

DOI: 10.11779/CJGE202005022

冲击荷载下类煤岩组合体能量耗散与破碎特性分析

李成杰¹, 徐颖^{1, 2}, 叶洲元³

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001;
3. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411100)

摘要: 利用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 对类煤、岩单体及组合体试件进行冲击压缩试验, 分析了试件能量耗散与破碎块度特征, 通过对组合体煤、岩两组分碎块分别筛分, 得到了各自的平均破碎块度, 并依据单体试件平均破碎块度及破碎耗能密度与入射能之间的关系, 获得了两种组分的破碎耗能密度, 探究了两组吸能特性。结果表明: 结合面的存在使得应力脉冲在组合体试件与压杆间传播做功过程更复杂, 试件耗能变化与煤单体接近, 而小于波阻抗较大的岩单体。煤组分由于受到岩组分变形抑制作用而能量集聚程度更高, 破碎耗能密度与破碎程度大于同等冲击强度下的煤单体, 破碎过程岩组分的能量转移亦加剧了煤组分的破碎程度; 相反, 岩组分破碎耗能密度与破碎程度相比岩单体则偏小。复合煤岩体能量集聚程度更高, 发生动力灾害所需的能量更低, 在对复合煤岩巷道冲击地压和瓦斯突出动力灾害机理认识上及采取防治措施时应注意此特性。

关键词: 煤岩组合体; SHPB; 平均破碎块度; 耗能密度; 能量分配

中图分类号: TD353

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2020)05 - 0981 - 08

作者简介: 李成杰(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程爆破方面的研究工作。E-mail: 651832861@qq.com。

Energy dissipation and crushing characteristics of coal-rock-like combined body under impact loading

LI Cheng-jie¹, XU Ying^{1, 2}, YE Zhou-yuan³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, China)

Abstract: The impact compression tests on a single coal-like body, a rock-like body and a combined coal-rock-like body are carried out by using the split Hopkinson pressure bar (SHPB). The energy dissipation and fragmentation characteristics of the specimens are analyzed. By screening the coal and rock fragments respectively, the average fragment sizes are obtained. The energy dissipation densities of the two sections are obtained according to the relationship among average fragment size, energy dissipation density and incident energy of single bodies, and the energy absorption characteristics of the two sections are investigated. The results show that the existence of the joint surface makes the propagation of stress pulse between combined specimens and elastic bars more complex, and the dissipated energy is close to that of the single coal body, however smaller than that of the single rock body with large impedance. The degree of energy accumulation of coal section is higher because of the deformation inhibition of the rock section, and the energy dissipation density and crushing degree of coal section are greater than those of the single coal body under the same impact intensity, and the energy transfer of rock section aggravates the crushing degree of the coal section. On the contrary, the energy dissipation density and the crushing degree of rock section are smaller than those of the single rock body. The energy needed for dynamic disaster of composite coal and rock is lower than that of the single coal body because of the higher energy accumulation degree. These conclusions should be considered when understanding the mechanism of rock burst and coal and gas outburst and taking prevention and control measures for these dynamic disasters.

Key words: coal-rock combined body; SHPB; average fragment size; energy dissipation density; energy distribution

0 引言

随着中国煤炭开采深度的日益加深, 地应力显著

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51374012)

收稿日期: 2019 - 08 - 16

*通信作者 (E-mail: yxu@aust.edu.cn)

增大使得冲击地压、顶板冒落、巷道大变形等灾害频繁发生^[1-3]。这些工程灾害不仅仅受煤、岩单一岩体的影响，与煤、岩体组成的整体结构更为密切相关，因此，对煤岩组合体破坏机制研究尤为重要，许多学者对此展开了大量研究，既包括静载方面^[4-6]，亦涉及动载方面^[7]，但主要集中于静载方面的研究。

实际上，上述矿井灾害的发生均是能量驱使的结果，当煤岩层中积聚的能量达到其储能极限^[8]后，围岩体即发生变形破坏，甚至出现突然失稳现象。从能量角度对煤岩组合岩体进行试验研究有助于从根本上探讨煤岩组合体破坏机制。陈岩等^[9]研究发现，循环加卸载下煤岩组合体的能量演化具有明显的非线性特征，输入能密度、弹性能密度、耗散能密度均随着应力的增大而增大，但耗散能密度增大速率较小。邵光耀等^[10]研究了围压对煤岩组合体能量释放和耗散的影响，结果表明煤岩组合体的输入能、弹性能、耗散能均随着围压的增大而增大。陈光波等^[11]分析了不同比例的二元、三元组合体峰前能量积聚特征，发现无论岩石组分硬度如何，煤组分能量占比均在50%以上，且岩石组分越硬，煤组分能量占比越大。

