

# 鹿邑凹陷海陆过渡相页岩气地质调查 鹿页1井钻井技术

郝登峰<sup>1,2,3</sup>, 齐治虎<sup>\*1,2,3</sup>, 张晓昂<sup>1,2,3</sup>, 秦红涛<sup>1,2,3</sup>, 刘二伟<sup>1,2,3</sup>

(1.河南豫中地质勘查工程有限公司,河南郑州450016; 2.河南省能源钻井工程技术研究中心,河南郑州450016;  
3.河南省自然资源科技创新中心(非常规天然气开发研究),河南郑州450016)

**摘要:**南华北盆地鹿邑凹陷具有页岩气形成和发育的良好地质条件,区域内设计的页岩气地质调查鹿页1井井深3506.5 m。区域内属于海陆过渡相地层,地层复杂,构造发育,山西组及上石盒子组地层泥岩层段较多,施工中易出现坍塌、掉块等孔内复杂情况。针对钻井工程施工难点,通过优选钻探设备、钻头、钻井液体系等措施,总结了泥浆护壁、深孔取心、防斜等技术措施,保障了钻井工程的顺利实施,形成了一套适用于南华北盆地鹿邑凹陷海陆过渡相地层的页岩气深井钻井施工技术方法。为下一步实施同类钻井、安全优质高效开发页岩气提供了有益借鉴。

**关键词:**页岩气地质调查;页岩气井;海陆过渡相;取心技术;防斜技术;鹿页1井;鹿邑凹陷;南华北盆地

**中图分类号:**P634; TE2 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2022)05-0080-06

## Drilling technology of Well Luye-1 for shale gas geological survey in Luyi Sag

HAO Dengfeng<sup>1,2,3</sup>, QI Zhihu<sup>\*1,2,3</sup>, ZHANG Xiao'ang<sup>1,2,3</sup>, QIN Hongtao<sup>1,2,3</sup>, LIU Erwei<sup>1,2,3</sup>

(1.Henan Yuzhong Geological Exploration Engineering Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450016, China;  
2.Henan Provincial Energy Drilling Engineering Technology Research Center, Zhengzhou Henan 450016, China;  
3.Natural Resources Science and Technology Innovation Center of Henan Province (Unconventional Natural Gas Development and Research), Zhengzhou Henan 450016, China)

**Abstract:** Luyi Sag in the Southern North China Basin provides beneficial geological conditions for the formation and development of shale gas. The area belongs to the marine-continental transitional facies strata. The strata are complex and the structure is well developed; and there are many mudstone strata in Shanxi Formation and Shangshihezi Formation, which are prone to collapse and block falling during drilling. The designed depth of Well Luye-1 for shale gas survey in the region is 3506.5m. In view of the difficulties in drilling works, optimization of drilling equipment, bits and drilling fluid systems was conducted, and the technical measures such as mud wall protection, deep hole coring and anti-deviation were summarized. These measures have ensured the smooth implementation of drilling operations and form a set of shale gas deep well drilling technology methods suitable for marine and continental transitional strata in Luyi Sag of Southern North China Basin. It provides a useful reference for the next implementation of similar drilling engineering, as well as safe, high-quality and efficient development of shale gas.

**Key words:** shale gas geological survey; shale gas well; marine-continental transitional facies; coring technology; deviation prevention technology; Well Luye-1; Luyi Sag; Southern North China Basin

收稿日期:2022-03-06; 修回日期:2022-07-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.05.011

第一作者:郝登峰,男,汉族,1975年生,高级工程师,水文地质与工程地质专业,从事水文地质、非常规能源勘探与开发工作,河南省郑州市郑东新区商鼎路70号,1363492264@qq.com。

通信作者:齐治虎,男,汉族,1967年生,高级工程师,资源勘查工程专业,从事石油、煤层气钻井及技术研究工作,河南省郑州市郑东新区商鼎路70号,qzh6707@163.com。

引用格式:郝登峰,齐治虎,张晓昂,等.鹿邑凹陷海陆过渡相页岩气地质调查鹿页1井钻井技术[J].钻探工程,2022,49(5):80-85.

