

# LQDR-1 地热温泉井钻井施工技术

冯红喜<sup>1</sup>, 赖子威<sup>2</sup>, 万振卓<sup>2</sup>, 杨永明<sup>1</sup>, 封优生<sup>1</sup>,  
李海兴<sup>1</sup>, 杨 焯<sup>2</sup>, 李林庆<sup>1</sup>, 郑秀华<sup>2</sup>

(1. 河北伟业地热新能源科技有限公司, 河北 邯郸 057650; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:** 地热资源是一种清洁、安全、可靠、稳定的可再生能源。LQDR-1 是一口地热温泉井, 设计井深 3500 m, 实际完钻井深 3201.2 m。热储属于裂隙型, 设计靶区范围较小, 钻井的针对性、目的性比较强, 且地层倾角大、可钻性差。在一开、二开井段, 为减少井底水平位移, 提高中靶率, LQDR-1 井采用了塔式+钟摆钻具组合, 通过优化钻具组合及钻井参数, 全井保持了较低的井斜和较高的井身质量。在三开、四开井段, 采用气举反循环钻井工艺钻进热储地层, 一方面可以解决大口径多开次地热井环空携岩能力较差问题, 另一方面可避免或减少伤害储层, 保持地层最大出水能力, 提高单井出水量。

**关键词:** 地热资源; 地热温泉井; 井斜控制; 塔式+钟摆钻具组合; 气举反循环; 沉没比

**中图分类号:** P634; TE242 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0309-07

## Drilling technology for LQDR-1 geothermal hot spring well

FENG Hongxi<sup>1</sup>, LAI Ziwei<sup>2</sup>, WAN Zhenzhuo<sup>2</sup>, YANG Yongming<sup>1</sup>, FENG Yousheng<sup>1</sup>,  
LI Haixing<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>2</sup>, LI Linqing<sup>1</sup>, ZHENG Xiuhua<sup>2</sup>

(1. Hebei Weiye Geothermal New Energy Technology Co., Ltd., Handan Henan 057650, China;  
2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Geothermal energy is a kind of renewable energy sources which is clean, safe, reliable and stable. LQDR-1 is a geothermal hot spring well with a design depth of 3500m and an actual drilling depth of 3201.2m. The geothermal reservoir is fracturing type, with a small designed target area, strong drilling pertinence and purpose, large dip angle and poor drillability. In the first and second well section, the LQDR-1 well adopts a drilling assembly of tapered + pendulum type in order to reduce the horizontal displacement at the bottom of the well and improve the hit rate. Through optimizing the drill collar string and drilling parameters, the entire well maintains a lower wellbore inclination and higher wellbore quality. In the third and fourth well section, the air-lifting reverse circulation drilling technology was used to drill into the geothermal reservoir, which can solve the problem of poor cutting carrying capacity in the annulus of large-diameter and multi opening geothermal wells, on the other hand, the damage to the reservoir can be avoided or reduced, the maximum water output capacity of the formation is maintained, and the water output of a single well is increased.

**Key words:** geothermal resources; geothermal hot spring well; inclination control; tapered + pendulum type assembly; air-lifting reverse circulation drilling; submergence ratio

## 0 引言

地热资源集热、水、矿为一体<sup>[1]</sup>, 是一种清洁、安

全、可靠、稳定和可再生的低碳能源, 被公认为优于其他可再生能源, 在供暖、发电、洗浴、医疗保健、矿

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-08-26 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.048

基金项目: 雄安新区科技创新专项“雄安新区地热资源高效钻井与开采新型技术应用研究”(编号: 2022XAGG0500); 国家自然科学基金项目“钻井液在 EGS 热储环境下反应及其对热储伤害机制研究”(编号: 42172342)

第一作者: 冯红喜, 男, 汉族, 1972 年生, 工程师, 探矿工程专业, 从事钻探技术开发和管理工作, 河北省邯郸市广平县金广源路 91 号, xiangmubu006@163.com。

引用格式: 冯红喜, 赖子威, 万振卓, 等. LQDR-1 地热温泉井钻井施工技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 309-315.

FENG Hongxi, LAI Ziwei, WAN Zhenzhuo, et al. Drilling technology for LQDR-1 geothermal hot spring well[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 309-315.

