

# TGQ-200RC型多工艺自动化钻机的研制与应用

岳永东<sup>1,2</sup>, 谭春亮<sup>1,2</sup>, 冉灵杰<sup>1,2</sup>, 祝强<sup>1,2</sup>, 苏兴涛<sup>1,2</sup>

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国地质调查局绿色钻探技术创新中心, 北京 100083)

**摘要:**新一轮找矿突破战略行动对钻探技术提出更高要求,利用浅钻技术在浅覆盖区进行快速查证是重要的技术手段。多工艺钻探可以为复杂地层钻探施工提供绿色高效的钻探技术支撑。围绕这一需求研制了TGQ-200RC型多工艺自动化钻机,制定了钻机的总体方案,研制了多工艺动力头、夹持拧卸装置、6自由度移摆管机构、车装集成式液压储杆库、电液控制及参数监测系统,规划了自动加减钻杆过程中多机构协同动作控制流程。实钻试验表明,TGQ-200RC型钻机钻进效率高,取样质量好,具有多工艺、机动化、自动化、数字化等特点,单次自动加减钻杆平均用时约90 s,配合无线遥控可实现孔口无人操作,有效降低劳动强度,提高施工安全性。TGQ-200RC型多工艺自动化钻机可以为构建绿色、高效、经济的快速查证钻探技术体系提供坚实支撑,为推动国内浅层钻探装备自动化升级提供有益借鉴。

**关键词:**多工艺钻机;自动化钻机;空气反循环;绿色勘查;钻杆处理系统;浅钻技术;快速查证

**中图分类号:**P634.3<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)05-0101-07

## Development and application of TGQ-200RC multi-technique automatic drill

YUE Yongdong<sup>1,2</sup>, TAN Chunliang<sup>1,2</sup>, RAN Lingjie<sup>1,2</sup>, ZHU Qiang<sup>1,2</sup>, SU Xingtao<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;

2. Technology Innovation Center of Green Drilling, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The new round of strategic action for mineral exploration breakthrough has put forward higher requirements for drilling technology, and the shallow drilling technology is of great important for rapid verification in shallow cover area. Moreover, the multi-technique drilling technology can provide technical supports for green and efficient drilling in complex formations. Based on this requirement, the TGQ-200RC multi-technique automatic drill is developed. The overall schedule of the drill is formulated, and the main components of the drill are designed such as the multi-techniques power head, clamping and unscrewing device, 6-DOF drill rod swinging mechanism, vehicle-mounted integrated hydraulic rod storage, electro-hydraulic control and parameter monitoring system. Furthermore, the process of multi-mechanism collaborative action during automatic adding and removing drill rods was planned. The field test shows that the TGQ-200RC drilli has high drilling efficiency, good sampling quality, and features of multi-technique capability, mobility, automation, and digitization, the average time for a single automatic adding or removing of drill rods is about 90s. With the wireless remote control, it can achieve unmanned operation in the wellhead, effectively reducing labor intensity and improving operational safety. The TGQ-200RC multi-technique automatic drill can provide solid support for building a green, efficient and economical rapid verification drilling technology system, and useful reference for promoting the automated upgrading of domestic shallow drilling equipment.

**Key words:** multi-technique drill; automatic drilling rig; air reverse circulation; green exploration; rod handling system; shallow drilling technology; rapid verification

收稿日期:2024-07-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.05.012

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“绿色勘查钻探应用示范”(编号:DD20240122)

第一作者:岳永东,男,汉族,1990年生,高级工程师,探矿工程专业,硕士,从事浅层钻探技术及装备的研发与应用,北京市海淀区学院路29号探工楼,442710173@qq.com。

引用格式:岳永东,谭春亮,冉灵杰,等.TGQ-200RC型多工艺自动化钻机的研制与应用[J].钻探工程,2024,51(5):101-107.

YUE Yongdong, TAN Chunliang, RAN Lingjie, et al. Development and application of TGQ-200RC multi-technique automatic drill [J]. Drilling Engineering, 2024,51(5):101-107.

