

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.260

不同加载速率下煤岩组合体碎块分形特征与 能量传递机制

陈光波^{1,2}, 滕鹏程¹, 张国华³, 杨磊⁴, 李谭^{1,2}, 吕鹏飞¹

(1. 内蒙古科技大学矿业研究院, 内蒙古包头 014010; 2. 山东科技大学能源与矿业工程学院, 山东青岛 266590;
3. 黑龙江科技大学, 哈尔滨 150022; 4. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013)

摘要:为了研究不同加载速率下煤岩组合体破坏碎块的分布、分形特征以及失稳破坏机制,对细砂岩-煤(FC)、粗砂岩-煤(GC)、细砂岩-煤-粗砂岩(FCG)3种煤岩组合体开展0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1 mm/s加载速率下的单轴压缩试验,结果表明:1)0.001 mm/s速率下破坏煤块粒径较小,为完全充分破坏,破坏类型属于塑性破坏。0.1 mm/s加载速率下,试件破坏碎块粒径最大,形状不规则,为不完全不充分破坏,破坏类型属于脆性破坏。加载速率对试件破坏的影响主要表现在:裂隙发育程度、破坏块体粒径、破坏块体数目、能量释放速度、破坏形式、失稳机制。2)试件碎块具有明显的分类特征。随着加载速率增大,4.75~<10 mm、10~<20 mm两种粒径等级的碎块数量逐渐减少,试件的破碎程度减小;3种试件的长/厚值随着碎块粒径的减小呈现先增加后减小的趋势;对于相同粒径等级内的碎块,其长/厚值随加载速率增大而增大,增大加载速率会促进薄形态碎块生成。3)5种加载速率下,FC、GC、FCG组合体的粒度-数量分形维数分别在1.53~0.55、1.27~0.26、1.45~0.46之间,粒度-数量分形维数随着加载速率增大而减小,加载速率越大,分形维数越小;FC、GC、FCG组合体粒度-质量分形维数分别在2.35~1.48、2.36~1.34、2.34~1.58之间,粒度-质量分形维数均随加载速率增大而减小。4)针对煤岩组合体破坏形态,分析了组合体破坏过程的能量传递机制。组合体不断受载,煤组分最先发生破坏,释放的能量直接传递给岩石组分,若达到岩石组分的储能极限,则导致岩石组分发生破坏。煤岩组合体破坏过程的能量传递机制较好地揭示了岩石组分破坏的滞后现象。

关键词:煤岩组合体;加载速率;碎块;分形;能量;试验研究

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)08-115-15

Fractal characteristics and energy transfer mechanism of coal-rock combined body fragments under different loading rates

CHEN Guangbo^{1,2}, TENG Pengcheng¹, ZHANG Guohua³, YANG Lei⁴, LI Tan^{1,2}, LYU Pengfei¹

(1. Mining Research Institute, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, P. R. China; 2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University

收稿日期:2020-01-18 网络出版日期:2021-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助(51774122);内蒙古自治区自然科学基金资助(2020BS05007);内蒙古科技大学创新基金资助(2019QDL-B33)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51774122), Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region of China (2020BS05007) and Inner Mongolia University of Science and Technology Innovation Fund(2019QDL-B33).

作者简介:陈光波(1990—),男,讲师,博士,硕士生导师,主要从事于岩石力学与工程方面的教学与研究工作,(E-mail) cgb150617@126.com。

of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, P. R. China; 3. Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, P. R. China; 4. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, P. R. China)

Abstract: In order to study the distribution, fractal characteristics and instability failure mechanism of coal-rock assemblages under different loading rates, uniaxial compression tests of fine sandstone-coal (FC), coarse sandstone-coal (GC) and fine sandstone-coal-coarse sandstone (FCG) were carried out under 0.001 mm/s, 0.005 mm/s, 0.01 mm/s, 0.05 mm/s and 0.1 mm/s loading rates. The results show that: 1) at the 0.001 mm/s rate, the particle size of the broken coal is small, which is a complete and full failure, and the failure type belongs to plastic failure. Under 0.1 mm/s loading rate, the size of the failure fragment is the largest and the shape is irregular, which is an incomplete and inadequate failure, and the failure type belongs to brittle failure. The influence of loading rate on the failure of specimens is mainly shown in the degree of fracture development, the particle size of failure blocks, the number of failure blocks, the rate of energy release, the form of failure and the mechanism of instability. 2) The sample fragments have obvious classification characteristics. With the increase of loading rate, the number of fragments from 4.75 mm to less than 10 mm and 10 mm to less than 20 mm decreases gradually, and the fragmentation degree of specimens decreases, and the length to thickness ratio of three kinds of specimens increase at first and then decrease with the decrease of fragment size. For the fragments with the same particle size, the length to thickness ratio increases with the increase of loading rate. Increasing the loading rate will promote the number of thin-shaped fragments. 3) At the five loading rates, the particle size-quantity fractal dimensions of FC, GC and FCG composites are from 1.53 to 0.55, 1.27 to 0.26, and 1.45 to 0.46, respectively. The granularity-quantity fractal dimension decreases with the increase of loading rate, and the higher the loading rate is, the smaller the fractal dimension is. The particle size-mass fractal dimensions of FC, GC and FCG composites are from 2.35 to 1.48, 2.36 to 1.34, and 2.34 to 1.58, respectively, and the particle size-mass fractal dimensions decrease with the increase of loading rate. 4) According to the failure form of coal-rock assembly, the energy transfer mechanism of the failure process is analyzed. With the continuous loading of the assembly, the coal component is the first to be destroyed, and the released energy is directly transferred to the rock component. If it reaches the energy storage limit of the rock component, it will lead to the failure of the rock component. The energy transfer mechanism in the failure process of coal-rock assemblage reveals the lag phenomenon of rock component failure.

Keywords: coal-rock combined body; loading rate; fragment; fractal; energy; experimental research

冲击地压是煤矿最为常见的煤岩动力灾害^[1-3]。冲击地压发生时,在大量弹性能的驱使下煤岩发生剧烈破坏,抛向采掘空间,造成巷道毁坏、设备损坏、人员伤亡。除此以外,冲击地压还容易造成煤尘爆炸、瓦斯爆炸、矿井水害等一系列的连锁事故。因此,冲击地压严重影响着煤矿安全生产和人员生命安全^[4,5]。尤其近年来,随着煤矿开采深度的加深和开采广度的加大,在“三高一扰动”的影响下,冲击地压的频次和烈度更是显著增加^[6]。研究深部开采条件下煤岩动力破碎特征对于研究冲击地压的发生机理和预测防治具有参考价值。

许多专家以冲击地压为背景,对煤岩体分形特征开展了大量的研究工作。文献[7-9]将分形理论引入到岩石破坏分析中,主要研究了岩石断口形貌分形特征、断裂和岩爆分形特征及岩石损伤与能量耗散之间的关系。文献[10-12]利用分形理论,通过运用自主研发的冲击岩爆试验系统,获得岩爆碎屑的分形特征;高保彬等^[13]研究了砂岩、泥岩在单轴压缩下声发射序列的分形特征;郭海峰等^[14]对冲击倾向性煤进行了单轴压缩试验,对煤样破坏过程中不同损伤程度分形维数进行了研究;夏元友等^[15]通过自主研发的岩爆模拟试验装

