

# 花岗岩在单轴冲击压缩荷载下的动态断裂分析

翟越<sup>1</sup>, 马国伟<sup>2</sup>, 赵均海<sup>1</sup>, 胡昌明<sup>2</sup>

(1. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 南洋理工大学土木与环境工程学院, 新加坡 639798)

**摘要:** 利用脉冲整形器改进后的分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 系统, 对新加坡 Bukit Timah 地区的花岗岩圆柱形试样进行了高应变率下的单轴压缩实验。实验结果发现: 随着应变率的增加, 不仅花岗岩材料的抗压强度增大, 而且以轴向拉伸劈裂为主要破坏形式的破碎程度也有所提高, 表现为碎块的尺寸减小和数量增加。针对上述花岗岩的动态特性, 采用多裂纹相互作用的动态滑移型裂纹模型定量的分析了不同应变率下, 材料的微裂纹的初始长度、角度、初始裂纹间距以及裂纹面的摩擦系数等微裂纹特征对材料动态强度及破碎的影响, 将岩石类材料的宏观动力学特性与其微观结构联系起来, 合理地解释了花岗岩的动态强度及破碎程度的应变率相关性。

**关键词:** SHPB; 应变率; 脉冲整形器; 动态滑移型裂纹模型; 动态应力强度因子; 动态断裂韧性

**中图分类号:** TU452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2007)03-0385-06

**作者简介:** 翟越(1975-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 从事结构强度理论及材料动态特性研究。E-mail: zhaiyue75@yahoo.com.cn。

## Dynamic failure analysis on granite under uniaxial impact compressive load

ZHAI Yue<sup>1</sup>, Ma Guo-wei<sup>2</sup>, ZHAO Jun-hai<sup>1</sup>, HU Chang-ming<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Engineering, Changan University, Xi'an 710061, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

**Abstract:** High strain-rate uniaxial compressive loading tests were produced in the modified split Hopkinson pressure bar (SHPB) with pulse shaper on granite samples. It was shown that the failure of the granite cylinder was typical tensile splitting failure mode by sudden splitting parallel with the direction of uniaxial compressive loading at different strain rates. Besides, it was concluded not only the strength of granite increased, but also the fragment size decreased and fragment numbers increased with the increasing strain rate. To analyze quantitatively the failure phenomena, the numerical calculation based on a dynamic interacting sliding microcrack model was adopted to investigate the influence of microcracks with the different initial crack length, crack angle, crack space and friction coefficient on the macro-mechanical properties of granite under different strain rates. Accordingly, the strain-dependency of the compression strength and the fragmentation degree of granite was explained reasonably.

**Key words:** SHPB; strain rate; pulse shaper; dynamic interaction sliding microcrack model; dynamic stress intensity factor; dynamic fracture toughness

## 0 引言

当前备受关注的防爆工程、爆破开挖、定点爆破以及地震研究等诸多领域都涉及到高应变率荷载作用下岩石类材料的动力学性能。与岩石类材料的静力学相比, 其动力学问题在实验研究和力学分析上要复杂得多, 物理和数学处理上也困难得多, 因此到目前为止岩石类材料在动态实验研究和动力学理论分析上还处于不成熟阶段。在众多动力学问题中, 应变率相关性一直是研究材料动力学性能的重点研究课题。近些年来由于多种动力学实验设备(如: SHPB、炸药透镜和气炮)的建立和使用, 促进了这一研究的发

展, 给出了不少应变率在 $10^1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 之间的岩石类材料的动态实验结果<sup>[1-21]</sup>。另一方面, 随着扫描电镜(SEM)和声发射(AE)等实验设备的广泛应用, 对岩石类材料的微缺陷在外荷载作用下的扩展、分叉以及聚合的细观力学行为进行了较深入的研究。基于上述的实验研究以及断裂力学的相关理论, 一些裂纹模型被应用于研究岩石类材料在压缩荷载作用下的强度以及变形特性, 并成为目前岩石类材料力学特性研究

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20040710001)

收稿日期: 2005-12-31

的热点方向<sup>[3-8]</sup>。但以往对此大多是基于岩石类材料的应变率相关特性的定性分析,缺乏动力学理论与动态实验相结合的定量分析以及材料的细观微结构与宏观动力学性能之间的应变率相关性的系统研究。