HAO Dengfeng, QI Zhihu, ZHANG Xiao'ang, et al. Drilling technology of Well Luye-1 for shale gas geological survey in Luyi Sag [J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):80-85.

## 0 引言

海陆过渡相作为页岩气富成藏的重要沉积环境,在我国南方地区分布广泛。由于沉积环境的影响,海陆过渡相泥页岩展布较为局限,横向连续性差,单层厚度较薄,累计厚度大,纵向上与煤层、砂岩层叠置频繁,特殊的沉积环境及较高粘土含量给钻井施工造成了困难。鹿邑凹陷位于南华北盆地中北部,是典型的海陆过渡相地层,主体属于周口坳陷构造单元,探区面积 2216.58 km<sup>2</sup>,估算上古生界太原组、山西组页岩气总资源量约 7384 亿 m<sup>3</sup>,具有较大的页岩气资源勘探前景<sup>[1-3]</sup>。鹿页1井是部署在鹿邑凹陷邱集断裂带的一口页岩气调查井,目的是查明地层层序,探索上古生界页岩发育特征及含气性,同时兼顾探索致密砂岩气和煤层含气性。本文以鹿页1井钻井工程为剖析对象,针对钻探施工中出现的坍塌、掉块、取心等技术难点,从钻探设备、钻井液、钻具组合等角度,提出相对应的技术措施,总结了一套适合于该地区经济高效的钻探施工技术和工艺,以期为南华北盆地页岩气勘探开发提供技术支撑。

## 1 地质概况

### 1.1 地质构造

鹿邑凹陷是一个以古近系沉积为主体、多套地层层叠合的断陷凹陷,结构总体表现为南断北超。上古生界太原组—山西组属于海陆过渡相煤系地层,泥页岩比较发育,受区域构造南北向和东西向主应

力场控制,凹陷内部断裂发育,不同期地发育了NW和NE两个方向主要断裂,二者交叉复合、多期改造,形成了现今较为复杂的断裂体系(见图1)。NW和NE向断层具有控制凹陷沉积的性质,鹿邑凹陷的断裂主要以喜山期形成的正断层为主,共有一级断裂3条,二级断裂4条<sup>[4-6]</sup>。

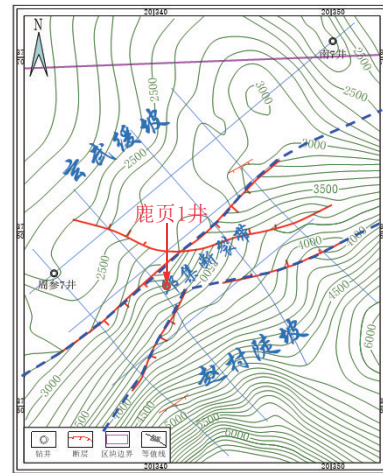


图1 鹿页1井构造位置

Fig.1 Structural location map of Well Luye-1

### 1.2 地层概况

根据邻井及地震资料,鹿邑凹陷自下而上发育了寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系和新界地层,缺失上三叠统及侏罗、白垩系地层。

设计目的层为山西组、太原组,全井设计取心 200 m。该井钻遇地层见表1。

表1 钻遇地层

Table 1 Drilling strata lithology

系	组	深度/m	岩性简述
第四系		452.0	主要为黄灰色粘土、粉砂质粘土、细砂岩等,质软,弱固结
新近系		1130.0	以棕红色泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩为主
古近系		1728.0	以浅棕色泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩为主
	孙家沟组	2493.0	以褐棕色泥岩、粉砂岩、灰白色细砂岩为主
	上石盒子组	2899.0	以绿灰色泥岩、粉砂岩、细砂岩为主,夹薄层碳质泥岩、煤层
二叠系	下石盒子组	3252.0	以灰色、绿灰色细砂岩、泥岩、砂质泥岩为主,局部含砾石
	山西组	3346.0	以深灰色细砂岩、泥岩、砂质泥岩为主,夹多层煤
	太原组	3484.0	以灰色、深灰色细砂岩,石灰岩,砂质泥岩为主,夹多层煤
	本溪组	3506.5	以浅灰色、灰色铝质泥岩、泥岩为主,夹薄煤层

