

雄安新区岩溶热储地热井钻井技术难点及 解决方案

王培义^{1,2}, 张林洁³, 张海雄², 刘慧盈²

(1. 深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:雄安新区地热资源开发面临多项钻井技术挑战, 主要体现在复杂地质条件与环境保护双重压力。深层地热储层普遍具有高温特性, 井下高温导致钻井液性能调控难度大; 碳酸盐岩裂缝性储层易发生井漏、井塌等井下复杂情况, 甚至发生失返性漏失和卡钻事故, 严重影响钻井取心和录井作业; 目的储层岩石具有高硬度、强研磨性特征, 严重影响机械钻速。针对雄安新区岩溶热储复杂地质条件, 开展精细地质研究, 优化井身结构设计, 主要以三开井身结构为主; 针对高温环境, 采用耐高温螺杆钻具配合抗高温钻井液体系; 裂缝性非目的储层采用随钻堵漏技术, 配套使用纳米封堵材料与纤维增强型堵漏剂, 岩溶热储目的层钻进采用清水、清水充空气、双壁钻杆钻井技术解决地层漏失问题; 环保方面重点开展废弃钻井液无害化处理, 应用闭式循环系统减少废弃物排放。

关键词:岩溶热储; 地热钻井; 失返性漏失; 卡钻事故; 雄安新区

中图分类号:TE249;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0153-07

Geothermal well technical difficulties and solutions in drilling of Xiong'an New Area karst heat reservoir

WANG Peiyi^{1,2}, ZHANG Linjie³, ZHANG Haixiong², LIU Huiying²

(1. State Key Laboratory of Deep Geothermal Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Beijing 102206, China; 2. Sinopec Star Petroleum Co., Ltd., Beijing 100083, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The development of geothermal resources in Xiong'an New Area faces multiple drilling technology challenges, mainly reflected in the dual pressure of complex geological conditions and environmental protection. Deep geothermal reservoirs generally have high-temperature. The high downhole temperature makes it difficult to regulate the performance of the drilling fluid. In the fractured carbonate reservoirs, downhole complex situations such as lost circulation and wellbore collapse are likely to occur. Even irreversible lost circulation and pipe sticking accidents may occur, which seriously affect the drilling coring and mud logging operations. The rocks in the target reservoir are characterized by high hardness and strong abrasiveness, which seriously affect the rate of penetration. In response to the complex geological conditions of the karst geothermal reservoirs in the Xiong'an New Area, detailed geological research has been carried out, and the wellbore structure design has been optimized, mainly focusing on the three-section wellbore structure. In the face of the high-temperature environment, high-temperature-resistant positive displacement motors are used in combination with a high-temperature-resistant drilling fluid system. For the fractured non-target reservoirs, the lost circulation control technology while drilling is adopted, and nano-blocking materials and fiber-reinforced lost circulation materials are used in supporting. When drilling in the target layer of the karst geothermal reservoir, technologies such as clear water drilling, clear water with air injection drilling, and double-wall drill pipe drilling are adopted to solve the problem of formation lost circulation. In terms of environmental protection, the key work is to carry

收稿日期: 2024-12-09; 修回日期: 2025-02-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.03.020

第一作者: 王培义, 男, 汉族, 高级工程师, 钻探工程专业, 博士, 从事地热钻井技术研究与管理工作, 北京市海淀区北四环中路263号, hzwpy@163.com。

引用格式: 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.

out harmless treatment of the waste drilling fluid, and a closed-circuit circulation system is applied to reduce the discharge of waste.

