

XD-40型钻机在雄安新区地热勘探井施工中的应用

高鹏举¹, 董向宇¹, 刘凡柏¹, 任启伟¹, 朱芝同¹, 王跃伟¹, 王雷浩², 殷 邈²

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 河北省地矿局第九地质大队, 河北 邢台 054000)

摘要:深部矿产资源勘查技术装备XD-40型钻机应用于雄安新区地热勘探井施工, 圆满完成了D13井钻探任务, 完钻井深2506.14 m, 完钻口径152.4 mm。本文主要从工程概况、设备特点、施工情况、事故处理等方面, 介绍D13井的施工情况, 总结了XD-40型钻机的总体性能、事故处理、多工艺性、能耗等方面的表现。验证了XD-40型钻机的能力及安全可靠、智能控制、节能环保方面的优越性, 可应用于井深2500~2800 m的地热井施工。

关键词: XD-40型钻机; 雄安新区; D13井; 地热勘探井

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)08-0072-06

Application of XD-40 drilling rig in geothermal exploration well construction in Xiongan New Area

GAO Pengju¹, DONG Xiangyu¹, LIU Fanbai¹, REN Qiwei¹,

ZHU Zhitong¹, WANG Yuewei¹, WANG Leihao², YIN Miao²

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Hebei Bureau of Geology 9th Geological Brigade, Xingtai Hebei 054000, China)

Abstract: XD-40 drilling rig, the technical equipment for deep mineral resources exploration, has been applied to the construction of geothermal exploration wells in Xiongan New Area, and successfully completed the drilling task of Well D13, with the drilling depth of 2506.14m and the drilling diameter of Ø152.4mm. This paper mainly introduces the construction of D13 well from the aspects of project overview, equipment characteristics, operations and accident treatment, and summarizes the performance of XD-40 in overall performance, accident treatment, multi-process adaptability, and energy consumption. It has been proved that XD-40 drilling rig has the advantages of safety, reliability, intelligent control, energy saving and environmental protection, and can be applied to the construction of geothermal wells with depth of 2500~2800m.

Key words: XD-40 drilling rig; Xiongan New Area; D13 well; geothermal exploration wells

0 引言

4000 m地质岩心钻机(XD-40型)是中国地质科学院勘探技术研究所牵头研发的深部矿产资源勘查技术装备^[1-3], 可应用于固体矿产、地热、浅层油气勘探等领域。钻机研制成功后, 于2017—2018年

在天津东丽区CGSD-01井进行了试验, 初步验证了钻机的能力及主要性能^[4-7]。随后XD-40型钻机应用于雄安新区的地热勘探施工, 圆满完成了D13井的钻探工作。D13井设计井深2500 m, 完钻井深2506.14 m, 完钻口径152.4 mm。

收稿日期: 2021-04-28; 修回日期: 2021-06-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.08.011

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”(编号: 2018YFC0603400); 中国地质调查局地质调查项目“雄安新区地热清洁能源调查评价(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20189115)、“智能化深部钻探技术升级与应用示范”(DD20211421)

作者简介: 高鹏举, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探设备、钻进工艺的研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, gaopengju1000@163.com。

引用格式: 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 Xiongan New Area[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8): 72-77.

1 工程概况

1.1 地理简况

D13井位于雄安新区容城东南文营村西南,井场周边有多条乡道、县道,并且邻近荣乌高速,交通便利(见图1)。雄安新区属于暖温带半湿润大陆性季风气候。四季分明,气候温和,光照充足,雨量适中,无霜期长,干寒同期。春季干燥多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽宜人,冬季寒冷少雪。年均气温在15℃左右,历年1月份平均气温为0.7℃,7月份平均气温为27.1℃,年降水量700 mm左右。



图1 D13井钻井位置

Fig.1 Drilling position map of D13 well

1.2 地质情况

雄安新区地质构造上位于渤海湾盆地的冀中拗陷内,主要涉及的构造单元有徐水凹陷、容城凸起、牛驼镇凸起、霸县凹陷、保定凹陷、高阳低凸起。主体构造线以NE向为主。主要断裂有NE向容城断裂、牛东断裂、保定断裂、高阳断裂,NWW向牛南断裂。D13井位于冀中拗陷容城凸起构造东部^[8-10]。

