

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.003

基于颗粒流的节理岩体动态力学特性研究*

罗忆^a, 曾芙翎^b, 王刚^b, 李新平^a, 甘鑫^b

(武汉理工大学 a. 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室; b. 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘要: 基于颗粒流理论, 采用 PFC^{2D} (particle flow code) 建立霍普金森冲击压缩数值模型, 并对试件两端应力平衡状态进行校验。通过不同荷载的冲击压缩仿真试验, 对完整及单节理试件的动态强度、裂纹时空演化特征等进行分析。结果表明: 预制节理破坏了岩石的完整性, 降低了试件抗压强度, 且随冲击荷载的增大, 节理对强度弱化作用趋于明显; 根据裂纹发展规律, 试件破坏分为弹性变形阶段、裂纹启裂阶段、裂纹快速扩展阶段及裂纹缓慢发展阶段; 预制节理影响了裂纹发展特征, 造成试件启裂应力降低, 节理试件更早萌生微观裂纹; 在冲击荷载作用下, 新生裂隙往往起始于预制节理尖端及附近, 且在较低应变率时, 预制 30° 倾角节理试件的裂纹为翼裂纹和共面裂纹, 随加载应变率增大, 反翼裂纹发展愈发明显, 其中翼型裂纹启裂角介于 55° ~ 80°, 反翼裂纹介于 115° ~ 130° 区间。

关键词: 岩石动力学; 节理岩体; 分离式霍普金森压杆; 离散元; 裂纹扩展

中图分类号: O347.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0018-07

Dynamic Mechanical Properties Analysis of Jointed Rock Mass based on Particle Flow Simulation

LUO Yi^a, ZENG Fu-ling^b, WANG Gang^b, LI Xin-ping^a, GAN Xin^b

(a. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering; b. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on the particle flow theory, the numerical model of Hopkinson impact compression is established by the PFC^{2D} (particle flow code), and the stress equilibrium state of both ends of the specimen is verified. Through impact compression simulation tests under different loads, the dynamic strength and spatio-temporal evolution characteristics of cracks of complete and single joint specimens are analyzed. The results show that prefabricated joints destroy the integrity of rock and reduce the compressive strength of specimens. With the increase of impact load, the weakening effect of joints on strength tends to be obvious. According to crack development law, the failure process of specimens is divided into elastic deformation stage, crack initiation stage, crack rapid growth stage and crack slow development stage. Prefabricated joints affect crack development characteristics, resulting in the crack initiation stress reduces and early initiation of micro-cracks in joint specimens. Under impact load, the new cracks tend to start at and near the tip of pre-fabricated joint. When at lower strain rates, the cracks are wing crack and coplanar crack for the pre-fabricated 30 dip joint specimens. With the increase of loading strain rate, the development of counter-wing crack becomes more and more obvious. The crack initiation angle of wing crack is between 55 ~ 80 degree and the counter-wing crack is between 115 ~ 130 degree.

Key words: rock dynamics; jointed rock mass; split Hopkinson pressure bar; discrete element; crack propagation

收稿日期: 2020-07-06

作者简介: 罗忆(1984-), 男, 博士研究生、副教授, 从事岩土施工方面研究, (E-mail) allielaw@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779197, 51774222, 51609183)

随着国家经济的快速发展, 我国进行了大量的岩体项目及资源开发工程。在巷道掘进、矿山开挖

等施工中,机械扰动和爆破冲击等都将对岩体产生强烈冲击作用,因此,岩体的动态强度、破坏演化机制等特性逐渐成为岩土力学界的热门前沿课题之一^[1-3],如 P B Attewell 最早用分离式霍普金森压杆得到了火成岩和沉积岩的黏弹性模型^[4];Olsson 等通过对凝灰岩进行 SHPB 冲击试验,得到了岩石的高应变率本构模型^[5,6];ZHU J B 基于室内试验,建立了 SHPB 数值测试系统^[7],研究了岩石在静、动荷载同时作用下的特性。

