

高压高应力岩石声波时域传播特性试验研究

金解放¹, 赵康艳¹, 黄方博², 王宇¹, 方立兴¹

(1. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 地下工程岩体普遍处于水压力和地应力环境中, 水压力和地应力共同控制着岩石的物理力学特性, 研究高压和高应力对岩石声波传播的影响特性, 有利于揭示深部岩体工程开挖时围岩损伤演化、动态力学响应以及水压力和地应力的反演。基于自主研发的高压高应力岩石声波测试系统, 设置多组水压力和轴向静应力等级用于模拟地下水压力和地应力环境, 对红砂岩和石灰岩进行声波传播试验。选取岩石声波首波波形, 研究岩石声波波速、首波幅值和能量随水压力和轴向静应力的变化关系, 构建岩石声学参数的演化经验模型。研究表明, 当承受的轴向静应力确定时, 红砂岩声波波速随水压力的增大呈先上升后下降的变化趋势, 2者呈良好高斯函数关系, 石灰岩声波波速随水压力的增加先快速升高后缓慢降低。当承受的水压力确定时, 2种岩石声波波速随轴向静应力的增大均呈先增加后减小的变化趋势, 红砂岩声波波速与轴向静应力呈高斯函数关系, 且红砂岩声波波速变化显著, 石灰岩变化较小。确定轴向静应力工况下, 红砂岩首波幅值和能量随水压力的增加先平缓发展后快速降低, 首波幅值与水压力呈指数函数的变化关系; 石灰岩首波幅值和能量随水压力的增加先快速增加后平稳发展或略有降低。确定水压力工况下, 红砂岩首波幅值和能量随轴向静应力的增加先升高后下降; 石灰岩首波幅值和能量随轴向静应力的增大先快速上升后急剧减小。研究成果对深部高压高应力环境下岩体工程开挖围岩赋存状态表征、应力波传播以及邻近结构的稳定性分析提供理论基础。

关键词: 深部高压; 岩石声波传播; 声波波速; 首波幅值; 首波能量

中图分类号: TU45; TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)07-3074-16

Experimental study on acoustic time domain propagation characteristics of rock under high water pressure and ground stress

JIN Jiefang¹, ZHAO Kangyan¹, HUANG Fangbo², WANG Yu¹, FANG Lixing¹

(1. School of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. School of Resources and Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Rocks bodies in underground engineering are generally subjected to water pressure and geo-stress environment, where water pressure and ground stress together control the physical and mechanical properties of the rock. The study of the influence characteristics of high water pressure and high stress on the propagation of rock acoustic waves is helpful to reveal the damage evolution and dynamic mechanical properties of the surrounding rock and the inversion of water pressure and soil stress during deep rock engineering excavations. Using a self-developed high hydraulic pressure and high stress rock acoustic test system, and multiple levels of hydraulic pressure and axial static stress were set to simulate the

收稿日期: 2023-08-21 修回日期: 2024-01-08 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1028

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52174112); 江西省自然科学基金资助项目 (20232ACB204015)

作者简介: 金解放 (1977—), 男, 河南杞县人, 教授, 博士生导师。E-mail: jif_chang@126.com

引用格式: 金解放, 赵康艳, 黄方博, 等. 高压高应力岩石声波时域传播特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3074-3089.

JIN Jiefang, ZHAO Kangyan, HUANG Fangbo, et al. Experimental study on acoustic time domain propagation characteristics of rock under high water pressure and ground stress[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3074-3089.



移动阅读

groundwater pressure and geo-stress environment, then the acoustic propagation tests were conducted on red sandstone and limestone. The head waveforms of rock acoustic waves were selected to investigate the relationship between wave velocity, amplitude and energy of rock acoustic waves with water pressure and axial static stress, and to construct an empirical model for the evolution of rock acoustic parameters. The results show that when the axial static stress is determined, the acoustic wave velocity of red sandstone increases and then decreases with the increase in water pressure, and the two show a good Gaussian function relationship, and the acoustic wave velocity of limestone increases rapidly and then decreases slowly with the increase in water pressure. When the water pressure is determined, the acoustic wave velocity of both types of rock shows an increasing and then decreasing trend with the increase of axial static stress. The relationship between the acoustic wave velocity of red sandstone and axial static stress follows a Gaussian function, and the change in acoustic wave velocity is significant. In contrast, the change in limestone is smaller. The axial static stress condition is determined. As water pressure increases, the first wave amplitude and energy of red sandstone initially increase gradually, but then decrease rapidly, and the head wave amplitude shows an exponential function with the water pressure. The head wave amplitude and energy of limestone first increase rapidly and then increase slowly or decrease slightly. When the water pressure is determined, the head wave amplitude and energy of red sandstone increase with the increase in axial static stress and then decrease gradually, while the head wave amplitude and energy of limestone increase rapidly with the increase in axial static stress and then decrease sharply. The research results provide a theoretical basis for the characterization of the surrounding rock state, the propagation of stress waves and the stability analysis of adjacent structures in deep rock excavations under high hydraulic pressure.

Key words: deep high water pressure; rock acoustic propagation; acoustic wave velocity; head wave amplitude; head wave energy

随着浅部资源的枯竭、西部大开发战略和立体交通网规划的实施,我国交通、水利水电建设以及资源开采不断向岩层深部推进。深部高水压环境下岩石(体)工程深受涌突水等难题的困扰,引发了许多重大地质灾害和安全事故^[1-2],这些均是缺乏对高水压高应力工程岩体在开挖卸载作用下损伤及其演化特性的系统研究掌握,成为制约深部高水压环境下岩体工程建设和运营的技术问题瓶颈。因此,研究高水压和高应力对岩石声波传播的影响特性,对深部岩体工程开挖时围岩损伤演化、动态力学响应以及水压力和地应力的反演具有重要意义。

不同水环境下岩石(体)声波传播衰减特性一直是岩石力学聚焦的重点。地下水对岩石(体)物理力学性能有重大的影响,地下水充填岩石(体)初始孔隙以及导致岩石微裂纹的萌生扩展是岩石声波传播特征发生变化的根本原因。饱和度影响岩石孔隙及裂隙充填水程度,进而影响岩石声波波形特征、声波波速和幅值特性^[3-5]。在含水率作用下,岩石孔隙微裂纹或裂隙处于饱和状态,裂隙中的水对岩石孔隙结构具有软化作用,导致岩石物理力学参数发生改变,进而影响声波传播衰减特性^[6-7];随着含水率的增大,岩石纵波衰减系数先略有增加后逐渐减小^[6],声波波形最大首波幅值总体呈线性下降的变化趋势^[7]。当承受的水压力确定时,压力水通过有效应力作用于岩石时,

抵消部分外荷载对岩石的影响,具体表现为岩石中微裂纹或裂隙中的水由饱和变到不饱和或受到挤压作用,岩石中裂隙数目增多,加速裂隙萌生和扩展,进而影响岩石物理力学特性^[8-9]。随着注水压力的增加,岩石声波波速呈线性上升的变化关系,且各阶段声波波速增量几乎保持一致^[10];岩石声波幅值随水压力的增加呈持续增大的变化趋势^[11]。通过理论模型模拟低水压作用下声波在岩石中传播特性,表明岩石声波波速和能量等声学参数与注水量呈正相关关系^[12]。但目前对岩石的声波传播试验多集中在含水率和低水压状态下,与深部高水压的工况有较大的差异,难以支撑深部高水压环境下岩体工程开挖建设运营。

地应力是工程岩体的重要赋存环境,决定着工程围岩体的物理力学性能。随地应力的变化,岩石(体)微裂隙经历孔隙压密和损伤累积演化等变形,其波阻抗值发生显著变化,这些变化控制着岩石声波传播衰减特性^[13-14]。静应力影响岩石孔隙压密及损伤程度,进而影响岩石纵波波速、声波幅值和能量^[15-17];随着轴向静应力的增加,岩石微裂纹或裂隙经历压密、弹性和损伤阶段,进而导致岩石声波波速呈“快速升高—平缓发展—急剧降低”的变化趋势^[14];而岩石声波幅值随着轴向静应力的增大呈先增加后减小的变化关系^[15]。随着围压的增大,岩石声波波速和首波幅值呈上升的变化关系,表明围压的存在抑制微裂纹和

裂隙的萌生扩展,对岩石声波传播特性表现为增强作用^[17]。越来越多的学者通过研究岩体工程开挖时围岩损伤演化反映岩石声波传播特性的变化规律;但声波在岩石传播过程中遇到裂隙或不连续界面时会发生多次透反射,与后续波会叠加,造成后续波产生畸变。为减小后续波叠加带来的误差,进行声波幅值分析时,选用首波幅值为研究对象;随着轴向静应力的增加,声波首波幅值呈先缓慢升高后逐渐降低的变化趋势^[18]。岩石声波波速随着静应力的增大整体上呈先增加后减小的变化关系,首波幅值持续降低^[19]。这些研究极大地提升了人们对地应力作用下工程岩体声波传播的认识,也是利用岩石声学参数反演工程岩体损伤程度和赋存环境的基础。

但在深部高压环境下,高压和高应力共同影响岩石微裂纹的萌生扩展、封闭孔隙开裂比例、孔隙充填水的程度以及有效应力大小,控制岩石(体)的损伤演化和变形特性,进而改变岩石声波传播衰减特性^[20-22],这是区别于浅部工程岩体声波传播特性的根本所在。由于试验装置的限制,目前还未开展高压和高应力对岩石声波传播特性的影响研究,不利于深部高压环境下岩体工程开挖围岩体损伤程度控制和涌突水灾害的防治。

为研究高压高应力下岩石声波时域传播规律及机理,笔者选用孔隙率相差较大的红砂岩和石灰岩为试验对象,基于自主研发的高压高应力岩石声波测试试验系统,设置不同大小的水压力和轴向静应力,分别模拟深部岩石赋存的水压力和地应力环境,探索高压和高应力对不同岩性岩石声波传播的影响特性。基于声波时域数据,计算不同工况下岩石声波波速;确定声波首波选取方法,计算不同工况下岩石声波首波幅值和能量。分析岩石声波波速、首波幅值和能量随水压力和轴向静应力的变化规律,构建岩石声学参数与水压力和静应力之间的经验关系模型,探究水压力和轴向静应力对岩石声波传播特性的影响机理。旨在探索高压高应力环境下岩石声波传播衰减特性,希冀对深部高压环境下工程岩体开挖建设提供理论经验参数以及地下工程灾害预警提供理论分析基础。

