

# 雄安新区 D19 地热勘探井钻探技术及成果

王勇军<sup>1,2</sup>, 聂德久<sup>\*1,2</sup>, 张涛<sup>1,2</sup>, 冯守涛<sup>1,2</sup>, 邱佳强<sup>3</sup>, 王磊<sup>3</sup>, 佟铮<sup>1,2</sup>

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东德州 253072;

2. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心, 山东德州 253072;

3. 山东省德水新能源有限公司, 山东德州 253072)

**摘要:** D19 井是雄安新区地热清洁能源调查评价项目中的一个勘探井。钻探施工过程中, 对多种钻进工艺、钻具钻头、钻井液等关键技术进行研究应用, 提高了深部地热钻探施工效率, 解决了 D19 井中复杂地层钻进困难的难题, 实现了对目标热储层的保护, 顺利地完成了钻探施工任务, 通过测录井及抽水试验等手段查明了地质构造及热储特征。文章对 D19 井钻探关键工艺技术及成果进行了总结, 可以为类似钻探项目提供技术支撑, 有利于推动深部地热钻探的发展。

**关键词:** 地热钻探; 复杂地层; 气举反循环钻进; 测录井; 抽水试验; 雄安新区

**中图分类号:** P634; TE242 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0299-06

## Drilling technology and achievements of D19 geothermal exploration well in Xiong'an New Area

WANG Yongjun<sup>1,2</sup>, NIE Dejiu<sup>\*1,2</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, FENG Shoutao<sup>1,2</sup>,

DI Jiaqiang<sup>3</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, TONG Zheng<sup>1,2</sup>

(1. *The Second Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou Shandong 253072, China;*

2. *Shandong Engineering Technology Research Center for Geothermal Clean Energy Exploration and Reinjection, Dezhou Shandong 253072, China;*

3. *Shandong Deshui New Energy Co., Ltd., Dezhou Shandong 253072, China)*

**Abstract:** D19 is an exploration well in the geothermal clean energy survey and evaluation project in Xiong'an New Area. During drilling process, research and application of the various research and application on key technologies such as drilling process, drilling bit and drilling fluids are carried out, by which the drilling efficiency of deep geothermal is improved, the difficult problem of the complex strata drilling in the deep geothermal drilling of well D19 is solved, the target thermal reservoirs is protected, the drilling construction task is successfully completed, and the geological structure and heat storage characteristics are identified by well logging and pumping tests. In this paper, the key drilling technology and achievements of well D19 are summerized which can provides technical support for similar drilling projects and promote the development of deep geothermal drilling.

**Key words:** geothermal drilling; complex strata; air lift reverse circulation drilling; well logging; pumping test; Xiong'an New Area

收稿日期: 2023-01-31; 修回日期: 2023-05-06 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.046

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“天津东丽区—河北牛驼镇地热资源调查与试验”(编号: DD20190127); 山东省地矿局地质勘查和科技创新项目“大口径深部钻探钻完井技术研究”(编号: KY201946); 山东省地矿局地质勘查引领示范与科技攻关项目“高温地热超深孔勘查取心钻探关键技术研究与应用”(编号: KY202219)

第一作者: 王勇军, 男, 汉族, 1984 年生, 高级工程师, 勘查技术与工程专业, 从事深部资源钻探技术研究工作, 山东省德州市大学东路 1499 号, wyjed511@sina.com。

通信作者: 聂德久, 男, 汉族, 1983 年生, 高级工程师, 土木工程专业, 现主要从事水工环地质和地热资源勘查研究工作, 山东省德州市大学东路 1499 号, 21483126@qq.com。

引用格式: 王勇军, 聂德久, 张涛, 等. 雄安新区 D19 地热勘探井钻探技术及成果[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 299-304.

WANG Yongjun, NIE Dejiu, ZHANG Tao, et al. Drilling technology and achievements of D19 geothermal exploration well in Xiong'an New Area[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 299-304.

