

# 侧钻绕障技术在干热岩 HDR-1 井中的应用

谭现锋<sup>1,2</sup>, 张强<sup>\*1,2</sup>, 赵长亮<sup>3</sup>, 战启帅<sup>1,2</sup>, 李生海<sup>1,2</sup>

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 山东 济宁 272100;

2. 山东省地热清洁能源勘查开发工程研究中心, 山东 济宁 272100;

3. 山东省地勘局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东 德州 253072)

**摘要:** 东南沿海深部干热岩科学钻探 HDR-1 井在 3000 m 以深发生卡钻事故, 经过多种方法处理后, 井内仍留有 100 多米“落鱼”。由于继续套铣打捞井内“落鱼”难度大、风险高、周期长, 经多方论证, 决定采用侧钻绕障技术绕过事故井段。通过对套管斜向器侧钻、裸眼水泥塞侧钻和裸眼斜向器侧钻 3 种方案进行对比, 最终采用裸眼水泥塞侧钻方案。此次侧钻绕障的成功应用, 在国内干热岩施工中尚属首次, 克服了大深度、大直径、高温、高硬度等技术难题, 综合运用了随钻测量、复合动力钻进工艺、抗高温钻井液等先进技术, 为我国干热岩科学钻探与深部地热资源勘探提供了新的技术支撑。

**关键词:** 干热岩钻井; 绕障侧钻; 高温硬岩; 螺杆钻具

**中图分类号:** P634; TE24 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2023)03-0083-09

## Application of sidetracking to obstacle bypassing in hot dry rock Well HDR-1

TAN Xianfeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>\*1,2</sup>, ZHAO Changliang<sup>3</sup>, ZHAN Qishuai<sup>1,2</sup>, LI Shenghai<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Provincial Lunan Geology and Exploration Institute (Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources No.2 Geological Brigade), Jining Shandong 272100, China;

2. Shandong Geothermal Clean Energy Exploration and Development Engineering Research Center, Jining Shandong 272100, China;

3. The Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou Shandong 253072, China)

**Abstract:** A sticking incident happened in HDR-1 well at a depth of 3000m in hot dry rock. After various treatments, over 100m long “lost fish” still remained downhole. With the casing-milling method to continue to deal with the fish, it may lead to great difficulty, high risk and long period. After trade-offs of various methods, it is decided to adopt the method of sidetracking to bypass the incident section. Through the comparison of three plans of sidetracking with the deflector inside casing, sidetracking from the open hole cement plug and sidetracking with the open hole deflector, sidetracking from the open hole cement plug was finally adopted. The successful application of sidetracking around the barrier is the first time in hot dry rock drilling in China, which has overcome the technical difficulties of large depth, large diameter, high temperature and high hardness, and applied advanced technology, such as measurement while drilling, complex power drilling technology, high temperature resistant mud, providing new technical support for hot dry rock scientific drilling and deep geothermal resource exploration in China.

**Key words:** hot dry rock drilling well; sidetracking around the obstacle; high temperature hard rock; PDM drill tool

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-10-25 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.03.011

第一作者: 谭现锋, 男, 汉族, 1977 年生, 研究员, 地质工程专业, 博士, 主要从事深部地热资源勘探与开发、采煤沉陷区综合治理与生态修复工作, 山东省济宁市兖州区九州中路 107 号, geotan1977@126.com。

通信作者: 张强, 男, 汉族, 1991 年生, 工程师, 勘查技术与工程专业, 长期从事钻探生产技术与管理工作, 山东省济宁市兖州区九州中路 107 号, 1327107863@qq.com。

引用格式: 谭现锋, 张强, 赵长亮, 等. 侧钻绕障技术在干热岩 HDR-1 井中的应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 83-91.

TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAO Changliang, et al. Application of sidetracking to obstacle bypassing in hot dry rock Well HDR-1[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 83-91.

## 0 引言

中国地质科学院水文地质环境地质研究所实施的“东南沿海深部干热岩科学钻探HDR-1井”,设计井深4000 m,完钻井深4000.86 m,完钻井径152.4 mm,井底温度109.58℃。该井钻进至3121.24 m进行定深取心,取心完毕下钻划眼过程中在3101 m处发生卡钻事故。根据钻时录井和岩心分析,上部井段机械钻速较高,岩心成大角度劈裂状,地层破碎、易坍塌掉块是导致卡钻事故的主要因素。事故发生后,经爆炸松扣、套铣钻杆、震击、套铣钻铤等处理手段后,套铣打捞至2965 m,井内仍留有100多米“落

鱼”。由于继续套铣打捞井内“落鱼”难度大、风险高、周期长,经多方论证,决定放弃套铣打捞,采用侧钻绕障的方法绕过事故井段后继续钻井施工。

## 1 HDR-1井基本情况

### 1.1 地层情况

HDR-1井位于福建省漳州市龙海市清泉林场内,主要地层岩性为燕山期似斑状花岗岩、黑云母花岗岩、橄榄辉绿玢岩、混合岩、弱片麻黑云二长花岗岩、含橄榄黑云二长花岗岩、二长花岗岩、辉长岩夹混合岩、粗粒二长花岗岩等。

