

涡轮取芯钻进工艺在干热岩钻井中的应用

谭现锋, 王景广, 赵长亮, 王稳石, 翁 炜, 段隆臣

A study of the application of turbine coring drilling technology to hot dry rock drilling

TAN Xianfeng, WANG Jingguang, ZHAO Changliang, WANG Wenshi, WENG Wei, and DUAN Longchen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

封隔注浆分层成井技术在水文地质勘查中的应用研究

Application of the technology of injecting cement for the stratified well completion to hydrogeological exploration

王明明, 解伟, 安永会, 龚磊, 王文祥, 崔虎群 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 50-50

渗透率对于干热岩开采过程储层变化规律的影响

\$_{suggestArticle.titleEn}\$

崔翰博, 唐巨鹏, 姜昕彤 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 171-180

扁铲探头贯入干砂的位移特征试验研究

An experimental study of the displacement characteristics of dry sand under dilatometer penetration

陈忠清, 吴天宇, 高彦斌, 吕越, 刘帅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 119-125

集束式监测井成井工艺研究

A study of the well-forming technology of a cluster monitoring well

张建良, 李文鹏, 孙梓航, 李长青, 王进卫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 44-48

三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制

Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area

卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 李滨, 贺凯, 唐俊刚, 张天贵 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 73-81

热屏障井对地下水源热泵换热影响模拟

Simulation study on the effect of thermal barrier well on the heat transfer of groundwater heat pump

肖锐, 黄坚, 王小清 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 190-198



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003044

涡轮取芯钻进工艺在干热岩钻井中的应用

谭现锋^{1,2}, 王景广¹, 赵长亮³, 王稳石⁴, 翁 炜⁵, 段隆臣²

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地勘局第二地质大队), 山东 济宁 272100; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 3. 山东省地勘局第二水文地质工程地质大队, 山东 德州 253000; 4. 中国地质调查局勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 5. 中国地质调查局北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: 我国干热岩勘探刚刚起步。为准确评价干热岩型地热资源的资源量, 需要钻获高质量的干热岩岩心, 但目前针对高温、高硬度、高研磨工况下的干热岩取芯钻进工艺研究较少, 严重制约了干热岩型地热资源的准确评价。为此, 自主研发了 $\Phi 127$ mm 涡轮钻具, 在福建漳州 HDR-1 井和青海共和 GR1 井进行了干热岩钻井取芯应用研究, 研究验证了研发的涡轮钻具与 KT-140 取芯钻具的适配性、涡轮钻具与金刚石取芯钻头的匹配性, 揭示了高温和硬岩井况下涡轮钻具工作特性, 经受了孔底 236 °C 高温考验, 钻获了高质量岩心, 取得了涡轮钻具现场测试应用的各项参数; 涡轮取芯钻进工艺与常规取芯钻进工艺相比, 既充分发挥了涡轮钻具高转速的性能, 也发挥了其耐高温、耐研磨、耐高地应力、使用寿命长和现场劳动强度低的特性, 干热岩取芯钻速和质量大大提高。该工艺是高温深孔干热岩井下动力回转钻具驱动取芯钻头进行取芯钻进的首次成功尝试, 为干热岩涡轮钻具复合取芯钻井技术的进一步科研攻关、现场试验与推广应用提供了宝贵的施工应用经验和借鉴, 也将为我国干热岩科学钻探与深部地热资源勘探提供新的技术支撑。

关键词: 干热岩; 复合动力钻进工艺; 涡轮钻具; HDR-1 井; GR1 井; 漳州; 共和

中图分类号: P314.1; P634

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0195-08

A study of the application of turbine coring drilling technology to hot dry rock drilling

TAN Xianfeng^{1,2}, WANG Jingguang¹, ZHAO Changliang³, WANG Wenshi⁴,
WENG Wei⁵, DUAN Longchen²

(1. Shandong Lunan Geological Engineering Survey Institute (The Second Geological Brigade of Shandong Geological Survey Bureau), Jinan, Shandong 272100, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 3. The Second Hydrogeology Engineering Geology Brigade of Shandong Geological Survey, Dezhou, Shandong 253000, China; 4. Institute of Exploration Technology, China Geological Survey, Langfang, Hebei 065000, China; 5. Beijing Institute of Prospecting Engineering, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: Exploration of hot dry rock in China has just started. In order to accurately evaluate the amount of hot dry rock geothermal resources in China, high-quality hot dry rock drilling cores are needed. However, there are few researches on coring drilling of hot dry rock under the conditions of high temperature, high hardness and high grinding, which seriously restricts the accurate evaluation of hot dry rock geothermal resources. Therefore,

收稿日期: 2020-03-17; 修订日期: 2020-03-31

基金项目: 国家重点研发课题(2019YFB1504104); 国家自然科学基金面上项目(41972327; 51979100)

