

煤层气水平井排采设备适应性及应用效果评价

胡海洋^{1,2},冯云飞¹,陈捷¹,高为¹,李全中³,杜志刚⁴

(1.贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心,贵州 贵阳 550081;2.贵州省煤田地质局地质勘察研究院,贵州 贵阳 550081;
3.山西工程技术学院 矿业工程系,山西 阳泉 045000;4.洛阳理工学院 土木工程学院,河南 洛阳 471023)

摘要:针对贵州省煤层气水平井开发案例较少的现状,开展煤层气水平井排水采气工艺适配性研究及应用效果评价。以六盘水煤田水平井为例,分析该井井斜、压裂规模对排采设备排水采气的影响,并进行设备适应性分析,优选射流泵作为该井的排采设备。结果表明:煤层气水平井的复杂工况会影响排采设备的适应性,需根据水平井的工况复杂性优选匹配的排采设备;采用射流泵进行煤层气水平井排水采气,能够满足水平井连续稳定排采的要求;对射流泵井下管柱及下泵深度进行优化,增大沉砂沉粉井段,采取“S”型产出流道分离气水流体,能够有效避免泵筒卡泵及气锁现象。该水平井的开发实践及应用效果,为贵州省煤层气水平井的排水采气设备优选及管柱优化提供了工程借鉴。

关键词:煤层气;水平井;压裂规模;排采设备;效果评价

中图分类号:P618;TD845 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2024)S1-0696-05

Evaluation of adaptability and application effect of coal-bed methane horizontal well drainage equipment

HU Haiyang^{1,2}, FENG Yunfei¹, CHEN Jie¹, GAO Wei¹, LI Quanzhong⁴, DU Zhigang⁵

(1. Guizhou Research Center of Shale Gas and CBM Engineering Technology, Guiyang 550081, China;

2. Geological Exploration Research Institute, Guizhou Bureau of Coal Geological Exploration, Guiyang 550081, China;

3. Mining Engineering Department, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China;

4. Civil Engineering Department, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: In view of the few development cases of coalbed methane horizontal wells in Guizhou Province, the adaptation research and application effect evaluation of coalbed methane horizontal wells drainage gas recovery process are carried out. Taking horizontal well in Lipanshui coalfield as an example, the influence of well inclination and fracturing scale on gas drainage and production equipment is analyzed, and equipment adaptability is analyzed, and jet pump is selected as the drainage and production equipment of this well. The practice shows that the complex working conditions of coalbed methane horizontal wells will affect the adaptability of the drainage equipment, and the matching drainage equipment should be selected according to the complexity of the working conditions of the horizontal wells. The use of jet pump for drainage and production of coalbed methane horizontal Wells can meet the requirements of continuous and stable drainage of horizontal wells. By optimizing the downhole pipe string and pump depth of jet pump, enlarging sand and powder sinking well section, adopting "S" type output flow channel to separate gas and water fluid, the phenomenon of pump barrel sticking and gas lock can be effectively avoided. The development practice and application results of this horizontal well provide engineering reference for the optimization of drainage and gas production equipment and string optimization of coalbed methane horizontal wells in Guizhou Province.

Key words: coal bed methane; horizontal well; fracturing scale; drainage and production equipment; effect evaluation

0 引言

贵州省煤层气资源丰富,煤系地层煤层层数多、

累计厚度大,要实现煤层气资源动用最大化,目前主要以直井、定向井为基本井型,以井组模式进行煤层气开发^[1-3],水平井开发井型较少,在煤层气水平井

收稿日期:2024-01-29;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.24012902

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合战略略矿[2022]ZD001-03、黔科合平台人才-CXTD[2022]016、黔科合支撑[2021]一般401)

作者简介:胡海洋(1989—),男,湖北随州人,高级工程师。E-mail:997086919@qq.com

通讯作者:冯云飞(1990—),男,河南安阳人,工程师。E-mail:452726005@qq.com

引用格式:胡海洋,冯云飞,陈捷,等.煤层气水平井排采设备适应性及应用效果评价[J].洁净煤技术,2024,30(S1):696-700.