Key words: karst heat reservoir; geothermal drilling; lost circulation; sticking accident; Xiong'an New Area

0 引言

雄安新区作为国家级新区,地热资源丰富,是中国岩溶地热资源最好的地区之一,具有连通性好、水量大、水温高、易回灌、效益好等优点。地热资源开发是绿色低碳发展战略的重要组成部分,但是在钻井施工过程中非常容易出现钻井事故和复杂情况。前期研究和实践主要集中在资源勘查、钻井技术优化、回灌技术攻关、环境影响评估等方面,取得以下研究成果^[1-8]:(1)利用三维地震和测井技术刻画了热储层空间展布特征,建立了基于温度场和压力场的动态开采模型,优化了井间距和开采强度;(2)钻井技术优化,研发了高温地热钻井液体系和套管防腐技术,提出了基岩热储地热钻探有效解决方案,应用了“一采多灌”的尾水同层回灌模式,建设封闭式回灌管网,配套过滤和加压装置,通过射孔优化和储层酸化改造提升回灌效率;(3)建立地热井远程监控平台,实时采集流量、温度、压力数据,对异常情况进行预警,实施“一井一档”管理,动态跟踪每口井的开采、回灌及环境影响数据。但仍存在热储层上覆盖层特征认识不清、破碎地层取心困难、井身结构不匹配、钻井液性能调控难度大、岩溶热储漏失严重和机械钻速慢等问题。

为此,根据岩溶热储地质特点,结合地震、地质、钻井资料,开展了区域构造演化分析,明确地层发育特征,精细刻画奥陶系和蓟县系热储顶底构造,明确断裂发育特征;充分利用研究区重点探井岩心、常规测井、成像测井等资料建立裂缝识别评价方法,识别并精细描述裂缝发育特征;地层精准识别、井身结构优化;对白云岩、灰岩裂缝性地层钻井取心技术进行研究,对取心工具进行试验与改进,现场应用效果良好。

1 钻井过程中存在的主要问题

雄安新区在前期开发过程中,多口地热井在钻井过程中出现垮塌、埋钻事故,被迫填井侧钻或提前完钻(见表1),直接影响了雄安新区地热勘探步伐。究其原因主要有以下几方面。

表1 事故统计
Table 1 Accident well statistics

井号	设计井深/m	事故井深/m	事故层位	处 理 过 程
徐码1井	1528	750	明化镇组	二开钻至750 m钻井液失返,抢起钻具下钻准备堵漏,下钻至340 m受阻,后侧钻至730 m二开中完;三开922~1350 m钻井液失返,顶漏钻进至1350 m完钻,测井前通井至1200 m受阻,下部井眼坍塌,经多次捞取至1240 m后下滤水管完井
口头1井	1888	1215	明化镇组	二开钻至1214.94 m时钻井液失返,抢起钻具至1154 m卡钻,在434 m爆破松扣后,堵漏失败,从340 m进行侧钻
甄码2井	1692	1000~1151	明化镇组、雾迷山组	二开钻至1000 m钻井液失返,起钻多次堵漏无效后在680 m处填井侧钻,至995 m二开中完;三开钻至1012 m钻井液失返,顶漏钻进至1151 m后起钻检修设备,下钻到底接单根时上提遇卡、下放遇阻,且水眼堵死,卡钻,后填井侧钻
口头2井	1800	1349	雾迷山组	三开钻至1348.8 m钻井液失返,井眼坍塌,多次捞取无效后注水泥封固,钻至1480.72 m后短起下,划眼至1393.85 m受阻,下部井眼坍塌,多次处理无效后提前完钻

1.1 基础地质认知缺乏精细研究和刻画

储盖组合地质描述不明确、上覆盖层特征认识不清、岩溶热储内部裂缝分布规律认识不清,导致现场风化壳识别不准,钻遇失返性漏失地层时,易引发卡钻事故^[3]。

1.2 岩溶热储层易发生恶性漏失、取心困难

雄安新区钻遇岩溶热储层易发生井漏,钻井资料显示,进入雾迷山组后大部分井发生失返性漏失。恶性漏失不但浪费钻井液材料,而且易引发井壁失稳、掉块、卡埋钻具等(见表2)。失返性漏失还

导致 LWD 地面和井下测量仪器间信号失联,无法获取数据。同时岩溶区域热储层胶结差、岩性松散、岩心成柱性差,取心时堵心、挤心严重,起钻过程中易掉心,岩心采取率低,严重影响产状描述和地质分析。

