

# 空气潜孔锤钻进技术在舜皇山基岩地热深井的应用

石荆京<sup>1</sup>, 张海林<sup>2</sup>, 苏园园<sup>2</sup>, 胡志航<sup>1</sup>, 郑秀华<sup>\*1</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 北京泰利新能源科技发展有限公司, 北京 101118)

**摘要:**空气潜孔锤钻进技术不仅可以提高钻探效率, 而且不损害地热储层, 因此在地热井中的应用十分广泛, 但仍受到钻探深度和出水量的限制。在湖南永州舜皇山基岩地热深井钻探过程中, 常规牙轮钻进与泥浆钻进工艺存在钻进效率低、堵塞储层、影响出水量的可能。应用空气潜孔锤钻进技术实现了钻探深度的突破, 钻探深度达到1820 m, 实际出水量400 m<sup>3</sup>/d, 出水温度43 ℃, 符合设计指标。本文总结了相应的钻进工艺措施, 以期促进对该技术在地热深井中的推广应用。

**关键词:**空气潜孔锤; 基岩; 地热深井; 钻探效率; 地层出水量; 热储保护

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)10-0036-07

## Application of air DTH hammer drilling technology in deep bedrock geothermal well in the Shunhuang Mountain

SHI Jingjing<sup>1</sup>, ZHANG Hailin<sup>2</sup>, SU Yuanyuan<sup>2</sup>, HU Zhihang<sup>2</sup>, ZHENG Xiuhua<sup>\*1</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Beijing Taili New Energy Technology Development Limited Company, Beijing 101118, China)

**Abstract:** Air DTH hammer drilling technology can not only improve drilling efficiency, but also does not damage geothermal reservoirs; therefore, it is widely used in geothermal well drilling. However, it is limited by drilling depth and water output. During drilling of deep geothermal wells in the Shunhuang Mountain of Yongzhou, Hunan, air down-the-hole hammer drilling technology was used to achieve a breakthrough in the drilling depth with the drilling depth up to 1820m, and the actual water output of 400m<sup>3</sup>/day at surface temperature of 43℃, meeting the design index. The relevant drilling measures are summarized so as to promote application of the technology in geothermal deep wells.

**Key words:** air DTH hammer; bedrock; deep geothermal well; drilling efficiency; formation water output; thermal storage protection

## 0 引言

湖南永州舜皇山基岩地热深井钻遇的主要地层为基岩, 常规牙轮钻进与泥浆钻进工艺存在钻进效率低、堵塞储层、影响出水量的可能。空气潜孔锤钻进是当代多工艺空气钻进技术方法之一, 当井内条件适合时, 空气潜孔锤可以有效地减少钻井时

间, 但存在的问题是, 目前采用空气潜孔锤技术的钻井深度都在1000 m左右, 地层深度越大, 井内钻井液柱压力也就越大, 空气潜孔锤钻进的难度也会随之增大; 而且, 空气潜孔锤对地层出水量要求很高, 对于较深的地层, 当出水量超过钻进要求时, 空气潜孔锤就无法进行正常的冲击工作。因此需要

收稿日期: 2020-09-20; 修回日期: 2021-04-12 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.10.005

基金项目: 国家自然科学基金项目“高温热储环境下微气泡钻井液特性及作用机理”(编号: 41872184)

作者简介: 石荆京, 男, 汉族, 1997年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 研究方向为钻/完井流体和地热工程, 北京市海淀区学院路29号, 17760868126@163.com。

通信作者: 郑秀华, 女, 汉族, 1965年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 研究方向为钻/完井流体和地热工程, 北京市海淀区学院路29号, xiuhuazh@cugb.edu.cn。

引用格式: 石荆京, 张海林, 苏园园, 等. 空气潜孔锤钻进技术在舜皇山基岩地热深井的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(10): 36-42.

SHI Jingjing, ZHANG Hailin, SU Yuanyuan, et al. Application of air DTH hammer drilling technology in deep bedrock geothermal well in the Shunhuang Mountain[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 36-42.

