

页岩气录井技术进展及展望

吴 尤

(中石化经纬有限公司华北测控公司,河南 郑州 453700)

摘要:经过十几年技术攻关,国内页岩气录井技术发展与应用水平不断提高。本文基于地质工程一体化的评价需求,总结了具有特色的页岩气录井技术系列:岩石热解录井和自然伽马能谱录井结合的烃源岩特性评价技术;元素录井和自然伽马能谱录井结合的页岩岩性、脆性评价技术;气测录井和碳同位素录井结合的含气性评价技术;核磁录井为主的页岩物性评价技术。同时,还对页岩气录井技术发展进行了展望,认为现今页岩气录井技术面临水平井目标靶体复杂化、深层页岩气地层温度高、常压页岩气地层压力低的技术难题,需要不断提升录井仪器分辨率,加强多维核磁录井技术等录井新技术创新;为实现页岩气层的立体刻画和精确评价,需要利用大数据资源开发智能化录井工程技术系列,为页岩气高效优质勘探开发提供全面技术支撑。

关键词:页岩气;录井技术;元素录井;地质工程一体化;进展及展望

中图分类号:P634;TE27 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)05-0171-06

Progress and prospect of shale gas mud-logging technologies

WU You

(Huabei Geosteering & Logging Company of Sinopec Matrix Corporation, Zhengzhou Henan 453700, China)

Abstract: The development and application of shale gas mud logging technology has enhanced constantly with technology research for more than ten years. Based on the evaluation demand of geological engineering integration technology, the paper has summarized a characteristic series of shale gas logging technology, namely, hydrocarbon source rock property evaluation by combination of the rock pyrolysis mud logging method and the natural gamma ray spectrometry mud logging method, shale lithology and brittleness evaluation by combination of element mud logging and natural gamma ray spectrometry mud logging, shale gas-bearing evaluation by combination of gas mud logging and carbon isotope mud logging, and shale physical property evaluation mainly by nuclear magnetic mud logging. Meanwhile, the paper predicts the development of shale gas mud logging technology. Nowadays, it faces the technical problems of complex horizontal shale gas well exploration targets, higher temperature of deep shale gas formation and lower pressure of normal pressure shale gas formation; thus, it is necessary to constantly improve the resolution of logging instruments, to strengthen innovation of multi-dimensional nuclear magnetic mud logging methods and other new technologies. In order to realize the three-dimensional portrayal and precise evaluation of shale gas formation, the big data resources should be used to develop intelligent mud logging technology so as to provide comprehensive technical support for efficient and high-quality shale gas exploration and development.

Key words: shale gas; mud logging technology; element mud logging; geological engineering integration; progress and prospect

页岩气主要以游离态和吸附态赋存于页岩的微纳米孔隙中,需要通过压裂排采等人工改造才能采出的非常规油气藏,通过国内外页岩气勘探开发

的实践认识,页岩气藏具有初期高产但产量递减快、后期低产且稳产时间长的特点^[1-5]。近十几年,国内经过四川盆地及周缘、黔北正安、鄂西恩施等

收稿日期:2022-05-23; **修回日期:**2022-07-26 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2022.05.023

作者简介:吴尤,男,汉族,1973年生,工程师,石油地质专业,长期从事录井技术应用及研究工作,河南省郑州市中原区须水街道须贾路04号, wuyou-886@163.com。

引用格式:吴尤.页岩气录井技术进展及展望[J].钻探工程,2022,49(5):171-176.

WU You. Progress and prospect of shale gas mud-logging technologies[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):171-176.

地区页岩气勘探开发技术攻关,针对下古生界奥陶系五峰组—志留系龙马溪组、吴家坪组等富有机质页岩层系,形成了多种页岩气录井技术方法,在页岩气层识别与评价方面发挥了重要作用^[6-14]。

页岩气录井技术的发展可为页岩气层有效划分、孔隙结构精细刻画和含气性定量评价提供更为有效的技术方法,为页岩气水平井地质导向提供支撑,提高水平井优质页岩钻遇率,提供页岩气层压裂改造选层选段方案,促进页岩气水平井增储上产,有效提升页岩气勘探开发效益。