HU Haiyang, FENG Yunfei, CHEN Jie, et al. Evaluation of adaptability and application effect of coal-bed methane horizontal well drainage equipment[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S1): 696-700.

开发的排水采气举升工艺方面实际应用经验较少。水平井相对于直井、定向井,需重点解决井下设备偏磨、固相颗粒卡泵与埋泵、管柱结垢、气蚀气锁等问题^[4-5]。目前常用的排水采气举升工艺包括有杆式和无杆式两大类,有杆式排采主要包括游梁式抽油机及螺杆泵,其工艺技术成熟、设备稳定性较好,但无法解决井下设备偏磨导致油管、抽油杆(螺杆)磨损严重,频繁出现修井作业的情况,对煤层气水平井排采不利。为实现煤层气水平井排采“连续、缓慢、长期、稳定”的八字方针,煤层气水平井宜采取无杆式的排水采气工艺。煤层气水平井的开发实践证明,水力柱塞泵动力液频繁换向及柱塞泵供水方式会使柱塞泵进液管线在工作中始终处于未充盈状态,使管线发生强烈的振动,设备稳定性较低,维护保养频繁;电潜泵的防固相颗粒能力一般,不适应低液量煤层气井,电缆易出故障,可靠性一般;射流泵的防固相颗粒能力与地面设备可靠性一般,存在泵芯结垢较为严重,起泵芯次数较多的问题^[6-8]。为实现煤层气水平井的长期稳定排采,目前也开展了隔膜泵、顶驱螺杆泵、“小油管+泡排”、“连续油管+柱塞+气举”等工艺试验,并在鄂尔多斯盆地取得了一定的效果^[9-10]。

本文以六盘水煤田土城向斜深部空白区块实施的煤层气水平井为例,对其钻井、压裂的复杂工况给水平井排水采气带来的难点进行分析,对目前常用的水平井排水采气设备进行适应性分析,优选该水平井排水采气设备并进行应用效果分析,结合该水平井排水采气过程中遇到的问题提出针对性建议,为贵州省煤层气水平井排水采气工程提供现场借鉴,减少水平井排水采气过程中因异常情况造成的停抽降产,以及避免因作业对煤储层造成伤害而引起的产气量降低。

1 研究区煤层气水平井概况

研究区水平井以二叠系龙潭组含煤岩系煤层内的煤层气为主要研究对象,通过实施水平井钻探、储层改造和排采产气试验,探索适应贵州省煤层群发育特殊条件的煤层气水平井抽采地质工程一体化关键技术。井区为单斜构造,次级褶皱不发育,地层倾角为 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$,总体浅部陡、深部缓,构造相对简单。龙潭组煤系地层厚 341 m,含煤 47~66 层,一般为 50 层,含煤厚度 37~47 m,一般为 41 m,含煤系数为 12%。该井沿龙潭组 3#煤层钻进,整体呈上翘型 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$,完钻井深 2 168 m,水平段长 859 m,煤层钻遇率 92%。该井压裂施工 8 段,采用清水压裂液+

2%KCl+杀菌剂的压裂液体系,针对不同段采用分段多簇射孔、定向射孔、变密度射孔、泵送可溶性桥塞与射孔联作、光套管大液量低砂比、脉冲和阶梯式加砂、多级多次加砂等压裂工艺技术,8 段累计加砂 486 m^3 ,累计加液 $17\ 245\text{ m}^3$,改造缝网体积 $811\times 10^4\text{ m}^3$,压裂改造效果较好。

2 水平井排水采气设备适应性分析

2.1 复杂工况对设备排水采气的影响

2.1.1 井斜对排采设备的影响

该水平井井深及井斜大,最大井斜超过 90° ,常规的有杆设备在井斜角过大的煤层气排采过程中,容易出现油管、抽油杆磨损、油管漏水、抽油杆断脱等情况,需要作业更换磨损的井下设备,会造成排采中断。该井为上翘型水平井,水平段垂深差 47 m,井身结构关键点参数见表 1。

