

SHPB 加载下含不同倾角裂隙的类岩石试样力学特性

王卫华¹, 李坤¹, 王小金¹, 姜海涛², 严哲¹

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

2. 福建岩土工程勘察研究院, 福州 350001

摘要 为研究裂隙倾角对类岩石试样的强度与变形特性、裂纹扩展规律及破坏过程的变化趋势的影响,对含有不同倾角的预制裂隙类岩石试样进行霍普金森杆(SHPB)加载试验。研究发现,SHPB加载作用下类岩石试样的应变阶段分段不明显,基本不存在应变软化阶段以及残余强度段。SHPB加载作用下,类岩石试样的峰值强度的变化趋势与静载荷作用下基本相同。随着预制裂隙倾角变化呈先变大后减小的V字形变化。在裂隙倾角为45°时,试样的峰值强度最小,0°和90°试样的峰值强度与完整试样极其接近。且SHPB加载作用下的类岩石试样的强度增加比较缓慢,峰值强度基本都小于相同条件下静载荷的峰值强度。随着预制裂隙倾角的增大,起裂角逐渐减小。当预制裂隙倾角较小时(0°,15°),起裂角接近90°。与静载荷作用下的变化趋势是一致的。SHPB加载过程与静载荷不同,类岩石试样从开始加载至完全破坏总时间为约为2 s,速度极快。

关键词 裂隙倾角;类岩石试样;霍普金森杆;力学特性;破坏过程

工程中的岩体往往存在大量裂隙,这些裂隙的存在不但使岩石承受荷载能力下降,还使应力波传播速度降低、峰值衰减。因此,对动载下裂隙岩体的研究显得尤为重要^[1]。而这些裂隙在动载作用下如何变化和扩展,是岩石动力学的一个重要课题。研究证明,岩体的破坏和失稳最终都是由岩体内部这些不连续面的闭合、相对滑动和扩展,形成的贯通破坏面引起的。因此,研究岩体中裂隙的起裂、扩展、贯通过程及破坏模式,认识节理裂隙岩体的变形破坏特征和强度变化规律,可以为工程提供理论和实际支撑基础^[2]。但是由于现场试验取材、测试等存在诸多困难,现有的针对实际裂隙岩体破坏过程的研究主要借助于室内试验来进行^[3]。而霍普金森杆(SHPB)实验装置是应用最为广泛的装置之一。但基于传统SHPB装置的岩石动力学试验由于装置本身的缺陷往往存在较大的误差,而改进的SHPB实验装置及其平台为人们研究动载荷作用下岩石提供了良好的平台和基础^[4],由于其操作简便,误差较小,较为真实地模拟了岩石在自然界受到的动力载荷的作用,在此基础上取得了一批研究成果。

Loeber等^[5]在1968年分析了在动载荷作用下,岩石中裂纹尖端的应力分布情况,为后人的研究提供了基础理论。Bagde等^[6]通过对砂岩的室内试验,得到了完整砂岩在静态和动态载荷作用下力学性能的变化规律。Yang等^[7]分析了时间

和空间对于微裂纹的影响及其复杂的机械行为以及宏观裂纹在介观尺度基于损伤的演化原理。李地元等^[8]利用SHPB进行冲击压缩试验,分析了冲击载荷作用下预制孔洞试样的动态抗压强度、破坏模式和裂纹扩展特性。研究发现,孔洞大小、形状和空间位置对岩石的动态抗压强度都有一定影响。王锦山等^[9]对影响含裂纹岩石受载后的应力场以及影响应力场分布的因素进行了分析,探究了裂纹尖端的应力集中程度以及造成岩石破坏、裂纹扩展的理论原因。朱万成等^[10]对含预制裂纹的巴西圆盘试样的破裂模式进行了数值模拟,研究了不同裂隙倾角对破坏模式的影响,试验结果均符合基本理论解释;吴海等^[11]阐述了岩石、混凝土类材料微裂纹成核、扩展理论和扩展模型及其应用研究。Wong等^[12]对含三维表面裂隙的PMMA和大理岩材料进行了裂隙扩展试验,研究了半圆形三维表面裂隙的扩展规律。朱万成等^[13]采用岩石破裂过程分析系统(RFPA)研究了含有不同角度预制裂纹的岩石试样在动态载荷作用下的破坏过程,数值模拟表明:应力峰值较小时,试样的破裂模式与静态载荷作用下的破裂模式相似;应力峰值较大时,试样的破坏区主要集中在试样顶端。