## 0 引言

在勘查工作中,利用浅钻技术采集样品分析测试,可精准查明隐伏基岩顶面埋深、不同岩性物质组成及接触关系,快速验证物化探异常,准确圈定矿体、计算储量、评估品位等<sup>[1]</sup>,是浅覆盖区等新一轮找矿突破战略行动重点调查区勘查工作不可或缺的重要技术手段。通过高质量践行绿色勘查实现找矿突破,对钻探技术提出了更高要求,在复杂地层钻探施工中,常规岩心钻探遇到生产效率低、孔内事故多、施工成本高等系列问题<sup>[2]</sup>,多工艺钻探是一种以满足地质要求、提高钻探效率为主要目的,集成空气钻进、冲洗液钻进、无循环钻进等多种钻探工艺技术优势的实用性综合钻探技术方法,利用一套钻探设备,通过调整配套工艺器具和钻进技术参数,快速切换不同钻探工艺,实现快速高效的钻探验证,可以为浅覆盖区等区域的矿产勘查提供绿色高效的钻探技术支撑<sup>[3]</sup>。

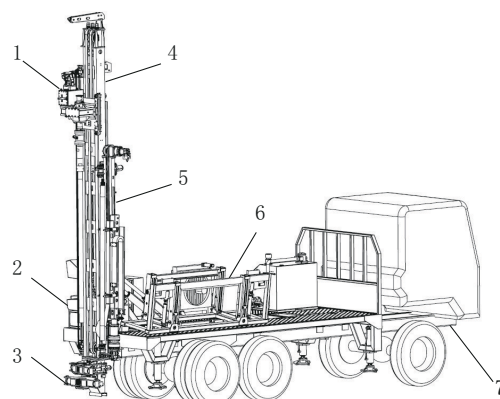
在国内地质矿产勘查中,空气反循环钻探技术(简称RC)等高效钻进技术的应用尚未普及,配套的多工艺钻探设备发展动力不足。自1980年代起,经过引进及消化吸收国外反循环钻探技术相关配套设备机具,目前国内RC钻探设备已基本发展成熟,以此为基础,国内多工艺钻机的研制也开展了相关探索,在多工艺钻进、数字化操控、自动化加减钻杆等方面取得一定进展,但总体而言国内多工艺钻探设备仍处于起步阶段,在可靠性、系列化、自动化等方面与国外先进水平仍有较大差距,尚未进一步推广应用,无法较好的满足地质矿产勘查应用需求<sup>[4-12]</sup>。

为服务支撑战略性矿产快速查证调查需求,促进多工艺钻探技术在浅覆盖区矿产勘查中的应用,推动国内浅层钻探装备自动化升级,研制了TGQ-200RC型多工艺自动化钻机,并开展了现场实钻试验,取得了良好效果。

## 1 钻机总体技术方案

围绕戈壁、荒漠、草原等浅覆盖区矿产勘查的快速查证需求,开展TGQ-200RC型多工艺自动化钻机的研制。钻机以实现气/水反循环钻进取样(心)工艺为主,结构形式为全液压动力头式车装钻机,主要由车底盘及动力单元、多工艺动力头、给进机构、孔口夹持拧卸装置、移摆管机构、液压储杆

库、电液控制系统、工具绞车、泥浆泵及其他辅助零部件等组成,钻机整体结构如图1所示,特点如下:



1—多工艺动力头;2—操纵台;3—夹持拧卸装置;4—给进机构;5—移摆管机构;6—液压储杆库;7—车底盘

图1 TGQ-200RC型钻机整体结构

Fig.1 Structure of TGQ-200RC drill

(1)多工艺。钻机可实现空气正/反循环取样、水力反循环取心、金刚石回转钻进等多种钻进工艺,克服单一钻探技术适用范围有限等缺点,有利于解决钻探施工复杂问题,提升钻探施工效率。

