

含非贯通裂隙砂岩的动力破坏特性研究

赵国彦, 李振阳, 吴 浩, 王恩杰, 刘雷磊

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 为研究动载作用下非贯通裂隙对岩石破坏特性的影响, 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)对含不同裂隙数量及深度非贯通裂隙砂岩进行冲击试验, 并基于分形理论和能量耗散原理分析其动力破坏特性。研究结果表明, 动态峰值应力随裂隙数量及深度变化情况较复杂; 峰值应变随裂隙数量增加而增加, 随裂隙深度增加先增大后减小; 动态弹性模量随裂隙数量增加先增加后减小, 随裂隙深度增加而减小; 不同工况试样的破坏模式分为张应变破坏、张应变-剪切复合破坏和压碎破坏 3 种, 且裂隙数量对破坏模式的影响较裂隙深度大; 试样破坏后的分形维数、单位体积耗散能和能量吸收率均随裂隙数量及深度的增加而增加, 且分形维数与单位体积耗散能和能量吸收率均近似正线性关系。

关 键 词: 岩石动力学; 非贯通裂隙; 霍普金森压杆(SHPB); 分形维数; 能量耗散原理

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 增 1-0073-09

Dynamic failure characteristics of sandstone with non-penetrating cracks

ZHAO Guo-yan, LI Zhen-yang, WU Hao, WANG En-jie, LIU Lei-lei

(School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: In order to study the influence of non-penetrating cracks on rock failure characteristics under dynamic loading, splitting Hopkinson pressure bar(SHPB) is used to conduct impact tests on sandstones with different number and developed depth of non-penetrating cracks. The dynamic failure characteristics are analyzed based on fractal theory and energy dissipation principle. The results show that dynamic peak stress is more complicated in different number and developed depth of cracks. Peak strain increases with the increase in the number of cracks, and it increases at first and then decreases with the increase in the developed depth of cracks. Dynamic elastic modulus increases at first and then decreases with the increase in the number of cracks, but it decreases with the increase in the developed depth of cracks. The failure modes of specimens under different working conditions are mainly divided into three types, i.e. tension strain failure, tension strain-shear composite failure and crushing failure. The number of cracks has more significant influence on the failure mode than the developed depth of cracks. The fractal dimension, energy dissipation per unit volume and energy absorption rate of the rupturing rocks increase with the increase of the number and developed depth of cracks. Moreover, the fractal dimension and dissipation energy per unit volume are both approximately linear correlated with energy absorption rate.

Keywords: rock dynamics; non-penetrating crack; splitting Hopkinson pressure bar(SHPB); fractal dimension; energy dissipation principle

1 引 言

节理裂隙岩体是岩土工程中常遇到的一类复杂岩体, 岩石的破裂与失稳通常是由其内部及表面非连续的裂隙面发育、扩展进而贯通引起的^[1]。在岩土工程中常见的机械冲击、工程爆破等动力扰动

因素使岩体变形破坏表现得更为剧烈且模式更加复杂^[2], 开展节理岩体的力学破坏特性研究对岩土工程的稳定性具有重要意义。

国内外学者对节理裂隙岩体的裂纹扩展、破坏特性及破坏模式进行了大量研究, 并取得了一定的成效。在静载方面, 吕小波等^[3]运用成像系统, 对

收稿日期: 2018-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(No.51774321); 中南大学研究生自主探索创新项目(No.2018zzts755); 国家重点研发计划项目(No.2018YFC0604606)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51774321), the Postgraduate Research and Innovation Foundation of Central South University(2018zzts755), and the National Key R&D Program of China(2018YFC0604606)。

第一作者简介: 赵国彦, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事金属矿开采和岩石力学研究。E-mail: gy.zhao@263.net

单节理花岗岩单轴压缩过程采集照片, 分析了其破坏各阶段应力场特征。蒋明镜等^[4]基于离散元法, 分析了含预制双节理岩石在单轴压缩下的裂纹演化机理。Yang 等^[5]分析了裂隙角对含复合缺陷砂岩试件强度和变形行为的影响。Park 等^[6]、Wong 等^[7]研究了含 2 条和多条平行裂纹的类岩材料在单轴压缩下的力学特性及破坏模式, 发现多裂隙试件的起裂方式和破坏模式与含 2 条裂隙试件大致相同。滕春凯等^[8]在大理岩平板材料中用三点弯曲法研究了非穿透裂纹的始裂和扩展机制, 并在理论上进行初步探讨。Wong 等^[9]在单轴压缩条件下大理石非贯通裂隙 (平板状试样裂隙深度与试样厚度的比值 $d/t < 1/3$) 扩展试验中首次观察到反翼裂隙扩展的破裂模式。Fujii 等^[10]开展表面预制倾斜裂隙的砂岩以及水泥砂浆的试验和数值模拟研究发现, 裂纹扩展方向与砂岩和水泥砂浆含量有关。在动载方面, Li 等^[11]利用霍普金森杆(SHPB)加载试验装置, 分析了不同倾角和长度的预制裂纹对岩石动态力学性能和破坏模式的影响, 发现含裂隙大理岩试样破坏模式随裂隙倾角增大而由完整试样的劈裂拉伸破坏向含裂隙试样的剪切破坏转变。Zhou 等^[12]用 LS-DYNA 对含预制裂隙圆盘试样的动态力学破坏特征进行数值模拟研究发现, 裂纹总是沿缺陷周边起裂, 并沿加载方向呈劈裂破坏。岑夺丰等^[13]基于平行黏结模型, 分析了高应变率下单裂隙岩样的裂纹扩展模式。刘红岩等^[14]采用相似材料, 分析了不同裂隙产状模型的动态强度及破坏模式。Dai 等^[15]基于 CCNBD 法对岩石动态断裂参数及断裂韧度等进行了分析。李地元等^[16-17]研究了动载作用下不同裂隙倾角砂岩、千枚岩的动态力学破坏特性, 发现随裂隙倾角增大, 动态力学参数先减小后增大, 且破坏模式随裂隙倾角变化有一定差异。

