

新疆硫磺沟煤田火烧区地热双水平井施工技术

赵俊杰^{1,2}, 吴纪修^{1,2*}, 李宽^{1,2}, 张恒春^{1,2}, 曹龙龙^{1,2}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399; 2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 天津 300399)

摘要: 本研究以新疆煤田火灾治理为背景, 借鉴国外 Eavor-Loop 等封闭式地热系统 (CLGS) 工程经验, 旨在通过提取地下热能使煤田火烧区降温, 以恢复火烧区煤炭资源开采, 并实现地下热能利用的双重目标。采用闭式双水平井取热方案, 设计了“稳斜+造斜+水平+造斜+稳斜”的五段制井眼轨道双水平井轨迹。针对煤田火烧区高温破碎地层特性, 创新采用“小口径先导孔+大口径回拖扩孔”工艺完成施工, 提出了适用于新疆硫磺沟煤田火烧区高温岩层的高效、低成本钻探和换热取热技术方案。针对施工中遇到的井下高温 ($>170^{\circ}\text{C}$)、地层不稳定和全井段大井斜等挑战, 采取多种钻完井工艺方法, 优化钻井液体系和设备, 应用耐高温测量仪器及井下动力钻具, 解决了钻遇煤田火区时地层松散破碎、失返漏失、异常高温等问题。为未来煤田火区钻完井施工形成可推广的技术范式。

关键词: 煤田火烧区; 地热井; 双水平井; 导向孔钻进; 回拖扩孔; 煤田火灾治理

中图分类号: P634.7 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0134-07

Construction technology of dual horizontal wells for geothermal energy in the coalfield fire area of Liuhuanguo, Xinjiang

ZHAO Junjie^{1,2}, WU Jixiu^{1,2*}, LI Kuan^{1,2}, ZHANG Hengchun^{1,2}, CAO Longlong^{1,2}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China; 2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300399, China)

Abstract: This study is set against the background of coal fire control in Xinjiang. Drawing on international engineering experience with closed-loop geothermal systems (CLGS) such as Eavor-Loop, it aims to achieve dual objectives: extracting underground thermal energy to cool coal fire zones, thereby facilitating the recovery of coal resources in burned-out areas, and utilizing the geothermal energy obtained. A closed dual horizontal well heat extraction scheme was adopted, featuring a five-section well trajectory design— "build-up+tangent+horizontal+build-up+tangent". In response to the high-temperature and fractured formation characteristics of the coal fire area, an innovative "small-diameter pilot hole+large-diameter back-reaming" process was employed during implementation. This approach proposes an efficient and low-cost drilling and heat extraction technical solution suitable for high-temperature rock mass underground thermal energy reservoirs in the Liuhuanguo coalfield fire area. In order to solve the problems of high temperature ($>170^{\circ}\text{C}$), unstable strata and large inclination in the whole well, various drilling and completion techniques are adopted, the drilling fluid system and equipment are optimized, and the high temperature measuring instruments and downhole power tools are applied. As a result, issues such as loose and fractured formations, lost circulation, and abnormal high temperatures when drilling through the coal fire zone were successfully resolved. This work establishes a replicable technical paradigm for future drilling and completion operations in coal fire areas.

Key words: coalfield fire area; geothermal well; dual horizontal wells; pilot hole drilling; back-reaming; coalfield fire control

收稿日期: 2025-05-21; 修回日期: 2025-11-12 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.020

第一作者: 赵俊杰, 男, 汉族, 1999年生, 助理工程师, 石油与天然气工程专业, 硕士, 从事钻探工艺技术研究工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, zhao_junjie0514@foxmail.com。

通信作者: 吴纪修, 男, 汉族, 1984年生, 研究室副主任, 高级工程师, 地质工程专业, 博士, 从事钻探工艺技术研究工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, Wujixiu2008@126.com。

引用格式: 赵俊杰, 吴纪修, 李宽, 等. 新疆硫磺沟煤田火烧区地热双水平井施工技术[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 134-140.

