

湘西北复杂构造区雪峰山先导孔钻进技术

韩毅^{1,2}, 张绍和^{*1,2}, 王文彬³, 曹函^{1,2}, 刘彪^{1,2}, 肖金成^{3,4}

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

3. 湖南省煤炭地质勘查院, 湖南长沙 410014;

4. 湖南省地质新能源勘探开发中心, 湖南长沙 410014)

摘要:雪峰山先导孔是部署在湘西北沅麻盆地麻阳向斜的一口页岩气地质调查井。钻遇地层松散破碎、裂隙发育、软硬互层等, 钻进中极易出现漏失、卡钻、埋钻、岩心掉落等孔内复杂情况, 严重影响了钻进效率。针对钻进过程中遇到的复杂地层及钻进技术难点, 如裂隙发育地层钻井液漏失和涌水问题、松散破碎地层岩心采取问题、水敏性地层孔壁稳定性问题, 提出了针对性的解决措施, 包括: 改进取心钻具, 采用不提钻换内钻头拦簧护心绳索取心钻具; 优化钻井液配方, 采用微泡沫钻井液以及膨润土+褐煤树脂+广谱护壁剂Ⅲ型+抗高温抗盐降失水剂+石灰石粉的钻井液配方; 采取针对性的施工管理措施。提高了钻进效率, 钻井质量满足地质要求, 有效地完成了钻井施工任务, 为同类型页岩气调查井的钻井施工提供技术参考。

关键词: 钻探; 页岩气调查井; 复杂地层; 绳索取心钻具; 不提钻换内钻头; 钻井液

中图分类号: P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)07-0020-06

Drilling technology for Xuefengshan pilot hole for shale gas geological survey in Northwest Hunan

HAN Yi^{1,2}, ZHANG Shaoh^{*1,2}, WANG Wenbin³, CAO Han^{1,2}, LIU Biao^{1,2}, XIAO Jincheng^{3,4}

(1. *Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China;*

2. *School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;*

3. *The Coal Geological Exploration Institute of Hunan Province, Changsha Hunan 410014, China;*

4. *Hunan Geological New Energy Exploration and Development Engineering Technology Research Center, Changsha Hunan 410014, China)*

Abstract: The Xuefengshan pilot hole is a shale gas geological survey hole deployed in the Mayang syncline in the Yuanma Basin in Western Hunan. This paper introduces the engineering and geological conditions of the borehole with focus on the drilling and completion technology. The complex formations and drilling technical difficulties encountered during the drilling process are also summarized and analyzed with specific solutions put forward for different drilling difficulties. The solutions mainly include improving drilling and coring tools, adopts wire-line coring tool that does not lift the drill to replace the inner drill bit with a spring core protector cord. Micro-foam drilling fluid and a drilling fluid formula of bentonite+lignite resin+broad-spectrum wall protectant type III+high temperature

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2021-03-11 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.07.004

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“3D打印栅格状胎体刀刃化唇面对金刚石钻头破碎坚硬岩层的影响机制研究”(编号: 41872186); 湖南省自然资源科技计划项目“复杂地质条件区页岩气深井钻探施工技术研究”(编号: 2020-23)

作者简介: 韩毅, 男, 汉族, 1995年生, 在读硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为地质工程, 湖南省长沙市岳麓区中南大学本部, 13088321665@163.com。

通信作者: 张绍和, 男, 汉族, 1967年生, 教授、博士生导师, 探矿工程专业, 研究方向为钻掘工程, 湖南省长沙市岳麓区中南大学本部, zhangsh@csu.edu.cn。

引用格式: 韩毅, 张绍和, 王文彬, 等. 湘西北复杂构造区雪峰山先导孔钻进技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 20-25.

HAN Yi, ZHANG Shaoh, WANG Wenbin, et al. Drilling technology for Xuefengshan pilot hole for shale gas geological survey in Northwest Hunan[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 20-25.

and salt resistance fluid loss agent+limestone powder are used. Developing the relevant management measures. As a result, drilling efficiency has been improved, drilling quality has met the geological requirements, and the drilling tasks have been effectively completed. It is desired the drilling experiences can provide technical reference for drilling of similar shale gas survey boreholes.