1 试验方法与原理

1.1 试件制备

选用孔隙率相差较大的红砂岩和石灰岩制备岩石试件,用于表征不同岩性岩石在高压高应力工况下的声波传播特性。相同岩性岩石均取自同一块均质的岩石石块,其物理力学参数见表1。为了得到明显

的岩石声波传播衰减特性,岩石试件应足够长;根据自主研发的高压加载试验装置的有效长度,确定岩石试件的长度为200 mm,直径为50 mm。同时保证试件两端面不平整度和不垂直度均小于0.02 mm,端面法线偏差小于0.25°。利用声波测速仪对岩石试件进行声波检测筛选,剔除声波波速偏离较大的岩石试件,以减小试验结果的离散性。声波试验前对岩石试件进行饱水处理,以便于后续高压加载时高压水直接作用于岩石试件内部。

表1 试件物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the samples

试件	$\Phi/\%$	$\rho_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_{\text{sat}}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C_d/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$C_{\text{sat}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	σ_c/MPa
红砂岩	5.28	2.39	2.44	2 778	3 018	55
石灰岩	0.65	2.70	2.71	5 574	5 578	63

注: Φ 为孔隙率; ρ_d 为干密度; ρ_{sat} 为饱和密度; C_d 为干燥声波波速; C_{sat} 为饱和声波波速; σ_c 为饱水状态下单轴抗压强度。

由表1可以看出,红砂岩和石灰岩孔隙率相差较大,这必将导致声波在传播过程中其声学参数存在差异。红砂岩的致密程度较低,单轴抗压强度为55 MPa,平均声波波速由干燥状态下2 778 m/s增至饱水状态下3 018 m/s,平均增量为7.95%;石灰岩的致密程度较高,单轴抗压强度为63 MPa,石灰岩平均声波波速由干燥状态下5 574 m/s增至饱水状态下5 578 m/s,平均增量为0.07%,表明岩石声波传播特性与岩石岩性密切相关。

1.2 试验装置

采用自主研发的高压高应力岩石声波测试试验系统进行试验,该试验系统由静应力加载装置,高压加载装置和声波测试系统组成,如图1所示。轴压加载系统、高压加载装置相对独立,可在声波测试前对岩石试件施加不同大小的轴向静应力和水压力,分别模拟工程地应力和水压力。

采用RSM-SY5(T)型声波仪测试不同工况下岩石声波数据。试验时声波仪的基本参数如下:高通频率0.5 kHz,低通频率500 kHz,波形采样间隔时间为1 μs ,波形采样长度512,发射脉宽5 μs ,发射电压为低压,换能频率为500 kHz。发射换能器发射电脉冲激励晶片振动,发射出声波在岩石中传播,后经接收换能器接收,将声能转化为电信号至接收系统,经信号放大在声波仪上显示波形图。

高压加载装置由密封腔、端盖、压盖、密封圈及手动水压泵组成,如图1(c)所示。在入射杆和透射杆上先分别套上端盖、径向密封圈和压盖,用螺钉将

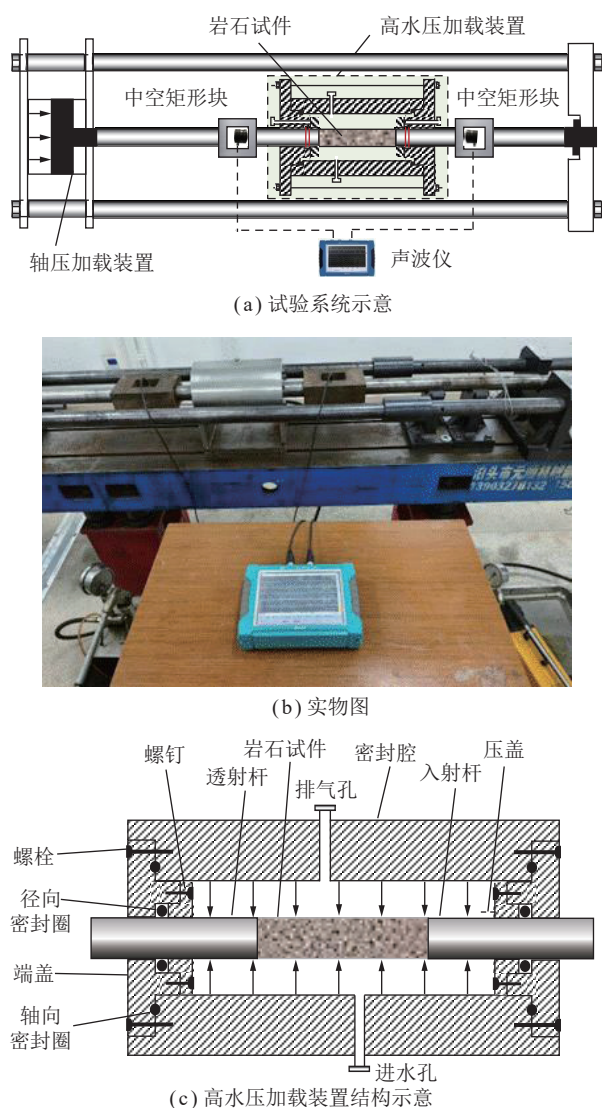


图1 高水压高应力岩石声波测试试验系统

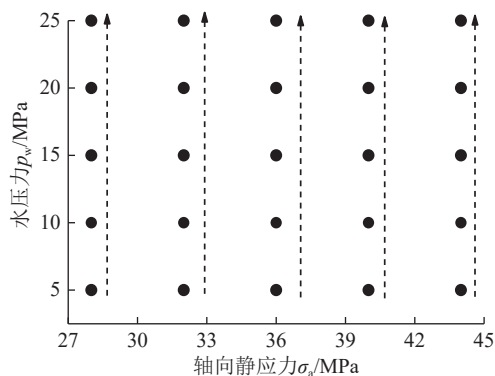
Fig.1 Acoustic test system for rock with high water pressure and high ground stress

压盖和端盖紧密固连在一起。通过压盖和端盖的挤压, 径向密封圈发生变形, 与入射杆和透射杆圆周表面紧密接触, 防止高压水从弹性杆表面渗漏, 达到封闭高压水的效果。其创新点是在在单轴加载系统的基础上, 增加高水压加载装置, 高水压和高应力下岩石微裂纹的萌生扩展以及有效应力的改变, 导致岩石产生不同程度的损伤和弱化效应, 实现了水力耦合情况下的声波测试。试验过程中施加的轴向静应力须大于水压力, 以保证入射杆和透射杆都与岩石试件紧密接触, 进而金属杆两端受力平衡, 轴向静应力相当于法向总应力, 高水压模拟地下水压力。岩石试件两端应涂抹凡士林耦合剂, 保证弹性杆与岩石试件端面接触良好。

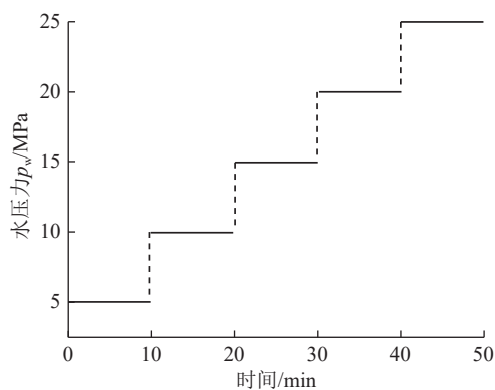
1.3 试验方法及步骤

为研究高水压和高应力对岩石声波传播特性的

影响, 轴向静应力分别设置为 28、32、36、40 和 44 MPa 等 5 个等级。当岩石试件承受确定的轴向静应力时, 水压力从 0 开始, 间隔 5 MPa 测量岩石声波并记录其时域数据, 直至加载到 25 MPa, 即水压力分别设置为 0、5、10、...、25 MPa 等 6 个等级, 水压力的加载路径如图 2(a) 所示。



(a) 高水压高应力加载示意



(b) 水压力加载示意

图2 岩石试件加载路径示意

Fig.2 Loading path diagram of rock specimen

对每个岩石试件先施加确定的轴向静应力至预定值, 在按照图 2(b) 所示加载方式逐级施加水压力至设定值时饱载 10 min 后进行声波测试, 同时记录声波波形数据。对每个轴向静应力下的红砂岩和石灰岩各选取 3 个岩石试件进行不同水压力下的声波试验。

1.4 声波波速测定方法

基于岩石试件的有效长度 L_s 、声波在中空矩形块和弹性杆中的传播时间 T_0 (图 3(a))、声波在中空矩形

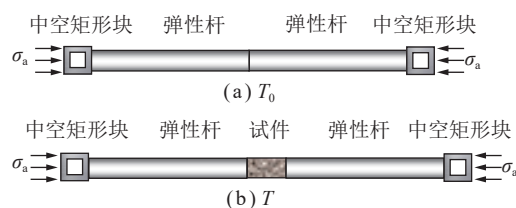


图3 水压力和静应力下岩石声波传播时间测试示意

Fig.3 Acoustic wave test schematic diagram under water pressure and static stress of rock

