

赵毅鑫, 龚爽, 黄亚琼. 冲击载荷下煤样动态拉伸劈裂能量耗散特征实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2320-2326. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.6007

Zhao Yixin, Gong Shuang, Huang Yaqiong. Experimental study on energy dissipation characteristics of coal samples under impact loading [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2320-2326. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.6007

冲击载荷下煤样动态拉伸劈裂能量耗散特征实验

赵毅鑫^{1,2}, 龚爽¹, 黄亚琼³

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究煤样动态拉伸变形破坏过程中的能量耗散规律, 利用分离式霍普金森杆冲击加载系统, 对煤样进行冲击条件下巴西圆盘劈裂试验, 探讨了冲击速度、层理倾角及饱和含水对煤样总吸收能密度、总耗散能密度和损伤变量的影响; 同时将煤样破碎后产生粒径为 0~0.2 mm 和 0.2~5 mm 的碎屑进行收集, 并对不同尺寸碎屑的分布特征进行了对比分析。研究表明: 同一层理倾角的自然煤样损伤变量随着冲击速度的增加呈近似线性增加, 饱水煤样损伤变量整体随冲击速度增大呈指数函数增加; 相比于自然煤样, 饱水煤样粒径为 0~0.2 mm 的碎屑量减少了 14.1%~31.3%, 粒径为 0.2~5 mm 的碎屑量减少了 33.7%~53.0%; 但当层理倾角为 45° 时, 饱水煤样碎屑量质量百分比反而比自然煤样要大。

关键词: 霍普金森压杆; 煤岩; 能量耗散; 层理; 饱和含水; 碎屑

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2015)10-2320-07

Experimental study on energy dissipation characteristics of coal samples under impact loading

ZHAO Yi-xin^{1,2}, GONG Shuang¹, HUANG Ya-qiong³

(1. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Lab of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The energy dissipation law of coal under different impact loading conditions was experimentally investigated by using a Split Hopkinson Pressure Bar. The indirect dynamic Brazilian disc split tension tests for coals were carried out. The total absorption energy density, total dissipated energy density and damage variable for different bedding angles under different impact velocities were analyzed and discussed. Meanwhile, the post-failure fragments of coal samples (0-0.2 mm and 0.2-5 mm) were collected and quantitatively analyzed to characterize the dynamic failure features for coal samples. Based on the experimental results, it was found that the damage variable of air dry coal specimens with the same bedding angle nearly linearly increases with the increase of impact velocity, and the damage variable of overall saturated coals increases exponentially with the increase of impact velocity. Except the bedding angle of 45°, 14.1% to 31.3% fragment reductions of 0-0.2 mm and 33.7% to 53.0% reductions of 0.2-5 mm were observed for the saturated coals compared to dry ones. For the bedding angle of 45°, the water saturation did not reduce fragments.

收稿日期: 2015-08-02 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174213); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226804); 中央高校基本科研业务费资助项目(2009QM01)

作者简介: 赵毅鑫(1977—), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 博士。Tel: 010-62339851, E-mail: zhaoyx@cumt.edu.cn

Key words: split Hopkinson pressure bar; coal; energy dissipation; layers; water saturated; rock fines

煤在动态拉伸破坏时的能量耗散规律及其碎屑分布特征与放顶煤开采中的爆破方案设计、煤巷支护和冲击地压及煤与瓦斯突出等灾害防治问题直接相关^[1]。能量是物理反应的本质特征,是物质发生破坏的内在因素,贯穿于煤岩变形破坏的整个过程,所以能量耗散的分析是阐明煤岩破碎机制的基本途径^[2-7]。但在冲击钻进、爆破和切削等采矿施工工艺中,用于破岩的有效能量相比于总输入能相当低,比如在切削和钻进过程中,只有约 10% 的输入能被用于有效破岩,而大部分输入能则以热或其它形式耗散^[8];在爆破中,用于破岩的能量利用率也只有 5%~15%^[9];Chi 等指出,实际用于破岩形成新的断裂表面的能量低于输入能的 1%^[10]。因此,进一步定量研究煤在动态拉伸破坏时的能量耗散规律及其碎屑分布特征,对于煤矿动力灾害防治、提高资源采出率和能源效率等均具有重要意义。