表 2 雄安新区部分地热井井漏情况统计

Table 2 Statistics of well leakage in some geothermal wells in Xiong'an New Area

井 号	漏失情况	漏失层位	漏失井深/m
金台 2	30~60m ³ /h	雾迷山组	1663~1780
金台 3	20~51m ³ /h	雾迷山组	1755~1900
城南 1	失返性漏失	雾迷山组	1396~1404
城南 3	失返性漏失	雾迷山组	1605~1780
城南 4	失返性漏失	雾迷山组	955~1880
口头 2 井	失返性漏失	雾迷山组	1349
甄码 2 井	失返性漏失	雾迷山组	1000~1012
徐码 1 井	失返性漏失	雾迷山组	922~1350
口头 1 井	失返性漏失	雾迷山组	1215

1.3 钻井液性能调控难度大

雄安新区岩溶热储地层岩性复杂,易发生井壁失稳,井下高温又导致钻井液性能调控难度大。如 D15 井,第四系、明化镇组、沙河街组易坍塌,孔店组含石膏层,易出现钙侵,出现钻井液黏度升高、失水增大等性能恶化现象。雾迷山组上部风化壳地层破碎严重,钻透风化壳后钻井液大量漏失,蓟县系地层孔隙和裂缝发育良好、易漏失^[9]。

1.4 岩溶热储层机械钻速慢

实钻数据表明,雾迷山组岩溶热储层机械钻速低,主要原因是雾迷山组白云岩硬度高、研磨性强、可钻性级别高,同时井眼清洁度差、部分岩屑重复破碎,钻头磨损严重,常规牙轮钻头寿命短,起下钻次数多,纯钻进时间利用率低(见表 3)。

2 主要技术措施

2.1 精细地质研究解决储盖组合及地层识别问题

针对雄安新区地质描述储盖组合不明确、岩溶裂缝分布规律认识不清问题,开展区域地质特征精细刻画和岩溶裂缝发育规律研究,明确雄安新区储盖组合,精细描述裂缝发育特征,对井下复杂情况进行有效提示,并针对性进行井身结构设计优化。

表 3 雄安新区部分地热井机械钻速统计

Table 3 Statistics of mechanical drilling rate of some geothermal wells in Xiong'an New Area

井 号	开次	井段/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
大营村 3	一开	0~350	38.53
	二开	350~945	19.78
	三开	945~2950	7.17
大营村 4	一开	0~351	36.95
	二开	351~1015	16.06
	三开	1015~3950	3.29
徐码 2	一开	0~320	29.09
	二开	320~971	22.45
	三开	971~1600	4.80
包装城 8	一开	0~344	25.00
	二开	344~990	21.90
	三开	990~1703	5.63

2.1.1 储盖组合特征

研究区岩溶热储的直接盖层为石炭二叠系的煤系地层,区域盖层为新近系厚层砂泥岩,均起到良好的热封盖作用。因印支运动与燕山运动所引起的剥蚀程度不同,致使不同构造带基岩地层的残存状况与后期盖层的发育程度均有较大差异,不同构造带上的岩溶热储的储盖组合差异较大。

雄安新区发育 3 种储盖组合类型,即雾迷山组-明化镇组组合、雾迷山组-古近系组合和奥陶系-石炭二叠系组合。牛驼镇凸起北段发育新近系-蓟县系组合,热储主要为雾迷山组,凸起顶部上覆直接盖层为明化镇组,凸起西侧的牛北斜坡处上覆直接盖层为古近系,储层和盖层之间的中生界—蓟县系上部地层由于多期构造运动被剥蚀完全,大套地层缺失。此外,由于岩溶热储经历了多期构造运动,岩溶作用十分发育,储层物性极好^[1-3]。

