

雄安新区 D03 地热勘探井钻探施工实践

樊腊生¹, 贾小丰², 王贵玲³, 张统得¹, 张平⁴, 吕灿⁴, 李俊萍¹

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734;

2.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北保定 071051;

3.中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北石家庄 050061;

4.河北省地矿局第三水文工程地质大队,河北衡水 053099)

摘要: D03 地热勘探井部署在雄安新区雄县牛驼镇凸起的轴部,设计井深 2500 m,完钻井深 2511.10 m。实施的目的是为探明蓟县系碳酸盐岩热储的地质结构和分布,获取碳酸盐岩热储地热—水文地质参数,计算地热资源潜力。本文主要介绍了 D03 地热勘探井的钻探施工情况,开展了螺杆马达单点定向顶漏侧钻绕障作业,解决了失返性漏失段定向侧钻难题,探索了失返性漏失段水泥固井工艺,获取了标志层杨庄组的岩屑和岩心,区分开了雾迷山组白云岩和高于庄组白云岩,实现了勘探的目的。通过钻探施工、取心、岩屑录井、薄片鉴定等工作,基本查明了 D03 井区的地质结构及主要岩性特征。通过抽水试验,获取了水文地质参数,评价了可开采资源量。

关键词: 雄安新区;清洁能源;地热资源调查;地热勘探井;钻探;抽水试验

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)10-0013-10

Drilling practice of D03 geothermal exploration well in Xiongan New Area

FAN Lasheng¹, JIA Xiaofeng², WANG Guiling³, ZHANG Tongde¹,

ZHANG Ping⁴, LÜ Can⁴, LI Junping¹

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding Hebei 071051, China;

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

4. No.3 Team of Hydrogeology and Engineering Geology,

Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration, Hengshui Hebei 053099, China)

Abstract: D03 geothermal exploration well is deployed at the axis of Niutuo Town Uplift in Xiong County, Xiongan New Area with the design depth of 2500m and the completion depth 2511.10m. The purpose of this project is to find out the geological structure and distribution of carbonate reservoir in the Jixian System, obtain geothermal hydrogeological parameters and calculate geothermal resource potential. This paper mainly introduces the drilling work of D03 geothermal exploration well, where sidetracking was carried out against lost circulation with the PDM single point orientation, the difficulty in sidetracking in the lost circulation section was resolved, and the application research for cementation in the lost circulation section was explored, the cuttings and cores from Yangzhuang Formation were obtained with the dolomite of Wumishan Formation distinguished from Gaoyuzhuang Formation, achieving the exploration purpose. Through drilling work, coring, cuttings logging and thin section identification, the geological structure and main lithologic characteristics at D03 were basically identified. Through pumping test, hydrogeological parameters are obtained and exploitable resources were evaluated.

Key words: Xiongan New Area; clean geothermal energy; geothermal resources survey; geothermal exploration well; drilling; pumping test

收稿日期:2020-03-15; 修回日期:2020-07-24 DOI:10.12143/j.tkge.2020.10.003

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(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号:DD20189626)、“滇东北地区页岩气地质调查(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号:DD20201167)

作者简介:樊腊生,男,汉族,1964年生,教授级高级工程师,探矿工程专业,从事深部钻探技术工作,四川省成都市郫都区成都现代工业港(北区)港华路139号,gysflscd@163.com。

引用格式: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.

1 项目概况

雄安新区地热清洁能源调查评价项目是中国地质调查局2018年新开二级项目,工作周期2018—2020年,由中国地质科学院水文地质环境地质研究所(简称水环所)承担。该项目的目标是构建绿色透明雄安,打造全球地热利用样板;查明雄安新区浅层地温能赋存条件和容城、高阳、牛驼镇地热田地热地质条件,评价雄安新区各地热田地热资源可持续开发潜力,圈定地下热水开发利用靶区,提出雄安新区浅层地温能开采利用适宜性区划,建立2~4处地热资源高效利用示范基地,编制深部地热资源开发利用与保护区划,为缓解京津冀大气污染及科学规划开发雄安新区地热资源提供技术保障^[1-2]。

根据二级项目工作部署,2018年中国地质调查局水文地质环境地质调查中心(简称水环中心)在雄安新区牛驼镇地热田布置了D01、D02和D03三口地热勘探井,D01和D02地热勘探井由水环中心承担,分别位于雄县雄州镇坛台村南、雄县大营镇文家营村南。

D03地热勘探井(简称D03井)的钻探(含定深取心)、录井、抽水试验、成井等工作由中国地质科学院探矿工艺研究所(简称工艺所)承担,物探测井工作由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所(简称物化探所)承担,设计井深2500 m。

D03井的勘探目标为探明蓟县系碳酸盐岩热储的地质结构和分布;获取碳酸盐岩热储地热—水文地质参数,计算地热资源潜力。D03井部署在牛驼镇凸起轴部的张码村—徐码村之间的条带区域,位于雄安新区雄县北沙口乡小庄村南(S333省道旁)。

2 钻探施工

2.1 井身结构设计

根据地热资源调查的探采结合原则,依据钻井深度、泵室段和完井的井径、地层层序、热储层等情况,设计的D03井井身结构为: $\Phi 444.5\text{ mm} \times 400\text{ m} / \Phi 339.7\text{ mm}$ 表层套管 $\times 400\text{ m} + \Phi 311.1\text{ mm} \times 900\text{ m} / \Phi 244.5\text{ mm}$ 技术尾管 $\times (350 \sim 900\text{ m}) + \Phi 215.9\text{ mm} \times 2050\text{ m} / \Phi 177.8\text{ mm}$ 技术尾管 $\times (850 \sim 2050\text{ m}) + \Phi 152.4\text{ mm} \times 2500\text{ m} /$ 滤水管或裸眼完井^[3-5]。