1.3 钻遇地层

雄安新区地表出露地层为第四系地层,第四系以下的岩层包括新近系(明化镇组、馆陶组)、古近系(东营组、沙河街组、孔店组)、中-新元古界(蓟县系雾迷山组、杨庄组;长城系高于庄组、大红峪组、团山子组、串岭沟组和常州沟组)、太古宇,普遍缺失古生界,不同区域受构造、剥蚀等因素影响,地层发育序列和厚度有所不同。D13井地层如表1所示。

(1)本井原预计800 m见蓟县系雾迷山组,但实际上于998 m处钻遇长城系高于庄组,结合岩(矿)心切片鉴定报告结果,推断本区域蓟县系雾迷山组厚度极薄或缺失。

(2)第四系地层底界埋深340 m,厚度340 m。岩性主要为灰黄、黄棕粘土、粉质粘土、粉土层及不

表1 D13井设计与钻遇地层

Table 1 Design and as-drilled formation at D13 well

地 层	设 计		钻 遇	
	底深/m	厚度/m	底深/m	厚度/m
第四系	350	350	340	340
明化镇组	800	450	998	658
雾迷山组	1600	800	缺失	
杨庄组	1800	200	缺失	
高于庄组	2300	500	1435	437
大红峪组	缺失		2151	716
太古宇	2500	200	2506.14	241.14(未穿)

等厚的灰黄色粉砂、细砂层等。由于地层松散不成岩,采用大泵量喷射钻进,钻进时调整钻进速度,控制井斜。同时调整钻井液性能,满足护壁、防塌要求。

(3)新近系明化镇组地层底界埋深998 m,厚度为658 m。岩性以泥岩为主,主要为棕红色、红褐色、灰绿色、杂色泥岩等不等厚互层,部分泥岩含钙化物质较多;砂岩为灰绿色、灰黄色、浅绿色,含不等厚砾砂岩。上部砂岩胶结松散,下部砂岩较坚硬,部分颗粒显风化。以棕红色泥岩结束。地层遇水易膨胀、缩径,钻井液性能以护壁和降失水为主,同时控制好粘度和密度。

(4)蓟县系高于庄组地层底界埋深1435 m,厚度为437 m。岩性以白云岩为主,顶部是灰白色泥质白云岩、灰褐色花斑状白云岩,富含燧石条带、团块,结晶程度高,部分层位有方解石填充。孔隙和裂缝发育良好,钻进过程中易发生漏失,钻进过程中应及时补充惰性堵漏材料。地层内燧石条带和团块造成地层软硬不均,钻进过程中易对钻头造成冲击,选择抗冲击性能好的钻头。

(5)长城系大红峪组地层底界埋深2151 m,厚度为716 m。上段为粗面玄武岩,含不规则状玛瑙、绿泥石等填充物,部分岩层有不规则岩层裂隙发育。下段为灰白色泥质角砾白云岩,裂隙发育良好。地层倾角较大,自然造斜明显,钻进过程中优化钻具组合、采用控向钻进,控制井身轨迹。

(6)太古宙地层,钻至2506.14 m,未揭穿。岩性为肉红色钾长片麻岩,角闪二长片麻岩。地层研磨性强,钻进过程中影响钻头寿命,采用硬度较高的钻头。

1.4 钻井结构

一开 $\text{O}444.5\text{ mm}$ 钻进至 363.88 m , 下入 $\text{O}339.7\text{ mm} \times 9.65\text{ mm}$ 套管, 下入井段 $0 \sim 363.88\text{ m}$, 全井段固井。二开 $\text{O}311.2\text{ mm}$ 钻进至 857.57 m , 下入 $\text{O}244.5\text{ mm} \times 8.94\text{ mm}$ 套管, 下入井段 $329.56 \sim 857.57\text{ m}$, 全井段固井。三开 $\text{O}215.9\text{ mm}$ 钻进至 1501.43 m , 下入 $\text{O}177.8\text{ mm} \times 8.05\text{ mm}$ 三开套管, 下入井段 $818.23 \sim 1501.43\text{ m}$, “穿鞋戴帽”固井。四开 $\text{O}152.9\text{ mm}$ 钻进至 2506.14 m [11-14]。