工作区地层概念模型见图1。

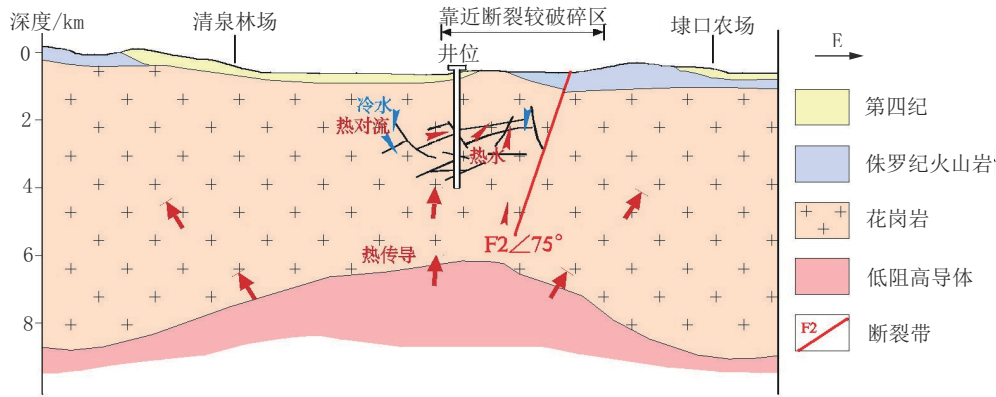


图1 HDR-1井位与地层概念模型

Fig.1 Conceptual model of HDR-1 well location and formation

### 1.2 主要设备情况

HDR-1井施工现场主要设备情况如下:

ZJ30/1700型钻机:钻井深度3000 m( $\Phi 114$  mm),最大钩载1700 kN,配套JJ170/41-K型井架。

3NB-1300D型泥浆泵:排量28.16~51.85 L/s,压力17~31 MPa,冲程305 mm,冲数120 spm,标配956 kW电机。

固控设备:ZSL $\times 1.15 \times 2-2$ 型振动筛1台,LW450-842N型离心机1台。

### 1.3 侧钻前井身结构

(1)井口管: $\Phi 444.5$  mm钻进至34 m,下入 $\Phi 377$  mm $\times 11$  mm的导管护孔;

(2)一开: $\Phi 311.1$  mm钻进至206.57 m,下入 $\Phi 244.5$  mm $\times 10.03$  mm石油套管并固井;

(3)二开: $\Phi 215.9$  mm钻进至3121.24 m进行定深取心,取心完毕下钻划眼过程中在3101 m处发生

卡钻事故。

HDR-1井0~3121.24 m实钻井身结构如图2所示。

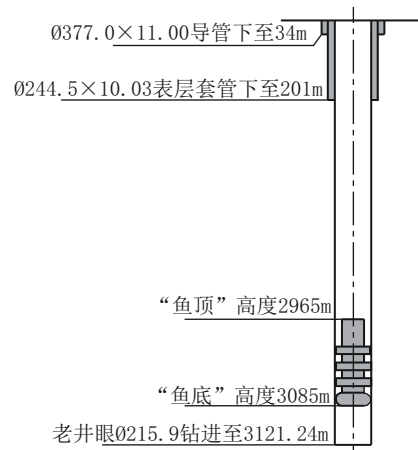


图2 HDR-1井井身结构示意图

Fig.2 Structure of Well HDR-1

## 2 侧钻实施难点

侧钻技术广泛应用于油气井工程中水平井、分支井开发及事故绕障处理等,在干热岩施工中应用尚属国内首次,没有相关经验可以借鉴。HDR-1井侧钻绕障的实施,主要面临以下困难。

### 2.1 侧钻深度大

HDR-1井“鱼顶”高度2965 m,为减少报废井段长度,最大限度地降低经济和工期损失,侧钻位置应尽量在2800~2900 m井段选取。

### 2.2 侧钻井段直径大

HDR-1井由于裸眼段较长、地层较破碎,时有掉块发生,加之井眼尺寸较大,使钻柱与井眼间环空间隙大,水力参数不足,环空返速低,钻屑携带困难,井眼净化难度大,同时由于钻机型号偏小使得钻机碎岩能力不足,机械钻速慢。

相较于小直径岩心钻探,大直径硬岩侧钻导向钻具造斜率较低,井斜、垂深、位移控制要求高,轨迹控制精度要求高<sup>[1-3]</sup>。为了防止次生事故发生,实施侧钻前必须对裸眼井段下入 $\varnothing 177.8$  mm技术套管,确保上部井壁的稳定。技术套管下入后,需采用 $\varnothing 152.4$  mm钻头进行扫塞和侧钻。

### 2.3 地层硬度高

HDR-1井钻遇地层岩性主要为花岗岩,具有硬度高、研磨性强、可钻性差、地应力大等特性,机械钻速较低<sup>[4]</sup>。尤其是在裸眼水泥塞侧钻过程中,水泥塞强度与钻遇的岩石强度差别较大,侧钻过程中容易顺老井眼滑移,侧钻难度大<sup>[5]</sup>。

### 2.4 侧钻井段温度高

根据测井资料显示,侧钻井段的地层温度 $> 80$  °C,较高的地层温度使钻井液性能加速老化,性能参数难以保持,同时对螺杆钻具和随钻测量工具的抗高温性能均提出了更高的要求。

### 2.5 水泥塞质量控制难

裸眼水泥塞侧钻技术中水泥塞的质量和强度关系到侧钻的成败,一般要求侧钻点以上有10~20 m胶结好的水泥塞,侧钻井段有50~100 m强度较高的水泥塞<sup>[6]</sup>。HDR-1井近3000 m的侧钻深度和超过80 °C的地层温度均大大增加了水泥塞质量的控制难度。

