

围压作用下花岗岩加载过程中波速变化规律试验研究

张盛^{1,2}, 张旭龙¹, 王晓峰³, 李杰¹, 喻炳鑫¹, 王宏越¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454001; 2. 河南理工大学 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454001;
3. 军事科学院国防工程研究院工程防护研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为获得深部岩石在遭受一定围压并持续受载状态下波速的变化规律, 采用 GCTS RTX - 3000 岩石力学试验机对花岗岩进行围压水平分别为 40 和 80 MPa 条件下的三轴压缩试验, 得到相应的应力 - 应变曲线以及纵、横波速, 结果表明: 在围压增加过程中, 花岗岩的纵、横波速随围压的增加而增大, 呈二次函数关系; 纵、横波速在三轴加载过程中均先急剧增加, 然后趋于稳定, 在开始萌生裂纹到发生破坏的阶段, 波速先缓慢降低, 之后急剧下降, 其中, 横波对围压及加载过程的应力状态更敏感; 对花岗岩的整个加载过程进行损伤分析, 动弹性模量在不同阶段呈现增加、稳定、下降的趋势, 动泊松比能够反映岩石的膨胀扩容过程。该研究有助于理解高围压条件下岩石的损伤特征, 对深部围岩控制及地震的预测等研究有重要的意义。

关键词: 岩石力学; 围压; 纵波; 横波; 三轴压缩; 损伤演化

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)09 - 1767 - 09

Experimental study on the variation of wave velocities of granite during loading process under a certain confining pressure

ZHANG Sheng^{1,2}, ZHANG Xulong¹, WANG Xiaofeng³, LI Jie¹, YU Bingxin¹, WANG Hongyue¹

(1. College of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454001, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454001, China; 3. Research Institute for National Defense Engineering of Academy of Military Science PLA China, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: In order to obtain the variation law of wave velocities of deep rocks under certain confining pressure and continuous loading condition, the triaxial compression tests of granite under confining pressure levels of 40 MPa and 80 MPa were carried out by GCTS RTX - 3000 rock mechanics testing system, and the stress-strain curve as well as compression and shear wave velocities was obtained. The results show that the compression and shear wave velocities of granite increase with increasing the confining pressure in a quadratic form. During the triaxial loading process, the compression and shear wave velocities increase sharply and then tend to be stable, while in the process from crack initiation to failure, the wave velocities slowly decrease and then drop sharply. The shear wave is more sensitive to the stress state of the confining pressure and the loading process. The damage analysis of the rock in the whole loading process was carried out and it is shown that, at different stages, the

收稿日期: 2019 - 04 - 11; **修回日期:** 2019 - 06 - 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674101)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51674101)

作者简介: 张盛(1976 -), 男, 博士, 2000年毕业于河南理工大学采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学及巷道围岩控制方面的教学与研究工作。E-mail: zsroy2002@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0246

dynamic elastic modulus shows an increasing, stable or decreasing trend, and that the dynamic Poisson's ratio reflects the expansion process of the rock. The study is helpful to understand the damage characteristics of rock mass under high confining pressure conditions and of great significance for the study of deep surrounding rock control, earthquake prediction and so on.

Key words: rock mechanics; confining pressure; compression wave; shear wave; triaxial compression; damage evolution

1 引言

岩石的纵、横波传播规律可以综合表征其物理力学特性,处在不同应力状态下的岩石纵、横波速会有很大的差异。近年来,矿产资源开采不断向深部进展,金属矿产开采范围已经超过 4 000 m,垂直应力超过 100 MPa,由高应力引发的动力灾害现象日益增多。通过研究不同应力状态下岩石试样的波速变化及其传播规律,可以有效地评估深部岩体质量,有利于解决高应力状态下岩体结构的稳定性问题。

超声波测试作为一种监测损伤的手段,在岩土工程勘察中被广泛应用^[1],通过超声波原位测试可以对场地类别进行划分^[2],根据波速变化幅度与岩体力学参数间的关系,可以检测和区分不同损伤程度的岩样^[3]。另外,岩体的裂纹分布形态、应力变化、孔隙、裂隙介质、密度、温压等因素会对声波波速的变化产生很大影响^[4-6]。

对于岩石在单轴加载破坏过程中的纵、横波传播规律,国内外众多学者进行了大量研究,并通过试验和理论分析,建立了波速与应力的对应关系,G. Simmons^[7]证实了岩石在受载过程中微裂隙的变化对超声波的传播速度会产生很大影响。在给定有效压力下,K. Senetakis 等^[8]通过试验研究表明,纵波明显受到矿物颗粒形态的影响,矿物颗粒不规则对纵波的传播过程影响较大。罗津辉等^[9]通过测量和分析波速与振幅的变化,划分了岩石在加载破坏过程中的不同阶段,可以对岩石破坏进行有效预测。郑贵平等^[10]比较了不同岩石在加载过程中的波速变化,总结出了 2 种波速变化类型。李祥春等^[11]通过试验研究了煤体加载过程中的纵、横波速变化规律,建立了纵波波速与应力的关系式。燕静等^[12]利用回归分析方法,得出了纵波波速与单轴抗压强度的相关关系。赵明阶和吴德伦^[13]运用等效裂纹模型,建立了在单轴加载过程中超声波参数随应力变化的理论关系。

