

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0076

# 高轴压和围压共同作用下受频繁冲击时 含铜蛇纹岩能量演化规律\*

王 春<sup>1,2,3</sup>, 程露萍<sup>1</sup>, 唐礼忠<sup>2</sup>, 王 文<sup>1</sup>, 刘 涛<sup>2</sup>, 韦永恒<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

3. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 探讨高轴压和围压共同作用下频繁冲击扰动试验过程中伴随主要能量的种类, 并推演冲击扰动前后弹性能、塑性能等能量的计算公式; 采用预加载围压、高轴压、0.5 MPa 冲击气压模拟深部岩体承受的水平应力、垂直高应力及爆破开挖扰动的影 响开展动力学试验, 并基于试验结果分析含铜蛇纹岩的动力学特征及能量演化规律。研究结果表明: 含铜蛇纹岩能承受的扰动冲击次数随轴压增大而减小, 随围压增大而增大, 且动态峰值应力随扰动冲击次数增加而减小; 随扰动冲击次数的增加, 岩样伴随的弹性能先增大后趋于减小, 伴随的塑性能呈增大的趋势发展, 反射能和入射能的比值与透射能和入射能比值的 变化规律相反, 前者呈增大趋势, 后者呈减小趋势; 单位体积吸(释)能随扰动冲击次数的增加呈下凸曲线趋势变化, 其均值随围压增大先减小后增大, 随轴压增大而减小。

**关键词:** 高轴压; 围压; 频繁冲击; 弹性能; 塑性能

**中图分类号:** O347; TU45

**国标学科代码:** 13015

**文献标志码:** A

能量是物质发生变形破坏的内在因素, 影响其变化规律的因素众多, 如外部荷载、温度、湿度、物质自身材质等。岩石是一种非均匀性的特殊材料, 其变形破坏的过程中同样伴随着能量的传递与转换<sup>[1-2]</sup>。研究不同环境下岩石伴随能量的演化规律, 可为岩石工程中涉及的爆破开挖、围岩支护、岩爆预测等提供理论参考。深部岩石工程处于高地应力环境中, 开挖时受频繁爆破扰动影响, 故研究高静应力、频繁动态扰动条件下深部岩石能量演化的规律更具有实际意义。

关于深部岩石工程中岩石处于动静组合力学条件下变形破坏伴随能量特征的问题, 各国学者进行了一定的研究, 探讨了不同岩性、冲击强度、温度对岩石耗能规律的影响。Liu 等<sup>[3]</sup>、李明等<sup>[4]</sup>、于水生等<sup>[5]</sup>和 Ju 等<sup>[6]</sup>研究了砂岩、花岗岩破坏程度与能量耗散之间的关系, 发现岩样破坏后的块度越小, 耗能越多。黎立云等<sup>[7]</sup>和叶洲元等<sup>[8]</sup>研究了不同冲击速度下岩石破坏能量的规律, 当冲击速度越快, 岩石破碎越严重, 耗能越大。许金余等<sup>[9]</sup>和徐小丽等<sup>[10]</sup>研究了高温下岩石破坏过程中涉及的能量演化规律, 认为岩石单位体积吸收能不随温度的增加而呈现规律性变化。尹士兵等<sup>[11]</sup>研究了温、压耦合及动力扰动下岩石破碎时的耗能规律, 得出岩石破碎时能量吸收率最大的预压力及温度值。李夕兵等<sup>[12]</sup>分析了动静组合加载下岩石破坏的应变能密度准则和突变理论, 认为岩石破坏时的应变能密度临界值与破坏前的塑性变形及所处环境有关。金解放等<sup>[13]</sup>研究了轴压、围压对循环冲击下砂岩耗能的影响, 得出岩石单位体积耗能随循环冲击次数的增大而增加。赵伏军等<sup>[14]</sup>研究了动载、静载、动静组合荷载三种条件下破岩时岩石释放声发射累计能量的大小, 得出动静组合荷载破岩时居中。刘少虹等<sup>[15]</sup>、王文等<sup>[16]</sup>还探讨了

\* 收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-08-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(51604093); 河南省高校重点科研项目(18A440014); 河南理工大学博士基金(672707); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(192102310247); 深井瓦斯抽采与围岩控制技术国家地方联合工程实验室开放研究基金(SJF201803)

**第一作者:** 王 春(1986—), 男, 博士, 讲师, wczyl15728@163.com。

动静组合加载下煤岩的耗能规律,认为应力波幅值、静载大小、含水率等都是影响煤岩耗能的主要因素。综上所述,关于动静组合荷载下岩石伴随能量的规律研究,学者们投入了大量精力,但还未见涉及含矿物岩石处于高轴压和围压共同作用下受频繁冲击时能量演化规律的研究。

本文中,立足于冬瓜山铜矿采矿工程中面临的岩性条件及力学环境条件,采用 SHPB 动静组合加载装置对高轴压和围压共同作用下受频繁冲击时含铜蛇纹岩进行冲击加载,研究其能量演化规律。

## 1 实验方案与原理

### 1.1 实验装置及原理

#### (1) 实验装置

实验采用的 SHPB 动静组合加载实验装置<sup>[17-19]</sup>,主要由入射杆、透射杆、缓冲杆、纺锤型冲头、加压装置、数据采集系统组成,其结构示意图及实物见图 1。制造杆件的材料为 40Cr 合金钢,单轴抗压强度为 800 MPa,纵波波速 5447 m/s,弹性模量为 240 GPa。实验采用高压氮气发动纺锤型冲头,冲击 2 m 长的入射杆,产生恒应变率加载的半正弦应力脉冲,透射波经 1.5 m 长的透射杆传播,0.5 m 长的缓冲杆和轴压加载装置可吸收透射杆中的部分能量,以提高实验精度。实验过程中的数据由 DL-750 示波器及 CS-1D 超动态应变仪进行采集。

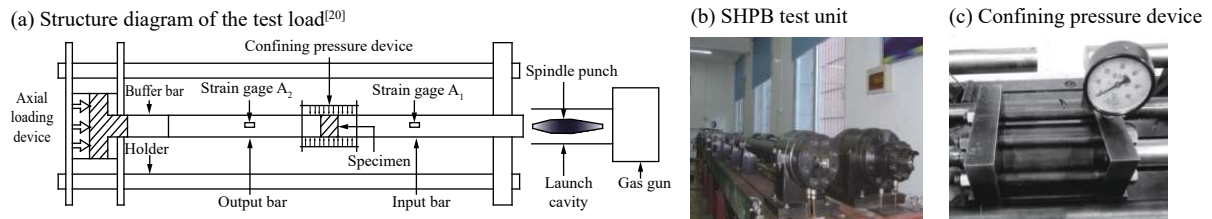


图 1 SHPB 实验加载系统

Fig. 1 Loading system of SHPB

#### (2) 实验原理

根据一维应力下弹性波在细长杆中传播无畸变及弹性波在岩样与杆件接触的两界面经多次反射后,两界面的应力应变趋于平衡的原理,由粘贴在入射杆、透射杆上的应变片  $A_1$ 、 $A_2$  分别测出冲击过程中入射波、反射波、透射波对应的电压信号。测得的电压信号转换成相应的入射应力、反射应力、透射应力后,可根据如下公式推算出岩样的动态应力、动态应变率、动态应变<sup>[21]</sup>:

$$\sigma_s(t) = \frac{A}{2A_s} [\sigma_I(t) + \sigma_R(t) + \sigma_T(t)] \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{c}{El} [\sigma_I(t) - \sigma_R(t) - \sigma_T(t)] \quad (2)$$

$$\epsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}_s(t) dt \quad (3)$$

式中:  $\sigma_I(t)$ 、 $\sigma_R(t)$ 、 $\sigma_T(t)$  分别为冲击过程中的入射应力、反射应力、透射应力,取压应力为正;  $\sigma_s(t)$ 、 $\dot{\epsilon}_s(t)$ 、 $\epsilon_s(t)$  分别为岩样的动态应力、应变率、应变;  $A$ 、 $A_s$  分别为弹性杆、岩样横截面积;  $E$ 、 $c$  分别为弹性杆的弹性模量、纵波波速;  $l$  为岩样的长度。