ZHAO Junjie, WU Jixiu, LI Kuan, et al. Construction technology of dual horizontal wells for geothermal energy in the coalfield fire area of Liuhuanguo, Xinjiang[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 134-140.

0 引言

随着全球能源结构的转型和碳中和目标的提出,地热能作为一种清洁、可再生的能源,逐渐成为各国能源战略的重要组成部分。根据国际能源署(IEA)的报告,地热能在未来几十年内有望成为全球能源供应的重要来源之一,其中闭式地热系统(Closed-Loop Geothermal Systems, CLGS)因其环境友好性和适应性广的优势,成为研究热点^[1-2]。然而,在煤田火烧区等极端地质条件下,CLGS的应用仍面临巨大挑战:高温环境($>170^{\circ}\text{C}$)加速钻具损耗,裂隙发育地层导致井壁失稳频发,传统技术难以兼顾效率与安全性,针对钻完井工艺的优化仍缺乏系统方案^[3-5]。

本研究以新疆硫磺沟煤田为工程背景,旨在针对煤田火烧区降温治理和地下热能开发利用双重目标钻井中的高温、地层破碎等技术难题,提出一种高效、低成本的闭式双水平井取热方案。通过优化钻井工艺、引入耐高温钻具和仪器、改进钻井液体系等技术手段,解决钻进过程中的漏失、卡钻等问题,提高地热井的钻进效率和安全性,为类似地质条件的地下热能开发利用提供技术支持和工程示范。

1 工区概况

工作区位于新疆硫磺沟镇西部,地处北天山褶皱带的西端,褶皱和断层较为发育,地质构造复杂,地层倾角较大,局部地区存在明显的逆冲断层^[6-7]。复杂的地质构造使得该区域的地层稳定性较差,增加了钻探施工的难度。

基于2022年新疆地矿局第十一地质大队在本工区的地质调查与勘探井资料,钻遇地层如下:

(1)地表回填层(0~2.5 m):为第四系松散堆积物,结构疏松,无胶结,是钻井液失返性漏失的主要层位。

(2)基岩地层(2.5~63.7 m):主要为灰黑色粉砂岩、细砂岩及碳质砂岩,岩性较单一,但受火烧区影响严重。岩石普遍破碎,裂隙发育,多见褐红色烧变岩,整体完整性差,易引发井壁垮塌。

(3)目标煤层(63.7~65.9 m):黑色,片理状构造,煤层本身破碎严重,呈碎末状。该煤层为煤田火区的燃烧层,根据勘探资料推断,其温度可达 150°C 以上,实测井底温度高达 170°C ,是本次地下热能提取的目标层位。

综上所述,工区地层具有“上松、中碎、下高温”的显著特征。地表回填层与普遍破碎的基岩地层极易导致钻井液漏失和井壁失稳,而深层目标煤层的高温环境对钻具、仪器和钻井液性能构成了严峻挑战^[8]。

2 钻井工艺设计

2.1 设计思路

基于硫磺沟煤田火烧区的地质条件与地下热能赋存特点,本研究借鉴 Eavor-Loop 闭式循环技术理念,采用闭式双水平井取热方案。该方案旨在通过主动提取地下热能,为煤田火区降温以治理火灾、恢复煤炭资源开采,同时实现对地下热能的有效利用,达到灾害治理与能源开发的双重目标^[9-12]。

2.2 井眼轨道设计

本研究采用闭式双水平井取热方案,设计包含2口独立的水平井,井身结构如图1所示。2口井均采用相同的五段制井眼轨道设计,具体包括“稳斜(0~70 m)+造斜(70~150 m)+水平(150~550 m)+造斜(550~630 m)+稳斜(630~700 m)”,井眼轨迹示意如图2所示。该设计使2口井的水平段在垂深40~46 m的高温靶区内保持平行、间距合理,水平段长度分别为216 m和218 m。施工过程中,稳斜段与水平段采用复合钻进技术,以确保井眼轨迹平滑稳定;造斜段则采用滑动导向钻进方式,实现轨迹精确控制。