1.5 施工难点

(1) D13井为地热勘探井, 明化镇组以深可参考资料较少, 实际钻遇地层与设计地层相差较大, 对施工造成了一定影响。

(2) 钻进过程中, 根据地层变化需要进行取心。全面钻进和取心钻进所需的工艺参数相差较大, 要求钻机运行参数调整范围宽、控制精度高。

(3) XD-40型钻机自带泥浆泵排量偏小, 不适合大口径钻进, 需要单独配套钻井泵及固控系统。

2 设备介绍

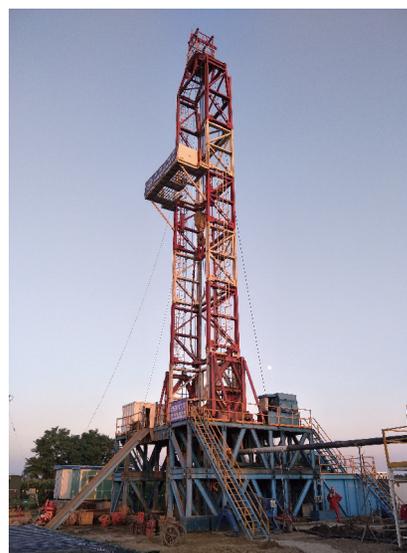
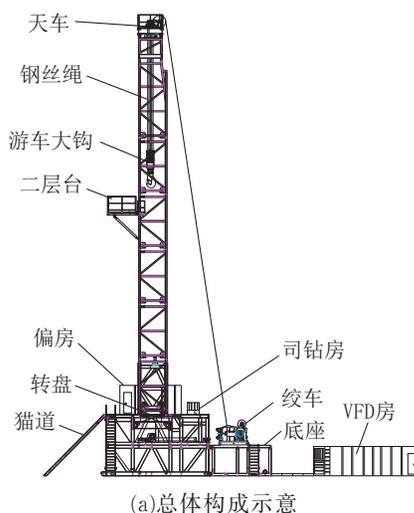
XD-40型钻机由垂直起升井架、底座、天车、游车大钩、主绞车、转盘、液气系统、VFD房、司钻房等组成, 采用交流变频技术、自动化控制技术、PLC控制技术等, 可实现提升系统、回转系统无级调速, 具备数字显示、数据存储等功能。钻机总体构成示意及现场施工如图2所示, 主要技术参数如表2所示, 其他配套装置如表3所示。

3 施工情况介绍

3.1 一开简介

本井于2018年8月21日开钻, 一开完钻时间2018年8月24日。根据设计要求及施工经验, 开孔采用 $\text{O}444.5\text{ mm}$ 牙轮钻头钻进至 363.88 m , 穿过第四系, 进入明化镇组地层 18.88 m 。一开钻进主要钻遇上部第四系土层, 由于上部地层松散不成岩, 钻进时控制钻压、转速, 采用大排量喷射钻进。

全面钻进钻具组合: $\text{O}444.5\text{ mm}$ 牙轮钻头 + $\text{O}203\text{ mm}$ 钻铤 + $\text{O}178\text{ mm}$ 钻铤 + $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆。钻进参数: 钻压 $20 \sim 130\text{ kN}$, 转速 $50 \sim 60\text{ r/min}$, 排量 $28 \sim 31.1\text{ L/s}$ 。一开钻井液配置: 水 + 膨润土 + 铵盐 + 纯碱。钻井液性能参数: 密度 $1.03 \sim 1.10\text{ g/cm}^3$, 漏斗粘度 $29 \sim 39\text{ s}$, 滤失量 $9 \sim 12\text{ mL}$, 泥饼厚



(b)施工现场

图2 XD-40型钻机总体构成及施工现场

Fig.2 General structure of XD-40 drilling rig and working at site

$\leq 1.5\text{ mm}$ 。

3.2 二开简介

2018年8月30日二开使用 $\text{O}311.2\text{ mm}$ 牙轮钻头开钻, 2018年9月6日钻至 857.57 m 二开完钻。钻遇地层主要为明化镇组泥岩、砂岩, 地层较松散, 遇水易膨胀、缩径, 钻井液性能以护壁和降失水为主, 同时重点控制粘度和密度。