在节理岩体力学特性方面的研究大多针对含贯通裂隙的岩体, 对于动态荷载下含非贯通裂隙岩体力学破坏特性的研究较少。一些实际工程诸如地下硐室边墙、地下矿采场的矿柱、边坡等工程岩体中往往存在大量非贯通裂隙, 在不同开采中段爆破作业、落矿、矿震及机械凿岩等强烈动力扰动作用下含非贯通裂隙岩体的裂纹扩展贯通、破坏模式及断裂机制与含贯通裂隙岩体有本质的差异^[18-19], 因此有必要对含非贯通裂隙岩体的动力破坏特性进行研究。本次利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置, 对含不同裂隙数量和深度非贯通裂隙砂岩进行冲击试验, 研究了冲击荷载作用下含非贯通裂隙砂岩的动力破坏特性。

2 试验设计

2.1 试样制备

本次试验材料选取天然节理较少、完整性较好的山东黄砂岩, 主要矿物成分为石英和长石, 含有少量铁元素, 整体呈致密的粒状构造, 粒径较均匀, 表面主要为浅黄色、黄色和深黄色。试样加工形状高 50 mm、直径为 50 mm 圆柱形。试验前对每个试样进行纵波波速测试和密度测试, 选用波速及密度较为接近的试件进行试验, 先采用电液伺服万能试验机对完整岩石进行了静态单轴压缩试验, 得到岩石试样的基本静态力学参数, 见表 1。

表 1 完整砂岩试样静态力学参数

Table 1 Static mechanical parameters of complete sandstone samples

单轴抗压强度 /MPa	泊松比	弹性模量 /GPa	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa
44.59	0.26	5.57	61.36	7.68

在天然含水状态下试样纵波波速约为 1 778 m/s, 平均密度为 2.23 g/cm³。用直径为 40 mm 圆形切割刀具在试样表面预制出 1~4 条 4 种非贯通裂隙, 预制裂隙面间距为 0.8 mm, 预制裂隙长度沿试样高度方向贯穿, 切割方向沿直径方向, 切入深度分为 5、10、15 mm 三种, 试件制备符合 ISRM^[20]相关要求。共制备试样 26 个, 其中完整无裂隙试样 2 个, 含不同裂隙数量及裂隙深度试样 (12 种工况) 24 个, 部分试样见图 1。



图 1 含非贯通裂隙的砂岩试样

Fig.1 Sandstone specimens with non-penetrating cracks

2.2 试验设备

采用中南大学 50 mm 杆径分离式霍普金森压杆试验平台进行冲击试验, 试验系统见图 2。SHPB 压杆材质为 40Cr 合金钢, 密度为 7.810 t/m³, 泊松比为 0.28, 动态弹性模量为 250 GPa, 纵波速度为 5 410 m/s, 入射杆长 2.0 m, 透射杆长为 1.5 m, 直径为 50 mm。子弹为线性变化的“纺锤型”冲头, 产

生半正弦应力波，由压杆上应变片记录的电压信号转算，数据采集处理系统由超动态应变仪、示波记录仪和计算机组成，试样的加载方向如图 3 所示。



图 2 SHPB 试验装置及试验系统

Fig.2 SHPB device and experimental system

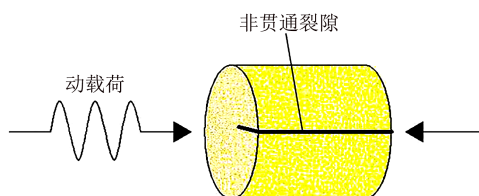


图 3 砂岩试样加载方向

Fig.3 Loading direction of sandstone specimen

2.3 试验原理与方法

冲击试验中采用冲击气压（0.75 MPa）对完整试样和含非贯通裂隙试样进行试验，为减少压杆与试件接触面之间的摩擦效应，在试件的两端面上均匀涂抹了用润滑油和石墨配制的润滑剂。试验中通过测量入射杆和透射杆上应变片的电压，可以间接地计算出试件的应力、应变率和应变等动力学参数。