2.1.2 岩溶热储裂缝发育规律

大王探采 1 井依据岩心、成像及常规测井联合识别评价,明确了区域裂缝发育规律。拾取 460 条高导裂缝,其中高角度($\geq 60^\circ$)裂缝 77 条,低角度($< 30^\circ$)裂缝 87 条,介于两者之间裂缝 296 条。裂缝张开度 ≥ 9 mm 的高导缝 27 条,裂缝张开度 < 3 mm 的高导缝 206 条,张开度在两者之间的 227 条。成像测井显示,雾迷山组主要发育 2 期裂缝系统,其中上部裂缝倾向为 225° 左右,下部裂缝倾向 315° 左右、北东走向,显示该区裂缝系统发育良好。

2.1.3 XRF 元素录井技术识别地层

雄安新区古近系砂岩成岩作用强,胶结较为致密,热储层和盖层接触稳定;新近系砂岩成岩作用较弱,胶结物少且多为泥质胶结,胶结疏松,热储层和盖层接触不稳定。据统计,80%的井壁坍塌事故发生在新近系疏松热盖层,20%发生在岩溶裂缝发育的雾迷山组热储。

失返性漏失多发生在雾迷山组顶部。根据区域不同的储盖组合关系特征和工程实践,推荐进入热储层2~3 m即可中完。造成事故的最大原因是风化壳识别错误,准确识别风化壳界面十分重要。

XRF 元素录井技术可以实时测量岩屑中常见的20余种元素,分析地层信息,为地层识别及地质评价提供基础数据。雄安新区明化镇组底部、雾迷山组风化壳顶部,Si和Ca元素的含量大幅升高,Fe、Al、K、Ti、V、Ba、Rb、Zr和Sr等元素的含量大幅

降低,Ca、Mg和P等元素的含量基本稳定;进入风化壳后Ca、Mg元素的含量迅速升高,其余元素的含量相对稳定。据此,可以判断风化壳界面^[10]。

2.1.4 井身结构优化设计

根据研究区最发育的3种储盖组合的盖层特征和岩溶热储特征,形成4种井身结构设计方案^[11]。

2.1.4.1 雾迷山组-明化镇组储盖组合

明化镇组地层胶结疏松,主要考虑封固疏松地层。若风化壳不漏失或少漏失,采用三开井身结构(见表4、图1a),重点在于精准识别风化壳和雾迷山组埋藏深度,二开钻穿风化壳进入雾迷山组2 m中完。若风化壳出现失返性漏失,采用四开井身结构(见表4、图1b),表层套管深度满足下泵要求,二开第一层技术套管封固明化镇组不稳定地层,三开第二层技术套管封固风化壳,四开进入目的层雾迷山组,滤水管完井。

表4 典型井身结构数据
Table 4 Data of casing programme

类 型	开次	钻头直径/mm	井段/m	套管外径/mm	套管下深/m	水泥返深/m
雾迷山组-明化镇组储盖组合风化壳不漏失	一开	445	0~400	340	0~399	0
	二开	311	400~1002	245	379~1001	379
	三开	216	1002~2000	178	981~1999	
雾迷山组-明化镇组储盖组合风化壳失返性漏失	一开	445	0~400	340	0~399	0
	二开	311	400~950	245	379~949	379
	三开	216	950~1002	178	929~1001	929
	四开	152	1002~2000	114	981~1999	
雾迷山组-古近系储盖组合	一开	445	0~500	340	0~499	0
	二开	311	500~2505	245	459~2504	459
	三开	216	2505~3400	178	2481~3399	
奥陶系-石炭二叠系储盖组合	一开	445	0~450	340	0~449	0
	二开	311	450~2905	245	409~2904	459
	三开	216	2905~3600	178	2802~3599	

2.1.4.2 雾迷山组-古近系储盖组合

热储和盖层接触稳定,结合区域已钻井蓟县系顶部未出现漏失情况,采用三开井身结构设计(见表4、图1c)。

2.1.4.3 奥陶系-石炭二叠系储盖组合

石炭二叠系炭质泥岩物理力学性质特殊,岩体结构性差,受扰动易破碎,容易引起上部地层坍塌,主要考虑上部石炭二叠系地层稳定性,采用一层技术套管封固上部不稳定地层,推荐采用三开井身结