## 2 钻井施工难点

### 2.1 钻井深度大

该井设计井深 3260 m,为目前河南省内施工最

深的页岩气勘探井,井位地处多级断裂带中,可参考资料较少,地层倾角大,构造复杂,岩心破碎,地层稳定性差。地层侧向压力大,岩石易向井眼内部产生位移而发生坍塌。

## 2.2 井壁稳定性差

粘土矿物含量越多,发生地层坍塌的可能性越大,必须采取合理的护壁措施来提高钻井施工的安全性<sup>[7-9]</sup>。该井山西组中上部及上石盒子组地层含泥岩层段较多,厚度变化大。泥岩成分以高岭石、蒙脱石为主,岩心呈块状,遇水易水化膨胀,抗压强度降低,造成井壁不稳定。

煤层段由于煤体结构松软,抗压强度低,在施工中易发生坍塌现象。奥陶系石灰岩地层裂隙及岩溶较为发育。一旦钻遇漏失地层,易发生失返性漏失,致使上部地层失稳。

## 2.3 岩层可钻性差

该井钻遇新生界弱固结砂岩、泥岩、砂砾岩等,古生界泥岩、粉砂岩、砂岩、煤层、石灰岩等。岩性变化大,软硬互层频现,钻头适应性较差,钻进效率较低<sup>[10-11]</sup>。同时,由于岩层局部发育研磨性较强的角砾岩、硅质岩等,严重影响入井钻头的使用寿命,导致频繁起下钻,钻进效率低下。

## 3 钻井施工技术

### 3.1 设备优选

根据该~井的实际情况,采用石油 ZJ-40 型钻机进行施工,主要配置为:ZJ-40 型钻机, JJ225/43-K 型井架, 3NB-1300A 型钻井泵, 配 PZ12V190 型柴油机 2 台, Y450-6 型 630 kW 发电机组 2 台, 2FZ35-35 型双闸板防喷器, 五级泥浆固控系统。图 2 为施工现场。动力采用国家电网供电系统供电。

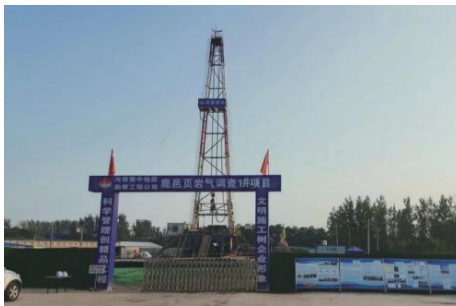


图2 施工现场

Fig.2 Drilling site

### 3.2 井身结构

鹿页 1 井采用三开井身结构:一开以  $\text{O}444.5$  mm 钻头钻穿上部松软、易塌、易漏地层,钻至稳定岩层后(井深  $0.00\sim 400.00$  m, 钻厚  $400.00$  m), 下入

$\text{O}339.7$  mm 套管,水泥固井上返至地面;二开以  $\text{O}311.15$  mm 钻头钻至三叠系岩性强固结地层(井深  $400.00\sim 2350.00$  m, 钻厚  $1950.00$  m), 下入  $\text{O}244.5$  mm 套管,水泥固井上返至地面;三开以  $\text{O}215.9$  mm 钻头钻入奥陶系  $100$  m 完钻,目的层段进行取心,裸眼完井。实际完钻井深  $3506.5$  m, 实钻井身结构如图 3 所示。

