潜孔钻机冲击频率采集系统研发与应用研究*

谢科尧[1]，侯晓倩[1]，孙远朋[1]，刘殿书[1]，屈晨亮[2]

（1.中国矿业大学（北京）力学与土木工程学院， 北京 100083；
2.北京中大爆破工程有限公司， 北京 100083）

摘要：针对露天潜孔钻机冲击频率采集问题，基于TAIYE-390-Ⅱ分体式液压露天潜孔钻机钻进声信号特征，分析了冲击频率采集系统及采集方法，在恒风压、恒轴压条件下开展钻进声学实验及炮孔窥视实验，对系统稳定性及冲击频率在岩体结构面识别的可行性进行研究。结果表明：6 kHz为冲击段波形最明显的信号优势采样频率；基于Hilbert变换、变分模态分解（VMD）及Savitzky-Golay滤波的钻进过程声信号冲击频率采集方法可准确提取钻进实时冲击频率，误差控制在1 Hz；冲击频率对岩体结构响应较为明显，在遇到各类结构面时，冲击频率数值会下降1～3 Hz。研究结果在潜孔钻机冲击频率采集和岩体结构面识别等方面具有重要的理论意义和应用价值。

关键词：潜孔钻机；声信号；冲击频率采集系统；岩体结构

中图分类号：TD164　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)01-0222-08

Development and Application of Impact Frequency Acquisition System for Down-The-Hole Drill Rig

XIE Keyao[1], *HOU Xiaoqian*[1], *SUN Yuanpeng*[1], *LIU Dianshu*[1], *QU Chenliang*[2]

(1.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2.Beijing Zhongda Blasting Engineering Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Regarding the problem of collecting the impact frequency of open-pit down-the-hole drill rigs, based on the characteristics of the drilling acoustic signals of the TAIYE-390-Ⅱ split hydraulic open-pit down-the-hole drill rig, the impact frequency acquisition system and acquisition method were analyzed. Under the condition of constant wind pressure and constant axial pressure, drilling acoustic experiment and blasthole peep experiment were carried out to study the stability of the system and the feasibility of impact frequency in the identification of rock mass structural plane. The results show that 6 kHz is the most obvious signal dominant sampling frequency of the impact section waveform. The impact frequency acquisition method of acoustic signal in drilling process based on Hilbert transform, variational mode decomposition (VMD) and Savitzky-Golay filter can accurately extract the real-time impact frequency of drilling, and the error is controlled at 1 Hz. The impact frequency has a relatively obvious response to the rock mass structure. When encountering various structural planes, the value of the impact frequency will decrease by 1-3 Hz. The research results have important theoretical significance and application value in aspects such as the collection of the impact frequency of down-the-hole drills and the identification of rock mass structural planes.

Key words: Down-the-hole drill rig, Acoustic signal, Impact frequency acquisition system, Structural of rock mass

0 引言

随着采矿技术飞跃发展，潜孔钻机以其高效、可靠等特点广泛应用于矿山、铁路等工程中。潜孔钻机通过潜孔冲击器活塞冲击钻头以及钻头自身连续回转实现钻孔作业[1-2]。因此，冲击器性能差异在很大程度上决定着钻机破岩效率的高低，通常采用冲击频率、冲击功与风耗量这三个基本指标对冲击器技术性能进行解释。

有研究表明，钻进速度和回转速度等钻进参数与冲击频率存在密切关系[3-4]，合理控制冲击频率的大小对于提高钻机的钻进速度具有显著的影响。因此，实时监测钻进过程中的冲击频率变得十分重要。通过实时检测冲击频率，操作人员可以及时调整钻机的工作参数，以确保钻机在最佳的冲击频率范围内工作，从而最大程度地提高钻进速度和效率。这种实时

* **收稿日期**：2024-03-26
作者简介：谢科尧（1999—），男，江西上饶人，硕士研究生，主要从事工程爆破与岩石破碎方面的研究。E-mail：xiekeyao1999@163.com
通信作者：刘殿书（1960—），男，山东潍坊人，教授，主要从事工程爆破与岩石破碎方面的研究与教学工作。E-mail：a1912903545@163.com

