

DOI: 10.11779/CJGE20230477

# 露天潜孔钻机随钻测量系统研发与应用研究

侯仕军<sup>1</sup>, 丁伟捷<sup>1</sup>, 田帅康<sup>1</sup>, 梁书锋<sup>\*1</sup>, 刘殿书<sup>1</sup>, 郭大超<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 成远矿业开发股份有限公司, 辽宁 辽阳 111299)

**摘要:** 露天采矿随钻测量技术研究目前尚处于初期阶段, 研发随钻参数测量系统是实现随钻测量技术服务于采矿工程行业的首要任务。基于 TAIYE-390-II 潜孔钻机工作原理, 确定了随钻参数, 提出了一套通用的测量方法, 并研发了测量装置。装置主要由数据采集系统、数据转换系统和数据处理系统组成, 可实现对钻进时间、钻进深度、钻进速度、钻杆轴压、回转力矩、回转速度、冲击风压和冲击风量等参数的实时准确测量、采集、计算、存储、显示和远程传输。结合某石灰岩矿钻孔数据, 提出了一种反映岩性变化的数据整合方法, 并借助钻孔成像试验分析了随钻测量技术在岩体结构识别中的可行性。结果表明钻进速度和回转力矩对岩体结构响应最为灵敏, 冲击风量和冲击风压在钻凿含孔洞的破碎岩体时表现突出, 而钻杆轴压和回转速度在岩体结构识别中作用较小。研究成果在潜孔钻机随钻测量系统研发和随钻岩性识别等方面具有重要的理论意义和应用价值。

**关键词:** 随钻测量; 潜孔钻机; 系统研发; 岩体结构; 炮孔成像

中图分类号: TU43; TD164 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)07-1509-07

作者简介: 侯仕军(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事岩石破碎和工程爆破方面的研究。E-mail: hsj131723@163.com。

## Development and application of MWD system for DTH drilling rig

HOU Shijun<sup>1</sup>, DING Weijie<sup>1</sup>, TIAN Shuaikang<sup>1</sup>, LIANG Shufeng<sup>1</sup>, LIU Dianshu<sup>1</sup>, GUO Dachao<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Chengyuan Mining Development Co., Ltd., Liaoyang 111299, China)

**Abstract:** The researches on the measurement while drilling (MWD) technology in the field of open-pit mining are still in the early stage, and the development of MWD systems is the primary task to realize the application of MWD technology in the mining engineering industry. Based on the working principles of the TAIYE-390-II hydraulic DTH drilling rig, the MWD parameters and a universal measurement method are respectively determined, and the corresponding measurement devices are developed. The devices mainly include a data acquisition system, a data conversion system, and a data processing system, which can realize the real-time and accurate measurement, acquisition, calculation, storage, display and remote transmission of parameters such as drilling time, depth, penetration rate, axial force, rotation torque, rotation speed, percussive air pressure and air quantity. With the MWD data from a limestone mine, a data integration method that can reflect lithological variations is proposed, and the feasibility of MWD in the structural identification of rock mass is analyzed through the borehole imaging experiments. The results indicate that the penetration rate and rotation torque exhibit the highest sensitivity to rock mass structures. The air quantity and air pressure are more sensitive only when drilling fragmented rock masses with cavities, while the axial force and rotation speed have limited influences on the structural identification of rock mass. The research findings are of important theoretical significance and practical value in the development of MWD systems for DTH drilling rigs and lithological identification.

**Key words:** measurement while drilling; down-the-hole drilling rig; system development; rock mass structure; borehole imaging

## 0 引言

随钻测量(measurement while drilling, MWD)指钻机在正常钻进的同时连续不断地测量有关钻孔或钻头地信息并将其记录地技术地简称<sup>[1]</sup>。该技术在油气钻井工程领域应用的已较为成熟, 相关研究文献较多,

