

# 雄安新区D05井燧石白云岩地层钻头应用探索

王勇军<sup>1,2</sup>, 梁伟<sup>\*1,2</sup>, 杜志强<sup>3</sup>, 王磊<sup>3</sup>, 张涛<sup>1,2</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:** D05井是雄安新区一眼地热勘探井, 完钻井深4014.42 m, 揭露了雾迷山组和高于庄组两个热储层。在高于庄组石英含量较高的燧石白云岩地层钻进中, 出现了钻头严重磨损、钻头使用寿命短的状况。为解决钻探施工中的难题, 进行了钻头应用探索, 通过分析研究、实践应用优化, 探索出了一种适用于石英含量较高的燧石白云岩地层 $\varnothing$ 215.9 mm井径使用的牙轮钻头, 平衡了钻头磨损和钻进效率方面的难题。使用该型号钻头顺利地完成了D05井三开 $\varnothing$ 215.9 mm孔径钻探施工任务。通过本次钻头应用探索, 为类似地层钻头应用提供了参考方案, 丰富了深部地热钻探工艺技术, 为深部地热钻探的发展提供了技术支撑。

**关键词:** 燧石白云岩; 钻头磨损; 使用寿命; 硬质合金齿; 地热井

**中图分类号:** P634.4<sup>+</sup>1; TE921 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)04-0142-07

## Exploration of drill bit applied in chert dolomite strata in Well D05 of Xiong'an New Area

WANG Yongjun<sup>1,2</sup>, LIANG Wei<sup>\*1,2</sup>, DU Zhiqiang<sup>3</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2</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:** Well D05 is a geothermal exploration well in Xiong'an New Area with the total depth of 4014.42 m, and two thermal reservoirs were revealed named Wumishan Formation and Gaoyuzhuang Formation. The situation of serious wear and short service life of bit appeared when drilling in the quartz-rich chert dolomite strata in Gaoyuzhuang Formation. Therefore, the exploration of drill bit was made through the analytical study and practice optimization. As a result, a kind of cone bit suitable for  $\varnothing$ 215.9mm well diameter in quartz-rich chert dolomite strata was explored, and the problem of bit wear and drilling efficiency were balanced. The drilling task of  $\varnothing$ 215.9mm well diameter in the third spud of Well D05 was completed smoothly by the use of this bit. The successful application provides a reference scheme for bit usage in similar strata, enriches the deep geothermal drilling technology and provides technical support for the development of deep geothermal drilling.

**收稿日期:** 2023-01-03; **修回日期:** 2023-03-27 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2023.04.019

**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:** 梁伟, 男, 汉族, 1972年生, 高级工程师, 勘查技术与工程专业, 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, 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.

**Key words:** chert dolomite strata; drill bit wear; service life; carbide drilling bit; geothermal well

## 0 引言

地热是一种清洁可再生能源,在国家加强环境保护、努力实现双碳目标的背景下,地热资源的开发利用愈加受到重视,地热资源的勘探与开发利用力度越来越大<sup>[1-2]</sup>,且逐步向深部发展。随着钻探深度的增加,地层可钻性越来越差,钻探施工难度越来越大,对钻头的要求也越来越高。雄安新区建设是“千年大计、国家大事”,迫切需加强清洁能源的开发利用,为服务雄安新区绿色低碳建设发展,相关部门及科研单位组织实施了雄安新区及周边深部地热资源调查评价项目<sup>[3]</sup>。旨在探明深部碳酸盐岩热储的分布、物性特征、温压条件、产能特征和地温场变化特征,揭示热储发育程度及开发潜力,为雄安新区深部地热资源精细评价以及高效开发利用提供科学支撑<sup>[4]</sup>。本文以雄安新区深部地热勘探D05井工程实例为基础,针对钻探施工中在石英含量较高的燧石白云岩地层中钻头磨损严重、使用寿命短、且常出现钻头事故的难题,开展钻头应用探索,解决了钻探施工中所遇到的难题,有效地保障了钻探项目的顺利实施。总结此次钻头应用经验教训,可以为类似项目钻头应用提供参考方案,有利于推动深部地热钻探的发展。