### 1.2 岩样制备

岩样取自冬瓜山铜矿深部出矿巷道附近的围岩,取样位置埋深约 900 m。由于出矿巷道围岩含有少量铜矿物,故取出的岩样为含铜蛇纹岩。岩样多呈黑绿色或暗灰绿色,表面可见非均匀的裂纹缺陷及点星铜矿物,但总体结构致密。为确保实验结果精确,按照岩石力学测试要求,将岩样加工成直径为 50 mm,高度为 100、50 mm 的两种类型。高径比为 2 : 1 岩样的用于三轴压缩实验测定含铜蛇纹岩的三轴抗压

强度, 高径比 1 : 1 的则用于动力学实验测试。为确保岩样内含铜矿物的量相近, 实验选用密度相近且两端面不平行度及不垂直度均小于 0.02 mm 的岩样进行测试。

### 1.3 实验方案

采用预加载围压  $p_c$  模拟深部岩体承受的水平应力, 预加载轴压  $p_a$  模拟深部岩体垂直方向承受的高静压力, 较小的冲击气压  $p_{shock}$  模拟深部岩体承受的频繁爆破开挖扰动的影响。实验中先施加围压, 再施加轴向压力, 待二者稳定后施加轴向的冲击荷载, 每次冲击后须进行调整, 确保冲击前预加载的围压、轴压一致, 直至岩样发生宏观破坏。具体的实验加载力学模型见图 2, 其中:  $p_{a,tot}$  为岩体承受的轴向总压力。

为模拟高静载的条件, 需预加载的轴压接近岩石的三轴抗压强度, 故实验前须采用 Instron 1346 型电液伺服材料试验机测定了含铜蛇纹岩的三轴抗压强度, 结果见表 1 及图 3。

由表 1 及图 3 得, 随围压的增加, 岩石的三轴抗压强度增大, 原因是围压增强了岩石抵抗外部静力荷载的能力。高轴压和围压共同作用下频繁冲击扰动实验要求预加载围压、轴压时岩样未发生宏观破坏, 且预加载的轴压值须趋近岩石静力学条件下的峰值强度。基于含铜蛇纹岩三轴压缩实验结果, 考虑岩样内部结构的差异, 选择围压为 15 MPa 时的三轴抗压强度 185.36 MPa 为参考值, 制定动力学实验预加载的轴压分别为 100、120、140、160 MPa, 围压则设置为 15、20、25、30 MPa。

为模拟深部岩体承受的爆破开挖小扰动条件, 基于爆破监测结果及取样位置与爆破点的距离, 由监测点顶板振动速度反演出发射腔内冲头的速度, 进一步推算出动力实验中冲击气压的值为 0.5 MPa。具体的反演步骤如下。

基于冬瓜山铜矿爆破监测结果, 以萨氏经验公式为基本形式, 采用最小二乘法进行拟合, 获得出矿巷道-760m 水平监测点顶板振动速度幅值的经验公式<sup>[22]</sup>:

$$v_d = 309.1007 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1.6032} \quad R = 0.8201 \quad (4)$$

式中:  $v_d$  为爆破振动速度, cm/s;  $Q$  为单循环总耗炸药量, kg;  $r$  为监测点到爆破点的距离, m;  $R$  为拟合相关系数。

由式(4)可计算出距爆破点 21 m 处(取样位置)的爆破振动速度为 12.37 cm/s, 为与室内高静载频繁动力扰动实验相结合, 假设图 4 发射腔内冲头受气体的压力不变, 且冲头的速度等于取样处爆破振动速度, 故可利用下式推导出冲击气压的值为 0.5 MPa<sup>[21,23]</sup>:

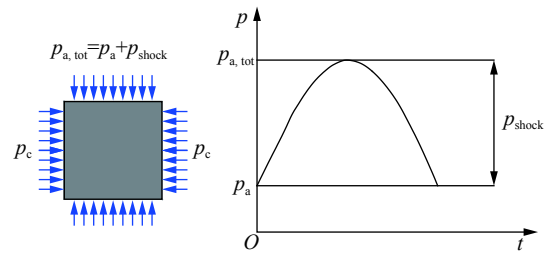


图 2 实验加载力学模型示意图

Fig. 2 Sketch map of mechanical model under test load

表 1 深部含铜蛇纹岩三轴压缩实验结果

Table 1 Test results of deep copper-bearing serpentine under triaxial constringent compression

岩样编号	围压/ MPa	围压加载速率/ (mm·s <sup>-1</sup> )	轴压加载速率/ (MPa·s <sup>-1</sup> )	三轴抗压强度/ MPa
SW1-1	5	0.03	0.05	142.87
SW1-2	10	0.03	0.05	171.90
SW1-3	15	0.03	0.05	185.36
SW1-4	20	0.03	0.05	208.04
SW1-5	25	0.03	0.05	225.76
SW1-6	30	0.03	0.05	249.02

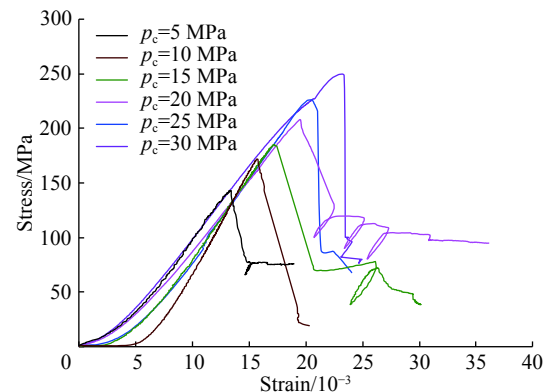


图 3 三轴压缩条件下含铜蛇纹岩的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of copper-bearing serpentine under triaxial constringent compression

$$v = \sqrt{f \cdot \frac{2S}{m} \int_0^L p dx} \quad (5)$$

式中: 发射腔截面积  $S=1.13 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ; 冲头质量  $m=1.77 \text{ kg}$ ; 发射腔长度  $L=2.46 \text{ m}$ ;  $p$  为冲击气压, MPa;  $f$  为衰减系数, 取值为 0.1。

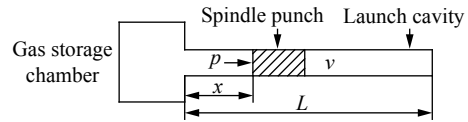


图 4 冲击气压与冲头速度关系示意图  
Fig. 4 Relational diagram of impact pressure and punch speed

