 刘平, 肖波, 等. 井筒完整性监测方法在 CCUS 中的应用探讨[J]. 油气井测试, 2023, 32(6): 55-59.

Cite: ZHANG Jingyu, LIU Ping, XIAO Bo, et al. Application of well integrity monitoring in CCUS [J]. Well Testing, 2023, 32(6): 55-59.

**摘要** 实施碳捕集、利用和封存(CCUS)技术中,开展补能提效和地下埋存都需要通过井筒进行注入作业,管柱或固井水泥环失效导致 CO<sub>2</sub> 窜漏,会极大影响动态埋存率和驱油效率。从目前多种井下油套管窜漏点测井方法入手,采用氧活化、多参数、噪声测井等综合测井方式,监测注 CO<sub>2</sub> 井的可疑窜漏点,结合实际测井资料及应用效果形成一套准确、高效、可行的综合找漏测井方法。对 CO<sub>2</sub> 封存井筒完整性前期测井评价到中后期泄露监测进行了技术适应性分析,提出了静态先导评估与动态时移监测阶段下的配套方法。经 Y27 井现场应用,监测出该井 1 700 m 处为可疑漏点,通过对该点实施化学堵漏后恢复注气。该方法为油气田 CCUS 项目开展封存监测提供了思路。

**关键词** 井筒完整性;综合找漏;CO<sub>2</sub> 驱;测井评价;动态监测;CO<sub>2</sub> 封存;CCUS

中图分类号: TE357.7 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.06.009

## Application of well integrity monitoring in CCUS

ZHANG Jingyu<sup>1</sup>, LIU Ping<sup>1</sup>, XIAO Bo<sup>2</sup>, LI Guishan<sup>1</sup>, WANG Jianren<sup>1</sup>, WANG Xuan<sup>1</sup>

1. Changqing Branch, China National Logging Corporation, Xi'an, Shaanxi 710200, China

2. No. 5 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710201, China

**Abstract:** For carbon capture, utilization and storage (CCUS), both energy replenishment and underground storage require wellbore injection, during which the failure of drilling string or cement sheath may induce CO<sub>2</sub> leakage to greatly impact the dynamic storage rate and oil displacement efficiency. Based on the principles of existing downhole tubing/casing leakage logging techniques, oxygen activation, multiple parameters and noise logging were integrated to detect the suspected leakage points in wells with CO<sub>2</sub> injection. Coupling with actual logging data and application results, an accurate, efficient and feasible integrated leakage logging technique was developed. Its adaptability to the process from log evaluation in the early stage to leakage monitoring in the mid-late stage with respect to well integrity in CO<sub>2</sub> storage environment was analyzed, and then the supporting procedures in the stage of static pilot evaluation and dynamic time-lapse monitoring were proposed. Field application in Well Y27 revealed a suspected leakage point at 1 700 m, which was plugged chemically before the resumption of CO<sub>2</sub> injection. The proposed technique provides a reference for storage monitoring in field CCUS projects.

**Keywords:** well integrity; integrated leakage logging; CO<sub>2</sub> flooding; log evaluation; dynamic monitoring; CO<sub>2</sub> storage; CCUS

宋新民等<sup>[1]</sup>全面梳理中国二氧化碳捕集、驱油与埋存(CCUS-EOR)攻关探索、矿产试验、工业化应用 3 个阶段的发展历程,系统阐述近年来在 CO<sub>2</sub> 驱油机理合矿场实践等当面取得的突破性认识和相应的工程配套虎山公园成果,指出未来发展的前景。张贤<sup>[2]</sup>指出战网碳中和目标下未来发展需明细 CCUS 技术新战略定位,创新 CCUS 技术发展路

径;推动大规模 CCUS 集群示范,超前部署新一代低成本、低能耗技术研发;建立健全激励机制、政策法规与商业模式,推动 CCUS 商业化;以及加强国际合作,深化知识共享。在油气田实施的 CCUS 项目中,使用 CO<sub>2</sub> 补能压裂、构建 CO<sub>2</sub>-EOR 驱油体系还是选择地质构造进行埋存<sup>[3]</sup>,多数都通过井筒注入,井筒完整性直接影响 CO<sub>2</sub> 封存的安全性和补能、驱油