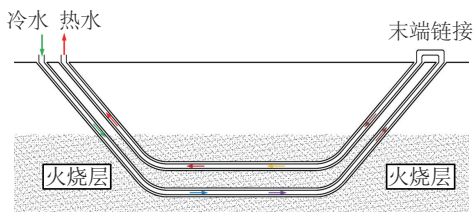


图1 双水平井注采示意

Fig.1 Schematic diagram of injection and production in the dual horizontal wells

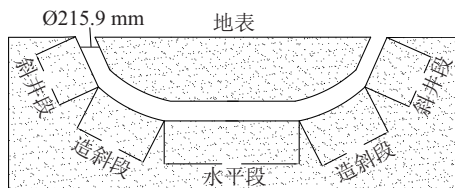


图2 钻井轨迹示意

Fig.2 Drilling trajectory diagram

实际施工中,为应对地层松散破碎带来的挑战,摒弃常规钻井方法,创新性地对每口水平井采用“小口径先导孔($\Phi 152.4$ mm)+大口径回拖扩孔”钻完井工艺。即先钻成小口径导向孔,再通过回拖扩孔将井径扩大至300 mm,最终形成2口独立的大口径水平井。成井后,2口井的井口通过地表管路密闭连接,构成闭式循环换热系统。

2.3 钻具组合设计

在初步设计中,采用了 $\Phi 215.9$ mm PDC钻头+ $\Phi 172$ mm $\times 1^\circ$ 弯螺杆钻具+ $\Phi 178$ mm无磁钻铤(内置无线随钻测斜仪)+ $\Phi 89$ mm钻杆的钻具组合,原计划完钻口径 ≥ 215.9 mm。然而,在实际钻探过程中,由于地层松散破碎和高温环境影响,该组合在钻进至48 m时发生失返性漏失,并引发严重卡钻事故。经技术论证后,为提高成井质量、增强井壁稳定性并满足后续换热管柱下入需求,决定将完钻口径扩大至300 mm,并相应将钻完井工艺调整为“小口径先导孔+大口径回拖扩孔”。该工艺有效降低了井壁失稳和漏失风险,实际成井口径达到300 mm。

2.4 钻井设备选型

为应对火烧区的高温 and 地层破碎问题,选用了GBS-100型水平定向钻机和3NB-500型泥浆泵。GBS-100型钻机具有高扭矩和大回拖力,最大扭矩45 kN $\cdot$ m,最大回拖力1000 kN,能够有效应对大井斜和复杂地层的钻探需求;3NB-500型泥浆泵则具备高压力和高排量的特点,额定压力12~30 MPa,额定流量26.5~11.2 L/s,能够确保钻井液在高温环境下的稳定循环,减少漏失和卡钻风险。

3 钻井施工难点及主要技术措施

3.1 钻井施工难点

3.1.1 地层温度高

煤田火烧区现状见图3,现场实测井底温度高达170 $^\circ$ C。高温环境不仅显著降低了钻头、MWD(随钻测量仪器)和马达等井下工具的稳定性和寿命,还加速了钻井液中有有机添加剂的降解和失效,增加了泥浆泵等地面设备的故障率,导致非作业时间增加。此外,高温环境下钻头和井下仪器的金属材料易发生热疲劳,降低了其使用寿命。

3.1.2 地层破碎,裂隙发育

煤田火区燃烧时会在地面形成燃烧裂隙、地面塌陷、烧变岩等地质效应,使煤层附近的岩层应力



图3 煤田火烧区现状

Fig.3 The current situation of the burned areas in the coalfield

平衡改变,增强岩石的不稳定性^[13-14]。导致地层松散破碎,砂岩层承压能力低,地层压力与漏失压力窗口窄,钻井过程中易发生漏失和卡钻事故。特别是在水平段钻进时,井壁垮塌和掉块现象频发,严重影响了钻进效率^[15]。