置,研究了不同加卸载路径下大尺寸试件岩爆碎屑的质量和形状分布特征,探讨试件发生岩爆的烈度与碎屑分形维数的关系;许金余等^[16]应用分形几何的方法对冲击加载试验中大理岩破碎块度分布进行统计分析;周盛涛等^[17]研究了冻融岩石单轴压缩破坏断口形貌分形特征及其与宏观力学参数之间的关联性;李守巨等^[18]基于分形几何理论,采用计盒维数方法计算单轴压缩试验不同荷载条件下的岩石破坏分形维数,建立了分形维数与顶部位移之间的非线性演化模型;周翠英等^[19]通过分形盒维数表征岩样外表面裂纹的变化情况,发现岩样破坏越严重,裂纹分形维数越高;刘享华等^[20]对不同裂隙倾角的裂隙砂岩试件进行单轴压缩试验,基于分形理论定量描述了碎屑尺度分布的分形特征,初步探究了能量耗散与破碎分形维数之间的力学机制;丁鑫等^[21]运用筛分统计方法获得煤体碎块分形特征,探寻煤体强度离散性与分形特征的内在联系,建立分形维数与声发射能量关系数学关系;李杨杨等^[22]研究了单轴循环加卸载下煤样碎块分形特征。

目前,煤岩介质的破坏分形研究多集中于煤或者岩石方面,而关于煤岩组合体破坏的分形研究则鲜有报道。地下工程实际中,冲击地压的发生是煤岩共同作用的结果,单纯研究煤或岩石有失全面性。据此,自主构建了细砂岩-煤(FC)、粗砂岩-煤(GC)、细砂岩-煤-粗砂岩(FCG)3种煤岩组合体,对其开展 0.001,0.005,0.01,0.05,0.1 mm/s 加载速率下的单轴压缩试验,研究不同加载速率下煤岩组合体破坏碎块的分类、数量、质量和尺寸分布特征以及粒度-数量、粒度-质量分形特征,深入研究煤岩组合体破坏过程的能量传递机制,以期研究冲击地压发生机理和预测防治提供参考。

1 煤岩组合体单轴压缩试验

试验所需试样均取自于黑龙江龙煤矿业集团某煤矿 17 层煤及顶、底板中粗砂岩和细砂岩。煤的抗压强度 13.50 MPa,粗砂岩抗压强度 51.15 MPa,细砂岩抗压强度 112.12 MPa,3 种岩石分别为软岩、中硬岩、硬岩的代表。根据煤矿煤层厚度与顶底板厚度比例情况,设置试验中煤岩比例为 1:1,其中,二元试件比例为 1:1,三元试件比例 1:2:1,组合模型如图 1 所示。组合试件种类分为细砂岩-煤(FC)、粗砂岩-煤(GC)、细砂岩-煤-粗砂岩(FCG)3 种,试样须符合下述 4 点制作要求,试件经取芯机取芯、切割机截取、磨石机打磨,获得符合要求的组合试件。3 种典型的组合试件如图 2 所示。

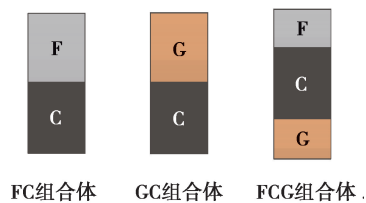


图 1 组合模型示意图

Fig. 1 The schematic diagram of combined model

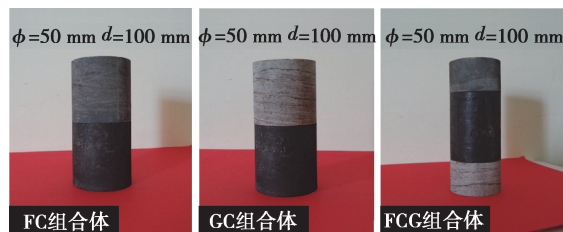


图 2 典型的煤岩组合试件

Fig. 2 The pictures of typical coal-rock combined body

组合试件试验要求:

1) 为保证组合试件中细砂岩、粗砂岩、煤具有同源性,3 种试件中的相同组分均需取自同一大块岩体(煤体),这就保证了试件各组分的赋存环境,力学性质一致。

2) 组合试件尺寸为标准尺寸: $\phi=50\text{ mm}$ 、 $d=100\text{ mm}$ 。

3)为尽可能保持工程实际原始叠加互层状态,组分间直接接触,不使用黏合剂,避免黏合剂的用量、黏合作用对组合体性质产生影响。

4)为降低试验误差,每种试件加工 3 个,对其做单轴压缩试验,各参数数据取平均值。

试验采用 TAW-2 000 kN 微机控制电液伺服岩石试验机,对 3 种组合体进行 0.001,0.005,0.01,0.05,0.1 mm/s 5 种加载速率下的单轴压缩试验,获得试件压缩破坏后的碎块。

试验以黑龙江龙煤矿业集团某煤矿为工程背景,试样也取自于该煤矿,并且依据该煤矿设置了煤岩组合模型,试验地点在黑龙江科技大学黑龙江省煤矿深部开采地压控制与瓦斯治理重点实验室进行,试验按照《煤和岩石物理力学性质测定方法》规定执行,试验契合工程实际情况,合理性较好。

2 组合体破坏形态分析

组合体在不同加载速率下的典型的破坏形态如图 3 所示。由图 3 可知,从破坏碎块粒径来看,0.001 mm/s速率下破坏煤块粒径较小,出现了较多煤粉,煤粉和粒径较小的煤块比重较大。究其原因,低加载速率下煤组分有充足的时间来萌生更多的裂纹、裂隙,裂纹、裂隙的扩展和贯通更加充分。在试验机的作用下,破裂界面之间相互摩擦,产生较多矿物颗粒,因此,低加载速率下的破坏属于完全充分破坏,破坏类型属于塑性破坏。随着加载速率的增加,煤组分中的较多裂纹、裂隙来不及扩展和贯通,试件裂纹裂隙发展不充分,破坏面积逐渐减小,逐渐由塑性破坏转变为脆性破坏。0.1 mm/s 加载速率下,试件破坏碎块粒径最大,形状不规则,粒径较小的煤块比重较小。试件在高加载速率下,裂纹、裂隙萌生数量较少,扩展和贯通不完全,主要沿着煤中已有裂纹迅速扩展贯通,从而出现局部破坏,继而引发整体失稳。从破坏形态来看,为不完全不充分破坏,破坏形式属于脆性破坏。



图 3 组合体在不同的加载速率下典型的破坏形态

Fig. 3 The typical failure modes of combined body under different loading rates

由以上分析可知,加载速率对试件的破坏形态和破坏机制产生较大影响。低加载速率下,试件完全破坏,裂纹、裂隙发育充分,试件峰值前积聚的能量,大多以裂纹、裂隙的贯通、发展以及薄弱结构面摩擦的形式缓慢耗散,破坏形式属于塑性破坏。高加载速率下,试件破坏不完全,裂纹、裂隙发展贯通较少,发育不完全,试件破坏主要是由局部破坏引发整体失稳,峰前积聚能量主要以冲击方式快速释放,高加载速率下试件的破坏形式属于脆性破坏。加载速率对试件破坏的影响主要表现在 6 个方面:裂隙发育程度、破坏块体粒径、破坏块体数目、能量释放速度、破坏形式、失稳形式,如表 1 所示。

表 1 加载速率对试件破坏的影响

Table 1 Influence of loading rates on failure of specimens

参数	低加载速率	高加载速率
裂隙发育程度	完全充分发育	不完全不充分发育
破坏块体粒径	块体粒径小,有较多煤粉出现	块体粒径大,有少量煤粉出现
破坏块体数目	数目多	数目少
能量释放速度	缓慢	迅速
破坏形式	塑性破坏	脆性破坏
失稳形式	大面积破坏	局部关键破坏引发整体失稳

3 组合体破坏碎块的分布特征

对大于 4.75 mm 的较大碎块采用游标卡尺测量其尺寸(长度、宽度、厚度,试验中的均采用其最大值),对小于 4.75 mm 的较小碎块采用不同孔径的筛子筛分出不同粒径的碎块,并采用高精度电子秤对不同粒径的块体进行称重。试验所用器材如图 4 所示。不同等级对应的粒径和测量方法如表 2 所示。

