



移动阅读

刘洋,李远,乔兰,等.干耦合超声波测试技术及其岩石动静参量测试应用[J].煤炭学报,2019,44(5):1465-1472. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.6019

LIU Yang, LI Yuan, QIAO Lan, et al. Dry coupled ultrasonic testing technology and its application in testing rock dynamic and static parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1465-1472. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.6019

干耦合超声波测试技术及其岩石动静参量测试应用

刘洋¹,李远¹,乔兰¹,范大卫²

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083; 2. 北京科技大学 机械工程学院,北京 100083)

摘要: 岩体非线性特征随深度增加不断凸显,其力学参量现场实时精确测量及长期监测,为地应力解除过程中岩体变化特征及应力监测提供了必要的基础。然而目前岩石力学参量测定多基于室内力学试验,时效性及拟合方法都会对测试结果带来误差。传统耦合超声波发射、接收探头对接触面平整性要求高,无法实现布置于现场钻孔内的长效监测。基于干耦合点接触声波探头测速技术,通过对声波发射、接收探头设计,电路板稳定性及去噪算法研究,研发出具有瞬时采集、无线传输功能的数字化波速采集系统。通过对同一区域取自现场加工的 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 花岗岩岩样及地应力解除岩芯,分别进行室内力学试验及波速测定,以计算获取相应静态、动态弹性模量。结果表明:首先,自研发基于干耦合点接触声波测速采集系统,对不同工作接触面适应性较好,数据误差在规范允许范围内。其次,对于同一区域相同岩性不同尺度、形态的岩样,其动态、静态弹性模量关系彼此间具有适用性。这就为现场基于干耦合点接触声波测速计算获得的岩体动态弹性模量,推算其静态弹性模量提供了依据。进一步的,基于干耦合点接触声波测速数字化采集系统,岩体动、静态力学参数在现场地应力岩芯解除过程及岩体长期监测过程中的实时采集及分析研究,具有一定的可行性。

关键词: 干耦合;空心包体;数字化采集;动态参量

中图分类号:TD315 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2019)05-1465-08

Dry coupled ultrasonic testing technology and its application in testing rock dynamic and static parameters

LIU Yang¹, LI Yuan¹, QIAO Lan¹, FAN Dawei²

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The nonlinear characteristics of rock mass become increasingly prominent with the increase of depth, and its mechanical parameters can be accurately measured and monitored in real-time, which provides a necessary basis for rock mass change characteristics and stress monitoring in the process of in-situ stress relief. At present, however, rock mechanics parameter measurement is mostly based on laboratory mechanics test. Timeliness and fitting method will bring errors to test results. Conventional coupled ultrasonic transmitting and receiving probes have high requirements for the flatness of the contact surface, so it is impossible to achieve long-term monitoring in the field borehole. Based on the dry-coupled point-contact acoustic probe velocity measurement technology, through the design of acoustic emission

收稿日期:2019-01-13 修回日期:2019-03-27 责任编辑:常明然

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600703)

作者简介:刘洋(1991—),男,安徽合肥人,博士研究生。E-mail:liuyangliyang@163.com

通讯作者:李远(1980—),男,辽宁沈阳人,副教授。E-mail:liyuan@ustb.edu.cn

and reception probes, the stability of the circuit board and the research of denoising algorithm, a digital wave velocity acquisition system with instantaneous acquisition and wireless transmission functions has been developed. Based on the same area taken from the scene processing $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ granite rock and ground stress relieve core, the laboratory mechanics test and the determination of wave velocity were conducted, respectively, to obtain corresponding static and dynamic modulus of elasticity. The results show that firstly, the self-developed acoustic velocity acquisition system based on dry coupling point-contact has a good adaptability to different working contact surfaces, and the data error is within the allowable range of the specification. Secondly, for rock samples with the same lithology and different scales and forms in the same region, the dynamic and static elastic modulus relationship is applicable to each other. This provides a basis for calculating the dynamic elastic modulus of rock mass based on dry coupling point-contact acoustic velocity measurement and calculating its static elastic modulus. Furthermore, based on the digital acquisition system of dry-coupled point-contact acoustic velocity measurement, it is feasible to collect and analyze the dynamic and static mechanical parameters of rock mass in real time during the process of in-situ stress core relief and long-term monitoring of rock mass.