构设计(见表4、图1d)。

2.2 恶性漏失地层堵漏和钻井技术

恶性漏失地层通常具有裂缝发育、孔隙连通性强等特点,导致钻井液大量漏失,可能引发井壁失稳、卡钻甚至井喷等重大风险。针对非目的层井段恶性漏失问题的主要技术手段包括:(1)采用智能堵漏材料体系,通过可变形颗粒、纤维材料与凝胶的协同作用实现自适应封堵;(2)应用随钻堵漏技术,在钻进过程中实时监测漏失情况并注入复合堵

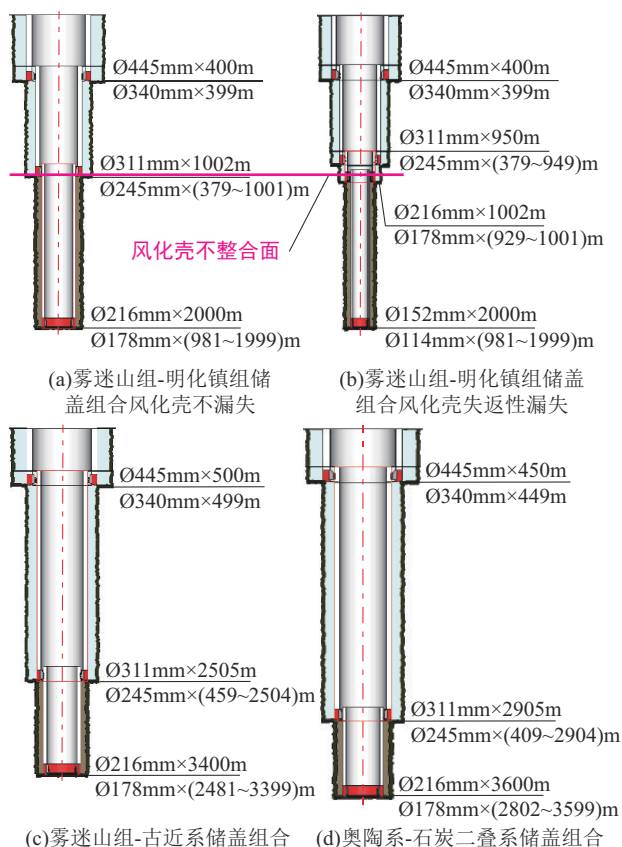


图1 典型井身结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of casing programme

漏剂;(3)精确控制井筒压力剖面减少漏失发生;(4)发展地质工程一体化技术,利用三维地质建模和随钻测井数据提前预测漏失层位。

雄安新区热储目的层大多为雾迷山组,裂缝发育、易漏失。钻进时控制液柱压力,利用清水、清水充空气、双壁钻杆钻井技术解决地层漏失问题,要求钻井液具有较高的黏度。钻井液选用无固相充气钻井液体系,配方为:清水+0.1%~0.2%羧甲基纤维素钠(Na-CMC)+0.5%~0.8%聚丙烯酰胺(PAM)+0.5%~1.0%增黏剂+空气。

提前做好可循环微泡沫钻井液体系或泡沫钻井液体系优选,在三开钻进中失返导致携岩困难、阻卡严重等复杂情况应适时进行钻井液体系转换。

2.3 裂缝性地层取心技术

裂缝性地层因裂缝发育导致岩石结构破碎、各向异性显著,常规取心岩心破碎率高达40%以上,且裂缝开度、充填物等关键地质信息易失真。

针对取心目标地层裂缝发育,取心困难且难以获取地层原始特征的问题,采用具有耐磨低阻、抗

高温、易切割等特点的复合材料管或铝合金管作保型衬筒,研发了隐蔽式岩心爪和防冲蚀取心钻头,形成了裂缝性地层取心技术。选择适用于定向井取心的JS-6全封销挂式多用取心筒配合全封闭岩心爪进行取心。一体式岩心爪实现内筒全封闭,确保起钻过程中不掉心,配合适合于碳酸盐岩取心的GC406型高效取心钻头提高机械钻速。