### 2.6 轨迹控制难度大

井眼轨迹控制是侧钻施工中的重要环节,常用的轨迹控制测量方式为随钻测量,通过测量数据及

时调整工具面角,从而达到轨迹控制的目的。在实际操作中,测点距钻头12 m,仪器测量信息滞后,钻头处井斜角、方位角、工具面角等均与实际存在偏差,很难实现轨迹精准控制。同时由于钻具组合刚度小,造斜率不宜控制,井眼轨迹控制更加困难<sup>[7-8]</sup>。

### 2.7 扭矩、钻压传递困难

侧钻位置深,钻铤等与井壁接触面积大,摩阻大,井口扭矩很难传递到井底。同时,由于钻杆柔性大,工具面难以摆正,再加上井眼轨迹差,岩屑携带不清等原因,钻压传递困难,易形成托压现象<sup>[9-10]</sup>。

### 2.8 “落鱼”磁干扰

HDR-1井“落鱼”位置2965~3085 m,“落鱼”长度120 m,侧钻过程中要预防井底“落鱼”对新井眼轨迹监测造成磁干扰,一般情况下,防碰距离至少要超过4 m,否则新井眼的方位数据会受到影响。

## 3 侧钻方案设计优选

通过对HDR-1井的井身结构、井身质量、地层情况、井下“落鱼”情况等充分分析,借鉴油气井工程侧钻施工经验,提出套管斜向器侧钻、裸眼水泥塞侧钻和裸眼斜向器侧钻3种方案。

### 3.1 套管斜向器侧钻方案

由于事故处理过程中,201~2965 m均为裸眼井段,为确保后续施工过程中上部井段的稳定,该侧钻方案实施前需先行下入 $\varnothing 177.8$  mm技术套管。具体实施流程为:首先采用 $\varnothing 215.9$  mm钻头扫孔至“鱼顶”以上30~50 m,下入 $\varnothing 177.8$  mm技术套管,G级水泥固井候凝。待固井水泥候凝48 h且强度达到要求以后,扫孔至侧钻点下入斜向器坐封,然后采用 $\varnothing 152.4$  mm钻头配合螺杆钻具实施套管内开窗作业。该方案井身结构如图3所示。

### 3.2 裸眼水泥塞侧钻方案

侧钻前,为确保后续施工过程中上部井段的稳定,需要下入 $\varnothing 177.8$  mm技术套管。首先对“落鱼”上部井段进行不少于200 m的井段注水泥塞处理,以便重新造斜侧钻开凿新井眼。待固井水泥龄期和强度达到要求以后,采用 $\varnothing 215.9$  mm钻头扫水泥塞至2800 m,下入 $\varnothing 177.8$  mm技术套管。待固井水泥龄期和强度达到要求以后,采用 $\varnothing 152.4$  mm钻头配合螺杆钻具实施裸眼侧钻作业。该方案井身结构如图4所示。

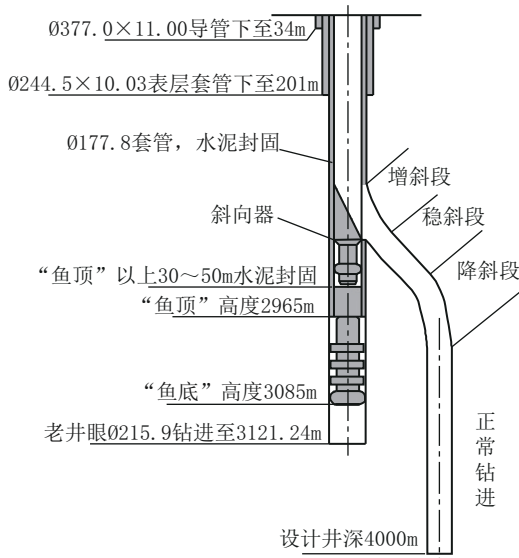


图3 套管斜向器侧钻井身结构示意图

Fig.3 Sidetracking well structure with the deflector inside casing

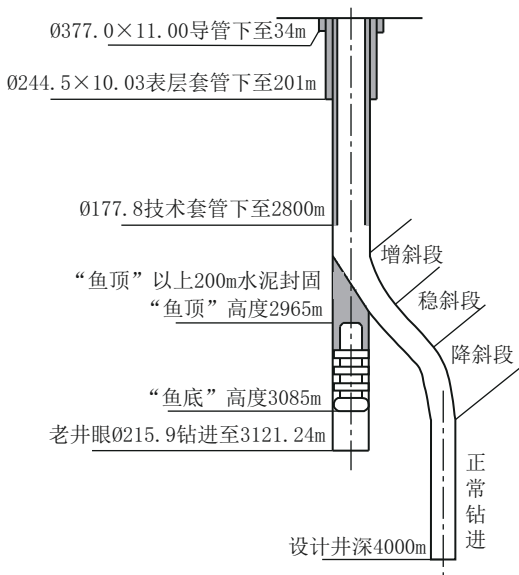


图4 裸眼水泥塞侧钻井身结构示意图

Fig.4 Sidetracking well structure with the open hole cement plug

### 3.3 裸眼斜向器侧钻方案

将常规斜向器进行改进(如图5所示),利用其导斜体下部接几根套管(20 m左右),借助“鱼顶”将其支撑;通过导斜体锚定机构锚定在裸眼段花岗岩地层井壁,实现倒扣丢手;丢手后利用钻具和送入机构进行挤水泥作业将导斜体及下部裸眼井段封固,保证导斜体不会转动或上下移动。然后采用