表 1 水平井井身结构关键点数据

项目	井深/m	垂深/m	井斜/ $(^{\circ})$	方位/ $(^{\circ})$
造斜点	697.58	697.41	1.49	317.33
A 靶点	1 309	1 067.18	87.62	300.04
B 靶点	2 168	1 021.88	91	300

根据水平井井身结构示意图及关键点数据可知,该水平井最大井斜超过 90° ,属于上翘井型,该井在着陆之前的最大狗腿度达到 $6.9^{\circ}/30\text{ m}$ (井深 1 114.24 m处),着陆后最大狗腿度达到 $8.71^{\circ}/30\text{ m}$ (井深 1 400.36 m处),在 1 046.20 m、1 055.87 m、1 065.41 m连续三处的狗腿度检测值均大于 $6.0^{\circ}/30\text{ m}$,狗腿度持续较大,增加了排采设备的风险及优选难度。一是排采设备井下油管的下入过程遇阻、遇卡风险增加;二是排采过程中油管管柱内的流体流动可能会造成油管摆动偏磨,管柱磨损、漏失的风险增加;三是井底流压监测使用的压力计电缆下入及排采过程磨损风险增加。

2.1.2 压裂规模对排采设备的影响

水平井压裂施工规模及改造范围大,水平段长 859 m,压裂施工 8 段,累计射孔 22 簇,共 28 m,压裂施工排量在 $14\sim 15\text{ m}^3/\text{min}$,累计加液 $17\ 245\text{ m}^3$,累计加砂 486 m^3 ,形成的压裂裂缝缝高最大为 40 m,缝网体积达到 $811\times 10^4\text{ m}^3$,储层缝网交叉,储层破碎,产生较多固相颗粒,增加了排采设备排水采气的难度。

由水平井的压裂缝网平面示意图(图 1)可以看出,压裂改造缝网实现了水平井段全覆盖,即段与段、簇与簇之间均实现了压裂裂缝的相互沟通、覆盖。水平井压裂监测显示的压裂裂缝缝高在 $30\sim$

40 m, 裂缝半长在 106.9~223.2 m, 表明压裂施工裂缝沟通到了该范围内的煤层及顶底板围岩, 考虑压裂影响范围内, 边缘处的煤层可能未发生破裂事件, 但压裂液影响了该区域, 则压裂液的影响范围比压裂监测范围更广, 表明压裂液对目的层段的改造强度、程度都较高。由于煤层的破裂压力低于围岩, 因此在井筒附近的煤层改造效果更甚, 导致压裂后煤层较破裂、煤粉颗粒较多。

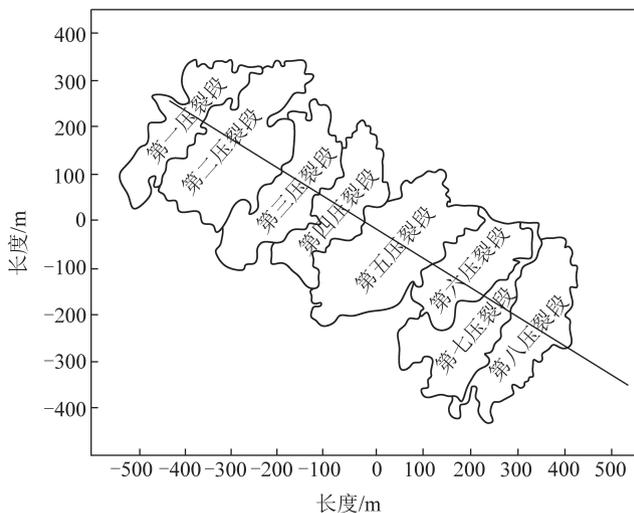


图1 压裂缝网平面示意图

压裂产生的煤粉颗粒对排采及排采设备的风险较高^[11-12], 主要体现在三个方面: 一是煤粉颗粒在水相及气水混相流体的带动下, 增加了堵塞压裂裂缝的风险; 二是煤粉颗粒运移至水平段井筒后, 在重力作用下出现沉降、沉淀, 从而造成水平段井筒过流面积减小, 甚至可能出现井下管柱埋没的风险; 三是煤粉颗粒在从吸入口进入井下管柱时, 容易堵塞在筛管吸入口而影响排采设备的携液能力, 造成井底流压及储层压力难以下降, 增加了排采设备的风险。