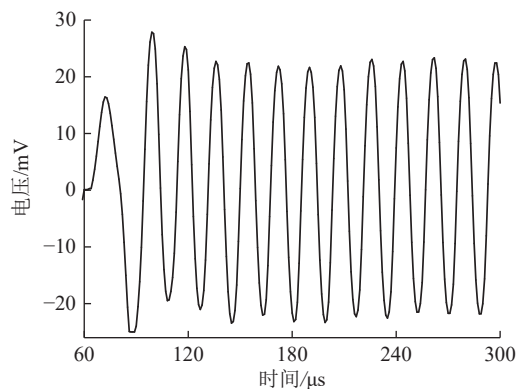
块、弹性杆和岩石试件中总的传播时间 T (图 3(b)), 可计算出高水压和高应力作用下岩石声波波速 C 。

$$C = \frac{L_s}{T - T_0} \quad (1)$$

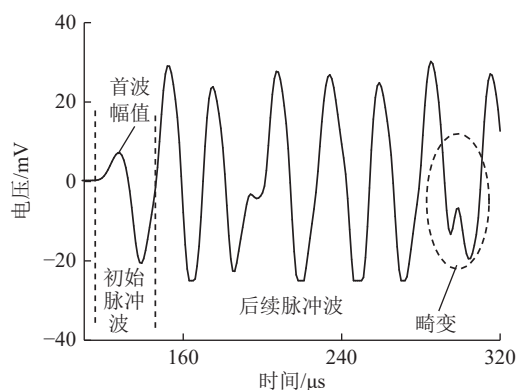
2 试验结果与分析

2.1 声波首波选取及其特征

图 4 为轴向静应力 $\sigma_a=28$ MPa、水压力 $p_w=5$ MPa 工况下声波波形。由图 4 可以看出, 岩石声波波形呈周期性变化, 后续其他周期波峰幅值与第 1 周期波峰幅值相比会显著提高, 表明声波在传播过程中遇到裂隙或不连续界面时会发生反射、折射和散射, 声波仪发射端产生的波与后续反射回去的波叠加产生共振的现象导致的^[21-22]。



(a) 声波在弹性杆中传播时初始波形



(b) 声波在岩石中传播时初始波形

图 4 高水压高应力岩声波首波示意

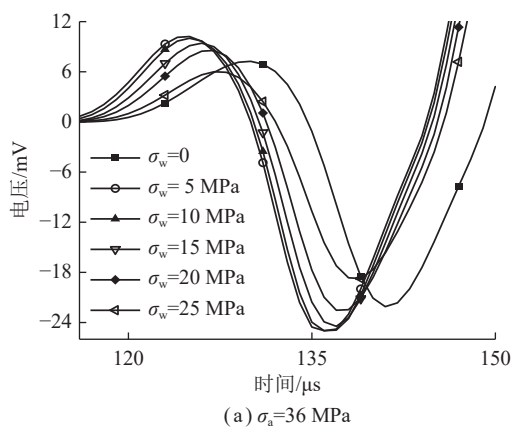
Fig.4 Rock head wave shape selection under high water pressure and high axial static stress

由图 4 还可以看出, 当承受的水压力确定时, 声波在岩石中传播时幅值小于弹性杆中幅值, 这是由于发生多次透反射波与后续波会叠加, 造成后续波产生畸变, 产生误差; 为减小后续波叠加带来的误差, 将图 4(b) 中初始脉冲波的声波波形定义为首波, 研究相同发射频率声波在不同工况下岩石声波衰减特性, 应

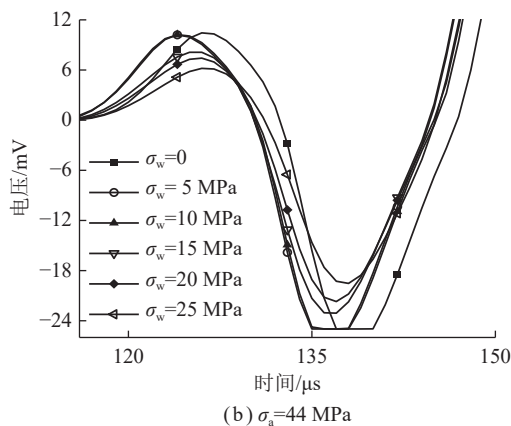
选择声学参数变化显著的部分信号, 且在声波传播中衰减表现较为明显的首波波形的变化^[19], 这是由于声波在岩石试件内往复传播一次需要的时间是 $143 \mu\text{s}$ 。红砂岩首波波形周期明显小于 $143 \mu\text{s}$, 因此多次透反射对首波波形影响较小。

2.2 红砂岩首波波形变化规律

图 5 为部分轴向静应力工况下红砂岩首波波形曲线。由图 5 可以看出, 当承受的轴向静应力确定时, 水压力对红砂岩首波波形变化特征具有明显影响; 随着水压力的增加, 红砂岩首波波形形状变化基本相似, 首波起跳点时间先提前后延迟, 首波持续时间呈先减小后增大的变化关系, 岩石首波幅值呈先升高后降低的变化趋势。



(a) $\sigma_a=36$ MPa



(b) $\sigma_a=44$ MPa

图 5 岩石声波首波波形与水压力的变化关系

Fig.5 Relationship between rock acoustic head wave shape and water pressure

分析认为, 当承受的轴向静应力确定时, 岩石试件初始孔隙被压密或损伤, 具有一定数目的微裂纹或裂隙。承受水压力较小时, 岩石初始微裂纹或裂隙中空气被挤压排出, 被水填充的程度加大, 导致岩石中裂隙黏性较弱, 从而有利于声波传播, 首波起跳点提前。但随着水压力进一步加大, 高水压有利于微裂纹萌生、扩展和成核, 导致岩石微裂纹数量增多, 损伤程

度加大;同时也伴随着更大比例的岩石骨架受高压水作用而发生软化作用^[23-24];这些均导致岩石中裂隙黏性增强,劣化了岩石声波传播,首波起跳点延迟。

2.3 石灰岩首波波形变化规律

图6为部分轴向静应力工况下石灰岩首波波形曲线。由图6可以看出,轴向静应力工况下,是否承受水压力对岩石首波波形变化特征有较大影响;随着水压力的增加,岩石首波起跳点先提前后延迟,首波持续时间呈先提前后延迟的变化关系,首波幅值呈先快速增大后缓慢降低的变化趋势。

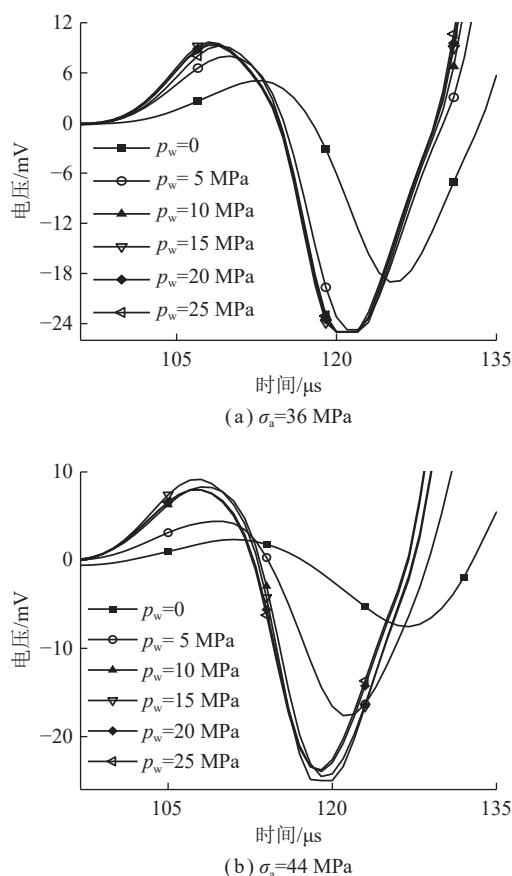


图6 岩石声波首波波形与水压力的变化关系

Fig.6 Relationship between rock acoustic head wave shape and water pressure

当承受的轴向静应力确定时,随着水压力的增大,红砂岩和石灰岩首波波形变化特征具有显著差异。水压力从0增至5 MPa,红砂岩首波起跳点和首波幅值变化较小,而石灰岩变化显著,表明小水压力对石灰岩首波波形变化特征影响显著。但随着水压力的进一步加大,红砂岩首波起跳点和声波首波幅值变化显著,而石灰岩变化较小,表明高水压对红砂岩首波波形变化特征影响显著。

水压力较小时,水压力对岩石初始孔隙或裂隙快速填充达到饱和,有利于声波传播,岩石首波起跳点

时间快速提前,首波持续时间减小;随着水压力进一步加大,高水压促进岩石内部裂隙扩展,岩石孔隙中结合水黏性增强,导致岩石微裂纹数量增多、损伤程度加大^[8],但由于石灰岩强度较高、致密性较好,高水压对石灰岩微裂纹萌生与扩展作用影响较小,因此石灰岩首波起跳点时间和幅值变化较小。

根据试验得到首波声波波形,利用式(1)计算得到声波波速;根据首波选取,计算得到首波能量,计算结果见表2。

3 声波波速的变化规律

波速反映声波在介质中传播快慢,广泛应用于表征或反演岩石内部缺陷、孔隙度、软硬程度和强度^[7]。因此研究高水压和高应力作用下岩石声波波速的变化特性,是岩石声波传播衰减特性的重要内容。

3.1 水压力对岩石声波波速的影响

红砂岩声波波速与水压力的变化关系如图7所示。由图7可以看出,确定轴向静应力工况下,红砂岩声波波速随水压力的增加先增大后降低;相比无水压时的声波波速,增幅最大达151.6 m/s,降幅达-188.08 m/s,这表明地下水压力对岩石声波波速具有较大的影响。

为了定量地研究红砂岩声波传播特性与地下水压力的变化关系,并利用2者的关系确定特定水压力工况下岩石的声波波速,或利用声波波速值反演地下水压力环境,对图7中的试验数据进行拟合,发现2者满足良好的高斯函数关系:

$$C_R = C_0 + C_A \exp \left(-\frac{(p_w - \sigma_c)^2}{w^2} \right) \quad (2)$$

其中, C_R 为红砂岩声波波速, m/s; C_0 、 C_A 、 w 及 σ_c 为拟合参数。 $\sigma_c = p_w$ 时, $C_R = C_0 + C_A$; $p_w < \sigma_c$ 时, 岩石声波波速随着水压力的增大逐渐增大; $p_w > \sigma_c$ 时, 岩石声波波速随着水压力的增加逐渐降低, 因此定义 σ_c 为临界水压力 (MPa)。由高斯函数特点可知, w 越大说明将有更大范围的水压力对声波波速有影响, 因此定义 w 为水压力敏感性因子 (MPa)。

