

DOI: 10.11779/CJGE202204004

# 扰动冲击下弱胶结红砂岩的能量耗散与分形特征

张慧梅<sup>1</sup>, 陈世官<sup>\*2</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 程树范<sup>3</sup>, 杨更社<sup>2</sup>, 申艳军<sup>4</sup>

(1. 西安科技大学力学系, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 4. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为探索动态扰动后西部矿区软岩夹层的能量耗散规律和破坏模式, 利用分离式霍普金森压杆装置对弱胶结红砂岩进行动态冲击破坏试验, 分析该类红砂岩在受到不同加载速率、不同次数扰动冲击以及是否扰动的条件下, 试样在相同加载速率破坏性冲击过程中的能量耗散与分形特征。试验结果表明: 在不同速率扰动冲击作用下, 随着扰动冲击次数的增加反射能递增而透射能和耗散能呈减小趋势, 其中较高速率扰动冲击下试样的反射能高于低速率扰动冲击, 耗散能则相反, 且低速率扰动冲击下试样的耗散能、能量耗散率和能量耗散密度高于较高速率扰动冲击, 表明低速率扰动冲击下试样的能量利用率更高; 在破坏性冲击试验中, 随着扰动冲击次数的增加, 低速率扰动后试样的破碎程度相较于未扰动与高速率扰动更为严重, 对应分形维数  $D_b$  低速率扰动 > 未扰动 > 高速率扰动, 表明分形维数与扰动冲击次数呈正相关, 与扰动冲击速率呈负相关; 在相同扰动冲击次数下, 低速率扰动试样的  $D_b$  所对应累积耗散能和耗散能密度高于较高速率扰动试样, 而对应的累积反射能则相反。

**关键词:** 弱胶结砂岩; 扰动冲击; SHPB; 能量耗散; 分形维数

中图分类号: TU458.3

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2022)04 - 0622 - 10

**作者简介:** 张慧梅 (1968—), 女, 山西大同人, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程稳定性评价及岩石力学理论与应用。E-mail: zhanghuimei68@163.com。

## Energy dissipation and fractal characteristics of weakly cemented red sandstone under disturbance impact

ZHANG Hui-mei<sup>1</sup>, CHEN Shi-guan<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, CHENG Shu-fan<sup>3</sup>, YANG Geng-she<sup>2</sup>, SHEN Yan-jun<sup>4</sup>

(1. Department of Mechanics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To explore the energy dissipation law and failure mode of soft rock interlayer in western mining areas of China after dynamic disturbance, the dynamic impact failure tests on weakly cemented red sandstone are carried out by using the separated Hopkinson compression bar device. Under the impact of this red sandstone under different loading rates, different times of disturbance and whether there is the disturbance or not, the energy dissipation and fractal characteristics of the samples during the same loading rate impact failure are analyzed. The experimental results show that under different disturbance impact rates, with the increase of disturbance impact times, the reflection energy increases, while the transmission energy and dissipation energy decrease. The reflection energy of the samples under the impact of high-speed disturbance is higher than that of the low-speed disturbance impact, while the dissipative energy is the opposite. Moreover, the dissipative energy of the samples under the impact of low-speed rate disturbance is opposite. The energy dissipation rate and energy dissipation density are higher than those of the high-speed disturbance impact, which indicates that the energy utilization rate of the samples is higher under the impact of low-speed disturbance. In the impact failure tests, with the increase of the number of disturbance impact, the fragmentation degree of the sample after the low-speed rate disturbance is more serious than that of the undisturbed and high-speed rate disturbance. The low-speed rate disturbance of fractal dimension  $D_b > \text{undisturbed} > \text{high-speed rate disturbance}$  shows that the fractal dimension is positively correlated with the number of disturbance shocks. The results show that the impact rate is negatively correlated with the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12172280, 42077274, 41907259);  
陕西省自然科学基金重点项目 (2020JZ-53)  
收稿日期: 2021 - 06 - 10  
\*通信作者 (E-mail: 18992178070@163.com)

disturbance. Under the same number of disturbance impact, the cumulative dissipation energy and energy density of  $D_b$  of the low-speed rate-disturbed samples are higher than those of the high-speed disturbed samples, while the cumulative reflection energy is opposite.

**Key words:** weakly cemented sandstone; disturbance impact; SHPB; energy dissipation; fractal dimension

## 0 引言

随着中国经济的快速发展,对资源的需求越来越大,尤其是矿产资源,然而中东部浅层矿产资源却逐渐枯竭。因此,近年来对矿产资源的开采逐步转向西部地区<sup>[1-3]</sup>。西部矿区浅层岩体多为第四纪白垩系弱胶结砂岩,在隧道开挖、井巷掘进过程中,普遍采用钻爆法施工。而爆破、地震及机械震动产生的扰动应力波往往对已支护岩体造成损伤,导致岩体内部损伤累积,内部微裂纹、微孔洞开始萌生、扩展甚至贯通,使岩体失去承载能力而失稳,发生岩体崩塌、支护垮塌等安全事故,造成严重后果。而岩体变形破坏实质是一个能量耗散的过程<sup>[4-6]</sup>,因此研究扰动冲击下弱胶结红砂岩的能量耗散和破碎特征,有助于了解工程动力灾害的发生机理,对岩土工程和学术研究都具有重要意义。

能量耗散是岩石材料破坏的原动力<sup>[7]</sup>,岩石在冲击作用下将产生不可逆的能量耗散,而材料破坏后碎块的大小、数量和尺度分布又是能量耗散的宏观表现。因此,近年来国内外许多学者利用 SHPB 装置对岩石进行了能量耗散方面的研究,并取得了丰硕的研究成果。黎立云等<sup>[8]</sup>对不同冲击载荷作用下岩石破坏能量规律进行了研究。谢和平等<sup>[9]</sup>讨论了岩石变形破坏过程中能量耗散、能量释放与岩石强度和整体破坏的内在联系,给出了基于能量耗散的强度丧失准则和基于可释放应变能的整体破坏准则,分析了各种应力状态下岩石单元整体破坏的临界应力。Lundberg 等<sup>[10]</sup>获得了冲击凿岩过程中的最佳能量效率,然而,这些研究并未涉及岩石破碎后的碎屑大小特征;Hong 等<sup>[11]</sup>通过霍普金森压杆(SHPB)试验,对冲击作用后岩石的能量耗散和破碎块度之间的关系进行了量化;李夕兵等<sup>[12]</sup>研究了岩石在动静组合加载下的能耗特征;Feng 等<sup>[13]</sup>研究了应变率效应对能量耗散密度、能量利用率、分形维数特征和断裂表面能的影响;Millon 等<sup>[14]</sup>研究发现能量耗散密度随着应变率或入射能量的增加而增加;Gong 等<sup>[15]</sup>通过 SHPB 试验研究发现,随着加载速率的增加,能量利用率和破碎块度呈减小趋势;张文清等<sup>[16]</sup>研究了煤岩在不同加载速率下的能量耗散和破碎块度分布,研究表明:试件的耗散能密度随应变率的提高而快速增大,分形维数随应变率呈对数增长,导致破碎程度更严重;王利等<sup>[17]</sup>根据岩石分形