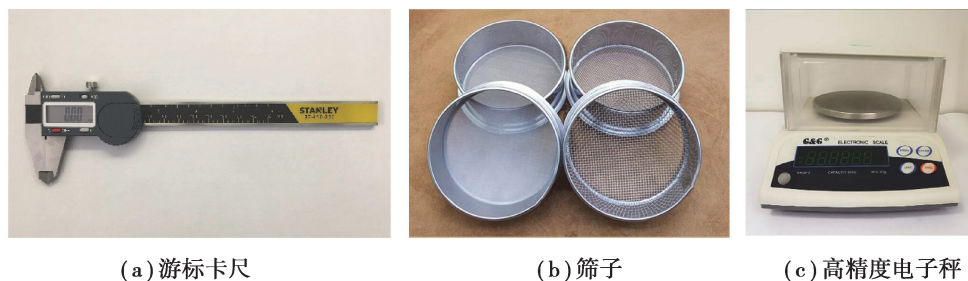


图 4 试验器材

Fig. 4 The experimental equipment

表 2 块体等级与测量方法

Table 2 Block grade and measurement method

编号	等级	粒径范围/mm	测量与称重方法	试验目的
1	大碎块	≥ 50		
2	较大碎块	$30 \sim < 50$		
3	中等碎块	$20 \sim < 30$	1)用游标卡尺测量尺寸; 2)用高精度电子秤称碎块重量	碎块个数 尺寸特征 质量分布
4	较小碎块	$10 \sim < 20$		
5	小碎块	$4.75 \sim < 10$		

续表2

编号	等级	粒径范围/mm	测量与称重方法	试验目的
6	粗颗粒	2~<4.75	1)不同孔径筛子筛分 2)高精度电子秤称重	测总质量
7	中颗粒	1.18~<2		
8	细颗粒	0.6~<1.18		
9	微颗粒	<0.6		

3.1 破坏碎块分类分布特征

对不同加载速率下的试件碎块进行筛分整理,如图 5 所示。由图 5 可知,碎块具有明显的分类特征。组合试件在 0.001 mm/s 加载速率下,碎块分布平均,分布范围广,而 0.1 mm/s 加载速率下,碎块分布不均匀。随着加载速率增大,小碎块数目逐渐减少。究其原因,是因为较大的加载速率使得煤中裂纹、裂隙不完全发育,数量较少,破坏时具有局部性和不完全性。较低的加载速率,有足够的时间保证裂纹裂隙的萌生、发展、贯通;另外,较低的加载速率下,更多的薄弱面产生摩擦效应。因此,碎块分布均匀。从宏观上来讲,加载速率越小,煤组分破碎程度越高。

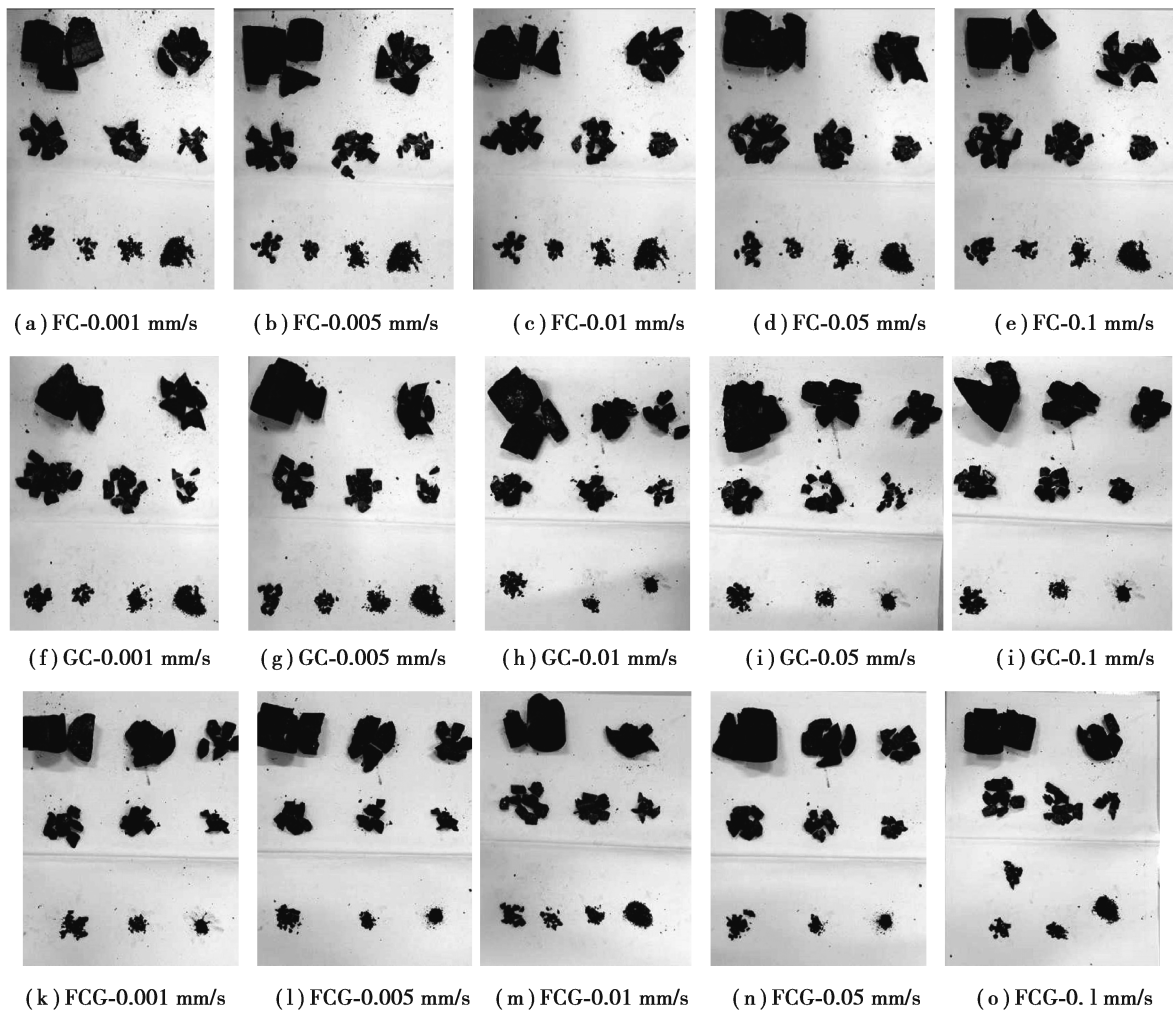


图 5 试件碎块筛分结果

Fig. 5 The screening results of sample's fragments

3.2 破坏碎块数量分布特征

对不同加载速率下试件破坏碎块数量计数,对离散数据求平均值。因小于 4.75 mm 的颗粒计数困难,故选择大于 4.75 mm 的 5 种等级的颗粒计数。结果如图 6 所示。

