

# 雄安新区基岩热储钻探施工技术探讨

齐 恭<sup>1</sup>, 李 杨<sup>1</sup>, 齐晓凤<sup>1</sup>, 高鹏举<sup>2</sup>, 董向宇<sup>\*2</sup>

(1. 河北省地质矿产勘查开发局第三水文工程地质大队, 河北 衡水 053000;

2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 针对雄安新区基岩热储钻探中风化壳钻进、地层大量漏失封堵及基岩取心的钻探工程难点, 通过对所处牛驼镇地热田、容城地热田和高阳地热田地热地质状况、岩性特点的分析, 提出了基岩热储地热钻探有效解决方案, 包括采用小径探孔施工工法、采用封隔器有效完成水泥浆堵漏、借鉴金刚石满眼取心钻具技术等。

**关键词:** 基岩热储; 地热钻探; 风化壳; 漏失地层; 泥浆; 封隔器; 取心; 雄安新区

**中图分类号:** P634.5; TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)01-0126-05

## Discussion on drilling technology for bedrock thermal reservoir in Xiong'an New Area

QI Gong<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, QI Xiaofeng<sup>1</sup>, GAO Pengju<sup>2</sup>, DONG Xiangyu<sup>\*2</sup>

(1. No.3 Hydrology Engineering Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Hengshui Hebei 053000, China;

2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulties exist in thermal reservoir drilling in bedrock of Xiong'an New Area such as drilling in weathered crust, plugging severe formation lost and coring at bedrock, an effective solution for drilling in bedrock thermal reservoir is proposed including small diameter exploration wells, effectively mud plugging using packers and borrowed the principle of diamond full hole coring tool technology through the analysis of the geothermal geological conditions and lithological characteristics of Niutuozen Geothermal Field, Rongcheng Geothermal Field and Gaoyang Geothermal Field.

**Key words:** bedrock thermal reservoir; geothermal drilling; weathered crust; lost strata; mud; packer; coring; Xiong'an New Area

### 0 引言

地热是世界公认的极具应用价值的、新型绿色清洁能源, 具有分布范围广、储量大的特点。开发利用地热资源是实现“碳达峰、碳中和”目标任务、治理大气污染的重要途径之一<sup>[1]</sup>。雄安新区地处华北平原腹地, 位于牛驼镇地热田、容城地热田

和高阳地热田区域内, 地热资源赋存条件极好<sup>[2]</sup>。2017—2021年的5年中, 以“探测蓟县系热储发育深度及开发潜力, 为雄安新区提供地热资源开发的第二空间, 全面支撑服务雄安新区规划建设”为重要的工作目标, 先后完成了数十口地热勘探井, 为雄安新区地热清洁能源开发利用和国土资源管理提

收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2023-08-19 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.01.017

基金项目: 河北省地质矿产勘查开发局项目“河北平原深部基岩热储钻探关键技术研究”(编号 13000022P003294101122)

第一作者: 齐恭, 男, 汉族, 1971年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 从事水文水井钻探工作, 河北省衡水市红旗大街808号, 57006594@qq.com。

通信作者: 董向宇, 男, 汉族, 1970年生, 教授级高级工程师, 探矿工程专业, 从事水文水井钻探、岩心钻探、非开挖技术等工作, 河北省廊坊市金光道77号, 13932678511@163.com。

引用格式: 齐恭, 李杨, 齐晓凤, 等. 雄安新区基岩热储钻探施工技术探讨[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 126-130.

QI Gong, LI Yang, QI Xiaofeng, et al. Discussion on drilling technology for bedrock thermal reservoir in Xiong'an New Area[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 126-130.

供了大量精确的原始数据资料。

## 1 雄安新区地热地质特点

雄安新区下覆地层自下而上发育了太古界-古元古界、中元古界(长城系和蓟县系)、古近系(孔店组、沙河街组、东营组)、新近系(馆陶组和明化镇组)和第四系地层<sup>[3]</sup>,主要热储为砂岩孔隙热储和基岩裂隙热储。

(1)新近系馆陶组孔隙热储。雄安新区内馆陶组热储在廊固凹陷和牛驼镇凸起及保定凹陷部分缺失,其它地方均有分布。

(2)寒武-奥陶系裂隙岩溶热储。主要分布在容城县城、安新县城西部地区 and 雄县的西北部,热储层主要为奥陶系的马家沟组、亮甲山组、冶里组及寒武系的炒米店组、崮山组、馒头组,主要岩性为灰岩、白云质灰岩、鲕状灰岩<sup>[3]</sup>。