表1 页岩气录井技术

Table 1 Mud logging technology for shale gas

页岩气层性质	录井技术	技术特点
烃源岩特性	岩石热解录井+自然伽马能谱录井	针对岩心和细碎岩屑样品,及时性好
岩性+脆性	元素录井+自然伽马能谱录井	可随钻识别,提高钻遇率
物性	核磁录井+RoqSCAN录井	定量识别微观孔缝
含气性	气测录井+碳同位素录井	直观含气特征分析与油源性质识别

1.1 烃源岩特性录井技术

页岩烃源岩特性主要是通过页岩总有机碳含量(TOC)表征,TOC是评价页岩有机质丰度及划分烃源岩品质的重要依据。通过岩石热解录井可以直接获得页岩的TOC,页岩样品在热解仪内进行程序升温,页岩中的有机质在不同温度下产生裂解,部分有机质裂解成烃类成分,由氢焰离子化检测器检测出各烃类组分含量,热解后的样品继续放入氧化炉升温加热,样品中残余的有机碳氧化为CO₂和少量CO,由热导检测器检测其含量,综合得到页岩样品中TOC^[10]。

岩石热解录井是获得TOC最直接有效的手段,当页岩气井钻探过程中使用PDC钻头时,造成岩屑细小粉碎等情况,导致岩石热解样品难以选取时,利用自然伽马能谱录井计算TOC成为一种有效方法。自然伽马能谱录井是利用探测器测量页岩样品的铀、钍、钾元素伽马射线的混合谱,运用能谱分析的方法,根据铀、钍、钾的自然伽马能谱特征进行解谱,从而确定页岩样品中铀、钍、钾各自含量的录井技术。当富有机质页岩中TOC增高时,页岩岩石颗粒对铀离子的吸附力也会增强,测量得到的铀含量会明显增高。通常利用U元素与TOC的正相关关系[式(1)],采用拟合回归法计算页岩气层的总有机碳

1 页岩气录井技术进展

通过对诸多应用实例的总结分析,利用气相色谱录井、岩石热解录井等常规录井方法和元素录井、核磁录井、自然伽马能谱录井、碳同位素录井等特殊录井方法,基于地质工程一体化评价原则,以页岩气甜点预测技术方法为指导,注重表征参数的全面性和有效性,总结了富有机质页岩的烃源岩特性、岩性、物性、含气性和脆性的“五性”特征评价的录井技术方法(表1)。

含量^[6]。相比岩石热解法,这种TOC参数计算方法更简便快捷。

$$TOC = aU + b \quad (1)$$

式中:TOC——总有机碳含量;U——页岩铀元素含量,μg/g;a、b——地区经验系数,以岩心实验分析获取。

1.2 页岩岩性和脆性录井技术

页岩岩性通过页岩中各类矿物的含量来表征,利用元素录井可以获得页岩的矿物含量。常用的元素录井仪器是XRF元素分析仪,可以检测页岩岩屑、岩心样品中的Na、Mg、Al、Si等33种元素^[7]。较为先进的元素录井仪器是RoqSCAN仪器,这种仪器配备有扫描电镜与X射线检测器,不仅可以测得页岩的元素成分,而且还可以获得页岩的显微图像^[12]。通过元素录井测量得到的页岩中各元素含量,运用氧化闭合物模型等方法计算得到页岩的矿物成分,可以识别岩性和划分页岩层段;同时根据矿物成分可以测算脆性物质含量,定量评价页岩的脆性和可压性。

自然伽马能谱录井测得的页岩中铀含量对优质页岩有重要的指示作用,与元素录井测量资料结合使用可以有效识别优质页岩层段,进行页岩层地质甜点和工程甜点的优选。川南某井奥陶系五峰组—

志留系龙马溪组元素录井和自然伽马能谱录井结果可以看出(图1),五峰组和龙马溪组一段底页岩层段自然伽马能谱录井呈现高U值,元素录井的硅值较高,明确指示页岩高有机碳含量和较好的脆性特征。体现出元素录井和自然伽马能谱录井组合应用在预测页岩地质甜点和工程甜点方面的优势。