第一作者: 谭现锋(1977-), 男, 研究员, 主要从事深部地热资源勘探与开发、采煤沉陷区综合治理与生态修复研究。

E-mail: geotan1977@126.com

通讯作者: 段隆臣(1967-), 男, 博士, 教授, 主要从深部资源与地热钻探开发及机具研究。E-mail: duanlongchen@163.com

independent research and development of the turbodrill $\Phi 127$ mm are carried out. The HDR-1 well in Zhangzhou of Fujian and the GR1 well in Gonghe of Qinghai were drilled and the research and application of hot dry rock drilling coring were performed to verify the research and development of turbodrill and the suitability of the KT-140 coring drilling tools and the matching of turbodrill and diamond core bit. The high temperature and hard rock characteristics of turbodrill working under the well conditions are revealed, the test of high temperature of 236 °C at the bottom of the bore is withstood, and the application test of turbodrill parameters is obtained. Compared with the conventional coring drilling technology, the turbodrill composite coring drilling technology not only plays an important role in the performance of high rotating speed of the turbodrill, but also makes full use of the characteristics of high temperature resistance, grinding resistance, high ground stress resistance, long service life and low on-site labor intensity, which greatly improves the drilling speed of hot dry rock. The method is of high temperature deep hole hot dry rock underground rotary drill driving core bit coring drilling and is the first successful attempt for hot dry rock of turbodrill coring drilling technology. The field test and application may provide valuable construction experience. The results will also provide a new technical support for hot dry rock scientific drilling and deep geothermal resource exploration in China.

Keywords: hot dry rock; combined dynamic drilling process; turbodrill; HDR-1; GR1; Zhangzhou; Gonghe

干热岩是不含或仅含少量流体,温度高于 180 °C,其热能在当前技术经济条件下可以利用的岩体,干热岩储层岩石可分为侵入岩、变质岩和沉积岩三大类。未来干热岩的开发利用主要取决于钻井和人工储层建造的费用,较低的钻井成本和较高的储层热交换速率将大大降低增强型地热系统的开发成本。干热岩钻探在我国起步较晚,耐高温钻具和钻井技术、高温钻井液技术还不够成熟,主要是对地矿和石油行业现有钻探技术进行改良利用,尚未形成一套成熟的干热岩高温钻井技术体系和指导施工的干热岩钻探技术规程,严重制约了干热岩钻探的施工效率和发展^[1-2]。解决大口径干热岩钻探的关键技术问题,特别是大口径快速、高效取芯问题,为科研技术人员提供高质量的干热岩岩心以加强对干热岩热物性、天然裂隙和可压裂性等方面的研究,快速准确探明我国干热岩分布与储量,对干热岩资源的开发与利用意义重大^[3-10]。

我国初期的干热岩勘探取芯主要采用常规转盘回转钻进技术,在钻进过程中由于干热岩具有高研磨性、高温和高硬度等特征,转盘转速低、扭矩小,钻进取芯效率低。近年来,中国石油大学(北京)、中国地质大学(北京)、西南石油大学、长江大学、中国地质调查局勘探技术研究所、北京探矿工程研究所等机构对涡轮钻具均进行了一定的研究,主要集中在提高本体性能、寿命和优化工艺。目前,我国虽已拥有外径为 240, 195, 175, 165, 127 mm 等规格型号的涡轮钻具,但国内实际钻井工作中使用的涡轮钻具仍基本依靠从俄罗斯进口或者采用美国 Smith 公司的服务。尽

管我国已经研发出一系列的涡轮钻具,但国内在深孔复杂地质涡轮钻具及工艺方面的研究进展很缓慢,主要原因是:涡轮钻类型单一,品种系列不配套,工艺研究不够深入,技术水平、使用范围及效果与国外差距较大,特别是在深井高温硬岩工况下,涡轮钻具全面钻进工艺在我国的研究和应用都较少,严重制约了孔底涡轮动力钻具的发展,特别是在干热岩取芯钻进方面的应用研究尚处于空白阶段。

为此,课题组将新研制的 $\Phi 127$ mm 涡轮钻具,在福建漳州 HDR-1 井和青海共和 GR1 井分别进行了干热岩钻井取芯工艺研究,干热岩“转盘+涡轮钻具+KT-140 取芯钻具”复合取芯钻进工法和器具经受住了孔底 236 °C 高温考验,钻获了高质量岩心,从而为进一步完善干热岩涡轮钻具复合取芯钻井技术提供了数据、经验和借鉴。

1 涡轮钻具工作原理及设计

1.1 涡轮钻具工作原理

涡轮钻具是一种依靠钻井液驱动的孔底动力钻具,其物理基础是液力驱动的欧拉方程。涡轮钻具一般包括涡轮节和轴承节。涡轮节是涡轮钻具的动力部件,在涡轮节内安装有多级涡轮。常规涡轮叶片设计中转子和定子叶片形状相同但弯曲方向相反。工作时,钻井介质在泥浆泵作用下进入涡轮马达内,经定子导流后以一定的方向和速度进入转子,可将钻井介质的动能转变为机械能,驱动转子并带动涡轮轴回转,从而带动下方连接的取芯和碎岩工具(图 1)。