截至目前,国内外已有许多学者从能量角度出发研究岩石的变形破坏过程,并取得了不少有益的成果^[11-16]。不断增强了对岩石破碎能量耗散特征的认识,推动了采矿技术的发展,然而对于煤岩变形破坏过程中的能量耗散规律则鲜有报道,同时煤中含有一定量的原始水分并夹杂层理等原生结构,使得煤的动态拉伸测试结果离散性增加,因此有必要研究煤的层理和含水对其能量耗散特征的影响^[17]。

本文采用动态巴西劈裂试验对煤的能量耗散规律进行分析,开展了 90 个圆盘形煤样的 SHPB 冲击劈裂试验,探讨了冲击速度、煤样中层理倾角及饱和含水对煤样总吸收能密度、总耗散能、总耗散能密度和损伤变量的影响,对比分析了煤样动态劈裂过程中产生的不同尺寸碎屑的分布特征。

1 煤岩样 SHPB 动态冲击试验

1.1 煤岩样品

煤样取自大同忻州窑矿 11 号煤的二盘区 8935 工作面,系侏罗系煤层。为保证样品的物理力学性质具有一定的关联性,所有样品均由一块较完整的煤样切割加工而成。共加工测试用煤样 90 块,为 $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,直径平均值为 49.29 mm,厚度平均值为 25.27 mm,尺寸误差为 $\pm 1 \text{ mm}$,两端面打磨后平整度在 $\pm 0.05 \text{ mm}$,端面垂直轴线,最大偏差不大于 0.25° 。经测试得到煤样单轴抗压强度为 27.64 MPa,抗拉强度为 1.75 MPa,黏聚力 7.85 MPa,内摩擦角 32.64° ,弹性模量 2.29 GPa,泊

松比 0.24。由煤岩工业分析测定 11 号煤样水分为 4.13%,灰分 2.04%,固定碳 69.17%,属于特低灰分烟煤。

最终加工的 90 个巴西圆盘煤样如图 1 所示,其中 45 个煤样为自然含水状态,将其余 45 个煤样浸水 161 h 以达到饱和含水状态。自然和饱水状态煤样都按照层理倾角(层理面和冲击方向的夹角)不同划分为 5 组(0° , 22.5° , 45° , 67.5° 和 90°),如图 1 所示。为了保证煤样能够达到完全饱水状态,随机选取 5 个不同层理倾角的典型试样以记录并观测其吸水过程,如图 2 所示。结果显示 80 h 左右煤样质量基本保持恒定,表明煤样达到饱和含水状态。45 个饱水煤样的吸水率为 1.2%~2.4%。

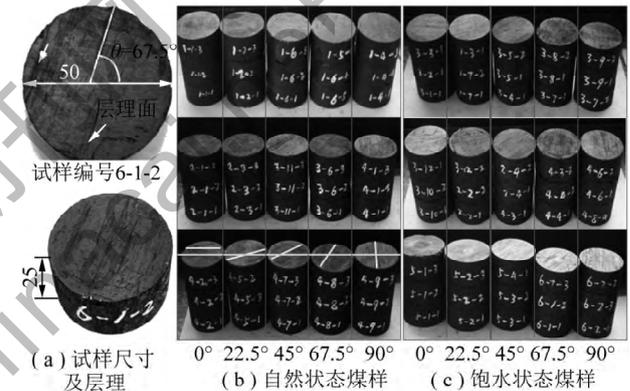


图 1 SHPB 动态冲击试样

Fig. 1 BD specimens for the SHPB tests

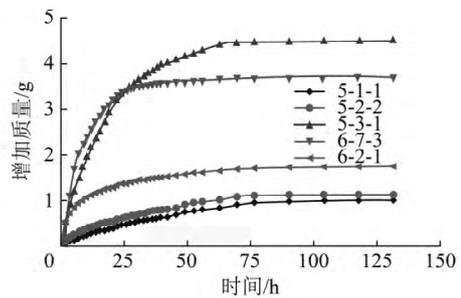


图 2 5 个典型试样吸水过程中质量增加曲线

Fig. 2 Water imbibition process curves for five typical samples

1.2 试验系统

煤岩动态冲击巴西劈裂试验在中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的 SHPB 系统上完成。试验用 SHPB 装置的钢质圆柱形子弹、输入杆和输出杆的直径均为 50 mm,长度分别为 400, 2 000 和 2 000 mm,分别在输入杆和输出杆距试件端部 1 m 位置处贴应变片,以记录杆体应变。子弹初速通过气室内的气压控制,而输入杆速则