3.1.3 全井段大井斜

由于整个井段均为大井斜施工,钻具承受的摩擦阻和回转扭矩显著增加,同时,无法利用钻具自重进行加压。大井斜条件下,岩屑上返困难,易在定向段井眼低边形成岩屑床,导致钻进与起钻时的摩擦阻进一步增大^[16]。因此,为降低钻具事故风险,需添加耐高温润滑剂以改善钻井液的润滑性能,并优化钻具组合,增加水力振荡器等钻井辅助工具,以确保施工的安全顺利进行。

3.2 主要技术措施

3.2.1 “小口径先导孔+大口径回拖扩孔”工艺

在钻探过程中,最初设计采用 $\Phi 215.9$ mm井眼复合钻进,但在钻进至48 m(垂深约15 m)时发生了失返性漏失。随后,顶漏钻进至96 m(垂深约25 m)时又发生了严重卡钻事故,导致900 kN钻具过提并松动。解卡后发现现场出现井壁坍塌情况,下钻风险极高。

根据地层信息,井眼轨迹穿越的地层为回填料,回填料无胶结和封堵能力,粒径不均匀。由于钻井液的护壁能力有限,加上火烧区温度异常,钻探施工面临极大的困难和风险。综合考虑这些因素,最终采用了“小口径先导孔+大口径回拖扩孔”的钻完井工艺。

小口径导向钻进能够有效降低井壁失稳的风险。同时,在小口径钻进阶段,泥浆泵的排量相对较低,有助于减少钻井液的漏失和消耗。而大口径

回拖扩孔至口径不 ≤ 300 mm,确保了生产套管的顺利穿越。所使用的回拖扩孔牙轮钻头见图4。



图4 $\Phi 300$ mm 大口径岩石层回拖扩孔牙轮钻头

Fig.4 $\Phi 300$ mm large-diameter rock strata back-reaming cone bit

本次钻完井工艺的原理为:首先按照预先设计的井眼轨迹钻出小口径先导孔;随后在先导孔出口端的钻杆头部安装扩孔器,沿原轨迹进行回拉扩孔;待井眼扩大至所需尺寸后,即可完成大口径井眼的构建,为后续工序创造条件^[17]。

小口径先导孔的钻具组合为: $\Phi 152.4$ mm 牙轮钻头 $\times 1$ 只+ $\Phi 121$ mm $\times 1.5^\circ$ 螺杆 $\times 1$ 根+ $\Phi 121$ mm定向接头(内置测斜仪) $\times 1$ 只+ $\Phi 121$ mm无磁钻铤 $\times 1$ 根+ $\Phi 121$ mm水力振荡器 $\times 1$ 根+ $\Phi 114$ mm钻杆。

3.2.2 耐高温无线随钻测斜仪

为应对高温环境,本次施工采用了耐温达 175°C 的钻井液脉冲式无线随钻测斜仪(图5)。该仪器采用钻井液正脉冲技术,地面部分通过无线电传输立管压力信号及其他数据参数,无需布置电缆,方便加接钻杆。

在钻井液管线上安装的压力传感器定期采集



图5 无线随钻测量仪器

Fig.5 MWD (measurement while drilling) tool

钻井液压力信号,并通过无线方式发送至无线收发主机。该主机连接到数据处理仪,接收并处理泵压信号。数据处理软件对泵压信号进行解算,生成所需的数据,并通过无线方式传输至司钻显示器,以便实时显示和监控相关数据。由于井斜与脉冲存在一定的对应关系,地面操作人员可以根据脉冲信号来确定井斜大小^[18]。