2.2 钻探设备选择

根据井身结构、地层条件、负荷情况、环保要求

等,D03地热勘探井采用了电动机驱动的ZJ30M型石油钻机等,主要钻探设备见表1。D03井2018年8月4日开钻,2019年4月29日以井深2511.10 m完钻,历时269 d,施工进展情况如图1所示,完钻口径152.4 mm。下滤水管、洗井、抽水试验、测温后,于2019年5月26日完井。

表1 主要钻探设备

Table 1 Main drilling equipment

序号	名称	型号	数量	备注
1	石油钻机	ZJ30M	1部	135 t
2	基座	2.4米	1部	
3	井架	31米K型	1部	135 t
4	泥浆泵	N3NB-1000型	1台	
5	泥浆泵	QZ3NB-350型	1台	
6	固控系统	KAMS50型	1套	102 m ³
7	智能箱式变电站	ZBWO-Y12型	1台	1250 kVA
8	柴油发电机组	GF-400型	1台	400 kW

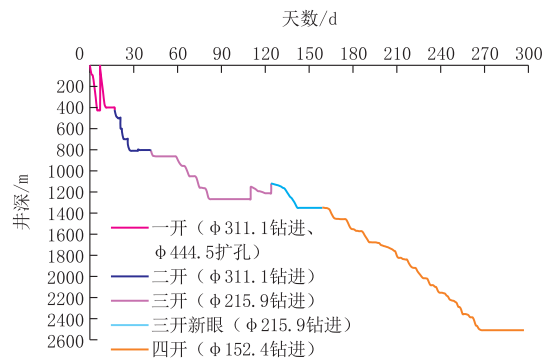


图1 D03地热勘探井钻探施工进度曲线

Fig.1 Drilling progress curve of D03 geothermal exploration well

2.3 地层及难点分析

2.3.1 地层情况

根据邻井资料和地球物理勘查,预测的D03井钻遇地层情况见表2。

2.3.2 难点分析

(1)第四系粘土、砂质粘土和明化镇组上段胶结不完全的砂泥岩厚度较大,易垮塌,需下套管封固。明化镇组可能存在漏失,特别是明化镇组底部的风化壳,漏失后会造造成裸眼段的垮塌。为安全施工,钻穿第四系后需下表层套管封隔,钻穿明化镇组后需下技术尾管封隔。

(2)明化镇组地层结构松散、全面钻进口径大,雾迷山组和高于庄组的白云岩地层裂隙发育、地层性硬质脆,定深取心钻进时岩心采取率难以保证,需强化取心钻进工艺。

表 2 D03 地热勘探井钻遇地层简况
Table 2 Strata encountered in D03 geothermal exploration well

界	系	组	代号	预 测		实 钻		岩 性 简 述
				埋深/m	厚度/m	埋深/m	厚度/m	
新 生 界	新 近 系	第四系	Q	400	400	406.00	406.00	主要为灰、灰黄、棕黄、棕红色亚粘土,亚砂土,粘土与灰黄、灰绿色细砂、粉细砂等不等厚互层,结构松散
		明化镇组	Nm	900	500	796.00	390.00	上部为棕黄、棕红、绿、深灰色泥岩、砂质泥岩与杂色粗砂岩、含砾粗砂岩互层,主要粗砂岩成分为石英和长石。下部为棕红、绿色泥岩、砂质泥岩互层,泥岩颜色不均匀,且胶结程度较好,由软变硬。底部含少量白色粘土,见少量硅质白云岩碎屑
中 — 新 元 古 界	蓟 县 系	雾迷山组	Jxw	2000	1100	1702.93	906.93	深灰、灰黑硅质白云岩,晶亮含钙白云岩与灰—土黄色泥质白云岩,含燧石条带
		杨庄组	Jxy	2050	50	1768.00	65.07	褐红色含泥质泥粉晶白云岩,含青灰色—灰白色泥质白云岩团块
		高于庄组	Jxg	2500	450	2511.10	743.10	灰白色含硅质白云岩,青灰色含泥质白云岩,与深灰—灰黑色白云岩交互沉积出现,局部含黄铁矿晶体,硅质成分大多以条纹状、透镜状、微小褶皱状出现。未穿

(3)雾迷山组和高于庄组的白云岩可钻性差,易漏失,需优选钻进工艺。

(4)除表层套管外,其他套管须采用尾管结构,上部环空大,需加强岩屑携带。

2.4 钻探技术

2.4.1 一开钻进(0~424.90 m)

一开钻进于 2018 年 8 月 4 日开始,按照工程设计,结合实际情况并兼顾测井工作需要,采用 $\Phi 311.1$ mm 牙轮钻头全面钻进至 424.90 m,配合完成此井段的测井工作。测井表明,该段施工最大井斜角 0.7° ,平均井径为 314.47 mm,超径系数为 1.01,满足要求。

测井施工结束后采用 $\Phi 444.5$ mm 带导向扩孔钻头扩孔至井深 400.00 m;下入 $\Phi 339.7$ mm \times 9.65 mm 石油套管(J55)并固井,42.5 普通硅酸盐水泥浆返至地面,套管下深为 400.00 m。

一开钻进采用膨润土聚合物钻井液^[6],漏斗粘度 30~60 s,密度 1.10~1.20 g/cm³,失水量 8~10 mL/30 min,pH 值 9。一开井段渗漏钻井液 111 m³。

2.4.2 二开钻进(424.90~809.09 m)

二开钻进于 2018 年 8 月 21 日开始,主要采用 $\Phi 311.1$ mm 牙轮钻头全面钻进(其中取心钻进 18.14 m),至井深 796.00 m 钻具别钻、跳钻,偶见灰白色、白色硅质白云岩碎屑,换 $\Phi 152.4$ mm 牙轮钻头探雾迷山组风化壳,当钻进至 809.09 m 时钻井液突然失返,提钻后采用粘土球堵漏,但效果不明显,且在通井过程中发生井眼坍塌现象,为了避免井

