

地质超前钻探声波与岩石强度关系初步研究

朱敢为¹, 赵宁宁², 周晓忠¹, 刘军廷¹, 王 睢³, 柴芮祥³

(1. 宁波冶金勘察设计研究股份有限公司, 浙江 宁波 315041; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315211;
3. 绍兴文理学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 该研究的主要目的是揭示地质超前钻探过程中产生的声音与岩石强度之间的关系。基于频带分析的方法对不同强度的岩样进行钻孔试验, 通过室内信号采集和分析系统收集声波数据, 提取特征信号, 识别不同强度试件的钻孔声音频谱特征, 并在频段分割之后计算每个频带的平均幅度以便观察频域中的幅值变化趋势。研究结果有助于揭示岩石强度对钻井过程声波频域特征的影响机制, 并为开发一种评估钻探声波信号采集的岩石结构信息的方法提供了可能性。

关键词: 随钻测量 (MWD); 频谱特征; 岩性识别; 地质超前预报

中图分类号: TD15

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)05-0383-09

A preliminary study on relationship between sound wave and rock strength in geological advanced forecast

ZHU Gan-wei¹, ZHAO Ning-ning², ZHOU Xiao-zhong¹, LIU Jun-ting¹, WANG Sui³, CHAI Rui-xiang³

(1. Ningbo Metallurgical Survey and Design Research Co., Ltd., Ningbo 315041, China;

2. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315012, China;

3. College of civil engineering, Shaoxing University of Arts and science, Shaoxing 312000, China)

Abstract: The main purpose of the study is to reveal the relationship between the sound produced during the advanced drilling process and the rock strength. Based on the method of frequency band analysis, the drilling tests on rock specimens of different strengths were conducted. The acoustic data were collected through the indoor signal acquisition and analysis system, and the characteristic signals were extracted. The frequency spectrum characteristics of drilling sound of specimens of different strengths were recognized. After the frequency band was divided, the average amplitude of each frequency band was calculated to conveniently observe the overall distribution trend in the frequency domain. The research results help to reveal the influence mechanism of rock strength on the acoustic frequency domain characteristics of the drilling process, and provide the possibility to develop a method for evaluating the rock structure information collected by the drilling acoustic signal.

Key words: measurement while drilling (MWD); spectral characteristic; lithology identification; geological advanced forecast

0 引 言

随着我国大规模基础建设的进行, 隧道施工事故时有发生, 在 381 起公路、铁路、水工隧道事故中, 围岩等级、断层破碎带、岩溶、孤石、采空区等与不良地质引发的事故占比高于 40%^[1], 为避免这些灾害事故的发生, 超前地质预报技术日益得到

重视^[2-3]。目前基于地震波反射原理的 TSP (Tunnel Seismic Prediction) 法、地质雷达法、瞬变电磁法等物理勘探技术迅速发展, 超前钻探仍然是隧道施工前最有效、最直接、最可靠的地质预报方法^[3]。

超前钻探过程中, 钻机机械参数 (钻进速度、推力、能量、转速等) 与岩性之间存在一定的对应关系。科研工作者开展了基于岩层的构造预报方法

收稿日期: 2020-09-17

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY16E040002); 宁波市自然科学基金 (2019A610394); 宁波市公益类科技计划项目 (2019C50012)。

作者简介: 朱敢为 (1972—), 男, 浙江临海人, 高级工程师, 从事岩土工程、地下工程等领域的工程与科研工作。E-mail: lzt2002@gmail.com。

研究,取得了一些成果^[4-12]。Vardhan 等^[13]定性地指出了岩石单轴抗压强度 (uniaxial compressive strength, UCS) 与声级的相关关系:单轴抗压强度越高,或耐磨性越低,则声级越大。Kumar 等^[14-16]用多元回归方法,得出了单轴抗压强度,抗拉强度 (tensile strength, TS),孔隙率与钻头直径、进给量、钻进速度及钻孔声级之间的经验公式;或利用神经网络算法,根据钻孔声级对岩石物性进行有效的预测。Shreedharan 等^[17]用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT)方法,发现在4 000~9 000 Hz范围内,每个种类的岩石钻孔,都有一处特有的频率(即主频率)其幅值最高,可作为识别岩种的特征值。Lesso 等^[18]提出了一种信号分析方法,将各种类型的岩石钻孔声音表达为希尔伯特空间的矢量,从而实现钻孔声音的可视化并辨识岩种。李占涛等^[19]采用4种岩石做钻孔实验,采集钻孔声强信号,利用FFT进行频谱分析,总结出不同岩石的频谱特性。陈晓君等^[20]开发了钻孔的分析模型,利用ansys数值模拟方法研究冲击载荷下的岩石振动特性,发现岩石特性对振动有紧密关系;岩石的密度、刚度和抗压强度对岩石的振动都有一定影响,其中岩石强度对振动的影响最为明显;岩石刚度越小,强度越小,在冲击荷载作用下,岩石振动越大。Kumar 等^[21-23]用FFT方法处理噪声信号,得到了5个主频率,用一元或多元回归方法,发现单轴抗拉强度、抗拉强度等物性与主频率之间有显著的相关关系。Delibalta^[24]观测了岩石锯割进程,亦发现其噪音水平与岩石物性有极强的相关性;具体而言,岩石强度指标越强,噪音水平越高,呈幂函数关系;密度越高,噪音水平越高,但呈线性关系;孔隙度越高,噪音水平越低,两者之间也存在线性关系。