(2)机动化。钻机采用六驱卡车底盘装载,主、辅设备集中在一台车上,机动性强,搬迁运移方便快捷,钻机动力取自车底盘,简化配置,结构紧凑。

(3)自动化。针对反循环钻进采用的双壁钻杆质量大,起下钻时人工加减钻杆劳动强度大、效率低且存在较大安全隐患的问题,研制配套的集成式钻杆处理系统,实现机械化、自动化拧卸、移摆、排放钻杆,降低劳动强度。

(4)数字化。钻机控制系统机电液一体化技术集成,构建基于PLC的数字化操控监测系统,实现对钻机的电液比例控制、参数实时监测与存储,并可实现远程遥控操作。

结合不同施工工艺的参数需求,考虑钻机功能与工艺的匹配性,经过设计选型,最终确定钻机主要技术参数如表1所示。

## 2 钻机主要结构的研制

### 2.1 多工艺动力头

传统地质钻机的动力头多数针对一种钻进工艺研制,若要实现多工艺钻进通常采用更换动力头甚

表1 TGQ-200RC型钻机主要技术参数

Table1 Main technical parameters of GQ-200RC drill

序号	项目	参数
1 钻进能力	钻杆规格	Ø89 mm
	钻进深度/m	200
2 动力系统	发动机功率	220 kW@ 2300 r/min
	低速转速/(r·min <sup>-1</sup> )	0~113
3 多工艺动力头	低速扭矩/(N·m)	7000
	高速转速/(r·min <sup>-1</sup> )	0~736
	高速扭矩/(N·m)	1080
	给进行程/mm	4000
4 给进系统	最大提升力/kN	120
	最大给进力/kN	60
	钻孔角度/(°)	45~90
5 移摆管机构	最大夹持力/kN	2
6 液压储杆库	最大储杆容量/根	35
7 夹持拧卸装置	最大通径/mm	Ø168
8 液压系统	主油泵额定压力/MPa	28
	辅油泵额定压力/MPa	20
9 泥浆泵	额定压力/MPa	2.5
	流量/(L·min <sup>-1</sup> )	450

至更换钻机的方式,造成时间和成本的极大浪费<sup>[13]</sup>。多工艺动力头是钻机实现多工艺钻进的核心部件,其设计应满足利用一个动力头实现大范围的转速扭矩调控,满足不同钻进工艺的参数需求,从而仅需简单更换配套钻具、循环设备等部件即可达到快速切换钻进工艺的目的,提升钻探施工效率。

TGQ-200RC 型钻机动力头采用变量柱塞马达+变速箱+减速箱+气水盒子的结构形式,如图2所示,通过手动机械换挡+液压无级调速的方式,实现输出转速与扭矩的大范围调节。选用液控变量斜轴式柱塞马达,通过液压控制调节马达排量实现无级调速,高速变速箱实现两挡变速,速比分别为6.773、1.6,减速箱速比为2.28,动力头各模块结构紧凑、简单高效、维护方便。

## 2.2 夹持拧卸装置

传统的动力头式岩心钻机加减钻杆时,需要人工配合动力头回转实现钻杆的拧卸扣,工作强度大且有较大安全隐患,因此研制了液压钳式夹持拧卸

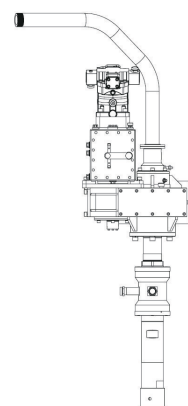


图2 多工艺动力头结构示意图

Fig.2 Structure schematic of multi-technique power head

装置,结构如图3所示,以实现机械化拧卸钻杆。

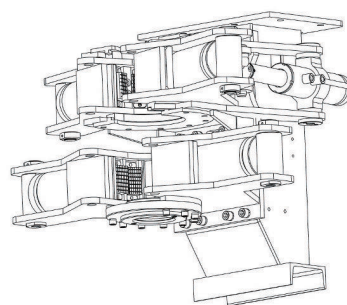


图3 夹持拧卸装置结构示意图

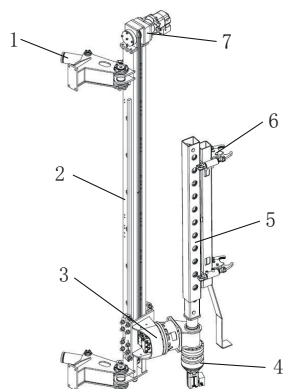
Fig.3 Structure schematic of clamping and unscrewing device