由于岩石在深部赋存环境中会受到高应力作用,在受载破坏过程中,纵、横波传播速度会受到围压变化以及裂隙损伤的影响。F. Birch^[14-15]指出岩石处于静水压力下,波速随围压的增大而增加,当围压达到一定值后,波速的增加量减小。A. Nur 和 G. Simmons^[16]通过双轴应力波速试验,提出了不同的应力组合可以产生相同的波速。马中高等^[17]通过控制围压、孔压和温度模拟岩石在地层中的温压状态,测试不同有效压力岩石的纵、横波速,得出了岩石波速与有效压力的定量关系。黄承贤和宋大卫^[18]介绍了岩石在三轴压缩作用下纵、横波速和其他物理力学参数的变化规律及其关系。王密和田家勇^[19]将大量岩石样本的纵、横波速与静水围压试验数据进行回归分析,得出了相互之间的耦合模型。李浩然等^[20]在三轴循环载荷作用下对盐岩的波速及声发射变化特征进行分析,研究了波速、声发射特征以及围压之间的关系。王贵宾等^[21]针对不同岩石的矿物组分、微构造和其所处的温度围压状态,开展了常温常压、常温围压和温度围压条件下的岩石声波速度测试。谷川等^[22]利用变围压驱动三轴设备,通过施加特殊应力途径,模拟地震发生时,纵波和横波耦合对饱和软黏土动力特性的影响。陈志等^[23]测试了高温高压条件下辉长岩的纵、横波速和品质因子,总结了波速随温压变化的规律,并根据品质因子的变化讨论了地震的传播过程。

上述研究成果一般是在单轴压缩作用下对岩石的破坏过程进行纵、横波速分析,当作用高围压时,由于受试验设备限制,更多采用直径 10 mm 左右的小尺寸试样。针对以上研究存在的不足,在 GCTS RTX-3000 岩石力学试验机上,利用加载压头自带的波速测试传感器,测得了直径 50 mm 的花岗岩标准试样分别在 40 和 80 MPa 两个围压应力水平加载过程中的纵、横波速,通过试验数据分析了围压和岩石破坏失稳过程与纵、横波速的关系,有助于了解深部高围压岩体的损伤特征和围岩应力状态。

2 试验方法

2.1 试样加工

花岗岩取自湖北随州，选取没有明显节理的完整岩石，按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)规定的要求，采用钻、切、磨的工序，加工成直径 $\phi = 50\text{ mm}$ ，高度 $h = 100\text{ mm}$ 的标准圆柱体试样。沿同一方向钻取岩芯，将切割好的试样两端磨平，使其不平整度偏差小于 0.02 mm ，花岗岩试样如图 1 所示。



图 1 花岗岩标准试样
Fig.1 Granite standard samples

花岗岩的主要矿物成分及含量分别为：石英(54.4%)、黑云母(12.7%)、钠长石(13.4%)、歪长石(14.3%)和正长石(5.0%)。花岗岩的平均天然密度为 2.589 g/cm^3 ，平均天然孔隙率为 0.77%。

2.2 波速测试

采用 GCTS ULT - 200 测试系统进行波速测试，在加载过程中测量波速需采用专用的超声波压头，如图 2(a)所示。为了能够同时测量纵、横波速，需在压头内部同时安装纵、横波传感器，这些传感器由压电陶瓷材料制成，当在试样一端的传感器上施加电压时，会产生穿过试样的脉冲信号。由试样另一端相同的传感器监测信号，并转换成可以被数据采集板处理的电信号。传感器具有 $200\sim 1\ 000\text{ kHz}$ 范围的工作脉冲频率，工作频率由传感器厚度和脉冲传播方向决定。纵、横波传感器晶体组合模型如图 2(b)所示。

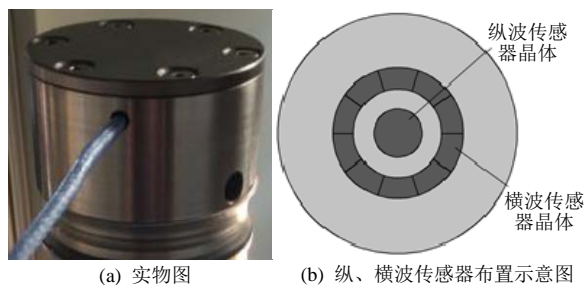


图 2 超声波压头
Fig.2 Ultrasonic indenter

在波速测试前，先确定纵、横波通过压头的时间，通过将 2 个压头进行面对面接触的测试来完成，然后将测试试样的纵、横波到达时间减去面对面的到达时间得到正确的首次到达时间，进而根据试样的长度，计算出纵、横波速。

当脉冲信号到达接收传感器时，由于其穿过试样的随机不连续性，脉冲可能显著减弱，试验时，通过选择低频率的传感器可以减小这些衰减损失。另外，超声波压头与试样之间采用了声学耦合材料进行耦合，能够显著改善纵、横波振幅。

2.3 试验设备及测试方案

花岗岩试样的高围压常规三轴压缩试验在河南理工大学 GCTS RTX - 3000 高温高压岩石三轴试验机上进行，试验机如图 3 所示。安装有传感器的装样图如图 4 所示。试验时，首先在压头和试样端面均匀涂抹蜂蜜作为耦合剂，将试样与超声波压头压实并套上耐高温、高压的热缩管，然后安装环向应变传感器和轴向应变传感器，调整传感器的行程，使其在允许量程内。

用轴向应变传感器测量轴向压缩变形，环向应变传感器测量环向扩张变形，采用 $3\ 000\text{ kN}$ 力传感



图 3 GCTS RTX - 3000 高温高压岩石三轴试验机
Fig.3 GCTS RTX - 3000 rock triaxial testing machine

