

DOI: 10.11779/CJGE201707021

# 高应变率下预制单节理岩石 SHPB 剪裂试验 能量耗散分析

李 森, 乔 兰, 李庆文

(北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 应用 SHPB 试验装置研究预制单节理岩石的能量耗散关系。使用 SHPB 试验系统, 对高径比为 0.5 的完整花岗岩试样及预制单节理花岗岩试样进行高应变率下的冲击剪裂试验。在相同驱动气压下, 改变加载方向与节理间的夹角, 完成高应变率相同入射能下的冲击剪裂试验。对 SHPB 系统中的入射能、反射能、透射能及试样吸收能的时程变化规律进行了分析; 从能量角度出发, 分析冲击荷载作用下单节理岩石的能量耗散规律及其各向异性特征。结果表明: 高应变率下, 完整花岗岩试样在冲击剪裂试验中的吸收能随平均应变率增加而增加, 表现出显著的应变率相关性; 预制单节理岩石与加载方向之间夹角对破坏模式的影响明显, 节理试样产生 3 种破坏模式: ①穿越节理面的剪裂破坏; ②沿节理岩石层面的滑移破坏; ③剪裂与滑移破坏共同作用下的破坏。在入射能基本相同, 入射时间较长时节理岩石试样吸收能较入射时间较短时的吸收能大。动态剪裂试验中, 节理试样的吸收能随节理角度变化 ( $0^\circ \sim 90^\circ$ ) 近似呈 U 型。研究成果可为节理岩石动态力学性能研究提供参考。

**关键词:** SHPB; 冲击剪裂试验; 单节理岩石; 能量耗散; 各向异性

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)07-1336-08

作者简介: 李 森(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石动力学方面的研究。E-mail: lomotoy@163.com.

## Energy dissipation of rock specimens under high strain rate with single joint in SHPB tensile tests

LI Miao, QIAO Lan, LI Qing-wen

(School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The energy dissipation in single jointed rocks under high strain rate is investigated by the split-Hopkinson pressure bar (SHPB) technique. The dynamic split tensile tests on both intact granite specimens and man-made single jointed granite specimens with a thickness-diameter ratio of 0.5 are carried out. The compressive analysis on the temporal responses of incident energy, reflection energy, transmission energy and absorbed energy stored in the rock specimens is performed. The anisotropy characteristics of energy dissipation of the jointed rock are discussed based on the analysis of energy distribution. The results show that the absorbed energy of rock specimens in SHPB tests increases with the increment of strain rate. The fracture modes of jointed granite with different angles are different from each other. There are three kinds of fracture modes: sliding failure along the joint, combination of splitting failure and slide failure, and splitting failure. When the incident energy stays constant, the absorbed energy with shorter incident time is less than that with longer incident time. The distribution of absorbed energy corresponding to the joint angle within range of  $[0, 90^\circ]$  is found to be quite similar with the shape of letter "U", which further proves the anisotropic characteristics of the single jointed rock in the dynamic split tensile tests. The research results can provide references for the dynamic tensile mechanical properties of jointed rock.

**Key words:** SHPB; dynamic split tensile test; single jointed rock; energy dissipation; anisotropy

## 0 引言

岩体含有不同性质的结构面, 常表现为节理、层理、片理等。由于现场原位试验的困难性, 进行必要的实验室岩体模拟试验, 获得节理岩体的力学参数十分重要。隧道及地下工程等岩体的掘进开采多采用钻

爆法施工, 研究节理岩石在冲击荷载作用下的破坏形态及波形传播特性, 是爆破作业中亟待解决的问题。

众多学者进行了大量节理岩体的静力学试验, 在

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474016, 51674013)

收稿日期: 2016-10-10

节理岩体强度理论、破坏机理等方面都作了许多有益的工作<sup>[1-3]</sup>。然而, 对节理岩体在冲击荷载条件下的研究还十分匮乏。

李地元等<sup>[4]</sup>基于 SHPB 试验, 对具有较弱层理效应的层状砂岩进行了动态拉压力学特性研究, 并研究了其吸能特性。赵毅鑫等<sup>[5]</sup>对不同应变率、不同层理倾角下的煤样 SHPB 试验结果进行分析, 发现倾角对煤样的动态拉伸特性及破坏模式具有重要影响。刘红岩等<sup>[6-7]</sup>、邓正定等<sup>[8]</sup>采用相似材料模型试验对不同节理状态下的岩体动态强度及破坏模式进行了 SHPB 试验研究, 节理岩体动态破坏模式及强度与节理构造形态密切相关, 在此基础上提出了节理岩体单轴压缩动态损伤本构模型。

关于节理岩体的动态力学特性研究分为两方面: 一是不连续岩体, 一是不同材料连续层状岩体。研究主要集中于节理岩体内应力波传播特性研究<sup>[9-11]</sup>。围绕节理类型、节理密度、节理自身力学特性以及不同波形特性的应力波对应力波传播规律及能量传递规律的影响分析。