### 1.4 实验结果

基于实验原理, 总结分析实验数据, 将每组岩样承受的扰动冲击次数累计值列入表 2。图 5 给出了轴压为 100 MPa, 围压分别为 15、30MPa 时的动态应力-应变曲线, 其中数字为扰动冲击序号。

表 2 高轴压和围压共同作用下频繁动态扰动实验结果

Table 2 Results of frequent dynamic disturbance test under combined action of high axial pressure and confining pressure

实验分组	岩样编号	预加围压/MPa	预加轴压/MPa	冲击气压/MPa	累计冲击次数
1	S1-1	15	100	0.5	21
	S1-2	15	120	0.5	19
	S1-3	15	140	0.5	13
	S1-4	15	160	0.5	12
2	S2-1	20	100	0.5	23
	S2-2	20	120	0.5	21
	S2-3	20	140	0.5	16
	S2-4	20	160	0.5	13
3	S3-1	25	100	0.5	26
	S3-2	25	120	0.5	22
	S3-3	25	140	0.5	18
	S3-4	25	160	0.5	15
4	S4-1	30	100	0.5	31
	S4-2	30	120	0.5	24
	S4-3	30	140	0.5	20
	S4-4	30	160	0.5	17

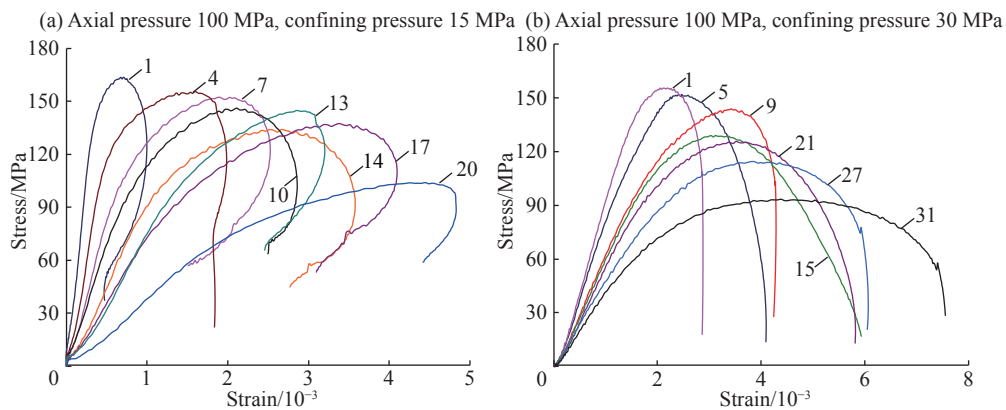


图 5 动态应力-应变曲线随冲击次数的变化规律  
Fig. 5 Change of dynamic stress-strain curves with impact times

表 2 中显示, 累计扰动冲击次数随轴压的增大而减小, 随围压的增大而增大, 说明预加载的轴压促使了岩石内部微裂纹的萌发、扩展、贯通, 降低了岩石抵抗外界冲击荷载的能力; 预加载的围压制约了岩石内部的损伤, 使岩石内部的微裂纹横向发展速度减慢, 相应提高了岩石抗冲击荷载的能力。



图5显示了动态应力-应变曲线于峰值应力前由线性向非线性变化的趋势发展。峰值应力后冲击应力卸载的阶段出现两种现象:一种是动态应变减小的回弹现象,另一种是动态应变一直增大到冲击应力卸载结束的现象。究其原因,岩石内部微裂纹压密后,冲击扰动时岩石处于弹性变形过程,造成动态应力-应变曲线的直线增长;随冲击应力的增加,岩石内部微裂纹萌发、扩展、贯通,出现了塑性变形,尤其当应力达到岩石的屈服应力时,动态应力-应变曲线进入非线性阶段;动态应变减小的回弹现象是由于岩石未发生宏观破坏时内部存储的弹性力大于卸载阶段时的扰动冲击应力;动态应变增至卸载结束是因为在扰动冲击过程中,岩石内部产生了局部破坏,内部存储的弹性能释放较多,不足以抵抗冲击应力造成的压缩强度。

图5中还显示,每次冲击过程对应的峰值应力随扰动冲击次数的增加而降低,且峰值应变滞后于峰值应力。前者说明扰动冲击诱发了岩石内部损伤,使其损伤程度加剧,后者现象的原因有二:一是冲击荷载作用时,岩样已处于高静应力状态,冲击荷载的瞬间作用造成岩样内部产生一定损伤,当其瞬间卸载后,岩样在高静应力趋势下,短时间内继续产生压缩应变;二是冲击荷载瞬间卸荷,高应变率无法瞬间降为零,岩样的压缩应变仍继续增大,造成峰值应变滞后于峰值应力。

## 2 能量种类探讨

### 2.1 基本假设

高轴压和围压共同作用下频繁冲击扰动实验过程中伴随着多种能量的转换,部分能量无法通过计算直接得出,如声能、岩样震动耗能等。为研究冲击扰动前后岩样伴随能量的变化规律,在一定假设的基础上利用能量守恒定律定量探讨,具体假设条件如下:

- (1) 预加载围压、轴压时,认为岩样处于弹性变形阶段,此时岩样可认为是完全弹性的,即应力与应变的关系服从胡克定律;
- (2) 冲击荷载作用瞬间,岩样承受的围压值近似认为不发生突变,维持初始围压不变;
- (3) 每次冲击扰动后,若围压、轴压可调整至初始值,认为岩样未完全破碎,且岩样的变形与岩样原尺寸相比很小;
- (4) 每次冲击扰动后,若围压、轴压无法加载到初始值,认为岩样完全破碎,失去抵抗外界静荷载或冲击荷载的能力;
- (5) 由于冲击扰动瞬间完成,可认为冲击过程中岩样与外界未进行热交换。

### 2.2 能量探讨

高轴压和围压共同作用下频繁冲击扰动实验中监测各种能量的转换规律难以实现,但基于一定假设基础,可对主要能量的演化规律进行推演,得出岩样内部能量转换的基本规律,如弹性能、塑性能、释放能、吸收能等。由于岩样承受多次冲击扰动,每次冲击扰动后岩样伴随的能量都产生变化,为确保能量探讨的可靠性,针对每次冲击扰动前、扰动后的能量种类进行探讨。

#### 2.2.1 冲击扰动前能量探讨

在假设(1)的基础上,每次冲击扰动前的主要能量为岩样内部存储的弹性能及冲击荷载作用时产生的冲击动能,即入射能。

(1) 弹性能。预加载围压、轴压时,岩样发生弹性变形,在假设(3)小变形条件下,此时岩样内部存储的弹性能可按产生因素分两部分进行探讨:一部分由轴压引起;另一部分由围压产生;总的弹性能则为两部分之和乘以修正系数 $K$ , $K$ 取值范围为1.05~1.15。

在假设(1)的基础上,预加轴压时岩样内部存储的弹性能为

$$U_{e,a} = \frac{1}{2} E \varepsilon^2 V \quad (6)$$

式中: $U_{e,a}$ 为岩样内部轴压产生的弹性能; $E$ 为静载作用下岩样的弹性模量; $\varepsilon$ 为岩样产生的压缩应变;