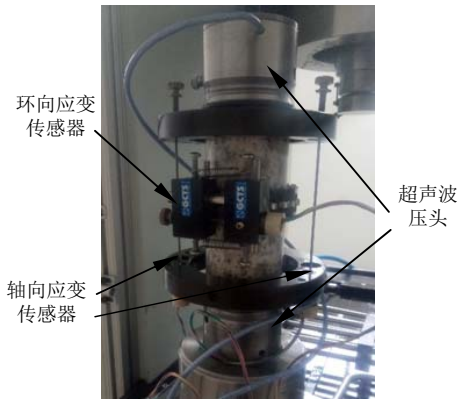


图4 花岗岩装样图

Fig.4 Strain sensors and ultrasonic indenters

器测量轴向荷载。本次试验分别设置 40 和 80 MPa 两个围压水平进行三轴压缩试验，每组试验重复 4 次，采用手动加围压的方式，当围压加到预定值后，通过轴向应变传感器控制轴向加载，轴向加载速率为 0.002%/s，当应力达到预估峰值的 80%，手动切换成由环向应变传感器控制的环向加载，环向加载速率为-0.002%/s。分别在试验的 2 个加载过程中测试试样的纵、横波速。

(1) 加围压过程中的波速测定：在手动加围压的同时，每增加 10 MPa 采集一次纵、横波速，直至围压加到预定值。

(2) 三轴压缩过程中的波速测定：轴向加载与波速测试同步进行，每隔 30 s 记录一次纵、横波速，直至试样破坏。

3 试验结果分析

3.1 应力 - 应变曲线

图 5 为围压水平分别为 40 和 80 MPa 时，假三轴压缩过程中花岗岩的应力 - 应变曲线。由图 5 可以看出，该花岗岩极为坚硬，破坏的平均偏应力峰值强度分别高达 553.07 和 738.92 MPa。在加载过程中，试样裂纹将出现不稳定扩展，破裂过程也极为剧烈，试样整体快速丧失承载能力。其中 G80 - 1 试样得到了 II 型曲线，其原因很可能是由于在加载过程中，由轴向应变控制切换成环向应变控制，为满足径向变形以一定的速率增加造成的。

另外，与 40 MPa 相比，围压为 80 MPa 时花岗岩的应力 - 应变曲线在峰值处有明显的离散现象，围压 40 MPa 的峰值强度范围为 545.55~560.44 MPa，差值为 14.89 MPa，差值为平均峰值强度的 2.7%；围压 80 MPa 的峰值强度范围为 715.57~758.42 MPa，

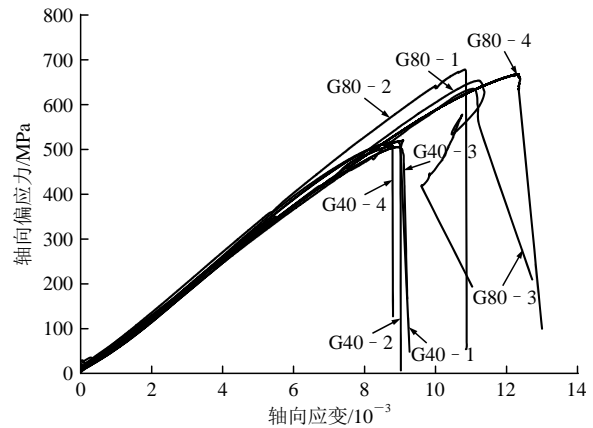


图5 应力 - 应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves

差值为 42.85 MPa，差值达到平均峰值强度的 5.8%。分析认为，由于花岗岩试样中所含的石英、黑云母、长石的力学性质具有差异，且每个试样中各矿物含量不是绝对均匀的，围压的增高使这种差异更为突出，表现为宏观的抗压强度发生显著的离散现象^[24]。围压 80 MPa 时花岗岩的应力 - 应变曲线轴向应变差值为 1.53×10^{-3} ，占到整个平均轴向应变的 13.4%，由较大的压缩变形差异引起的端部摩擦效应对抗压强度产生很大影响。此外，花岗岩的强度是由最小承载断面决定的，其各组成成分的空间位置分布差异也会造成强度离散。

3.2 加围压过程波速分析

在加围压阶段，采用手动加围压的方式，以 10 MPa 为一个梯度，分别测得了围压水平加到 40, 80 MPa 的 2 组纵、横波速。图 6 分别为纵、横波波速随围压变化的分布图，根据测试数据分别拟合出纵、横波波速随围压的变化曲线。从拟合曲线可以看出，纵、横波波速均随围压的增加而增大，呈二次函数关系，拟合公式为

$$V_p = -0.284 3\sigma_3^2 + 48.496\sigma_3 + 3 367.0 \quad (R^2 = 0.996 7) \quad (1)$$

$$V_s = -0.128\sigma_3^2 + 20.297\sigma_3 + 2 001.8 \quad (R^2 = 0.993 9) \quad (2)$$

式中： σ_3 为岩样所受到的围压(MPa)； V_p 和 V_s 分别为纵、横波波速(m/s)。

从图 6 可以看出，纵波波速的离散性较小，而横波波速则具有较大的离散性。其原因可能是剪切波的传播过程较为复杂，更容易受到试样内部不同矿物成分、微裂隙等因素的影响。总体而言，横波波速基本呈上升趋势，随着围压增加其离散性减小并逐渐趋于稳定。