## 1 工程概况

D05井是中国地质调查局水文地质环境地质调查中心实施的国家地勘基金项目“天津东丽区—河北牛驼镇地热资源调查与试验”所属的一眼地热勘探井,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)负责该项目的钻探工作任务。D05勘探井位于雄安新区雄县朱各庄镇西柳村,设计孔深4000 m,实际完钻孔深4014.42 m。项目于2019年7月开始实施,受年度工作任务、疫情及井下复杂情况等因素影响,于2021年3月终孔,2021年4月完成所有钻探工作任务。

### 1.1 钻探设备

D05井采用ZJ40型石油钻机进行施工,主要设备见表1。

### 1.2 地质概况

D05勘探井在地质构造上位于牛驼镇凸起南

表1 主要钻探设备

Table 1 Main drilling equipment

序号	设备名称	规格型号	功率/kW
1	钻机	ZJ40/2250D	
2	井架	JJ225/45-K	
3	转盘	ZP275	
4	绞车	JC40	1100
5	泥浆泵	F-1300	960
6	动力机	1号 电动机	800
		2号 电动机	800
7	固控系统	ZJGK-40	180
8	井控装置	2FZ35-21	

部,牛驼镇凸起四周为凹陷所围,西部为容城凸起和徐水断凹,北为廊固凹陷,东北及东部为武清凹陷和霸县凹陷,南部为饶阳凹陷、高阳低凸起和保定凹陷<sup>[5-6]</sup>,D05井钻遇地层情况见表2。

### 1.3 井身结构

D05井为四开结构,成井井身结构如图1所示。

一开钻进至505.00 m,采用 $\varnothing 444.5$  mm钻头和 $\varnothing 339.7$  mm石油套管;二开钻进至2188.42 m,采用 $\varnothing 311.2$  mm钻头和 $\varnothing 244.5$  mm石油套管;三开钻进至3720.11 m,采用 $\varnothing 215.9$  mm钻头和 $\varnothing 177.8$  mm石油套管;四开钻进至4014.42 m,采用 $\varnothing 152.4$  mm钻头,裸眼完井。

## 2 钻遇难题

D05井三开井径为 $\varnothing 215.9$  mm,自井深3025 m进入高于庄组,地层岩性以燧石白云岩为主,硅质胶结、石英含量较高、研磨性强,岩石可钻性等级为8~9级,钻获燧石白云岩岩心实物见图2。使用LS617GL型牙轮钻头、配合螺杆钻具复合钻进平均机械钻速为1.82 m/h,与上部雾迷山组白云岩机械钻速相近,但钻头使用寿命很低、连续两个回次的进尺仅有52 m和43 m(见表3),起钻检查发现钻头牙轮外圈硬质合金齿崩裂殆尽、牙轮及掌背磨损、轴承磨损旷动,见图3。

表2 D05井钻遇地层  
Table 2 Strata drilled by Well D05

地 层	底深/m	厚度/m	岩 性 特 征
第四系 平原组	270.00	270.00	主要为浅灰、土黄色砂质粘土、粉细砂为主,结构松散
新近系 明化镇组	1040.00	770.00	上段主要为土黄、浅灰色泥岩、灰白色细砂岩,下段主要为浅灰绿、灰、紫色泥岩、灰白色粉细砂岩,其中局部发育少量钙质结核,底部以砾岩作为明化镇组底部界限
沙河街组	1425.00	385.00	主要为灰黑色泥岩、灰白色泥膏岩
古近系 孔店组	2185.00	760.00	主要为紫红色泥岩,夹灰色灰岩、灰白色白云岩砾石,局部发育灰白、紫红、杂色砾岩
元 蓟县系 雾迷山组	3002.00	817.00	主要为灰、灰白色白云岩,深灰、灰黑色燧石白云岩
杨庄组	3025.00	23.00	主要为紫红、深灰色泥质白云岩
元 长城系 高于庄组	4014.42	989.42	主要为灰、灰白色白云岩,深灰、灰黑色燧石白云岩,其中在3850 m左右有侵入玄武岩
界 (未揭穿)			