上述文献表明,岩石物性与钻孔声波之间在某种程度上存在确定的联系;部分研究指出声强与岩性的定量关系^[14-16,18-23]。但是基于声波特性的岩石强度探测方法,其精度、分辨率问题,还没有充分展开。本研究将建立钻孔分析模型和动力学模型,进行岩石-钻柱系统振动理论研究,采用混凝土、黏土砖等人工材料和天然石材作为实验材料,开展室内钻孔实验与现场钻探实验,取得声波信号数据,总结岩石单轴压缩强度与声波频谱特征之间的对应关系,并对探测结果进行评估。

本研究的成果有助于揭示岩体物理力学性质对于钻探声波特性的影响机理,具有一定的基础理论价值;基于钻孔声波特性的岩性探测方法,可以对隧道施工地层地质情况进行精细探查,有利于正

确估计工程岩体等级、减轻或避免地质灾害,提高工程质量,具有一定的工程价值。

1 理论研究 with 基础研究

1.1 岩石钻孔分析模型^[5]

切削型钻头的钻削运动可以分解为若干个重复进行的循环,每个循环包括进给运动和切削运动(图1)。切削运动可以采用Nishimatsu的岩石切削模型^[25]来描述。为了使之符合钻削的实际,对Nishimatsu模型进行了扩展,在钻头后刀面上设置一个接触表面,用于模拟钻头后刀面的磨损程度(图2)。根据这个模型和Mohr-Coulomb准则,推算出圆周力如下:

$$\begin{aligned} P_1 &= k_1 \cdot d \cdot C_0 \\ P_2 &= k_2 \cdot b \cdot C_0 \\ k_1 &= \frac{1}{n+1} \cdot \frac{(1-\sin\phi_1)\sin(\beta+\phi_1)}{1+\cos(\beta+\phi_1+\phi_2)} \\ k_2 &= \frac{1}{n+1} \cdot \frac{(1-\sin\phi_1)\sin\beta\sin\phi_1}{1+\cos(\beta+\phi_1+\phi_2)} \end{aligned} \quad (1)$$

钻头形状和切削各角度有关的系数。 P_1 是切削圆周力, P_2 是后刀面摩擦力, d 是每转的进给量, b 是接触面长度, C_0 是单轴抗压强度, ϕ_1 是钻头与岩石之间的摩擦角, ϕ_2 是岩石内部摩擦角, n 是应力分布系数, β 是钻头切削角。经测算,在正常切削条件下,后刀面摩擦力可以达到圆周力总和的约20%,可见摩擦力是不可忽视的一个因素。这也证明了扩展型模型的有用性。

钻孔进给运动是一个相当复杂的过程。可能包含研磨、压入、压碎和冲击等破碎方式。根据小型钻孔机械的小进给量钻孔特点,只考虑进给过程中的压入作用。参考Mateus的压入理论^[26],可以推算出钻头某点上进给过程中的圆周力 P_f 如下:

$$P_f = k_{it} \cdot C_0 \quad (2)$$

同时,伴随钻进进程,钻头与孔底出现复杂的冲击碾压作用,孔底钻头就在冲击和旋转共同作用下破碎岩石,进行钻进。所以旋转型钻机,并非理想状态下的纯旋转钻进,其仍有冲击交变的动载,使钻头上的比载荷增加,加载速度提高,岩石产生形变所需时间缩短,变形速度增大,被冲击点还来不及对作用力重新分配,应力便很快接近或超过强度极限,使岩石脆性增加,塑性下降。被冲击岩体容易破碎形成坑穴和产生剪切体,有利于体积破碎的发生,从而可以提高钻井速度。当然,与冲击型

钻孔相比, 旋转型钻孔的过程, 以旋转切削为主, 冲击碎岩为辅。如图 3 所示。

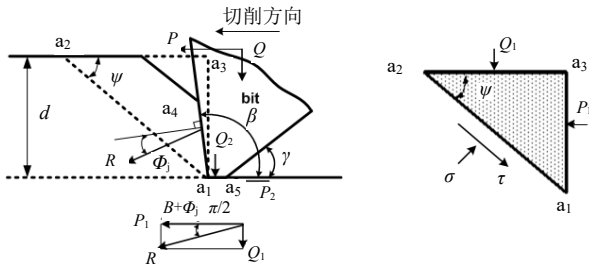


图 1 切削型钻头的钻孔模型^[5]