断裂切割岩块的块度形成机制,利用能量守恒关系,建立损伤-能量-碎块尺寸理论关系式,并根据块度分布的自相似性,将岩石块度分布特性应用于岩体块度分布预测;李成杰等<sup>[18-19]</sup>对裂隙类组合岩体进行了能量耗散与破碎分形特征研究;戴兵等<sup>[20]</sup>研究了在循环冲击荷载下含孔洞岩石损伤特性与能量耗散。从以上研究成果可以看出,目前研究主要集中在不同加载速率和循环冲击载荷作用下硬岩破坏的能量耗散和分形特征,而将循环扰动冲击和单轴冲击破坏试验结合研究的还较少。在西部地区的实际工程中,广泛分布的软弱岩石常遭遇频繁爆破和机械振动扰动,当高加载速率的动荷载作用于扰动岩体上时,更易造成工程岩体及支护机构的失稳和破坏<sup>[21]</sup>。因此,研究软弱岩石在不同加载速率和次数扰动作用下,遭受破坏性冲击后的能量耗散和分形特征是有价值的。

本文利用直径 50 mm 的分离式霍普金森压杆试验装置(SHPB)对西部地区广泛分布的弱胶结红砂岩进行了不同速率扰动冲击后的破坏性冲击试验,模拟实际工程中的扰动损伤,结合能量耗散理论和分形理论<sup>[22-25]</sup>,研究不同冲击速率和冲击次数扰动作用下,红砂岩在破坏性冲击过程中的能量耗散及破碎块度分布特征,以期工程提供相应的理论依据。

## 1 单轴冲击压缩试验

### 1.1 试样制备

试样取自西部矿区的白垩系洛河组红砂岩,是典型的弱胶结砂岩(后文统称为红砂岩),颜色暗红,质松,由泥质胶结物组成,依据国际岩石力学学会标准,对试样进行实验室加工处理,选用长径比为 0.5 的试样进行试验,试样直径为 50 mm,高度 25 mm,试样的端面平整度经过精细打磨符合规范要求即(平整度在 0.02 mm 公差范围内),如图 1 所示。同时在制取试样过程中剔除表面有明显缺陷及超声波检测波速异常的试样,降低试验结果的离散性,红砂岩的基本物理力学参数见表 1。

表 1 红砂岩基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of red sandstone

密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	纵波波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	单轴抗压强 度/MPa	弹性模量 /GPa	孔隙度 /%
1.874	1897	13.78	1.22	22.8

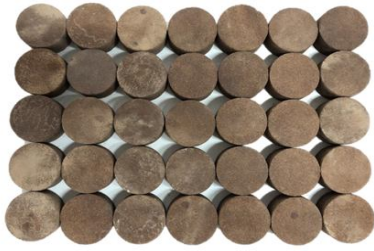


图1 红砂岩试样

Fig. 1 Red sandstone sample

### 1.2 试验方案

由于红砂岩强度较低，为保证在扰动冲击试验过程中试样不发生破坏，需要进行试冲击试验来确定扰动冲击速度和破坏冲击速度。试冲结果发现，当冲击杆速度在 3.2 m/s 时，试样发生临界破坏，因此以速度 3.2 m/s 作为扰动冲击后的破坏速度，并将此速度下单次冲击破坏作为对照组（DZ 组）试验，然后分别对红砂岩试样进行均速为 1.65 m/s 和 1.27 m/s 的扰动冲击试验，扰动次数为 1, 3 和 5，为区别两种速率扰动冲击，本试验将加载速率为 1.65 m/s 的扰动定义为较高速率扰动（A 组），加载速率为 1.27 m/s 的定义为低速率扰动（C 组），从而来模拟实际工程中不同速率冲击荷载对围岩造成的扰动损伤，最后对经过不同扰动损伤的试样进行与对照组相同的冲击破坏试验，研究不同扰动水平下弱胶结红砂岩的能量耗散规律，冲击破坏后收集碎块进行筛分试验，分析其分形特征，具体的试验方案如图 2 所示。

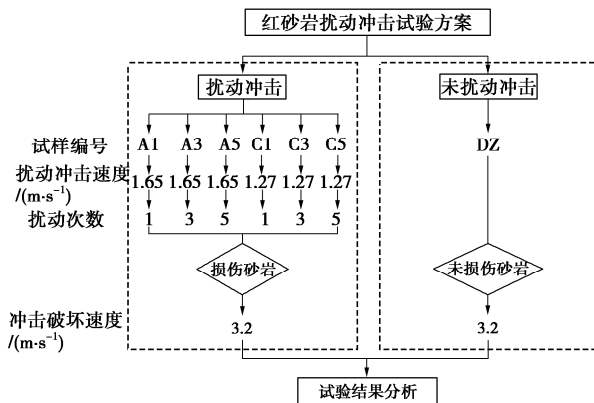


图2 试验方案流程图

Fig. 2 Flow chart of experimental scheme

### 1.3 应力平衡验证

在扰动冲击试验过程中，为保证试件两端在扰动冲击过程中受力处于均匀状态，保证试验的可靠性，因此需对应力平衡性进行验证。图 3 为试件 A1-1 在第一次扰动冲击时的应力平衡图。由图可知，入射应力波和反射应力波之和与透射应力波曲线基本重合，表明扰动冲击时试件达到应力平衡。

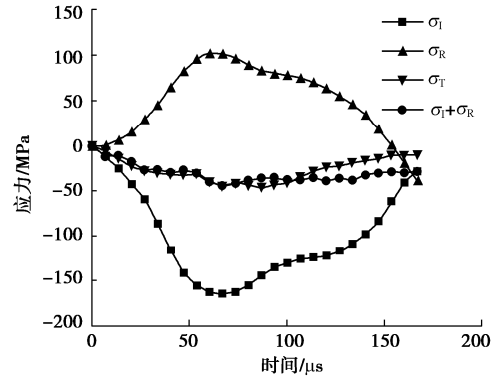


图3 动态应力平衡验证

Fig. 3 Verification of dynamic stress equilibrium

## 2 能量耗散分析

### 2.1 能量计算

入射能量、反射能量、透射能量和耗散能量是 SHPB 测试中的 4 个主要能量。入射能量越大，作用在试样上的冲击应力越大，试样的损伤程度越大。当入射能量固定时，透射能量越大，样品的致密性和均匀性越好。反射能量越大，样品内部损伤越严重。