本文针对新加坡 Bukit Timah 地区的花岗岩材料特性,采用黄铜脉冲整形器改进后的分离式 Hopkinson 压杆系统,对其岩芯制成的圆柱形试样进行了高应变率下的单轴压缩实验,有效降低了传统 SHPB 在岩石类脆性材料动态实验研究中应变率的波动性和测试数据的不可靠性。实验结果表明:在不同应变率下花岗岩试样的破坏形式都是以平行于主应力方向的拉伸劈裂破坏为主而不是轴向压缩破坏,同时发现不但试样的动态抗压强度随应变率的增加而提高,而且相应的试样破碎程度也有所增大,表现为碎块的尺寸减小、块数增加(见图 1)。

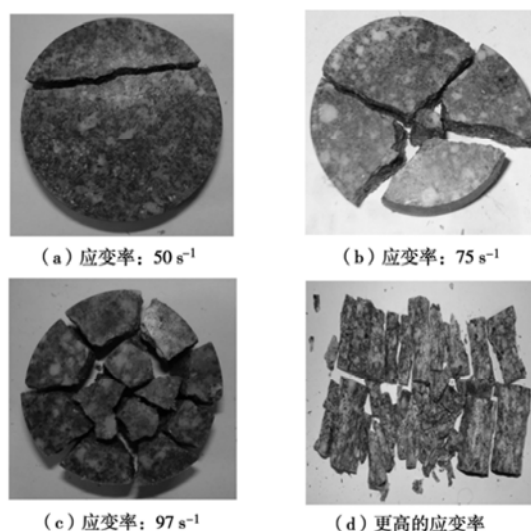


图 1 不同应变率下花岗岩在单轴冲击压缩荷载实验中的破碎形式

Fig. 1 Picture of granite fragment in dynamic uniaxial compressive load test

为了合理的分析实验结果,本文采用多裂纹相互作用的动态滑移型裂纹模型,通过断裂动力学的相关理论结合实验结果定量的分析了单轴冲击压缩荷载下,应变率对于花岗岩材料的不同初始长度、角度和间距的微裂纹尖端的拉伸扩展的影响,从而合理的解释了花岗岩试样的动态劈裂破坏程度及抗压强度与应变率的相关性,架起岩石类材料的细观微结构与宏观动力学特性之间的桥梁。

## 1 花岗岩的单轴动态压缩实验

SHPB 系统通过贴于弹性入射杆和输出杆中部的应变片测得加载应力波,进而采用间接的方法推算出

夹在两根压杆之间的试样的动态应力和应变,避开了冲击作用下直接测量的困难,因此成为一种研究较高应变率( $\dot{\varepsilon}=10^1 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ )下工程材料动态特性的重要实验系统(见图 2)。试样的基本动力学参数计算公式如下

$$\sigma(t) = \frac{A}{2A_0} E_0 (\varepsilon_i + \varepsilon_R + \varepsilon_T), \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt, \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{L_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_R - \varepsilon_T). \quad (3)$$

式中  $A$  和  $A_0$  分别为试样和压杆的横截面积;  $E_0$  为压杆的弹性模量;  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_R$ ,  $\varepsilon_T$  分别为入射杆和输出杆上测得的入射波、反射波和透射波;  $C_0$  和  $L_0$  分别为压杆的波速和压杆长度。

采用传统的 SHPB 系统时,子弹撞入射杆将产生上升沿很陡峭并且波峰带有剧烈震荡的矩形波。而在这种应力波作用下,低阻抗材料和脆性材料在破坏之前,试样很难满足均匀变形的要求,这对材料动态性能研究是失效的。为了得到更可靠的脆性材料和低阻抗材料在高应变率下的动力学参数,一种有效而简便的办法是由 Christenson 等人于 1972 提出的波形整形器技术,并由 Nemat-Nasser 和 Frew 等人发展了此项技术,使之广泛的应用于高应变率下陶瓷、岩石、复合材料等工程材料的动态特性研究<sup>[9-10]</sup>。针对花岗岩材料,经过反复实验,本文采用直径为 18 mm、厚度为 1 mm 的圆形黄铜片作为脉冲整形器,用黄油将其贴在入射杆的受冲击端中心处(见图 2),有效地将原来有高频震荡的矩形波变成较为平滑的半正弦波(见图 3),这样入射波的上升时间更长,并减少了高频震荡,可以获得较为恒定加载率,这对研究应变率敏感材料的动态特性是尤为重要的。