而在采矿工程行业的应用仍处于“摸着石头过河”的早期研究阶段。

要想将随钻测量技术应用于采矿工程行业, 研发

随钻测量系统是首要任务。目前,国外知名钻机厂商Atlas Copco、Sandvick等在其出厂的部分生产钻机上配套了随钻测量系统,但出于保密目的均未公开相关技术<sup>[2]</sup>。Khorzoughi等<sup>[3]</sup>、Manzoor等<sup>[4]</sup>、Kosolapov等<sup>[5]</sup>分别基于上述系统进行了岩体力学参数确定、岩体结构参数识别、矿体可爆性评价等方面的初步研究。反观国内,韩新平等<sup>[6]</sup>、邹伟<sup>[7]</sup>分别基于回转钻机和潜孔钻机研发了随钻参数测量系统,并进行了简单应用。与此同时,学者们设计的钻孔监测系统可实现与生产钻机随钻测量系统的互补。岳中琦等<sup>[8]</sup>设计开发了钻孔过程数字监测仪(DPM系统)。李宁等<sup>[9]</sup>基于旋切破岩原理开发了室内WCS-50型旋转触探仪,并于2015年研发了现场XCY-1型旋切触探仪。王琦等<sup>[10]</sup>设计开发了基于切削破岩原理的室内多功能真三轴岩体钻探测试系统(室内TRD系统),并于2020年研制了现场本安型围岩数字钻探测试系统(现场SDT系统)。Lakshminarayana等<sup>[11]</sup>、Kumar等<sup>[12]</sup>、Kalantari等<sup>[13]</sup>分别研制了室内旋切钻进系统,可实现钻速、轴压和力矩等参数的测量。上述作者分别基于各自设计的监测系统进行了岩石强度参数确定、岩石交界面识别等应用。

露天潜孔钻机(Down-the-hole, DTH)<sup>[14]</sup>作为采矿工程行业最为常用的一种高效率生产设备,在钻孔过程中钻头与岩体直接接触和破碎岩体,隐含有大量的岩体结构和地质力学信息,若基于潜孔钻机设计一套随钻参数测量和分析系统,分析和提取钻孔内的岩体结构和力学参数,则相当于可对全作业范围内的岩体参数进行原位和定量测取,即可实时获得反映岩体质量和岩体力学参数的综合数字信息。

基于此,笔者所在团队联合成远矿业开发股份有限公司等单位合作研发了露天潜孔钻机随钻测量系统,实现了钻进速度等参数的实时连续测量、采集、计算、存储、显示和远程传输。通过在露天矿山生产现场进行应用,证明了系统的可靠性,并借助钻孔成像试验,提出了一种新的岩体结构参数随钻识别方法。

## 1 随钻参数确定

露天潜孔钻机破岩方式为冲击式,其在凿岩时将冲击器潜入孔内,冲击器内的活塞在压风作用下直接打击钻头而破碎岩石<sup>[15]</sup>。本文选择宣化泰业潜孔机械有限公司生产的TAIYE-390-II分体式液压潜孔钻机作为随钻参数测量工作平台。TAIYE-390-II潜孔钻机主要工作机构包括推进机构、回转机构和冲击机构。工作时,推进机构使钻具连续推进,并使钻具以一定的轴压力施与孔底,保证钻头始终与孔底岩石接触。回转机构带动钻具连续回转,避免钻头重复打击在相同的凿痕上。同时安装在钻杆前端的冲击器,在压风的

作用下,使活塞不断地冲击钻头,进而产生冲击力破碎岩石。压风由回转机构进入,经由中空钻杆直通孔底,把破碎的岩屑从钻杆与孔壁之间的环形空间吹到孔外,形成炮孔。TAIYE-390-II潜孔钻机完成一个钻孔需要经过多个过程,包括开孔、钻进、接卸副钻杆、停机等。TAIYE-390-II潜孔钻机主要工作参数及参考值如表1所示。

表1 TAIYE-390-II潜孔钻机参数表

Table 1 Working parameters of TAIYE-390-II DTH drilling rig

参数	参考值	参数	参考值
钻孔直径/mm	115~203	液压泵工作压力/MPa	35
钻进深度/m	21	推进/提升力/N	18000
钻杆数量/根	7	回转力矩/(N·m)	3300
单次推进/m	3	回转速度/RPM	120
滑架行程/mm	4115	工作风压/MPa	1.05~2.46

基于上述潜孔钻机破岩原理和工作原理,本文确定TAIYE-390-II潜孔钻机随钻参数包括时间、钻进深度、钻进速度、钻杆轴压、回转力矩、回转速度、冲击风压和冲击风量等8项随钻参数。各项随钻参数的定义如表2所示。

表2 随钻参数定义

Table 2 Definition of MWD parameters

名称	定义
钻进深度	沿钻孔方向钻头底部离地表的轴向长度
钻进速度	钻头钻进岩体的速度
钻杆轴压	施加于钻头上的轴压力
回转力矩	钻头转动所需要的扭矩
回转速度	钻头每分钟转动的圈数
冲击风压	作用于冲击器上的风的压力
冲击风量	作用于冲击器上的风的流量