检测冲击频率的做法可以为钻孔作业提供必要的指导和支持,有助于实现更高效、更稳定的钻探操作[5]。

钻孔操作中,钻头对岩体施加冲击和旋切作用时,会引发声信号[6]。这些声信号蕴含着丰富的信息[7-9],对于进行矿山爆破具有重要的参考价值,能够提供必要的判断依据,因此日益引起人们重视。学者们通过对钻机钻进过程中的声学响应进行研究,深入探讨了钻进过程中产生的声信号,发现岩石钻孔时的声信号能够传递岩层构造、钻具特性等重要信息[10-14]。

同时,声信号被广泛应用于机械设备振动的信号频率分析[15-16]。与传统的加速度传感器采集振动信号相比,声信号具有诸多优势。首先,声信号的数据采集更为方便,只需在设备周围布置少量的麦克风即可获取振动数据,而不需要安装复杂的传感器系统。其次,声信号蕴含信息丰富,能够提供更全面的振动特征,包括频率、振幅、波形等,有助于更准确地分析设备状态。此外,声信号采集:设备还具有维修简单的特点,麦克风等设备相对较易于安装和更换,且不容易受到环境干扰。因此,声信号分析作为一种振动分析的手段,展现出了巨大的潜力,在工程实践中得到了广泛应用[17]。

基于此,本文研发了基于拾音器的露天潜孔钻机冲击频率采集系统,实现了冲击频率的实时采集与存储,将其应用于露天矿山生产现场,证明了系统的可靠性,并结合炮孔窥视试验分析了冲击频率用于岩体结构面识别的可行性。

1 系统组成与原理

本文选择搭建了随钻参数测量系统的 TAIYE-390-Ⅱ分体式液压潜孔钻机作为冲击频率采集平台。该潜孔钻机的随钻参数测量系统由传感器、信号采集卡以及工控机组成,可实现钻孔过程中轴压、风压等随钻信号的实时测量、转换与储存[18]。TAIYE-390-Ⅱ分体式液压潜孔钻机所配冲击器的最大冲击频率为 35 Hz,在正常工作时随岩石的硬度冲击频率在 0～35 Hz 范围内变化,冲击器转速为 30～70 r/min,耗气量为 0～20 m^3/min。

潜孔钻机冲击频率采集系统主要包括数字拾音器、数据采集卡和工控机三大部分。数字拾音器负责实时采集钻进声音信号,数据采集卡负责数字信号与声音信号的转换,工控机则负责完成冲击频率的实时计算、本地存储、本地显示等。

其中,数字拾音器安装在 TAIYE-390-Ⅱ分体式液压潜孔钻机司机室脚梯侧面板附近,实现对钻孔声音电压信号的测量。拾音器选用 TS-915E 型数字拾音器,其具体技术参数见表 1,所采集的电压范围为 0～2.5 V,灵敏度为－35 dB,可满足钻孔过程的声信号采集需求。

冲击频率采集系统原理如图 1 所示,标定后的拾音器通过数据传输线与凌华高频率动态型采集卡 PCI-9527 连接,实现声信号的数字化采集与转换,并传输至工控机中,进而在工控机中通过信号处理实现冲击频率的计算和记录。

表 1 TS-915E 拾音器技术参数

Table 1 Technical parameters of TS-915E microphone

拾音范围/m	麦克风	频率响应/kHz	采样率/K	灵敏度/dB	工作环境/℃	尺寸(长×宽×高)/mm	质量/kg
1～20(可调节)	高灵敏度的电容咪头	0.02～20	32	－35	－20～60	135×71×28	0.22

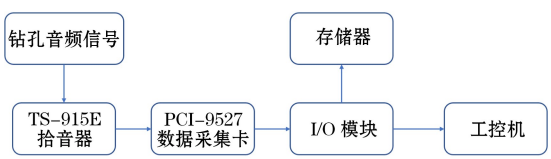


图 1 冲击频率采集系统原理

Fig.1 Principles of impact frequency acquisition systems

2 采样频率调试试验

露天潜孔钻机通常采用冲击凿岩方式进行破岩作业。在这种方式下,冲击器被送入钻孔内部,其中的活塞在压缩空气的推动作用下直接撞击钻头,以此来破碎岩石。这一过程中产生的声音呈现为连续脉冲形式,随着冲击的进行而持续产生。在声信号采样过程中,不同的拾音器采样频率所采集到的声音波形具有不同的特征,为了有效识别脉冲数量从而计算冲击频率,通过对比不同的音频电压信号采样频率,进而确定冲击段波形最明显的信号采样频率。

