

岩溶地貌区浅层孔隙压力剖面的构建与 钻探工艺探讨

孟祥龙^{1,2}, 李大勇^{1,2*}, 甘新科³, 王胜建^{1,2}, 迟焕鹏^{1,2}, 朱迪斯^{1,2}, 岳伟民^{1,2}, 苑 坤^{1,2}

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质调查局非常规油气地质重点实验室, 北京 100083; 3. 新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要:岩溶地貌区浅部地层钻探过程中发生大量漏失、涌水等复杂情况,地层中广泛发育的缝洞网络形成了流体运移通道,而钻井液和地层水之间的压差也是重要的影响因素,常规孔隙压力预测方法无法对浅层孔隙压力实现有效表征。为探索岩溶地貌区浅层孔隙压力的实际分布情况,基于水文地质学和流体力学原理,构建了基于地下水实际分布的浅部地层孔隙压力剖面,并利用黔西探井钻探实例验证了剖面的有效性,结果表明岩溶地貌区浅层存在多个压力分区且与地下水的分布密切相关:地下水位以上为无孔隙压力;潜水层孔隙压力的计算应以地下水面为基线,是典型的低压区;承压水层的孔隙压力取决于补给区与排泄区位置差异,可能表现为高压、低压或常压。分析了堵漏材料、清水钻进及空气潜孔锤钻进在岩溶地貌区的适应性,建议在钻井设计中充分利用水文地质资料构建浅层压力剖面,据此选择钻探工艺或钻探工艺组合并确定各开次钻探深度,以避免钻井复杂情况,提高钻探效率。本研究能够为岩溶地貌区钻探工程设计与实施提供参考。

关键词:岩溶地貌区;水文地质资料;浅层孔隙压力;井漏;井涌;钻探工艺

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0141-05

Construction of shallow pore pressure profile and exploration of drilling technology in karst landform areas

MENG Xianglong^{1,2}, LI Dayong^{1,2*}, GAN Xinke³, WANG Shengjian^{1,2},

CHI Huanpeng^{1,2}, ZHU Disi^{1,2}, YUE Weimin^{1,2}, YUAN Kun^{1,2}

(1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 3. Xinjiang Yaxin Coalbed Methane Investment and Development (Group) Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 830063, China)

Abstract: During the drilling process of shallow strata in karst landform areas, a large number of complex situations such as leakage and water inflow occur. The widely developed fracture and cave network in the strata forms fluid migration channels, and the pressure difference between drilling fluid and formation water is also an important influencing factor. Conventional pore pressure prediction methods cannot effectively characterize shallow pore pressure. To explore the actual distribution of shallow pore pressure in karst landform areas, a shallow pore pressure profile based on the actual distribution of groundwater was constructed based on hydrogeological and fluid mechanics principles. The effectiveness of the profile was verified by an exploration well drilling in west Guizhou Province. The

收稿日期:2024-08-24; 修回日期:2024-10-18 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.018

基金项目:中国地质调查局油气资源调查中心科技创新基金项目“渝东二叠系大隆组硅质岩储层可压裂性评价研究”(编号:油科创[2023]-QN02);中国地质调查局地质调查项目“重点参数井钻探及配套技术应用”(编号:DD20242400)

第一作者:孟祥龙,男,汉族,1997年生,助理工程师,石油与天然气工程专业,研究方向为石油工程岩石力学,北京市海淀区北四环中路267号
奥运大厦, mengxianglong001@mail.cgs.gov.cn。

通信作者:李大勇,男,汉族,1971年生,高级工程师,钻井工程专业,从事钻井工程技术研究及管理工作,北京市海淀区北四环中路267号奥运大厦, brv-lee@163.com。

引用格式:孟祥龙,李大勇,甘新科,等.岩溶地貌区浅层孔隙压力剖面的构建与钻探工艺探讨[J].钻探工程,2025,52(3):141-145.