Ø152.4 mm 钻头配合螺杆钻具借助导斜体进行侧钻作业。该方案井身结构如图6所示。

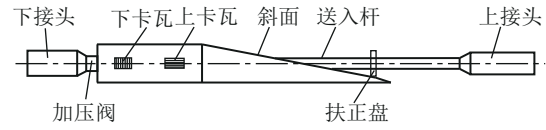


图5 裸眼斜向器结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the open hole deflector

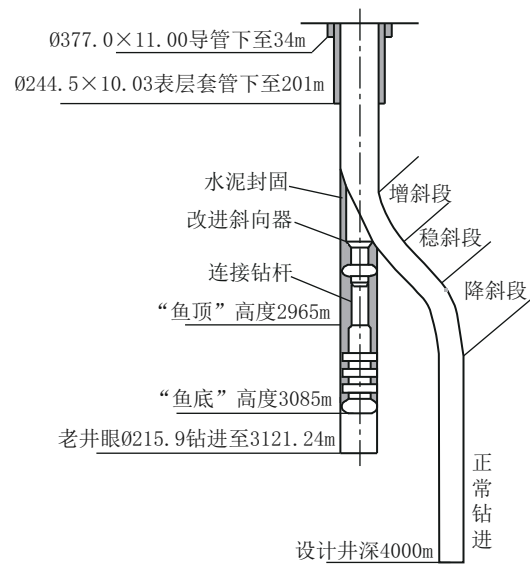


图6 裸眼斜向器侧钻井身结构示意图

Fig.6 Sidetracking well structure with the open hole deflector

设计的裸眼侧钻斜向器可分为:送入工具(兼作挤水泥工具)、导斜体和锚定体、套管支撑体3大部分组成。工具串下至接触“鱼顶”后,通过液力憋压将锚定体卡瓦压张开,将导斜体锚定在裸眼井壁,下部“鱼顶”可提供向上支撑。憋压同时将工具串内部憋压球座打掉,实现钻具水眼与环空联通,倒扣丢手后即可借助送入工具进行挤水泥作业,封固导斜体及下部裸眼井段。

### 3.4 侧钻方案优选

鉴于HDR-1井侧钻施工的特殊性、复杂性,对以上3种侧钻方案进行了充分的论证和比较,总结出优点和难点如表1所示<sup>[11-12]</sup>。

综合测井资料显示,侧钻井段井眼直径不规则,使斜向器侧钻工艺难度加大,对人员、设备等均要求较高。为了确保侧钻成功率,经综合论证后决定采用裸眼水泥塞侧钻施工方案。

表 1 侧钻方案优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of sidetracking schemes

序号	侧钻方案	优 点	难 点
1	套管斜向器侧钻	侧钻成功率高,侧钻轨迹控制压力小	需要进行相关设备和人员的准备与动员,作业环节多,时间长,费用高,对后续完井影响大
2	裸眼水泥塞侧钻	工艺操作简单,不需要较大的调整井身结构设计,费用较低	裸眼段为岩石硬度级别较高的花岗岩,对水泥塞的封固质量和硬度要求较高,钻具容易顺老井眼滑移,侧钻难度大
3	裸眼斜向器侧钻	专门针对该井设计的斜向器,适用性较好;侧钻成功率高;不需要较大的调整井身结构设计	井眼直径不规则,工艺难度大,技术水平要求较高;要确保斜体顺利丢手,否则斜向器坐封困难;要确保挤水泥作业的封固质量,否则斜体易发生转动或上下移动,影响后续侧钻作业

4 侧钻技术控制措施

4.1 侧钻点的选择

侧钻点选择既要尽量减少报废井段,也要保证侧钻点的稳定,防止夹壁墙坍塌,同时还要兼顾侧钻难易程度,选择机械钻速相对较高的井段<sup>[13]</sup>。HDR-1 井“鱼顶”高度 2965 m,2800 m 以深井段平均机械钻速 1.14 m/h,且该井段地层稳定,不易坍塌。

根据老井眼单点和多点测井数据,2866 m 处井斜角 4.40°,方位角 116.20°,全角变化率 2.24°/30 m (见表 2),该位置全角变化率最大,以深井段井斜角不断增大,便于降井斜划槽造台阶。而且,该点距“鱼顶”100 m,有足够的距离作为侧钻操作长度,且报废井段在可接受范围之内。综合分析后,决定以 2860 m 处为侧钻点,方位 320°。