本研究采用含有预制贯穿张开裂隙的水泥砂浆圆柱体试样,并对试样进行SHPB加载试验。通过改变预制裂隙的倾角,得到不同的试验结果并进行分析研究。针对裂隙倾角

收稿日期:2015-07-03;修回日期:2015-09-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41372278)

作者简介:王卫华,副教授,研究方向为岩体动力学、爆破,电子邮箱:50973993@qq.com

引用格式:王卫华,李坤,王小金,等. SHPB加载下含不同倾角裂隙的类岩石试样力学特性[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 246-250; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.033

这一参数的变化,研究了其对类岩石试样的强度与变形特性、裂纹扩展规律及破坏过程的变化趋势等,获得了裂隙倾角这一参数对试样力学特性的影响规律。

1 试验设计

1.1 试样的尺寸以及裂隙分布情况

类岩石试样高径比为1:1(50 mm:50 mm)^[14](以裂隙倾角45°的试样为例,图1),用于SHPB动载荷加载试验,编号O是不含裂隙的完整试样,其余试样按照裂隙倾角依次从A~F进行编号,倾角角度从0°~90°以15°的递增(75°除外)共7组,每组试样各2个,试样按照O₁、O₂~F₁、F₂分别进行编号,类岩石试样的实测尺寸(本次试验所用试样为下标为编号1的试样)见表1。



图1 类岩石试样(裂隙倾角45°)

Fig. 1 Rocklike specimen(crack obliquity 45°)

1.2 试样的制备方法及过程

研究使用的试样由水泥砂浆制成,其中水泥:水:砂的质量比为1:0.5:2。制备步骤是将水泥、砂和水按比例混合并搅拌均匀后浇注到模具中,然后捣实压密,使试样表面尽量光



(a) SHPB实验仪器



(b) SHPB实验数据采集仪

图2 SHPB实验装置

Fig. 2 SHPB experimental apparatus

2 试验结果

2.1 数据处理方法

采用SHPB对含预制裂隙的类岩石试样进行冲击加载实验,在加载过程中,示波器上显示出加载的入射波,反射波以及透射波观察波形的效果并保存数据。首先,在电脑上打开SHPB处理软件,将示波器中的数据导入到软件中,并保存为Excel格式,用于对数据的进一步处理;然后在Excel里插入时

间项,对原始数据校零;应用SHPB数据处理软件进行数据处理后,可以得到试样的应力应变曲线、应变率时间图以及试样的峰值强度等参数。

2.2 SHPB作用下含裂隙试样应力-应变曲线

图3是SHPB加载作用下含裂隙试样的应力-应变曲线:图中O为完整类岩石试样,A为0°裂隙试样,B为15°裂隙试样,C为30°裂隙试样,D为45°裂隙试样,E为60°裂隙试样,F

表1 类岩石试样的实测尺寸

Table 1 The actual size of the rocklike specimen

试样 编号	裂隙倾角 $\theta/(\circ)$	实测 角度/ (\circ)	裂隙长度 /mm	试样直径 /mm	试样长度 /mm
O ₁	—	—	—	48.74	50.06
A ₁	0	2	9.89	48.85	50.49
B ₁	15	19	12.33	48.78	50.30
C ₁	30	29	11.52	48.92	50.40
D ₁	45	48	11.18	49.04	49.96
E ₁	60	63	11.33	49.61	49.80
F ₁	90	91	11.65	49.92	50.25

滑平整,之后脱模放入养护箱中养护28天达到预定强度后取出,养护条件为标准条件:温度20°C,湿度90%。最后用磨石机将试样两端面磨平,以满足试验要求精度。

试样中的裂隙是事先预制的。具体制作方法^[15]是先将水泥砂浆倒入模具并捣实压密后,将金属薄片(厚度0.1 mm)涂抹润滑剂后按照预先设计的裂隙位置和裂隙倾角插入模具中,在水泥砂浆初凝后,把金属薄片拔出,预制裂隙即制作完成。

1.3 试验装置和加载过程

试验所用仪器是霍普金森压杆(SHPB),见图2。SHPB装置是由强度均为40Cr合金钢制造的冲头、入射杆、透射杆和吸收杆组成,其弹性极限达800 MPa,纵波波速为5410 m/s,密度为7810 kg/m³,即其波阻抗的大小为4.2×10⁷ MPa/s;直径为50 mm,入射杆、透射杆和缓冲杆长度分别为2、1.5、0.5 m,发射腔内采用异型冲头以消除PC振荡,实现半正弦波加载,达到恒应变率加载的目的。数据采集和显示设备为CS-1D超动态应变仪和DL-750示波器。