翻阅相关资料<sup>[12]</sup>, 并未对节理岩体破坏情况下, 节理岩体的能量传播规律进行分析。

本文利用 SHPB 试验系统, 对节理本身进行控制, 制备具有相同节理密度(单节理)相同力学特性(同种填充材料), 对预制单节理岩样进行动态剪裂拉伸试验。在分析研究节理岩样破坏特性的基础上, 从能量的观点出发, 分析在相同入射能不同节理角度下, 动态剪裂拉伸试验过程中的能量耗散规律, 得到了一些有益的结论。

## 1 岩石冲击试验及结果

### 1.1 SHPB 系统原理

SHPB 系统简图如图 1 所示。为减小弥散效应, 拉长加载波的上升沿和滤除高频波对试验造成的影响, 在撞击杆与入射杆中间加入 1 cm×1 cm 黄铜片实现波形整形。通过入射杆和透射杆上的应变片, SDY2107B 型超动态应变仪超动态应变仪和计算机, 采集超动态应变波数据, 获得入射、反射和透射应变波。在 SHPB 试验中, 撞击杆以一定速度撞击输入杆, 由输入杆上的应变片测得在输入杆上产生的入射脉冲  $\varepsilon_i$ 。当输入脉冲到达岩石试样时, 岩样在该应力脉冲作用下发生变形, 并在输入杆中产生一个往回的反射脉冲  $\varepsilon_r$ , 由输入杆上的应变片测得, 在输出杆内产生一个向前的透射脉冲  $\varepsilon_t$ , 由输出杆上的应变片测得。

冲击剪裂试验的方法借鉴了静载巴西圆盘试验<sup>[13]</sup>, 利用 SHPB 装置进行圆盘冲击剪裂试验时, 加载方式

如图 1 所示<sup>[14]</sup>。将试件两端应力的平均值视为试件内的应力<sup>[5]</sup>。三波公式变为

$$\sigma_s(t) = \frac{AE}{2\pi Dh} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)], \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{c_0}{D} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)], \quad (2)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{c_0}{D} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt. \quad (3)$$

应用三波公式可以导出试样在对应某一加载率下的应力时间关系曲线。

式中,  $A$  为入射杆、透射杆横截面面积,  $E$  为入射杆及透射杆材料弹模,  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_r$  和  $\varepsilon_t$  为输入杆和输出杆上测得的入射波、反射波和透射波信号;  $c_0$  为弹性压缩波的波速;  $\varepsilon_i(t)$ ,  $\varepsilon_r(t)$ ,  $\varepsilon_t(t)$  分别为试件中的入射、反射和透射应变脉冲;  $D$ ,  $h$  为试样的直径、厚度。

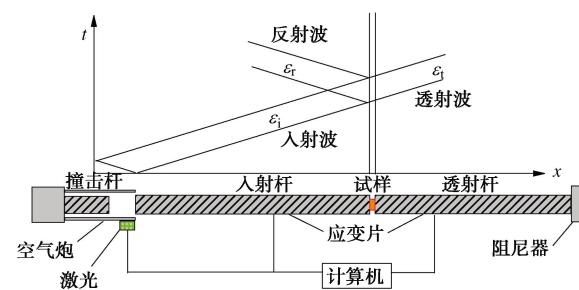


图 1 SHPB 冲击剪裂加载示意图

Fig. 1 Schematic of SHPB

### 1.2 SHPB 动态剪裂试验试样制备及试验设计

试验岩样取自西鞍山铁矿地区, 取样孔为 ZKB8, 岩芯直径 70 mm, 岩性为花岗岩, 埋深为 800~1000 m。部分岩芯经过钻取、切削、打磨等步骤加工为直径 50 mm, 高度 25 mm 的完整岩样(图 2(a))。为保证制取节理试样的一致性, 首先将岩芯切割为对称的两半, 再使用调制的石膏将两半圆盘胶结黏合, 经过钻取、切削、打磨等步骤加工为模拟节理岩体的试验岩样(图 2(b))。岩样圆柱面表面无大于 0.025 mm 划痕, 端面平整度小于 0.25 mm 和最大允许倾角小于 0.25°。

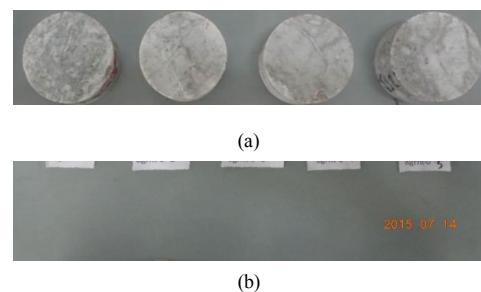


图 2 完整岩样及预制节理岩样

Fig. 2 Intact and jointed rock specimens

制作完成完整试样 18 块, 预制单节理试样 30 块。完整岩样分为 6 组, 每组 3 块。分别进行气压为 0.1, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45 MPa 下的 SHPB 巴西圆盘试验。在完整岩样冲击试验基础上确定节理岩样均在 0.2 MPa 气压下进行 SHPB 冲击劈裂试验, 加载示意如图 3 所示。试验中, 岩样节理与加载方向夹角  $\theta$  为  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 。