(3)蓟县系雾迷山组、高于庄组裂隙岩溶热储。主要分布于牛驼镇凸起和高阳低凸起上,呈北东向连续分布。是一种沉积碳酸盐岩,岩性主要为白云岩、燧石条带白云岩、泥质白云岩等<sup>[2]</sup>,泥质白云岩软硬互层,地层倾角大(见图1a),地层胶结程度高,含有较多燧石团块、条带,燧石白云岩(见图1b)。白云岩硬度4~5级,燧石硬度大致为7~8级,研磨性强。岩石脆性较强,遇外力呈块状破碎(见图1c)。岩溶裂隙发育,连通性好(见图1d)。

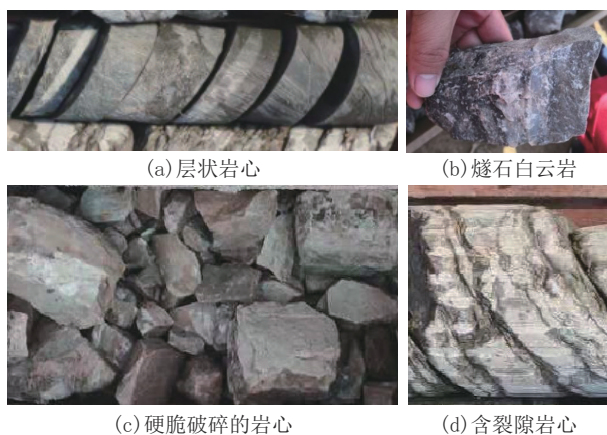


图1 典型基岩热储地层

Fig.1 Typical bedrock thermal reservoir formation

## 2 基岩热储钻探常见问题

(1)基岩热储地层岩溶裂隙发育,岩性硬脆碎且软硬不均严重,钻进过程中易发生漏失、掉块、卡钻

等事故。钻进参数不易控制,导致钻头的适应性差,影响钻进效率、井身质量和固井质量<sup>[4]</sup>。

(2)基岩热储顶板风化壳钻进常常面临着井内严重漏失,甚至失反的突发状况,由于漏失量大,实施有效合理的封堵比较困难,导致风化壳上部井段发生井壁失稳、坍塌,引发卡埋钻事故。面对井下大量钻屑沉渣或者井壁失稳坍塌掉块的复杂井下情况,实践中经常发生不能正常钻进到稳定基岩界面形成技术套管过早下入的局面。技术套管不能合理的坐到基岩稳定层面<sup>[5]</sup>,套管底部未封隔的风化壳层坍塌掉块、泥浆漏失将不能完全有效控制,形成局部隐患井段,严重影响后续钻井施工<sup>[6]</sup>。

(3)取心钻进过程中受地层裂隙及软硬不均等因素影响,时常形成堵心的情况,回次取心进尺短,岩心采取率低。

## 3 钻探技术解决方案

在充分分析钻遇地层特性的前提下,通过改进钻井工艺,研制适宜的钻具、钻头,调整钻具组合,控制钻进参数等手段,对基岩热储钻探所遇到的技术问题逐一解决。

### 3.1 风化壳地层钻进

风化壳是指基岩热储层顶部遭受风化和溶蚀形成的风化层,在蓟县系雾迷山组的顶部广泛存在,大致由燧石白云岩、燧石条带、砾石层组成。风化壳层内部构造裂隙极为发育,在雄县、容城地热田范围内,风化壳厚度一般在10~50 m。当钻透风化壳层时,经常会遇到井内泥浆瞬时失反性大量漏失的状况,导致裸露的古近系或新近系大口径沉积岩井筒失稳,发生井壁坍塌、埋钻或掉块卡钻等井下事故<sup>[7-9]</sup>。

针对风化壳层钻进,可以采取以下方法。

(1)根据临井或区域地质资料以及随钻岩屑等资料预测风化壳埋深,预计距离到风化壳30~50 m时,调整泥浆性能,增强泥浆的携砂能力,提高泥浆的封堵性能。钻进风化壳层位,常有钻具放空、蹩钻、跳钻,泥浆漏失等现象,此时应观察记录岩屑、钻压、立压、进出口密度、钻速、出口流量、循环液总体积等参数。

(2)卡准风化壳界面。进入风化壳前一般会有造浆性能的红色、黄色、乳白色的粘土,循环泥浆会有短暂颜色变化,这预示着即将钻进风化壳,要实时

监测上返岩屑,计算好迟到时间。

(3)小径探孔施工工法。钻达风化壳顶部时,实施提钻更换小径钻具简化钻具结构钻进策略。一般是采用 $\varnothing 152$  mm口径牙轮钻头进行先导试探钻进,采取小钻压、大排量、近平衡的钻进方式。