从表3可以看出, 红砂岩声波波速与水压力的关系服从良好的高斯函数分布, 随着轴向静应力的增加, C_0 和 σ_c 持续增大, 而 C_A 和 w 呈先上升后下降的变化趋势。此经验模型可较好地表征岩石声波波速与水压力的关系, 可为预测深部高水压条件下地下工程岩体的声波传播特性提供参考。

石灰岩声波波速 C_L 与水压力的关系如图8所示。由图8可以看出, 确定轴向静应力工况下, 石灰岩声

表 2 不同水压力与轴向静应力下岩石声波传播实验结果

Table 2 Acoustic wave propagation experimental results of rock under different water pressure and axial static stress

p_w/MPa	σ_a/MPa	红砂岩				石灰岩			
		$t/\mu\text{s}$	A_R/mV	E/J	$C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$t/\mu\text{s}$	A_L/mV	E/J	$C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0	28	120.00	5.97	209.66	3 636.36	101.00	5.06	182.43	5 555.56
5		118.00	6.18	251.28	3 773.58	99.00	8.03	454.38	5 882.35
10		118.00	6.25	314.08	3 773.58	99.00	9.31	576.65	5 882.35
15		119.00	5.10	166.47	3 703.70	99.00	9.68	614.61	5 882.35
20		120.00	3.56	82.86	3 636.36	99.00	9.52	597.77	5 882.35
25		123.00	2.95	59.73	3 448.28	99.67	9.24	574.23	5 768.68
0	32	118.67	7.17	300.75	3 726.48	100.00	9.30	587.73	5 714.29
5		116.67	7.21	313.68	3 870.97	98.67	10.44	681.46	5 940.01
10		117.33	7.41	365.05	3 821.66	97.67	10.82	717.72	6 121.82
15		118.67	7.23	355.08	3 726.71	98.00	11.09	750.15	6 060.61
20		120.00	5.65	203.60	3 636.36	98.00	10.73	700.07	6 060.61
25		121.33	3.49	76.21	3 550.30	98.00	10.92	729.42	6 060.61
0	36	117.00	9.42	546.20	3 846.15	101.00	8.07	459.14	5 555.56
5		115.67	9.92	596.44	3 947.11	98.67	9.95	626.20	5 940.01
10		115.33	10.01	619.92	3 973.77	98.67	10.49	678.58	5 940.01
15		116.00	9.42	530.62	3 921.57	99.00	10.12	635.27	5 882.35
20		118.00	8.54	440.64	3 773.58	99.00	10.27	661.23	5 882.35
25		119.00	6.00	217.70	3 707.70	99.00	10.28	667.56	5 882.35
0	40	117.00	10.69	752.42	3 846.15	100.33	7.47	402.70	5 660.91
5		115.67	10.99	719.30	3 947.37	98.00	10.31	677.78	6 060.61
10		116.00	11.03	754.03	3 921.57	97.67	10.61	707.19	6 121.82
15		116.33	10.47	680.52	3 896.10	97.00	10.77	726.57	6 250.00
20		117.33	9.73	611.56	3 821.66	97.67	10.16	664.15	6 121.82
25		118.33	7.98	393.77	3 750.00	98.00	9.82	636.79	6 060.61
0	44	117.33	10.44	697.77	3 821.90	100.33	2.35	44.91	5 660.91
5		116.00	10.21	660.02	3 921.57	98.00	4.41	148.28	6 060.61
10		115.33	10.12	669.45	3 973.51	99.00	8.31	482.91	5 882.35
15		116.33	8.13	508.70	3 896.10	98.67	9.21	563.54	5 940.01
20		117.00	7.42	336.53	3 846.15	98.67	7.97	430.70	5 940.01
25		117.33	6.19	235.17	3 821.66	98.67	7.98	422.70	5 940.01

注： E 为声波首波能量，J； t 为信号采集时间， μs ； A_R 为红砂岩首波幅值，mV； A_L 为石灰岩首波幅值，mV。

波波速随水压力的增大先快速升高后缓慢降低。当水压力从 0 增大至 5 MPa 时，石灰岩声波波速的增幅变化较为显著，表明水压力在这一范围内对石灰岩声波波速的影响较为显著；随着水压力的继续增大，石灰岩声波波速增幅较小，表明高水压对石灰岩声波波速的影响较小。

由图 7、8 可以发现，随着水压力的增加，2 种岩石声波波速的变化趋势大致相似，但增减幅度不同。

当承受的水压力较小时，红砂岩声波波速增幅较小，石灰岩增幅加大，表明小水压极大地促进石灰岩声波传播特性；当承受的水压力较大时，红砂岩声波波速减小幅度显著，石灰岩减小幅度较小，表明高水压对红砂岩传播影响较为显著。

分析认为，水压力对岩石声波波速的影响具有双重作用机理，小水压促进了石灰岩声波传播，高水压对石灰岩声波传播阻碍作用较小。水压力较小时，岩

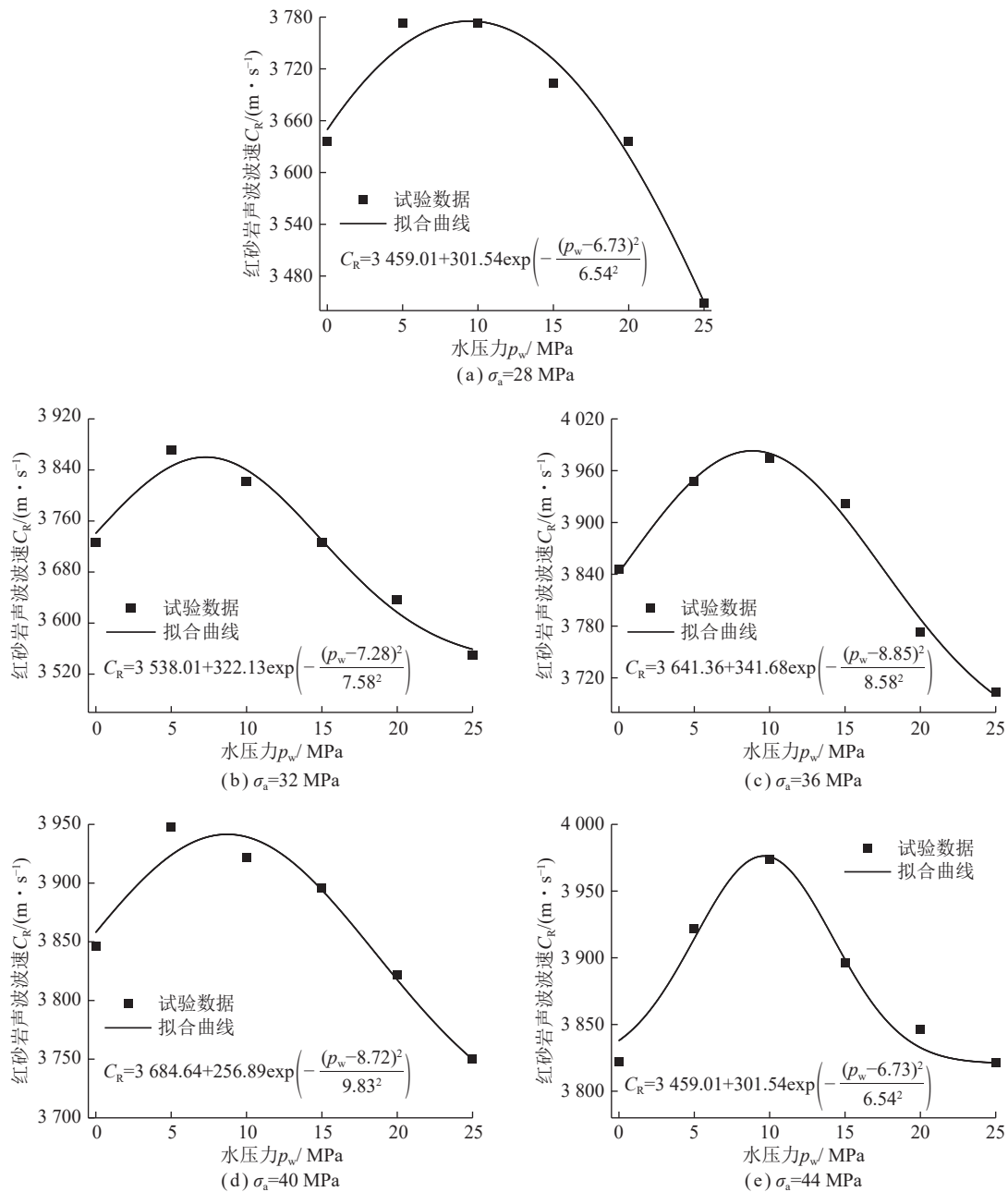


图7 水压力对红砂岩声波波速的影响

Fig.7 Influence of water pressure on acoustic wave velocity in red sandstone

表3 红砂岩声波波速与水压力之间的拟合结果

Table 3 Fitting result between acoustic wave velocity of red sandstone and water pressure

σ_a/MPa	$C_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$C_A/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	w/MPa	σ_c/MPa	R^2
28	3 459.01	301.54	6.54	6.73	0.934
32	3 538.01	322.13	7.58	7.28	0.940
36	3 641.36	341.68	8.58	8.85	0.976
40	3 684.64	256.89	9.83	8.72	0.902
44	3 820.75	155.54	4.58	9.62	0.933

石内部自由水含量增强,自由水快速填充岩石孔隙或裂纹,有利于快速提升石灰岩声波波速;水压力较大

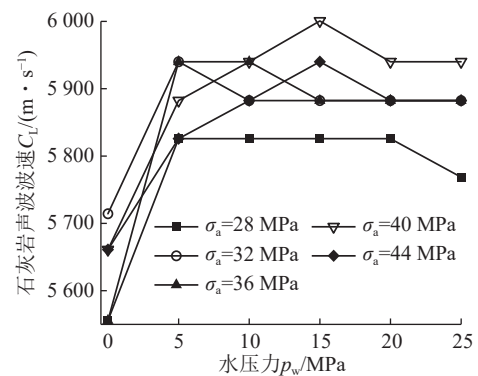


图8 水压力对石灰岩声波波速的影响

Fig.8 Influence of water pressure on acoustic wave velocity in limestone

时,岩石内自由水含量趋于稳定,高水压促进岩石裂隙扩展,导致岩石微裂纹数量增多、损伤进一步加大,劣化了石灰岩声波传播性能,岩石声波波速减小;但由于石灰岩的致密性较高和孔隙率较小,高水压对岩石损伤程度影响较弱,岩石声波波速减小幅度较小。