以上对煤岩组合体能量耗散相关研究只限于静载方面，而采掘工作面或巷道围岩体常常受到爆破开挖或机械振动影响，煤岩复合围岩体相当于受到了不同程度的动荷载作用。此外，岩体开挖过程是瞬态卸荷的过程，这也是一个典型的动力学过程^[12]。可见，煤岩组合体受动载情况并不少见，因此有必要对其开展动荷载下的能量演化特性研究。目前Gong等^[13]研究了不同冲击强度下煤岩组合体的应力-应变特征，分析了组合体整体能量分布规律，但并未分别对煤、岩两个组分进行探讨。煤岩组合体两个组分物理力学特性具有明显差异，组合体整体冲击作用下，两个组分对动荷载的响应必然不同。考虑到真实的煤岩组合体较难获取，本文以制作的型煤、砂浆及两者组合体为研究对象，探究不同冲击强度下其能量耗散与破碎特征，并具体分析组合体煤、岩两种组分的破碎块度与能量吸收特性。

1 单轴冲击压缩试验

1.1 试件制备

本试验所用试件包括煤单体(MC)、岩单体(YC)及组合体(ZCW)，煤单体及组合体煤组分为采用水泥、煤粉制作的型煤，岩单体及组合体岩组分为水泥砂浆。所有试件均取自较大的立方体试块，试块在边长150 mm试模内浇筑完成。型煤质量配比水泥：煤粉：水=1：2.5：1，砂浆质量配比水泥：河砂：水

=1：1.5：0.5，其中，煤粉过筛尺寸为1.25 mm×1.25 mm，河砂过筛尺寸为2.5 mm×2.5 mm。对于组合体试件，立方体试块需分两部分浇筑，试模中间通过薄钢板隔开，振捣完成后抽出隔板使煤、岩浆体自然接触至凝固。室内养护28 d后，垂直于结合面取芯并加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times h 50 \text{ mm}$ 标准试件，两种组分高度均为25 mm，加工成品见图1。由静力学试验测得了试件的基本物理力学参数，见表1。可见，型煤和砂浆物理力学参数与对应的真实煤和岩石较为相似^[14]，对其开展相关研究具有一定的真实性。



图1 部分单体及组合体试件

Fig. 1 Partial specimens of single body and combined body

表1 试件物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of specimens

试件种类	密度 $/(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	波速 $/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	泊松比	弹性模量 /GPa
MC	1.42	2.42	0.27	1.47
YC	2.13	3.97	0.23	6.90
ZCW	1.76	3.01	—	1.78

注：组合体弹性模量指视在弹性模量^[15]。

1.2 试验装置与试验方案

本试验所用SHPB装置主要包括加载驱动系统、测速系统、压杆系统、数据采集系统。加载驱动系统包括高压氮气瓶、气压控制阀、高压气室、发射腔等；测速系统包括测速电路、平行光源、计时仪等；压杆系统由冲头、入射杆、透射杆、吸能装置等组成；数据采集系统由应变片、接线桥盒、SDY2107A超动态应变仪、Yokowaga-DL850E型示波器记录仪等组成，见图2。冲头呈纺锤体，冲击波形呈正弦波，压杆杆径为50 mm，压杆与冲头材料为合金钢，密度为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量为210 GPa，纵波波速为5190 m/s。

试验前经过试冲，对岩体及组合体采用0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa 5种冲击气压，由于煤单体在0.5 MPa冲击气压时已严重破碎，因此笔者此前在文献[16]中对煤体只对其进行了上述前4种冲击气压试验，为便于对比，本试验对其补充了0.6 MPa冲击气压试验。3种试件每种气压下均进行3个以上。冲击过程中为

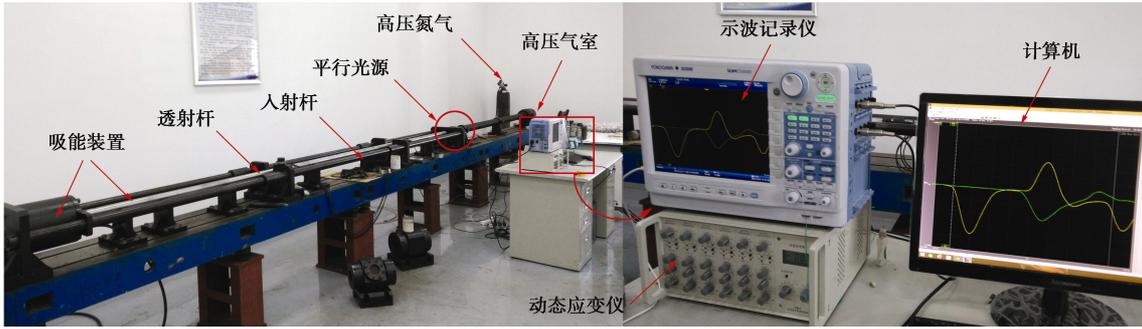


图 2 SHPB 系统

Fig. 2 SHPB system

使试件与压杆紧密接触, 在试件两端涂抹凡士林, 组合体岩体一端靠近入射杆。冲击完成后收集试件碎块进行筛分, 所选取筛孔孔径分别为 50, 31.5, 19, 10, 4.75, 2.5, 1.25, 0.63, 0.0 mm。