Fig. 1 Drilling model of a cutting bit

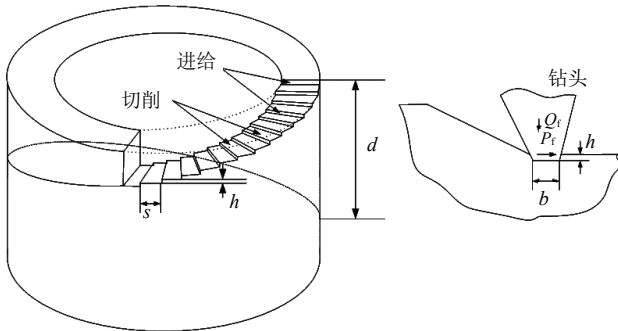


图 2 Nishimatsu 模型及其扩展^[5]

Fig. 2 Modified Nishimatsu model

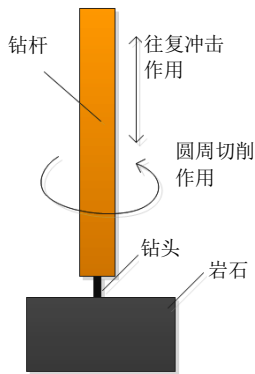


图 3 岩石钻孔工艺示意图

Fig. 3 Rock drilling process

在岩石钻孔过程中, 孔底钻头是在冲击和旋转共同作用下破碎岩石。在旋转型钻孔进程中, 旋转切削运动是主要作用, 周期性的小幅度冲击运动是导致钻柱振动的主要成因。为了使冲击下岩石响应机制更具有普遍性, 以岩石仅受冲击载荷为例进行分析。

(1) 钻杆的物理模型^[27]

钻杆是各向同性的均匀介质, 用多个带有重量的弹簧叠加模拟(见图 4)。随着钻头旋转切入岩石, 钻头底面与岩石接触处产生剧烈摩擦并伴随冲击与振动, 受岩石反向振动冲击情况对应, 弹簧上端

面固定, 下端自由运动。假设每个弹簧长度为 l , 线密度为 ρ , 则弹簧质量为 m , 将弹簧离散化, 均分成 N 段, 并假设每段弹簧上部都挂着一个质量为 $m_0=m/N$ 的小球, 最后一段尾部所挂小球质量为 M 。这样就把具有重力的弹簧模型转化为不具有重力的弹簧和带有重力的小球模型。设每段弹簧弹性系数为 k_0 , 整个弹簧弹性系数为 $k=k_0N$ 。每段弹簧的长度为 $l_0=l/N$,

$$m \frac{d^2 u_n}{dt^2} = k(u_{n-1} - 2u_n + u_{n+1}) - mg$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots N-1).$$

$$M \frac{d^2 u_N}{dt^2} = k_0(l_0 - u_N + u_{N-1}) - Mg$$

假设岩石固有振动频率为 ω_1 , 岩石对钻头反作用力为:

$$F = F_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \tag{4}$$

若忽略钻柱与空气的摩擦阻尼, 钻柱响应的微分方程为:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = \frac{F_1}{M} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \tag{5}$$

计算其通解为:

$$x = \frac{F_1}{\omega^2 - \omega_1^2} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A \cos(\omega t + \varphi) \tag{6}$$

式中: F_1 为岩石对于钻柱的冲击载荷的幅值; ω_1 为钻柱所受冲击载荷的频率; φ_1 为施加冲击载荷的相位角; A ; φ 为钻柱振动的初始振幅和相位, 反映的是钻进作用下钻柱初始能量和初始位置。

式 (6) 即为岩石反向振动冲击下钻柱响应的运动方程。观察其特点可知, 钻柱响应为两个简谐振。

因此推算出钻孔时的转矩是:

$$T = k_c \cdot d \cdot C_0 + k_r \cdot b \cdot C_0 + k_f \cdot b \cdot d \cdot C_0 + T_i \tag{7}$$

这里 k_c , k_r 和 k_f 是与钻头形状和切削角度有关的系数, T_i 是钻孔机械空转时的转矩。

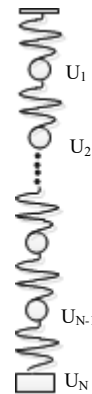


图 4 钻杆等效模型^[25]

Fig. 4 Equivalent model of a drill stem

由此可见,这种钻孔模型可以有效地描述切削型钻头的钻削过程中转矩、推力、进给速度、体积比能量等机械参数与岩石单轴压缩强度之间的关系。

1.2 钻柱振动动力学模型

选取旋转钻机、切削型钻头为研究对象。旋转钻孔实质上就是以旋转钻进的连续破碎岩石作用为主的一种破岩方法,其主要方式是在钻杆上联接一动的互扰振动。显然,钻柱振动特性中包含岩石振动信息。