液压钳式夹持卸扣器主要由下夹持器、上卸扣器和卸扣油缸组成。下夹持器与上卸扣器在左右夹持油缸的作用下,均可独立实现对钻杆的夹紧或松开。卡瓦与钻杆的接触面为V形平面接触,卡瓦的夹持直径是具有一定范围的,适用于不同规格的钻杆,省去经常更换卡瓦的时间。在卸扣油缸的驱动下,上卸扣器可沿半圆滑轨转动一定角度。当下夹持器与上卸扣器分别夹住相连的两根钻杆时,驱动卸扣油缸,上卸扣器体沿滑轨带动钻杆转动一定角度,实现对两根钻杆间螺纹的卸扣。

## 2.3 移摆管机构

集成式钻杆处理系统由移摆管机构及液压储杆库组成,其中移摆管机构固定于钻机滑架侧方,结构如图4所示,主要由机械臂导轨、导轨旋转机构、机械臂升降机构、机械臂X轴旋转机构、机械臂

Y轴旋转机构、机械臂伸缩组件及机械臂夹爪等组成,各部件功能见表2,其具有6个自由度,可以完成对钻杆的夹持、升降、翻转、旋转、移摆等操作,位置调整灵活,适应度高,各驱动机构均配有刹车装置,启停平稳,确保装置运行安全性。



1—导轨旋转机构;2—机械臂导轨;3—机械臂X轴旋转机构;4—机械臂Y轴旋转机构;5—机械臂伸缩组件;6—机械臂夹爪;7—机械臂升降机构

图4 移摆管机构结构示意图

Fig.4 Structure schematic of swinging mechanism of the drill rod

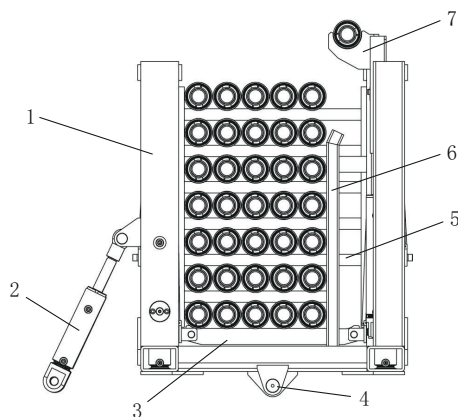
表2 移摆管机构主要部件及功能

Table 2 Main components and functions of the swinging tube mechanism

部件名称	执行元件	功能
机械臂X轴旋转机构	行走液压马达总成	实现机械臂水平状态及平行于钻机滑架状态的转换
机械臂Y轴旋转机构	行走液压马达总成	实现机械臂绕其轴线旋转
机械臂伸缩组件	液压缸	实现机械臂沿其轴向伸缩
机械臂升降机构	液压马达+滚子链条	实现机械臂沿导轨上下运动
导轨旋转机构	液压缸	实现导轨平行于钻机滑架的往复摆动
机械臂夹爪	液压缸	实现对钻杆的夹持

## 2.4 液压储杆库

液压储杆库集成于钻机底盘之上,可实现钻杆的存储与自动排放,由钻杆架、储杆库摆动油缸、钻杆升降机构、托杆机构等组成,如图5所示,结构简单、工作可靠,各运动机构由液压缸驱动,通过简单的电液控制即可实现自动化操作。



