

DOI:10.11784/tdxbz202503029

振动载荷对岩石冲击破裂特征与粒度分布影响的试验研究

赵环帅^{1,2,3}, 潘永泰¹, 唐建华⁴, 赵英嘉¹, 尹方熙¹, 乔鑫¹

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083;

2. 河北省智能装备数字化设计及过程仿真重点实验室(唐山学院), 唐山 063000;

3. 唐山学院机电工程学院, 唐山 063000; 4. 中蓝连海设计研究院有限公司, 连云港 222004)

摘要: 外部加载方式对岩石的力学性质及破裂行为具有显著的影响, 在不同的加载方式下, 岩石的破裂特征与粒度分布往往呈现出显著的差异性。然而, 现有的研究主要以单一加载方式为主, 对于复合加载下岩石的破裂特征以及不同加载方式之间相互作用的研究相对较少。针对上述问题, 本研究以准脆性物料青砂岩为研究对象, 采用 PAN-E2E-VIT 高速动态测定试验系统, 对比分析了青砂岩在冲击、振动冲击复合加载下的破裂特征、粒度分布与质量占比, 并研究了振动载荷对岩石冲击破裂特征及粒度分布规律的影响。结果表明, 在冲击、振动冲击复合加载下, 青砂岩呈现出相似的破裂特征, 即首先形成上、下两个破碎锥, 随后下破碎锥的破坏逐渐加剧直至完全破坏, 而上破碎锥在最后阶段发生破坏。相较于冲击加载, 振动冲击复合加载方式能显著提高 6 mm 以上颗粒的质量占比, 且增加振幅与振动频率, 能明显增加 6~20 mm 颗粒的质量占比。此外, 振幅与振动频率对青砂岩的破碎具有显著的选择性破裂效果。研究结果为岩石破碎加载方式及工艺参数的合理选择提供参考。

关键词: 振动载荷; 青砂岩; 破裂特征; 粒度分布; 质量占比

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)04-0398-10

Experimental Study on the Influence of Vibration Loading on Rock Impact Fracture Characteristics and Particle Size Distribution

Zhao Huanshui^{1,2,3}, Pan Yongtai¹, Tang Jianhua⁴, Zhao Yingjia¹, Yin Fangxi¹, Qiao Xin¹

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Equipment Digital Design and Process Simulation of

Hebei Province, Tangshan University, Tangshan 063000, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China;

4. Bluestar Lehigh Engineering Institute Co., Ltd., Lianyungang 222004, China)

Abstract: External loading methods significantly influence the mechanical properties and fracture behavior of rocks. The fracture characteristics and particle size distribution often vary markedly under different loading conditions. However, most existing studies focus on single loading methods, with limited research on the effects of composite loading and the interactions between different loading modes. To address these gaps, this study investigates green sandstone, a quasi-brittle material, using the PAN-E2E-VIT high-speed dynamic measurement test system. The study compares and analyzes the fracture characteristics, particle size distribution, and mass proportion of green sandstone under impact and vibration-impact composite loading. The influence of vibration loading on the impact fracture characteristics and particle size distribution of rock is also investigated. The results show that under impact and vibration-impact composite loading, green sandstone exhibits similar fracture characteristics: initially, upper and lower crushing cones are formed; subsequently, the lower crushing cone undergoes progressive failure until complete destruction; finally, the upper crushing cone is fractured. Compared to impact loading alone, vibration-impact com-

收稿日期: 2025-03-21; 修回日期: 2025-04-27.

作者简介: 赵环帅(1980—), 男, 博士, 副研究员, zhaohuanshui@163.com.

通信作者: 潘永泰, panyongtai@cumtb.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074308); 河北省教育厅科学研究项目(ZC2026264); 唐山学院博士创新项目(BC2025014ZD).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52074308), the Science Research Project of Hebei Education Department(No. ZC2026264), the Doctoral Research Startup Fund Project of Tangshan University(No. BC2025014ZD).

posite loading can significantly increase the mass proportion of particles larger than 6 mm. Moreover, increasing the vibration amplitude and frequency notably enhances the mass proportion of particles within the 6—20 mm range. Additionally, both vibration amplitude and frequency exhibit selective fracturing effects on green sandstone. These findings provide a reference for the optimized selection of loading methods and process parameters for rock crushing.

Keywords: vibration loading; green sandstone; fracture characteristics; particle size distribution; mass proportion

破碎作业是生产加工中的关键环节之一,其主要通过施加各种形式的外部载荷,使物料的外形尺寸减小的过程^[1-2]。同时,破碎作业也是矿物高效分离的基本单元,其核心目标在于实现目的矿物与非目的矿物的解离,满足后续工序对粒度的要求^[3-4]。岩石作为自然界中的一种天然介质,是工业生产中应用最广泛的基础材料之一,同时也是重要的工业原料和矿产资源^[5]。由于岩石是由多种矿物组成的集合体,其内部矿物力学性质存在显著差异,因此,在外部加载过程中,岩石通常表现出非均质性、非连续性、非线性、各向异性和黏弹性等复杂特性^[6]。此外,在破碎作业中,岩石的力学性质不仅与岩石种类、矿物成分及应力状态等天然条件密切相关,外部加载方式也对其力学性质及破裂行为产生显著影响。在不同的加载方式下,岩石的力学特性、破裂特征、裂纹特点及能量演化等方面往往呈现出显著差异^[7]。

目前,对岩石外部载荷的研究主要集中在单一加载方式上^[8-11],而关于复合载荷下岩石破裂特性及不同加载方式之间相互作用的研究相对较少^[12]。然而,工程实际应用中,由于破碎工况的复杂性,岩石的破碎过程通常涉及多种加载方式的相互作用。例如,在选矿工业中,惯性圆锥破碎机通过简谐振动力和可调节的冲击力对各种岩石进行选择破碎。当振动与冲击载荷相结合时,能够产生协同效应,即使振动载荷较小的变化也能显著提高岩石破碎的速度和效果^[13]。因此,未来的研究方向应更加聚焦于多种加载方式复合作用对岩石破裂特性的影响,以及不同加载方式之间的相互作用机制。这不仅有助于优化破岩工艺参数,还能为实际工程应用提供理论支持和技术指导。