## 2 随钻测量系统组成与原理

潜孔钻机随钻参数实时测量系统主要包括三大部分:数据采集系统、数据转换系统和数据处理系统。数据采集系统由推进磁性编码器、推进油压变送器、回转油压变送器、回转涡轮流量计、冲击风压变送器和冲击涡街流量计组成,负责随钻信号的实时采集。数据转换系统由1路CANopen数字信号采集卡(推进磁性编码器)、7路4~20mA电流信号采集卡(2路推进油压变送器、2路回转油压变送器、1路回转涡轮流量计、1路冲击风压变送器、1路冲击涡街流量计)、电缆线等组成,负责数字或模拟信号与随钻信号的转换等。数据处理系统由工控机、固态硬盘、远程传输模块、显示屏、键鼠、NAS网络存储器等组成,完成随钻信号的实时计算、本地存储、本地显示、远程传输和存储等。潜孔钻机随钻参数实时测量系统各传感器及数据采集装置安装位置如图1所示。

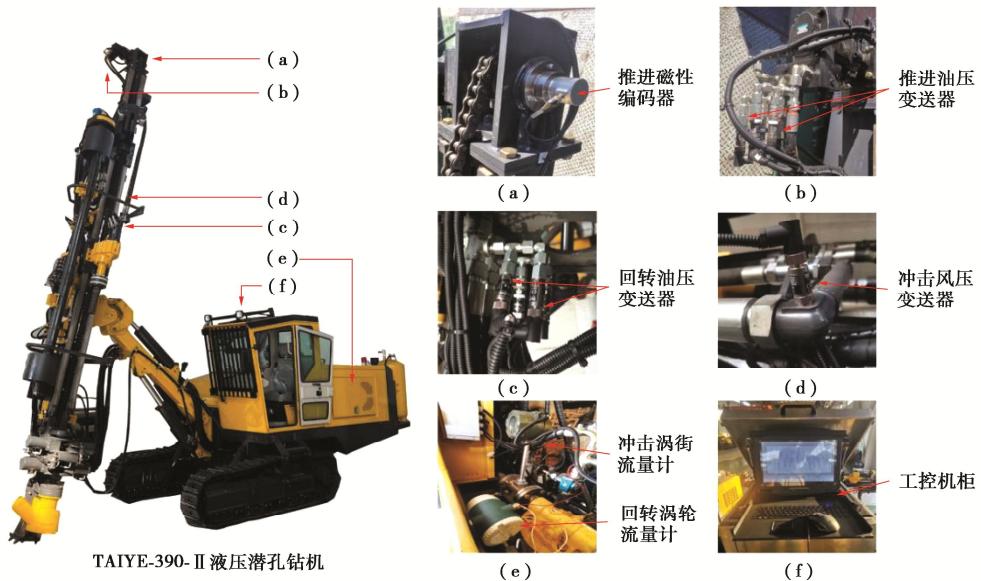


图 1 潜孔钻机随钻测量系统组成

Fig. 1 Installation position of sensors of TAIYE-390-II MWD system

其中, 推进磁性编码器安装在 TAIYE-390-II 分体式液压潜孔钻机推进马达输出轴处, 实现对钻进深度和钻进速度的测量; 2 路推进油压变送器分别安装在推进马达进油管路和回油管路口处, 实现对钻杆轴压的测量; 2 路回转油压变送器分别安装在回转马达进油管路和回油管路口处, 实现对回转力矩的测量; 回转涡轮流量计安装在回转液压阀出口附近的液压油管上, 实现对回转速度的测量; 冲击风压变送器安装在钻杆进风口附近的风管上, 实现对冲击风压的测量; 冲击涡街流量计安装在钻机进风口附近的风管上, 实现对冲击风量的测量。标定后的传感器分别以有线的形式与相应的数据采集卡连接实现电信号与物理量信号的转换, 进而在工控机中通过编程实现对上述随钻参数的计算和记录。潜孔钻机随钻参数实时测量系统原理如图 2 所示。

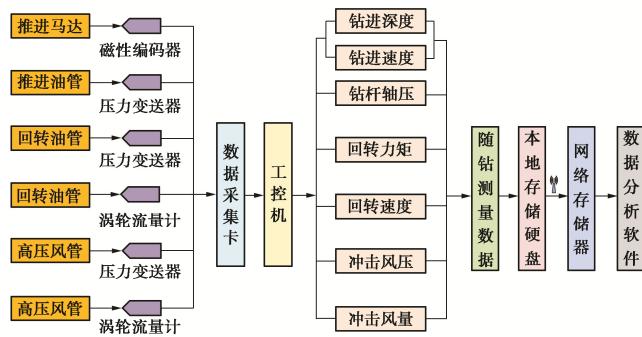


图 2 潜孔钻机随钻参数测量系统原理

Fig. 2 Principles of MWD system based on TAIYE-390-II DTH drilling rig

数据转换和数据处理系统包含的硬件设备较多, 系统专门设计了放置上述硬件的工控机柜。机柜为长方体开合式设计, 箱体为 304 不锈钢板金框折弯焊接一体化成型, 盖板位置设置防水反边槽, 接口部分带有防水防尘罩保护。机柜内部的上层为显示屏、键盘等, 下层为数据采集卡、工控机等。考虑到机柜尺寸和钻机结构特点, 机柜用螺栓固定于钻机司机室顶部。所有设备固定位均配备了减震胶垫以减少作业振动对机柜的影响。