对空气潜孔锤技术的钻探深度和地层出水量作进一步的探索。

## 1 空气潜孔锤钻进技术

### 1.1 技术特点及应用

空气潜孔锤钻进技术是一种用连接在钻头上的冲击器给予钻头高频冲击能量,进行冲击回转钻进的技术。这种技术主要适用于基岩地层钻进<sup>[1]</sup>,在冲击载荷的作用下,使岩石发生体积破碎。

国外的空气潜孔锤技术发展始于20世纪30年代中期,主要用于提高采石、采矿效率,70年代早期,空气潜孔锤技术发展到水井、油气井、地热井和固体矿产等方面<sup>[2]</sup>。70—80年代,在加拿大洛基山、Appalachian、Permian盆地等已经广泛应用空气锤,取得了很好的经济效益,同时发明了很多专利,例如加润滑添加剂钻深井的空气锤、带取心式钻头的空

气锤等<sup>[3]</sup>。

国内的空气潜孔锤技术首先应用于浅井(孔)施工中。20世纪70年代,空气潜孔锤钻进技术引入国内,并不断发展和完善,在水文、地质勘探等浅井中得以应用推广<sup>[4]</sup>。2000年以后,空气潜孔锤在浅层凉水井及基岩埋管钻探方面得到了广泛地应用<sup>[5-6]</sup>。最近几年,空气潜孔锤技术已成为浅层凉水井和基岩埋管领域的首选钻进技术,处于大规模应用阶段<sup>[7-10]</sup>。

空气潜孔锤技术应用于国内深井钻探始于2000年,最先应用于石油行业,中石油和中石化都对空气潜孔锤钻进技术进行了应用与推广。2003年中国石油勘探开发研究院开始了对油田气体钻井中应用空气锤技术的研究工作,表1中列出了中石油部分采用空气潜孔锤钻进技术的钻井数据。

表1 中石油部分空气潜孔锤钻井数据

Table 1 Some air DTH hammer drilling data by CNPC

井号	空气锤 型号	井眼直 径/in	现场试 验日期	气量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	立管压 力/MPa	钻压/ kN	钻进井段/m	累计钻 时/h	平均机械钻 速/(m·h <sup>-1</sup> )
威寒1井	KQC180	8½	2004.11	60	2.5	20~40	1198.22~1300	3	33.93
七北101井 <sup>[11]</sup>	KQC275	12¼	2005.04	100~120	6	30~50	675.52~2056.35	81.27	16.99
龙17井	KQC275	12¼	2005.06	100~120	1.8	30~50	1763.87~2111.45	11.67	29.73
东升1井	KQC275	12¼	2005.07	100~120	1.4~2	0~10	3064.52~3276.18*	27.58	
七北102井	KQC275	12¼	2006.04	100~120	1.8~2.3	20~50	516.96~1381	54.5	15.85
龙岗1井 <sup>[12]</sup>	KQC275	12¼	2006.05	100~120	2	30~50	807.77~2520.59	58.87	29.09

注:(1)\*井斜角由14.01°降至7.21°;(2)1 in=25.4 mm,下同

从表1可知,钻进深度最大的是东升1井,已达3276.18 m;各井平均机械钻速在15.85~33.93 m/h,钻进效率很高。

国内地热行业应用空气潜孔锤始于最近几年。随着人们生活水平的提高,对旅游康养、医疗保健的需求越来越强烈,很多南方地市便开始探索开发基岩裂隙型地热温泉资源<sup>[13-15]</sup>,因此催生并加速了空气潜孔锤技术在地热井中的应用。2015年开始,很多水文地质勘查及地热从业单位都在探索使用空气潜孔锤技术开展地热井钻探工作,在地热井一开钻进过程中,采用空气潜孔锤技术已经非常普遍<sup>[16-18]</sup>;在地热井二开钻进过程中采用空气潜孔锤技术也有很多单位在尝试<sup>[18-21]</sup>。