的有效性,地层条件、井身质量和  $\text{CO}_2$  的腐蚀性等均会对井筒完整性造成威胁<sup>[4]</sup>,一旦失效而产生漏、窜,都会导致  $\text{CO}_2$  通过井筒泄露甚至外逸至地表,不仅影响碳的动态埋存率,失去了碳的利用意义,还会形成灾难性的窒息区域、陡然剧增的局部温室效应、泄漏区附近土壤、地下水以及大气受到污染等一系列环境问题。因此,井筒的完整性关系着  $\text{CO}_2$  注入、利用和埋存的各个环节,对其进行完整性评价和监测预警有着重要意义。本文在分析已有的井筒完整性测井评价与监测手段基础上,结合长庆油田黄 3 区  $\text{CO}_2$  驱国家重大专项先导试验区的实践经验,对  $\text{CO}_2$  封存井筒完整性前期测井评价到中后期泄露监测进行了技术适应性分析,探讨了静态先导评估与动态时移监测阶段下的配套方法,为油气田开展 CCUS 项目提供了思路。

## 1 井筒完整性意义

井筒完整性即有效井筒屏障,目前被广泛定义的含义包括井筒的承压能力和密封良好、井口和井下工具的密封良好、作业管柱和工具在井筒内起下顺利、井筒内外流体流畅运移且可控四个方面<sup>[5-7]</sup>;狭义上,在油气水井中可以理解为管柱和水泥环的有效密封性,即不发生漏、窜。

管柱完整性失效表现为油套管因腐蚀、撞击、磨损等原因出现的渗漏现象,其主要原因一方面是井筒在通井、磨钻、酸化、压裂等作业使用的腐蚀性溶液、复杂注入介质以及井筒内高压对井筒造成的伤害;另一方面由于套管自身质量以及作业过程中受力不集中导致接箍丝扣损伤造成渗漏。水泥环封隔完整性失效表现为形成难以控制的窜流通道,导致气窜、压力异常,其主要原因一方面是前期受水泥强度、气体在水泥候凝过程中窜流、施工质量等因素影响导致固井质量不佳而产生通道,另一方面是受到后期射孔、压裂、酸性流体、异常压力等对水泥环完整性造成破坏。无论是管柱“沙眼”样微小损伤、接箍丝扣微小缝隙或是水泥环存在的微环隙在井筒流压的作用下均易导致较为严重的窜漏。

## 2 注入 $\text{CO}_2$ 介质的特性

$\text{CO}_2$  特性与常规注水、注聚合物等介质不同,主要体现在密度、温度及黏性等特性,这些特性影响测井项目的特性,因此必须根据测试目的选择合适的测井项目。 $\text{CO}_2$  在常温常压下为无色而略带刺鼻

气味和微酸味的气体,随着温度和压力的变化,当温度高于  $31.1\text{ }^\circ\text{C}$ 、压力高于  $7.38\text{ MPa}$  时,形成高密度流体,在物理特性上兼有了气体和液体的双重特性,密度是气体的几百倍,近于但低于液体,在临界温度以下,气体被不断的压缩会有液相出现,然而,超临界流体被压缩只是增加其密度,不会形成液相。超临界流体的密度和温度与压力密切相关,超临界  $\text{CO}_2$  的密度随着压力升高而增大,随着温度升高而减小,在临界点附近,密度对于压力和温度十分的敏感,很小的温压变化就会导致密度的急剧变化。

扩散系数和黏度是衡量超临界流体传质能力的重要参数,超临界流体黏度比液体小两个数量级,与气体相似,流动性远大于液体, $\text{CO}_2$  的黏度在压力比较低的时候基本保持不变,而当压力升高时,黏度随着增大,在临界点附近随着压力升高而急剧增大,之后又相对平缓,超临界  $\text{CO}_2$  流体具有比较好的传质性能,超临界  $\text{CO}_2$  的密度、黏度和扩散系数等性能可以随着温度和压力的变化而改变。在达到临界点后,流体被压缩只表现出密度的变化,不会产生相态变化,超临界  $\text{CO}_2$  在黏度、密度及扩散系数上具有超临界流体共有的特殊性质,简单来说,其兼有气体和液体双重特性,即密度接近液体,黏度与气体相似,扩散系数接近于气体,大约为液体的 100 倍,具备较好的流动性、传输性和透视性,因此相比较油水液体介质, $\text{CO}_2$  易发生“气窜”。

$\text{CO}_2$  溶解于地层水后生成的碳酸具有腐蚀性,注入地下后,在适宜的湿度及压力条件下会腐蚀埋存区域内井的水泥环及套管,发生化学反应,使水泥环抗压强度下降、渗透率增大,一旦水泥由于被腐蚀渗透性增大,大量溶解了  $\text{CO}_2$  的液体流至套管附近,使得套管附近 pH 值显著减小,形成高渗通道加速套管腐蚀速率。因此,在  $\text{CO}_2$  注入井中,井筒完整性易受到破坏,极易发生漏、窜。