$V$  为岩样的体积。

预加载轴压时岩样变形服从胡克定律, 结合单轴压缩作用下应力、应变计算的原理, 可得:

$$E = \sigma/\varepsilon, \quad \sigma = F_1/A_s, \quad V = A_s H \tag{7}$$

式中:  $\sigma$  为压应力;  $F_1$  为冲击扰动前预加载的轴向压力;  $H$  为岩样的高度。将式(7)带入式(6), 得

$$U_{e,a} = \frac{F_1^2 H}{2EA_s} \tag{8}$$

预加围压时, 在小变形假设的基础上, 可将圆柱形岩样等效为方形岩样进行弹性能估算, 见图 6。

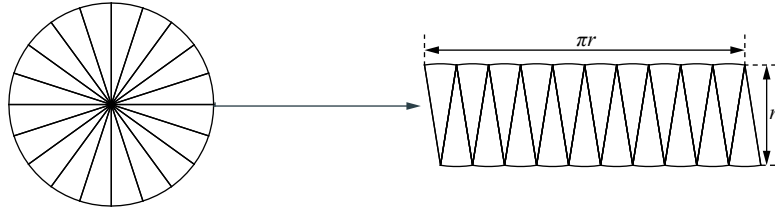


图 6 圆柱形岩样与方形岩样同体积等效示意图

Fig. 6 Same volume equivalent diagram of cylindrical rock sample and square rock sample

此时, 估算预加围压时岩样内部弹性能的增量, 只需将式(8)中岩样的高度  $H$ 、横截面积  $A_s$  分别用岩样的半径  $r$ 、侧面积的一半 ( $H\pi r/2$ ) 进行替换:

$$U_{e,c} = \frac{F_2^2}{2\pi E H} \tag{9}$$

式中:  $U_{e,c}$  为岩样内部围压引起的弹性能,  $F_2$  为冲击扰动前预加载的侧向压力。

结合式(8)~(9), 可推算预加载围压、轴压时岩石内部存储的总弹性能表达式为:

$$U_{e,pre} = K \left( \frac{F_1^2 H}{2EA_s} + \frac{F_2^2}{2\pi E} \right) \tag{10}$$

(2) 入射能。实验过程中, 纺锤型冲头冲击入射杆产生正弦应力波, 相对应的冲击动能便是入射能, 是岩样变形、破碎、岩块弹射等所需能量的主要来源, 入射能表达式为<sup>[21]</sup>

$$U_1 = \frac{Ac}{E} \int_0^\tau \sigma_1^2(t) dt \tag{11}$$

式中:  $U_1$  为入射能;  $\tau$  为应力脉冲延续的时间。

### 2.2.2 冲击扰动后能量探讨

在假设(1)~(5)的基础上, 每次冲击扰动后岩样伴随的主要能量为弹性能、塑性能, 以及冲击荷载作用时产生的反射能、透射能。

根据热力学定律, 弹性能密度  $u_e$ 、塑性能密度  $u_p$  可根据动态应力-应变曲线进行计算, 如图 7 所示, 图中  $\sigma^*$  为动态峰值应力,  $\varepsilon^*$  为动态峰值应变,  $E_d$  为动态变形模量。

(1) 弹性能。岩样完全破碎时, 在假设(4)的基础上认为伴随岩样的弹性能为零, 因此探讨岩样未完全破碎时伴随的弹性能更有意义。弹性能由围压、轴压及冲击荷载共同产生, 可分两部分进行探讨。在假设(3)的基础上, 扰动冲击后围压、轴压促使岩样内部产生的能量类似于实验前预加围压、轴压产生的弹性能, 仍可用式(10)进行计算; 冲击扰动

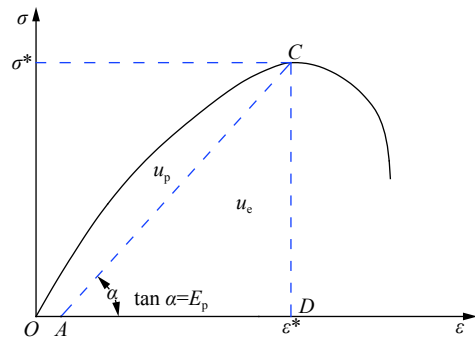


图 7 冲击伴随弹性能密度、塑性能密度计算关系图

Fig. 7 Calculation diagram of elastic energy density and plastic energy density under impact load

促使岩样产生弹性变形, 基于假设(2)~(5), 产生的弹性能为

$$U_{e,shock} = u_e \cdot V = \frac{\sigma^{*2}}{2E_d} \cdot V \quad (12)$$

(2) 塑性能。冲击应力加载阶段, 即动态应力-应变曲线峰前阶段, 岩样内部集聚弹性能, 且由于损伤加剧也消耗一定的能量, 基于假设(5), 岩样伴随的总能量密度为

$$u = u_p + u_e \quad (13)$$

由图 7, 得,

$$u = \int_0^{\varepsilon^*} \sigma d\varepsilon \quad (14)$$

将式(12)和(14)代入式(13), 得

$$u_p = \int_0^{\varepsilon^*} \sigma d\varepsilon - u_e = \int_0^{\varepsilon^*} \sigma d\varepsilon - \frac{\sigma^{*2}}{2E_d} \quad (15)$$

即冲击扰动后塑性能的计算公式为:

$$U_{p,shock} = u_p V = \left( \int_0^{\varepsilon^*} \sigma d\varepsilon - \frac{\sigma^{*2}}{2E_d} \right) V \quad (16)$$

(3) 反射能、透射能: 每次冲击扰动时, 入射应力脉冲传至岩样受冲击面, 部分应力脉冲经岩样受冲击面反射回来, 伴随的能量为反射能; 部分应力脉冲透过岩样继续传播, 伴随的能量为透射能; 二者的计算公式如下<sup>[21]</sup>:

$$U_R = \frac{Ac}{E} \int_0^{\tau} \sigma_R^2(t) dt \quad (17)$$

$$U_T = \frac{Ac}{E} \int_0^{\tau} \sigma_T^2(t) dt \quad (18)$$

式中:  $U_R$ 、 $U_T$ 分别为反射能、透射能;  $\sigma_R$ 、 $\sigma_T$ 分别为冲击过程中的反射应力、透射应力。

### 3 能量演化规律

#### 3.1 冲击伴随弹性能变化规律

冲击荷载作用时, 岩样产生弹性变形, 内部存储一定的弹性能。当预加载的围压、轴压一定时, 岩样内部存储的弹性能随扰动冲击次数的增加先增加后减小, 如图 8 所示。