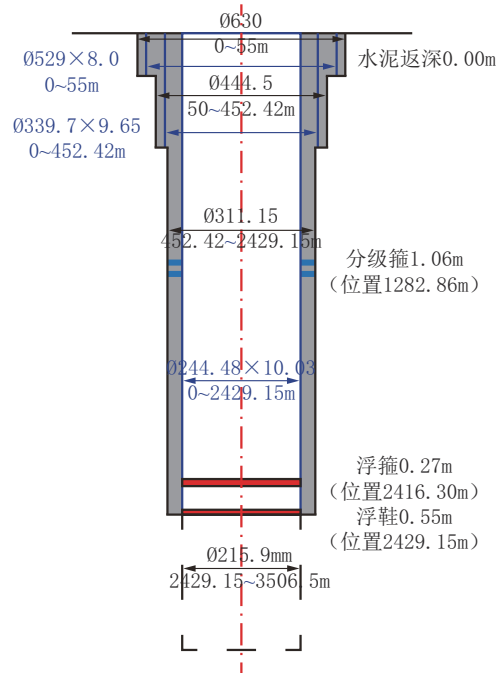


图3 实钻井身结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of wellbore structure

### 3.3 钻头优选

根据该井钻遇地层及其岩性特征进行分析,配备不同型号及数量的钻头,以满足钻探施工要求。

针对一开第四系和二开新近系较软地层,主要以大尺寸切削齿、4翼 PDC 钻头为主,水力喷射钻进提高机械钻速。针对二开古近系软硬互层地层,主要以中尺寸切削齿、5翼 PDC 钻头为主,提高钻头的适应性;钻进孙家沟组较强研磨性的细粉砂岩,以钢齿三牙轮钻头为主,增大碎岩效率。三开取心钻头选用 PDC 筒式取心钻头(见图 4), 钻齿出刃较小,降低了对井壁的扰动,同时水眼设计在钻头体上,有效减少了对岩心的冲刷,经现场应用试验,筒式取心钻头适宜于海陆过渡相泥页岩取心施工。

### 3.4 钻具组合

一开、二开均为全面钻进,一开采用塔式钻具组合,防止开孔井斜;二开主要采用复合钻进技术快速



图4 川8-3筒状取心钻头

Fig.4 Chuan 8-3 cylindrical coring bit

通过上部易垮塌地层;三开不取心段采用复合钻进技术,取心段采用川8-3绳索取心钻具取心。钻具

组合见表2。

### 3.5 钻井液优选

(1)一开井段采用钠土浆钻井液体系,基本配方为:水+5%~6%钠土+0.1%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+0.1%CMC。钻井过程中做好井斜控制、防漏工作,同时隔离好浅部松散地层水。

(2)二开井段采用强抑制钾铵基聚合物钻井液体系,基本配方为:水+2.0%钠土+0.2%~0.5%NaOH+0.2%~0.3%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+0.2%~0.5%聚丙烯酰胺钾盐+0.2%~1.0%两性离子聚合物包被剂+0.5%~2.0%页岩抑制剂酰胺聚合物+0.5%~1.0%降滤失剂+0.2%~0.5%增粘剂+0.1%~0.3%降粘剂。

表2 钻具组合

Table 2 Bottom hole assembly

开钻次序	钻具组合	备注
一开	Ø445.5 mm 牙轮钻头+Ø203 mm 钻铤×6根+Ø178 mm 钻铤×6根+Ø127 mm 钻杆+Ø133 mm 方钻杆	随井深逐步增加钻铤
二开	Ø311.15 mm PDC 钻头+Ø193.7mm 单弯螺杆(0.75°)+Ø165mm 无磁钻铤×1根+ MWD +Ø158.8 mm 钻铤×6根+Ø127mm 钻杆+Ø133mm 方钻杆	
三开	Ø215.9 mm PDC 钻头+Ø165 mm 螺杆+Ø165 mm 无磁钻铤+MWD+Ø165 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆+Ø133 mm 方钻杆	不取心钻进
	Ø215.9 mm PDC 取心钻头+川8-3取心筒+Ø158.8 mm 钻铤×6根+Ø127 mm 钻杆+Ø133 mm 方钻杆	取心钻进(3124.58~3506.50 m)

