

不同应变率下煤的动力学特征研究

Study on the Kinetic Characteristics of Coal under Different Strain Rates

李耀谦, 王晓东 (华阳新材料科技集团有限公司技术中心, 山西 阳泉 045000)

摘要:为探究煤在冲击破坏中表现出来的动力学特征,使用直径50 mm分离式霍普金森压杆装置试验系统对煤样进行不同应变率下的冲击破坏实验。结果表明:碎裂过程可以分为4个阶段,分别是压实阶段、线弹性阶段、裂纹扩展阶段、破坏阶段。在不同应变率下,煤样的应变随时间的增加而增加,应变率越大,煤样的应变-时程曲线斜率越大;煤岩的动态变形模量和动态抗压强度随应变率的增大而增大,并在一定范围内波动;煤样冲击破碎块度分布和应变率有明显的相关性。

关键词:分离式霍普金森杆;冲击破坏;动力学特性;应变率

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)04-0093-05

Abstract: In order to study the kinetic characteristics of coal under impact damage, the impact damage test under different strain rates is carried out on coal samples with the 50 mm diameter split Hopkinson pressure bar test system. The results show that the fragmentation process can be divided into four stages, namely the compaction stage, the linear elastic stage, the crack propagation stage and the damage stage. Under different strain rates, the strain of the coal sample increases with time. The larger the strain rate, the greater the strain-time curve slope of the coal sample; The dynamic deformation modulus and dynamic compressive strength of the coal increase with the increase of strain rate, and fluctuate within a certain range; There is a clear correlation between the coal sample impact crushing block distribution and the strain rate.

Key words: split Hopkinson pressure bar; impact damage; kinetic properties; strain rate

1 前言

煤炭是我国重要的基础能源,但近年来,随着煤矿的开采不断深入,开采难度越来越大,煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩动力灾害日趋严重,为了预防和减少事故的发生,需要对煤的动力学特征进行深入研究,分析煤的动态力学特征,了解煤的破坏规律,以此指导工程实践。潘结南^[1]等人通过对不同煤级煤的单轴压缩试验总结了煤的4种变形破坏形式,并分析了煤的变形破坏机制与冲击倾向性的关系;刘晓辉^[2]等人利用分离式霍普金森压杆(SHPB)对煤岩进行不同应变率下冲击试验,分析了不同应变率下煤的破坏特征;刘少虹^[3]等人通过对一维动静加载下组合煤岩动态破坏特性的实验,获得组合煤岩的动态强度和碎片分维随载荷的变化规律,揭示了裂纹数目、煤岩结构特性以及动静载荷对组合煤岩的破坏失稳的影响。

为了进一步研究煤在冲击破坏中表现出来的动力学特征,利用分离式霍普金森压杆测试系统对煤样进行冲击破坏实验,通过应力-应变曲线对煤样的破坏过程进行分析,并考察不同应变率与煤样的变形模量与动态抗压强度之间的关系。

2 实验装置及煤试样

2.1 实验装置及原理

实验采用直径50 mm分离式霍普金森杆,在中国矿业大学(北京)煤岩动载破坏力学测试实验室完成。SHPB实验系统包括子弹、压杆、测速系统、超动态应变仪和数据存储处理系统^[4],实验系统装置如图1所示。

实验采用直径为50 mm × 400 mm钢质圆柱体子弹,直径50 mm × 3 000 mm的钢制圆柱体入射杆,直径50 mm × 2 500 mm的钢制圆柱体透射杆,直径50 mm × 1 000 mm的钢制圆柱体吸收杆,压杆的弹性模量均为 $E = 206\ 000\ \text{MPa}$,子弹的冲击速度使用测速仪器测定,入射杆和透射杆上黏贴应变片,对应变脉冲进行记录,并通过超动态应变仪放大,实验采用超动态数据采集装置,系统型号为SDY2107A,4个通道进行数据采集,采样速率为 $10^7\ \text{s}^{-1}$ 。杆中应力波传播过程中存在由于杆的横向惯性造成的几何

[作者简介] 李耀谦(1970-),山西平定人,高级工程师,从事煤矿通风与安全、矿井瓦斯治理方面的研究。

[基金项目] 国家科技重点专项资助项目(2016ZX05067)

[引用格式] 李耀谦,王晓东. 不同应变率下煤的动力学特征研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(4):93-97.