Key words: dry coupling; hollow inclusion; digital acquisition; dynamic mechanical parameter

地应力是岩体中存在的天然应力,是决定地下工程开挖、设计、稳定性分析的最重要因素^[1],随着岩土工程、水利、采矿工程向深部地层逐渐发展,地应力作用表现愈加显现,深部岩体地应力环境参量获取变得十分必要^[2]。

目前,岩石力学参量的测定主要基于两种方法^[3]:一是室内力学实验,二是基于弹性波理论计算。室内力学试验测定结果,往往存在由于时间效应及数据拟合方法造成与实际岩石参量误差。声波测试技术在岩石检测方面已有一定的研究。赵航等^[4]基于弹性波传播特性,采用波幅表征岩石宏观损伤变量。王贵宾等^[5]通过不同温度围压下岩石波速测试,建立温度、围压与波速定性定量关系。李楠等^[6]通过水媒体纵波波速变化规律及波形特征,研究了煤体孔隙率对纵波波速的影响。朱合华等^[7]研究了饱水对致密岩石的声学参量的影响。徐晓炼等^[8]通过煤岩渗透性与纵波波速及层理方向相关关系,进而判断煤岩的层理特性。陈宇龙等^[9]利用超声波法估算岩石力学参数。以上研究皆基于传统大尺寸超声波收发探头,其与被测面接触面积较大,对测试表面要求平整。对于室内试验岩样有限的尺寸大小,传统收发探头无法视为点接触,难以确定实际超声波传播距离,对波速测量造成偏差。因此,现场岩体力学参量实时高频准确便捷获取具有一定的必要性。

1 地应力解除岩芯动态弹性力学参数采集数字化系统研发

1.1 岩石动态力学参数瞬时采集系统研发

岩石的弹性模量和泊松比是地应力计算过程中不可或缺的基础数据。其测量方法有两种:一种是通

过室内围压率定试验,通过围压与岩芯环向应变数据,线性拟合得到静态弹性力学参数。另一种是通过测量岩芯纵横波速,基于弹性波理论,实时获取岩芯动态弹性力学参数。目前,随着地下工程深度的不断增加,岩石的非线性力学行为愈加明显。

传统超声波传感器利用耦合剂来增强测试材料与传感器之间的传输,其液体耦合剂包括丙二醇或丙三醇。在长效监测过程中,液体耦合剂持久性较差,易从传感器的下面漏出或者溢出,对于高黏度耦合剂,其对横波测试信号又不太稳定^[10],这就产生信号传输问题。干耦合声波探头本质是振荡探头表面与测试表面的声接触区大小比超声波的长度小很多倍,前端和测试件近似点接触,此时没有耦合剂也并不影响信号传递^[11]。本文所述课题组自主研发的不需耦合剂的干点接触超声波探头,通过设置发射与接收探头中心点间距,采集发射信号初至接收探头时间计算波速。优势在于大大减小探头与试件表面的接触面积,且在促动器前端添加柔性材料,声压匹配好,与试件表面紧密接触,保证了信号强度。在尺寸上,远小于目前多数超声波探头,相对于传统的大尺寸平面超声波探头受接触面曲率无法贴合,干点接触探头可通过后端弹簧装置挤压产生的法向应力与孔壁进行点接触贴合。且结合自主研发的采集电路板,可实现波速数据的长期监测存储,大大拓展了其在不同工作环境的应用性。并可与三维孔壁应变计结合,对地应力岩芯解除过程中,岩体参数及能量变化实时记录。对岩芯的室内围压率定试验还原原岩应力场提供进一步的依据。

本课题组研发的小尺寸干耦合超声波探头,与传统耦合型超声波探头对比如图 1 所示。图中左边部

件为自研发干耦合点接触声波探头,其内部包括堆叠型压电陶瓷促动器、固定结构、后端减震吸波结构及预紧结构,以增加促动器在工作时的稳定性,减小弹性波在发射、接收探头内部的折射、反射,首先从硬件上提高信噪比。



图1 自研发干耦合超声波探头与传统超声波探头

Fig. 1 Self-developed dry-coupled ultrasonic probe and traditional ultrasonic probe

在考虑现场地应力小钻孔的尺寸限制及声波探头的设计需求,经不断的研发与改进,目前声波数字化采集板已经是第二代产品,如图2所示。激励电压模块产生100 V脉冲波,通过控制系统为压电陶瓷提供激励信号。设置DC/DC隔离电源模块将发射电路与接收电路在电源上隔离,减少接收信号中的干扰信号,隔离前后接收信号波形如图3所示。接收波形增强信噪比的算法结合傅里叶变换、低通滤波、小波去噪及寻峰算法,其应用效果将结合地应力解除岩芯围压率定试验着重介绍。