井内条件适合时,空气潜孔锤可以有效地减少

钻井时间,但仍受到深度和出水量的限制,目前钻井深度都在1000 m左右,而且在井较深时,如果地层出水量超出一定范围,空气潜孔锤将无法进行正常的冲击工作。

北京泰利新能源科技发展有限公司近5年来由易到难逐步推广了地热井潜孔锤钻进技术。2015—2016年在5眼地热井一开(孔径311 mm)钻探中,以及2016—2017年在3眼地热井一开(孔径311 mm,深度500 m)、二开(孔径216 mm,深度1200~1500 m)钻探中应用空气潜孔锤钻进技术;2017—2018年在2眼地热井中应用空气潜孔锤钻进技术钻探终孔,最大钻孔深度达2250 m;自2019年起,在北京泰利新能源公司内部强制推行地热井空气潜孔锤钻进技术。

## 1.2 技术优势

空气潜孔锤钻进技术是一种低钻压、低转速、高冲击破岩回转的钻进技术,它兼容了气体钻井和冲击回转钻进的优势,其钻效比回转钻进高10~20倍。与常规泥浆循环牙轮钻进相比,空气潜孔锤在地热井钻探中主要具有以下优势:

(1)钻效高:空气潜孔锤钻效一般在10~30 m/h,是常规牙轮钻进的10~20倍,且地层硬度越大,钻效优势越明显。

(2)保护储层:采用气体作为钻井介质,钻井过程始终保持井孔内为负压状态,减少对含水层的损害,同时破碎的岩屑会被空气由环空从井眼带出,相当于边钻进边洗井。

## 2 工程概况

### 2.1 舜皇山地质概况

舜皇山地区及其附近出露地层为单一的越城岭花岗岩主体,见图1。岩体特质如下:

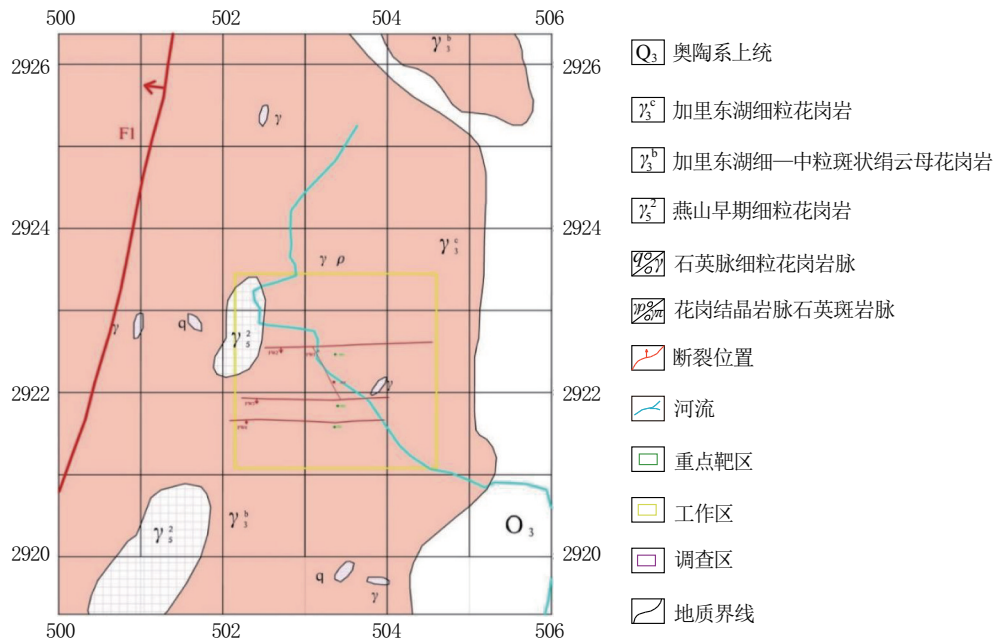


图1 舜皇山项目综合勘查成果图

Fig.1 Map of the comprehensive survey results from the Shunhuang Mountain project