采用光电法测量。

1.3 数据处理

霍普金森杆技术基于一维假定和应力均匀假定基础,根据应力均匀假定,采用三波法^[12]得到材料的动态应力-应变关系为

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = \frac{c}{l_s}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \\ \varepsilon(t) = \frac{c}{l_s} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \\ \sigma(t) = \frac{A}{2A_s} E(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 E 、 c 和 A 分别为压杆的弹性模量、弹性波波速和横截面积; A_s 和 l_s 分别为试样的初始横截面积和初始长度; ε_i 、 ε_r 和 ε_t 分别为杆中的入射、反射和透射应变。

从加载到卸载过程中入射波、反射波和透射波所携带的能量分别为 W_i 、 W_r 和 W_t , 试样总耗散能为 W_d , 总耗散能密度为 w_d , 其计算公式^[11-12] 如下:

$$\begin{cases} W_i = \frac{AC_b}{E_b} \int \sigma_i^2 dt = AE_b C_b \int \varepsilon_i^2 dt \\ W_r = \frac{AC_b}{E_b} \int \sigma_r^2 dt = AE_b C_b \int \varepsilon_r^2 dt \\ W_t = \frac{AC_{bt}}{E_{bt}} \int \sigma_t^2 dt = AE_{bt} C_{bt} \int \varepsilon_t^2 dt \end{cases} \quad (2)$$

$$W_d = W_i - W_r - W_t \quad (3)$$

$$w_d = W_d/V \quad (4)$$

式中 σ_i 、 σ_r 和 σ_t 分别为压杆上对应于入射波、反射波和透射波的应力; V 为试样体积; C_b 、 C_{bt} 、 E_b 和 E_{bt} 分别为输入杆、输出杆中声波传播速度和杆的弹性模量。

2 试验结果及分析

2.1 基于能量耗散的损伤变量定义

分离式霍普金森杆试验基于一维弹性应力波假设和均匀性假设,主要通过试验过程中的入射波、反射波和透射波的改变来反映试样应力应变响应特征。应力波穿过试样过程中,由于试样内部存在层理、裂隙并且伴随裂纹的生成和扩展,应力波所携带的能量逐渐衰减,其中入射波所携带的能量减去反射波和透射波所携带的能量之和,即为试样动态加载破坏所消耗的能量。这部分能量主要用于试样的损伤及破坏,其中还有一小部分转化为热能、声能和电磁辐射能等。

损伤的研究可以基于细观力学和宏观唯象学 2 种方法。在宏观唯象学中,可以定义面积、模量和能量等不同的损伤变量。黎立云等^[11]对砂岩试件进

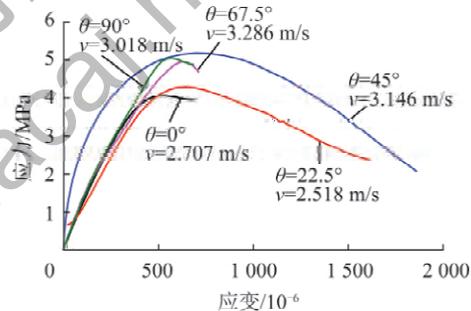
行了动态 SHPB 冲击破坏实验,并得到了不同冲击速度下砂岩试件受压破坏时的损伤变量。金丰年等^[14]基于对材料变形中的本构能及耗散能的认识,从能量耗散角度定义材料的损伤变量,给出了损伤变量及损伤阈值的理论公式,并依据循环加载计算了耗散能。因此,基于以往学者的研究成果,本文对于煤岩试件动态冲击受拉破坏的损伤变量 d 定义如下:

$$d = w_d/\mu \quad (5)$$

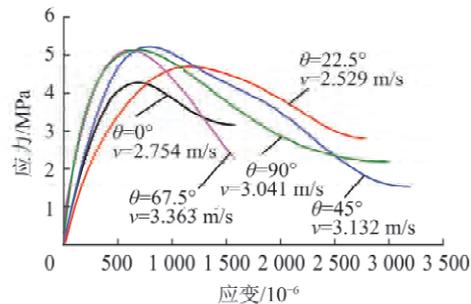
其中 μ 为试样破坏总吸收能密度,即煤样应力-应变曲线所围成的面积:

$$\mu = \int \sigma d\varepsilon \quad (6)$$

图 3 为自然和饱水煤样不同层理倾角的典型应力应变曲线,可以看出,饱水煤样都有一段较长的峰后曲线,表明其发生较大的变形。相比而言,自然煤样具有较低的峰值强度并且破坏前产生了较小的变形。煤样破坏总吸收能密度可由相应应力-应变曲线积分得到。