3.2 轴向静应力对岩石声波波速的影响

红砂岩声波波速与轴向静应力的关系如图 9 所示。由图 9 可以看出,当承受的水压力确定时,红砂岩声波波速随轴向静应力的增加呈先升高后下降的变化趋势,表明深部水压环境下地应力的大小对岩石声波波速的影响较为显著。

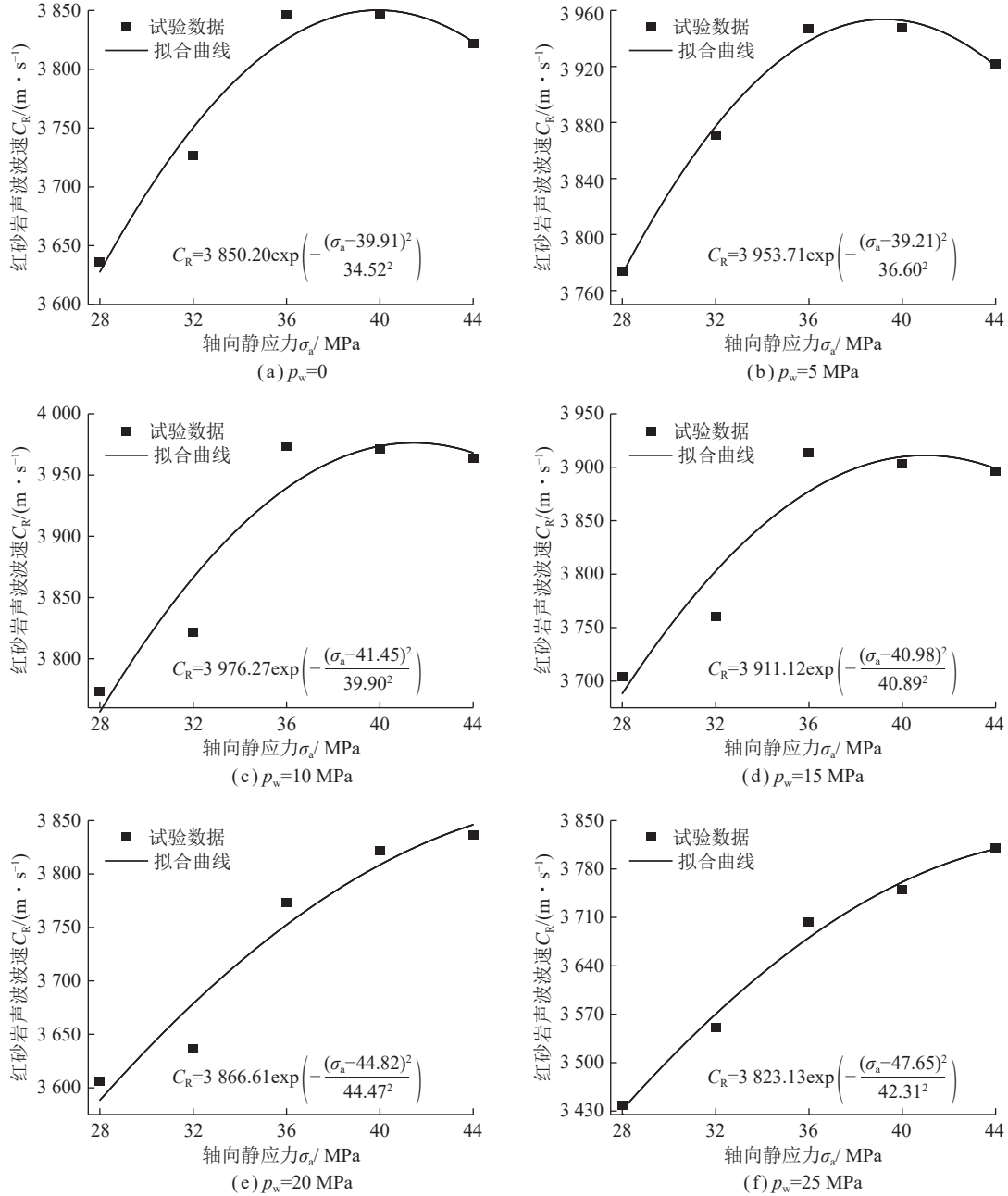


图 9 轴向静应力对红砂岩声波波速的影响

Fig.9 Influence of axial static pressure on acoustic wave velocity in red sandstone

为探究轴向静应力对具有水压力岩石声波传播衰减特性的影响,将图 9 中声波传播速度与轴向静应力的相关关系进行拟合,拟合结果如下:

$$C_R = C_a \exp\left(-\frac{(\sigma_a - \eta)^2}{\xi^2}\right) \quad (3)$$

式中, C_a 为岩石声波波速的最大值, m/s; η 为临界静应力, MPa; ξ 为静应力敏感性因子, MPa。

当承受的水压力确定时,岩石初始孔隙被填充或导致微裂纹萌生扩展,具有一定数量微裂纹或裂隙。轴向静应力较小时,岩石初始裂隙或微裂纹被压密、

孔隙闭合, 导致试件波阻抗增大, 有利于提升岩石声波波速^[14]; 随着轴向静应力进一步加大, 高轴向静应力促进微裂纹的萌生、扩展和成核, 导致岩石微裂纹数量增多、损伤程度加大, 导致岩石波阻抗减小, 岩石声波波速减小。

由表 4 可以看出, 红砂岩声波波速与轴向静应力之间服从高斯函数分布, 随着水压力的增加, C_a 和 η 整体上呈先增大后减小的变化关系, ξ 呈逐渐减小的变化趋势。此经验模型可以较好地表征出岩石声波波速与轴向静应力的关系, 可为预测围岩体开挖时地下工程岩石的声波波速提供参考。

表 4 红砂岩声波波速与轴向静应力之间的拟合结果

Table 4 Fitting result between acoustic wave velocity of red sandstone and axial static pressure

p_w/MPa	$C_a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	ξ/MPa	η/MPa	R^2
0	3 890.20	34.52	39.91	0.934
5	3 953.71	36.60	39.21	0.986
10	3 966.27	39.90	41.15	0.819
15	3 911.12	40.89	40.98	0.829
20	3 866.61	44.47	44.82	0.875
25	3 823.13	42.31	47.65	0.977

石灰岩声波波速与轴向静应力的关系如图 10 所示。由图 10 可以发现, 相同水压力工况下, 石灰岩声波波速随轴向静应力的增大先上升后下降, 表明随轴向静应力的变化岩石微裂纹或裂隙被压密或损伤, 导致波阻抗发生变化, 进而影响岩石声波波速, 结合图 10 的变化趋势, 推测出随轴向静应力的增大, 岩石声波波速将逐渐减小。

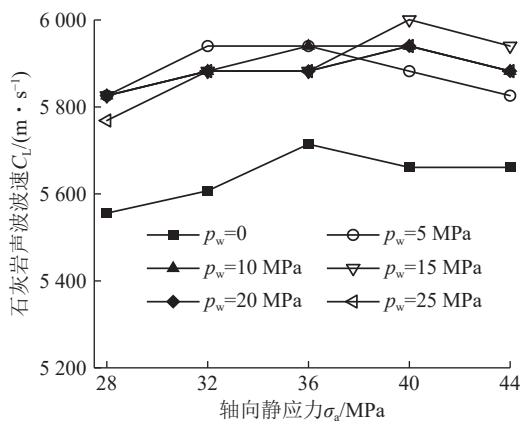


图 10 轴向静应力对石灰岩声波波速的影响

Fig.10 Influence of axial static pressure on acoustic wave velocity in limestone

由图 9、10 可以看出, 红砂岩和石灰岩声波波速随轴向静应力的增加其变化趋势相似, 但其变化幅度

存在明显差异; 体现了轴向静应力对不同岩性岩石的影响特性不同。这主要是由于红砂岩初始孔隙率较大、致密性较差、吸水性较好以及强度较低, 而石灰岩孔隙率较小、致密性较好、吸水性较差以及强度较高等特性引起的。

4 首波幅值的变化规律

岩石赋存环境变化时, 其内部孔隙及微裂纹也会随之变化, 声波传播性能发生改变, 导致首波幅值衰减程度不同。首波幅值为声波首波信号波形的最大振幅, 表征声波在岩石传播过程中的衰减程度^[14], 也能较好反映深部岩石赋存环境。因此研究高水压高应力作用下岩石首波幅值的变化特性, 是岩石声波传播衰减特性的重要内容。

4.1 水压力对岩石首波幅值的影响

红砂岩首波幅值与水压力的变化关系如图 11 所示。由图 11 可以看出, 当承受的轴向静应力较小时, 红砂岩首波幅值随水压力的增加先平缓发展后急剧降低; 当承受的轴向静应力较大时, 红砂岩首波幅值随水压力的增加持续降低, 表明水压力对岩石首波幅值具有显著影响。

为定量地分析红砂岩声波首波幅值 A_R 与水压力的关系, 对图 11 中的试验数据进行拟合:

$$A_R = A_0 + A_w \exp(\lambda p_w) \quad (4)$$

式中, A_0 、 A_w 、 λ 为拟合参数。当水压力为 0 时, $(A_0 + A_w)$ 为首波幅值, mV。由指数函数的特点可知, λ 越大意味着将有更大范围内水压力对声波首波幅值的影响, 因此定义 λ 为水压力对首波幅值的影响因子, MPa^{-1} 。

所有工况下声波发射端信号相同, 接收端声波的首波幅值越大, 通过岩石试件的衰减能量越少。较小水压力作用于岩石时, 岩石中部分微裂纹或裂隙被水填充, 裂隙中黏性影响较小, 声波发生透反射次数减小, 有利于声波传播, 首波幅值持续增大; 随着水压力的增大, 岩石内微裂纹或裂隙开始不断发育和扩展, 压力水对岩石中裂隙“水楔”效应作用具有增强作用, 裂隙间黏性增强, 声波发生透反射的次数增多, 恶化了声波传播, 岩石声波首波幅值减小。

