



## 动载下含内部裂隙类岩体力学响应与能量耗散规律

蒋力帅 杨一鸣 赵阳 李皓哲 吴琦 彭晓涵

### 引用本文:

蒋力帅, 杨一鸣, 赵阳, 等. 动载下含内部裂隙类岩体力学响应与能量耗散规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 137–150.  
JIANG Lishuai, YANG Yiming, ZHAO Yang. Mechanical response and energy dissipation law of rock-like mass with internal fractures under dynamic load[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 137–150.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1409>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 砂型3D打印材料对类软岩力学特性影响规律及机理

Influence and mechanism of printing materials on the mechanical properties of sand powder 3D printed weak rock-like materials  
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 84–94 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-2060>

#### 低速冲击载荷扰动煤体破裂动力学特征与能量耗散规律研究

Study on dynamics characteristics and energy dissipation laws of coal fracture under lowspeed impact load  
煤炭科学技术. 2024, 52(11): 273–284 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1341>

#### 预制孔洞煤样冲击力学特性及能量耗散试验研究

Experimental study on impact mechanical properties and energy dissipation of predrilled hole coal samples under impact load  
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 92–103 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1789>

#### 非静水压条件下深部岩石能量耗散规律及破坏特征试验研究

Experimental study on energy dissipation and failure characteristics of rock at depth under non-hydrostatic pressure condition  
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 83–96 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1504>

#### 含裂隙煤体能量耗散特征与冲击倾向性研究

Research on energy dissipation characteristics and coal burst tendency of fissured coal mass  
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 32–44 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2242>

#### 含共面双裂隙复合岩三轴力学行为及能量演化规律

Study on triaxial mechanical behavior and energy evolution of composite rock with coplanar double fractures  
煤炭科学技术. 2024, 52(12): 71–83 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1566>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

蒋力帅, 杨一鸣, 赵 阳, 等. 动载下含内部裂隙类岩体力学响应与能量耗散规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 137–150.

JIANG Lishuai, YANG Yiming, ZHAO Yang, *et al.* Mechanical response and energy dissipation law of rock-like mass with internal fractures under dynamic load[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 137–150.

## 动载下含内部裂隙类岩体力学响应与能量耗散规律

蒋力帅, 杨一鸣, 赵 阳, 李皓哲, 吴 琦, 彭晓涵

(山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

**摘 要:** 深部巷道围岩中煤、泥岩、砂岩等常见岩石强度较低、裂隙发育, 在深部复杂力学环境下易发生动力灾害, 研究内部裂隙特征对岩体的动力学响应及能量耗散规律对明晰动力灾害的发生具有重要意义。为研究内部裂隙倾角、裂隙分布对类岩体动态力学响应与能量耗散规律的影响, 通过砂型 3D 打印制备含内部裂隙的类岩体试样, 采用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 对试样进行动态压缩试验, 使用高速摄像机观察裂纹发育情况, 并结合能量耗散原理和分形理论分析其动力破坏特性。研究结果表明: 随着内部裂隙倾角角度增加, 类岩体试样动态峰值应力和动态弹性模量先减小后增大, 均在 30° 时最低; 随着裂隙数量的增多, 垂直分布裂隙对试样的动态峰值应力影响大于水平分布裂隙; 试样破坏的能量耗散随裂隙倾角角度增加呈现先减小后增加的规律, 裂隙倾角较小时, 松散充填物的存在会加剧应力波衰减, 使能量耗散增加, 随裂隙倾角增加, 充填物对试样的能量耗散影响逐渐减小; 相同裂隙倾角下, 随裂隙数量的增加, 垂直分布裂隙试样能量耗散小于水平分布裂隙, 与试样动态峰值应力呈正相关; 随着裂隙倾角的增大, 试样的分形维数先增加后减小, 30° 裂隙倾角时试样的破碎程度最大, 试样的分形维数最大; 裂隙数量的增多使试样破碎块度逐渐均匀, 试样的分形维数呈现增大趋势。研究结果揭示了内部裂隙对岩体动力学特性及能量耗散的影响规律, 为采用砂型 3D 打印技术开展复杂内部裂隙岩体动力学试验提供了重要基础, 对进一步了解实际工程中深部软岩巷道围岩破裂失稳机理具有重要意义。

**关键词:** 动力荷载; 砂型 3D 打印; 内部裂隙; 动态力学特性; 能量耗散; 分形维数

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)02-0137-14

## Mechanical response and energy dissipation law of rock-like mass with internal fractures under dynamic load

JIANG Lishuai, YANG Yiming, ZHAO Yang, LI Haozhe, WU Qi, PENG Xiaohan

(State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** The strength of coal, mudstone, sandstone and other common rocks in the surrounding rock of deep roadway is low and the fractures are developed. Dynamic disasters are prone to occur in the complex mechanical environment of deep roadway. The key to clarify the occurrence of dynamic disasters is to study the dynamic response and energy dissipation law of the internal fracture characteristics to the rock mass. In order to study the influence of internal fracture dip angle and fracture distribution on the dynamic mechanical response and energy dissipation law of rock-like mass, the rock-like mass samples with internal fractures were prepared by sand powder 3D printing. The dynamic compression test of the samples was carried out by split Hopkinson pressure bar (SHPB). The high-speed camera was used to observe the crack development, and the dynamic failure characteristics were analyzed by combining the energy dissipation principle and fractal theory. The results show that with the increase of the dip angle of the internal fracture, the dynamic peak stress and the dynamic elastic modulus of the samples decrease first and then increase, both of which are the lowest at 30°. With the increase of the number of

收稿日期: 2024-10-07

策划编辑: 常 琛

责任编辑: 钱小静

DOI: 10.12438/cst.2024-1409

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074166); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2021YQ38)

作者简介: 蒋力帅 (1989—), 男, 江苏南通人, 教授、博士生导师。E-mail: lsjiang@sdust.edu.cn

通讯作者: 赵 阳 (1994—), 男, 山东临沂人, 博士研究生。E-mail: mrzhao\_y@163.com

fractures, the influence of vertical distribution fractures on the dynamic peak stress of the sample is greater than that of horizontal distribution fractures. The energy dissipation of sample failure decreases first and then increases with the increase of fracture dip angle. When the fracture dip angle is small, the existence of loose filling will aggravate the attenuation of stress wave and increase the energy dissipation. With the increase of fracture dip angle, the influence of filling on the energy dissipation of sample decreases gradually. Under the same crack inclination angle, with the increase of fracture number, the energy dissipation of vertical distribution fracture samples are less than that of horizontal distribution fracture, which is positively correlated with the dynamic peak stress of sample. With the increase of fracture dip angle, the fractal dimension of the sample increases first and then decreases. When the fracture dip angle is  $30^\circ$ , the fracture degree of the sample is the largest, and the fractal dimension of the sample is the largest. The increase of the number of cracks makes the fragmentation of the sample gradually uniform, and the fractal dimension of the sample shows an increasing trend. The research results reveal the influence of internal fractures on the dynamic characteristics and energy dissipation of rock mass, and provide an important basis for the dynamic test of complex internal fractured rock mass by using sand powder 3D printing technology. It is of great significance to further understand the fracture and instability mechanism of surrounding rock in deep soft rock roadway in practical engineering.

**Key words:** dynamic load; sand powder 3D printing; internal fracture; dynamic mechanical properties; energy dissipation; fractal dimension

## 0 引 言

随着浅部资源日益枯竭,深部开采正逐渐成为我国煤炭资源开发常态,冲击地压等典型动力灾害频发,给煤炭安全高效开采带来严峻挑战<sup>[1-3]</sup>。受煤系地层沉积环作用影响,深部巷道围岩中煤、泥岩、砂岩等常见岩石强度较低、裂隙发育,在深部“三高一扰动”的复杂力学环境下,围岩强矿压显现、支护失效冒顶乃至冲击地压等问题屡见不鲜,严重影响巷道围岩稳定,制约深部煤炭安全高效开采<sup>[4-6]</sup>。因此,针对深部煤矿巷道围岩的内秉特征(裂隙发育)和外载条件(动力荷载),深入研究裂隙岩体在动力荷载下的力学响应规律对深部巷道围岩破坏机理与控制具有重要意义。

SHPB 装置自 Hopkinson<sup>[7]</sup> 研发以来,经众多学者的改进<sup>[8-10]</sup>,已广泛应用于岩石动力学领域,是研究高应变率下岩石、类岩石材料动态力学特性的重要试验装置。国内外学者对各类完整岩石不同动力荷载作用下的动态力学特性和能量耗散规律开展了大量研究<sup>[11-14]</sup>,李夕兵等<sup>[15]</sup>通过改进的 SHPB 装置,对不同动静组合加载下砂岩的动态力学性能与吸能效率进行研究;宫凤强等<sup>[16]</sup>研究了应变率对砂岩的动态抗压强度的影响,表明应变率与砂岩的动态抗压强度呈正比。天然岩体由于长期受地应力和地质构造的影响,其内部广泛分布着具有不同特征的结构面、裂隙等缺陷,因此含裂隙岩石的动态力学特性研究受到国内外学者的重视,LI 等<sup>[17]</sup>通过 SHPB 对含单、双裂隙的大理岩试样进行动态冲击,研究了贯穿裂纹角度和岩桥角度对岩石动态力学性能、能量演化和破裂行为的影响;刘婷婷等<sup>[18]</sup>通过对交叉节理岩体进行 SHPB 冲击试验,发现节理夹角、节理贯