众所周知,在实际工程中,岩石结构和构造具有复杂特性,其内部存在着各种节理、裂隙,这些复杂的特性将会严重影响岩石的各种力学特性^[8,9],所以一些学者逐渐开始关注节理等缺陷的对岩体动态力学特性的影响,如 LI Xi-bing 等利用分离式 Hopkinson 压杆试验装置研究了完整花岗岩和含单裂隙大理岩的动态力学特性,发现中等应变率下花岗岩的动态压缩强度与应变率的立方成正比^[10];李地元等将 50 mm × 50 mm 圆柱形大理岩加工含不同裂隙倾角的试件样,在 SHPB 试验平台上进行冲击加载试验^[11],并使用高速摄影仪记录了裂纹扩展以及动态破坏过程。

由于 SHPB 冲击试验受瞬态破坏、环境干扰等诸多因素影响,许多损伤测量技术,如声发射测量,声波测量及 CT 扫描等很难用于岩石冲击试验的实时损伤测量^[12-14],所以已有成果主要集中于宏观力学特性,而对冲击荷载作用下岩石的细观特征及演化规律研究极少。近年来新兴的颗粒流数值分析方法从细观角度出发,突破了连续介质方法在岩体应用中需预设本构模型及难以模拟材料开裂、破碎过程的技术难点。颗粒流离散元采用颗粒构建数值计算模型,反映介质的连续非线性应力-应变关系;同时,通过颗粒间接触发生的破坏,可精确全程捕捉到试件的形态演变及裂纹扩展演化全过程,深入揭示介质的破裂机制,因此颗粒流法逐渐被应用于岩石类材料基本力学特性、破裂特征等问题的研究中^[15-18],如 Jie L 采用颗粒流数值方法建立了含单一预制裂隙岩石试样^[19],研究了准静态加载过程中,集中拉应力、剪切应力对翼型、二次裂纹扩展的影响;刘宁利用 BPM 模型^[20],从细观尺度再现深埋大理岩试验过程中的裂纹扩展和破裂特征。

基于室内力学试验,建立 PFC^{2D} 颗粒流数值模型,从细观角度进一步分析了与材料应变率效应、破碎形态密切相关的裂纹密度及扩展路径等特征,研究内容对正确认识节理岩体在冲击作用下的破坏机理、岩体动载支护工程及评价工程岩体稳定性提供

了一定的依据。

1 SHPB 冲击试验颗粒流数值模型

1.1 PFC 数值模型设计及参数标定

为提高计算效率,同时避免压杆端部自由面反射波的干扰,本文将入射杆长设为 1.0 m,透射杆长为 1.0 m,直径为 0.05 m,并在入射杆、透射杆外端面设置透射边界。压杆颗粒组设置为规则排列模式,以改善应力波传播能力,降低试样端部弥散效应。由于动态冲击实验中,杆件几乎不会产生损伤破坏,故本文将数值模型中压杆颗粒间的粘结设置足够大强度。

制备尺寸为 50 mm × 50 mm 的岩石试件数值模型,颗粒粒径范围为 0.3 ~ 0.5 mm,总数为 10 044 个,粒间的初始接触数目为 23 833 个。试件采用线性平行接触模型^[21,22],可通过接触传递力和力矩,当力达到粘极限时颗粒间粘结破碎,很好的表征岩石特征。试件中预制的单节理采用光滑节理模型^[23,24],类似形成一系列均匀分布在圆柱截面上的弹簧,从而表征一定张开度的节理特性。本文预设节理长 0.013 m,倾角 30°,模型如图 1 所示。通过调整平行黏结模型细观参数,使数值模型试件与物理试样的宏观特征基本一致。最终标定试件宏、细观参数见表 1 及表 2。

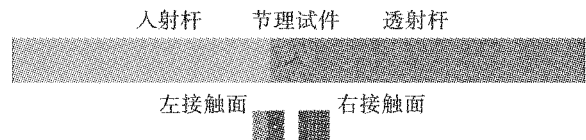


图 1 SHPB 数值模型

Fig. 1 SHPB numerical model

表 1 试件力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the specimens

类别	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
砂岩试件	31.0	14.00	0.24
模型试件	30.8	14.40	0.24

1.2 应力均匀性校验

基于 Bell 和 Meng 等人的试验研究^[25,26],SHPB 试验试样两端应力平衡状态是得到正确试验结果的重要前提。本次研究通过编写的 Fish 函数获取冲击加载过程中试样和压杆接触面颗粒间的接触力,计算公式如下^[27]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{In} &= \frac{\sum_{j=1}^N F_{Ij}}{2r\delta} \\ \sigma_{Tr} &= \frac{\sum_{i=1}^{NT} F_{Ti}}{2r\delta} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： σ_{In} 为试样入射端应力； σ_{Tr} 为试样透射端应力； N 表示试样与入射杆的接触颗粒总数； NT 表示试样与透射杆的接触颗粒总数； F_{Ij} 、 F_{Ti} 表示入射端、透射端接触颗粒的轴向接触力； r 为试件半径； δ 为颗粒厚度。