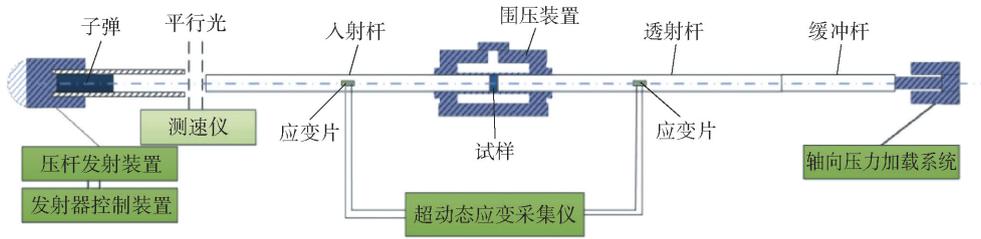


图1 实验系统示意图

弥散以及材料自身特性造成的本构弥散^[5-6],同时在实验环境中同样存在不可避免的环境噪声污染等干扰,因此在试验开始之前,需要对入射波形进行物理滤波和整形^[7-9],实验时采用直径20 mm、厚度1.5 mm的紫铜片作为整形器,黏贴于入射杆端与子弹撞击测的端面处。

SHPB系统试验的基本原理是通过系统进行加载,利用发射系统,将给予子弹固定速度使之撞入入射杆,撞击过程中在入射杆中会产生入射脉冲信号,此脉冲会继续穿过入射杆,当与试块接触时,在入射脉冲的作用下,试块会发生一定程度的形变,同时对入射杆产生反向的反射脉冲信号,对透射杆产生正向的透射脉冲信号,试验原理如图2所示。

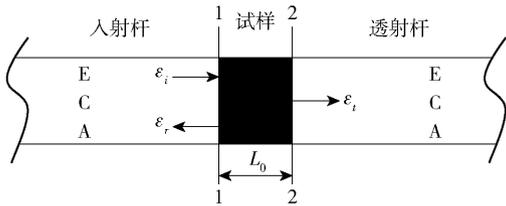


图2 试验原理图

$\epsilon_i(t)$ 是子弹撞击产生的入射波, $\epsilon_r(t)$ 是入射波在入射杆与试件接触面形成的反射波, $\epsilon_t(t)$ 是入射波穿过试件形成的透射波,通过入射杆和透射杆上的应变片采集,E、C、A分别为入射杆或透射杆的弹性模量、纵波波速和杆件的横截面积。

实验基本原理^[10-11]化简公式为

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C}{L_0}\epsilon_r(t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2C}{L_0} \int_0^t \epsilon_r(t) dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = E \frac{A}{A_0} \epsilon_t(t) \quad (3)$$

式中, $\dot{\epsilon}(t)$ 为加载应变率、 $\epsilon(t)$ 为试样的应变、 $\sigma(t)$ 为试样加载应力; $\epsilon_r(t)$ 、 $\epsilon_t(t)$ 分别为反射波应变、透射波应变; E 为弹性模量、 C 为压杆中的波速、 A

为压杆横截面积; A_0 为试件的横截面积、 L_0 为试件的厚度。

2.2 煤试样的制备

试样采用煤块取煤芯的方法制作,因为试样的尺寸差异会产生不同的惯性效应,严重影响实验结果,所以试样应尽可能选择合适的长径比才能更好的满足SHPB实验的两个假设条件^[12-13],根据李胜利^[14]等推荐的最佳长径比 L/D 为0.4~1.0,在此范围能够准确地反映材料的动态力学性能,因此本实验制备的试样直径为50 mm、长度为30 mm,长径比为0.6,为保证试件满足“均匀性”的假设,试件两端面采用高精度磨床精密加工打磨,确保两端面的不平行度 ≤ 0.02 mm,实验共制备试样10个,综合试样的质量以及尺寸最终确定5个强度接近的试样并进行编号,实验中需要将试样加持在入射杆和透射杆之间,为防止试样滑落,减少界面摩擦效应^[15-16],在试样与压杆接触的两个端面涂抹二硫化钼润滑,并保证试样与压杆紧密接触,试样制备和选定如图3、图4所示。



图3 试样制备

3 实验结果

3.1 实验参数

对煤样进行冲击压缩试验,通过霍普金森装置对5个加工的煤样进行不同应变率下的冲击破坏试验,排除实验失败的一个试样,最终得到4组数据,编号为W-Y-1到W-Y-4,利用origin通过二波法



图4 试样选取

(式3)计算可以得到煤样的动态应力参数,汇总见表1。

表1 试样力学参数汇总表

试样编号	直径/mm	厚度/mm	变形模量/GPa	应变率/s ⁻¹	抗压强度/MPa
W-Y-1	50.11	29.87	7.89	63.68	15.78
W-Y-2	50.07	29.93	9.07	89.14	21.79
W-Y-3	50.18	30.18	9.34	134.96	22.33
W-Y-4	49.92	29.78	17.14	170.82	24.12

