

# 基于能量法测量节理岩体品质因子的实验研究

戎立帆<sup>1,2</sup>, 李建春<sup>1,3,4</sup>, 李海波<sup>1</sup>, 李志文<sup>1,2</sup>, 洪胜男<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学 北京 100049;  
3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 4. 东南大学 未来地下空间研究院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 品质因子是衡量岩体中应力波衰减特性的一个重要参数。利用分离式霍普金森压杆实验系统对含人工节理花岗岩试样进行单轴冲击压缩实验, 研究节理吻合系数(JMC)对岩体试样品质因子的影响。首先, 根据品质因子基本概念得出了利用应力波能量计算品质因子的方法, 并证明在试样严格满足应力均匀条件时, 其与应力-应变曲线方法是等价的。然后, 用三波法得到了节理试样的应力-应变曲线, 同时用应力波能量方法计算了品质因子。实验结果表明: 随着节理吻合系数(JMC)降低, 应力-应变曲线滞回环面积增加, 节理岩体试样的动态割线模量和品质因子均减小, 说明节理接触面积减小弱化了整个试样并且使试样能量耗散能力增加。

**关键词:** 岩石力学; 节理岩体; 品质因子; 应力波能量衰减; 节理吻合系数

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2017)10-2474-10

## Measurement of seismic quality factor of jointed rock based on stress wave energy

RONG Lifan<sup>1,2</sup>, LI Jianchun<sup>1,3,4</sup>, LI Haibo<sup>1</sup>, LI Zhiwen<sup>1,2</sup>, HONG Shengnan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 4. Institute for Underground Space, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** The seismic quality factor is commonly used to describe the attenuation characteristics of stress wave propagation across rock masses. In order to research the influence of Joint Matching Coefficients(JMCs) on the seismic quality factor  $Q_s$  of jointed rock mass, a series of uniaxial impact compression experiments were conducted on the granite specimens containing artificial joint by using the apparatus of split Hopkinson pressure bar(SHPB). A method to calculate the seismic quality factor is proposed based on the variation of stress wave energy and conformed to the concept of seismic quality factor. The method is proved to be equivalent to the stress-strain method on the condition that the stresses on the specimen are uniform. The stress-strain curves were calculated through the three-wave method, while the seismic quality factor of the specimen was calculated with the energy method. The experimental results show that both the dynamic secant modulus and quality factor decrease with the decrease of joint matching coefficient, indicating that a joint with smaller contact area weakens the whole specimen, but enhances the ability of energy dissipation.

**Key words:** rock mechanics; jointed rock mass; seismic quality factor; stress wave energy attenuation; joint

**收稿日期:** 2017-04-11; **修回日期:** 2017-06-16

**基金项目:** 国家杰出青年基金项目(41525009); 国家自然科学基金重点项目(51439008); 国家自然科学基金面上项目(51679231)

Supported by the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China(Grant No. 41525009) and National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51439008 and 51679231)

**作者简介:** 戎立帆(1987-), 男, 2010年毕业于中国矿业大学安全工程专业, 现为博士研究生, 主要从事应力波传播和岩石动力学方面的研究工作。E-mail: rong-lifan@foxmail.com。通讯作者: 李建春(1971-), 女, 博士, 现任研究员、博士生导师。E-mail: jcli@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0372

matching coefficient(*JMC*)

## 1 引言

应力波是应力扰动的传播形式, 在岩土工程施工过程中普遍存在, 施工扰动(例如爆破)引起的应力波通过岩体介质向周围传播, 会影响临近建(构)筑物的安全稳定。节理是一种广泛存在于岩体中的不连续结构面, 不仅对岩体的力学性质起重要控制作用, 也对岩体中应力波的传播有显著影响。因此研究节理岩体中应力波衰减对指导爆破设计和预测与控制爆破振动都有实际意义。

现有研究表明岩石节理基本特征(如力学特性、表面形貌参数和几何分布)都影响应力波在岩体中的传播。R. Miller 等<sup>[1-4]</sup>基于位移不连续方法<sup>[1-5]</sup>对应力波入射单节理问题进行了详细研究, 结果表明应力波穿越节理时会发生幅值衰减、中心频率降低和时间延迟现象, 且应力波斜入射节理时还会引起波形转换, 节理本构模型(如线弹性和非线性)与刚度、应力波入射角度和频率等均会影响应力波传播。同时 J. B. Zhu 等<sup>[4, 6-11]</sup>研究了含一组平行节理岩体中应力波的传播, 结果表明节理数目和节理间距都是影响因素, 当节理间距小于应力波波长时, 应力波在节理之间会发生多次透反射现象。S. B. Chai 等<sup>[12]</sup>推导了应力波穿越 2 条非平行节理的传播方程, 计算结果表明非平行节理的交叉角度对应力波传播也有重要影响, 平面应力波穿越非平行节理后波阵面不再为平面, 应力波场变得十分复杂。

品质因子  $Q_s$  是一个量纲一参数, 用来表征岩体中应力波能量耗散<sup>[13]</sup>。节理岩体的品质因子与节理特征有着密切关系。N. Barton<sup>[14]</sup>分析了大量的岩体工程现场数据, 经验性的提出岩体质量和品质因子之间存在广泛联系, 当岩体中节理发育且节理组较多时, 岩体质量往往较差, 岩体波速较低, 同时岩体的品质因子也较低。品质因子  $Q_s$  是地球物理学科常用概念, 将  $Q_s$  与岩石节理特征以及岩体中应力波衰减结合起来, 是岩土工程学科与地球物理学科的交叉, 也是研究岩体中应力波能量衰减的新思路。

目前通常采用黏弹性等效介质模型研究  $Q_s$  与应力波传播的关系。J. C. Li 等<sup>[15]</sup>采用等效黏弹性模型结合虚拟波源对含一组平行节理岩体中应力波传播规律进行了研究, 随后又引入了品质因子对黏弹性模型参数进行反演<sup>[16]</sup>, 讨论了不同品质因子地层

中应力波传播规律, 为黏弹性模型参数选取提供了新方法。J. M. Carcione 等<sup>[17]</sup>给出了线黏弹性模型中  $Q_s$  的计算表达式, 并研究了波衰减与波的相速度之间的关系。王志亮和陈强<sup>[18]</sup>研究了 ZWT 模型的  $Q_s$  与应力波频率之间的关系, 发现在一定频率内  $Q_s$  是稳定的。