(a) 自然状态



(b) 饱水状态

图 3 不同层理倾角煤样应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of coal specimens with different bedding angles

2.2 SHPB 动态冲击下煤岩能量耗散规律

为分析煤样总吸收能密度、总耗散能、总耗散能密度和损伤变量对冲击速度、层理倾角及饱和含水的响应特征,试验成功获取了 41 个样品的能量耗散特征参数情况。表 1 给出了煤样各能量耗散特征参数的统计分布。分析发现:在冲击速度相近条件下,自然状态煤样中层理倾角为 45°时总吸收能密度最大,层理倾角为 90°时最小;此外,层理倾角为 0°的煤样

离散性最大,层理倾角为 22.5°时离散性最小。对于饱水煤样,层理倾角为 0°时总吸收能密度及离散性都最小,层理倾角为 45°总吸收能密度值最大,且层理倾角为 90°时离散性最大。自然煤样层理倾角为 45°时总耗散能密度最大,90°时最小;饱水煤样层理

倾角为 45°时总耗散能密度最大,0°时最小。自然煤样层理倾角为 67.5°时损伤变量最大,22.5°时损伤变量最小,且层理倾角为 45°时离散性最大;饱水煤样层理倾角为 67.5°时损伤变量及离散性都最大,层理倾角为 0°时损伤变量最小。

表 1 煤样能量耗散特征参数统计分布

Table 1 Statistical distribution of energy dissipation characteristic parameters of coal samples

含水状态	层理倾角 $\theta/(^\circ)$	冲击速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	总吸收能密度 $u/(J \cdot m^{-3})$	总耗散能 W_d/J	总耗散能密度 $w_d/(J \cdot m^{-3})$	损伤变量 d
自然	0	3.045 ₄ ±0.422 4	5 475.09 ₄ ±3 352	0.026 8 ₄ ±0.019 4	547.69 ₄ ±394.6	0.093 2 ₄ ±0.015 1
	22.5	2.847 2 ₅ ±0.578 2	5 357.56 ₅ ±1 202	0.023 ₅ ±0.01	472.478 ₅ ±199.4	0.085 1 ₅ ±0.017 8
	45	2.998 7 ₃ ±0.326 9	6 473.18 ₃ ±1 464	0.032 ₃ ±0.013	652.557 ₃ ±257.3	0.097 8 ₃ ±0.020 5
	67.5	3.088 ₅ ±0.712 7	5 004.94 ₅ ±1 466	0.024 4 ₅ ±0.007 8	509.472 ₅ ±163.3	0.103 8 ₅ ±0.018 1
	90	2.989 2 ₅ ±0.548	4 486.94 ₅ ±2 895	0.021 4 ₅ ±0.015 9	439.90 ₅ ±327.2	0.092 4 ₅ ±0.016 6
饱水	0	2.503 6 ₅ ±0.653	4 198.80 ₅ ±1 124	0.017 2 ₅ ±0.007 1	369.584 ₅ ±153.1	0.082 7 ₅ ±0.015 7
	22.5	2.702 8 ₄ ±0.356	8 036.25 ₄ ±2 742	0.033 3 ₄ ±0.013 5	679.353 ₄ ±277.8	0.083 1 ₄ ±0.008 7
	45	3.118 3 ₃ ±0.197	8 316.98 ₃ ±2 505	0.047 3 ₃ ±0.015 9	985.693 ₃ ±337.9	0.117 3 ₃ ±0.008 5
	67.5	3.225 3 ₃ ±0.303	6 339.03 ₃ ±2 489	0.036 ₃ ±0.010 5	749.95 ₃ ±224.9	0.125 8 ₃ ±0.034
	90	2.640 5 ₄ ±0.503	5 574.68 ₄ ±2 746	0.025 3 ₄ ±0.015 5	532.16 ₄ ±318.2	0.093 3 ₄ ±0.017