通度对花岗岩的动态力学特性、能量耗散有显著影响。

对工程现场岩体采样,通过 CT 扫描三维重构可以观察到,外表看似完整的岩样,其内部存在着复杂孔洞、节理等缺陷<sup>[19-20]</sup>,大量岩体工程灾变破坏实例表明,内部裂隙的扩展演化是造成此类灾害的内在因素<sup>[21-23]</sup>,是影响岩体力学性能的关键因素<sup>[24-26]</sup>。长期地质作用形成的裂隙中普遍含有弱胶结的充填物,充填物的存在改变了原有裂隙间的摩擦强度,充填物能提供部分承载力,降低裂隙附近的应力集中现象,裂隙中的充填物与岩体之间的相互作用,致使岩体的破裂行为趋于复杂,裂隙中充填物以及充填物材料对岩体力学特性、破裂模式影响显著<sup>[27-28]</sup>。因此,研究含充填物的不同内部裂隙类岩体的动力学响应至关重要,对进一步了解实际工程中深部软岩巷道围岩破裂失稳机理具有重要意义。

含充填物内部裂隙试样曾受制备方式制约,目前,含充填物内部裂隙试样的制备主要有薄片植入浇筑法<sup>[29-31]</sup>、3D 打印法<sup>[19,32]</sup>。其中 3D 打印法具有制样效率高、制样精度高、试样离散性低、试验可重复性强等优势,突破了传统裂隙、孔洞试样的制备方法的局限,为岩石力学试验试样制备提供了新方法。众多学者对不同 3D 打印技术应用于岩石力学领域的可行性做出充分证明,其中,ZHOU<sup>[33]</sup>、ZHU 等<sup>[34]</sup>通过单轴压缩试验对比分析不同 3D 打印技术制备的试样,表明技术制备的试样脆性较好,适合模拟硬岩。ZHAO 等<sup>[35]</sup>对比众多天然煤岩的力学参数,证明以硅砂 GS19 为基质的砂型 3D 打印技术(BJT)适用于模拟软岩。

基于此,在砂型 3D 打印模拟软岩具有充分可行性的前提下,使用砂型 3D 打印内部裂隙类岩体试样,

通过 SHPB 进行动态压缩试验,研究内部裂隙对类岩体动态力学特性的影响,探究裂隙倾角、裂隙分布对岩石动力学特性、能量耗散的影响规律,结合高速摄像机及破碎块度统计,分析裂隙特征对类岩体试样破坏特征的影响。研究结果揭示了不同内部裂隙特征对砂型 3D 打印类岩体试样动态力学特性、能量耗散、破坏特征的影响,为采用砂型 3D 打印技术开展复杂裂隙岩体动力学试验提供了重要基础。

## 1 含内部裂隙 3D 打印类岩体试样制备与试验方案

### 1.1 试样制备流程

深部巷道围岩相对浅部更加破碎,且受动载影响,为明晰动载下内部裂隙倾角、分布对裂隙岩体动态力学特性、能量耗散的影响,本次试验制备含不同裂隙倾角、不同裂隙分布方式的砂型 3D 打印类岩体试样。试样制备沿用砂型 3D 打印方法<sup>[36]</sup>,以微滴喷射 (BJT) 砂型 3D 打印机为制备含内部裂隙的类岩体试样,采用“垂直成型”工艺,打印层厚 0.2 mm,以颗粒粒径为 0.106 ~ 0.212 mm 的机制砂 (硅砂 GS19) 作为基质,以呋喃树脂为黏结剂,甲苯磺酸为酸性固化剂,通过黏结剂固化剂反应,所制得的试样能较好模拟煤、泥岩等煤矿软岩的静力学特性<sup>[37-38]</sup>和动态力学特性 (图 1)<sup>[39-42]</sup>。

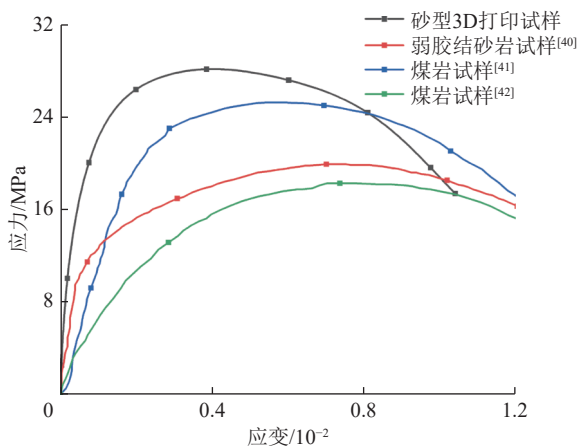


图 1 砂型 3D 打印与软岩试样的动态应力-应变曲线

Fig.1 Dynamic stress-strain curves of sand powder 3D printing sample and soft rock samples

试样制备过程大致分为 3 步: ① 建模并导入裂隙试样模型。② 称装搅拌使机制砂均匀混合。③ 打印及试样成型后的后处理工作,将砂型 3D 打印试样放置一周后其强度保持稳定<sup>[43]</sup>。砂型 3D 打印机及原理分别如图 2、图 3 所示,主要由软件操控系统、打印喷头、成型缸、送料缸、送粉辊组成。软

件操控系统可以识别 stl 格式的文件、生成加工代码文件并操控打印机,首先打印喷头在操控系统的指令下将黏结剂喷至待成型截面,随后成型缸下降 0.2 mm,铺粉辊将送料缸内混合好的机制砂均匀推入成型缸,最后送料缸上升,此时完成一个打印循环。根据试样长度和打印层厚将其分为有限个打印循环,逐层打印,直至成型。



图 2 Easy-3DP-S450 砂型 3D 打印机

Fig.2 Easy-3DP-S500 sand powder 3D printer

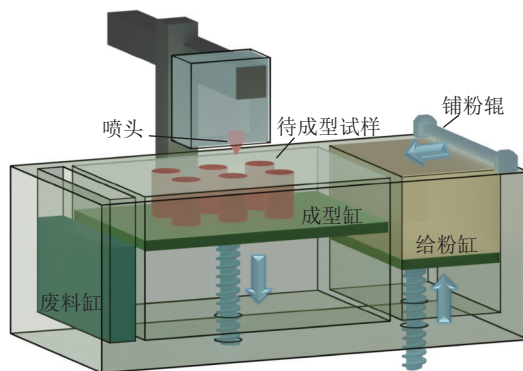


图 3 砂型 3D 打印原理

Fig.3 sand powder 3D printer principle

煤、泥岩等煤矿软岩等沉积岩受地应力、人工开采扰动等影响,易产生裂隙,发生破坏,其中未在岩体表面露出的岩块发生破坏后,弱胶结部分脱落,形成含有松散充填物的裂隙,文中砂型 3D 打印含内部裂隙的试样均含有松散的砂粉充填物。试验根据试验推荐方法<sup>[44]</sup>,制备  $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  圆柱形砂型 3D 打印类岩体试样。试样裂隙为圆盘形,直径 14 mm,宽度 2 mm,以倾角为变量的试样裂隙倾角分为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ ;多条裂隙试样的裂隙倾角均为  $45^\circ$ ,相邻裂隙的体中心距离均为 10 mm。试样编号命名如下: Int 表示完整试样; A 表示含裂隙倾角变化的试样,例如 A30-1 表示试样内部含 1 条  $30^\circ$  倾角裂隙,编号中 1 代表裂隙条数;根据裂隙分布方式的不

同将试样分为水平分布裂隙和垂直分布裂隙并分别用 H 和 V 表示,例如 V45-2 表示试样内部含 2 条垂直分布的 45°倾角裂隙,编号中 2、3 代表裂隙条数(图 4)。

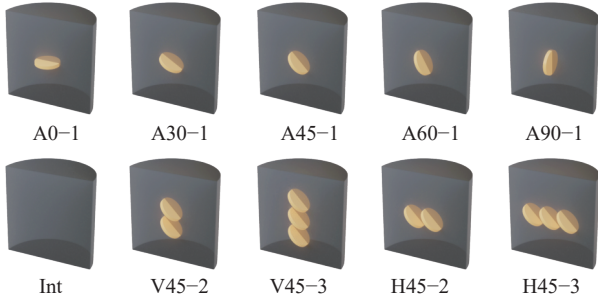


图 4 试样编号及裂隙构造

Fig.4 Sample number and fracture structure

## 1.2 试验方案

试验技术路线如图 5 所示,试验采用山东科技大学煤岩体动力实验室分离式霍普金森压杆,设备主要由动力装置、冲头、入射杆、透射杆、吸收杆和动态数据采集系统等构成。压杆直径均为 50 mm、弹性模量 206 GPa 的刚杆,其纵波波速为 7 850 m/s,冲头为纺锤形,可实现稳定的半正弦波。动态数据采集系统应变信号输入频率 1 MHz,最大采样频率 20 MHz。采用 Vision Research/V410L 超高速摄像机记录试样冲击破坏过程,采样频率最高 650 000 fps,最高分辨率 1 024×1 024 像素,满足试验数据的采集记录与处理需求。