(3)三开井段采用强抑制双钾铵基聚合物钻井液体系。该钻井液体系具有较好的流变性、抗高温能力和适宜的滤失量。在满足钻井施工、保证工程安全的前提下,尽可能降低钻井液粘度、密度、固含量和失水量<sup>[12-13]</sup>。

基本配方:水+2.0%钠土+0.2%~0.5%NaOH+0.2%~0.3%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+0.2%~0.5%聚丙烯酰胺钾盐+5.0%~10.0%氯化钾+0.2%~1.0%两性离子聚合物包被剂+0.5%~2.0%页岩抑制剂酰胺聚合物+0.5%~1.0%降滤失剂+0.2%~0.5%增粘剂+0.1%~0.3%降粘剂。

处理添加剂:OSAMK、LF-TEX-1。其它添加剂:工业用氢氧化钠、加重剂、堵漏剂、除硫剂等。

## 4 主要技术措施

### 4.1 泥浆护壁技术措施

钻进至井深2493 m时,井内开始出现坍塌、掉

块,并伴有卡钻。多次调整钻井液至密度1.15 g/cm<sup>3</sup>、粘度90 s之后,井内坍塌的状况依然没有解决,最多沉渣厚度达60余米。为了确保施工安全,决定在2426~2741 m井段封井侧钻。

注水泥回填分段进行:先将钻杆下至2741 m,封固段2600~2741 m,共计141 m。先注入5 m<sup>3</sup>清水前置液,然后注入标号为R42.5、密度为1.80 g/cm<sup>3</sup>水泥浆10.5 m<sup>3</sup>,最后替浆22.8 m<sup>3</sup>。然后将钻具提至2600 m,封固段2426~2600 m,共计174 m;先注入5 m<sup>3</sup>前置液,然后注入标号为R42.5、密度为1.80 g/cm<sup>3</sup>的水泥浆8 m<sup>3</sup>,最后替浆21.5 m<sup>3</sup>。

根据前期施工教训,选用高密度(1.15~1.25 g/cm<sup>3</sup>)、高粘度(200 s)的泥浆进行施工,加入2%防塌剂,加入适量土粉,降低失水在6 mL以下,并每回次起钻时及时将井内灌满泥浆,避免液柱压力下降,保证了施工顺利进行<sup>[14-15]</sup>。

## 4.2 防斜技术措施

钻进过程中采用MWD无线随钻仪进行测斜作业。在井斜控制方面主要采取措施如下:

(1)井架、平台的安装周正、水平、稳固,保证天车、转盘、井眼中心三点一线。

(2)采用防斜快打复合钻进技术,即采用PDC钻头+MWD+1.25°单弯螺杆复合钻进技术。

(3)在全面钻进井段,严格控制钻压基本一致,加尺后做好扫孔工作,检查好入井钻具。

(4)在取心井段,保持钻压一致,每次下钻到井底先扫孔20 min,待井底干净无杂物后,再开始低速钻进。每钻进100 m起钻下仪器测井斜一次,发现超标及时修正纠斜。

完钻全井最大井斜 $9.02^\circ$ ,达到设计要求。

## 4.3 深孔取心技术措施

取心段主要位于下石盒子组底部、山西组和太原组,钻具组合为: $\varnothing 215.9$  mm PDC钻头+川8-3取心筒+ $\varnothing 158.8$  mm钻铤+ $\varnothing 127$  mm钻杆+ $\varnothing 133$  mm方钻杆。

钻进参数:钻压50~70 kN,转速50 r/min,泵压8~12 MPa。

(1)取心作业前,充分循环钻井液并调整好性能,保证井底清洁和起下钻通畅。保障钻井设备和仪表性能良好,能够正常工作。

(2)取心作业中,下钻速度 $\geq 0.5$  m/s。操作平稳,严禁猛刹、猛放。下钻距井底3~5 m时,开泵循环,清洗井眼及内筒。

(3)取心钻进中,控制回次进尺,防止堵心;观测地质录井气测显示及泵压变化,发现进入煤层及松软地层,及时调整钻压,防止憋泵。在割心前0.5 m左右,增加压力至30 kN,使底部岩心增粗,再轻压钻进10 min,恢复正常钻压后实施割心;调整岩心与岩心爪的间隙为10~15 mm,降低卡心的概率;使用弹性较好的岩心爪,便于取心<sup>[16-18]</sup>,以最大程度保证岩心采取率。