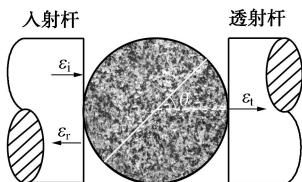


图 3 节理岩样 SHPB 冲击劈裂加载示意图

Fig. 3 Schematic of disk specimen for Brazil tests in a SHPB system

需要指出的是: 节理的初识刚度是影响能量传递的重要因素, 随着节理的初始刚度的增加, 节理的透射能量会增加<sup>[15]</sup>。笔者选用石膏作为填充物, 研究含充填物的节理岩石中能量传递的规律研究。在控制岩样石膏体厚度相同且很小, 试样的初始刚度相同, 可作为单一变量研究问题。在研究含充填单节理的角度对能量吸收的影响时, 未将节理吸收能单独考虑。

## 2 试验过程中能量分析

SHPB 试验基于一维弹性应力波理论及均匀性假设, 应力波  $\sigma(t)$  所携带的能量由式子(1)~(3)得到<sup>[16-17]</sup>从开始加载到卸载过程中入射波、反射波和透射波所携带的能量分别为  $W_i$ ,  $W_r$ ,  $W_t$ , 试样破碎能耗为  $W_a$ , 试样的吸收能为  $W_{aa}$ 。

由于 SHPB 试验为动力学试验, 所以岩石试件不可避免的产生动能。岩石破坏后, 碎块飞出, 伴随着动能的转化。根据 Zhang 等<sup>[18]</sup>的研究, 关于岩石试样 SHPB 试验碎块动能的花岗岩试样动态破坏过程的能量分析研究结果, 动能  $W_k$  占吸收能  $W_a$  比例:

$$\frac{W_k}{W_a} = \frac{(0.69v_0 + 0.22)}{100} \quad (4)$$

计算得到的值大部分在 10% 以内, 试件的动能在试件吸收的能量中只占很小一部分。在高速冲击荷载作用下, 断裂损伤能为岩石动态破坏过程中吸收能量的主要部分。因此冲击气压较大时, 可以忽略试样冲击后的动能<sup>[18]</sup>, 计算试样的破碎能耗  $W_a = W_{aa}$ 。

$$W = \frac{Ac}{E} \int_0^t \sigma^2(t) dt = AEc \int_0^t \varepsilon^2(t) dt \quad (5)$$

$$W_i = AEc \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt \quad (6)$$

$$W_r = AEc \int_0^t \varepsilon_r^2(t) dt \quad , \quad (7)$$

$$W_t = AEc \int_0^t \varepsilon_t^2(t) dt \quad . \quad (8)$$

式中,  $A$  为输入杆与输出杆的横截面面积,  $E$  为输入杆与输出杆的弹性模量,  $c$  为应力波在杆件中的传播速度。

由于弹性应力波动过程为一个等温过程, 与外部没有热交换, 且本文试验条件下试件两端部与压杆的摩擦作用可忽略<sup>[19]</sup>, 因此, 根据热力学第一定律, 岩样应力波动过程中能量满足:

$$W_a = W_i - W_r - W_t \quad . \quad (9)$$

## 3 试验结果与分析

### 3.1 完整岩样试验结果与分析

由 SHPB 冲击劈裂试验获得的时间波形曲线(图 4)及能量耗散计算公式, 可以得到完整试样试验中的入射能、反射能和透射能及试样吸收能。由式(5)~(9)计算得到典型的能量时间曲线如图 5 所示。

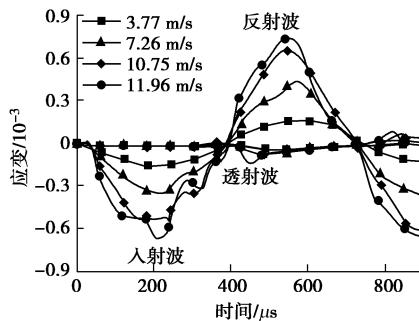


图 4 动态冲击应变时程曲线

Fig. 4 Strain waveforms of incident and transmitted bars

从图 5 可以看出, 在完整岩石试样 SHPB 冲击劈裂试验开始阶段, 入射能、反射能和吸收能均随时间增加而增加, 到达某一时刻后能量均几乎保持恒定; 透射能随时间增加变化不明显, 但仍呈缓慢上升趋势。由于试件的圆柱面与入射杆和反射杆的接触面很小, 反射能相较于透射能较大。当入射能到达入射杆与试件接触端面时, 大部分能量反射回入射杆; 而经过圆盘试样的能量, 大部分被试件吸收, 只有很小一部分传递到透射杆中形成透射能。