1—钻杆架;2—储杆库摆动油缸;3—钻杆升降机构;4—铰支座;5—隔层垫板;6—钻杆立挡;7—托杆机构

图5 液压储杆库结构示意图

Fig.5 Structure schematic of the hydraulic drill pipe storage

钻杆架与钻机底盘铰接,利用储杆库摆动油缸驱动储杆库以一定的角度向两侧倾斜,从而利用钻杆自身的滚动实现自动排放;每层钻杆之间由垫板间隔,亦作为钻杆滚动的轨道;当顶层钻杆处理完成后,利用钻杆升降机构将下层钻杆升起;托杆机构可将待夹持的钻杆托起,协同移摆管机构完成对钻杆的机械化操作;钻杆立挡用于防止下层钻杆在储杆库左右摆动过程中滚动,以免影响托杆机构升降。

## 2.5 电液控制及参数监测系统

钻机电液控制系统集成液压负载敏感控制及电液比例控制等技术,节能高效、控制精准,并可实现对钻机的无线遥控操作及钻进参数的实时监测<sup>[14]</sup>。

钻机液压控制系统为开式系统,根据各执行机构工作要求,回转动力头、给进及移摆管机构、液压储杆库及孔口夹持拆卸装置、泥浆泵系统、钻机其他辅助机构分别设计为独立的5个油源,各机构复合动作时不会产生相互干扰,也有利于整机效率的提高;钻机动力头回转、给进及移摆管装置等主要执行部件均采用负载敏感液压回路控制,可以提高系统抗负载变化的刚度,保证多个执行元件复合动作的可控性和稳定性,同时提高回路效率,降低系统发热<sup>[15]</sup>。钻机其他液压执行机构无需无极调速,因此选择定量泵驱动,节能高效。

给进机构多路阀中位采用Y型实现拆卸钻杆丝扣时的浮动保护,利用节流阀调节背压控制减压钻进,同时避免悬停状态动力头下滑现象,采用先



导式比例溢流阀控制推进压力,提供安全保护;滑架起降油缸回路中采用双向平衡阀控制滑架起降的速度,保证起降过程的平稳;支腿油缸、补偿油缸、机械手夹杆油缸、夹持器夹紧油缸均采用双向液压锁,避免出现油缸因设备自重等原因出现泄压、“软腿”现象;储杆库钻杆升降油缸、托杆升降油缸均采用分流集流阀,保证多油缸运动的同步性。

钻机电控系统组成结构如图6所示,主要由PLC控制器、电液比例阀、电液开关阀、远程遥控器、传感器、手柄开关、工控机等组成,并通过CAN总线链接通讯。控制器根据预定的自动控制策略或各手柄开关的输入,控制各电磁阀驱动液压执行机构动作;钻机具备操作台手动控制及无线遥控两种操纵模式,可以有效改善现场人员工作环境、提升操作人员安全保障和操作视野。

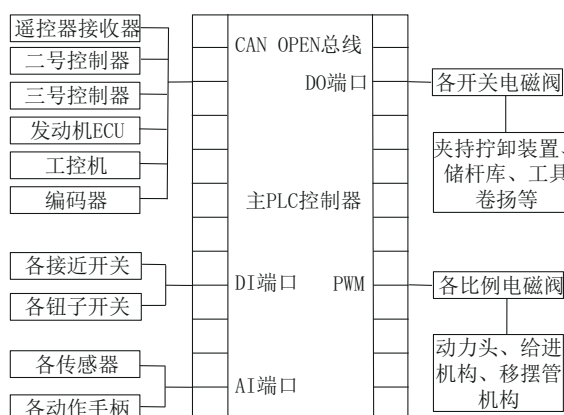


图6 钻机电控系统结构示意图

Fig.6 Structure schematic of the electric control system

配套的参数监测系统利用多种类型的传感器实现钻机发动机、液压系统状态参数及钻机倾角、钻压、扭矩、转速、孔深等钻进工程参数的实时采集监测,并自动存储于EXCEL表格中,生成钻探施工记录表,便于掌握设备运行状态及孔内钻进工况,参数监测界面如图7所示。

## 2.6 自动移摆管操作

基于钻杆处理系统及电液比例控制系统,钻机可以实现加减钻杆过程中钻杆在孔口与储杆库之间的自动化移摆,进而与动力头、孔口夹持拧卸装置协同配合,实现机械化、自动化加减钻杆,充分发挥钻杆处理系统的优势,在降低工作强度的基础上