1.3 应力平衡验证

冲击试验过程中, 试件在破坏前两端应力能否达到平衡决定了试验结果是否可靠^[17], 因此有必要对应力平衡性进行验证。图 3 显示了组合体试件两端的应力平衡情况, 入射应力与反射应力之和与透射应力基本相等, 试件两端应力平衡可以得到满足, 两种单体与之类似。因此, 所得试验结果具有可靠性。

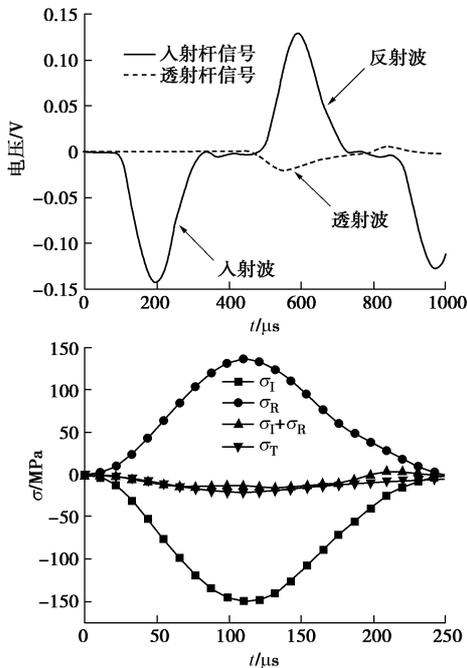


图 3 动应力平衡验证

Fig. 3 Verification of dynamic stress equilibrium

度撞击入射杆, 忽略杆间及杆与试件间能量损失, 其动能首先转化为入射能, 在入射应力波到达试件后, 一部分能量转化为反射能储存在反射波中, 一部分储存在透射波中被吸能装置所吸收, 其余部分则主要被试件所吸收, 用于试件新裂纹与新表面的生成。相关能量计算公式如下:

$$W_I = \frac{c_B A_B}{E_B} \int \sigma_I^2(t) dt \quad (1)$$

$$W_R = \frac{c_B A_B}{E_B} \int \sigma_R^2(t) dt \quad (2)$$

$$W_T = \frac{c_B A_B}{E_B} \int \sigma_T^2(t) dt \quad (3)$$

$$W_A = W_I - W_R - W_T \quad (4)$$

式中 W_I , W_R , W_T , W_A 分别为入射能、反射能、透射能和吸收能, c_B , A_B , E_B 分别为为压杆波速、横截面积、弹性模量, $\sigma_I(t)$, $\sigma_R(t)$, $\sigma_T(t)$ 分别为 t 时刻入射应力、反射应力、透射应力。上述几种能量中, 与工程实际最为密切相关的是试件的吸收能, 而破碎耗能密度 ε_d 反映了试件的冲击韧性^[18],

$$\varepsilon_d = \frac{W_A}{V} \quad (5)$$

式中, V 为试件的体积。

根据式 (1) ~ (3) 可得到能量随时间演化曲线, 图 4 为 150 J 左右入射能时的能量变化情况。对于单体试件, 岩单体波阻抗 (密度×波速) 大于煤单体, 与压杆波阻抗更接近, 因此, 入射杆 - 试件界面处的反射应力脉冲相比煤单体较弱, 反射能更小, 而透过该界面进入到试件中的应力脉冲更强烈, 在试件端部与压杆接触的两个界面间不断反射过程中对试件做功更大, 即吸收能大于煤单体。应力脉冲在两个界面间往复传播过程中, 每次在试件与透射杆界面处都会有一部分进入透射杆, 显然岩单体时的透射脉冲较强, 因此透射能更大。虽然从结果上看, 组合体能量随时间变化与煤单体接近, 但组合体中应力波传播过程相对复杂。入射脉冲首先透过入射杆 - 岩组分界面, 再