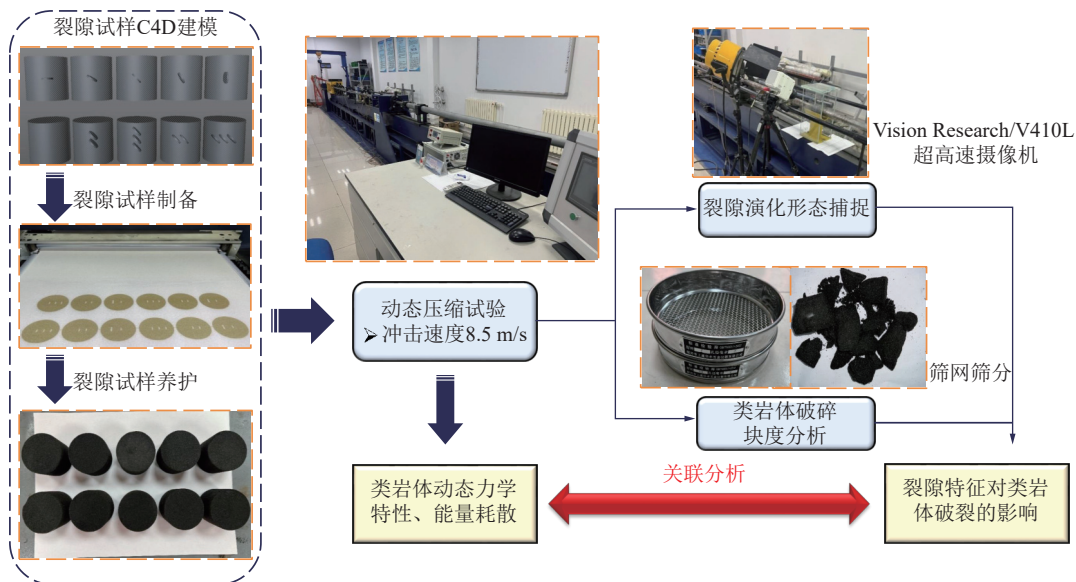


图 5 试验技术路线

Fig.5 Test technical route

为保证所有试样均能一次冲击破碎,先预冲击两块完整试样以确定冲击气压及冲头冲击速度,此次试验控制冲击速度为 8.5 m/s,在冲击前将试样两端涂抹一层凡士林,以保证试样与杆件接触良好,每次试验后需要将冲头推回发射腔同一位置,使子弹加速时间相同。三波法是 SHPB 试验中处理试验数据,确定动态应力-应变曲线的常用方法。在满足一维应力波平衡和应力-应变均匀性假定的条件下,通过三波法处理入射波、反射波、透射波数据得出试样的应力  $\sigma$ 、应变  $\varepsilon$  和应变  $\dot{\varepsilon}$ ,得到试样的动态应力-应变曲线,三波法公式原理如下:

$$\sigma(t) = \frac{A_0}{2A_s} E_0 [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{L_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (3)$$

$$C_0 = \sqrt{E_0/\rho_0} \quad (4)$$

式中:  $A_0$  为杆体的横截面积;  $A_s$  为试样的横截面积;  $E_0$  为杆体的弹性模量;  $C_0$  为杆体的纵波波速;  $L_s$  为试样的原始长度;  $\rho_0$  为压杆的质量密度;  $\varepsilon_i$  为入射波应变;  $\varepsilon_R$  为反射波应变;  $\varepsilon_T$  为透射波应变。

为保证试验结果可靠,在动态冲击过程中需要使试样两端达到动态应力平衡状态, A30-1 试样动态应力波曲线如图 6 所示,入射波  $\varepsilon_i$  与反射波  $\varepsilon_R$  的

叠加波与透射波  $\varepsilon_T$  基本重合, 试样在动态冲击过程中满足动态应力平衡条件, 试验结果有效。

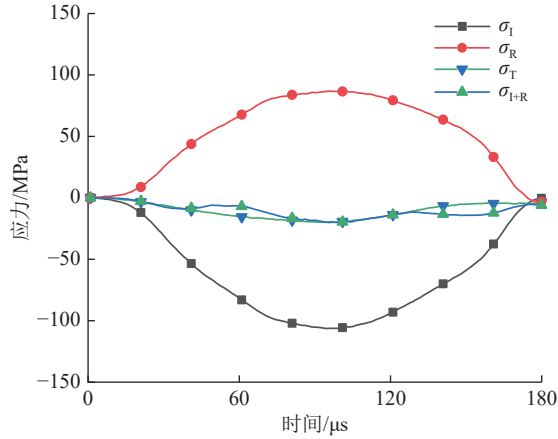


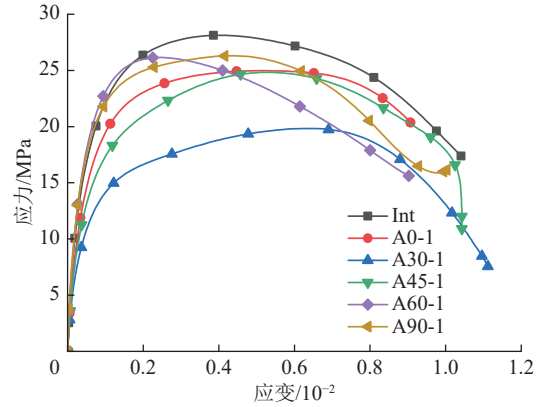
图 6 动态应力平衡曲线

Fig.6 Dynamic stress equilibrium curves

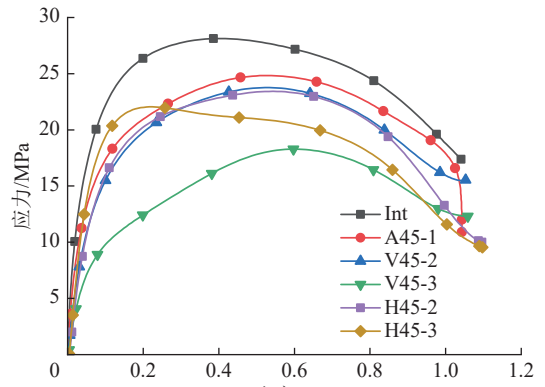
## 2 裂隙特征对类岩体动态力学特性的影响规律分析

### 2.1 内部裂隙类岩体的动态应力-应变曲线特征

图 7a、图 7b 分别为不同内部裂隙倾角试样的动态应力-应变曲线与垂直、水平分布的多条 45°裂隙试样的动态应力-应变曲线, 由于试验轴向预静载为 0, 试样的动态应力-应变曲线存在回弹现象。根据图 7 可以观察到试样的动态应力-应变曲线中出现微裂隙压密阶段缺失、部分曲线在峰值应力附近趋于平缓即峰值应力附近出现了明显的“平台”、峰值应力后应力缓慢下降的现象。微裂隙压密阶段的缺失是 SHPB 进行动态岩石力学试验普遍存在的现象<sup>[45]</sup>, 其根本原因是仪器的冲击、试样的破坏均在短时间完成, 试样内部的微孔隙迅速压密闭合, 其宏观表现为动态应力-应变曲线微裂隙压密阶段缺失或不明显。随着试样进一步被压缩, 试样的曲线在峰值应力附近其应变率变化幅度减小, 为明显的非线性变形, 应力随应变的增加而相对缓慢变化, 峰值应力附近出现了明显的塑性平台, 试样处于屈服阶段并出现明显塑性变形<sup>[42]</sup>。塑性平台较长的原因是由于内部充填物的存在, 使得裂隙尖端应力集中现象减弱, 裂纹沿内部裂隙发育、并相对稳定扩展, 使试样作用时间相对延长<sup>[46-47]</sup>。图 7 中试样在峰值应力后破坏, 其强度没有快速而又明显降低, 说明 3D 打印类岩体试样在高应变率下呈现出塑性, 这与其低应变率的静载下呈现出脆性有着较大的区别。动载下砂型 3D 打印类岩体试样其性质与软岩近似, 进一步表明砂型 3D 打印应用于模拟软岩的可行性。



(a) 裂隙倾角试样



(b) 裂隙分布试样

图 7 不同裂隙倾角、裂隙分布试样的动态应力-应变曲线  
Fig.7 Dynamic stress-strain curves of samples with different fracture dip angle and fractures distribution

### 2.2 单裂隙倾角对类岩体动态力学特性的影响

图 8 为不同内部裂隙倾角试样动态峰值应力对比及拟合曲线, 直观表明裂隙倾角对试样动态峰值应力影响显著, 随着内部裂隙倾角的增大, 试样强度先减小后增加, 0° ~ 30° 时试样的动态强度不断降低, 裂隙倾角与动态强度表现出负相关关系, 30° ~ 90° 时试样的动态强度不断增大, 裂隙倾角与动态强度呈正相关关系, 30° 时试样强度降低最显著, 为 19.83 MPa, 45° 裂隙倾角试样强度高于 30° 试样, 60°、90° 试样的强度大致相同且均大于 0°。0° 试样其充填物与动力荷载方向垂直, 相对其他倾角试样, 在受到动力荷载时, 充填物能提供部分支撑力, 故 0° 试样强度较高; 60°、90° 裂隙试样在入射方向上的投影面积较小, 裂隙及充填物对应力波干扰较小, 强度偏高; 30°、45° 裂隙试样在入射方向上的投影面积较大, 裂隙及充填物对应力波干扰较大, 强度均低于 60°、90° 裂隙试样; 而 30° 裂隙试样峰值强度明显低于 45° 试样, 这是砂型 3D 打印试样的裂纹扩展对 30° 倾角的敏感性较强。试验结果与 ZHAO 等<sup>[35]</sup>、田威等<sup>[48]</sup>相似, ZHAO 等通过数值模拟进一步证明 30° 倾角试样

强度最低, YAN 等<sup>[49]</sup> 对内江现场砂岩预制裂隙后进行冲击, 在固定的冲击速率下, 砂岩试样的动态力学强度随倾角的增加先减小, 后增加, 45°为强度最低值。根据以上研究, 结合本试验试样强度特征, 砂型 3D 打印试样与软岩性质近似, 且 30°~45°裂隙倾角为优势起裂角区间, 更容易引起裂纹的扩展。