图7 钻机参数监测界面

Fig.7 Parameter monitoring interface of TGQ-200RC drill

进一步提高施工效率。

规划了加减钻杆过程中多机构协同动作流程,其中加杆时流程如图8所示,自动减杆流程为其逆过程。为保证加减钻杆过程的可靠性,目前钻杆的移摆可一键自动化操作,拧卸扣操作则由手动操作完成。利用机械硬限位或接近开关定位的方式确定各执行机构的运动位置,辅助机械臂夹爪夹持钻杆及钻杆移摆至孔口时实现准确对。通过调试确认各执行机构运动最优速度曲线及作为判断条件的压力设定值等。

移摆管操作的自动与手动模式可自由选择,首次使用自动移摆管功能时,需手动操作移摆管机构、液压储杆库及动力头使其置于设定好的初始状态,方可开始自动流程,启动自动移摆管功能后,运转过程中可随时急停,保障施工安全。

## 3 钻机试验情况

为充分验证TGQ-200RC型钻机的性能及可靠性,钻机组装调试完成后,在内蒙古阿鲁科尔沁旗开展了野外实钻试验,顺利完成了孔深201 m的钻孔1个,试验现场如图9所示。

工作区位于大兴安岭成矿带东南缘,内蒙古中东部和松辽盆地周缘盆山结合带位置,工作区覆盖严重,景观以林地、农田和草地为主,属于典型的生态脆弱区,对于钻探等绿色勘查技术要求较高。覆盖层厚度不一,其主要有风成砂质碎屑、乌尔吉组黄土沉积、赤峰黄土湖相碎屑沉积层、山前冲洪积沉积碎屑物质等组成,基岩层则以安山岩与花岗岩为主。钻孔布设目的为快速穿透覆盖层查明隐伏基岩特征,完成物化探异常查证,并采集部分覆盖

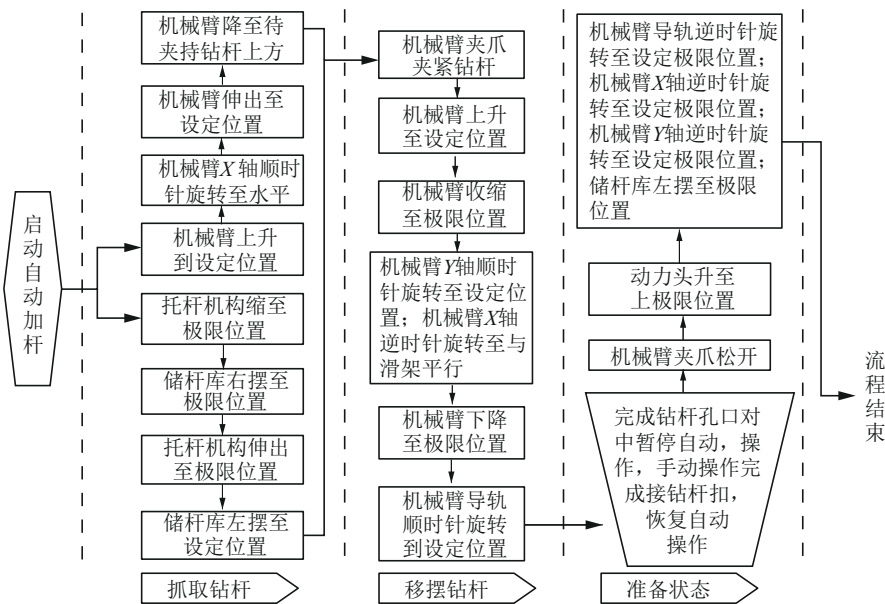


图8 加杆状态自动移摆管流程

Fig.8 Flow chart of automatic swing pipe movement in the state of adding drill rod