主要技术突破集中在3个方面:一是采用低扰动取心工具,如双管半合式取心筒配合液动马达,可将钻具振动降低60%;二是研发纳米级封缝剂,在取心过程中实时注入裂缝系统形成柔性支撑,有效维持裂缝原位状态;三是引入冷冻保形技术,通过液氮循环系统在起钻过程中实现-196℃急速冷冻,成功将岩心出筒完整率提升至85%以上。

2.4 利用优质钻井液技术解决地层坍塌问题

钻井液设计秉承绿色设计理念,通过生物基钻井液体系、纳米封堵型环保钻井液等创新技术有效解决了传统钻井液带来的土壤和地下水污染风险。

一开配制预水化膨润土钻井液,加入HV-CMC调节黏度。钻进中钻井液黏度过低采用HV-CMC调节,过高则按循环周缓慢加入清水。下表层套管前加足量的HV-CMC配制封闭液封闭井底50~100 m,保证下套管及固井顺利。

二开前清理循环系统泥砂,循环罐内加入清水配制钻井液,各项性能指标达到设计要求。钻进中及时补充0.3%~1.0%高分子聚合物胶液维护调整性能稳定,并根据钻井液黏切和滤失量变化,用不同浓度胶液处理。利用固控设备严格控制固相含量。下套管前通井到底后,在钻井液中加入HV-CMC、塑料小球、液体润滑剂等配制稠浆封闭井底部分裸眼井段,确保下套管及固井顺利。

三开前清理循环系统,往循环罐内加入清水,从混合漏斗加入处理剂,下钻后将所配胶液与老浆混合均匀。按要求调整好钻井液性能,钻进中定期补充聚合物胶液,维持钻井液性能稳定。

2.5 井下动力马达提高机械钻速

雄安新区雾迷山组地层优先选用混合钻头或配有孕镶金刚石复合片强化切削齿的抗研磨PDC钻头。优化钻压与转速匹配,采用中等钻压(120~180 kN)配合较高转速(120~180 r/min),同时加强水力参数,提高排量确保井底清洁。推荐使用高润滑性油基钻井液体系,添加纳米级润滑剂将摩阻系

数控制在0.08以下,配合3%~5%的硅酸盐抑制剂稳定井壁。涡轮钻具或高速螺杆(转速350~450 r/min)可有效提升破岩效率,配合随钻震击器预防黏滑振动。建立实钻机械比能模型,通过MWD/LWD实时监测调整参数,钻遇燧石条带时及时调整钻压防止跳钻。完钻后需进行钻头磨损分析,结合岩屑特征建立地层可钻性级别数据库,为后续井施工提供优化依据^[10-11]。

3 现场应用

3.1 地层精准识别技术

该方法可以提示钻井地质风险,降低钻井事故率,提高经济效益,实现地热资源的高效利用。根据不同储盖组合的井身结构设计研究成果,现场实施9口井(容东探采1、容东探采3移、一铺南2、大王探采1、孔雀城1、孔雀城4、新河勘探1、新河勘探2和信誉家园3井),未出现钻井事故,取得较好的经济效益,具有良好的推广应用前景。

近2年来雄安新区雾迷山组、奥陶系风化壳识别准确率上升30%,2024年达100%,创下了雄安新区新高,达到全面提升风化壳识别优良率及现场施工便利化、精准量化的目的。

3.2 地层穿漏技术、取心技术

采用双壁钻杆穿漏技术、裂缝性地层取心技术,首次在容东探采1井完成了2筒次的取心作业,最后一次岩心采取率99.4%,为该区间后续作业打下了一定的基础,两次取心结果见表5。

表5 容东探采1井取心作业情况统计
Table 5 Statistics of coring operation of exploration and production well 1 in Rongdong Region

序号	取心井段/m	进尺/m	心长/m	取心率/%
1	1600.00~1602.60	2.60	2.35	90.4
2	1800.61~1803.77	3.16	3.14	99.4