2.2 复杂工况排水采气设备适应性分析

目前常规的煤层气、页岩气排水采气设备包括有杆泵系统和无杆泵系统, 目前常用的有杆泵系统主要包括游梁式抽油机系统、螺杆泵系统等, 常用的无杆泵系统主要包括电潜泵系统、水力喷射泵系统、水力柱塞泵系统等。同时, 经过多年的技术演变, 也衍生出了多种泵的组合系统或者分阶段采取不同的排采系统。相对于无杆泵系统的无井下管柱相对位移, 排水采气过程中由于相对位移导致的井下管柱出现磨损、断脱等情况, 使得有杆泵系统在大斜度井、水平井上的应用较少。也有部分井采取分阶段排采和加深泵挂的策略使用有杆泵系统进行生产, 但作业成本会相对增加; 也有采取大泵径、高冲程、低冲次的方式使用有杆泵系统进行生产的, 这样可

以降低单位产水的井下管柱磨损程度, 但在排采中后期产水较少时, 大泵径、高冲程的弊端就会显现出来, 此时需采取间抽或回注水的方式进行连续排采。笔者针对水平井的复杂井况条件, 主要进行了无杆泵系统的适应性分析, 以利于该水平井长期、连续、稳定排采。

2.2.1 电潜泵适应性分析

1) 工作原理

电潜泵排水采气举升系统是利用井下电机带动与之相连的多级离心泵高速旋转, 同时随着多级离心泵的高速旋转, 井液从泵吸入口进入, 经增压后从泵出口排入油管, 再通过油管将地层产水排出井口, 同时利用油套环形空间将地层产气排出井口的一种基于机械降压原理的排水采气技术。

2) 工艺特点

优点: 井下管柱结构中无运动部件, 排采过程中无偏磨问题, 适应大斜度井及水平井; 电潜泵具有排量扬程范围广、功率大、生产压差大、地面工艺简单等特点。缺点: 设备购置费用高, 防煤粉能力和防砂能力一般, 不适应低液量煤层气井, 井下电机输电电缆易出故障, 可靠性一般。

2.2.2 水力柱塞泵适应性分析

1) 工作原理

水力柱塞泵排水采气举升系统是借助来自地面三缸泵的高压动力液, 推动井下水力活塞泵的液马达做上下往复运动, 上下往复运动的液马达再通过与泵端相连的连杆带动泵端活塞也做上下往复运动, 从而通过泵端活塞的抽吸作用, 将井液排出井口的一种基于机械降压原理的排水采气技术。

2) 工艺特点

优点: 管柱结构中无运动部件, 排采过程中无偏磨问题, 适应大斜度井及水平井; 可自动清洗井下液力泵柱塞阀座, 避免泵漏失; 可由1台地面设备对多口煤层气井同时进行排采; 工艺能耗低、地面占地面积小、安装运输方便。缺点: 对井液中固体颗粒的敏感性强, 动力液应保持干净, 不适合煤粉、支撑剂反吐严重的煤层气井, 地面存在高压管线刺漏风险、防腐防垢能力一般, 地面设备稳定性较差。

2.2.3 水力喷射泵适应性分析

1) 工作原理

水力喷射泵排水采气工艺是利用地面三缸泵的高压动力液沿油管注入, 经水力喷射泵的喷嘴喷出, 喷出后的动力液已由低速、高压流体转换成高速、低压流体, 导致喷嘴前端的压力急剧下降, 形成低压吸入区。由于低压吸入效应, 来自地层的井液通过吸