试样 σ - ε - $\dot{\varepsilon}$ 关系测定的前提条件是一维应力波传播和应力均匀。由一维应力波传播理论，可得试样的平均应力、应变和应变率的计算公式^[21]：

$$\sigma(t) = [\sigma_I(t) - \sigma_R(t) + \sigma_T(t)] A_e / 2A_s \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\rho_e C_e L_s} \int_0^t [\sigma_I(t) + \sigma_R(t) - \sigma_T(t)] dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{1}{\rho_e C_e L_s} [\sigma_I(t) + \sigma_R(t) - \sigma_T(t)] \quad (3)$$

式中： A_e 、 A_s 分别为压杆和试样的横截面积； $\sigma_I(t)$ 、 $\sigma_R(t)$ 、 $\sigma_T(t)$ 分别为 t 时刻的入射应力、反射应力、透射应力； L_s 为试样的长度； $\rho_e C_e$ 为压杆的波阻抗。

根据一维弹性波理论，得到入射波、反射波和透射波的能量表达式分别为

$$W_I(t) = \frac{A_e}{C_e \rho_e} \int_0^t \sigma_I^2(t) dt \quad (4)$$

$$W_R(t) = \frac{A_e}{C_e \rho_e} \int_0^t \sigma_R^2(t) dt \quad (5)$$

$$W_T(t) = \frac{A_e}{C_e \rho_e} \int_0^t \sigma_T^2(t) dt \quad (6)$$

式中： $W_I(t)$ 、 $W_R(t)$ 、 $W_T(t)$ 分别为入射能量、反射能量和透射能量。

根据能量守恒原理得到试验过程中试件总耗散能 $W_S(t)$ ：

$$W_S(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t) \quad (7)$$

3 动力特性与破坏模式

3.1 动态力学参数分析

通过数据处理得到了完整砂岩试样两次重复试验的平均动态峰值应力、平均峰值应变及平均动态弹性模量，结果见表 2。冲击荷载作用下不同裂隙数量和深度试样两次重复试验的平均动态峰值应力如图 4 所示。

表 2 完整试样动态力学参数

Table 2 Dynamic mechanical parameters of complete specimens

动态峰值应力/MPa	峰值应变/ 10^{-2}	动态弹性模量/GPa
98.95	1.51	15.78

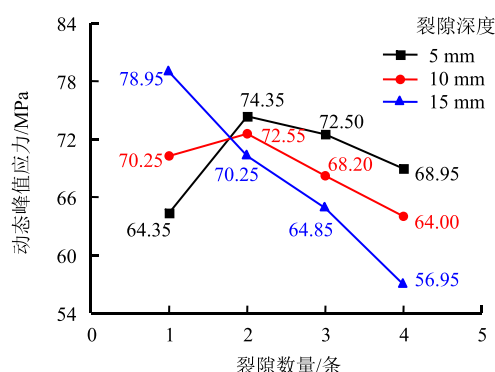


图 4 动态峰值应力与裂隙数量及深度关系（单位：MPa）

Fig.4 Relationships of dynamic peak stress and the number, developed depth of cracks (unit: MPa)

对比表 2 和图 4 可知，含非贯通裂隙试样的动态峰值应力均小于完整试样的动态峰值应力，当裂

隙深度为 5 mm 和 10 mm 时, 试样动态峰值应力随裂隙数量先增大后减小, 裂隙数量为 2 条时动态峰值应力最大; 当裂隙深度为 15 mm 时动态峰值应力随裂隙数量逐渐减小, 当裂隙数量为 1 条时, 动态峰值应力随裂隙深度的增加而增加。这与试样的破坏模式有关, 当裂隙数量为 1 条时试样主要为单裂隙张应变剥落破坏, 随裂隙深度的增加剥落厚度逐渐增加, 动态峰值应力随之增加, 当裂隙数量为 2 条以上时多裂隙对试样的损伤效应愈加显著, 动态峰值应力随裂隙深度增加而减小。

将动态峰值应力对应的应变称为峰值应变, 不同裂隙数量和深度试样两次重复试验的平均峰值应变如图 5 所示。对比表 2 和图 5 可知, 含非贯通裂隙试样的峰值应变均大于完整试样的峰值应变; 当裂隙深度相同时峰值应变随裂隙数量的增加而增大; 当裂隙数量一定时峰值应变随裂隙深度的增加先增大后减小, 总体表现为裂隙深度为 10 mm 时试样峰值应变最大, 其次为裂隙深度 15 mm 时裂隙深度 5 mm 时峰值应变最小。

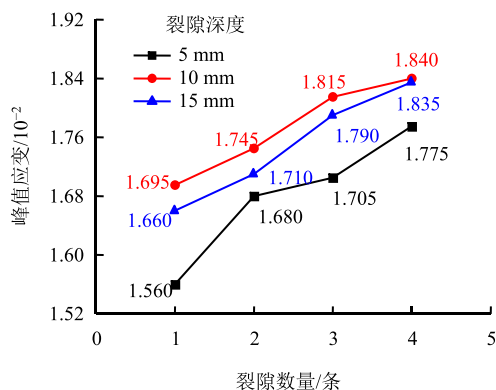


图 5 峰值应变与裂隙数量及深度关系

Fig.5 Relationships among peak strain, the number and depth of cracks

将应力-应变曲线直线段部分的斜率称为动态弹性模量, 不同裂隙数量和裂隙深度试样两次重复试验的平均动态弹性模量如图 6 所示。

对比表 2 和图 6 可知, 含非贯通裂隙试样的动态弹性模量均小于完整试样的动态弹性模量; 当裂隙深度相同时动态弹性模量随裂隙数量增加先增大后减小; 当裂隙数量一定时动态弹性模量随裂隙深度增加逐渐减小, 裂隙数量为 2 条时动态弹性模量最大。