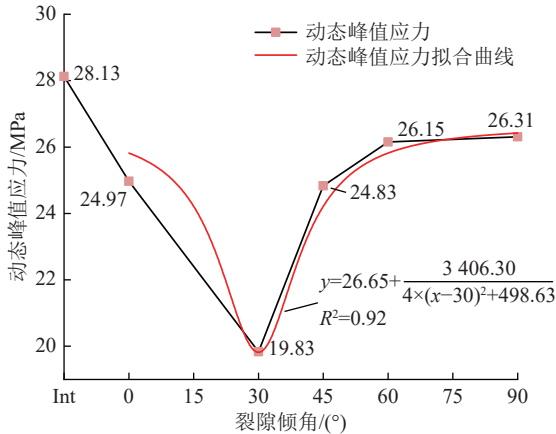


图 8 不同裂隙倾角试样的动态峰值应力

Fig.8 Dynamic peak stress of samples with different fracture dip angle

弹性模量反映物体变形能力, 在弹性阶段时试样的应力-应变成正比, 且相同应力下, 试样的应变越小, 其弹性模量越大。图 9 为不同倾角内部裂隙试样的动态弹性模量及拟合曲线, 显而易见裂隙倾角对试样动态弹性模量影响显著, 动态弹性模量均随着裂隙倾角的增大, 先减小后增加, 0°、30°、45°、60°、90°试样弹性模量分别为 17.70、13.06、15.76、23.16、23.94 GPa, 相对完整试样 (26.50 GPa) 分别降低了 33.21%、50.72%、40.53%、12.60%、9.67%, 与裂隙倾角对试样动态峰值应力影响规律相近, 均在

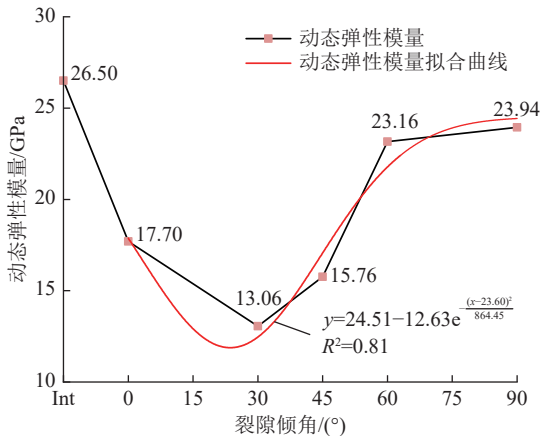


图 9 不同裂隙倾角试样的动态弹性模量

Fig.9 Dynamic elastic modulus of samples with different fracture dip angle

30°倾角时最低。

### 2.3 裂隙分布对类岩体动态强度的影响

图 10 为水平分布裂隙、垂直分布裂隙试样动态强度对比, 其中含裂隙试样对比完整试样强度可知内部裂隙的存在显著削弱了试样的强度, 裂隙数量对试样动态强度有影响, 结合水平、垂直分布裂隙的拟合曲线可知, 在低裂隙数量下裂隙分布对其影响较小, 随着裂隙数量的增多, 裂隙分布对其影响显著, 水平分布裂隙强度随着裂隙条数的增加降低较为均匀, 而垂直分布裂隙强度随着裂隙数量的增多强度显著降低。V45-2(23.77 MPa) 与 H45-2(23.43 MPa) 相对于 A45-1(24.83 MPa) 强度分别降低了 4.30%、5.67%, 2 条裂隙情况下水平、垂直分布裂隙其强度差异不明显, 这是因为水平和垂直分布裂隙条数较少, 裂隙数量是试样动态强度的主要影响因素; V45-3(18.29 MPa) 与 H45-3(22.04 MPa) 相对于 A45-1(24.83 MPa) 强度分别降低了 26.35%、11.23%, 3 条裂隙情况下垂直分布裂隙试样强度显著低于水平分布裂隙试样。

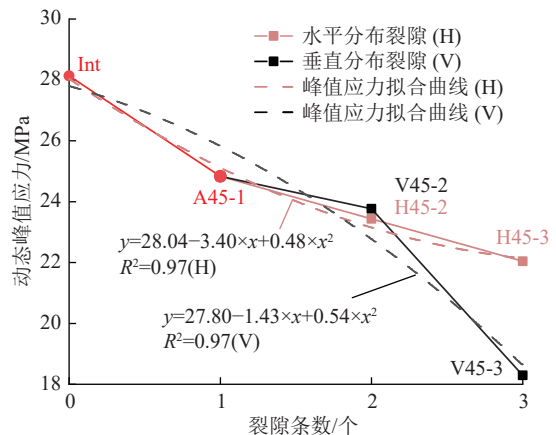


图 10 不同裂隙分布的动态峰值应力

Fig.10 Dynamic peak stress of different fracture distribution

图 11 为裂隙截面及受力示意, 用于分析不同截面受力情况, 随着截面中裂隙面积的增加, 裂隙面受

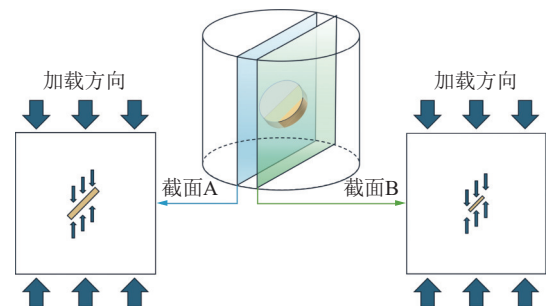


图 11 裂隙截面及受力示意

Fig.11 Fracture section and stress diagram

力逐步增大,由于裂隙内部含有松散的硅砂充填物,不能有效传递应力,裂隙尖端应力集中随着裂隙截面的增加而增大,选取截面中最大裂隙尺寸为代表,分析垂直、水平分布裂隙强度差异。

沿垂直、水平分布裂隙倾向的最大截面如图 12 所示,垂直分布裂隙相对水平分布裂隙距离加载端面更近,在动力荷载下,裂隙尖端应力集中效应显著,裂纹往往在裂隙尖端起裂,起裂产生的翼裂纹及次生共面裂纹具有惯性效应,易沿原起裂方向快速发展<sup>[50]</sup>(图 13),同时动载应力波在裂纹表面反射,产生拉伸波<sup>[15, 51]</sup>,驱动裂纹向平行于加载方向的延伸扩展,因此受到冲击后 3 条垂直分布裂隙试样的裂隙与端面间连接贯通相对水平分布裂隙容易,3 条垂直分布裂隙试样强度显著低于水平分布裂隙。

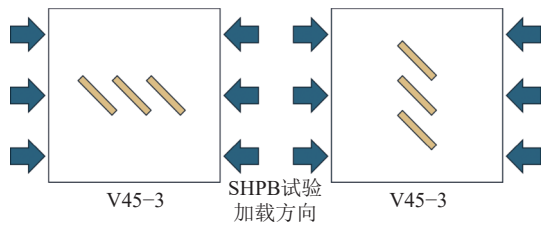


图 12 裂隙最大截面

Fig.12 Maximum cross-section diagram of fracture

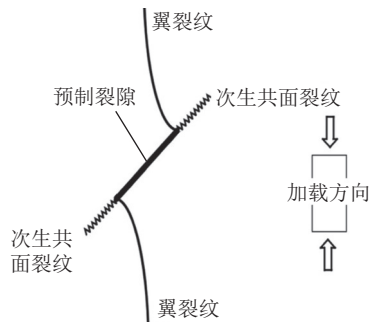


图 13 预制裂隙尖端主要分支裂纹示意<sup>[50]</sup>

Fig.13 Schematic diagram of the main branch cracks at the tip of the prefabricated crack tip<sup>[50]</sup>

### 3 裂隙特征对类岩体能量耗散的影响规律分析

输入到试样中的应力波能量是使试样变形破坏的根本原因,应力波能量主要被用于试样内部裂隙的发育、扩展、贯通,其中极小部分以热能、声能、电磁辐射能耗散<sup>[52-53]</sup>,由此所消耗的应力波能量是不可逆的过程。试验的冲击速度大致在 8.5 m/s,入射波所携带的能量基本相等,因此通过对试样冲击过程的能量耗散进行分析,探究裂隙倾角、裂隙分布对类岩体试样能量耗散的影响。

根据一维弹性波理论,试样的入射能  $W_I$ 、反射能  $W_R$ 、透射能  $W_T$  计算式为

$$W_I = \frac{A_0 C_0}{E_0} \int_0^t \sigma_I^2(t) dt = A_0 C_0 E_0 \int_0^t \varepsilon_I^2(t) dt \quad (5)$$

$$W_R = \frac{A_0 C_0}{E_0} \int_0^t \sigma_R^2(t) dt = A_0 C_0 E_0 \int_0^t \varepsilon_R^2(t) dt \quad (6)$$

$$W_T = \frac{A_0 C_0}{E_0} \int_0^t \sigma_T^2(t) dt = A_0 C_0 E_0 \int_0^t \varepsilon_T^2(t) dt \quad (7)$$

根据式(5)—式(7),试样的能量耗散  $W_C$  通过式(8)表示:

$$W_C = W_I - W_R - W_T \quad (8)$$

#### 3.1 动态荷载下类岩体能量耗散演化过程

试样冲击破坏过程中内部损伤特征与试样的能量耗散有着密切的联系<sup>[54]</sup>,图 14 为 A30-1 试样的动态应力-应变曲线及应变率时程、能量耗散时程曲线,试样的能量耗散曲线呈现“S”型,以 A30-1 试样为例,借助类煤岩体试样的耗散能时程曲线,将试样的动态应力-应变曲线大致划分为 3 个阶段。