通过控制加载气压来获得不同加载率。取完整岩石试样冲击劈裂试验破坏的最低气压 (0.20 MPa) 为预制单节理岩石试样冲击试验的统一气压。

定义吸收能系数 (Energy absorption coefficient) 为  $\eta$ ,

$$\eta = W_a / W_i \quad . \quad (10)$$

式中,  $W_a$ ,  $W_i$  分别为岩石破碎耗能和入射能。计算获



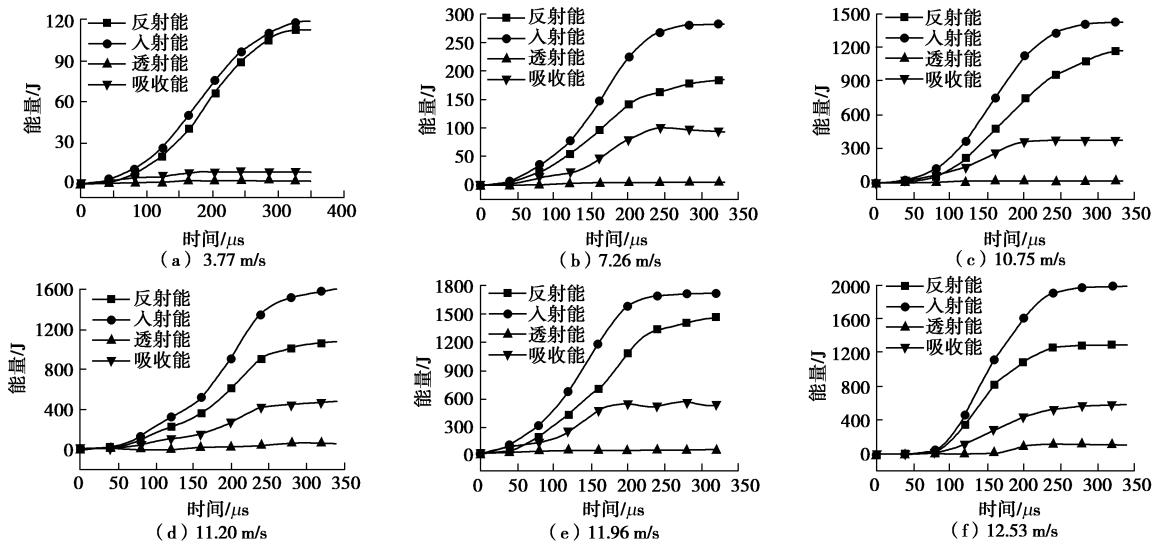


图 5 完整岩石不同冲击速度下的能量时程曲线

Fig. 5 Energy-time curves of sandstone specimens in SHPB tensile tests with different loading rates

得完整岩石在不同加载速率下的吸收能系数如表 1 所示。

不同加载气压下的完整试样试验表明(表 1): 试件的入射能及吸收能随加载气压的增大而增大; 试件的吸能系数呈现先增大再减小并趋于平稳的趋势。

表 1 不同冲击速度完整岩石入射能吸收能关系表<sup>[20]</sup>Table 1 Relationship between incident and absorbed energies under different loading rates<sup>[20]</sup>

| 加载气压/MPa | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.35 | 0.4  | 0.45 |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| 入射能/J    | 113  | 283  | 1401 | 1602 | 1794 | 1994 |
| 吸收能/J    | 9    | 101  | 405  | 477  | 527  | 587  |
| $\eta$   | 0.08 | 0.36 | 0.28 | 0.30 | 0.29 | 0.29 |

分析完整试样宏观破坏裂纹及主破裂面的类型与应变率之间的关系。如图 5 所示, 完整试样随应变率的增加破坏模式并未改变, 仍为劈裂破坏。随着加载速率的增加, 试样与输入杆、输出杆接触部位的破裂程度也随之增加, 岩石试样在冲击荷载下破坏更加破碎。随着加载速率的增加, 圆盘试样仍满足中心开裂, 然而由于加载速率增大, 试样与杆件接触部位产生部分压裂破坏, 且破坏范围随加载速率的增大而增大。

随加载速率的增大, 观测到试验中试样破坏范围越大(图 6), 表明岩石破坏所需的耗散能量增大; 随着加载速率的不断升高, 入射能增大, 而透射能及反射能也随之增大, 以此确定的吸能系数并不一定随加载速率的增高而增大。

表 1 显示, 在加载气压为 0.3~0.45 MPa 范围时, 能量吸收率稳定在 0.28~0.3 之间。吸能系数呈现先增大后减小并在一定范围内保持基本恒定的趋势。



图 6 完整岩石破坏模式

Fig. 6 Failure modes of intact rock samples

笔者认为, 在极低加载速率下, 岩石试件不发生破坏, 此时试件吸能系数趋近于 0, 随着加载速率的增大, 岩石产生破坏, 吸能系数逐渐增大; 当入射能增大到一定程度后, 试件的吸收能增加比例小于透射能与反射能之和, 试件吸能系数逐渐减小; 吸能系数在一定加载速率范围内几乎保持恒定, 这是由于该加载速率范围内吸收能增加比例与入射能增加比例几乎相同。当加载速率进一步提高时, 温度等相关影响因素作用变大, 相关原理需要进一步探究。

### 3.2 节理岩样试验结果与分析

花岗岩结构致密, 试验过程中, 采用高速摄像仪进行了连续拍照记录, 记录了完整岩样及节理试样的破坏模式(图 7)。试验获得的各节理角度下岩样的破坏情况如图 8 所示。将高速摄影拍摄图片与图 8 中预制节理岩石的破坏模式对比发现: 尽管岩体受到冲击气压几乎相等, 但由于夹角  $\theta$  不一样, 其破坏的特征, 破坏的方式也不相同。