因此，分析测试过程中入射能量，反射能量，透射能量和耗散能量的变化规律可以有效准确反映出样品内部损伤的变化。各应力波  $\sigma_i(t)$  携带的能量计算公式如下：

$$W_i = A_c E_c C_c \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt \quad (i = I, R, T) \quad (1)$$

式中  $A_c$  为输入与输出杆的横截面积； $E_c$  为输入杆与输出杆材料的弹性模量； $C_c$  为一维应力波波速，本试验为 5172 m/s； $\varepsilon_i(t)$  为入射波、反射波和透射波所对应的应变，如图 4 所示为试件 A1-1 在第一次扰动冲击时的应变时程曲线。

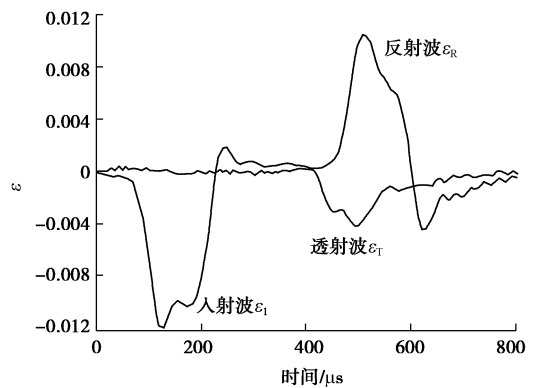


图4 动态冲击应变时程曲线

Fig. 4 Curves of strain and time under impact

根据能量守恒定律，SHPB 冲击试验中的总耗散能  $W_D$  可表示为

$$W_D = W_I - W_R - W_T, \quad (2)$$

式中,  $W_I$ ,  $W_R$  和  $W_T$  分别为入射能、反射能和透射能, 可由式 (1) 计算得出。

总耗散能  $W_D$  主要包括以下 3 部分: ①产生断裂面和分支裂纹所用的断裂能量; ②试样破碎后飞溅碎片携带的动能; ③其他形式消耗的能量, 如热能、声能等。根据文献[26]的研究可知, 后两种耗散能量占比不足 5%, 而在冲击过程中试件产生断裂面、分支裂纹和破坏所吸收的能量为总耗散能量的主要占比。因此, 试样的总吸收能量可近似用总耗散能表示。

为衡量扰动冲击作用下耗散能用于试件破坏做功的能力, 引入能量耗散密度  $\varepsilon_d$  的概念, 用试样单位体积能量耗散表示:

$$\varepsilon_d = \frac{W_D}{V}, \quad (3)$$

式中,  $V$  为试件体积。

同时, 为了解不同加载速率扰动冲击下红砂岩能量耗散的强弱, 引入能量耗散率  $N$  的概念, 通常定义能量耗散率为总耗散能与入射能的比值, 即

$$N = \frac{W_D}{W_I} \times 100\%。 \quad (4)$$

根据式 (1) ~ (4), 计算得到试件在冲击扰动下和破坏后的能量, 在研究试样的能量耗散规律时, 主要对引起试样破坏的反射能  $W_R$ 、耗散能  $W_D$ 、破碎耗能密度  $\varepsilon_d$  和能量耗散率  $N$  展开分析。

### 2.2 扰动冲击后能量耗散分析

在不同加载速率循环扰动冲击试验中, 通过固定冲击杆的位置以及试冲击试验确定的冲击气压, 保证同一加载速率扰动冲击下的入射波即入射能量是一致的, 当扰动冲击均速分别为 1.65 m/s 和 1.27 m/s 时, 对应的 A、C 两组扰动冲击试样的入射能量能够控制在  $3.85 \text{ J} \pm 5\%$  和  $2.55 \text{ J} \pm 5\%$  范围内, 如图 5 所示, 两组入射能量相差 1.3J 左右, 平均应变率分别为  $29.84 \text{ s}^{-1}$  和  $20.73 \text{ s}^{-1}$ , 在同一加载速率扰动下, 入射能量在合理的范围内波动, 因此试验结果可靠。

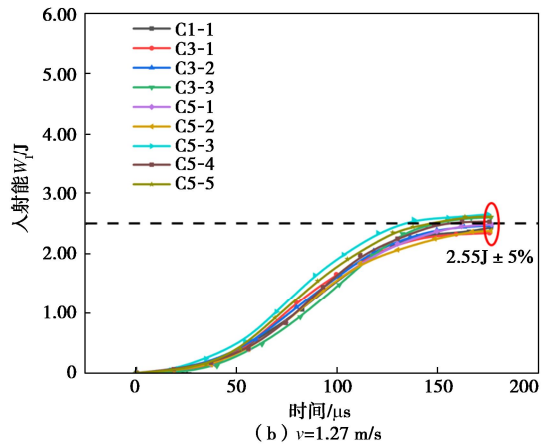
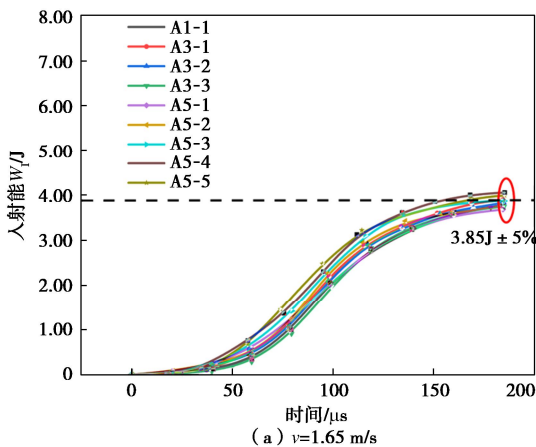
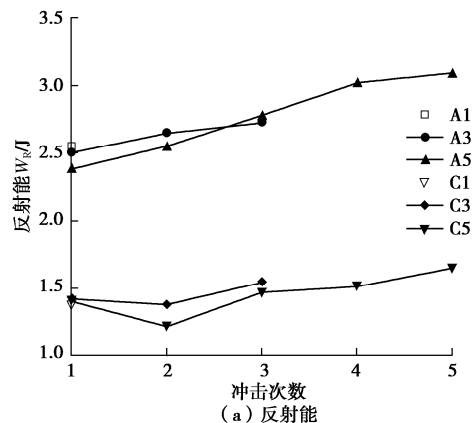


图 5 不同加载速率扰动冲击下入射能量时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of incident energy under disturbance impact with different loading rates