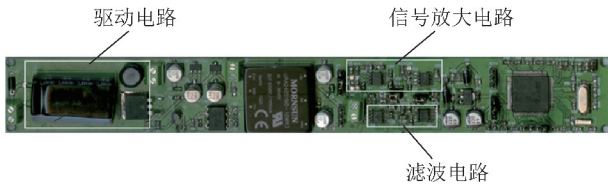


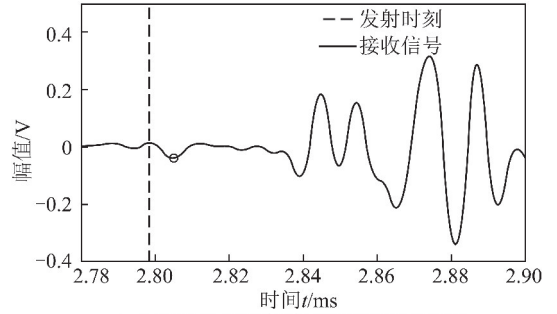
图2 数字化型声波采集系统

Fig. 2 Digital acoustic wave acquisition system

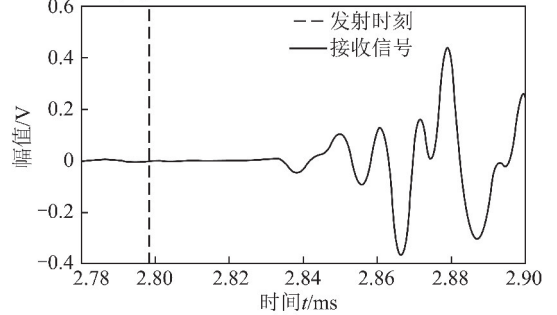
本设备提供两种数据传输方式:一种为有线传输-RS232 串口通信,通过有线连接,将数据传输到上位机的串口助手;另一种为蓝牙通信,使用 HC-02 蓝牙串口模块,与单片机系统中的 TTL 串口连接,接收端可以是带有蓝牙功能的 PC 机、手机或者其他移动设备。

1.2 岩石动态力学参数瞬时采集设备室内标定试验研究

数字化型岩石动态力学参数瞬时采集设备包括干耦合声波探头、采集电路板及滤波算法等设计。动态力学参数的获得基于纵波、横波波速的准确测量。采集系统作为整体结构,需进行室内标定试验,对各



(a) 设置电源隔离模块前接收信号波形



(b) 设置电源隔离模块后接收信号波形

图3 设置电源隔离模块前后接收信号波形

Fig. 3 Signal waveform before and after power isolation module is set

部件间的系统工作性测定,以对现场动态力学参数的采集准确性提供数据支持。

本次标定试验参照《水利水电工程岩石实验规程 SL264—2001》及《承压设备无损检测 NB/T47013》,选用的标准试块为 CSK-1A 型,材质为 20 号钢,如图4所示。试块出厂报告中已标明纵波波速 $5\,900 \pm 50$ m/s,横波波速 $3\,230 \pm 50$ m/s。试验中采用基于干耦合探头的自研发声波采集系统测试标准块5次。

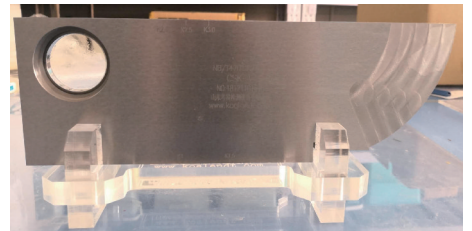


图4 CSK-1A 标定试块

Fig. 4 CSK-1A calibration test block

测试结果见表1。

表1 干点接触声波探头标定

Table 1 Calibration of dry point contact acoustic probe

次序	1	2	3	4	5
纵波波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	5 852	5 848	5 853	5 851	5 857
横波波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3 190	3 192	3 195	3 192	3 194

由表1可知,自研发基于干点接触声波探头测速测定波动情况在允许误差范围内,测速准确度较高。

2 标准岩样动静参量关系

2.1 试验方案

本次试验花岗岩岩样取自三山岛金-795 m水平,根据国际岩石力学学会实验室和现场实验标准化委员会(ISRM标准)规定,端面的平整度误差小于0.02 mm。选取具有代表性的花岗岩加工成8块 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体,密度取均值 2.72 g/cm^3 ,如图5所示。