(2) 岩石的物理模型

对于振动系统,其固有频率 ω_n 可表达为:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_r}{m_r}} \quad (8)$$

式中: k_r 是岩块刚度; m_r 是岩块质量。

若岩块为理想模型,其刚度可表达为:

$$k_r = \frac{E_r A_r}{L_r} \quad (9)$$

式中: E_r 是岩块弹性模量; L_r 是模型长度; A_r 是模型截面积。所以:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{E_r A_r}{L_r m_r}} \quad (10)$$

表明岩石固有振动频率与其弹性模量有关。

从上述分析可知,钻柱振动频谱特性取决于钻柱与岩石的性质及两者的相互作用。特别是,岩石的弹性模量是影响钻柱振动的主要因素之一,而弹性模量与岩石的许多强度指标有直接相关关系。另一方面,钻探过程中的声波,实质上是岩石和钻柱振动引起的空气振动,声波特性取决于岩石与钻柱的振动特性。所以,根据钻孔声波特性识别岩石种类和性质,就具有了可靠的理论依据。

2 实验设备与仪器

2.1 室内钻孔实验系统开发及实验设备

图5是室内冲击钻孔设备及数据采集系统,该系统在钻孔的同时可以同步采集声波数据。系统主要包括:旋转型钻孔设备(博世 GBM13-2RE Professional)、金刚石孕镶钻头(内径20 mm)、声波信号采集仪(BRÜEL & KJÆR公司 BK 3053-B-120)、声压传感器(北京东方振动和噪声技术研究所 INV9206)、声波信号处理软件(北京东方振动和噪声技术研究所 DASP-V11)、电脑(Windows)。仪器和传感器型号如表1所示。

2.2 试样制作

研究岩石单轴压缩强度与声波性质的关系,理

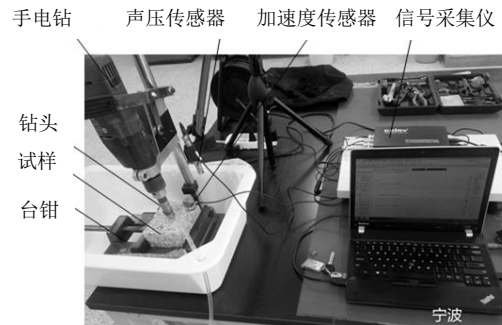


图5 室内钻孔振动与声波采集系统

Fig. 5 Indoor drilling vibration and sound wave acquisition system

想情况是控制变量,使得试料除开单轴压缩强度之外的组织结构特性、物理及力学性质完全相同。但岩石是成分复杂的天然材料,矿物颗粒硬度与尺寸、黏合物性质、天然节理、内部缺陷等各种因素都会影响单轴压缩强度。因此精确控制变量极为困难。本研究从两个方面着手提高变量的可控性:(1)部分试件采用混凝土为原料,混凝土的成分及制作过程更为可控;(2)选择适当的天然岩块,使得强度范围尽量均布在20~100 MPa范围内。

水泥为32.5R普通硅酸盐水泥,骨料为0.1~0.5 mm河沙;不使用任何掺和料和外加剂。为避免尺寸效应,试件统一制作成为边长为150 mm的正水泥为32.5R普通硅酸盐水泥,骨料为0.1~0.5 mm河沙;不使用任何掺和料和外加剂。为避免尺寸效应,试件统一制作成为边长为150 mm的正立方体。测试混凝土试件28 d立方抗压强度,精度符合《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GBT50081-2002)的要求。共制作5种试样,每种试样至少3个。各种试样的配比如表2所示,试样外观如图6。除了普通混凝土之外,还选取了加气混凝土、黏土砖、花岗岩、青石、大理石等强度区分明显的岩种制作试块。对每种试样分别取至少3个试块,进行物性测试,包括P波速度、硬度、单轴抗压强度、抗拉强度。物性取多个试块的平均值,如表3所示。

3 实验结果及分析

岩石试料固定在工作台上,靠近钻头处放置声压计以采集岩石钻孔声波信号。对每个试块进行钻孔实验,交替采用手动进给与自动进给(4级进给量:16.5 mm/min, 33.1 mm/min, 47.4 mm/min, 71.6 mm/min)钻进,直至试块贯穿,因此贯入深度不低于100 mm。在每次实验过程中,试件被牢固

夹紧在台钳上, 利用 BK PULSE Smart Signal Acquisition System 智能信号采集系统, 至少采集 4 段信号, 每段不小于 10 秒。采样频率为 32 768 Hz。

表 4 列出了各种试块在不同进给量下, 相同频段内声压的绝对值。

表 1 设备及数据采集系统规格

Tab. 1 Specifications of data acquisition system and equipment

仪器名称	型号	规格/功能	制造商
手电钻	GBM13-2RE Professional	最大钻孔直径 13 mm	博世
声波振动采集仪	BK 3053-B-120	4 频道、24 位、51.2 kHz	BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT A/S (HQ)
声波振动分析软件	DASP-V11 精选版平台软件	示波采样、变时基采样、INV 高精度频率计、时域分析、自谱分析, 等等	北京东方振动和噪声技术研究所
声压传感器	INV9206	20~20 kHz/20~146 dB/ ICP	北京东方振动和噪声技术研究所