表 2 老井眼测井数据

Table 2 Logging data of the existing well

序号	测深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)	垂深/m	南北/m	东西/m	闭合距/m	闭合方位/m	全角/[°·(30m) <sup>-1</sup> ]
1	2799.50	2.80	154.30	2789.42	-179.82	-89.42	200.83	206.44	0.90
2	2809.00	2.84	155.38	2798.91	-180.25	-89.22	201.12	206.33	0.21
3	2818.50	2.75	147.36	2808.40	-180.65	-89.00	201.39	206.23	1.27
4	2828.00	2.75	144.17	2817.89	-181.03	-88.74	201.61	206.11	0.48
5	2837.50	3.07	136.52	2827.38	-181.40	-88.43	201.81	205.99	1.59
6	2847.00	3.30	124.31	2836.86	-181.74	-88.03	201.94	205.85	2.24
7	2856.50	3.97	123.94	2846.34	-182.08	-87.53	202.02	205.68	2.12
8	2866.00	4.40	116.20	2855.82	-182.42	-86.94	202.08	205.48	2.24
9	2875.50	4.75	110.79	2865.29	-182.72	-86.24	202.05	205.27	1.75
10	2885.00	5.03	108.91	2874.75	-182.99	-85.48	201.97	205.04	1.02
11	2894.50	5.19	108.30	2884.22	-183.26	-84.68	201.88	204.80	0.53
12	2904.00	5.15	103.69	2893.68	-183.50	-83.85	201.75	204.56	1.32
13	2913.50	5.19	99.43	2903.14	-183.67	-83.02	201.56	204.32	1.22
14	2923.00	5.26	94.23	2912.60	-183.77	-82.16	201.30	204.09	1.51
15	2932.50	5.61	88.98	2922.06	-183.80	-81.26	200.96	203.85	1.92
16	2942.00	6.23	90.05	2931.51	-183.79	-80.28	200.56	203.60	1.99
17	2951.50	7.23	94.22	2940.94	-183.83	-79.17	200.16	203.30	3.51
18	2961.00	8.47	101.43	2950.35	-184.02	-77.89	199.82	202.94	4.99
19	3085.00	8.00	101.43	3073.07	-187.54	-60.48	197.05	197.87	0.11

4.2 侧钻工具及钻头的优选

HDR-1 井钻遇地层岩性以细粒花岗岩为主,岩石硬度级别较高,为了提高侧钻的可靠性,侧钻工具

采用“直螺杆+弯接头(2°)”。该组合弯度大,侧向力大,便于侧钻,同时直螺杆可提供井下复合动力,配合 Ø152.4 mm 磨鞋钻头,可以提高碎岩效率。

### 4.3 钻具组合

为了减少钻具与井壁的接触面积,降低摩阻,提高钻压、扭矩的传递效率,尽量减少钻铤使用数量,以加重钻杆代替钻铤,且加重钻杆避开侧钻点位置。

### 4.4 水泥塞质量控制

裸眼水泥塞侧钻准备过程中,应尽量保证回填水泥塞质量,降低水泥塞与地层之间的强度差,避免侧钻位置滑移。实际操作中,一般回填水泥塞强度

≥25 MPa,且回填过程中容易被钻井液污染,形成较强的混浆段,影响封固质量<sup>[14]</sup>。

为了保证回填水泥塞质量,主要采取以下措施:

(1)采用高标号抗高温水泥,水泥浆密度 $\leq 1.90$  g/cm<sup>3</sup>,密度误差控制在0.03 g/cm<sup>3</sup>以内;

(2)严格控制水泥浆自由水为0,失水量控制在40 mL以内(水泥浆性能参数设计见表3);

表3 水泥浆性能参数设计

Table 3 Design of cement slurry performance

项目	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	失水量(6.9 MPa)/ [mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	自由液/ %	72 h顶部抗压 强度/MPa	48 h抗压强度 (62℃)/MPa	初始稠度/ Bc	100 Bc稠化 时间/min	流动度/ mm
领浆	1.9	≤40	0	≥14.0		≤15.0	240~300	≥20
尾浆	1.9	≤40	0		≥14.0	≤15.0	90~150	≥20

(3)使用前置液和后置液(见表4),防止水泥浆被钻井液污染;

表4 水泥浆体系配比

Table 4 Mixing ratio of the cement slurry system

名称	配 比
前置液	2 m <sup>3</sup> 清水+50 kg CMC(HV)+12 kg 缓凝剂+16 kg 降失水剂
水泥浆	7.5 m <sup>3</sup> 水泥浆+60 kg 降失水剂+10~20 kg 缓凝剂+40 kg 减阻剂
后置液	0.5 m <sup>3</sup> 清水+12 kg CMC(HV)+3 kg 缓凝剂

(4)精确计算和计量顶替钻井液量,采用泥浆罐计量、累积泵冲计量和电磁流量计计量三方相结合的方式;

(5)固井水泥车顶替水泥浆时,控制较快的顶替速度,且钻具内留有一定量的水泥浆,防止混浆;

(6)水泥浆现场取样,模拟井下环境养护,水泥胶结强度合格后方可进行探塞作业;

(7)候凝时间 $\leq 48$  h,下钻扫除顶部混浆后做承压试验,验证水泥塞强度。

### 4.5 控时钻进

控时钻进过程中要求司钻送钻一定要均匀,通过在滚筒或钻杆上用油漆做标记来有效控制钻具下放速度,并保持送钻的连续性。密切注意近钻头井斜,判断轨迹走向。前1~3 m,控制机械钻速0.2 m/h,确保造出有利于侧钻的台阶;4~15 m,控制机械钻速0.5 m/h;15~20 m,控制机械钻速1 m/h。

控时钻进时,每米捞取钻屑一包,根据钻屑中地层岩屑的含量,判断侧钻效果,及时调整钻进参数。当钻屑中出现地层岩屑,说明造台阶成功,钻头开始侧向切削地层;当钻屑含量超过60%,可以适当提高机械钻速;当捞取的钻屑全部为地层岩屑时,说明钻头已经钻出新井眼<sup>[15-16]</sup>。