全面钻进钻具组合: $\text{O}311.2\text{ mm}$ 牙轮钻头 + $\text{O}203\text{ mm}$ 钻铤 + $\text{O}177.8\text{ mm}$ 钻铤 + $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆。全面钻进参数: 钻压 $30 \sim 100\text{ kN}$, 转速 $30 \sim 50\text{ r/}$

表2 XD-40型钻机主要技术参数^[4-6]

Table 2 Main technical parameters of XD-40 rig		
钻进能力	H规格(Ø89 mm)/m	4000
	P规格(Ø114 mm)/m	3000
	Ø127 mm API石油钻杆/m	1800
	Ø89 mm API石油钻杆/m	2800
井架平台	井架型式	K型
	井架起升方式	液压驱动垂直起升
	净空高度/m	31
	承载力/kN	1350
	二层台高度/m	16.5
	立根容量/m	4000@Ø89 mm
	天车轮系	5×6
	前平台尺寸/m	8.5×9.6×5
	后平台尺寸/m	5×9.6×2.5
	导轨长度/m	25
导轨抗扭/(N·m)	25000	
升降系统	主电机功率/kW	400
	单绳最大提升力/kN	150
	钢丝绳直径/mm	26
	滚筒转速/(r·min ⁻¹)	0~250
	钩速/(m·s ⁻¹)	0~1.1
	主刹车	液压盘式刹车
	辅助刹车	能耗制动
	送钻电机功率/kW	15
	自动送钻速度/(m·min ⁻¹)	0~0.4
	电机功率/kW	180
转盘系统	最大扭矩/(N·m)	20000
	转速/(r·min ⁻¹)	0~200
	通孔直径/mm	444.5
液压系统	额定流量/(L·min ⁻¹)	15、50、120
	额定压力/MPa	7、16、16
气源系统	工作压力/MPa	1
	气罐容积/m ³	3
高压管汇系统	工作压力/MPa	35
	公称通径/mm	107

min, 泵量 28~30 L/s。钻井液配置:水+膨润土+铵盐+纯碱。钻井液性能参数:密度 1.06~1.14 g/cm³, 漏斗粘度 31~48 s, 滤失量 6~10 mL, 泥饼厚≤1 mm。

二开取心钻进钻具组合:Ø215.9 mm 取心钻头+川8-3型取心钻具+Ø177.8 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆。取心钻进参数:钻压 30~35 kN, 转速 30

表3 其他配套装置

Table 3 Matching equipment			
名称	型号	性能参数	
循环系统	泥浆泵	F-1300	1300 HP
	钻井液罐		250 m ³
	搅拌器		10 kW 以上
固控系统	振动筛 1	2ZS4.2-280	
	振动筛 2	2ZS4.2-280	
	除砂器	NCS300×2	2.5 m ³ /min
	除泥器	SB6×8	2.5 m ³ /min
	离心机	LW600-1019N	0.95 m ³ /min
	除气器	HZQ1/4	1.5 m ³ /min

r/min, 泵量 11 L/s。

3.3 三开简介

本开次于 2018 年 9 月 18 日使用 Ø215.9 mm 牙轮钻头开钻, 2019 年 1 月 2 日完钻, 钻遇地层主要为蓟县系高于庄组泥质白云岩和长城系大红峪组粗面玄武岩。

全面钻进钻具组合:Ø215.9 mm 牙轮钻头+Ø177.8 mm 钻铤+Ø165 mm 钻铤+Ø159 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆。钻进参数:钻压 50~120 kN, 转速 50~65 r/min, 泵量 30~35 L/s。钻井液配置:水+膨润土+铵盐+纯碱。钻井液性能参数:密度 1.06~1.10 g/cm³, 漏斗粘度 25~40 s, 滤失量 7~10 mL, 泥饼厚≤0.8 mm。三开段部分全漏失地层采用清水强钻。

三开取心钻进钻具组合:Ø215.9 mm 取心钻头+川8-3型取心钻具+Ø177.8 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆。钻进参数:钻压 40~50 kN, 转速 40~50 r/min, 泵量 12~15 L/s。