3.2.3 优选井底动力钻具

在选择单弯螺杆钻具时,优先考虑技术成熟、大扭矩和耐高温的特点。为满足造斜和复合钻进的需求,选用 1.5° 的单弯螺杆,耐温能力达 180°C 。这种钻具在复合钻进中具有良好的防斜打直效果,能够随钻纠偏,并实现一定的井眼扩大率,有效降低因缩径而引起的摩阻增大、卡钻和划眼等风险。主要以滑动钻进为主,既能满足造斜要求,又能保持井眼轨迹的平滑。螺杆主要技术参数见表1。螺杆内部结构如图6所示。

表1 螺杆主要技术参数

Table 1 Key technical parameters of the downhole motor (PDM)

性能	指标
钻头直径/mm	152.4
外径/mm	121
弯度/ $^\circ$	1.5
流量范围/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	495~990
钻头转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	150~300
马达压降/MPa	4
输出扭矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	2515
推荐钻压/kN	49
输出功率/kW	71
长度/m	6.7
质量/kg	978



图6 螺杆内部结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of the internal structure of the downhole motor (PDM)

3.2.4 水力振荡器

随着井眼的延伸和井斜角度的增大,钻具与井壁之间的摩擦阻力逐渐增大,可能导致托压现象,使得施加钻压变得困难,影响施工效率^[19]。为此,

本次施工引入了水力振荡器,旨在减少钻具与井壁之间的摩擦阻力,提高机械钻速。

水力振荡器通过钻井液驱动内部动阀片产生周期性压力波动,引发钻柱轴向振动,从而将钻具与井壁的静摩擦转化为动摩擦,有效降低摩擦阻力^[20]。其力学模型可基于振动系统动力学分析:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

式中: m ——钻柱等效质量(含钻头、钻铤等),kg; x ——位移,m; t ——时间,s; c ——阻尼系数,N·s/m; k ——等效弹簧刚度,N/m; F_0 ——周期性激振力的幅值,N; ω ——角频率,rad/s。

水力振荡器具体的实物见图7。

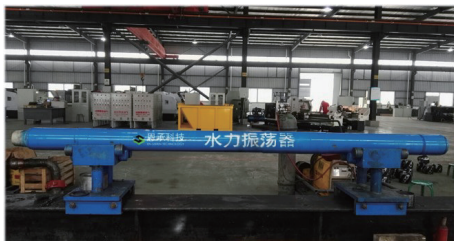


图7 水力振荡器实物

Fig.7 Physical diagram of hydraulic oscillator

3.2.5 钻井液固控装置与冷却装置

由于地层破碎,钻进时钻井液会混入各类固相颗粒,因此本工程使用了钻井液净化装置(图8),以便及时、有效地清除钻井液中的固相杂质,维护钻井液性能,保障顺利钻进^[21]。同时,考虑到地层高温环境,使用了钻井液强制冷却装置(图9),通过强制对流换热将高温钻井液与低温载冷剂进行换热,实现钻井液降温,确保其性能稳定,延长井下工具的使用寿命。



图8 D系列非开挖钻井液净化装置

Fig.8 D-series trenchless drilling fluid purification unit



图9 钻井液冷却装置

Fig.9 Drilling fluid cooling system

3.2.6 优化高温钻井液体系

根据地层岩性和地层温度,采用了耐高温复合有机盐钻井液体系。该体系经过材料及配方优化,能够有效解决超高温钻井液固有的高温降解、高温钝化等技术难题^[22]。

钻井液配方:1% BZ-TQJ、2%~3% 抗高温降滤失剂、0.5%~1% 的聚胺抑制剂、0.8%~1.2% 抗高温增黏降滤失剂、1%~2% 抗高温封堵防塌剂、1.5%~2% 封堵剂、1%~2% 极压润滑剂、5%~8% 钾盐、2%~3% 细目钙、2%~3% 纯碱,根据需要添加CaCO₃、烧碱。该体系不添加惰性加重材料,通过合理选择钻井液密度、强化高温流变性能、加强抑制封堵能力、提前井漏预防、优化润滑性能等技术手段,能够有效维持井壁稳定,降低定向托压,改善钻压传递,降低漏失风险。钻井液性能参数见表2。