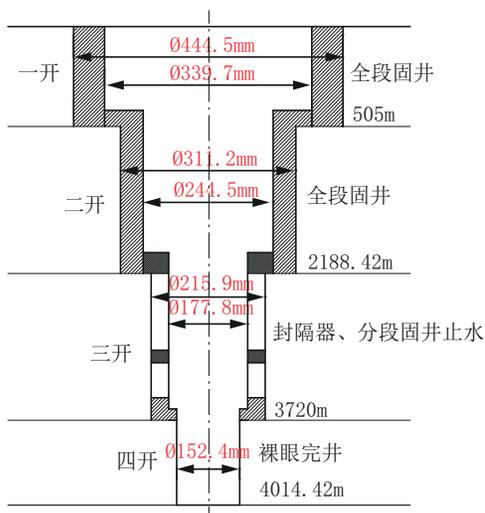


图1 D05井成井结构示意图

Fig.1 Completion structure of Well D05



图2 D05井燧石白云岩岩心块照片

Fig.2 Core picture of chert dolomite in Well D05

3 研究探索

3.1 原因分析

分析认为:高于庄组燧石白云岩,石英含量较高,硬度高、研磨性强;同时燧石团块与周边白云岩岩性存在较大差异,形成孔底岩石软硬不均的现状。在此类地层中钻进时,一方面因岩石硬度高、抗

压强度高,钻头牙齿不能及时压入并破碎岩石,在钻头转动时会形成“粘滞-滑动”的效应,即我们常说的“粘滑”效应<sup>[7-8]</sup>,类似我们钻探施工中的憋钻和憋钻后高速回转的现象,“粘滑”效应会使钻头牙齿承受强烈的冲击力,从而使牙轮钻头硬质合金齿快速损

表3 Ø215.9 mm井段LS617GL型钻头使用记录

Table 3 Usage record of LS617GL bit in Ø215.9 mm well section

钻头型号特征	孔段/m	孔径/mm	钻压/kN	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	回次进尺/m	纯钻时/h	机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )
LS617GL	3025~3177	Ø215.9	80~100	40+149	52	28.58	1.82
	3177~3120				43	23.50	1.83



图3 Ø215.9 mm 井段磨损严重的LS617GL型钻头照片  
Fig.3 Photo of LS617GL bit with severe wear in  
Ø215.9 mm well section

坏,特别是处于钻头牙轮外圈的硬质合金齿,其在回转的过程中线速度更高,承受的冲击力也就更大<sup>[9-10]</sup>;另一方面,软硬不均的岩石会使得牙轮钻头在回转过程中产生较大的纵向振动力,这本是牙轮钻头冲击碎岩的能量来源,有利于提高牙轮钻头碎岩效率<sup>[11]</sup>,但较大的纵向振动会使牙轮钻头硬质合金齿承受的冲击力增加,加快牙轮钻头硬质合金齿的损坏;同时螺杆钻具提供的较高转速,进一步增强了以上两种现象,加快了钻头牙轮硬质合金齿的损坏。钻头牙轮的硬质合金齿在达到受力极限时发生崩断,进而使钻头牙轮体直接与地层岩石接触而造成磨损;崩断的硬质合金齿在孔底形成“钢粒”效应,加剧牙轮的磨损<sup>[12-13]</sup>,从而造成钻头磨损严重、甚至是钻头事故。

### 3.2 方案研究

通过以上分析我们知道,现使用的LS617GL型牙轮钻头硬质合金齿抗冲击性能不足以应对此类石英含量较高的燧石白云岩地层是形成钻头整体磨损严重的主要原因。经充分调研,会同牙轮钻头生产厂家研究决定采用抗冲击、抗磨性能更好的637系列牙轮钻头。一方面637系列牙轮硬质合金齿出刃更短、且齿形为球形齿,因此抗冲击性能更强;另一方面637系列牙轮硬质合金齿的强度亦高于617系

