

# 岩石破坏过程中波速变化特征

张鹏海<sup>1,2</sup>, 杨天鸿<sup>1,2</sup>, 赵永川<sup>1,2</sup>, 夏冬<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 在单轴阶段加载条件下,对取自闽南地区的闪长岩岩样进行了不同方向上纵波传播速度的测试. 首先根据实验结果总结出不同方向波速在岩石破裂过程中的变化规律,然后基于应力微小变化范围内波速与应力遵循线性关系的假设构建波速-应力关系模型,最后通过多参数分段拟合方式求解模型待定系数. 研究表明:平行于加载方向的波速在压密阶段快速上升,岩石破裂前的波速降不明显. 而垂直于荷载方向的波速在压密阶段少量上升后在临近岩石破裂出现非常明显的波速降. 波速-应力关系模型通过参数的变化可以准确地描述不同方向波速的变化过程,证明了模型的适用性.

**关 键 词:** 单轴多阶段加载;波速;岩石破裂;裂纹演化;波速-应力模型

中图分类号: TD 76 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)01-0134-04

## Variation Characteristics of Wave Velocity During Rock Failure Process

ZHANG Peng-hai<sup>1,2</sup>, YANG Tian-hong<sup>1,2</sup>, ZHAO Yong-chuan<sup>1,2</sup>, XIA Dong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Safe Mining of Deep Metal Mines, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Peng-hai, E-mail: zhangpenghai2005@163.com)

**Abstract:** Under uniaxial multi-level loading condition, the longitudinal wave velocities in different directions from south Fujian diorite were measured. Firstly, based on the experiment results, the changes of wave velocities with stress were analyzed. And then according to the hypothesis of the linear relationship between wave velocity and stress in a very small range of stress, a wave velocity-stress model was built. In the end, using the multi-parameter piecewise fitting, undetermined coefficients in the model were determined. The results showed that the variation of wave velocity paralleled to the loading direction is characterized by an initial instant and nonlinear rise below a critical stress, followed by a more gradual linear increase above this critical stress, and the decrease is not obvious before the failure. Whereas, the variation of wave velocity perpendicular to the loading direction is characterized by a slightly rise below a critical stress, followed by an accelerated decrease above this critical stress, and the decrease is very obvious before the failure. The variation of wave velocities in different directions can be accurately fitted by the wave velocity-stress model, which confirms the applicability of the model.

**Key words:** uniaxial multi-level loading; wave velocity; rock failure; crack evolution; wave velocity-stress model

在岩石工程中,波速的高低及变化过程被看成是岩石完整性及其内部物理力学性质变化的反映,尤其是临近破裂时波速的变化特征,对于岩石破坏的预报有重要参考意义.

起初,大量的实验研究结果表明<sup>[1-2]</sup>:纵波波速随应力的增加而增加.然而这一结论却与岩石

膨胀模型中破裂前由于微破裂的增加而密度减小,进而使波速下降的理论结果相互矛盾.随着实验方法和波速测量技术的改进,人们对岩石破裂过程中波速的变化规律有了更深入的了解.施行觉等<sup>[3]</sup>通过对波速计算方法的改进成功测量出粉砂岩在单轴加载临近破裂时(0.98 峰值强度)

波速的下降. 葛洪魁等<sup>[4]</sup>对单轴应力下花岗岩、大理岩及闪长岩中的波速进行了研究,发现波速下降点出现在 0.5 峰值强度附近. Fortin 等<sup>[5]</sup>的三轴压缩实验结果则表明波速下降点与塑性变形起始点十分相近. 这些研究成果促进了人们对波速的认识,但不同学者给出的波速下降点出现较大的离散性,同时利用理论模型描述波速的变化过程目前还较少涉及.

针对以上问题,本文对闪长岩岩样进行单轴阶段加载条件下不同方向上的波速测试,研究岩石受压过程中不同方向上波速的变化特征及对应的波速下降点,并基于实验结果构建波速-应力模型.