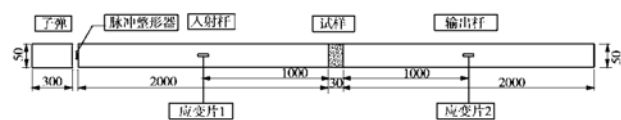


图 2 加脉冲整形器的 SHPB 系统示意图

Fig. 2 Sketch map of modified SHPB apparatus with pulse shaper

利用上述改进的 SHPB 系统,对采自新加坡的 Bukit Timah 地区的花岗岩岩心制成的直径为 50 mm、厚度约为 25 mm 的圆柱形试样在三种不同应变率下进行单轴冲击压缩实验。实验所得花岗岩试样的动态应力应变曲线如图 4 所示。分析实验结果可以看出:花岗岩试件的单轴动态抗压强度随着应变速率的提高有明显的增加,而其弹性模量的实验结果比较接近,总体上可视为应变率无关量。

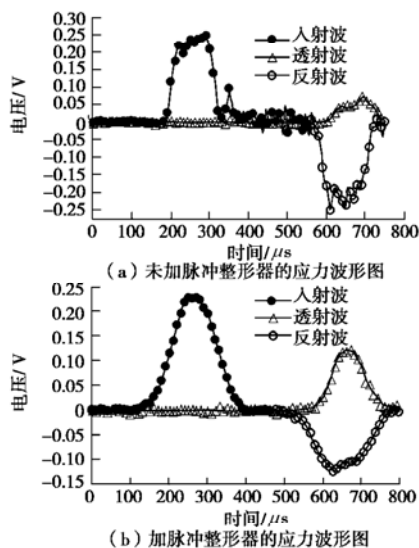


图3 脉冲整形器对应力波形的影响

Fig. 3 Influence of pulse shaper on pulse curve

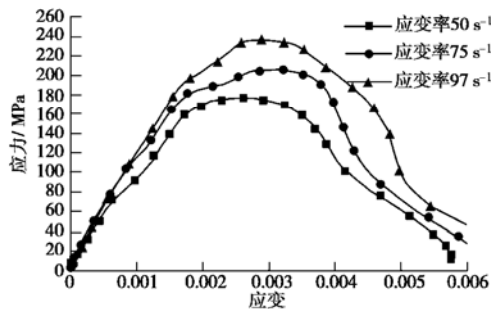


图4 不同应变率下花岗岩的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of granite under different strain rate

## 2 单轴冲击压缩荷载作用下花岗岩的断裂模型

花岗岩是一种典型的非均质脆性材料, 受到压缩荷载作用产生的裂隙都是从既有缺陷(如: 岩矿颗粒边界、内部孔洞、裂隙以及软弱介质等)尖端发展起来的。在单轴压缩以及侧向应力为拉伸应力或很小的压缩应力时, 裂隙是沿着最大主应力的方向扩展, 具有明显的方向性, 最终裂纹相互兼并, 进而贯通导致材料的轴向劈裂破坏。根据材料的断裂机制, 岩石类材料的这种破坏大致可以分为4个阶段: ①微裂纹处于闭合和摩擦滑移过程; ②摩擦滑移区内的部分微裂纹发生自相似的平面扩展; ③微裂纹弯折扩展, 将产生初始拉伸裂纹 $l^*$ ; ④发生弯折扩展后, 微裂纹尖端应力场主要为I型的 $k$ 场, 裂纹将沿平行于最大主应力方向拉伸劈裂扩展, 这是脆性材料受压破碎的主要阶段, 正因为如此, 轴向压缩荷载引起脆性材料的劈裂断面与轴向拉伸荷载引起的断裂面很相似, 所以这一阶段是本文研究的重点。针对花岗岩的微结构特征,