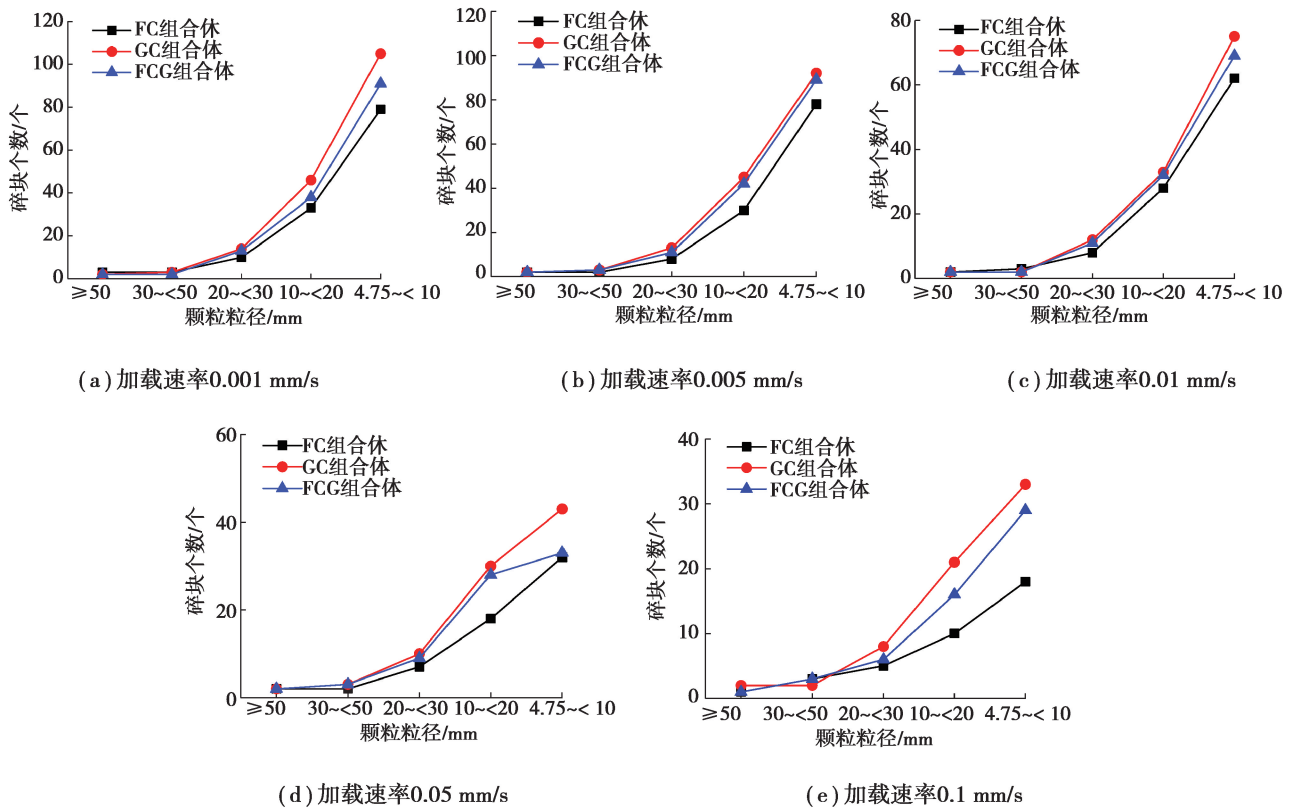
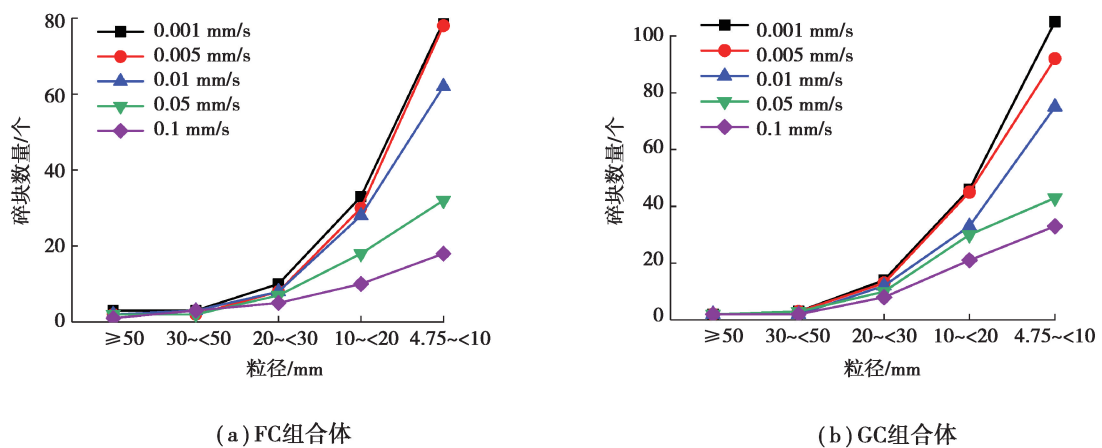


图 6 相同加载速率下碎块数量与碎块尺寸之间的关系

Fig. 6 The relationship between the number of fragments and the size of fragments under the same loading rates

由图 6 可知,粒径尺寸越大,数量越少。粒径大于 30 mm 的碎块数量较少,3 种试件无明显差别;粒径尺寸在 20~<30 mm 的碎块数量开始显现出差别,FC 组合体试件的颗粒少,GC 组合体试件颗粒最多,粒径尺寸为 10~<20 mm、4.75~<10 mm 的碎块数量也存在这种规律。由此表明:组合试件组分之间差别越大,碎块的数量越少,组分差别越小,碎块越多。

图 7 显示了不同加载速率下碎块数量与碎块尺寸之间的关系。由图 7 可知,随着加载速率增大,<20 mm 的碎块数量逐渐减少。加载速率的增大有助于减少试件的破碎程度。



(a) FC组合体

(b) GC组合体

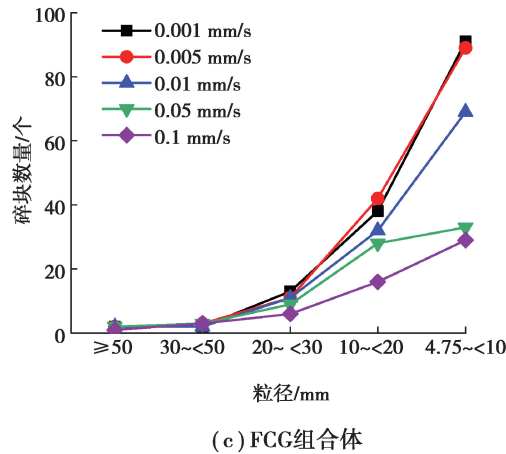


图 7 不同加载速率下碎块数量与碎块尺寸之间的关系

Fig. 7 The relationship between the number of fragments and the size of fragments under the different loading rates

3.3 破坏碎块质量分布特征

对试件在不同加载速率下的破坏碎块在不同粒径尺寸范围内称重,获得不同粒径尺寸范围碎块的质量分数(不同粒径尺寸范围内的块体数量与破坏块体总质量的比值),根据获取的试验数据,以 FC 组合体为例,作图 8。

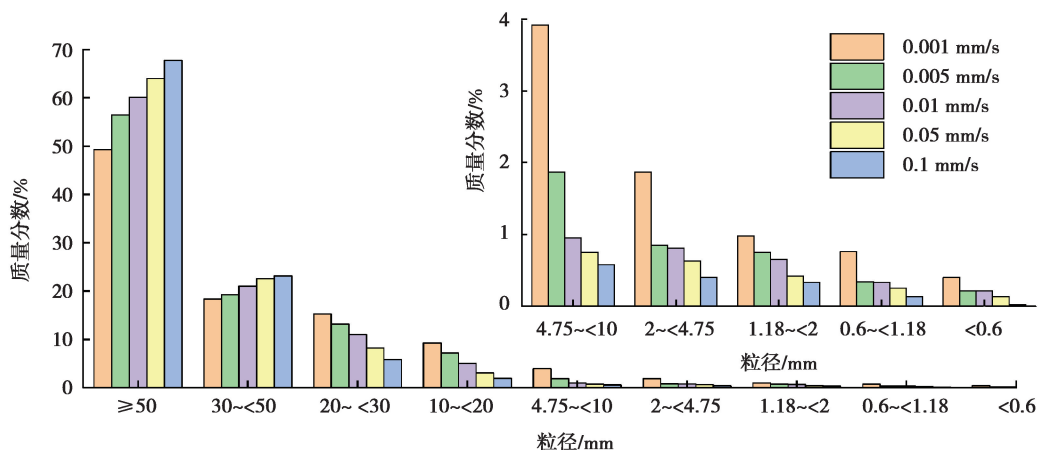


图 8 FC 组合体不同加载速率下碎块质量分数与粒径尺寸之间的关系

Fig. 8 The relationship between mass fraction of fragments and size of FC combined body under different loading rates