(1)岩体侵入与前泥盆系形成的复式背斜轴部,呈不规则长条状,轴向与围岩构造线方向基本上一致。

(2)岩体与围岩的接触线多呈弯曲状,东部与震旦系、奥陶系呈侵入接触,倾向东或南东,倾角较陡,接触面产状为 $120^{\circ}/70^{\circ}$ ;北部与寒武系、奥陶系呈侵入接触,接触面倾向围岩,倾角在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ;西部与震旦系呈侵入接触,局部地段与白垩系呈断裂接触;岩体东部龙水北西一带,与泥盆系中统跳马涧组呈沉积接触,故岩体属加里东期。

(3)岩石呈灰白色,风化后呈黄灰、棕灰色。岩性变化不大,以中粒斑状黑云母花岗岩为主,局部分布有中粒斑状黑云母二长花岗岩,个别还有中粒斑状黑云母二长岩,后两者因分布范围很小,与中粒斑

状黑云母花岗岩呈逐渐过渡关系。

### 2.2 钻井设计

舜皇山基岩地热深井设计井深为2000 m,设计出水量为 $400\text{ m}^3/\text{d}$ ,设计出水温度为 $40^{\circ}\text{C}$ ,钻遇地层主要为花岗岩,设计取水段为1000~2000 m,总设计工期为6个月。各井段的具体设计参数见表2。

表2 各井段设计参数

Table 2 Design parameters for each well section

井段	深度/m	孔径/mm	管径/mm
一开	0~650	311	245
二开	650~1300	216	178
三开	1300~2000	152	裸眼成井

### 3 空气潜孔锤钻进参数选择

#### 3.1 风量、风速和风压的选择

空气潜孔锤钻进最大的成本支出就是空压机租赁费和耗油费,而上述费用的高低与风量、风压关系密切。供风量不仅是保证冲击器工作的基本条件,也是保证钻孔是否能正常排粉的重要因素,因为在干空气的钻进情况下,排粉效果的好坏,主要是和上返风速有关,而风速与供风量有直接关系。

风量根据所用冲击器的性能以及要满足洗井所需的上返风速而确定。因为岩屑在气流介质中由于本身的粘度、密度和形状的不同而具有不同的悬浮速度,因此要使岩屑有效地排出井外,达到井底干净,就必须采用大于岩屑悬浮速度的上返风速。对于反循环气动潜孔锤钻进来说不存在此类问题,对于一般正循环钻进,压缩空气在钻杆与井壁环状间隙中的上返流速,一般为15~25 m/s。供气量的选择与确定,主要是要保证一定的环空上返风速,依下列公式推算:

$$Q \geq 60K_1K_2 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)v$$

式中:Q——空压机的供风量, m<sup>3</sup>/min; v——上返风速,一般取15~25 m/s; D——钻井实际直径, m; d——钻杆外径, m; K<sub>1</sub>——井深修正系数(由于井深环状间隙压力损失增大,导致流量减小),一般井深在100~200 m时 K<sub>1</sub>=1.05~1.1,井深在500 m时 K<sub>1</sub>=1.25~1.3; K<sub>2</sub>——井内有涌水时的风量增加系数,与涌水量有关,中、小涌水量时 K<sub>2</sub>=1.5。

空气潜孔锤钻进时,空压机压力主要用于克服压缩空气在整个流动通道中的沿程损失和各个局部压力损失,克服井内水柱压力和提供潜孔锤工作所需的压力。钻进速度与所供给的风压密切相关。通常规律是其相同条件下风压越高钻速越快。随井深的增加所需压力也增大,如钻Ø120 mm的井,深150 m时需消耗风压1.4 MPa,深200 m时需消耗风压1.7 MPa。不同冲孔方法对配备空压机能力要求也不同。此外,在有水的情况下钻进,背压对潜孔锤风压每10 m增加0.1 MPa。

#### 3.2 钻压的选择

潜孔锤的破碎原理主要是靠冲击动载作用下破碎岩石,钻进效率高主要取决冲击功的大小及频率的多少。而钻压是保证冲击功充分发挥作用的辅助力,钻压过大和过小都会影响潜孔锤钻进的正常