Key words: drilling technology; shale gas survey borehole; complex formation; wire-line coring tool; retrievable drill bit; drilling fluid

湖南省页岩气资源潜力巨大,目前具有开发潜力的页岩气层主要是位于湘西北地区的下寒武统牛蹄塘组和下志留统龙马溪组。作为页岩气重点勘探区,在该区域已部署了几十口页岩气调查井^[1]。为开展湘西北雪峰山非常规油气资源评价,在雪峰山开展了先导孔钻探实验。但该区地质构造复杂,在页岩气勘探过程中常钻遇松散破碎、裂隙发育地层、软硬互层等复杂地层,极易出现漏失、卡钻、埋钻、岩心掉落等孔内复杂情况,严重影响了钻进效率,阻碍了该地区页岩气勘探开发的进度^[2-5]。

本文总结了雪峰山先导孔的钻井施工技术,并阐述分析了钻探施工中主要遇到的问题及解决措施。以期为同类型页岩气调查井的钻井施工提供参考。

1 概况

1.1 项目概况

“雪峰山先导孔钻探工程”项目隶属中国地质科学院地质力学研究所“钦杭结合带及邻区深部地质调查”二级项目。该项目由中国地质科学院地质力学研究所承担,湖南省煤炭地质勘查院负责钻探施工。该井为页岩气地质调查井,位于湖南省怀化市麻阳苗族自治县隆家堡乡步云坪村十组,目的层为下寒武统牛蹄塘组。该井设计井深2400 m,完钻井深2403.91 m,达到地质勘探目的,岩心采取率96.5%。测井数据显示,井眼规则,井身质量合格,固井质量合格。

1.2 地质概况

雪峰山先导孔钻遇14套地层,自上而下依次为:第四系;白垩系下统神皇山组、东井组、石门组;寒武系芙蓉统车夫组,上统熬溪组,中统清虚洞组,中下统牛蹄塘组;震旦系上统留茶坡组,下统金家洞组;南华系上统南沱组,中统大塘坡组、古城组,下统富禄组。

钻遇地层主要为灰岩、泥晶灰岩、硅质灰岩、粉

砂岩、细砂岩、薄层状泥岩、石煤层,泥质页岩,岩石级别为V级,岩石研磨性较强,属稍硬—中硬地层。

2 钻井工程技术

2.1 井身结构

井身结构设计应根据钻井质量指标和技术要求,以满足页岩气基础地质调查的研究目的,不仅要考虑到事故预防和处理的合理安排,还要考虑到后续录井的有效开展。同时,由于地层压力剖面资料缺乏,难以把握“必封点”的准确位置。因此,在实际钻进施工中,应基于井内实时情况,及时优化调整井身结构^[6]。雪峰山先导孔实际井身结构如图1所示。

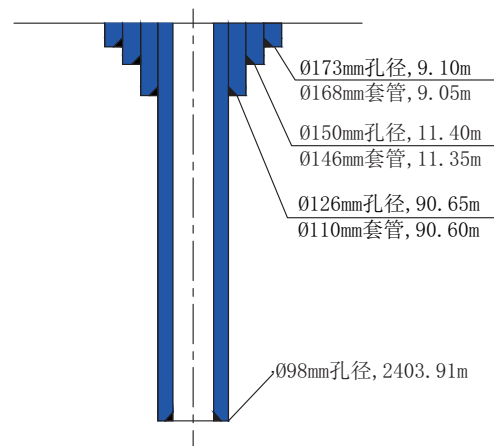


图1 雪峰山先导孔井身结构

Fig.1 Structural diagram of Xuefengshan pilot hole

2.2 钻井工艺

2.2.1 一开

由于地表疏松,为防止井口塌陷,保证井眼打直,在刚开钻时,先用单泵开钻,排量30~50 L/s,转速75 r/min,钻压2~5 kN,钻压自重缓慢吊打,然后开双泵加大排量,钻进至一开井深9.1 m。钻进过程中及时跟踪测斜,防止井斜超标给二开钻进增加难度。使用Ø173 mm钻头钻进,钻井液密度为1.02~

