

舞阳盐矿水平对接井近点反拉施工技术

蒋祥光, 严伟超*, 洪毅, 杨怡, 叶辉兵, 陈维保, 万宇航

(湖北省地质局第七地质大队, 湖北宜昌 443000)

摘要: 由于单井矿盐开采存在生产效率低、成本高、安全风险高、卤水溶解度不确定、环境影响大等问题, 近年来水平对接井钻井技术不断发展和完善。舞阳盐矿 JSV005-JSV006 井是部署在舞阳凹陷的一组水平对接井, 本文从井身结构、钻具组合、钻进参数、钻井液性能、定向井眼轨迹控制及地质导向技术、预防井下故障措施等多方面对两井组的对接连通进行了系统的总结, 重点阐述了采用近点反拉技术解决水平位移不足的问题, 为今后矿盐的开采提供了技术支撑。

关键词: 对接井; 水平井; 定向钻井; 近点反拉; 盐井开采

中图分类号: P634.7; TE243 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0398-06

Near-point reverse pull technology of horizontal intersected wells in Wuyang Salt Mine

JIANG Xiangguang, YAN Weichao*, HONG Yi, YANG Yi, YE Huibing, CHEN Weibao, WAN Yuhang

(The Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Yichang Hubei 443000, China)

Abstract: Due to issues such as low production efficiency, high costs, high safety risks, uncertain brine solubility, and significant environmental impact associated with single-well salt mining, the technology for drilling horizontal intersected wells has continuously developed and improved in recent years. The JSV005-JSV006 wells in the Wuyang salt mine are a set of horizontally intersected wells deployed in the Wuyang depression. This paper systematically summarizes the connection and communication of these wells from various aspects, including wellbore structure, drilling assembly, drilling parameters, drilling fluid performance, directional well trajectory control and geological steering technology, and measures to prevent downhole failures. The focus is on addressing the issue of insufficient horizontal displacement using near-point pullback technology, providing technical support for future salt mining operations.

Key words: intersected well; horizontal wells; directional drilling; near-point pullback; salt well mining

0 引言

舞阳凹陷盐矿资源丰富, 储量较大。主要盐矿类型包括岩盐和卤水盐。该地区已探明的盐层有40多层, 且盐层厚度不均, 大部分盐层厚度较小。传统的开采方式是单井水溶造腔方法, 通过提升腔体高度以增加腔体体积。然而在层状盐岩中, 由于

盐层厚度有限, 该方法形成的腔内有效空间受到限制^[1-2], 如何安全、高效钻井开采^[3-6]是本地区盐层开采的主要问题。很多学者对水溶开采开展了研究, 杨春和等^[7]提出双井小间距水溶造腔技术, 该方法通过控制双井间距来增大溶腔直径, 从而在有限厚度盐层内形成更大容积的腔体, 使盐层的利用效率

收稿日期: 2024-06-26; 修回日期: 2024-07-06 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.064

基金项目: 湖北省地质局项目“湖北省中深层地热井完井技术研究”(编号: KJ2022-26)

第一作者: 蒋祥光, 男, 汉族, 1996年生, 工程师, 硕士, 石油与天然气工程专业, 从事钻探工程技术研究与实践工作, 湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号, 2413722144@qq.com。

通信作者: 严伟超, 男, 汉族, 1981年生, 工程师, 探矿工程专业, 从事地质钻探工作, 湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号, 5588664@qq.com。

引用格式: 蒋祥光, 严伟超, 洪毅, 等. 舞阳盐矿水平对接井近点反拉施工技术[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 398-403.

JIANG Xiangguang, YAN Weichao, HONG Yi, et al. Near-point reverse pull technology of horizontal intersected wells in Wuyang Salt Mine[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 398-403.