表2 PFC^{2D}细观参数Table 2 Meso parameters in PFC^{2D}

类别	颗粒半径/m	密度/ (kg·m ⁻³)	接触模量/ GPa	Krat	Pb_ten/ MPa	Pb_coh/ MPa	Pb_fa/°	Sj_kn/ (GPa·m ⁻¹)	Sj_ks/ (GPa·m ⁻¹)	Sj_fric	Sj_ten/ MPa	Sj_coh/ MPa
完整试件	0.3E-3~0.5E-3	2950	28.57	1.8	14.7	10.5	34	/	/	/	/	/
节理试件	0.3E-3~0.5E-3	2950	28.57	1.8	14.7	10.5	30	2E9	2E9	0.35	0	0
杆件	0.5E-3	7995	221	2.5	1E100	1E100	30	/	/	/	/	/

为进一步衡量试样的应力平衡状态,定义试样前后端面应力差与试件中平均应力之比为平衡系数 η ,计算公式为

$$\eta = \frac{2(\sigma_{In} - \sigma_{Tr})}{\sigma_{In} + \sigma_{Tr}} \quad (2)$$

平衡因子的值越接近0,表明试样两端应力平衡状态越好,试样应力均匀性越好。图2为对完整试件进行冲击加载获取的应力监测时程曲线,在45 μ s后,试件透射端应力波与入射端应力波重合,试样内部应力分布近似均匀,平衡系数 η 趋于零并仅在一个较小范围内波动,即模型满足宏观平衡条件。

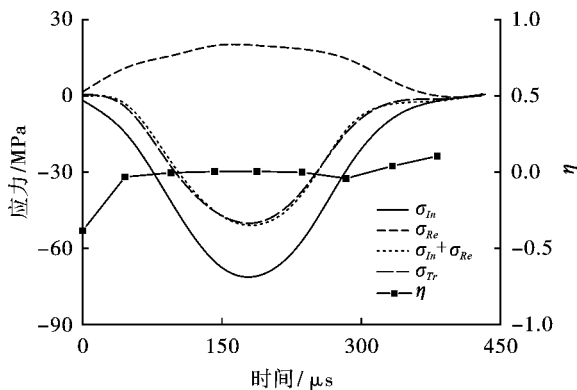


图2 应力平衡检验

Fig. 2 Dynamic stress equilibrium monitoring results

2 节理试样在冲击荷载下的细观力学响应和分析

为分析完整及单节理试件的动态强度、裂纹时空演化特征,在入射杆端部区域施加周期为400 μ s,冲击应力幅值分别为35 MPa、45 MPa、55 MPa、65 MPa、75 MPa的半正弦应力波,以模拟霍布金森

冲击压缩试验中子弹对入射杆的不同冲击作用,其中完整试件编号C1~C5,节理试件编号J1~J5。

2.1 节理对模型裂纹发展的影响

在PFC^{2D}颗粒流仿真模拟中,根据受力特征,颗粒间粘结的破坏分为剪切破坏和拉伸破坏,因此裂隙可分为剪切裂隙和拉伸裂隙,这里以冲击荷载为55 MPa的完整试件C3和节理试件J3裂纹发展为例进行分析。

由图3可指观察到裂纹数目增长经历了无裂纹、缓慢萌生、快速增长、基本稳定阶段,具有明显规律性,据此将完整试件裂纹扩展分为弹性变形阶段、裂纹启裂阶段、裂纹快速扩展阶段和裂纹缓慢发展阶段。

弹性变形阶段(OA):391 μ s至520 μ s期间,试件处于弹性变形,内部未产生裂纹。

裂纹启裂阶段(AB): $t = 520 \mu$ s时裂纹启裂,并较快扩展,裂纹增长曲线呈下凹型非线性特征,其对应的应力曲线为启裂应力到峰值应力附近阶段。此时启裂强度是22 MPa,为完整试件的动态抗压强度的52%;从裂隙数量变化曲线可观察到,此阶段剪切裂纹数目大于拉伸裂纹数目,试件内部损伤主要为剪切作用。