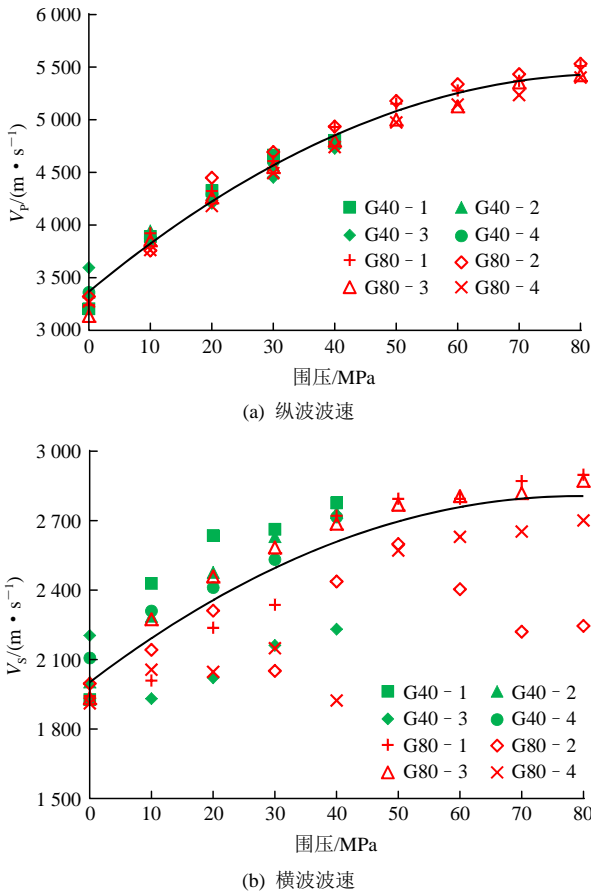


图 6 纵、横波速随围压变化曲线

Fig.6 Curves of compression and shear wave velocities with confining pressure

在未加围压时，花岗岩纵、横波速的平均值分别为 3 311, 1 971 m/s，在加围压的初始阶段，由于试样孔隙随着围压的增加而发生闭合，纵、横波速对围压的变化比较敏感，波速增加较快。当围压加到 40 MPa 时，花岗岩的纵、横波速分别提高了 1 500 和 622 m/s。而在围压相对高的阶段，试样的孔隙已基本闭合，此时纵、横波速随围压的变化相对平缓。从图 6 中拟合曲线的变化趋势来看，纵、横波速在后期将逐渐趋于稳定，相对变化很小。在 40~80 MPa 围压范围内，纵、横波速仅分别增长了 656, 231 m/s，仅仅约为前一阶段的 0.4 倍，此时花岗岩的纵波波速平均值为 5 467 m/s，横波波速平均值为 2 824 m/s。可以看出，随着围压的增加，纵、横波速变化幅值逐渐减小，其传播更加稳定。

3.3 围压确定条件下轴向加载过程波速变化规律

岩石试样在三轴加载过程中，随着应力的增加，试样内部结构会发生变化，内部微裂纹和缺陷可能出现不同程度的闭合和扩展，存在不同的损伤程度，纵、横波速也会随之变化，图 7 为 G80 - 1 试样纵、横波速和偏应力随时间变化的对比曲线。

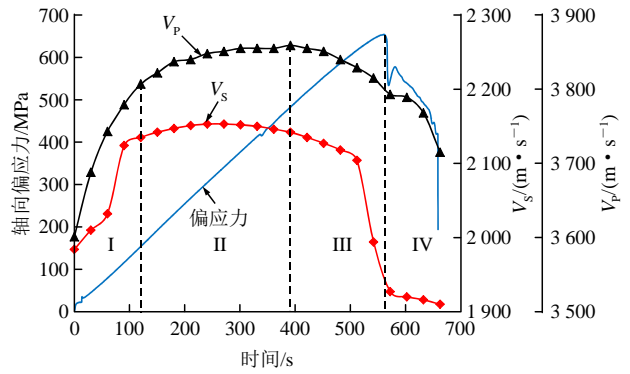


图 7 纵、横波速和偏应力随时间变化对比曲线

Fig.7 Curves of compression and shear wave velocities and deviatoric stress with time

对图 7 中 G80 - 1 试样的纵、横波速分别求导，得到其导数值的变化曲线，如图 8 所示。根据纵、横波速导数值的变化结合偏应力曲线可将整个加载过程分为 4 个阶段：第 I 阶段 0~120 s，裂隙压密阶段，岩石内部微裂隙在轴向应力的作用下发生闭合，纵、横波速开始急剧增长，其中纵波波速由 3 601 m/s 增加至 3 807 m/s，增加幅值逐渐减小，而横波波速先缓慢增加，而后突然由 2 032 m/s 跃升至 2 135 m/s；第 II 阶段 120~390 s，线弹性阶段，开始纵、横波速均缓慢增加，在 270 s 横波波速开始缓慢下降；第 III 阶段 390~570 s，塑性阶段，偏应力在 570 s 达到峰值，此阶段裂纹开始萌生并发生扩展，纵波波速也开始缓慢下降，横波波速在快达到峰值应力前急剧下降，在峰值应力处下降到 1 927 m/s；在第 IV 阶段 570~660 s，试样发生破坏，纵波波速在到达二次应力峰值后有一处平稳阶段，而后突然下降，横波波速则比较平稳。G80 - 1 试样 4 个阶段分别占整个加载过程的 18.2%，40.9%，27.3% 和 13.6%，比较纵、横波速的变化过程，两者均是先急剧增加，然后趋于稳定，在开始出现裂纹到发生破坏的过程，波速先缓慢降低后急剧下降，