更高^[8]。由于水平盐腔可有效利用厚度较薄的盐岩资源,提高盐层空间利用率,相比传统方法形成的竖直腔体更适于中国层状盐岩的开采。水平对接井采卤技术由于其安全高效、生产事故少、可控性高和产能丰富等优点,在中国盐矿开采中被广泛使用^[9]。康延鹏等^[10]提出水平多步法造腔,有效提高较纯的薄盐层溶腔容积,提高了盐层利用率,该方法是由水平对接井造腔方法演化而来。施锡林等^[11]提出在高杂质盐矿中改造采卤溶腔的方法,对促进盐矿开采可持续发展有重要的推动作用。但是这种技术同样需要采用水平对接井造腔方法建造出足够大容积的水平盐腔。

为了提高盐矿开采效率,促进地方经济发展,

在河南舞阳盐矿建造了一组水平对接井。通过定向井眼轨迹控制及地质导向技术、防井下故障措施和多方面的配合,两井顺利对接连通,实现了采卤生产。

1 地理概况和地层特征

本组对接井位于河南省漯河市舞阳县孟寨镇魏家村南,是河南金大地化工有限责任公司部署在舞阳凹陷孟寨次凹的南部斜坡带的一组生产井,包括JSV006水平井和JSV005直井。附近有居民,交通便利,用电方便。

该地区地质构造主要受华北克拉通西缘的构造影响^[12],主要构造风貌为背斜和断裂带。JSV006井钻穿地层情况如表1。

表1 地层及岩性描述

系	统	组	厚度/m		岩性简述
			分层	累计	
第四系	全新统	平原组	75	75	杂色砂砾层,浅棕黄色粘土层
上第三系	中新统	上寺组	792	717	浅黄、灰黄、杂色细砂砾岩,砾状砂岩与灰黄、棕红色泥岩呈不等厚互层
		廖庄组	1445	653	上部为灰白色砾状砂岩与深灰色泥岩互层,下部为杂色砾状砂岩,浅灰色含砾砂岩与棕、灰黄色泥岩互层
下第三系	渐新统	核桃园组	2394	949	上部为灰色泥岩夹含膏泥岩,下部为含盐系。由深灰色泥岩,含膏泥岩与灰白,灰黑色盐岩呈不等厚互层组成

2 钻井过程

2.1 设备选取

根据地层和钻井设计要求,主要钻井设备包括ZJ30型钻机一台,机高4.6 m,配备2FZ35-35型防喷器,G12V190B型柴油机3台,F-1300型泥浆泵2台,四级固控系统一套。

2.2 定向井眼轨迹

直井设计:按常规开发直井设计及施工完井,钻穿目的盐层,确定目的盐层垂深和厚度。

水平井设计:直一增一稳是最简单和目前水平井设计优先考虑的方法^[13]。这种结构也更利于下部钻井的顺利施工。但由于两井间距较小,靶前位移不足,为了保证快速、安全钻井,提高盐矿采收率,工程设计从800 m先拉反向负位移,后降斜增方位增斜中A、B靶点,B靶点为水平井与直井的连通点。为满足设计要求,全井段施工必须以定向钻进为主,特别是到后期进入核桃园组地层,测斜过程易发生粘卡,容易发生井下事故。

对接设计:钻完直井后下中油管,用水将下部盐层融化,形成一个腔体,然后水平井通过定向数据往腔体钻进,井眼数据的准确性、溶腔的大小都决定着能否一次连通。JSV005井测井报告显示,目的盐层垂深为2216.03~2122.02 m,为了提高对接的成功率,将JSV006井对接点垂深设置在2120 m,避免对接时脱离产层。

2.3 井身结构

根据地层情况和钻井设计,两井的井身结构见表2,对接示意图1。

2.4 钻井参数

不同井段的钻井参数如表3所示。

2.5 钻具组合

根据井深和地层特点选择不同的钻具组合,JSV006-JSV005井钻具组合见表4。

2.6 钻井液

上部地层主要采用低固相常规钻井液体系进行钻进,配方为:清水+5%~6%膨润土+0.1%~

表2 井身结构

井号	开次	钻头尺寸/	井深/	套管尺寸/	套管下深/
		mm	m	mm	mm
JSV006	1	346	310	273	310
	2	241.3	2250	177.8	2240.31
	3	152.4	2394		
JSV005	1	346	316	273	308
	2	241.3	2350	177.8	2118.08