基于此,本文以岩石破碎过程中准脆性材料青砂岩为研究对象,采用 PAN-E2E-VIT 高速动态测定试验系统,对比分析了青砂岩在冲击、振动冲击复合加载下的破裂特征、粒度分布与质量占比,并研究了振动载荷对岩石冲击破裂特征及粒度分布规律的影响,以为岩石破碎加载方式及工艺参数的合理选择提供参考。

1 试验设备及方案

1.1 试验设备

本研究采用课题组自主研发设计的 PAN-E2E-VIT 高速动态测定试验系统,该系统主要包括振动冲击测试平台、高速摄像机、激光位移传感器、动态信号采集仪及高速动态测定试验机等检测仪器(图1)。这些设备能够实时监测岩石在各种外部加载条件下的破碎过程,包括裂纹演化、颗粒飞溅、变形位移以及破碎力等特征数据。具体仪器型号与参数详见表1。此外,该试验系统配备多种形式的锤头,并可通过添加配重铅块调整锤头质量。本次试验中,使用了自重为 20 kg 的平面锤头,并配置了 3 块质量均为 5 kg 的铅块(图2)。

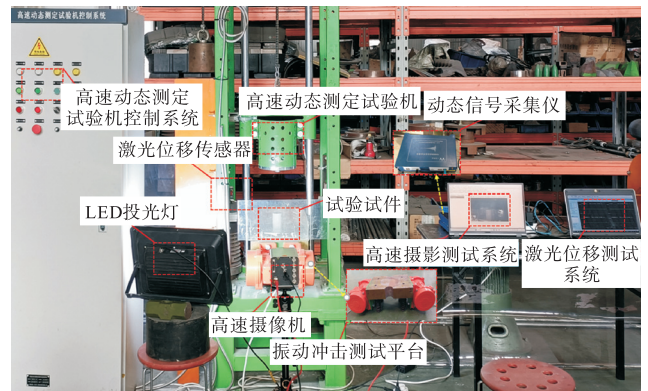


图1 PAN-E2E-VIT 高速动态测定试验系统

Fig.1 PAN-E2E-VIT high-speed dynamic measurement test system

表1 试验仪器的型号与参数

Tab.1 Models and parameters of experimental instruments

试验设备	型号	参数
高速摄像机	Mega Speed MS55K Hi-G	分辨率:1 280 像素 × 1024 像素 拍摄频率:800 Hz
动态压力传感器	B1YP600E	量程:600 kN
激光位移传感器	HL-G112-A-C5	量程:± 60 mm 通道:6
信号采集分析仪	YSV8008	AD:24 采样频率:51.2 kHz 激振力:8 kN
振动测试平台	PT-MVEVBE-8-2	激振功率:0.55 kW

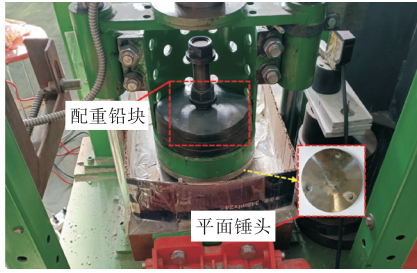


图 2 平面锤头及配重铅块

Fig.2 Plane hammerhead and counterweight lead block

1.2 试验材料

试验所用的岩样取自四川省自贡市,其为典型的陆相沉积岩,主要由石英、长石和云母等矿物质砂粒胶结而成,富含硅、钙、黏土和氧化铁,是一种常见的准脆性材料.该岩样的均质性较好,断面结构如图 3 所示.为了减少非均质性和节理特性对试验结果的影响,试验选取同一块岩石,沿垂直层理密集布孔钻取岩芯,并采用水冷方式冷却,经过钻孔、锯切和磨削等工序,按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)的要求,加工成直径 50 mm、长度 100 mm 的标准圆柱体试样.随后,从所有试件中挑选表面无明显节理或裂隙的青砂岩试样,其平行度、平直度和垂直度均符合规范要求(< 0.05 mm),主要物理参数详见表 2.



图 3 青砂岩试件断面结构

Fig.3 Cross-sectional structure of the green sandstone specimens

表 2 青砂岩试件主要物理参数

Tab.2 Main physical parameters of the green sandstone specimens

直径/ mm	高度/ mm	平均密度/ (kg/m^3)	平行度/ mm	平直度/ mm	垂直度/ mm
50	100	2 294.216	0.020	0.020	0.020

1.3 试验方案

为研究振动载荷对青砂岩冲击破裂特征与粒度分布的影响,本研究设计了两种加载试验:冲击加载试验(图 4)、振动冲击复合加载试验(图 5).在冲击加载试验中,采用高速动态测定试验机对青砂岩试件进行加载;而在振动冲击复合加载试验中,青砂岩试件的上部通过高速动态测定试验机加载,下部则通过

振动冲击测试平台加载.试验过程中,加载条件的具体控制方法如下:

- (1) 冲击速度通过调整冲击锤头的高度来设定,分别设置为 50、60、70 cm.
- (2) 振动频率通过 GDCK-1A 高速动态测定试验机控制系统中的电机变频器进行调整,分别设置为 2、4、6 Hz.
- (3) 振幅通过调整振动电机两偏心块的重合角度控制,当两偏心块重合角度分别为 100%、90%和 80%时,设置振幅为振幅 A、振幅 B 和振幅 C,见图 6.设计中使用的振动电机型号为 VBE-8-2,激振力为 8 kN,振动平台的最大振幅为 1.167 mm.