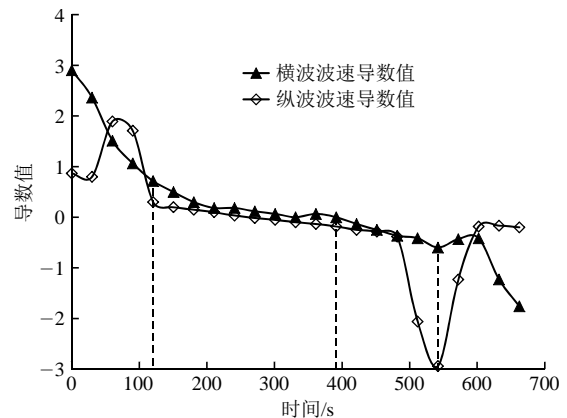


图 8 纵、横波速导数值变化曲线

Fig.8 Curves of derivatives of compression and shear wave velocities with time

不同的是横波波速在每个阶段总是先于纵波波速发生突变，对围压和加载过程的应力状态更敏感。

波速在三轴压缩试验过程中会随着轴向应力的

增大而发生变化，为了研究纵、横波速的变化规律，分别做出 8 个试样的纵、横波速随轴向应变的变化曲线，如图 9 所示。

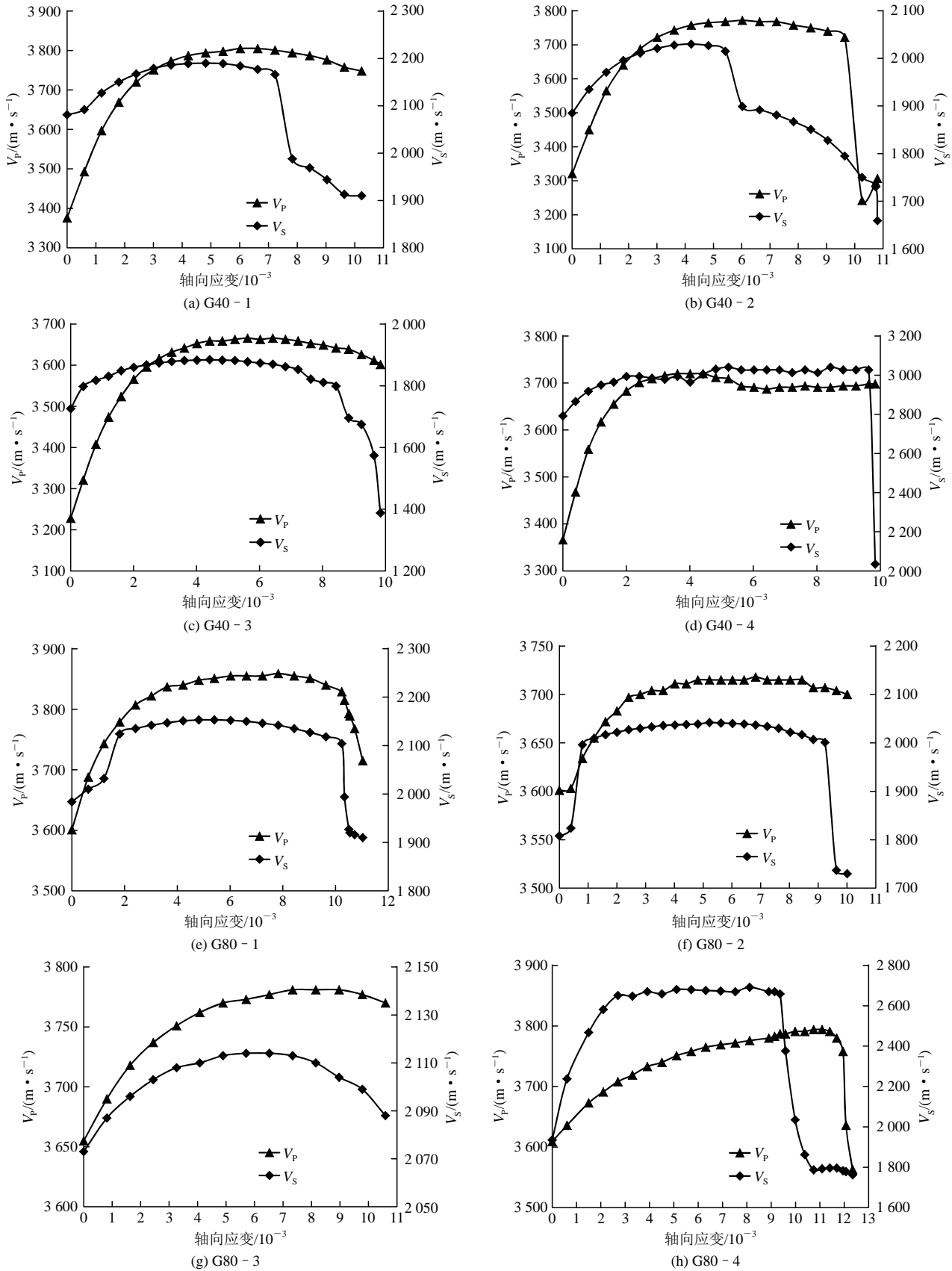


图 9 三轴加载过程纵、横波速随轴向应变变化曲线

Fig.9 Curves of compression and shear wave velocities with axial strain during triaxial loading

从图 9 中可以看出，对于不同围压值的三轴压缩试验，纵波波速随轴向应变的变化规律基本相同，受围压值的影响较小，呈现非线性变化，近似于抛物线。在加载初期波速变化较为明显，之后波速缓慢上升，大约在中间时刻开始缓慢下降，最后随着试样的破坏，波速有一个突变，如图 9(b), (h) 所示。另外由于围压的不同，波速值有一定的差异，围压水平为 40 MPa 试样的平均波速初始值为 3 322.75 m/s，平均最大值为 3 740.75 m/s。围压水平为 80 MPa 的波速平均初始值为 3 621.5 m/s，平均最大值为 3 788 m/s。分析表明，由于围压的影响，初始波速差异较为明显，而最大值仅相差 47.25 m/s，波速增加的幅值随围压的增大而减小，或者说高围压条件下，试样加载过程中的波速变化更加稳定。