0.2%Na₂CO₃。性能:粘度40~50 s,密度1.05~1.20 g/cm³。

进入盐层段前选择更换饱和盐水钻井液体系,防止盐层溶解造成井径的扩大。

饱和盐水钻井液主要配方:清水+2%~3%膨润土+1.0%~1.5%抗盐增粘剂+1.5%~2.0%CMC+0.1%~0.2%絮凝剂+30%NaCl+0.2%~0.4%烧碱。由于盐矿具有一定的水溶性和蠕变性,对钻探施工造成了一定的难度,因此在施工过程中要注意及时调整钻井液的烧碱用量,确保pH值始终维持在9~11之间,使钻井液的添加剂发挥最佳的效果。

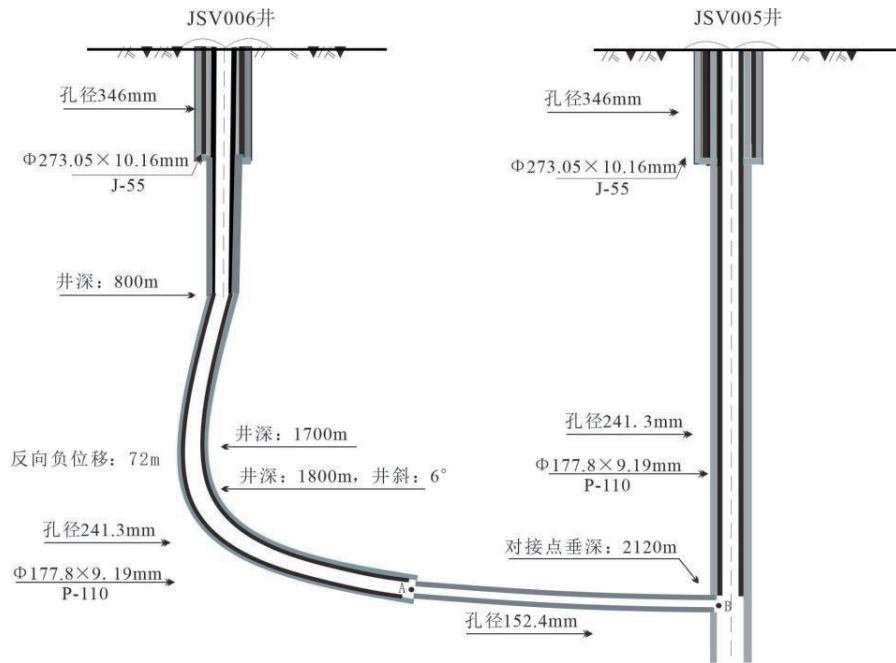


图1 JSV006井与JSV005井对接示意

表3 JSV006-JSV005井钻井参数

井号	井段/m	钻头		钻进参数		
		外径/mm	类型	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵压/MPa
JSV005	0~316.03	346	PDC	9~20	螺杆	1~2
	316.03~653.28	241.3	PDC	10~20	螺杆	2~3
	653.28~930.77	241.3	牙轮	30~40	螺杆	3~5.5
	930.77~1735.84	241.3	PDC	30~40	螺杆	6~7
	1735.84~2350.00	241.3	牙轮	50~80	螺杆	7~8.5
JSV006	0~310.00	346	PDC	5~20	螺杆	4~5
	310.00~640.76	241.3	PDC	30~40	螺杆	5~7
	640.76~840.09	241.3	牙轮	50~80	螺杆	5~7
	840.09~1706.04	241.3	PDC	40~50	螺杆	8~9
	1706.04~2250.00	241.3	牙轮	50~100	螺杆	8~12
	2250.00~2394.00	152.4	PDC	20~40	螺杆	12~16

表4 JSV006-JSV005井钻具组合

井号	井段	钻具组合
JSV005	一开直井段	Ø346 mm钻头+Ø185 mm螺杆(1.25°)+Ø159 mm无磁钻铤+Ø159 mm钻铤+Ø127 mm钻杆+133 mm×133 mm方钻杆
	二开直井段	Ø241.3 mm钻头+Ø185 mm螺杆(1.25°)+Ø159 mm无磁钻铤+Ø159 mm钻铤+Ø127 mm加重钻杆+Ø127 mm钻杆+133 mm×133 mm方钻杆
JSV006	一开直井段	Ø346 mm钻头+Ø185 mm螺杆(1.25°)+Ø159 mm无磁钻铤+Ø159 mm钻铤+Ø127 mm钻杆+133 mm×133 mm方钻杆
	二开直井段	Ø241.3 mm钻头+Ø185 mm螺杆(1.25°)+Ø159 mm无磁钻铤+Ø159 mm钻铤+Ø127 mm钻杆+133 mm×133 mm方钻杆
	二开造斜段	Ø241.3 mm钻头+Ø185 mm螺杆(1.5°)+Ø159 mm无磁钻铤+Ø127 mm加重钻杆+Ø127 mm钻杆+Ø127 mm加重钻杆+Ø159 mm钻铤+Ø127 mm钻杆+133 mm×133 mm方钻杆
	三开水平段	Ø152.4 mm钻头+Ø127 mm螺杆(1.25°)+Ø108 mm无磁钻铤+Ø89 mm加重钻杆+Ø89 mm钻杆+133 mm×133 mm方钻杆