3.2 应力-应变曲线

在煤样的冲击破坏实验中,根据数据采集的结果和式(1)~(3),可计算得到煤样的动态应力-应变曲线,绘制应力-应变曲线如图5所示。

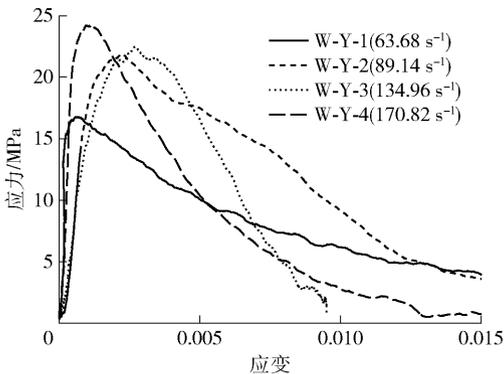


图5 不同速率下煤样应力应变曲线图

如图5所示,不同应变率下的煤样应力-应变曲线变化曲线规律基本一致。一般情况下,煤岩材料在达到应力极值之前的阶段具有较强的线弹性性质,在这个阶段中,不同应变率下获得的曲线偏离程度不大,并且能够较好地重叠。

以图6中W-Y-2为例,SHPB冲击破坏煤样应力应变曲线分为四个阶段,其中数字1表示压实阶段,2表示线弹性阶段,3表示裂纹扩展阶段,4表示

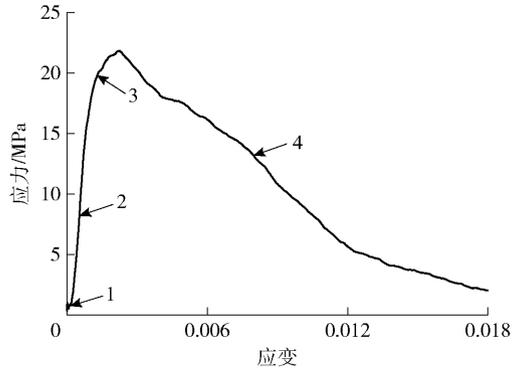


图6 W-Y-2 应力应变曲线图

破坏阶段。

压实阶段:在不同速度下,该阶段的应力应变曲线存在着明显的差别,当应变率最小时,应力-应变曲线的上凹型最显著,显示出最明显的压实阶段;随应变率的增加,煤样的压实阶段逐渐减小。

线弹性阶段:在此阶段中煤样的应力应变曲线基本呈直线趋势,随着试件形变的增加,应力呈正比例增长;由于煤样中的微裂纹在该阶段处于较稳定的状态,试件中的弹性变形状态不会发生本质上的转变,所以在该阶段的应力-应变曲线的斜率基本不变。

裂纹扩展阶段:在此阶段的应力是煤样的峰值强度,应力-应变曲线呈上凸趋势;此时半正弦弹性波产生的应力作用在煤样上,在应力波的作用下,试件内的新的裂缝从缓慢增加到稳定扩展,与原先存在的裂纹和主裂纹贯通,最终导致试件破坏;该阶段产生的应力是最大应力。

破坏阶段:煤样在此阶段发生破坏,应力-应变关系呈反比例下降,最后应力大小超过岩体的承载能力,试件快速变形,内部破裂面增多,试件承载力迅速下降,但最终仍具有一定的承载能力。

综上所述,不同应变率下的煤样的应力-应变曲线满足四个阶段的划分(压实阶段-近似线弹性阶段-屈服强化阶段-塑性承载变形阶段)。不同应变率条件下,煤样的线弹性阶段和裂纹扩展阶段持续时间不同。

图7所示为不同应变率下的应变时程曲线,在前10 μs之内,应变的变化差异性不大,比较缓慢,即使应变率的变化很大,应变的变化也并不明显,说明在此阶段,煤样并没有发生明显的变形,处于压实阶段;10~30 μs,随着应变率的增加应变的差异性越来越明显,曲线上升的速率随着应变率的增加而

增加,说明应力波对应变有明显影响,煤样在这段时间内处于线弹性阶段和裂纹扩展阶段,表面裂纹迅速增长,应变基本呈线性增加,但此现象随着应变率的增加而减弱;在 30 μs 后曲线趋于平稳,煤样处于破坏阶段,应变保持不变,表明煤样已经完成碎裂。