### 4.6 轨迹控制与监测

(1)采用MWD随钻测量,严格执行10 m一测。

(2)缩短测量系统到钻头的距离,提高测量数据的精度和轨迹预测精度。

(3)减小钻头、螺杆钻具、弯接头的长度和柔性,稳定工具面角。

(4)利用钻具倒装,改善滑动效果。

(5)根据返出岩屑中水泥与地层岩屑所占百分比,结合随钻测量数据,及时判断侧钻轨迹<sup>[17-19]</sup>。

### 4.7 复合钻进

HDR-1井钻遇的细粒花岗岩岩石硬度级别在Ⅹ级以上,加上近3000 m的侧钻深度,采用常规的钻进工艺已经远远满足不了干热岩侧钻的要求。为了提高绕障侧钻的成功率、降低成本、实现高效快速钻进,在施工中采用“转盘+螺杆钻具”复合动力钻进工艺。由于干热岩钻进过程中,螺杆定子橡胶容易受高温影响逐步加速老化,造成失效,所以优选7LZ127型螺杆钻具。该类型螺杆钻具最高可耐受120℃高温,HDR-1井井底最高温度109.58℃,满足施工要求。

#### 4.8 钻井液设计

钻井液性能在满足复合钻进工艺要求和干热岩抗高温要求的前提下,还要克服深部花岗岩存在的

破碎、漏失、局部蚀变高岭土化造浆等复杂情况,因此,要强化钻井液的耐高温性、护壁性、封堵性和润滑性,钻井液设计指标和基本配方见表5。

表5 2800 m以深钻井液设计  
Table 5 Design of drilling fluid below 2800m

开钻次序	井深/m	钻井液基本配方	性能指标
三开	2860~4000	5%膨润土,0.2%~0.4%(土量)稀释剂,0.10%~0.20%火碱,0.2%~0.4%抗高温增粘剂,0.5%~1.0%钠盐,0.2%~0.3%包被剂,1.0%~2.0%RH-3润滑剂,1.5%~2.0%超细碳酸钙,1.5%~2.0%改性沥青,重晶石粉按实际计算	密度1.18~1.24 g/cm <sup>3</sup> ,粘度50~70 s,失水量≤3.8 mL/7.5 min,泥饼厚度0.2 mm,pH值9,含砂量≤0.5%,切力3/6

### 5 现场实施效果

#### 5.1 井眼准备

##### 5.1.1 打水泥塞作业

侧钻前,为确保侧钻成功,对“落鱼”上部不少于200 m的井段注水泥塞处理,以便重新造斜侧钻。因井底温度较高,使用油田抗高温G级水泥对2765~2965 m井段进行水泥固井,水泥浆密度为1.90 g/cm<sup>3</sup>,候凝48 h。

##### 5.1.2 下套管作业

采用 $\varnothing 215.9$  mm钻头进行扫水泥塞工作,扫至2824.30 m,下入 $\varnothing 177.8$  mm $\times$ 10.36 mm石油套管2832.28 m,套管下深2824.30 m,全井段固井。固井采用G级低失水水泥30 t、粉煤灰低密度水泥35 t,水泥浆平均密度1.90 g/cm<sup>3</sup>,候凝时间>48 h。

##### 5.1.3 承压试验

待套管固井水泥候凝时间达到要求以后,扫水泥塞至井深2860 m,对水泥塞强度进行承压检验。试静承压150 kN,静止2 min,钻具无下移;试动承压50 kN,钻压无回落。水泥塞强度满足侧钻要求,起钻,下侧钻钻具,钻具组合: $\varnothing 152.4$  mm磨鞋钻头+ $\varnothing 120$  mm $\times$ 6.06 m直螺杆+弯接头(2°)+MWD定向接头+ $\varnothing 120$  mm无磁钻铤5根+ $\varnothing 120$  mm钻铤3根+ $\varnothing 89$  mm斜坡钻杆串。

#### 5.2 造台阶

下钻至2850 m,对2850~2860 m井段进行控时划眼。工具面角控制在320°,划眼以快速上提、缓慢下放为原则,且下方位置不得超过侧钻点,划眼时间1 h<sup>[20]</sup>。划眼结束前,观察近钻头井斜角降低,说明钻具已经在井壁上形成沟槽,开始定点造台阶。

在2860 m处刹住刹把,定点旋转1 h。

#### 5.3 控时钻进

控时钻进过程中,前13.16 m(井深2860.79~2873.95 m),控制机械钻速0.2 m/h;13.16~34.12 m(井深2873.95~2908.07 m),控制机械钻速0.5 m/h;井深2908.07 m之后,控制机械钻速0.8 m/h。根据随钻测量结果,在2873.95 m处,井斜角3.16°;捞取的钻屑显示,地层岩屑所占比例已超过60%,说明新井眼正在形成。为防止井斜角过大,造成“狗腿”,影响下步钻井施工,起钻,将“直螺杆+弯接头(2°)”更换为7LZ127 $\times$ 7.0弯螺杆马达(1.15°)进行稳斜钻进。根据随钻测量结果,2873.95~2908.07 m井段井斜角从3.16°降到1.30°,在2908.07 m处已经偏离老井眼2.83 m,侧钻成功。