## 0 引言

雄安新区建设中高度重视对生态环境的保护,大力推进清洁能源的开发利用,在此背景下地热资源的勘探及开发利用显得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。为服务雄安新区建设规划,中国地质调查局组织实施了雄安新区深部地热资源勘查工作,旨在查明区域地层结构、地热地质特征,为雄安新区深部地热资源精细化评价及高效勘探开发提供科学支撑<sup>[3-5]</sup>。

D19井是中国地质调查局地质调查二级项目“雄安地热清洁能源调查评价”中的一个勘探井,项目由中国地质科学院水文地质环境地质研究所负责实施,钻探工作任务由山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院)承担。该井揭露了雾迷山组和高于庄组两个热储层,通过地热地质钻探、测录井及抽水试验等手段,初步查明该区地层岩性、结构构造、地温垂向变化、热储富水性、渗透性等特征,评价了允许开采量。

## 1 工程概况

D19井设计钻探深度4000 m、完钻深度4021.78 m,位于雄安新区起步区南部,紧靠安新县城,井场北临安新县旅游西路、西邻国道G230,交通便利。

### 1.1 钻探设备

D19井采用ZJ50LDB型钻机,为满足雄安新区对工程建设环保的要求、达到绿色勘探标准,对钻机进行了电动化改装,采用两台功率为800 kW电动机代替原配三机中的两台190型柴油机,为钻机绞车和泥浆泵提供动力,主要设备见表1。

表1 主要钻探设备

序号	设备名称	型号	功率/kW
1	钻机	ZJ50/3150LDB	
2	井架	JJ315/45-K	
3	转盘	ZP375	
4	绞车	JC50	
5	泥浆泵	F-1300	
6	动力机	1号 电动机	800
		2号 电动机	800
		转盘 电动机	400
7	固控系统	ZJGK-50	220
8	井控装置	2FZ35-21	144

### 1.2 地质概况

雄安新区在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,主体构造线以北东向为主,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<sup>[6-7]</sup>。D19井在地质构造上处于容城凸起南部斜坡带,位于容城地热田容城断裂东南、徐水断裂北部,钻遇地层情况见表2。

### 1.3 井身结构

D19井为四开井:

一开采用 $\varnothing 444.5$  mm钻头钻进至700.00 m,下入 $\varnothing 339.7$  mm石油套管并全段固井;

二开采用 $\varnothing 311.2$  mm钻头钻进至2926.00 m,并进行定深取心,揭露雾迷山组白云岩,下入 $\varnothing 244.5$  mm石油套管并全段固井;

三开采用 $\varnothing 215.9$  mm钻头钻进至3767.00 m,

表2 D19井钻遇地层

界	地层		实际分层		岩性特征
	系	组	底深/m	厚度/m	
新生界	第四系	平原组	433.90	433.90	土黄、灰黄、浅灰色粉土、粉质粘土、粘土,灰黄、灰白色细砂、粉细砂
	新近系	明化镇组	1270.00	836.10	灰褐、灰绿色泥质粉砂岩,灰白、灰绿色泥岩
		东营组	1665.00	395.00	主要为灰白、灰绿色细砂岩,灰、灰绿色泥质粉砂岩互层;红褐、棕褐色泥岩,灰、灰绿色泥质粉砂岩,灰白、浅灰色细砂岩互层
	古近系	沙河街组	2920.00	1255.00	灰白、灰绿色含砾细砂岩,浅灰、灰白色细砂岩,灰黑、灰褐色泥岩,杂色砾岩互层
元古界		雾迷山组	3760.00	840.00	灰、灰白色白云岩,深灰、灰黑色燧石白云岩
	蓟县系	杨庄组	3770.00	10.00	灰绿色泥岩、灰白色泥质白云岩
	长城系	高于庄组	4021.78(未揭穿)	251.78	灰、灰白色白云岩,深灰、灰黑色燧石白云岩

并进行定深取心,揭穿雾迷山组白云岩,下入 $\varnothing 177.8$  mm石油套管,并设置封隔器、“穿鞋”固井;