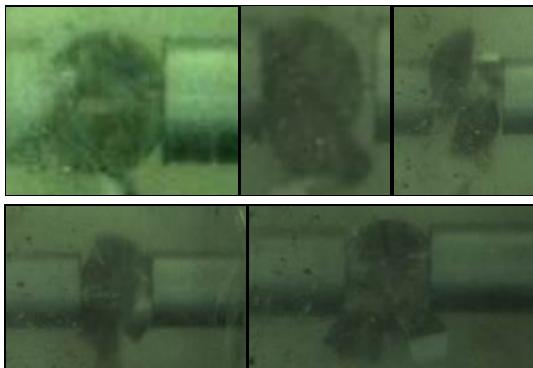


图 7 高速摄影下节理岩石破坏模式

Fig. 7 Failures mode of single jointed rock samples with high speed camera

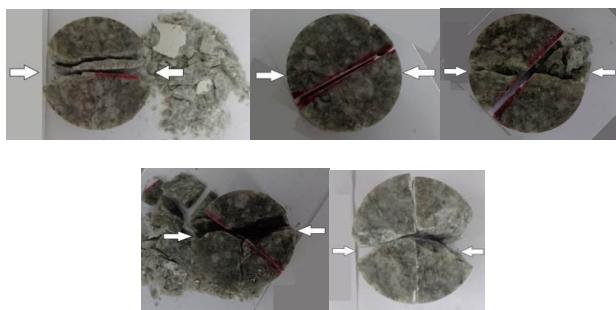
图 8 节理角度  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  岩石破坏模式

Fig. 8 Failure modes of single jointed rock samples with different joint angles

节理岩石的破坏形式与夹角  $\theta$  有关(图 7, 8), 节理角度为  $0^\circ$  时, 法向(铅直向)为拉应力, 试件的破坏最有可能呈现沿节理法向拉裂, 岩石试样的强度主要取决于节理的黏结强度, 预制节理拉伸强度很

小, 沿节理的法向拉裂破坏的吸收能较小。由图 8 可知, 节理角度为  $0^\circ$  时, 试样同时产生平行于节理的劈裂破坏, 使得试样的能量吸收率变大(表 2)。在冲击破坏过程中, 花岗岩材料特性也发挥了一定作用, 岩样的力学特性由节理及花岗岩材料本身的特性共同决定。节理岩石在夹角为  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  时, 节理岩石的力学特性由花岗岩本身材料特性及黏接面特性共同决定, 表现为劈裂破坏与顺节理面剪切破坏相组合的模式; 节理角度为  $30^\circ$  时, 节理面的破坏极其光滑, 沿节理面错开, 未产生劈裂破坏形态, 节理岩石试样力学特性由石膏与岩石之间的连接剪切破坏决定, 岩石表现为沿节理面的滑动破坏。节理角度为  $90^\circ$  时, 材料的力学特性仅由花岗岩材料本身的特性决定, 破坏表现为劈裂破坏, 与完整岩样破坏模式相似。

表 2 节理角度与能量关系表

Table 2 Relationship between joint angle and energy

| 节理角度/( $^\circ$ ) | 完整   | 0    | 30   | 45   | 60   | 90   |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| 入射能/J             | 283  | 299  | 289  | 282  | 295  | 294  |
| 吸收能/J             | 101  | 79   | 51   | 59   | 78   | 102  |
| $\eta$            | 0.36 | 0.26 | 0.18 | 0.21 | 0.26 | 0.35 |

节理角度为  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  时, 试样与杆件接触的部位产生了压裂破坏, 破坏范围较大, 满足中心起裂的巴西圆盘试验假设; 岩石在夹角为  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  时, 试样与杆件接触的部位几乎未产生压裂破坏, 不满足中心起裂的巴西圆盘试验假设。