表 2 混凝土配比

Tab. 2 Concrete proportion

水泥强度等级	试样种类编号	项目	材料用量		
			水泥	水	砂
PC (复合硅酸盐水泥) 32.5R	C10	单方用量 kg/m ²	199	185	850
		重量比	1	0.93	4.27
	C15	单方用量 kg/m ²	253	185	750
		重量比	1	0.73	2.96
	C20	单方用量 kg/m ²	330	185	641
		重量比	1	0.56	1.94
	C25	单方用量 kg/m ²	385	185	586
		重量比	1	0.48	1.52
	C30	单方用量 kg/m ²	440	185	532
		重量比	1	0.42	1.21

表 3 试样物性实测值

Tab. 3 Properties of rock samples

岩种	编号	密度/(g/cm ³)	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	硬度/HL	P 波速度/(m/s)
混凝土	C10	2 037.4	1.6	0.6	172.5	3 109.3
混凝土	C15	2 118.8	6.9	0.1	178.1	3 383.3
混凝土	C20	2 129.7	8.8	-	220	3 738.3
混凝土	C25	2 143.4	13.7	2	240.3	3 844.0
混凝土	C30	2 172.2	15.7	-	280.8	3 936.3
加气混凝土	D	612.4	2.1	-	209.6	1 698.6
黏土砖	E	1 656.7	24.8	3.1	509.2	2 764.6
花岗岩	F	2 809.4	90.7	10.3	805.0	5 465.8
青石	G	2 247.3	27.1	3.4	540.7	2 977.7
大理石	G	2 234.6	47.3	6.3	623.8	4 522.5

表4 试块钻孔声压幅值
Tab. 4 Applitudes of sound pressure

试块编号	单轴抗压强度/MPa	进给量/(mm/min)				
		手动	16.5	33.1	47.4	71.6
F1	95.6	0.000 364 836	0.000 528 616	0.000 487 553	0.000 579 001	0.000 619 072
F2	104.8	0.000 546 443	0.000 546 182	0.000 595 926	0.000 655 455	0.000 614 909
E	24.3	0.000 160 602	0.000 138 684	0.000 215 071	0.000 248 382	0.000 236 336
D1	1.9	0.000 145 214	0.000 104 203	9.780 08E-05	9.774 29E-05	9.688 25E-05
C10	1.6	0.000 137 131	9.031 81E-05	0.000 107 364	0.000 123 08	0.000 148 288
C15	6.9	0.000 113 048	0.000 117 769	0.000 153 543	0.000 154 117	0.000 149 849
C20	8.8	0.000 129 829	0.000 102 498	0.000 121 615	0.000 141 456	0.000 147 54
C25	13.7	0.000 123 141	0.000 127 857	0.000 129 524	0.000 138 626	0.000 139 828
C30	15.7	0.000 142 968	0.000 146 737	0.000 163 152	0.000 154 721	0.000 156 008
G1	26.1	0.000 212 493	0.000 206 254	0.000 216 194	0.000 230 484	0.000 217 439
G2	27.1	0.000 217 347	0.000 224 774	0.000 230 796	0.000 223 349	0.000 218 535
H1	57.8	0.000 335 638	0.000 327 59	0.000 338 625	0.000 397 523	0.000 353 302
H2	47.3	0.000 346 674	0.000 359 214	0.000 262 697	0.000 372 009	0.000 374 694

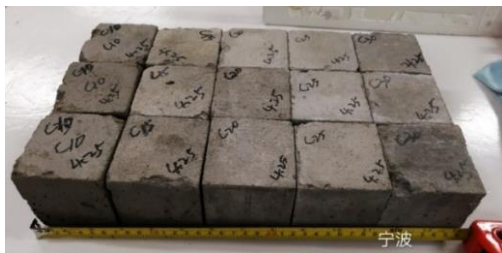


图6 混凝土试样外观
Fig. 6 Concrete samples

表5 回归分析结果评价
Tabl. 5 Evaluation of regression analysis results

进给量/ (mm/min)	16.5	33.1	47.4	71.6
R Square	0.972	0.977	0.989	0.977
标准误差	5.967	5.352	3.785	5.37
观测值	13	13	13	13
Significance F	7.0E-10	2.1E-10	4.6E-12	2.2E-10