根据音频设备与现场钻进条件,正常钻进时风压在 17 MPa 左右,在钻孔过程中分别设定 24 kHz、12 kHz、6 kHz、3 kHz、1.5 kHz、750 Hz 6 种采样频率采集音频电压信号,选取正常钻进过程中风压稳

定段绘制不同采样频率下的波形时域图,为便于观察冲击波形,随机选取钻进时的 1 s 数据进行分析。不同采样频率下钻孔音频信号波形如图 2 所示。

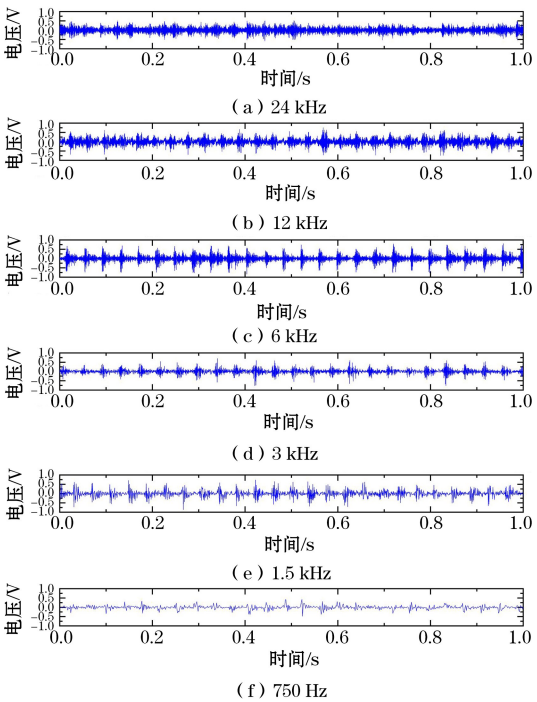


图 2 不同采样频率的钻孔声音波形

Fig.2 Waveforms of drilling sounds at different sampling frequencies

通过观察 6 种不同采样频率下记录的信号波形,在 24 kHz 与 12 kHz 的采样频率下波形中记录的信息量大,无法较好地分离出每一次的冲击段信号,而 750 Hz 的采样频率下波形无法完整地记录冲击段的信号。而在 6 kHz、3 kHz 与 1.5 kHz 采样频率下的波形对比中可以发现,6 kHz 下采集到的波形信号可以较好地分离出每一次冲击段,同时考虑到钻进声音的最大频率接近 6 kHz,因此选取 6 kHz 作为本次试验钻孔音频电压信号的优势采样频率。且其在不同深度下均可清晰记录每一次冲击时的峰值,如图 3 所示。

3 冲击频率采集方法

由图 2 与图 3 可知,钻孔声音信号中存在与冲击对应的峰值波形,该冲击频率采集系统通过结合 Hilbert 变换、变分模态分解(VMD)及 Savitzky-Golay 滤波对声音信号进行处理,并通过提取单位时间内的冲击峰值数量来计算冲击频率,冲击频率采集的原理如图 4 所示,信号处理结果如图 5 所示。

