

## 动态冲击下锦屏大理岩力学响应与能量特性

李 傲, 王志亮, 封陈晨, 巫绪涛, 卢志堂, 李松玉, 贾帅龙

### Mechanical responses and energy characteristics of the Jinping marble under the dynamic impact

LI Ao, WANG Zhiliang, FENG Chenchen, WU Xutao, LU Zhitang, LI Songyu, and JIA Shuailong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111028>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 动态载荷下大理岩断口形貌特征试验研究

An experimental study of the fracture morphology of marble under dynamic loading

王伟祥, 王志亮, 贾帅龙, 卢志堂 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 118-124

#### 3种因素影响下固化废弃淤泥的微观特性研究

Research on the micro-characteristics of solidified waste sludge under the effect of three factors

杨浩, 朱剑锋, 陶燕丽 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 91-99

#### 冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究

A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing-thawing cycles

戚利荣, 王家鼎, 张登飞, 张永双, 李贞孝, 孙嘉兴, 马剑飞 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 65-73

#### 基于离散元法的砂石混合体直剪试验结果分析

An analysis of direct shear test results of sand-gravel mixture based on the discrete element method

苏永华, 王栋 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 97-104

#### 强震作用下崩塌滚石冲击耗能损伤演化分析

An evolution analysis of the impact energy damage of collapsed rolling stones under strong earthquakes

李娟, 何亮, 苟晓慧 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 157-163

#### 基于能量耗散机制的粗粒土圆度损伤特性分析

Analyses of roundness damage characteristics of coarse-grained soil based on energy dissipation mechanism

何亮, 魏玉峰, 潘远阳, 雷壮 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 120-126



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111028

李傲, 王志亮, 封陈晨, 等. 动态冲击下锦屏大理岩力学响应与能量特性 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 112-118.

LI Ao, WANG Zhiliang, FENG Chenchen, *et al.* Mechanical responses and energy characteristics of the Jinping marble under the dynamic impact[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 112-118.

## 动态冲击下锦屏大理岩力学响应与能量特性

李傲<sup>1</sup>, 王志亮<sup>1</sup>, 封陈晨<sup>1</sup>, 巫绪涛<sup>1</sup>, 卢志堂<sup>2</sup>, 李松玉<sup>1</sup>, 贾帅龙<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009;

2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要:** 为了分析锦屏水电站大理岩的动力学响应和能量特性, 采用分离式霍普金森压杆对岩样开展了动态压缩试验, 并引入分形维数定量表征试样的破碎形态、能耗特性及其与应变率的内在关系。结果表明: 动态载荷下大理岩应力-应变曲线初始压实段不明显, 当应变率较低时, 应力-应变曲线呈现出回弹现象; 试样峰值应力随应变率的增大而增加, 且动态抗压强度与应变率对数呈线性关系; 试样能量时程曲线呈“S”型演化, 入射能、反射能及透射能均随应变率的增高而增大, 动态抗压强度与能耗密度呈对数增长关系; 随着比能耗散值或应变率的增加, 试样破坏程度和分形维数均逐渐增大。本文研究对提高爆破等动态荷载下岩石损伤破坏机理的认知具有一定参考价值。

**关键词:** 大理岩; 动态冲击; 力学响应; 能量特性; 分形维数

中图分类号: TU458<sup>+.3</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0112-07

## Mechanical responses and energy characteristics of the Jinping marble under the dynamic impact

LI Ao<sup>1</sup>, WANG Zhiliang<sup>1</sup>, FENG Chenchen<sup>1</sup>, WU Xutao<sup>1</sup>, LU Zhitang<sup>2</sup>, LI Songyu<sup>1</sup>, JIA Shuailong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract:** To study the dynamic responses and energy characteristics of the marble from the Jinping hydropower station, the dynamic compression tests on the rock samples are carried out using the split-Hopkinson pressure bar, and the fractal dimension of the fragments is also introduced to quantitatively characterize the relationship among the failure shape, energy consumption characteristics and strain rate of the rock samples. The results show that the initial compaction section of the stress-strain curve of the marble under dynamic loading is not obvious, and the stress-strain curve takes on a rebound phenomenon when the strain rate is low, and the peak stress of the sample increases with the rise of strain rate. The dynamic compressive strength has a linear relationship with the logarithm of strain rate, and the energy time-history curves show an "S"-shaped evolution. The incident energy, reflected energy and transmitted energy all increase with the increasing strain rate. The dynamic compressive strength has a logarithmic growth with the energy consumption density. As the energy consumption density or strain rate rises, the failure degree and the fractal dimension of the samples gradually increase. This study is of certain reference