图 4 青砂岩试件(冲击加载试验)
Fig.4 Green sandstone specimens (impact loading test)



(a) 振幅 A



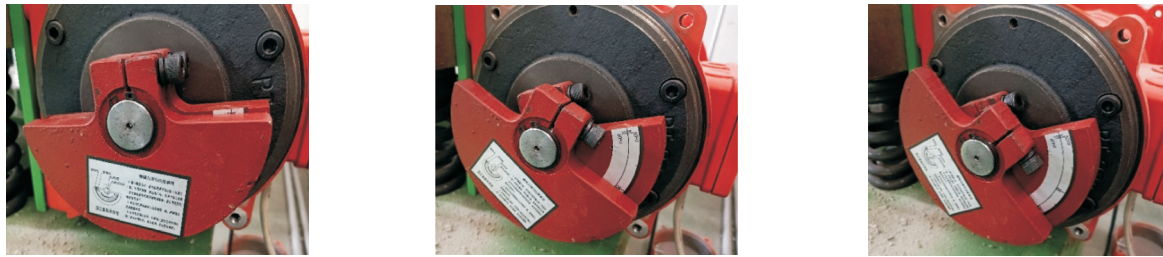
(b) 振幅 B



(c) 振幅 C

图 5 青砂岩试件(振动冲击复合加载试验)

Fig.5 Green sandstone specimens (vibration-impact composite loading test)



(a) 振幅 A(两偏心块重合角度 100%) (b) 振幅 B(两偏心块重合角度 90%) (c) 振幅 C(两偏心块重合角度 80%)

图 6 振幅调整方法

Fig.6 Amplitude adjustment method

通过上述加载参数的控制,具体的加载方式组合见表 3. 同时,为了减少青砂岩试验中偶然误差对结果的影响,试验过程中每组试验均进行 3 次重复测试,并在分析测试结果时取其平均值. 这种方法能够有效降低偶然误差对试验结果的干扰,提高数据的可靠性和准确性.

表 3 加载方式组合

Tab.3 Loading method combinations

加载方式	冲击高度/cm			振幅			振动频率/Hz		
	50	60	70	A	B	C	2	4	6
冲击加载	●	●	●						
振动冲击复合加载	●	●	●	▲	▲	▲	▼	▼	▼

注: ▲与▼采用相互交叉组合方法.

2 破裂特征分析

2.1 冲击加载下青砂岩的破裂特征

在冲击加载试验下,当冲击高度分别为 50、60、



(a) 冲击高度 50 cm

(b) 冲击高度 60 cm

(c) 冲击高度 70 cm

图 7 冲击加载下青砂岩的破裂特征

Fig.7 Failure characteristics of green sandstone under impact loading

2.2 振动冲击复合加载下青砂岩的破裂特征

2.2.1 振幅与振动频率不变, 改变冲击高度

在振动冲击复合加载试验中,通过保持青砂岩的振幅 B(90%)和振动频率(6 Hz)不变,而改变冲击高度,研究青砂岩的破裂特征. 例如,在上述条件下,当

70 cm 时,青砂岩的破裂特征如图 7 所示,由图 7 可知:

(1) 当冲击高度为 50 cm 时,青砂岩在破裂过程中形成了上、下两个破碎锥,这两个破碎锥仍然保持一定的连接关系,同时伴随一些较小的碎块产生. 这表明在较低冲击高度下,岩石的破裂主要表现为局部裂纹扩展,裂纹尚未完全贯通,导致部分区域仍保持整体性.

(2) 随着冲击高度增加至 60 cm,上破碎锥的破裂程度进一步加剧,最终分裂为两块较大的碎块. 这一现象说明冲击能量的增加导致裂纹扩展速率加快,破坏模式由局部裂纹扩展逐渐向整体破裂转变.

(3) 当冲击高度达到 70 cm 时,上破碎锥几乎完全破坏,而下部破碎锥的破裂也进一步加剧. 此时,岩石的破裂模式已从局部裂纹扩展演变为整体解体.

综上可得,冲击高度对青砂岩的破裂特征具有显著影响,且随着冲击高度的增加,岩石的破裂模式和破碎程度均发生了显著变化.

冲击高度分别为 50、60、70 cm 时,青砂岩的破裂特征如图 8 所示,由图 8 可知:当冲击高度为 50 cm 时,青砂岩在破裂过程中形成了上、下两个破碎锥,并伴随一些片状碎块的产生;当冲击高度增加至 60 cm 时,上破碎锥的破裂程度进一步加剧,下破碎



图 8 振动冲击复合加载下青砂岩的破裂特征(改变冲击高度)

Fig.8 Failure characteristics of green sandstone under vibration-impact composite loading (changing impact height)

锥也出现更明显的破裂;当冲击高度达到 70 cm 时,上部破碎锥的破裂更加剧烈,同时下破碎锥完全破裂.

综上可得,在振动冲击复合加载条件下,冲击高度对青砂岩的破裂影响显著,且随着冲击高度的增加,青砂岩的破裂模式和破碎程度均发生了显著变化.

2.2.2 振幅与冲击高度不变,改变振动频率

在振动冲击复合加载条件下,通过保持青砂岩的振幅 B(90%)和冲击高度(60 cm)不变,改变振动频率,研究青砂岩的破裂特征.例如,在上述条件下,分

别测试了振动频率为 2、4、6 Hz 时的破裂情况,得到青砂岩的破裂特征如图 9 所示.由图 9 可知:当振动频率为 2 Hz 时,青砂岩在破裂过程中形成了上下两个破碎锥,并伴随一些碎块的产生;当振动频率增加至 4 Hz 时,上破碎锥的破裂程度进一步加剧,下破碎锥也出现更明显的破裂;而当振动频率达到 6 Hz 时,上破碎锥的破裂更加剧烈,同时下破碎锥完全破裂.

综上可得,在振动冲击复合加载条件下,振动频率对青砂岩的破裂影响显著,且随着振动频率的增加,青砂岩的破裂模式和破碎程度均发生了显著变化.