入口吸入低压区,并与来自喷嘴前端的高速、低压流体混合。混合后的井液获得来自动力液的动能,井液的流速增大,动力液的流速则下降,这样形成的中速动力液+井液混合流体经喉道进入扩散管再次进行能量转换,将中速、低压的动力液+井液的混合流体转换为低速、高压流体。通过合理设计,可确保转换后的低速、高压流体具有足够的压头,最终通过油管与套管环形空间排至地面(图2)。

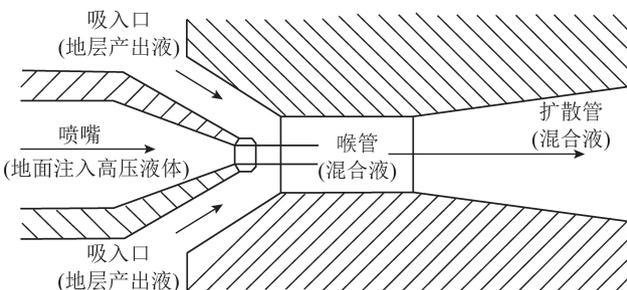


图2 射流泵工作原理示意图

2) 工艺特点

优点:管柱结构中无运动部件,排采过程中无偏磨问题,适应大斜度井及水平井;井下结构简单,更换泵芯时只需倒井口流程反洗即可取出泵芯,不用取出原井管柱;可由1台地面设备对多口煤层气井同时进行排采;设备携砂、携煤粉能力较强。**缺点:**泵芯易结垢,对动力液水质要求较高,泵效较低,地面流程较复杂,占地面积较大,存在高压刺漏风险。

根据对煤层气水平井常用无杆排水采气工艺系统进行对比分析,发现三种常用设备各有利弊,综合对比各设备的排液能力、携砂性能、稳定性等因素后,选择射流泵排水采气系统对该水平井进行排采。

3 射流泵工艺应用效果及建议

3.1 下泵深度及管柱优化

为确保射流泵后期排采工作的连续稳定,减少排采过程中的作业次数,射流泵的下泵深度设计首先应满足充分降低水平段的井底流压,泵的吸入口应尽量接近水平段煤层。其次应优化井下设备与水平段煤层间距,避免水平段沉砂造成的井下设备砂埋、卡泵等异常情况。最后,射流泵泵筒宜处于井眼轨迹稳定、平滑,适合放置排采设备的位置。基于以上三点,该井下泵深度与上翘末端(B靶点)的垂深一致,设计下泵垂深为1 022 m左右,井深1 107 m左右,井斜角63°,井眼狗腿度3.61°/30 m,应确保水平段有足够的沉砂沉粉及气水分离井段,避免因固相颗粒堆积至泵筒位置造成的埋泵事故,以及固相颗粒进入泵筒造成的卡泵事故。考虑流体流速

高、携砂性能强的特点,井下管柱优化组合选择48.3 mm的动力液管+73 mm的混合液管,动力液管与混合液管环控面积小、流体流速高,携砂、携煤粉的能力强,避免固相颗粒沉淀在泵筒造成的停抽检泵情况。针对水平井产气量较高时,宜出现气锁影响气水产出的问题,一方面可以将下泵位置设计在斜井段,增强气水流动过程中的分离效果,另一方面可以采取优化气水流道的方式,在泵筒下端接2根48.3 mm的油管,使气水流体流动形成“S”型的流道,促进气水分离,避免产生气锁现象(图3)。