3.2 破坏模式分析

冲击试验中部分试样破坏形态见表 3。

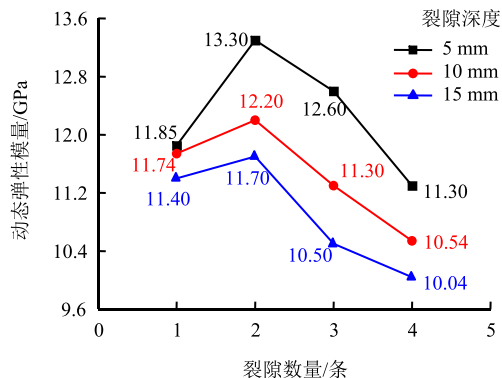


图 6 动态弹性模量与裂隙数量和深度关系 (单位: GPa)

Fig.6 Relationships among dynamic elastic modulus, the number and developed depth of cracks (unit: GPa)

表 3 不同裂隙数量及深度试样的破坏形态和模式

Table 3 Failure patterns and modes of samples with different crack number and developed depth

类别	裂隙深度/mm		
	5	10	15
1 条裂隙			
破坏模式	张应变破坏	张应变破坏	张应变破坏
2 条裂隙			
破坏模式	张应变破坏	张应变破坏	张应变-剪切复合破坏
3 条裂隙			
破坏模式	张应变-剪切复合破坏	张应变-剪切复合破坏	压碎破坏
4 条裂隙			
破坏模式	压碎破坏	压碎破坏	压碎破坏
完整试样			
破坏模式	劈裂破坏		

由表 3 可见, 试样破坏形态随裂隙数量及深度不同变化较大。当完整无裂隙时试样的破坏模式主要为劈裂破坏, 当裂隙数量为 1 条和 2 条时冲击后试样破坏形态主要表现为试样周边沿预制裂隙附近剥落破碎, 试样中心柱状大块保留较完整。这是由于当裂隙数量较少时, 试样初始损伤较小, 在冲击荷载下预制裂隙附近微裂纹较易发生活化、扩展, 当入射应力波刚到达试样表面时, 由于边界效应的存在, 试样两个端面外沿处的有效应力值最大, 率先达到试样的最大拉应力, 沿端面边缘薄弱区域(预制裂隙处)发生破坏, 随后破坏将向试件外沿面中部和内部同时扩展, 宏观表现为破坏裂纹起始于试样的非贯通裂隙, 向周边剥落, 剥落厚度约为非贯通裂隙深度, 这种破坏模式称为张应变破坏^[22]。

当裂隙数量为 2 条且深度为 15 mm 和裂隙数量为 3 条且深度 5、10 mm 时, 岩石碎块中存在锥形大块, 说明此时试样除存在张应变剥落破坏外, 试样中心也发生了剪切破坏。这是由于随着裂隙数量和深度的增加, 预制裂隙附近更多的微裂纹在冲击荷载作用下发生活化扩展, 造成剥落破坏量增加, 致使试样中心的较完整大块的损伤度增加, 到达某一阈值时冲击荷载即可使其中间最薄弱位置发生剪切破坏, 这种破坏模式称为张应变-剪切复合破坏。

当裂隙数量由 2 条增加至 3 条时冲击试验后试样总体破碎程度明显增加, 整体破坏形态主要表现为块度较小、数量较多的碎块。当裂隙数量继续增加至 4 条时试样的破坏形态仍为小碎块, 但碎块尺寸进一步减小, 考虑是由于随着裂隙数量的增加, 试样初始损伤程度不断增加, 非贯通裂隙之间的间距减小, 每条裂隙处都产生应力集中现象, 试样破坏过程中导致原生微裂纹相互作用的距离减小从而更容易发生相互兼并贯通, 使整个试样内部大量微裂纹共同作用, 宏观表现为试样整体被压碎为很多小块, 这种破坏模式称为压碎破坏。

当试样裂隙数量为 1 条和 4 条且裂隙深度从 5 mm 增加至 10、15 mm 时冲击试验后试样的破坏模式基本一致, 只是试样破坏后的块度随裂隙深度的增加逐渐减小, 且破坏程度逐渐增加。这是由于随裂隙深度的增加, 预制裂隙对试样的初始损伤程度加大, 使试样内部更多微裂纹在冲击荷载下被激活, 发生扩展贯通。当裂隙数量为 2、3 条时, 随着裂隙数量和深度的增加, 试样的破坏模式发生了由张应变破坏到张应变-剪切复合破坏进而压碎破坏的变化, 说明在动载作用下裂隙数量和裂隙深度对试样的破坏模式的影响并非各自独立的, 存在一定的交

互作用, 两者对试样的联合初始损伤程度达到一定阈值, 即会导致破坏模式发生变化。从完整试样到含 4 条 15 mm 深裂隙试样破坏模式的总体演化情况看, 裂隙数量对试样破坏模式的影响较裂隙深度更大。