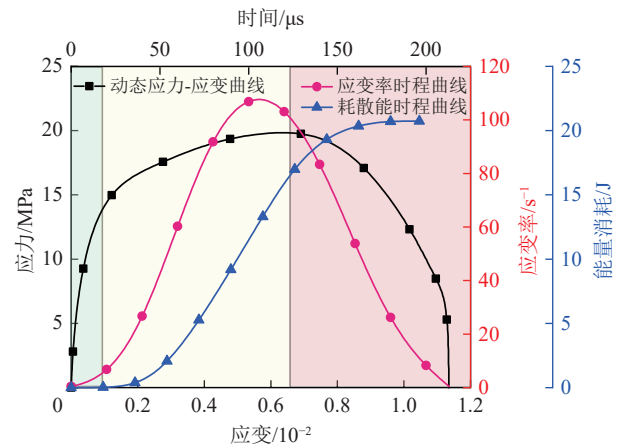


图 14 A30-1 动态应力-应变曲线及应变率、能量耗散时程曲线

Fig.14 A30-1 dynamic stress-strain curve and strain rate, energy dissipation time history curves

阶段 I: 试样的应力-应变曲线大致呈直线,这是因为在冲击时试样最初处于微裂隙压密阶段和弹性阶段,试样内部的微裂隙被瞬间压密,并产生弹性变形,此时能量消耗几乎为 0;阶段 II: 随入射时间的变化,应变增长速度大于应力增长速度,试样的应力-应变曲线斜率变小,试样由弹性阶段转变为屈服阶段,试样内部产生了大量不可复原的中小裂隙,能量消耗迅速增大;阶段 III: 试样由屈服阶段转变为峰后破坏阶段,具体表现为产生显著影响试样强度的贯通裂隙,直至冲击过程结束,试样彻底破碎,在此阶段试样的能量消耗增长缓慢直至平稳。

### 3.2 单裂隙倾角对类岩体能量耗散的影响

入射 150  $\mu\text{s}$  时不同裂隙倾角的能量耗散量如图 15 所示, 内部裂隙倾角对能量耗散有影响, 随着裂隙倾角的增加, 试样破碎的能量耗散呈先减小后增大的趋势。完整试样的能量耗散为 24.89 J, 0°、30°、45°裂隙试样破坏的能量耗散相对完整试样分别降低 8.20%、26.32%、28.77%, 能量耗散降低幅度逐渐增大; 60°、90°裂隙试样破坏的能量耗散相对完整试样分别降低 26.28%、11.69%, 能量耗散降低幅度逐渐减小; 试样的能量耗散增减趋势与动态峰值应力增减趋势相似。0°、30°裂隙试样其能量耗散明显偏高, 这是因为 0°、30°裂隙试样其充填物在动力荷载方向上的投影面积较大, 应力波穿过含松散充填物的裂隙时会发生能量衰减, 使能量消耗增加, 故 0°、30°时试样的能量耗散明显偏高。

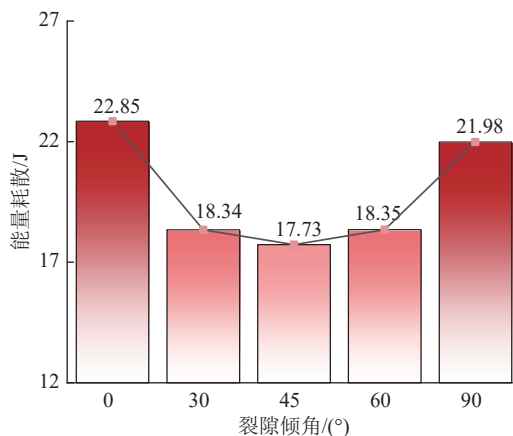


图 15 不同裂隙倾角试样的能量耗散

Fig.15 Energy dissipation of samples with different fracture dip angle

### 3.3 裂隙分布对类岩体能量耗散的影响

图 16 为不同裂隙分布的能量耗散及对比, 低裂隙数量下垂直、水平分布能量耗散降低幅度不大, 随着裂隙数量的增多, 垂直分布裂隙能量耗散降低幅度略高于水平分布试样。完整试样的破坏的能量耗散为 24.89 J, A45-1 试样破坏的能量耗散为 17.73 J, 降低了 28.77%; V45-2(14.21 J)、H45-2(13.78 J) 相对 A45-1(17.73 J) 试样的能量耗散分别降低 19.85%、22.28%, 2 条裂隙时水平分布裂隙能量耗散相对较大; V45-3(9.68 J)、H45-3(10.21 J) 相对 A45-1(17.73 J) 试样分别降低 45.40%、42.41%, 3 条裂隙时垂直分布裂隙能量耗散较大。其中 V45-3(9.68 J) 相较 V45-2(14.21 J) 降低 31.88%, H45-3(10.21 J) 相较 H45-2(13.78 J) 降低 25.91%, 当裂隙数量逐渐增多时, 垂直分布裂隙试样的能量耗散降低幅度高于水平分

布裂隙试样。图 16 中, 水平、垂直裂隙分布下试样的能量耗散均随着裂隙数量的增多呈现降低趋势, 这与试样冲击破坏过程中内部损伤特征有着密切的联系<sup>[54]</sup>, 试验结果与 LI 等<sup>[17]</sup> 相符, 即多裂隙试样强度低于单裂隙试样, 多裂隙试样冲击破坏不需要消耗更多的能量。内部裂隙的存在使得试样承受动载荷的能力减弱, 结合工程实际, 巷道围岩愈破碎, 其失稳破坏消耗的能量愈小, 愈需要对其加强支护, 在不同工程条件下, 需要视其动力荷载及裂隙发育程度提供合理的支护。

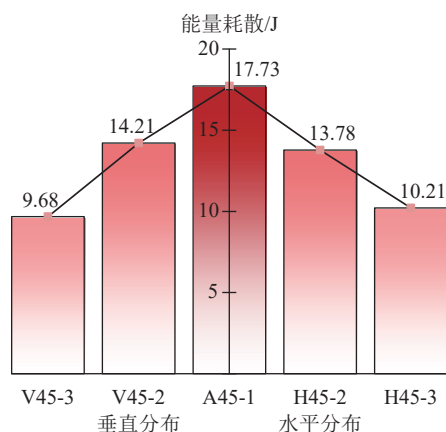


图 16 不同裂隙分布试样的能量耗散

Fig.16 Energy dissipation of samples with different fracture distribution

## 4 裂隙特征对类岩体动力破坏形态的影响规律分析

裂隙的破裂演化行为、破坏形态受裂隙特征的影响, 贯穿裂隙端部在外界荷载作用下应力集中效应明显, 对裂纹起裂、发育、扩展有着促进作用<sup>[35]</sup>。对比贯穿裂隙, 内部裂隙体积较小、裂隙尖端及边缘均处在类岩体试样中, 且充填物的存在一定程度上降低了裂隙尖端及边缘的应力集中效应, 在动力荷载下, 内部裂隙内部应力分布、演化相对复杂, 需要通过高速摄像机及对岩石破碎后拼接及破碎块度分析综合分析内部裂隙对类岩体动力破坏过程、破坏形态的影响。

### 4.1 裂隙特征对类岩体破坏模式的影响

在动态应力峰值点时, 试样内部裂隙连接、贯通, 宏观表现为试样出现贯通裂纹, 是试样整体破坏的临界点<sup>[12]</sup>。通过冲击过程中的高速摄像机观测, 得到类岩体试样受到冲击时产生的主要裂纹, 其中, 图 17 为动力荷载下不同裂隙特征试样裂纹形态特征, 由表可以清晰观察到随着裂隙数量的增多, 类岩

体试样产生的主要裂纹数量由 1 条变为 2 条,受到冲击时裂纹发育更快。不同裂隙倾角试样峰值破坏瞬时产生的裂纹数量为 1 条,45°裂隙倾角试样产生单条单拉伸裂纹,60°裂隙倾角试样产生单条拉剪混合裂纹;垂直、水平分布裂隙试样峰值破坏瞬时产生

的裂纹数量为 2 条,其中 H45-3 试样在冲击破坏时产生单条拉伸裂纹,单条拉剪混合裂纹。无论裂隙垂直、水平分布,均随裂隙数量的增加,动力荷载下试样最先产生主要裂纹数目增多,预制裂隙数量增多使试样冲击破坏过程加速。