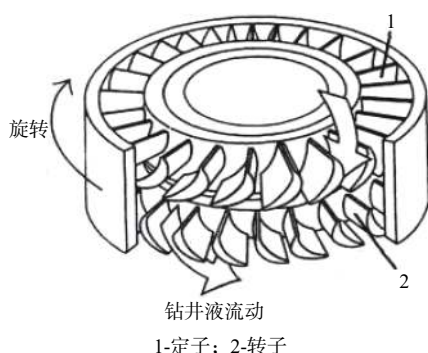


图1 单一涡轮结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a single turbine structure

根据干热岩钻井高温、高硬度、高研磨工况的应用需要,首先确定了涡轮钻具的主体结构方案和初始设计目标,之后分别对涡轮节和支承节进行了结构设计。在涡轮节设计过程中包括涡轮叶片叶形设计、涡轮叶片级数设计、涡轮节节数设计、涡轮主轴、外壳设计等,经过数值模拟、台架试验后,对涡轮叶片水力性能进行了验证和优化。在支承节结构设计中主要包括推力轴承及扶正轴承设计、主轴设计、外壳设计等,还包含联轴器设计等,主要通过对轴承型式进行设计,提高承载力和工作寿命,在设计过程中要对涡轮钻具的叶片、主轴关键部件进行材料优选和强度校核,确保井下工作的安全性。在空间尺寸确定的情况下,涡轮钻具设计的核心是叶片设计。

按轴承工作原理并结合干热岩钻井的需求,对涡轮钻具的止推轴承进行了优选。因聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact,简称PDC),止推轴承因不含橡胶件为全金属件而被引入了涡轮钻具,以解决在钻井中遇到的传统止推轴承不适用于高温和高磨蚀环境的问题,该类轴承已经普遍应用到高速高温涡轮钻具。

1.2 涡轮钻具配套钻头设计原则

在硬地层钻进过程中,涡轮钻具的性能既与钻进参数相关,同时也与钻头、钻具、辅助设备的设计与选型相关,为此根据其工作需要对其钻头、钻具进行有针对性的研究和选型。

在深孔钻探中常用的钻头主要有牙轮钻头、PDC钻头和金刚石钻头。不同型式钻头的破岩原理和破岩方式不同。在破岩过程中,牙轮齿压入地层破碎;PDC钻头主要利用了岩石剪切强度低的弱点,PDC复合片刃口切入地层,在扭矩作用下回转并实施破岩,但是该种破岩方式要求上部钻具组合可向PDC钻头传递足够扭矩,才能够满足剪切破岩的需求(图2)。

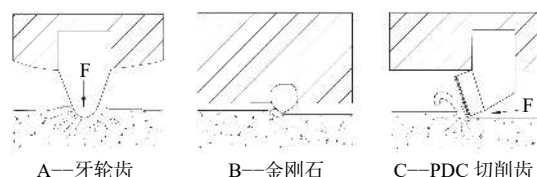


图2 三种不同的破岩方式

Fig.2 Three different ways of breaking rock

根据PDC钻头和金刚石钻头的工作原理,一般情况下,较软的地层可以采用PDC钻头,针对硬岩地层设计的涡轮钻具其工作转速较高,可选择孕镶金刚石钻头作为涡轮钻具配套钻头。

1.3 涡轮取芯钻具设计原则

硬岩取芯钻具的设计要符合以下原则:首先要满足水力通道要求,其次要避免钻具在取芯工作过程中受到振动冲击影响取芯效果,同时采用降低摩阻及保护岩心的措施提高采取效率。根据取样钻具的实际需求,采用单动双管(三层管)结构,在钻具外管受涡轮驱动回转的过程中内管本身不转动,避免外部钻具振动影响岩心采取。钻具内部设计水力流道,既要保证为钻头提供充分的水力,同时在钻进的过程中避免冲刷岩心。为此,在钻具结构设计过程中,根据涡轮钻具的流道面积,设计钻具的流道。

1.4 涡轮钻具工作条件

涡轮钻具的使用效果和使用时间,与现场工况以及配套技术密切相关。针对涡轮钻具深孔钻探取样,其工作条件如下:

(1) 钻井液

涡轮钻具对泥浆密度无特别要求,对泥浆密度没有限制。但是,压降与泥浆密度息息相关,随着泥浆密度增加,流量应适当减小,以避免损伤钻具及其他泥浆设备。一般要求泥浆密度不大于 1.3 g/cm^3 。

为减小涡轮钻具磨损,钻井液固相含量必须控制。按照行业惯例标准,含砂量应小于0.3%。加重剂禁用铁矿粉,堵漏材料颗粒直径要求低于2 mm。井队应配备离心机、泥浆清洁器等固控设备。