文献[16]中完整试样和含倾角 90° 贯通裂隙试样在动荷载下的破坏模式均为劈裂拉伸破坏, 其中完整试样的破坏模式与本文结果基本一致, 但含 90° 贯通裂隙试样的破坏模式(劈裂拉伸破坏)与本文中含非贯通裂隙试样的破坏模式(多种破坏模式)差异较大, 说明非贯通裂隙与穿透裂隙的动力破坏特性存在显著差异。

4 分形与能量耗散特征分析

4.1 分形维数计算

基于质量-频率关系度量可以得到岩石冲击破碎块度的分布方程^[23]:

$$Y = M(x) / M_T = \left(\frac{x}{x_m} \right)^{3-D_b} \quad (8)$$

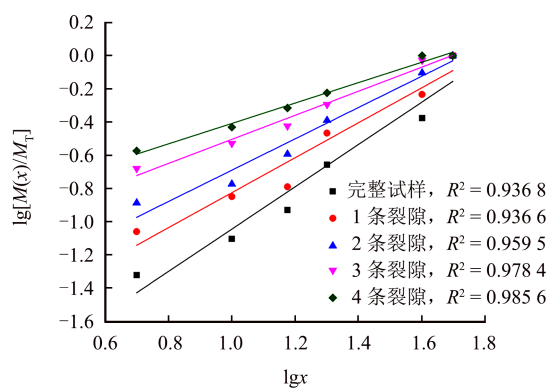
式中: x 为颗粒的粒度; x_m 为破碎岩块的最大尺寸; D_b 为破碎块度分布的分形维数; $M(x)$ 为尺寸小于 x 的碎块累计质量; M_T 为碎块的总质量。

对式 (8) 两边取对数可得

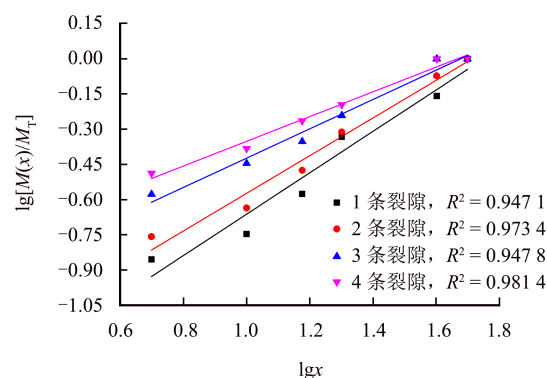
$$\lg Y = \lg [M(x) / M_T] = (3 - D_b) \lg x - (3 - D_b) \lg x_m \quad (9)$$

由式 (9) 可知, $(3 - D_b)$ 即为 $\lg (M(x) / M_T) - \lg x$ 坐标中拟合直线的斜率。

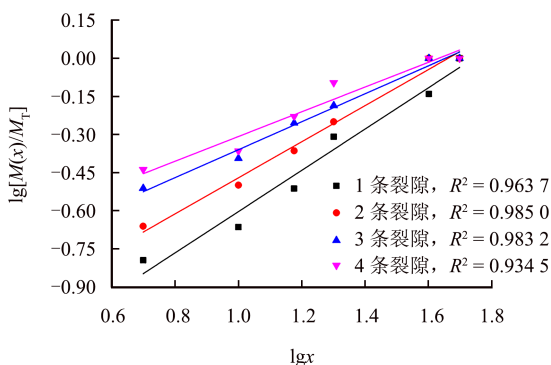
对不同裂隙数量及深度试样冲击破坏后的碎块采用 5、10、15、20、40、50 mm 的标准筛, 将岩石碎块分为 0~5、5~10、10~15、15~20、20~40、40~50 mm 共 6 个等级, 经上述 6 种标准筛筛分并对各等级碎块称重后对相同工况的统计结果取平均值, 由式 (8) ~ (9) 计算得出了不同裂隙数量和深度试样在 0.75 MPa 气压下的冲击破碎块度分形维数计算的双对数关系曲线, 如图 7 所示。从图中可以看出, 拟合相关系数的平方 R^2 值较高, 拟合直线的相关性较好, 说明岩石破碎后的块度分布具有很好的自相似性, 即是一个分形分布。岩石冲击破碎块度的分形维数在一定的范围内上下浮动, 冲击破坏后, 不同裂隙数量及深度试样的块度分形维数主要集中在 1.726 4~2.513 6 之间, 其中完整试样的分形维数最小, 为 1.726 4, 含 4 条 15 mm 深



(a) 裂隙深度为 5 mm



(b) 裂隙深度为 10 mm



(c) 裂隙深度为 15 mm

图 7 $\lg[M(x)/M_t]$ - $\lg x$ 曲线Fig.7 Curves of $\lg[M(x)/M_t]$ - $\lg x$ curves

裂隙试样冲击破坏后分形维数最大, 为 2.513 6。

4.2 裂隙数量及深度与分形维数关系

分形维数与裂隙数量及深度的关系如图 8 所示。由章节 4.1 可知, 完整试样冲击破坏后的分形维数为 1.726 4, 结合图 8 可知, 含非贯通裂隙试样的分形维数均大于完整试样; 当裂隙深度一定时分形维数随裂隙数量增加逐渐增大, 裂隙数量从 2 条增加至 3 条时分形维数增长率较裂隙数量从 1 条增加至 2、3 条增加至 4 条时大, 说明裂隙数量从 2 条增加至 3 条时破碎程度变化较明显, 与表 3 中试