从图 9 还可以看出，相较于纵波波速，横波波速变化规律更为复杂。图 9(a), (b) 中波速开始缓慢上升到平稳过程中，在中间时刻有一个突降的变化，然后继续缓慢下降。从图 9(e), (f) 可以看出，波速在刚开始有一小段先稳定然后突然上升的过程，之后波速不再发生明显变化，直到试样破坏，波速再急剧下降。另外对比围压水平为 40 MPa 的横波波速在初始阶段缓慢增加的变化规律，围压水平为 80 MPa 的试样横波波速在初期都有一个急剧上升的过程。试样 G40 - 4 的初始波速为 2 792 m/s，最大波速为 3 041 m/s，围压水平为 40 MPa 的其他 3 个试样的波速平均初始值为 1 897.33 m/s，平均最大值为 2 035 m/s，波速的初始值和最大值差异分别达到 47% 和 49%。围压水平为 80 MPa 的波速平均初始值为 1 950 m/s。另外，试样 G80 - 4 的最大值为 2 692 m/s，其他 3 个试样的平均最大值为 2 103 m/s，可以看出，试样 G80 - 4 的幅值比其他提高了 30%。通过对横波波速的数据进行分析，发现其离散性较大，规律不明显，并且会出现单个试样波速值突然增大或幅值突然增高的现象。

为了更直观了解纵、横波波速变化规律，本文定义纵、横波波速的最大值与初始值的差为增加的幅值。图 10 为试样的纵、横波波速幅值变化图。图 10 中，*m*, *n* 分别为围压水平 40 MPa 的试样纵波波速和横波波速的平均值，分别为 418, 165.5 m/s; *j* 为围压水平 80 MPa 的试样纵波波速的平均值，为 166.5 m/s; 由于 G80 - 4 的横波波速幅值较大，*k* 只表示前 3 个试样横波波速的平均值，为 148 m/s。

从图 10 中可以看出，随着围压增大，纵、横波波速幅值的平均值都有所减小，纵波波速幅值减小比

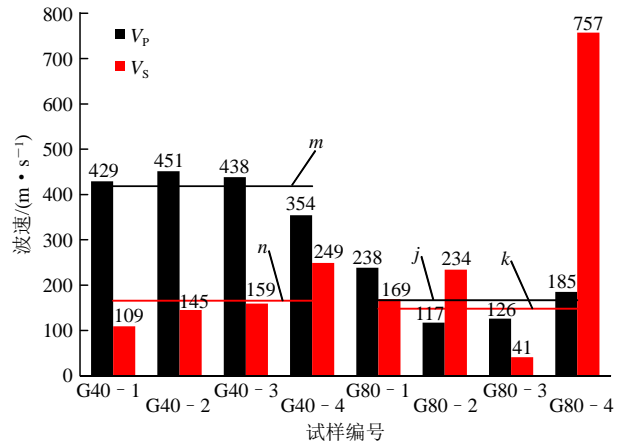


图 10 纵、横波波速幅值变化图

Fig.10 Amplitude changes of compression and shear wave velocities

较明显，平均减小 251.5 m/s，但横波波速平均幅值变化不大。对于某些单个试样，横波波速会有大幅度提高，一方面是由于横波的传播特点导致离散性较大；另一方面与试样内部结构、不同矿物成分、微裂隙等因素有很大关系。

3.4 动态法测试动弹性模量和动泊松比

花岗岩在三轴压缩过程中，岩石内部会出现裂纹的萌生、扩展演化，为了分析损伤演化规律，通过引入动弹性模量和动泊松比 2 个参量来描述，假定试样为均质、各向同性的介质，根据动态法测试原理，纵、横波在弹性介质中传播的速度由下式表示：

$$V_p = \sqrt{E_d(1-\nu_d) / [\rho(1+\nu_d)(1-2\nu_d)]} \quad (3)$$

$$V_s = \sqrt{E_d / [2\rho(1+\nu_d)]} \quad (4)$$

式中： E_d 为岩石的动弹性模量， ν_d 为岩石的动泊松比， ρ 为岩石的密度。由式(3), (4)可得

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (5)$$

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2V_p^2 - 2V_s^2} \quad (6)$$

将试验测得的纵、横波数据代入式(5), (6)计算得到三轴加载过程中的动弹性模量和动泊松比，三者的变化关系如图 11 所示。

从图 11 可以看出，在压密阶段，花岗岩的动弹性模量上升显著，占整个加载过程的 24.5%；线弹性阶段动弹性模量趋于稳定，占整个加载过程的 48.9%；试样的塑性阶段占整个加载过程的 26.6%，此阶段的动弹性模量在稳定一段时间后开始下降，过了峰值点后急剧下降。花岗岩的动泊松比变化曲