裂纹快速扩展阶段(BC): $t = 618 \mu$ s时临近峰值应力,裂纹数目呈线性快速增长趋势,拉伸裂纹迅速增加并超过剪切裂纹数量,试件进入快速破坏阶段。此时细观裂纹密度的增大提高了岩石力学性能的非线性特征,试件中的自由表面不断增加,从而降低了结构承受荷载的能力。

裂纹缓慢发展阶段(CD):709 μ s之后,裂纹数目增加较慢,最终产生3831个裂纹,其中拉伸裂纹约占76%,剪切裂纹占24%,试件在拉伸裂隙主导作用下产生张拉破坏。

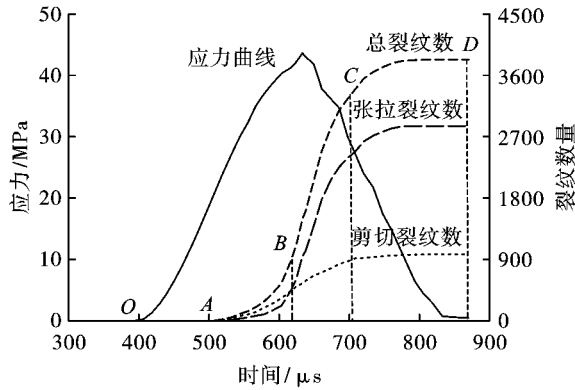


图3 完整试件裂纹数目及应力曲线图

Fig. 3 Crack number and stress curve of intact specimen

如图4,预制单节理试件破坏过程仍分为弹性变形阶段、裂纹启裂阶段、裂纹快速扩展阶段和裂纹数目稳定阶段4个阶段,其裂纹扩展规律与完整试件的类似但略有不同。

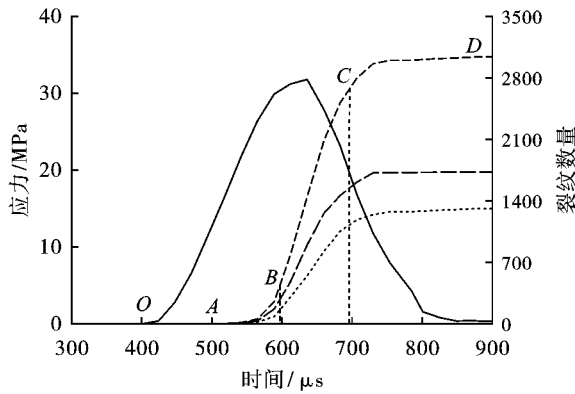


图4 节理试件裂纹数目及应力曲线图

Fig. 4 Crack number and stress curve of joint specimen

弹性变形阶段(OA):408 μs 至 527 s 期间,试件处于弹性变形,内部未产生裂纹。

裂纹启裂阶段(AB):在 $t = 528 \mu s$ 时,裂纹启裂并初步扩展,增长曲线呈下凹型非线性特征,其对应的应力曲线为启裂应力到峰值应力附近的曲线阶段。此时启裂强度为 14 MPa,仅为完整试件动态抗压强度的 34%,即预制裂隙减弱了试件启裂时的应力,促使其更早的萌生裂纹;从裂隙数量变化曲线可看到,此阶段拉伸裂纹数目大于剪切裂纹数目,试件内部损伤主要为预制节理尖端的张拉作用。

裂纹快速扩展阶段(BC): $t = 598 \mu s$ 临近峰值应力,裂纹快速扩展。对应应力曲线峰值应力附近的快速破坏阶段。此阶段剪切裂隙与拉伸裂纹数目呈线性快速增长,细观裂纹密度的增大增强了岩石非线性特征,试件中的自由表面不断增加,从而降低了结构传递荷载的能力,产生强度劣化的现象。

裂纹缓慢扩展阶段(CD):在 $692 \mu s$ 之后,裂纹数目增加缓慢,最终产生 3040 个裂纹,此时拉伸裂纹约占 59%,剪切裂纹占 41%,试件在拉伸和剪切作用下瞬间破坏。