图5 花岗岩试样

Fig.5 Granite sample

动态参量的获取基于弹性波理论。声波探头发射脉冲的本质是电信号向机械振动信号的转化,即逆压电效应,接收探头原理反之。在纵波发射探头对岩块产生一个脉冲之后,在脉冲方向产生一个压缩波即纵波,在其垂直方向将产生一个剪切波即横波。该横波引起的质点振动方向垂直于岩块的表面,可以由纵波探头接收^[12]。虽然岩石纵波波速大于横波波速,但在完整岩石平测法测量中,沿检测表面传播的纵波平行检测表面振动,与接收换能器中压电感应元件感受方向垂直,故接收不到纵波,首波是横波^[13-14]。故本文采用岩石端面对测法采集纵波速度,小孔内侧壁平测法采集横波速度。根据弹性波测试原理按下式计算纵波波速 V_p 和横波波速 V_s 。

$$V_p = \frac{l_p}{t_p} \quad (1)$$

$$V_s = \frac{l_s}{t_s} \quad (2)$$

式中, l_p 为对测法时发射与接收探头间距; t_p 为对测法发射信号初至接收探头时间; l_s 为平测法时发射与接收探头间距; t_s 为平测法发射信号初至接收探头时间。

故在岩样侧壁布置一对收发声波探头测量横波波速,在岩样端面布置一对收发声波探头测量纵波波速,如图6所示,对8块标准样分别测量纵波、横波波速,而后基于单轴试验测得弹性模量。

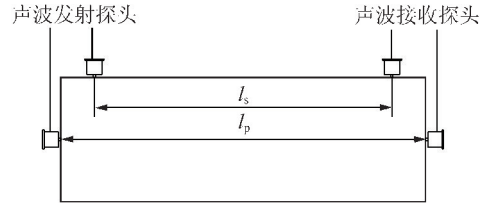


图6 岩样纵、横波测速布置

Fig.6 Longitudinal and shear wave velocity measurement layout of rock samples

岩样静态弹性参量基于单轴压缩试验获得一系列的岩石变形参数数据。并检查测定的结果,废弃一些可疑数据。

2.2 试验结果处理及分析

岩石的动弹性模量是岩石动力学测试和分析的基本数据。根据声波测试所测得的纵波波速和横波波速通过下列公式来确定岩石的动弹性模量 E_d :

$$E_d = \rho V_p^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (4)$$

式中, E_d 为动弹性模量; ρ 为岩芯密度; ν 为泊松比。

岩样的静态弹性模量,采用一元回归分析方法,对近似成直线段的载荷和变形值进行线性回归分析,载荷-纵向变形曲线上回归直线段的斜率为切线模量 E_s ,即静态弹性模量。

根据 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 岩样基于波速计算得到的动弹性模量 E_d ,及单轴试验数据处理获得的静弹性模量 E_s 相互关系如图7所示。拟合关系式为

$$E_d = 2.4894E_s + 0.3826 \quad (5)$$

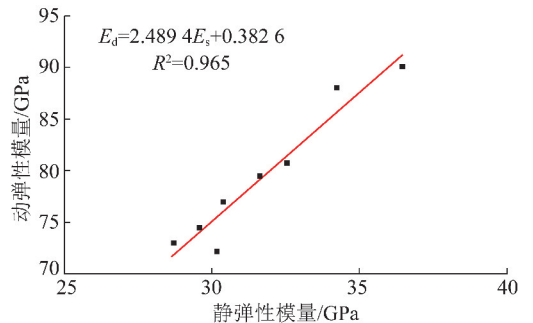


图7 花岗岩动静弹性模量关系

Fig.7 Relationship between dynamic and static elastic modulus of granite

3 地应力解除岩芯动静参量关系

3.1 试验方案

地应力解除岩芯取自三山岛金矿-795 m水平,

与标准岩样属同一区域。地应力解除岩芯外径 112 mm, 内径 42 mm, 密度 2.8 g/cm^3 , 如图 8 所示。



图 8 -795 m 地应力解除岩芯
Fig. 8 -795 m stress relief core

动态弹性参量基于自主研发小尺寸干耦合探头测速系统计算岩芯动态力学参数。图 9 为岩芯动静参量测定系统, 包含示波器、应变采集板、集成电路板及围压舱。围压舱内部的解除岩芯小孔内, 沿侧壁布置一对收发声波探头测量横波波速, 在解除岩芯端面布置一对收发声波探头测量纵波波速, 如图 10 所示。设置超声波发射探头脉冲为 $8 \mu\text{s}$, 即频率 125 kHz , $l_p = 32 \text{ cm}$, $l_s = 28 \text{ cm}$ 。