1.03 g/cm³, 马氏漏斗粘度 27~28 s, 下入 Φ 168 mm 表层套管 9.05 m。

2.2.2 二开

同样先用单泵开钻, 排量 30~50 L/s, 转速 75 r/min, 钻压 2~5 kN, 钻压自重缓慢吊打, 然后开双泵加大排量, 钻进至二开井深 11.4 m。钻进过程中及时跟踪测斜, 防止井斜超标给三开钻进增加难度。使用 Φ 150 mm 钻头钻进, 钻井液密度为 1.02~1.03 g/cm³, 马氏漏斗粘度 27~28 s, 下入 Φ 146 mm 套管 11.35 m。

2.2.3 三开

使用 Φ 122 mm 钻头钻进, 钻井液密度 1.00~1.05 g/cm³, 马氏漏斗粘度 27~28 s, 下入 Φ 110 mm 技术套管 90.60 m。钻遇地层主要为砂岩, 地层易井漏。在做好防塌、防漏、防卡、防斜的技术准备基础上, 全压钻进, 提高钻进速度, 保证井壁稳定, 起下钻畅通。

为保证井身质量和井下安全, 制定了以下技术措施:

(1) 上部井段要严格控制井斜, 使用转速 75~150 r/min、钻压 5~10 kN 钻水泥塞及附件, 待钻头出套管后钻压控制在 10 kN 左右, 以吊打为主, 确保三开开孔要直; 钻进 50 m 后逐渐将钻压加至正常

钻压。

(2) 三开快速钻进阶段要做到早开泵晚停泵, 每打完方钻杆加接单根前坚持划眼循环 2~3 min, 接单根速度要尽量控制在 3 min 以内, 以防止沉砂卡钻。

2.2.4 四开

使用 Φ 98 mm 钻头钻进, 钻井液密度 1.02~1.16 g/cm³, 马氏漏斗粘度 27~29 s。

为保证井身质量和井下安全, 制定了以下技术措施:

(1) 每钻进 100~200 m 短程起下钻一次, 保持井眼畅通和井下安全。

(2) 加强井眼轨迹跟踪监测工作, 及时测量、分析井斜及方位变化情况, 以便采取有效措施。

(3) 钻压 15~30 kN, 转速 150~490 r/min, 排量 42~91 L/min。

(4) 打开气层后, 注意做好井控和 H₂S 监测工作, 若发现钻井液中 H₂S 含量偏高, 应及时启动 H₂S 应急预案, 严格按 H₂S 应急预案组织施工, 并立即报告项目组 and 上级部门。

2.2.5 各开次主要钻具组合

各开次钻具组合见表 1。

表 1 雪峰山先导孔各开次钻具组合

Table 1 Drilling stem for each drilling section

开次	钻进井段/m	钻具组合
一开	0~9.1	Φ 173 mm 普通硬质合金取心钻头 + Φ 168 mm 岩心管 + Φ 89 mm 钻杆 + Φ 89 mm 立轴
二开	9.1~11.40	Φ 150 mm 金刚石钻头 + Φ 146 mm 岩心管 + Φ 89 mm 钻杆 + Φ 89 mm 立轴
三开	11.40~90.65	Φ 122 mm 金刚石绳索取心钻具 + Φ 110 mm 岩心管 + Φ 89 mm 钻杆 + Φ 89 mm 立轴
四开	90.65~2403.91	Φ 98 mm 普通金刚石绳索取心钻具 + Φ 98 mm 不提钻换内钻头拦簧护心绳索取心钻具 + Φ 89 mm 钻杆 + Φ 89 mm 立轴

3 钻遇复杂地层及钻进难点

3.1 裂隙发育地层

本井地层中构造裂隙较为发育, 有大量不规则裂隙, 宽度一般为 1~20 mm, 局部裂隙较宽, 密度一般为 2~6 条/m, 局部可达 50~60 条/m。在构造裂隙地层中钻进, 钻井液漏失和涌水问题是主要技术难题。且这类地层岩石破碎, 钻井液对孔壁的冲刷或漏失容易引发塌孔、埋钻、烧钻等事故^[7]。在井深

43.9~180.65 m 段时漏水严重, 消耗量为 8.05 m³/h, 地层为白垩系下统神皇山组, 岩性为角砾岩。在井深 2399.4~2403.91 m 段井内出现小量涌水现象, 地层为南华系下统富禄组, 岩性为变质细砂岩, 裂隙发育。