内情况进一步恶化,与二级项目技术人员沟通后决定下入 $\Phi 244.5$ mm 二开技术尾管封隔明化镇组。 $\Phi 244.5$ mm 钻头通井至 802.33 m,配合完成此井段的测井工作;测井表明,该段施工最大井斜角 1.7° ,平均井径为 346.15 mm,超径系数为 1.11,满足要求。

测井结束后 $\Phi 311.1$ mm 钻头通井,下入 $\Phi 244.5$ mm \times 8.94 mm 技术尾管(J55 石油套管)至井深 802.33 m,尾管串长度 456.54 m,与上层 $\Phi 339.7$ mm 表层套管重叠 54.21 m,采用“穿鞋戴帽”法固井(G 级油井水泥)。

二开钻进采用膨润土聚合物泥浆体系,漏斗粘度 30~40 s,密度 1.10~1.20 g/cm³。

2.4.3 三开钻进(809.09~1350.00 m)

三开钻进于 2018 年 9 月 15 日开始,采用 $\Phi 215.9$ mm 规格钻头施工,钻进至 809.09 m 钻井液失返,在井深 809.27~809.40 m、818.74~819.04 m 钻具放空,顶漏钻进至 862.09 m,井眼垮塌严重、掉块频繁,井内沉渣达 46.00 m,难以维持钻进。连续 8 天注水泥浆堵漏 8 次(共 15.1 m³),钻水泥塞至井深 814.77 m 钻井液再次失返,添加随钻堵漏剂堵漏无效^[4]。清水顶漏钻进至 1268.03 m 发生埋钻事故,反复处理无效后倒开井内钻具,井内残留钻具 42.59 m(4 根 $\Phi 165.1$ mm 钻铤及取心钻具,“鱼”顶 1223.54 m)。套铣井内“落鱼”时,至井深 1189.73 m 时别钻、卡钻严重,由于套铣筒外径($\Phi 206$ mm)与三开井径($\Phi 215.9$ mm)之间的

环隙很小,且井内一直掉块同时因冲洗液不上返井内岩粉沉淀比较多,经综合分析发生事故概率较大,为避免套铣筒被卡死再次发生井下事故,遂决定提出套铣钻具,先综合测井,再进行抽水试验,然后采用侧钻的方法绕开事故段^[7],恢复正常钻进。

配合完成三开上部综合测井。测井结果显示,该段井底井斜角 4.0° ,平均井径为258.57 mm,超径系数为1.19。测井结果也表明进入雾迷山组后地层极其破碎,导致井眼超径,同时井斜角有上升趋势。

雾迷山组上段抽水试验结束后,打水泥塞(3 t普通硅酸盐水泥)进行第一次单点定向顶漏侧钻绕障作业(井深1154.13~1212.09 m),未能成功。再次打水泥塞(5 t普通硅酸盐水泥),从井深1119.47 m开始单点定向降井斜顶漏侧钻作业,至1144.60 m侧钻出新井眼,井深1140.00 m处井斜角 2.9° 、方位角 149° (老眼原井深的井斜角 3.9° 、方位角 152°)。采用无磁钻铤、偏心钻铤的钻具组合顶漏钻进分别至1165.57、1350.00 m。

三开顶漏钻进以来,井内垮塌、沉渣多、井况复杂,施工时间长,同时无法捞取岩屑,并且注入了大量的清水。为满足地质要求、降低施工风险、加快施工进度,项目组经反复商讨、慎重考虑,提出井身结构及施工变更申请,并经专家论证、评审,同意井身结构变更方案。三开以井深1350.00 m完钻,三开完钻口径215.9 mm。

配合完成三开下部综合测井。测井结果显示,该段最大井斜角 4.8° 、井底井斜角约 4.0° ,下部平均井径为224.46 mm,超径系数为1.04。

测井结束后通井,下入 $\varnothing 177.8\text{ mm}\times 8.05\text{ mm}$ 技术尾管(J55石油套管)至井深1350.00 m,尾管串长度602.41 m,与上层 $\varnothing 244.5\text{ mm}$ 技术尾管重叠54.74 m,采用“穿鞋戴帽”法固井(G级油井水泥)。

因风化壳失返性漏失,三开钻进采用2口农用机耕井的清水进行顶漏钻进,注入清水约 62646 m^3 。

2.4.4 四开钻进(1350.00~2511.10 m)

四开钻进于2019年1月11日开始,主要采用 $\varnothing 152.4\text{ mm}$ 牙轮钻头全面钻进(其中点取心钻进64.20 m),部分井段采用了螺杆马达复合钻进。至井深1459.10 m,所取岩心硅质含量较上部地层明显提高,类似高于庄组四段的特征,同时担心杨庄组地层较薄甚至被上层尾管封闭或缺失,遂暂定地层为高于庄组四段,随后按设计要求进行了雾迷山组

下段的抽水试验。

钻进至井深1700 m左右,钻时明显变慢,且振动筛返出褐红色泥质白云岩和浅肉红色白云质泥岩岩屑。钻进至井深1714.81 m,岩屑总体仍为褐红色且泥质成分含量高,遂调整取心位置,及时进行取心钻进(1714.81~1724.14 m),取心钻进2个回次,共进尺9.33 m、岩心长8.24 m。岩性为褐红色含泥质泥晶白云岩,含青灰色—灰白色泥质白云岩团块(见图2)。



图2 杨庄组岩心(井深1714.81~1719.38 m)

Fig.2 Cores from Yangzhuang Formation (from 1714.81 to 1719.38m)

该段岩性较为特殊,且特征明显,看法不一致(雄安新区容城地热田的D16、D11地热勘探井的杨庄组岩心与本井的此段岩心有差异,天津东丽湖地热井雾迷山组中曾出现此类岩心),遂决定取样送化验室鉴定,以确定岩性并辅助专家判定地层。通过岩屑、岩心、取样分析,经专家鉴定,2019年3月25日确认井段1702.93~1768.00 m为杨庄组。