所采用的断裂模型不应该只针对单一裂纹而必须考虑多裂纹之间的相互作用对微裂纹扩展的影响, 因此, 本文采用多裂纹相互作用的动态滑移型裂纹模型<sup>[3-8]</sup>(见图5), 研究花岗岩在单轴动态压缩荷载作用下的力学特性。

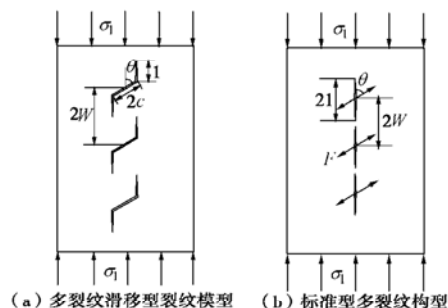


图5 考虑裂纹相互作用的滑移型裂纹模型

Fig. 5 Interacting sliding crack model

动荷载作用下, 由于荷载随时间变化, 因而应力、裂纹尖端的动态应力强度因子和动态断裂韧度都是时间的函数, 故以最大拉应力作为判据的多裂纹相互作用的动态滑移型裂纹模型的I型裂纹扩展准则可表示为

$$K_I^{\text{array}}(a, \sigma, t) = K_{Id}(t). \quad (4)$$

式中  $K_I^{\text{array}}(a, \sigma, t)$  为多裂纹相互作用的动态滑移模型的I型动态应力强度因子, 它与微裂纹特征参数 $a$ 、外加应力 $\sigma$ 及荷载作用时间有关;  $K_{Id}(t)$  为动态断裂韧度。对于 Bukit Timah 花岗岩, Zhao 等<sup>[11]</sup>基于动态断裂韧度实验(三点弯曲实验)数据的回归分析结果可以得到动态断裂韧度与加载时间 $t_d$ (单位为ms)有如下关系

$$K_{Id}(t) = -0.118 \log(t_d) + 1.719. \quad (5)$$

为了考虑裂纹扩展速度对裂纹尖端动态应力强度因子的影响, 引入裂纹扩展速度影响系数 $k(v)$ , 但到目前为止, 尚没有精确地确定其表达式的方法, 通常采用一些近似表达式。应用得比较广泛的是 Freund<sup>[12]</sup>提出的近似表达式, 即裂纹同时承受裂纹中心集中力作用和远场应力作用时的裂纹扩展速度影响系数 $k_1(v)$ 和 $k_2(v)$ 分别表示为

$$k_1(v) = \frac{v_r - v(t)}{v_r - 0.75v(t)}, \quad (6)$$

$$k_2(v) = \frac{v_r - v(t)}{v_r - 0.5v(t)}, \quad (7)$$

式中,  $v(t)$  和  $v_r$  分别表示裂纹扩展速度及其极限速度。在 Tada<sup>[13]</sup>定义的多裂纹相互作用的滑移型裂纹模型的静态应力强度因子的基础上, 考虑裂纹扩展速度对裂纹扩展的影响, 其动态应力强度因子可以表示为

$$K_1^{\text{array}}(a, \sigma, t) = k_1(v) \frac{F(t) \sin \theta}{\sqrt{W \sin \frac{\pi(l+l^*)}{W}}} - k_2(v) \sigma_2(t) \sqrt{2W \tan \frac{\pi l}{2w}}, \quad (8)$$

其中

$$F(t) = 2c\tau^*(t), \quad (9)$$

$$\tau^*(t) = \frac{1}{2}[\sigma_1(t) - \sigma_2(t)] \sin 2\theta - \frac{1}{2}\mu\{\sigma_1(t) + \sigma_2(t) - [\sigma_1(t) - \sigma_2(t)] \cos 2\theta\}. \quad (10)$$

式中  $F(t)$  为微裂纹中心承受的集中荷载;  $\sigma_2(t)$  为材料承受的均匀围压;  $\sigma_1(t)$  为轴向冲击荷载;  $\tau^*(t)$  为裂纹面上的剪应力;  $2c$  为裂纹初始长度;  $\theta$  为初始裂纹与最大主应力之间的夹角;  $\mu$  为裂纹面的摩擦系数;  $2W$  为裂纹间距;  $2l$  为拉伸裂纹长度;  $l^*$  为微裂纹弯折扩展产生的初始拉伸裂纹长度。当试样承受单轴冲击压缩荷载时  $\sigma_2 = 0$ , 可得到单轴冲击压缩荷载下的动态应力强度因子的表达式为

$$K_1^{\text{array}}(a, \sigma, t) = ak_1(v)\sigma_1(t), \quad (11)$$

$$a = \frac{c \sin \theta [\sin 2\theta - \mu(1 - \cos 2\theta)]}{\sqrt{W \sin \frac{\pi(l+l^*)}{W}}}. \quad (12)$$