# 1 实验过程

## 1.1 岩样制备

本文实验所用岩样为取自闽南地区的细粒闪长岩. 主要矿物成分及质量分数为:斜长石 50%;碱性长石 13%;石英 7%;角闪石 22%;黑云母 8%. 矿物颗粒的分布杂乱无章,总体上较为均匀. 试件尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm.

## 1.2 实验方案

采用应力控制的阶段加载方式(TAW-3000 微机控制岩石伺服压力试验机)进行加载. 加载速率为 200 N/s,每上升 30 kN(12 MPa)稳压一次,利用声发射监测系统(PCI-2 型)进行波速测试直到试件破坏.

## 1.3 波速的测定

利用声发射监测系统的波速测试功能,将各个传感器依次作为脉冲波发射端,其余传感器作为接收端,根据传播时差和传播距离即可算出与加载方向呈不同角度的弹性波波速,传感器布置及不同方向上波速的传播路径如图 1 所示.

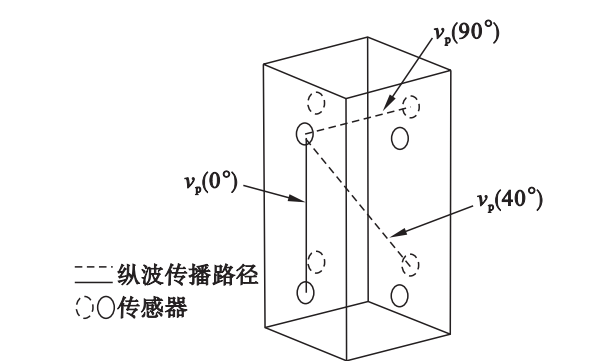


图 1 传感器布置及波速测量示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the transducer arrangements and wave velocity measurement

# 2 实验结果与分析

如图 2 所示,闪长岩破裂过程中,根据裂纹演化特征的不同,可分为压密阶段(Ⅰ),弹性阶段(Ⅱ),裂纹萌生、稳定扩展阶段(Ⅲ)以及裂纹加速扩展阶段(Ⅳ)<sup>[6]</sup>,不同阶段中与加载方向呈不同角度的弹性波波速变化特征不同.

对于平行于加载方向的波速(0°):在压密阶段(Ⅰ),约 0~0.25  $\sigma_c$  应力水平,波速以非线性形式快速上升,随着应力的增加上升速度逐渐减小,波速的上升主要为微裂隙的闭合所致;随着应力的增加裂隙基本压密,闭合效应对波速的影响减弱,取而代之的是岩石基质的压缩<sup>[7]</sup>. 在弹性阶段(Ⅱ)及裂纹萌生、稳定扩展阶段(Ⅲ),波速以近似直线形式上升,这是因为轴向荷载会产生垂直于加载方向的拉应力,形成平行于加载方向微裂纹,对平行于加载方向纵波波速无太大影响<sup>[8]</sup>;在裂纹加速扩展阶段(Ⅳ),波速开始出现小幅降低. 以上演化规律与文献[1-3]相似,波速下降点出现在约 0.9  $\sigma_c$ .