3.1 不同岩样单轴抗压强度与声压的相关性研究

在各级进给量下，将单轴压缩强度作为横坐标，声压作为纵坐标，绘制两者的散点图（图7）。显然，在每一级进给量下，单轴压缩强度与声压都呈线性正相关关系。岩石强度越高，钻孔声压越大。这个结论与生活常识相吻合，也与文献^[14-16]的研究结论一致。对两者关系进行回归分析，表5列出了分析结果。相关系数都高于0.9，属于高度相关。采用F检验法对自变量在整体上相对因变量的线性显著性检验表明，显著性水平远小于5%（Significance F为4.6E-12~7.0E-10）。因此，可以利用这些回归分析的结果作为经验公式，从声压中推断岩石的单轴压缩强度。另单轴压缩强度为UCS，声压为SP，经验公式如下：

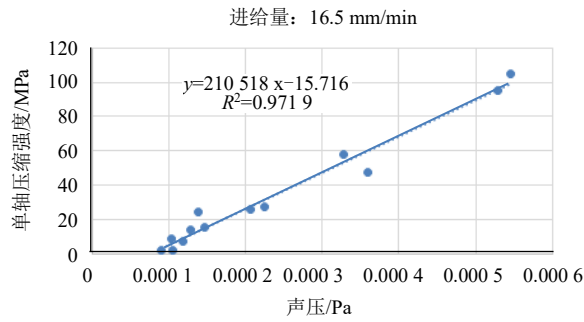
$$\begin{cases} UCS = 210\ 518\ SP - 15.72, f = 16.5 \\ UCS = 221\ 848\ SP - 20.041, f = 33.4 \\ UCS = 188\ 812\ SP - 17.87, f = 44.1 \\ UCS = 192\ 078\ SP - 18.11, f = 71.6 \end{cases} \quad (11)$$

式中：f是进给量，mm/min。

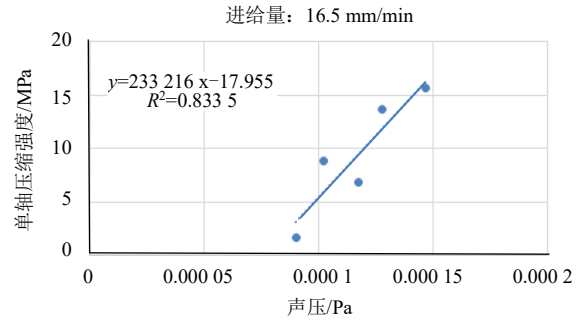
3.2 排除岩石组织构造性质影响条件下，混凝土试块强度与声压的相关性研究

为排除岩石组织构造性质对于声压的影响，以5种混凝土试块为样本。图8是在各级进给量下，单轴抗压强度与声压绝对值之间的散点图。总体趋势是，岩石强度越高，声压越大。通俗地说，岩石越硬（强），声音越大。然而进行进一步的精细观察，可以发现，在进给量为16.5 mm/min时相关性最好，随着进给量增大，相关性越来越差。可见，作为测试手段，进给量必须设置恰当，才能提高测试精度。

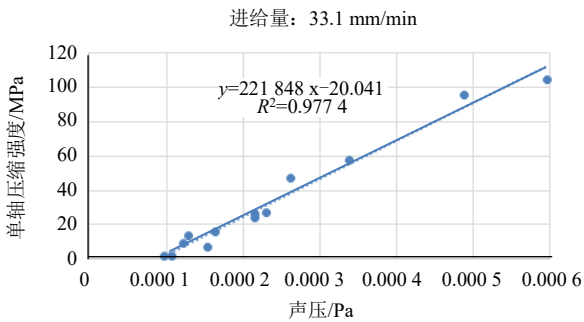
从以上分析可以看出，钻孔声压与岩石强度之间存在一定的相关关系，可以利用这个结论，基于岩石钻孔声波性质推断岩石单轴压缩强度。从3.1可以看出，若岩石强度区别较大（级差20 MPa以上），则声波可以准确识别，然而，从3.2的分析可见，若岩石强度差别较小（小于5 MPa），仅靠声压难以区分。因而，作为一种测试手段，其分辨率在20 MPa左右，对于判断岩石的坚硬程度分级，有一



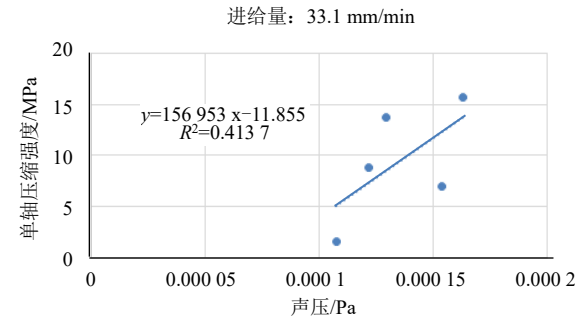
(a)



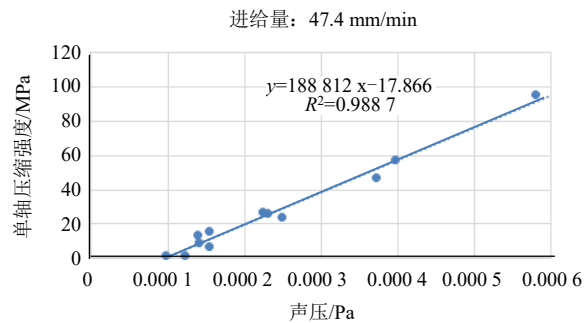
(a)