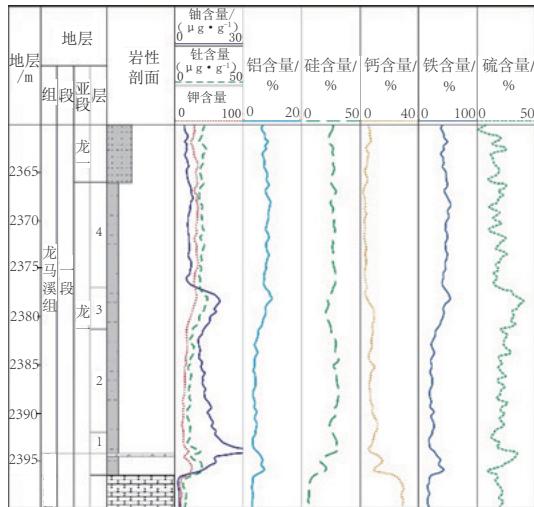


图1 四川盆地X井岩性录井图^[13]

Fig.1 Lithological mud logging plot Well X in Sichuan Basin

1.3 页岩物性录井技术

页岩的物性是指页岩的孔渗特征,目前用于页岩物性分析的录井方法主要是核磁共振录井方法。核磁共振录井是测量页岩孔隙中流体的氢核在外加磁场作用后,再通过脉冲作用产生弛豫过程的弛豫时间,现有核磁共振录井仪器测量的是氢核的横向弛豫时间 T_2 ,通过对 T_2 谱的定量分析进行页岩孔隙结构的定量评价。目前应用的纳米孔隙核磁共振分析仪检测的最小页岩孔径是 2 nm,分析岩屑样品的粒径要超过 2 mm,否则检测误差较大^[13]。

RoqSCAN 元素录井仪器由于配备有高倍电子扫描显微镜,可以通过观察制备样品的孔隙形态对页岩的孔隙特征进行分析。在四川盆地某井 RoqSCAN 扫描图像可以看出页岩孔隙的形状、含量和分布方式等信息^[12](图2)。

1.4 页岩含气性录井技术

页岩的含气性是指页岩层内所含气体的成分和含量,主要包括游离气和吸附气成分及含量。气测录井技术是通过检测钻井液从井下携带烃类气体进

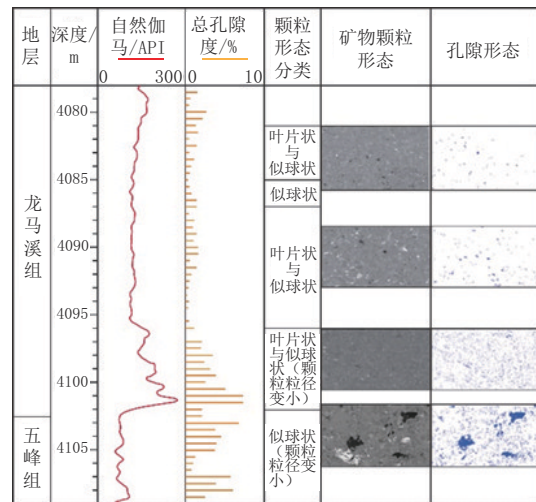


图2 四川盆地X井RoqSCAN录井图^[12]

Fig.2 RoqSCAN mud logging plot of Well X in Sichuan Basin

行油气层识别的一种方法。钻探过程中,钻头破岩后,地层内的页岩气会侵入井筒随钻井液循环到地面,经过钻井液脱气器搅拌后将气体连续脱出,由气路管线输送至气体检测分析仪连续测定气体组分和含量,检测得到的主要是页岩中的游离气含量。实际应用过程中,对比分析发现钻井相应深度点上气测录井获取的页岩气含量与页岩气岩心解析仪分析得到的解析气量相关性较强,通过选取页岩气层多点气测录井数据和解析气数据进行拟合分析,可以建立基于气测全烃值的页岩游离气含量估算公式^[8],既用于页岩含气量的定性评价和定量估算,又可以节省用于解析实验所需的钻探取心费用。

近年来应用的另一种判断页岩含气性的录井方法是碳同位素录井技术,其原理是利用快速色谱分离由泥浆气和钻屑罐装气获取的页岩气烃类气体组分,然后在氧化池使其燃烧为二氧化碳,通过中红外激光光谱测量腔室,利用 $^{12}\text{C}-\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}-\text{O}$ 碳同位素的分子键对激光不同的吸收特征,实现对碳同位素的测量。通过在鄂西和川东南地区的应用效果看(图3),根据甲烷和乙烷碳同位素反转特征可以分析页岩气的热演化阶段,进而判断优质页岩含气性^[9,14-15]。