四开采用 $\varnothing 152.4$  mm钻头钻进至4021.78 m,并进行定深取心,揭露高于庄组热储层,裸眼完井。

井身结构如图1所示。

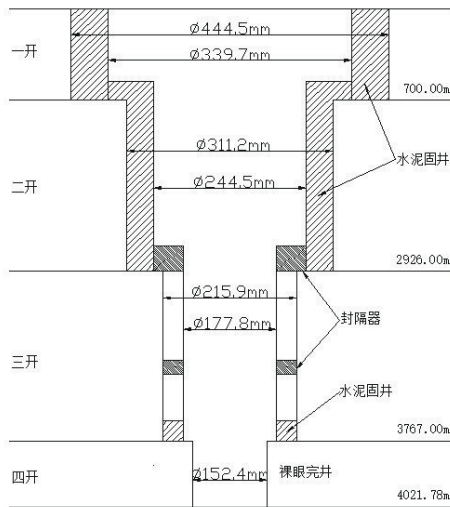


图1 D19井井身结构

## 2 钻探施工难点

(1)沙河街组泥岩中常含有较多研磨性强的砾石,采用钢齿牙轮钻头和常规PDC钻头寿命低、磨损严重易出现钻头事故,采用镶齿牙轮钻头则效率低,同时泥岩中常夹有结构致密、硬度较高的硬塑性泥岩,在硬塑性泥岩地层中钻进效率极低,严重影响钻探施工效率,如何提高此类地层钻进效率是钻探施工中的一大难题。

(2)古近系东营组及沙河街组中有大段含石膏泥页岩地层,在此类地层钻进时,一方面地层中的石膏吸收钻井液中的水分膨胀,致使井壁泥页岩膨胀剥落;另一方面石膏侵使钻井液性能恶化,降低钻井液的护壁能力;两者形成恶性循环,致使该类地层钻进时护壁困难,井下复杂情况时有发生。

(3)为保护热储层,在热储层钻进需使用清水或无固相钻井液,而清水或无固相钻井液护壁、携带岩屑能力差<sup>[8-9]</sup>,钻遇破碎热储层时,常出现井壁掉块崩塌、岩屑携带困难、孔底沉渣多等复杂情况。在漏失较严重的情况下,情况愈加严重,严重影响钻探施工连续性、甚至无法钻进,无固相钻井液的补给极大地增加钻进成本。同时,漏失的钻井液和岩屑进

入热储层亦会对热储层造成一定的影响,不利于热储层保护。

## 3 关键钻探技术

### 3.1 多种钻进工艺的合理应用

D19井钻探施工过程中,根据不同井段地层特征、井径及深度等因素,结合以往类似项目施工经验教训,在不同开次、不同地层采用了不同的钻进工艺方法。其中,上部平原组及明化镇地层胶结较差、结构松散,采用大泵量、高泵压喷射钻进工艺以取得较高的钻进效率,喷射钻进完成进尺1251 m;中下部东营组及沙河街组地层胶结较好,主要采用螺杆钻具复合钻进工艺以提高钻效,螺杆钻具复合钻进完成进尺1854 m,底部雾迷山组及高于庄组热储层漏失严重、破碎地层岩屑携带困难,同时为保护热储层,主要采用气举反循环钻进工艺,气举反循环钻进完成进尺781 m,各井段钻进工艺及参数见表3。

对比该地区类似钻探项目,喷射钻进较常规转盘回转钻进机械钻效提高超过200%、螺杆钻具复合钻进较常规转盘回转钻进机械钻效提高超过90%、气举反循环钻进较常规转盘回转钻进机械钻效提高超过25%。D19井通过多种钻进工艺的合理应用,提高了钻探施工效率,有效地保障了钻探施工安全和质量,顺利地完成了项目钻探施工任务。

### 3.2 含砾泥岩夹硬塑性泥岩地层钻头技术

在沙河街中,泥岩中常含有较多研磨性强的砾石,采用钢齿牙轮钻头和常规PDC钻头则磨损严重,采用镶齿牙轮钻头则钻效很低,在钻遇硬塑性泥岩时钻效更低、机械钻效仅有0.3~0.4 m/h。通过对硬塑性泥岩地层碎岩机理的深入研究,设计出两种针对地层岩性特征的个性化PDC钻头(见图2),配合使用螺杆钻具复合钻进,在硬塑性泥岩地层的机械钻效大幅度提高、达到了0.7~0.8 m/h;同时通过对PDC钻头结构的优化设计、异形抗冲击复合片的优选应用,以及对复合片金刚石复合层进行脱钻处理等技术措施<sup>[10-13]</sup>,有效地提高了PDC钻头应对含砾地层的能力,设计的钻头回次进尺寿命达到了250 m,钻头使用寿命满足了钻进需求。D19井使用研究设计的PDC钻头累计钻进912 m,顺利穿过沙河街组难钻进地层,取得了良好的效益。