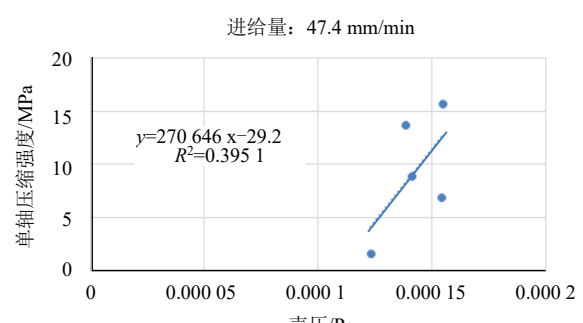
(b)



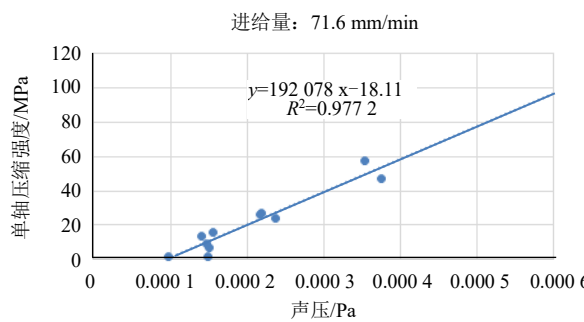
(b)



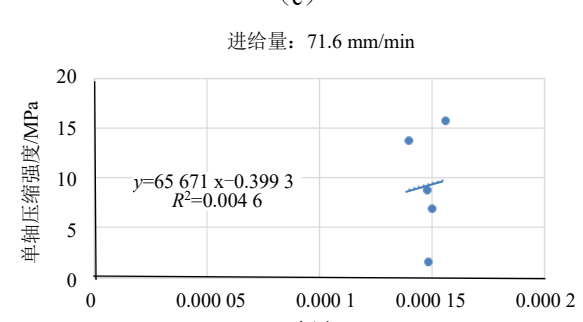
(c)



(c)



(d)



(d)

图 7 不同岩样试块强度与钻孔声压的散点图 (考虑进给量)
Fig. 7 Scatter plots of different rock sample strength and borehole sound pressure (consider the feed rate)

图 8 混凝土试块的强度与钻孔声压的关系图 (考虑进给量)
Fig. 8 Relationship between concrete block strength and borehole sound pressure (consider the feed rate)

定的参考价值。

3.3 进给量对于岩石钻孔声波的影响

图 9 展示了 5 种混凝土试块的钻孔声压与进给量的关系图。总体趋势是: 随着进给量的提高, 声

压随之增大。即钻孔越快, 声音越大。这个结论与人们的常识一致。因此, 要识别岩性, 必须排除进给量的影响。作为测试手段, 必须控制进给量的变化, 或者在某规定进给量条件下, 统一采集信号。

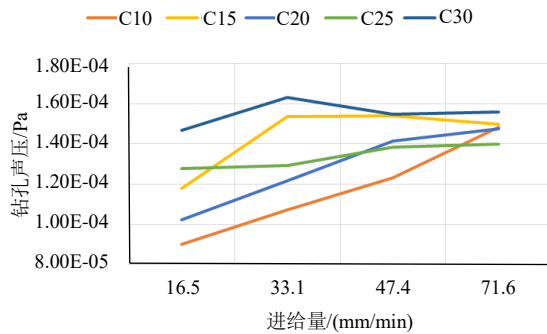


图9 混凝土试块的钻孔声压与进给量的关系图

Fig. 9 Relationship between feed rate and sound pressure

4 结 论

(1) 总体而言,不同岩样强度越高,钻孔声波和振动的幅值越大。特别是,强度级差在20 MPa以上时,可以根据声波、振动的幅值区分岩性。

(2) 强度级差小于20 MPa时,岩石组织构造、强度等因素交织,出现明显多解性,仅根据声波、振动特性难以判断岩石强度。

(3) 对于同一类岩石,比如混凝土,根据声波振动特性可以辨别岩石强度差异。

(4) 在强度识别方面,进给量对于实验结果影响很大,若作为测试手段,岩石钻孔应精确控制钻进的进给量。

(5) 本节的研究手段还不够丰富,不够全面,今后扩大样本量,对声波振动频谱特性展开精细研究。

参考文献

[1] 朱捷, 曾国伟, 胡国忠, 等. 基于事故统计分析的隧道坍塌施工安全风险预估[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2019, 15(9): 237-240.

ZHU Jie, ZENG Guo-wei, HU Guo-zhong, et al. Risk assessment of tunnel collapse based on the statistical analysis of accidents[J]. Highway Transportation Technology: Applied Technology Edition, 2019, 15(9): 237-240.