表2 钻井液性能参数

Table 2 Drilling fluid performance parameters

性 能	指 标
密度/(g·cm ⁻³)	1.15~1.25
漏斗黏度/s	60~90
初切力/Pa	1~4
终切力/Pa	4~18
塑性黏度/(mPa·s)	40~60
动切力/Pa	8~15
API滤失量/mL	4
泥饼厚度/mm	0.5
pH	8~9

4 钻井施工和应用效果

4.1 钻井施工与成井概况

本项目成功完成了2口地下热能先导试验水平井的钻探与完井作业,构建了完整的闭式双水平井取热系统。2口井均严格按照设计轨道施工,并圆满达到了所有技术指标。最终成井关键参数如表3所示。

表 3 双水平井成井关键参数

Table 3 Key parameters of the dual horizontal wells

井号	完钻井深/m	水平段长度/m	水平段垂深/m	终孔直径/mm	井身质量
1	499.11	216.84	41.10~42.73	300	合格
2	499.11	218.76	45.09~46.73	300	合格
设计要求	-	≥200	40~50	≥215.9	全角变化率≤10°/30 m

4.2 关键技术与措施应用效果分析

4.2.1 “先导孔+回拖扩孔”工艺成效

该工艺是本项目取得成功的关键。在初期采用 $\varnothing 215.9$ mm 井眼钻进时,钻至 48 m 发生失返性漏失,继续顶漏钻进至 96 m 又出现严重卡钻事故(过提拔达 900 kN),表明原方案在松散回填层与破碎基岩中不具备可行性。经调整为“ $\varnothing 152.4$ mm 先导孔+ $\varnothing 300$ mm 回拖扩孔”工艺后,取得显著成效:小口径先导孔机械钻速稳定在 12 m/h,井下阻卡现象明显改善,日进尺提升至 90 m,实现了安全高效钻进;后续回拖扩孔至 $\varnothing 300$ mm 过程顺利,有效保障了大口径井眼的形成及生产套管的顺利下入。新工艺成功解决了前期漏失与卡钻问题,具体钻进参数见表 4。

表 4 $\varnothing 152.4$ mm 口径钻进参数

Table 4 $\varnothing 152.4$ mm borehole drilling parameters

钻进工艺	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	排量/(L·s ⁻¹)
复合钻进	15~30	25~35	12~15
滑动导向	30~60	-	12~15

4.2.2 高温应对措施效果

针对井下高温环境(>170 °C),通过采用耐温 175 °C 的无线随钻测斜仪(MWD)与耐温 180 °C 的螺杆钻具,保障了全井段轨迹控制的连续性与精确性,未发生因高温导致的工具失效;配合使用耐温复合有机盐钻井液体系,显著增强了井壁稳定性;并辅以钻井液强制冷却装置,有效控制循环流体温度,为井下工具提供了稳定的工作环境。

4.2.3 井眼轨迹控制与降摩阻效果

由于全井段处于大井斜状态(开孔井斜约 66°),导致钻具摩阻和回转变矩显著增大,且岩屑易在井眼低边堆积形成岩屑床。为此,在轨迹控制方面,全程结合无线随钻测量技术,确保井眼轨迹平滑,实现了 2 口井水平段在目标层内的精准平行延伸,中靶精度完全符合设计要求;在降阻措施方面,通过在水平段钻具组合中引入水力振荡器,有效将钻

柱与井壁间的静摩擦转化为动摩擦,显著缓解了“托压”现象,保障了钻进效率。

5 结论

(1)基于 Eavor-Loop 闭式循环技术,结合硫磺沟煤田地质特征,设计了“稳斜+造斜+水平+造斜+稳斜”五段制井眼轨道,并创新采用“小口径先导孔+大口径回拖扩孔”工艺。小口径先导孔($\varnothing 152.4$ mm)有效降低井壁失稳风险,减少漏失与卡钻事故;后续大口径回拖扩孔($\geq \varnothing 300$ mm)保障了生产套管的高效穿越,同时增加换热面积,为深层热能提取奠定基础。