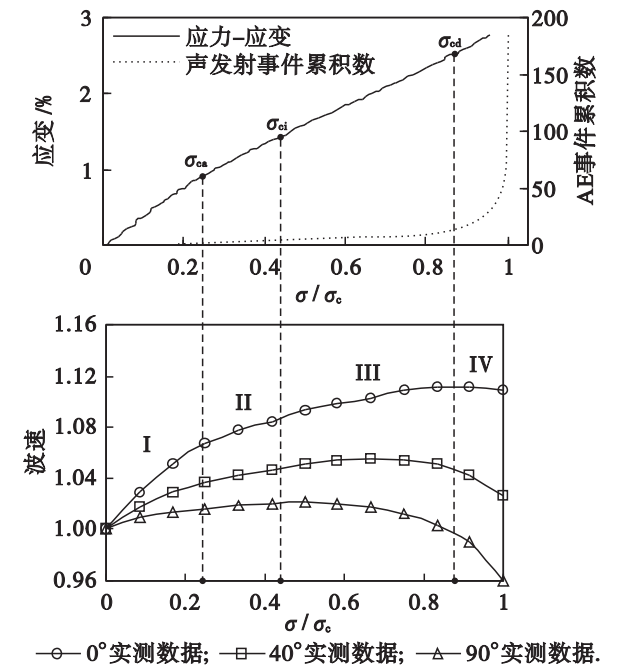


图 2 波速变化过程(波速已无量纲化,初始波速为 1)  
Fig. 2 Variation of wave velocities

对于垂直于荷载方向的波速(90°):在压密及弹性阶段(Ⅰ,Ⅱ),波速随应力的增加上升,但上升幅度明显小于平行加载方向(0°),原因是轴向荷载作用下近水平裂纹会优先闭合且压密效果较近竖直向裂纹明显;在裂纹萌生、稳定扩展阶段(Ⅲ),波速逐渐由上升转变成下降,可见平行于

加载方向的微观裂纹对垂直于荷载方向的波速产生了十分明显的降低作用<sup>[9-10]</sup>;在裂纹加速扩展阶段(Ⅳ),波速加速下降.以上实验结果与文献[5]相似,波速下降点出现在约  $0.5\sigma_c$  处.

对于与加载方向呈  $40^\circ$  夹角的波速,其变化规律介于  $0^\circ$  及  $90^\circ$  之间,波速下降点出现在约  $0.67\sigma_c$  处.可见与荷载加载方向夹角越小,波速下降点对应的应力水平越大.

对实验结果的分析说明,微裂纹演化在方向上的不均匀导致不同方向波速变化规律的差异.波速下降点出现的应力水平取决于波的传播方向与荷载加载方向间的夹角.

### 3 波速 - 应力变化关系模型

基于以上分析,波速的变化主要受岩石中原有微裂纹的压密、岩石基质的压缩、新裂纹的萌生及扩展这三种因素的影响.以下分别讨论三种因素影响下,波速及应力间的关系.

1) 岩石基质压缩.大量实验研究表明,岩石基质压缩过程中,波速与应力呈线性关系<sup>[7]</sup>,即

$$dv_c/v_{c0} = Ed\sigma. \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为应力; $E$  为待定系数; $dv_c$  为受力为  $\sigma$  时,岩石基质压缩引起的波速变化量; $v_{c0}$  为裂纹被最大程度压密,而岩石基质未被压缩时,波在岩石中的传播速度.

将式(1)积分得

$$v_c = E\sigma + v_{c0}. \quad (2)$$

2) 微裂纹压密.将裂纹本身视为一种介质,假定在应力微小变化范围内波速与应力遵循线性关系,即

$$dv_c/v_c = Cd\sigma. \quad (3)$$

式中: $C$  为待定系数; $dv_c$  为受力为  $\sigma$  时,裂纹引起的波速下降量.

将式(3)积分得

$$v_c = v_{c0} \exp(C\sigma). \quad (4)$$

式中, $v_{c0}$  为受力为 0 时,裂纹引起的波速下降量.

3) 裂纹萌生及扩展.裂纹萌生及扩展表现为裂纹体积的增加,可视为裂纹压密的逆过程,波速降与应力间的关系可用式(5)表达:

$$dv_d/v_d = Dd\sigma. \quad (5)$$

式中: $D$  为待定系数; $dv_d$  为受力为  $\sigma$  时,新裂纹的萌生和扩展引起的波速降.