列牙轮所用硬质合金,具有更好的抗冲击、耐磨性能。同时考虑石英含量较高的燧石白云岩地层研磨性较强、孔底还存在一定的硬质合金粒等因素,因此决定进一步强化钻头保径性能,防止因钻头保径磨损后造成牙轮掌背、牙轮及轴承快速磨损的状况发生。研究决定在钻头背锥齿与外排齿之间增加了一排修边齿,并使用金刚石保径替代原硬质合金保径以增强牙轮钻头保径性能。优化调整后的钻头型号为LST637GDH。

### 3.3 实践应用

LST637GDH型钻头在D05井三开3120~3196 m段回次钻进76 m,整只钻头仅有数颗外排齿崩裂,钻头磨损较轻(见图4),钻头磨损严重、使用寿命低的问题得到解决。



图4 Ø215.9 mm 井段LST637GDH型  
钻头磨损状况照片

Fig.4 Photo of LST637GDH bit with severe wear in  
Ø215.9 mm well section

但该型号钻头的机械钻速较低,螺杆钻具复合钻进平均机械钻速仅为1.12 m/h,与原LS617GL型牙轮钻头螺杆钻具复合钻进机械钻速1.82 m/h相差较大。再次使用新LST637GDH型钻头钻进一个回次、进尺108 m,钻头磨损亦较轻、机械钻速仍无变化,见表4。

表4 Ø215.9 mm 井段LST637GDH型钻头使用记录

Table 4 Usage record of LST637GDH bit in Ø215.9 mm well section

钻头型号	孔段/m	孔径/mm	钻压/kN	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	回次进尺/m	纯钻时/h	机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )
LST637GDH	3120~3196	Ø215.9	80~100	40+149	76	67.85	1.12
	3196~3304				108	96.50	

实践应用证明,637系列球形硬质合金齿牙轮钻头抗磨、冲击性能较好,可以满足在石英含量较高的燧石白云岩地层使用,但其硬质合金齿出刃较短、球面的齿顶外形不利于硬质合金齿压碎并吃入岩石,因此机械钻速较低。

### 3.4 优化调整

过低的机械钻速显然不符合钻进要求,还需对钻头进行进一步的优化调整,在解决钻头磨损的情况下提高机械钻速。根据以往的研究成果我们知道:在其它条件不发生变化的情况下,提高碎岩效率可以有效地提高机械钻速,要提高碎岩效率一方面可以提高碎岩能量,另一方面可以提高钻头的碎岩能力<sup>[14-15]</sup>。钻进中碎岩能量来自于钻压和转速,在现有设备条件下可调整的范围较小,对碎岩效率影响较小。通过分析我们知道:牙轮钻头是依靠牙轮绕钻头轴线的公转与牙轮绕自身轴线的自转所产生的冲击压碎作用和牙齿的滑动剪切作用来破碎岩石<sup>[16-17]</sup>,要提高钻头的碎岩能力,就需要提高牙轮硬质合金齿压碎吃入岩石的能力,就需要牙轮钻头硬质合金齿具有较长的出刃和较为尖锐的齿顶外形。研究决定对钻头进行两个方面的优化调整:一方面对牙轮钻头硬质合金齿形状进行优化,考虑钻头外圈齿承受的冲击力较大,外排齿和修边齿仍采用抗冲击性能较好的球形齿,其余切削齿调整为特制的锥球形齿,其比常规锥球形齿更长更尖,相较于球形齿更易于压碎吃入岩石,从而提高碎岩效率<sup>[18]</sup>;另

一方面选用轴承和密封更好的江钻金属密封钻头代替立林复合密封钻头,确保轴承在承受冲击力时的运行性能。优化调整后钻头型号为MD617HDY。

### 3.5 效果评价

D05井自井深3304 m开始使用MD617HDY型钻头,机械钻速达到了1.76 m/h,首只钻头钻进110 m后起钻检查,钻头磨损较轻,见图5。D05井继续使用该型号钻头钻进至3886 m完成三开 $\varnothing 215.9$  mm井径钻探任务,期间未再出现钻头磨损严重的现象。该型号钻头的使用寿命约110~140 m,基本满足了钻进需求,同时平均机械钻速达到了1.74~1.82 m/h,机械钻速亦恢复至原正常水平,见表5。