图 9 振动冲击复合加载下青砂岩的破裂特征(改变振动频率)

Fig.9 Failure characteristics of green sandstone under vibration-impact composite loading (changing vibration frequency)

2.2.3 振动频率与冲击高度不变,改变振幅

在振动冲击复合加载下,通过保持青砂岩的振动频率(6 Hz)和冲击高度(60 cm)不变,改变振幅,研究青砂岩的破裂特征.例如,在上述条件下,分别测试了振幅 A、B、C 时的破裂情况,得到青砂岩的破裂特

征如图 10 所示.由图 10 可知:振幅 A 时,青砂岩在破裂过程中形成上、下两个破碎锥,并伴随一些碎块的产生;振幅 B 时,上部破碎锥的破裂进一步加剧,下部破碎锥也出现更明显的破裂;而当振幅 C 时,上、下破碎锥的破裂程度显著增加.



图 10 振动冲击复合加载下青砂岩的破裂特征(改变振幅)

Fig.10 Failure characteristics of green sandstone under vibration-impact composite loading (changing vibration amplitude)

综上可得,在振动冲击复合加载条件下,振幅对青砂岩的破裂影响显著,且随着振幅的增加,青砂岩的破裂模式和破碎程度均发生了显著变化。

综合以上分析可知,在冲击、振动冲击复合加载条件下,青砂岩表现出相似的破裂特征:首先形成上、下两个破碎锥,随后下破碎锥的破坏逐渐加剧直至完全破坏,而上破碎锥在最后阶段发生破坏。相较于冲击加载,振动冲击复合加载对青砂岩的破裂效果影响更为显著。通过采用颗粒流模拟对青砂岩进行振动加载也得出相同的结论,即振动载荷的变化会直接影响岩石的破裂模式和能量利用效率^[12-13]。分析认为,这是由于在冲击加载下,冲击时间较短且能量集中,输入能量主要通过裂纹耗散;而在振动冲击复合加载下,由于岩石间的阻尼较小(通常范围为 0.003 ~ 0.300)^[14],在低频率时振幅具有放大作用,振动载荷增加了岩石颗粒间黏结键的振幅,导致颗粒间黏结键的破坏加速,微裂纹产生与贯通速度加快,宏观表现为相同时间内,青砂岩受到振动作用后的破裂程度更大。因此,增加冲击速度会加剧岩石的破裂,而增加振幅与频率也能对岩石的破裂起到一定的辅助作用。

3 粒度分布与质量占比分析

粒度分布是破碎设备及生产工艺中的重要评价指标,其直接影响矿物加工过程的效率和产品质量。在矿物加工生产中,合适的产物粒度是矿物解离的关键,对后续分选工艺设计及产品品位提高具有重要影响。通过对冲击、振动冲击复合加载下青砂岩破裂产物的粒度特征规律进行分析,可以分别得到青砂岩在大粒级产物(>20 mm)、中等粒级产物(6~20 mm)、小粒级产物(1~6 mm)和微小粒级产物(<1 mm)下的质量分布及其质量占比,如图 11~14 所示。图中,柱状图代表了不同粒度范围内的颗粒分布情况,而曲线图则表示各粒度范围颗粒的质量占比。

3.1 冲击加载下青砂岩的粒度分布与质量占比

在冲击加载试验下,青砂岩破裂后的粒度分布与质量占比情况如图 11 所示。

(1) 在相同的冲击高度下,青砂岩破裂后的粒度质量分布与质量占比总体上呈现出先快速下降后趋于稳定的趋势。具体而言,大粒级产物(>20 mm)的质量占比范围为 63.832%~79.881%,中等粒级产物(6~20 mm)的质量占比范围为 12.355%~24.328%,小粒级产物(1~6 mm)的质量占比范围为 3.097%~4.859%,微小粒级产物(<1 mm)的质量占比范围为 4.493%~7.503%。这一趋势表明,随着粒度的减

小,颗粒质量占比逐渐减少,而大颗粒质量占比相对较高。

(2) 在不同冲击高度下,青砂岩破裂后的粒级产物的质量占比表现出显著变化。具体而言,随着冲击高度的增加,大粒级产物(>20 mm)的质量占比有所下降,而中等粒级产物(6~20 mm)、小粒级产物(1~6 mm)和微小粒级产物(<1 mm)的质量占比则明显增大。这一现象说明,冲击高度的增加更有利于生成较小颗粒的产物,从而提高了青砂岩的破碎效果。

从上述分析可以看出,冲击加载试验对青砂岩的破碎效果具有显著影响,且粒度分布的变化规律与冲击高度密切相关。

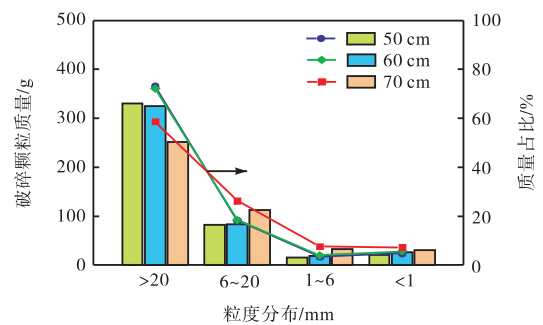


图 11 冲击加载下青砂岩粒度分布与质量占比

Fig.11 Particle size distribution and mass proportion of green sandstone under impact loading

3.2 振动冲击复合加载下青砂岩的粒度分布与质量占比

3.2.1 振幅与振动频率不变,改变冲击高度

在振动冲击复合加载试验下,保持振幅与振动频率相同,改变冲击高度,得到青砂岩的粒度分布与质量占比情况如图 12 所示。

(1) 在相同的冲击高度下,青砂岩破裂后的粒度质量分布与质量占比总体上呈现出先快速下降后趋于稳定的趋势。具体而言,大粒级产物(>20 mm)的质量占比范围为 73.983%~93.387%,中等粒级产物(6~20 mm)的质量占比范围为 5.154%~18.584%,小粒级产物(1~6 mm)的质量占比范围为 0.660%~3.994%,微小粒级产物(<1 mm)的质量占比范围为 0.799%~5.791%。这一趋势表明,在相同振动频率和振幅下,改变冲击高度,不同粒径的产物质量占比具有一定的规律性,且大颗粒产物占据主要比例,而细颗粒产物的比例相对较低。