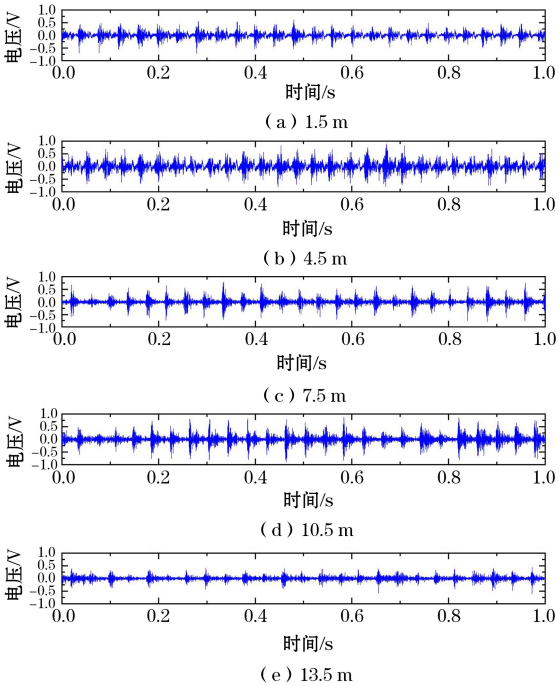


图 3 6 kHz 下不同深度的钻孔声音波形

Fig.3 Waveforms of drilling sounds at different depths under 6 kHz

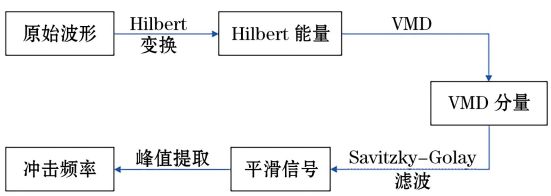


图 4 冲击频率采集原理

Fig.4 Principle of impact frequency collection

Hilbert 变换通过对信号进行 90°的相移来提取其包络线和相位信息,常用于分析信号整体特征,例如振幅变化趋势等,可以帮助理解信号的动态变化过程,对信号的分析和处理具有重要意义,被广泛应用于信号处理领域。对所采集的钻孔声音信号进行 Hilbert 变换,得到信号的 Hilbert 能量,如图 5(b)所示。

变分模态分解(VMD)通过迭代搜寻变分模型的最优解,以确定每个分解的分量中心频率和带宽。这意味着 VMD 能够将信号分解成多个具有不同频率特征的子信号。通过这种方式,VMD 能够有效地对目标信号进行去噪处理,从而提取出其中的有效信息。通过对钻孔声音信号的 Hilbert 能量进行变分模态分解,得到了包含冲击频率的 VMD 分量,

有效去除了与冲击频率无关的部分噪声信号,如图5(c)所示。

为了便于工控机对冲击频率峰值进行提取,采用 Savitzky-Golay 滤波方法对所得到的 VMD 分量进行滤波光滑,滤波后信号峰值显著,如图 5(d)所示。Savitzky-Golay 滤波可在平滑信号的同时有效地保留信号的变化信息,使得处理后的信号更加准确和可靠。

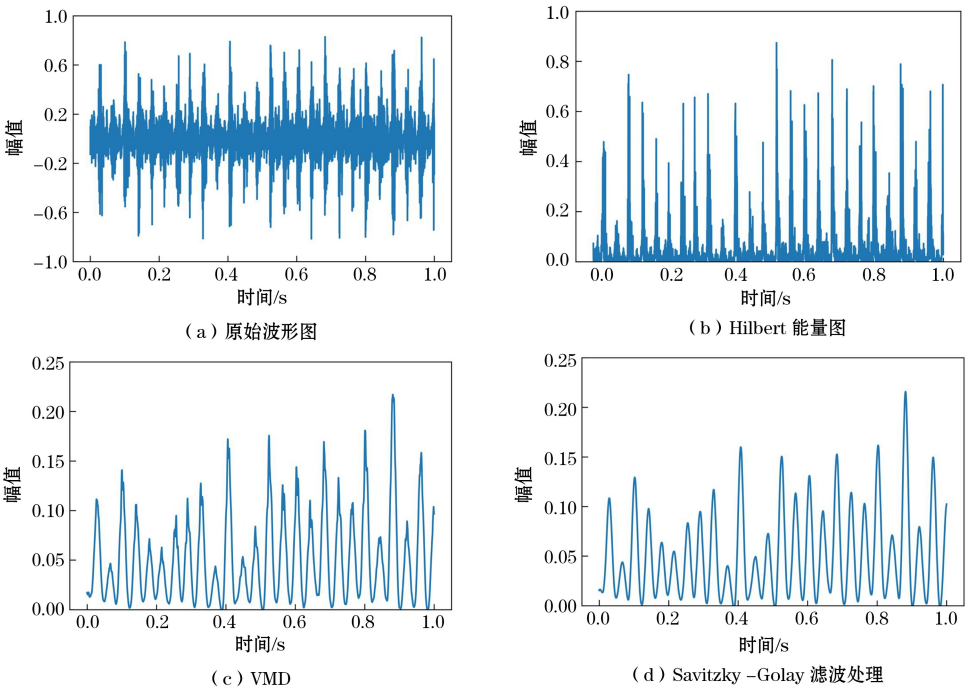


图 5 信号处理结果

Fig.5 Results of signal processing

4 采集系统现场应用

4.1 工程背景

辽阳千山石灰岩矿位于辽宁省辽阳市小屯镇,开采矿种为石灰岩,储量丰富,资源可靠。地质勘查报告显示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。该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,适合进行单一岩性的钻孔声学试验。