泉饮用、种植与养殖等方面应用广泛<sup>[2]</sup>。高效开发利用地热资源,对地热井钻探的质量要求尤其是井斜的要求比较高,井底位移及“狗腿度”均不可过大<sup>[3-4]</sup>。尤其是裂隙型热储<sup>[5]</sup>一般发育在地层的裂缝、裂隙、断层或破碎带中,设计靶区范围较小,钻井的针对性、目的性比较强,井底位移偏移过大就有可能偏离靶区,导致无水或枯水等现象。

地热钻井工艺根据循环流体的不同,可分为传统泥浆正循环钻井工艺<sup>[6]</sup>、空气潜孔锤钻井工艺<sup>[7]</sup>、泡沫钻井工艺<sup>[8]</sup>、充气液钻井工艺<sup>[9]</sup>及气举反循环钻井工艺。传统泥浆正循环钻井工艺应用时间最早,发展最为成熟,适用性最强<sup>[10]</sup>,但由于泥浆密度较大,在地热井钻探过程中很难实现欠平衡钻进,空气潜孔锤、气举反循环等其他钻井工艺或由于工艺特性或通过参数调节,都可实现欠平衡钻进,达到不伤害储层的目的。

本文重点介绍LQDR-1地热温泉井泥浆正循环钻井工艺井斜控制方法及气举反循环钻进热储关键技术,分析其在地热深井中的应用效果和优势。

## 1 LQDR-1井概况

LQDR-1地热温泉井位于太行山北部山区的废弃矿山治理区,该地区属于缺水山区,在该井附近没有完井成果较好的地热井,现设计井深3500 m,实际完井深度3201.2 m(已达地质目的,按要求完钻),该区断层发育丰富,地热资源类型为裂隙型。

### 1.1 地质概况

勘查区地层垂向分布依次为奥陶系(O)、寒武系(Є)、中元古界( $Pt_2$ )、下元古界( $Pt_3$ )。井口海拔257 m。

### 1.2 井身结构

LQDR-1井实际完井深度3201.2 m,采用四开井身结构(见图1)。

一开 $\varnothing 444.5$  mm牙轮/PDC钻头钻进至602 m;下入 $\varnothing 339.7$  mm $\times$ 9.65 mm泵室管,所用管材为API标准J55无缝石油套管。

二开 $\varnothing 311.1$  mm牙轮/PDC钻头钻进至1900 m;下入 $\varnothing 244.5$  mm $\times$ 8.94 mm技术套管,所用管材为API标准J55无缝石油套管。

三开 $\varnothing 215.9$  mm反循环牙轮钻头钻进至2817 m;下入 $\varnothing 177.8$  mm $\times$ 8.05 mm技术套管,所用管材为API标准J55无缝石油套管及花管。

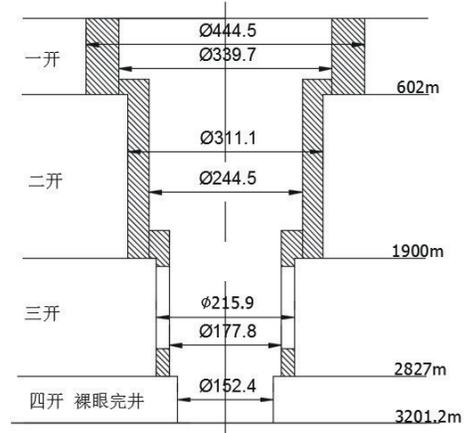


图1 LQDR-1井身结构

四开 $\varnothing 152.4$  mm反循环牙轮钻头钻进至3201.2 m,裸眼成井。

### 1.3 施工难点

(1)地层坚硬。本井钻遇地层岩性主要是灰岩、白云质灰岩、角砾状灰岩、灰色层状白云岩、燧石结核燧石条带白云岩、石英砂岩、长石石英砂岩等,下部井段以变质岩为主(大理岩化白云岩),属中硬—坚硬岩石,可钻性6~10级,具有强研磨性,可钻性极差,钻效低,难以发挥大功率石油钻机优势,只能通过优选钻井工艺和钻头型号以提高钻效。

(2)地层倾角大,极易导致井斜。根据出露地层剖面倾角分析,工区内断层发育,产状不一,地质条件异常复杂,常规钻具组合控制井斜难度较高<sup>[11-12]</sup>。