(2) 在不同冲击高度下,青砂岩破裂后的粒级产物的质量占比表现出显著变化。具体而言,随着冲击高度的增加,大粒级产物(>20 mm)的质量占比明显减少,而中等粒级产物(6~20 mm)、小粒级产物(1~6 mm)和微小粒级产物(<1 mm)的质量占比则逐渐

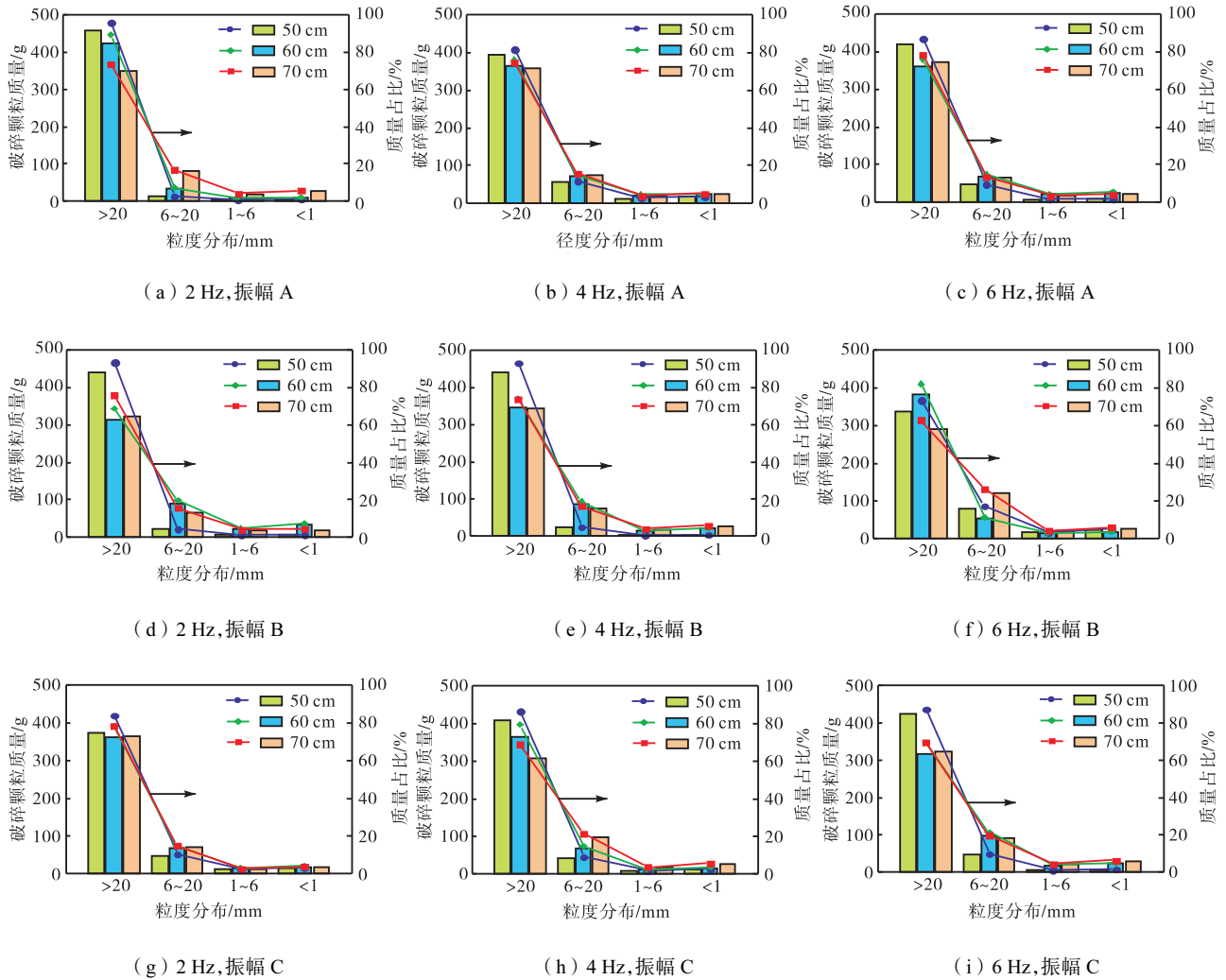


图 12 青砂岩粒度分布与质量占比(改变冲击高度)

Fig.12 Particle size distribution and mass proportion of green sandstone (changing impact height)

增大. 这一现象说明, 在相同振动频率和振幅下, 增加冲击高度能够显著有利于生成较小颗粒的产物, 从而提高了破碎效果.

3.2.2 振幅与冲击高度不变, 改变振动频率

在振动冲击复合加载试验下, 保持振幅与冲击高度相同, 改变振动频率, 得到青砂岩破裂后的粒度分布与质量占比情况如图 13 所示, 由图 13 可知: 在振幅与冲击高度相同的条件下, 改变振动频率, 青砂岩的破碎效果显著. 例如, 振幅 A 条件下, 冲击高度为 60 cm 时, 随着振动频率的增加, 大颗粒产物 (> 20 mm) 质量占比明显较小, 而中等颗粒产物 (6 ~ 20 mm)、小颗粒产物 (1 ~ 6 mm)、微小颗粒产物 (< 1 mm) 明显增大. 这一现象表明, 通过振动频率能够显著改善青砂岩的破碎效果. 因此, 在实际工业生产中, 适当调整振动频率可以提高岩石的破碎效率.