图5  $\varnothing 215.9$  mm井段MD617HDY型钻头磨损状况照片

Fig.5 Photo of MD617HDY bit with severe wear in  $\varnothing 215.9$  mm well section

表5  $\varnothing 215.9$  mm井段MD617HDY型钻头使用记录

Table 5 Usage record of MD617HDY bit in  $\varnothing 215.9$  mm well section

钻头型号	孔段/m	孔径/mm	钻压/kN	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	回次进尺/m	纯钻时/h	机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )
MD617HDY	3304~3414	$\varnothing 215.9$	80~100	40+149	110	62.50	1.76
	3414~3535				121	69.53	1.74
	3535~3675				140	78.67	1.78
	3675~3804				129	73.75	1.75
	3804~3886				82	45.00	1.82

## 4 新问题及下一步计划

D05井后续处理井内复杂情况,在3670 m处下入套管封隔上部地层,自3720 m处换 $\varnothing 152.4$  mm钻头开始侧钻绕障作业。自3740 m确定已偏离原井眼轨迹,起钻更换MD617HDY型钻头进行定向钻进,至3785 m钻头到底憋泵,提离孔底后钻具反转,

泵压恢复正常,起钻检查钻头磨损严重(见图6)。

通过充分调研、结合钻遇地层情况及以往类似地层钻头应用经验分析:一方面,此段地层中石英含量较多,岩石研磨性较上部地层更强;另一方面, $\varnothing 152.4$  mm牙轮钻头抗磨、抗冲击性能较相同齿型的 $\varnothing 215.9$  mm牙轮钻头差;以致上部 $\varnothing 215.9$  mm井段



图6  $\text{O}152.4$  mm 井段磨损严重的MD617HDY型钻头照片

Fig.6 Photo of MD617HDY bit with severe wear in  $\text{O}152.4$  mm well section



图7  $\text{O}152.4$  mm 井段磨损严重的LST637GDH型钻头照片

Fig.7 Photo of LST637GDH bit with severe wear in  $\text{O}152.4$  mm well section

使用效果较好的MD617HDY型钻头在深部 $\text{O}152.4$  mm井段应用效果较差。

研究决定换用抗磨、抗冲击性能更好的LST637GDH型钻头,使用过程中,钻头寿命仅有三四十米,仍出现了钻头硬质合金齿、牙轮及轴承磨损严重的现象,见图7。随后换用质量更好、造价更高的MD637HDY型牙轮钻头,钻头轴承磨损的问题得到解决,但硬质合金齿及牙轮磨损仍较严重,见图8。至3850 m地层岩性变化后钻头磨损情况方有所改善,后一直使用MD637HDY型钻头钻进至4014.42 m终孔,在石英含量较高的燧石白云岩地层中 $\text{O}152.4$  mm牙轮钻头磨损严重、使用寿命短的问题未能得到解决。后期施工的项目未再在此类地层中设计 $\text{O}152.4$  mm孔径,因此未再进行燧石白云岩地层 $\text{O}152.4$  mm钻头的应用探索,适宜于硬度高、研磨性强、且软硬不均地层的 $\text{O}152.4$  mm钻头,将是我们下步研究的重点和必须攻关的难关。

## 5 结论与建议

(1)在石英含量较高的燧石白云岩中,常规牙轮钻头快速磨损,影响正常钻进,甚至造成孔内钻头事故,钻遇此类地层时需提高警惕。

(2)使用637系列附带特殊金刚石保径的钻头可以有效解决石英含量较高的燧石白云岩地层 $\text{O}215.9$  mm井径钻头磨损严重、使用寿命短的问题,但637系列钻头常采用球形硬质合金齿、碎岩效率较低,以致机械钻速较低。

(3)采用特制加长锥球齿、特殊金刚石保径的



图8  $\text{O}152.4$  mm 井段磨损较严重的MD637HDY型钻头照片

Fig.8 Photo of MD637HDY bit with the more severe wear in  $\text{O}152.4$  mm well section

MD617系列钻头在石英含量较高的燧石白云岩地层 $\text{O}215.9$  mm井径中应用效果良好,平衡了钻头磨损和钻效方面的难题,其缺点就是造价相对较高,但综合效益较高。

(4)在石英含量较高的燧石白云岩地层 $\text{O}152.4$  mm井径中,637系列金刚石保径的钻头亦磨损较为严重、使用寿命较低,适宜于硬度高、磨性强、且软硬不均地层的 $\text{O}152.4$  mm钻头,需要我们继续进行探索研究。

## 参考文献(References):

[1] 庞忠和,孙彦龙,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.