3.4 四开简介

本开次于 2019 年 1 月 9 日使用 Ø152.4 mm 牙轮钻头开钻, 2019 年 3 月 9 日完钻。钻遇地层主要为长城系大红峪组粗面玄武岩、泥质白云岩、炭质页岩、凝灰岩和太古宇角闪岩、片麻岩。由于四开井段较深, 部分井段地层破碎, 钻井液以防塌护壁为主, 并控制滤失量。钻井液性能参数调整为:密度 1.06~1.15 g/cm³, 漏斗粘度 36~51 s, 滤失量 8~10 mL, 泥饼厚≤0.7 mm。

全面钻进钻具组合:Ø152.4 mm 牙轮钻头+Ø121 mm 钻铤+Ø89 mm 加重钻杆+Ø89 mm 钻杆+

Ø127 mm 钻杆。钻进参数:钻压 30~80 kN, 转速 40~50 r/min, 泵量 30~35 L/s。

取心钻进钻具组合:Ø152.4 mm 取心钻头+川 6-3 型取心钻具+Ø121 mm 钻铤+Ø89 mm 加重钻杆+Ø89 mm 钻杆+Ø127 mm 钻杆。钻进参数:钻压 20~40 kN, 转速 25~30 r/min, 泵量 12~15 L/s。

4 事故处理

4.1 卡钻事故

三开钻进至 947 m 处开始出现漏失, 1007 m 后地层全部漏失, 期间试过多次堵漏方案, 均无明显效果。顶漏钻进至 1584.65 m 时发生卡钻事故, 上下活动钻具几个小时后依旧未能解卡, 最大上提力 1350 kN, 然后使用 Ø177.8 mm 地面震击器成功解卡。

4.2 随钻纠斜

在四开开钻后, 因地层复杂, 地层倾角较大, 进行了加密测斜并不断调整钻进参数。在使用常规钻具组合钻进至 1666.33 m 后, 发现井斜增大至 9.6°, 井斜增长较快, 井斜控制难度较大, 决定使用随钻定向仪器进行吊打纠斜。2019 年 1 月 18 日开始使用随钻定向仪器和螺杆钻具组合进行钻进, 纠斜效果明显, 随钻定向仪器使用井段为 1666.33~2322.40 m, 2311.40 m 井斜降至 1.4°。定向钻进钻具组合:Ø 152.4 mm PDC 钻头+Ø120 mm 螺杆+MWD 短节+Ø120 mm 无磁钻铤+Ø121 mm 钻铤+Ø89 mm 加重钻杆+Ø89 mm 钻杆+Ø127 mm 钻杆。定向段钻进参数:钻压 30~40 kN, 转盘转速 0, 泵量 13~17 L/s。复合段钻进参数:钻压 30~40 kN, 转盘转速 10~20 r/min, 泵量 13~17 L/s。

5 钻机性能表现

在 D13 井施工期间, XD-40 型钻机完成了全井的钻探工作量, 总进尺 2506.14 m, 其中取心 12 回次, 取心进尺 50.51 m, 岩心长度总计 41.85 m, 全井平均岩心采取率 82.86%。完成了下套管、固井等成井工作, 体现了钻机的综合能力。

在卡钻事故处理过程中, 强力起拔力达到 1350 kN, 证明了绞车的提升能力。底座高度 5 m, 满足现场防喷器安装所需的空空间。转盘无级调速功能满足了全面钻进、取心钻进及复合钻进对转速不同的需求, 体现了变频调速的优势^[15]。在施工过程中分别

触发过卷防撞、天车防撞一次, 防撞装置安全可靠, 绞车紧急制动效果良好, 有效避免了事故的发生。

XD-40 型钻机采用的交流变频系统能耗较少、节能环保。对比在容城地热田施工的 D11、D12 井, XD-40 钻机平均每米节省电费分别为 4%、21.9%, 如表 4 所示。

表 4 D11、D12、D13 井用电对比

Table 4 Comparison of power consumption for Well D11, D12 and D13

井号	钻机型号	动力机类型	终孔深度/m	电费/万元	单位消耗/(元·m ⁻¹)
D11	ZJ30	三相异步电动机	2520.8	48.5	192.4
D12	ZJ30LDB	交流变频电机(无变频控制器)	2608.5	61.7	236.5
D13	XD-40	交流变频电机	2506.14	46.3	184.7