### 3 花岗岩的微裂纹特征对其动态断裂性能的影响

#### 3.1 花岗岩微裂纹特征参数的确定

运用多裂纹相互作用的动态滑移型裂纹模型定量分析花岗岩在冲击压缩荷载作用下的动力学性能, 除了已有的实验数据, 还必须确定材料的微裂纹特征参数。光学显微镜观察结果表明岩石类材料的裂纹初始长度  $2c$  与其颗粒直径  $d$  的关系为  $0.2d \leq 2c \leq d$  [13], 而 Bukit Timah 花岗岩的平均颗粒直径约为 1.5 mm [11], 因此本文的模型分析中取裂纹初始长度在 0.3 至 1.5 mm 范围内。初始拉伸裂纹  $l^*$  取为 0.27 倍的裂纹初始长度 [7]。文献 [14] 指出含石英矿物的岩石类材料, 其内部含有的微裂纹面的摩擦系数在 0.1~0.7 之间。对于岩石类材料的裂纹扩展极限速度的研究到目前为止还不成熟, 虽然一般情况下认为它是岩石类材料的瑞利波波速, 但一些岩石类材料实验表明该极限速率约为瑞利波波速的 30%~40% [15], 而 Bukit Timah 花岗岩的瑞利波波速约 2000 m/s [11], 因此本文取裂纹扩展的极限速率为 700 m/s。最难确定的参数是随时间变化的动态裂纹扩展速度  $v(t)$ , 本文采用 Ravichandran 和 Chen 提出的裂纹扩展平均速率的观点 [16], 以裂纹开始扩展到贯通的有效裂纹扩展时间  $t_{\text{id}}$  内的平均扩展速度作为近似值的简化方法, 计算公式如下:

$$v(t) \approx \bar{v} = \frac{W}{t_{\text{id}}} = \frac{W}{t_d - t_e}, \quad (13)$$

式中,  $t_e$  为试样弹性变形所用的时间, 这个期间裂纹没有扩展, 因此在荷载作用时间  $t_d$  中扣除这一部分, 可得到近似的有效裂纹扩展时间  $t_{\text{id}}$ 。将式 (13) 代入式 (6), 可得到裂纹平均扩展速度影响系数  $k(\bar{v})$  的近似计算公式

$$k(\bar{v}) = \frac{(t_{\text{id}}v_r - W)}{t_{\text{id}}v_r - 0.75W}. \quad (14)$$

#### 3.2 材料微裂纹特征参数对其动态断裂性能的影响

为了便于研究, 对裂纹尖端的动态应力强度因子正则化, 即动态应力强度因子除以动态压缩荷载  $\sigma_1(t)$  和平均裂纹扩展速度影响系数  $k(\bar{v})$ 。此时正则化的动态应力强度因子 (NDSIF) 独立于应变率和荷载作用时间, 而只与微裂纹特征参数有关。

当其它特征参数一定时, 对于不同的裂纹面摩擦系数  $\mu$ , 正则化的动态应力强度因子与初始裂纹角度有近似半正弦的曲线关系 (见图 6), 图中正则化动态应力强度因子的最大值对应的裂纹角度就是最易扩展的初始裂纹角度, 此角度只与裂纹面的摩擦系数有关, 即随着摩擦系数的减小而增大, 而与其它特征参数无关。对花岗岩而言可取  $\mu = 0.3$ , 此时最易扩展角度约为  $45^\circ$ 。