2.2 节理对模型动态强度的影响

当完整试件的冲击载荷由 35 Pa 增加到 75 MPa 时,试件强度分别由 34.1 MPa 增加到 49.1 MPa(表3),最大达到原来的 1.44 倍;对于单节理试件,当冲击载荷由 35 MPa 增加到 75 MPa 时,试件强度分别由 27.5 MPa 增加到 34.8 MPa,最大达到原来的 1.19 倍,即完整试件和节理试件的动强度均随着冲击荷载的增加而增大(如图5)。对于上述现象,从裂纹劣化角度分析,即随着冲击荷载的增加,内部产生大量新生裂纹,这些新生裂纹也参与岩石的破坏,但暂时来不及进一步扩展或贯通,从而试件出现明显的变形滞后,动态强度呈增大趋势。

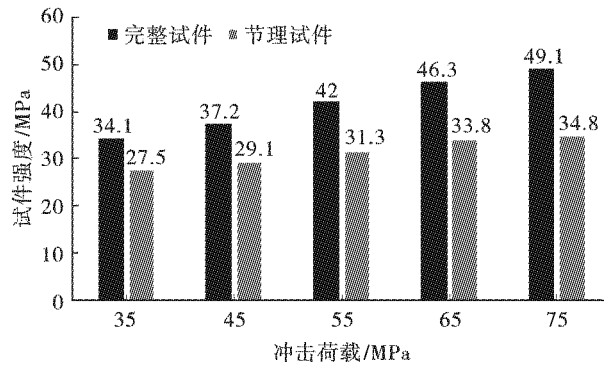


图5 不同冲击荷载下试件强度

Fig. 5 Strength of the specimens under different impact loads

在同等冲击荷载作用下,完整试件强度为 34.1 ~ 49.1 MPa,而预制裂隙试件强度明显偏小,为 27.5 ~ 34.8 MPa,即预制节理增加,节理对强度弱化作用规律,定义强度比例系数 γ

$$\gamma = \frac{\sigma_{joint}}{\sigma_{int}} \quad (3)$$

式中: σ_{joint} 为节理试件强度; σ_{int} 为完整试件强度。

如图6所示,随着冲击荷载强度的增加, γ 分别为 0.806、0.782、0.745、0.730、0.709,呈逐渐减小趋势,即表明随着冲击荷载的增大,节理对试件动态强度的弱化作用趋于明显。对应到实际工程中,说明节理等缺陷破坏了岩体完整性,随外界扰动强度的增加,这种类缺陷造成的强度弱化特征会逐步放大,可能造成严重工程事故。见表3。

2.3 试样破坏形态分析

分别对完整试件及单节理试件进行了冲击荷载

为 35 MPa、45 MPa、55 MPa、65 MPa、75 MPa 五种加载条件下冲击压缩实验,试件破坏图如图 7 所示。

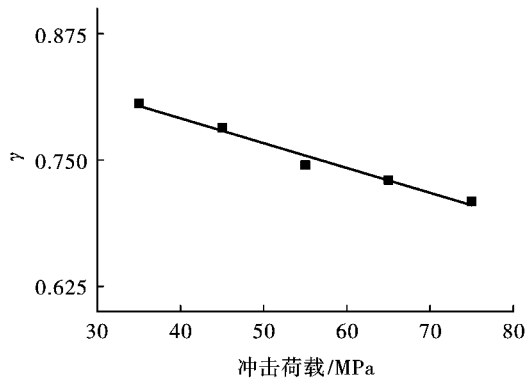


图 6 强度因子 γ 与冲击荷载的关系图

Fig. 6 Relationship between the intensity factor γ and the impact load

表 3 试件动态强度汇总表

Table 3 Statistics of dynamic strength of specimens

冲击应力 幅值/MPa	完整试件 强度/MPa	节理试件 强度/MPa
35	34.1	27.5
45	37.2	29.1
55	42.0	31.3
65	46.3	33.8
75	49.1	34.8

对于完整试件如图 7(a),在冲击荷载为 35 MPa($\dot{\epsilon} = 15.2 \text{ s}^{-1}$)时,试件局部产生拉剪损伤,但试件并未破坏失效;随着冲击荷载的增加,微裂纹迅速激活,裂纹网络发生根本变化而形成细观主裂纹,产生张拉劈裂破坏;当冲击荷载为 75 MPa($\dot{\epsilon} = 86.7 \text{ s}^{-1}$),更多微裂纹被激活进而加入到破碎过程,