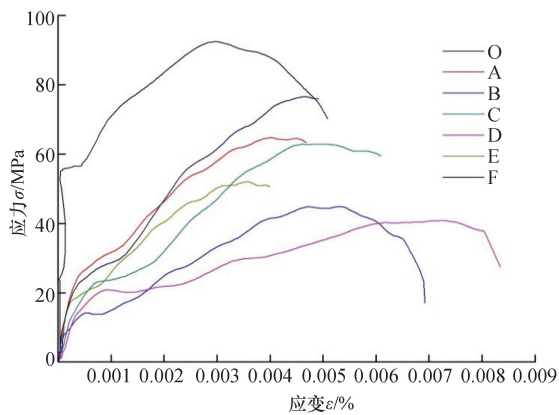


图3 SHPB载荷作用下的应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curve under SHPB loading

为90°裂隙试样。

可以看出, SHPB加载作用下类岩石试样的应变阶段分段不明显, 基本不存在应变软化阶段以及残余强度段。由于SHPB载荷的加载速率较快, 类岩石试样很快达到峰值强度, 进而完全破坏, 后期两个阶段基本不会存在。SHPB加载初期与静载荷作用下^[15]相比, 类岩石试样破坏的前3个阶段基本相同, 即压密阶段, 线弹性阶段以及裂纹稳定扩展阶段。

在SHPB加载作用下, 由于应力幅值迅速变化, 使试样内部应力在极短时间内超过材料的强度, 导致横向拉应力引起的微裂纹在试样表面出现, 起裂方向与最大主应力方向平行或成很小夹角。随着应力的持续增加, 裂纹继续向前扩展, 但由于加载时间很短, 在峰值荷载附近停留的时间更短, 已经产生的裂纹要发生归并、搭接所需要的时间不能得到满足, 因此SHPB加载作用下相邻的裂纹间很少发生剪切形式的贯通, 裂纹持续向平行于压应力方向扩展, 并沿着最大压应力方向搭接, 最后贯穿试样顶部, 在横向拉应力作用下, 张性破坏在瞬间发生^[16]。

还可以看出, 预制裂隙倾角为0°以及90°的类岩石试样的应力应变曲线与完整类岩石试样的应力应变曲线极其接近, 说明当裂隙倾角为0°或者90°时, 预制裂隙对于类岩石试样的力学参数的影响较小。

2.3 试样的峰值应力强度

在SHPB加载作用下, 随着预制裂隙倾角的不断变化, 类岩石试样的峰值强度成一定规律变化, 具体的变化趋势见图4。

从图4可以看出, 试样在SHPB加载作用下压缩强度值随裂隙倾角从0°到90°的变化呈V字形, 这与静载荷作用下^[17]的强度变化趋势大体一致, 但是变化曲线更为曲折。与静载荷加载相比, SHPB加载作用下的类岩石试样的强度增加比较缓慢, 且类岩石试样的峰值强度基本都小于相同条件下静载荷的峰值强度。倾角为45°时, 峰值强度最低。倾角为0°和90°时, 强度最高。裂隙0°和90°的试样的峰值强度和完整试样的几乎相同, 但是SHPB加载作用下由于破坏模式相对于

完整试样更加复杂, 在其共同作用下导致类岩石试样迅速破碎。

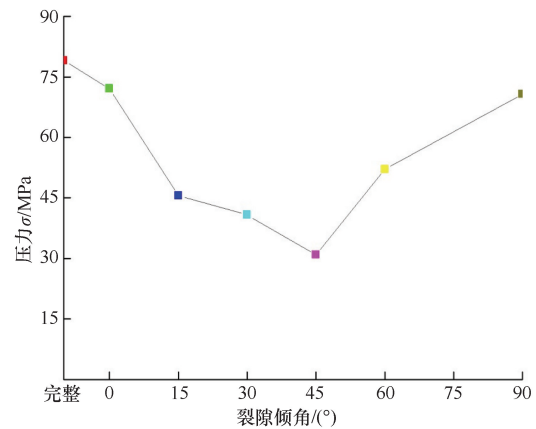


图4 峰值强度随裂隙倾角的变化规律
Fig. 4 Peak strength VS. crack angle

由以上分析可知, SHPB加载作用下, 类岩石试样的峰值强度的变化趋势与静载荷作用下基本相同, 随着预制裂隙倾角呈先变大后减小, V字形变化。在裂隙倾角为45°时, 试样的峰值强度最小, 0°和90°试样的峰值强度与完整试样极其接近。