3.2 松散、破碎地层

本井共钻遇 4 处破碎带, 所取岩心较为破碎(如图 2 所示)。在岩性较硬的破碎带钻进时, 钻头工作条件恶劣, 磨损较大, 提钻间隔短, 钻进效率低。且

由于普通绳索取心钻具缺乏护心机构,在钻进过程中岩心易受到机械碰撞和钻井液冲蚀,极易破碎,继而磨心、堵心,而在提钻过程中岩心容易脱落,导致岩心采取率低甚至钻孔报废^[8-10]。

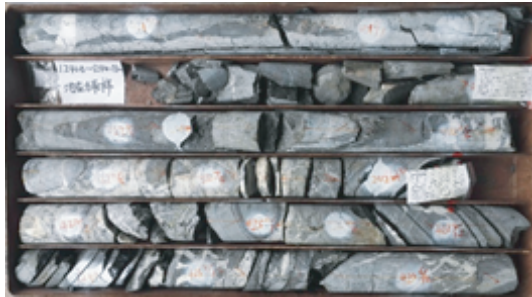


图2 破碎带岩心

Fig.2 Cores from the broken zone

3.3 水敏性地层

在井深1020 m处钻遇牛蹄塘组,牛蹄塘组高碳质泥页岩发育,岩心软弱、破碎,为典型的水敏性地层,井壁稳定性问题成为主要矛盾而凸显出来^[11-12]。在这类地层钻进时容易遇到缩径、超径、掉块、卡钻等复杂情况,地层受钻井液侵入而致使井壁膨胀、软化、剥落。由于粘土造浆作用易使钻井液粘度上升,常用清水稀释,导致井壁更不稳定,甚至出现井塌、埋钻致使钻孔报废的情况。此外,水化膨胀地层岩心遇水后容易膨胀,与内管摩阻力增大而产生堵心,岩心采取率和质量受到影响。

实际钻进过程中,岩心软弱、破碎,钻井液密度偏低,在 $1.02\sim 1.04\text{ g/cm}^3$ 之间,且泥页岩造浆严重,钻井液粘度上升,致使底部沉渣过多,导致了卡钻事故。

4 钻探技术优化

4.1 优化钻具选择

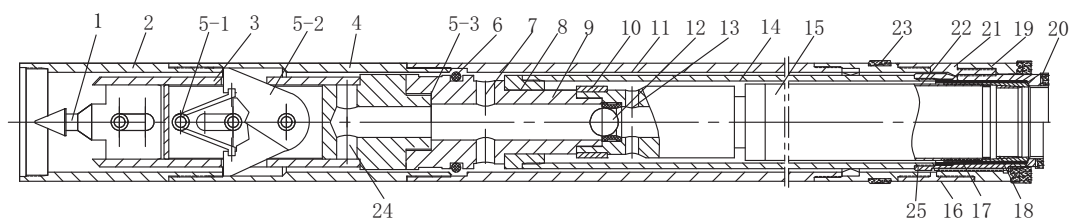
针对普通绳索取心钻具在上述复杂地层中钻进时遇到的钻头磨损快、钻进效率低、岩心易脱落、岩心采取率低等问题,提出采用不提钻更换内钻头拦簧护心绳索取心钻具,现场应用表明,该钻具能够在松散、软弱、破碎等复杂地层的钻探工作,岩心采取率达95%以上,取心质量也得到明显提高。

4.1.1 钻具结构及工作原理

新型钻具的结构如图3所示,该钻具在普通绳索取心钻具基础上增加了第三层岩心容纳管,在第三层岩心容纳管上端增设了单动轴,使岩心管不回转,可以达到减摩、防堵塞、退心方便的目的。此外,该钻具采用卡簧卡取岩心,并设有拦簧护心机构,即在第三层岩心容纳管的外部设置了拦簧,拦簧与内管下部的拦簧圈连接,提钻时,拦簧簧爪会向下并收拢托住岩心,可以防止破碎岩心脱落。内钻头与内管下侧通过丝扣连接,内、外钻头通过花键连接。工作时,内钻头超前有2方面的作用:一是内钻头的超前设置起到了隔水护心的作用,减轻岩心根部受到的冲刷,防止岩心进入钻头之前就被钻井液冲蚀掉;二是内管头可超前钻进破碎岩石,为外钻头创造更多的自由面,使外钻头钻进时产生更多的体积破碎,提高外钻头的破岩效率,从而不仅延长了钻头的使用寿命,还提高了钻进效率。内钻头可随内管总成打捞至地表,更换钻头不需提大钻,因此可以节省升降钻具的辅助作业时间,从而提高钻探施工效率。