(3)下部地层(1900 m以深)易发生坍塌、掉块、破碎等不利情况,井底沉砂多,采用清水气举反循环钻进<sup>[13]</sup>,若操作不当易造成卡钻或堵钻事故。

## 2 钻探设备

LQDR-1井采用ZJ40型钻机进行施工,主要设备如下:JJ225/43K型井架,PZ12V190B型柴油机3台,400kw节能发电机1台,3NB-1300型泥浆泵2台,SF-10/250型空气压缩机1台,振动筛2台,ZQJ250 $\times$ 2/1.5 $\times$ 0.6型除砂器1台,ZCJ100 $\times$ 10型除泥器1台,LW450-842NA型离心机1台。施工现场见图2。

## 3 泥浆正循环钻进

一开、二开井段采用泥浆正循环钻进工艺施工。



图2 LQDR-1地热温泉井施工现场

### 3.1 钻具组合及钻进参数

#### 3.1.1 一开井段(0~602 m)钻具组合及钻进参数

地表地层岩性为石灰岩,仅靠水力冲击开孔难度较大,且若开孔不正对后续的施工会造成一定的困难,因此采用常规泥浆正循环回转开孔。在设备安装阶段校正、固定好,以保证开孔及后续施工的安全;做到井口、天车、转盘三点一线,使用转盘旋转开孔。

在开孔阶段(0~12 m),采用 $\text{O}444.5\text{mm}$  PDC钻头+731×730接头+731×410变径接头+ $\text{O}127\text{mm}$ 钻杆+ $\text{O}133\text{mm}\times 133\text{mm}$ 方钻杆的钻具组合。钻进参数:钻压5~10 kN,转速I档(55 r/min),泥浆排量22~55 L/s。

常规泥浆螺杆复合钻进阶段(12~602 m),采用 $\text{O}444.5\text{mm}$ 牙轮钻头+ $\text{O}244.5\text{mm}$ 直螺杆+ $\text{O}228.6\text{mm}$ 钻铤×1根+ $\text{O}406\text{mm}$ 扶正器+ $\text{O}228.6\text{mm}$ 钻铤×2根+731×410变径接头+ $\text{O}177.8\text{mm}$ 钻铤×6根+ $\text{O}127.0\text{mm}$ 钻杆+ $\text{O}133\text{mm}\times 133\text{mm}$ 方钻杆的钟摆复合钻具组合。钻进参数:钻压200~350 kN,转速I档(55 r/min+螺杆转速),泥浆排量55 L/s,泵压3~6 MPa。钻压可根据地层倾角及井斜变化趋势进行调整,为有效控制井斜,可采用150~300 kN钻压进行吊打。

#### 3.1.2 二开井段(602~1900 m)钻具组合及钻进参数

由于该井地层倾角大、可钻性差,二开井段钻进时选用2种大钟摆钻具组合:

(1)同一开井段选用的钻具组合相类似,此钻具组合适合PDC钻头钻进,在软硬胶结不均质性强地

层应用效果良好。 $\text{O}311.2\text{mm}$  PDC钻头+ $\text{O}244.5\text{mm}$ 直螺杆+ $\text{O}228.6\text{mm}$ 钻铤×1根+ $\text{O}308\text{mm}$ 扶正器+ $\text{O}228.6\text{mm}$ 钻铤×2根+731×410变径接头+ $\text{O}177.8\text{mm}$ 钻铤×6根+ $\text{O}127.0\text{mm}$ 钻杆+ $\text{O}133\text{mm}\times 133\text{mm}$ 方钻杆。

钻进参数:钻压100~150 kN,转速I档(55 r/min+螺杆转速),泥浆排量55 L/s,泵压6~15 MPa。钻压可根据地层倾角及井斜变化趋势进行调整,采用80~100 kN钻压进行吊打,井斜控制效果良好。

(2)适用于采用牙轮钻头钻进极硬变质岩地层的钻具组合。 $\text{O}311.2\text{mm}$ 牙轮钻头+ $\text{O}228.6\text{mm}$ 钻铤×2根+ $\text{O}308\text{mm}$ 扶正器+ $\text{O}228.6\text{mm}$ 钻铤×1根+731×410变径接头+ $\text{O}177.8\text{mm}$ 钻铤×6根+ $\text{O}127.0\text{mm}$ 钻杆+ $\text{O}133\text{mm}\times 133\text{mm}$ 方钻杆。