### 3.3 膏泥岩地层钻井液技术

在东营组及沙河街组中,钻遇了大段含石膏泥

表3 D19井钻进工艺方法及参数

开次	地层	钻进工艺方法	钻进参数						平均机械钻效/(m·h <sup>-1</sup> )	
			钻压/kN	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	泵量/(L·s <sup>-1</sup> )	泵压/MPa	风量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	风压/MPa		上返流量/(L·s <sup>-1</sup> )
一开	平原组	喷射钻进	20~40	69	64.6	14~20			22.72	
	明化镇组上段									
二开	明化镇组下段	螺杆钻具复合钻进	60~120	40+169	41.5,32.3	12~18			1.92	
	东营组									
	沙河街组									
三开	雾迷山组顶部	气举反循环钻进	60~80	69			10	3~5	6	1.60
	雾迷山组									
四开	高于庄组									



图2 异形片PDC钻头

页岩地层,通过对含石膏泥页岩地层井壁失稳机理的深入分析。制定了如下技术措施:一、控制钻井液中自由水,尽量降低钻井液失水、减轻石膏吸水膨胀及对地层的水化作用;二、调节钻井液密度、平衡石膏吸水增加的地层压力,使钻井液—地层系统压力平衡;三、调节钻井液PH值,为钻井液处理剂发挥作用提供良好的环境<sup>[14-15]</sup>。考虑现场条件及钻井液成本等因素,以抗盐抗钙稀释剂、降失水剂、防塌护壁剂、火碱等处理剂为主调节钻井液性能。钻井液处理剂具体配方为:木质素磺酸盐2%+水解聚丙烯晴钠盐1%+磺化沥青2%+KHm 0.8%+火碱0.2%+成膜防塌剂0.3%,并添加适量的重晶石粉调节钻井液密度。调整后钻井液性能明显改善(见表4),井下复杂情况得到解决,有效地维持了钻进过程中井壁稳定,成功的穿过了累计厚度超过300m的含石膏泥页岩地层。

表4 调节前后钻井液性能

项目	黏度/s	滤失量/[ml·(30min) <sup>-1</sup> ]	泥饼厚/度/mm	PH值	密度/(g·ml <sup>-1</sup> )
调节前	72~98	8~15	2~3	6~7	1.15~1.20
调节后	42~55	3~6	0.6~1	8~10	1.22~1.35

### 3.4 热储层气举反循环钻进技术

在三开、四开井段,采用了气举反循环钻进工艺,有效地解决了热储层漏失无法建立循环、破碎地层井壁崩塌、岩屑携带困难等问题;同时,钻进过程中热储层地热水进入井筒参与循环,防止了钻井液、岩屑进入热储层裂隙中,有效地保护了热储层。

#### 3.4.1 设备配备

根据双壁钻杆下入深度与钻孔深度比值、空压机风量等要求,综合考虑钻探深度、井径等因素,D19井气举反循环钻进配备的主要设备见表5。

表5 气举反循环配备主要设备

名称	规格	数量	备注
空压机	15 m <sup>3</sup> /min、10 MPa	1台	变频控制
双壁钻杆	Ø127/89 mm	800 m	S135钢级
常规钻杆	Ø114 mm	3500 m	S135钢级
	Ø89 mm	3500 m	S135钢级
双壁主动钻杆	Ø133/89 mm	1根	长12.5 m
气盒子		1套	

#### 3.4.2 钻具组合

考虑破碎热储层钻进时,孔内沉渣较多,容易造成钻柱内腔堵塞,在钻头与钻铤之间设置了防堵工

具<sup>[16]</sup>;同时考虑钻孔垂直度方面的要求,采用了单扶钟摆防斜钻具组合;并配备足够的钻铤以实现吊打防止孔斜。D19井气举反循环钻进钻具组合为:Ø215.9 mm 牙轮钻头+防堵工具+27 m Ø165 mm 钻铤+Ø214 mm 螺旋扶正器+81 m Ø165 mm 钻铤+Ø114 常规钻杆+Ø127 双壁钻杆。