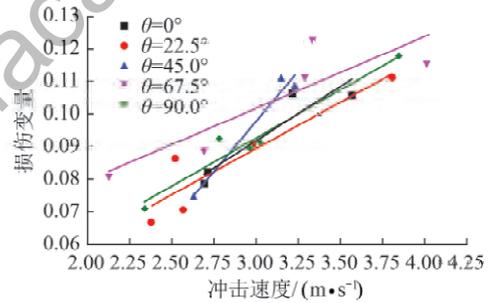
注:数据采用“平均值_{试样数量}±标准差”的形式表示。

图 4 给出了自然和饱水煤样的损伤变量与冲击速度之间的关系曲线。由图 4 可见,当冲击速度为 2.00~4.25 m/s 时,自然状态煤样的损伤变量在 0.06~0.13 范围内,当冲击速度为 1.5~3.6 m/s 时,饱水状态煤样的损伤变量在 0.06~0.16 范围内。可以看出,同一层理倾角的自然和饱水煤样损伤变量随着冲击速度的增加呈近似线性增加,当冲击速度小于 3.1 m/s 时,层理倾角为 67.5°的自然煤样损伤变量最大,冲击速度为 3.10~3.75 m/s 时,层理倾角为 45.0°的自然煤样损伤变量最大。饱水煤样整体损伤变量随冲击速度呈指数函数增加的关系,拟合函数即式(7),但层理倾角为 22.5°时饱水煤样整体损伤变量随冲击速度变化拟合曲线呈下降趋势。该现象主要由冲击速度为 3.233 m/s 时样品的损伤变量较小导致,其可能因对应条件下样品的离散性所致,但并不影响总体规律的提取。

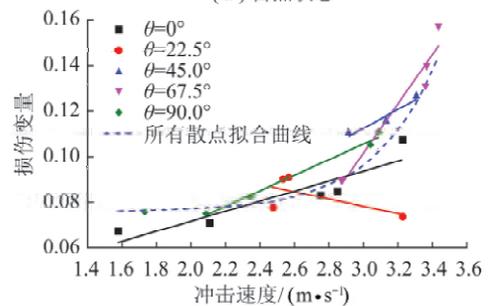
$$d = 5.692 \times 10^{-6} e^{\frac{v}{0.3656}} + 0.07565 \quad (7)$$

2.3 碎屑分布特征

试验过程中,对每个煤样破碎后处于 0~0.2, 0.2~0.3 和 0.3~5 mm 范围内的碎屑进行收集、筛选和称重,图 5 为煤样在 1.58~3.882 m/s 的冲击速度范围内层理倾角分别为 0°,45°和 90°的碎屑粒径统计(煤样从左到右的粒径分别为 0~0.2,0.2~0.3,0.3~5 mm),可以看出,随着冲击速度的增大,同一层理倾角的煤样破坏后粒径为 0~0.2 和 0.2~



(a) 自然状态



(b) 饱水状态

图 4 煤样损伤变量与冲击速度的关系

Fig. 4 Relationship between damage variable and impact velocity of coal

0.3 mm 的碎屑量随之增加,这是由于在 SHPB 试验中,冲击加载速率越大,入射波携带的能量就越大,煤样的总耗散能密度和损伤变量也就越大,有更多的能量被煤样吸收用于产生小粒径碎屑。其中粒径 0.3~5 mm 的碎屑形状主要为片状、块状和颗粒状。

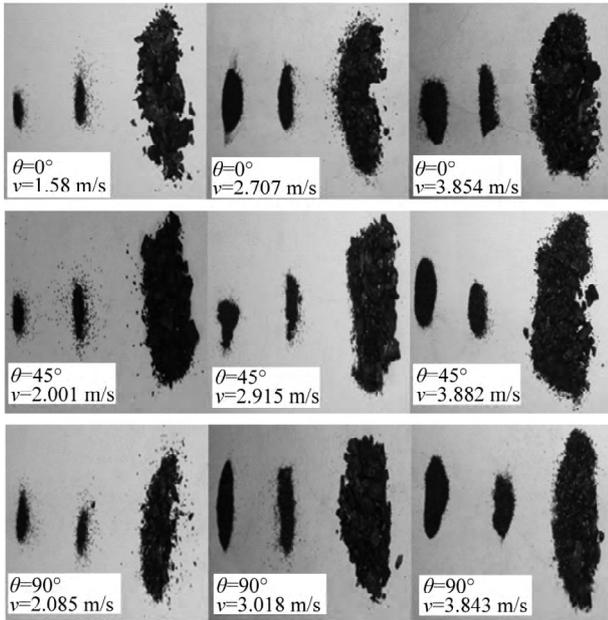


图 5 不同层理倾角和冲击速度下煤样的碎屑粒径统计
Fig. 5 Size statistics of fragments of coal with different bedding angles under the impact loading