## 3 井筒完整性静态先导评估方法

静态先导评估即对注入  $\text{CO}_2$  前的井筒进行套损和固井质量评价测井,由于一般是处于未加压注入的状态,不存在流体流动,因此静态找漏找窜测井方法可能对于间歇性漏失、微小漏失无法精确监测。对于管柱而言,目前常用的技术手段为多臂井径(MIT)、磁壁厚(MTT)、电磁探伤(MID-S/K)等测井技术,对于水泥环检测而言,常常采用结合常规

声幅-变密度常规测井更加全面的扇区水泥胶结测井(RBT/ SBT)、伽马—密度测井(SGDT/AMK2000)等技术手段,还有能够同时进行套损和固井质量评价的套后声波扫描成像(IBC)、套损—固井检测与储层饱和度评价综合测井技术(CCFET)等。

针对穿孔、管柱变形、丝扣脱落等明显漏失,管柱损伤检测测井技术适应性较好,常用的测井仪器性能指标见表 1,其漏点的典型曲线响应特征及井下电视对应照片见图 1。

表 1 常用多臂井径与磁成像测井仪器主要性能

Table 1 Main performance of common multi-arm diameter and magnetic imaging logging instruments

仪器名称	测量范围/mm	检测精度/mm	
MIT24	45 ~ 114	2.54(纵向)	0.076(径向)
MIT40	76 ~ 190	2.54(纵向)	0.127(径向)
MIT60	114 ~ 245	2.54(纵向)	0.178(径向)
MTT	50.8 ~ 177.8	小于壁厚的 15%	
MID-K	62 ~ 324	0.5 mm(内层管柱)/1.5 mm(外层管柱)	

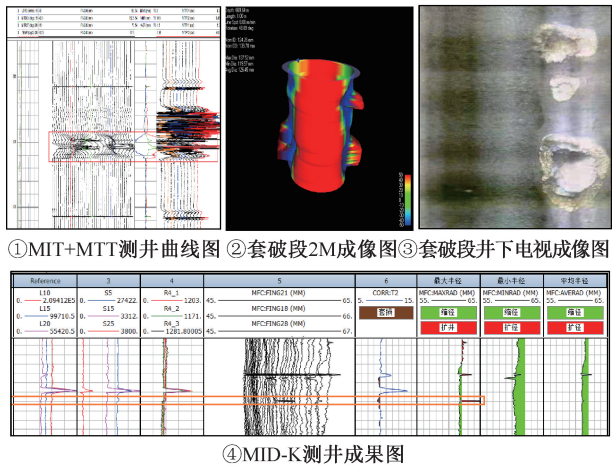


图 1 MIT、MTT、井下电视、MID-K 对于套破点的典型响应特征

Fig. 1 Typical response characteristics of MIT, MTT, underground television, MID-K to casing breaking points

由于 CO<sub>2</sub> 的扩散系数较高,具备较好的流动性,同样面临易气窜的情况,对固井质量测井检测能力要求更高,目前随着水泥胶结评价测井从单一的声幅—变密度测井朝向扇区成像(RBT/ SBT)、水泥密度、填充率与套管壁厚等综合一体化测井技术发展,以 AMK2000/SGDT 为代表的声波+放射性固井质量测井仪可对水泥填充密度、窜槽、微环空、套管壁厚、管外扶正器等进行全面评价,见图 2;以 IBC 为代表的声波类固井质量测井仪能够分辨窜槽、受污染的水泥、微环隙、径向或方位信息,同时对于低密度水泥和偏心测量的适应性进一步提高,见图 3。