4.1.2 钻具钻进试验

钻遇松散、破碎地层时,将普通绳索取心钻具更换为该新型绳索取心钻具进行钻进试验。使用新型钻具在此孔段钻进了5个回次,每个回次进尺2.5



1—捞矛头;2—弹卡挡头;3—回收管;4—弹卡室;5-1—张簧;5-2—弹卡钳;5-3—弹卡架;6—O形密封圈;7—孔;8—滑动套;9—滑动轴;10—悬挂环;11—外管;12—钢球;13—孔;14—内管;15—第三层岩心容纳管;16—外接头;17—拦簧;18—卡簧座;19—外钻头;20—内钻头;21—钻头座;22—拦簧座;23—扩孔器;24—孔;25—拦簧圈

图3 不提钻换内钻头拦簧护心绳索取心钻具

Fig.3 Wire-line coring tool with the retrievable drill bit

m。试验过程中,井内没有复杂情况出现,取心试验数据见表2。由表2看出,采用新型绳索取心钻具的岩心采取率为95.5%,而原采用普通钻具的岩心采取率仅有74%左右,远未达到地质找矿规范要求。图4为采取的岩心。新型绳索取心钻具相比普通绳索取心钻具采心效果提升明显,且钻进效率得到明显提升。

表2 新型绳索取心钻具试验井段取心情况

Table 2 Coring results of the new wire-line coring tool from the test hole section

回次 编号	钻进井 段/m	回次进 尺/m	取心长 度/m	岩心采取 率/%
1	1239.75~1242.25	2.50	2.42	96.8
2	1242.25~1244.75	2.50	2.33	93.2
3	1244.75~1247.25	2.50	2.41	96.4
4	1247.25~1249.75	2.50	2.39	95.6
5	1249.75~1252.25	2.50	2.39	95.6
总计		12.50	11.94	95.5



图4 新型绳索取心钻具所取得岩心

Fig.4 Core obtained by the new wire-line coring tool

4.2 钻井液技术措施

对于构造裂隙发育的漏失地层,由于井内液柱压力大于地层的漏失压力,造成钻井液漏失。因此,在施工中应采用高粘度、低密度钻井液^[13-14]。现场施工采用了成本低廉的微泡沫钻井液,加入了3%膨润土、0.05%聚丙烯酰胺,0.5%纤维素以及1%泡沫剂。微泡沫钻井液具有较强的剪切稀释性,进入裂隙通道后流速下降,粘度迅速上升,有效减轻了漏失情况。此外,由于微泡沫钻井液密度较小,可以减轻破碎岩心受到的冲蚀作用,有利于提高破碎岩心采取率。在本井漏失层段使用该微泡沫钻井液后,漏失量明显减小,消耗量由8.05 m³/h减少到3.58 m³/h。

在处理完牛蹄塘组泥页岩地层卡钻事故后,针对该地层软弱、易膨胀垮塌等风险,改变了钻井液配方,采用的配方为:膨润土+褐煤树脂+广谱护壁剂Ⅲ型+抗高温抗盐降失水剂+石灰石粉^[15-16],提升钻井液密度至1.05 g/cm³,但是效果不理想,于井深1050.63 m处发生卡钻事故。

处理卡钻方法为用反丝钻杆打捞事故钻具,后用平底金刚石钻头+导向钻头磨掉未反出的事故钻具,同时改变钻井液配方,加入水溶硅酸钠(水玻璃),降低钻井液粘度,提高钻井液流动性及携渣性,提升钻井液密度至1.12~1.16 g/cm³。