2 页岩气录井技术面临的挑战

2.1 优快钻井技术需要

为适应页岩气勘探开发降本增效的需求,目前

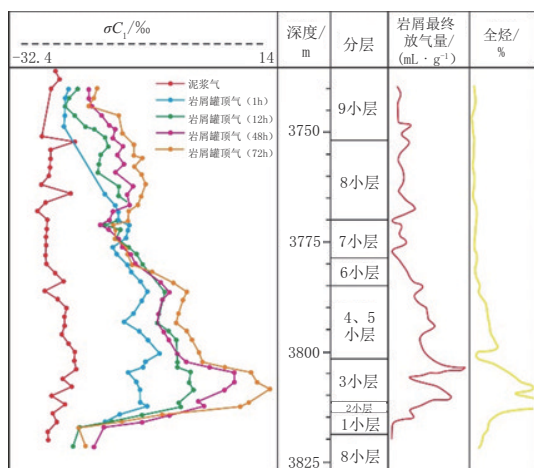


图3 四川盆地X井碳同位素录井图^[9]

Fig.3 Carbon isotope mud logging plot of Well X in Sichuan Basin

应用的旋转导向与地质导向相结合的技术增加了钻井速度,而且页岩水平井的水平段越来越长,对钻探靶体的精度要求越来越高。钻井液成分越来越复杂^[16-20],致使井下岩屑样品更加破碎,甚至呈粉末状,而且带有多种钻井液添加剂,严重影响了录井分析样品挑选的代表性和分析的准确性,给水平井地质导向和钻探靶体优化带来极大挑战。

2.2 勘探对象的复杂性

随着页岩气勘探开发程度越来越高,面对的勘探对象日趋复杂,海相深层页岩气地层温度高、复杂构造区常压页岩气地层能量不足、陆相及海陆过渡相页岩气储层非均质性强等勘探难题^[21-23],使优质页岩甜点预测难度越来越大,急需创新水平井钻探箱体优选录井技术。

2.3 页岩气层精细开发需求

基于页岩气层立体开发和差异化压裂等开发技术需要,亟需地质工程一体化技术共同打造“透明”页岩气藏,特别是对加密井的水平井穿行轨迹准确把控,可有效降低施工难度、提高页岩气层改造缝网的效果^[24-26]。因此,需要进行井筒全方位立体化刻画录井技术攻关。

3 页岩气录井技术发展对策及展望

3.1 持续提升录井仪器性能

为解决优快钻井条件下岩屑样品代表性差、水平段井筒条件复杂等问题,录井仪器的研发应基于高分辨率、多维度攻关方向,持续提升元素录井仪器

的分辨率和精确度,升级高分辨率核磁共振录井仪器性能,加大研发和应用定量脱气器、多维核磁共振分析仪等新型设备,提升激光录井、岩屑声波录井等录井新技术的应用水平,提升分析效率,缩短分析周期,实现页岩气层快速化精细化评价。

3.2 加强地质工程一体化录井技术攻关

基于页岩气勘探开发降本增效的需求,录井技术的发展应在地质甜点评价和工程甜点评价2个方面加强方法研究,立足钻探现场,发挥“快速、直接”的优势,在实现页岩元素快速检测、孔隙结构立体刻画和气体实时分析的同时,加强岩石力学等工程甜点参数分析能力,与岩心测试、测井等技术方法相结合,创新页岩气地质工程一体化录井预测和评价水平,提高水平井优质页岩箱体钻遇率,提升页岩气层改造效果。

3.3 提升录井大数据应用水平

基于录井大数据资源,以物联网、人工智能技术为驱动,立足页岩气井长水平段、复杂目标靶体等生产需求,建立多因素耦合分析模型,致力开发录井参数智能分析与数据综合应用平台,进行页岩气井井筒含气特征和稳定性能风险智能诊断、随钻智能地层评价与导向系统优化,形成自动化智能化录井工程技术系列,实现页岩气勘探开发全过程录井技术的最优化。