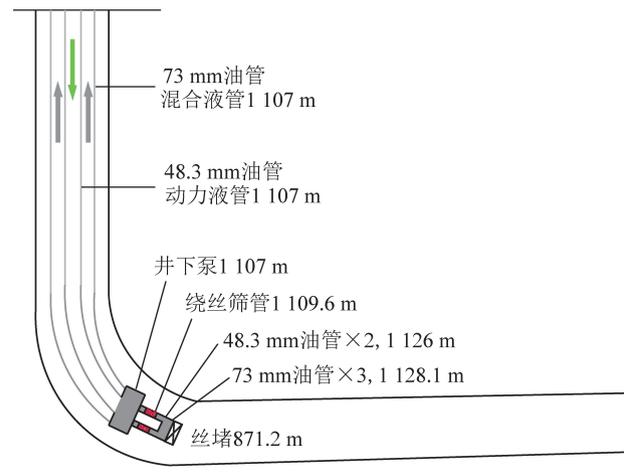


图3 下泵管柱设计示意图

3.2 应用效果及建议

该水平井开抽时井底流压为10.001 MPa,开抽前放溢流产水为2 363 m³,压裂液返排率为13.70%。针对该水平井井底流压、套压、液柱高度、日产水量、日产气量等参数变化,结合地层流体产出相态变化特征,在煤层气直井、定向井“五段三压法”^[13-14]的基础上,优化采取九段式精细化排采管控方案,各阶段的控制要点及目标各有差异,九阶段分别为试抽阶段、稳定降压阶段、阶梯降压阶段、临界解吸阶段、稳定排水阶段、控压排水阶段、产气初期阶段、阶梯提产阶段、控压稳产阶段。该水平井3#煤层的实际解吸压力为4.846 MPa,地解差为5.155 MPa。

通过九段式精细化排采管控,该水平井解吸前连续稳定排采200 d,平均井底流压日降幅为0.025 8 MPa/d,累计产水4 735.2 m³,平均日产水量为23.68 m³/d,最高日产水量为29.28 m³/d。根据该水平井排采过程中的水质监测分析,产出液主要为压裂液,地层原始含水较少,无外源含水层的补水产出。该水平井解吸前累计产水(含放溢流产水)7 098.2 m³,压裂液返排率达到41.16%(总压裂液量为17 245 m³),预计产水半径达到压裂半径的64%左右。煤层解吸产气后,控制地层优先产水,缓

慢提产、扩大压降半径,在日产气量达到 $5\ 000\ \text{m}^3$ 之前,继续产水209 d,累计产水 $2\ 646.7\ \text{m}^3$,压裂液返排率提高了15.35%,累计返排率达到56.51%,预计产水半径达到压裂半径的75%左右。该水平井日产气量为 $5\ 000\ \text{m}^3$ 之后,井底流压、套压变化等均显示出较好的产气潜力,因此继续进行提产。截至2023年9月30日,该水平井日产气量已突破 $10\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$,累计产气量为 $2\ 957\ 380\ \text{m}^3$ (图4)。

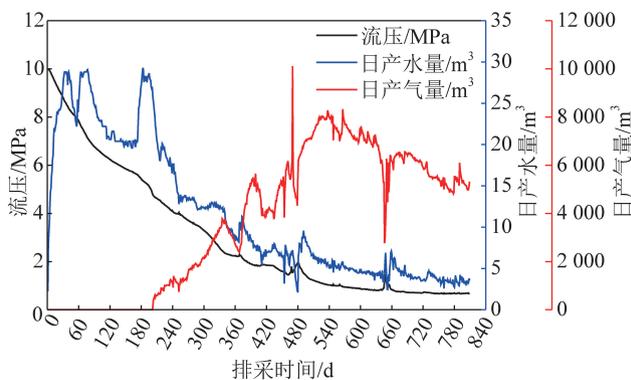


图4 排采曲线

通过分析该水平井排采设备的应用效果可知,该水平井排采过程连续稳定,未对井下管柱进行长周期检泵作业。由于射流泵井下管柱内的流体流速高、压力高,流体中的固相颗粒对井下管柱存在磨损、腐蚀情况,需更换射流泵中心管后继续进行排采,停抽1~2 d,时间一般较短。采用射流泵进行排水采气,下泵位置与B靶点的垂深一致,与最低点的垂深差为47 m,与最低点(1 391 m)之间的井筒长度为284 m,为支撑剂、煤粉等固相颗粒提供了沉砂、沉粉井段,避免了排采过程中大量砂粉进入泵筒造成的停抽、检泵作业。