(2) 井底温度

本次设计的涡轮钻具为全金属材质,抗温性能好,产品的最高工作温度为 250°C 。

(3) 马达流量

涡轮钻具工作时,钻头的转速、扭矩与通过马达的输入流量相关。流量较小时,转速随之下降,输出功率不够,涡轮钻具就无法正常工作;对于钻具应在推荐流量范围内可发挥其最优性能。如果流量偏低,

将导致马达输出扭矩严重下降。流量升高,转速、扭矩、压降随之增大。为保证转速,应适当加压,应当根据需要的流量以及钻井作业的要求,调整钻井泵的参

(4) 马达压降

涡轮钻具相比螺杆钻具其压降大,马达在工作中,大致是稳定的,但压降很高,仅钻具本身压降可高达 10 MPa。因此选择钻井泵和钻杆柱等循环通道时,一定要确保马达处于最优工作区域内,避免循环压力过大。

(5) 扭矩

涡轮钻具转速与扭矩成线性关系,可通过控制钻压(WOB),达到控制涡轮钻具输出扭矩的目的,钻压增大,扭矩增加。

(6) 钻压

涡轮钻具在井下工作,应施加足够的钻压,为钻头破岩提供足够的扭矩和适宜的转速。施加钻压的大小,可以通过观察指重表上悬重的变化确定,应当

通过逐渐增加钻压使扭矩和转速达到规定的数值,使马达最大限度地提供破岩性能。同时,应当控制钻压不能超过规定的钻压,以避免导致涡轮钻具制动。

2 应用实例

在福建漳州 HDR-1 和青海共和 GR1 钻井中为实现高质量快速取芯钻进,研究应用了“转盘+涡轮钻具”复合取芯钻进工艺。主要研究验证了涡轮钻具与 KT-140 取芯钻具的适配性和涡轮钻具与金刚石取芯钻头的匹配性;验证了高温、硬岩井况下的涡轮钻具工作特性;初步确定了涡轮钻具的取芯钻进参数,是干热岩高温深孔井下动力回转钻具驱动取芯钻头进行取芯钻进的首次成功尝试。

2.1 工艺参数

涡轮钻具干热岩复合取芯钻井工艺参数如下:

(1) 设备选型、钻遇地层与钻井结构

HDR-1、GR1 钻孔的基本情况、使用钻机型号与目的层地层(表 1)基本情况。

表 1 钻孔基本情况

Table 1 Basic conditions of drilling

钻孔	位置	孔深/m	孔底温度/℃	钻机型号	目的地层
HDR-1	福建漳州	4 000	109	ZJ30/1 700	晚白垩世早期细粒花岗岩
GR1	青海共和	3 705	236	大庆130/2 250	古近系三垛组侵入粗粒花岗岩

为了满足复合钻进需要,现场配备了 3 NB-1 300 D 泥浆泵和固控设备等主要附属设备,其工作参数见表 2。现场配备 500 kW 变频器一台,用于驱动转盘电机,以

便涡轮复合钻进取芯时降低转盘转速。转盘原始最低转速 58 rpm,使用变频器后最低转速降至约 20 rpm,相对更适合复合钻进。

表 2 主要附属设备

Table 2 Main ancillary equipment

设备	参数						
现场主要附属设备	缸径/mm	140	150	160	170	180	190
	排量/(L·s ⁻¹)	28.16	32.32	36.78	41.51	46.54	51.85
3NB-1300D 泥浆泵	压力/MPa	31	27	24	21	19	17
冲程: 305 mm; 冲数: 120 spm; 标配电机: 956 kW							
固控设备	振动筛 1 台型号: ZSL×1.15×2-2; 离心机 1 台型号: LW450-842N						
涡轮钻具规格参数	钻具外径 132 mm, 涡轮长度 6.5 m, 支撑节长度 1.6 m, 额定排量 15 L/s, 制动扭矩 900 N·m						

HDR-1 井与 GR1 井现场测试 $\Phi 127$ mm 涡轮钻具要求正常工作排量为 12 ~ 15 L/S, 调整现场 3 NB-1 300 D 泥浆泵, 使泵的理论排量达到约 13 L/S, 以匹配涡轮钻具正常工作排量。

HDR-1 井与 GR1 井取芯段钻井结构基本信息见表 3。

(2) 钻柱与取芯钻具组合

干热岩 HDR-1 井钻柱组合: $\Phi 150/95$ mm KT140 取

芯管×1 根+ $\Phi 127$ 涡轮钻具×1 根+ $\Phi 178$ mm 钻铤×1 根+ $\Phi 215$ mm 扶正器×1 根+ $\Phi 165$ mm 钻铤×1 根+ $\Phi 159$ mm 钻铤×4 根+ $\Phi 89$ mm 钻杆+ $\Phi 127$ mm 钻杆×*n* 柱^[11]。