3.2.3 振动频率与冲击高度不变, 改变振幅

在振动冲击复合加载试验下, 保持振动频率与冲

击高度相同, 改变振幅, 得到青砂岩破裂后的粒度分布与质量占比情况如图 14 所示, 由图 14 可知: 在振动频率与冲击高度相同的条件下, 改变振幅, 青砂岩的破碎效果显著. 例如, 在振动频率为 4 Hz 和冲击高度为 70 cm 的条件下, 随着振幅的增加, 大颗粒产物 (> 20 mm) 的质量占比明显减少, 而中等颗粒产物 (6 ~ 20 mm)、小颗粒产物 (1 ~ 6 mm) 以及微小颗粒产物 (< 1 mm) 的质量占比则显著增加. 这一现象表明, 通过振幅能够显著改善青砂岩的破碎效果. 因此, 在实际工业生产中, 适当调整振幅可以提高岩石的破碎效率.

综上所述, 相较于冲击加载方式, 振动冲击复合加载显著提高了青砂岩中 6 mm 以上颗粒的质量占比. 同时, 通过增加振幅或振动频率, 可以进一步提升 6 ~ 20 mm 颗粒的质量占比. 这一现象表明, 振幅与振动频率对青砂岩的破碎具有显著的选择性破坏效果. 分析认为, 主要原因如下.

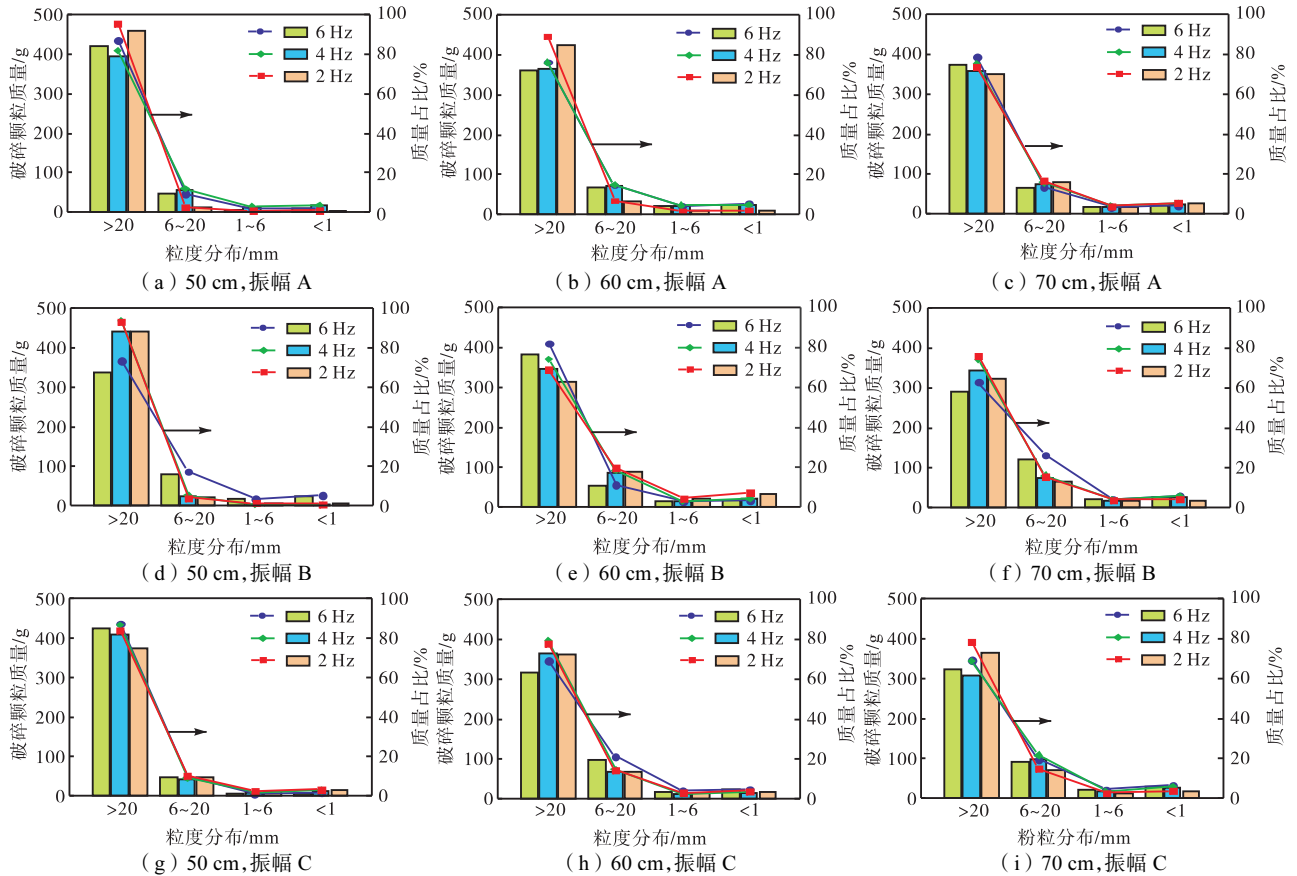


图 13 青砂岩粒度分布与质量占比 (改变振动频率)

Fig.13 Particle size distribution and mass proportion of green sandstone (changing vibration frequency)