[2] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.

LI Shu-cai, SUN Bin, SUN Huai-feng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 2014, 33(6): 1090-1113.

[3] 周轮, 李术才, 许振浩, 等. 隧道综合超前地质预报技术及其工程应用[J]. 山东大学学报: 工学版, 2017, 47(2): 55-62.

ZHOU Lun, LI Shu-cai, XU Zhen-hao, et al. Integrated advanced geological prediction technology of tunnel and its engineering application[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2017, 47(2): 55-62.

[4] 田昊, 李术才, 薛翊国, 等. 基于钻进能量理论的隧道凝灰岩地层界面识别及围岩分级方法[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2457-2464.

TIAN Hao, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, et al. Identification of interface of tuff stratum and classification of surrounding rock of tunnel using drilling energy theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2457-2464.

[5] LI Z, ITAKURA K. An analytical drilling model of drag bits for evaluation of rock strength[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(2): 216-227.

[6] LI Z, ITAKURA K, MA Y. Survey of measurement-while-drilling technology for small-diameter drilling machines[J]. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 10267-10282.

[7] 叶俊能. 宁波轨道交通山岭隧道综合性勘探法应用[J]. 地下空间与工程, 2014, 10(S2): 1829-1834, 1852.

YE Jun-neng. Application of comprehensive prospecting method in the exploration of mountain tunnel in Ningbo urban rail transit project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(S2): 1829-1834, 1852.

[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 Zhong-qi. 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.

[9] 田昊. 隧道地质数字钻进精细化识别方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.

TIAN Hao. Refinement identification method of digital drilling for tunnel geological[D]. Jinan: Shandong University, 2015.

[10] LEUNG R, SCHEDING S. Automated coal seam detection using a modulated specific energy measure in a monitor-while-drilling context[J]. International Journal of

- Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 75: 196-209.
- [11] 李文. 基于钻进响应的岩石(体)特性识别理论与方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
LI Wen. Research on theory and method for identification of rock mass properties based on drilling response[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [12] KHORZOUGH M D, HALL R, APEL D. Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28: 859-864.
- [13] VARDHAN H R, ADHIKARI G, RAJ M. Estimating rock properties using sound levels produced during drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(3): 604-612.
- [14] 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.
- [15] KUMAR B, VARDHAN H, GOVINDARAJ M, et al. Artificial neural network model for prediction of rock properties from sound level produced during drilling[J]. Geomechanics and Geoenvironment, 2013, 8(1): 53-61.
- [16] KUMAR B, VARDHAN H, GOVINDARAJ M, et al. Regression analysis and ANN models to predict rock properties from sound levels produced during drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013, 58: 61-72.
- [17] SHREEDHARAN S, HEGDE C, SHARMA S, et al. Acoustic fingerprinting for rock identification during drilling[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2014, 5: 89-105.
- [18] LESSO I, FLEGNER P, HOROVČÁK P, et al. Some problems in control of the quality of the process of rotary drilling of rocks by using suitable visualization of concurrent vibrations[J]. Acta Montanistica Slovaca, 2015, 20: 282-289.
- [19] 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 Zhan-tao, LIN Xiao-guo, SONG Chun-xia. 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.
- [20] 陈晓君, 陈根龙, 宋刚, 等. 基于岩石性质的钻进振动响应分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(10): 20-26.
CHEN Xiao-jun, CHEN Gen-long, SONG Gang, et al. Analysis of drilling vibration response based on rock properties[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(10): 20-26.
- [21] KUMAR C, VARDHAN H, MURTHY C, et al. Estimating rock properties using sound signal dominant frequencies during diamond core drilling operations[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(4): 850-859.
- [22] KUMAR C, VARDHAN H, MURTHY C, et al. 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.
- [23] KUMAR C, VARDHAN H, MURTHY C. Multiple regression model for prediction of rock properties using acoustic frequency during core drilling operations[J]. Geomechanics and Geoenvironment, 2019: 1-16.
- [24] DELIBALTA M, KAHRAMAN S, COMAKLI R. The usability of noise level from rock cutting for the prediction of physico-mechanical properties of rocks[J]. Fluctuation and Noise Letters, 2015, 14(1): 1550006.
- [25] NISHIMATSU Y. The mechanics of rock cutting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1972, 9: 261-270.
- [26] MATEUS J, SAAVEDRA N F, CARRILLO Z C, et al. Correlation development between indentation parameters and uniaxial compressive strength for Colombian sandstones[J]. CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro, 2007, 3(3): 125-136.
- [27] 李玮, 纪照生, 董智煜, 等. 基于重整化方法的冲击载荷下岩石振动分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(16): 49-54.
LI Wei, JI Zhao-sheng, DONG Zhi-yu, et al. Vibration analysis of rock under impact loads based on the renormalization method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(16): 49-54.