干热岩钻井涡轮取芯钻具组合: $\Phi 127$ mm 涡轮钻具+KT140 取芯钻具+152 mm 孕镶金刚石钻头入井实验。

(3) 取芯钻进参数

涡轮钻具恒排量、恒压取芯试验: 在泥浆泵排量 12 L/s (15 L/s) 的情况下, 钻压以 3 kN 为梯度, 从 50 kN

表 3 目的层钻孔结构
Table 3 Borehole structure in the target layer

井号	开钻次序	井深/m	钻头尺寸/mm	套管尺寸/mm	钻机型号	取芯段岩性
HDR-1	三开	2 860	215.9	177.8	ZJ30/1700	晚白垩世早期细粒花岗岩
	四开	4 000	152.4	—		
GR1	三开	3 361	215.9	177.8	大庆130/1700	古近系三垛组侵入中粗粒花岗岩
	四开	2 705	152.4	—	大庆130/2250	

逐步提高至涡轮钻制动, 观察并记录泵量、泵压、扭矩、机械钻速等工程参数; 在恒排量试验的基础上, 以最优机械钻速为标准, 选定恒钻压试验基本钻压值。在保持该钻压不变的情况下, 以 0.5 L/s 的梯度增加泥浆泵排量, 观察并记录泵量、泵压、扭矩、机械钻速等工程参数^[12-20]。

2.2 干热岩复合钻进取芯(以 HDR-1 井为例)

2.2.1 涡轮取芯钻具准备

涡轮钻具长度为 8.02 m。检查涡轮钻具, 涡轮钻具外管良好, 无损坏情况, 上下端丝扣完好, 外壳螺纹无松动迹象。放平涡轮钻具, 用手转动输出轴, 可轻松转动, 轴承间隙正常。涡轮钻具与 165 mm 钻铤间使用转换接头(NC50-NC38)连接。

用自由钳人工拧紧内总成连接螺纹, 并调整卡簧座与钻头内台阶间隙至约 10 mm。考虑到涡轮钻具的高转速特性, 建议取芯钻具外总成丝扣上扣扭矩为 4 000 (N·m)。取芯钻具长度为 4.70 m。

2.2.2 涡轮钻具井口测试与入井

涡轮钻具接入钻柱入井前应在井口开泵试验其工作情况。由于泥浆泵并未配置变频器, 以固定排量井口试压, 涡轮运转稳定, 泵压 10 MPa, 孔口工作正常后方可入井工作。

2.2.3 涡轮钻具入井取芯

(1) 循环探底

下钻离孔底 1 m 左右开泵循环, 泵压 16 MPa, 取芯前进行探底并校正指重表, 大钻压开始钻进。

(2) 大钻压钻进

根据现场螺杆钻具取芯经验, 以较大钻压钻进(40 kN), 开始以 30~35 kN 的钻压钻进, 历时 1.33 h, 钻进井段 2 812.05~2 812.23 m, 进尺仅 0.18 m。具体参数: 钻压 25~35 kN, 转盘转速 38 rpm, 泵压开始为 14 MPa, 循环开后稳定为 13.5 MPa。

(3) 大钻压→小钻压过度

因大钻压进尺缓慢, 判断为涡轮输出转速不稳定, 后刹住主绞车, 释放钻压, 钻压逐渐降至 0~5 kN, 泵压逐渐上升至 15.5 MPa, 根据台架试验情况, 判断

此工况为涡轮钻具高效率工作工况, 转速约 800 rpm。该过程历时 10 min, 井段 2 812.23~2 812.27 m, 进尺 0.04 m。具体参数: 钻压 0~25 kN, 逐渐降钻压, 转盘转速 38 rpm, 泵压 13.5~15.5 MPa, 且表现为逐渐上升。

(4) 小钻压钻进

钻压维持在 0~5 kN, 泵压 15~15.5 MPa, 机械钻速明显提高, 井深进尺 2 812.27~2 812.96 m, 进尺 0.69 m, 机械钻速 1.03 m/h, 其中约 20 min 进尺 0.44 m, 机械钻速达 1.32 m/h。该过程历时 40 min, 井段 2 812.27~2 812.96 m, 进尺 0.69 m。具体参数: 钻压 0~5 kN, 转盘转速 38 rpm, 泵压 15~15.5 MPa。

(5) 割心提钻

该过程进尺 0.2 m, 历时 20 min, 钻速 0.6 m/h。

(6) 出芯和钻具检查

提钻过程中, 检查钻具, 取芯钻具提出井口, 钻头外管正常、钻具所有螺纹连接正常; 出芯, 进尺 1.5 m, 岩心长 1.35 m, 取芯率 90%。岩心顶端有研磨迹象, 岩心较完整、平整。涡轮钻具吊放至地面, 手动旋转输出轴, 不能拧动, 用自由钳轻松拧动并且旋转时无异常声响, 涡轮钻具正常。取芯钻具卡簧磨损正常, 内管下段有清晰的摩擦痕, 保径上接头下端保径部分磨损量较大, 最下端硬质合金磨损超 2 mm, 钻头底面和内外保径磨损正常, 无异常损坏^[21-22]。