### 3 随钻参数采集逻辑

#### 3.1 随钻参数采集流程

潜孔钻机在钻凿岩石过程中产生的随钻数据是研究所需要的, 因此钻杆提升、钻杆下降但未接触岩石、换杆和卡钻等<sup>[16]</sup>情况导致的数据应视为无效数据, 钻进深度不应在这几种情况下发生累积。因此, 实现钻进深度的自动累加是难点之一。

潜孔钻机随钻参数测量系统数据采集逻辑如图 3 所示。主要包括以下步骤: ①读取传感器采集的原始电信号; ②将采集的原始电信号转化为物理量信号; ③计算随钻参数; ④将实时采集的随钻参数与已经确定好的钻孔工作参数阈值进行比较, 判断钻进深度是否累积, 并将随钻数据按照时间序列写入.csv 文件; ⑤判断钻孔是否结束, 若没结束则继续读写数据, 若钻孔完成则保存文件并自动新建一个文件开始下一个钻孔数据的记录; ⑥将已经钻孔完成的文件通过 4G 网络上传 NAS 服务器。值得说明的是, 该系统钻孔开

始/完成是通过开关进行控制的, 相比钻进深度是否达到预设深度等方法, 该方法可实现任意孔深的随钻测量的准确控制。

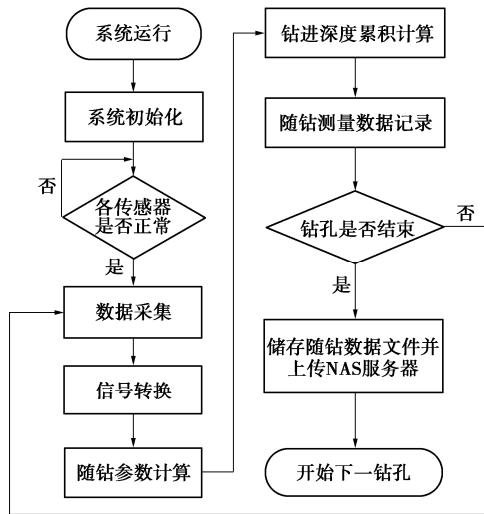


图 3 随钻测量系统数据采集逻辑框图

Fig. 3 Logical flowchart of data acquisition for MWD system

### 3.2 钻进深度计算方法

在正常钻进时, 钻头的行走历程与动力头的行走历程保持一致, 而动力头是通过链条与链轮轮齿的啮合来运动和传递动力的, 其行走历程等同于链轮的行走历程, 因此通过测量链轮的运动即可获取钻进深度。

动力头下行历程对计算钻进深度是有用的, 而上行历程对应的是提升, 因此应首先排除  $\Delta d \leq 0$  的情况。此外, 下列情况也应该排除: ①开孔时, 动力头下行使钻头接触到地面之前的历程; ②接副钻杆时, 动力头向钻杆接头位置靠拢时的下行历程; ③卸副钻杆时, 卸完一根副钻杆去接另一根副钻杆时对应的动力头下行历程; ④钻孔过程中不断提升钻头后导致的下行等。

基于此, 为了采集能够反映孔深方向的岩体性质的随钻测量数据, 本文提出如下方法计算有效钻进深度: ①  $\Delta d > 0$ ; ②  $F > F_0$ ; ③  $T > T_0$ ; ④  $P > P_0$ 。注:  $\Delta d$  为相邻两次采样间隔  $\Delta t$  期间的钻进深度;  $F$  为钻杆轴压;  $T$  为回转力矩;  $P$  为冲击风压;  $F_0$ ,  $T_0$ ,  $P_0$  分别为正常钻进时所需要的最小参数。 $F_0$  等阈值的确定方法为: 将钻机置于某一工作状态, 记录各工作参数稳定状态时的参数值, 即是此工作参数的阈值。

相应地, 钻进速度计算公式为

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{\pi D \Delta N}{2^n \Delta t} \quad (1)$$

式中:  $v$  为瞬时钻进速度 (m/s);  $D$  为链轮分度圆直径, 取 0.157659 m;  $n$  为编码器单圈分辨率, 取 13;  $\Delta N$  为  $\Delta t$  期间编码器转动的步数。