#### 5.4 正常钻进

根据侧钻实钻数据和老井眼数据分析计算,预测在2965 m(“鱼顶”位置)防碰撞距离为7.68 m,在3085 m(“鱼底”位置)防碰撞距离为21.58 m(新井眼按照1°/100 m增斜预测,老井数据在2960 m后按稳斜预测)。余下井段,只要保证在2965 m时井斜角 $\geq 3^\circ$ ,在3085 m时井斜角 $\geq 5^\circ$ ,即可安全绕开老井眼井底“落鱼”。所以决定起钻,下入直螺杆小钻压复合钻进<sup>[21]</sup>,钻具组合: $\varnothing 152.4$  mm牙轮钻头+7LZ127 $\times$ 7.0螺杆马达 $\times$ 1根+ $\varnothing 120$  mm无磁钻铤 $\times$ 1根+ $\varnothing 120$  mm钻铤 $\times$ 6根+ $\varnothing 89$  mm钻杆。

#### 5.5 井眼轨迹监测

HDR-1井实际侧钻点2860 m,侧钻降斜井段2860.00~2873.95 m,稳斜井段2873.95~2908.07 m,正常钻进井段2908.07~3085.00 m,侧钻实钻数据见表6,井眼轨迹见图7。

表6 侧钻实钻数据

Table 6 Actual sidetracking data

序号	测深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)	垂深/m	南北/m	东西/m	闭合距/m	闭合方位/m	全角/[ $(^\circ) \cdot (30\text{m})^{-1}$ ]
1	2860.00	4.12	120.90	2849.83	-182.21	-87.33	202.05	205.61	0
2	2866.00	3.25	113.03	2855.82	-182.38	-86.99	202.07	205.50	5.02
3	2876.00	2.37	108.46	2865.81	-182.56	-86.53	202.03	205.36	2.72
4	2886.00	0.97	58.89	2875.81	-182.58	-86.26	201.93	205.29	5.67
5	2896.00	1.14	57.66	2885.80	-182.49	-86.10	201.78	205.26	0.51
6	2908.00	1.30	57.66	2897.80	-182.35	-85.89	201.56	205.22	0.40
7	2965.00	1.90	58.00	2954.78	-181.50	-84.54	200.22	204.97	0.32
8	3085.00	3.00	58.00	3074.67	-178.78	-80.19	195.94	204.16	0.28

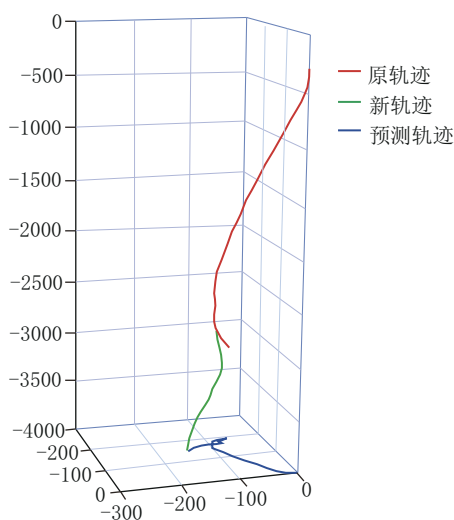


图7 井眼轨迹

Fig.7 Well trajectory

## 6 结论与认识

HDR-1井通过侧钻施工,成功绕过井底“落鱼”,大大缩短了工期,节约了施工成本,顺利竣工。该井绕障侧钻的成功是在干热岩勘探施工中的首次尝试,相对于小口径固体勘探,克服了大深度、大直径、高温度、高硬度等技术难题,为我国干热岩科学钻探与深部地热资源勘探提供了新的技术支撑。

(1)选择合适的侧钻点是侧钻成功的前提,侧钻点要兼顾经济性(尽量较少报废井段)、技术性(机械钻速较高,易于造斜)、可靠性(地层完整,窗口稳定)原则;

(2)干热岩钻遇地层一般具有高温、高硬度、高研磨性等特征,均对回填水泥塞的硬度和质量造成不利影响。只有采取有效技术措施降低水泥塞与侧钻地层的硬度差,才能确保顺利侧钻。

(3)侧钻前要对井眼轨迹进行优化设计,选择合适的工具面角。同时在侧钻过程中采取随钻测量技术,及时掌握井眼轨迹参数,并对井眼轨迹控制与监测走向进行分析和预测,发现轨迹偏离,及时对定向参数和钻进参数进行调整。

(4)在高温、高硬度、高研磨性钻进工况下,复合钻进工艺与常规钻进工艺相比钻速仍能大大提高。施工中根据具体情况适时选择复合钻进工艺,从而实现高效快速钻进

## 参考文献(References):

- [1] 刘召永,袁君,黄旭平.页岩油大井眼斜井段技术难点分析[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(5):206-207.  
LIU Zhaoyong, YUAN Jun, HUANG Xuping. Analysis of technical difficulties in deviated section of large shale well[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(5): 206-207.
- [2] 周超.辽河油田SAGD大井眼水平井钻完井技术[J].化工管理,2021(17):185-186.  
ZHOU Chao. Drilling and completion technology of SAGD large borehole horizontal well in Liaohe Oilfield[J]. Chemical Management, 2021(17):185-186.
- [3] 权春阳,权迎军,种奋刚,等.陕224储气库大井眼定向井钻完井关键技术[J].山东化工,2022,51(5):159-160,165.  
QUAN Chunyang, QUAN Yingjun, ZHONG Fengang, et al. Key technologies of directional drilling and completion in Shan 224 large hole of gas storage[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(5): 159-160, 165.
- [4] 谭现锋,王景广,赵长亮,等.涡轮取心钻进工艺在干热岩钻井中的应用[J].水文地质工程地质,2021,48(1):195-202.  
TAN Xianfeng, WANG Jingguang, ZHAO Changliang, et al. A study of the application of turbine coring drilling technology to hot dry rock drilling[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 195-202.
- [5] 李亚南,于占森,晁文学,等.顺北评2H超深小井眼侧钻水平井