钻进参数:钻压100~150 kN,转速I档(55 r/min),泥浆排量55 L/s,泵压9~12 MPa。钻压可根据地层倾角及井斜变化趋势进行调整。

### 3.2 井斜控制效果

LQDR-1井钻遇地层坚硬,可钻性差,为提高钻效,应采用较大钻压,但钻遇地层倾角大,增大钻压极易增加井斜。为提高钻效且将井斜控制在较小范围内,采用塔式、钟摆复合钻具。

塔式、钟摆复合钻具既可以有效防止井斜,也可以有效纠斜,是控制井斜的有力手段。

以二开井段为例,井斜及水平位移较常规钟摆钻具组合钻进时得到大幅降低,取得了较好应用效果,井斜角、水平位移变化趋势见图3。LQDR-1井二开井段井斜角仅 $0.21^{\circ}\sim 1.83^{\circ}$ ,最大水平位移9.71 m,随后逐渐降低,井深1900 m处水平位移仅4 m,闭合方位 $18.37^{\circ}$ 。

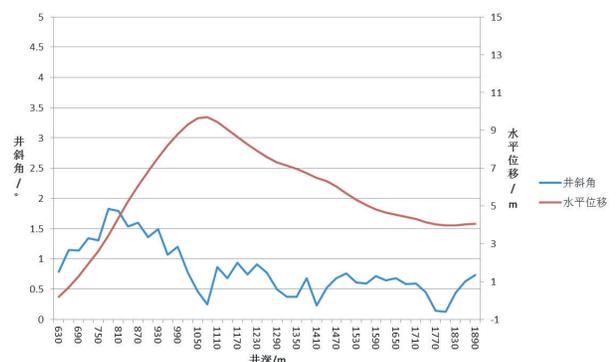


图3 二开井段井斜角、水平位移变化趋势

#### 4 气举反循环钻进热储层

三开、四开井段热储层钻进施工中,采用气举反循环钻井工艺,可避免或减少伤害热储层,保持地层最大出水能力,提高单井出水量。

气举反循环钻井工艺的原理是空气在空压机的驱动下经过双壁钻杆的内外管环空到达双壁钻杆底部,通过气水混合器进入内管与清洗液及岩屑形成三相流。双壁钻杆内管中的清洗液(多为携带岩屑的清水)因为混入空气,在混合器上部形成低密度的气水混合液,内管的气水混合液在压差作用下向上流动,把井底的岩屑连续不断携带出地表,排入沉淀池。沉淀后的泥浆再流回井内,补充循环液的空间,如此不断循环形成连续钻进的过程<sup>[14]</sup>。

气举反循环是一种欠平衡空气钻井工艺,相比传统钻井工艺,可有效降低环空井底压力,减少岩屑重复破碎,有效保护热储层,保持单井最大出水能力<sup>[15]</sup>。

##### 4.1 钻具组合

泥浆正循环钻进切换至气举反循环钻进,仅需额外配备双壁钻具、空压机等设备、钻头更换反循环牙轮钻头即可,且气举反循环钻进不需要配备大功率泥浆泵,其他钻探设备不需要改变,工艺切换较为简单快捷。

气举反循环钻具组合为:反循环钻头+钻铤+加重钻杆+单壁钻杆+气水混合器+双壁钻杆+双壁主动钻杆+气盒子+单通道水龙头。

##### 4.2 气举反循环钻进参数

三开、四开井段(1900~3201 m)采用气举反循环钻井工艺施工,该工艺钻进效率主要取决于压缩空气气量、压力、沉没比及上返速度等。

###### 4.2.1 空压机参数

(1)供气压力。可通过现场测试确定,选用空压机可保证在设计最大应用深度(终孔深度)、最低动水位和最大沉没深度的工况下,正常启动形成反循环即可。选定空压机的额定供气压力应满足公式(1)<sup>[16]</sup>:

$$P_e \geq 10^{-3} \times \rho g H + \Delta P \quad (1)$$

式中: $P_e$ ——空压机额定压力,MPa; $\rho$ ——钻孔冲洗液密度, $g/cm^3$ ;  $g$ ——重力加速度, $9.8 m/s^2$ ;  $H$ ——气水混合器拟最大沉没深度,m; $\Delta P$ ——压气管道的压力损失,一般根据供气量和管路截面积等因素,