2.4 起裂角

进行SHPB加载时, 类岩石试样从初始受到加载作用、开始起裂直至最终完全破坏, 是一个极其短暂的过程, 基本上肉眼无法分辨出这几个阶段。因而本试验在SHPB加载过程中, 使用高速摄影仪记录试样破坏的全过程, 根据预制裂隙起裂初期的照片(图5, 以45°裂隙试样为例), 可以测得起裂角(裂纹起裂扩展方向与预制裂纹延长线的夹角), 由此得到了预制裂隙起裂角随着预制裂隙倾角的变化规律。

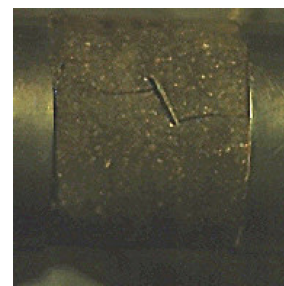


图5 类岩石试样起裂初期(以45°裂隙试样为例)
Fig. 5 Crack initial stage of the rocklike specimen (crack obliquity 45°)

根据高速摄影仪记录下的类岩石试样整个加载破坏过程, 获取预制裂隙尖端开始起裂一刻的图片, 根据图片测量不同倾角的预制裂隙在动载荷作用下的起裂角, 具体测量数据见表2。

从表2可以看出, 起裂角随着裂隙倾角的增加呈递减趋势。翼裂纹从裂纹尖端以曲线路径扩展, 最终趋向于平行于

最大压应力的方向扩展,这种扩展趋势与静载荷作用下类岩石试样裂纹扩展相大致一致。但变化下降很快。预制裂隙倾角为 90° 时,破坏模式与完整试样的破坏模式相同。随着预制裂隙倾角的增大,起裂角逐渐减小。当预制裂隙的倾角较小时(0° 、 15°),起裂角接近 90° 。与本研究结果不同的是,当预制裂隙倾角足够大时,起裂角趋近于 0° ,即与类岩石试样中预制裂隙基本共面。

表2 SHPB载荷作用下起裂角的测量值
Table 2 Crack angles under SHPB loading

编号	裂隙倾角/ $(^\circ)$	起裂角/ $(^\circ)$	平均值/ $(^\circ)$	编号	裂隙倾角/ $(^\circ)$	起裂角/ $(^\circ)$	平均值/ $(^\circ)$
A ₁	0	上 94 下 79	87	A ₂	0	上 101 下 78	90
B ₁	15	上 89 下 83	86	B ₂	15	上 79 下 81	80
C ₁	30	上 76 下 72	74	C ₂	30	上 75 下 67	71
D ₁	45	上 57 下 49	53	D ₂	45	上 54 下 47	51
E ₁	60	上 46 下 34	40	E ₂	60	上 43 下 32	38
F ₁	90	上 6 下 5	6	F ₂	90	上 9 下 3	6

2.5 类岩石试样的破坏过程

进行 SHPB 加载试验时,使用高速摄影仪对加载的过程进行记录,研究类岩石试样的破坏方式以及破坏阶段。SHPB 加载过程与静载荷不同,速度非常快,类岩石试样从开始加载至完全破坏整个过程总时间为 2 s,以 45° 裂隙试样为例说明 SHPB 加载作用下类岩石试样的破坏过程(图 6)。

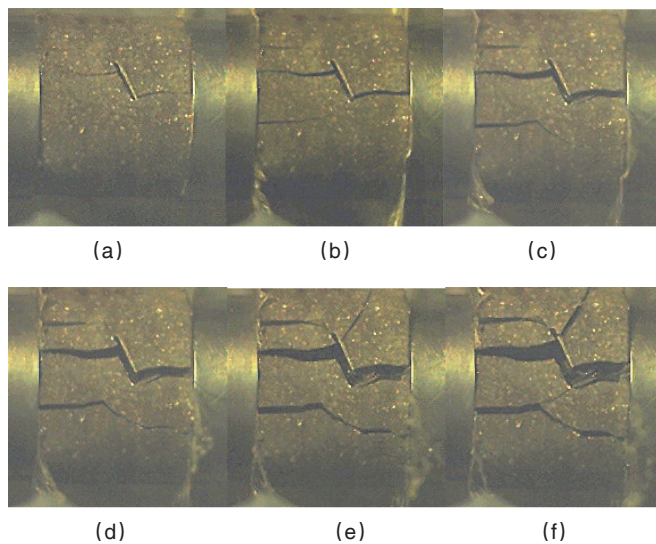


图6 SHPB载荷作用下类岩石试样的破坏过程
Fig. 6 Failure process of rocklike specimen under SHPB loading

