

雄安新区D15地热勘探井钻探施工技术

高鹏举¹, 董向宇¹, 马峰², 王昭³, 王晓赛¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;

2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061;

3. 河北省地矿局第三水文工程地质大队, 河北衡水 053000)

摘要:为探查容城地热田地热资源, 中国地质调查局在雄安新区部署了地热勘探井D15井。D15井设计井深3000 m, 完钻井深3111.58 m。钻探目的是为揭露容城凸起北部斜坡带地层发育情况, 服务于新区地热开发规划。本文介绍了D15井的井区及地质状况、钻探施工情况; 总结了取得的钻探成果, 包括完成的钻探施工任务和施工质量; 提炼出水热型地热井钻井液技术, 优选取心工具, 以及获取了岩心等实物资料; 实施射孔作业完成了目的层抽水试验, 获取的地层水温、水量等参数, 为雄安新区地热资源调查评价提供了资料。

关键词:雄安新区; 地热钻探; 取心; 射孔; 抽水试验

中图分类号: P634; TE249 文献标识码: B 文章编号: 2096-9686(2021)03-0106-07

Drilling technology for D15 geothermal exploration well in Xiong'an New Area

GAO Pengju¹, DONG Xiangyu¹, MA Feng², WANG Zhao³, WANG Xiaosai¹

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

2. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang Hebei 050061, China;

3. No. 3 Hydrological and Engineering Geology Team, Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Hengshui Hebei 053000, China)

Abstract: In order to explore the geothermal resources in the Rongcheng geothermal field, the Geological Survey of China has deployed a geothermal exploration well D15 in Xiong'an New Area with the design depth of 3000m and the completion depth 3111.58m. It is intended to reveal the development of the strata in the northern slope zone of the Rongcheng uplift and serve the geothermal development planning of Xiong'an New Area. This paper describes the drilling achievements, including completion of the drilling tasks, assurance of drilling quality; and summarizes hydrothermal well drilling fluid technology, selection of the coring tools, and acquisition of the physical data such as core, cuttings and other. Perforation operation was performed for pumping test to obtain formation parameters on water temperature and volume so as to provide data for the investigation and evaluation of geothermal resources in Xiong'an New Area.

Key words: Xiong'an New Area; geothermal drilling; coring; perforation; pumping test

1 项目概况

D15井是中国地质调查局“京津冀地热资源调查评价与综合开发示范工程”2019年在雄安新区的

一口地热地质勘探井, 由中国地质科学院水文地质环境地质研究所进行工程部署, 中国地质调查局勘探技术研究所承担实施。该井钻探目的为揭露容

收稿日期: 2020-12-11; 修回日期: 2021-02-01 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.03.015

基金项目: 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)

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

引用格式: 高鹏举, 董向宇, 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.

城凸起北部斜坡带地层发育情况,服务于新区地热开发规划,为晾马台特色小镇地热资源开发提供参数,设计井深为3000 m,目的层为蓟县系地层^[1-5]。

2 井区及地质状况

2.1 井位及交通

根据二级项目部署,在容城县晾马台镇南侧实施地热勘探,勘探井地理位置如图1所示,在雄安新区北部,荣乌高速公路以北。北京、天津、石家庄通过高速公路用数小时就能到达雄安新区,交通非常便利,通讯便捷。



图1 D15井钻井位置

Fig.1 Drilling position of D15

2.2 地质情况及钻井难点分析

2.2.1 地层情况

工作区所处容城凸起北部东侧斜坡区,钻遇地层如表1所示。

2.2.2 热储特征

D15井钻遇雾迷山组、高于庄组裂隙岩溶热储。雾迷山组裂隙岩溶热储岩性主要为白云岩含有泥质成分,上部风化程度较高,裂隙(水层)总厚度22.4 m,占地层总厚度的10%(裂隙率)。高于庄组裂隙岩溶热储岩性主要为白云岩、含燧石条带白云岩,裂隙(水层)总厚度19.6 m,占地层总厚度的9.18%(裂隙率)。

2.2.3 钻井难点分析

第四系、明化镇组、沙河街组易坍塌,重点调整钻井液参数,确保井壁稳定。孔店组含石膏层,易出现钙侵,造成钻井液粘度升高、失水增大等性能恶化。蓟县系雾迷山组上段风化壳地层破碎严重,钻透易出现大量漏失,进入风化壳后,加强录井岩性判定工作。蓟县系地层孔隙和裂缝发育良好、易漏失,做好随钻堵漏的准备。局部夹杂泥岩,下套管前避免清水洗井,以免造成井壁坍塌。