该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,穿孔倾角为 85°或 90°。

4.2 数据分析

以某钻孔工程为例,选取时刻 214~235 s 的钻孔声音信号,分别采用自动计算与手动提取计数的方法计算单位时间内的冲击频率,冲击频率计算结果见表2,其中手动提取仅计算完整冲击波形的数量。

表 2 冲击频率采集数据

Table 2 Acquisition data of impact frequency

时间/s	自动计算/Hz	手动提取/Hz	误差/Hz
214	29	29	0
215	31	30	1
216	31	31	0
217	31	30	1
218	30	30	0
219	32	31	1
220	32	31	1
221	32	32	0
222	32	32	0
223	32	32	0
224	32	32	0
225	32	32	0
226	32	31	1
227	31	31	0
228	32	31	1
229	32	32	0
230	32	32	0
231	32	32	0
232	32	32	0
233	32	32	0
234	32	32	0
235	32	32	0

对两者得到的冲击频率进行对比分析,如图 6 所示。由表 2 和图 6 可以发现,自动计算得到的冲击频率与手动提取的结果在数值与波动趋势上均一致,误差在 1 Hz 左右,这可能是由于手动提取过程中仅对完整冲击波形进行了计数,忽略了非完整波形峰值的存在。而在自动计算过程中,对于非完整波形,若存在波形峰值,仍会进行计数,导致了自动计算结果比手动提取的要多出 1 Hz。

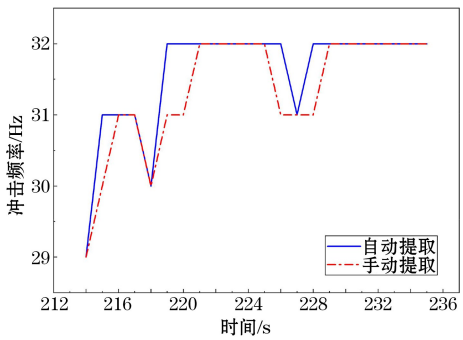


图 6 冲击频率对比

Fig.6 Comparison of impact frequency

钻机轴压、风压在钻孔过程中是可调节的独立参数。从潜孔钻机冲击器工作特性可知,冲击频率不受钻进轴压影响,而是受钻进风压影响,且随着风压增大而增大。为了进一步验证该冲击频率采集系统的有效性,分别控制轴压为 12.5 kN 或风压为 1.75 MPa,从而进行不同风压、轴压条件下的钻进声学试验。从现场收集了不同情况下的冲击频率数据,声学试验结果参数见表 3。本文共进行了 28 组现场试验,其中轴压试验 17 组,风压试验 13 组,分别为 $Z_{1\text{-}17}$ 与 $F_{1\text{-}13}$,存在两组共用数据。

表 3 声学试验参数监测结果

Table 3 Monitoring results of acoustic experimental parameters

编号	轴压/kN	风压/MPa	冲击频率/Hz
Z_1	5.0	1.75	32
Z_2	6.0	1.75	31
Z_3	9.5	1.75	32
Z_4	10.0	1.75	31
Z_5	11.5	1.75	31
Z_6	11.5	1.75	32
Z_7	11.5	1.75	31
Z_8	12.0	1.75	32
Z_9	12.0	1.75	32
Z_{10}	12.0	1.75	31
Z_{11}	12.0	1.75	31
Z_{12}	12.5	1.75	31
Z_{13}	12.5	1.75	32
Z_{14},F_1	12.5	1.75	31
Z_{15},F_2	12.5	1.75	32
Z_{16}	13.0	1.75	32
Z_{17}	13.0	1.75	32
F_3	12.5	1.65	31
F_4	12.5	1.65	31
F_5	12.5	1.80	32
F_6	12.5	1.80	32
F_7	12.5	1.90	32
F_8	12.5	1.90	32
F_9	12.5	1.90	32
F_{10}	12.5	1.90	32
F_{11}	12.5	2.05	33
F_{12}	12.5	2.05	34
F_{13}	12.5	2.05	34