收稿日期: 2021-11-12; 修订日期: 2021-12-06

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金雅砻江联合基金项目(U1965101); 国家自然科学基金项目(51579062; 41807266)

第一作者: 李傲(1997-), 男, 硕士研究生, 从事岩石动态损伤机理研究。E-mail: [liao15203030124@126.com](mailto:liao15203030124@126.com)

通讯作者: 王志亮(1969-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为岩石动力学特性。E-mail: [cviewzL@hfut.edu.cn](mailto:cviewzL@hfut.edu.cn)

value for improving the cognition of rock damage and fracture evolution mechanism under dynamic loads such as blast.

**Keywords:** marble; dynamic impact; mechanical responses; energy characteristics; fractal dimension

随着社会经济的不断发展, 越来越多的大型工程逐渐向地球深部进军, 如核废料深埋处置、深部矿产资源开采及水电站地下厂房修建等。这些深部工程均不可避免地涉及到岩石动荷载下的力学特性及损伤破坏问题。岩石在动态荷载作用下表现出的力学性质要比静荷载下复杂得多, 故对实验研究方法和测试系统提出了较高要求<sup>[1]</sup>。20 世纪 40 年代, Kolsky 率先发展并引入了分离式霍普金森压杆装置, 通过对入射杆和透射杆中应变信号进行测量即可得到夹在 2 根压杆之间试样的动态应力、应变、应变率及其它相关的动力学参数。

近年来许多学者对岩石的动力学性能进行了研究。李晓锋等<sup>[2]</sup>基于岩石的冲击压缩试验, 发现随着应变率的增加, 岩石的破坏形态将由完整型到劈裂破坏再到粉碎破坏转变, 岩石破碎程度与应变率存在正相关性。黎立云等<sup>[3]</sup>对砂岩开展了动态冲击实验, 结果表明入射能、透射能及吸收能均随着弹速的提高而增加。Hong 等<sup>[4]</sup>探讨了动态压缩下岩石能量特性的变化规律, 指出岩石的能耗密度与入射能量呈线性相关。张号等<sup>[5]</sup>对石灰岩开展了不同应变率的动态冲击实验, 结果表明随着应变率增大, 应力-应变曲线峰值后表现出不同的变化规律, 呈现明显的率相关性。王德荣等<sup>[6]</sup>对比分析了砂岩及花岗岩的动力学特性, 结果表明岩石的动态压缩强度及峰值应变均随应变率的增加而增大。李邵军等<sup>[7]</sup>对大理岩试样进行了不同弹速的冲击试验, 研究了动态压缩强度与冲击弹速间关系, 发现强度与冲击弹速基本呈线性正相关。朱子涵等<sup>[8]</sup>对大理岩开展动态压缩实验, 指出试样的动态压缩强度与应变率具有良好的线性关联。谢和平等<sup>[9]</sup>将分形理论引入到岩石力学研究中, 为定量研究岩石损伤破碎程度提供了全新的手段。随后, 其他学者<sup>[10-11]</sup>发展和完善了分形理论-岩石力学的框架体系, 发现岩石破碎后块度具有统计自相似性, 用分形理论去定量分析岩石破碎程度具有可行性。

综上所述, 围绕岩石动力特性的研究已取得不少成果, 但以往工作多集中在材料应变率效应或冲击弹速影响等方面, 而对动态冲击下大理岩力学响应的内在机理及其分形特征方面的研究尚不多见。本文拟通过 SHPB 系统, 以锦屏水电站大理岩为对象, 先分析

其应力-应变曲线和动态抗压强度的应变率效应, 接着探析能量特性与抗压强度的关联性, 最后结合分形几何理论, 建立起分形维数与应变率及能耗密度间联系, 力求得出具有参考价值的结论。

## 1 大理岩动态压缩实验

### 1.1 SHPB 试验原理

SHPB 试验是基于弹性应力波的传播理论, 并满足 2 个基本假定: 即一维假定和应力均匀假定。

采用“三波法”得到试样的平均应力  $\sigma(t)$ 、应变率  $\dot{\varepsilon}$  和平均应变  $\varepsilon(t)$ , 计算式如下<sup>[12]</sup>:

$$\sigma(t) = \frac{EA}{2A_s} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C}{L_s} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C}{L_s} \int [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (3)$$