裂隙、缺陷会向不同的方向和层次发展,试件破坏模式由劈裂拉伸破坏模式向压碎破坏模式发展,破碎的块度更小。

对于节理试件如图 7(b)所示,预制裂纹明显影响岩石裂纹分布及破碎形态,裂纹在裂隙的尖端启裂,在冲击荷载为 35 MPa($\dot{\epsilon} = 21.6 \text{ s}^{-1}$)时,由翼裂纹、共面裂纹扩展贯通形成宏观自由表面,伴随多层次交叉裂纹网格,产生一定数目的破碎颗粒;当冲击荷载增大,应变率达 147.2 s^{-1} 时,产生翼裂纹、反翼裂纹及共面裂纹,裂纹扩展贯通导致试件破坏。裂纹及碎块统计结果见表 4。

为进一步探究冲击荷载是否影响节理岩体反翼裂纹的生成,补充低冲击荷载模拟试验,设计幅值为 28 MPa、32 MPa,应力波周期 T 为 $400 \mu\text{s}$ 的半正弦应力波加载,对未发生失效破坏试件,采用相同强度的荷载多次冲击作用致试件破坏或达到 4 次冲击设计值为止。如图 8(a),冲击荷载为 32 MPa,在初次冲击荷载作用下,预制裂纹端部产生拉伸翼裂纹,冲击四次后试件破坏失效,翼裂纹及其共面裂纹扩展贯通最终导致试件破坏;采用冲击荷载幅值为 28 MPa,试件冲击四次未发生破坏失效(8(b)),由于基本未产生岩石碎块(屑),所以图中未列举碎块(屑)形态图。从图中可以观察到试件启裂及初步扩展裂纹的形态,其与采用 32 MPa 冲击荷载时极其相似,沿预制裂隙端部位置启裂,然后向岩石端部逐渐扩展,形成翼状及共面形态裂纹。我们可以发现在预制节理条件不变的条件下,虽然冲击荷载发生改变,但翼裂纹、反翼裂纹启裂角类似,翼型裂纹 $55^\circ \sim 80^\circ$,反翼裂纹 $115^\circ \sim 130^\circ$ (图 9 为典型裂纹素描图)。

表 4 试件碎块、裂纹数量统计结果

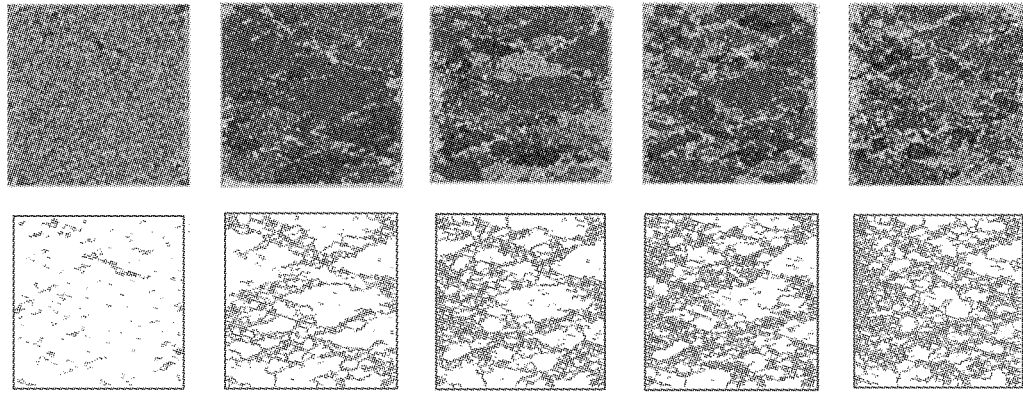
Table 4 Statistics of the number of cracks and fragments

冲击应力 幅值/MPa	完整试件		节理试件	
	裂纹个数/个	碎块个数/个	裂纹个数/个	碎块个数/个
35	829	48	774	46
45	2812	204	1498	143
55	3831	316	3040	241
65	4397	392	3700	311
75	5178	484	4093	353