2 能量耗散特性分析

2.1 能量计算

SHPB 试验中, 冲头在高压氮气作用下以一定速

透过岩组分-煤组分界面到达煤组分-透射杆界面,3个界面处均发生反射与透射,经过后续的应力脉冲往复传播过程最终致使反射与透射应力脉冲与煤单体类似,能量变化也类似。

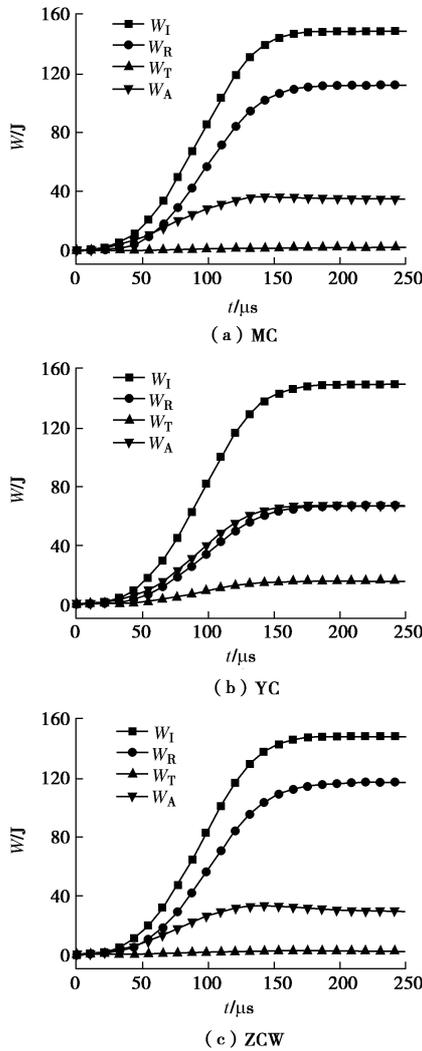


图4 能量演化曲线

Fig. 4 Energy evolution curves

图5为3种能量随入射能变化情况,0.2 MPa冲击气压下3种试件均为发生明显破坏,0.3 MPa下岩单体未发生明显破坏,图中未给出相关试件能量变化。由图可见,3种试件反射能、透射能、吸收能随入射能近似线性增加,其中反射能增长速率最大,吸收能次之,透射能增长速率最小。煤单体与组合体的3种能量随入射能变化规律类似,两者反射能增加速率大于岩单体,吸收能与透射能增加速率则较小。

2.2 破碎耗能密度

试件的破碎耗能密度随入射能变化见图6。3种试件破碎耗能密度随入射能增加呈线性增加,岩体破碎耗能密度较单体与组合体大得多,且其增加速率最大。煤单体增加速率略大于组合体,入射能较小时,

煤单体与组合体破碎耗能密度较接近,随入射能增大,差距逐渐增加。

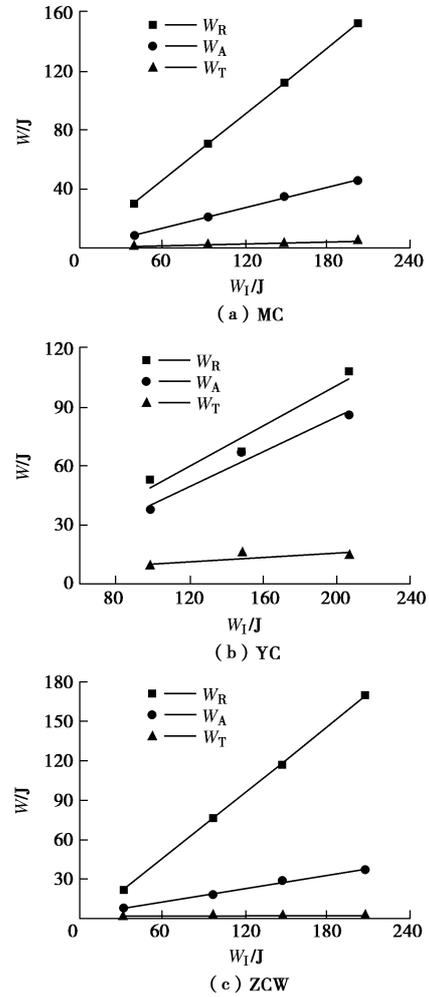


图5 3种能量与入射能变化关系

Fig. 5 Relationship between three forms of energy and incident energy

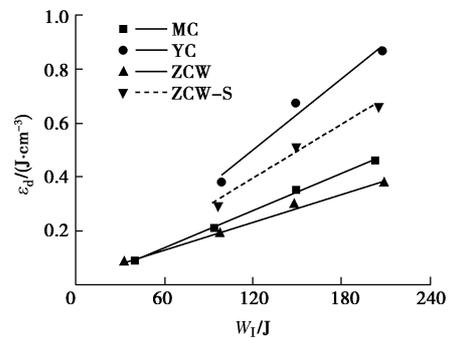


图6 试件破碎耗能密度

Fig. 6 Energy dissipation densities of specimens

从结构上看,煤岩组合体破碎耗能密度似乎应介于两种单体之间,但结果并非如此,甚至低于强度较低的煤单体。若动载下组合体两种组分能量耗散互不影响,即同等入射能下均能达到单体试件所对应的破