由于冲击荷载作用时间极短, 岩样瞬间完成储能、释能两个阶段。冲击初始阶段, 由于岩样损伤程

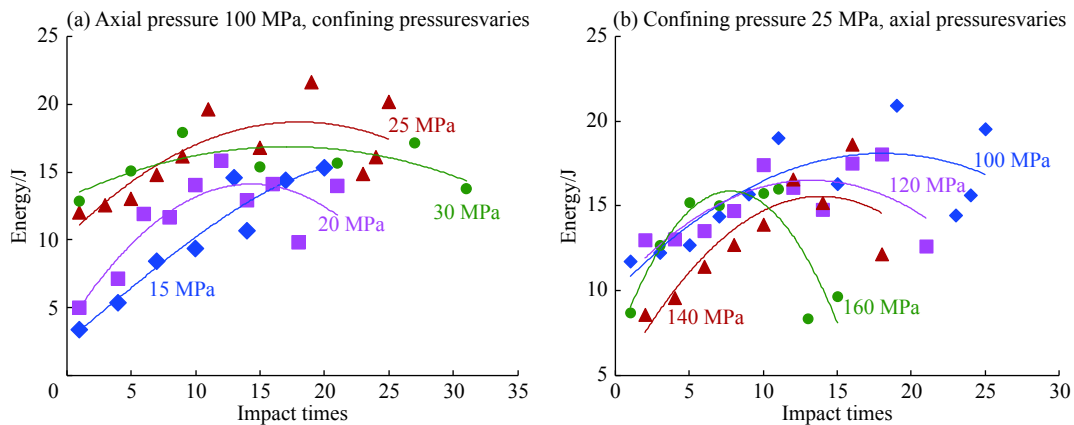


图 8 冲击伴随弹性能随扰动冲击次数的变化规律

Fig. 8 The change law of elastic energy produced by impact load with disturbance impact times

度小,抵抗冲击荷载的能力降低不明显,但此时压缩变形量增加幅度相对较大,造成岩样伴随的弹性能快速增加,说明岩样此时具有由脆性向延性转化的倾向;当冲击次数达到一定值时,岩样损伤急剧增加,内部微裂纹快速发展、贯通,此时岩样以塑性变形为主,弹性变形趋于减小的趋势发展,造成岩样内部存储的弹性能逐渐减小,说明岩样即将面临脆性破坏。

预加载的围压、轴压对冲击伴随弹性能的变化规律也有一定的影响。图 8(a)中,当冲击次数小于 7 时,弹性能随围压的增大而增大,说明围压提高了岩样抗压缩变形的能力;当冲击次数大于 7 次时,弹性能随围压的增大而变化的规律不明显,说明此时岩样内部微裂纹处于非稳定状态,围压的存在甚至有利于局部裂纹的扩展、贯通。图 8(b)中,当冲击次数大于 10 次时,弹性能随轴压的增大而降低,说明高轴压加剧了岩样内部损伤,降低其强度,减弱其储能能力;当冲击次数小于 10 次时,弹性能变化趋势基本一致,尤其是轴压为 100 和 120 MPa 时,因为此时岩样内部损伤程度较低,不同轴压下岩样内部结构特征相似。

### 3.2 冲击伴随塑性能变化规律

冲击荷载作用时,岩样产生不可恢复的变形,说明岩样内部产生了不可逆的结构变化,如裂纹的萌发,需消耗一定的能量。研究冲击扰动时岩样伴随塑性能的变化规律,可揭示岩石内部结构演化的特征。如图 9 所示,预加载围压、轴压不变时,塑性能随扰动冲击次数的增加而增大。塑性能的增大说明岩样内部微裂纹的萌发数量增多,扩展程度提高,进一步说明频繁的冲击诱发岩石损伤加剧,降低了岩石抵抗外界荷载的能力。

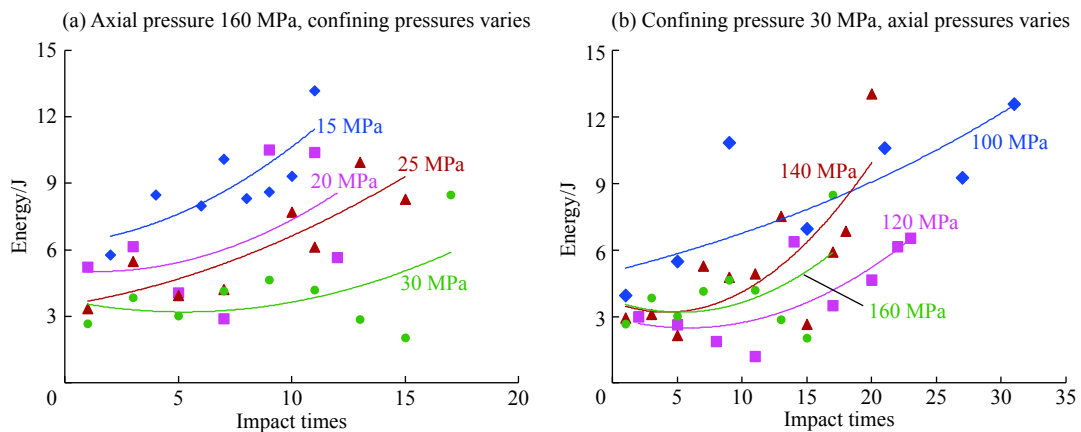


图 9 冲击伴随塑性能随扰动冲击次数的变化规律

Fig. 9 The change law of plastic energy produced by impact load with disturbance impact times

围压的存在局限了岩石内部微裂纹的横向发展,可提高岩石抗冲击的能力,体现在塑性能的大小上,则随围压的增大,岩样用于裂纹萌发、扩展等消耗的能量(塑性能)减小,如图 9(a)所示。

当轴压相对较低时,岩样内原有微裂纹或由于预加载围压萌发的微裂纹未充分闭合,冲击荷载作用时该部分裂纹继续闭合,消耗的能量较多;随轴压的增大岩样闭合越充分,微裂纹闭合消耗的能量相应减小;微裂纹完全闭合后,继续增加轴压,此时岩样内部产生损伤,冲击荷载诱发新微裂纹萌发、扩展,且速度逐渐增大,此时消耗的能量逐渐增多。体现在塑性能的变化规律上如图 9(b)所示,总体上随轴压的增大先减小后增大。

### 3.3 入射能、反射能与透射能

入射能、透射能、反射能是高轴压和围压共同作用下频繁冲击扰动实验中伴随的三种主要能量。入射能越大则作用于岩样上的冲击应力就越大,透射能越大说明岩样致密性、均质性越好,反射能越大说明岩样内部损伤越严重。分析实验过程中入射能、透射能、反射能的变化规律,可间接反应岩石内部结构的变化,但由于预加载高轴压与围压使岩样内部存储了一定的能量,同时冲击过程中还伴随着其他



能量的转换,都影响着入射能、透射能、反射能的变化规律。为消除岩石内部存储能量对入射能、透射能、反射能造成的影响,取反射能、透射能与入射能的比值进行分析,仍可体现冲击过程中岩石内部特征的变化情况。

图 10 显示,当预加载轴压、围压一定时,反射能与入射能的比值随扰动冲击次数的增加呈增大的趋势发展,说明冲击扰动过程中从岩样端面反射回来的应力波能量逐渐增大,间接说明岩样内部损伤加剧,即岩样内部的破裂裂纹数增多,裂纹间的间隙也增大,造成应力波透过岩样传播的阻力增大,同时岩样受冲击端面上衍生的破裂裂纹数也增多,不规则的裂纹面也增大了应力波反射的面积,最终造成反射能与入射能的比值增大。