从图6可以看出,类岩石试样在 SHPB 载荷作用下,破坏过程极快,(a)图即为预制裂隙开始起裂,裂纹从预制裂隙尖端开始起裂,沿着与应力平行的方向发展;(b)图类岩石试样在 SHPB 加载作用下,试样厚度有一定程度的减小,预制裂隙的扩展进一步加深,从类岩石试样的顶部和底部开始出现裂纹;(c)图从预制裂隙延伸发展出的裂纹进一步加深,贯通整个试样,类岩石试样顶部和底部的裂纹也有逐步贯通整个试样的趋势;(d)图类岩石试样的破坏变形十分明显,此时已有小块的岩石碎片从试样飞出,试样逐渐破碎;(e)图类岩石试样的变形极其严重,整个试样已经破碎成几个部分,从类岩石试样的顶部和底部发展出的裂纹已经贯穿整个试样;(f)图类岩石试样已经完全被压碎,成几个部分,但是预制裂隙延伸发展的裂纹是类岩石试样破坏的主要原因,从试样顶部以及底部产生的裂纹对整个类岩石试样的破坏起到了辅助作用。

3 结论

对含有不同倾角裂隙的类岩石试样进行了 SHPB 压缩载荷作用试验,研究了含裂隙类岩石试样的力学特性变化,得到了如下结果:

1) 与静载荷作用下的类岩石试样的应力应变曲线相比,SHPB 加载作用下类岩石试样的应变阶段分段不明显,基本不存在应变软化阶段以及残余强度段。

2) 裂隙倾角会对类岩石试样的峰值抗压强度产生一定的影响,峰值抗压强度随着裂隙倾角的增大先减小后增大,呈 V 字形;在倾角 45° 时岩石的峰值抗压强度最低,裂隙倾角 0° 和 90° 的岩石几乎可以达到与完整岩石相同的峰值抗压强度。

3) SHPB 加载作用下,类岩石试样的强度增加比较缓慢,且类岩石试样的峰值强度基本都小于相同条件下静载荷的峰值强度。预制裂隙倾角为 0° 以及 90° 的类岩石试样的应力应变曲线与完整类岩石试样的应力应变曲线极其接近,说明当裂隙倾角为 0° 或者 90° 时,预制裂隙对于类岩石试样的力学参数的影响较小。

4) SHPB 载荷作用,起裂角随着裂隙倾角的增加呈递减趋势,且翼裂纹扩展趋势与静载荷作用下类岩石试样裂纹扩展一致。

5) 类岩石试样在 SHPB 加载作用下,其破坏速度非常快,开始加载至完全破坏整个过程总时间约为 2 s。

参考文献 (References)

- [1] 王明洋, 钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(20): 42-46.
Wang Mingyang, Qian Qihu. The attenuation law of explosive stress wave through joint fissure zone[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(20): 42-46.
- [2] 蒲成志. 单抽压缩下类岩体裂隙材料断裂破坏机制的实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
Pu Chengzhi. Experiment research on the fracture failure mechanism of