钻遇地层岩性包括泥岩、砂岩、白云岩等,针对不同岩性特性,优选钻进和取心工艺。

3 钻井质量指标及技术要求

3.1 钻井质量指标

D15井设计井深3000 m,井斜率要求:300 m内不大于1°,2000 m内不大于7°,3000 m内不大于10°。

3.2 取心要求

全井取心进尺 \leq 40 m,岩心直径 \leq 70 mm,一般

表1 D15井钻遇地层简况

Table 1 Brief geology at D15

界	地 层			埋深/m	岩 性	
	系	组	段 代号			
新生界	第四系		Q	430	灰黄、棕黄、灰白粉砂,中砂,粘土以及细砂	
	新近系	明化镇组	Nm	1030	棕黄色、棕色、杂色泥岩,灰绿色、灰黄色砂岩和含砾砂岩	
			一段	Es ¹	1378	浅灰色、灰色泥岩,含少量灰绿色泥岩夹灰色砂岩,页岩
		沙河街组	二段	Es ²	2134	棕红色泥岩,浅灰色、灰绿色砂岩
			三段	Es ³	2307	深灰色、灰色和灰白色泥岩,灰绿色砂岩,含少量石膏
	古近系	沙河街组	四段	Es ⁴	2560	主要由深灰色、灰色泥岩组成,含有白色石膏
		孔店组	Ek	2623	主要为深棕红色泥岩,含少量砾石	
中元古界	蓟县系	雾迷山组	Jxw	2837	灰白色白云岩,灰色泥质白云岩,含有泥质成分	
		杨庄组	Jxy	2898	棕红色泥岩,含有少量砾石	
		高于庄组	Jxg	3111.58	灰白色、灰色白云岩,灰白色泥质白云岩,含少量燧石(未穿)	

地层岩心采取率 $\leq 80\%$,破碎地层岩心采取率 $\leq 50\%$ 。

4 钻探施工

4.1 井身结构

一开采用 $\varnothing 444.5$ mm钻头钻至井深1030.3 m,下 $\varnothing 339.7$ mm套管,下入深度0~1026.11 m。封隔表层松软、易垮塌地层,作为泵室段满足下入水泵、保护地表水及井控装置安装的要求。

二开采用 $\varnothing 311.1$ mm钻头钻至井深2301.68 m,下 $\varnothing 244.5$ mm套管,下入深度972.17~

2301.98 m。

三开采用 $\varnothing 215.9$ mm钻头钻至井深2777.72 m,下 $\varnothing 177.8$ mm套管,下入深度2250.82~2777.72 m。

四开采用 $\varnothing 152.4$ mm钻头钻至井深3111.58 m,下 $\varnothing 127$ mm套管、筛管组合,下入深度2773.55~3111.30 m^[6-11]。

4.2 钻井设备

根据钻遇地层情况、设计孔深等条件,选择ZJ30/1700B型石油钻机,主要配置见表2。

表2 钻机主要配置

Table 2 Main parts of the drilling rig

类别	名称	型号	单位	数量	备注
钻机	绞车	JC30	台	1	三正一倒,主刹车为带刹、辅助刹车为1台FDWS-30型电磁涡流刹车,含司钻操作控制箱1件,采用 $\varnothing 29$ mm钢丝绳
	转盘	ZP-520	台	1	通径520 mm
	井架	JJ41K-200	套	1	额定负荷2000 kN,井架有效高度41 m
	底座	DZ200/5.0	套	1	撬装式底座前台高5.0 m
	天车	TC-200	套	1	天车六轮
	游车大钩	YG-180	套	1	五轮整体
	水龙头	SL-180	套	1	最大静载荷1800 kN,中心管通径75 mm
	泥浆泵1	3NB-1000	台	1	中速泵,变频调速
泥浆泵2	3NB-500	台	1	中速泵,变频调速	
动力	柴油机	PZ12V190PZL	台	1	功率1000 kW
	电动机	Y355L2-4	台	3	单台功率315 kW,4级

4.3 一开钻进

一开采用 $\varnothing 311.1$ mm开钻,使用牙轮、PDC钻头钻至1030.10 m,穿过新近系明化镇组。测井数据表明,300 m内最大井斜为 0.94° ,一开井段最大井斜 1.15° ,平均井径319.9 mm,平均井径扩大率2.84%,最大“狗腿”度 $0.36^\circ/25$ m,符合设计要求。然后采用 $\varnothing 444.5$ mm牙轮钻头扩孔至1030.30 m。