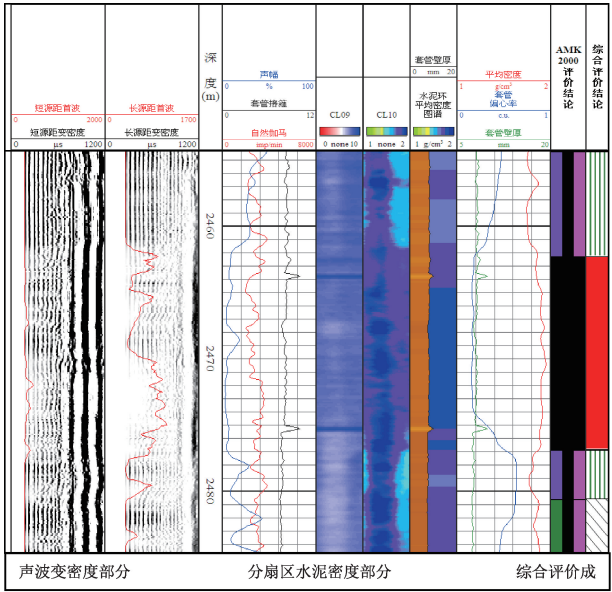


图 2 AMK2000 测井曲线成果图

Fig. 2 AMK2000 logging curve results chart

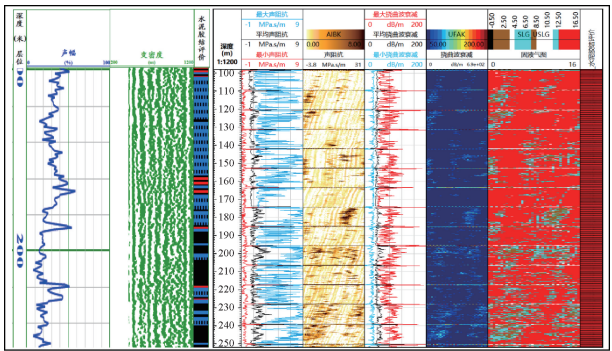


图 3 IBC 套后声波扫描成像固井质量测井评价成果图

Fig. 3 Evaluation results of cementing quality logging with IBC post casing acoustic scanning imaging

## 4 井筒完整性动态时移监测方法

动态时移监测存在两方面的概念,一方面是发生窜、漏之后进行动态找漏,另一方面是进行监测预警,更具时效性。动态找漏测井目前主要是通过下入井温、流量、噪声、脉冲中子氧活化测井仪器,在有流体流动过程中进行测量,出现异常响应变化点经过解析可确定为漏点,其对于微漏失具有一定的判别能力<sup>[8-9]</sup>,噪声及超声波找漏测井被证实可以检测到低至 0.02 L/min 的泄漏率的漏失<sup>[10]</sup>,但对井筒工程作业条件较高,同时需要通过多次点测和连续测量进行确定,相对比较静态找漏找窜测井测量精度明显提升,但对于偶发性、间歇性、一井多处漏失可能出现捕捉不到的情况。图 4 为某井动态综合找漏测井响应解释成果图。



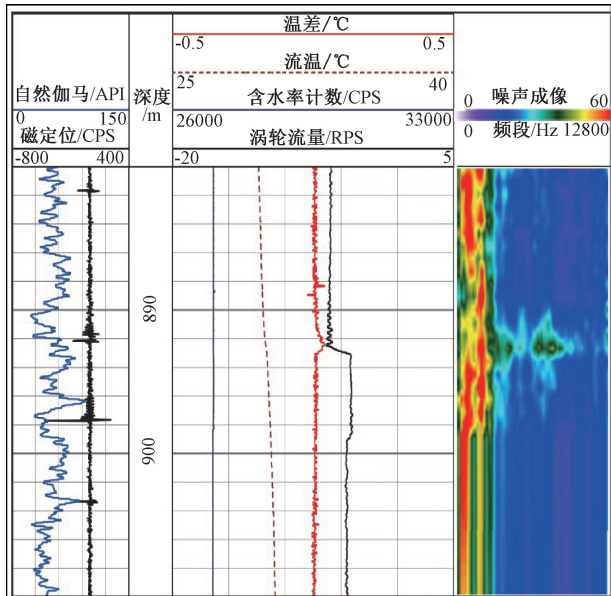


图 4 某井动态找漏测井响应解释成果图

Fig. 4 Interpretation results of dynamic leak detection logging response in a well

分布式光纤传感技术作为新兴地球物理测井方法,已经广泛应用于油气田动态监测中,尤其是漏、窜监测方面<sup>[11]</sup>。以基于拉曼散射的分布式光纤温度传感(DTS)测井技术和基于瑞利散射的分布式光纤振动传感(DAS)测井技术为例,在套管找漏测井时,通过测取套管泵注流体状态下和停注恢复的全井段分布式光纤井温(DTS)或分布式光纤振动(DAS)数据,基于井筒轴向和径向热力学变化原理解析井下温度场的变化,井温显示异常或异常恢复速度点可以判断为井下漏点,或者基于井下振动事件信号的振幅、频率和能谱进行解调,振动信号显示异常点可以判断为井下漏点。图 5 为利用 DTS 和 DAS 进行找漏测井的成果示意图。