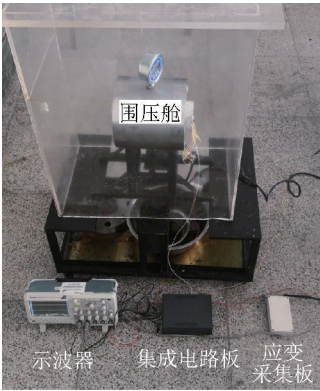


图 9 岩石动静参量测定系统

Fig. 9 Rock dynamic and static parameter measurement system

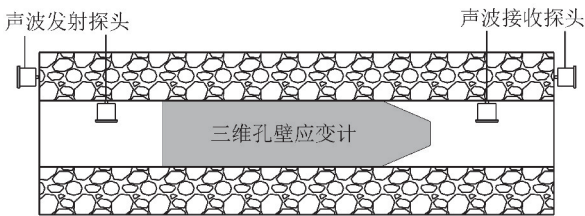


图 10 声波探头及应变计布置示意

Fig. 10 Schematic diagram of acoustic probe and strain gauge layout

静态弹性参量基于围压率定试验数据, 设置围压 $0 \sim 45 \text{ MPa}$, 梯度设置 5 MPa , 每次记录 3 组数据取均值。

3.2 试验结果处理及分析

3.2.1 地应力解除岩芯动态力学参数测定

岩芯动态力学参数取决于准确的波速测量, 也即波形初至点时间的获取。对于接收到的声波波形在算法上分为傅里叶变换、低通滤波、小波去噪及寻峰算法 4 步, 以提高信噪比。未经算法处理的原始波形

如图 11 所示, 接收信号毛刺多, 噪声干扰严重, 接收信号初至点无法判断。

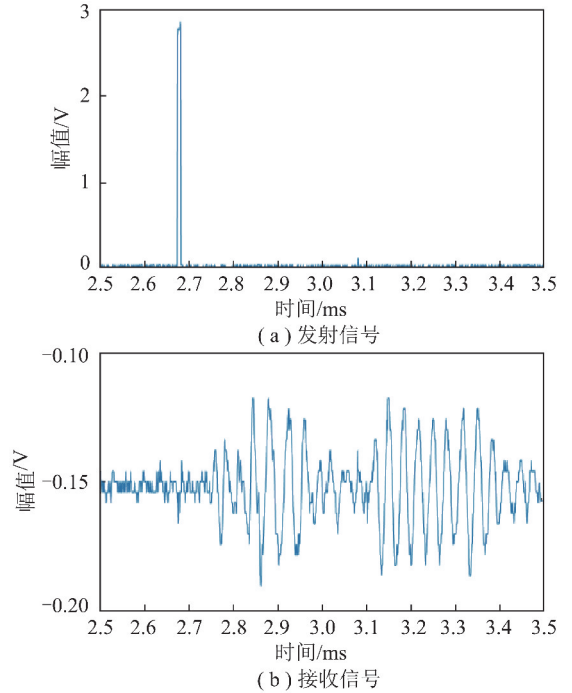


图 11 未经处理原始收发信号波形

Fig. 11 Raw transceiver signal waveform without processing

弹性波在传播过程中, 因为波的几何扩散、材料吸收以及散射衰减等原因, 波的幅值、频率等参数随着传播距离的增加而逐渐下降^[15]。故接收波形分布在一个低于 125 kHz 的频带中。经傅里叶变换后的幅频特性如图 12 所示, 可以看出信号频谱成分较为复杂, 在非信号频段 ($>125 \text{ kHz}$) 有集中频率分布, 在信号频段 ($<125 \text{ kHz}$) 分布较为零散。首先设置低通滤波去除频率 125 kHz 以上波形, 平滑毛刺信号, 消除信号频带外噪声影响。对于信号频带内的噪声影响, 选择小波阈值去噪。其过程如图 13 所示, f_k 为原始含噪信号; $w_{j,k}$ 为小波分解后得到的小波系数; $\hat{w}_{j,k}$ 为经过阈值处理得到的新的小波系数估计值; \hat{f}_k 为小波重构得到的信号, 即去噪后的信号 g_k 。