一开钻进主要钻遇上部第四系土层和下部明化镇组砂岩、泥岩,钻进时控制钻压、转速,大泵量喷射钻进。钻进时控制钻进速度,确保一开井眼垂直度。加接单根时泥浆泵充分循环携砂,根据井深和钻速情况不断调整泵量,同时调整钻井液性能,满足护壁、防塌及堵漏要求,保证起下钻具通畅。一开钻进完成后,提钻前充分循环泥浆,保护孔壁。

一开采用聚合物钻井液体系,配方为:清水+

5%膨润土+0.4%HV-CMC+1% NH_4 -HPAN+0.5%KPAM+2%复合沥青+火碱+纯碱,调整泥浆密度在 $1.01\sim 1.15$ g/cm³,漏斗粘度28~42 s,失水量10~15 mL,泥饼厚度 ≤ 0.1 mm。

4.4 二开钻进

二开采用 $\varnothing 311.1$ mm开钻,使用牙轮、PDC钻头钻至2301.68 m二开中完。本开次上部地层为古近系沙河街组泥岩、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,同时控制好粘度和密度。

二开采用硅基防塌钻井液体系,配方为:基浆+0.1%~0.2%大钾+3%硅稳定剂+2%复合沥青+1%液体降粘剂+1%LV-PAC+火碱,调整泥浆密度在 $1.15\sim 1.29$ g/cm³,漏斗粘度41~71 s,失水量4~10 mL,泥饼厚度 ≤ 0.1 mm。

测井数据表明,该井段最大井斜为 2.65° ,平均井径为 323.92 mm ,平均井径扩大率为 4.1% ,最大“狗腿”度 $0.57^\circ/25\text{ m}$,符合设计要求。

4.5 三开钻进

三开采用 $\text{O}215.9\text{ mm}$ 开钻,钻至 2777.72 m 三开中完。本开次钻遇地层复杂,主要为古近系沙河街组泥岩、砂岩,孔店组泥岩、砂岩,蓟县系雾迷山组白云岩。

三开采用硅基钻井液体系,配方与二开相同,调整泥浆密度在 $1.15\sim 1.23\text{ g/cm}^3$,漏斗粘度 $48\sim 82\text{ s}$,失水量 $5\sim 6\text{ mL}$,泥饼厚度 $\leq 0.1\text{ mm}$ 。

测井数据表明,该井段最大井斜 4.75° ,平均井径为 209.13 mm ,平均井径扩大率为 -3.13% ,最大“狗腿”度 $1.55^\circ/25\text{ m}$,符合设计要求。

4.6 四开钻进

四开 $\text{O}152.4\text{ mm}$ 牙轮钻头开钻,钻至 3111.58 m 完钻。本开次钻遇地层主要为蓟县系雾迷山组白云岩,杨庄组泥岩、砂岩,高于庄组白云岩。

四开采用低固相防漏钻井液体系,配方为:原浆+ 20% 清水+ 3% 随钻堵漏剂,调整泥浆密度在 $1.15\sim 1.23\text{ g/cm}^3$,漏斗粘度 $48\sim 82\text{ s}$,失水量 $5\sim 6\text{ mL}$,泥饼厚度 $\leq 0.1\text{ mm}$ 。

测井数据表明,该井段最大井斜为 4.34° ,平均井径为 148.00 mm ,平均井径扩大率为 -2.88% ,最大“狗腿”度 $2.67^\circ/25\text{ m}$,符合设计要求。

4.7 施工进度总结

D15井于2019年6月25日开始井场建设、设备同步进场,2019年7月26日开钻,于2019年12月25日钻至 3111.58 m 完钻,钻井周期 152 d 。2020年5月20日筑好井口,2019年野外工作全部完成,野外工作周期为 330 d 。其中钻前工程 31 d ,钻井时间 131 d ,测井时间 5 d ,下套管(含通井)、候凝 36 d ,抽水试验(含试抽水、抽水前洗井等工作) 27 d ,射孔 2 d ,钻后工程 27 d ,春节及疫情停工 82 d ,时间统计如图2所示。

5 钻探技术成果

5.1 完成钻探任务,保证了施工质量

D15井在钻探施工过程中,完成了一开、二开、三开、四开的钻井、测井、录井、固井、下套管等任务,完钻井深 3111.58 m ,完成率 103.72% 。根据物探测井数据,全孔最大井斜处为 2750 m ,井斜 4.75° ,