根据式(5)~(9)及试验获得的应变时程曲线, 计算获得各个节理角度下, 岩石试样的 SHPB 冲击劈裂试验能量变化时程曲线如图 9 所示。

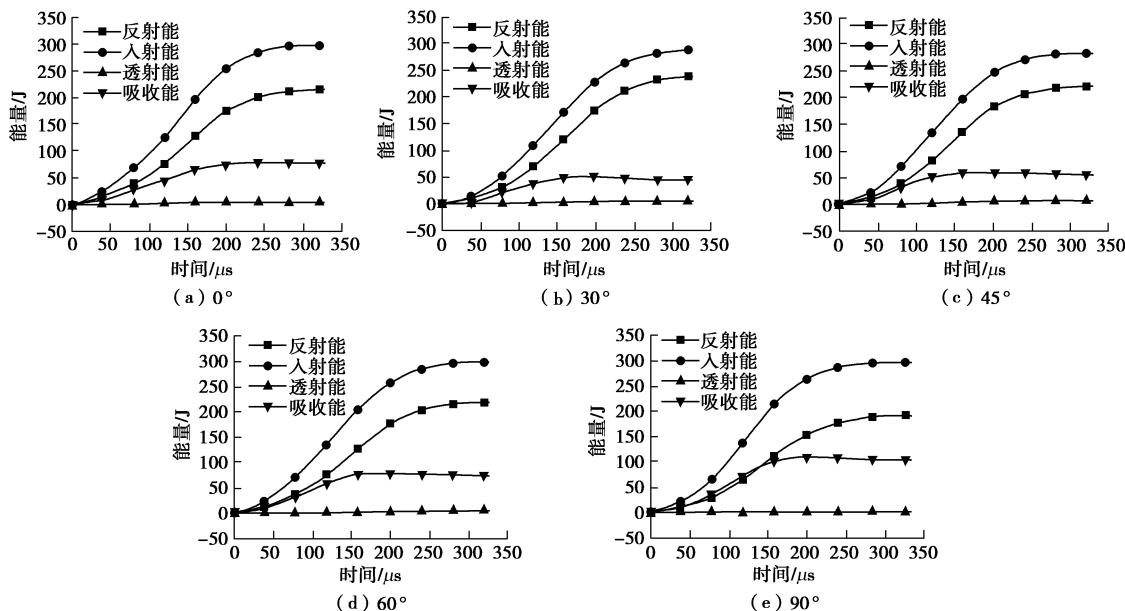


图 9 不同节理角度下能量时程曲线

Fig. 9 Energy-time curves of jointed specimens with different angles in SHPB tensile tests (striker bar of 400 mm)

在开始阶段, 入射能随时间逐渐升高, 能量随时间增长较慢, 到达一定时间 ( $75 \mu\text{s}$ ) 后, 入射能急剧上升, 入射能达到一定量值后, 保持平稳; 反射能与入射能有相似的变化规律; 透射能在试验中随时间变化不大, 基本保持平稳。计算获得的吸收能, 从 0 时刻开始即平稳增长, 最终达到一定量值后保持恒定。

由式 (10) 计算得到的各节理角度下的吸收能系数如表 2 所示。

结合岩石试样的破坏形态分析, 表 2 说明: 岩石在节理角度为  $0^\circ$  时能量吸收率较大, 但小于完整岩石的能量吸收率, 此时, 试样既产生节理处的拉裂破坏又产生非节理处的剪裂破坏, 由于节理强度较弱, 拉裂破坏产生的能量消耗较小, 沿节理的法向拉裂破坏的吸收能较完整试样能量吸收率较小; 在节理角度为  $30^\circ$  时能量吸收率最小, 由于此时产生的是沿节理面的剪切滑移破坏, 节理强度较弱, 破坏产生的能量消耗较小, 此时试样能量吸收率最小; 在节理角度为  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  时能量吸收率居中, 此时试样既产生沿节理的滑移破坏又产生部分剪裂破坏, 由于节理强度较小, 剪裂破坏不充分, 该节理角度下, 能量吸收率居中; 在节理角度为  $90^\circ$  时能量吸收率最大, 此时岩石剪裂破坏, 与完整岩石试样破坏类型相似, 因此该节理角度下岩样的能量吸收率接近完整岩石的能量吸收率。能量吸收率随节理角度的变化曲线近似呈 U型(图 12)。

为研究波形中入射时间对能量吸收的影响。增加一组在输入能量相同情况下, 不同入射时间对能量吸收影响试验。

根据 SHPB 系统原理, 当子弹被空气炮加速后以一定的速度撞击入射杆后, 在子弹和入射杆的接触面上产生一维压缩应力波以相同的速度向两边传播。一维压缩应力波传播至子弹自由面时反射成为拉伸应力波, 当此拉伸应力波传播至子弹和入射杆的接触面时, 子弹与入射杆分离, 与此同时, 入射杆中即产生一个波长为 2 倍子弹长度的矩形压缩脉冲(入射波), 此压缩脉冲的大小与子弹的速度成正比, 当子弹的长度和撞击速度变化时, 入射杆中便会产生不同波长和大小的矩形压缩脉冲。为实现不同入射时间相同入射能量的输入条件, 可通过改变子弹长度实现入射时间的减小。

为实现不同入射时间相同入射能量的输入条件, 通过增大或减小子弹长度实现入射时间的增大或减小(图 10)。

补充试验中, 将子弹长度由 400 mm 变为 250 mm。

对完整岩石试验表明, 子弹长度 250 mm, 加载气压为 0.25 MPa 时, 输入能量约为 295 J。在此情况下研究不同入射时间下, 对能量吸收规律的影响(节理岩石试样在不同入射时间下破坏模式相同, 在此不作赘述)。

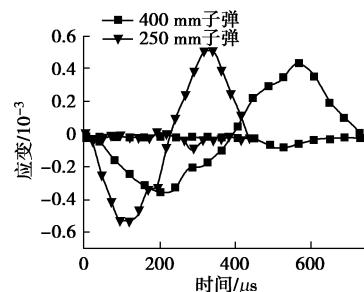


图 10 不同子弹长度动态冲击应变时程曲线示意图

Fig. 10 Strain waveforms of incident and transmitted bars with different lengths of striker bar

根据式 (5) ~ (9) 及试验获得的应变时程曲线, 子弹长度为 250 mm 时, 计算获得各个节理角度下, 岩石试样的 SHPB 冲击剪裂试验能量变化时程曲线如图 11 所示。