品质因子  $Q_s$  是岩体的固有参数, 可以通过实验手段测量得到。郝召兵等<sup>[19]</sup>综述了实验室测量  $Q_s$  的方法, 主要有驻波振动法、行波法和应力应变曲线法 3 种, 实验对象均为完整岩石。鉴于节理岩体试样的复杂性, 实验室测量  $Q_s$  工作有一定困难。L. J. Pyrak-nolte 等<sup>[2, 20]</sup>采用超声波对单节理岩体进行了测试, 并利用频谱比法计算了节理岩体的  $Q_s$ , 研究表明节理岩体  $Q_s$  与节理刚度密切相关, 节理刚度越大,  $Q_s$  越大。相对于超声波波幅和频率, 实际工程中爆破作业爆源附近应力波幅值较大且频率较低, 而分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)能够提供较大幅值和较低频率的应力波, 因此采用 SHPB 实验测量节理岩体  $Q_s$  对研究节理岩体在靠近爆源处的能量耗散提供一些参考资料。鞠杨等<sup>[21-22]</sup>利用 SHPB 实验设备测试了节理岩样的耗散能量, 讨论了节理表面分形维数与耗散能量的关系, 研究表明节理表面越粗糙, 节理岩样耗散能量越多。耗散能量是品质因子计算公式的一部分, 可以直接反映节理岩体的能量耗散情况, 但品质因子作为无量纲量能更客观地描述节理岩体的能量耗散能力, 与黏弹性介质模型联系也更直接。因此研究利用 SHPB 实验测量节理岩体的品质因子  $Q_s$  有一定意义。

本文采用 SHPB 实验设备对含人工节理的花岗岩样进行了冲击压缩实验, 理论推导了利用 SHPB 实验中应力波能量计算品质因子  $Q_s$  的方法, 同时讨论了应力波能量法与传统的应力-应变曲线法之间的关系。通过实验结果分析了节理吻合系数(joint matching coefficient, *JMC*)对节理岩体  $Q_s$  的影响, 并结合微裂纹(颗粒)摩擦机制对实验结果进行了讨论。

## 2 实验方法

### 2.1 实验系统及程序

实验装置采用中国科学院武汉岩土力学研究所

岩石动力实验室的分离式霍普金森压杆(SHPB)装置,如图 1 所示,装置由气腔、子弹、入射杆、透射杆、吸收杆、缓冲器和数据采集系统组成。子弹、入射杆、透射杆和吸收杆为高强弹簧钢,材料的弹性模量  $E = 210 \text{ GPa}$ , 密度  $\rho = 7\,800 \text{ kg/m}^3$ , 实测波速  $c = 5\,189 \text{ m/s}$ 。钢杆直径为  $50 \text{ mm}$ , 其中子弹长度为  $400 \text{ mm}$ , 入射杆和透射杆长度为  $2\,500 \text{ mm}$ , 吸收杆为  $1\,000 \text{ mm}$ 。数据采集系统由贴在钢杆表面的应变片、惠斯通电桥、动态应变采集仪和示波器组成。



图 1 SHPB 实验装置  
Fig.1 SHPB test equipment

SHPB 装置中子弹由气腔中高压氮气推动发射,并以一定速度撞击入射杆产生入射应力波,入射波沿入射杆传播至测试试件,因试件与钢杆波阻抗不同,在钢杆与试件界面处产生反射波和透射波,反射波返回入射杆,透射波进入透射杆继续传播。入射波、反射波和透射波信号由贴于钢杆表面的应变片测量,经动态应变仪采集并传输至示波器显示和存储。

测试试样共有 11 组,其中 1 组为完整岩块,10 组为  $JMC$  各异的节理岩块。实验中气腔发射气压固定为  $0.2 \text{ MPa}$ ,同时子弹发射位置固定为同一位置,使得子弹发射速度一定,以尽量保证每次实验加载条件相同。在入射杆的入射端中心贴硅胶片作为波形整形器,硅胶片厚度为  $0.5 \text{ mm}$ ,直径为  $12 \text{ mm}$ ,将入射波调整为类半正弦波。每组实验对同一试样进行 3 次重复实验,在 3 个实验结果中选取其中 2 个相近的数据进行分析,用以排除干扰和保证实验数据可靠。

### 2.2 节理岩体试样

试样的材料为花岗岩,为尽量保证材料的一致性,试样全部取自同一块花岗岩岩块,材料的密度为  $2\,630 \text{ kg/m}^3$ ,波速为  $3\,368 \text{ m/s}$ 。首先在大块花岗岩取芯并切割为  $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  圆柱状试样,并对试样两端面进行磨平保证端面不平行度误差小于  $0.01 \text{ mm}$ 。然后使用切割机在部分试样表面进行切槽,槽深为  $3 \text{ mm}$ ,切槽和未切槽岩块如图 2 所示。将表面刻槽岩块与另一表面未刻槽岩块贴合形成不



图 2 表面切槽与未切槽岩块

Fig.2 Rock samples notched and without been notched

匹配面,将不匹配面作为岩石节理,如图 3 所示。节理的厚度为岩块表面的刻槽深度,节理吻合系数( $JMC$ )为节理接触面积  $A$  与岩块横截面面积  $A_0$  之比,即

$$JMC = \frac{A}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

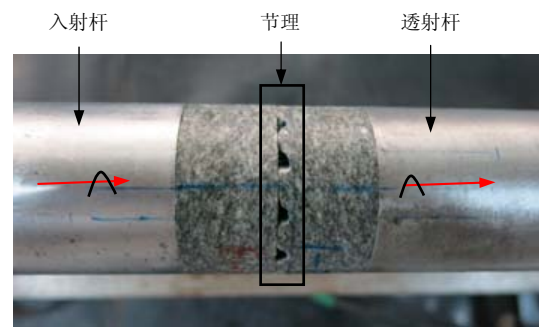


图 3 节理试样

Fig.3 Rock sample with joints

不同的槽宽和切槽数量可得到不同的节理吻合系数( $JMC$ ),槽宽、切槽数量及形成的节理吻合系数如表 1 所示。另外,准备了 2 个  $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  完整岩块作为参照试样,并认为参照试样  $JMC = 1$ 。