### 3.4.3 钻进工艺参数

根据气举反循环钻进中双壁钻杆下深、沉没比

表6 气举反循环钻进工艺参数

双壁钻杆下深/m	沉没比	风量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	风压/MPa	返水量/(L·s <sup>-1</sup> )	钻压/kN	转速/(r·min <sup>-1</sup> )
460~560	0.63~0.69	10	3~5	6	60~80	69

$$V_{\min} = 5.72[d_1(r_f - r_1)/r_1]^{1/2}/10 \quad (1)$$

式中: $d_1$ ——岩屑颗粒直径,cm; $r_f$ ——岩屑密度,g/cm<sup>3</sup>; $r_1$ ——钻井液密度,g/cm<sup>3</sup>。

实际钻进过程中,在地层较为完整时,返水(渣)连续平稳(见图3),孔底无沉渣;在地层较为破碎时,返水(渣)存在间断现象,但间断时间较短,基本满足钻进过程中循环携带岩屑要求,同时孔底的沉渣亦能通过扫孔循环消除,满足了气举反循环正常钻进要求。

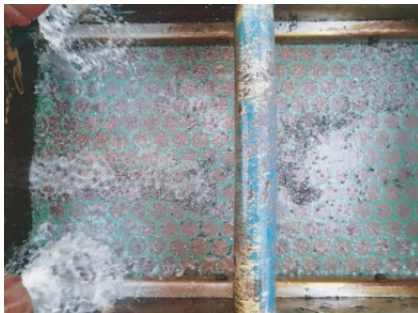


图3 气举反循环钻进正常返水(渣)情况

## 4 钻探成果

### 4.1 测录井成果

(1)取心:D19井共取心14次,其中明化镇组1次、东营组2次、沙河街组4次、雾迷山组6次、高于庄组1次,累计取心进尺40.36 m、获取岩心32.84 m,平均岩心采取率达到了81.36%。

(2)岩屑录井:D19井共捞取岩屑录1144件,所有岩屑自然风干,并填写岩屑标签、装岩屑袋封存,岩屑袋按照顺序摆放在岩屑样盒内,同时制作岩屑沙盘,逐一描述并保存于岩心库中。

及供气量一般要求,考虑实际钻进中刻取岩屑颗粒粒径,运用循环携带不同直径岩屑所需的最小流速(式1)计算出携带粒径为10 mm的岩屑所需最小流速为0.75 m/s,换算为返水量为5.4 L/s<sup>[16]</sup>,参考常规转盘回转钻进时的钻压、转速,实际钻进过程中,气举反循环钻进工艺参数见表6。

(3)测井:D19井共进行了4次物探测井工作,测井项目包括:井温、井径、井斜、电阻率、自然电位、自然伽玛、声波时差等。

D19井通过岩屑录井、取心及测井,查明了各地层埋深及发育厚度,查明了该区域雾迷山组及高于庄组热储构造,在雾迷山组及高于庄组中发现较厚破碎热储层18段。

### 4.2 抽水试验成果

D19井对雾迷山组上段、雾迷山组全段及高于庄组热储层分别进行了抽水试验,通过抽水试验知晓了热储层的水头压力、温度、富水性等特征,为单井可采资源评价提供了科学依据。根据抽水试验获取的数据,采用承压水稳定流非完整井水文地质参数计算公式<sup>[17]</sup>计算出各参数,各组抽水试验获得数据绘制的Q-S关系曲线见图4、q-s关系曲线见图5、T-Q曲线见图6。