由图 6 可以看出, 在不同加载速率扰动冲击作用下, 透射能远小于反射能和耗散能, 这主要是由于入射能量从高波阻抗的入射杆传递到低波阻抗的岩样时, 能量在弱胶结砂岩内部发生多次反射和耗散, 因此只有少部分能量传递到透射杆。随着扰动冲击次数的增加, 图 6 (a), (b) 结果显示, A 组反射能由 2.486 J 升高到 3.109 J, 呈单调递增趋势, 透射能则由 0.27 J 降低到 0.178 J, 呈单调递减趋势, C 组反射能由 1.402 J 先降低到 1.297 J 再升高到 1.651 J, 呈先降低后升高趋势, 透射能则由 0.032 J 先升高到 0.395 J 再降低到 0.031 J, 呈先升高后降低趋势, 总体 A 组反射能是 C 组的 2 倍左右, 且在相同扰动冲击次数下, A 组反射能与 C 组最大相差 1.509 J。图 6 (c) 表明, A 组耗散能除首次扰动冲击 1.03 J 略高于 C 组 0.986 J 外, 其余均低于 C 组, 呈单调递减, C 组则呈先升高后降低, 且 A 组下降速率高于 C 组。图 6 (d) 表明, 不同加载速率扰动下的能量耗散率  $N$  变化趋势与耗散能相似, 扰动加载速率较低的 C 组试样的平均  $N$  值为 40.5%, 明显高于 A 组的 23.9%, 说明 C 组试样用于破坏所吸收能量的能力强于 A 组试样, 但吸收能量多用于内部损伤扩展, 无明显的宏观表现。



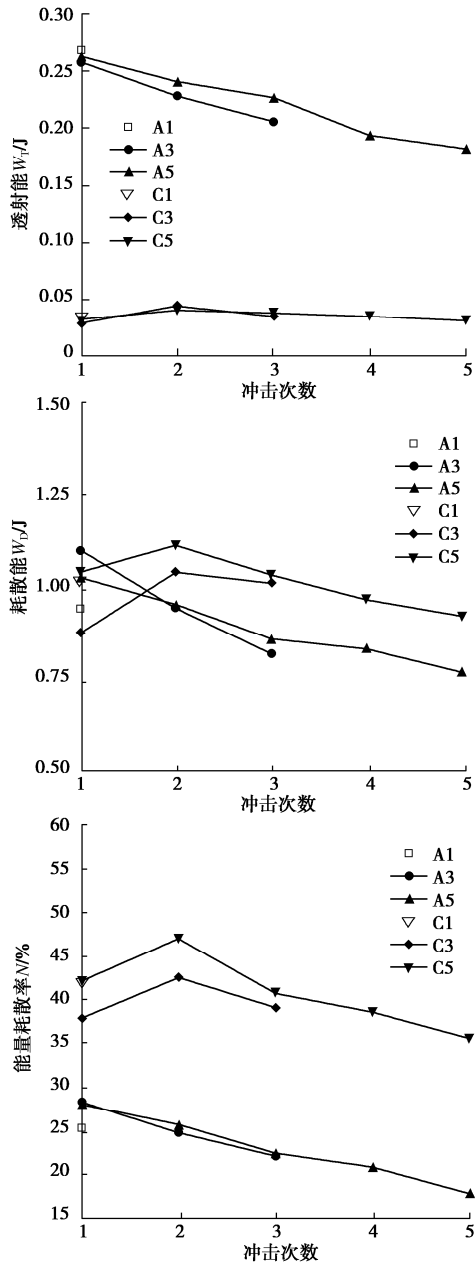


图 6 扰动冲击下砂岩各能量随冲击次数的变化关系

Fig. 6 Relationship between energy of sandstone and impact times under disturbance impact

由以上结果可知，在不同加载速率扰动冲击下，试样的反射能和耗散能呈现较大的差异，加载速率较高的 A 组试样反射能高于 C 组试样，而耗散能则相反。因此，为了更直观反映不同加载速率及扰动次数冲击下能量耗散规律，结合图 7 试样在扰动冲击后的宏观损伤形态进行分析。在首次冲击过后，由于 A 组试样具有较高加载速率，使得靠近入射杆端的试样表面沿冲击方向上出现了单条未贯通宏观裂纹，而随着扰动冲击次数增加到 3 和 5 次时，试样表面未贯通宏观裂纹的深度沿冲击方向进一步加深，并且在主裂纹周边出现掉渣和较大块度剥落现象，该过程中试样宏观

裂纹的深度以及端面颗粒剥落，造成应力波的反射面积增加，使得反射能呈递增趋势，穿透试样的透射能降低，耗散能下降。

对于扰动加载速率较低的 C 组试样，在首次冲击扰动作用下，除小部分能量造成试样端部的颗粒脱落，剩余大部分能量对靠近入射端试样局部产生了压实增强作用，促进了应力波在压实区域的传输，进而造成第 2 次冲击过程中试样的反射能降低，透射能升高，试样内部微裂纹的萌生和扩展致使耗散能增加。随着扰动冲击次数的增加，试样端部颗粒剥落区域面积增加，试样周边出现微裂纹，但未出现明显的宏观裂隙，说明在低加载速率扰动作用下，反射能不能对试样造成明显的宏观损伤，但耗散能降低了试样内部颗粒间的黏结力，使得颗粒间相对位置在错动和滑移后发生改变，试样内部微裂隙数量增加，致密性和均匀性降低，阻碍了能量的传播，造成反射能量增加，透射能和耗散能降低。

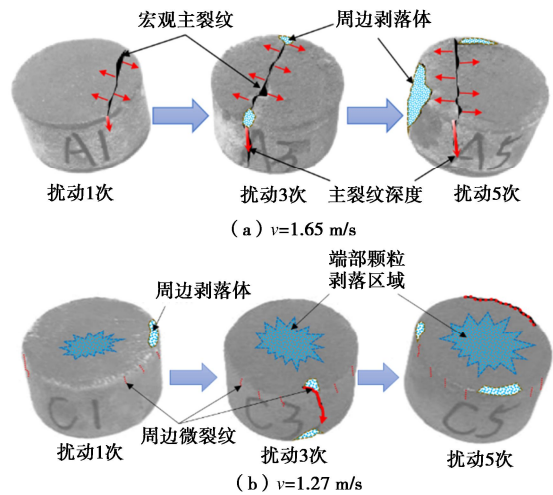


图 7 不同加载速率循环扰动后试样损伤形态

Fig. 7 Damage morphology of samples after cyclic disturbance at different loading rates

图 8 反映的是不同扰动冲击速率下耗散能密度与冲击次数的关系。由图中可以看出，随着冲击次数的增加，不同加载速率扰动下耗散能密度与耗散能变化趋势基本保持一致，C 组试样的平均耗散能密度为  $0.021 \text{ J/cm}^3$ ，高于 A 组试样的  $0.0187 \text{ J/cm}^3$ ，进一步说明了耗散能在低速率扰动且未对试样造成宏观损伤的 C 组试样中，用于试件破坏做功的能力要强于高速率扰动且具有宏观损伤的 A 组试样。