表 1 试样节理表面参数  
Table 1 Parameters of joint surface

编号	接触面积/mm <sup>2</sup>	$JMC/\%$	槽数	槽宽/mm	备注
R1	1 963.5	100.0	-	-	完整岩块
S1	1 663.1	84.7	1	6	节理岩块
S2	1 398.0	71.2	2	6	
S3	1 264.5	64.4	4	4	
S4	1 184.0	60.3	3	6	
S5	1 019.1	51.9	6	4	
S6	1 007.3	51.3	4	6	
S7	995.5	50.7	5	5	
S8	828.6	42.2	5	6	
S9	818.8	41.7	6	5	
S10	636.2	32.4	6	6	

### 2.3 品质因子计算方法

品质因子的经典定义为应力波传播一个波长距离后原来储存能量  $W$  与消耗能量  $\Delta W$  之比的  $2\pi$  倍，或经过一个应力循环时最大储存能量  $W$  与消耗能量  $\Delta W$  之比的  $2\pi$  倍<sup>[13]</sup>，即

$$Q_s = 2\pi \frac{W}{\Delta W} \quad (2)$$

根据上述定义，在应力循环实验测得应力 - 应变曲线中，加载和卸载曲线构成的滞回环面积代表消耗能量  $\Delta W$ ，在应变最大时储存的能量为最大储存能量  $W$ ，如图 4 所示。

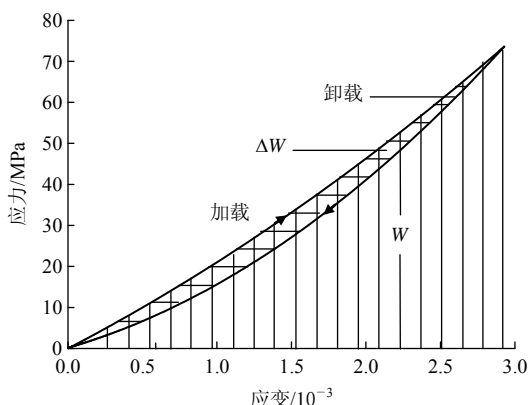


图 4 加卸载曲线与能量耗散关系示意图  
Fig.4 Relationship of load-unload curves with energy dissipation

本节提出一种计算品质因子的新方法，该方法遵守品质因子的基本概念，但不采用应力 - 应变曲线计算试样能量，而是利用霍普金森压杆实验系统可以测量应力波的优势，采用应力波能量来计算试样最大储存能量和耗散能量。

由节 2.1 中介绍的分离式霍普金森压杆实验原理可知，试样在动载荷作用下的变形与其两端的应力波有直接关系，因此试样在变形过程中的能量变化与其两端应力波的能量也有直接关系。那么试样在变形过程中的能量可以由钢杆上的应力波能量得出。整个分离式霍普金森实验系统的能量可分为 4 个部分：入射波能量  $W_I$ 、反射波能量  $W_R$ 、透射波能量  $W_T$  和试件变形能  $W_S$ ，其中变形能包含可释放变形能  $W_e$  和耗散能量  $W_L$  两部分能量，又因为应力波和试样变形都与时间相关，因此将四者表示为时间相关的函数，即  $W_I(t)$ 、 $W_R(t)$ 、 $W_T(t)$  和  $W_S(t)$ 。考虑整个实验系统在实验过程中与外界无热交换，即认为整个实验系统为封闭系统，钢杆对试样做功可用  $U(t)$  表示， $U(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t)$ ，根据热力

学第一定律， $U(t)$  将全部转化为试样变形能  $W_S(t)$ ，表示为

$$W_S(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t) \quad (0 \leq t \leq t_0) \quad (3)$$

式中： $t_0$  为应力波持续时间，通常选入射波持续时间。根据弹性理论，入射波、反射波和透射波能量可表示为

$$W_I(t) = A_s c E \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt \quad (4a)$$

$$W_R(t) = A_s c E \int_0^t \varepsilon_r^2(t) dt \quad (4b)$$

$$W_T(t) = A_s c E \int_0^t \varepsilon_t^2(t) dt \quad (4c)$$

将式(4a)~(4c)代入式(3)，可得

$$W_S(t) = A_s E c \int_0^t [\varepsilon_i^2(t) - \varepsilon_r^2(t) - \varepsilon_t^2(t)] dt \quad (5)$$

式中： $A_s$  为钢杆的横截面积； $c$  为钢杆波速； $E$  为钢杆弹性模量； $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$  和  $\varepsilon_t(t)$  分别为以应变形式表示的入射波、反射波和透射波。

试样变形能  $W_S(t)$  不是定值而是随时间变化的量。在应力波作用下，前期阶段试样受压缩变形，应力波通过钢杆将能量传递给试样，试样变形能逐渐增加直至达到最大值，称为最大储存能量  $W_{Smax}$ ；随着时间持续，后期阶段试件两端压缩应力逐渐降低，试件变形也逐渐恢复，变形恢复过程中可释放变形能  $W_e$  通过以应力波形式传递给钢杆，试件变形能逐渐降低。由于岩石试件的能量耗散特性，变形能有一部分被试样自身消耗，导致应力波能量出现亏损，而亏损能量就是试样消耗能量，称为耗散能量  $W_L$ 。

值得注意的是，当  $t = t_0$  时，应力波与试样之间相互作用结束，试样经历了一个加卸载过程，此时试样变形能中的可释放变形能  $W_e$  已经通过卸载过程将能量传递给钢杆，剩余部分则为耗散能量  $W_L$ ，因此耗散能量  $W_L = W_S(t_0)$ ，同时  $W_I(t_0)$ 、 $W_R(t_0)$ 、 $W_T(t_0)$  分别为整个入射波、反射波和透射波波形包含的能量。由式(3)可知： $W_S(t_0) = W_I(t_0) - W_R(t_0) - W_T(t_0)$ ，这与鞠杨等<sup>[21-22]</sup>对耗散能的定义是相同的；但当  $t < t_0$  时， $W_S(t)$  包含两部分能量，即可释放变形能  $W_e$  和耗散能  $W_L$ ，同时  $W_I(t)$ 、 $W_R(t)$ 、 $W_T(t)$  分别为从对试样进行加载时刻(设为时间零点)到持续到时刻  $t$  时入射波、反射波和透射波包含的能量，可以反映整个实验过程中应力波和试样能量的变化。故试样的耗散能量为

$$W_L = W_S(t_0) = A_s E c \int_0^{t_0} [\varepsilon_i^2(t) - \varepsilon_r^2(t) - \varepsilon_t^2(t)] dt \quad (6a)$$