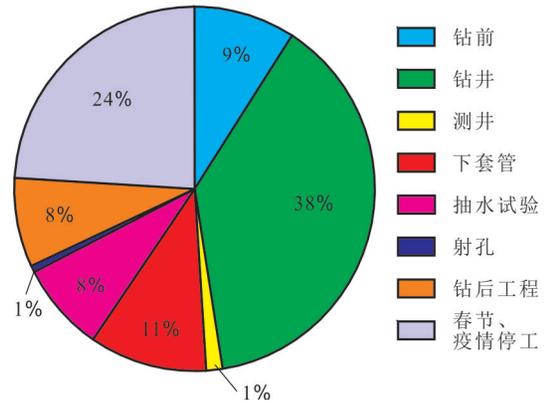


图2 D15井工作时间统计

Fig.2 Working time composition of D15

总方位 200.55° ;井底 3110 m 处,井斜为 2.56° ,总方位 204.08° (见图3),满足设计要求。

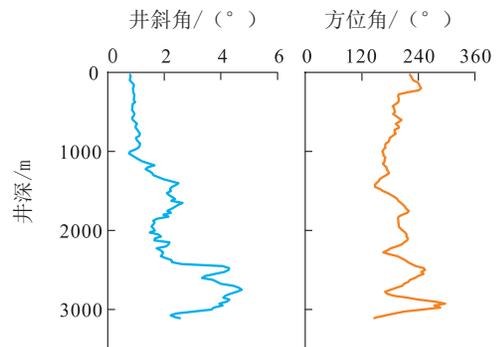


图3 D15井井斜、方位数据曲线

Fig.3 Inclination and azimuth data curve of D15

5.2 提炼水热型地热井钻井液技术

5.2.1 覆盖层防塌钻井液技术

覆盖层包括第四系、明化镇组、沙河街组、孔店组,覆盖层厚 2623 m ,对钻井液技术要求较高。

一开第四系、明化镇组地层,井眼直径大,泥浆排量小(单泵)、上返速度低,加之上部井段泥岩分散造浆严重,在优选聚合物泥浆体系的同时要确保体系中足够的大分子含量,使泥浆有足够的包被抑制能力。尽可能降低有害固相含量,防止钻头泥包。适当控制钻速,打完单根上下大幅度活动钻具划眼,便于携砂,保持井眼清洁。钻完一开进尺,尽量采用大排量循环洗井。

二开沙河街组地层,钻进前在套管内循环泥浆,加入大分子、沥青、PAC-LV、硅稳定剂等材料,改型为硅基防塌钻井液,控制失水,调整pH值、用重晶石提高密度。钻进期间加入润滑剂等控制摩

阻,加入沥青类、大分子、细目碳酸钙等改善泥饼质量,加入乳化沥青提高钻井液防塌、润滑性能。同时加强泥浆流型的调整,加大排量,便于携砂,保证井眼清洁。

三开沙河街组、孔店组地层延续使用硅基防塌钻井液体系。各开次中完提钻前,配制封闭浆,封闭裸眼井段,防止电测和下套管遇阻、遇卡。

5.2.2 热储层防漏钻井液技术

热储层为蓟县系雾迷山组、高于庄组,以白云岩为主,裂隙发育良好,易漏失,采用低固相钻井液体系。

四开钻进前用原浆加水稀释,然后加入随钻堵漏剂,钻进过程中根据消耗情况补充钻井液,并适量补充CMC等降失水材料,改善泥饼质量。

提钻前用磺化沥青、石墨封闭裸眼井段,确保电测和下套管顺利。

5.3 针对不同地层,优选取心工具

D15井全井段根据设计要求及实际钻遇地层情况共计取心11回次,取心进尺49.44 m,岩心长度43.56 m,岩心采取率88.11%。取心情况统计见表3。全井单个回次取心率最高100%,最低66.06%。经过统计,岩心采取率30%~70%有1次,70%以上10次。其中覆盖层的泥岩、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燧石条带、团块发育良好,软硬不均,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,但是易堵心、进尺较慢。