样宏观破坏形态结果较吻合; 当裂隙数量一定时, 分形维数随裂隙深度的增加而增加, 且裂隙深度从 5 mm 增加到 10 mm 时, 其分形维数变化率较裂隙深度从 10 mm 增加至 15 mm 时稍大。

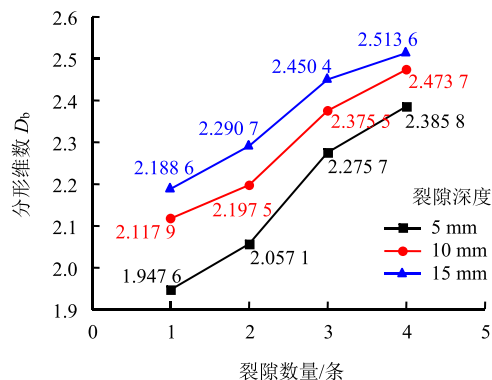


图 8 分形维数与裂隙数量及深度关系

Fig.8 Relationships among fractal dimension, the number and developed depth of cracks

4.3 裂隙数量及深度与单位体积耗散能关系

由于裂隙数量和深度的不同以及试样加工误差, 不同试样体积有一定差异, 为消除这种差异, 引入单位体积耗散能表征含不同裂隙数量和深度试样的能量耗散情况, 见式 (10)。

$$E_v = \frac{W_s}{V_s} \quad (10)$$

式中: E_v 为单位体积耗散能; W_s 为试件总耗散能; V_s 为试样体积。

由式 (1) ~ (7) 和式 (10) 计算得到各工况试样的平均单位体积耗散能 E_v , 其中完整试样的单位体积耗散能 E_v 为 0.504 5 J/cm³, 不同裂隙数量及深度试样的单位体积耗散能如图 9 所示。从图中可以看出, 含非贯通裂隙试样的单位体积耗散能均大于完整试样, 且随裂隙数量及深度的增加而增加。这是由于试样的破坏是由岩石内部的微裂纹扩展兼并造成的, 而微裂纹的扩展兼并需要消耗能量, 随着非贯通裂隙的增多致使试样内部更多受冲击后可继续扩展的微裂纹被激活, 故单位体积耗散能随之增加; 裂隙数量从 2 条增加至 3 条时, 单位体积耗散能增长速率明显增大, 是由于此时试样内部被激活的微裂纹数量激增, 能量消耗随之显著增加, 结合章节 3.2 中破坏模式和图 8 分析可知, 此时试样的破碎程度显著加剧, 分形维数增长率较大且破坏模式基本转变为压碎破坏。

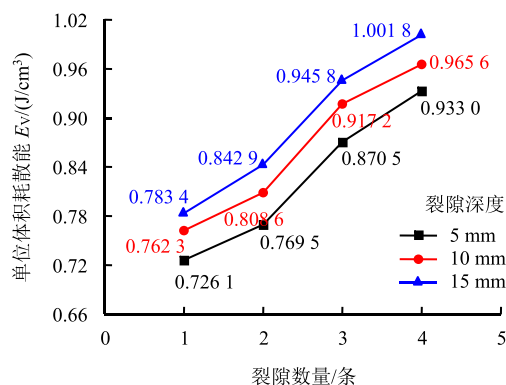


图9 单位体积耗散能与裂隙数量及深度关系(单位: J/cm³)
Fig.9 Relationships among dissipated energy per unit volume, the number and developed depth of cracks(unit: J/cm³)

4.4 裂隙数量及深度与能量吸收率关系

为了减少入射能的差异对分析结果的影响, 引入能量吸收率 η 表征岩石试件能量吸收能力的强弱, 计算公式为

$$\eta = W_s / W_1 \quad (11)$$

式中: η 为单位体积耗散能; W_s 为试件总耗散能; W_1 为入射能。

由式 (1) ~ (7) 和式 (11) 计算得到各工况试样的平均能量吸收率 η , 其中完整试样的能量吸收率为 0.311 1, 不同裂隙数量及深度试样的能量吸收率如图 10 所示。从图中可以看出, 含非贯通裂隙试样的能量吸收率均大于完整试样, 且随裂隙数量及深度的增加而增加, 其总体变化趋势与单位体积耗散能随裂隙数量及深度的变化情况基本一致。