最大储存能量为

$$W_{Smax} = \max_{0 \leq t \leq t_0} [W_s(t)] = \max_{0 \leq t \leq t_0} \left\{ A_3 E c \int_0^t [\varepsilon_i^2(t) - \varepsilon_r^2(t) - \varepsilon_t^2(t)] dt \right\} \quad (6b)$$

把式(6a)和(6b)代入式(2), 得到用应力波能量计算品质因子的公式:

$$Q_s = 2\pi \frac{W_{Smax}}{W_L} = 2\pi \frac{\max_{0 \leq t \leq t_0} \left\{ \int_0^t [\varepsilon_i^2(t) - \varepsilon_r^2(t) - \varepsilon_t^2(t)] dt \right\}}{\int_0^{t_0} [\varepsilon_i^2(t) - \varepsilon_r^2(t) - \varepsilon_t^2(t)] dt} \quad (7)$$

该方法与传统的应力 - 应变法存在一定的联系, 在实验严格满足一维应力假设和应力均匀性假设时, 二者是等价的, 以下给出证明。

当实验满足一维应力假设和应力均匀性假设时, 基于一维应力波理论, 采用三波法, 计算式为

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c}{l} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (8a)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c}{l} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (8b)$$

$$\sigma(t) = \frac{A_3 E}{2A_0} \int_0^t [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] dt \quad (8c)$$

式中:  $l$  为试样长度,  $A_0$  为试样横截面积,  $\dot{\varepsilon}(t)$  为试样应变率,  $\varepsilon(t)$  为试样应变,  $\sigma(t)$  为试样应力。处理 SHPB 实验数据, 可以得到试件的动态应力 - 应变曲线<sup>[23]</sup>。如果加载应力波的幅值比较小, 试样不会有明显的损伤, 认为其仍处于弹性变形阶段, 此时计算出的应力 - 应变曲线形式同图 4, 也包含加载段和卸载段。对应力 - 应变曲线进行积分可以计算出试样的最大储存能量和耗散能量, 进而得出  $Q_s$ 。

首先推导应力 - 应变曲线法和应力波能量法计算试样变形能的关系。应力 - 应变曲线法计算试样变形能可表示为

$$W_s(t) = \int_v U_s dv = A_0 l \int_0^t \sigma d\varepsilon = A_0 l \int_0^t \sigma(t) d\varepsilon(t) = A_0 l \int_0^t \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt \quad (9)$$

式中:  $v$  为试样体积,  $U_s$  为单位体积变形能。  $t$  的取值范围为  $0 \leq t \leq t_0$ ,  $t_0$  与式(3)含义相同。当  $t = t_0$  时,  $W_s(t_0)$  为应力 - 应变曲线包络面积与试样体积的乘积, 也即试样的耗散能量。

将三波法计算应变率和应力的式(8a)和(8c)代入式(9), 得

$$W_s(t) = \frac{A_3 E c}{2} \int_0^t [\varepsilon_i^2(t) - \varepsilon_r^2(t) - \varepsilon_t^2(t) - 2\varepsilon_r(t)\varepsilon_t(t)] dt \quad (10)$$

若引入试件应力(应变)均匀性, 则应力与应变率可由下式计算:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c}{l} \varepsilon_r(t) \quad (11a)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c}{l} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \quad (11b)$$

$$\sigma(t) = E \varepsilon_i(t) \quad (11c)$$

将式(11a)~(11c)代入式(9), 可得

$$W_s(t) = -2A_3 E c \int_0^t \varepsilon_r(t) \varepsilon_i(t) dt \quad (12)$$

联立式(10)和(12), 可得

$$W_s(t) = A_3 E c \int_0^t [\varepsilon_i^2(t) - \varepsilon_r^2(t) - \varepsilon_t^2(t)] dt \quad (13)$$

式(13)和(5)相同, 因此用应力 - 应变曲线法和应力波能量法计算试样变形能是等价的。因此, 当  $t = t_0$  时, 应力 - 应变法计算的耗散能量与应力波能量法计算结果也是相同的。

由图 4 可知, 当积分上限取最大应变时, 对应力应变曲线进行积分就是试样单位体积最大储存能量, 再乘以试样体积即为试样的最大储存能量。假设试样的最大应变为  $\varepsilon_1$ , 在式(11b)中对应的时间  $t = t_1$ 。由图 4 可知, 试样应变先增加至最大值, 然后逐渐减小, 根据利用应力波数据计算应变的式(11b)可知,  $\varepsilon_r(t)$  在  $t < t_1$  阶段必定先是负值, 试样的应变才会为正值然后逐渐增加, 在  $t > t_1$  阶段必定为负值, 试样的应变才会逐渐减小。由图 4 可知, 试样的应力为正值, 那么根据式(11c)可知,  $\varepsilon_i(t)$  必定为正值。根据  $\varepsilon_r(t)$  和  $\varepsilon_t(t)$  随时间的变化可以得出由式(12)表示的试样变形能  $W_s(t)$  随时间的变化, 当  $t < t_1$  时  $W_s(t)$  是增加的, 当  $t > t_1$  时  $W_s(t)$  是减小的, 当  $t = t_1$  时,  $W_s(t_1)$  为最大值。由于式(12)与(13)是等价的, 因此  $W_{Smax} = W_s(t_1)$ , 当试样的应变达到最大值时, 利用应力波能量计算得到的试样变形能也是最大值, 因此利用应力 - 应变曲线法与利用应力波能量法计算试样最大储存能量也是相同的。

综上所述, 计算试样的耗散能量和最大储存能量时, 应力应变曲线法和应力波能量法得到的结果是相同的, 因此计算出的品质因子也是相同的, 命题得证。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 实验波形图与应力均匀性检验