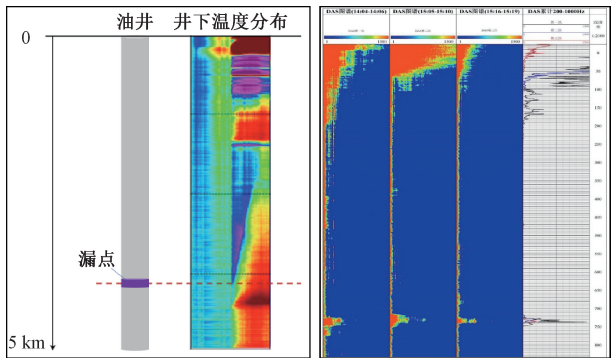


图 5 DTS 找漏和 DAS 找漏成果示意图

Fig. 5 Schematic diagram of DTS leak detection and DAS leak detection results

光纤传感测井具备多种实施工艺,除上述可回收光纤测井工艺外,可实现预警和实时监测功能的

工艺为套管或油管外永置式光纤,其通过套管或油管外束缚光纤的施工工艺下入井中,通过 DAS 采集系统结合数据实时处理分析系统解析时域、频域信号异常可实现全天候、全尺度、连续性时移动监测,可以做到真正意义上的预警监测<sup>[12]</sup>。光纤智能监测预警系统由采集系统、传输系统和分析系统组成,可实现远程智能监测预警。同时,光纤监测系统可借助物联网建设,结合涡度微气象监测、遥感遥测成像、红外光谱监测等地面监测预警技术,打造地面+地下一体化智能监测预警系统,助力埋存及监测技术逐步向产业化、效益化迈进。

### 5 现场应用

Y27 井由注水井转注 CO<sub>2</sub>, 目前 CO<sub>2</sub> 累计注 10 136 t,但是 2020 年 10 月压力由 14.2 MPa 降至 7.4 MPa。当前注入压力 6.8 MPa,怀疑井下存在漏失。该井油压主压力系统发生明显变化,且前期 CO<sub>2</sub> 已经注入 10 136 t,注入压力的减少说明该井非注入低压力层位套破,导致注入压力下降。根据动态显示情况,计划采用中子氧活化,井温+噪声测井方式,检测该井可疑漏点,为 Y27 井下一步采取措施提供数据可靠依据。

通过对测井资料分析得出(见图 6),Y27 井测试 MIT+MTT 全井段无明显穿孔,井温显示在 1 700 m 存在负异常,加测噪声后可以明显看到该点存在异常高频信号;后改注水加大注入量,测量氧活化后发现,水流从环空上返后在 1 700 m 处消失。通过综合分析泄漏的可能途径是油管腐蚀穿孔后,注入的高压气体从油管穿孔处进入环空,由环空进入套管破损处低压力层位。最后通过对该位置实施化学堵漏后恢复注气。

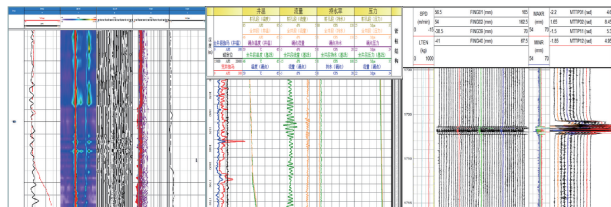


图 6 Y27 井注 CO<sub>2</sub> 井找漏成果图

Fig. 6 Comprehensive leak finding results of CO<sub>2</sub> injection well Y27

### 6 结论

(1)对于开展 CO<sub>2</sub> 注入前可进行井筒完整性静态先导评估,使用多臂井径(MIT)、磁壁厚(MTT)、





电磁探伤(MID-S/K)等测井技术对管柱损伤评价,使用扇区水泥胶结测井(RBT/SBT)、伽马-密度测井(SGDT/AMK2000)等技术手段对水泥环进行封固检测或使用IBC、CCFET一体化测井评价技术综合分析。

(2)当进入CO<sub>2</sub>持续注入阶段,需要开展动态时移监测,对于产生漏窜的井可使用井温、流量、噪声、脉冲中子氧活化等动态找漏测井手段进行找漏。

(3)无论是静态找漏还是动态找漏均存在时效性的问题,而永置式分布式光纤测井手段可通过实时采集、远程传输、智能分析进行全天候、全尺度、连续性监测和预警,与地面监测系统协同可助力埋存及监测技术逐步向产业化、效益化迈进。