MENG Xianglong, LI Dayong, GAN Xinke, et al. Construction of shallow pore pressure profile and exploration of drilling technology in karst landform areas[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 141-145.

results showed that there were multiple pressure zones in the shallow layer of karst landform areas, which were closely related to the distribution of groundwater. No pore pressure exists above the groundwater level. The calculation of pore pressure in the groundwater layer should be based on the groundwater surface, which is a typical low-pressure zone. The pore pressure of a confined aquifer depends on the difference in location between the recharge and discharge zones, and may manifest as high pressure, low pressure, or normal pressure. The adaptability of plugging materials, clean water drilling, and air down the hole hammer drilling in karst landform areas are analyzed. It is recommended to fully utilize hydrogeological data in drilling design to construct shallow pressure profiles, based on which, selecting drilling processes or drilling process combinations, and determining the depth of drilling for each drilling section to avoid complex drilling situations and improve drilling efficiency. This study can provide reference for the design and implementation of drilling projects in karst landform areas.

Key words: karst landform; hydrogeological data; shallow pore pressure; well leakage; well surge; drilling technology

0 引言

我国南方页岩气资源所在的岩溶地貌区工程地质条件复杂,裂缝、溶洞、暗河发育,部分地区高山林立,地形切割严重,目前已开发的川东南、滇黔北的长宁—威远^[1]、宣汉—开江^[2]、昭通^[3]等区块以及中国地质调查局在黔西等页岩气勘探新区部署的探井^[4-6]均报道浅层钻探发生大量失返性漏失、坍塌、涌水等复杂情况,严重影响了钻探工程进度,同时也造成了大量的经济损失,给页岩气勘探带来了严重的挑战。

目前,岩溶地貌区钻探漏失的原理及应对的钻探工艺已经进行了大量的探索与实践^[7-11],岩溶地层广泛发育的裂隙及溶洞是重要的漏失通道。另一方面,流体压差也是漏失发生的必要条件,常规孔隙压力预测方法及工程实践中普遍认为浅部地层为常压地层,即从地表起算的静水压力(压力系数为1),这难以解释清水钻进依旧发生严重漏失的现象。水文地质学的研究表明浅层地下水相对于深层地下水运移更加活跃,且地下水并非从地表开始充满岩土体的孔隙^[12]。地下水位对深层孔隙压力的影响已经被关注^[13-14],但在浅层钻探中尚无相关研究的报道,且石油工程中鲜有针对区域水文地质观测的报道。

本文根据岩溶地貌区的水文地质特征和流体力学原理,形成了基于地下水实际分布的浅部地层压力剖面的构建方法,并利用黔西地区一口探井钻探及简易水文观测资料对浅层孔隙压力的分布进行了描述,分析了其钻探过程中漏失及涌水等现象的内在机制,并分析了目前各种钻探工艺在岩溶地貌区浅层钻探的适应性。

1 岩溶地貌区的水文地质特征

岩溶地貌由地表出露的可溶性岩石受侵蚀而成。我国南方岩溶分布范围广,类型众多,以川渝东部,湘黔桂斜坡山地区域为例,由于强烈而广泛的地质构造运动,该区地形切割强烈,主要表现为峰丛洼地和峰丛谷地,山峰陡峭耸立,地面高差巨大,地表以前三叠系的致密、坚硬的碳酸盐岩为主,虽然其本身孔隙度小,但裂缝发育强烈,加之富含CO₂流水的不断侵蚀,裂隙不断扩大,形成复杂的缝洞网络,相对于岩石本身的孔隙而言,这些开启的缝洞网络渗透性极好,地下水能够在其中顺畅的运移。在钻探工程中,这些缝洞网络也成为了地层流体和钻井液的交换通道^[12,15-17]。

密布的缝洞网络加之季风气候使岩溶地貌区水系发育,地下水运动强烈,地下水主要以潜水和承压水两种形式赋存,自上而下形成一个潜水流体系统和若干个承压水流体系统^[12]。图1表示了岩溶地貌区的地下水系统,大气降水渗入地表向下运移,达到某一深度时岩土体中的缝洞网络被水所充满,形成地下水面,而在这个水面以上,水是以吸附在土壤或岩石的孔隙壁的形式存在,也就是从这个水面开始,地下水在岩石的缝洞中连续分布,产生连续的孔隙压力,即图中所示潜水面。地层中也存在一些渗透率极低的弱透水层,承压水是充满于两个弱透水层之间的含水层中的水,补给主要来源于远端的补给区,并接受上层潜水透过弱透水层的少量补给。