将式(5)积分后得

$$v_d = v_{d0} \exp(D\sigma). \quad (6)$$

式中, $v_{d0}$  为裂纹萌生应力( $\sigma_{ci}$ )下新生裂纹引起的

波速降.由于裂纹萌生应力前,波速降应为 0,所以式(6)应修正为

$$v_d = v_{d0} \exp(D(\sigma - \sigma_{ci})) \quad (\sigma \geq \sigma_{ci}). \quad (7)$$

综上所述,波速 - 应力间的关系可由下式表达:

$$\left. \begin{aligned} v &= (E\sigma + v_{c0}) - v_{c0} \exp(-C\sigma) \quad (\sigma < \sigma_{ci}), \\ v &= (E\sigma + v_{c0}) - v_{c0} \exp(-C\sigma) - v_{d0} \exp(D(\sigma - \sigma_{ci})) \\ &\quad (\sigma \geq \sigma_{ci}). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据式(8)可知,岩石破裂过程中其实并不存在绝对的波速线性变化段,只是由于裂纹体积在弹性阶段的变化非常小,导致波速的非线性变化幅度极小,可被看作线性变化而已.

式中所有待定参数均可求解,下面以实验结果中平行于加载方向的波速( $0^\circ$ )为例介绍求解过程:首先利用裂纹活动程度最低的弹性阶段(Ⅱ阶段)对应的波速直线变化段拟合式(2)中待定参数,得  $E = 0.0934$ ,  $v_{c0} = 1.046$ , 拟合系数  $R^2 = 0.9963$ ;然后选取压密阶段(Ⅰ)、弹性阶段(Ⅱ)波速实测数据,对式(8)中第一段公式进行拟合,得  $v_{c0} = 0.04685$ ,  $C = 9.17$ , 拟合系数  $R^2 = 0.9965$ ;最后,选取Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ阶段波速实测数据,对式(8)中第二段公式进行拟合,裂纹萌生应力  $\sigma_{ci} = 0.45\sigma_c$ ,得  $v_{d0} = 0.00128$ ,  $D = 5.81869$ , 拟合系数  $R^2 = 0.9688$ .较高的拟合系数证明了波速 - 应力理论模型形式上的合理性.但由于缺乏直接证据证明“在应力微小变化范围内波速与应力遵循线性关系”假设的准确性,本文推导的模型是对波速 - 应力理论关系的一种可能性描述及初步探索.

利用同样的方法可求得其他方向上波速 - 应力模型中的参数,如表 1 所示.拟合曲线如图 3 所示.

随着与加载方向夹角的增加, $v_{c0}$  (由裂隙闭合引起的波速变化量)逐渐减小,与越接近竖直向的裂纹越难被压缩导致水平向波速增量最小的实验结果一致.由于水平向拉应力的作用,裂纹萌生应力下,新生裂纹大多近竖直向,所以  $v_{d0}$  (裂纹萌生应力水平下新生裂纹引起的波速降)应随与加载方向夹角的增大而增大,但拟合结果出现  $v_{d0}$  ( $40^\circ$ ) 高于  $v_{d0}$  ( $90^\circ$ ) 的情况.笔者分析除了波速测试及拟合过程中产生的误差外,还与  $v_p$  ( $40^\circ$ ) 传播路径最长,导致通过的裂纹数量最多有关.裂纹萌生、稳定扩展阶段后,微裂纹演化在方向上的不均匀程度持续提高,会导致与加载方向夹角越大波速下降速度越快,即  $D$  值越大,拟合结果与

实验结果一致。

表 1 参数拟合结果  
Table 1 Fitted parameters

待定参数	0°	40°	90°
$E/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})$	$9.34\times10^{-2}$	$5.55\times10^{-2}$	$1.76\times10^{-2}$
$v_{e0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.046	1.023 5	1.012 6
$v_{a0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$4.68\times10^{-2}$	$2.37\times10^{-2}$	$1.26\times10^{-2}$
$C/(\text{MPa}^{-1})$	-9.17	-11.04	-11.82
$v_{d0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$1.28\times10^{-3}$	$1.77\times10^{-3}$	$1.55\times10^{-3}$
$D/(\text{MPa}^{-1})$	5.818 7	6.208 6	6.933 8