6 问题及建议

(1) 与传统石油钻机相比, XD-40 型钻机提下钻速度偏慢, 建议增大主绞车电机功率, 并合理分配减速箱传动比。

(2) XD-40 型钻机自带泥浆泵不能提供大口径钻探施工所需泵量, 建议匹配钻井泵及固控系统, 以形成完整的施工装备。

(3) 底座的前场面积较小, 不方便安装液气大钳。电气系统及控制系统对维护人员要求较高, 建议施工时配备具有电气经验的技术人员。

7 结语

在 D13 井施工期间, XD-40 型钻机完成了钻井、取心、下套管等工作, 为获取地层参数、评价热储提供了支撑。经过 D13 井生产实践, 充分验证了 XD-40 型钻机的技术性能, 体现了安全可靠、节能环保的优点, 可应用于井深 2500~2800 m 的地热井施工。

参考文献(References):

- [1] 刘凡柏, 高鹏举, 任启伟, 等. 4000m 交流变频电驱岩心钻机的研制及其在地热井的工程应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(10): 40-46.
- LIU Fanbai, GAO Pengju, REN Qiwei, et al. Development an

- application of 4000m AC frequency-conversion core drill[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018,45(10):40-46.
- [2] 高鹏举,刘凡柏,和国磊,等.4000m地质岩心钻机主绞车关键技术研究[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第二届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2019:393-400.
- GAO Pengju, LIU Fanbai, HE Guolei, et al. Research on key technologies of main winch of 4000m geological core drilling rig [C]//Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2019:393-400.
- [3] 沈怀浦,何磊,高明帅,等.4000m直驱电传动高速顶驱的研制[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2017,44(S1):243-246.
- SHEN Huaipu, HE Lei, GAO Mingshuai, et al. Development of high-speed top drive with 4000m direct drive electric drive[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017,44(S1):243-246.
- [4] 高鹏举,刘凡柏,王跃伟,等.4000m地质岩心钻机在天津东丽区地热资源调查中的示范应用[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019,46(1):13-21.
- GAO Pengju, LIU Fanbai, WANG Yuewei, et al. Demonstration application of 4000m geological core drilling rig in geothermal resources investigation in Dongli district of Tianjin[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019,46(1):13-21.
- [5] 和国磊,宋志彬,胡志兴,等.东丽湖地热钻探CGSD-01井钻完井技术[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2019,46(4):7-13.
- HE Guolei, SONG Zhibin, HU Zhixing, et al. Summary of drilling and completion technology for Well CGSD-01 in Dongli Lake geothermal drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019,46(4):7-13.
- [6] 杜焱森,宋志彬,和国磊,等.天津东丽湖CGSD-01井取心问题及技术探索[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2019,46(3):13-19.
- DU Yaosen, SONG Zhibin, HE Guolei, et al. Core drilling in Well CGSD-01 in Tianjin Dongli Lake[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019,46(3):13-19.
- [7] 许本冲,和国磊,宋志彬,等.浮力下管技术在天津东丽CGSD-01地热调查井中的应用[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2019,46(4):14-17.
- XU Benchong, HE Guolei, SONG Zhibin, et al. Setting casing with buoyancy in the CGSD-01 geothermal well[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019,46(4):14-17.
- [8] 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(5):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.
- [9] 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.
- [10] 赵佳怡,张薇,马峰,等.雄安新区容城地热田地热流体化学特征[J].*地质学报*,2020,94(7):1991-2001.
- ZHAO Jiayi, ZHANG Wei, MA Feng, et al. Geochemical characteristics of the geothermal fluid in the Rongcheng geothermal field, Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020,94(7):1991-2001.
- [11] 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.
- [12] 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 Xiongan New Area[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(10):13-22.
- [13] 田京振,李砚智.河北省牛驮镇地热田钻探工艺[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2009,36(8):27-30.
- TIAN Jingzhen, LI Yanzhi. Drilling technology for Niutuozhen geothermal field in Hebei[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009,36(8):27-30.
- [14] DZ/T 0260—2014,地热钻探技术规程[S].
- DZ/T 0260—2014, Technical specification for geothermal well drilling[S].
- [15] 刘宝林,桂暖银.地质钻机交流变频调速系统驱动性能的实验研究[J].*探矿工程*,1996(1):49-52.
- LIU Baolin, GUI Nuanyin. Experiment on A. C. drive performance for geological drill [J]. *Exploration Engineering*, 1996(1):49-52.

(编辑 荐华)