小径钻具钻进深度不宜超过一个立根长度,严密观测泥浆消耗和岩屑情况,捕捉严重漏失井段位置,如出现失反性漏失,迅速提钻至大径孔段,此时一般情况下井内泥浆携带高浓度的岩屑把钻开的基岩漏失通道迅速架桥堵塞。

如果一个立根长度钻完后未见较大漏失情况,应该循环泥浆,观察上返岩屑,判断井底地层情况,如未穿透风化壳应提钻将这段小径井段实施扩孔,然后继续使用小径钻进探孔。

确认钻进到完整基岩后,对小径井段导孔进行扩孔,扩孔深度距离小径探孔孔深1 m时停止扩孔,充分循环,实施下管固井工序。

### 3.2 严重漏失的堵漏处理

对于基岩热储地热井,一般认为漏失量 $>10$  m<sup>3</sup>/h即为中等以上漏失<sup>[10]</sup>。地层大漏失一般会有2种情形:一种是钻穿风化壳后,已经下入套管并固井完成,新开次开始钻进后漏失,这时大漏失泥浆不能循环、钻孔内沉渣多,影响钻进,但不会引起基岩面上部井壁失稳,造成井壁坍塌;另一种情况是在钻进风化壳时发生大漏失,井壁极易因漏失失稳。实践中常用固相泥浆加惰性材料随钻堵漏的方式,或者针对大的漏失采用速凝水泥浆堵漏。下面介绍一种采用封隔器有效完成水泥浆堵漏的方法。

压力平衡水泥浆固井是经常采用的封堵方法。采用水泥浆堵漏,如何让水泥浆在预定井段凝固是堵漏的关键。水泥浆堵漏过程中,由于井眼与地层裂隙处于导通状态,灰浆与地下水存在密度差,灰浆会因密度大而下沉,造成封堵井段位置出现较大偏差。井下存在地下水径流,流动的地下水会将灰浆稀释或带走,因而不能在计划的时间内凝固,甚至不能凝固,堵漏失败。平衡井内液柱压力与地层裂隙压力,有效控制固井水泥浆柱移动位置是这个方法取得成功的关键。实施过程中涉及到兼顾繁琐的压力平衡条件以及平衡计算<sup>[10]</sup>。为此在总结以往堵漏经验的基础上,将封隔器应用引入到大漏失层堵漏工作中,取得良好的应用效果,封堵处理成功率达到100%。基本的施工步骤如下:

(1)根据漏失层以上开次的套管内径,选择与该套管匹配的封隔器。

(2)下入部分钻杆,钻杆的长度为 $h_4=20\sim 30$  m,然后连接封隔器,再继续加钻杆,当漏失层顶端到最下面的一开次套管倒数第二根套管中部距离 $<80$  m时,封隔器在漏失层顶端上方80 m处坐封,如果此处是两根套管的接箍位置,则选择在接箍位置上方的套管处;当漏失层顶端到最下面的一开次套管倒数第二根套管中部距离 $>80$  m时,封隔器应下至最后一开次倒数第二根套管位置进行坐封。

(3)根据漏失段长度,应用公式 $V_1=S_1(h_1+h_2)$ 计算需要灰浆理论用量。 $V_1$ 为灰浆理论用量, $S_1$ 为漏失段井筒的内截面积, $h_1$ 为漏失段长度, $h_2=20\sim 30$  m。实际需要灰浆用量 $\geq 1.2V_1$ ,配置灰浆。

(4)通过泥浆将配制好的灰浆压入钻杆底部的井中,清水替浆,注入封隔器下方。替浆清水体积 $V_2=S_1h_3+S_2(h_4+h_5)$ , $h_3=20\sim 30$  m, $S_2$ 为钻杆内径的横截面积, $h_5$ 为封隔器到井口阀门钻杆距离。

(5)灌注替浆清水后迅速关闭灌注阀门,封闭灌注钻杆,这时在封隔器以下地层处于密闭状态,取样做参照样板,根据配置的灰浆性能,确定灰浆凝固时间,静置待井下灰浆凝固,见图2。