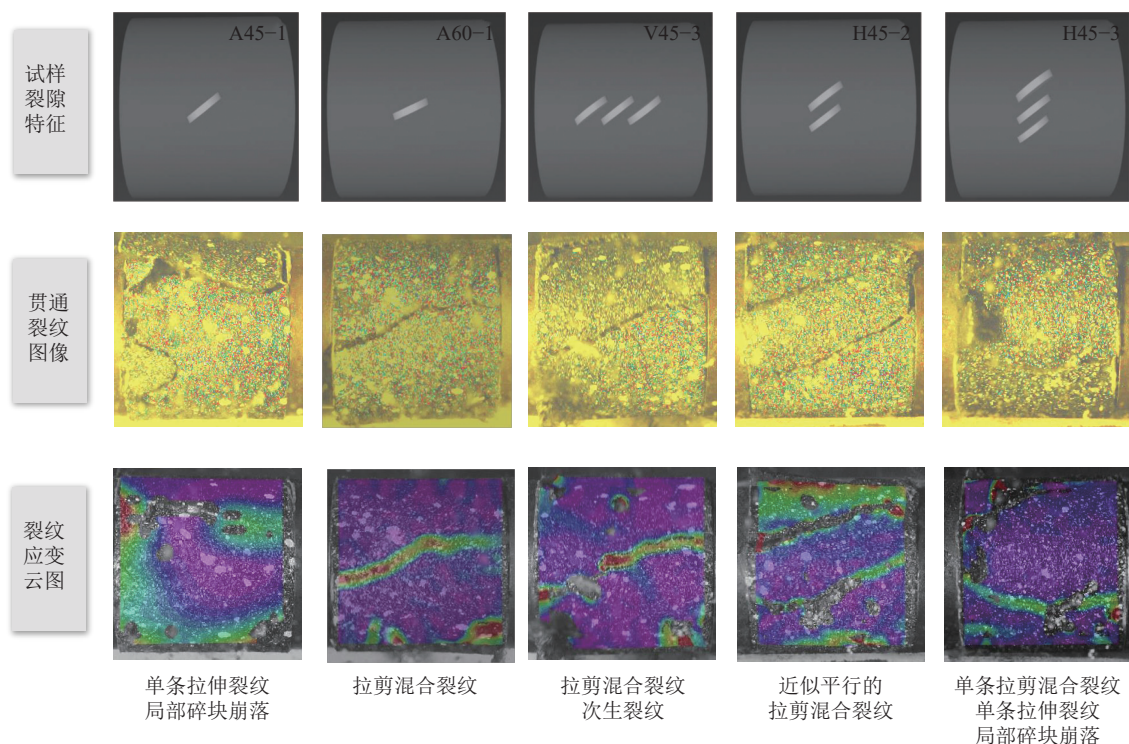


图 17 动力荷载下不同裂隙特征试样裂纹形态

Fig.17 Crack shapes of samples with different fracture characteristics under dynamic load

以 A60-1 试样为例,分析裂隙特征对类岩体试样破裂演化的影响,图 18 为 A60-1 试样加载过程中的裂纹演化及对应的应变云图,在施加动载前试样不产生应变(应变为 0),裂纹由入射杆端部起裂,向透射杆端发育,扩展;动载施加后的瞬间,试样表面出现了不同程度的应变,其中试样左下部分应变较大由试样局部产生碎块所致,试样中心出现明显应变集中,且应变集中部分与内部裂隙空间位置相似,说明内部裂隙的存在改变了应力传递、集中的效果,进而对裂纹扩展产生影响;随加载过程的进行,图中试样中心应变不断变大,裂纹产生,贯通并最终导致试样破坏。相对于不含充填物的裂隙,充填物的存在使应力均匀传递,降低裂隙边缘的应力。但根据试样破碎后的破碎形态推断,众多裂隙从裂隙边缘、尖端开始破裂,内部裂隙及其充填物的存在势必会影响试样的破碎过程,在受力时裂隙边缘仍然有较强的应力集中,使裂纹更容易在裂隙边缘发育、连接。

完整、0°、30°、45°、60°、90°试样沿裂隙边缘显著破裂面如图 19 所示,结合试样最终破碎形态可知,裂隙倾角、裂隙分布均对试样的破坏模式有影响,A0-1、A45-1、A60-1、V45-3、H45-3 试样最终破坏形式为拉伸-剪切破坏,Int 试样为拉伸破坏,A90-1 试样产生拉伸破坏和拉伸-剪切破坏,A30-1 试样较为破碎未能完整拼接,多裂隙对试样裂纹发育程度相比单裂隙影响显著;不同裂隙分布情况下类岩体试样的破坏模式如图 20 所示,V45-3、H45-3 试样均有明显的剪切破坏痕迹,多裂隙使裂纹之间易于连接贯通。结合试样动态峰值应力认为:入射速度一定时,随着内部裂隙倾角的增大,试样由拉伸-剪切破坏向拉伸破坏演变;不同裂隙分布下,试样破坏程度大,破碎颗粒较为均匀,产生拉伸-剪切破坏。

#### 4.2 裂隙特征对类岩体碎块分形维数的影响

分形几何理论主要用于研究非线性复杂现象,目前广泛应用于定量分析岩石损伤破坏程度<sup>[55]</sup>。试样的破碎块度受轴压、动力荷载等影响,动力荷载越

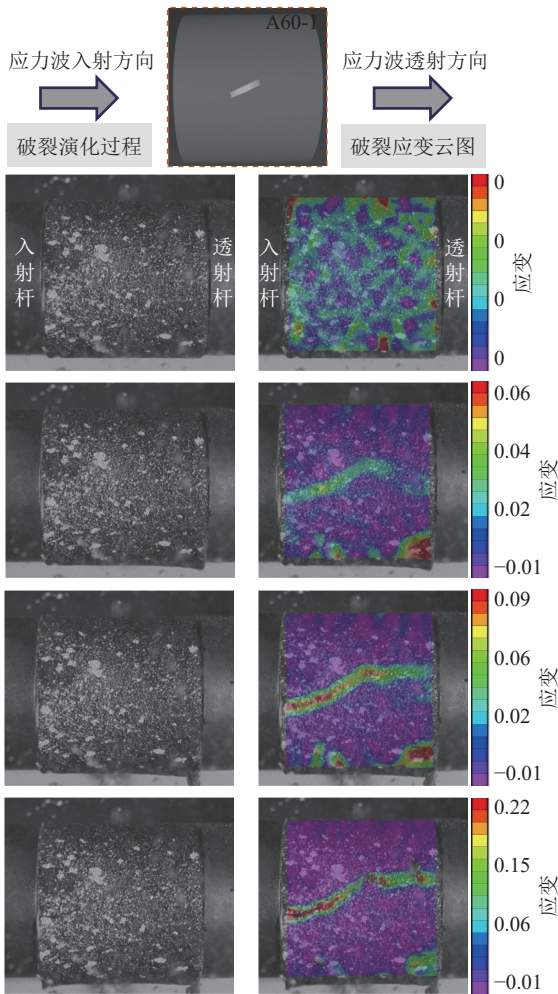


图 18 A60-1 试样破裂演化过程及应变云图

Fig.18 Fracture evolution process and strain cloud diagram of A60-1 sample

大, 试样破碎块度越均匀细小, 且轴压促进岩石破碎效果。本试验控制其冲击速度以减小动力荷载对试样碎块的影响, 分形维数以试样的碎块大小为自变量, 以不同等级碎块的质量为因变量, 反应试样的破碎程度, 破碎程度越大, 试样碎块大小越均匀, 即中小等级碎块质量占比越大, 根据试样的质量-频率关系<sup>[56]</sup>得到试样冲击破碎块度的分布方程为



图 19 单裂隙试样破坏模式

Fig.19 Failure mode of single fracture samples

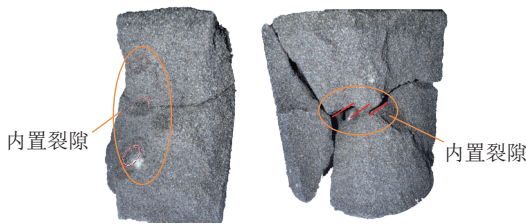


图 20 V45-3、H45-3 试样破坏模式

Fig.20 Failure mode of V45-3, H45-3 samples

$$Y = M(r)/M_T = \left(\frac{r}{r_m}\right)^{3-D_b} \quad (9)$$

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

对式 (9) 两边取对数可得:

$$\lg Y = \lg [M(r)/M_T] = (3 - D_b)(\lg r - \lg r_m) \quad (10)$$

由式 (10) 知,  $3 - D_b$  为  $\lg [M(r)/M_T] - \lg r$  坐标中拟合直线的斜率。

试样的最终破坏碎块如图 21 所示, 在全部冲击试验中, 试样均冲击破坏, 对试验后收集的试样碎块使用标准筛进行筛分, 筛分粒径范围为 0 ~ 2、2 ~ 4、4 ~ 12、12 ~ 20、20 ~ 35、35 ~ 50 mm, 共 6 个等级。对每个等级的试样碎块多次称重取平均值, 并由此得到 6 组  $\lg [M(r)/M_T]$  和  $\lg r$ , 代入  $\lg [M(r)/M_T] - \lg r$

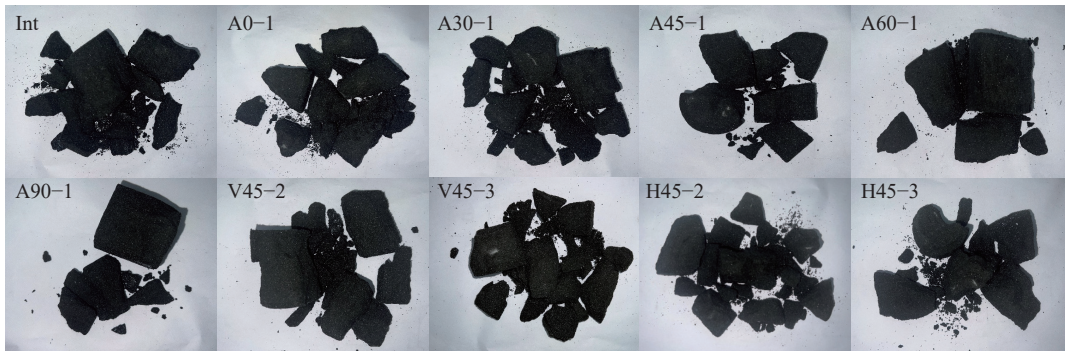


图 21 试样碎最终破坏形态

Fig.21 Final failure mode of crushed samples

坐标中进行直线拟合,得到关于试样破碎块度的双对数关系直线。破碎块度的分形维数  $D_b$  由拟合直线的斜率得出,  $R^2$  为线性回归模型的拟合度量,衡量着分形维数  $D_b$  与因变量  $\lg [M(r)/M_T]$  间的关系强度,直线的拟合度量  $R^2$  高,反映出试样破碎块度分布是具有良好自相似性的分形分布。