碎耗能密度, 则组合体整体破碎耗能密度将如图 6 中 ZCW-S 所示。可见, 冲击荷载下组合体试件破坏过程中两种组分相互影响着彼此能量耗散, 最终导致整体破碎耗能密度偏小。然而, 两种组分具体破碎耗能如何尚不得知, 既然两种组分耗能情况变化较大, 那么其破碎特征亦必发生改变, 为进一步分析两种组分吸能情况, 可先分别对两种组分的破碎特征进行分析。

3 破碎特性分析

3.1 破碎形态

表 2 列出了不同冲击气压下试件破碎形态, 随入射能的增加, 3 类试件的破碎程度不断加剧。较低入射能下, 单体试件呈明显劈裂破坏, 随入射能增加, 试件碎块逐渐由块状变为颗粒状, 甚至粉末状, 这与真实岩石试件类似^[19-20]。组合体试件两种组分破碎程度随入射能均逐渐增加, 煤组分 (ZCW-M) 破碎程度远大于岩组分 (ZCW-Y)。岩组分呈明显劈裂破坏, 新破坏面相对岩单体更为平整, 且碎块多以组合形式存在, 与之结合的煤体部分近似呈锥体, 随入射能增加, 锥体高度逐渐变小。此外可以明显发现, 岩组分破坏程度相比同等入射能下岩单体要偏弱。由此可知, 岩组分破坏是由煤组分破坏过程中裂纹贯穿结合面在岩组分扩展所致。

表 2 试件破碎形态

Table 2 Failure modes of specimens

试件	破坏形态		
MC			
	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa
	YC		
0.4 MPa		0.5 MPa	0.6 MPa
ZCW			
	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa

3.2 平均破碎块度

为表征试件的破碎程度, 采用下式求取试件的平均破碎尺寸 \bar{R} ^[21]:

$$\bar{R} = \frac{M_1R_1 + M_2R_2 + M_3R_3 + \dots + M_nR_n}{M} \quad (6)$$

式中, M_n 为相邻两筛筛得的碎块质量, R_n 为对应两筛筛孔平均值, M 为碎块总质量。需要说明的是, 组合体破坏后结合面部分碎块仍以组合体形式存在, 在计算组合体整体破碎块度时不区分煤、岩组分, 而分别计算两种组分破碎块度时则需先将组合形式碎块的煤、岩部分分开, 再分别筛分。

图 7 给出了不同入射能下单体、组合体及组合体煤、岩组分的碎块平均尺寸, 单体及组合体试件平均破碎块度随入射能增加均逐渐减小。相对岩单体, 组合体中岩组分在较小入射能下便发生破坏。煤单体平均破碎块度小于相同入射能下的岩单体, 在入射能为 30 J 左右时, 煤单体平均破碎块度与组合体基本相等, 入射能较大时则偏小。入射能为 90 J 左右时, 岩单体平均破碎块度与组合体基本相等, 随着入射能增加, 前者小于后者。

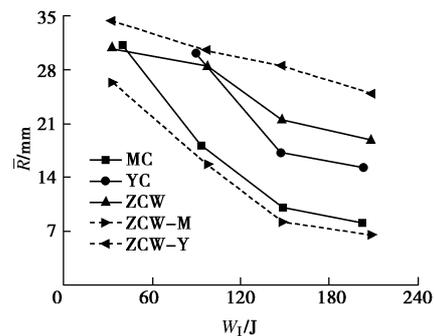


图 7 试件平均破碎块度与入射能关系

Fig. 7 Relationship between average fragment size and incident energy

对于组合体的两种组分, 岩组分和煤组分平均破碎块度分别位于组合体整体破碎块度上下两侧, 岩组分平均破碎块度与组合体相对更接近, 说明组合体的平均破碎块度更多的取决于岩组分的破碎块度。实际上筛分过程中可发现, 组合体破坏后尺寸较大的碎块多来自岩组分, 其质量相对孔径较小筛孔下的碎块质量要大得多, 因此根据式 (6) 亦不难得到此规律。相同入射能下, 组合体岩组分破碎块度大于岩单体, 这与 3.1 节破碎形态是一致的, 煤组分破碎块度则小于煤单体。说明了冲击荷载下, 两种组分的吸能能力相对单体试件发生了改变, 冲击过程中的能量耗散并不是按 2.2 节假设那样。下文将探究两种组分具体的能量耗散情况。