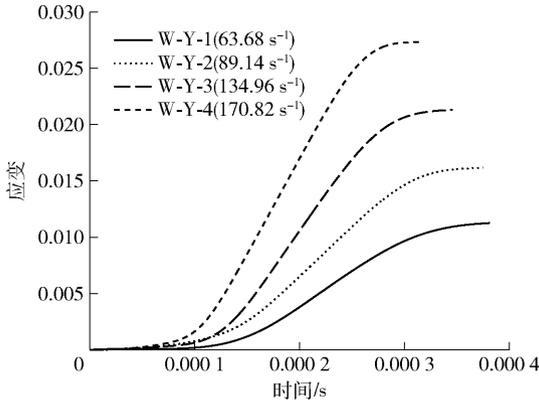


图7 不同应变率下的应变时程曲线

3.3 不同应变率下煤样力学参数的变化

试样的变形模量是研究煤岩应变率效应的重要参数,通常用平均模量表示,因为煤岩的应力-应变曲线几乎没有近似直线段,平均模量的起始点和中点无法确定。以割线模量作为变形模量^[17],对煤样的应变率与变形模量的关系进行分析

$$E_{50} = \sigma_{50} / \varepsilon_{50} \quad (4)$$

式(4)中, E_{50} 表示煤岩的变形模量 (GPa)、 σ_{50} 表示煤岩的动态抗压强度峰值的 50% (MPa)、 ε_{50} 表示煤岩的动态抗压强度峰值所对应的轴向应变值。

根据应力-应变曲线,得到变形模量,通过 Origin 计算,绘制应变率与变形模量的散点图,变化规律如图 8 所示。

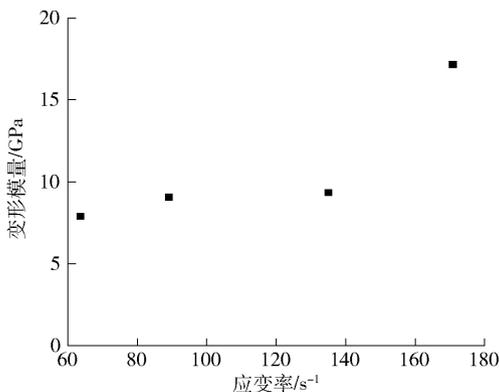


图8 不同应变率下弹性模量的变化规律

从图中可以看出:煤样的弹性模量随着应变率的增大而增大,当应变率较小时,煤样变形模量的变

化不大,当应变率增加到一定数值时,煤样的变形模量忽然增大,并在一定范围内波动。

为进一步研究煤样应变率效应,分析的应变率与动态抗压强度之间的关系,绘制应变率与动态抗压强度的散点图,变化规律如图 9 所示。

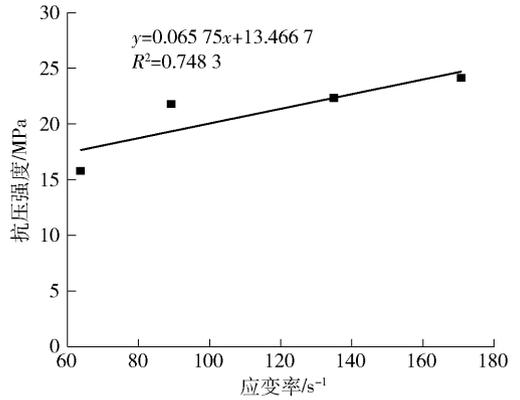


图9 不同应变率下抗压强度的变化规律

从图中可以看出,随着应变率的提高,煤样的抗压强度也随之增大,在一定的范围内波动。

4 破碎形态分析

图 10 所示为不同应变率下每样的破碎形态。由图可知,应变率依次增加时,煤样冲击破碎块度尺寸呈现出明显的减小,说明应变率对煤样的破碎形态有显著影响,两者具有明显相关性。