不同裂隙倾角类岩体试样碎块的分形维数计算如图 22a 所示,裂隙倾角对类岩体试样的分形维数影响较为明显,类岩体试样的破碎程度随着内部裂隙倾角的增大,呈先上升后下降的规律,其中  $30^\circ$  裂隙倾角试样的分形维数最大,为 1.75,其破碎程度较大,中小等级碎块较多; $90^\circ$  裂隙倾角试样的分形维数最小,分形维数为 1.48,破碎程度相对低,中高等级碎块比重大,表明内部裂隙倾角会对试样的破碎块度产生影响,与试样的动态峰值应力呈现负相关,试

样强度越低,相同冲击速度下其分形维数越大,破碎程度越大。图 22b、图 22c 分别表示垂直、水平分布裂隙试样的分形维数,在较低裂隙数量下,试样的分形维数相差不大,V45-2 与 H45-2 的拟合优度分别为 0.92、0.93,分形维数分别为 1.72、1.73,2 条裂隙下垂直、水平裂隙分布的分形维数相差不大,其分形维数关系与 V45-2 与 H45-2 的动态峰值应力关系相近;受破碎块度收集、拟合优度影响,V45-3 与 H45-3 分形维数相差较大,但由图 22 可知裂隙数量的增多使类岩体试样的分形维数呈增大趋势,裂隙数目越多,其动态强度越低,相同冲击速度下分形维数越大,冲击破坏后试样越呈现出碎块化。结合工程实际,随着新开掘的巷道埋深不断变大,其应力环境相对浅部越恶劣,巷道围岩越破碎,受到动力扰动后巷道变形量大,破坏越严重。

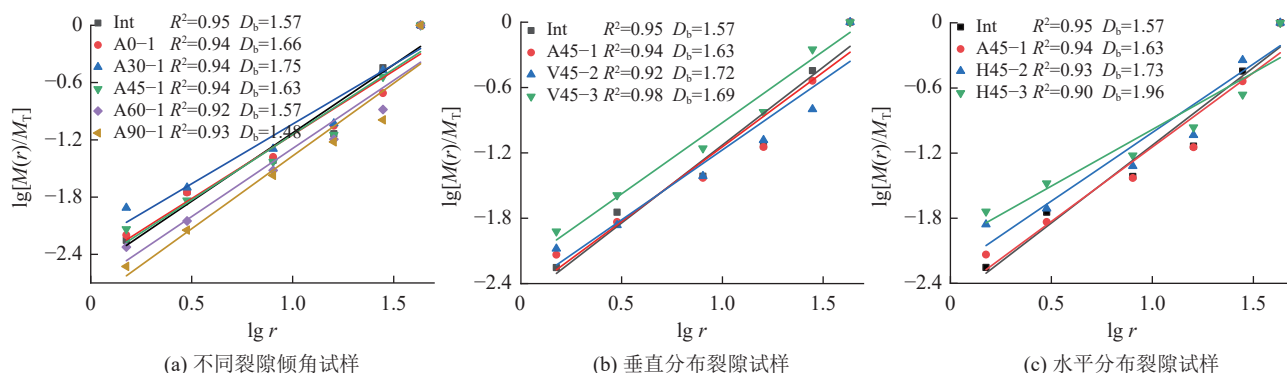


图 22 不同裂隙特征的分形维数

Fig.22 Fractal dimension of different fracture characteristics

## 5 讨 论

煤、砂岩、泥岩等沉积岩,在长期的地质作用下内部胶结的矿物颗粒互相挤压、摩擦,发生破坏所形成的裂隙中普遍含有弱胶结的充填物。充填物的存在会显著影响裂隙面的刚度、摩擦特性等,使其在不同应力状态下表现出不同的变形和破坏特性。充填物会改变应力的传递路径,在一定程度上能传递应力、提供承载力,降低裂隙附近的应力集中现象进而延缓裂隙扩展。

充填物对岩石、岩体力学特性的影响显著,本文研究的试样含充填物,裂隙形态为薄圆盘形。在裂隙试样设计过程中,结合马军等<sup>[57]</sup>观点,将内部裂隙形态设置为薄圆盘形,与贯穿裂隙形态区别较大;含充填物的裂隙试样在加载过程中,充填物与岩体之间的相互作用的影响不可忽略,岩体的破裂行为受此影响趋于复杂,与不含充填物的裂隙区别较大。

深部煤矿巷道围岩力学环境复杂,巷道围岩中存在大量复杂内部裂隙,研究复杂内部裂隙的性质对明晰岩体破裂劣化致灾机理有重要意义,对复杂的含充填物的内部裂隙试样研究是通晓其物理力学特性的有效手段。而本文简单的内部裂隙与后续复杂裂隙性质相似,其研究结果及分析为后续复杂裂隙岩体力学试验提供参考,是后续复杂裂隙岩体力学试验的重要基础。

## 6 结 论

1) 相同冲击速度下,随着内部裂隙倾角的不断增大,试样的动态峰值应力及动态弹性模量均呈现先减小后增大的趋势, $30^\circ$ 裂隙倾角试样强度及动态弹性模量最低, $90^\circ$ 试样最高,内部裂隙倾角对试样的动态力学特性影响显著。砂型 3D 打印试样与软岩性质相似, $30^\circ \sim 45^\circ$ 裂隙倾角为优势起裂角区间,有利于裂纹的起裂扩展。

2) 相同冲击速度下,随着内部裂隙数量的增多,垂直分布裂隙对试样动态峰值应力的影响高于水平分布,应力波在裂隙表面反射产生拉伸波,且垂直分布裂隙尖端距离冲击端面近,裂隙尖端产生的裂纹易于沿冲击方向发育贯通。

3) 不同内部裂隙倾角对能量耗散影响显著,其规律与动态弹性模量相似,均呈现先减小后增加的规律。裂隙倾角较小时,松散充填物的存在会加剧应力波衰减,使能量耗散增加,随裂隙倾角增加,充填物对试样的能量耗散影响逐渐减小。相同裂隙倾角下,随着裂隙数量增多,垂直分布裂隙试样能量耗散低于水平分布裂隙试样,能量耗散与试样动态峰值应力呈正相关,试样动态峰值应力越大,破坏其所需要的能量越大。

4) 相同冲击速度下,随着裂隙倾角的增大,试样的分形维数先增加后减小,30°裂隙倾角时试样的破碎程度最大,试样的分形维数最大;随着内部裂隙数量的增多,垂直、水平裂隙试样峰值破坏时产生的主要裂纹数量增多,破碎块度逐渐均匀,试样的分形维数呈现增大趋势。

本文研究结果为采用砂型 3D 打印技术开展复杂内部裂隙岩体动力学试验提供了重要基础,揭示了内部裂隙对岩体动力学特性及能量耗散的影响规律,对进一步了解实际工程中深部软岩巷道围岩破裂失稳机理具有重要意义。

#### 参考文献(References):

- [1] 康红普,范明建,高富强,等.超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2227-2241.  
KANG Hongpu, FAN Mingjian, GAO Fuqiang, et al. Deformation and support of rock roadway at depth more than 1 000 meters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2227-2241.
- [2] 谢和平,张茹,张泽天,等.深地科学与深地工程技术探索与思考[J].煤炭学报,2023,48(11):3959-3978.  
XIE Heping, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959-3978.
- [3] 潘一山.煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J].煤炭学报,2018,43(8):2091-2098.  
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2091-2098.
- [4] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等.深部采矿岩石力学进展[J].煤炭学报,2024,49(1):75-99.  
HE Manchao, WU Yiyi, GAO Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75-99.
- [5] 李伟,孙希奎.深地煤炭资源安全高效智能化开采关键技术与实践[J].煤炭科学技术,2024,52(1):52-64.  
LI Wei, SUN Xikui. Key technologies and practices for safe, efficient, and intelligent mining of deep coal resources[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 52-64.
- [6] 左建平,刘海雁,王军,等.深部巷道主被动全空间协同控制技术及工程应用[J].煤炭科学技术,2023,51(7):255-267.  
ZUO Jianping, LIU Haiyan, WANG Jun, et al. Active and passive full-space collaborative control technology and engineering application in deep roadways[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 255-267.
- [7] HOPKINSON B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 213(497-508): 437-456.
- [8] DAVIES Robert L. A critical study of the hopkinson pressure bar[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 240(821): 375-457.
- [9] KOLSKY H. An Investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society. Section B: 676-700.
- [10] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 739-748.
- [11] 刘晓辉,张茹,刘建锋.不同应变率下煤岩冲击动力试验研究[J].煤炭学报,2012,37(9):1528-1534.  
LIU Xiaohui, ZHANG Ru, LIU Jianfeng. Dynamic test study of coal rock under different strain rates[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1528-1534.
- [12] 黄达,谭清,黄润秋.高围压卸荷条件下大理岩破碎块度分形特征及其与能量相关性研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1379-1389.  
HUANG Da, TAN Qing, HUANG Runqiu. Fractal characteristics of fragmentation and correlation with energy of marble under unloading with high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1379-1389.
- [13] GONG H L, LUO Y, ZHOU J R, et al. Fracture behaviors and damage evolution anisotropy of granite under coupling of multi-axial confinement and dynamic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(4): 2515-2534.
- [14] ZHANG J R, LUO Y, HUANG J H, et al. Progressive damage and fracture behavior of brittle rock under multi-axial prestress constraint and cyclic impact load coupling[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2024, 10(1): 48.
- [15] 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 Xibing, ZHOU Zilong, YE Zhouyuan, 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.