表 5 为拟合相关系数及拟合参数, 由表 5 可以看出, 岩石首波幅值与水压力呈良好的指数函数关系, 拟合相关系数较高。此经验模型可较好地表征岩石首波幅值与水压力的关系, 可为预测深部水环境下工程岩体的声波传播特性提供参考。

石灰岩首波幅值 A_L 与水压力的相关关系如图 12 所示。由图 12 可以发现, 当承受的轴向静应力较小

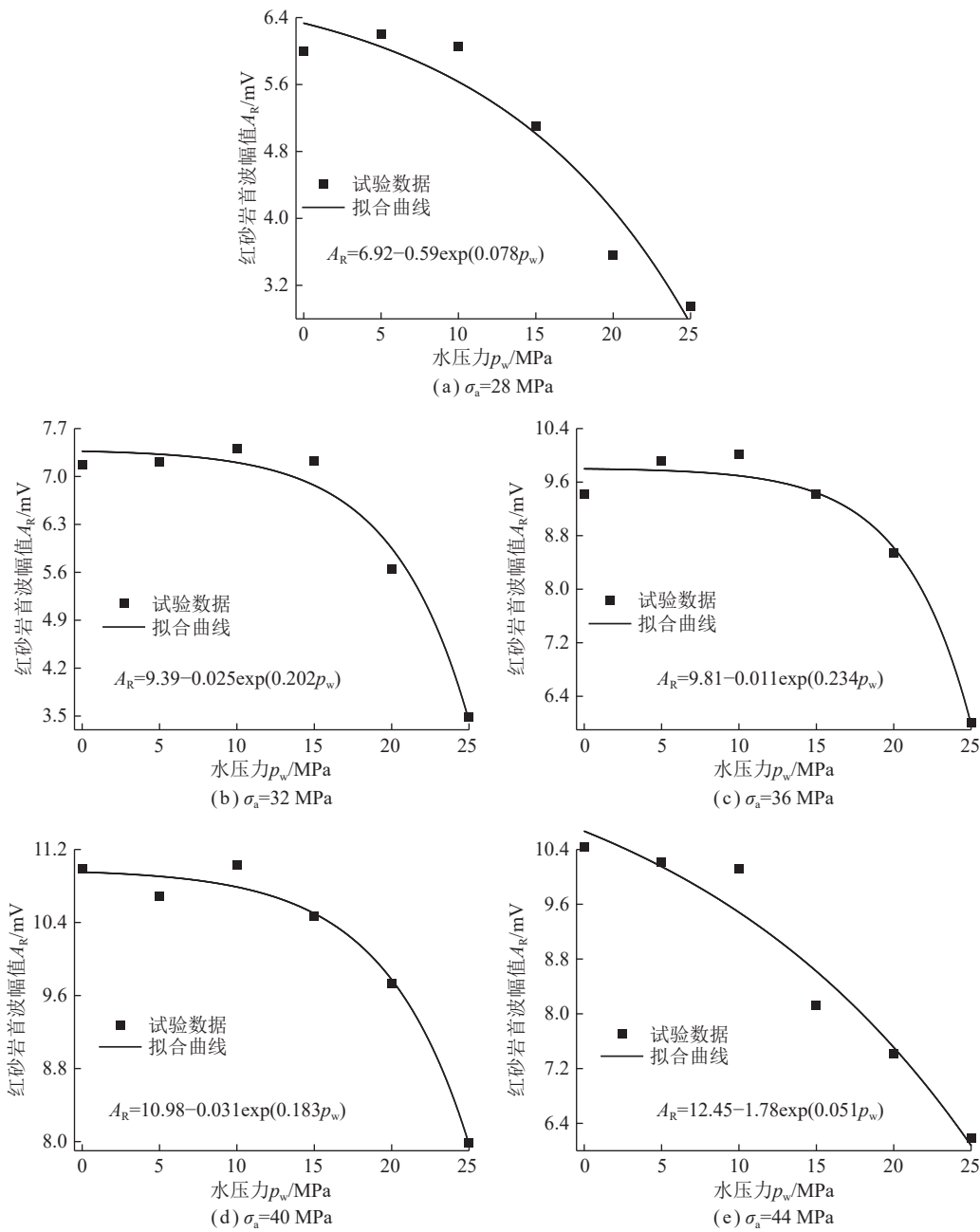


图 11 水压力对红砂岩首波幅值的影响

Fig.11 Influence of water pressure on head wave amplitude in red sandstone

表 5 红砂岩首波幅值与水压力之间的拟合结果

Table 5 Fitting result between head wave amplitude of red sandstone and water pressure

σ_a/MPa	A_0/mV	A_w/mV	λ/MPa^{-1}	R^2
28	6.92	0.590	0.078	0.889
32	9.39	0.025	0.202	0.955
36	9.81	0.011	0.234	0.960
40	10.98	0.031	0.183	0.974
44	12.45	1.780	0.051	0.922

时,石灰岩首波幅值随水压力的增大先快速上升后平缓发展;当承受的轴向静应力较大时,石灰岩首波幅

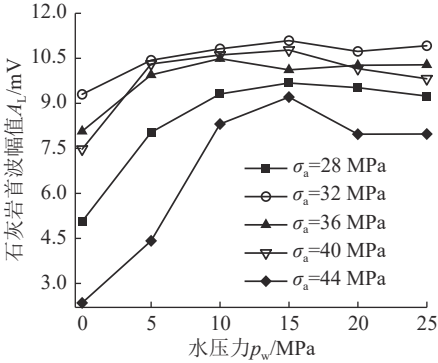


图 12 水压力对石灰岩首波幅值的影响

Fig.12 Influence of water pressure on head wave amplitude in limestone

值随水压力的增加先快速升高后缓慢降低, 这表明水压力对石灰岩首波幅值起到先促进后抑制的作用。由图 12 还可以看出, 水压力由 0 增大至 5 MPa 时, 石灰岩首波幅值变化显著; 随着水压力的进一步增大, 岩石首波幅值变化幅度较小, 表明小水压促进石灰岩声波传播, 而高水压对石灰岩声波传播阻碍有限, 这主要是由石灰岩强度、密度和吸水性所导致的。

由图 11、12 可以看出, 较小水压力作用下, 红砂岩首波幅值平缓发展, 而石灰岩首波幅值急剧升高; 随着水压力持续增大, 红砂岩首波幅值急剧降低, 而石灰岩首波幅值平缓发展或略有下降, 这表明岩石首

波幅值与水压力和岩石岩性相关。

4.2 轴向静应力对岩石首波幅值的影响

红砂岩首波幅值与轴向静应力关系曲线如图 13 所示。由图 13 可以看出, 红砂岩首波幅值随轴向静应力的增大先上升后降低。不同水压力作用下, 轴向静应力为 40 MPa 时岩石首波幅值达最大值, 随着轴向静应力的增加, 首波幅值对水压力的敏感性持续增大, 如轴向静应力为 28、36、44 MPa 时, 水压力从 0 增到 25 MPa, 首波幅值变化为 3.30、3.92 和 4.25 mV。

为探讨最大首波幅值与对应轴向静应力的值, 对图 13 中首波幅值随轴向静应力的变化规律进行拟合:

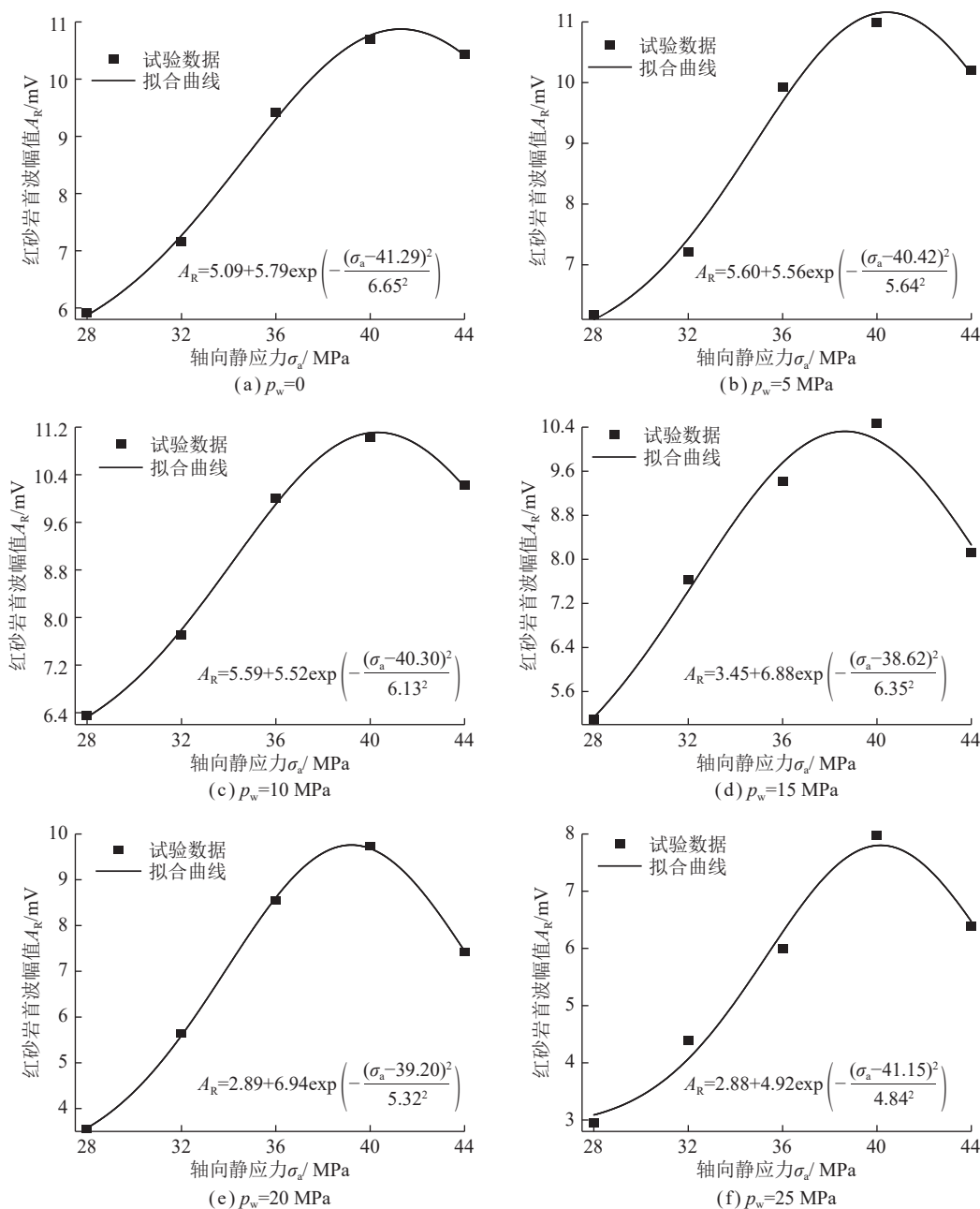


图 13 轴向静应力对红砂岩首波幅值的影响

Fig.13 Influence of axial static on head wave amplitude in red sandstone

$$A_R = A_a + A_c \exp \left(-\frac{(\sigma_a - \kappa)^2}{\mu^2} \right) \quad (5)$$