与子弹长度为 400 mm 相比, 能量时程变化曲线趋势相近。在开始阶段, 入射能随时间逐渐升高, 能量随时间增长较慢, 到达一定时间 ( $45 \mu\text{s}$ ) 后, 入射能急剧上升, 入射能达到一定量值后, 保持平稳; 反射能与入射能有相似的变化规律; 透射能在试验中随时间变化不大, 基本保持平稳。计算获得的吸收能, 从 0 时刻开始平稳增长, 最终达到一定量值后同样保持恒定。

子弹长度为 250 mm 时, 计算获得各节理角度下的吸收能系数如表 3 所示。由表 3、图 12 可知, 冲击荷载作用下, 节理岩石的能量吸收率随节理角度变化而改变。能量吸收率随节理角度的变化曲线与子弹长度为 400 mm 时相似, 近似呈 U型。

表 3 子弹长度 250 mm 时节理角度及能量关系表

Table 3 Relationship between joint angle and energy (striker bar of 250 mm)

| 节理角度/(°) | 完整   | 0    | 30   | 45   | 60   | 90   |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| 入射能/J    | 289  | 312  | 297  | 295  | 302  | 277  |
| 吸收能/J    | 91   | 78   | 51   | 54   | 72   | 80   |
| $\eta$   | 0.31 | 0.25 | 0.16 | 0.18 | 0.24 | 0.29 |

由于加载时间变小, 岩石试样变形破坏的时间变短, 试样没有充分的时间产生破坏, 破坏程度相对变小, 试样吸收能相对较小。即当入射时间变小时, 试样的能量吸收率相对变小。

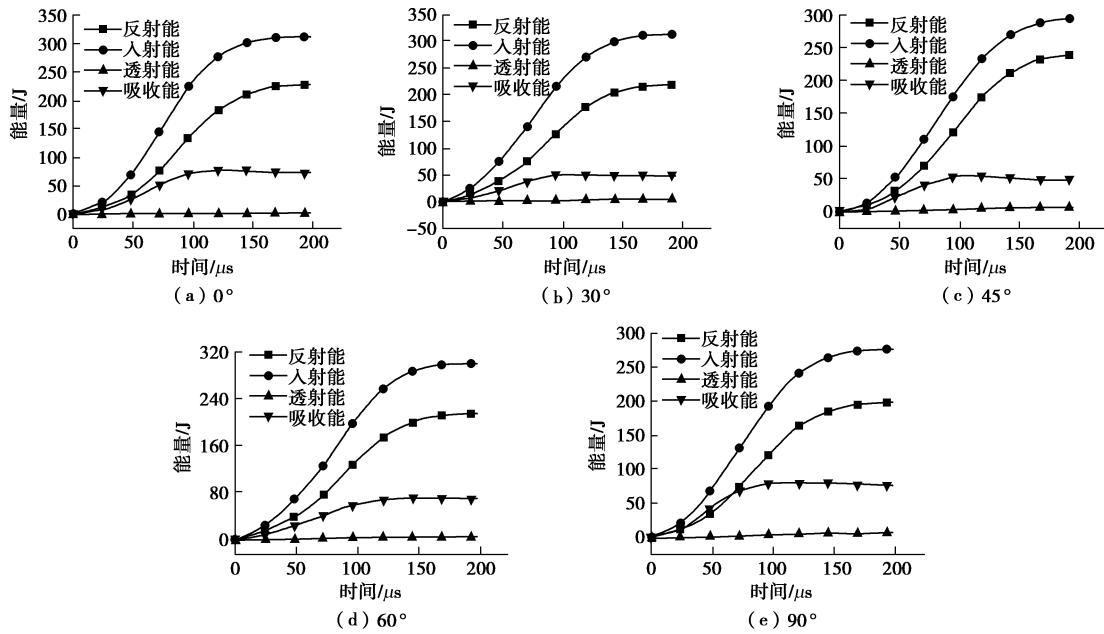


图 11 子弹长 250 mm 时不同节理角度下能量时程曲线

Fig. 11 Energy-time curves of jointed specimens with different angles in SHPB tensile tests (striker bar of 250 mm)

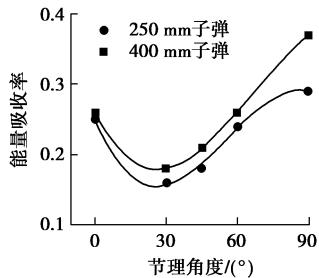


图 12 不同节理角度下能量吸收率变化曲线

Fig. 12 Energy absorption coefficients with different joint angles

## 4 结论与建议

通过对完整花岗岩试验及预制单节理花岗岩试样的 SHPB 冲击劈裂试验, 分析了节理岩样在高应变率冲击荷载作用下的破坏模式, 从能量角度出发, 通过分析完整岩石试样及单节理岩石试样的试验数据, 得到以下结论:

(1) 节理岩石在高应变率冲击荷载作用下, 节理面倾角的改变使预制单节理试样主要产生 3 种类型的破坏模式: ①穿越节理面的劈裂破坏 ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ); ②沿节理岩石层面的滑移破坏 ( $30^\circ$ ); ③劈裂与滑移破坏共同作用下的破坏 ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ )。预制节理岩石倾角对破坏模式的影响非常明显。