4.5 分形维数与单位体积耗散能及能量吸收率关系

分形维数与单位体积耗散能及能量吸收率的关系如图 11、12 所示。从图中可以看出, 不同工况下岩石破坏后的分形维数与单位体积耗散能、能量吸

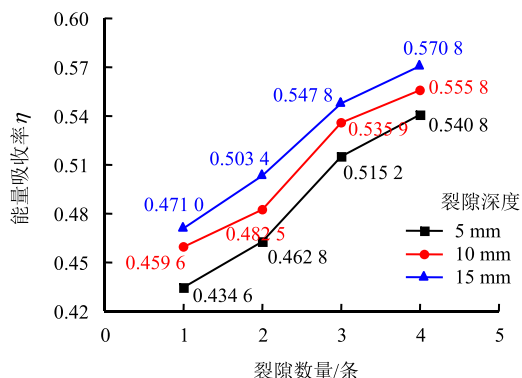


图 10 能量吸收率与裂隙数量及深度关系
Fig.10 Relationships among energy absorption rate, the number and developed depth of cracks

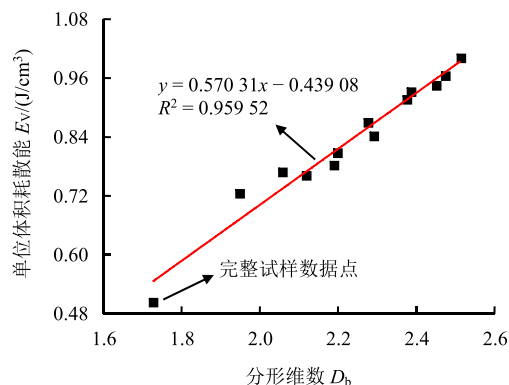


图 11 分形维数与单位体积耗散能关系
Fig.11 Relationships between fractal dimension and dissipated energy per unit volume

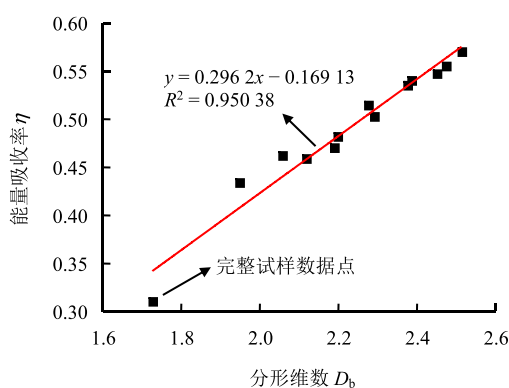


图 12 分形维数与能量吸收率关系
Fig.12 Relationships between fractal dimension and energy absorption rate

收率近似正线性关系, 完整试样的数据点与含裂隙试样的数据点距离稍远, 说明非贯通裂隙对试样的分形维数、单位体积耗散能及能量吸收率均有较显著影响。结合图 8~10 分析可知, 非贯通裂隙数量越多、裂隙深度越大, 冲击后试样的分形维数、单位体积耗散能及能量吸收率就越大。这是由于岩石的宏观破坏是由岩石内部大量微裂纹扩展、发育、贯通造成的, 预制非贯通裂隙数量越多、深度越大, 致使内部可被激活的微裂纹就越多, 这些微裂纹的扩展兼并将吸收更多能量, 故单位体积耗散能及能量吸收率越大, 宏观表现为岩石断裂、破碎的块度减小, 分形维数增大。

5 结 论

(1) 冲击荷载作用下裂隙深度为 5、10 mm 时试样的动态峰值应力随裂隙数量增加先增加后减小, 裂隙深度为 15 mm 时动态峰值应力随裂隙深度增加而减小。当试样含 1 条裂隙时动态峰值应力随裂隙深度增加而增加, 当裂隙数量为 2 条以上时动

态峰值应力随裂隙深度增加而减小。峰值应变随裂隙数量的增加而增加,随裂隙深度的增加先增大后减小,动态弹性模量随裂隙数量的增加先增加后减小,随裂隙深度的增加逐渐减小。

(2) 含非贯通裂隙砂岩的破坏模式随裂隙数量和深度的变化,主要为张应变破坏、张应变-剪切复合破坏和压碎破坏 3 种,从试样破坏模式的总体演化情况看裂隙数量对破坏模式的影响较裂隙深度大。

(3) 冲击荷载作用下含非贯通裂隙试样破坏后的分形维数、单位体积耗散能及能量吸收率均大于完整试样,且随裂隙数量和深度的增加而增加。裂隙数量由 2 条增加至 3 条时分形维数、单位体积耗散能及能量吸收率的增长速率显著增大。试样破坏后的分形维数与单位体积耗散能及能量吸收率均近似正线性关系。