钻进至井深1891.65 m,井段1888.65~1891.65 m漏失,停泵,测水位,6 min水位由3.97 m下降至32 m,漏失量约 $24\text{ m}^3/\text{h}$ 。添加蛭石、粘土粉,随钻循环堵漏,水位逐渐恢复正常。

继续钻进至井深2160.66 m,为配合水环中心D02地热勘探井(雄县大营镇文家营村)的地层对比研究需要,增加了一次中途测井,主要采集伽马、井斜、方位角、压力、温度等参数。测井表明:GR曲线在1702.00~1770.00 m高值异常;最大井斜角 8.2° (井底),在井深1980.00、2070.00 m处井斜角明显增大。

针对井斜增大的情况,采取低钻压(30 kN)钻进,上部井段主要采用40 kN钻压钻进。

于2019年4月29日钻进至2511.10 m完钻。配合完成此井段的测井工作。测井表明,该段施工最大井斜角 8.5° 、井底井斜角 7.7° ,平均井径为187.83 mm,超径系数为1.23。

四开钻进采用膨润土聚合物泥浆体系,漏斗粘度 17 ~ 38 s,密度 1.05 ~ 1.10 g/cm³。井深 1891.65 m 发生漏失,通过添加粘土粉提高粘度。

2.4.5 完井

四开完钻后,进行了井温测量(物化探所、水环所),并补充和完善了完井方案(为满足后期的监测需要,采用滤水管完井),对高于庄组的测井解释结果进行了专家咨询。

2019 年 5 月 16 日开始完井工作,套管通径、丈量、编号,检查套管变丝接头、倒扣接头、吊卡等,割缝、焊接套管引鞋。根据测井解释安排 $\Phi 114.3$ mm 滤水管(19 根计 204.87 m)的位置,排下套管顺序号。在场地按下管顺序号排管,安装 2 组胶伞止水(分别对应杨庄组的井深 1768.00、1763.00 m)和 1 组胶带止水(对应上层 $\Phi 177.8$ mm 尾管重叠段井深 1328.02 m)。

下钻冲孔、换浆、洗井后,依次下了 $\Phi 114.3$ mm \times 6.35 mm 套管 1032.70 m(含 204.87 m 滤水管)、 $\Phi 127.0$ mm \times 9.19 mm 套管 163.40 m 和 $\Phi 139.7$ mm \times 7.72 mm 套管 15.40 m,用 $\Phi 89$ mm 钻杆送至井底 2511.10 m,倒扣提出钻杆,与上层 $\Phi 177.8$ mm 尾管重叠 50.40 m。

2019 年 5 月 20 日开始抽水试验,至 5 月 26 日 7:30 结束 3 个落程的抽水试验。

5 月 26—28 日甩钻具、工艺所超高温测斜仪项目组测斜测温试验、物化探所测井温。清理井口,安

装井口装置。设备搬迁及井场恢复。

2.5 钻探技术经济效益

在 D03 井钻探施工中,经历了钻前工程、设备安装等;一开(第四系)全面钻进、配合测井、扩孔钻进、下表层套管并固井等;二开(明化镇组)全面钻进、取心钻进、配合测井、下技术尾管并固井等;三开(雾迷山组上段)全面钻进、取心钻进、中途测井、抽水试验、水泥回填、侧钻绕障、全面钻进、配合测井、下技术尾管并固井等;四开(雾迷山组中下段、杨庄组、高于庄组)全面钻进、取心钻进、抽水试验(怀疑进入高于庄组四段)、钻进、中途测井(确定杨庄组的参数,供 D02 地热勘探井对比研究)、继续钻进、配合测井、换浆下滤水管+套管止水、试抽水、空气洗井、抽水试验、安装井口装置等^[8-10]。D03 地热勘探井钻探施工效果统计见表 3,完钻井斜角 7.7°、方位角 156°(见图 3),最大井斜角 8.5°;井底温度 85.6 °C,地温梯度分为 2 个明显的趋势段(3.54 °C/100 m、0.95 °C/100 m),位于明化镇组底界处(见图 3)。

按照设计要求,完成了取心钻进 100.24 m,岩心采取率为 59.0%。开展了钻时、钻井液、工程参数、岩屑、岩心等录井工作(见图 4)。配合完成 4 次综合测井、2 次阶段性测井、2 次测井温工作。完成了一开下表层套管及固井,二开、三开下技术尾管及固井等工作,四开下滤水管+套管止水成井等工作(见图 5)。进行了蓟县系雾迷山组上段、下段上部和高于庄组的抽水试验。

表 3 D03 地热勘探井钻探施工技术效果统计

Table 3 Summary of drilling results of D03 geothermal exploration well

开次	钻进方法	井段/m	进尺/m	回次数	纯钻时间/h	机械钻速/(h·m ⁻¹)	回次长度/m	备注
一开	$\Phi 311.1$ mm 全面钻进	0~424.90	424.90	2	51.88	8.19	212.45	
	$\Phi 444.5$ mm 扩孔钻进	0~400.00	400.00	1	64.72	6.18	400.00	
二开	$\Phi 311.1$ mm 全面钻进	424.90~796.15	353.11	4	58.17	6.07	88.28	
	$\Phi 152.4$ mm 全面钻进	796.15~809.09	12.94	1	2.42	5.35	12.94	
	$\Phi 311.1$ mm 扩孔钻进	495.00~802.33	24.32	4	5.05	4.82	6.08	
	点取心钻进	495.00~699.31	18.14	5	14.88	1.22	3.63	岩心采取率 75.5%
三开	$\Phi 215.9$ mm 全面钻进	809.09~1265.78 1119.47~1350.00	671.57	10	592.53	1.13	67.16	侧钻绕障
	$\Phi 215.9$ mm 扩孔钻进	802.33~809.09	6.76	1	0.58	11.59	6.75	
	点取心钻进	859.41~1268.03	17.90	7	84.08	0.21	2.56	岩心采取率 31.8%
四开	$\Phi 152.4$ mm 全面钻进	1350.00~2506.00	1096.90	26	1058.80	1.04	42.19	
	点取心钻进	1353.76~2511.10	64.20	21	220.13	0.29	3.06	岩心采取率 61.9%
全井	全面钻进	0~2506.00	2559.42	43	1763.80	1.45	59.52	含侧钻重复进尺
	扩孔钻进	0~809.09	431.08	6	70.35	6.13	71.85	
	点取心钻进	495.00~2511.10	100.24	33	319.09	0.31	3.04	岩心采取率 59.0%