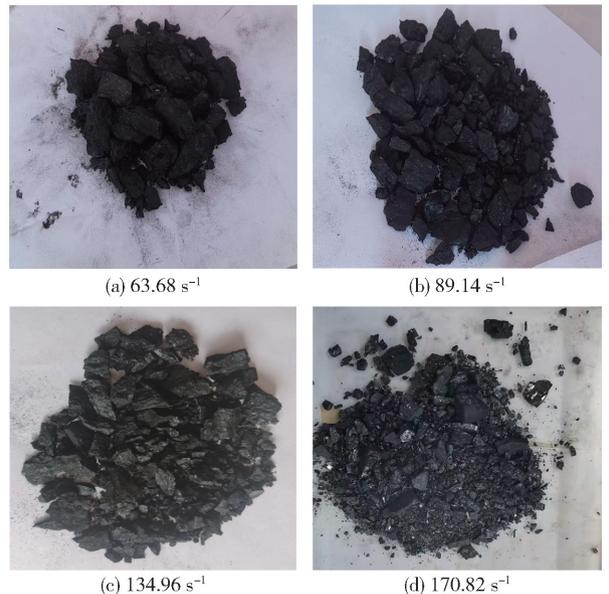


图10 煤样破碎特征

从图 10 可以看出,当煤样应变率为 63.68 s⁻¹ 时,煤样的块度相对较大,平均粒径在 15 mm 以上,

但随着应变率的增加,煤样的块度随之减小,粒径也逐渐降低;当煤样应变率为 89.14 s^{-1} 时,煤样的块度明显减小,煤样呈轴向劈裂的破坏形式;当煤样的应变率增加至 134.96 s^{-1} 时,破碎程度严重,粒径主要集中在 7 mm 以下;当应变率增加至 170.82 s^{-1} 时,煤样呈现出压碎破坏,破坏的形式从块状变为粉状,其主要是因为当应变率较高时,输入的能量也随之增加,用于破坏试件的能量占比就越多,加剧了煤样内部的裂纹扩展。

5 结论

(1) 在冲击加载作用下,应力波在煤样中传播,使煤样发生碎裂,应力-应变曲线可以分为四个阶段,分别是压实阶段、线弹性阶段、裂纹扩展阶段、破坏阶段,其中压实阶段煤样表面不发生明显变化,内部受力;在线弹性阶段,煤样的应力随应变呈正相关,内部的微裂纹不发生明显变化;在裂纹扩展阶段,煤样内部微裂纹向外扩展,最终导致煤样碎裂。

(2) 在不同应变率下,煤样的应变随时间变化显著,初始阶段,煤样的应变并不明显,随着时间的增加,煤样的应变随着应变率的增加而增加,且应变率越大,煤样的应力-时程曲线斜率越大。

(3) 煤岩的动态弹性模量和动态抗压强度随应变率的增大而增大,在较低的应变率下,煤岩的抗压强度变化不大,当应变率达到一定值,煤岩的抗压强度会发生明显变化,并在一定范围内波动。

(4) 煤岩冲击破碎块度分布与应变率有明显的相关性,应变率越大,碎煤的块度分布越小,粒径越小,并且当应变率增加到一定程度时,煤样破坏形态从块状变为粉状。

[参考文献]

[1] 潘结南. 煤岩单轴压缩变形破坏机制及与其冲击倾向性的关系[J]. 煤矿安全, 2006(8): 1-4.
 [2] 刘晓辉, 张茹, 刘建锋. 不同应变率下煤岩冲击动力试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1528-1534.
 [3] 刘少虹, 秦子晗, 娄金福. 一维动静加载下组合煤岩动

态破坏特性的试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2064-2075.

- [4] 王登科, 刘淑敏, 魏建平, 等. 冲击载荷作用下煤的破坏特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 594-600.
 [5] 孙国军, 薛琪琦, 朱珏, 等. 一种消除应力波传播中弥散效应的新方法[J]. 数值计算与计算机应用, 2014, 35(3): 206-220.
 [6] 王从约, 夏源明. 傅立叶弥散分析在冲击拉伸和冲击压缩试验中的应用[J]. 爆炸与冲击, 1998(3): 22-28.
 [7] 王永刚, 施绍裘, 王礼立. 采用改进的 SHPB 方法对泡沫铝动态力学性能的研究[J]. 实验力学, 2003(2): 257-264.
 [8] 任文科, 李汶峰, 王江波, 等. 整形器对 SHPB 入射波形影响规律的定量研究[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(9): 901-910.
 [9] 陈庚. 霍普金森杆波形整形技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
 [10] 张军. 围压条件下含水砂岩的动态力学性能试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
 [11] 张嘉凡, 高壮, 程树范, 等. 冲击荷载作用下煤岩动力特性试验研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(8): 23-27.
 [12] 金同希等. 冲击动力学[M]. 北京, 清华大学出版社, 2011.
 [13] 高宇. 煤岩组合体冲击破坏试验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
 [14] 李胜林, 刘殿书, 李祥龙, 等. $\Phi 75 \text{ mm}$ 分离式霍普金森压杆试件长度效应的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 93-97.
 [15] 吕晓聪, 许金余, 张龙, 等. 大直径 SHPB 系统角闪岩的冲击动力试验[J]. 兵工学报, 2010, 31(S1): 227-233.
 [16] 李为民, 许金余, 沈刘军, 等. $\Phi 100 \text{ mm}$ SHPB 应力均匀及恒应变率加载试验技术研究[J]. 振动与冲击, 2008(2): 129-132+181-182.
 [17] 李夕兵, 宫凤强, 高科, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 251-260.