(2) 节理岩石在高应变率冲击荷载作用下, 当入射能基本相同入射时间相同的时, 节理岩石的吸收能随节理角度的增加 ( $0^\circ \sim 90^\circ$ ) 而改变, 表现出单节理岩石的各向异性。单节理岩石的吸收能系数随节理角度的增加而呈 U 型变化。

(3) 节理岩石在高应变率冲击荷载作用下, 入射能基本相同的情况下, 入射时间较大时岩石试样吸收能较入射时间较小时节理岩石的吸收能大。随节理角度的增加 ( $0^\circ \sim 90^\circ$ ), 不同入射时间下, 单节理岩石的吸收能系数随节理角度的增加仍呈 U 型变化。

值得指出的是, 由于本文使用的是预制充填单节理岩石试样研究节理倾角对岩石破坏模式及波形特性进行分析。未对不同节理类型岩体及自然条件下具有层状结构的岩体进行研究, 使得研究结果有一定的局限性。在后续试验及研究中需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rock[J]. Geological Magazine, 1960, 97(1): 65 - 72.
- [2] WOROTNICKI G. CSIRO triaxial stress measurement cell[C]// Rock Testing and Site Characterization. Oxford, 1993: 329 - 334.
- [3] TALESNICK M L, RINGEL M. Completing the hollow cylinder methodology for testing of transversely isotropic rocks: torsion testing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(5): 627 - 639.
- [4] 李地元, 邱加冬, 李夕兵. 冲击载荷作用下层状砂岩动态拉压力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2091 - 2097. (LI Di-yuan, QIU Jia-dong, LI Xi-bing. Experimental study on dynamic tensile and compressive properties of bedding sandstone under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,

- 34(10): 2091 – 2097. (in Chinese))
- [5] 赵毅鑫, 肖汉, 黄亚琼. 霍普金森杆冲击加载煤样巴西圆盘剪裂试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 286 – 291. (ZHAO Yi-xin, XIAO Han, HUANG Ya-qiong. Dynamic split tensile test of Brazilian disc of coal with split Hopkinson pressure bar loading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 286 – 291. (in Chinese))
- [6] 刘红岩, 黄好诗, 李楷兵, 等. 预制节理岩体试件强度及破坏模式的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 34(5): 1368 – 1374. (LIU Hong-yan, HUANG Yu-shi, LI Kai-bing et al. Test study of strength and failure mode of pre-existing jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 34(5): 1368 – 1374. (in Chinese))
- [7] 刘红岩, 王新生, 张力民, 等. 非贯通节理岩体单轴压缩动态损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 426 – 436. (LIU Hong-yan, WANG Xin-sheng, ZHENG Li-min et al. A dynamic damage constitutive model for rock mass with non-persistent joints under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 426 – 436. (in Chinese))
- [8] 邓正定, 王桢, 刘红岩. 基于复合损伤的节理岩体动态本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1368 – 1374. (DENG Zheng-ding, WANG Zhen, LIU Hong-yan. Dynamic constitutive model of jointed rock mass based on the theory of composite damage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1368 – 1374. (in Chinese))
- [9] 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.
- [10] ZHAO G F. Modeling stress wave propagation in rocks by distinct lattice spring model[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(4): 348 – 355.
- [11] 饶宇, 赵根, 吴新霞, 等. 应力波入射黏弹性节理的传播特性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2237 – 2245. (RAO Yu, ZHAO Gen, WU Xin-xia, et al. Propagation characteristics of stress waves across viscoelastic joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2237 – 2245. (in Chinese))
- [12] WU B B, WEI Y, XIA K W. An experimental study of dynamic tensile failure of rocks subjected to hydrostatic confinement[J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2016, 49(10): 3855 – 3864.
- [13] 宫凤强, 李夕兵, ZHAO J. 巴西圆盘剪裂试验中拉伸模量的解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 881 – 891. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, ZHAO J. Analytical algorithm to estimate tensile modulus in brazilian disk splitting tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 881 – 891. (in Chinese))
- [14] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M], 北京: 科学出版社, 2014. (LI Xi-bing. Rock dynamics fundamentals and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [15] 刘婷婷, 李建春, 李海波, 等. 应力波通过非线性平行节理的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1610 – 1617. (LIU Ting-ting, LI Jian-chun, LI Hai-bo, et al. Tao Jun-lin. Energy analysis of stress wave propagation across parallel nonlinear joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1610 – 1617. (in Chinese))
- [16] KOLSKY. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society (Section B), 1949, 62(11): 676 – 700.
- [17] LUNBERG B. A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(6): 187 – 197.
- [18] ZHANG Z X, KOU S Q, JIANG L G, et al. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(5): 745 – 762.
- [19] 陶俊林. SHPB 试验技术若干问题研究[D]. 锦阳: 中国工程物理研究院, 2005. (TAO Jun-lin. An investigation on some issues of SHPB technique[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics 2005. (in Chinese))
- [20] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2603 – 2608. (XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2603 – 2608. (in Chinese))