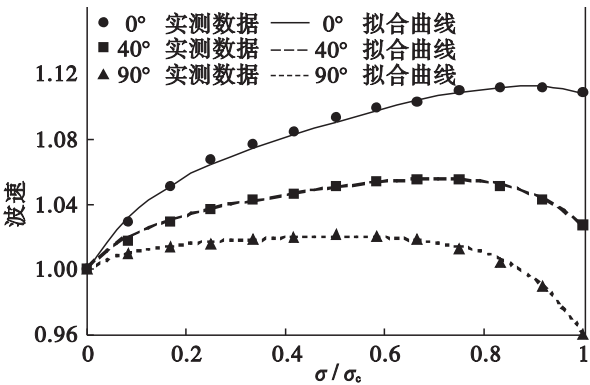


图 3 波速拟合曲线

Fig. 3 The fitted curves of wave velocity

4 结 论

1) 微裂纹演化在方向上的不均匀导致波速变化特征的各向异性. 对于平行于加载方向的波速,变化过程为压密应力(约  $0.25\sigma_c$ )前的非线性快速上升及该应力后的近似线性上升,岩石破裂前的波速降并不明显,波速下降点出现在约  $0.9\sigma_c$ . 而对于垂直于荷载方向的波速,变化过程则为在裂纹萌生、稳定扩展阶段前的少量上升及其后的快速下降,波速最高值出现在约  $0.5\sigma_c$  处.

2) 基于应力微小变化范围内波速变化与应力遵循线性关系的假设,初步探索性地推导出波速-应力模型,该模型通过参数的变化可以准确地描述不同方向上波速的变化过程,突破了以往幂律模型无法描述随应力增加波速下降的局限性.

参考文献:

[ 1 ] Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner G H F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media[ J ]. *Geophysics*, 1958, 23 ( 3 ) : 459 – 493.

[ 2 ] Sharma P. Geophysical methods in geology[ M ]. New York: Elsevier, 1986.

[ 3 ] 施行觉, 赵闯, 杨映希, 等. 岩石临破裂前波速变化特征的

实验研究[ J ]. *地球物理学报*, 2012, 55 ( 10 ) : 3386 – 3392.

( Shi Xing-jue, Zhao Chuang, Yang Ying-xi, et al. Experimental study of velocity characteristic before rock fracture [ J ]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55 ( 10 ) : 3386 – 3392. )

[ 4 ] 宋丽莉, 葛洪魁, 梁天成, 等. 小应力扰动下岩石弹性波速变化的波形检测[ J ]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 36 ( 4 ) : 60 – 65.

( Song Li-li, Ge Hong-kui, Liang Tian-cheng, et al. Waveform detection of elastic wave velocity changes in rock under small stress perturbations [ J ]. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science*, 2012, 36 ( 4 ) : 60 – 65. )

[ 5 ] Fortin J, Stanchits S, Dresen G. Acoustic emission and velocities associated with the formation of compaction bands in sandstone [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111 : B10203 – B10209.

[ 6 ] Martin C D, Christiansson R, Soderhall J. Rock stability considerations for siting and constructing a KBS-3 repository [ R ]. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2001.

[ 7 ] Ullemeyer K, Nikolayev D I, Christensen N I, et al. Evaluation of intrinsic velocity-pressure trends from low-pressure P-wave velocity measurements in rocks containing microcracks [ J ]. *Geophysical Journal International*, 2011, 185 ( 3 ) : 1312 – 1320.

[ 8 ] 巩思园, 窦林名, 何江, 等. 深部冲击倾向煤岩循环加卸载的纵波波速与应力关系试验研究[ J ]. *岩土力学*, 2012, 33 ( 1 ) : 41 – 47.

( Gong Si-yuan, Dou Lin-ming, He Jiang, et al. Study of correlation between stress and longitudinal wave velocity for deep burst tendency coal and rock samples in uniaxial cyclic loading and unloading experiment [ J ]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 ( 1 ) : 41 – 47. )

[ 9 ] Yin H Z, Nur A. Stress-induced ultrasonic velocity and attenuation anisotropy of rocks [ J ]. *SEG Expanded Abstracts*, 1992, 11 ( 1 ) : 1073 – 1076.

[ 10 ] Kim H, Cho J W, Song I. Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea [ J ]. *Engineering Geology*, 2012, 147 : 68 – 77.