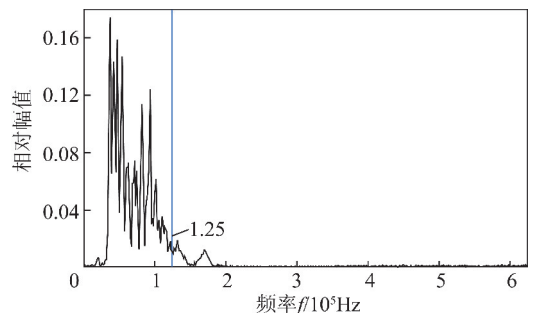


图 12 接收信号幅频特性

Fig. 12 Amplitude-frequency characteristics of received signals

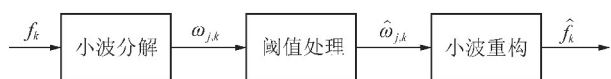


图13 小波去噪过程示意

Fig. 13 Schematic diagram of wavelet denoising process

小波去噪的过程关键在于分解层数的选取。理论上,分解层数越大,噪声与信号展现的特性区别越大,更利于区分信号与噪声,但是分解层数太大时,也会影响重构信号的保真度。根据信号类型以及信噪比的不同,一般小波去噪中,分解层数取3~5层,且硬阈值去噪的效果要优于软阈值去噪的效果。为了定量地分析去噪效果,定义幅值比 P_{SN} 为

$$P_{SN} = \left| \frac{V_S}{V_N} \right| \quad (6)$$

其中, V_S 为接收信号首波峰值点的幅值; V_N 为噪声信号峰值幅度。幅度比 P_{SN} 的值越大,去噪效果越好,采用阈值法时延估计得到的时间越准确。

由表2可知,当分解层数递增时,幅值比并没有一直保持增加,在分解层数为5时幅值比反而下降。故分解层数为4时幅值比最高,去噪效果最好。本文采取选择db8小波、分解层数4、Heursure规则、阈值调整策略“mln”及硬阈值处理方法。

表2 不同分层数下的幅值比

Table 2 Amplitude ratio under different number of layers

分解层数	3	4	5
幅值比	8.690 4	9.518 3	5.694 3

为获取波形初至点时间,对去噪接收信号数据取绝对值,首先提取初至波峰点时间。根据设定的阈值进行分峰截幅,可以避免幅值较低的噪声数据的干扰,减少了运算的数据量。对离散数据求一阶差分向量 D_1 ,即求相邻数据的差值,对求得的结果进行取符号运算,运算规则如下式所示:

$$S_1(i) = \begin{cases} 1, & D_1(i) > 0 \\ 0, & D_1(i) = 0 \\ -1, & D_1(i) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $S_1(i)$ 为向量中的元素个数。对向量 S 中等于0的元素进一步处理:若 $S_1(i) = 0$ 且 $S_1(i+1) \geq 0$, 则 $S_1(i) = 1$; 若 $S_1(i) = 0$ 且 $S_1(i+1) \leq 0$, 则 $S_1(i) = -1$ 。这样向量 S_1 只包含1和-1两种元素,对向量 S_1 求一阶差分向量 D_2 ,即接收数据的二阶差分向量,若向量 D_2 中, $D_2(i) = -2$, 则波峰位置即为 $D_2(i+1)$ 对应的点。基于此获得接收信号首波初至点时间,也即纵波由发射端至接收端传播时间。

基于以上算法,获得解除岩芯端面对测时纵波初

至时间 $68 \mu\text{s}$,但还需剔除系统误差。采用收发探头相互对接,发射波时间为0时,获得波形如图14所示,首波初至 $6 \mu\text{s}$ 。故真实纵波初至时间应为 $62 \mu\text{s}$,发射波为0时,如图15所示,故纵波波速 5161 m/s 。对平测法测速采用同样的算法获得横波初至时间 $91 \mu\text{s}$,横波波速 3077 m/s 。