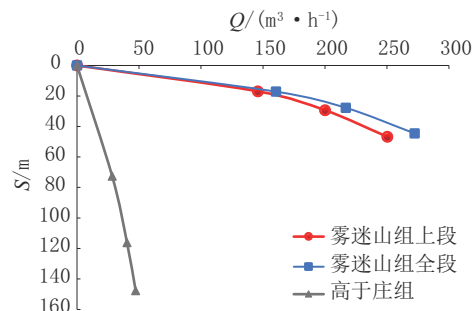


图4 D19井抽水试验Q-S关系曲线

通过抽水试验曲线可以看出:雾迷山组上段涌水量大、降深小,反映出雾迷山组上段热储层裂隙发育程度较高,富水性较好,同时因出水量较大,地热

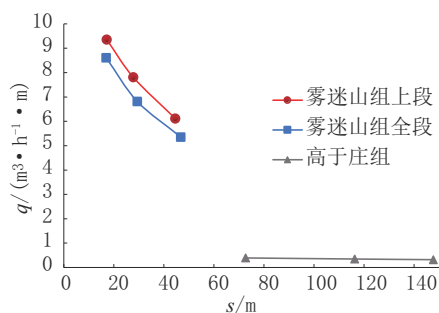


图5 D19井抽水试验  $q-s$  关系曲线

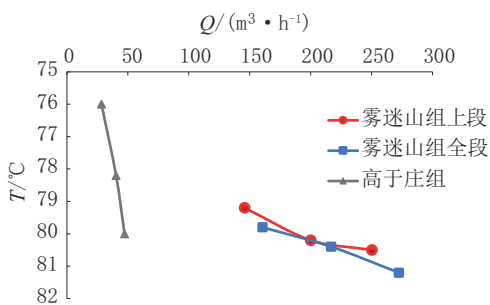


图6 D19井抽水试验温度流量曲线

水在井筒中向上运移的速度快、温度损失较少,出水温度较高,地热资源丰富;而雾迷山组全段抽水实验数据相较雾迷山组上段变化较小,反应出雾迷山组下段热储发育程度较低、雾迷山组地热资源主要赋存在雾迷山组上段;高于庄组涌水量较小、降深较大,反映出高于庄组热储层富水性较差,同时因涌水量较小,地热水在井筒中向上运移的速度慢、温度损失较大,出水温度相对降低,高于庄组地热资源赋存情况一般。

## 5 结论

(1)D19井通过多工艺的合理应用,有效地提高了上部覆盖层钻进效率,有效地保护了热储层、解决了破碎热储层护壁堵漏的难题。

(2)针对沙河街组泥岩中含较多研磨性强的砾石、夹硬塑性泥岩的难题,通过研究设计个性化PDC钻头,配合螺杆钻具复合钻进,提高了硬塑性地层机械钻效、解决了含较多研磨性强砾石地层钻头磨损严重的问题,有效地提高了该类地层钻进效率。

(3)针对含石膏泥页岩地层研究的钻井液技术,

有效地解决了石膏侵使钻井液性能恶化、含石膏泥页岩地层井壁失稳等井下复杂情况,保障了钻探施工的顺利进行。

(4)通过测录井、抽水试验等手段,查明了区域地层埋深及发育厚度,查明了热储发育、水温水压及富水性等特征,取得了丰硕的成果,为地热资源的精细化评价和开发利用提供了科学支撑。

## 参考文献:

- [1] 庞忠和,孔彦龙,庞菊梅,等.雄安新区地热资源与开发利用研究[J].中国科学院院刊,2017,32(11):1224-1230.
- [2] 戴明刚,汪新伟,刘金侠,等.雄安新区起步区及周边地热资源特征与影响因素[J].地质科学,2019,54(1):176-191.
- [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.
- [4] 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.
- [5] 郭飒飒,朱传庆,邱楠生,等.雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测[J].地质学报,2020,94(7):2026-2035.
- [6] 王贵玲,李郡,吴爱民,等.河北容城凸起区热储层新近系——高于庄组热储特征研究[J].地球学报,2018,39(5):533-541.
- [7] 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.
- [8] 赵长亮,王勇军,陈师逊.大同地区高温超深地热孔钻探难点分析与施工方案设计[J].地质装备,2022,23(4):32-39.
- [9] 王勇军,代娜,郑宇轩.干热岩钻探关键技术探索[J].山东国土资源,2019,35(2):64-67.
- [10] 杨迎新,杨燕,陈欣伟,等.PDC钻头复合钻进碎岩机理及个性化设计探讨[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):565-575.
- [11] 李琴,傅文韬,黄志强,等.硬地层中新型PDC齿破岩机理及试验研究[J].工程设计学报,2019,26(6):635-644.
- [12] 谢晗,况雨春,秦超.非平面PDC切削齿破岩有限元仿真及试验[J].石油钻探技术,2019,47(5):69-73.
- [13] 刘建华,令文学,王恒.非平面三棱形PDC齿破岩机理研究与现场试验[J].石油钻探技术,2021,49(5):46-50.
- [14] 王勇军,赵长亮,郑宇轩,等.牛热四井膏泥岩钻井液技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,42(6):33-37.
- [15] 王勇军,赵长亮,张明德,等.垦利东兴地区深层卤水普查井钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(6):28-31.
- [16] 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研究[J].钻探工程,2022,49(4):127-143.
- [17] 李红梅,王雷浩,殷逸.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.

(编辑 王文)