(4)针对该井泥岩层数多、厚度大的特性,按2%的比例增加了液体润滑剂,降低摩阻,提高泥浆流变性,起到护壁、防止钻头泥包的作用,现场应用效果良好。

取心井段施工共计118 d,取心纯钻进时间1109 h,最长回次钻进时间51 h,钻井效率较低,主要是由于泥浆粘度过大,岩心破碎(图5),岩石可钻

性差,起下钻辅助时间过长。



图5 山西组地层岩心

Fig.5 Cores from Shanxi Formation

全井共取心46回次,连续取心377.44 m,平均岩心采取率为90.9%,岩心直径102 mm,达到了岩心采样试验要求。

## 5 取得的技术成果

(1)鹿页1井完钻井深3506.50 m,自下石盒子组开始取心,取心进尺377.44 m,累计取心长度343.25 m,岩心采取率为90.9%,取心直径102 mm,满足设计及测试要求。

(2)通过钻探施工及取心作业,配合录井及测井工作,获取了原始资料和数据,建立了实钻地层剖面,查明了该区地层发育情况,为该区油气发现奠定了良好基础。

(3)采用螺杆复合钻具+MWD无线随钻钻井工艺,全面提高了钻进效率,并有效跟踪控制了井斜,保证了井身质量。

(4)针对该井区海陆过渡相软硬互层、易坍塌掉块的地层特征,优选出了一套匹配该地层施工的钻井液体系,达到了护壁的目的,解决了孔内坍塌掉块问题。但较高的泥浆密度影响了地化录井和气测录井资料的可靠性,影响了气层的评价效果,建议针对该井区进一步研究更适宜的泥浆体系。

## 6 结语

鹿页1井是河南省内页岩气钻井最深、取心技术要求最高的一口探井,钻探施工中,在钻具组合、钻头优选、深井取心、钻井液的优选以及复杂地层处理方面均取得了较好的效果,总结了很多经验,可为下一步该地区页岩气的超深井施工提供借鉴。