图 6 分别为动态冲击荷载作用下不同层理倾角的自然煤样和饱水煤样碎屑粒度为 0~0.2 和 0.2~5 mm 的分布,由于煤样破碎后各粒径的质量百分比分布范围较大,为更好地反映其分布特征,图中采用半对数坐标。结合半对数坐标的刻度特点可知,对于碎屑粒径为 0~0.2 mm 的自然或饱水煤样,其碎屑质量百分比随冲击速度的增加变化不大(0.448 9%~0.776%)。然而,对于碎屑粒径为 0.2~5 mm 的自然或饱水煤样,其碎屑质量百分比随冲击速度的增加明显增大(3.533%~11.879%),并且碎屑粒径为 0.2~5 mm 的饱水煤样的质量百分比明显少于相同冲击速度下的自然煤样。文献[18~20]中的现场注水防尘研究表明,在注水区域灰尘产生量下降 38%~50%,因此本结论从试验角度很好地印证了采矿过程中的注水降尘技术原理。

表 2 为自然和饱水煤样冲击加载后两种粒径尺寸的碎屑平均值统计。可以看出,层理倾角为 67.5° 的自然煤样粒径为 0~0.2 和 0.2~5 mm 的碎屑质

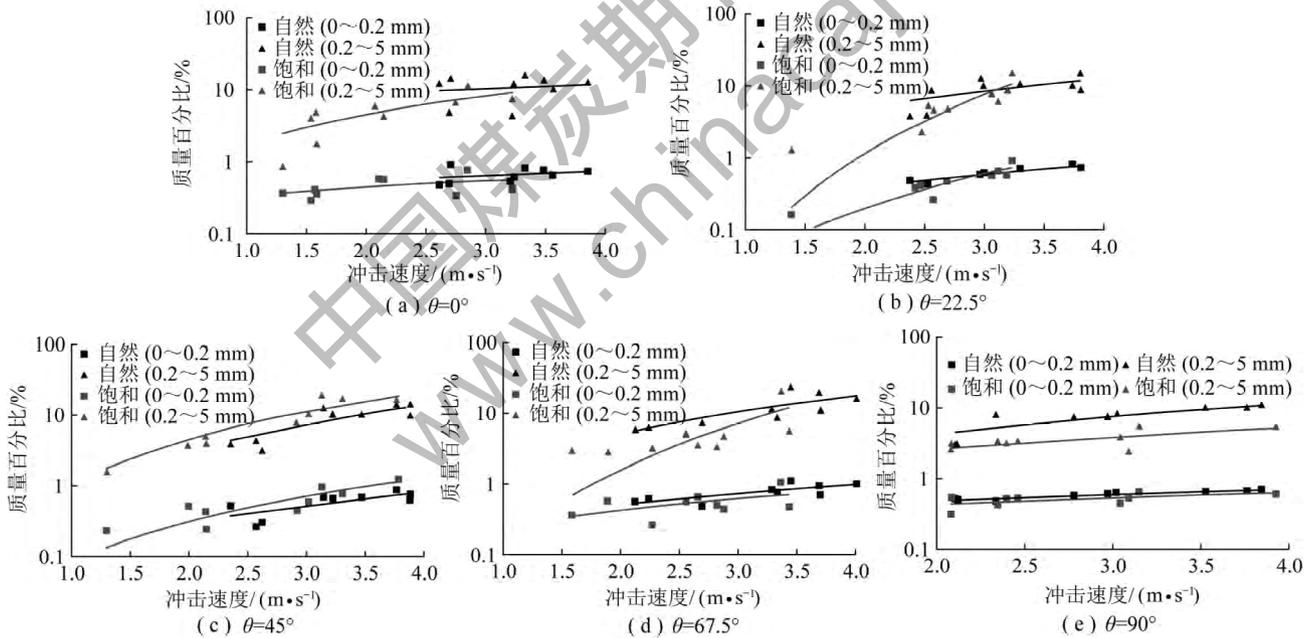


图 6 动态冲击荷载作用下不同层理倾角的自然和饱水煤样碎屑粒度分布

Fig. 6 Size distribution of fragments of air dry coal and water saturated coal specimens after failure under the dynamic impact loading

表 2 自然和饱水煤样冲击加载后两种粒径尺寸的碎屑平均值统计

Table 2 Average amounts of two scales fragments of air dry and water saturated specimens after impact loading