正常钻进后,没有再出现埋钻事故。

5 结语

(1)本文对页岩气调查井雪峰山先导孔钻进过程中遇到的复杂地层进行了分类总结,并对在各类复杂地层钻进取心可能遇到的问题进行了分析,提出了相应的解决方法,在现场应用过程中,效果良好。

(2)针对钻井过程中遇到的钻井效率低、岩心采取率低等问题,采用了不提钻换内钻头拦簧护心绳索取心钻具,现场应用表明,该新型钻具能有效提高钻进效率及岩心采取率。

(3)针对钻井过程中遇到的漏失地层以及水敏性地层,分别采用对应的钻井液体系,减少了漏失地层的漏失量,同时有效解决了泥页岩地层中的井壁坍塌及卡钻问题。

参考文献(References):

- [1] 李鹭光,王红岩,刘合,等.天然气助力未来世界发展——第27届世界天然气大会(WGC)综述[J].天然气工业,2018,38(9):1-9.
LI Luguang, WANG Hongyan, LIU He, et al. Natural gas fueling the world's future: A brief summary from the 27th World Gas Conference (WGC) [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9):1-9.
- [2] 曾义金.页岩气开发的地质与工程一体化技术[J].石油钻探技术,2014,42(1):1-6.
ZENG Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1):1-6.
- [3] 张所续.世界页岩气勘探开发现状及我国页岩气发展展望[J].中国矿业,2013,22(3):1-3,11.
ZHANG Suoxu. The exploration and development situation of

- world shale gas and development of China's shale gas outlook [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(3): 1-3, 11.
- [4] 杨芳, 陈师逊. 深部地质钻探钻孔结构设计与施工分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(11): 21-26.
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geo-drilling boreholes [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11): 21-26.
- [5] 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.
- [6] 卢予北, 吴焯, 陈莹. 页岩气钻探关键技术问题分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(S1): 27-31.
LU Yubei, WU Ye, CHEN Ying. Key technical analyze and research on shale gas drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(S1): 27-31.
- [7] 张英传. 新疆昌吉庙煤1井钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(8): 41-44.
ZHANG Yingchuan. Drilling construction technology of Well Miaomei-1 of Xinjiang Changji [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(8): 41-44.
- [8] 陈云龙, 阮海龙, 朱慈广, 等. 松软泥砂地层取心钻具的设计及应用[J]. 地质装备, 2018, 19(6): 25-28.
CHEN Yunlong, RUAN Hailong, ZHU Ciguang, et al. Design and application of core drilling tools in soft mud sand stratum [J]. Geologic Equipment, 2018, 19(6): 25-28.
- [9] 卢春华, 鄢泰宁, H.T. 叶戈罗夫. 提高复杂地层取心质量的新型钻具[J]. 地质与勘探, 2009, 45(2): 112-114.
LU Chunhua, YAN Taining, EGOROVHT. New drilling tools for improving core recovery in complex strata [J]. Geology and Exploration, 2009, 45(2): 112-114.
- [10] 韩毅, 张绍和, 白锐, 等. 囊袋多节捆绑式绳索取心钻具的设计与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 220-224.
HAN Yi, ZHANG Shaohe, BAI Rui, et al. Design and application of bag multi section bundled wire line coring tool [J]. Coalfield Geology and Exploration, 2019, 47(5): 220-224.
- [11] Germanovich L N, Dyskin A V. Fracture mechanisms and instability of openings in compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37: 263-284.
- [12] S.L. Sakmar. Shale gas developments in north America: An overview of the regulatory and environmental challenges facing the industry [J]. SPE 144279, 2011.
- [13] Padila Aaron. Social responsibility & management systems: Elevating performance for shale gas development [J]. SPE 156728, 2012.
- [14] Hummes Olof, Bond Paul, Jones Anthony, et al. Using advanced drilling technology to enable well factory concept in the Marcellus shale [J]. SPE 151466, 2012.
- [15] Valery A. Karsakov. Decision for optimum number of well pads during phase of field development design [J]. SPE 171299, 2014.
- [16] 牛新明. 涪陵页岩气田钻井技术难点及对策[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(4): 1-6.
NIU Xinming. Drilling technology challenges and resolutions in Fuling Shale Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 1-6.

(编辑 李艺)