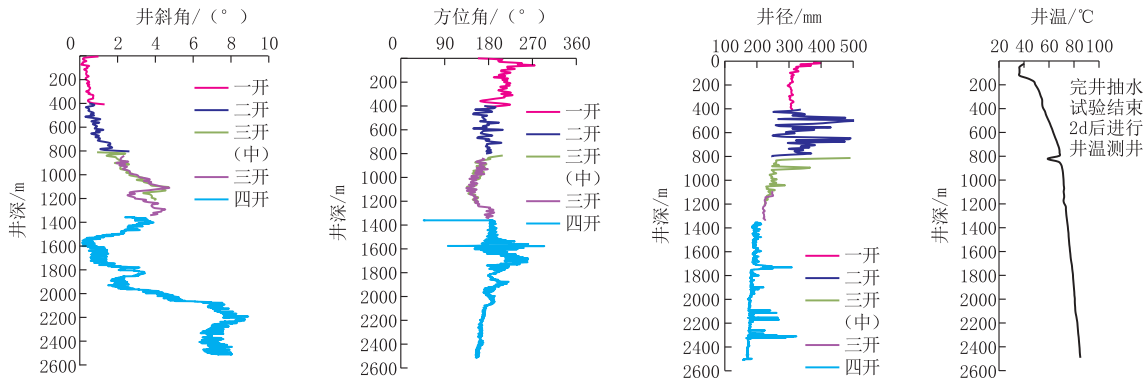


图3 D03 地热勘探井的井斜、井径、井温测井数据曲线

Fig.3 Well deviation, diameter and temperature logging curves of D03 geothermal exploration well

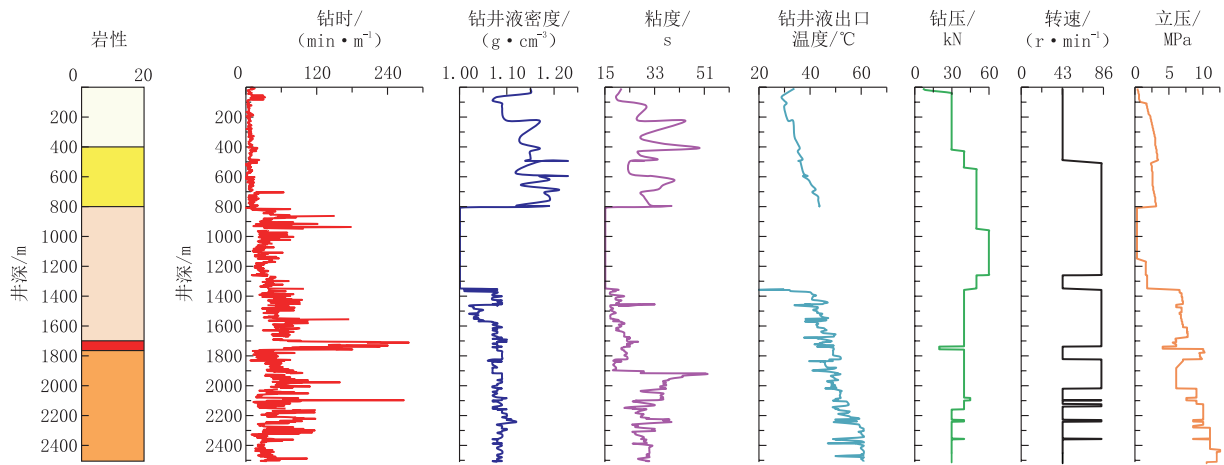


图4 D03 地热勘探井录井成果

Fig.4 Logging results of D03 geothermal exploration well

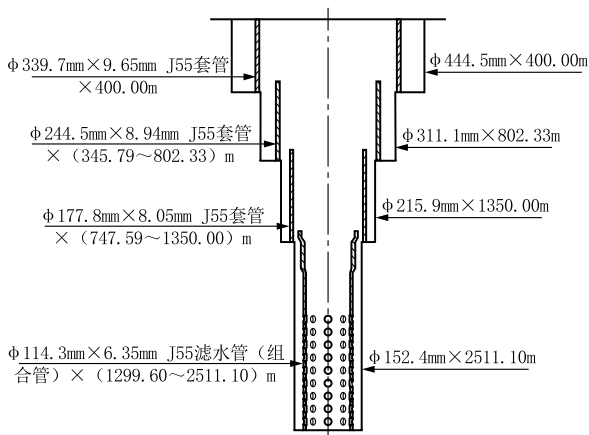


图5 D03 地热勘探井完井的井身结构

Fig.5 Completion structure of D03 geothermal exploration well

2.6 存在问题及建议

(1) 钻探施工工期达 269 d。雾迷山组风化壳钻进施工, 因失返性漏失治理花费了较多时间, 同时不能获取岩屑, 并在施工中发生恶性井内事故, 有待进

一步总结和提高应对技术措施。

(2) 雾迷山组风化壳失返性漏失, 三开 809.09~1268.03 m 井段清水顶漏钻进 353.37 h, 注入清水约 24379 m³ (三开井段顶漏钻进, 总注入清水约 62646 m³), 对地层温度的恢复影响较大。四开 1888.65~1891.65 m 漏失层, 采用添加蛭石、粘土粉随钻循环堵漏获得成功, 但对抽水试验有影响, 需用空气压缩机空气洗井。