图 5 为 11 组实验数据中具有代表性的 2 组应力



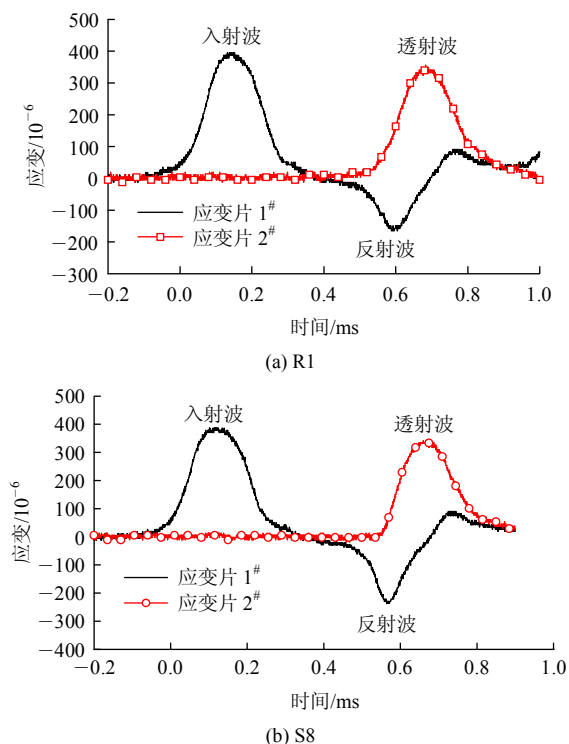


图 5 典型实验波形  
Fig.5 Typical wave forms

波数据，分别是完整试样 R1 和节理试样 S8( $JMC = 42.2\%$ )。如图 5 所示，波形数据包括入射波、反射波和透射波 3 个波形。入射波和反射波由位于入射杆的应变片 1# 测量得到，因此二者共用应变片 1# 的数据记录，透射波由位于透射杆的应变片 2# 测量。在 3 个应力波中，入射波幅值最大，透射波幅值较入射波小，二者波形相似，都类似于半正弦波，但反射波波形不同。反射波波形验证了节 2.3 中对反射波的分析，随着时间持续，反射波先由零点逐渐降低到最低点，然后回升至零点位置，此阶段  $\varepsilon_r(t)$  为负值，之后反射波越过零点升高至最高点，最后缓慢下降接近零点，此阶段  $\varepsilon_r(t)$  为正值。这是因为反射波波形与试样的变形过程密切相关，反射波幅值为负时，试样受压轴向尺寸减小，反射波幅值为正时，试样恢复变形，轴向尺寸逐渐恢复。

在 SHPB 实验中，试样应力均匀性是影响实验结果的主要因素之一。相较于完整试件，节理的存在使得节理试件在受力变形时应力分布更加复杂，试件达到应力均匀的难度也会增加，因此对节理试件的应力均匀性进行讨论。宫凤强等<sup>[24]</sup>根据岩石 SHPB 试验中应力波在弹性杆和岩样内的透反射规律，给出了利用反射系数和应力波在试样间来回传播最低次数获得应力差相对值的查值表。经过超声波测速仪和电子精密天平共同测量得到试样波阻

抗，其中试样 S10 波阻抗最低，波速为 3 195 m/s，密度为 2 593 kg/m<sup>3</sup>，波阻抗为 8 284 635 kg/(m<sup>2</sup>·s)，其达到应力平衡所需要应力波来回传播最低次数最大，以应力相对差值 5% 作为应力平衡临界值，根据查值表得到应力波最少需来回传播 3 次。实验中入射波上升沿时间约为 0.18 ms，足够应力波来回传播 5.7 次，说明理论上试样应力可以达到平衡。

接下来通过实验数据检验应力均匀性。由一维应力波理论可知，试件前端面(与入射杆接触端)的应力由入射波和反射波叠加而成，可由下式得出：

$$\sigma_1(t) = E \int_0^t [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] dt \quad (14a)$$

后端面(与透射杆接触端)应力只与透射波有关，可下式得出：

$$\sigma_2(t) = E \int_0^t \varepsilon_t(t) dt \quad (14b)$$

图 6 为节理试件 S8( $JMC = 42.2\%$ )和 S10( $JMC = 32.4\%$ )的前后端面应力以及应力差值变化趋势。由图 6 可知，在加载段试件两端应力非常接近，在达到应力最大值时开始出现轻微差别，一直持续到卸载阶段。节理试样 S8 前、后端面应力最大值分别为

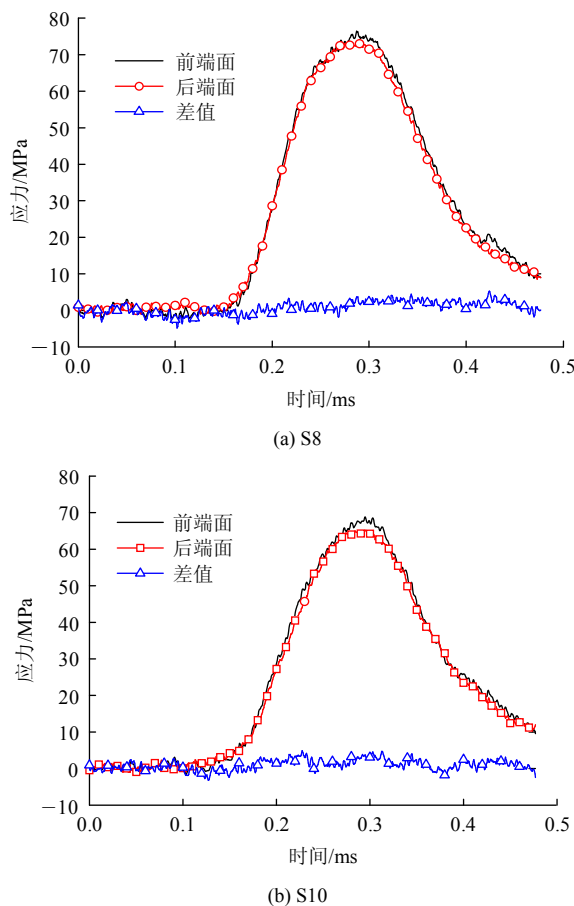


图 6 节理试样两端应力差值

Fig.6 The difference between the stresses of specimen ends

77.0 和 73.4 MPa，二者最大相对差值约为 4.7%；节理试样 S10 前、后端面应力最大值分别为 68.6 和 65.5 MPa，二者最大相对差值约为 4.6%。应力差值说明虽然节理对试样应力均匀性有一定影响，但相对应力差值较小且小于 5%，可以认为实验中试样的应力分布是均匀的。