进行。表3为不同规格的潜孔锤钻进时适宜的钻压范围。

表3 空气潜孔锤钻进适宜的钻压范围  
Table 3 Suitable WOB range for air DTH hammer drilling

潜孔锤直径/mm	最低钻压/kN	最高钻压/kN
76	1.5	3.0
102	2.5	5.0
203	8.0	20.0
305	16.0	35.0

#### 3.3 转速的选择

潜孔锤钻进以冲击碎岩为主,合理的转速选择,对钻头寿命乃至钻进成本至关重要。转速太快,对钻头的寿命不利,特别在研磨性强的岩层,转速过快将使钻头外围的刃齿很快磨损和碎裂。转速太慢,则将使柱齿冲击时与已有冲击破碎点(凹坑)重复,导致钻速下降。常规是岩石越硬或钻头直径越大,越要求用较低之转速。

通过对潜孔锤钻进效率、钻头寿命等因素进行综合考虑,不同岩层对于转速的要求也不相同,覆盖层为40~60 r/min;软岩层为30~50 r/min;中硬岩层为20~40 r/min;硬岩层为10~30 r/min。由于舜皇山地热井钻遇地层主要为花岗岩,所以无特殊情况只采用一挡钻进,以降低转速,防止崩齿。

### 4 现场应用

#### 4.1 不同钻进工艺效率及效果对比分析

该井钻遇地层主要为花岗岩,其硬度较大。钻井施工数据如下:

一开井径311 mm,深度0~635 m,管径245 mm;二开井径216 mm,深度635~1318 m,管径178 mm(花管);三开井径152 mm,深度1318~1820 m,裸眼成井。实际井深为1820 m;取水段范围较大,为800~1820 m;出水量为400 m<sup>3</sup>/d,出水温度为43℃。

表4列出了实际钻井过程中空气潜孔锤钻进与牙轮钻进的钻效数据。从表4可知,空气潜孔锤钻进在出水量较大的一开井段纯钻钻效为13 m/h,是常规牙轮钻进效率的23倍;二开井段采用空气潜孔锤钻进的纯钻钻效为11.3 m/h,是常规牙轮钻进效

率的17.9倍;在三开井段,空气潜孔锤钻进的纯钻钻效也达到了8.5 m/h,远远高于常规牙轮钻进的钻进效率。这说明在花岗岩地层,采用空气潜孔锤钻

进效率很高,极大地节省了钻井时间,从而降低了钻井成本。

表4 实际钻效数据统计

Table 4 Actual drilling efficiency data

井段	钻进方式	深度/m	总进尺/m	施工工期/d	日平均进尺/(m·d <sup>-1</sup> )	纯钻钻效/(m·h <sup>-1</sup> )
一开	空气潜孔锤	0~300	300	2.5	120	13
	牙轮	300~635	335	30	11.17	0.56
二开	牙轮	635~923	288	23	12.5	0.63
	空气潜孔锤	923~1318	395	6	65.83	11.3
三开	空气潜孔锤	1318~1820	502	8	62.75	8.5

#### 4.2 舜皇山空气潜孔锤钻进技术特点

与国内同类型地热井相比,舜皇山地热井在井深方面实现重大突破,井深达到1820 m,地层出水量最大达到了20~60 m<sup>3</sup>/h,出水温度为43 ℃,基本满足设计目标。表5列出了各井段空气潜孔锤的施工参数。从表中可以看出,一开井段地层的出水量达到了20~60 m<sup>3</sup>/h,是整个钻进过程中出水量最大的一段。但是由于一开空气潜孔锤钻进的深度只有300 m,工作气压仅为2.0~2.8 MPa。二开井段出水

量只有5~10 m<sup>3</sup>/h,但是随着钻进深度的增大,井内钻井液液柱压力也在不断增大,需要增大工作气压来保持压力平衡,所以增加2台增压机来增大排气压力;利用较大的气压将地层出水吹成雾气状态,通过井眼排出;三开井段深度已经超过1318 m,此时地层压力达到最大,出水量变为15~16.17 m<sup>3</sup>/h,所以工作气压也随之增大到4.5~5.0 MPa;与一开和二开相比,三开井段的直径较小,所以工作钻压也相对较小,只有10~15 kN。