4 组合体煤、岩组分耗能分析

上文2.2节与3.2节分别从破碎耗能密度与平均破碎块度两个方面定性的推断出了组合体两个部分吸能情况与单体试件存在差异。为定量研究两种组分的耗能情况,获取煤、岩两组分各自能量吸收值,现作假设:当煤、岩两组分破碎程度与对应单体相同时,两组分各自吸收能量与对应单体相等。据此,由图7可得到与组合体两个组分破碎块度对应相等的单体试件的入射能,再根据图6数据,即可得到不同入射能下两个组分的破碎耗能密度。在求取两部分岩体破碎耗能密度时,将图7中单体相邻两入射能等级间平均破碎块度看作线性变化,未破坏试件平均破碎块度看作50 mm,求得结果见表3,其中入射能为各试件的平均值。

表3 组合体煤、岩两种组分破碎耗能密度预测值

Table 3 Predicted values of energy dissipation density of two sections of combined body

W_1/J	MC	YC	ZCW	ZCW-M	ZCW-Y
32.7	0.091	—	0.082	0.139	0.318
97.2	0.212	0.383	0.187	0.292	0.367
147.9	0.354	0.675	0.297	0.461	0.402
208.2	0.461	0.867	0.377	0.570	0.465

由表3中数据可知,煤、岩两组分能量耗散密度之和的平均值大于组合体,说明根据上述假设求得的煤、岩组分的破碎耗能密度至少有一种组分偏大。对于煤组分,其泊松比大于岩体部分,在扩容破坏过程中会受到岩组分的限制作用,从某种意义上说结合面处煤组分在径向变形过程中受到岩组分的“围压”作用。徐永福等^[22-23]研究表明,围压的存在使得试件分形维数偏大,碎块粒径偏小,即试件破碎块度变小。同样道理,岩组分对煤组分的限制作用使得煤体颗粒在冲击过程中相对煤单体接触更紧密,导致煤组分破碎程度更大,因此煤组分破碎耗能密度相对煤单体应有所偏大。当然,此限制作用是被动,表现在从煤组分产生径向变形开始至岩组分破坏前,该限制程度虽远不及真实围压加载情况,但多少存在。另外,从能量角度亦不难理解,冲击加载过程中,两种组分不断积聚能量,而储能极限较低的煤组分首先产生损伤破坏,岩组分积聚的更多能量会不断传递给煤组分,使煤组分破碎耗能密度大于相同入射能下的煤单体,同时,煤组分新生破坏面向结合面扩展贯穿又导致了岩组分破坏,当然后者破碎耗能密度会因此而减小。总之,所得煤组分破碎耗能密度大于煤单体的结论具有一定合理性。

对于岩组分,3.1节已分析其破碎形态特征,其破

坏形式呈明显的劈裂形式。而相同破碎块度下,单体试件产生的碎块表面有明显的摩擦痕迹,这说明单体试件破坏机制更为复杂,产生的粒内与粒间变形会更大,所吸收能量会更多^[24]。因此,相同破碎块度下岩组分的耗能会低于岩单体,表3中所求岩组分结果相比真实值应是偏大的。即便如此,该值仍然小于岩单体,这足可说明组合体中岩组分吸收的能量低于相同入射能下的岩单体。

表3中组合体煤组分与煤单体之间破碎耗能密度偏差相对岩组分与岩单体的差值要小,说明采用上述方法所求得的煤组分破碎耗能密度相对准确。不妨认为该值为准确值,那么岩组分的准确值即组合体破碎耗能密度与煤组分的差值将如图8所示。可见,组合体煤、岩两个组分破碎耗能密度随入射能变化与单体及组合体类似,均近似线性增加,但煤组分所吸收能量较岩组分大得多。

为直观分析煤、岩组分相对单体耗能变化,定义吸能比 P 为组合体中煤、岩组分破碎耗能密度与对应单体之比:

$$P = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_s} \quad (7)$$

式中, ε' 为组合体中煤、岩组分破碎耗能密度, ε_s 为对应单体试件的破碎耗能密度,所得煤、岩组分的吸能比见图8。煤组分 P_M 值大于1,为1.23~1.53,且随着入射能的增加有下降趋势。岩组分的 P_Y 值小于1,为0.04~0.22,表明组合体破坏过程中岩组分吸收的能量相对岩单体大大减小,且减小幅度比煤组分增加的幅度更大,这也是组合体整体破碎耗能密度低于煤单体的原因。