PANG Zhonghe, SUN Yanlong, PANG Jumei, et al. Geother-

- mal resources and development in Xiong'an New Area[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 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.  
DAI Minggang, WANG Xinwei, LIU Jinxia, et al. Characteristics and influence factors of geothermal resources in the starting and adjacent zone of Xiong'an New Area[J]. Chinese Journal of Geology, 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.  
MA Feng, WANG Guiling, ZHANG Wei, et al. Spatial structure and resource potential of heat storage in Rongcheng Geothermal Field, Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):1981-1990.
- [4] 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.  
WANG Guiling, LI Jun, WU Aimin, et al. Study on the characteristics of Neogene—Gaoyuzhuang Formation thermal reservoir in Rongcheng Uplift Area, Hebei province [J]. Journal of Earth Sciences, 2018, 39(5):533-541.
- [5] 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. Spatial structure and resource potential of heat storage in Rongcheng Geothermal Field, Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):1981-1990.
- [6] 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.  
GUO Sasa, ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, et al. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):2026-2035.
- [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.  
FAN Lasheng, JIA Xiaofeng, WANG Guiling, et al. Drilling and construction practice of D03 geothermal exploration well in Xiong'an New Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunelling), 2020, 47(10):13-22.
- [8] 吕利强.雄安新区地热井钻探施工难点及措施[J].中国煤炭地质,2019,31(10):69-72.  
LÜ Liqiang. Difficulty and measures of geothermal well drilling in Xiong'an New Area [J]. Journal of China Coal Geology, 2019, 31(10):69-72.
- [9] 谭现锋,马哲明,段隆臣,等.复合动力钻进工艺在干热岩钻井中的应用研究[J].钻探工程,2021,48(7):1-8.  
TAN Xianfeng, MA Zhemin, DUAN Longchen, et al. Application of compound power drilling technology in hot dry rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7):1-8.
- [10] 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.  
ZHAO Changliang, WANG Yongjun, CHEN Shixun. Difficulty analysis and construction scheme design of high temperature and ultra deep geothermal well drilling in datong region [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2022, 23(4):32-39.
- [11] 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):64-68.  
WANG Yongjun, DAI Na, ZHENG Yuxuan. Study on key technologies of dry hot rock drilling [J]. Shandong Land and Resources, 2019, 35(2):64-68.
- [12] 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.
- [13] 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.  
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):127-143.
- [14] 郑宇轩,单文军,赵长亮,等.青海共和干热岩GR1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2018,54(5):1038-1045.  
ZHENG Yuxuan, SHAN Wenjun, ZHAO Changliang, et al. The drilling technology for the GR1 well in hot-dry rock of Gonghe, Qinghai province [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5):1038-1045.
- [15] 宋继伟,蒋国盛,班金彭.贵州省地热深井开放式思维高质量成井综合技术[J].地质与勘探,2020,56(5):1065-1071.  
SONG Jiwei, JIANG Guosheng, BAN Jinpeng. Innovative and high-quality comprehensive completion technology of deep geothermal wells in Guizhou province[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(5):1065-1071.
- [16] 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.
- [17] DZ/T 0260—2014, 地热钻探技术规程[S].  
DZ/T 0260—2014, Technical specification for geothermal well drilling[S].
- [18] 王务红,陈东方.三塘湖火成岩地层牙轮钻头的开发[J].江汉石油科技,2010,20(3):214-216.  
WANG Wuhong, CHEN Dongfang. Development of tooth wheel drill bit in Santang Lake igneous rock formation [J]. Jianghan Petroleum Technology, 2010, 20(3):214-216.

(编辑 王文)