式中:  $A_s$ ——试样的截面积;

$A$ ——压杆的截面积;

$L_s$ ——试样长度;

$C$ ——压杆的波速;

$E$ ——压杆的弹性模量;

$\varepsilon_I(t)$ 、 $\varepsilon_R(t)$ 、 $\varepsilon_T(t)$ ——入射波、反射波与透射波的应变时程。

### 1.2 试验方案

试验装置主要由高压气腔室、子弹、入射杆、透射杆、缓冲装置、数据采集及分析系统构成(图 1)。其中, 子弹长度为 300 mm, 入射杆和透射杆杆度长分别为 2 400 mm 与 1 400 mm。子弹和所有杆件均采用高强度合金钢制成, 密度为 7 900 kg/m<sup>3</sup>, 波速为 5 172 m/s, 弹性模量为 210 GPa。通过预试验确定合理的子弹冲击弹速, C12、C23、C4、C16、C20、C5 试样的弹速分别为 8.23, 9.07, 12.63, 13.30, 15.61, 16.50 m/s。其中, 最低弹速下试样有显著裂纹, 但整体基本完好, 最高弹速下试样破坏前的整体应力基本均匀。

### 1.3 试样制备

本次试验大理岩取自于锦屏二级水电站的深埋引水隧洞, 所有试样均取自于同一块完整的石材, 该大理岩密度为 2.812 g/cm<sup>3</sup>。为了满足试验中应力均匀

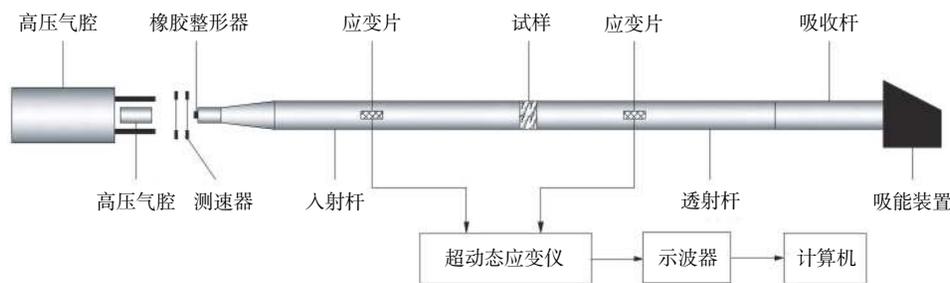


图 1 SHPB 装置  
Fig. 1 SHPB device

性要求, 试样尺寸选为  $\phi 5.0 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ <sup>[13]</sup>。试样两端面经仔细打磨, 确保其不平行度小于 0.05 mm, 以降低由于受到偏心受压导致的应力集中带来的误差影响<sup>[14]</sup>。对同批次大理岩试样进行了静态压缩试验, 测得其单轴抗压强度为 120 MPa, 弹性模量为 42.3 GPa, 泊松比为 0.34。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 应力均匀性验证

为了改善入射波形以减小试验误差, 在入射杆前端面中心处粘贴一直径 10 mm、厚度 1 mm 的橡胶片作为波形整形器(图 1)。图 2 为不同弹速下的动态压缩原始波形图, 可见随着弹速的增大, 入射波、透射波及反射波峰值都会相应增加。图 3 为动态压缩下试样的动态应力曲线( $v = 15.61 \text{ m/s}$ ), 其中符号 I、T 和 R 分别代表入射波、透射波与反射波, 由于采用了波形整形器, 入射波升降均比较平缓且没有振荡。此外, 透射波与入射波反射波之和曲线在峰值前几乎重合, 表明试样在加载过程中已达到动态应力平衡。

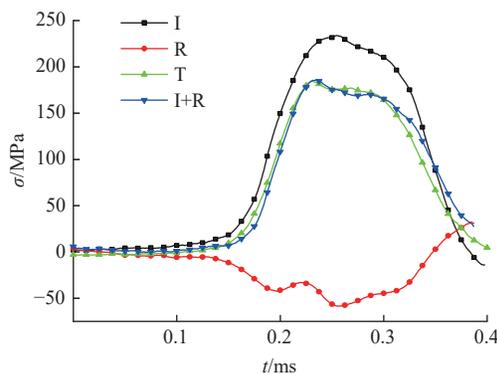


图 3 动态应力平衡图

Fig. 3 Diagram of dynamic stress balance

力分别为 132.3, 135.1, 161.2, 164.8, 181.0, 187.8 MPa。由图 4 可知, 大理岩试样峰值应力随应变率增加而增大, 表现出较强的应变率效应。当应变率较低时, 试样的应力-应变曲线峰后阶段应变随着应力降低而逐渐减小, 呈现出“回弹”现象, 这是因为试样储存的应变能在峰后阶段得到释放; 随着应变率的增加, 应力-应变曲线峰后阶段回弹现象消失, 应变软化特征显著。