### 3.2 岩体试样应力 - 应变关系

利用三波法(式(8a)~(8c))处理应力波数据，计算出 11 个试样的应力 - 应变曲线，如图 7 所示。

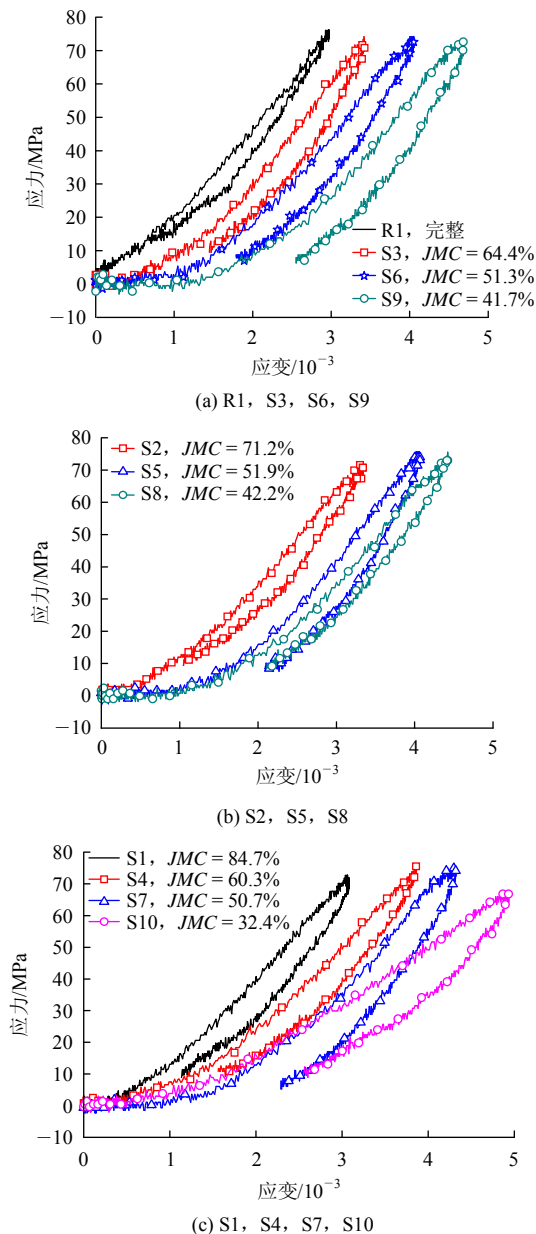


图 7 试样应力 - 应变曲线

Fig.7 The stress-strain curves of the specimens

由图 7 可知，完整岩石试样 R1 应力 - 应变曲线加载段近似为直线，而含节理试样的应力 - 应变曲线在加载过程前半段非线性比较明显，在加载后

半段逐渐向直线过渡，这种情况随节理接触面积减小愈加明显。这说明完整岩石在动态加卸载过程中加载段力学响应基本为线性，而节理试件在加载初期有一个压密闭合的过程，节理对试样加载初期的力学响应影响比较明显。

试样的应力 - 应变曲线在卸载段均为非线性曲线，且卸载段跟加载段不重合。同等应力水平下，与加载段应变相比，卸载段应变大于前者，说明试样在卸载过程中应变恢复滞后，这与岩石的非线性弹性紧密相关，也与应力波在试样中的衰减有密切关系。应力 - 应变曲线加载段和卸载段共同构成滞后回线，包围出一块面积，与图 4 曲线形式类似，包围面积表示试件在压缩变形过程中吸收能量与恢复过程中释放能量之差，即耗散能量。由于测量精度的影响，卸载曲线并未回到零点，但卸载应力已经接近零值，并不妨碍做出定性估计，随节理接触面积减少，试件应力 - 应变曲线滞回环面积增大，即耗散能量增加。

### 3.3 节理接触面积对岩体试样动态弹性模量的影响

从图 7 可知，试件应力 - 应变曲线的峰值应力基本相同，大约为 75 MPa，这说明采用固定发射气压和子弹位置的方式使得加载条件相同是可行的。在峰值应力基本不变的情况下，随着试样的节理接触面积减小，峰值应变越来越大。这说明在同等应力水平下，节理接触面积减小会导致试样整体应变增加，即试样动态弹性模量减小。由节 3.2 可知，节理试样的应力 - 应变曲线前半段非线性较明显，且随着 JMC 的增加非线性段延长。在常用的几种弹性模量中，如切线模量、割线模量、拟线性段模量，割线模量反映了试样的平均弹性模量，包含了非线性段对试样模量带来的影响，因此采用割线模量来反映试样的抵抗变形能力。定义应力 - 应变曲线峰值应力点与坐标零点连线的斜率为试样动态割线模量，计算结果如图 8 所示，随着节理吻合系数(JMC)减少，试样的割线模量单调递减，且递减速度越来越快。通过数据拟合，二者关系可用二次多项式来表示： $E = -11.78 \times JMC^2 + 31.94 \times JMC + 4.94$ ，相关系数为 0.94。