2.2.4 涡轮钻具入井取芯试验工况分析

(1) 大钻压工况下几乎不进尺

开始试验阶段, 钻压较大, 进尺很慢。从试验中泵压的变化, 可以明确判断出钻压超过 25 kN 时, 涡轮钻具即转动不连续, 处于半制动状态, 进尺极其缓慢。

(2) 泵压不变增加钻压

钻压逐渐由 5 kN 增加至 25 kN, 根据大钻压钻进情况, 此时泵压应逐渐降低至 13.5 MPa, 但实际泵压仍为 15 MPa, 并且进尺很慢, 另外及时刹住主绞车后, 钻压回得很慢, 泵压变化也不明显。此时的基本情况是马达回转正常, 堵心等其他因素造成钻头未受钻压。提出钻具后, 根据出芯和钻具情况, 但取芯钻具上接头保径合金下部磨损量大, 造成了托压、马达空

转;从上提钻具释放钻压后进尺加快及岩心的破碎形式和断茬形状来看,堵心的可能性较大。

(3)泵压降低进尺缓慢

取芯末段,泵压持续降低,进尺缓慢。提钻后发现的钻具刺漏是泵压迅速下降的原因。刺漏后,涡轮钻具的输入排量逐渐降低,功率(扭矩和转速)不断降低,表现为机械钻速降低。

(4)岩心蘑菇头

出芯后,岩心顶端一块明显磨出蘑菇头,岩心下端有约 5 cm 长的偏磨,偏磨不严重(图 3)。蘑菇头应为开始取芯钻进时,进尺慢,高转速钻具晃动所致,偏磨判断应为上提钻具释放钻压、解堵有关,与进尺工况情况吻合。



图 3 岩心偏磨和蘑菇头
Fig. 3 Core bias grinding and mushroom head

2.2.5 干热岩涡轮钻具取芯试验差异性分析

在 12.2 L/S 的恒排量情况下,钻压从 0~40 kN,涡轮钻具从空载、制动到快速钻进,初步探索和掌握了 $\Phi 127$ mm 涡轮钻具+KT140 取芯钻具+152 mm 孕镶金刚石钻头入井取芯的工作特性,初步掌握了适合现场井内条件下的钻进参数,完成了国产 $\Phi 127$ mm 涡轮钻具+KT140 取芯钻具+152 mm 孕镶金刚石钻头的首次入井试验,且井深超过 2 800 m。钻进过程证明使用自主研制的小直径涡轮钻具及改进的 KT140 取芯钻具取芯钻进是可行的,且可以获得较为可观的机械钻速。在典型的干热岩花岗岩地层中,涡轮钻高转速的输出特性得到验证,小钻压即可获得高钻速。涡轮钻具高转速的工况下,可获得完成、外表平整的岩心;由于泥浆泵的排量 12 L/S 与涡轮要求的额定排量 15 L/s 有一定的差距,未能达到挥涡轮钻的最佳输出特性;泥浆泵不能无级变频,钻机为原始的刹把式送钻方式,泥浆黏度、含沙量等都较大,无法实现涡轮钻取芯钻进的精细操作^[23-24]。

3 干热岩涡轮钻具复合钻进取芯评价

3.1 复合钻进机械钻速及取芯率

涡轮钻具复合取芯钻进工艺在干热岩 HDR-1 井和 GR1 井进行现场测试,因使用转盘+复合动力钻具的转速+扭矩双碎岩动力叠加的复合钻进工艺,与常规取芯钻进工艺相比,平均机械钻速提高 53.5%,因国产涡轮钻具为初次井下测试应用,各项技术参数仍需进一步优化;从钻具磨损和配合来看,加工精度和材料选型仍须进一步提高;HDR-1 井为细粒高研磨性花岗岩且井底温度相对较低,GR1 井为粗粒中低研磨性花岗岩且孔底温度较高,孔底岩石因循环液和孔底温度温差较大而产生温度蠕变和裂隙加之研磨性较低,更易于碎岩,所以 GR1 井平均机械钻速均比 HDR-1 井高,其中常规钻进提高了 12.6%、复合钻进提高了 14.5%。具体取芯技术指标对比见表 4^[25-26]。

表 4 涡轮复合取芯钻进与常规取芯钻进对比
Table 4 Comparison of turbine composite coring drilling and ordinary coring drilling

井号	取芯钻进方式	取芯次数	取芯进尺/m	平均机械钻速/(m·h ⁻¹)	岩心采取率/%
HDR-1	常规	25	75	1.03	73.1
	复合	6	15	1.52	74.4
	对比提高	—	—	0.49	1.3
GR1	常规	20	60	1.16	82.2
	复合	5	13	1.74	83.6
	对比提高	—	—	0.58	1.4

3.2 取芯钻头的适配性

涡轮取芯钻具组合在干热岩 HDR-1 井与 GR1 井现场实际钻进时,取芯机械钻速虽然大幅提高,但孕镶金刚石取芯钻头与高转速涡轮钻具以及高温高研磨性地层的适配性较差,使用寿命和平均进尺明显缩短,仍须进一步加大孕镶金刚石取芯钻头的优选和改进,尤其是在高温硬岩工况下钻头胎体的耐研磨性和水口设置的科学性,具体指标对比见表 5^[27-29]。