- 2008, 27(7): 1387–1395.
- [16] 宫凤强, 陆道辉, 李夕兵, 等. 不同应变率下砂岩动态强度准则的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2433–2441, 2429.  
GONG Fengqiang, LU Daohui, LI Xibing, et al. Experimental research of sandstone dynamic strength criterion under different strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2433–2441, 2429.
- [17] LI D Y, HAN Z Y, SUN X L, et al. Dynamic mechanical properties and fracturing behavior of marble specimens containing single and double flaws in SHPB tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(6): 1623–1643.
- [18] LIU T T, DING L Y, WANG G, et al. Dynamic properties and failure mechanism of granite with non-persistent joints subjected to impact load[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 169: 105451.
- [19] 鞠杨, 谢和平, 郑泽民, 等. 基于 3D 打印技术的岩体复杂结构与应力场的可视化方法[J]. 科学通报, 2014, 59(32): 3109–3119.  
JU Yang, XIE Heping, ZHENG Zemin, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(32): 3109–3119.
- [20] 王相龙, 潘结南, 王凯, 等. 微米 CT 扫描尺度下构造煤微裂隙结构特征及其对渗透性的控制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1325–1334.  
WANG Xianglong, PAN Jienan, WANG Kai, et al. Characteristics of micro-CT scale pore-fracture of tectonic ally deformed coal and their controlling effect on permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1325–1334.
- [21] JIANG L S, KONG P, ZHANG P P, et al. Dynamic analysis of the rock burst potential of a longwall panel intersecting with a fault[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(4): 1737–1754.
- [22] WANG P T, MA C, ZHANG B, et al. Development of an improved three-dimensional rough discrete fracture network model: Method and application[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(12): 1469–1485.
- [23] 王兆会, 孙文超, 王雪冰, 等. 预制裂隙类岩石试件表面变形场演化与裂隙扩展机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 72–82.  
WANG Zhaohui, SUN Wenchao, WANG Xuebing, et al. Surface deformation field and fracture propagation mechanism of rock-like specimen with pre-existing fracture[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 72–82.
- [24] 李术才, 杨磊, 李明田, 等. 三维内置裂隙倾角对类岩石材料拉伸力学性能和断裂特征的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 281–289.  
LI Shucai, YANG Lei, LI Mingtian, et al. Influences of 3d internal crack dip angle on tensile mechanical properties and fracture features of rock-like material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 281–289.
- [25] 戴峰, 魏明东, 徐奴文, 等. 内置三维裂隙非均匀性岩石渐进破坏数值研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(6): 1178–1186.  
DAI Feng, WEI Mingdong, XU Nuwen, et al. Numerical simulation on progressive failure of heterogeneous rock specimens with A pre-existing three-dimensional crack[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(6): 1178–1186.
- [26] 王文海, 蒋力帅, 何鑫, 等. 基于砂型 3D 打印的复杂节理岩体变形破坏特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 754–767.  
WANG Wenhai, JIANG Lishuai, HE Xin, et al. Experimental study on deformation and failure characteristic of complex jointed rock mass based on sand-powder 3D printing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 754–767.
- [27] LEI R D, ZHANG Z Y, BERTO F, et al. Strain localization and cracking behavior of sandstone with two gypsum-infilled parallel flaws[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 112: 102873.
- [28] MOKHTARIAN H, MOOMIVAND H, MOOMIVAND H. Effect of infill material of discontinuities on the failure criterion of rock under triaxial compressive stresses[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 108: 102652.
- [29] DYSKIN A V, SAHOURYEH E, JEWELL R J, et al. Influence of shape and locations of initial 3-D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(15): 2115–2136.
- [30] WANG H Y, DYSKIN A, PASTERNAK E, et al. Effect of the intermediate principal stress on 3-D crack growth[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 204: 404–420.
- [31] FU J W, CHEN K, ZHU W S, et al. Progressive failure of new modelling material with a single internal crack under biaxial compression and the 3-D numerical simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 165: 140–152.
- [32] WANG X Z, JIANG L S, LI Y Y, et al. Experimental study on the mechanical behavior and failure characteristics of rock analogs with filled internal fractures: A new method by sand powder 3D printing[J]. Construction and Building Materials, 2024, 427: 136261.
- [33] ZHOU T, ZHU J B. Identification of a suitable 3D printing material for mimicking brittle and hard rocks and its brittleness enhancements[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(3): 765–777.
- [34] ZHU J B, ZHOU T, LIAO Z Y, et al. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behaviour of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 106: 198–212.
- [35] ZHAO Y, JIANG L S, LI C N, et al. Experimental investigation into the mechanical behavior of jointed soft rock using sand powder 3D printing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(7): 5383–5404.
- [36] 蒋力帅, 王鑫哲, 徐清, 等. 砂型 3D 打印材料对类软岩力学特性影响规律及机理[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 84–94.

- JIANG Lishuai, WANG Xinzhe, XU Qing, et al. Influence and mechanism of printing materials on the mechanical properties of sand powder 3D printed weak rock-like materials[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(11): 84–94.
- [37] XU Q, JIANG L S, MA C Q, et al. Effect of layer thickness on the physical and mechanical properties of sand powder 3D printing specimens[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 763202.
- [38] PERRAS M A, VOGLER D. Compressive and tensile behavior of 3D-printed and natural sandstones[J]. *Transport in Porous Media*, 2019, 129(2): 559–581.
- [39] 蒋力帅, 吴星宇, 王庆伟, 等. 砂型 3D 打印类煤试样动静组合加载力学特性[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1196–1207.
- JIANG Lishuai, WU Xingyu, WANG Qingwei, et al. Dynamic mechanical behaviors of sand-powder 3D printing rock-like specimens under coupled static and dynamic loads[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1196–1207.
- [40] WANG L, SU H M, QIN Y, et al. Study on dynamic constitutive model of weakly consolidated soft rock in western China[J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 8865013.
- [41] 王磊, 袁秋鹏, 谢广祥, 等. 冲击载荷下煤样能量耗散与破碎分形的长径比效应[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(4): 1534–1546.
- WANG Lei, YUAN Qiupeng, XIE Guangxiang, et al. Length-diameter ratio effect of energy dissipation and fractals of coal samples under impact loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1534–1546.
- [42] LI C J, XU Y, CHEN P Y, et al. Dynamic mechanical properties and fragment fractal characteristics of fractured coal-rock-like combined bodies in split Hopkinson pressure bar tests[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(5): 3179–3195.
- [43] ZHANG Z, JIANG L S, LI C N, et al. Characteristics and mechanism of time on sand powder 3D printing rock analogue: A new method for fractured rock mechanics[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 166.
- [44] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [45] WU X Y, JIANG L S, TAO M, et al. Dynamic behaviors and bolt-strengthening effect of sand-powder 3D printing rock analog under static and dynamic coupled loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134723.
- [46] 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 Diyuan, HAN Zhenyu, SUN Xiaolei, 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.
- [47] 刘晓辉, 薛洋, 郑钰, 等. 冲击载荷下煤岩破碎过程能量释放研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(S2): 3201–3211.
- LIU Xiaohui, XUE Yang, ZHENG Yu, et al. Study on energy release during coal and rock crushing under impact load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(S2): 3201–3211.
- [48] 田威, 余宸, 王肖辉, 等. 3D 打印裂隙岩体动态力学性能及能量耗散规律初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(3): 446–456.
- TIAN Wei, YU Chen, WANG Xiaohui, et al. A preliminary research on dynamic mechanical properties and energy dissipation rule of 3D printed fractured rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(3): 446–456.
- [49] YAN Z L, DAI F, ZHU J B, et al. Dynamic cracking behaviors and energy evolution of multi-flawed rocks under static pre-compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(9): 5117–5139.
- [50] 张平, 李宁, 贺若兰, 等. 动载下两条断续预制裂隙贯通机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6): 1210–1217.
- ZHANG Ping, LI Ning, HERUO Lan, et al. Mechanism of fracture coalescence between two pre-existing flaws under dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(6): 1210–1217.
- [51] 黄理兴. 动荷载作用下岩石裂纹的扩展与控制[J]. *水利学报*, 1988, 19(1): 53–58.
- HUANG Lixing. Propagation and control of rock crack under dynamic load[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988, 19(1): 53–58.
- [52] 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 Heping, JU Yang, LI Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1729–1740.
- [53] 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.
- [54] 夏昌敬, 谢和平, 鞠杨, 等. 冲击载荷下孔隙岩石能量耗散的实验研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(9): 1–5.
- XIA Changjing, XIE Heping, JU Yang, et al. Experimental study of energy dissipation of porous rock under impact loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(9): 1–5.
- [55] 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, 30.
- SHAN Xiaoyun, LI Zhanjin. Fractal theory, characteristics and its application on rock fragmentation[J]. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 2003, 25(2): 11–17, 30.
- [56] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23(4): 1–9.
- XIE Heping, GAO Feng, ZHOU Hongwei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. *Journal of Seismology*, 2003, 23(4): 1–9.
- [57] 马军, 谭春, 马智法, 等. 裂隙岩体复杂结构面特征预测与密度计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(S2): 3127–3136.
- MA Jun, TAN Chun, MA Zhifa, et al. Prediction and density calculation of complex structural plane features of fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(S2): 3127–3136.