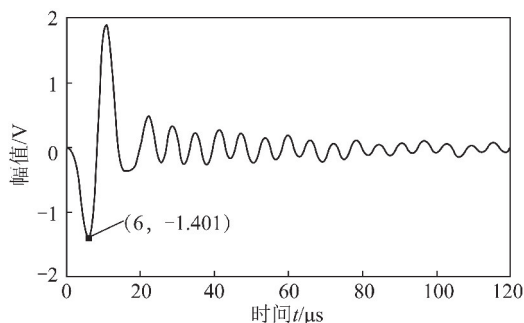


图14 收发探头对接波形

Fig. 14 Docking waveform of transceiver probe

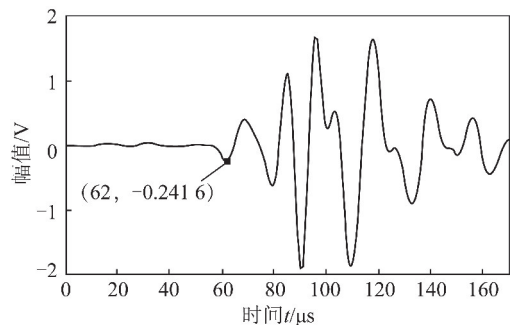


图15 纵波接收信号初至波形

Fig. 15 Initial arrival waveform of p-wave receiving signal

由式(3),(4)可知,试验的解除岩芯动态弹性模量计算结果为 64.9 GPa ,代入式(5),可推得解除岩芯静态弹性模量 25.92 GPa 。

3.2.2 地应力解除岩芯静态力学参数获取测定

围压率定试验在地应力测量分析中用于获取解除岩芯的弹性模量 E 和泊松比 ν ^[16-17]。试验中岩芯处于平面应力状态,采用弹性力学分析,可推得小孔孔壁内应变片应变与围压关系:

$$E = \frac{\sigma_r}{\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \quad (8)$$

其中, σ_r 为径向压力(压缩应力为正); R 和 r 分别为解除岩芯外半径和小孔半径; ε_θ 为3组应变花环向应变的平均值。

$$E_p = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\varepsilon_\theta} \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \quad (9)$$

由地应力解除岩芯围压率定数据拟合如图16所示,结合式(9)可知: $E = 25.47 \text{ GPa}$ 。

3.2.3 动态、静态力学参数对比分析

动态弹性模量以测定岩体弹性波速度为基础,由

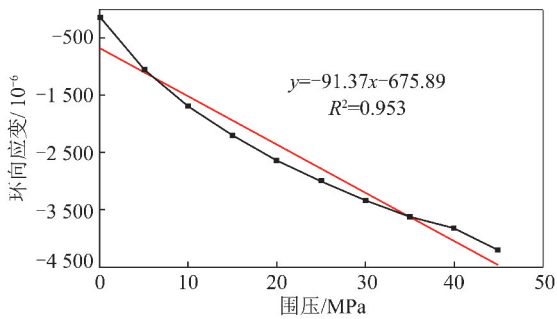


图16 围压-环向应变曲线

Fig. 16 Confining pressure-circumferential strain curves

于测试作用力小且时间短暂,对于远离震源的介质或岩体可近似视为弹性体,应变可视为弹性变形,与岩性及影响其波速的构造、结构面发育情况、完整性、应力状态等因素有关,速度对动弹模量的影响权重较大。静态弹性模量则以测定静荷载作用下岩体的应力与应变而确定,测试时外加作用力大且作用时间长,受测试条件影响较大。

越具有离散性、颗粒性、孔隙性的材料,应变越滞后于应力的变化,从而在动力作用下的变形量越小于在同值静力作用下的变形量,动态弹性模量越大于静态弹性模量。反之,一致性越好的材料,动静弹性模量之比越趋近于1^[18]。3.2.1节中通过拟合公式推得地应力解除岩芯静态弹性模量为25.92 GPa,与围压率定试验数据计算的静态弹性模量25.47 GPa较为接近。对于同一类花岗岩,即使尺寸不同,其动态及静态弹性模量仍存在一定程度的固定关系。为基于小尺寸干耦合点接触声波探头测速系统在现场测定岩体静态弹性模量的可行性,提供了一定的依据。

4 结 论

(1) 自研发小尺寸干耦合点接触式声波收发探头,便于钻孔内布置,前端与岩石声压匹配较好,不需使用耦合剂。相较于传统声波发射、接收探头,不仅免去涂加耦合剂的繁琐,还避免了因耦合剂溢漏造成的信号丢失。

(2) 从硬件及算法两面提高信噪比,同时采用瞬时无线数据采集技术,避免长时采集过程中,由于导线发热对采集精度的影响,提高了工程环境的适用性,为现场长期监测提供了基础。

(3) 通过对同一区域标准花岗岩岩样进行纵横波速测定及单轴压缩试验,计算并拟合了动、静态弹性模量关系式。其对大尺寸地应力解除岩芯基于纵横波速测定计算获得动态弹性模量,与围压率定试验测得静态弹性模量间的关系具有一定适用性。为岩体静态力学参数在现场地应力岩芯解除过程及岩

体长期监测过程中的实时采集与分析研究提供了借鉴。

参考文献(References):