层理倾角/ $^{\circ}$	质量百分比(0~0.2 mm, 自然, W_{d1}) /%	质量百分比(0.2~5 mm, 自然, W_{d2}) /%	质量百分比(0~0.2 mm, 饱水, W_{w1}) /%	质量百分比(0.2~5 mm, 饱水, W_{w2}) /%	$(W_{d1} - W_{w1}) / W_{d1}$ /%	$(W_{d2} - W_{w2}) / W_{d2}$ /%
0	0.653	10.551	0.448 9	5.007	31.255 700	52.544 78
22.5	0.617	9.004	0.487 8	5.968	20.940 030	33.718 35
45	0.593	8.970	0.602 0	9.183	-1.517 707	-2.374 60
67.5	0.776	11.879	0.540 0	5.579	30.412 370	53.034 77
90	0.589	7.418 9	0.506 0	3.533	14.091 680	52.378 38

量百分比均为最大,层理倾角为 90° 的自然煤样粒径为 $0\sim 0.2$ 和 $0.2\sim 5$ mm 的碎屑质量百分比均为最小;层理倾角为 45° 的饱水煤样粒径为 $0\sim 0.2$ 和 $0.2\sim 5$ mm 的碎屑质量百分比均为最大,层理倾角为 0° 的饱水煤样粒径为 $0\sim 0.2$ mm 的碎屑质量百分比最小,层理倾角为 90° 的饱水煤样粒径为 $0.2\sim 5$ mm 的碎屑质量百分比最小。相比于自然煤样,饱水煤样粒径为 $0\sim 0.2$ mm 的碎屑量减少了 $14.1\%\sim 31.3\%$,粒径为 $0.2\sim 5$ mm 的碎屑量减少了 $33.7\%\sim 53.0\%$ 。但当层理倾角为 45° 时,碎屑粒径为 $0\sim 0.2$ 和 $0.2\sim 5$ mm 的饱水煤样碎屑质量百分比反而比自然煤样要大,产生该现象的原因有待进一步研究,但以往的现场观测发现,注水防尘的效果与煤的层理有很大关系,煤层层理与长壁工作面开采方向夹角是其重要影响因素^[21]。

3 结 论

(1) 饱水煤样应力应变曲线都有一段较长的峰后段,表明其发生较大的变形。相比而言,自然煤样具有较低的峰值强度并且破坏前产生了较小的变形。

(2) 动态冲击下的煤样,随着冲击速度的增大,损伤变量 d 越大,并且饱水煤样整体损伤变量 d 随着冲击速度增大呈指数函数增加。

(3) 对于碎屑粒径为 $0\sim 0.2$ mm 的自然或饱水煤样,其碎屑质量百分比随冲击速度的增加变化不大。然而,对于碎屑粒径为 $0.2\sim 5$ mm 的自然或饱水煤样,其碎屑质量百分比随冲击速度的增加明显增大,并且碎屑粒径为 $0.2\sim 5$ mm 的饱水煤样的质量百分比明显少于相同冲击速度下的自然煤样。

(4) 相比于自然煤样,饱水煤样粒径为 $0\sim 0.2$ mm 的碎屑量减少了 $14.1\%\sim 31.3\%$,粒径为 $0.2\sim 5$ mm 的碎屑量减少了 $33.7\%\sim 53.0\%$ 。但当层理倾角为 45° 时,碎屑粒径为 $0\sim 0.2$ 和 $0.2\sim 5$ mm 的饱水煤样碎屑质量百分比反而比自然煤样要大。

参考文献:

[1] 赵毅鑫,赵高峰,姜耀东,等.基于微焦点 CT 的煤岩微观破裂机理研究[M].北京:科学出版社,2013:65-70.
Zhao Yixin, Zhao Gaofeng, Jiang Yaodong, et al. Study on microscopic rupture mechanism of coal based on micro-computed tomography [M]. Beijing: Science Press, 2013: 65-70.

[2] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002:63-71.
Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002: 63-71.

[3] 谢和平,彭瑞东,鞠杨.岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3565-3570.

Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3565-3570.

[4] 鞠杨,李业学,谢和平,等.节理岩石的应力波动与能量耗散[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2426-2434.
Ju Yang, Li Yexue, Xie Heping, et al. Stress wave propagation and energy dissipation in jointed rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2426-2434.

[5] 赵忠虎,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.
Zhao 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.

[6] 胡柳青,李夕兵,赵伏军.冲击荷载作用下岩石破裂损伤的耗能规律[J].岩石力学与工程学报,2002,21(S2):2304-2308.
Hu Liuqing, Li Xibing, Zhao Fujun. Study on energy consumption in fracture and damage of rock induced by impact loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(S2): 2304-2308.