表3 D15井取心情况统计
Table 3 Coring data of D15

序号	取心段/m	进尺/ m	心长/ m	岩心采 取率/%	钻时/ (m·h ⁻¹)	取心钻具	钻 头		岩 性
							直径/mm	类型	
1	1036.42~1038.82	2.40	2.13	88.75	0.21	川7-4	215.9	复合片	泥岩、砂岩
2	1059.66~1064.70	5.13	4.60	89.67	0.27	川8-4	215.9	复合片	泥岩
3	1323.17~1330.78	7.61	7.00	91.98	0.78		215.9	复合片	泥岩、砂岩
4	1787.18~1796.12	8.94	8.00	89.49	0.18		215.9	复合片	泥岩、砂岩
5	2016.82~2020.82	4.00	3.20	80.00	1.58		215.9	复合片	泥岩含少量砂质成分
6	2307.83~2313.05	5.22	5.00	95.78	2.06	Ø216 mm 三合一	215.9	金刚石	泥岩含少量砂质成分
7	2586.81~2592.26	5.45	3.60	66.06	0.85	川6-4	152.0	复合片	泥岩含少量砂质成分
8	2803.67~2806.92	3.25	3.20	98.46	3.85		125.0	金刚石	含砾石泥岩
9	2900.24~2904.74	4.50	3.90	86.67	2.46	Ø125 mm 单动双管	125.0	金刚石	粉晶泥质白云岩
10	3015.09~3016.75	1.66	1.65	99.40	4.52		125.0	金刚石	泥质白云岩
11	3110.30~3111.58	1.28	1.28	100.00	7.23		125.0	金刚石	白云岩

5.4 实施射孔作业,实现热储层分层抽水试验

按照地质设计要求,需要对雾迷山组及高于庄组分别进行抽水试验,同时为保证孔壁的稳定性,采用先套管成井、后射孔进行抽水试验的方法,射开三开套管,为雾迷山组热储层开出流体通道^[13-15]。

5.4.1 射孔层位确定及射孔作业

根据D15井三开测井解释成果图内裂隙发育情况,确定射孔层位,射孔段共计50 m,如表4所示。该段为Ø177.8 mm套管,127型射孔弹具有较强的穿透能力,本次射孔选择常用规格102枪和127型射孔弹进行射孔作业(图4),能够满足作业要求,确定射孔孔数15个/m,相邻弹孔成90°相位。

射孔作业完成后取出射孔枪,进行磁定位测井。射孔枪枪眼完整(见图5),全部射孔器材起爆正常。分析磁定位曲线图,射孔位置与设计位置相符。

5.4.2 抽水试验

5.4.2.1 高于庄组抽水

(1)洗井。针对2700~3100 m井段,钻杆下深3103 m,注入1%焦磷酸钠12 m³,浸泡并进行活塞抽吸约20 h,随后用清水替出焦磷酸钠溶液并对井壁进行冲洗。采用LGVF12.5/70型空压机气举洗井,空压机额定排量为12.5 m³/min。将钻杆下至515.60 m,共计洗井8 h。

(2)高于庄组抽水试验总计历时100.5 h,其中

表4 射孔位置

Table 4 Perforation position

层号	层顶深度/m	层底深度/m	层厚/m	备注
1	2759	2763	4	二类裂隙
2	2755	2759	4	三类裂隙
3	2747	2753	6	三类裂隙
4	2736	2742	6	二类裂隙
5	2721	2727	6	三类裂隙
6	2713	2719	6	三类裂隙
7	2700	2706	6	三类裂隙
8	2689	2693	4	漏失点
9	2666	2670	4	漏失点
10	2643	2647	4	漏失点



图4 组装完成的射孔弹

Fig.4 Assembled perforating bullets



图5 射孔后的射孔枪

Fig.5 Perforating gun after use

抽水时间 76.5 h, 恢复水位时间 24 h。抽水试验分 2 个落程, 持续时间分别为 48、28.5 h。抽水试验获得热水头为 107.98 m, 动水位埋深为 253.50 m, 水位降

深 145.52 m, 涌水量 30.54 m³/h, 单位涌水量 0.210 m³/(h·m), 井口水温 66.5 °C, 试验所得数据见表 5。

表5 高于庄组抽水试验数据表

Table 5 Pumping test data of Gaoyuzhuang Formation

落程	静水位/m	动水位/m	水位降深/m	涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)	单位涌水量/[m ³ ·(h·m) ⁻¹]	水温/°C	稳定时间/h
S ₁	107.98	253.50	145.52	30.54	0.210	66.5	39.5
S ₂	107.98	218.52	110.54	26.20	0.237	65.5	12.5
S ₃	因涌水量较小, 未进行第三次落程抽水试验						