其中, A_a 、 A_c 、 κ 及 μ 为拟合参数;本文定义 κ 为临界静应力, MPa; μ 为静应力敏感性因子, MPa。当 $\kappa=\sigma_a$ 时, (A_a+A_c) 为首波幅值的最大值。

在 6 个水压力下, 最大首波幅值所对应的轴向静应力为 38~42 MPa。拟合结果表明, 轴向静应力为 38~42 MPa 时红砂岩首波幅值从上升到降低的临界点, 较为准确地预测了岩石首波幅值随轴向静应力从增大到减小临界点所在位置。

表 6 为拟合相关系数及拟合参数, 由表 6 可以看出, 岩石首波幅值与轴向静应力之间服从良好高斯函数关系, 拟合精度较高。此经验模型可以较好地表征岩石首波幅值与轴向静应力的关系, 可为预测深部静应力环境下地下工程岩体的最大首波幅值提高参考。

表 6 红砂岩首波幅值与轴向静应力之间的拟合结果

Table 6 Fitting result between head wave amplitude of red sandstone and axial static stress

p_w/MPa	A_a/mV	κ/MPa	A_c/mV	μ/MPa	R^2
0	5.09	41.29	5.79	6.65	0.993
5	5.60	40.42	5.56	5.64	0.969
10	5.59	40.30	5.52	6.13	0.993
15	3.45	38.62	6.88	6.35	0.935
20	2.89	39.20	6.94	5.32	0.998
25	2.88	41.15	4.92	4.84	0.935

石灰岩首波幅值与轴向静应力的关系如图 14 所示。由图 14 可以看出, 相同水压力下, 石灰岩首波幅值随轴向静应力的增加呈“快速上升—缓慢发展—急剧降低”的变化, 表明轴向静应力对石灰岩的首波幅值起到先促进后抑制的作用。

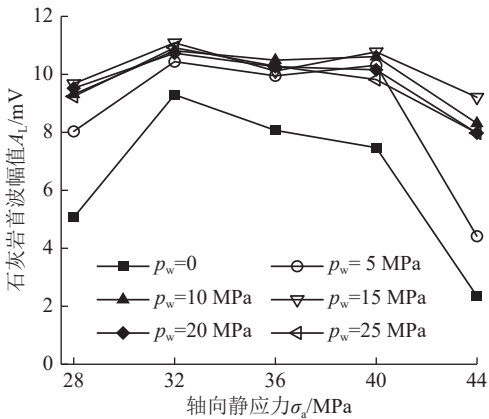


图 14 轴向静应力对石灰岩首波幅值的影响

Fig.14 Influence of axial static on head wave amplitude in limestone

相同水压力工况下, 随着轴向静应力的增加, 石灰岩声波波速和首波幅值变化趋势大致相同, 但其增减幅度存在差别; 石灰岩声波波速变化幅度较小, 而首波幅值变化程度显著, 表明轴向静应力对石灰岩首波幅值敏感性优于其声波波速。

由图 13、14 可以看出, 当承受的水压力确定时, 随着轴向静应力的增加, 石灰岩首波幅值的变化趋势与红砂岩存在显著区别, 体现为轴向静应力对不同岩性岩石的影响特性差异性, 静应力通过影响岩石压密、萌生、扩展和贯通, 使得岩石具有不同程度孔隙压密和损伤累积演化程度, 导致声波传播特性不同。

施加预定轴向静应力会促进岩石初始孔隙或裂隙萌生、扩展和贯通, 在此基础上, 岩石孔隙中空气被水填充挤排出来以及更大比例的岩石骨架受高压水作用而发生软化和润滑作用, 2 者共同作用加剧岩石裂隙进一步扩展, 导致其损伤程度加大, 进而影响岩石首波幅值。

5 首波能量的变化规律

首波幅值的变化特性仅仅是利用波形最大值表征声能损失的演化特性, 为从波形的整体变化研究高水压和高应力对岩石声波的影响, 从首波能量的变化角度研究高水压高应力岩石声波的变化特性。

声波首波能量指单位时间内的声波能量^[25], 其计算方法为

$$E = \int_0^t V_A^2 dt \quad (6)$$

式中, V_A 为首波不同时刻的电压, mV。

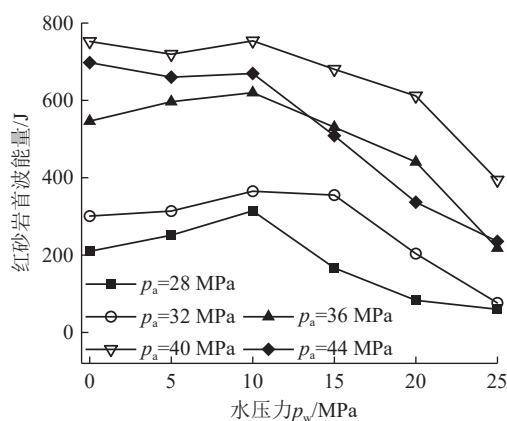
根据试验得到原始波形, 选取首波波形, 基于式(6)可得到水压力和轴向静应力工况下岩石首波能量(表 2)。

5.1 水压力对岩石首波能量的影响

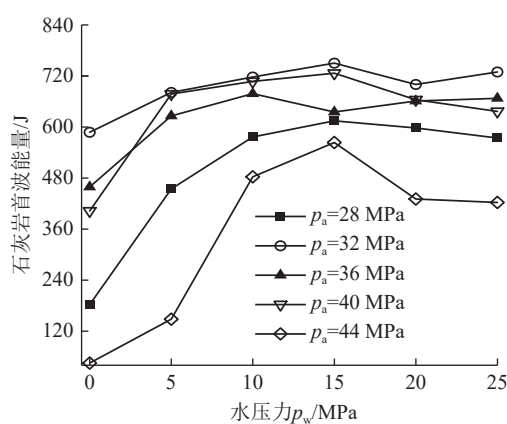
红砂岩首波能量与水压力的变化关系如图 15(a)所示。由图 15(a)可以看出, 当承受的轴向静应力确定时, 随着水压力的增加, 红砂岩首波能量呈先缓慢上升后急剧降低的变化趋势, 表明水压力对红砂岩首波能量具有显著的影响。

相同轴向静应力下, 随着水压力的增加, 红砂岩声波波速、首波幅值和能量变化趋势基本一致, 均为先增大后减小, 但增幅不同。随水压力进一步加大, 红砂岩首波能量变化显著, 首波幅值次之, 声波波速变化最小, 表明水压力对红砂岩首波能量的敏感性优于首波幅值和声波波速。

岩石在轴向静应力作用下部分孔隙闭合, 水压力较小时, 压力水对岩石楔入作用影响较小, 岩石裂隙



(a) 红砂岩



(b) 石灰岩

图 15 水压力对红砂岩、石灰岩首波能量的影响

Fig.15 Influence of water pressure on head wave energy in red sandstone and limestone

之间水提供部分刚度,抑制岩石损伤;随着水压力的增加,压力水对岩石楔入作用影响增强,导致岩石裂隙结构因软化和润滑作用发生变化,黏性不断增强,岩石损伤程度增大,声能损失严重。

石灰岩首波能量与水压力的关系如图 15(b) 所示。由图 15(b) 可以看出,当承受的轴向静应力较小时,石灰岩首波能量随水压力的增加先快速上升后平缓发展;当承受的轴向静应力较大时,石灰岩首波能量随水压力的增加先升高后缓慢降低,表明水压力对岩石首波能量具有明显的影响。

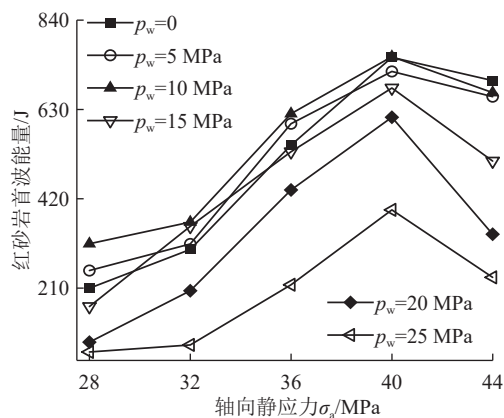
由图 15 可以看出,相同轴向静应力下,水压力从 0 开始增加时,红砂岩首波能量变化较小,而石灰岩变化显著;随水压力的增大,红砂岩首波能量变化显著,而石灰岩变化较小,表明岩石首波能量随水压力的变化与岩石的岩性密切相关。

岩石在轴向静应力作用下初始孔隙发生压密或损伤,水压力较小时,岩石微裂纹或裂隙被水填充,导致岩石裂隙之间黏性减弱,抑制微裂纹扩展,声能损失减小。随水压力的增大,高水压促进岩石微裂纹扩