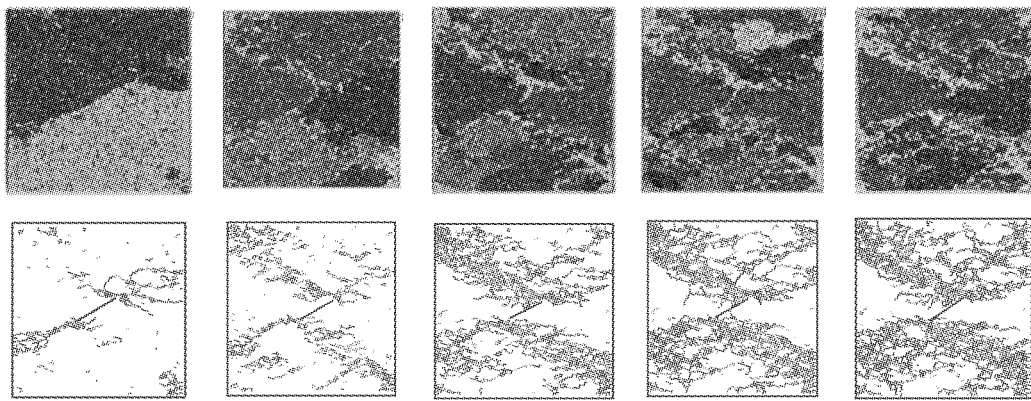
3 结论

基于分离式霍普金森压杆(SHPB)室内冲击压缩试验,建立 PFC2D 颗粒流数值模型,从细观角进

一步分析与材料“率”效应和破碎形态密切相关的裂纹密度、扩展路径等特征,研究了冲击荷载作用下试件的动态损伤与破坏过程,主要结论如下:



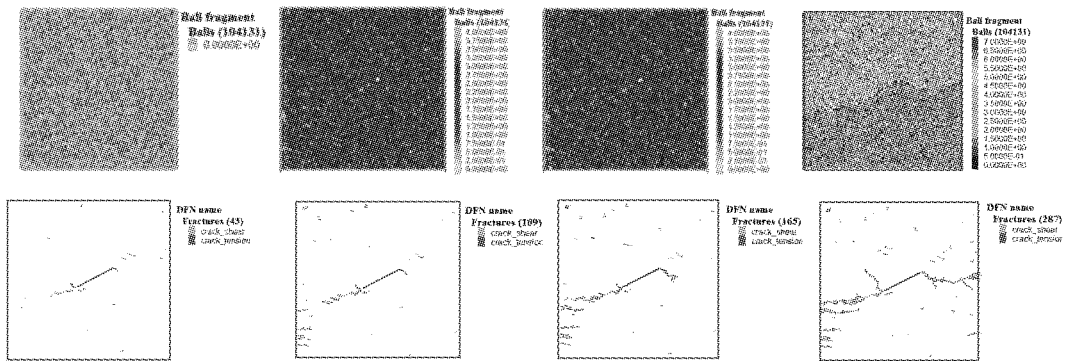
(a) 完整试件破坏图 (冲击荷载35, 45, 55, 65, 75 MPa)
 (a) Failure pattern of the intact specimens (impact load 35, 45, 55, 65, 75 MPa)



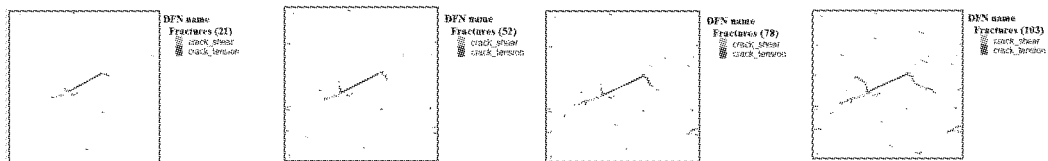
(b) 单节理岩体破坏图 (冲击荷载35, 45, 55, 65, 75 MPa)
 (b) Failure pattern of the joint specimens (impact load 35, 45, 55, 65, 75 MPa)

图 7 不同冲击压力下试件破坏形态图

Fig. 7 Failure pattern of specimens under different impact loads



(a) 冲击应力波 32 MPa 试件破坏图 (1~4次冲击)
 (a) Failure pattern of specimen with 32MPa impact load (1~4 times)



(b) 冲击应力波 28 MPa 试件破坏图 (1~4次冲击)
 (b) Failure pattern of specimen with 28MPa impact load (1~4 times)