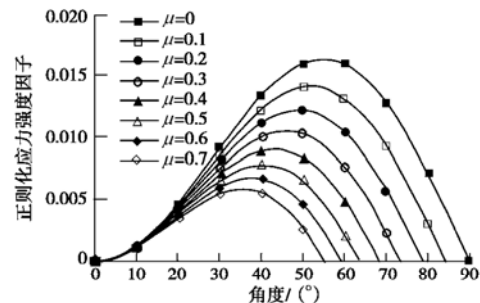


图 6 不同摩擦系数下正则化动态应力强度因子随初始裂纹角度增加的变化曲线

Fig. 6 Variation of NDSIF with crack angle  $\theta$  under different friction coefficient ( $2c=1.5$  mm,  $2W=6$  mm)

图 7 描述了在其它特征参数一定的情况下正则化动态应力强度因子随着裂纹间距的增加而减小的规律。当间距增大到一定程度 (如图当裂纹间距超过 10 mm) 后, 裂纹间相互作用很小可以忽略不计, 此时多裂纹相互作用的动态应力强度因子趋近于单独裂纹的动态应力强度因子。

此外由式 (11) 还容易看出, 在其它条件不变的情况下动态应力强度因子与裂纹初始长度  $c$  成正比, 因此初始长度越长的裂纹越容易扩展。由于裂纹初始长度与岩石类材料的岩矿颗粒尺寸有关, 所以也表明

在相同外荷载作用下, 岩矿颗粒尺寸越大的花岗岩越容易破碎, 强度越低。

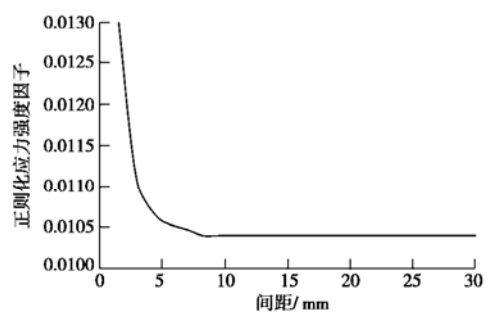


图 7 正则化动态应力强度因子随裂纹间距增加的变化规律  
Fig.7 Variation of NDSIF with crack spacing( $\theta=45^\circ$ ,  $2c=1.5$  mm,  $\mu=0.3$ )

3.3 应变率对材料动态断裂性能的影响

为了定量的分析应变率对花岗岩的动态断裂韧度及动态应力强度因子的影响, 取定花岗岩的微裂纹特征参数值: 摩擦系数  $\mu=0.3$ ; 初始裂纹角度  $\theta=45^\circ$ ; 裂纹初始长度  $2c=1.5$  mm; 裂纹初始间距  $2W=6$  mm; 初始拉伸裂纹  $l^*=0.41$  mm。由式 (12) 可得到微裂纹特征参数  $a=0.0105\text{ m}^{1/2}$ 。由实验数据, 可得不同应变率对应的动态断裂韧度和裂纹扩展速度等影响系数如表 1, 可以看出花岗岩材料的动态断裂韧度随着应变率的增加而增加, 而另一方面裂纹扩展速度影响系数随应变率的增加而减小, 并且都小于 1, 故在应力峰值相等的情况下动态应力强度因子要小于静态的, 而动态断裂韧度却大于静态的, 所以动态荷载作用下花岗岩的微裂纹更不易扩展, 材料破坏就需要更大的荷载, 这就是材料的动态强度高于静态强度的一个主要原因。

表 1 不同应变率下花岗岩的动态参数值

| Table 1 Dynamic parameters of granite under deferent stain rate |           |                                           |           |            |             |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------|-----------|------------|-------------|
| 应变率/ $\text{s}^{-1}$                                            | 荷载作用时间/ms | 动态断裂韧度/ $(\text{MPa}\cdot\text{m})^{1/2}$ | 裂纹扩展时间/ms | 裂纹扩展速度影响系数 | 临界初始裂纹长度/mm |
| 50                                                              | 0.112     | 1.831                                     | 0.179     | 0.988      | 1.06        |
| 75                                                              | 0.104     | 1.835                                     | 0.166     | 0.987      | 0.92        |
| 97                                                              | 0.096     | 1.839                                     | 0.154     | 0.985      | 0.80        |