## 4 随钻测量系统现场应用

### 4.1 工程背景

辽阳千山水泥有限责任公司位于辽宁省辽阳市小屯镇, 开采矿种为水泥用石灰岩, 储量丰富, 资源可靠。地质勘查报告显示除矿层底板外, 千山矿矿体岩性较为简单, 主要为细晶灰岩、斑花灰岩和鲕状灰岩, 且夹石较少。矿区范围内的石灰岩矿层为坚硬岩层, 抗压强度较大, 岩体完整性为较完整—完整, 岩体质量为 I-II 级, 总体工程地质条件良好。

矿山采用露天深孔台阶爆破法开采, 设计台阶高度 15 m, 台阶坡面角 85°, 采用搭建了随钻参数测量系统的 TAIYE-390-II 分体式液压潜孔钻机进行穿孔工作, 穿孔直径为 120 mm, 穿孔倾角 85° 或 90°。

### 4.2 数据分析

以某钻孔工程为例, 深度序列原始随钻数据如图 4 所示, 图中标记处为接副钻杆后重新开钻产生的数据, 此部分应当予以过滤。由图 4 可以发现, 钻杆轴压 (AF) 和回转力矩 (RT) 噪音较大, 这主要是因为钻机在钻进过程中产生的振动不可避免地会带动滑架上的液压油管里的液压油发生振动; 而回转速度 (RS)、冲击风压 (AP)、冲击风量 (AQ) 等参数总体噪音较小, 可以清晰揭示数据波动规律。钻进速度 (PR) 过于灵敏, 难以直接分辨钻进过程快慢, 需要进行进一步处理。

基于以上分析, 提出了一种深度序列随钻数据整合方法, 即钻进深度每达到 2 cm 进行一次整合并输出一个确定值, 具体为: 钻杆轴压、回转力矩、回转速度、冲击风压和冲击风量是取 2 cm 范围内的各个参数的平均值, 而钻进速度是通过钻进深度除以对应时间得到的。整合后的随钻数据如图 5 (a) 所示。值得说明的是, 受上一台阶爆破扰动影响, 本台阶孔口附近的岩体无法反映原岩性质。因此, 本文对距孔口 1.5 m 范围内的随钻数据进行了剔除。相比于图 4 原始深度序列随钻测量数据, 整合后的随钻数据可以清晰显示随钻信号波动关系。钻杆轴压和回转速度是由钻机手控制的独立参数, 在钻进速度和回转力矩突变处其仍然较为平稳。此外, 在该钻孔工程中, 冲击风压和冲击风量总体也较为平稳。猜测在钻进速度和回转力矩突变处, 岩体性质发生了变化。为了验证该假设, 采用 TS-C1201H(C) 高清多功能钻孔成像分析仪对炮孔进行了成像监测 (图 6), 成像结果不仅可以区分矿体、夹矸等各种地质结构体, 也可以准确确定裂隙、破碎带、溶洞等结构的位置、发育情况及产状。在炮孔成像前, 要确保钻孔孔壁上无粉尘。图 5 (b), (c) 钻孔成像结果显示该钻孔岩性成分单一, 仅存在少数结构面。