浅层地下水不均匀分布使地层中的孔隙压力并非从地表向下均匀升高。陆地钻探中用静水压力表示地下水产生的压力,由于地下水位一般低于地表,从地表起算的静水压力将高过孔隙压力,但全球大部分地区地下水位(潜水面) ≥ 10 m,且多为

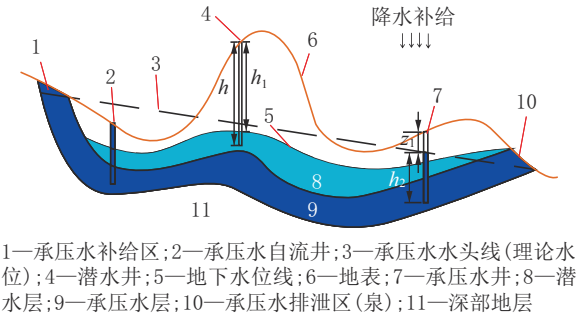


图1 岩溶地貌区的地下水系统示意(修改自文献[12-13])

Fig.1 Schematic diagram of groundwater system in karst landform area

第四系土壤,渗透性较差,即便从地表起算引起的钻井液损耗也不明显,岩溶地区由于地形起伏大、缝洞网络充分通连,地下水分布复杂,一些地区地下水位甚至可达200 m以深,一些地方水文地质条件复杂,存在低渗地层封隔的高压水层,因此浅部地层孔隙压力的计算要考虑地下水的实际分布。

2 岩溶地貌区浅部地层孔隙压力的计算

基于地下水的分布情况和流体力学原理,能够实现对浅层孔隙压力的计算,其关键在于计算基线的选择,计算数据参考图1的标注。

对于地下水位以上的地层,吸附在孔隙壁上的水并非以连续的水体存在,因此孔隙压力为0,地层不具备任何承压能力。

对于潜水部分,地下水一个以地下水面为自由表面的开放体系形式存在,潜水区的孔隙压力的计算应以地下水面基准,这与海洋钻探孔隙压力计算需附加海水深度正相反,该区的计算公式为:

$$P_1 = \rho g(h - h_1) \quad (1)$$

式中: ρ ——地下水密度; g ——重力加速度; h ——测点垂深; h_1 ——地下水水位。

因此,在该层流体系统内,其孔隙压力小于以地面起算的静水压力,差值恒定为地下水位至地表所亏空的压力。若以压力系数来表示,该层位的压力系数是变化的,从上向下逐渐增大,只要该层足够厚将逐渐接近1。

当有承压水层存在时,则应由补给区和排泄区的高差引起的压力降来控制实际的压力,水文地质学中用水头高度来表示承压水的理论水面高度,以图1中承压水井为例,承压水的理论水位线位于

地表以下 z_1 处,因此承压水的压力为:

$$P_2 = \rho g h_2 = (h - z_1) \rho g \quad (2)$$

式中: h_2 ——承压水水头高度。

因此,在每一个承压水系统内,任意一点的孔隙压力与补给区和排泄区的高差引起的压力降有关,理论水面可能在地表以上、以下或与地表等高,因此其地层压力可能表现为低压、超压或者常压。该层的压力系数也是从上向下逐渐增大,但通常不从0开始。

3 实例分析

黔紫页1井是在贵州紫云部署的一口页岩气探井,自地表依次钻遇三叠系罗楼组,二叠系领蓢组,四大寨组,主要为岩溶发育的灰岩地层并夹杂泥岩、碎屑岩层,钻探过程中发生了漏失、涌水等复杂情况。基于钻探过程中的简易水文观测情况,该井表层地下水位约100 m,隔水层在374 m处,承压水水头约30 m(由于上部地层中存在裂缝,实际承压水水头高度应在30 m以浅,这里按30 m计算),由此可计算该井浅层压力系数 K 分布(为了便于工程应用,这里采用压力系数表示),计算结果如式(3)所示,据此绘制浅层孔隙压力剖面,见图2。

$$K = \begin{cases} 0 & (h < 100) \\ (h - 100)/h & (100 < h < 374) \\ (h - 30)/h & (h > 374) \end{cases} \quad (3)$$