其它微裂纹特征参数确定的条件下, 能使裂纹尖端的动态应力强度因子达到动态断裂韧度, 从而裂纹开始扩展的最小裂纹初始长度可以称为临界裂纹初始长度, 由式 (4) 及 (11) 可得

$$c_0 = \frac{K_{\text{ld}}(t)}{nk(v)\sigma_{\text{imax}}(t)}, \tag{15}$$

其中

$$n = \frac{\sin \theta [\sin 2\theta - \mu(1 - \cos 2\theta)]}{\sqrt{W \sin \frac{\pi(l+l^*)}{W}}}, \tag{16}$$

对于确定的微裂纹, 式中  $n$  可以认为是不变量。分析实验值可以发现动态断裂韧度和裂纹扩展速度影响系数随应变率的增加而变化的幅度远小于冲击应力的增加幅度, 因此由式 (15) 可知随着应变率的增加, 临界裂纹初始长度有减小的趋势 (见表 1), 所以在高应变率下会有更多的、更短小的微裂纹可以扩展, 进而连通导致更小的破碎块度。

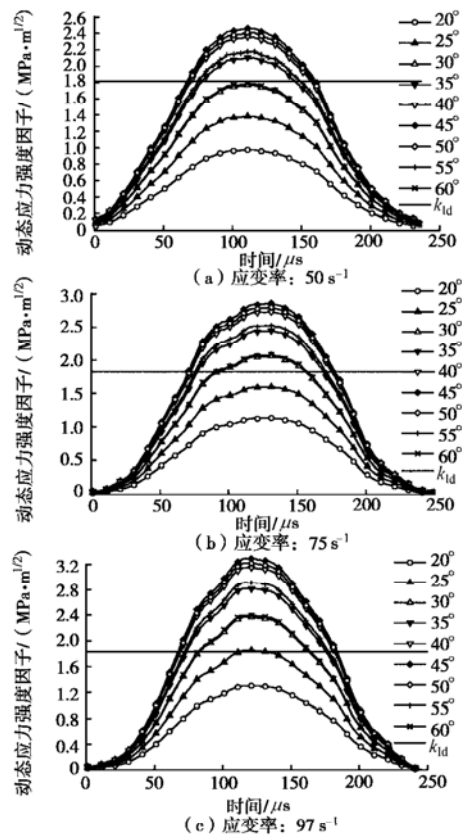


图 8 不同应变率下不同裂纹初始角度对动态应力强度因子的影响规律

Fig.8 Variation of DSIF with crack angle under difference strain rates ( $2c=1.5$  mm,  $2W=6$  mm,  $\mu=0.3$ )

不同应变率下, 其它条件一定时, 不同裂纹初始角度对动态应力强度因子的影响规律如图 8 所示。分析图中三种应变率下, 9 种初始裂纹角度 ( $\theta=20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ , ...,  $60^\circ$ ) 的动态应力强度因子与相应的动态断裂韧度的关系, 不仅可以发现各种角度的微裂纹对应的动态应力强度因子随应变率的增加而增大, 而且更重要的是能达到动态断裂韧度进而扩展的微裂纹的角度范围随之扩大。当应变率为  $50\text{ s}^{-1}$ , 有 5 种角度包括  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $55^\circ$  的裂纹的动态应力强度因子能达到动态断裂韧度 (见图 8(a));

当应变率增加到  $75 \text{ s}^{-1}$ , 有 7 种角度, 增加了  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  (见图 8(b)); 当应变率增加到  $97 \text{ s}^{-1}$ ,  $25^\circ$  的裂纹的动态应力强度因子也能达到动态断裂韧度 (见图 8(c))。此外还可发现, 不同角度的裂纹在动态荷载下起始扩展的时间也不同, 具有最易扩展角度的裂纹先扩展, 而后随着应力的增大越来越多的其它角度的裂纹逐渐开始扩展。

综上所述, 不同应变率下材料的微裂纹特征对动态断裂有不同的影响。当应变率较低时, 只有那些能在低应力下活化的微裂纹可以扩展, 因为当荷载增加到使其它微裂纹激活之前, 这些微裂纹的扩展与贯通就使材料发生破坏, 此时起作用的微裂纹数目较少, 所以材料破碎后碎块的尺寸比较大, 达到破碎的应力门槛值较低, 因而材料的抗压强度较低。当在高应变率下加载时, 微裂纹发生兼并之前, 应力已达到较高的水平使得更多的微裂纹发生扩展进而参加破碎过程, 导致材料的破碎碎块尺度更小, 材料达到破碎的应力门槛值更高。