(2)针对高温环境,集成耐 175 °C 无线随钻测斜仪与 180 °C 螺杆钻具,实现精准导向与高效钻进;自主研发耐高温复合有机盐钻井液体系(耐温 ≥ 210 °C),优化配方包含抗高温降滤失剂、聚胺抑制剂等关键材料,显著提升护壁性能与流变稳定性。

(3)引入非开挖定向铺管钻机,结合泥浆净化装置与低密度钻井液体系,增强携岩能力并降低漏失风险;针对全井段大井斜导致的摩擦阻力,采用水力振荡器降低钻具与井壁摩擦,有效降低了水平段钻进中的摩阻和托压现象。

(4)通过“小口径先导孔”工艺提高事故处理效率,降低解卡成本;钻井液强制冷却装置与固控系统协同运行,延长井下工具寿命并减少非作业时间。现场应用表明,该技术方案成功解决了失返性漏失、井壁垮塌等难题。

参考文献(References):

[1] 张家琪. 地热深井闭式采热-储能-供暖一体化系统研究[D]. 天津:天津大学,2022.
ZHANG Jiaqi. Study on geothermal closed-loop heating systems integrated with deep borehole heat exchangers for heat extraction and energy storage[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.

[2] 马永法,周学军,袁利娟,等. 垂直井闭循环地热系统热提取性能和注入优化数值模拟[J]. 可再生能源,2024,42(10):1302-1312.
MA Yongfa, ZHOU Xuejun, YUAN Lijuan, et al. Simulation