- 技术[J].石油钻采工艺,2018,40(2):169-173.
- LI Yanan, YU Zhanmiao, CHAO Wenxue, et al. Ultra-deep slim horizontal well sidetracking technology applied in Well Shunbeiping 2H [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018,40(2):169-173.
- [6] 王恒.裸眼侧钻关键技术研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(10):26-29.
- WANG Heng. Research on key technology of sidetracking in open hole and the application[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(10):26-29.
- [7] 孙庆仁,郭盛堂,孟祥波.达深CP302开窗侧钻水平井钻井实践与认识[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(4):36-38.
- SUN Qingren, GUO Shengtang, MENG Xiangbo. Practice of sidetracking drilling in dashen cp302 horizontal well and the cognition [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(4):36-38.
- [8] 赵少伟,范白涛,岳文凯,等.海上高效侧钻小井眼水平井钻完井技术研究及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(3):13-18.
- ZHAO Shaowei, FAN Baitao, YUE Wenkai, et al. Research and application of offshore drilling and completion technology of efficient sidetracking slim-hole horizontal well [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(3):13-18.
- [9] 李广江.宁东3-侧1井套管开窗侧钻定向工艺技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):29-32.
- LI Guangjiang. Casing cutting window sidetracking drilling technology in Well Ce-1 of East Ningxia [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(1):29-32.
- [10] 张瑞平,丁浩,陈水新,等.扎那诺尔油田套管开窗侧钻定向井钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(7):28-30.
- ZHANG Ruiping, DING Hao, CHEN Shuixin, et al. Directional well drilling technology of casing window sidetracking in Zhanazhol Oilfield [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(7):28-30.
- [11] 吴占民,王占领,王赞,等.海上同层侧钻井实施方案优选方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(7):41-43.
- WU Zhanmin, WANG Zhanling, WANG Zan, et al. Optimization method for offshore same layer sidetracking scheme [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(7):41-43.
- [12] 罗鸣,顾纯巍,杜威.半潜式钻井平台水平井裸眼侧钻技术[J].石油钻采工艺,2014,36(3):20-22.
- LUO Ming, GU Chunwei, DU Wei. Sidetracking technology for horizontal open hole on semi-submersible drilling platforms [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014,36(3):20-22.
- [13] 杨仲涵,何世明,郑锋辉,等.悬空侧钻技术在大牛地气田DP22水平井的应用[J].石油钻采工艺,2012,34(3):20-23.
- YANG Zhonghan, HE Shiming, ZHENG Fenghui, et al. Application and knowledge from suspended sidetracking technology at the Well DP-22 in Daniudi Gas Field [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012,34(3):20-23.
- [14] 吴江,罗鸣,黄凯文,等.水平井段注水泥塞侧钻技术在半潜式平台的首次应用[J].石油钻采工艺,2015,37(2):44-46.
- WU Jiang, LUO Ming, HUANG Kaiwen, et al. First application of cementing plug side tracking technology in horizontal wellbore on semi-submersible platform [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015,37(2):44-46.
- [15] 李光宏.东庞煤矿DB2-E5井侧钻水平钻先进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(7):52-55,69.
- LI Guanghong. Sidetracking horizontal drilling technology in Well DB2-E5 of Dongpang Coal Mine [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(7):52-55,69.
- [16] 刘文兵.DP6水平井 $\Phi 311.15$  mm井眼侧钻技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(12):27-31.
- LIU Wenbing. Discussion of sidetracking technology for  $\Phi 311.15$  mm borehole of DP6 horizontal well [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(12):27-31.
- [17] 徐云龙,王锐,王文斐,等.TP131HCH超深五段制侧钻水平井优快钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(10):22-25.
- XU Yunlong, WANG Rui, WANG Wenfei, et al. High quality and high speed drilling technology for ultra-deep five-section sidetracking horizontal Well TP131HCH [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(10):22-25.
- [18] 刘鹏飞,和鹏飞,李凡,等.欠位移水平井C33H井裸眼悬空侧钻技术[J].石油钻采工艺,2014,36(1):44-47.
- LIU Pengfei, HE Pengfei, LI Fan, et al. Open-hole sidetrack drilling technique for C33H under-displacement horizontal well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014,36(1):44-47.
- [19] 李锁成,谷玉堂,奚广春,等.新120-侧平80井侧钻钻井实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(2):20-23.
- LI Suocheng, GU Yutang, XI Guangchun, et al. Drilling practice of New 120-80 sidetrack horizontal well [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(2):20-23.
- [20] 贾雍,和鹏飞,袁则名,等.海上某气田悬空侧钻水平分支井技术及应用[J].钻探工程,2021,48(4):104-109.
- JIA Yong, HE Pengfei, YUAN Zeming, et al. Application of horizontal branch wells in an offshore gas field [J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):104-109.
- [21] 谭现锋,王景广,郭新强,等.螺杆钻进工艺在青海共和干热岩GR1钻井中的应用[J].钻探工程,2021,48(2):49-53.
- TAN Xianfeng, WANG Jingguang, GUO Xinqiang, et al. Application of PDM drilling technology in Well-GR1 drilling in hot dry rock [J]. Drilling Engineering, 2021,48(2):49-53.

(编辑 李艺)