图 7、图 8 分别显示了岩石钻孔过程中风压、轴压与冲击频率的相关性。由图 7 可知,在钻孔过程中,风压对潜孔冲击器冲击频率的影响较为显著,在轴压大小相同的条件下,冲击频率随风压的增大而增大。由图 8 可知,轴压大小与潜孔冲击器冲击频率的相关性较低,在相同风压的条件下,冲击频率在一定范围内波动,不随轴压的增大而发生显著变化。

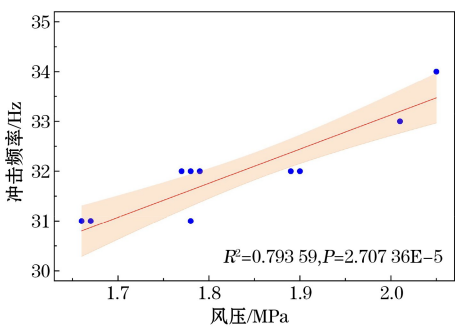


图 7 风压与冲击频率的相关性

Fig.7 Correlation between wind pressure and impact frequency

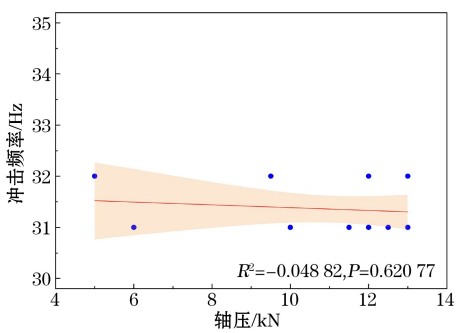


图 8 轴压与冲击频率的相关性

Fig.8 Correlation between axial pressure and impact frequency

由上文分析可知,该潜孔钻机冲击频率采集系统自动计算的钻进冲击频率与人工手动提取的结果十

分接近，该系统采集的冲击频率可以准确反映钻进过程的冲击。同时，通过冲击频率与风压和轴压的相关性试验，发现冲击频率与风压呈显著正相关，而轴压与冲击频率相关性较低，这符合潜孔冲击器的工作机械特性，进一步验证了该冲击频率采集系统的有效性。

4.3　岩体结构面识别

冲击频率在钻进过程中的变化可能与岩性及风压、轴压等钻进参数相关，恒定钻进过程的风压、轴压参数，从而排除风压等参数对冲击频率的影响，便于探究钻进过程中冲击频率与岩体结构的关系。

在恒定轴压(12.5 kN)和风压(1.75 MPa)的工况下进行岩石钻进作业，钻进孔数为 4 个，孔深均小于 1 m，如图 9 所示。通过冲击频率采集系统获取钻进岩石的冲击频率数据，如图 10 所示。由 4 个岩石钻进冲击频率曲线可以发现，钻进过程中冲击频率始终保持在 32 Hz，为常数，其中末尾下降段可能是由于钻头钻穿岩石导致。