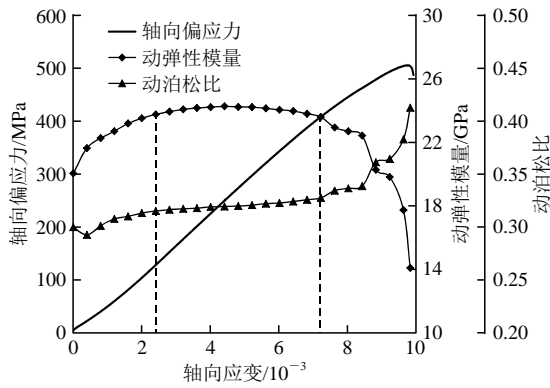


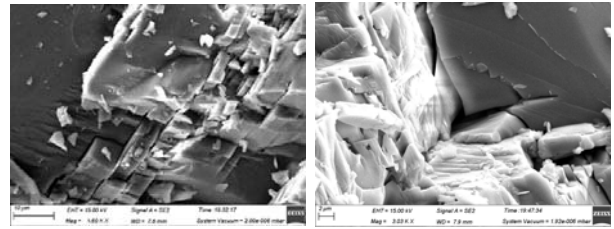
图 11 三轴加载过程动弹性模量和动泊松比变化图
Fig.11 Changes of dynamic elastic modulus and Poisson's ratio with axial strain during triaxial loading

线整体呈上升趋势，在压密阶段和线弹性阶段，动泊松比缓慢增加，当岩样内部微裂隙开始产生时，动泊松比开始迅速上升，表现为试样开始膨胀扩容，裂隙演化贯通。另外，根据动弹性模量和动泊松比变化所划分的加载过程中的 3 个阶段与节 3.3 中由纵、横波速变化所划分的试样破坏前三阶段所占比例基本相同。

4 关于波速测试值存在差异的讨论

值得说明的是，本文花岗岩纵、横波速实现了 2 个过程的测定，即加围压过程中的波速测定和三轴压缩过程中的波速测定。由于 2 个过程波速的采集方式不同，而且在加载过程中，纵、横波速受到轴向载荷的影响，导致在第一个过程围压稳定后采集到的波速值和加载初始时刻采集到的波速值有所差异。

在相同的围压和加载条件下，有时测定的波速值差异会很大，特别是横波波速。G40 - 4 试样的横波波速初始值和最大值与平均值的差异分别达到 47% 和 49%，G80 - 4 试样的横波波速在加载过程中增加了 757 m/s，是其他 3 个试样平均幅值的 5 倍。由于试验过程中超声波压头与各试样的耦合条件不完全相同，且花岗岩内部结构复杂，所含矿物成分性质有明显差异，纵、横波在试样内部穿过具有不同速度特性的材料边界时可能经历反射和模式转换，表现出显著的各向异性特征。另外，花岗岩在扫描电镜下观察到的微观结构图像如图 12 所示，图 12(a)为花岗岩试样放大 1 600 倍观察得到的图像，从图中可以看出岩样内部存在明显的层状节理。当波的传播方向与节理的角度发生变化时，波的衰减程度会有不同，从而会导致波速产生差异。当局



(a) 放大 1 600 倍 (b) 放大 3 030 倍

图 12 花岗岩微观结构图像

Fig.12 Granite microstructures

部放大到 3 030 倍，如图 12(b)所示，试样产生的裂隙周围存在很多离散的颗粒，这些颗粒结构对波的传播产生明显的削弱作用。

5 结 论

(1) 在围压加载过程中，花岗岩的纵、横波速随围压的增加而增大，基本呈二次函数关系，即在开始阶段增长迅速，后期逐渐趋于平缓。另外，在一定的围压水平条件下，横波波速相对离散，但随着围压增加其离散性减小并逐渐趋于稳定。

(2) 根据纵、横波速的变化率，将加载过程分为压密、弹性、塑形和破坏 4 个阶段。比较纵、横波速的变化过程，两者均是先急剧增加，然后趋于稳定，在开始萌生裂纹到发生破坏的阶段，波速先缓慢降低后急剧下降。不同的是横波波速在每个阶段总是先于纵波波速发生突变，对围压和加载过程的应力状态更敏感。

(3) 利用加载过程中的波速，计算得到动弹性模量和动泊松比 2 个参量，结合应力 - 应变曲线对花岗岩的整个加载过程进行损伤分析。分析表明，花岗岩的动弹性模量在不同阶段，呈现增加、稳定、下降的趋势，动泊松比反映了岩石的膨胀扩容过程。

参考文献(References):

[1] 王 宇, 李 晓, 胡瑞林, 等. 岩土超声波测试研究进展及应用综述[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 287 - 300.(WANG Yu, LI Xiao, HU Ruilin, et al. Review of research process and application of ultrasonic testing for rock and soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(2): 287 - 300.(in Chinese))

[2] 张国强, 杜立志. 波速测试在岩土工程中的应用[J]. 世界地质, 2018, 37(3): 952 - 957.(ZHANG Guoqiang, DU Lizhi. Application of wave velocity testing in geotechnical engineering[J]. Global Geology, 2018, 37(3): 952 - 957.(in Chinese))

[3] 严 鹏, 张 晨, 高启栋, 等. 不同损伤程度下岩石力学参数变化的声波测试[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3 425 - 3 432.(YAN Peng,