(3) 根据单孔抽水试验所得参数, 参照有关经验值, 渗透系数 $K=0.417$ m/d, 影响半径 $R=916.89$ m, 导水系数 $T=8.1732$ m²/d。

5.4.2.2 雾迷山组、高于庄组混合抽水

(1) 针对射孔段 2600~2800 m 进行空压机洗井, 空压机额定排量为 12.5 m³/min, 额定工作压力为 7 MPa。将钻杆下至 515.44 m, 共计洗井 15.5 h。洗井过程中空压机最大压力 7 MPa, 压降在 1.6~2.8 MPa 间波动, 喷涌时间约 1 min, 喷涌时间间隔由最开始的约 20 min 至最终的约 8 min。洗井前水位为 133.58 m, 停止洗井 8 h 后测水位为 123.80 m。

(2) 雾迷山组、高于庄组混合抽水试验总计历时 104 h, 其中抽水时间 82 h, 恢复水位时间 22 h。抽水试验分 3 个落程, 持续时间分别为 48、24、10 h。抽水试验获得热水头为 108.18 m, 动水位埋深为 254.76 m, 水位降深 146.58 m, 涌水量 34.12 m³/h, 单位涌水量 0.233 m³/(h·m), 井口水温 66 °C, 试验所得数据见表 6。

(3) 根据单孔抽水试验所得参数, 参照有关经验值, 渗透系数 $K=0.284$ m/d, 影响半径 $R=715.09$ m, 导水系数 $T=9.8264$ m²/d。

表6 雾迷山组、高于庄组混合抽水试验数据

Table 6 Mixed pumping test data of Wumishan Formation and Gaoyuzhuang Formation

落程	静水位/m	动水位/m	水位降深/m	涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)	单位涌水量/[m ³ ·(h·m) ⁻¹]	水温/°C	稳定时间/h
S ₁	108.18	254.76	146.58	34.12	0.233	66.0	26.5
S ₂	108.18	216.00	107.82	29.26	0.271	64.0	14.5
S ₃	108.18	156.33	48.15	17.95	0.373	61.5	8.0

6 结语

在雄安新区完成了地热勘探井D15井钻完井施工任务,优化钻探技术为后期地热井勘探开发优选了技术方法,减少工程风险,降低施工成本。获取了岩心、岩屑实物资料,划分了地层厚度、岩性变化特性、孔隙发育情况,基本查明了井区地质结构,为查明容城地热田重点构造位置提供了数据资料。采用射孔技术实现了目的层抽水试验,获取了温度、水量等参数,为雄安新区地热资源调查提供数据支撑。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 胡秋韵,高俊,马峰,等.雄安新区容城凸起区地热可采资源量动态预测[J].地质学报,2020,94(7):2013-2025.
HU Qiuyun, GAO Jun, MA Feng, et al. Dynamic prediction of geothermal recoverable resources in the Rongcheng Uplift Area of the Xiong'an New Area [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):2013-2025.
- [5] 吴爱民,马峰,王贵玲,等.雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J].地球学报,2018,39(5):523-532.
WU Aimin, MA Feng, WANG Guiling, et al. A Study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiong'an New Area [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2018, 39(5):523-532.
- [6] 刘凡柏,高鹏举,任启伟,等.4000 m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 and application of 4000m AC frequency-conversion core drill[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):40-46.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] DZ/T 0260—2014,地热钻探技术规程[S].
DZ/T 0260—2014, Technical specification for geothermal well drilling[S].
- [11] 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 completing technology for Well CGSD-01 in Dongli Lake geothermal drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(4):7-13.
- [12] 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.
- [13] 马忠平,王艳宏,沈健,等.天津馆陶组地热回灌井钻井和射孔工艺探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(8):36-39.
MA Zhongping, WANG Yanhong, SHEN Jian, et al. Discussion on drilling and perforation technology of geothermal recharge well in Guantao Formation of Tianjin [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(8):36-39.
- [14] 柯柏林,赵连海,温泽涛.射孔和酸化压裂技术在地热井洗井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(8):17-19.
KE Bolin, ZHAO Lianhai, WEN Zetao. Application of perforation and acid fracturing technology in geothermal well flushing [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(8):17-19.
- [15] 武环,马秀春.射孔技术在水井成井事故处理中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(3):52-53.
WU Huan, MA Xiuchun. Application of perforation technique in water well completion accidents treatment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005, 32(3):52-53.

(编辑 李艺)