按每百米管路0.10~0.70 MPa选择。

代入相关参数计算得空压机最小供气压力为6.2 MPa。

(2)供气量。空压机的供气量应与双壁钻杆内外直径、钻孔直径相适应,以达到最佳的排渣效果。空压机额定供气量应满足见公式(2)<sup>[16]</sup>:

$$Q_e = (120 - 144) d^2 v \quad (2)$$

式中: $Q_e$ ——空压机额定供气量, $m^3/min$ ;  $d$ ——岩屑上返通道直径,m;  $v$ ——双壁钻杆内管流体上返速度, $m/s$ 。

代入相关参数计算得空压机最小供气量为1.8  $m^3/min$ 。

供气量也可参照表1<sup>[16]</sup>确定。通常情况下,气举反循环钻进时双钻杆环状间隙的压缩空气流速控制在15~20  $m/s$ 之间,气液固混合冲洗液上返速度控制在2~3  $m/s$ 之间为宜。

表1 气举反循环钻进所需的供气量

双壁钻杆内管内径/mm	供气量/( $m^3 \cdot min^{-1}$ )
49	1.0~2.4
66	1.8~4.3
78	2.6~6.0
98	4.1~9.5
113	5.4~12.6
150	9.5~22.3

因此,综合确定选用型号为SF-10/250型空压机1台,其额定排气量10  $m^3/min$ 、额定排气压力25 MPa,可以满足实际需求,且有较大富余量。

为提高钻进效率,探索供气量对气举反循环钻进的影响,在2577.27~2607 m井段采用2台SF-10/250型空压机并联供气进行钻井作业,供气量提升至20  $m^3/min$ 。实际钻进过程中井口返水量较为稳定,约36  $m^3/h$ ,井口收集的岩屑粒径有所增加,多见7~10 mm的片状岩屑、有少量达到15 mm的块状岩屑,井底较为干净。供气量增加至20  $m^3$ 后,接单根后重新建立循环的时间由25 min缩减至12 min,但在其他参数及地层均保持一致的情况下,机械钻速提升不明显,因此此后井段供气量仍采用10  $m^3/min$ 的单台空压机供气。该试验仅维持较短时间,为优化气举反循环钻进所需供气量,应在不同工况下展开多次试验,并理论分析供气量对钻效的影响。

#### 4.2.2 沉没比确定

沉没比即气水混合器在动水位以下的浸没深度与其至水龙头弯管最高处中心线的长度之比。该井在应用气举反循环钻进过程中,为提高沉没比,增大钻杆内外压差,采取了回灌措施,时刻保持动水位在井口处,因此动水位以下的双壁钻杆长度等于下入双壁钻杆总长度。气举反循环钻进沉没比计算示意图4。

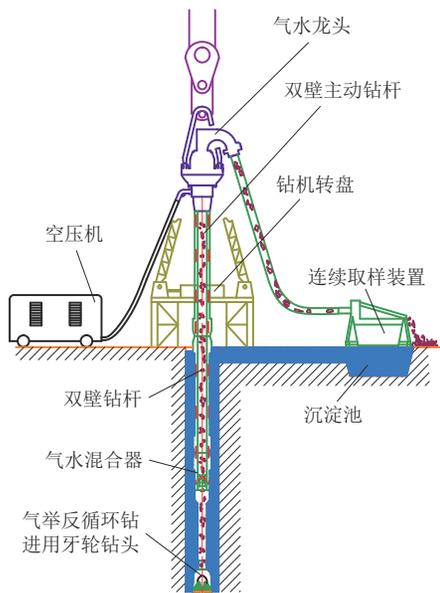


图4 气举反循环钻进沉没比计算示意

##### 4.2.2.1 初始沉没比的确定

实现气举反循环要求一定的沉没比。计算公式如下,在第一次尝试应用气举反循环的过程中,此时孔深1920 m,静水位70 m,平台至水龙头鹅颈管高度12 m。

$$m = h_2 / (h_1 + h_2) \quad (3)$$

式中: $m$ ——沉没比; $h_2$ ——静水位至气水混合器的高度; $h_1$ ——静水位至鹅颈管的高度。

为保证钻杆内外建立足够压差,下入了多达54根、总长度517.32 m的双壁钻杆,沉没比达到0.974。按照沉没比计算公式得沉没比为0.86。此时,气举反循环效果较好,但由于双壁钻杆数量有限,钻进进尺较快,需要提钻加接单壁钻杆,劳动强度大,随着孔深加大,通过调整沉没比来减轻提下钻带来的劳动强度。