由图 8 知:大碎块和较大碎块两种等级的碎块质量分数随着加载速率增加而增加。除微颗粒等级之外,其余等级的碎块质量分数随着加载速率增加而减小。由此可见,高加载速率下,试件容易产生较大碎块,低加载速率下,试件容易产生较小碎块。这是因为低加载速率使试件中的裂纹、裂隙萌生与发展更加充分,加剧了试件的破碎程度。

3.4 破坏碎块尺寸分布特征

为研究各等级内碎块尺寸比例分布特征,测量不同加载速率下 3 种试件各等级内碎块最大长度、最大宽度、最大厚度。由于颗粒(粗、中、细、微)尺寸难以测量,故只对大于 4.75 mm 粒径等级的碎块进行测量。以 FC 组合体为例,根据试验数据作图 9。

由图 9 可知,组合体在不同加载速率下破坏后碎块长/宽值与宽/厚值无明显规律,加载速率对其基本无影响;组合体的长/厚值随着碎块粒径的减小呈现先增加后减小的趋势;相同粒径等级内,0.1 mm/s 加载速率下碎块长/厚值最大,其次为 0.05,0.01,0.005,0.001,加载速率下碎块的长/厚值最小。由此表明:增大加

载速率会促生长薄形态的碎块。相同粒径等级内:加载速率越大,长薄碎块越多,加载速率越小,长薄碎块越少。

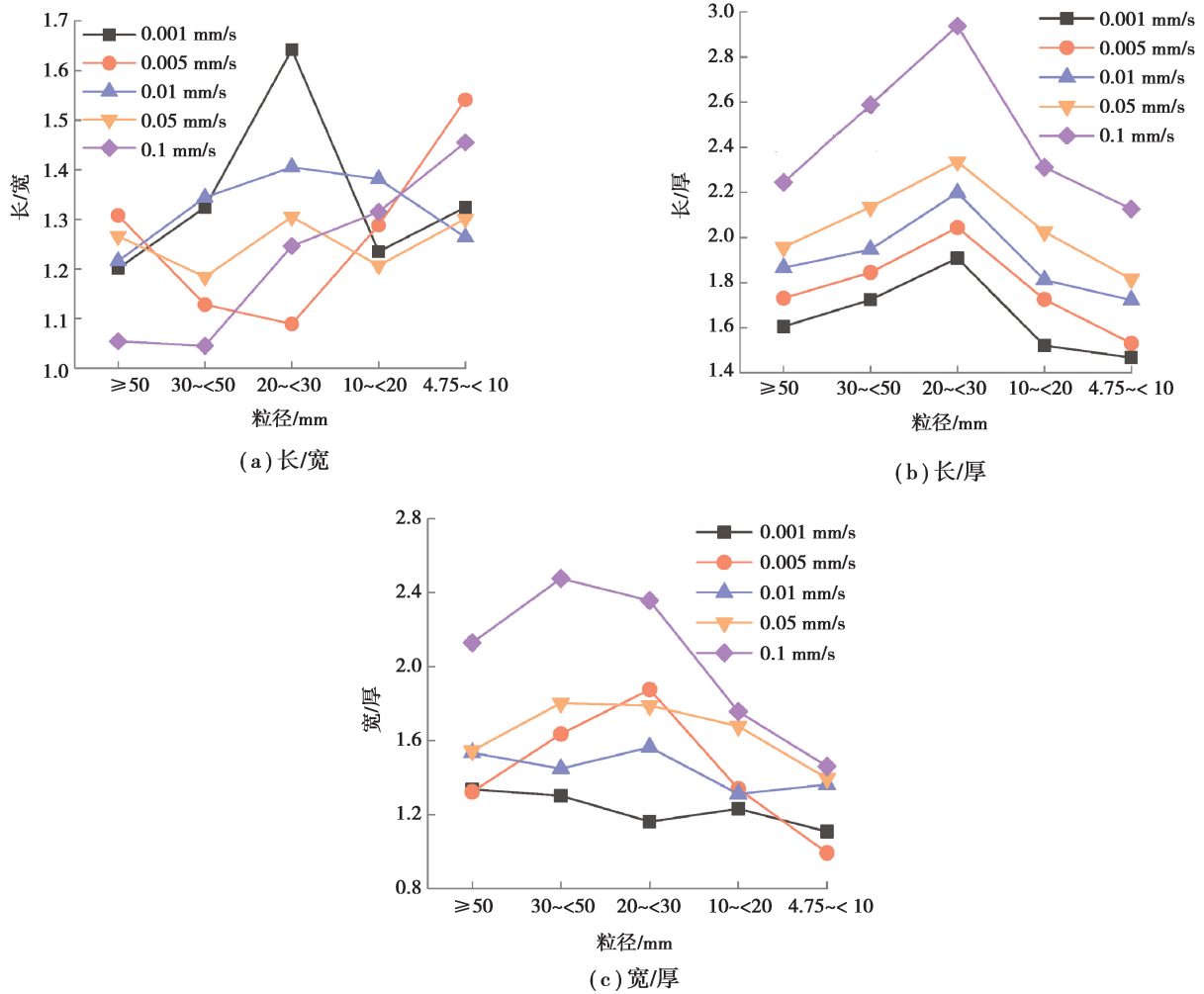


图 9 不同加载速率下 FC 组合体破坏碎块的尺寸特征

Fig. 9 The size characteristics of failure fragments of FC combined body under the different loading rate

4 试件破坏碎块分形特征

分形几何理论中,煤岩试件破碎过程的统计自相似性特征主要由分形维数和无标度空间 2 个参数来描述^[18,23],其中,分形维数的定义如下:

$$D = - \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\epsilon)}{\lg \epsilon}, \tag{1}$$

式中: D 为分形维数, ϵ 为标度, $N(\epsilon)$ 为在标度 ϵ 的测量值。

在计算破碎试件的分形维数方法上,主要有颗粒-数量、颗粒-质量 2 种方法,该 2 种方法都是采用等效变长对度量粒度尺寸,根据特征尺度与累计数量的关系来计算分形维数^[24-25]。

4.1 粒度-数量分形特征

由于 <4.75 mm 的碎块数量计数困难,数目不准确;而且 <4.75 mm 碎块主要由裂纹界面之间的摩擦或者试件压缩变形时内部的挤压而产生;另外,小碎块的产生所受影响因素较多,包括原生裂隙、取样条件等。上述原因使得 <4.75 mm 碎块的产生具有较大的不确定性,研究结论价值不大,故对 <4.75 mm 的碎块数量不做研究,仅对 >4.75 mm 的碎块计数,测量碎块的长度(l)、宽度(w)、厚度(h),根据李杨杨等^[22]、李德建^[25]的研究,正方体的等效边长 L_{eq} 可以由式(2)计算:

$$L_{eq} = \sqrt[3]{l \times w \times h} \quad (2)$$

分形维数计算公式为：

$$N = N_0 (L_{eq} / L_{eqmax})^{-D} \quad (3)$$

式中： N 为等效边长 $\geq L_{eq}$ 的碎屑数量， N_0 为具有最大特征尺寸 L_{eqmax} 的碎屑数， D 为分形维数。

为便于绘图和描述粒度-数量特征，对式(3)取对数，得：

$$\lg N = D \lg(L_{eqmax} / L_{eq}) - D \lg N_0 \quad (4)$$

由式(4)可知， $\lg N - \lg(L_{eqmax} / L_{eq})$ 的斜率为分形维数。3 种试件不同加载速率下的 $\lg N - \lg(L_{eqmax} / L_{eq})$ 曲线如图 10 所示。

根据图 10 中 3 种试件的 $\lg(N) - \lg(L_{eqmax} / L_{eq})$ 曲线可知，FC 组合体随着加载速率增大，碎块分形维数分别为 1.53、1.30、1.28、1.08、0.55；GC 组合体随着加载速率增大，碎块分形维数分别为 1.27、0.84、0.72、0.48、0.26；FCG 组合体随着加载速率增大，碎块分形维数分别为 1.45、1.28、1.12、0.53、0.46。由此可知，分形维数随着加载速率增大而减小，加载速率越大，分形维数越小。从碎块的分形维数的物理意义分析，其值越大，表明其越复杂或破碎越难，吸收的能量越多。加载速率较小时，试件破碎完全，形成小碎块较多，则需要消耗的能量较多；加载速率较大时，试件产生碎块较少，所需能量也较少。