### 3 分形特征

#### 3.1 破碎块度的分布

为定量分析试样在不同加载速率及次数扰动基础

表 2 扰动作用下红砂岩冲击破碎块度的筛分结果

Table 2 Screening results of impact fragmentation of red sandstone under disturbing action

试件编号	筛分直径/mm										总质量 /g	$D_b$
	0.080	0.160	0.315	0.630	1.250	2.500	5.000	10.000	15.000	30.000		
A1-Z	2.18	3.56	1.52	1.20	0.80	3.44	6.48	2.53	35.82	39.18	96.71	2.365
A3-Z	2.78	4.41	1.33	1.20	0.72	2.65	7.46	3.33	33.96	37.35	95.19	2.403
A5-Z	5.49	10.54	3.23	3.35	2.00	6.95	13.39	13.18	9.37	34.07	101.57	2.592
C1-Z	7.84	5.34	1.38	1.35	0.70	3.35	13.89	24.45	36.46	0.00	94.76	2.586
C3-Z	8.68	12.39	3.50	3.43	2.15	6.68	12.68	15.64	30.57	0.00	95.72	2.644
C5-Z	9.40	17.37	4.56	3.35	1.80	7.91	15.73	16.52	16.6	0.00	93.24	2.673
DZ	3.66	10.41	2.95	2.28	1.19	4.11	4.87	8.50	34.84	23.01	95.82	2.537

注: 试件编号说明, A 和 C 分别表示较高速率扰动组和低速率扰动组, 编号 1, 3, 5 表示需要进行扰动的次数, -Z 表示每组所有扰动次数完成后的破坏性冲击试验, DZ 表示对照组。

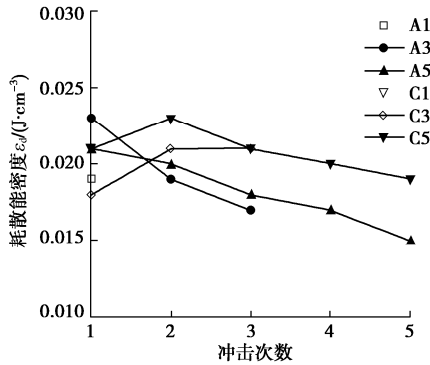


图 8 扰动冲击下耗散能密度与冲击次数的关系

Fig. 8 Relationship between dissipative energy density and impact times under disturbance impact

上, 施加相同破坏荷载后的破坏程度, 对破坏后的试样碎块进行收集, 选用 0.000~0.080, 0.080~0.160, 0.160~0.315, 0.315~0.630, 0.630~1.250, 1.250~2.500, 2.500~5.000, 5.000~10.000, 10.000~15.000 和 15.000~30.000 共计 10 个等级的分级筛对碎块进行筛分, 并通过高灵敏度电子天平称量每个等级孔径筛中滞留的碎块质量, 筛分结果如表 2 所示, 冲击破坏后的破坏形态如图 9 所示。

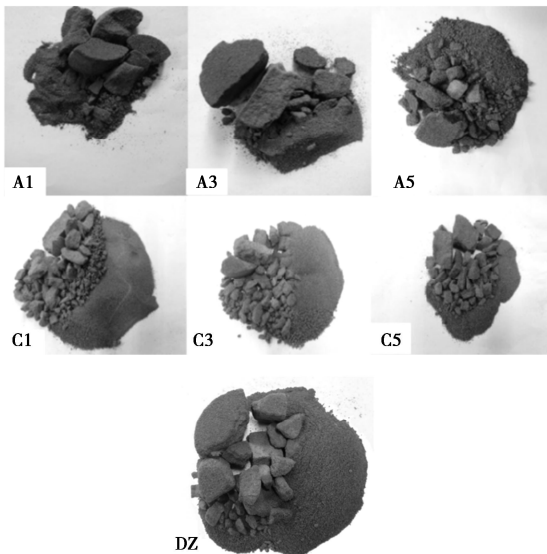


图 9 扰动与未扰动试样冲击破坏后的破碎形态

Fig. 9 Fracture morphology of disturbed and undisturbed samples after impact failure

由图 9 可以直观看出, 与未扰动冲击的对照组相比, 较高加载速率扰动下的 A 组试样, 其破碎形态中保留有大粒径块度, 且破碎面与扰动冲击形成的主裂隙面一致, 试样破碎程度弱于 DZ 组。低加载速率扰动下的 C 组试样, 其破碎形态中无明显大粒径块度, 主要以中、小粒径为主, 试样破碎程度高于 DZ 组。因此从最终破碎形态上初步证实了上节扰动冲击过程中的能量耗散规律。

通过表 2 计算获得累计筛下物占总质量百分比, 如图 10 所示。

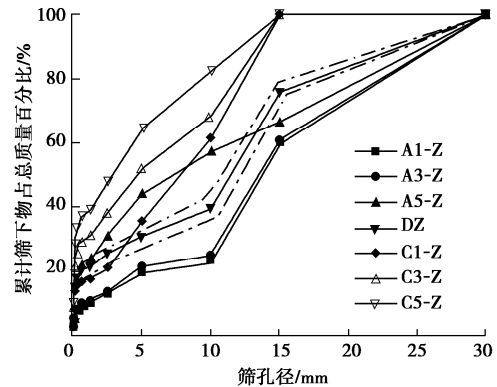


图 10 扰动与未扰动试样冲击破坏后的破碎块度分布

Fig. 10 Fragmentation distribution of disturbed and undisturbed samples after impact failure

由图 10 可以看出, 经过不同扰动冲击的 A、C 两组破碎块度分布曲线明显位于未扰动冲击组即对照组 (DZ) 曲线两侧, 高速率扰动的 A 组试样除 A5-Z 组外, 破碎块度分布曲线均位于 DZ 组下方, 而低速率扰动的 C 组试样则位于 DZ 组上方, 并且碎块粒径大于 30 mm 的占比为 0, 表明不同加载速率扰动冲击对破碎块度分布有较大的影响。对比 A、C 两组数据发现, 不同速率扰动冲击下累计筛下物粒径占比不同, 低速率扰动的 C 组试样在小粒径 (0~2.5 mm) 和中粒径 (2.5~10 mm) 占比较大, 达到总占比的 61.52%~82.20%, 而高速率扰动的 A 组试样在中粒径 (2.5~