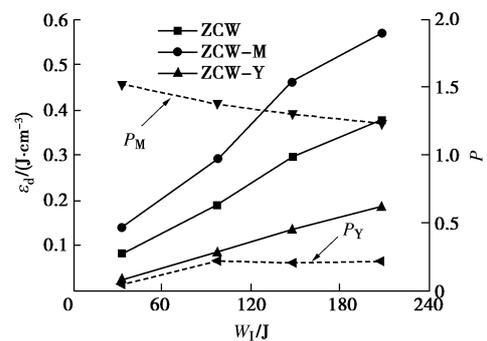


图8 煤、岩组分破碎耗能密度与吸能比变化

Fig. 8 Energy dissipation densities and energy absorptions proportion of coal and rock sections of combined body

5 讨论

试件破坏过程中,其能量演化与破坏特征是密切相关的,理论上说,同等冲击强度下,同种试件的破

碎程度应大致相同, 即相同入射能下同种试件平均破碎块度应相同。笔者将组合体能量耗散与平均破碎块度联系起来, 通过与单体试件能量耗散与平均破碎块度特征进行对比, 得到了煤、岩组分的破碎耗能规律, 此过程中所依据的标准实际上是单体试件平均破碎块度与破碎耗能密度之间的关系。组合结构的存在致使组合体破坏模式与单体不同, 虽然达到相同的破碎块度, 但碎块的表面形态并不相同, 耗散的能量不同, 因而对组合体的煤组分或岩组分能量耗散推测可能存在误差。煤、岩组分的真实耗能规律是很难通过计算求得的, 笔者通过此种方法所得结果虽与真实值可能存在一定偏差, 但足以反映组合体冲击破坏过程中煤、岩两个组分的能量耗散与分配情况。

6 结 论

(1) 单体与组合体试件的反射能、透射能及吸收能均随入射能的增加呈线性增加。相同冲击强度下, 波阻抗较大的岩单体中的应力脉冲更强烈, 导致破碎耗能密度及其随入射能增长速率大于波阻抗较低的煤单体。组合体中应力脉冲传播较复杂, 而组合体整体破碎耗能密度与煤单体接近。

(2) 3种试件平均破碎块度随入射能增加逐渐减小。不同泊松效应致使组合体冲击压缩过程中两种组分破坏模式与单体不同。岩组分对煤组分的径向变形抑制作用, 使得煤组分储能极限增大, 破碎程度大于同等冲击强度下的煤单体; 煤组分破坏过程中岩组分的能量“补给”亦加剧了煤组分破坏程度。相反, 岩组分由于受到煤组分的径向拉裂作用及本身弹性能的转移, 破碎程度较岩单体小得多。

(3) 组合体冲击破坏过程中, 煤组分能量集聚与破碎吸能能力明显大于对应煤单体, 说明复合煤岩体的冲击地压和煤与瓦斯突出比单一的煤体更加危险, 发生动力灾害所需的能量更低。在对复合煤岩巷道动力灾害机理认识上及采取防治措施时应考虑此特性。

参考文献:

[1] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(2): 205 - 213. (JIANG Yao-dong, PAN Yi-shan, JIANG Fu-xing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(2): 205 - 213. (in Chinese))

[2] 马念杰, 赵希栋, 赵志强, 等. 深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J]. 煤炭学报, 2015, **40**(10): 2287 - 2295. (MA Nian-jie, ZHAO Xi-dong, ZHAO Zhi-qiang, et al. Stability

analysis and control technology of mine roadway roof in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, **40**(10): 2287 - 2295. (in Chinese))

[3] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2803 - 2813. (HE Man-chao, Xie He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2803 - 2813. (in Chinese))

[4] 左建平, 陈岩, 张俊文, 等. 不同围压作用下煤-岩组合体破坏行为及强度特征[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(11): 2706 - 2713. (ZUO Jian-ping, CHEN Yan, ZHANG Jun-wen, et al. Failure behavior and strength characteristics of coal-rock combined body under different confining pressures[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(11): 2706 - 2713. (in Chinese))

[5] 左建平, 谢和平, 吴爱民, 等. 深部煤岩单体及组合体的破坏机制与力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(1): 84 - 92. (ZUO Jian-ping, XIE He-ping, WU Ai-min, et al. Investigation on failure mechanisms and mechanical behaviors of deep coal-rock single body and combined body[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, **30**(1): 84 - 92. (in Chinese))

[6] 宫凤强, 叶豪, 罗勇. 低加载率范围内煤岩组合体冲击倾向性的率效应试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, **42**(11): 2852 - 2860. (GONG Feng-qiang, YE Hao, LUO Yong. Rate effect on the burst tendency of coal-rock combined body under low loading rate range[J]. Journal of China Coal Society, 2017, **42**(11): 2852 - 2860. (in Chinese))

[7] 解北京, 严正. 基于层叠模型组合煤岩体动态力学本构模型[J]. 煤炭学报, 2019, **44**(2): 463 - 472. (XIE Bei-jing, YAN Zheng. Dynamic mechanical constitutive model of combined coal-rock mass based on overlay model[J]. Journal of China Coal Society, 2019, **44**(2): 463 - 472. (in Chinese))