压力剖面显示:浅层存在3个压力分区,在地下水位之上,0~100 m孔隙压力为0(无压力段),从地下水位开始,压力系数逐渐升高,但也远低于1,直至374 m处才达到0.74(低压段),在穿越隔水层之后陡增至接近1(常压段)。

孔隙压力剖面能够解释钻探过程漏失及涌水现象。导管段钻探由于地层无承压能力(孔隙压力为0)遇到裂隙则会发生大量漏失,漏失与钻遇裂隙数量和开度有关,该段导管段采用清水钻进至36.76 m,漏失2380 m³。一开使用空气+泡沫钻进(出水后),钻进至374 m地层涌水,强钻至415 m固井。该开次同时钻穿了上部的低压、无压层位及下部的常压层位,大量的涌水使得钻探工程陷入两难境地,继续将充气泡沫不断注入,必然会使丰富的地下水源源不断的涌出,而上部低压层位未封堵,改用常规钻井液体系必然会大量的漏失。根据孔

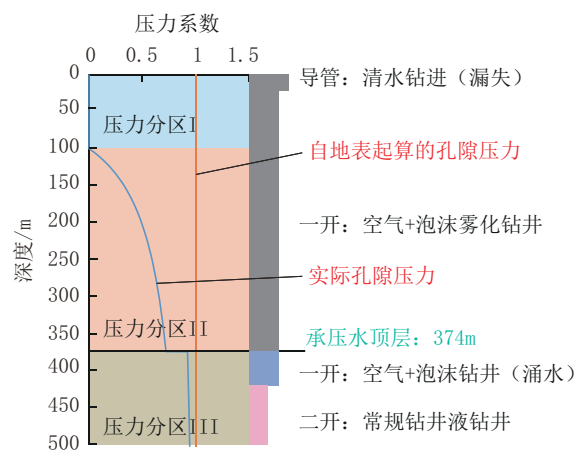


图2 黔紫页1井浅层孔隙压力剖面

Fig.2 Pore pressure profile of Well QZY-1

隙压力剖面,在进入压力分区III之后应立即封固上部地层,改用常规钻井液体系钻进,一开固井封堵了低压层位后,井内液柱压力由承压水层提供的孔隙压力,接近常压地层,采用清水钻进出现渗漏,改用常规钻井液体系+堵漏剂实现了二开正常钻进。

4 岩溶地貌区浅层钻探工艺技术探讨

利用地层压力剖面可对井身结构进行优化,但复杂水文地质条件可能伴随多个压力分区,且每个压力分区内部的压力系数是变化的,受成本及工具的限制难以在表层采用较多开次进行封隔,将井身结构设计和钻探工艺相结合,在钻探之前进行溶洞探测避免钻遇大型溶洞,并充分利用已有水文地质资料及探井钻探资料构建浅层压力剖面,结合浅层压力的分布特征选择合适的钻探工艺或钻探工艺组合来确定设计各开次钻探深度,有助于避免钻井复杂情况的发生、提高钻进效率。目前多种钻探工艺已经在岩溶地貌区钻探过程中应用,结合岩溶地貌区地层压力的特征,主要的钻探工艺及其特点如下:

(1) 钻井液堵漏材料:堵漏材料通过钻井液循环封堵井壁岩石孔隙及裂缝实现井筒强化,能够有效提高井筒承压能力,从而解决钻探漏失问题^[3,7],小型的裂缝性漏失可采用合理的堵漏钻井液体系进行封堵^[18],但对于岩溶地貌区常见的大型缝洞造成的失返性漏失,仅靠堵漏材料可能无法解决^[19]。对于地下水活跃的浅表地层,堵漏材料可能经由大型缝洞进入地下水循环,影响生态环境。

(2) 清水钻进:该方法是指使用清水为钻井液

顶漏钻进,一般在堵漏无效的失返性漏失发生后采用,此时清水钻井液的液柱压力仍将高于地层压力,因此清水携带岩屑通常不会从井口返出而进入地层中的缝洞,该方法的优势在于能够直接利用石油钻机,是失返性漏失地层钻探的重要解决措施。由于该方法钻探过程需要消耗大量水,受到水供应的限制,且其无法在井筒中形成液柱支撑井壁,对于易垮塌地层也难以运用^[8]。