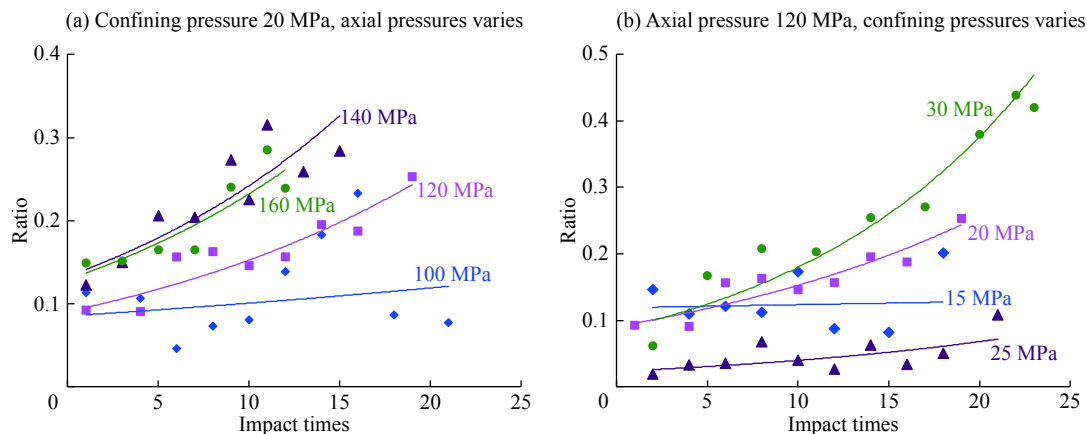


图 10 反射能与入射能比值随扰动冲击次数的变化规律

Fig. 10 Change law of the ratio of reflection to incident energy with disturbance impact times

图 10(a) 中,当预加载围压、扰动冲击次数一定时,反射能与入射能的比值随轴压的增大总体上呈增大的趋势发展,如冲击次数为第 10 次时,轴压为 100、120、140、160 MPa 对应的比值分别为 0.081、0.146、0.225、0.262,说明预加载的高轴压促使岩样内部产生损伤,且轴压越大损伤越严重,甚至产生宏观破坏的倾向。

图 10(b) 中,当预加载的轴压与扰动冲击次数一定时,当冲击次数较少时,反射能与入射能的比值随围压的增大呈减小的趋势发展,如图中冲击次数小于 5 时;当扰动冲击次数较大时,反射能与入射能的比值随围压的增大呈增大的趋势发展,如图中冲击次数大于 5 时;围压的存在限制了岩样内部微裂纹的横向扩展,提高了岩样的致密性,当冲击次数较少时,随围压的增大岩样的致密性提高,造成反射能与入射能的比值减小;随扰动冲击次数的增加,岩样内部损伤逐渐加剧,在动态扰动诱导下围压的存在反而促进了岩样内部损伤的加剧,加速了岩样的破坏,因此反射能与入射能的比值随围压的增大而增大。

图 11 中显示,当预加载的轴压、围压一定时,透射能与入射能的比值随扰动冲击次数的增加呈减小的趋势发展。其原因是扰动冲击次数的增加,岩样内部新旧裂纹的数目增多,且裂纹间隙逐渐增大,导致应力波在不规则的裂隙面上多次反射,最终导致透过岩样传播的应力波总能量减小。

图 11(a) 中可见预加载的围压、扰动冲击次数一定时,透射能与入射能的比值总体上随轴压的增大而减小,但也存在轴压较小时比值较大的现象。比值随轴压增大而减小的原因是预加载的轴压为高轴压,接近岩样的三轴抗压强度,当其增大时,岩样破坏的倾向就越明显,内部裂隙也就越多,导致应力波传播的阻力增大;轴压较小时比值较大的偶然现象的主要原因是冲击过程中预加载的轴压或围压产生了卸压现象,释放的部分能量转换成了透射能。

图 11(b) 中可见预加载的轴压、扰动冲击次数一定时,冲击次数小于 5 时,透射能与入射能的比值随围压的增大呈增大的现象,是由于围压提高了岩样的致密性,尤其是岩样横向的致密性;当冲击次数大于 5 时,比值随围压的增大呈减小的趋势发展,且规律性明显,其原因是多次冲击造成岩石内部损伤

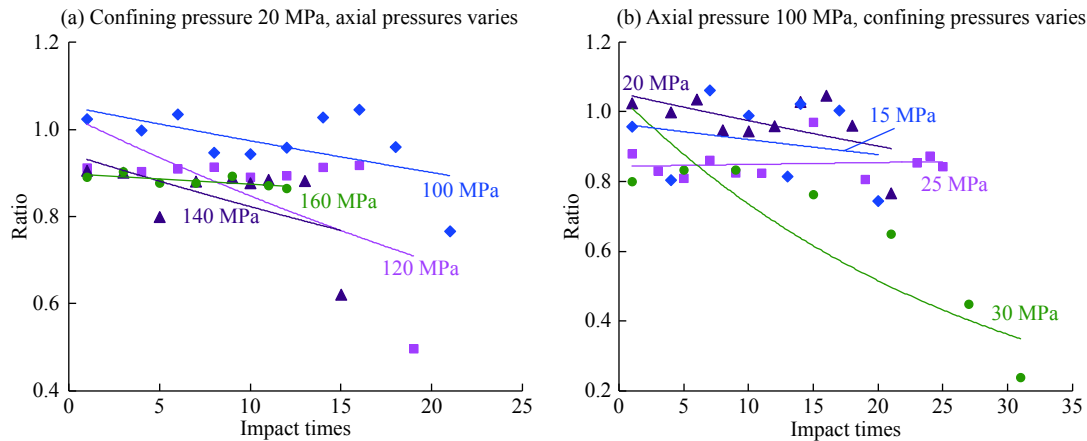


图 11 透射能与入射能比值随扰动冲击次数的变化规律

Fig. 11 Change law of the ratio of transmission to incident energy with disturbance impact times

加剧,甚至达到了临界破坏的状态,围压的存在则加速了岩样破坏的趋势,围压值越高冲击扰动过程中岩样破坏的几率就越大,体现在透射能的总量就越小。

### 3.4 岩样单位体积吸(释)能

高轴压和围压共同作用下频繁冲击扰动时,轴压、围压、扰动冲击次数以及岩样内部特征等都是影响岩样内部能量变化规律的因素。借助实验过程中外部能量的变化,可间接推演岩样内部能量的转换规律,即考虑入射能与反射能、透射能的差值便可推演岩样是吸收能量还是释放能量,若差值为正岩样吸收能量,反之释放能量。利用式(19)可计算岩样单位体积吸/释能,研究其随围压、轴压、扰动冲击次数的变化规律,可推测岩样内部结构特征的演化。

$$U_{ab} = \frac{U_i - U_R - U_T}{V_s} \quad (19)$$

式中:  $U_{ab}$  为岩石单位体积吸能,  $U_{ab} < 0$  为释放能量;  $V_s$  为岩样的体积。

图 12 中显示,当预加载的围压、轴压一定时,岩样单位体积吸(释)能随扰动冲击次数的增加呈先减小后增大的下凸曲线趋势变化。初始几次冲击阶段,岩石由吸收能向释放能转变,尤其是预加轴压为 100 MPa 时较明显,原因是开始几次冲击时岩样内部结构较稳定,吸收一定能量用于岩样内部微裂纹的闭合;当冲击次数达到一定值时,岩样呈释放能量的状态,且释放的能量先增大后减小,其是由于该阶段岩样内部损伤加剧,岩样内部存储的能量主要转换为裂纹扩展所需的能量,由于裂纹扩展的速度随扰动