图 11 反映了相同加载速率下 3 种组合体的分形维数情况。由图 11 可知，3 种试件的分形维数在 0.259 99~1.533 35 范围内，且相同加载速率下 3 种试件分形维数的关系为：FC 组合体 > FCG 组合体 > GC 组合体。

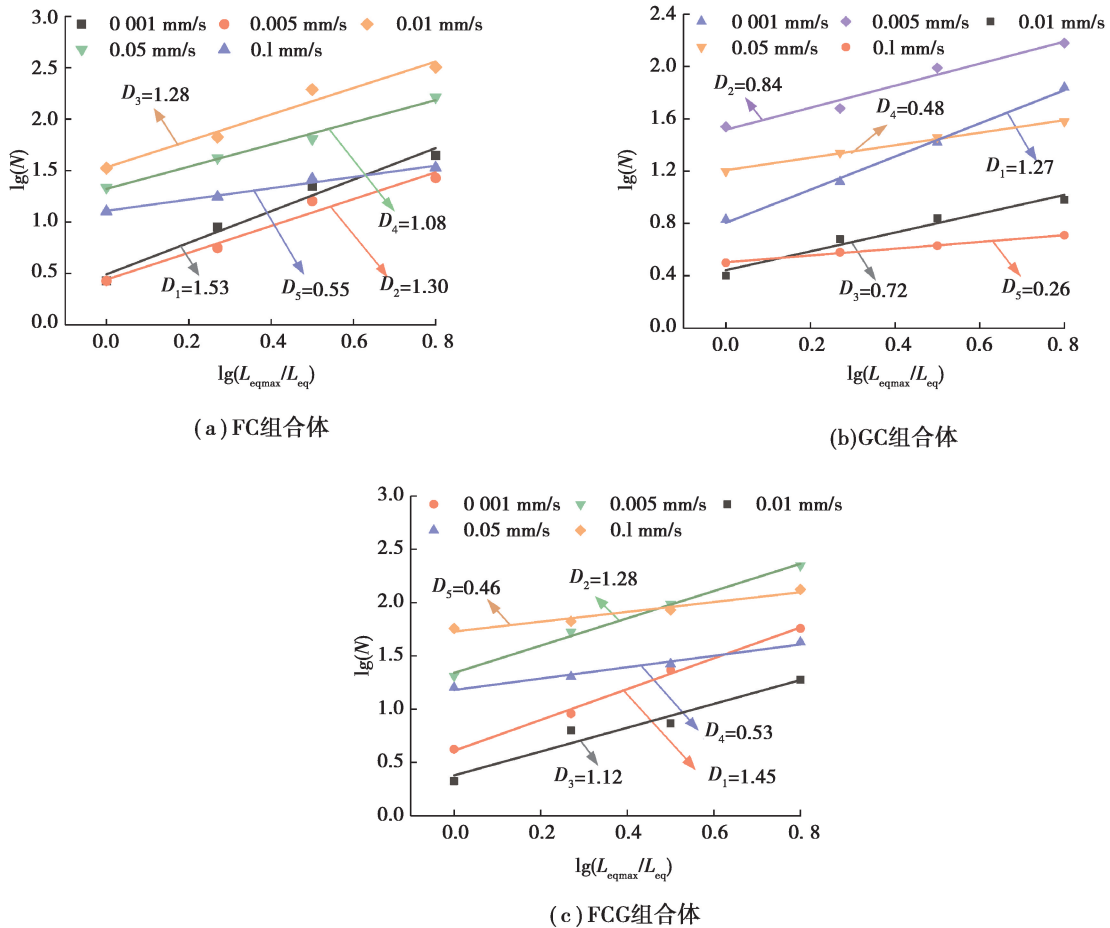


图 10 不同加载速率下试件 $\lg(N) - \lg(L_{eqmax} / L_{eq})$ 曲线

Fig. 10 The $\lg(N) - \lg(L_{eqmax} / L_{eq})$ curves of specimens under different loading rates

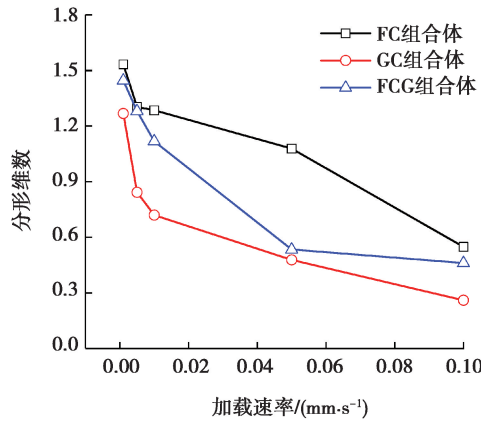


图 11 加载速率与粒度-数量分形维数的关系

Fig. 11 The relationship between loading rate and particle size-quantity fractal dimension

4.2 粒度-质量分形特征

碎块的粒度-质量分布关系式为

$$\frac{M_{L_{eq}}}{M} = \left(\frac{L_{eq}}{a}\right)^k, \tag{5}$$

式中: M 为碎块总质量, $M_{L_{eq}}$ 为小于等效边长 L_{eq} 的碎块质量, a 为碎屑平均尺寸, k 为指数。

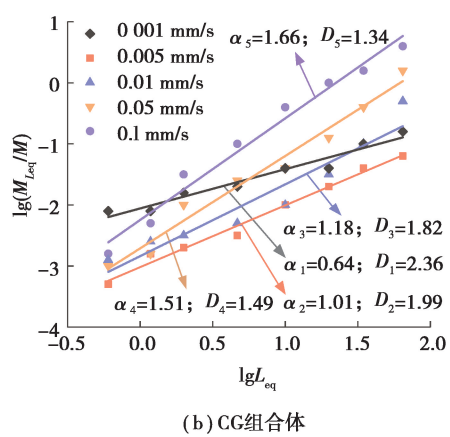
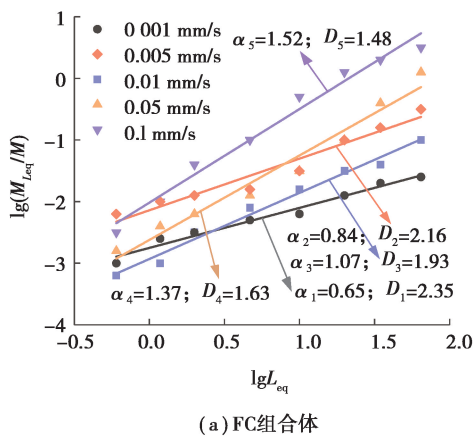
对公式(5)两边取对数,得:

$$\lg(M_{L_{eq}}/M) = k \lg L_{eq} - k \lg a. \tag{6}$$

由式(6)知, $\lg(M_{L_{eq}}/M) - \lg L_{eq}$ 曲线斜率为 k , 根据谢和平院士的岩石力学分形理论^[7-9]可知, 分形维数 D 与斜率 k 的关系为:

$$D = 3 - k. \tag{7}$$

图 12 为 3 种试件不同加载速率下的 $\lg(M_{L_{eq}}/M) - \lg L_{eq}$ 曲线, 由图 12 知: 试件碎块的粒度-质量具有明显的分形特征。图 13 描述了加载速率与分形维数的关系。由图 13 可知, 试件分形维数随加载速率增大依次为①FC 组合体: 2.35、2.16、1.93、1.63、1.48。②GC 组合体: 2.36、1.99、1.82、1.49、1.34。③FCG 组合体: 2.34、1.81、1.67、1.65、1.58。由此来看, 试件的分形维数均随加载速率增大而减小。在 0.001~0.01 mm/s 加载速率内, 试件的分形维数急剧下降, 0.01 mm/s 以后, 试件的分形维数下降幅度较小。