参 考 文 献

- [1] 李地元, 成腾蛟, 周韬, 等. 冲击荷载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 Di-yuan, CHENG Teng-jiao, 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.
- [2] DHAWAN K R, SINGH D N, GUPTA I D. Dynamic analysis of underground openings[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2004, 37(4): 299—315.
- [3] 吕小波, 赵其华, 韩刚. 基于应力集中强度比的单裂隙岩石破坏过程研究[J]. 岩土力学, 2017, 39(增刊 1): 87—95.
LÜ Xiao-bo, ZHAO Qi-hua, HAN Gang. Failure process of rock with single precast crack based on ratio of concentration stress to peak stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 39(Suppl.1): 87—95.
- [4] 蒋明镜, 陈贺, 张宁, 等. 含双裂隙岩石裂纹演化机制的离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3529—3288.
JIANG Ming-jing, CHEN He, ZHANG Ning, et al. Distinct element numerical analysis of crack evolution in rocks containing pre-existing double flaw[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(11): 3529—3288.
- [5] YANG S Q, JING H W, XU T. Mechanical behavior and failure analysis of brittle sandstone specimens containing combined flaws under uniaxial compression[J]. **Journal of Central South University**, 2014, 21(5): 2059—2073.
- [6] PARK C H, BOBET A. Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: A comparison[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(5): 819—829.
- [7] WONG R H C, CHAU K T, TANG C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws part I. Experimental approach[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(7): 909—924.
- [8] 滕春凯, 尹祥础, 李世愚, 等. 非穿透裂纹平板试件三维破裂的试验研究[J]. 地球物理学报, 1987, 30(4): 371—378.
TENG Chun-kai, YIN Xiang-chu, LI Shi-yu, et al. An experimental investigation on 3D fractures of non-penetrating crack in plane samples[J]. **Acta Geophysica Sinica**, 1987, 30(4): 371—378.
- [9] WONG R H C, LAW C M, CHAU K T, et al. Crack propagation from 3D surface fractures in PMMA and marble specimens under uniaxial compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(3): 360—366.
- [10] FUJII Y, ISHIJIMA Y. Consideration of fracture growth from an inclined slit and inclined initial fracture at the surface of rock and mortar in compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(6): 1035—1041.
- [11] LI X, ZHOU T, LI D. 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.
- [12] ZHOU Z L, LI Di-yuan, MA Guo-wei, et al. Failure of rock under dynamic compressive loading[J]. **Journal of Central South University**, 2008, 15(3): 339—343.
- [13] 岑夺丰, 黄达. 高应变率单轴压缩下岩体裂隙扩展的细观位移模式[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 436—444.
CEN Duo-feng, HUANG Da. Mesoscopic displacement modes of crack propagation of rock mass under uniaxial compression with high strain rate[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(3): 436—444.
- [14] 刘红岩, 邓正定, 王新生, 等. 节理岩体动态破坏的 SHPB 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 659—665.
LIU Hong-yan, DENG Zheng-ding, WANG Xin-sheng, et al. Similar material test study of dynamic failure of jointed rock mass with SHPB[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 659—665.

- [15] DAI F, CHEN R, XIA K W. A dynamic CCNBD method for measuring dynamic fracture parameters[J]. **Dynamic Behavior of Materials**, 2011(1): 39—48.
- [16] 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.
- LI Di-yuan, HAN Zhen-yu, SUN Xiao-lei, et al. Dynamic mechanical failure characteristics of marble with artificial flaws under shpb tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(12): 2872—2883.
- [17] QIU J, LI D, LI X. Dynamic failure of a phyllite with a low degree of metamorphism under impact Brazilian test[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2017, 94: 10—17.
- [18] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1387—1395.
- LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, YE Zhou-yuan, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(7): 1387—1395.
- [19] 张志强, 李宁, 陈方方, 等. 非贯通裂隙岩体破坏模式研究现状与思考[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 142—148.
- ZHANG Zhi-qiang, LI Ning, CHEN Fang-fang, et al. Review and status of research on failure mode of nonpenetrative fractured rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Suppl.2): 142—148.
- [20] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 49: 105—112.
- [21] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 69—289.
- LI Xi-bing. Rock dynamics fundamentals and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014: 269—289.
- [22] 赵光明, 马文伟, 孟祥瑞. 动载作用下岩石类材料破坏模式及能量特性[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3598—3605.
- ZHAO Guang-ming, MA Wen-wei, MENG Xiang-rui. Damage modes and energy characteristics of rock-like materials under dynamic load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3598—3605.
- [23] 单晓云, 李占金. 分形理论和岩石破碎的分形研究[J]. 河北理工学院学报, 2003, 25(2): 11—17.
- SHAN Xiao-yun, LI Zhan-jin. Fractal theory, characteristics and its application on rock fragmentation[J]. **Journal of Hebei Institute of Technology**, 2003, 25(2): 11—17.
- [19] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5389—2007 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- National Development and Reform Commission. DL/T 5389-2007 Construction technical specifications on rock-foundation excavating engineering of hydraulic structures[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [20] 李新平, 赵航, 罗忆, 等. 深部裂隙岩体中弹性波传播与衰减规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2319—2326.
- LI Xin-ping, ZHAO Hang, LUO Yi, et al. Experimental study of propagation and attenuation of Elastic wave in deep rock mass with joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(11): 2319—2326.
- [21] CHOW T M, MEGLIS I L, YOUNG R P. Progressive microcrack development in tests on Lac du Bonnet granite. II. Ultrasonic tomographic imaging[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1995, 32(8): 751—761.
- [22] GANNE P, VERVOORT A. Effect of stress path on pre-peak damage in rock induced by macro-compressive and -tensile stress fields[J]. **International Journal of Fracture**, 2007, 144(2): 77—89.
- [23] YANG S Q, JING H W. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression[J]. **International Journal of Fracture**, 2011, 168(2): 227—250.
- [24] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(2): 222—233.
- [25] LOKAJÍČEK T, GOEL R K, RUDAJEV V, et al. Assessment of velocity anisotropy in rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2013, 57: 142—152.

上接第 72 页