### 3.4 节理接触面积对岩体试样品质因子的影响

根据节 2.3 中利用应力波能量计算品质因子的方法(式(7))计算 11 组试件的品质因子，计算结果如图 9 所示。

对完整花岗岩试样品质因子 2 次测量结果为 36.7 和 37.9，取平均值 37.3 来与其他学者所测量的

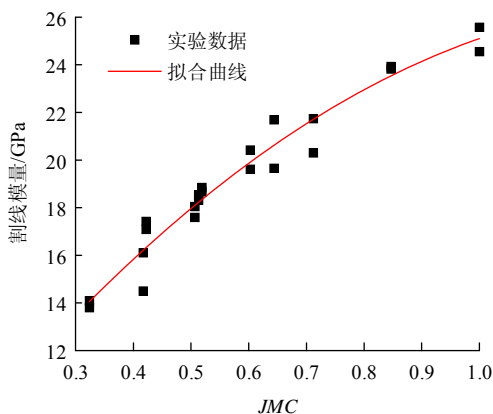


图 8 JMC 不同时试件的割线模量

Fig.8 Secant modulus of specimen with different JMCs

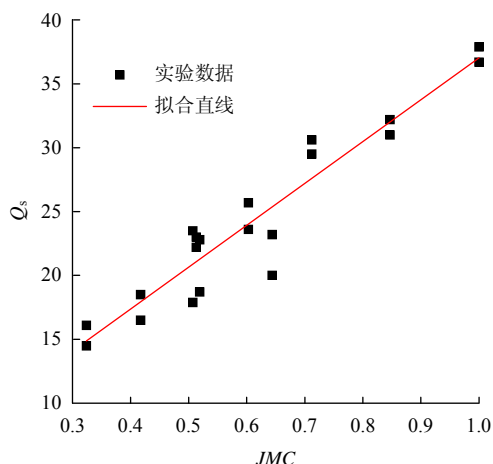


图 9 JMC 不同时试件的品质因子 Qs 值

Fig.9 Quality factor Qs of specimen with different JMCs

结果比较。V. M. Merkulova<sup>[25]</sup>用超声波测量花岗岩的  $Q_s$  值在 50~67 范围，施行觉和叶林<sup>[26]</sup>用超声波能量方法测得郟庐断裂合肥段花岗岩的  $Q_s$  值为 52，与之相比本文测量结果偏小但差别不大，说明本文方法具有合理性。推断造成数值偏小的原因有 2 个，一是试样差别，花岗岩产地和种类不同，其性质也会有一定差别，本次实验所用花岗岩颗粒比较大，波速为 3 368 m/s，与一般花岗岩波速相比较低，说明所用花岗岩力学性质较弱；二是本文 SHPB 实验加载幅值远大于超声波幅值，试样应变在  $10^{-3}$  量级，远大于超声波作用下试样的应变。因此，在考虑上述差别的情况下，可认为本文提出的品质因子实验方法是合理的。

由图 9 可知，数据有一定的离散性，但整体趋势十分清晰，随着节理吻合系数(JMC)减少，试样品质因子也是减小的，二者关系近似为线性，经数据拟合，可用一次多项式表示： $Q_s = 32.78JMC + 4.25$ ，相关系数为 0.89。数据离散性的原因是节理吻合系数(JMC)有一定误差，虽然人工节理接触面

经过了打磨处理，但不是绝对平整的，影响节理的实际接触面积。

在应变幅值较大时，对于干燥岩石在应力加卸载过程中的能量耗散，微裂纹(颗粒)摩擦机制有如下解释<sup>[27-28]</sup>，岩石在加卸载循环过程中的能量损失来自于微裂纹(颗粒)的摩擦耗能，即当岩石变形时，微裂纹(颗粒)之间相互滑动摩擦，将变形能转化为热能散失。根据摩擦机制，加卸载过程中试样的应变幅值与能量耗散程度( $1/Q_s$ )有直接关系，微裂纹(颗粒)之间相对滑动距离与应变幅值成正比，因此当加载过程中的应变幅值变大时，能量耗散程度( $1/Q_s$ )增加。

由节 3.2 和 3.3 可知，在本次 SHPB 实验结果中，加载脉冲应力幅值基本保持不变，试样中的最大应力也基本保持一致，试样的峰值应变随着节理接触面积的减小而减小，即试样的动态割线模量减小。节理 JMC 减小弱化了整个试样的动态割线模量，在同等幅值应力波脉冲作用下，试样最大应变增加，导致试样中微裂纹(颗粒)之间摩擦距离增加，从而导致试样的能量耗散程度( $1/Q_s$ )增加，也即  $Q_s$  值随节理吻合系数(JMC)减小而减小。

将  $Q_s$  值与动态割线模量绘制成图，如图 10 所示。图 10 说明  $Q_s$  值与动态割线模量成正相关关系，可以用线性关系式  $Q_s = 1.85JMC - 11.88$  表示，相关系数为 0.84。二者关系说明利用微裂纹(颗粒)摩擦机制解释 JMC 与  $Q_s$  的关系有合理性。

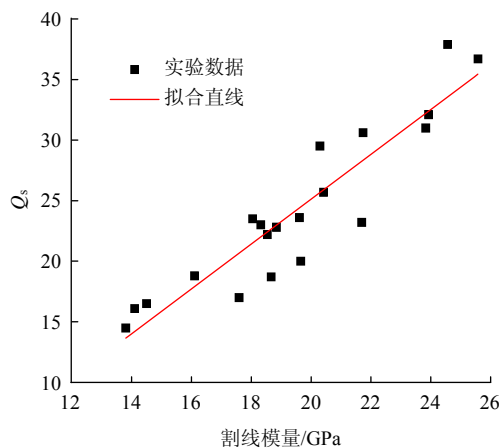


图 10 割线模量与 Qs 值的关系

Fig.10 The relationship between secant modulus and quality factor Qs

### 4 结 论

基于 SHPB 实验和一维应力波理论，理论推导



了用应力波能量计算品质因子  $Q_s$  的方法,并证明了当实验满足一维假定和应力均匀假定时其与应力-应变法计算结果相等。利用 SHPB 实验系统对含不同吻合系数( $JMC$ )节理的岩石试样进行了一系列冲击压缩实验,得到了 11 组应力波数据。使用三波法对应力波数据进行处理,得到了试样的应力-应变曲线,同时通过提出的应力波能量方法,利用应力波数据计算出试样的品质因子,得到了如下结论:

(1) 利用应力波能量方法计算得出的完整花岗岩试样品质因子与其他学者采用超声波方法得出的结果相差不大,在考虑试样以及实验条件的差别后可以认为应力波能量方法是合理的。

(2) 相同加载条件下,节理吻合系数( $JMC$ )越小,试样动态割线模量越小,应力-应变曲线构成的滞回环面积越大,表示能量耗散越多。

(3) 节理吻合系数( $JMC$ )越小,试样的  $Q_s$  值越小,表示能量耗散能力越强。

(4) 利用微裂纹(颗粒)摩擦机制可以解释节理吻合系数( $JMC$ )和品质因子  $Q_s$  之间的关系,节理接触面积越小,试样动弹割线模量越小,同等加载条件下试样应变增加,试样微裂纹(颗粒)之间摩擦滑动距离增大,摩擦耗能增加,导致  $Q_s$  值减小。