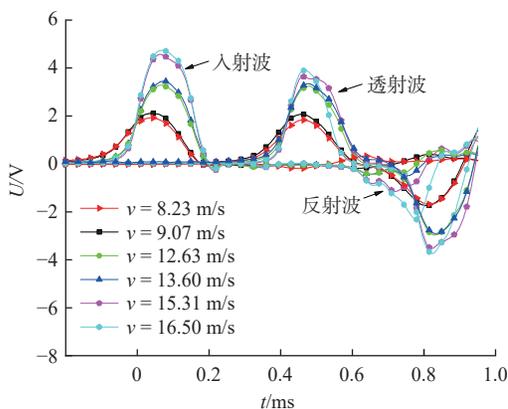


图 2 原始波形图

Fig. 2 Diagram of original waveforms

### 2.2 应力-应变曲线及动态抗压强度

图 4 显示 6 个弹速下试样(编号如表 1)的峰值应

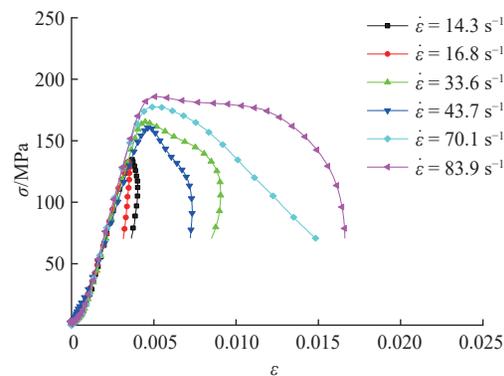


图 4 应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves

图 5 为动态抗压强度随应变率对数的变化关系, 可见动态抗压强度与应变率的对数呈现明显的线性相关性。当  $\lg \dot{\epsilon}$  处于 1.2 ~ 1.9 范围时, 动态抗压强度相

对于静态强度的增加幅度从 10% 上升到 56%, 这是因为与静态实验相比, 大理岩动态压缩过程时间较短, 试样侧向应变来不及充分发展, 使得试样的黏聚力及内摩擦角均有明显提高, 导致大理岩动态抗压强度随之提高<sup>[15]</sup>。

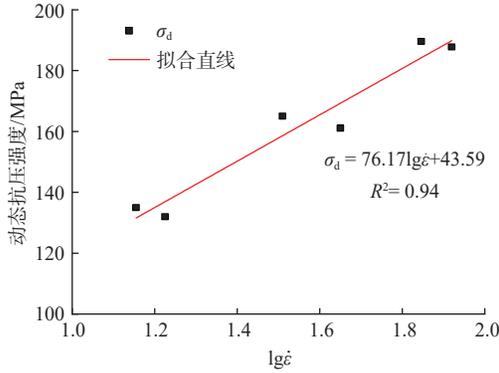


图 5 动态抗压强度与应变率对数关系  
Fig. 5 Relationship of the peak strength with strain-rate logarithm

### 2.3 能量计算结果

入射能  $W_I$ 、反射能  $W_R$  和透射能  $W_T$  计算式分别为<sup>[16]</sup>:

$$W_I = ACE \int \varepsilon_1^2(t) dt \quad (4)$$

$$W_R = ACE \int \varepsilon_r^2(t) dt \quad (5)$$

$$W_T = ACE \int \varepsilon_t^2(t) dt \quad (6)$$

式中各符号含义同前。

试样所消耗的能量主要包括 3 个部分: (1) 裂纹扩展所消耗的能量  $W_{LC}$ ; (2) 破碎后碎块的动能  $W_{LV}$ ; (3) 其它能量  $W_{LO}$ , 如弹性应变能和热能。另外, 试验中加载速率不高, 试样的热能也很小, 可忽略不计<sup>[17]</sup>。因此, 在动态压缩实验中, 可以认为试样吸收的能量全部用于裂纹的扩展。试样吸收的能量  $W_L$  可由下式求得:

$$W_L = W_I - W_R - W_T \quad (7)$$

为了避免试样尺寸效应对大理岩能耗特征的影响, 定义能耗密度  $\theta$  为单位体积岩石材料所消耗的能量<sup>[18]</sup>, 计算公式如下:

$$\theta = \frac{W_L}{V} \quad (8)$$

主要能量指标的计算结果如表 1 所示。

### 2.4 能量耗散的应变率效应

图 6 为试样在动态压缩荷载下所对应的能量时程

表 1 大理岩能量计算结果

编号	$W_I/J$	$W_T/J$	$W_R/J$	$W_L/J$	$\theta/(J \cdot cm^{-3})$	$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$
C12	680	619	16	39	0.8	14.3
C23	704	625	17	62	1.3	16.8
C4	1 846	1 500	46	217	4.4	33.6
C16	1 817	1 509	44	264	5.4	43.7
C20	3 522	2 554	160	808	16.5	70.1
C5	3 210	2 051	168	999	20.4	83.9

曲线, 可看出能量时程曲线呈现出“S”形变化, 即开始时缓慢、中期加快和收尾平缓。不同能量参数与应变率之间的关系如图 7 所示, 易见入射能、反射能、透射能及吸收能均随应变率增加而不断增长。其中, 入射能升幅最大, 反射能升幅最小, 且大部分入射能量都转化为吸收能量和透射能量, 这种现象随应变率的增加愈加明显。

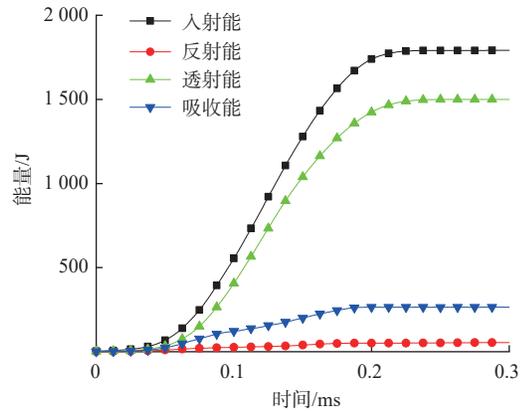


图 6 能量时程曲线  
Fig. 6 Energy time-history curves

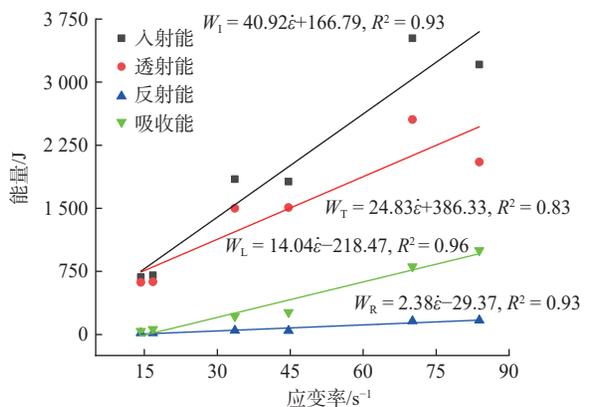


图 7 能量与应变率关系  
Fig. 7 Relationship between energy and strain rate

图 8 为大理岩动态抗压强度与能耗密度的关系, 数据拟合显示二者呈现出对数关系。图 9 显示了能耗密度与应变率之间的关系, 可见能耗密度随着应变

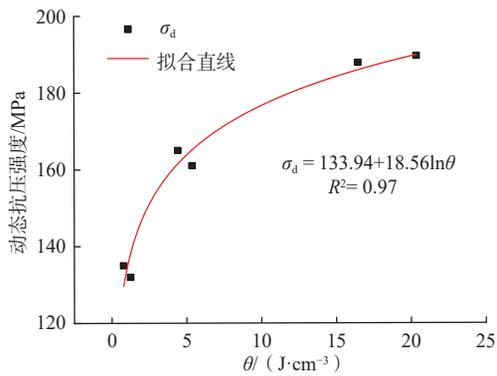


图 8 动态抗压强度与能耗密度关系

Fig. 8 Relationship between the dynamic compressive strength and energy consumption density

率增大而增加,且与应变率呈现出较强的线性相关性。因此,能耗密度可在一定程度上反映大理岩动态抗压强度的变化趋势。当能耗密度较小时,试样内部只有少量裂纹被激活,破碎块体尺寸较大,试样抗压强度增加率随能耗密度增大较快;随着耗散能量增大,被激活的裂纹数增多,试样破损严重,抗压强度增加速率随能耗密度增大而放慢并渐趋稳定。