(3) 三开失返性漏失地层 φ177.8 mm 技术尾管戴帽注水泥固井 4 次, 才获得成功, 需综合考虑“戴帽”注水泥固井工艺, 在重叠段的管串上安装水泥伞, 必要时考虑采用短回接固井方式, 利用管外封隔器和分级箍实现失返性漏失地层尾管“戴帽”注水泥固井。

(4) 雾迷山组取心钻进 41.05 m, 平均岩心采取率 38.1%, 平均机械钻速 0.23 m/h, 平均回次长度 2.41 m; 高于庄组取心钻进 31.72 m, 平均岩心采取

率 67.9%，平均机械钻速 0.29 m/h，平均回次长度 3.52 m。破碎地层大口径取心钻进效率和岩心采取率不高，有待进一步研究和完善^[11]。

(5) $\varnothing 244.5$ mm 技术尾管的尾管头与 $\varnothing 339.7$ mm 表层套管的台阶较大，测井探头下放到此处有阻挡现象，需采用带“喇叭”口的尾管头或测井探头底部带半球形的引导^[12]。

(6) 地热井抽水试验中产生的热水较多，排放问题有待多方面综合施策。

3 抽水试验

3.1 雾迷山组上段(802.33~1268.03 m)抽水试验

试验段深度 802.33~1268.03 m，有效裂隙储层段累计厚度 117.15 m/20 层。

(1) 试抽水。2018 年 11 月 2 日 19:30 开始试抽水(250QJR80-160 型井用潜水泵)，至 3 日 8:50 水温 46℃，至 4 日 15:00 水温上升至 53℃，至 5 日 16:00 水温上升至 56℃，试抽水 70 h 约 3500 m³ 地热水。继续试抽水，至 9 日 8:00 水温 57℃，至 10 日 10:30 水温上升至 62℃，试抽水 42 h 约 3360 m³

地热水。11 日 4:00 开始采用大流量潜水泵(250QJR160-220 型)试抽，至 12 日 8:00 水温上升至 65℃，温度上涨缓慢，遂决定开始正式抽水试验，试抽水 28.5 h 约 4000 m³ 地热水。三次共试抽水 140.5 h 约 10860 m³ 地热水。

(2) 抽水试验。2018 年 11 月 12 日 9:00 开始进行第一落程抽水试验，动水位 137.00 m，静水位热水头 111.92 m，降深 25.08 m 时涌水量 154.10 m³/h，单位涌水量 6.144 m³/h·m，温度 66.5℃；因排水场地有限，第一落程抽水试验共进行 24 h，其中抽水时间 12 h，稳定时间 11 h，恢复水位时间 12 h。2018 年 11 月 13 日 9:00 开始进行第二落程抽水试验，动水位 128.00 m，水量 125.18 m³/h，温度 68℃；第二落程抽水共进行 47.5 h，其中抽水时间 24.5 h，稳定时间 13.5 h，恢复水位时间 23 h(见图 6、表 4)。因排水场地问题，未能进行第三落程抽水试验。

(3) 水文地质参数。根据抽水试验结果，结合室内资料整理，由裘布依公式和影响半径的经验公式联立计算渗透系数和影响半径^[13]，计算结果见表 4。

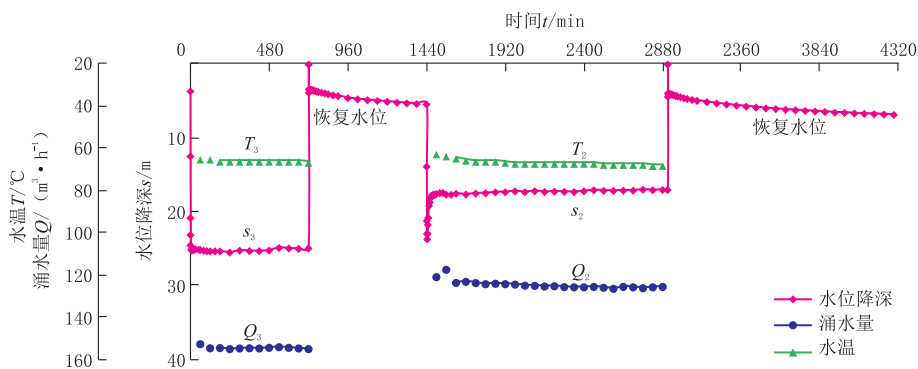


图 6 雾迷山组上段抽水试验 s 、 Q 、 $T-t$ 历时曲线(观测时间:2018 年 11 月 12 日 9:00—15 日 8:30)

Fig.6 s 、 Q 、 $T-t$ duration curves of pumping test for the upper section of Wumishan Formation

表 4 雾迷山组上段(802.33~1268.03 m)抽水试验数据

Table 4 Pumping test data of the upper section of Wumishan Formation(802.33~1268.03m)

落程	静水位/ m	动水位/ m	降深/ m	涌水量/ (m ³ ·h ⁻¹)	单位涌水量/ (m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻¹)	井口水温/ ℃	稳定时间/ h	渗透系数/ (m·d ⁻¹)	影响半径/ m
s_3	111.92	137.00	25.08	154.10	6.144	66.5	11	1.57	314.49
s_2	111.92	128.00	16.08	125.18	7.785	68.0	13.5	1.93	223.28

3.2 雾迷山组下段上部(1350.00~1459.10 m)抽水试验

D03 井四开自井深 1350.00 m 钻进至 1459.10 m，所取岩心(井深 1454.28~1459.10 m)类似高于庄组四段的特征，按设计要求进行雾迷山组下段