## 参考文献(References):

- [1] 牛志刚,冯斌,张兴辽,等.河南省通柘煤田的发现与地质特征(第一版)[M].北京:煤炭工业出版社,2018.  
NIU Zhigang, FENG Bin, ZHANG Xingliao, et al. Discovery and Geological Characteristics of Tongzhe Coalfield, Henan Province[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2018.
- [2] 刘敬维,姚素平,胡文瑄,等.徐淮地区二叠系烃源岩地球化学特征及页岩气资源潜力——以宿州3-1井钻井剖面为例[J].地质学刊,2018,42(1):79-87.  
LIU Jingwei, YAO Suping, HU Wenxuan, et al. Geochemical characteristics and shale gas resource potential of Permian source rocks in Xuhuai area: A case study of the 3-1 drilling section of Suzhou[J]. Journal of Geology, 2018,42(1):79-87.
- [3] 袁青松,张栋,代磊,等.南华北二叠系太原组泥页岩孔隙特征及其影响因素分析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2019,34(6):1-7.  
YUAN Qingsong, ZHANG Dong, DAI Lei, et al. Pore characteristics and influencing factors of mud shale in Taiyuan Formation, Southern North China[J]. Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science Edition), 2019,34(6):1-7.
- [4] 刘文武,赵志涛,翁炜,等.页岩气基础地质调查皖南地1井钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):66-70.  
LIU Wenwu, ZHAO Zhitao, WENG Wei, et al. Drilling of Wannandi Well-1 for basic shale gas geological survey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):66-70.
- [5] 蔡正水,朱恒银.深部钻探泥浆护壁技术研究与应用[J].安徽地质,2016,26(3):212-216.  
CAI Zhengshui, ZHU Hengyin. Study and application of slurry supporting technique in deep drilling[J]. Geology of Anhui, 2016,26(3):212-216.
- [6] 赵洪波,朱迪斯,黄正,等.南华北盆地亳州—阜阳地区页岩气钻井技术[J].石油钻采工艺,2020,42(6):679-683.  
ZHAO Hongbo, ZHU Disi, HUANG Zheng, et al. Shale gas drilling technologies used in Bozhou-Fuyang area of the Southern North China Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020,42(6):679-683.
- [7] 郝海洋,宋继伟,蒋国胜,等.南方页岩气基础地质调查黔普地1井钻井施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):23-29.  
HAO Haiyang, SONG Jiwei, JIANG Guosheng, et al. Drilling technology of Well Qianpudi-1 for basic geological survey of shale gas in southern China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(8):23-29.
- [8] 刘文武,郭坤,冯美贵,等.页岩气钻探钻井护壁技术[J].西部探矿工程,2021,33(1):60-61,65.  
LIU Wenwu, GUO Kun, FENG Meigui, et al. Drilling wall protection technology for shale gas drilling[J]. West-China Exploration Engineering, 2021,33(1):60-61,65.
- [9] 赵亮,汪程林.页岩气地质调查皖含地1井施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):42-47.  
ZHAO Liang, WANG Chenglin. Drilling of Well Wanhandi-1 for shale gas geological survey [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):42-47.
- [10] 袁青松,汪超,刘艳杰,等.中牟页岩气区块泥页岩井壁稳定影响因素分析及技术对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(11):12-18.  
YUAN Qingsong, WANG Chao, LIU Yanjie, et al. Analysis on the influence factors to mud shale borehole stability in Zhongmu Shale Gas Block and the technical countermeasures[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(11):12-18.
- [11] 苏舟,张绍和,王文彬,等.黔水地1井钻探施工技术难点及对策[J].钻探工程,2021,48(5):54-59.  
SU Zhou, ZHANG Shaohu, WANG Wenbin, et al. Technical difficulties in drilling of Well Qianshuidi-1 and their solutions [J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):54-59.
- [12] 朱恒银,蔡正水,王强,等.深部钻探技术方法的研究与应用[J].地质装备,2013,14(6):26-31.  
ZHU Hengyin, CAI Zhengshui, WANG Qiang, et al. Research and application of deep drilling technology[J]. Geological Equipment, 2013,14(6):26-31.
- [13] 卢予北,陈莹,申云飞,等.河南中牟页岩气区块地层特征及钻探问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):62-67.  
LU Yubei, CHEN Ying, SHEN Yunfei, et al. Research on formation characteristics and drilling problems in Zhongmu Shale Gas Block of Henan province [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(7):62-67.
- [14] 赵文智,贾爱林,位云生,等.中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J].中国石油勘探,2020,25(1):31-44.  
ZHAO Wenzhi, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):31-44.
- [15] 余道智.深层页岩气钻井关键技术难点及对策研究[J].能源化工,2019,40(1):69-73.  
YU Daozhi. Study on key technical difficulties and countermeasures of deep shale gas drilling[J]. Energy Chemical Industry, 2019,40(1):69-73.
- [16] 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.
- [17] 齐治虎,刘国卫.岩心钻探中复杂地层的护孔工艺[J].西部探矿工程,2021,33(11):49-52,57.  
QI Zhihu, LIU Guowei. Borehole protection technology in core drilling in complex formation[J]. West-China Exploration Engineering, 2021,33(11):49-52,57.
- [18] 杨柳,石富坤,赵逸清.复杂结构井在页岩气开发中的应用进展[J].科学技术与工程,2019,19(27):12-20.  
YANG Liu, SHI Fukun, ZHAO Yiqing. Applied research of complex structure well in shale gas development [J]. Science Technology and Engineering, 2019,19(27):12-20.

(编辑 李艺)