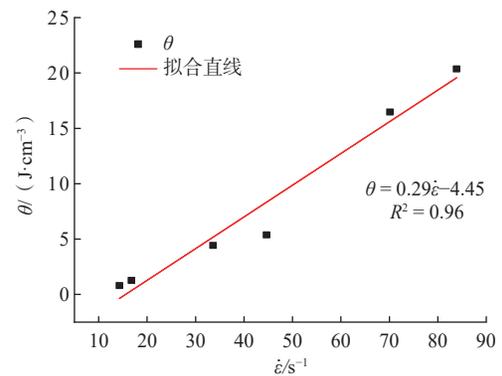


图 9 能耗密度与应变率关系

Fig. 9 Relationship between the energy consumption density and strain rate

### 2.5 试样破坏形态对比

图 10 为不同应变率下试样的破坏形态,可见随着应变率的增加,试样由裂成 2 块转变为粉碎性破坏。当应变率较小时,试样内部仅少量裂纹被激活,破坏形式以劈裂破坏为主;随着应变率增大,被激活的裂纹数量增加,试样破坏程度加剧,从而发生碎裂甚至粉碎性破坏。

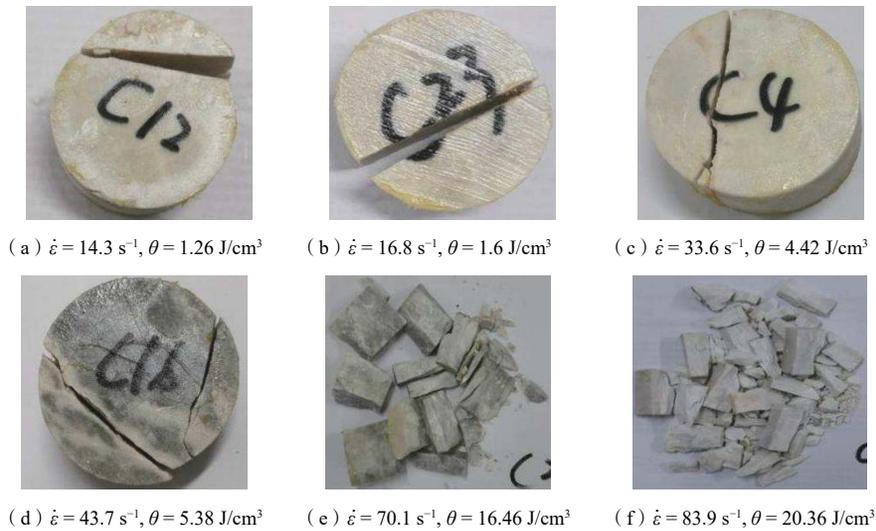


图 10 试样破坏模式比较

Fig. 10 Comparison of the sample failure shapes

### 2.6 碎块分形维数

岩石在动态冲击下破碎形态较为复杂, Mandelbrot 在 20 世纪 70 年代率先创立分形几何理论,借助分形几何理论能很好地描述岩石的破坏形态及其内在机理。目前,计算分形维数的方法有很多,考虑到计算筛分实验结果的方法已经较为成熟,因此,本文采用 2.5, 5, 10, 16, 20, 25, 31.5 mm 的标准筛对碎块进行筛分,称量每个筛孔上岩石碎块的质量,根据 G-G-S

分布函数,结合质量-频率关系<sup>[19]</sup>,可得碎块的分布方程:

$$M(d)/M_T = (d/d_m)^{3-D} \quad (9)$$

式中:  $M(d)$ —— $<d$  粒径下累积筛分质量;

$M_T$ ——碎块总质量;

$d$ ——特征尺寸;

$d_m$ ——碎块最大尺寸;

$D$ ——碎块分形维数。

对式(9)两边同时取对数,则得到:

$$\lg[M(d)/M_T] = (3 - D)\lg(d/d_m) \quad (10)$$

在  $\lg[M(d)/M_T]-\lg d$  对数坐标系中, 通过拟合直线的斜率即可求得碎块分形维数  $D$ 。  $D$  的计算结果列于表 2 中。

表 2 大理岩分形维数计算结果  
Table 2 Calculation results of the fractal dimension of the marble