[7] Whittles D N, Kingman S, Lowndes I, et al. Laboratory and numerical investigation into the characteristics of rock fragmentation [J]. Minerals Engineering, 2006, 19(14): 1418-1429.

[8] Carroll M M. Mechanics of geological materials [J]. Applied Mechanics Division, 1985, 70(38): 1256-1260.

[9] Revnintsev V I. We really need revolution in comminution [A]. XVI International Mineral Processing Congress [C]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988: 93-114.

[10] Chi G, Fuerstenau M C, Bradt R C, et al. Improved comminution efficiency through controlled blasting during mining [J]. International Journal of Mineral Processing, 1996, 47(1): 93-101.

[11] 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 velocity [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2007-2011.

[12] 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 Jinyu, 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.

[13] 赵阳升,冯增朝,万志军.岩体动力破坏的最小能量原理[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1781-1783.
Zhao Yangsheng, Feng Zengchao, Wan Zhijun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1781-1783.

[14] 金丰年,蒋美蓉,高小玲.基于能量耗散定义损伤变量的方法[J].岩石力学与工程学报,2004,23(12):1976-1980.
Jin Fengnian, Jiang Meirong, Gao Xiaoling. Defining damage variable based on energy dissipation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 1976-1980.

[15] 华安增,孔园波,李世平,等.岩块降压破碎的能量分析[J].煤

- 炭学报,1995(4):389-392.
- Hua Anzeng ,Kong Yuanbo ,Li Shiping ,et al.Energy analysis of de-pressurized rock fracture [J]. Journal of China Coal Society , 1995(4):389-392.
- [16] Bohloli B ,Hoven E.A laboratory and full-scale study on the frag-mentation behavior of rocks [J]. Engineering Geology ,2007 , 89(1):1-8.
- [17] 赵毅鑫 ,肖 汉 ,黄亚琼.霍普金森杆冲击加载煤样巴西圆盘劈裂试验研究[J].煤炭学报,2014,39(2):286-291.
- Zhao Yixin ,Xiao Han ,Huang Yaqiong.Dynamic split tensile test of Brazilian disc of coal with split Hopkinson pressure bar loading [J]. Journal of China Coal Society ,2014,39(2):286-291.
- [18] Cervik J ,Sainato A ,Baker E.Water infusion: An effective and eco-nomical longwall dust control [R].U.S.Department of the Interior , Bureau of Mines ,Pittsburgh ,PA ,1983:13-20.
- [19] McClelland J J ,Organiscak J A ,Jankowski R A ,et al.Water infu-sion for coal mine dust control: Three case studies [R]. Bureau of Mines ,Pittsburgh ,PA.Pittsburgh Research Center ,1987:56-61.
- [20] Shirey G A ,Colinet J F ,Kost J A.Dust control handbook for long-wall mining operations [R].USBM Final Report.Monroeville ,PA , 1985:34-52.
- [21] Kissell F N.Information circular 9465 handbook for dust control in mining [M].U.S.Department of Health and Human Services , Public Health Service ,Centers for Disease Control and Prevention , National Institute for Occupational Safety and Health , DHHS (NIOSH) ,Pittsburgh ,PA 2003:39-57.

欢迎订阅 2016 年《煤炭学报》

《煤炭学报》是由中国煤炭学会主办、煤炭科学研究总院承办,面向国内外发行的煤炭科学技术方面综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科研成果和学术论文。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被 Ei、IEA Coal Abstract CD-Room、中国科学引文数据库、PJK、科学技术文摘速报、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖;1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖;1999 年荣获由中华人民共和国新闻出版署颁发的首届“中国期刊奖”;2001 年被新闻出版总署评为“双奖期刊”;2008、2011、2014 年荣获“中国精品科技期刊”称号;2009 年荣获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号;2004、2007、2010、2011、2012、2013、2014、2015 年荣获“百种中国杰出学术期刊”称号;2012、2013、2014 年荣获“中国最具国际影响力学术期刊”称号。

《煤炭学报》受到广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位,很多单位都将在《煤炭学报》发表的文章作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,每册订价 78 元,全年总订价 936 元。欲订阅者可直接向本编辑部索取订单,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭大厦 1204 室《煤炭学报》编辑部 邮政编码:100013

联系电话:(010)84263821-11 联系人:郑红瑞

E-mail:zhenghongrui@chinacs.org.cn ,mtxb@vip.163.com