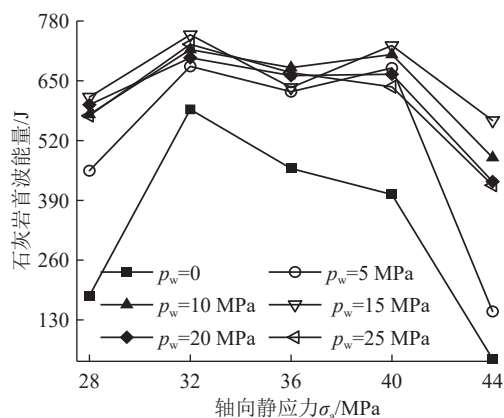
展,岩石裂隙中黏性越来越强,岩石损伤程度增大,声能损失严重。但由于石灰岩致密性较好、强度较高,水压力对石灰岩声波传播衰减影响较小,声能损失变化较小^[10]。

5.2 轴向静应力对岩石首波能量的影响

红砂岩首波能量与轴向静应力的关系如图 16(a) 所示。由图 16(a) 可以发现,相同水压力工况下,随着轴向静应力的增加,红砂岩首波能量呈先升高后下降的变化趋势,表明轴向静应力对红砂岩首波能量具有明显的影响。



(a) 红砂岩



(b) 石灰岩

图 16 轴向静应力对红砂岩、石灰岩首波能量的影响

Fig.16 Influence of axial static on head wave energy of red sandstone and limestone

从岩石声波波速、首波幅值和能量随轴向静应力变化特征可以看出,相同水压力下,随着轴向静应力的增加,岩石声波波速变化较小,首波幅值次之,首波能量变化显著,表明轴向静应力对首波能量的敏感性优于首波幅值和声波波速。

分析认为,岩石在水压力作用下部分孔隙被水充填闭合,轴向静应力较小时,岩石初始孔隙或裂隙被压密,孔隙闭合,抑制岩石发生侧向变形,声能损失减少;随着轴向静应力的增大,岩石裂隙萌生扩展,孔隙

破裂、微裂纹数量增多,损伤程度加大,声能损失增多,首波能量降低。

石灰岩首波能量与轴向静应力的关系如图16(b)所示。由图16(b)可以看出,相同水压力作用下,随着轴向静应力的增加,石灰岩首波能量呈“快速上升—缓慢降低—急剧减小”的变化趋势;水压力从0增至5 MPa时,岩石首波能量变化显著。

相同水压力下,石灰岩首波能量随轴向静应力变化趋势整体上与红砂岩一致,但变化幅度不同。轴向静应力较小时,石灰岩声波首波能量变化显著,红砂岩声波首波能量变化较小,表明低轴向静应力对石灰岩声波传播穿透能力影响显著;轴向静应力较高时,红砂岩首波能量变化显著,石灰岩变化较小,表明高轴向静应力对红砂岩声波穿透能量显著,体现了轴向静应力对不同岩性岩石的声能损失的差异性。

6 结 论

(1) 确定轴向静应力工况下,随着水压力的增大,岩石首波波形状基本相似;水压力对岩石首波起跳点时间具有显著影响,2种岩石首波起跳点时间随水压力的增大先提前后延迟,但石灰岩首波起跳点时间增幅较小。

(2) 当承受的轴向静应力确定时,红砂岩声波波速随水压力的增加先升高后降低,2者呈高斯函数关系分布;石灰岩声波波速随水压力的增大先快速上升后缓慢降低。当承受的水压力相同时,随着轴向静应力的增加,岩石由压密阶段向损伤演化发展,裂隙不断萌生扩展,2种岩石声波波速均呈现先上升后降低的变化关系。

(3) 相同轴向静应力工况下,红砂岩声波首波幅值随水压力的增大先平缓发展后快速降低,2者呈指数函数关系分布;石灰岩首波幅值随水压力的增加先快速升高后平稳发展或略有下降。相同水压力工况下,红砂岩首波幅值随轴向静应力的增加为先升高后降低,石灰岩声波首波幅值随轴向静应力的增大呈“快速升高—缓慢发展—急剧降低”变化关系。

(4) 当承受的轴向静应力较小时,红砂岩声波首波能量随水压力的增加先平缓发展后缓慢降低,承受的轴向静应力较大时,红砂岩首波能量随水压力的增加逐渐降低;石灰岩声波首波能量随水压力的增大先快速上升后趋于稳定或略有降低,小水压力有助于岩石声波传播,高水压力对岩石声波传播有劣化作用。相同水压力工况下,红砂岩声波首波能量随轴向静应力的增加先升高后下降,石灰岩声波首波能量随轴向静应力的呈现先快速上升后急剧下降的变化关系。

参考文献(References):

- [1] 李术才,许振浩,黄鑫,等.隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5): 1041-1069.
LI Shucai, XU Zhenhao, HUANG Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [2] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等.川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3): 445-468.
XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445-468.
- [3] 邓涛,韩文峰,保翰章.饱水大理岩的波速变化特性研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(6): 762-765.
DENG Tao, HAN Wenfeng, BAO Hanzhang. On the characteristics of wave velocity variations for marbles saturated in water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 762-765.
- [4] 邓华锋,原先凡,李建林,等.饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(8): 1625-1631.
DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, et al. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1625-1631.
- [5] REZAEI M, DAVOODI P K, NAJMODDINI I. Studying the correlation of rock properties with P-wave velocity index in dry and saturated conditions[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 169: 49-57.
- [6] 陈旭,俞缙,李宏,等.不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J].岩土力学,2013,34(9): 2527-2533.
CHEN Xu, YU Jin, LI Hong, et al. Experimental study of propagation characteristics of acoustic wave in rocks with different lithologies and water contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2527-2533.
- [7] 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.
- [8] 由爽,李飞,纪洪广,等.高应力高水压下深部花岗岩力学响应联动机制[J].煤炭学报,2020,45(S1): 219-229.
YOU Shuang, LI Fei, JI Hongguang, et al. Linkage mechanism of mechanical response of deep granite under high stress and high water pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 219-229.
- [9] 张树光,刘佳琦,陈培培,等.辽西花岗岩水-岩耦合力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(3): 520-527.
ZHANG Shuguang, LIU Jiaqi, CHEN Peipei, et al. Experimental study on water-rock coupling mechanical properties of granite in Western Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 520-527.

- [10] 王刚,李胜鹏,刘义鑫,等.真三轴下注水条件对煤体超声波传播特性影响规律的研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(11): 2225–2239.
WANG Gang, LI Shengpeng, LIU Yixin, et al. Influence of water injection on ultrasonic propagation characteristics of coal under true triaxial stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2225–2239.
- [11] HORIKAWA T, KATSURA M, YOKOTA T, et al. Effects of pore water distributions on P-wave velocity-water saturation relations in partially saturated sandstones[J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 226(3): 1558–1573.
- [12] CHEN J, CHENG W M, WANG G, et al. Correlation mechanism between the law of ultrasonic propagation in coal samples and the migration of water[J]. *Fuel*, 2022, 310: 122264.
- [13] 胡明明,周辉,张勇慧,等.单轴加载过程中砂岩声学特性研究[J].岩土力学,2018,39(12): 4468–4474.
HU Mingming, ZHOU Hui, ZHANG Yonghui, et al. Analysis of acoustic property of sandstone under uniaxial loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(12): 4468–4474.
- [14] 贾蓬,祝鹏程,李博,等.单轴压缩过程中岩石的实时超声波特性[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10): 3967–3977.
JIA Peng, ZHU Pengcheng, LI Bo, et al. Characteristics of real-time ultrasonic wave during uniaxial compression of rock[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(10): 3967–3977.
- [15] BIRCH F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 1[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1960, 65(4): 1083–1102.
- [16] 孙旭曙,李建林,王乐华,等.节理岩体超声测试及单轴压缩试验研究[J].岩土力学,2014,35(12): 3473–3478, 3488.
SUN Xushu, LI Jianlin, WANG Lehua, et al. Study of ultrasonic test and uniaxial compression test of jointed rock masses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3473–3478, 3488.
- [17] ZAIMA K, KATAYAMA I. Evolution of elastic wave velocities and amplitudes during triaxial deformation of aji granite under dry and water-saturated conditions[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2018, 123(11): 9601–9614.
- [18] 俞缙,宋博学,钱七虎.含单组节理的双重非线性弹性岩石介质中的P波传播规律[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12): 2400–2411.
YU Jin, SONG Boxue, QIAN Qihu. Study of propagation of p-waves in dual nonlinear elastic rock medium with one set of joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2400–2411.
- [19] HUANG X L, QI S W, GUO S F, et al. Experimental study of ultrasonic waves propagating through a rock mass with a single joint and multiple parallel joints[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 549–559.
- [20] LIANG Z Z, SONG W C, LIU W T. Theoretical models for simulating the failure range and stability of inclined floor strata induced by mining and hydraulic pressure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132: 104382.
- [21] 张天军,张磊,李树刚,等.含水含孔试样破坏的波速及功率谱密度特征[J].煤炭学报,2018,43(12): 3387–3394.
ZHANG Tianjun, ZHANG Lei, LI Shugang, et al. Characteristics of wave velocity and power spectral density of hole-containing specimens under water conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(12): 3387–3394.
- [22] 张天军,纪翔,张磊,等.瓦斯抽采钻孔孔周裂隙演化及等效裂纹宽度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S2): 3625–3633.
ZHANG Tianjun, JI Xiang, ZHANG Lei, et al. Experimental study on evolution of circumferential crack and equivalent crack width of gas drilling borehole[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S2): 3625–3633.
- [23] 邓华锋,方景成,李建林,等.含水状态对红层软岩力学特性影响机理[J].煤炭学报,2017,42(8): 1994–2002.
DENG Huafeng, FANG Jingcheng, LI Jianlin, et al. Mechanical properties of red-bed soft rock on saturated state[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(8): 1994–2002.
- [24] 贾海梁,王婷,项伟,等.含水率对泥质粉砂岩物理力学性质影响的规律与机制[J].岩石力学与工程学报,2018,37(7): 1618–1628.
JIA Hailiang, WANG Ting, XIANG Wei, et al. Influence of water content on the physical and mechanical behaviour of argillaceous siltstone and some microscopic explanations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(7): 1618–1628.
- [25] BENAVENTE D, MARTÍNEZ-MARTÍNEZ J, JÁUREGUI P, et al. Assessment of the strength of building rocks using signal processing procedures[J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(8): 562–568.