编号	C12	C23	C4	C16	C20	C5
$D$	1.27	1.30	1.61	1.64	2.01	2.12

图 11 中数据拟合的线性相关性较好, 表明大理岩破碎后块度分布具有较好的统计自相似性, 这是因为岩石内部微小裂隙演化成小破裂群, 造成岩样宏观上的破碎, 这种自相似的行为必然导致岩石破碎后的块度具有一定的自相似性<sup>[19]</sup>。通过这种分形方法, 可以对大理岩破碎程度进行定量的分析。图 12 为比能量耗散值和应变率与分形维数的关系, 在动态冲击实验中, 大理岩分形维数在 1.2 ~ 2.2 之间, 结合试样的宏观破碎分析可知, 分形维数越大, 试样破坏程度越高。随着试样碎块分形维数的增加, 试样的比能量耗散值与应变率随之增长, 近似呈线性关系。

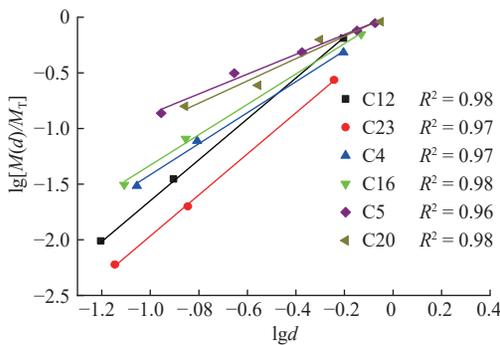


图 11  $\lg[M(d)/M_T]-\lg d$  曲线  
Fig. 11 Curves of  $\lg[M(d)/M_T] - \lg d$

这是因为岩石内部裂纹扩展时需消耗一定的能量, 当比能量耗散值较大时, 裂纹充分扩展, 破碎块体数量也随之上升, 破坏程度提高, 分形维数值也就越大。通过分形几何理论可很好地描述自然界中无规则的现象和行为, 表明动态载荷下大理岩损伤演化即为其内部裂纹萌生、发展、贯通而最终导致大理岩破坏的过程, 分形维数可作为表征大理岩损伤演化程度的理想参量。

### 3 结论

(1) 大理岩应力-应变曲线的初始压密段不太明

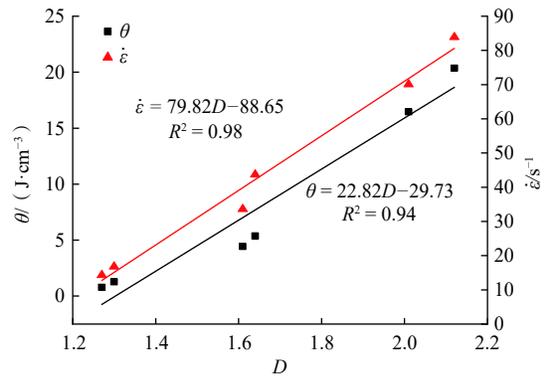


图 12 能耗密度与应变率和分形维数的关系  
Fig. 12 Relationship of  $\theta$  with  $\dot{\epsilon}$  and  $D$

显。当应变率较小时, 应力-应变曲线峰后阶段存在回弹现象; 随着应变率的增加, 应力-应变曲线峰后阶段具有明显的应变软化特征, 回弹现象消失; 动态抗压强度与应变率的对数表现出良好的线性相关。

(2) 大理岩的能量时程曲线呈开始时缓慢、中期加快和收尾平缓的“S”形发展; 随应变率的增加, 试样的入射能和耗散能均有明显增长; 该岩石抗压强度与其能耗密度间非线性特征显著, 即动态强度增幅先逐渐减小, 后趋于稳定。

(3) 试验后大理岩碎块分布具有良好的统计自相似性, 其分形维数在 1.2 ~ 2.2 之间, 试样破坏程度越高, 分形维数越大。当被激活的裂纹数目增多时, 能量被耗散的比重变大, 试样呈粉碎性破坏。随着分形维数的增大, 应变率与能耗密度近似呈线性增加。

### 参考文献 (References) :

[ 1 ] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2013. [ DAI Jun. Dynamic behaviors and blasting theory of rock[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013. (in Chinese with English abstract) ]

[ 2 ] 李晓锋, 李海波, 刘凯, 等. 冲击荷载作用下岩石动力学特性及破裂特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2393 - 2405. [ LI Xiaofeng, LI Haibo, LIU Kai, et al. Dynamic properties and fracture characteristics of rocks subject to impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2393 - 2405. (in Chinese with English abstract) ]