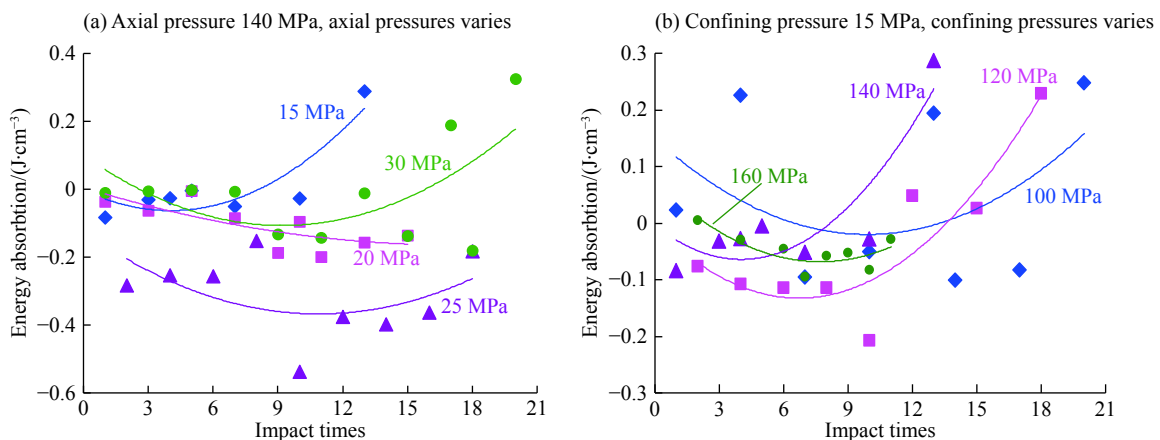


图 12 单位体积吸(释)能随扰动冲击次数的变化规律

Fig. 12 Change law of unit volume absorption (release) energy with disturbance impact times

冲击次数的增加经历“慢-快-慢-临界状态”四个阶段, 最终导致岩样内部可释放的能量先增大后减小; 岩样破坏前的几次冲击呈吸收能量的状态, 且吸收的能量骤然增大, 其原因是岩样破坏的过程中伴随声能、热能、破碎能等, 该部分能量便是由岩样吸收的能量转化而来。

为研究岩石单位体积吸(释)能受围压、轴压的影响, 取每块岩样冲击过程中单位体积吸(释)能的均值进行分析, 其变化规律见图 13。

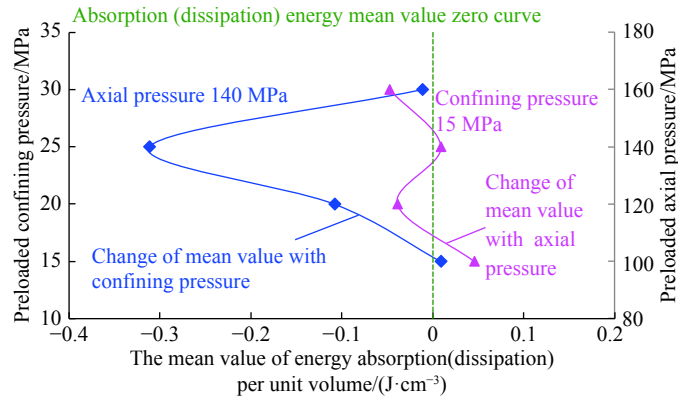


图 13 单位体积吸(释)能均值随预加围压或轴压的变化规律

Fig. 13 Change laws of the mean value of energy absorption (dissipation) per unit volume with preload confining pressure or axial pressure

图中显示岩样单位体积吸(释)能随围压的增大先减小后增大, 且围压较小时呈吸收能状态, 说明围压较小时可增强岩样的储能能力, 但围压增大到一定区间则会促使岩样产生损伤, 降低其储能能力; 随轴压的增大, 岩样单位体积吸(释)能呈减小的趋势发展, 说明轴压是岩样发生破坏的主导因素, 轴压越大岩样破坏的倾向就越强。

#### 4 工程应用探讨

深部岩体工程开挖时, 内部能量突然释放可能导致岩爆产生, 其宗旨是能量的释放。由于地应力的存在, 岩体内便产生一定的弹性能, 研究冲击扰动时岩样内部弹性能随扰动冲击次数的变化规律, 可揭示岩体受爆破扰动时产生弹性能的变化规律, 将二者结合起来便可预测第几次爆破时岩爆可能发生, 为岩爆预防提供理论参考。

为将研究成果应用到工程实践中, 首先探讨含铜蛇纹岩与一般均质岩石动力学特征及能量演化规律的异同点。含铜蛇纹岩与一般均质的蛇纹岩相比, 能承受的扰动冲击次数随预加轴压的变化趋势无明显差别, 实验中伴随弹性能、塑性能等随冲击扰动次数增加而变化的规律也无明显差别。不同之处在于二者的脆性、抵抗外界的能力方面, 含铜岩石的脆性弱于一般均质岩石, 同一条件下能承受的扰动冲击次数、存储的弹性能等都高于一般均质岩石。

冲击扰动时伴随的塑性能、反射能、透射能等随扰动冲击次数的变化规律, 可揭示岩样内部的损伤程度, 也可反映岩体中裂隙、裂纹等的发育程度。监测爆破扰动时产生的冲击应力波的能量, 结合爆破的次数和塑性能、反射能、透射能等随爆破次数的变化规律, 便可推测岩体的损伤程度, 为分析岩体的整体稳定性提供理论参考, 以便服务于爆破采矿、围岩支护、采空区稳定性控制等。岩石处于高静应力条件下, 内部存储一定的弹性能, 若该能量超出岩样储能极限, 瞬间进行释放便产生岩爆; 若储能位于岩样储能极限之下, 则需冲击扰动诱导, 才可能发生岩爆。因此, 可采用岩样内存储的弹性能为指标预测岩爆的发生, 计算公式如下:

$$U_{e,pre} + U_{e,shock} \geq U_{e,lim} \quad (20)$$

式中:  $U_{e,pre}$  为预加载围压、轴压时岩石内部存储的总弹性能;  $U_{e,shock}$  为冲击荷载作用产生的弹性能;  $U_{e,lim}$  为岩样能存储的临界弹性能。

## 5 结 论

基于高轴压和围压共同作用下频繁冲击扰动实验结果,分析了含铜量近似一致的蛇纹岩的力学特征及能量演化规律,得出如下结论:

(1) 岩样承受的扰动冲击次数随轴压的增大而减小,随围压的增大而增大,且每次冲击时对应的峰值应力随扰动冲击次数的增大而减小;

(2) 随扰动冲击次数的增加,岩样伴随的弹性能总体上呈先增大后趋于减小的趋势发展,塑性能、反射能与入射能比值呈增大的规律变化,透射能与入射能比值则呈减小的规律变化;

(3) 预加载的围压、轴压一定时,岩样单位体积吸(释)能随扰动冲击次数的增加呈先减小后增大的趋势发展,其均值随围压的增大也呈先减小后增大的规律变化,但随轴压的增大呈减小趋势发展。