(3) 空气潜孔锤钻进:该钻探技术以高速的空气作为循环介质,在岩溶地貌区浅层钻探工程中有巨大的应用潜力。空气的密度极低,钻进过程的循环压力也极低,且空气的成本可忽略,由于循环过程中空气速度高,即使地层中存在一些缝洞岩屑也能返出,且对于易垮塌地层,可采用潜孔锤-跟管钻探^[8]工艺,随钻下入套管保持井壁稳定,但该技术受地层出水的影响,出水量大则影响岩屑的排出同时将大量地下水带到地面。因此,该技术适用于出水量少的地层,对岩溶地貌区浅表地带的无压及低压地层尤为适用,可用于导管及一开等浅表层钻进,一旦出水量大影响钻进则需转换为清水钻进或其他方式。此外,该技术不采用添加剂作为循环材料,具有环保优势。

利用黔紫页1井钻探资料及孔隙压力剖面可对该井所在区域钻探工艺技术进行优化。该区域浅部地层为无压及低压地层,下部存在一个近常压的承压水层,为岩溶地貌区典型的“无压-低压-常压”压力模式,利用水文地质资料可分析各含水层的横向分布情况得到目标井位的实际压力剖面。以黔紫页1井的压力剖面为例,由钻探资料可知地层不易封堵,清水钻进开孔会造成大量清水消耗,宜采用空气钻进开孔,导管用于封隔上部松散地层。一开次深度可优化为承压水界面以封堵上部低压地层,由于上部低压层段较长,该开次仍可采用空气钻进方式,若地层出水量大无法钻进则转换为清水钻进。二开次钻遇地层接近常压,采用常规钻井液体系配合堵漏剂实现正常钻进。

5 结论

本文对岩溶地貌区浅层压力分布进行了探索,基于地下水的分布构建了浅层压力剖面,并利用浅层孔隙压力剖面解释了黔西探井漏失和涌水的机制,分析岩溶地貌区的浅层典型钻探工艺的特点,

主要认识如下:

(1)岩溶地貌区浅层存在多个压力分区且与地下水的分布密切相关:地下水位以上无孔隙压力;潜水层孔隙压力的计算应以地下水面为基线,是典型的低压区;承压水层孔隙压力取决于补给区与排泄区的位置差异,可能表现为高压、低压或常压。

(2)岩溶地貌区钻井设计应充分利用区域水文地质资料及邻井钻探水文观测资料构建浅层压力剖面,结合浅层压力的分布特征选择合适的钻探工艺或钻探工艺组合来确定设计各开次钻探深度,这将有助于避免钻井复杂情况,提高钻探效率。

参考文献(References):