##### 4.2.2.2 双壁钻杆沉没深度确定

由于该井动水位高度与井口持平,实现较高的

沉没比,对双壁钻杆长度的要求较低。因此,该井在后续的替杆作业中逐渐减少了双壁钻杆的长度,即减小了双壁钻具下入深度与尾杆长度的比值。在井深3168.37 m处,首次将替杆后下入的双壁钻杆长度减少至30根(287.4 m),顺利实现气举反循环钻进。代入上述沉没比计算公式得,沉没比为0.77,气举反循环钻进效果与之前相比,稍有降低,但考虑综合因素,可以满足钻进需求。

因此可得出以下结论:在维持大沉没比的前提下,双壁钻杆沉没在水中的长度越多,气举反循环效果越佳,但所需双壁钻具数量越多。

#### 4.2.3 上返速度计算

在气举反循环钻进过程中,流体的携岩能力与其上返速度密切相关,合理的上返速度是气举反循环钻进顺利进行的关键,可以运用下式计算气举反循环钻进岩屑上返所需的最小流速<sup>[17]</sup>:

$$V_{\text{上返}} = \frac{12.7Q}{D^2 - d^2} \quad (4)$$

式中: $D$ ——外圆截面积,  $\text{cm}^2$ ;  $d$ ——内圆截面积,  $\text{cm}^2$ ;  $Q$ ——举升液量,  $\text{L/s}$ 。

按照 $\varnothing 215.9 \text{ mm}$ 计算得举升液量为2.9~5.09  $\text{L/s}$ ,代入 $\varnothing 127 \text{ mm}$ 双壁钻具相关参数,忽略钻杆接头参数和延程损失,计算得 $V_{\text{min}} = 2.35 \text{ m/s}$ ,满足气举反循环最小流速2  $\text{m/s}$ 要求。上返岩屑见图5。



图5 气举钻进排出的岩屑

#### 4.2.4 其他参数

##### 4.2.4.1 钻压

钻压应根据地层情况、岩石可钻性及返出岩屑粒径及时调整。三开1900~2277 m井段钻压控制在30~40 kN, 2277~2827.07 m井段钻压控制在110~120 kN。测井结果表明:采用较小钻压吊打可以有效控制井斜。

##### 4.2.4.2 转速

转速控制在40~50  $\text{r/min}$ 。在钻具发生剧烈振

动或跳钻,需要及时调整转速,防止孔内事故发生。

### 4.3 防堵措施

在施工过程中,出现了多次钻头或钻铤堵塞的井下事故,大大增加了辅助作业的时间。为解决堵塞问题,经研究决定在钻头上加焊裙板(见图6),保证牙轮正常转动的情况下仍可进水并吸入小颗粒岩屑,大部分岩屑通过轮齿间隙进入,由于在钻进过程中牙轮一直转动,所以不会出现岩屑卡堵轮齿间隙的现象。在井底岩屑较多时,可以有效地防止进水(渣)堵塞,同时可以控制吸入岩屑的粒径和数量、避免钻具内腔因岩屑过多而堵塞。



图6 反循环牙轮钻头导流裙板

在实际施工过程中,常见片状岩屑架桥堵塞现象,一般将钻具提离井底,继续送风40~50 min后可恢复返水,若不能恢复返水,反复多次上提活动钻具大多能解除堵塞问题虽对钻进效率造成了一定的影响,但基本能维持正常钻进。

## 4.4 气举反循环钻进取得的成果

### 4.4.1 保持孔底干净,满足地质要求

本井采用气举反循环钻进工艺,完钻后采用酸

洗,出水量达到 $57\text{ m}^3$ 和温度达到 $53\text{ }^\circ\text{C}$ (见图7)。与附近同类型钻井效果比较,采用泥浆正循环钻进,完钻后酸洗水量和温度均增加50%以上,取得较好的地质成果,分析原因主要是气举反循环钻进作为一种前平衡钻井工艺,时刻保持孔底干净,不会对热储层的裂隙产生堵塞,而且能够时刻将热储层内裂隙通过气举反循环的抽吸作用清理干净,使其相互贯通,同时,采用该工艺,完钻后省去替浆、洗井步骤,可直接进行抽水试验,在有效保护热储层的同时节约了施工成本。