图 8 低应变率冲击试验

Fig. 8 Low strain rate impact test

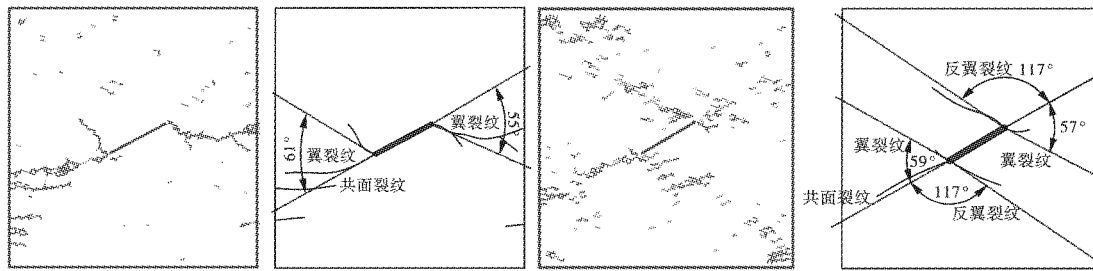


图 9 典型裂纹素描图

Fig. 9 Typical crack sketch

(1) 预制节理破坏了岩石的完整性, 岩石抗压强度变小, 且随着冲击荷载的增大, 节理对强度弱化作用更加明显。

(2) 根据裂纹发展规律, 试件破坏分为弹性变形阶段、裂纹启裂阶段、裂纹快速扩展阶段及裂纹缓慢发展阶段。

(3) 预制节理极大影响了试件破坏特征, 相对于完整试件随机位置启裂特征, 预制节理试件新生裂隙主要起始于节理尖端及附近, 发展路径较为清晰, 试件破碎的块度更大、数量更少。

(4) 裂纹扩展及破坏模式受应变率影响, 随着加载应变率增大, 裂纹扩展由翼裂纹、共面裂纹扩展贯通的破坏模式, 逐渐转变成由翼裂纹、反翼裂纹、共面裂纹扩展贯通的破坏模式, 且反翼裂纹发展愈发明显。

参考文献 (References)

- [1] ALI S, KAMRAN E, BIBHU M. Degradation of a discrete infilled joint shear strength subjected to repeated blast-induced vibrations[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(4): 23-33.
- [2] MEGLIS I L, CHOW T M, MARTIN C D, et al. Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(1): 25-34.
- [3] HAMID N H, ANUAR S A, AWANG H, et al. Experimental study on seismic behavior of repaired tunnel form building under cyclic loading[J]. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2018, 19(1): 1-12.
- [4] ATTEWELL P B. Response of rocks to high velocity impact[J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 1962, 71: 705-24.
- [5] OLSSON W A. The compressive strength of tuff as a function of strain rate from 10⁻⁶ to 103/sec[C]//*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Pergamon, 1991, 28(1): 115-118.
- [6] CHOCRON S, DANNEMANN K A, NICHOLLS A, et al. Apache Leap tuff rock: High strain rate characterization and support simulations [C]//*EURODYMAT 2006 8th International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*: [S. l.]. *Journal de Physique IV France*, 2006, 134: 565-570.
- [7] ZHU J B, LIAO Z Y, TANG C A. Numerical SHPB tests of rocks under combined static and dynamic loading conditions with application to dynamic behavior of rocks under in situ stresses[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(10): 3935-3946.
- [8] ZHANG X, JIANG Y, WANG G, et al. Mechanism of shear deformation, failure and energy dissipation of artificial rock joint in terms of physical and numerical consideration[J]. *Geosciences Journal*, 2018, 12(1): 1-11.
- [9] 李海波, 刘 博, 冯海鹏, 等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. *岩土力学*, 2008(7): 1741-1746.
- [9] LI Hai-bo, LIU Bo, FENG Hai-beng, et al. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008(7): 1741-1746. (in Chinese)
- [10] LI X B, ZHOU T, LI D Y. Dynamic strength and fracturing behavior of single-flawed prismatic marble specimens under impact loading with a split Hopkinson pressure bar [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 50(1): 1-16.
- [11] 李地元, 韩震宇, 孙小磊, 等. 含预制裂隙大理岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(12): 2872-2883.
- [11] LI Di-yuan, HAN Zheng-yu, SUN Xiao-lei, et al. Characteristics of dynamic failure of marble with artificial flaws under split Hopkinson pressure bar tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(12): 2872-2883. (in Chinese)
- [12] LIU X, LI X, HONG L, YIN T, RAO M. Acoustic emission characteristics of rock under impact loading [J]. *Cent South Univ*, 2015, 22: 3571-7.