(1350.00~1459.10 m)的抽水试验。下钻冲孔后，用清水替换井内泥浆，安装 250QJR80-160 型井用潜水泵，潜水泵下深 167.45 m。2019 年 1 月 25 日 19:50 试抽水，7 min 抽空，结束第二次抽水试验。经试验确定雾迷山组下段的上部热储层出水量极

小,不具备抽水试验条件。

3.3 高于庄组(1768.00~2511.10 m)抽水试验

高于庄组试验段深度 1768.00~2511.10 m,有效裂隙储层段累计厚度 157.90 m/22 层。

(1) 试抽水、洗井。2019 年 5 月 20 日,下 250QJR90-220 型井用潜水泵至井深 161.43 m,试抽水,抽空;试抽水前静水位 71.42 m,抽水后水位 141.67 m。

下 $\varnothing 89$ mm 光钻杆至 383.74 m,封井口,用螺杆活塞串联式空气压缩机(EX-90A 型螺杆式空气压缩机+L6VF-12.5/7.0 型空气压缩机)吹风洗井 50 min,效果不好。继续下钻至井深 579.60 m,吹风洗井 11 h 40 min,效果显著,水位 130.40 m^[14]。

5 月 22 日下 250QJR80-160 型井用潜水泵至井深 174.77 m,试抽水洗井 8 h 55 min 约 400 m³地热水。

(2) 抽水试验。2019 年 5 月 23 日 9:30 开始进

行第一落程抽水试验,动水位 158.60 m,静水位热水头 121.92 m,降深 36.68 m 时涌水量 44.10 m³/h,单位涌水量 1.202 m³/h·m,温度 80 °C;因排水场地有限,第一落程抽水试验共进行 33 h,其中抽水时间 27 h,稳定时间 12 h,恢复水位时间 6 h。2019 年 5 月 24 日 18:30 开始进行第二落程抽水试验,动水位 146.82 m,水量 36.10 m³/h,温度 79 °C;第二落程抽水试验共进行 13 h,稳定时间 8 h。2019 年 5 月 25 日 7:30 开始进行第三落程抽水试验,动水位 134.73 m,水量 22.40 m³/h,温度 77 °C;第三落程抽水试验共进行 24 h,其中抽水时间 11 h,稳定时间 9 h,恢复水位时间 13 h(见图 7、表 5)。

(3) 水文地质参数。根据抽水试验结果,结合室内资料整理,由裘布依公式和影响半径的经验公式联立计算渗透系数和影响半径^[13],计算的结果见表 5。

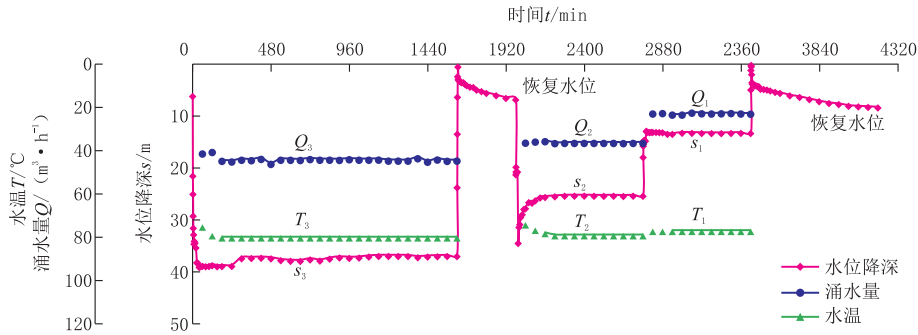


图 7 高于庄组抽水试验 s 、 Q 、 $T-t$ 历时曲线(观测时间:2019 年 5 月 23 日 9:30—26 日 7:30)

Fig.7 s 、 Q 、 $T-t$ duration curves of pumping test for the upper section of Gaoyuzhuang Formation

表 5 高于庄组(1768.00~2511.10 m)抽水试验数据

Table 5 Pumping test data of Gaoyuzhuang Formation(1768.00~2511.10m)

落程	静水位/ m	动水位/ m	降深/ m	涌水量/ (m ³ ·h ⁻¹)	单位涌水量/ (m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻¹)	井口水温/ °C	稳定时间/ h	渗透系数/ (m·d ⁻¹)	影响半径/ m
s_3	121.92	158.60	36.68	44.10	1.202	80.0	12	0.233	177.25
s_2	121.92	146.82	24.90	36.10	1.450	79.0	8	0.262	127.82
s_1	121.92	134.73	12.81	22.40	1.749	77.0	9	0.264	66.28

4 取得的地质成果

4.1 基本查明了该井区的地质情况

通过钻探取心、岩屑录井、薄片鉴定等工作,基本查明了该井区的地质结构及主要岩性特征(见表 2)。第四系地层底界埋深 406.00 m,沉积厚度 406.00 m;新近系明化镇组地层底界埋深 796.00

m,沉积厚度 390.00 m;蓟县系雾迷山组地层底界埋深 1702.93 m,沉积层厚 906.93 m;蓟县系杨庄组地层底界埋深 1768.00 m,沉积层厚 65.07 m;蓟县系高于庄组地层埋深 2511.10 m(完钻井深),沉积层厚 743.10 m(未穿)。

4.2 基本查明了该井区的热储特征

蓟县系雾迷山组裂隙岩溶热储岩性主要为白云

岩、泥质白云岩,上部风化程度较高,裂隙岩溶较发育。测井解释雾迷山组裂隙储层总厚度 168.70 m,占地层厚度的 18.60%(裂隙率),按厚度加权平均孔隙度为 5.46%,按厚度加权平均渗透率为 $4.38 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。雾迷山组抽水试验段(802.33~1268.03 m)井口水温 68 °C,静水位 111.92 m,降深 25.08 m,涌水量 154.10 m³/h,单位涌水量 6.144 m³/h·m。