4 结论

(1)“十三五”期间,页岩气录井技术快速发展,形成了以岩石热解录井和自然伽马能谱录井为主的烃源岩特性评价技术,以元素录井和自然伽马能谱录井为主的页岩岩性、脆性评价技术,以气测录井、碳同位素录井为主的含气性评价技术,以核磁录井为主的页岩物性评价技术,有力支撑了我国页岩气高效勘探和效益开发。

(2)“十四五”及今后,页岩气仍会是国内天然气增储上产的重点领域,而且页岩气的勘探开发对象日趋复杂,建议立足精细化和立体化技术需求,不断提升录井仪器性能,加强地质工程一体化录井评价技术攻关,提升录井大数据应用水平,逐步形成自动化智能化录井工程技术系列,持续为页岩气精细化勘探开发提供技术支撑,推动页岩气藏勘探开发高效优质运行。

参考文献(References):

- [1] 郭旭升. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.
GUO Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in Southern China—Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [2] 赵文智, 李建忠, 杨涛, 等. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 499-510.
ZHAO Wenzhi, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 499-510.
- [3] 赵全民, 张金成, 刘劲歌. 中国页岩气革命现状与发展建议[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(8): 1-9.
ZHAO Quanmin, ZHANG Jincheng, LIU Jing. Status of Chinese shale gas revolution and development proposal[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(8): 1-9.
- [4] 卢志远, 何治亮, 余川, 等. 复杂构造区页岩气富集特征——以四川盆地东南部丁山地区下古生界五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 86-97.
LU Zhiyuan, HE Zhiliang, YU Chuan, et al. Characteristics of shale gas enrichment in tectonically complex regions—A case study of the Wufeng-Longmaxi Formations of Lower Paleozoic in southeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 86-97.
- [5] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [6] 庞江平, 杨扬, 谢伟, 等. 自然伽马能谱录井技术在页岩气开发中的应用[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 54-59.
PANG Jiangping, YANG Yang, XIE Wei, et al. Application of natural gamma-ray spectral logging in shale gas development [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 54-59.
- [7] 尹平, 漆麟, 朱茜霞, 等. 元素录井在川渝地区关键层位岩性识别中的应用[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 31-38.
YIN Ping, QI Lin, ZHU Qianxia, et al. Application of element logging to lithologic identification of key horizons in Sichuan-Chongqing gas provinces [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9): 31-38.
- [8] 郭琼, 蔡君, 宋庆彬, 等. 基于气测录井的页岩气地层含气量计算方法[J]. 录井工程, 2020, 31(2): 16-20.
GUO Qiong, CAI Jun, SONG Qingbin, et al. Gas logging calculation method for gas content of shale gas formation[J]. Mud Logging Engineering, 2020, 31(2): 16-20.
- [9] 牛强, 张焕旭, 朱地, 等. 川东南五峰组—龙马溪组页岩气录井碳同位素特征及其地质意义[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(9): 1294-1305.
NIU Qiang, ZHANG Huanxu, ZHU Di, et al. Mud gas isotopic logging of Wufeng-Longmaxi shale in Southeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(9): 1294-1305.
- [10] 冯杏芬, 李朝晖, 郭建辉, 等. 岩石热解录井在文留地区页岩油气勘探中的应用[J]. 录井工程, 2014, 25(2): 60-63.
FENG Xingfen, LI Chaohui, GUO Jianhui, et al. Application of rock pyrolysis logging technology in shale oil and gas exploration in Wenliu region[J]. Mud Logging Engineering, 2014, 25(2): 60-63.
- [11] 王志战, 翟晓薇, 秦黎明, 等. 页岩油气藏录井技术现状及发展思路[J]. 录井技术, 2013, 24(3): 1-5.
WANG Zhizhan, ZHAI Xiaowei, QIN Liming, et al. Overview on shale oil and gas logging technology [J]. Mud Logging Engineering, 2013, 24(3): 1-5.
- [12] 陈明, 唐诚, 欧传根, 等. Roqscan技术在川南页岩气录井中的应用效果分析[J]. 录井技术, 2020, 31(2): 21-28.
CHEN Ming, TANG Cheng, OU Chuangen, et al. Application effect analysis Roqscan technology in shale gas mud logging in southern Sichuan [J]. Mud Logging Engineering, 2020, 31(2): 21-28.
- [13] 郑马嘉, 唐洪明, 瞿子易, 等. 页岩气储层录井配套技术应用新进展[J]. 天然气工业, 2019, 39(8): 41-48.
ZHENG Majia, TANG Hongming, QU Ziyi, et al. Recent application progress of mud-logging support technologies for shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(8): 41-48.
- [14] 张家政, 朱地, 慈兴华, 等. 湖北宜昌地区鄂阳页2井牛蹄塘组和陡山沱组页岩气随钻碳同位素特征及勘探意义[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1346-1357.
ZHANG Jiazheng, ZHU Di, CI Xinghua, et al. Characteristics of carbon isotope while drilling and exploration significance of shale gas in Niutitang and Doushantuo formations in Well Eyangye-2, Yichang, Hubei, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(11): 1346-1357.
- [15] 冯子齐, 刘丹, 黄土鹏, 等. 四川盆地长宁地区志留系页岩气碳同位素组成[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 705-713.
FENG Ziqi, LIU Dan, HUANG Shipeng, et al. Carbon isotopic composition of shale gas in the Silurian Longmaxi Formation of the Changning area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 705-713.
- [16] 路保平, 丁士东. 中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 1-9.
LU Baoping, DING Shidong. New progress and development prospect in shale gas engineering technologies of Sinopec [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 1-9.
- [17] 林永学, 甄剑武. 威远区块深层页岩气水平井水基钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 21-27.
LIN Yongxue, ZHEN Jianwu. Water based drilling fluid tech-