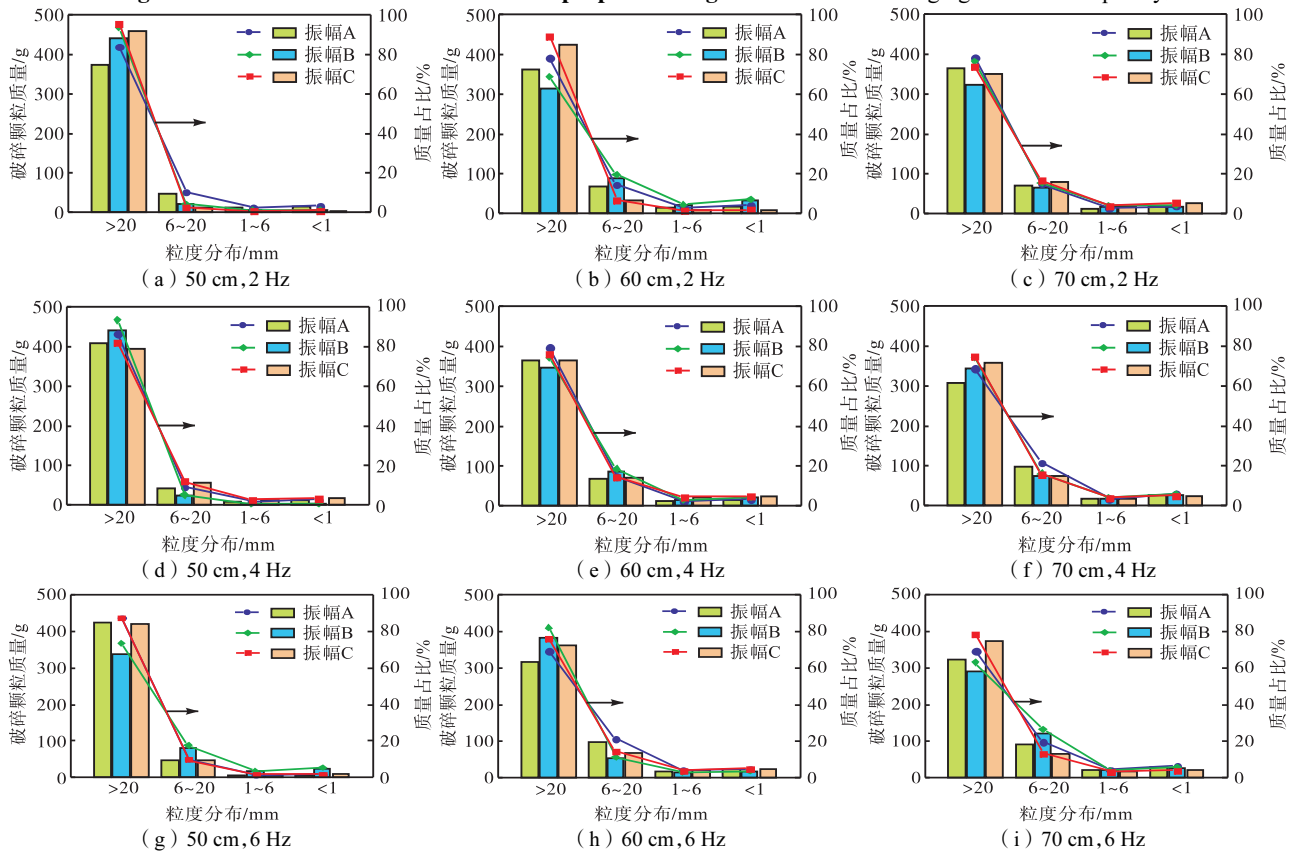


图 14 青砂岩粒度分布与质量占比 (改变振幅)

Fig.14 Particle size distribution and mass proportion of green sandstone (changing vibration amplitude)

(1) 岩石内部结构与矿物成分的异质性. 岩石由多种矿物组成, 这些矿物在力学性质(如硬度、强度、脆性等)上存在显著差异. 这种异质性不仅体现在矿物颗粒的成分和几何形态上, 还反映在岩石的微观结构中. 在振动加载破碎过程中, 不同矿物的抗压强度和疲劳极限差异显著, 这使得它们对振动加载的响应各不相同, 进一步加剧了选择性破碎的现象.

(2) 振动加载破碎过程中的能量分布. 振动加载破碎过程中, 能量在岩石内部的分布具有明显的不均匀性. 这种不均匀性主要源于岩石内部的应力集中区域或裂纹的存在, 这些区域更容易吸收振动能量并发生破坏. 此外, 由于岩石的非均质性, 能量在不同方向上的耗散方式(如剪切、弯曲、扭转等)也会影响破碎过程的均匀性. 因此, 能量分布的不均匀性不仅加剧了选择性破碎现象, 还可能导致局部区域的优先破坏.

(3) 振动加载破碎的几何和能量选择性. 选择性破碎不仅与矿物成分的异质性密切相关, 还受到破碎过程中几何条件的影响. 例如, 岩石料块之间的相互冲击和剪切作用可能导致某些区域的应力集中, 从而优先破坏这些区域. 此外, 振动破碎过程中能量的耗散方式(如剪切、弯曲、扭转等)也会显著影响破碎的均匀性. 研究表明, 当能量以剪切形式耗散时, 岩石的破碎效率更高; 而当能量以弹性形式积累时, 则可能导致局部裂纹扩展并最终引发宏观破坏. 因此, 几何条件和能量耗散方式共同决定了振动加载破碎的选择性特征.

4 结 论

本文以准脆性材料青砂岩为研究对象, 采用 PAN-E2E-VIT 高速动态测定试验系统, 对比分析了青砂岩在冲击、振动冲击复合加载下的破裂特征、粒度分布与质量占比, 并研究了振动载荷对岩石冲击破裂特征及粒度分布规律的影响, 得出以下主要结论.

(1) 在冲击、振动冲击复合加载下, 青砂岩的破裂特征表现出一定的相似性: 首先形成上、下两个破碎锥, 随后下部破碎锥的破坏逐渐加剧直至完全破坏, 而上部破碎锥在最后阶段发生破坏. 相较于冲击加载方式, 振动冲击复合加载显著提高了青砂岩的破裂效果.

(2) 相较于冲击加载方式, 振动冲击复合加载不仅显著提高了大于 6 mm 颗粒的质量占比, 还通过增加振幅和振动频率, 进一步提升 6~20 mm 颗粒的质

量占比. 此外, 振幅与振动频率对青砂岩的破裂具有显著的选择性破裂效果, 即不同粒径颗粒的破碎程度受到振幅和频率的调控作用.