蓟县系高于庄组裂隙岩溶热储岩性主要为白云岩、泥质白云岩、含燧石条带白云岩,裂隙岩溶局部较发育。测井解释高于庄组(未穿)裂隙储层总厚度 196.20 m,占地层厚度的 26.40%(裂隙率),按厚度加权平均孔隙度为 4.05%,按厚度加权平均渗透率为 $2.36 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。高于庄组抽水试验段(1768.00~2511.10 m)井口水温 80 °C,静水位 121.92 m,降深 36.68 m,涌水量 44.10 m³/h,单位涌水量 1.202 m³/h·m。

4.3 查明了基岩热储层的水化学特征

D03 井抽水试验最后一个落程取水样,委托核工业北京地质研究院分析测试研究中心水筒分析,主要结果见表 6。地热流体中主要阳离子为钠离子,主要阴离子为氯离子和碳酸氢根,水化学类型为 Cl·HCO₃—Na 型。

表 6 热储层水化学特征

Table 6 Hydro-chemical characteristics of the thermal reservoirs

水化学特征	热储层	
	雾迷山组上段	高于庄组
Na ⁺ /(mg·L ⁻¹)	619	888
Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	829	1244
HCO ₃ ⁻ /(mg·L ⁻¹)	470	447
F ⁻ /(mg·L ⁻¹)	7.4	1.3
H ₂ SiO ₃ /(mg·L ⁻¹)	57.7	61.3
pH 值	7.32	7.45
溶解性总固体/(mg·L ⁻¹)	1015	2470
总硬度/(mg·L ⁻¹)	215	207

4.4 评价了可开采资源量

经过稳定流抽水试验工作,依据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)通过计算^[15],蓟县系雾迷山组上段地热流体可采热能 10000.381 kW,年开采累积可利用的热能为 1.728066×10^8 MJ,折合标准煤 0.5896×10^4 t。高于庄组地热流体可采热能 3477.347 kW,年开采累积可利用的热能为 6.00886×10^7 MJ,折合标准煤 0.2050×10^4 t。

蓟县系雾迷山组上段地热水用于地板供暖,供

暖面积约 188597 m²,高于庄组地热水用于地板供暖,供暖面积约 68533 m²。

5 结语

(1)通过钻探施工、取心、岩屑录井、薄片鉴定等工作,基本查明了 D03 井区的地质结构及主要岩性特征。

(2)蓟县系雾迷山组裂隙岩溶热储岩性主要为白云岩、泥质白云岩,上部风化程度较高,裂隙岩溶较发育;蓟县系高于庄组裂隙岩溶热储岩性主要为白云岩、泥质白云岩、含燧石条带白云岩,裂隙岩溶局部较发育。通过抽水试验和水样分析,获取了雾迷山组上段、高于庄组(未穿)的地热—水文地质参数,基本查明了 D03 井区的热储特征、地温场特征、水化学特征,评价了该井的地热资源。

(3)开展了螺杆马达单点定向顶漏侧钻绕障和失返性漏失段水泥固井技术的应用性研究,获取了标志层杨庄组的岩屑和岩心,对雾迷山组白云岩和高于庄组白云岩进行了区分。

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] 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 Xiongan New Area[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2018, 39(5):523—532.
- [3] DZ/T 0260—2014, 地热钻探技术规程[S]. DZ/T 0260—2014, Technical specification for geothermal well drilling[S].
- [4] 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 Niutuozen geothermal field in Hebei[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(8):27—30.
- [5] 于孝民,杨春光,董国明,等.唐山市第一眼蓟县系地热井钻探及成井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(2):41—44. YU Xiaomin, YANG Chunguang, DONG Guoming, et al. Drilling and completion technology in the first geothermal well Construction in Jixian System in Tangshan[J]. Exploration

- Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(2): 41-44.
- [6] 李砚智, 张长茂. GYx 地热井钻井液技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(1): 61-66.
LI Yanzhi, ZHANG Changmao. Drilling fluid technology for geothermal Well GYx[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(1): 61-66.
- [7] 樊腊生, 张伟, 吴金生, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFS D-4 孔定向钻进技术应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 101-108.
FAN Lasheng, ZHANG Wei, WU Jinsheng, et al. Application of directional drilling technology in WFS D-4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 101-108.
- [8] 樊腊生, 贾军, 吴金生, 等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFS D-1)钻探施工概况[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(12): 5-8.
FAN Lasheng, JIA Jun, WU Jinsheng, et al. Overview on drilling operation of the WFS D-1 in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(12): 5-8.
- [9] 樊腊生, 王达, 科钻一井钻探施工技术路线和钻探施工概述[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(7): 72-76.
FAN Lasheng, WANG Da. Summary of drilling techniques applied in China's first deep scientific drilling well CCSD-1 and drilling operation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(7): 72-76.
- [10] 刘文武, 刘家荣, 郭坤, 等. 雄安新区 D14 地热井钻探施工技术研究[J]. 西部探矿工程, 2019, 31(8): 102-106.
LIU Wenwu, LIU Jiarong, GUO Kun, et al. Study on drilling technology of D14 geothermal well in Xiongan New Area [J]. West-China Exploration Engineering, 2019, 31(8): 102-106.
- [11] 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.
- [12] 樊腊生, 张伟, 李前贵, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目尾管固井技术的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 32-38.
FAN Lasheng, ZHANG Wei, LI Qiangui, et al. Application of liner cementation technology in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(9): 32-38.
- [13] GB 50027-2001, 供水水文地质勘察规范[S].
GB 50027-2001, Standard for hydrogeological investigation of water-supply[S].
- [14] 陈浩文, 宋志彬, 和国磊, 等. 多工艺联合洗井和抽水试验在 CGSD-01 井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(6): 8-13.
CHEN Haowen, SONG Zhibin, HE Guolei, et al. Application of multi-process combined well flushing and pumping test in Well CGSD-01[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(6): 8-13.
- [15] GB/T 11615-2010, 地热资源地质勘查规范[S].
GB/T 11615-2010, Geologic exploration standard of geothermal resources[S].

(编辑 王建华)