3 关键钻井技术

3.1 定向井眼轨迹控制及地质导向技术

定向井眼轨迹控制在水平对接井施工中至关重要,特别是在复杂地层和要求精度高的对接作业中。施工中采取了以下技术措施,确保JSV005和JSV006井成功对接。

3.1.1 水平井直井段施工

水平井的直井段施工是定向井轨迹控制的基础,必须确保直井段的井斜在合理范围内^[14],以便后续的造斜和轨迹控制更加顺利。

(1)井斜控制:在直井段施工中,一般要求井斜 $>3^\circ$ 。为在开采过程中更好地保护套管,JSV006井设计800 m之前为直井段,井斜控制在 2° 以内。

(2)钻具组合优化:使用高刚性的钻具组合,可增加下部钻具的刚性,减少井斜的波动。在JSV006井的直井段,采用“钻头+螺杆+无磁钻铤+钻铤+钻杆+方钻杆”的常规钻具组合,钻铤长度尽量加长,使用大尺寸钻铤,提高下部钻具的刚性,保持井斜在设计范围内。

(3)实时测斜与调整:在钻进过程中,使用高频率的测斜数据实时监控井斜情况。对于井斜超出控制范围的情况,及时调整钻压、转速和钻具组合,确保井眼轨迹在预定的范围内。当井斜较小时,使用复合钻进提高钻井速度。

3.1.2 水平井增斜段的定向施工

在水平井的增斜段施工中,定向井眼的精确控制是保证井眼轨迹达到目标的关键。

(1)MWD技术的应用:在钻具组合中集成

MWD(随钻测量)系统,实时传输井斜、方位和工具面数据。

(2)造斜率控制:根据地层特性和井眼设计要求,选择合适的螺杆和钻具组合^[15],以达到所需的造斜率。由于JSV006井的井位限制,靶前位移不足。在800 m开始增井斜,拉靶前位移,然后降斜增方位,直至达到设计靶点。

(3)定向钻进操作:在定向钻进中,使用旋转导向工具(RSS)和高精度的定向钻具,精确控制井眼轨迹。钻进中及时了解地层情况,选择合适的钻井液和钻具组合,合理使用和维护钻具,以延长使用寿命和减少故障^[16]。

3.1.3 水平井水平段施工

水平段的施工是对接井成功的关键部分,必须确保井眼轨迹在盐层内的稳定性和精确性^[17]。

(1)地层识别与伽马测量:利用伽马测量系统来识别盐层的顶板和底板^[18],确保井眼始终位于目标层内。根据周围井的测井资料分析,目的盐层厚度只有5~6 m,倾角在 $8^\circ\sim 10^\circ$ 之间,通过伽马值曲线和地质模型,控制轨迹在距离盐层底部1 m左右,以保证在盐层内的稳定钻进。

(2)井眼轨迹预测与调整:结合地质模型和实时伽马数据,预测井眼的下一步轨迹,并根据预测结果进行调整。密切监测井眼轨迹的变化,确保不偏离目标区域。每钻50 m进行一次短程起下,及时清除岩屑床,防止盐结晶卡钻^[19]。

(3)摩阻控制与工具面管理:由于水平段井斜较大,摩阻高,必须合理控制工具面和摩阻^[20-21]。通

过调整钻压和转速来减少摩阻,并使用润滑剂改善钻进条件。工具面的管理则需要通过连续的测量和调整来保持井眼的稳定。在井眼对接过程中,特别是接近对接点时,需及时处理泵压异常和井口返量减小等问题,确保两井的顺利连通。