图9 TGQ-200RC型钻机现场试验

Fig.9 Field test of TGQ-200RC drill

层、残积层和隐伏基岩样品。

试验配套的钻机具及钻进工艺参数见表3。

采用 $\varnothing 168\text{ mm}$ 偏心跟管钻具开孔,跟管钻进穿透覆盖层下入套管护壁,之后采用 $\varnothing 136\text{ mm}$ 中空潜孔锤进行空气反循环连续取样钻进至指定深度。钻

机总体试验效果良好:运移方便快捷,半天即可完成钻机进场与钻前准备工作;钻进施工过程中钻机各模块功能正常,钻进效率高,其中RC钻进机械钻速 $12\sim 18\text{ m/h}$ ,每回次单独收集岩样,岩样采取率 $\geq 90\%$ ,层位准确,污染少;现场操作人员经过简单培训后即可单独操作钻杆处理系统完成加减钻杆流程,单次平均用时约 $90\text{ s}$ ,配合无线遥控实现孔口无人操作,有效降低劳动强度,提高了施工安全性。

4 结语

针对战略性矿产调查对多工艺钻探技术的应用需求,研制了TGQ-200RC型车装式多工艺自动化钻机并开展了实钻试验,钻机应用效果良好,有效推动了国产浅钻装备在多工艺、数字化、自动化等方面的发展,为构建绿色、高效、经济的浅覆盖区

表3 TGQ-200RC型钻机现场试验概况  
Table 3 Overview of TGQ-200RC drill field test

设备	地层	钻进工艺	配套钻具	钻进参数			
				转速/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	钻压/ kN	风压/ MPa	风量/( $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ )
TGQ-200RC 钻机+RHP825 空压机	第四系及松 软覆盖层	偏心跟管钻进	$\varnothing 168\text{ mm}$ 偏心跟管钻具+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 双壁钻杆+正反转换接头+气/水龙头	30~50	5~7	1.8~2.2	14~22
	卵砾石层、 基岩	空气反循环连续取样钻进	$\varnothing 136\text{ mm}$ 中空气动潜孔锤+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 双壁钻杆+气/水龙头				

矿产快速查证钻探技术体系提供了坚实的支撑。

(1) 钻机可实现空气正/反循环取样、水力反循环取心、金刚石回转钻进等多种钻进工艺,为复杂地层施工提供快速高效的钻探技术支撑;通过移摆管机构+车载液压储杆库+孔口夹持卸扣装置+电液比例控制+无线遥控等技术的集成,实现孔口无人操作、自动化移摆排放钻杆及机械化拧卸扣,显著降低现场工人劳动强度,提高施工安全性;参数监测系统可实时采集钻进施工过程中的各项参数,推动地质钻探施工由“经验化”向“数据化”升级。

(2) 该钻机硬件基础相对完备,后续可进一步升级一键加减钻杆功能,开展自动化、智能化钻进相关研究工作。

(3) 推动多工艺钻探技术在国内的推广应用,除升级钻机性能外,仍需进一步优化如岩样收集与缩分装置、水力反循环取心钻具等相关配套工艺器具,并建立完善相应的勘查规范与实施标准等。