表5 各井段空气潜孔锤钻进施工参数统计

Table 5 Drilling parameters of the air DTH hammer for each well section

井段	空压机配置	工作钻压/ kN	工作气量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	工作气压/ MPa	地层出水量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	钻头数量/ 只	最大井斜/ (°)
一开	空压机2台 <sup>①</sup>	25~30	60	2.0~2.8	20~60	1	0.5
二开	空压机2台 增压机2台 <sup>②</sup>	15~20	60	4.0~4.5	5~10	3	1.9
三开	空压机2台 增压机2台	10~15	60	4.5~5.0	15~16.17	3	1.3

注:(1)单台排气量30 m<sup>3</sup>/min,最大排气压力30 kN;(2)单台排气量40 m<sup>3</sup>/min,最大排气压力150 kN

通过施工的实际情况可以看出,采用空气潜孔锤冲击回转钻进工艺具有以下特点:

(1)工作钻压与钻井直径有关,钻井直径越大,工作钻压越大。

(2)工作气压与钻井深度和出水量有关,钻井深度越大,出水量越大,在符合地层出水量要求的情况下,工作气压也就越大。

(3)钻进过程就是洗井过程,所以,对地层和含水层无污染、无堵塞。出水较多的地层,可以通过风

压将地层水吹成雾化状态,将岩屑与水通过环空从井眼排出,从而保持环空清洁和干燥,保证钻进的持续进行以及钻进效率的最大化。

(4)钻进效率高,成井速度快,大幅度缩短钻井时间,从而降低了钻井成本。

#### 4.3 空气潜孔锤钻进注意事项

##### 4.3.1 钻压与转速控制

要保证平稳施加钻压,钻机刹把要采用勤放、少放原则以控制钻压;无特殊情况只采用一档钻进,以

降低转速,防止崩齿。

#### 4.3.2 风压控制

一开只采用空压机施工期间,最高风压控制在2.8 MPa以内;二开及以下井段采用空压机+增压机施工期间,最高风压控制在5.0 MPa以内。一般每钻进2 m左右提钻30~50 cm释放压力以排渣,一般压力释放时间为20~40 s;井深增加释放时间加长,井深超过1500 m后压力释放时间 $<60$  s。

#### 4.3.3 接单根与排渣

(1)每次接单根之前,要将井内钻具采用盖桶盖好以防杂物落入钻具内;要确保所接单根经过钢丝球冲刷过钻杆内壁,接之前要采用大锤重力锤击以将钻杆内壁可能附着的铁锈或其他杂物震掉,并采用高压气体吹刷一遍后方可正式接单根。

(2)要尽量缩短接单根时间,单根接完后要关闭井口旋转放喷器盖板,之后方可开空压机供气钻进。

(3)钻进过程中视实际情况,通过泡沫泵向井内注入泡沫,具体注入频率由现场试验而定,以满足排渣泡沫注入量最小为原则。

(4)当井底沉渣过多无法接单根时,需采用集中打泡沫清底后再接单根;单次清底集中打泡沫量宜为1~2 m<sup>3</sup>(不宜超过2 m<sup>3</sup>,否则放喷压力过大易发生意外)。

(5)每接4~5个单根时需向钻具内倒入少量冲击器润滑油。

(6)每次接单根停气前先将钻头提离井底4~5 m,以防堵钻。

#### 4.3.4 起下钻

(1)每次起钻后需测量所提起钻头外径尺寸,观察钻钎头上硬质合金磨损情况,新下入钻头直径要视旧钻头磨损情况而定,尽量缩小新旧钻头级差。

(2)每次下钻前需将冲击器卸开清洗干净、重新组装完毕并加注润滑油;下钻前需在井口试振冲,冲击器正常振冲后方可下钻。

(3)每次下钻到底后需在井口钻具处接入1个单向阀(其他位置不得加单向阀)。下钻至1300~1400 m时,先用泥浆泵向钻具内打入干净的清水,当井口返水确认钻具通道通畅后,开启增压机吹水降压,之后视出水量大小每300~500 m吹水降压一次,直至接近井底。