- ZHANG Chen, GAO Qidong, et al. Acoustic wave test on mechanical properties variation of rocks under different damage degrees[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(12): 3 425 - 3 432.(in Chinese))
- [4] 李元辉, 赵兴东, 赵有国, 等. 不同条件下花岗岩中声波传播速度的规律[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(9): 1 030 - 1 033. (LI Yuanhui, ZHAO Xingdong, ZHAO Youguo, et al. Law of sound wave propagation velocity in granite under different conditions[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2006, 27(9): 1 030 - 1 033.(in Chinese))
- [5] 唐晓明, 钱玉萍, 陈雪莲. 孔隙、裂隙介质弹性波理论的实验研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4 226 - 4 233.(TANG Xiaoming, QIAN Yuping, CHEN Xuelian. Laboratory study of elastic wave theory for a cracked porous medium using ultrasonic velocity data of rock samples[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(12): 4 226 - 4 233.(in Chinese))
- [6] 杜守继, 马 明, 陈浩华, 等. 花岗岩经历不同高温后纵波波速分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 803 - 1 806.(DU Shouji, MA Ming, CHEN Haohua, et al. Testing study on longitudinal wave characteristics of granite after high temperature[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1 803 - 1 806.(in Chinese))
- [7] SIMMONS G. Velocity of shear waves in rocks to 10 kilobars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(6): 1 123 - 1 130.
- [8] SENETAKIS K, LI M, HE H, et al. Experimental investigation of primary-wave velocities and constrained moduli of quartz sand subjected to extender element tests and stress anisotropy[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2017, (3): 211 - 219.
- [9] 罗津辉, 蔡忠理, 刘 克, 等. 用声波参数确定岩石加载破坏过程的不同阶段[J]. 岩土力学, 1992, 13(1): 51 - 56.(LUO Jinhui, CAI Zhongli, LIU Ke, et al. Using sonic parameters to determine the different stages of rock loading failure process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1992, 13(1): 51 - 56.(in Chinese))
- [10] 郑贵平, 赵兴东, 刘建坡, 等. 岩石加载过程声波波速变化规律实验研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(8): 1 197 - 1 200. (ZHENG Guiping, ZHAO Xingdong, LIU Jianpo, et al. Experimental Study on change in acoustic wave velocity when rock is loading[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2009, 30(8): 1 197 - 1 200.(in Chinese))
- [11] 李祥春, 聂百胜, 杨春丽, 等. 煤体加载过程中声波波速变化规律实验研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(1): 13 - 16.(LI Xiangchun NIE Baisheng, YANG Chunli, et al. Law of acoustic wave velocity change in coal during loading[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(1): 13 - 16.(in Chinese))
- [12] 燕 静, 李祖奎, 李春城, 等. 用声波速度预测岩石单轴抗压强度的试验研究[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(2): 21 - 23.(YAN Jing, LI Zukui, LI Chuncheng, et al. Experimental study on predicting rock uniaxial compressive strength with acoustic velocity[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1999, 21(2): 21 - 23.(in Chinese))
- [13] 赵明阶, 吴德伦. 单轴加载条件下岩石声学参数与应力的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 51 - 55.(ZHAO Mingjie, WU Delun. Study on the relationship between rock acoustic parameters and stress under uniaxial loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(1): 51 - 55.(in Chinese))
- [14] BIRCH F. The velocity of compression wave in rocks to 10 kilobars(part I)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1960, 65(4): 1 083 - 1 102.
- [15] BIRCH F. The velocity of compression wave in rocks to 10 kilobars(part II)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(7): 2 199 - 2 224.
- [16] NUR A, SIMMONS G. Stress-induced velocity anisotropy in rock: An experimental study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(27): 6 667 - 6 674.
- [17] 马中高, 伍向阳, 王中海. 有效压力对岩石纵横波波速的影响[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(3): 183 - 186.(MA Zhonggao, WU Xiangyang, WANG Zhonghai. Effect of effective pressure on the longitudinal and transverse wave velocity of rock[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2006, 29(3): 183 - 186.(in Chinese))
- [18] 黄承贤, 宋大卫. 在围压下岩石弹性波速的研究[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(2): 32 - 41.(HUANG Chengxian, SONG Dawei. Study on elastic wave velocity of rock under confining pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 13(2): 32 - 41.(in Chinese))
- [19] 王 密, 田家勇. 基于岩石声弹理论的波速 - 静水围压关系耦合模型[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 462 - 468.(WANG Mi, TIAN Jiayong. Coupled model for velocity change in rocks subjected to hydrostatic confining pressure based on rock acoustoelasticity[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(2): 462 - 468.(in Chinese))
- [20] 李浩然, 杨春和, 李伯林, 等. 三轴多级荷载下盐岩声波声发射特征与损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 682 - 691.(LI Haoran, YANG Chunhe, LI Bailin, et al. Damage evolution and characteristics of ultrasonic velocity and acoustic emission for salt rock under triaxial multilevel loading test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(4): 682 - 691.(in Chinese))
- [21] 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影响因素的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 1): 2 834 - 2 842.(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(Supp.1): 2 834 - 2 842.(in Chinese))
- [22] 谷 川, 蔡袁强, 王 军. 地震P波和S波耦合的变围压动三轴试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1 903 - 1 909.(GU Chuan, CAI Yuanqiang, WANG Jun. Coupling effects of P-waves and S-waves based on cyclic triaxial tests with cyclic confining pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(10): 1 903 - 1 909.(in Chinese))
- [23] 陈 志, 杜建国, 周文戈, 等. 0.5~4.0 GPa, 100~300 °C条件下辉长岩弹性波速及衰减特征[J]. 高压物理学报, 2009, 23(5): 338 - 344.(CHEN Zhi, DU Jianguo, ZHOU Wenge, et al. Elastic wave velocity and attenuation characteristics of gabbro under conditions of 0.5 - 4.0 GPa and 100 - 300 °C[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(5): 338 - 344.(in Chinese))
- [24] 尤明庆. 围压对岩石试样强度的影响及离散性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 929 - 937.(YOU Mingqing. Effect of confining pressure on strength scattering of rock specimen[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(5): 929 - 937.(in Chinese))