D15井全井段共计取心11回次,取心进尺49.44 m,岩心长度43.56 m,岩心采取率88.11%。其中盖层的泥岩、砂岩等地层,优先选择川系列取心钻具,配合PDC复合片取心钻头。热储层雾迷山组地层选择单动双管取心钻具,配合孕镶金刚石钻头,可保证岩心采取率^[9,12-13]。

3.3 钻井液技术

容东探采1、容东探采3移、西管1井、西管2井

均应用了上述优质钻井液体系,该体系绿色、低碳、高效、环保,取得了良好的效果。

一开钻遇地层为第四系,主要为灰黄、黄棕、棕黄和棕红色亚砂土、亚黏土、黏土及灰黄和灰白色砂层,钻井液应维持足够的黏切,有良好的悬浮携砂、稳定井壁的能力。钻井液配方:清水+5%~6%膨润土+0.1%~0.2%Na₂CO₃+0.3%HV-CMC。

二开钻遇地层主要为第四系、新近系、蓟县系。第四系岩性主要为灰黄、黄棕、棕黄和棕红色亚砂土、亚黏土、黏土及灰黄和灰白色砂层。新近系由泥岩、砂岩、细砂岩等互层组成。蓟县系岩性主要为灰白至灰色细晶和隐晶质含燧石结核、燧石条带及泥质条带的白云岩,夹紫红、灰绿色泥岩和灰色、灰褐色泥质白云岩。应加强钻井液的护壁性和携砂性,钻井液体系为聚合物钻井液:清水+5%~6%膨润土+0.2~0.5%Na₂CO₃+1~2%CaCl₂+1%~2%铵盐+1%降滤失剂+2%~3%润滑剂。

三开钻遇地层为蓟县系,地层岩性主要以灰白至灰色细晶和隐晶质含燧石结核、燧石条带及泥质条带的白云岩,夹紫红、灰绿色泥岩和灰色、灰褐色泥质白云岩组成。局部裂隙溶洞发育,做好井漏后清水的储备工作。钻井液体系采用无固相钻井液体系,配方为:清水+0.1%~0.2%Na-CMC+0.5%~0.8%PAM+0.5%~1.0%增黏剂。

3.4 提速增效技术

Zg-Dr1井、大王探采1井,均采用涡轮钻具或高速螺杆,配合随钻震击器复合钻进,有效地提升了碎岩效率,实现了优质、安全、高效钻进。其中Zg-Dr1井,三开平均机械钻速8.15 m/h;大王探采1井完钻井深3500 m,完钻层位高于庄组,井身质量合格,三开平均机械钻速8.17 m/h,试水水温93.1℃,水量140 m³/h,取得了良好钻探效果。

4 结论

(1)针对地热开发需求和地质条件,采用三开为主的井身结构,表层套管封隔表层松散地层同时满足泵室段深度要求,技术套管下至热储层顶部,尾管悬挂,封固热储层顶部及以上地层。完井深度根据热储层埋深确定,生产套管尾管悬挂,目的层段下滤水管。通过井身结构优化,确保井筒完整性及热交换效率,同时兼顾地下水保护与地面沉降防控要求。

(2)精确控制井筒压力剖面可减少漏失发生,恶性漏失储层钻进时利用清水、清水充空气、双壁钻杆钻井技术解决地层漏失问题。针对新区普遍存在的基底破碎带取心难题,采用专用工具及多种技术组合,完整获取了雾迷山组白云岩破碎带的地质信息,为热储评价提供了关键数据和实物支撑。

(3)针对雄安地区复杂的地层条件与生态保护需求,优化钻井液配方,重点采用生物降解材料和无毒添加剂,有效降低了对地下水和土壤环境的潜在影响。强化了对浅层地热资源开发区的保护的同时,也平衡了资源开发与生态保护的双重目标,为新区地热能源开发提供了可靠的技术支撑。