- nology for deep shale gas horizontal wells in Block Weiyuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2):21-27.
- [18] 孙凯,刘化伟,明鑫,等.自201井区页岩气井水平段安全高效钻井技术[J].*钻探工程*,2022,49(2):104-109.
SUN Kai, LIU Huawei, MING Xin, et al. Safe and high-efficiency drilling technology for horizontal sections of shale gas wells in Well Block Zi-201[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(2):104-109.
- [19] 曾义金.深层页岩气开发工程技术进展[J].*石油科学通报*, 2019, 4(3):233-241.
ZENG Yijin. Progress in engineering technologies for the development of deep shale gas [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(3):233-241.
- [20] 韩烈祥.川渝地区超深井钻完井技术新进展[J].*石油钻采工艺*,2019,41(5):555-561.
HAN Liexiang. New progress of drilling and completion technologies for ultra-deep wells in the Sichuan-Chongqing area [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(5):555-561.
- [21] 孙焕泉,周德华,蔡勋育,等.中国石化页岩气发展现状与趋势[J].*中国石油勘探*,2020,25(2):14-26.
SUN Huanquan, ZHOU Dehua, CAI Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2):14-26.
- [22] 李国欣,朱如凯.中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J].*中国石油勘探*,2020,25(2):1-13.
LI Guoxin, ZHU Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2):1-13.
- [23] 何治亮,聂海宽,胡东风,等.深层页岩气有效开发的地质问题——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J].*石油学报*,2020,41(4):379-391.
HE Zhiliang, NIE Haikuan, HU Dongfeng, et al. Geological problems in the effective development of deep shale gas: A case study of upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations in Sichuan Basin and its periphery [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4):379-391.
- [24] 包汉勇,梁榜,郑爱维,等.地质工程一体化在涪陵页岩气示范区立体勘探开发中的应用[J].*中国石油勘探* 2022, 27(1):88-98.
BAO Hanyong, LIANG Bang, ZHENG Aiwei, et al. Application of geology and engineering integration in stereoscopic exploration and development of Fuling shale gas demonstration area [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1):88-98.
- [25] 谢军,鲜成钢,吴建发,等.长宁国家级页岩气示范区地质工程一体化最优化关键要素实践与认识[J].*中国石油勘探*,2019, 24(2):174-185.
XIE Jun, XIAN Chenggang, WU Jianfa, et al. Optimal key elements of geoenvironment integration in Changning National Shale Gas Demonstration Zone [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(2):174-185.
- [26] 宋明阶,彭光宇,胡春阳,等.涪陵页岩气田加密井轨道优化设计技术[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(5):11-16.
SONG Mingjie, PENG Guangyu, HU Chunyang, et al. Infill well 3D horizontal wellbore trajectory optimization design method in Fuling Shale Gas Field [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(5):11-16.

(编辑 李艺)