应该说明的是,采用在岩石表面切槽来模拟节理是为了可以定量研究  $JMC$  和  $Q_s$  之间的关系,是对节理特征影响品质因子  $Q_s$  的初步研究。天然节理都是有起伏度的粗糙面,粗糙节理特征(如  $JRC$ )对品质因子的影响有待后续研究。

### 参考文献(References):

- [1] MILLER R. An approximate method of analysis of the transmission of elastic waves through a frictional boundary[J]. Journal of Applied Mechanics, 1977, 44(4): 652 - 656.
- [2] PYRAK-NOLTE L J, MYER L R, COOK N G W. Transmission of seismic-waves across single natural fractures[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets, 1990, 95(B6): 8 617 - 8 638.
- [3] ZHAO J, CAI J G. Transmission of elastic p-waves across single fractures with a nonlinear normal deformational behavior[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(1): 3 - 22.
- [4] ZHU J B, PERINO A, ZHAO G F, et al. Seismic response of a single and a set of filled joints of viscoelastic deformational behaviour[J]. Geophysical Journal International, 2011, 186(3): 1 315 - 1 330.
- [5] SCHOENBERG M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(5): 1 516 - 1 521.
- [6] CAI J G. Effects of parallel fractures on wave attenuation in rock masses[Ph. D. Thesis][D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2001.
- [7] ZHAO J, ZHAO X B, CAI J G. A further study of P-wave attenuation across parallel fractures with linear deformational behaviour[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(5): 776 - 788.
- [8] ZHAO X B, ZHAO J, CAI J G. P - wave transmission across fractures with nonlinear deformational behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(11): 1 097 - 1 112.
- [9] PERINO A, ZHU J B, LI J C, et al. Theoretical methods for wave propagation across jointed rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6): 799 - 809.
- [10] LI J C. Wave propagation across non-linear rock joints based on time-domain recursive method[J]. Geophysical Journal International, 2013, 193(2): 970 - 985.
- [11] LI J C, LI H B, MA G W, et al. A time-domain recursive method to analyse transient wave propagation across rock joints[J]. Geophysical Journal International, 2012, 188(2): 631 - 644.
- [12] CHAI S B, LI J C, ZHANG Q B, et al. Stress wave propagation across a rock mass with two non-parallel joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(10): 4 023 - 4 032.
- [13] 陈 颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2009: 64 - 68.(CHEN Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. Rock physics[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009: 64 - 68.(in Chinese))
- [14] BARTON N. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007: 369 - 404.
- [15] LI J C, MA G W, ZHAO J. An equivalent viscoelastic model for rock mass with parallel joints[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2010, 115(B3): 1 923 - 1 941.
- [16] LI J C, LI H B, ZHAO J. An improved equivalent viscoelastic medium method for wave propagation across layered rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,

- 2015, 73: 62 - 69.
- [17] CARCIONE J M, KOSLOFF D, KOSLOFF R. Wave propagation simulation in a linear viscoelastic medium[J]. *Geophysical Journal International*, 1988, 95(3): 597 - 611.
- [18] 王志亮, 陈 强. 岩体品质因子与动态黏弹性本构[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(3): 365 - 369.(WANG Zhiliang, CHEN Qiang. Quality factor and dynamic viscoelastic model of rock mass[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(3): 365 - 369.(in Chinese))
- [19] 郝召兵, 秦静欣, 伍向阳. 地震波品质因子  $Q$  研究进展综述[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(2): 375 - 381.(HAO Zhaobing, QIN Jingxin, WU Xiangyang. Overview of research on the seismic wave quality factor( $Q$ )[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(2): 375 - 381.(in Chinese))
- [20] PYRAK-NOLTA L J. Seismic visibility of fractures[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley: University of California, 1987.
- [21] 鞠 杨, 李业学, 谢和平, 等. 节理岩石的应力波动与能量耗散[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2 426 - 2 434.(JU Yang, LI Yexue, XIE Heping, et al. Stress wave propagation and energy dissipation in jointed rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2 426 - 2 434.(in Chinese))
- [22] 李业学, 彭 琦, 朱建波, 等. 分形截距对应力波能耗影响规律的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增 2): 3 982 - 3 988.(LI Yexue, PENG Qi, ZHU Jianbo, et al. Experimental study of influential rule of fractal intercept on energy dissipation of stress wave[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(Supp.2): 3 982 - 3 988.(in Chinese))
- [23] 宋 力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(4): 368 - 373.(SONG Li, HU Shisheng. Two wave and three wave method in SHPB data processing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 368 - 373.(in Chinese))
- [24] 宫凤强, 李夕兵, 饶秋华, 等. 岩石 SHPB 试验中确定试样尺寸的参考方法[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(17): 24 - 28.(GONG Fengqiang, LI Xibing, RAO Qiuhua, et al. Reference method for determining sample size in SHPB tests of rock materials[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(17): 24 - 28.(in Chinese))
- [25] MERKULOVA V M. Absorption of ultrasonic waves in rocks in the 10-160 kilohertz range[J]. *Bull (Izv) Acad sci USSR: Earth Science*, 1968, (6): 20 - 25.
- [26] 施行觉, 叶 林. 用能量法测定柱状样品的衰减  $Q$  值[J]. *中国地震*, 1999, 15(4): 304 - 309.(SHI Xingjue, YE Ling. Measurement of attenuation  $Q$  value of cylindrical sample by using wave energy[J]. *Earthquake Research in China*, 1999, 15(4): 304 - 309.(in Chinese))
- [27] 温 丹, 施行觉. 结合内时理论研究岩石衰减与应变振幅的关系[J]. *实验力学*, 2004, 19(1): 19 - 23.(WEN Dan, SHI Xingjue. A study on the relationship between attenuation and strain amplitude in rock using endochronic theory[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2004, 19(1): 19 - 23.(in Chinese))
- [28] WINKLER K, NUR A, GLADWIN M. Friction and seismic attenuation in rocks[J]. *Nature*, 1979, 277(5697): 528 - 531.