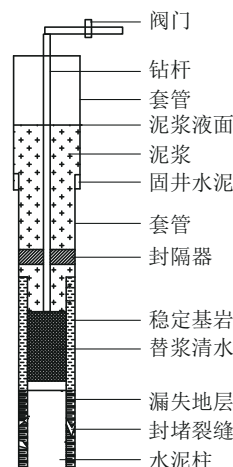


图2 封隔器法水泥浆堵漏示意

Fig.2 Method of cement slurry plugging with packer

(6)灰浆凝固后打开封隔器座封,提出钻杆和封隔器;下入正常钻进钻具,扫除水泥塞,继续钻井。

### 3.3 取心困难问题

#### 3.3.1 主要原因

雄安新区基岩热储的灰岩、白云岩、燧石条带白



云岩、泥质白云岩具有硬、脆、碎且软硬不均、裂隙发育尺寸大的物理特性。钻头切削岩石岩心一般不形成连续的柱状而是呈碎块状,取心钻进中岩心碎块会在岩心管内部相互挤压接触,磕碰翻转,从而造成岩心管内岩心堵塞。另外因取心进尺慢,岩心在卡簧位置磨细或破碎,加之泥浆的冲蚀,卡簧无法卡住岩心,时常发生岩心丢失打“空管”的现象。

### 3.3.2 解决办法

(1)目前普遍采用的大口径取心钻具为“川系列”取心钻具<sup>[11-12]</sup>,改变川式钻具的单轴承悬挂为双轴承悬挂,增加内管扶正器,提高内管的单动性能的稳定,防止岩心堵塞内管。

(2)借鉴地质绳索取心钻具的结构<sup>[13]</sup>,研制底喷式孕囊金刚石取心钻头,防止泥浆对岩心的冲蚀,根据岩石硬度合理确定胎体硬度,调整取心钻头壁厚,尽量减小钻头的碎岩切削面积,减小取心钻头内出刃,钻头内径小于取心管内径2~3 mm,缩小内管与取心钻头之间的距离,确保岩心能够更顺利地进入内管,且不呈柱状连续的岩心在卡簧处和内管内不会翻滚旋转,减少岩心磨细和卡滞内管的风险。

(3)取心钻头内部增加隔水及内管导正台阶,隔离泥浆并保证内管一直处于钻头中心位置。取心钻具组合上配置上下扶正器,形成局部满眼钻具<sup>[14]</sup>,轻压吊打,适当提高回转钻进速度,减少钻具回转钻进时的跳动和摆动。由于采用孕囊金刚石钻头钻进产生的岩屑颗粒细小,可以采用小排量泥浆清洁井底,同时也减轻泥浆对岩心的冲蚀作用,见图3和图4。

## 4 结论

通过在雄安新区实施的十几口地热勘探井的工

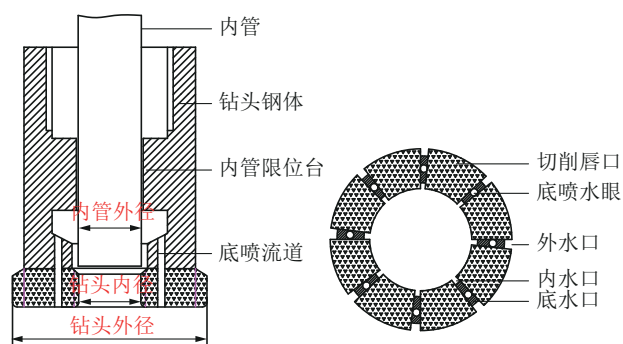


图3 取心钻具内管与底喷钻头

Fig.3 Inner tube of core drilling tool and bottom spray drill bit

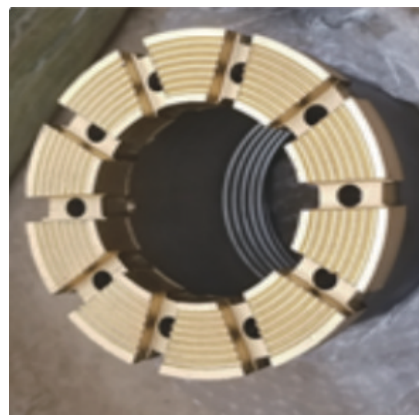


图4 底喷式孕囊金刚石取心钻头

Fig.4 Bottom spray impregnated diamond coring bit

程验证,充分分析基岩热储地层的岩性、构造、特性,采取研制具有适应性的钻具,有针对性的改进钻井工艺方法等技术手段,有效的解决了基岩热储常见的钻探技术问题。

(1)小径钻头探孔施工工法是解决基岩顶部风化壳钻进的有效技术手段,可以避免产生因突然漏失而引起的井壁坍塌、卡埋钻事故,确保技术套管能够准确地座入稳定基岩层。

(2)优化井身结构<sup>[15]</sup>,合理分配各个开次套管的下入深度并控制套管坐底位置,有效隔离复杂漏失地层。对于岩溶裂隙产生的大漏失层,采用封隔器水泥浆封堵技术,具有精确性高、暂时封堵效果好,操作简单的特点。