## 参考文献(References):

- [1] 岳永东,谭春亮,宋殿兰,等.基于绿色勘查的浅钻技术在浅覆盖区填图中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(12):5-11.  
YUE Yongdong, TAN Chunliang, SONG Dianlan, et al. Application of shallow drilling technology based on green exploration to geological mapping in thin overburden [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(12): 5-11.
- [2] 谭春亮,宋殿兰,岳永东,等.浅层钻探技术在覆盖区填图工作中的应用研究[J].矿产勘查,2018,9(2):334-340.  
TAN Chunliang, SONG Dianlan, YUE Yongdong, et al. Application of shallow drilling technology to geological mapping in shallow overburden area [J]. Mineral Exploration, 2018, 9(2): 334-340.
- [3] 谭春亮,岳永东,渠洪杰,等.多工艺钻探技术在浅覆盖区矿产勘查中的应用研究[J].矿产勘查,2023,14(4):631-638.  
TAN Chunliang, YUE Yongdong, QU Hongjie, et al. Application of multi-process drilling technology in mineral exploration in shallow overburden area [J]. Mineral Exploration, 2023, 14(4): 631-638.
- [4] 姚建平,底衡波.空气反循环连续取样技术在地质矿产勘查中的实际应用[J].矿产勘查,2021,12(7):1635-1640.  
YAO Jianping, DI Hengbo. Practical application of air reverse circulation continuous sampling technology in geological and mineral exploration (non-ferrous system) [J]. Mineral Exploration, 2021, 12(7): 1635-1640.
- [5] 李忠,姜光忍,唐宇恒,等.RC350型空气反循环钻机的研制与工艺试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(6):42-45.  
LI Zhong, JIANG Guangren, TANG Yuheng, et al. Development and process test of RC350 air reverse circulation drilling rig [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(6): 42-45.
- [6] 邓晟辉,陆生林,殷琨,等.地质勘探空气反循环钻进技术找矿效果示范应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(3):1-6.  
DENG Mengchun, LU Shenglin, YIN Kun, et al. Application research on demonstration of air reverse circulation drilling for prospecting in geological exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(3): 1-6.
- [7] 陈勇,陆生林,黄晟辉.空气反循环取样钻探技术应用于金矿勘查的地质效果对比研究[J].钻探工程,2021,48(9):82-88.  
CHEN Yong, LU Shenglin, HUANG Shenghui. Comparative study on geological effect of air reverse circulation sampling drilling technology in Gold exploration [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9): 82-88.
- [8] 周政,何磊,朱江龙,等.XD-12R型多工艺自动化钻机的研制与应用[J].地质装备,2020,21(3):11-16.  
ZHOU Zheng, HE Lei, ZHU Jianglong, et al. Development and application of XD-12R multi process automated drilling machine [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2020, 21(3): 11-16.
- [9] 刘智荣,伍晓龙,王庆晓.FD-600型全液动力头反循环连续取样钻机的研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):62-67.  
LIU Zhirong, WU Xiaolong, WANG Qingxiao. Development and application of FD-600 full hydraulic power head reverse circulation continuous sampling drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(3): 62-67.
- [10] 王立新,聂洪岩.空气反循环钻探技术在超高海拔地区的应用[J].钻探工程,2023,50(4):64-69.  
WANG Lixin, NIE Hongyan. Application of air reverse circulation drilling technology in ultra-high altitude area [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 64-69.
- [11] 殷国乐,王艳丽,陈浩文,等.气举反循环连续取心工艺探索[J].钻探工程,2022,49(2):22-29.  
YIN Guoyue, WANG Yanli, CHEN Haowen, et al. Air lift reverse circulation continuous coring technology [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 22-29.
- [12] 伍晓龙,冯钰琦,杜垚森,等.气举反循环双壁钻具流场仿真分析[J].钻探工程,2022,49(3):83-91.  
WU Xiaolong, FENG Yuqi, DU Yaosen, et al. Simulation analysis of the flow field of the air lift reverse circulation dual wall drill tool [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 83-91.
- [13] 沈中华,熊君,臧臣坤,等.GDC系列多功能钻机车的研制[J].地质装备,2022,23(5):3-7.  
SHEN Zhonghua, XIONG Jun, ZANG Chenkun, et al. Development of GDC series multifunctional drilling rig [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2022, 23(5): 3-7.
- [14] 宋志亮,孙卫娜,何磊,等.XD-12R型多工艺自动化钻机电液控制系统的设计[J].地质装备,2020,21(3):17-21.  
SONG Zhiliang, SUN Weina, HE Lei, et al. Design of the electro hydraulic control system for XD-12R multi process automated drilling machine [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2020, 21(3): 17-21.
- [15] 谭玉山,王金友,林宝新,等.液动力头岩心钻机的负载敏感液压回路[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(3):32-34.  
TAN Yushan, WANG Jinyou, LIN Baoxin, et al. Load sensing hydraulic circuit on hydraulic driving head core drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(3): 32-34.

(编辑 王文)