**致谢:**感谢中国石油测井有限公司第三项目部和解释评价中心成像室的相关同事们的大力支持。

# 参考文献

- [1] 宋新民,王峰,马德胜,等. 中国石油二氧化碳捕集、驱油与埋存技术进展及展望[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1):206-218.  
SONG Xinmin, WANG Feng, MA Desheng, et al. Progress and prospect of carbon dioxide capture, utilization and storage in CNPC oilfields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1):206-218.
- [2] 张贤,李凯,马乔,等. 碳中和目标下CCUS技术发展定位与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 29-33.  
ZHANG Xian, LI Kai, MA Qiao, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 29-33.
- [3] 胡永乐,郝明强,陈国利,等. 中国CO<sub>2</sub>驱油与埋存技术及实践[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 716-727.  
HU Yongle,HAO Mingqiang,CHEN Guoli,et al. Technologies and practice of CO<sub>2</sub> flooding and sequestration in China, [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4):716-727.
- [4] 张昆,孙悦,王池嘉,等. 碳捕集、利用与封存中CO<sub>2</sub>腐蚀与防护研究[J]. 表面技术,2022,51(9):43-52.  
ZHANG Kun, SUN Yue, WANG Chijia, et al. Research on CO<sub>2</sub> corrosion and protection in carbon capture, utilization and storage [J]. Surface Technology, 2022, 51(9):43-52.
- [5] 陈绪龙,牛步能,杜旭,等. 井筒管柱完整性测井评价技术的应用优化[J]. 测井技术, 2022. 46(4):487-492.

- CHEN Xulong, NIU Buneng, DU Xu, et al. Application optimization of wellbore string integrity log evaluation technology [J]. Well Logging Technology, 2022, 46(4): 487-492.
- [6] 吴志良. 复杂断块油田CO<sub>2</sub>驱油动态监测技术应用与分析[J]. 石油实验地质, 2009, 31(5): 542-546.  
WU Zhiliang. Application and analysis of dynamic monitoring technology of CO<sub>2</sub> flooding in complex block oil field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(5): 542-546.
- [7] 杨永杰,牛步能,傅强,等. 套管微小漏失综合测漏方法及其现场应用[J]. 测井技术, 2014, 38(4): 485-490.  
YANG Yongjie, NIU Buneng, FU Qiang, et al. Comprehensive detectable method of mini-leakage in casing and its application[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(4): 485-490.
- [8] 张金海,李震,刘平,等. 长期关停套损出水井的找漏技术及应用[J]. 测井技术, 2022, 46(2):223-228.  
ZHANG Jinhai, LI Zhen, LIU Ping, et al. Application and technology of leakage detection in long shutdown casing damage outlet well[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(2):223-228.
- [9] HILL A D. Production logging: theoretical and interpretive elements[M]. Austin: SPE Publishing, 2021:74-81.
- [10] 孙锐艳,马晓红,王世刚. 吉林油田CO<sub>2</sub>驱地面工程技术[J]. 石油规划设计, 2013, 24(2): 1-6.  
SUN Ruiyan, MA Xiaohong, WANG Shigang. Ground engineering technology of CO<sub>2</sub> flooding in Jilin oilfield[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2013, 24(2): 1-6.
- [11] 张晶宇,王光宇,王钊,等. 井筒完整性检测与评价技术在致密储层的应用[J]. 石化技术, 2021, 28(9): 133-134.  
ZHANG Jingyu, WANG Guangyu, WANG Zhao, et al. Application of wellbore integrity detection and evaluation technology in tight reservoir [J]. Petrochemical Industry Technology, 2021, 28(9): 133-134.
- [12] 郝敏,宋永臣. 利用CO<sub>2</sub>提高石油采收率技术研究现状[J]. 钻采工艺, 2010, 33(4):59-63.  
HAO Min, SONG Yongchen, Research status of CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery technology[J]. Drilling Production Technology, 2010, 33(4): 59-63.

编辑 方志慧

**第一作者简介:**张晶宇,男,1984年出生,硕士,工程师,2012年毕业于西南石油大学石油与天然气工程,现主要从事生产测井技术研究与管理工作。电话:029-86503188,15594988833;Email:zhangjingyu. cnle@ cnpc. com. cn。通信地址:陕西省西安泾河工业园方元大厦,邮政编码:710200。