[8] 张志镇, 高峰. 受载岩石能量演化的围压效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 1 - 11. (ZHANG Zhi-zhen, GAO Feng. Confining pressure effect on rock energy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(1): 1 - 11. (in Chinese))

[9] 陈岩, 左建平, 魏旭, 等. 煤岩组合体破坏行为的能量非线性演化特征[J]. 地下空间与工程学报, 2017, **13**(1): 124 - 132. (CHEN Yan, ZUO Jian-ping, WEI Xu, et al. Energy nonlinear evolution characteristics of the failure behavior of coal-rock combined body[J]. Chinese Journal of

- Underground Space and Engineering, 2017, **13**(1): 124 - 132. (in Chinese))
- [10] 邵光耀. 围压对煤岩组合体能量释放和耗散的影响[C]//北京力学会第二十四届学术年会, 2018, 北京: 264 - 267. (SHAO Guang-yao. Effects of confining pressure on energy release and dissipation of coal-rock combined body[C]//Proceedings of the 24th Annual Conference of Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, Beijing: 264 - 267. (in Chinese))
- [11] 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): 1 - 13. (CHEN Guang-bo, QIN Zhong-cheng, ZHANG Guo-hua, et al. Law of energy distribution before failure of loaded coal-rock combined body[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(6): 1 - 13. (in Chinese))
- [12] LU W B, YANG J H, YAN P, et al. Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in-situ stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, **53**(9): 129 - 141.
- [13] GONG F Q, YE H, LUO Y. The Effect of high loading rate on the behaviour and mechanical properties of Coal-Rock combined body[J]. Shock and Vibration, 2018: 1 - 12.
- [14] 马元, 靖洪文, 陈玉桦. 动压巷道围岩破坏机理及支护的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, **24**(1): 109 - 113. (MA Yuan, JING Hong-wen, CHEN Yu-hua. Numerical simulation of failure mechanism of surrounding rocks in mining induced roadway and its support[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, **24**(1): 109 - 113. (in Chinese))
- [15] 谭学术, 鲜学福. 复合层状岩体的变形及视在弹性模量[J]. 河北煤炭, 1985(1): 25 - 31. (TAN Xue-shu, XIAN Xue-fu. Deformation and apparent elastic modulus of bedded composite rock[J]. Hebei Coal, 1985(1): 25 - 31. (in Chinese))
- [16] 李成杰. 冲击荷载下裂隙复合岩体破坏试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018: 23 - 48. (LI Cheng-jie. Experimental Study on Failure Characteristics of Fissured Composite Rock Mass under Impact Load[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018: 23 - 48. (in Chinese))
- [17] LI D Y, HAN Z Y, ZHU Q Q, et al. Stress wave propagation and dynamic behavior of red sandstone with single bonded planar joint at various angles[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, **117**: 162 - 170.
- [18] 许金余, 刘石. 大理石冲击加载试验碎块的分析特征分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(11): 3225 - 3229. (XU Jin-yu, LIU Shi. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(11): 3225 - 3229. (in Chinese))
- [19] DENG Y, CHEN M, JIN Y, et al. Theoretical analysis and experimental research on the energy dissipation of rock crushing based on fractal theory[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, **33**: 231 - 239.
- [20] HOU T X., XU Q, ZHOU J W. Size distribution, morphology and fractal characteristics of brittle rock fragmentations by the impact loading effect[J]. Acta Mechanica, 2015, **226**(11): 3623 - 3637.
- [21] 洪亮. 冲击荷载下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 98 - 102. (HONG Liang. Size Effect on Strength and Energy Dissipation in Fracture of Rock under Impact Loads[D]. Changsha: Central South University, 2008: 98 - 102. (in Chinese))
- [22] 徐永福, 张庆华. 压应力对岩石破碎的分维的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(3): 193 - 200. (XU Yong-fu, ZHANG Qing-hua. Influence of confining pressure on fractal dimension of sandstone fragment distribution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(3): 193 - 200. (in Chinese))
- [23] 徐永福, 孙长龙, 俞鸿年, 等. 常温下砂岩的变形特征及其影响因素[J]. 岩土力学, 1995, **16**(1): 70 - 77. (XU Yong-fu, SUN Chang-long, YU Hong-nian, et al. Deformation characteristics of sandstone under normal temperature and affecting factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, **16**(1): 70 - 77. (in Chinese))
- [24] 张志镇. 岩石变形破坏过程中的能量演化机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013: 25 - 32. (ZHANG Zhi-zhen. Energy Evolution Mechanism During Rock Deformation and Failure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013: 25 - 32. (in Chinese))