(4)下钻到距离井底10 m以内时需接上方钻

杆,关闭井口旋转放喷器盖板,启动空压机供气正常后再慢慢将钻头下放至井底。

## 5 结论

(1)在舜皇山地热深井中应用空气潜孔锤钻进技术,实践表明,空气潜孔锤钻进效率达到了常规牙轮钻进效率的17.9~23倍。在坚硬的地层采用空气潜孔锤钻进技术可节约大量的钻井时间,从而显著提高直接经济效益,且对含水层没有伤害。边钻进边洗井,减少了洗井工序,降低了成本。

(2)舜皇山基岩地热深井的井深为1820 m,是目前空气潜孔锤技术在地热井中所能达到的比较大的深度,实现了钻探深度的突破。舜皇山地层出水量最大达到了20~60 m<sup>3</sup>/h,在深度为1318~1820 m的井段,出水量也达到了15~16.17 m<sup>3</sup>/h,属于出水量较大的地层,针对不同地层和不同出水量,通过调整空压机以及增压机的参数,成功解决了出水量过大、空气潜孔锤无法进行正常冲击工作的难题。

(3)由于空气潜孔锤特殊的钻进工艺,所以对于钻压、转速以及风压的控制也就十分重要。本次舜皇山地热钻井项目总结了部分注意事项以及异常情况的应对方案。由于地层的多样性以及特殊性,无法保证面面俱到,但仍为今后推广地热井潜孔锤钻探技术提供了技术参考。

## 参考文献(References):

- [1] Ion Pană. Aspects regarding numerical modeling of air drilling [C]//Modern Tehnologies in the 21th Century, 2003.
- [2] 鞍钢矿山研究所. 国外潜孔风动冲击器[M]. 北京:冶金工业出版社,1980.  
Angang Mining Research Institute. Foreign Down-the-hole Pneumatic Impactor[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980.
- [3] 唐俊,刘权萍,严辉容,等. 空气锤发展和应用研究[J]. 石油矿场机械,2013,42(11):16-19.  
TANG Jun, LIU Quanping, YAN Huirong, et al. Development and application of DTH hammer[J]. Oil Field Equipment, 2013,42(11):16-19.
- [4] 杜祥麟. 潜孔锤钻进技术[M]. 北京:地质出版社,1988.  
DU Xianglin. Down-the-hole Hammer Drilling Technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [5] 柴世丁. 空气潜孔锤钻进工艺在基岩水井施工中的应用[J]. 探矿工程,1998(6):3-5.  
CHAI Shiding. Application of air down-the-hole hammer drilling technology in bedrock water well construction [J]. Exploration Engineering, 1998(6):3-5.