## 4 结 语

(1) 利用改进的 SHPB 系统得到更为可靠的单轴冲击压缩荷载实验结果, 总结出花岗岩材料抗压强度及破碎程度随应变率的增加而变化的规律。

(2) 利用断裂动力学方法得出花岗岩材料的动态抗压强度随应变率的增加而提高的一个主要原因是随着应变率增加, 材料的动态断裂韧度增大而裂纹尖端的动态应力强度因子降低, 使材料裂纹扩展就需要更高的外荷载, 因此材料的抗压强度也就更高。

(3) 基于多裂纹相互作用的动态滑移型裂纹模型, 结合实验研究得到花岗岩材料单轴动态压缩破碎的一些特点: ①微裂纹在弯折扩展后沿着轴向应力方向扩展进而相互贯通; ② I 型动态应力强度因子与孔洞半径、颗粒半径以及裂纹初始长度成正比, 而与裂纹间距成反比; ③裂纹的最易扩展角度随着裂纹面的摩擦系数的减小而增大; ④随着应变率的增加, 临界裂纹初始长度减小而能够扩展的裂纹角度范围扩大, 因此扩展裂纹的数量增多, 试样的破碎程度增加。

## 参考文献:

- [1] BLANTON T L. Effect of strain rate from  $10^{-2}$  to  $10 \text{ sec}^{-1}$  in uniaxial compression tests on three rocks[J]. Int J Rock Mech and Min Sci. 1981, **18**(1):47 - 62.
- [2] JU Q H, WU M B. Experimental studies of dynamic characteristic of rocks under uniaxial compression[J]. Chinese J Geotech Engng, 1993, **15**(2):73 - 80.
- [3] LI H B, ZHAO J, LI T J. Micromechanical modelling of the mechanical properties of a granite under dynamic uniaxial compressive loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, **37**:923 - 935.
- [4] NEMAT-NASSER S, DENG H. Strain-rate effect on brittle failure in compression[J]. Acta Metall Materials 1994, **42**(3):1013 - 1024.
- [5] NEMAT-NASSER S, OBERT M. A microcrack model of dilatancy in brittle material[J]. J Appl Mech, 1988, **55**(1):24 - 35.
- [6] RAVICHANDRAN G, SUBHASH G. A micromechanical model for high strain rate behavior of ceramics[J]. Int J Solids Structures, 1995:2627 - 2646.
- [7] HORII H, NEMAT-NASSER S. Brittle failure in compression: splitting, faulting, and brittle-ductile transition[J]. Phil Trans Royal Soc London, 1986, **319**: 337 - 374.
- [8] DENG H, NEMAT-NASSER S. Dynamic damage evolution in brittle solids[J]. Mechanics of Materials 1992, **14**:83 - 103.
- [9] NEMAT-NASSER S, LSAACS J, RAVICHANDRAN G, STAMEN J E. Proc of TTCP TTP-1 workshop on new techniques of small scale high strain rate studie[R]. Australia, 1989.
- [10] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse-shaping Techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2002, **42**: 93 - 106.
- [11] ZHAO J, LI HB, ZHAO YH. Dynamic strength tests of the bukit timah granite[R]. Nanyang Technological University, Singapore, 1998.
- [12] FREUND LB. Dynamic fracture mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [13] TADA H. Stress analysis of cracks handbook[M]. Del Research Corporation, St Louis, 1973.
- [14] FREDRICH J T, EVENS B. Effect of grain size on brittle and semi-brittle strength: implication for micromechanics modeling of failure in compression[J]. J Geophys Res, 1990, **95**(10):907 - 920.
- [15] DALLY J W, FOURNEY W L, IRWIN G R. On the uniqueness of the stress intensity factor-crack velocity relationship[J]. Int J Fract, 1985, **27**:159 - 168.
- [16] RAVICHANDRAN G, CHEN W. Dynamic failure of brittle materials under uniaxial compression[R]. KIM K S. Experiments in Micromechanics of Failure Resistant Materials, 1991:85 - 90.