- of heat extraction and injection optimization from a vertical-well closed-loop geothermal system[J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(10):1302-1312.
- [3] 何东博,吕博舜,王雨佳,等. 中国石油冀东油田地热能开发思考与实践[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(6):825-833.
- HE Dongbo, LÜ Boshun, WANG Yujia, et al. Thoughts and practices of geothermal energy development in PetroChina Jidong Oilfield[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(6):825-833.
- [4] Isania F, Elahifar B. Advances in geothermal drilling: A comparative study with oil and gas techniques[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, 246:213638.
- [5] 王培义,张林洁,张海雄,等. 雄安新区岩溶热储地热井钻井技术难点及解决方案[J]. *钻探工程*, 2025, 52(3):153-159.
- WANG Peiyi, ZHANG Linjie, ZHANG Haixiong, et al. Geothermal well technical difficulties and solutions in drilling of Xiong'an New Area karst heat reservoir[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(3):153-159.
- [6] 王安民,张强,任会康,等. 淮南硫磺沟矿区及周边地区煤层气保存条件分析[J]. *中国煤炭地质*, 2014, 26(12):7-10.
- WANG Anmin, ZHANG Qiang, REN Huikang, et al. CBM preservation condition analysis in Lihuanggou mine area and periphery, Southern Junggar[J]. *Coal Geology of China*, 2014, (12):7-10.
- [7] 高北斗,王海超,田继军,等. 淮南煤田硫磺沟矿区向斜-承压式煤层气富集模式[J]. *现代地质*, 2020, 34(2):281-288.
- GAO Beidou, WANG Haichao, TIAN Jijun, et al. Syncline-confined-water model of coalbed methane enrichment area in Lihuanggou mining area, Southern Junggar Coalfield[J]. *Geoscience*, 2020, 34(2):281-288.
- [8] 雍明超. 新疆硫磺沟煤矿火区治理浅析[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2020(7):113-114.
- YONG Mingchao. Analysis of fire zone management in Lihuanggou Coal Mine, Xinjiang[J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2020(7):113-114.
- [9] Amaya A, Scherer J, Muir J, et al. GreenFire energy closed-loop geothermal demonstration using supercritical carbon dioxide as working fluid[C]//45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, 2020;SGP-TR-216.
- [10] Vany J, Hirschmiller J, Toews M. Subsurface characterization methods for Multilateral Closed Loop Geothermal Systems. Case study of field scale technology demonstration project in Alberta, Canada[C]//Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik, Iceland, 2020:1-11.
- [11] Chua K J, Chou S K, Yang W M. Advances in heat pump systems: A review[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(12):3611-3624.
- [12] 韩朝旭,高千,韩元红,等. 中深层U型地热井换热特征及影响因素数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(15):6332-6343.
- HAN Chaoxu, GAO Qian, HAN Yuanhong, et al. Numerical simulation of heat transfer characteristics and influencing factors in middle-deep U-shaped geothermal well[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(15):6332-6343.
- [13] 陈龙刚. 新疆淮南煤田煤样高温贫氧氧化特性研究[D]. 西安:西安科技大学, 2019.
- CHEN Longgang. Study on Oxygen-depleted oxidation characteristics of Xinjiang coal samples[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [14] 管伟明,任大鹏,艾克拜尔·艾尔肯,等. 地表环境温度对煤田火系统影响的数值分析[J]. *中州煤炭*, 2014(3):47-49, 53.
- GUAN Weiming, REN Dapeng, Ai Ke Bai Er - Ai Er Ken, et al. Numerical analysis on system impact of atmospheric temperature to coal-field fires[J]. *Zhongzhou Coal*, 2014(3):47-49, 53.
- [15] 刘明波. 矿山大口径钻孔钻探施工技术及工艺研究[J]. *世界有色金属*, 2024(15):163-165.
- LIU Mingbo. Research on construction technology and process of large diameter drilling in mines[J]. *World Nonferrous Metals*, 2024(15):163-165.
- [16] 薛曼,侯继武,李智,等. 多分支水平井岩屑运移模型与实验研究[J]. *钻探工程*, 2024, 51(1):31-39.
- XUE Man, HOU Jiwu, LI Zhi, et al. Model and experimental research of cuttings transport in multi-branch horizontal wells[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(1):31-39.
- [17] 陈振,李雪艳. 水平定向钻铺管技术在水利工程中的应用[J]. *水利规划与设计*, 2017(12):124-127.
- CHEN Zhen, LI Xueyan. Application of horizontal directional drilling Pipe-laying technology in water conservancy projects[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2017(12):124-127.
- [18] 蔡文军. 机械式无线随钻测斜仪系统研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2006.
- CAI Wenjun. Mechanical wireless inclinometer—Principle, design and application[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2006.
- [19] 王文龙,信伟卫,张晓龙,等. 基于振动冲击的高效钻进技术研究进展[J]. *钻探工程*, 2025, 52(S1):22-28.
- WANG Wenlong, XIN Weiwei, ZHANG Xiaolong, et al. Research progress on efficient drilling technologies based on vibration impact[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(S1):22-28.
- [20] 王丹. 水力振荡器研究现状及发展趋势[J]. *石油和化工设备*, 2024, 27(10):64-67, 60.
- WANG Dan. Research status and development trend of hydraulic oscillator[J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2024, 27(10):64-67, 60.
- [21] 罗沛琪,闫成双,陈治中,等. 钻井液固控设备研究现状与发展趋势[J]. *石油工业技术监督*, 2024, 40(12):67-71.
- LUO Peiqi, YAN Chengshuang, CHEN Zhizhong, et al. Research status and development trend of drilling fluid solid control equipment[J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2024, 40(12):67-71.
- [22] 陈瑶,谭慧静,王胜,等. 地热井固井中硅酸盐水泥体系的技术现状及发展趋势[J]. *钻探工程*, 2025, 52(3):1-11.
- CHEN Yao, TAN Huijing, WANG Sheng, et al. Technical status and trends of Portland cement system in geothermal well cementing[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(3):1-11.

(编辑 王文)