3.2 预防井下故障措施

(1)合理管理和使用钻具:加强日常中对钻具的使用、管理和维护。在下钻具之前,认真检查钻头水眼是否堵塞,钻具是否刺漏,丝扣是否紧好。根据地层特征和预期的钻进情况,选择适当的钻头类型和钻具组合。对于复杂地层或者易产生卡钻的情况,可以考虑使用特殊设计的钻头或者防卡钻具。

(2)钻井参数优化:根据实时地层反馈和钻进情况,调整钻进参数,包括钻压、转速、给进速度等,以适应不同的地层条件。通过优化钻井参数,可以减少井下故障的发生,提高钻井效率。

(3)井底清洁与钻井液循环:定期进行井底清洁,保持钻井液的良好循环状态,防止井底积聚岩屑和钻井液堵塞。适当添加润滑剂和减阻剂,改善钻井液的性能,减少卡钻的风险。

(4)井眼监测与应急处理:使用先进的监测设备实时监控井眼的状态,及时发现异常情况。建立详细的应急预案,包括应对井喷、井涌和卡钻等突发事件的处理措施,确保在紧急情况下能够快速响应。

(5)钻井液性能调整:根据地层条件,调整钻井液的配方和性能,特别是在进入盐层时,采用高矿化度和高抑制性的钻井液,可以防止盐层溶解和井径扩大。

(6)团队管理与培训:加强对钻井团队的管理和培训,提高操作人员的技术水平和安全意识。定期进行安全演练和技术培训,确保团队能够高效、安全地完成钻井任务。

4 施工难点及采取的措施

4.1 施工难点

JSV006井完钻井深2394 m,水平段长154 m,面临的技术问题比邻井更严峻,主要体现在:(1)靶前位移不足;(2)A点至连通段B点不在一个平面上。

4.2 针对性解决措施

4.2.1 优化井眼轨迹设计,增加反向负位移

靶前位移不足会导致井眼轨迹的优化受到限制,影响钻井效率和井眼轨迹的控制。在JSV006井的钻井过程中,为解决靶前位移不足的问题,采用了近点反拉措施,即增加“反向负位移”的方法。通过在井眼轨迹中进行连续的小角度逆向调整,增加井眼的水平位移,使井眼更早达到设计目标。具体实施步骤是:(1)反向调整:从800 m深度开始,每钻进100 m,逆向调整井斜 $0.5^{\circ}\sim 1^{\circ}$,在900~1700 m深度范围内,累计增加反向水平位移。(2)正向回调:在1700 m深度时,逐步将井斜调整回目标方向,每30 m段正向调整 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$,在1800 m深度时调整至 6° 的目标方向。通过反向与正向的连续调整,整体水平位移增加约72 m,确保井眼轨平稳过渡并准确到达设计靶点。

4.2.2 多段造斜法

A点至连通段B点不在一个平面上,这种情况增加了定向钻井的复杂性和风险。通过在A点和B点之间设计多个小角度的调整,使井眼逐步在垂直和水平两个方向上调整,最终使A点和B点位于同一平面内。在JSV006井的钻井过程中,从2240~2394 m深度,设置了多个小角度的调整点,最大角度调整至 15° ,确保井眼轨迹逐步平稳地过渡到目标平面。

5 施工效果

在舞阳盐矿JSV005和JSV006井的施工过程中,通过精细化的设计和先进技术的应用,取得了以下显著的施工效果。

(1)钻进速度提升、钻具寿命延长:通过优化的钻具组合和钻井参数,JSV005和JSV006井的钻进速度相比传统方法提高了约20%。有效缩短了施工周期。合理的钻具管理和使用,延长了螺杆和钻头的使用寿命,减少了更换频率,进一步降低了停工时间。

(2)对接成功率高:通过地质导向和实时轨迹调整,JSV005和JSV006井的井眼轨迹偏差控制在设计的2%以内,两井在盐层内的对接点实现了一次性成功连通,准确命中B靶点,确保了对接的顺利完成。