- [1] HAYASHI K, SATO A, ITO T. In-situ stress measurements by hydraulic fracturing for a rock mass with many planes of weakness[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(1): 45-48.
- [2] 康红普, 林健, 张晓. 深部矿井地应力测量方法研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 929-933.
KANG Hongpu, LIN Jian, ZHANG Xiao. Research and application of in-situ stress measurement in deep mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 929-933.
- [3] 任重阳, 唐爱松. 岩体工程质量分级应用研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(S1): 53-57.
REN Chongyuan, TANG Aisong. Classification application research of quality of engineering rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S1): 53-57.
- [4] 赵航, 李新平, 罗忆, 等. 裂隙岩体中弹性波传播特性试验及宏观损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2939-2948.
ZHAO Hang, LI Xinping, LUO Yi, et al. Characteristics of elastic wave propagation in jointed rock mass and development of constitutive model by coupling macroscopic and mesoscopic damage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2939-2948.
- [5] 王贵宾, 杨春和, 郭应同, 等. 川东北地区岩石纵波速度分布特征和响因素的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2834-2842.
WANG Guibin, YANG Chunhe, GUO Yingtong, et al. Experimental research on distribution characteristics and influential factors of p-wave velocity for rocks in northeast region of sichuan province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2834-2842.
- [6] 李楠, 张新, 王达轩, 等. 煤样吸水全过程纵波波速变化规律及波形特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1921-1929.
LI Nan, ZHANG Xin, WANG Daxuan, et al. Experimental study on the variation of P-wave velocity and waveform characteristics during the whole process of water absorption of coal samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1921-1929.
- [7] 朱合华, 周治国, 邓涛. 饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 823-828.
ZHU Hehua, ZHOU Zhiguo, DENG Tao. Acoustic parameters of low-porosity rock under dry and saturated conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 823-828.
- [8] 徐晓炼, 张茹, 戴峰, 等. 煤岩特性对超声波速影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 793-800.
XU Xiaolian, ZHANG Ru, DAI Feng, et al. Effect of coal and rock characteristics on ultrasonic velocity[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 793-800.
- [9] 陈宇龙, 张玉. 不同温度热处理石灰岩的物理力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 3732-3739.

- CHEN Yulong, ZHANG Yu. Experimental study of physical and mechanical behavior of limestone subjected to different heat treatment temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 3732-3739.
- [10] 司文朋, 杨勤勇, 王辉明, 等. 耦合方法对岩样声波速度测试影响的实验分析[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 1951-1955.
- SI Wenpeng, YANG Qinyong, WANG Huiming, et al. Experimental analysis of the influence of coupling methods on rock samples acoustic velocity measurement[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 1951-1955.
- [11] SHEVALDYKIN V G, SAMOKRUTOV A A, KOZLOV V N. Ultrasonic low-frequency transducers with dry dot contact and their applications for evaluation of concrete structures [P]. Ultrasonics Symposium, Proceedings, 2002 IEEE, 2002.
- [12] 尤明庆, 苏承东. 利用纵波探头测量横波速度的试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1841-1843.
- YOU Mingqing, SU Chengdong. Measurement of s-wave velocity with probes for p-wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1841-1843.
- [13] 柳建新, 刘文劼, 童孝忠, 等. 超声波单面平测法检测中的若干问题及改进方法[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(5): 20-23, 28.
- LIU Jianxin, LIU Wenjie, TONG Xiaozhong, et al. Some problems in one-side way of ultrasonic wave method and improving measures [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(5): 20-23, 28.
- [14] 晏露超. 混凝土结构裂缝的超声波平测法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- YAN Luchao. Research on crack detecting in concrete structure with ultrasonic single plane detecting method [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [15] HARDYJHR. Acoustic emission/microseismic activity [M]. Pennsylvania, USA: A. A. Balkema Publishers, 2003: 29-33.
- [16] 刘允芳, 刘元坤. 围压试验在空心包体式应变计地应力测量中的作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3932-3937.
- LIU Yunfang, LIU Yuankun. Function of confining pressure test on Hollow inclusion triaxial strain gauge for geostress measurement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3932-3937.
- [17] 冀东, 任奋华, 彭超, 等. 地应力弹性参数计算的应力区间分级方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2728-2734.
- JI Dong, REN Fenhua, PENG Chao, et al. A stress interval classification method for calculating rock elastic parameters in in-situ stress measurement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2728-2734.
- [18] 聂运钧, 肖国强, 王法刚. 声波法在三峡坝基岩石力学试验中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(S1): 175-177.
- NIE Yunjun, XIAO Guoqiang, WANG Fagang. Application of acoustic wave method to rock mechanical tests in Three Gorges Project dam area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S1): 175-177.