(4)涡轮钻具或高速螺杆应用、高性能钻头选型,数字化钻井参数优化系统,配合模块化井场布局与标准化作业流程,可有效解决复杂地层钻井效率低、事故风险高等难题,为雄安新区地热资源规模化开发提供了可靠的技术支撑,对华北地区类似地质条件下的清洁能源开发具有重要推广价值。

参考文献(References):

- [1] 王贵玲,张薇,蒯文静,等.京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J].中国地质,2017,44(6):1074-1085.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIAN Wenjing, et al. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Geology in China, 2017, 44(6):1074-1085.
- [2] 鲁锴,鲍志东,季汉成,等.雄安新区蓟县系雾迷山组岩溶热储特征、主控因素及有利区预测[J].古地理学报,2019,21(6):885-900.
LU Kai, BAO Zhidong, JI Hancheng, et al. Characteristics, main controlling factors and favorable areaprediction of karstic geothermal reservoirs of the Jixianina Wumishan Formation in Xiong'an new area[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(6):885-900.
- [3] 刘慧盈,汪新伟,毛翔,等.雄安新区岩溶热储钻井地质关键要素分析[J].东北石油大学学报,2021,45(4):69-81.
LIU Huiying, WANG Xinwei, MAO Xiang, et al. Analysis of key geological factors related to drilling design of karst geothermal reservoir in Xiong'an new area[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(4):69-81.
- [4] 齐恭,李杨,齐晓风,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.
- [5] 王勇军,梁伟,杜志强,等.雄安新区D05井燧石白云岩地层钻头应用探索[J].钻探工程,2023,50(4):142-148.
WANG Yongjun, LIANG Wei, DU Zhiqiang, et al. Exploration of drill bit applied in chert dolomite strata in well D05 of Xiong'an new area[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4):142-148.
- [6] 潘德元,何计彬,杨涛,等.雄安牛驼镇地热田岩溶热储层地热深井井身结构优化设计[J].钻探工程,2021,48(2):78-84.
PAN Deyuan, HE Jibin, YANG Tao, et al. Optimization design of the geothermal wellbore structure in karst reservoir[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):78-84.
- [7] 李红梅,王雷浩,殷邈,雄安新区D21地热勘探井钻探施工技术及其成果[J].钻探工程,2022,49(3):29-36.
LI Hongmei, WANG Leihao, YIN Miao. Drilling technology for D21 geothermal exploration well in Xiong'an new area[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3):29-36.
- [8] 赵长亮,王勇军,聂德久,等.雄安新区D19井破碎热储层气举反循环钻进技术[J].钻探工程,2022,49(4):137-143.
ZHAO Changliang, WANG Yongjun, NIE Dejiu, et al. Gas lift reverse circulation drilling technology for D19 well in broken thermal reservoir in Xiong'an new area[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4):137-143.
- [9] 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.
- [10] 曹华庆,吴波,龙志平,等.京津冀岩溶热储钻井关键技术[J].石油钻探技术,2021,49(2):42-47.
CAO Huaqing, WU Bo, LONG Zhiping, et al. Key technologies involved in karstic geothermal reservoir drilling in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(2):42-47.
- [11] 王培义,马鹏鹏,张贤印,等.中低温地热井钻井完井工艺技术研究与实践[J].石油钻探技术,2017,45(4):27-32.
WANG Peiyi, MA Pengpeng, ZHANG Xianyin, et al. Drilling and completion technologies for of geothermal wells with medium and low temperatures[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4):27-32.
- [12] 田京振,李砚智.河北省牛驼镇地热田钻探工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(8):27-30.
TIAN Jingzhen, LI Yanzhi. Drilling technology for niutuozen geothermal field in Hebei[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(8):27-30.
- [13] 樊腊生,贾小丰,王贵玲,等.雄安新区D03地热勘探井钻探施工实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):13-22.
FAN Lasheng, JIA Xiaofeng, WANG Guiling, et al. Drilling practice of D03 geothermal exploration well in Xiong'an new area[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10):13-22.

(编辑 王跃伟)