(3)优化大口径取心钻具的结构,合理借鉴金刚石满眼取心钻具的特点,对于基岩热储钻探取心率的提高有比较明显的成效。

## 参考文献(References):

- [1] 汪集暘,马伟斌,龚宇烈.地热利用技术(可再生能源丛书)[M].北京:化学工业出版社,2005.  
WANG Jiyang, MA Weibin, GONG Yulie. Geothermal Utilization Technology (Renewable Energy Series) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [2] 王贵玲,李郡,吴爱民,等.河北容城凸起区热储层新层系——高于庄组热储特征研究[J].地球学报,2018,39(7):533-541.  
WANG Guiling, LI Jun, WU Aimin, et al. A study of the thermal storage characteristics of Gaoyuzhuang Formation: A new layer system of thermal reservoir in Rongcheng Uplift Area of Hebei Province [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2018, 39(5): 533-541.
- [3] 马峰,王贵玲,张薇,等.雄安新区容城地热田热储空间结构及

- 资源潜力[J].地质学报,2020,94(7):1981-1990.
- MA Feng, WANG Guiling, ZHANG Wei, et al. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng Geothermal Field in Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020,94(7):1981-1990.
- [4] 卢予北.地热井常见主要问题分析与研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(2):43-47.
- LU Yubei. Analyses and research on frequently occurred problems in geothermal well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004,31(2):43-47.
- [5] 史秀辉.地热井钻完井施工工艺措施探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(13):3.
- SHI Xiuhui. Deep discussion on construction technology measures for geothermal well drilling and completion[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2022,42(13):3.
- [6] 韦利.地热井钻井施工技术研究[J].石化技术,2017,24(10):1.
- WEI Li. Research on geothermal well drilling construction technology[J]. Petrochemical Technology, 2017,24(10):1.
- [7] 高鹏举,董向宇,刘凡柏,等.XD-40型钻机在雄安新区地热勘探井施工中的应用[J].钻探工程,2021,48(8):72-77.
- GAO Pengju, DONG Xiangyu, LIU Fanbai, et al. Application of XD-40 drilling rig in geothermal exploration well construction in Xiong'an New Area[J]. Drilling Engineering, 2021,48(8):72-77.
- [8] 高鹏举,董向宇,马峰,等.雄安新区D15地热勘探井钻探施工技术[J].钻探工程,2021,48(3):106-112.
- GAO Pengju, DONG Xiangyu, MA Feng, et al. Drilling technology for D15 geothermal exploration well in Xiong'an New Area[J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):106-112.
- [9] 伍晓龙,杜垚森,王庆晓,等.冀中坳陷区域JZ04地热勘探井施工技术[J].钻探工程,2023,50(1):107-114.
- WU Xiaolong, DU Yaosen, WANG Qingxiao, et al. Construction technology of JZ04 geothermal exploration well in Jizhong Depression[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):107-114.
- [10] 刘文新,张长茂,鲍洪智,等.YR-3井井身井管结构设计及固井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(6):35-38.
- LIU Wenxin, ZHANG Changmao, BAO Hongzhi, et al. Structural design and cementing technology of YR-3 well casing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(6):35-38.
- [11] 四川石油钻采科技有限公司.川7-4型常规取心工具使用说明书[K].
- Sichuan Petroleum Drilling and Production Technology Co., Ltd. Chuan 7-4 conventional coring tool user manual[K].
- [12] 陈立,刘彬,李伟成,等.川7-5型(不投球)取心工具[J].石油科技论坛,2011,30(2):2.
- CHEN Li, LIU Bin, LI Weicheng, et al. Chuan 7-5 type (non throwing) coring tool [J]. Petroleum Technology Forum, 2011,30(2):2.
- [13] 施山山,闫家,李宽,等.破碎地层取心钻具研究现状及展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):56-61.
- SHI Shanshan, YAN Jia, LI Kuan, et al. Research status and prospects of coring tools for broken formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(7):56-61.
- [14] 张强,战启帅,张文良,等.页岩气地质调查井小口径绳索取心钻探技术分析[J].钻探工程,2022,49(5):72-79.
- ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, ZHANG Wenliang, et al. Application of small diameter wire-line core drilling in shale gas geological wells[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):72-79.
- [15] DZ/T 0260—2014,地热钻探技术规程[S].
- DZ/T 0260—2014, Technical regulations for geothermal drilling[S].

(编辑 王文)