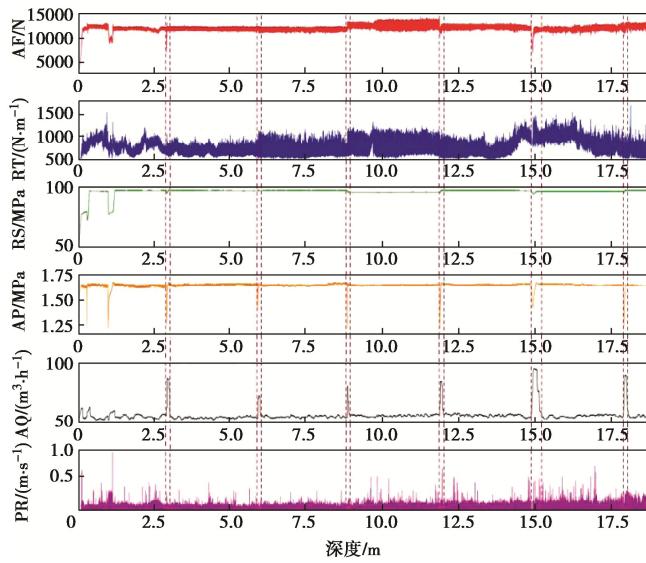


图 4 原始的深度序列随钻测量数据

Fig. 4 Raw MWD data of depth series

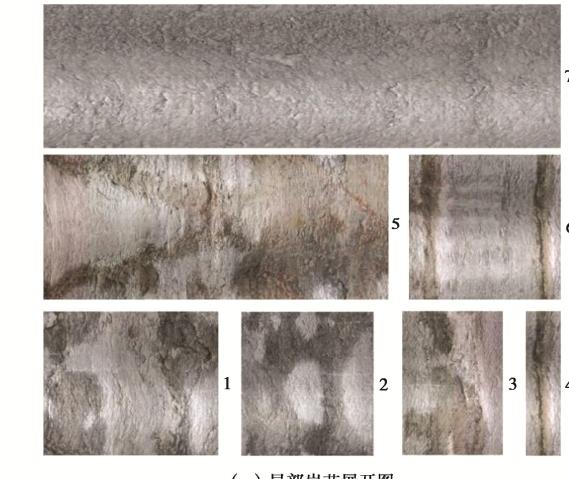
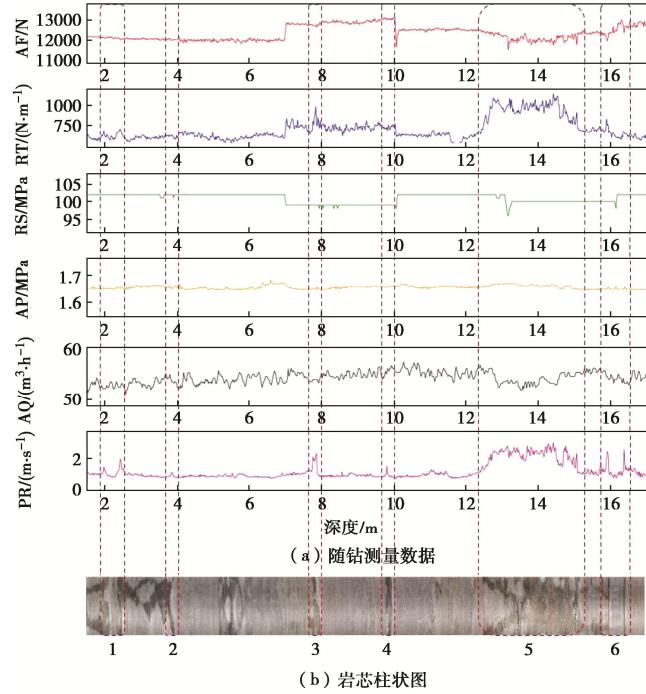