- rocklike material with fissures under uniaxial compression[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [3] 张平, 李宁, 贺若兰. 含裂隙类岩石材料的局部化渐进破坏模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2043-2050.
Zhang Ping, Li Ning, He Ruolan. Research on localized progressive damage model for fractured rocklike materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2043-2050.
- [4] 刘爱华, 郑鹏. SHPB在岩石动静组合加载实验中的应用及发展方向[J]. 爆破, 2007, 24: 253-259.
Liu Aihua, Zheng Peng. Application and future development of SHPB for rock test under static-dynamic loading[J]. Blasting, 2007, 24: 253-259.
- [5] Loeber J F, Sih G C. Diffraction of antiplane shear waves by a finite crack[J]. Acoustical Society of America, 1968, 44(1): 90-98.
- [6] Bagde M N, Petros V. The effect of machine behaviour and mechanical properties of intact sandstone under static and dynamic uniaxial cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38 (1): 59-67.
- [7] Yang Y F, Tang C A, Xia K W. Study on crack curving and branching mechanism in quasi-brittle materials under dynamic biaxial loading[J]. Int J Fract, 2012(177): 53-72.
- [8] 李地元, 成腾蛟, 周韬, 等. 冲击载荷作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 249-260.
Li Diyuan, Cheng Tengjiao, Zhou Tao, et al. Experimental study of the dynamic strength and fracturing characteristics of marble specimens with a single hole under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 249-260.
- [9] 王锦山, 黄明利. 含裂纹岩石受载后的应力场特征及其影响因素分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2001, 20(2): 90-94.
Wang Jinshan, Huang Mingli. Stress field characteristics and its influence factors of the cracked rocks[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Science and Technology, 2001, 20(2): 90-94.
- [10] 朱万成, 黄志平. 含预制裂纹巴西盘试样破裂模式的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1609-1613.
Zhu Wancheng, Huang Zhiping. Numerical simulation of fracture mode of Brazil plate with prefabricated cracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1609-1613.
- [11] 吴海, 杨栋. 类岩石材料裂纹演化机理的研究进展[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(增1): 7-11.
Wu Hai, Yang Dong. Research progress of the mechanism of crack evolution in rock like materials[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(Suppl 1): 7-11.
- [12] Wong R H C, Law C M, Chau K T. Crack propagation from 3-D surface fractures in PMMA and marble specimens under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 37-42.
- [13] 朱万成, 逢铭璋. 含预制裂纹岩石试样在动载荷作用下破裂模式的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 23-28.
Zhu Wancheng, Jiang Mingzhang. Numerical simulation of failure mode of rock samples with prefabricated cracks under dynamic loading [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 23-28.
- [14] 陈瑜, 黄永恒, 曹平, 等. 不同高径比时软岩强度与变形尺寸效应试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010(3): 1073-1078.
Chen Yu, Huang Yongheng, Cao Ping, et al. Experimental study on the strength and deformation of soft rock with different high diameter ratio[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010(3): 1073-1078.
- [15] 王卫华, 王小金, 姜海涛, 等. 单轴压缩作用下含不同倾角裂隙的类岩石试样力学特性[J]. 科技导报, 2014, 32(28/29): 48-53.
Wang Weihua, Wang Xiaojin, Jiang Haitao, et al. Experimental research on mechanical properties of rocklike specimens containing single cracks of different inclination angles under uniaxial compression [J]. Science and Technology Review, 2014, 32(28/29): 48-53.
- [16] 张海波. 动、静荷载作用下不同倾角裂隙岩体力学性能试验模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
Zhang Haibo. Experimental simulation study on mechanical properties of rock mass with different dip angle under dynamic and static loads [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [17] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3661-3666.
Pu Chengzhi, Cao Ping, Zhao Yanlin. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3661-3666.

Experimental study of mechanical properties of rocklike specimens containing single cracks of different inclination angles under SHPB loading

WANG Weihua¹, LI Kun¹, WANG Xiaojin¹, JIANG Haitao², YAN Zhe¹

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2. Fujian Geotechnical Engineering Investigation and Research Institute, Fuzhou 350001, China

Abstract In order to study the influence of the crack obliquity on the strength, the deformation, the crack propagation and the failure process of rocklike specimens, the SHPB loading test is carried out for rocklike specimens, with prefabricated cracks containing different inclinations. It is found that the strain phase segment is not obvious under the SHPB loading and the strain softening stage and residual strength section are almost of non-existence. Under the SHPB loading, the peak strength of the rock specimens is almost the same as that under the static loading, that is, it is in a V shape against the angle of the rocklike specimens and it increases before it decreases. The peak strength of the specimens is the minimum, when the crack obliquity is 45°, and the peak strength of the specimens is very close to that of the complete specimens when the crack obliquity is 0° or 90°. The strength of the rocklike specimens under the SHPB loading increases slowly and the peak strength is less than the peak strength under the static loading under the same condition. The crack angles decrease with the increase of the prefabricated crack inclinations. When the prefabricated crack inclinations are relatively small (0°, 15°), the crack angle is close to 90°. This trend is consistent with the static loading. The SHPB loading process is different from that of the static loading, it lasts about 2s from the beginning of the loading to the complete failure of the rocklike specimens, with an extremely fast speed.

Keywords crack obliquity; rocklike specimens; SHPB; mechanical properties; failure process

(编辑 傅雪)