图7 抽水试验效果

### 4.4.2 降低动力消耗,节约成本

根据现场统计,使用正循环钻进工艺,每月的耗电量大约为15万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,使用气举反循环钻进的每月耗电量大约为10万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。这是因为使用气举反循环钻进只使用空压机作为循环装置,相较于泥浆泵能更好的节约动力费用。

### 4.4.3 提高了钻头寿命

使用气举反循环钻进工艺在三开钻进,钻头的机械钻速相比一、二开正循环钻进高,且钻头平均寿命也提高,钻头使用情况见表2。

表2 钻头使用情况统计表

井段	井径/mm	总进尺/m	钻头个数	钻头类型	平均机械钻速/ $(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	最大机械钻速/ $(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	平均寿命/ $(\text{m}\cdot\text{个}^{-1})$
一开	444.5	602	7	PDC+镶齿牙轮	1.07	1.88	86
二开	311.1	1298	12	PDC+镶齿牙轮	1.32	2.17	108.17
三开	216.3	927.02	7	镶齿牙轮	1.62	2.27	130.14

## 5 结论与建议

(1)LQDR-1井一开及二开井段应用塔式+钟摆复合钻具控制井斜取得了较好应用效果,为井斜控制提供了一条有效途径。

(2)泥浆正循环钻进切换至气举反循环钻进较为简单快捷,在钻遇热储地层时,可根据实际情况及时切换。

(3)在维持大沉没比的前提下,双壁钻杆沉没在

水中的长度与尾杆的长度之比不低于1:10均可实现气举反循环钻进,可适当减少双壁钻杆下深,以增加替杆间距、减少替杆时间。

(4)气举反循环钻进流体上返速度快,不受井径影响,携岩能力强,携岩困难的大口径地热井可采用气举反循环钻进增加携岩能力,而且可避免或减少伤害热储层。

#### 参考文献:

- [1] 胡郁乐,张惠,张秋冬,等.深部地热钻井与成井技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2013:2-5.
- [2] 许刘万,伍晓龙,王艳丽.我国地热资源开发利用及钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(4):1-5.
- [3] 刘修善,苏义脑.井斜控制方案设计方法[J].石油学报,2015,36(7):890-896.
- [4] 王逸,曾杰,魏志刚,等.超深井小井眼井斜控制技术分析[J].工程技术研究,2021,6(10):139-140.
- [5] 李朋威,何治亮,冯建赟,等.中国东部主要沉积盆地型热储产出特征与地热开发利用建议[J].科技导报,2017,35(14):75-79.
- [6] 陈莹,卢玮,申云飞.多工艺钻进技术在地热开发中的应用[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.地质出版社,2019:185-190.
- [7] 石荆京,张海林,苏园园,等.空气潜孔锤钻进技术在舜皇山基岩地热深井的应用[J].钻探工程,2021,48(10):36-42.
- [8] 王龙,张子桥,张华伟,等.肯尼亚OLKARIA高温地热井钻井技术应用[J].国外油田工程,2010,26(10):32-33,51.
- [9] 郭启华,权迎军,权春阳.欠平衡充气钻井工艺技术应用及展望[J].化工设计通讯,2018,44(12):239.
- [10] 于海生.地热钻井工艺及方法分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022(5):0173-0175.
- [11] 林铁军,练章华,刘健,等.空气钻井井斜问题与地层倾角的规律探讨[J].钻采工艺,2007(3):7-9,147.
- [12] 孙士慧.大庆油田气体钻井井斜机理研究[D].大庆:东北石油大学,2011.
- [13] 岳松江,彭冉冉.气举反循环钻进技术应用[J].新疆地质,2017,35(S1):202-205.
- [14] 王桦,郝世俊,莫海涛.气举反循环钻进中空压机的启动风压初探[J].煤田地质与勘探,2017,45(4):157-162.
- [15] 彭彬,李帮民,王丹,等.气举反循环技术在石油钻井中的适应性分析[J].科学技术与工程,2016,16(19):179-184.
- [16] DZ/T 0355—2020,气举反循环钻探规程[S].
- [17] DZ/T 0260—2014,地热钻探技术规程[S].

(编辑 王文)