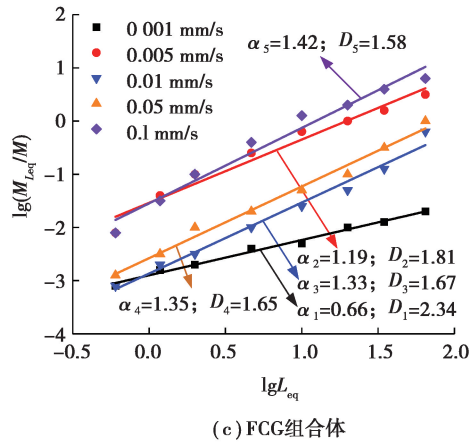


图 12 不同加载速率下试件 $\lg(M_{L_{eq}}/M)-\lg L_{eq}$ 曲线

Fig. 12 The $\lg(M_{L_{eq}}/M)-\lg L_{eq}$ curves of specimens under different loading rates

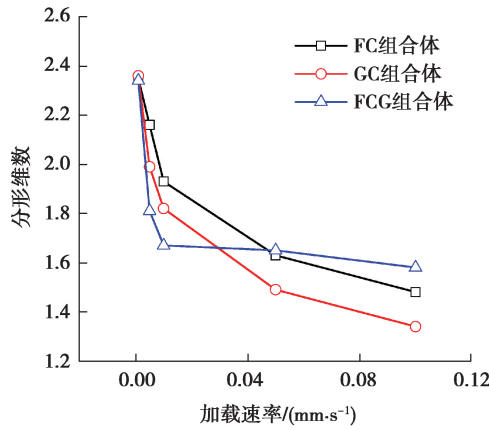
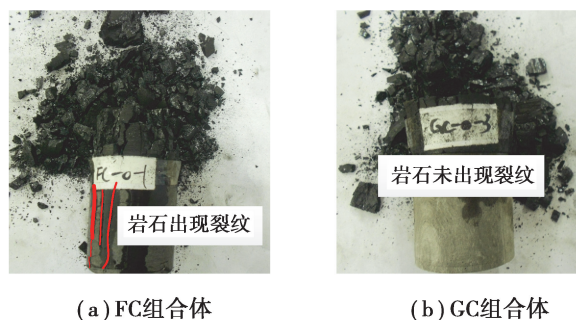


图 13 试件加载速率与粒度-质量分形维数的关系

Fig. 13 The relationship between loading rate and particle size-mass fractal dimension

5 组合体破坏能量传递机制讨论

煤岩组合体随着试验机的不断加载,抗压强度小的煤组分首先发生破坏。根据组合体的破坏形态可知,组合体的宏观破坏形态分为两种:1)煤和岩石组分均发生破坏,如图 14(a)FC 组合体,并且在试验过程中,宏观上可以看到煤组分首先发生破坏,然后岩石组分发生破坏;2)煤组分发生破坏,而岩石组分未发生破坏,如图 14(b)GC 组合体。



(a) FC组合体

(b) GC组合体

图 14 两种典型的试件破坏形态

Fig. 14 Two typical failure patterns of specimens

究其原因,随着试验机不断加载,组合体逐渐积聚大量的能量(如图 15(a)所示),当积聚的能量达到组合体的储能极限,由于煤组分的弹性模量较小,其储能极限也较小,因此,软弱的煤组分最先发生破坏,开始释放能量,这些释放的能量直接传递给岩石组分(如图 15(b)所示),导致积聚在岩石组分上的能量瞬间增加。此时,如果达到岩石组分的储能极限,岩石组分就发生破坏,则出现(1)破坏形态(如图 15(c)所示)。如果未达到岩石组分的储能极限,岩石组分就不发生破坏,则出现(2)破坏形态。这种能量的释放和传递速度较快,发生时间也较短。

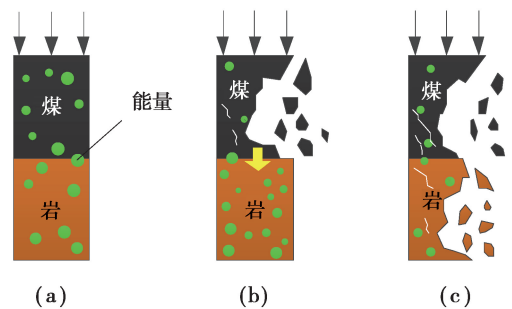


图 15 煤岩组合体破坏过程能量传递机制示意图

Fig. 15 Schematic diagram of energy transfer mechanism in the failure process of coal-rock combined body

另外,对于煤岩组分共同破坏的组合体而言,从破坏形态来看,粗砂岩组分的破坏程度比细砂岩组分的破坏程度更高、更完全,这是因为粗砂岩组分的储能极限比细砂岩组分低。当积聚的能量传递至粗砂岩组分时,其更容易发生破坏。

本文研究的能量传递机制与文献[26]的观点较为一致,均认为煤体压缩破坏释放的弹性变形能释放给岩石而引起岩石的破坏。文献[27]开展了组合体单轴压缩试验,组合体组分之间未加黏合剂,同样也出现了有些岩石组分破坏有些岩石组分未破坏的现象,与本试验的破坏现象一致。另外,笔者认为,煤岩组合体出现(1)破坏形态,除主要受能量传递机制的影响外,还受组分之间黏合剂的影响。组分之间黏合剂的黏合作用对于能量传递效率会起到一定作用,黏合作用越强,传递效率越高,岩石接收的能量越多;黏合作用越弱,传递效率越低,岩石接收的能量越少。因此,笔者认为煤岩组合体破坏形态主要受能量传递机制的影响,组分之间黏合剂的黏合作用对破坏形态影响较小。

值得注意的是,这里所研究的煤岩组合体破坏能量传递机制与文献[26]提出的岩石破坏能量驱动机制较为一致。同时,文献[28]指出:煤体破坏后,处于弹性状态岩石会发生回弹,回弹效应的存在加速了煤体破坏,也增强了能量传递效率。然而,文献[29]通过高速摄像机发现岩石的破坏要早于煤的破坏,并且通过数值模拟研究发现岩石的拉破坏是由于煤-岩侧向变形不一致导致煤岩界面岩石一侧出现拉应力而导致的岩石破裂破坏。出现这种情况的前提是,煤岩界面的摩擦力大于煤岩界面岩石一侧的极限拉应力,或者说煤岩界面的黏合作用太强导致煤岩界面岩石一侧出现破坏,这种岩石破坏机制也会存在。关于岩石破坏早于煤的破坏,笔者认为实验过程中岩石内部极度薄弱的原生裂隙在试验机作用下会产生破坏,并且这些原生裂隙的薄弱程度甚至比煤中裂隙还要强,这种情况下就会出现岩石首先破坏,但岩石中的这些破坏不足以导致岩石的宏观破坏,在试验机不断加载过程中,煤的内部也不断发生破坏并且导致了煤体宏观上的破坏。

6 结 论

1) 低加载速率下,试件完全破坏,裂纹、裂隙发育充分,属于塑性破坏;高加载速率下,试件不完全破坏,裂纹、裂隙发展贯通较少,发育不完全,属于脆性破坏。加载速率对试件破坏的影响主要表现在:裂隙发育程度、破坏块体粒径、破坏块体数目、能量释放速度、破坏形式、失稳机制。

2) 试件碎块具有明显的分类特征。随着加载速率增大,小碎块数目逐渐减少。高加载速率下,试件容易产生较大碎块,低加载速率下,试件容易产生较小碎块。3种试件的长/厚值随着碎块尺寸的减小呈现先增加后减小的趋势,增大加载速率会促进薄形态碎块生成。