10 mm) 和大粒径 (10~30 mm) 上占比较大, 达到总占比的 68.93%~86.87%, 并且在 中粒径的占比上, C 组的占比 29.58%~40.46% 大于 A 组的 9.32%~26.16%, 表明经过低速率扰动冲击后的试样吸能率更高, 内部损伤加剧, 在遭受破坏性冲击时, 表现为破碎程度更为严重。

### 3.2 扰动冲击作用对红砂岩分形维数的影响

岩石冲击破碎块度具有形状不规则、分布不均等特点, 故需采用分形几何来进行处理, 根据分形几何中的质量-等效尺寸关系, 可得红砂岩冲击破碎块度的分布方程为

$$y = \frac{M_R}{M_T} = \left( \frac{R}{R_m} \right)^{3-D_b} \quad (5)$$

式中  $R$  为碎块尺寸;  $R_m$  为碎块的最大尺寸 (mm);  $M_R$  为碎块尺寸小于  $R$  的累积质量 (g);  $M_T$  为碎块总重 (g);  $D_b$  为分形维数。对式 (5) 两边取对数可得

$$\lg(y) = \lg\left(\frac{M_R}{M_T}\right) = (3 - D_b) \lg\left(\frac{R}{R_m}\right) \quad (6)$$

根据式 (6) 以及图 11 可知, 拟合直线斜率即为  $(3 - D_b)$ 。

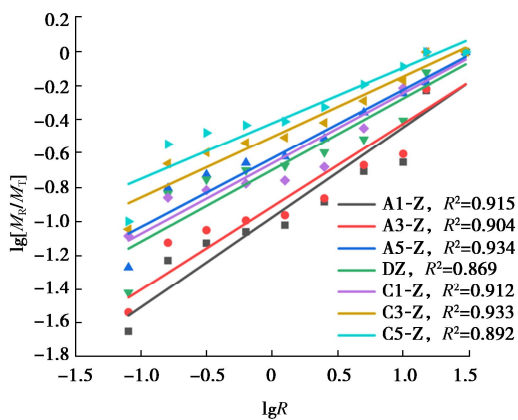


图 11 SHPB 冲击试验中  $\lg[M_R/M_T] - \lg R$  曲线

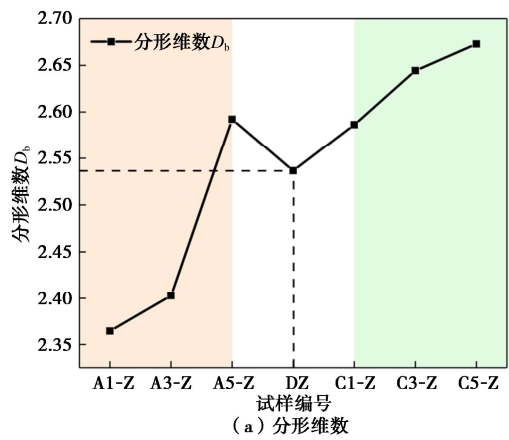
Fig. 11 Curve of  $\lg[M_R/M_T] - \lg R$  in SHPB impact tests

由图 11 可以看出, 各组冲击数据散点在双对数曲线中的拟合直线相关性较好, 表明红砂岩在经历扰动冲击作用后再进行冲击破坏试验的破碎块度具有很好的自相似性, 满足分形特征, 其中分形维数值越大, 表明碎块数目越多, 碎块尺寸越小, 试样的破碎程度越高。

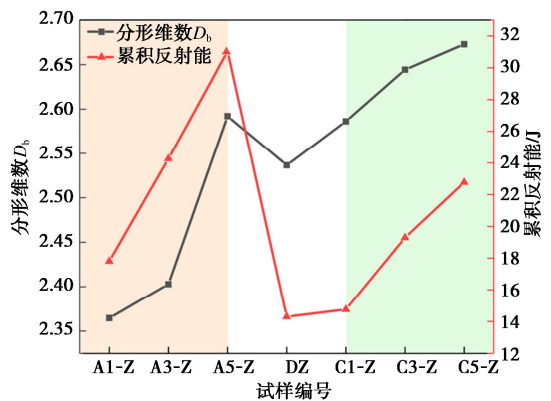
根据表 2 中分形维数的计算结果, 绘制不同扰动冲击速率作用下, 扰动冲击次数与分形维数之间的关系图, 如图 12 (a) 所示。由图中可以看出, 随着扰动冲击次数的增加, 试样的分形维数都呈现增大趋势, 但增长范围不同, 以对照组 (DZ) 为分界线, C、A

两组试样的增长起点分别位于上、下两侧。A 组试样的分形维数范围在 2.365~2.592, C 组试样的分形维数范围在 2.586~2.673, DZ 组的分形维数为 2.537。上述现象说明分形维数与扰动冲击次数呈正相关, 与扰动冲击速率呈负相关, 进一步说明了低扰动速率对试样内部造成损伤更为严重。

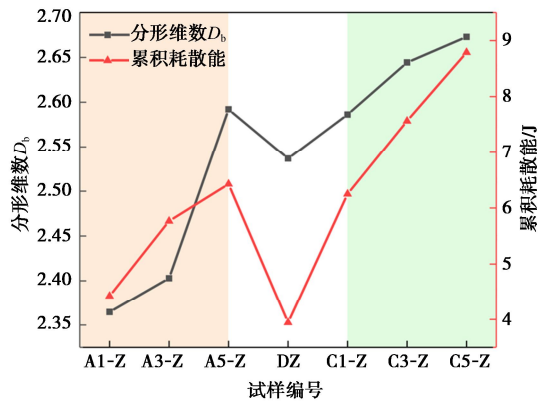
为研究试样冲击破坏过程中各累积能量耗散规律与分形特征之间的内在联系。由图 12 (b), (c), (d) 所示, 经历不同扰动冲击损伤的 A、C 两组试样的累积反射能、累积耗散能、累积耗散能密度以及分形维数均随冲击次数的增加呈增大趋势, 说明扰动冲击次数与试样的能量耗散和分形维数呈正相关性。