## 参考文献:

- [1] 尤业超,李二兵,谭跃虎,等.基于能量耗散原理的盐岩动力特性及破坏特征分析[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(4): 843-851. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0503.  
YOU Yechao, LI Erbing, TAN Yuehu, et al. Analysis on dynamic properties and failure characteristics of salt rock based on energy dissipation principle [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(4): 843-851. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0503.
- [2] 张忠虎,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. DOI: 10.15961/j.jsuese.2008.018.  
ZHANG Zhonghu, XIE Heping. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science)*, 2008, 40(2): 26-31. DOI: 10.15961/j.jsuese.2008.018.
- [3] Liu X H, Dai F, Zhang R, et al. Static and dynamic uniaxial compression tests on coal rock considering the bedding directivity [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(10): 5933-5949. DOI: 10.1007/s12665-015-4106-3.
- [4] 李明,茅献彪.冲击荷载作用下砂岩破坏及能量耗散率效应的数值模拟研究[J].*爆破*,2014,31(2): 78-83. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2014.02.017.  
LI Ming, MAO Xianbiao. Numerical simulation studies on strain rate effect of sandstone's energy dissipation and destruction under impulse loading [J]. *Blasting*, 2014, 31(2): 78-83. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2014.02.017.
- [5] 于水生,卢玉斌,朱万成,等.SHPB试验中花岗岩破坏程度与能量耗散关系分析[J].*东北大学学报(自然科学版)*,2015,36(12): 1733-1737. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3026.2015.12.014.  
YU Shuisheng, LU Yubin, ZHU Wancheng, et al. Analysis on relationship between degree of damage and energy dissipation of granite in SHPB tests [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36(12): 1733-1737. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3026.2015.12.014.
- [6] JU Yang, WANG Huijie, YANG Yongming, et al. Numerical simulation of mechanisms of deformation, failure and energy dissipation in porous rock media subjected to wave stresses [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2010, 53(4): 1098-1113. DOI: 10.1007/s11431-010-0126-0.
- [7] 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. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2011.12.012.  
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. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2011.12.012.
- [8] 叶洲元,李夕兵,万国香,等.受三维静载压缩岩石对冲击能的吸收效应[J].*爆炸与冲击*,2009,29(4): 419-424. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0419-06.  
YE Zhouyuan, LI Xibing, WAN Guoxiang, et al. Impact energy-absorption property of rock under tri-axial compression [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 419-424. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0419-06.

- [9] 许金余, 刘石. SHPB 试验中高温下岩石变形破坏过程的能耗规律分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(s2): 3109–3115.  
XU Jin-yu, LIU Shi. Analysis of energy dissipation rule during deformation and fracture process of rock under high temperatures in SHPB test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(s2): 3109–3115.
- [10] 徐小丽, 高峰, 周清, 等. 高温后岩石变形破坏过程的能量分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(1): 104–107. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2011.01.023.  
XU Xiaoli, GAO Feng, ZHOU Qing, et al. Energy analysis of rock deformation and failure process after high temperature [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(1): 104–107. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2011.01.023.
- [11] 尹土兵, 李夕兵, 叶洲元, 等. 温-压耦合及动力扰动下岩石破碎的能量耗散 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1197–1202.  
YIN Tubing, LI Xibing, YE Zhouyuan, et al. Energy dissipation of rock fracture under thermo-mechanical coupling and dynamic disturbances [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1197–1202.
- [12] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 动静组合加载下岩石破坏的应变能密度准则及突变理论分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2814–2824. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.16.002.  
LI Xibing, ZUO Yujun, MA Chunde. Failure criterion of strain energy density and catastrophe theory analysis of rock subjected to static-dynamic coupling loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2814–2824. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.16.002.
- [13] 金解放, 李夕兵, 殷志强, 等. 轴压和围压对循环冲击下砂岩能量耗散的影响 [J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3096–3102. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.11.007.  
JIN Jiefang, LI Xibing, YIN Zhiqiang, et al. Effects of axial compression and confining pressure on energy dissipation of sandstone under cyclic impact loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3096–3102. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.11.007.
- [14] 赵伏军, 王宏宇, 彭云, 等. 动静组合载荷破岩声发射能量与破岩效果试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1363–1368. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.07.008.  
ZHAO Fujun, WANG Hongyu, PENG Yun, et al. Experimental research on acoustic emission energy and rock crushing effect under static-dynamic coupling loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1363–1368. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.07.008.
- [15] 刘少虹, 毛德兵, 齐庆新, 等. 动静加载下组合煤岩的应力波传播机制与能量耗散 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1): 15–11. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0411.  
LIU Shaohong, MAO Debing, QI Qingxin, et al. Under static loading stress wave propagation mechanism and energy dissipation in compound coal-rock [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 15–11. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0411.
- [16] 王文, 李化敏, 顾合龙, 等. 动静组合加载含水煤样能量耗散特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3965–3971. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0546.  
WANG Wen, LI Huamin, GU Helong, et al. Feature analysis of energy dissipation of water-saturated coal samples under coupled static-dynamic loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3965–3971. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0546.
- [17] LI X, ZHOU Z, ZHAO Y. Approach to minimize scattering of results for split Hopkinson pressure bar test [J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(3): 404–407. DOI: 10.1007/s11771-007-0079-z.
- [18] 李夕兵, 周子龙, 王卫华. 运用有限元和神经网络为 SHPB 装置构造理想冲头 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4215–4218. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.23.003.  
LI Xibing, ZHOU Zilong, WANG Weihua. Construction of ideal striker for SHPB device based on FEM and neural network [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4215–4218. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.23.003.
- [19] 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. DOI: 10.1016/j.ijrmm.2007.08.013.
- [20] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1178–1190.



GONG Fengqiang, LI Xibing, LIU Xiling. Preliminary experimental study of characteristics of rock subjected to 3D coupled static and dynamic loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1178–1190.

[21] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 16–20.

[22] 武建力. 冬瓜山铜矿频繁爆破开采围岩变形与破坏机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014: 31–42.

[23] 单仁亮. 岩石冲击破坏力学模型及其随机性研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 1997: 67–78.

## Energy evolution law of copper-bearing serpentine received frequent impact under common action of high axial compression and confining pressure

WANG Chun<sup>1,2,3</sup>, CHENG Luping<sup>1</sup>, TANG Lizhong<sup>2</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, WEI Yongheng<sup>2</sup>

(1. *School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;*

2. *School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;*

3. *The Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production of Henan, Jiaozuo 454000, Henan, China*)

**Abstract:** Under the common action of high axial stress and confining pressure, the main types of energy were discussed in the study of frequent dynamic disturbance firstly. At the same time, the formula for calculating elastic energy, plastic energy are deduced before and after the impact disturbance. In order to conduct dynamic test, the horizontal stress, the vertical stress, the influence of blasting excavation disturbance of the deep rock mass were simulated by pre-confining pressure, pre-high axial stress, 0.5 MPa impact pressure, respectively. Based on the experimental results, the dynamic characteristics and energy evolution of the copper serpentine were analyzed. The results show that the cumulative disturbance impact times of copper snake-like rock decrease with the increase of axial pressure, while they increase with the increasing confining pressure, and the dynamic peak stress decreases with the increasing number of disturbances. As the number of disturbances increases, the elastic energy in the rock sample increases first and then decreases, the plastic energy shows a trend of increase, and the ratio of the reflection energy to the incident energy increases while the ratio of the transmission energy to incident energy decreases. The unit volume absorption (release) energy shows the trend of the lower convex curve with the number of disturbances increases. In addition, the averages of unit volume absorption (release) energy decreases first and then increases with the increasing confining pressure, but decreases with the increase of axial pressure.

**Keywords:** high axial compression; confining pressure; frequent impact; elastic energy; plastic energy

(责任编辑 王小飞)