- [6] 刘正斌. 空气潜孔锤钻进技术在非洲水井施工中的应用[J]. 西部探矿工程, 2004, 16(4): 129-130.  
LIU Zhengbin. The application of air down-the-hole hammer drilling technology in water well construction in Africa [J]. West-China Exploration Engineering, 2004, 16(4): 129-130.
- [7] 许刘万, 王艳丽, 刘江, 等. 影响水井钻探效率的因素及提高钻井速度的关键技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(4): 18-21.  
XU Liuwan, WANG Yanli, LIU Jiang, et al. On factors affecting well drilling efficiency and key technologies of improving drilling speed[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(4): 18-21.
- [8] 宋国龙, 李进安, 王超. 空气钻进技术及其在内蒙古供水井施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(11): 52-54.  
SONG Guolong, LI Jin'an, WANG Chao. Application of air drilling technology in water supply well construction in Inner Mongolia [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(11): 52-54.
- [9] 张统得, 严君凤, 房勇, 等. 空气潜孔锤钻进技术在乌蒙山地下水探采结合工程中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(11): 52-54.  
ZHANG Tongde, YAN Junfeng, FANG Yong, et al. Application of pneumatic DTH drilling technology in Wumeng Mountain groundwater exploration and production project [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(11): 52-54.
- [10] 徐青, 周磊, 刘成涛, 等. 气动潜孔锤钻进技术在微型桩施工中的应用[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(S1): 134-137.  
XU Qing, ZHOU Lei, LIU Chengtao, et al. Application of pneumatic DTH hammer drilling technology in micro pile foundation construction [J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(S1): 134-137.
- [11] 魏武, 许期聪, 邓虎, 等. 气体钻井技术在七北101井的应用与研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(9): 48-50.  
WEI Wu, XU Qicong, DENG Hu, et al. Research on gas drilling technology and its application in Well Qibei-101 [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(9): 48-50.
- [12] 孟庆昆, 王向东, 于兴胜. KQC系列空气锤在油田气体钻井中的应用[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(11): 54-57.  
MENG Qingkun, WANG Xiangdong, YU Xingsheng, et al. KQC series of air hammers for gas drilling in oil field [J]. Oil Field Equipment, 2007, 36(11): 54-57.
- [13] 赵华宣, 李强, 陈涛, 等. 贵州碳酸岩地层地热深井空气潜孔锤钻进技术应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(2): 37-42.  
ZHAO Huaxuan, LI Qiang, CHEN Tao, et al. Research and application of air dth hammer drilling technology for deep geothermal well in Guizhou carbonate formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(2): 37-42.
- [14] 尹欧, 隆威. 空气潜孔锤在地热勘探中的应用[J]. 山西建筑, 2014, 40(17): 56-57.  
YIN Ou, LONG Wei. Application of air down-the-hole hammer in geothermal exploration [J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(17): 56-57.
- [15] 赵华宣, 王玉军, 陈涛, 等. 贵州碎屑岩层地热深井空气潜孔锤钻进技术应用研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(5): 942-949.  
ZHAO Huaxuan, WANG Yujun, CHEN Tao, et al. Application of air DTH hammer drilling technology to deep geothermal wells in clastic rock strata in Guizhou province [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(5): 942-949.
- [16] 王虎, 陈怡, 段德培, 等. 贵州省深部地热钻井现状与发展建议[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(2): 45-47, 52.  
WANG Hu, CHEN Yi, DUAN Depei, et al. Present situation of deep geothermal well in Guizhou and the development suggestion [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(2): 45-47, 52.
- [17] 苏宁, 王虎, 王剑, 等. 多工艺钻井技术在贵州省遵义县ZK1井施工中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(1): 165-172.  
SU Ning, WANG Hu, WANG Jian, et al. Application of multi-process drilling technology to the Well ZK1 in Zunyi, Guizhou province [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(1): 165-172.
- [18] 陈浩. 空气潜孔锤在贵州百里杜鹃地热深井中的应用[J]. 资源信息与工程, 2016, 31(3): 76-77.  
CHEN Hao. Application of air DTH hammer in geothermal deep well of Baili Rhododendron in Guizhou [J]. Resource Information and Engineering, 2016, 31(3): 76-77.
- [19] 鲁国亮, 刘文涛, 孔祥武. 空气钻井技术在鲁东超深地热井施工中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2015(4): 126, 129.  
LU Guoliang, LIU Wentao, KONG Xiangwu. Application of air drilling technology in the construction of Lu Dong super deep geothermal wells [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2015(4): 126, 129.
- [20] 宋继伟, 蒋国盛, 苏宁, 等. 贵州省复杂地层地热深井钻探工艺[J]. 地质与勘探, 2018, 54(5): 1024-1037.  
SONG Jiwei, JIANG Guosheng, SU Ning, et al. Drilling technology of deep geothermal wells for complex strata in Guizhou province [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5): 1024-1037.
- [21] 张涛. 空气潜孔锤钻探施工工艺研究与应用[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(10): 58-62.  
ZHANG Tao. Research and application of air DTH hammer drilling technology [J]. Coal Geology of China, 2016, 28(10): 58-62.

(编辑 李艺)