(a) 分形维数



(b) 分形维数与累积反射能



(c) 分形维数与累积耗散能

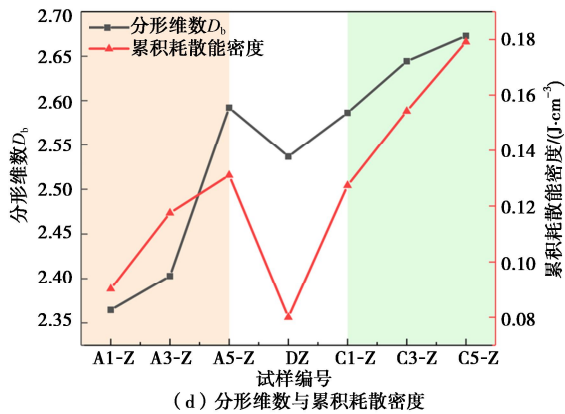


图12 分形维数与各累积能量关系曲线

Fig. 12 Relationship between fractal dimension and cumulative energy

具体的累积反射能与分形维数的关系是以对照组(DZ)为分界点, 高速率扰动的A组试样, 其累积反射能及增长速率均高于低速率扰动的C组试样, 但分形维数却低于C组, 说明A组试样的破碎程度主要取决于反射能, 而在相同扰动冲击次数下, 不同扰动冲击速率的A、C两组累积反射能与分形维数呈负相关性, 说明反射能越大其破碎程度反而越低。由图12(c), (d)可知, 低速率扰动的C组试样, 其累积耗散能和耗散能密度及增长速率均高于高速率扰动的A组试样, 对应分形维数也高于A组, 说明C组试样在较低扰动冲击速率下能够较大幅度地吸收冲击动能, 耗散能主导试样的损伤, 即分形维数与累积耗散能呈正相关性。

由上述结果可知, 在不同加载速率扰动冲击作用下, A、C两组试样表现出不同的损伤累积方式。对于抗拉性能差的弱胶结红砂岩, 在较高速率扰动作用下, A组试样的能量形式以造成宏观拉剪破坏的反射能为主, 而在低速率扰动作用下, C组试样则以用于改变内部弱胶结颗粒间相对位置和微裂隙扩展的耗散能为主。当具有宏观主裂隙的A组试样遭遇较大冲击破坏荷载时, 试样将沿冲击方向的主裂纹发生破坏, 以脆性破坏为主, 破碎程度较低; 而对于无宏观损伤但内部损伤更为严重的C组试样, 破坏主要由试样内部发育充分的微裂隙扩展和贯通造成, 破碎程度较高, 分形维数较大, 进一步说明了低速率扰动冲击虽不能对试样造成宏观损伤, 但其对弱胶结砂岩的内部损伤劣化作用却强于高速率扰动冲击。

因此, 在隧道掘进、洞室开挖以及此类工程后期的运营维护中, 不仅要加强对宏观裂隙发育软弱岩层的支护工作, 更要加强对经受过低速扰动冲击的软弱岩层损伤探查和支护, 因为这部分岩体在遭受破坏性冲击作用后, 破碎程度更为严重。

## 4 结 论

利用分离式霍普金森压杆装置对弱胶结红砂岩在不同加载速率、不同次数扰动冲击以及是否扰动的条件下, 遭受相同冲击荷载破坏过程中的能量耗散与分形特征展开研究。主要得出以下结论:

(1) 在扰动冲击作用下, 随着扰动冲击次数的增加反射能递增而透射能和耗散能呈减小趋势, 其中较高速率扰动冲击的能量形式以造成试样宏观拉剪破坏的反射能为主, 低速率扰动冲击则以改变试样内部弱胶结颗粒间相对位置和微裂隙扩展的耗散能为主, 且低速率扰动冲击下试样的耗散能、能量耗散率和能量耗散密度高于较高速率扰动冲击, 表明低速率扰动冲击下试样的能量利用率更高。

(2) 在冲击破坏试验中, 随着扰动冲击次数的增加, 低速率扰动后试样的破碎程度相较于未扰动与高速率扰动更为严重, 对应分形维数  $D_b$  低速率扰动(2.586~2.673) > 未扰动 2.537 > 高速率扰动(2.365~2.592), 表明分形维数与扰动冲击次数呈正相关, 与扰动冲击速率呈负相关; 在相同扰动冲击次数下, 低速率扰动试样的  $D_b$  所对应累积耗散能和耗散能密度高于较高速率扰动试样, 而对应的累积反射能则相反。

(3) 经历扰动冲击后的弱胶结砂岩在冲击破坏过程中, 低速率扰动试样在小粒径(0~2.5 mm)和中粒径(2.5~10 mm)占比较大, 达到总占比的61.52%~82.20%, 而高速率扰动试样在中粒径(2.5~10 mm)和大粒径(10~30 mm)上占比较大, 达到总占比的68.93%~86.87%, 表明经过低速率扰动冲击后的试样吸能率更高, 内部损伤加剧, 在遭受破坏性冲击时, 表现为破碎程度更为严重。

## 参考文献:

- [1] FAN L F, REN F, MA G W. Experimental study on viscoelastic behavior of sedimentary rock under dynamic loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(3): 433 - 438.
- [2] LI X B, WENG L. Numerical investigation on fracturing behaviors of deep-buried opening under dynamic disturbance[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 54: 61 - 72.
- [3] WENG L, HUANG L Q, TAHERI A, et al. Rockburst characteristics and numerical simulation based on a strain energy density index: a case study of a roadway in Linglong gold mine, China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 69: 223 - 232.



- [4] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (XIE He-ping. Fractal—Introduction to Rock Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [5] WENG L, WU Z J, LIU Q S, et al. Energy dissipation and dynamic fragmentation of dry and water-saturated siltstones under sub-zero temperatures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, **220**: 106659.
- [6] WANG L, QIN Y, JIA H B, et al. Study on mechanical properties and energy dissipation of frozen sandstone under shock loading[J]. *Shock and Vibration*, 2020(4): 8893128.
- [7] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2008, **40**(2): 26 - 31. (ZHAO Zhong-hu, XIE He-ping. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2008, **40**(2): 26 - 31. (in Chinese))
- [8] 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 Li-yun, XU Zhi-qiang, XIE He-ping, 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))
- [9] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(17): 3003 - 3010. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(17): 3003 - 3010. (in Chinese))
- [10] LUNDBERG B, OKROUHLIK M. Efficiency of a percussive rock drilling process with consideration of wave energy radiation into the rock[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, **32**(10): 1573 - 1583.
- [11] 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.
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] FENG J J, WANG E Y, SHEN R X, et al. Investigation on energy dissipation and its mechanism of coal under dynamic loads[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2016, **11**(5): 657 - 670.
- [14] MILLON O, RUIZ-RIPOLL M L, HOERTH T. Analysis of the behavior of sedimentary rocks under impact loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, **49**(11): 4257 - 4272.
- [15] GONG F Q, YE H, LUO Y. The effect of high loading rate on the behaviour and mechanical properties of coal-rock combined body[J]. *Shock and Vibration*, 2018(6): 1 - 9.
- [16] 张文清, 石必明, 穆朝民. 冲击载荷作用下煤岩破碎与耗能规律实验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, **33**(2): 375 - 380. (ZHANG Wen-qing, SHI Bi-ming, MU Chao-min. Experimental research on failure and energy dissipation law of coal under impact load[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, **33**(2): 375 - 380. (in Chinese))
- [17] 王 利, 高 谦. 基于损伤能量耗散的岩体块度分布预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(6): 1202 - 1211. (WANG Li, GAO Qian. Fragmentation distribution prediction of rock based on damage energy dissipation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(6): 1202 - 1211. (in Chinese))
- [18] 李成杰, 徐 颖, 张宇婷, 等. 冲击荷载下裂隙类煤岩组合体能量演化与分形特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, **38**(11): 2231 - 2241. (LI Cheng-jie, XU Ying, ZHANG Yu-ting, et al. Study on energy evolution and fractal characteristics of cracked coal-rock-like combined body under impact loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, **38**(11): 2231 - 2241. (in Chinese))
- [19] 李成杰, 徐 颖, 叶洲元. 冲击荷载下类煤岩组合体能量耗散与破碎特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(5): 981 - 988. (LI Cheng-jie, XU Ying, YE Zhou-yuan. Energy dissipation and crushing characteristics of coal-rock-like combined body under impact loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(5): 981 - 988. (in Chinese))
- [20] 戴 兵, 罗鑫尧, 单启伟, 等. 循环冲击荷载下含孔洞岩石损伤特性与能量耗散分析[J]. *中国安全科学学报*, 2020, **30**(7): 69 - 77. (DAI Bing, LUO Xin-yao, SHAN Qi-wei, et al. Analysis on damage characteristics and energy dissipation of rock with a single hole under cyclic impact loads[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, **30**(7): 69 - 77. (in Chinese))
- [21] 邓树新, 王明洋, 李 杰, 等. 冲击扰动下滑移型岩爆的模拟试验及机理探讨[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(12): 2215 - 2221. (DENG Shu-xin, WANG Ming-yang, LI Jie, et al. Mechanism and simulation experiment of slip-type rock bursts triggered by impact disturbances[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(12): 2215 - 2221. (in Chinese))