图 5 整合后的深度序列随钻测量数据及炮孔成像图

Fig. 5 Integrated MWD data of depth series and borehole imaging

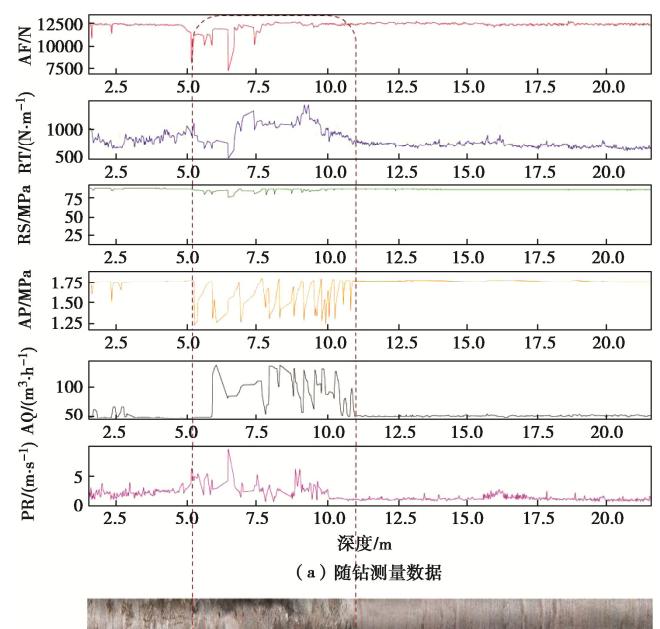


图 6 钻孔成像现场试验

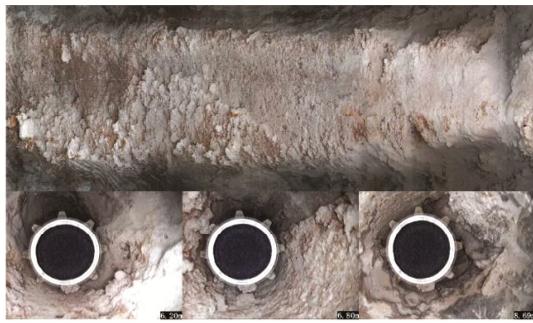
Fig. 6 Borehole imaging tests

#### 4.3 岩体结构参数随钻识别方法

为了清晰显示岩体结构变化, 对图 5 中标记的#1~#6 段三维岩体柱状图进行了局部放大, 放大后的岩体展开图如图 5 (c) 所示, 其中第 7 部分为无结构面的完整岩体展开图。可以发现, 在钻进速度和回转力矩突变处, 岩体结构均发生了变化, 这与 Manzoor 等<sup>[4]</sup>的研究结果相一致。此外, 冲击风量在该钻孔工程中总体表现的较为平稳, 仅在第 5 段对应的钻进速度和回转力矩类平台突跃处出现了平台降低。为了分析冲击风量和冲击风压能否在岩体结构参数识别中发挥作用, 本文选取了另一含有孔洞的破碎岩体钻孔工程进行分析, 与其对应的整合后的深度序列随钻数据、三维岩芯柱状图、局部展开图分别如图 7 (a) ~ (c) 所示。



(b) 三维岩芯柱状图



(c) 局部岩芯展开图及钻孔录像截图

图 7 整合后的深度序列随钻测量数据及孔洞岩体炮孔成像图

Fig. 7 Integrated MWD data of depth series and borehole imaging of cavity rock mass

由钻孔窥视结果可知该孔 5~10 m 处岩体较为破碎且一侧存在孔洞, 可以发现与其对应的冲击风量和冲击风压均表现出了明显的波动, 且冲击风量总体变大, 而冲击风压会变小。钻进速度和回转力矩表现依然灵敏。

综上所述, 在岩体岩性变化不大时, 钻进速度和回转力矩对岩体结构面响应最为灵敏, 遇到各种岩体结构面均会发生数值波动, 而冲击风量和冲击风压仅在钻凿含孔洞的破碎岩体时表现得较为灵敏。钻杆轴压和回转速度作为钻机手控制的独立性参数在岩体结构随钻识别中作用较小。

## 5 结 论

(1) TAIYE-390-II 液压潜孔钻机随钻参数包括钻进时间、钻进深度、钻进速度、钻杆轴压、回转力矩、回转速度、冲击风压和冲击风量。

(2) 潜孔钻机随钻参数测量系统主要包括数据采集系统、数据转换系统和数据处理系统, 能够实现随钻参数的实时连续测量、采集、计算、存储、显示、远程传输和存储。

(3) 潜孔钻机有效钻进深度的累积条件为①  $\Delta d > 0$ ; ②  $F > F_0$ ; ③  $T > T_0$ ; ④  $P > P_0$ 。基于此, 提出了一种能够反映岩性变化的深度序列随钻数据整合方法, 克服了原始数据受钻机振动影响和瞬时钻进速度误差大的缺点。

(4) 钻杆轴压和回转速度作为钻机手控制的独立性参数在岩体结构随钻识别中作用较小。钻进速度和回转力矩对岩体结构响应最为灵敏, 而冲击风量和冲击风压仅在钻凿含孔洞的破碎岩体时显得更为灵敏。

TAIYE-390-II 液压潜孔钻机随钻测量系统采用模块化设计, 可扩展性好、稳定性高、成本低。现场应用表明该系统耐振动、抗冲击、防水防尘效果好, 为在产钻机随钻测量系统搭建和钻机厂商生产随钻测量

钻机提供了有效的解决方案, 同时也为采矿工程师和学者通过随钻测量识别岩体结构面、评估岩体质量和可爆性提供了新方法。

## 参 考 文 献:

- [1] 刘红岐, 张元中. 随钻测井原理与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018. (LIU Hongqi, ZHANG Yuanzhong. Principle and Application of Logging While Drilling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018. (in Chinese))
- [2] 侯仕军, 丁伟捷, 田帅康, 等. 随钻测量技术在非油气工程领域的应用现状与展望[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(12): 41-49. (HOU Shijun, DING Weijie, TIAN Shuaikang, et al. Application status and prospects of MWD technology in non-oil and gas engineering field[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(12): 41-49. (in Chinese))
- [3] KHZORZOUGHI B M, HALL R, APEL D. Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(6): 859-864.
- [4] MANZOOR S, LIAGHAT S, GUSTAFSON A, et al. Establishing relationships between structural data from close-range terrestrial digital photogrammetry and measurement while drilling data[J]. Engineering Geology, 2020, 267: 105480.
- [5] KOSOLAPOV A I. Modern methods and tools for determining drillability and blastability of rocks[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 459(2): 022097.
- [6] 韩新平, 邹伟, 侯成恒. 基于 BP 神经网络的回转切削钻机凿岩速度预测[J]. 应用泛函分析学报, 2015, 17(1): 86-90. (HAN Xinpeng, ZOU Wei, HOU Chengheng. Prediction on drilling speed of rotary drilling rigs based on BP neural network[J]. Acta Analysis Functionalis Applicata, 2015, 17(1): 86-90. (in Chinese))
- [7] 邹伟. 基于潜孔钻机钻进参数的岩石硬度预测方法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015. (ZOU Wei. Study on Prediction Method of Rock Hardness Based on Drilling Parameters of DTH Drilling Rig[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015. (in Chinese))
- [8] 岳中琦. 钻孔过程监测(DPM)对工程岩体质量评价方法的完善与提升[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 1977-1996. (YUE Zhongqi. Drilling process monitoring for refining and upgrading rock mass quality classification methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 1977-1996. (in Chinese))