表 5 钻头使用情况
Table 5 Usage of drill bits

使用地点及井号	取芯钻进方式	钻头转速/rpm	单个钻头平均取芯进尺/m
福建漳州HDR-1	常规	93	12.5
	复合	550	5.9
	对比	—	使用寿命、进尺缩短
青海共和GR1	常规	93	13.6
	复合	550	6.3
	对比	—	使用寿命、进尺缩短

4 结论

(1) “转盘+涡轮钻具”复合取芯钻进工艺与常规取芯钻进工艺相比, 平均机械钻速提高 53.5%, 国产涡轮和取芯钻具及钻头均经受住了孔底 236 ℃ 的高温考验, 实现了高质量快速取芯; 由于现场条件所限, 泥浆泵排量不能无级改变, 原定恒钻压变排量试验未能实施。在恒排量的情况下, 钻压从 0 ~ 40 kN, 涡轮钻具从空载到制动, 做了充分的取芯试验, 圆满完成了 $\Phi 127$ mm 涡轮钻具+KT140 取芯钻具+152 mm 新型孕镶金刚石钻头入井试验的任务。

(2) 无橡胶原件的涡轮钻具采用了新材料和新结构, 便于现场连接和高温条件下作业, 具有中高速大扭矩较低压的技术优点, 叶片类型和数量适应泥浆比重和压力限制, 更适应深井、超深井, 机械钻速比转盘转速大幅度提高, 降低了扭矩、减小了阻力, 有助于大大降低钻柱的卡钻事故, 可直接降低钻井成本, 具有极高的经济效益, 对高温干热岩钻井提供了技术支撑。但因进口涡轮钻具及孕镶金刚石钻头价格昂贵, 应加快对涡轮钻具及其适配取芯钻头的国产化研发并逐步降低使用成本。

(3) 涡轮钻具的转子作定轴转动不会引起离心惯性力和横向振动, 可获得高质量的井眼轨迹, 特别是在取芯钻进中易于吃心从而提高了取芯速度和取芯率。涡轮钻具特性与螺杆钻具不同, 涡轮钻具为全金属结构, 具有良好的抗高温性能和长使用寿命, 可在干热岩钻探中井底高温工况下广泛推广应用。

参考文献 (References):

- [1] 陆川, 王贵玲. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 13 - 21. [LU Chuan, WANG Guiling. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 13 - 21. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 董明键, 肖新磊, 边培明. 复合钻井技术在元坝地区陆相地层中的应用[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 38 - 40. [DONG Mingjian, XIAO Xinlei, BIAN Peiming. Application of compound drilling technology in terrestrial formation in yuanba area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 38 - 40. (in Chinese with English abstract)]
- [3] DERKACH N D, KRUTIK E N, KOROTAEV Y A. Gear reduction turbodrills improve drilling results[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana. Society of Petroleum Engineers, 1998: 27 - 30.
- [4] HEYWOOD C, CURRIE A J, ROBSON D, et al. Recent material and geometrical changes in impreg technology on turbinedrive lead to reduced drilling costs in hard rock[C]//SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. Dubai, United Arab Emirates. Society of Petroleum Engineers, 2005: 12 - 14.
- [5] REYNOLDS S D, MILDREN S D, HILLIS R R, et al. The in situ stress field of the Cooper Basin and its implications for hot dry rock geothermal energy development[R]. PESA Eastern Australian Basins Symposium II, 2004, 431 - 440.
- [6] LANGILLE P, DEEN C A, KLASSEN J. Minimizing risks, maximizing on-bottom drilling time: turbodrilling with impregnated bits improves efficiency and circumvents trouble time, southern Oklahoma[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. Amsterdam, The Netherlands. Society of Petroleum Engineers, 2009: 17 - 19.
- [7] ALBRECHT M, FEROZE N, CARRILLO G, et al. Innovative solution for drilling pre khuff formations in Saudi Arabia utilizing turbodrill and impregnated bits[C]//SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Manama, Bahrain. Society of Petroleum Engineers, 2009: 15 - 18.
- [8] BAHRAMI D, DANKO G, FU P, et al. Poroelastic and self-propped single fracture THM models for EGS studies [C]//Proceedings of Fortieth Workshop On Geothermal Reservoir Engineering. California: Stanford University Press, 2015: 1 - 20.
- [9] BROWN D W, DUCHANE D V, HEIKEN G, et al. The enormous potential for hot dry rock geothermal energy[C]//Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 17 - 40.
- [10] DE SIMONE S, VILARRASA V, CARRERA J, et al. Thermal coupling may control mechanical stability of geothermal reservoirs during cold water injection[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2013, 64: 117 - 126.
- [11] FRIDLEIFSSON G Ó, ELDERS W A. Successful drilling for supercritical geothermal resources at reykjanes in SW Iceland. GRC Transactions[R]. 2017: 1095 - 1107.
- [12] MIT-led Interdisciplinary Panel. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century [R]. Idaho: Idaho National Library, 2006: 1 - 255.
- [13] FRIDLEIFSSON I B, R BERTANI, E HUENGES, et al. The possible role and contribution of geothermal energy to