- [22] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729 - 1740. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1729 - 1740. (in Chinese))
- [23] 谢和平, 彭瑞东, 鞠 杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565 - 3570. (XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3565 - 3570. (in Chinese))
- [24] 马芹永, 高常辉. 冲击荷载下玄武岩纤维水泥土吸能及分形特征[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 3921 - 3928, 3968. (MA Qin-yong, GAO Chang-hui. Energy absorption and fractal characteristics of basalt fiber-reinforced cement-soil under impact loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 3921 - 3928, 3968. (in Chinese))
- [25] 金解放, 吴 越, 张 睿, 等. 冲击速度和轴向静载对红砂岩破碎及能耗的影响[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(10): 42 - 55. (JIN Jie-fang, WU Yue, ZHANG Rui, et al. Effect of impact velocity and axial static stress on fragmentation and energy dissipation of red sandstone[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(10): 42 - 55. (in Chinese))
- [26] 平 琦, 马芹永, 袁 璞. 岩石试件 SHPB 劈裂拉伸试验中能量耗散分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 401 - 407. (PING Qi, MA Qin-yong, YUAN Pu. Energy dissipation analysis of stone specimens in SHPB tensile test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 401 - 407. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》青年论坛学术活动进展报告

为了更好地活跃学术气氛、扩大学术交流和促进学科发展,并进一步加强《岩土工程学报》与岩土界青年学者的联系,利用《岩土工程学报》各媒介平台,特别是利用学报微信公众号平台(岩土学术 CJGE)——它具有学术传播快捷、形式多样的特点——开展《岩土工程学报》青年论坛。分专题推出岩土界青年学者学术成果报道和学术演讲报告,学报编辑部邀请学报青年编委和岩土界青年学术骨干担任论坛各专题的召集人,组织广大岩土界青年学者参加本论坛的学术交流。

《岩土工程学报》青年论坛自 2021 年 9 月 7 日开讲以来已历经半年,半年来论坛组织发布了五个专题方向的 38 个学术报告,国内外著名高校、科研院所和公司等 33 家单位的青年学者代表在论坛上作了学术演讲,学术报告的阅读量总计达到 68176 人次,其中单个报告的最大阅读量达到 9260 人次,阅读量达 6000 人次以上的报告有 2 个,阅读量达 2000 人次以上的报告有 8 个,阅读量达 1000 人次以上的报告有 19 个。

《岩土工程学报》青年论坛第一专题:土工测试与勘察技术(第一期:土工测试技术),于 2021 年 9 月 7 日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,共包括 6 个学术报告,各学术报告的题目见附录 1。第一专题召集人为东南大学、安徽建筑大学教授蔡国军编委。

### 附录 1:《岩土工程学报》青年论坛第一专题:土工测试与勘察技术(第一期:土工测试技术)报告列表

1. 非饱和土热-水-力耦合试验系统研制及应用(北京交通大学蔡国庆教授)
2. 上海软土的小应变特性、HSS 模型参数取值及深基坑变形分析(同济大学顾晓强教授)
3. 季冻区渠道灾变离心模拟技术(南京水利科学研究院黄英豪教授级高工)
4. 基于地震成像的近地表波速测试技术及应用(华中科技大学苗雨教授)

《岩土工程学报》青年论坛第二专题:桩基理论与实践新进展,于 2021 年 10 月 8 日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,共包括 7 个学术报告,各学术报告的题目见附录 2。第二专题召集人为同济大学教授梁发云编委。

《岩土工程学报》青年论坛第三专题:极端环境下的岩土工程,于 2021 年 11 月 24 日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,本专题共包括 8 个学术报告,各学术报告的题目见附录 3。第三专题召集人为北京工业大学教授路德春编委。

《岩土工程学报》青年论坛第四专题:岩石动力学及分析方法,于 2021 年 12 月 24 日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,本专题共包括 10 个学术报告,各学术报告的题目见附录 4。第四专题召集人为华侨大学教授俞缙编委。

《岩土工程学报》青年论坛第五专题:软土地基排水固结理论与工程实践,于 2022 年 2 月 9 日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,本专题共包括 7 个学术报告,各学术报告的题目见附录 5。第五专题召集人为南京水利科学研究院教授级高工何宁编委。

(本刊编辑部 2022 年 3 月)

5. 液化场地桩-土-结构体系相互作用振动台试验与相关研究(哈尔滨工业大学唐亮教授)
6. 软土路基压电特性测试(温州大学王军教授)

### 附录 2:《岩土工程学报》青年论坛第二专题:桩基理论与实践新进展报告列表

1. 桩基动力学理论新进展(重庆大学丁选明教授)
2. 砂土液化大变形本构模型在桩基础地震响应研究中的应用(清华大学王睿教授)
3. 砂性土中桩打入过程多尺度模拟(浙江大学郭宁教授)

(下转 642 页)