- [9] 李宁, 李骞, 宋玲. 基于回转切削的岩石力学参数获取新思路[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(2): 323-329. (LI Ning, LI Qian, SONG Ling. Acquiring mechanical parameters of rock based on rotational cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(2): 323-329. (in Chinese))
- [10] 王琦, 高红科, 蒋振华, 等. 地下工程围岩数字钻探测系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(2): 301-310. (WANG Qi, GAO Hongke, JIANG Zhenhua, et al. Development and application of a surrounding rock digital drilling test system of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(2): 301-310. (in Chinese))
- [11] LAKSHMINARAYANA C R, TRIPATHI A K, PAL S K. Experimental investigation on potential use of drilling parameters to quantify rock strength[J]. International Journal of Geo-Engineering, 2021, **12**(1): 23.
- [12] RAJESH KUMAR B, VARDHAN H, GOVINDARAJ M. Prediction of uniaxial compressive strength, tensile strength and porosity of sedimentary rocks using sound level produced during rotary drilling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, **44**(5): 613-620.
- [13] KALANTARI S, BAGHBANAN A, HASHEM ALHOSSEINI H. An analytical model for estimating rock strength parameters from small-scale drilling data[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, **11**(1): 135-145.
- [14] 郭勇, 周振华. 潜孔钻机的应用现状与发展趋势[J]. 矿业快报, 2008(4): 13-15. (GUO Yong, ZHOU Zhenhua. Application actualities and development trend of down-the-hole drill[J]. Express Information of Mining Industry, 2008(4): 13-15. (in Chinese))
- [15] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. (XU Xiaohe, YU Jing. Rock Fragmentation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [16] 赵宏强, 李美香, 高斌, 等. 潜孔钻机凿岩过程自动防卡钻理论与方案研究[J]. 机械科学与技术, 2008, **27**(6): 739-743. (ZHAO Hongqiang, LI Meixiang, GAO Bin, et al. On automatic anti-jamming control in the rock drilling process for a down the hole drill[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, **27**(6): 739-743. (in Chinese))

(上接 1508 页)

- [23] CUI Y F, CHOI C E, LIU L H D, et al. Effects of particle size of mono-disperse granular flows impacting a rigid barrier[J]. Natural Hazards, 2018, **91**(3): 1179-1201.
- [24] ZHANG B, HUANG Y. Effect of unsteady flow dynamics on the impact of monodisperse and bidisperse granular flow[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, **81**(2): 77.
- [25] 宋东日, 周公旦, CHOI C E, 等. 土工离心机模拟泥石流问题的相似性考虑[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2262-2271. (SONG Dongri, ZHOU Gongdan, CHOI C E, et al. Scaling principles of debris flow modeling using geotechnical centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12): 2262-2271. (in Chinese))
- [26] SONG D, CHOI C E, ZHOU G G D, et al. Impulse load characteristics of bouldery debris flow impact[J]. Géotechnique Letters, 2018, **8**(2): 111-117.
- [27] ZHANG B, HUANG Y. Impact behavior of superspeed granular flow: insights from centrifuge modeling and DEM simulation[J]. Engineering Geology, 2022, **299**: 106569.
- [28] DEM solutions, EDEM 2020.1 document[Z]. Edinburgh: Altair, 2020: 1-100 [April 9, 2023]. <https://www.altair.com.cn/edem/>.
- [29] GOODWIN S R, CHOI C E. Translational inertial effects and scaling considerations for coarse granular flows impacting landslide-resisting barriers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, **147**(12): 04021153.
- [30] LAM H W K, WONG A L. Experimental and numerical study of dynamic soil debris impact load on reinforced concrete debris-resisting barriers[J]. Landslides, 2021, **18**(3): 955-966.
- [31] KWAN J. Supplementary technical guidance on design of rigid debris-resisting barriers [R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 2012:1-88. [https://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo\\_reports/geo\\_rpt270.html](https://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo_reports/geo_rpt270.html).
- [32] LI K, WANG Y F, LIN Q W, et al. Experiments on granular flow behavior and deposit characteristics: implications for rock avalanche kinematics[J]. Landslides, 2021, **18**(5): 1779-1799.