- the mitigation of climate change[C]//Hohmeyer O, Trittin T. IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources Proceedings. Luebeck, Germany: IPCC, 2008: 59 – 80.
- [14] BERTANI R. Geothermal generation in the world 2005-2010 update report [C]// WGC Technical Programme Committee. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia: WGC, 2010: 8.
- [15] GENTER, A N CUENOT, B MELCHERT, et al. Main achievements from the multi-well EGS Soultz project during geothermal exploration from 2010 and 2012 [C]// Proceedings of EGC 2013. Italy: EGEC. 2013: PS1 – 01.
- [16] LEAT P T. Geological evolution of the trachytic caldera volcano Menengai, Kenya Rift Valley[J]. *Journal of the Geological Society*, 1984, 141(6): 1057 – 1069.
- [17] 成海, 郑卫建, 夏彬, 等. 国内外涡轮钻具钻井技术及其发展趋势[J]. *石油矿场机械*, 2008, 37(4): 28 – 31. [CHENG Hai, ZHENG Weijian, XIA Bin, et al. The development trend of turbodrilling technology[J]. *Oil Field Equipment*, 2008, 37(4): 28 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘新义, 张东清. 川东北地区探井快速钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2008, 36(3): 37 – 40. [LIU Xinyi, ZHANG Dongqing. Rapid drilling technology used in exploratory wells in northeast Sichuan area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(3): 37 – 40. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 蒋祖军, 肖国益, 李群生. 川西深井提高钻井速度配套技术[J]. *石油钻探技术*, 2010, 38(4): 30 – 34. [JIANG Zujun, XIAO Guoyi, LI Qunsheng. Technology to increase deep well drilling speed in western Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(4): 30 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 高航献, 瞿佳, 曾鹏辉. 元坝地区钻井提速探索与实践[J]. *石油钻探技术*, 2010, 38(4): 26 – 29. [GAO Hangxian, QU Jia, ZENG Penghui. Research and practice to improve drilling speed in Yuanba area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(4): 26 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈天成, 白彬珍. 涡轮钻井技术适应性分析与应用探析[J]. *钻采工艺*, 2010, 33(6): 1 – 5. [CHEN Tiancheng, BAI Binzhen. Adaptability analysis of turbine drilling technology[J]. *Drilling & Production Technology*, 2010, 33(6): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 谭春飞, 蔡镜仑. 利用涡轮钻具提高深井钻速的试验研究[J]. *石油钻探技术*, 2003, 31(5): 30 – 32. [TAN Chunfei, CAI Jinglun. Trial tests for full exert advantages of turbodrill to improve ROP in deep wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2003, 31(5): 30 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李伟廷. 元坝1井超深井钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(2): 94 – 99. [LI Weiting. Ultra-deep drilling technologies used on well yuanba-1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(2): 94 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王光磊, 侯健, 于承朋, 等. 元坝1井钻井设计与施工[J]. *石油钻探技术*, 2008, 36(3): 41 – 45. [WANG Guanglei, HOU Jian, YU Chenpeng, et al. Drilling design and operation of well yuanba-1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(3): 41 – 45. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 冉恒谦, 冯起赠. 我国干热岩勘查的有关技术问题[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2010, 37(10): 17 – 21. [RAN Hengqian, FENG Qizeng. Some technical issues on hot dry rock exploration in China[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2010, 37(10): 17 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 光新军, 王敏生. 高温地热高效开发钻井关键技术[J]. *地质与勘探*, 2016, 52(4): 718 – 724. [GUANG Xinjun, WANG Minsheng. Key drilling technologies for efficient development of high-temperature geothermal resources[J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(4): 718 – 724. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 贾美玲, 蔡家品, 黄玉文, 等. 大陆科学钻探用新型镶嵌式钻头的研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2003, 30(增刊1): 289 – 291. [JIA Meiliang, CAI Jiapin, HUANG Yuwen, et al. Research on new type of inserted bits used in scientific drilling[J]. *Exploration Engineering (Drilling & Tunneling)*, 2003, 30(Sup1): 289 – 291. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 沈立娜, 阮海龙. 国内外金刚石钻头的部分技术进展[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2011, 38(5): 78 – 80. [SHEN Lina, RUAN Hailong. Some technical development of diamond bit both in China and abroad[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011, 38(5): 78 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 贾军, 张德龙, 翁炜, 等. 干热岩钻探关键技术及进展[J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 40 – 44. [JIA Jun, ZHANG Delong, WENG Wei, et al. Key technology and development of hot dry rock drilling[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19): 40 – 44. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