3) 利用分形理论研究了试件碎块的粒度-数量、粒度-质量分形特征。粒度-数量的分形维数随着加载速

率增大而减小,加载速率越大,分形维数越小。试件的粒度-质量分形维数均随加载速率增大而减小。在 $0.001\sim 0.01$ mm/s加载速率内,试件的分形维数急剧下降, 0.01 mm/s以后,试件的分形维数下降幅度较小。

4)讨论了煤岩组合体破坏过程的能量传递机制。组合体在试验机作用下,煤组分最先发生破坏,释放的能量传递给岩石组分。若达到岩石组分的储能极限,导致岩石组分则发生破坏。煤岩组合体破坏过程的能量传递机制较好地揭示了岩石组分发生破坏的滞后现象。

参考文献:

- [1] Kim B H, Walton G, Larson M K, et al. Experimental study on the confinement-dependent characteristics of a Utah coal considering the anisotropy by cleats[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 105: 182-191.
- [2] Eremenko A A, Mashukov I V, Eremenko V A. Geodynamic and seismic events under rockburst-hazardous block caving in gornaya shoria[J]. *Journal of Mining Science*, 2017, 53(1): 65-70.
- [3] Konicek P, Ptacek J, Waclawik P, et al. Long-term Czech experiences with rockbursts with applicability to today's underground coal mines[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(5): 1447-1458.
- [4] Louchnikov V N, Eremenko V A, Sandy M P, et al. Support design for mines exposed to rockburst hazard[J]. *Journal of Mining Science*, 2017, 53(3): 504-512.
- [5] Mohtarami E, Jafari A, Amini M. Stability analysis of slopes against combined circular-toppling failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67: 43-56.
- [6] 陈光波. 煤岩组合体动力破坏规律实验研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江科技大学, 2016.
Chen G B. A combination of coal and rock in the experimental research on dynamic damage[D]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [7] 谢和平. 大理岩微观断裂的分形(fractal)模型研究[J]. *科学通报*, 1989, (5): 365-368.
XIE Heping. Study on fractal model of marble micro-fracture[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, (5): 365-368. (in Chinese)
- [8] Zhang K, Chen Y L, Fan W C, et al. Influence of intermittent artificial crack density on shear fracturing and fractal behavior of rock bridges: experimental and numerical studies[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(2): 553-568.
- [9] Ju Y, Sudak L, Xie H P. Study on stress wave propagation in fractured rocks with fractal joint surfaces[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(13): 4256-4271.
- [10] 何满潮, 王炆, 苏劲松, 等. 动静组合荷载下砂岩冲击岩爆碎屑分形特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(4): 699-705.
He M C, Wang Y, Su J S, et al. Analysis of fractal characteristics of fragment of sandstone impact rock burst under static and dynamic coupled loads[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(4): 699-705. (in Chinese)
- [11] 何满潮, 杨国兴, 苗金丽, 等. 岩爆实验碎屑分类及其研究方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8): 1521-1529.
He M C, Yang G X, Miao J L, et al. Classification and research methods of rockburst experimental fragments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1521-1529. (in Chinese)
- [12] 赵菲, 何满潮, 李德建, 等. 真三轴卸载煤爆实验破坏特征演化分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(1): 142-150.
Zhao F, He M C, Li D J, et al. Damage evolution in the fracture process of coal burst during true triaxial unloading test[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(1): 142-150. (in Chinese)
- [13] 高保彬, 李回贵, 李化敏. 不同破坏类型岩石的声发射及分形特征研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(2): 358-363.
Gao B B, Li H G, Li H M. Study on acoustic emission and fractal characteristics of different damage types of rock[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(2): 358-363. (in Chinese)
- [14] 郭海峰, 宋大钊, 何学秋, 等. 冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究[J/OL]. *煤炭科学技术*: 1-9[2021-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200701.1731.006.html>.
Guo H F, Song D Z, He X Q, et al. Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal[J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1-9[2021-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200701.1731.006.html>. (in Chinese)
- [15] 夏元友, 吝曼卿, 廖璐璐, 等. 大尺寸试件岩爆试验碎屑分形特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7):

1358-1365.

Xia Y Y, Lin M Q, Liao L L, et al. Fractal characteristic analysis of fragments from rockburst tests of large-diameter specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1358-1365.(in Chinese)

[16] 许金余, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3225-3229.

Xu J Y, Liu S. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3225-3229.(in Chinese)

[17] 周盛涛, 方文, 蒋楠, 等. 冻融循环作用下砂岩单轴压缩破坏断口特征分形研究[J]. 地质科技通报, 2020, 39(5): 61-68.

Zhou S T, Fang W, Jiang N, et al. Fractal geometry study on uniaxial compression fracture characteristics of sandstone subjected to freeze-thaw cycles[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(5): 61-68.(in Chinese)

[18] 李守巨, 李德, 武力, 等. 非均质岩石单轴压缩试验破坏过程细观模拟及分形特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 849-854.

Li S J, Li D, Wu L, et al. Meso-simulation and fractal characteristics for uniaxial compression test of inhomogeneous rock[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 849-854.(in Chinese)

[19] 周翠英, 梁宁, 刘镇. 红层软岩压缩破坏的分形特征与级联失效过程[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 21-31.

Zhou C Y, Liang N, Liu Z. Fractal characteristics of compression failure of red soft rock and cascading failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 21-31.(in Chinese)

[20] 刘享华, 张科, 吴文远. 裂隙砂岩破坏过程中的能量耗散与破碎分形特征研究[J/OL]. 重庆大学学报:1-11 [2021-01-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20200617.1159.002.html>.

LIU Xianghua, ZHANG Ke, WU Wenyuan. Investigation on correlation between energy dissipation and fractal characteristics of fragments of preflawed sandstone[J/OL]. Journal of Chongqing University: 1-11[2021-05-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20200617.1159.002.html>. (in Chinese)

[21] 丁鑫, 肖晓春, 吕祥锋, 等. 煤体破裂分形特征与声发射规律研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3080-3087.

Ding X, Xiao X Chaochun, Lü X F, et al. Investigate on the fractal characteristics and acoustic emission of coal fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3080-3087.(in Chinese)

[22] 李杨杨, 张士川, 文志杰, 等. 循环载荷下煤样能量转化与碎块分布特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1411-1420.

Li Y Y, Zhang S C, Wen Z J, et al. Energy conversion and fragment distribution characteristics of coal sample under uniaxial cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1411-1420.(in Chinese)

[23] Liu Z X, Han K W, Yang S, et al. Fractal evolution mechanism of rock fracture in undersea metal mining[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(4): 1320-1333.

[24] 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.

[25] 李德建, 贾雪娜, 苗金丽, 等. 花岗岩岩爆试验碎屑分形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3280-3289.

Li D J, Jia X N, Miao J L, et al. Analysis of fractal characteristics of fragment from rockburst test of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3280-3289.(in Chinese)

[26] 杨磊, 高富强, 王晓卿, 等. 煤岩组合体的能量演化规律与破坏机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3894-3902.

Yang L, Gao F Q, Wang X Q, et al. Energy evolution law and failure mechanism of coal-rock combined specimen[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3894-3902.(in Chinese)

[27] 陈光波, 秦忠诚, 张国华, 等. 受载煤岩组合体破坏前能量分布规律[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2021-2033.

Chen G B, Qin Z C, Zhang G H, et al. Law of energy distribution before failure of a loaded coal-rock combined body[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2021-2033.(in Chinese)

[28] 尹大伟, 陈绍杰, 邢文彬, 等. 不同加载速率下顶板-煤柱结构体力学行为试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1249-1257.

Yin D W, Chen S J, Xing W B, et al. Experimental study on mechanical behavior of roof-coal pillar structure body under different loading rates[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1249-1257.(in Chinese)

[29] Gao F Q, Kang H P, Yang L. Experimental and numerical investigations on the failure processes and mechanisms of composite coal-rock specimens[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-13.