[ 3 ] 黎立云, 徐志强, 谢和平, 等. 不同冲击速度下岩石破坏能量规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2007 - 2011. [ LI Liyun, XU Zhiqiang, XIE Heping, et al. Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities[J]. Journal of

- China Coal Society, 2011, 36(12): 2007 – 2011. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] HONG L, ZHOU Z L, YIN T B, et al. Energy consumption in rock fragmentation at intermediate strain rate[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16(4): 677 – 682.
- [ 5 ] 张号, 平琦, 苏海鹏. 不同长径比石灰岩动态压缩 SHPB 试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(8): 38 – 43. [ ZHANG Hao, PING Qi, SU Haipeng. Study on dynamic compression SHPB test of limestone with different length diameter ratios[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(8): 38 – 43. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 王德荣, 刘昭言, 刘家贵, 等. 砂岩和花岗岩的动态性能与能量耗散分析[J]. *北京理工大学学报*, 2017, 37(12): 1217 – 1223. [ WANG Derong, LIU Zhaoyan, LIU Jiagui, et al. Analysis of dynamic properties and energy dissipation of sandstone and granite[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37(12): 1217 – 1223. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 李邵军, 徐怀胜, 晏飞, 等. 锦屏隧洞深部大理岩动力扰动力学特性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2669 – 2676. [ LI Shaojun, XU Huaisheng, YAN Fei, et al. Experimental study on mechanical properties under dynamics disturbance condition of marble of Jinping deep tunnel[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2669 – 2676. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 朱子涵, 蔚立元, 孟庆彬, 等. 峰前卸荷损伤大理岩的动静力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(4): 747 – 756. [ ZHU Zihan, YU Liyuan, MENG Qingbin, et al. Experimental study on dynamic and static characteristics of marble considering pre-peak unloading damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 747 – 756. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] XIE H P. *Fractals in rock mechanics*[M]. Rotterdam: A A Balkema, 1993.
- [ 10 ] 付小凤. 渗流-应力耦合作用下砂岩声发射及分形损伤特征研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(6): 83 – 88. [ FU Xiaofeng. A study of the acoustic emission and fractal damage of sandstone under the coupling of seepage and stress[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 83 – 88. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] XU X L, ZHANG Z Z. Fractal characteristics of rock fracture surface under triaxial compression after high temperature[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016(1): 1155 – 1165.
- [ 12 ] 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(1): 93 – 106.
- [ 13 ] LI X B, HONG L, YIN T B, et al. Relationship between diameter of split Hopkinson pressure bar and minimum loading rate under rock failure[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(2): 218 – 223.
- [ 14 ] WANG Z L, SHI G Y. Effect of heat treatment on dynamic tensile strength and damage behavior of medium-fine-grained Huashan granite[J]. *Experimental Techniques*, 2017, 41(4): 365 – 375.
- [ 15 ] 东兆星, 单仁亮. 岩石在动载作用下破坏模式与强度特性研究[J]. *爆破器材*, 2000, 29(1): 1 – 5. [ DONG Zhaoxing, SHAN Renliang. Research on the failure pattern and strength properties of rock under dynamic loading[J]. *Explosive Materials*, 2000, 29(1): 1 – 5. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 李森, 乔兰, 李庆文. 高应变率下预制单节理岩石 SHPB 劈裂试验能量耗散分析[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(7): 1336 – 1343. [ LI Miao, QIAO Lan, LI Qingwen. Energy dissipation of rock specimens under high strain rate with single joint in SHPB tensile tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(7): 1336 – 1343. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 翟越, 马国伟, 赵均海, 等. 花岗岩和混凝土在单轴冲击压缩荷载下的动态性能比较[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(4): 762 – 768. [ ZHAI Yue, MA Guowei, ZHAO Junhai, et al. Comparison of dynamic capabilities of granite and concrete under uniaxial impact compressive loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(4): 762 – 768. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] WANG Z L, LI H R, WANG J G, et al. Experimental study on mechanical and energy properties of granite under dynamic triaxial condition[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2018, 41(6): 1063 – 1075.
- [ 19 ] 高峰, 谢和平, 赵鹏. 岩石块度分布的分形性质及微观结构效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 1994, 13(3): 240 – 246. [ GAO Feng, XIE Heping, ZHAO Peng. Fractal properties of size-frequency distribution of rock fragments and the influence of meso-structure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1994, 13(3): 240 – 246. (in Chinese with English abstract) ]