图 9　钻进岩石

Fig.9　Rock drilling graph

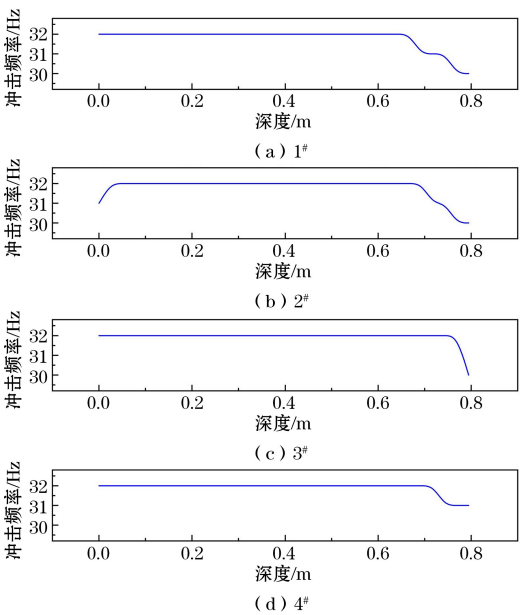


图 10　岩石钻进冲击频率

Fig.10　Impact frequency of rock drilling

在恒定轴压(12.5 N)和风压(1.75 MPa)的工况下进行岩体钻进作业，以某钻孔工程为例，钻进岩体的冲击频率数据如图 11 所示。

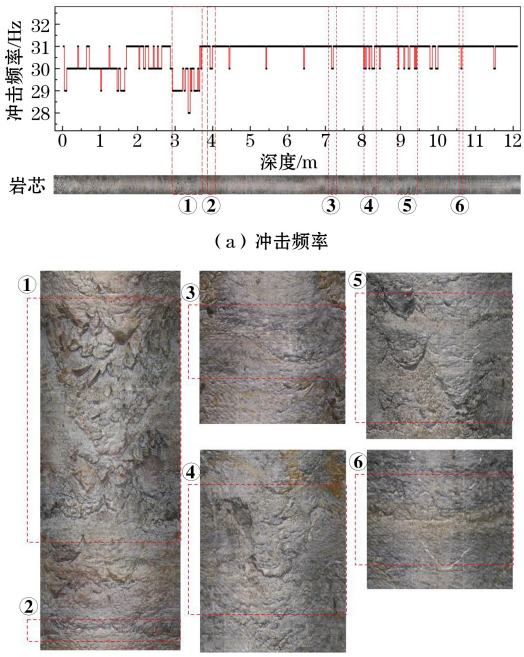


图 11　深度序列图及炮孔窥视图

Fig.11　Depth sequence graph and peep graph of blast hole

由于受上一台阶爆破扰动影响，本台阶孔口附近的岩体较为破碎，冲击频率值较低。可以发现与钻进岩石不同，钻进岩体时冲击频率在数值上存在多种波动，这可能与钻进岩体中节理裂隙、破碎带等结构面的影响有关。为了验证该猜想，采用炮孔窥视设备对炮孔内部结构进行了成像窥视，成像结果可以用于确定节理裂隙、破碎带等结构面的位置与发育程度。在进行炮孔窥视作业前，要确保钻孔内粉尘静置完毕，防止浮尘附着在炮孔窥视设备玻璃壁上，从而对炮孔窥视效果造成影响。

由图 11 中的标记部分可以发现，在冲击频率突变处，岩体结构均发生了变化。为了便于观察岩体结构变化，对标记处的岩芯柱状图进行局部展开。序号 1 至序号 6 所对应的岩体结构依次为破碎带、水平密闭裂隙、缓倾角密闭裂隙、陡倾角密闭裂隙、裂隙发育结构、水平密闭裂隙。对比冲击频率可发现，当遇到岩体软弱结构时，冲击频率下降，而当岩体结构重新稳定，冲击频率又会重新回升。此外，在岩体结构稳定、岩性变化不大时，冲击频率较为稳定。

综上所述,在保持轴压与风压恒定的情况下,钻进相同岩石时,冲击频率保持不变,恒为常数。在钻进岩体过程中,当岩体的岩性变化不大时,冲击频率较为稳定,但在遇到各类结构面时,冲击频率数值会下降。

5 结论

(1) 潜孔钻机冲击频率采集系统主要包括数字拾音器、数据采集卡和工控机三大部分,能够实现钻孔声信号的实时连续测量与冲击频率的采集及存储。

(2) 潜孔钻机钻进声信号的优势采样频率为 6 kHz,该频率下的冲击段波形显著,可清晰记录不同深度的冲击段声音波形,便于后续冲击频率采集方法的研究。

(3) 基于 Hilbert 变换、VMD 及 Savitzky-Golay 滤波的钻进过程声信号冲击频率采集方法所采集的冲击频率与手动提取的结果误差较小且变化趋势一致,同时符合潜孔冲击器的工作机械特性。

(4) 在保持轴压与风压恒定的情况下,钻进岩石时,冲击频率恒定在 32 Hz。在钻进岩体过程中,当岩体的岩性变化不大时,冲击频率较为稳定,保持在 31 Hz,但在遇到各类结构面时,冲击频率数值会下降 1～3 Hz。

参考文献(References):

[1] 岳中文,岳小磊,杨仁树,等.随钻岩性识别技术研究进展[J].矿业科学学报,2022,7(4):389-402.
YUE Zhongwen, YUE Xiaolei, YANG Renshu, et al. Progress of lithology identification technology while drilling [J].Journal of Mining Science and Technology,2022,7(4):389-402.