该水平井采用清水压裂液+2% KCL+杀菌剂的压裂液体系,盐度较高,进入地层后,与地层矿物质、地层水等混合后,将地层矿物质携带至井筒。在此过程中,高矿化度返排液易在井下管柱附着、结垢,造成井下管柱腐蚀及孔径减小,影响排采的连续稳定,增加气水产出难度。要降低排采过程中的井下管柱结垢,固相颗粒对井下管柱的磨损、腐蚀风险,减少停抽次数,减小对排采的影响^[15],一是要加强水质监测分析,掌握水质特征及变化规律;二是要定期清洗水箱,对水箱水质进行净化,降低水质矿化度;三是要根据水质分析结果及变化规律,加入阻垢剂以降低井下管柱结垢。

4 结 论

1)采用射流泵对煤层气水平井进行排水采气,

能够实现连续稳定排采的目标,能够有效避免井下管柱的设备偏磨、固相颗粒卡泵与埋泵、管柱结垢、气蚀气锁等问题。

2)通过分析固相颗粒及气水流体的运移规律发现,优化射流泵井下管柱设计及下泵深度,适当加长水平段沉砂、沉粉井段,优化气水流道,能够降低煤层气水平井砂粉卡泵、埋泵及气锁风险。

3)射流泵地面设备及井下管柱均为高压状态,若产水中固相颗粒较多、水质硬度大,井下管柱结垢、刺漏的风险就较高,建议加强水质分析,采取定期清洗水箱、净化水质及加入阻垢剂的方式,降低刺漏及结垢风险。

参考文献:

- [1] 赵福平,孙钊,桑树勋,等. 贵州省煤层气勘探开发进展及“十四五”开发战略[J]. 天然气工业,2022,42(6): 65-75.
- [2] 李佳欣,陈贞龙,郭涛. 贵州织金地区煤层气合采开发实践与认识[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(9): 163-170.
- [3] 高为,易同生,颜智华,等. 贵州省煤层气成藏条件及勘探方向[J]. 天然气地球科学,2022,33(5): 799-806.
- [4] 曾雯婷,葛腾泽,王倩,等. 深层煤层气全生命周期一体化排采工艺探索——以大宁-吉县区块为例[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(9): 78-85.
- [5] 张劲,林亮,魏迎春,等. 柳林区块煤层气水平井煤粉产出特征及影响因素研究[J]. 中国煤炭地质,2021,33(10): 11-16,70.
- [6] 原红超,于家盛,孙九江,等. 水力管式泵动力液管线振动原因及治理[J]. 中国煤层气,2022,19(6): 33-35.
- [7] 张玮,张光波,于家盛,等. 提高L型水平井排采时率的治理对策[J]. 中国煤层气,2022,19(1): 36-39.
- [8] 梅永贵,郭简,苏雷,等. 无杆泵排采技术在沁水煤层气田的应用[J]. 煤炭科学技术,2016,44(5): 64-67.
- [9] 秦绍锋,曹爱娟,付鑫,等. 煤层气L型井隔膜泵举升及配套技术研究[J]. 石油机械,2022,50(1): 122-127.
- [10] 马文涛,刘印华,吴建军,等. 煤层气井无杆排采工艺应用与改进方向——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(9): 22-31.
- [11] 孟文辉,张文,王博洋,等. 保德区块煤粉产出特征及其影响要素剖析[J]. 油气藏评价与开发,2023,13(4): 441-450.
- [12] 刘晓,崔彬,吴展. 煤层气井堵塞型递减原因分析及治理——以延川南煤层气田为例[J]. 油气藏评价与开发,2022,12(4): 626-632.
- [13] 胡海洋,白利娜,赵凌云,等. 黔西地区龙潭组煤层气共采排采控制研究[J]. 煤矿安全,2019,50(1): 175-178.
- [14] 胡海洋,赵凌云,陈捷,等. 发耳矿区煤储层敏感性对煤层气排采影响及控制对策[J]. 煤炭科学技术,2020,48(7): 334-340.
- [15] 崔建斌,张聪,樊彬,等. 煤层气井管柱防垢措施及效果评价[J]. 中国煤层气,2022,19(1): 32-35.