(3)施工安全性提高:整个施工过程中,JSV005

和JSV006井未发生重大井下事故,确保了人员和设备的安全,施工风险得到了有效地控制。井下故障的发生率降低了约30%,显著提高了施工的顺利性和安全性。

(4)经济效益提升:通过优化施工工艺和管理,JSV005和JSV006井的总施工成本相比传统方法降低了约15%,显著提高了项目的经济效益。成功的对接和高效的开采,使得盐矿的产量增加了约10%,为企业带来了显著的经济收益。

6 结语

JSV005—JSV006井作为舞阳盐矿的一组典型水平对接井,通过一系列先进技术的应用和优化设计,实现了高效、安全的施工。

本项目在井眼轨迹控制、钻具选择和井下故障预防等方面的成功实践,为未来类似项目提供了宝贵的技术经验和操作参考。

在未来的盐矿开采中,建议继续深入研究和优化关键技术,特别是在复杂地层和高精度要求的井眼轨迹控制方面,将是提高钻井效率和经济效益的关键。

参考文献:

- [1] 杨海军. 中国盐穴储气库建设关键技术及挑战[J]. 油气储运, 2017, 36(7): 747-753.
- [2] Li Jinlong, Shi Xilin, Zhang Shuai. Construction modeling and parameter optimization of multi-step horizontal energy storage salt caverns[J]. Energy, 2020, 203: 117840.
- [3] 刘江, 石逊, 王雷浩, 等. 煤矿采矿区区域治理水平井施工中托压问题的研究与实践[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 145-151.
- [4] 谭建国, 洪毅, 张所邦, 等. 近井口高压管汇布置结构设计及选材优化研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 163-170.
- [5] 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.
- [6] 李岩, 郭军, 王文彬. 滇东地区页岩气调查云宣地1井钻探施工难点及对策[J]. 钻探工程, 2021, 48(8): 12-18.
- [7] 杨春和, 贺涛, 王同涛. 层状盐岩地层油气储库建造技术研发进展[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 614-624.
- [8] Li Jinlong, Yang Chunhe, Shi Xilin, et al. Construction modeling and shape prediction of horizontal salt caverns for gas/oil storage in bedded salt[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 190: 107058.
- [9] 富隋小庆, 张勇, 康延鹏, 等. 山东岩盐溶腔储气造腔技术研究展望[J]. 山东国土资源, 2023, 39(2): 56-61.
- [10] 康延鹏, 焦雨佳, 王建夫, 等. 盐穴储气库水平溶腔蚀特征实验[J]. 油气储运, 2022, 41(9): 1061-1068.
- [11] 施锡林, 马洪岭, 章雨, 豪. 高杂质盐矿已有溶腔大规模储气技术研究进展[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 55-65.
- [12] 佟子达, 张静, 周振菊, 等. 河南舞阳凹陷底部火山岩的发现及其锆石年代学和Hf同位素地球化学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(3): 574-586.
- [13] 李瑞刚, 张洪宁, 刘湘华, 等. 顺北56X特深水平井定向钻井关键技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 57-63.
- [14] 熊亮, 张小连. 煤层气U型对接井施工关键技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(2): 33-35, 51.
- [15] 张所邦, 宋鸿, 陈兵, 等. 中国干热岩开发与钻井关键技术[J]. 资源环境与工程, 2017, 31(2): 202-207.
- [16] 洪毅, 郑兴华, 张所邦, 等. 恩施盆地恩热1井钻探工艺技术研究及应用[J]. 资源环境与工程, 2022, 36(6): 817-821.
- [17] 董正亮, 刘加杰, 王鹏, 等. 国内井矿盐钻井技术新进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(8): 67-72.
- [18] 刘春生, 陈晓林, 侯岳, 等. 方位伽马随钻测量技术在土耳其天然碱溶采对接井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(8): 28-34.
- [19] 付晓飞, 胡汉正, 覃丽君, 等. 江汉潜江构造盐矿水平井开采分析研究[J]. 广东石油化工学院学报, 2020, 30(4): 15-18, 22.
- [20] 欧阳勇, 段志锋, 陈春宇, 等. 水平井钻井水力振荡器安放位置优化与试验[J]. 钻采工艺, 2019, 42(5): 1-4, 6.
- [21] 彭建波, 余黎明. 水力振荡器配合螺杆钻具在岩盐水平对接井中的提速增效应用[J]. 中国井矿盐, 2022, 53(4): 25-27.

(编辑 荐华)