- [1] 万夫磊.长宁页岩气表层防漏治漏技术研究[J].钻采工艺,2019,42(4):28-31.
WAN Fulei. Research on Changning shale gas surface leakage prevention and control technology [J]. Drilling & Production Technology, 2019,42(4):28-31.
- [2] 王维斌,马廷虎,邓团.川东宣汉-开江地区恶性井漏特征及地质因素[J].天然气工业,2005,25(2):90-92.
WANG Weibin, MA Tinghu, DENG Tuan. Characteristics and geological factors of vicious lost circulation in Xuanhan-Kaijiang area of east Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 2005,25(2):90-92.
- [3] 张志磊,胡百中,卞维坤,等.昭通页岩气示范区井漏防治技术与实践[J].钻井液与完井液,2020,37(1):38-45.
ZHANG Zhilei, HU Baizhong, BIAN Weikun, et al. Mud loss control techniques and practices in Zhaotong demonstration Zone of shale gas drilling [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020,37(1):38-45.
- [4] 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.
- [5] 郭军,陈相霖,赵训林,等.桂中-南盘江地区黔水地1井钻井关键技术[J].断块油气田,2021,28(3):423-427.
GUO Jun, CHEN Xianglin, ZHAO Xunlin, et al. Key drilling technologies for well Qianshuidi 1 in Guizhong-Nanpanjiang area [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021,28(3):423-427.
- [6] 韩玉泉,王亚宁,陈忠泉.黔紫页1井钻井液施工总结[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(3):101-102.
HAN Yuquan, WANG Yaning, CHEN Zhongquan. Summary of drilling fluid construction for Well Qianziye 1[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018,38(3):101-102.
- [7] 曹华庆,燕建成,龙志平.川东南页岩气井岩溶浅表层安全高效钻井技术[J].石油钻探技术,2023,51(2):22-28.
CAO Huaqing, YAN Jiancheng, LONG Zhiping. Safe and efficient drilling technologies for shallow karst strata for shale gas wells in southeast Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023,51(2):22-28.
- [8] 迟焕鹏,胡志方,王胜建,等.黔西地区表层易漏地层钻井工程技术[J].钻探工程,2021,48(4):66-72.
CHI Huanpeng, HU Zhifang, WANG Shengjian, et al. Drilling techniques for thief zones in surface formations in Western Guizhou[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):66-72.
- [9] 万夫磊,王培钢,范生林.川南页岩气钻井井漏特征及堵漏技术研究与应用[J].石油科技论坛,2022,41(2):85-91.
WAN Fulei, WANG Peigang, FAN Shenglin. Leakage characteristics of shale gas wells drilled in southern Sichuan and plugging technology research and application [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022,41(2):85-91.
- [10] 杨哲,李晓平,万夫磊.四川长宁页岩气井身结构优化探讨[J].钻采工艺,2021,44(3):20-23.
YANG Zhe, LI Xiaoping, WAN Fulei. Discussion on optimization of wellbore structure in Changning shale gas [J]. Drilling & Production Technology, 2021,44(3):20-23.
- [11] 万夫磊,刘洪彬,齐玉.宁213井区浅表层环保钻井技术研究[J].钻采工艺,2018,41(6):13-15,26.
WAN Fulei, LIU Hongbin, QI Yu. Research on shallow surface environmental protection drilling technology in Ning213 well block [J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(6):13-15,26.
- [12] 王大纯.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1986.
WANG Dachun. Fundamentals of Hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- [13] 韩晓洁,范昌育,高潮,等.零水势面的确定与地层压力体系的划分——以鄂尔多斯盆地延安气田为例[J].天然气工业,2021,41(7):33-40.
HAN Xiaojie, FAN Changyu, GAO Chao, et al. Determination of zero water potential surface and division of formation pressure system: A case study of Yan'an Gas Field in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021,41(7):33-40.
- [14] Stewart S A, Albertz M. Hydrostatic pore water pressure revisited [J]. Basin Research, 2023,35(1):172-186.
- [15] 陈文俊,黄显强,宋怀则,等.中国南方岩溶地下水[J].地质学报,1981(2):149-160.
CHEN Wenjun, HUANG Xianqiang, SONG Huaize, et al. Karst groundwater in southern China [J]. Journal of Geology, 1981(2):149-160.
- [16] 曹伯勋.地貌学及第四纪地质学[M].武汉:中国地质大学出版社,1995.
CAO Baixun. Geomorphology and Quaternary Geology [M]. Wuhan: The Press of The China University of Geosciences, 1995.
- [17] 陈涛,赵华宣,李强,等.贵州裸露型岩溶地下河系统污染防治技术——以遵义坪桥地下河系统污染防治工程为例[J].钻探工程,2024,51(3):60-68.
CHEN Tao, ZHAO Huaxuan, LI Qiang, et al. Pollution prevention technology for exposed karst underground river systems in Guizhou: Taking the pollution prevention project of Pingqiao Underground River System in Zunyi as an example [J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):60-68.
- [18] 易浩,郭挺,孙连忠.顺北油气田二叠系火成岩钻井技术研究与应用[J].钻探工程,2024,51(1):131-138.
YI Hao, GUO Ting, SUN Lianzhong. Study and application of drilling technology for Permian igneous rocks in Shunbei Oil and Gas Field [J]. Drilling Engineering, 2024,51(1):131-138.
- [19] 赵志涛,蒋睿,卢彤,等.下扬子页岩气地质调查井的溶洞识别与处理[J].钻探工程,2022,49(5):22-29.
ZHAO Zhitao, JIANG Rui, LU Tong, et al. Karst cave identification and treatment for a Lower Yangtze shale gas geological survey well [J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):22-29.

(编辑 王文)