[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.

[3] ROSTAMI J, KAHRAMAN S, NAEIMIPOUR A, et al. Rock characterization while drilling and application of roof bolter drilling data for evaluation of ground conditions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015,7(3):273-281.

[4] 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.

[5] 吴斌,吴丰,李建龙,等.随钻振动和冲击参数监测在钻井过程中的应用[J].断块油气田,2015,22(1):113-115.
WU Bin, WU Feng, LI Jianlong, et al. Application of vibration and shock parameter monitoring while drilling in drilling process[J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2015,22(1):113-115.

[6] 李占涛,林小国,宋春霞.岩石钻孔振动与声波频谱特性实验研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(4):1008-1016.
LI Zhantao, LIN Xiaoguo, SONG Chunxia. Experimental study on spectral characteristics of sound and vibrations in rock drilling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019,15(4):1008-1016.

[7] KUMAR V, VARDHAN H, MURTHY C S N. Quantification of rock properties using frequency analysis during diamond core drilling operations[J]. Journal of the Institution of Engineers (india): Series D,2019,100(1):67-81.

[8] KUMAR V, VARDHAN H, MURTHY C S N. Multiple regression model for prediction of rock properties using acoustic frequency during core drilling operations [J]. Geomechanics and Geoengineering,2020,15(4):297-312.

[9] KAHRAMAN S,DELIBALTA M S, COMAKLI R, et al. Predicting the noise level in rock sawing from the physico-mechanical and mineralogical properties of rocks[J]. Applied Acoustics,2016,114:244-251.

[10] HARSHA V, ADHIKARI G R, MANDELA G R. Estimating rock properties using sound levels produced during drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2009,46(3):604-612.

[11] KUMAR B R, VARDHAN H, GOVINDARAJ M. Estimating rock properties using sound level during drilling: field investigation[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering,2010,2(3):169-184.

[12] 李辉,谢平,杨文飞,等.随钻钻柱振动声波技术对塔北地区风化壳的识别[J].录井工程,2014,25(3):10-14+99.
LI Hui, XIE Ping, YANG Wenfei, et al. Identification of weathering crust of the northern Tarim by using drillstring vibro-acoustic logging[J]. Mud Logging Engineering,2014,25(3):10-14+99.

[13] MASOOD. Estimation of sound level produced during drilling of igneous rock samples using a portable drill set-up [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 11: 469-482.

[14] KIVADE S B, MURTHY C S N, VARDHAN H. Investigation of noise level and penetration rate of pneumatic drill vis-à-vis rock compressive strength and abrasivity[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, 2014,95(2):103-114.

[15] 宋潍,陈宇灏,李小慧,等.基于机械共振的声谱分析技术[J].物理学报,2012,61(22):345-350.

SONG Wei, CHEN Yuhao, LI Xiaohui, et al. Mechanical resonance based acoustic spectrographic technique[J]. Acta Physica Sinica,2012,61(22):345-350.

[16] 王国林,裴晓朋,周海超,等.轮胎结构振动声学贡献度分析及降噪方法研究[J].振动与冲击,2015,34(24):53-58.
WANG Guolin, PEI Xiaopeng, ZHOU Haichao, et al. Acoustic contribution of tire structure vibration and method for noise reduction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(24):53-58.

[17] 武国平,邱开心,肖望强,等.管状带式输送机的托辊群振动噪声分析[J].矿业研究与开发,2022,42(10):137-142.
WU Guoping, QIU Kaixin, XIAO Wangqiang, et al. Vibration noise analysis of idler group for tubular belt conveyor[J]. Mining Research and Development, 2022, 42 (10):137-142

[18] 侯仕军,丁伟捷,田帅康,等.露天潜孔钻机随钻测量系统研发与应用研究[J].岩土工程学报,2024,46(7):1509-1515.
HOU Shijun, DING Weijie, TIAN Shuaikang, et al. Development and application of MWD system for DTH drilling rig[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024,46(7):1509-1515.