此外, 本研究为进一步探索振动载荷对岩石破裂机制提供了试验支持, 但该研究主要基于试验室条件下小尺寸样本(如 < 0.6 mm 至 > 20 mm)的试验结果. 然而, 岩石在实际工程破碎过程中, 其破碎尺寸的不规则性以及复杂的破裂行为难以完全通过试验室条件下的小尺寸样本来反映. 因此, 未来研究需结合现场试验和大数据分析, 以扩大样本尺寸来探索不同地质条件下的岩石破裂行为, 同时还要验证试验结果的普适性. 此外, 通过引入先进的测量技术(如三维断层扫描、CT 扫描和核磁共振成像)以及数值模拟方法, 可以更全面地揭示岩石在各种复杂应力条件下的破裂机制, 为优化岩石破碎工艺参数提供理论依据.

参考文献:

- [1] 周 强, 潘永泰, 郭 庆, 等. 不同冲击比能下煤岩颗粒破碎的分形演化[J]. 煤炭工程, 2020, 52(4): 143-148.
Zhou Qiang, Pan Yongtai, Guo Qing, et al. The fractal evolution of coal rock particle fragmentation under different impact energy ratios[J]. Coal Engineering, 2020, 52(4): 143-148 (in Chinese).
- [2] 李宏达, 赵红阳, 王 军, 等. 高压脉冲放电碎石法研究[J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(6): 722-726.
Li Hongda, Zhao Hongyang, Wang Jun, et al. High voltage pulse discharge lithotripsy[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015, 39(6): 722-726 (in Chinese).
- [3] 甘德清, 高 锋, 刘志义, 等. BIF 型铁矿石冲击破碎特性的能量效应[J]. 振动与冲击, 2019, 38(6): 75-82.
Gan Deqing, Gao Feng, Liu Zhiyi, et al. Effects of energy on the impact comminution characteristics of BIF magnetite ore[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(6): 75-82 (in Chinese).
- [4] Hlabangana N, Nhira E, Masayile N, et al. A fundamental investigation on the breakage of a bed of PGM ore particles: An attainable region approach, part 2[J]. Powder Technology, 2019, 346: 326-331.
- [5] 赵环帅, 潘永泰, 余 超, 等. 超声振动作用下青砂岩细观损伤演化规律及断裂能利用效率研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1646-1661.

- Zhao Huanshuai, Pan Yongtai, Yu Chao, et al. Study on the evolution law of microscopic damage and fracture energy utilization efficiency of sandstone under ultrasonic vibration[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(7): 1646-1661 (in Chinese).
- [6] 苏承东, 李怀珍, 张盛, 等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(5): 943-950.
- Su Chengdong, Li Huaizhen, Zhang Sheng, et al. Experimental investigation on effect of strain rate on mechanical characteristics of marble[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 943-950 (in Chinese).
- [7] 尹白琳, 吝曼卿, 石明汉, 等. 不同加载速率对磷块岩破坏特性的影响研究[J]. *化工矿物与加工*, 2023, 52(8): 26-31, 38.
- Yin Bailin, Lin Manqing, Shi Minghan, et al. Study on the effect of loading rates on the failure characteristics of phosphate rock[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2023, 52(8): 26-31, 38 (in Chinese).
- [8] 金爱兵, 朱东风, 孙浩, 等. 不同加载速率下的矿岩劈裂破坏特性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(1): 269-279.
- Jin Aibing, Zhu Dongfeng, Sun Hao, et al. Experimental study of ore-rock splitting failure characteristics at different loading rates[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(1): 269-279 (in Chinese).
- [9] 田家林, 杨志, 付传红, 等. 高频微幅冲击振动作用下岩石破碎行为计算方法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(6): 1808-1816.
- Tian Jialin, Yang Zhi, Fu Chuanhong, et al. Calculation method of rock-breaking behavior under impact vibration of high frequency and micro amplitude[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(6): 1808-1816 (in Chinese).
- [10] 宋义敏, 何爱军, 王泽军, 等. 冲击载荷作用下岩石动态断裂试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 965-970.
- Song Yimin, He Aijun, Wang Zejun, et al. Experiment study of the dynamic fractures of rock under impact loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 965-970 (in Chinese).
- [11] 彭建宇, 王浩南, 吴硕, 等. 红砂岩受高压电脉冲冲击穿作用下的破裂行为试验研究[J]. *金属矿山*, 2022(11): 71-76.
- Peng Jianyu, Wang Haonan, Wu Shuo, et al. Experimental study on fracture behavior of red sandstone subjected to breakdown effect of high voltage electric pulse[J]. *Metal Mine*, 2022(11): 71-76 (in Chinese).
- [12] 赵环帅, 潘永泰, 毕研琨, 等. 振动冲击复合加载下青砂岩破裂特征及断裂能利用效率研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2025, 42(2): 463-471.
- Zhao Huanshuai, Pan Yongtai, Bi Yankun, et al. Study on the fracturing characteristics and utilization efficiency of fracturing energy in green sandstone under vibration-impact composite loading[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2025, 42(2): 463-471 (in Chinese).
- [13] 赵环帅, 潘永泰, 余超, 等. 振动载荷对青砂岩冲击裂纹扩展及能量利用效率的影响[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(12): 2155-2165.
- Zhao Huanshuai, Pan Yongtai, Yu Chao, et al. The influence of vibration load on the propagation of impact cracks and energy utilization efficiency in sandstone[J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2024, 64(12): 2155-2165 (in Chinese).
- [14] Ahmed S B, Hunt R J, Manrod W E. Y-12 Site-Specific Earthquake Response Analysis and Soil Liquefaction Assessment[R]. Bethesda, USA: Lockheed Martin Energy Systems, INC., 1995.

(责任编辑: 田军)