

文章编号: 1673-3363-(2015)02-0317-08

高应变率下煤力学特性试验研究

李明¹, 茅献彪^{1,2}, 曹丽丽¹, 茅蓉蓉^{1,3}, 浦海¹

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 南通航运职业技术学院船舶工程系, 江苏 南通 226010)

摘要 利用 $\Phi 50$ mm 分离式霍普金森(Hopkinson)压杆(SHPB)试验系统, 对煤进行单轴冲击压缩试验, 明确煤的力学特性随应变率的变化规律。试验气压等级设计为 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 MPa, 为试样提供相应的 6 组不同应变率。试验结果表明: 高应变率下煤应力-应变曲线大致分为压密阶段、弹性变形阶段、微裂纹演化阶段、裂纹非稳定扩展阶段以及卸载阶段; 应变率升高缩短压密阶段, 延长弹性变形阶段; 随着应变率的升高, 煤动态弹性模量与峰值应力近似呈对数形式增加, 而峰值应变近似呈对数形式降低; 煤试样的破坏程度随应变率的升高而增加, 应变率由 68.666 s^{-1} 增加到 79.751 s^{-1} , 煤破坏程度对应变率的敏感性最为显著。研究结果可为采矿工程割煤参数的确定提供依据。

关键词 高应变率; 煤力学特性; 冲击载荷; 采矿工程

中图分类号 TD 315 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.023

Experimental study on mechanical properties of coal under high strain rate

LI Ming¹, MAO Xianbiao^{1,2}, CAO Lili¹, MAO Rongrong^{1,3}, PU Hai¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Ship Engineering Department, Nantong Shipping College, Nantong, Jiangsu 226010, China)

Abstract The mechanical properties of coal changing with the strain rate are proposed by impact uniaxial compression tests on split Hopkinson pressure bar (SHPB) equipment which with a diameter of 50 mm. Six different strain rates are provided for coal by designing test pressure levels with 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 and 0.55 MPa. Results of the tests are indicated as follows: Stress-strain curves of coal at high strain rates can be roughly divided into compaction phase, elastic deformation stage, micro-cracks evolution stage, crack unstable growth stage and unload stage. What's more, increased strain rate can shorten compaction phase and extended elastic deformation stage. With the increase of strain rate, the increment of dynamic elastic modulus and peak stress of coal can be approximately represented by a logarithmic trend, while decrement of the peak strain approximate logarithmic form. The damage extent of coal sample increases with the increasing strain rate, which becomes the most significant when

收稿日期: 2014-05-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB227900); 国家自然科学基金项目(51104128, 51227003, U1261201, 51322401); 教育部博士点基金项目(20120095110013); 江苏省高校研究生创新基金项目(KYLX_1371)

作者简介: 李明(1986—), 男, 山东省沂水县人, 博士研究生, 主要从事岩石动力学理论及实践方面的研究。

通信作者: 茅献彪 E-mail: xbmiao@cumt.edu.cn

Tel: 0516-83885058

strain rate increases from 68.666 s^{-1} to 79.751 s^{-1} . The results can be provided the basis for determining the rationalized parameters of cutting coal mining engineering.

Key words high strain rates; mechanical properties of coal; impact load; mining engineering

煤炭开采工程存在多种形式的冲击动力学问题^[1-3]。研究表明,实际的煤炭开采及储运过程中,作用在煤块上的应变率约在 $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 之间^[4]。因此,明确高应变率下煤的力学特性对于提高块煤率以及煤炭开采效率具有实际意义。

早在 20 世纪初,美英国家为了寻找理想的切割刀具及切割方法开始对高应变率下煤强度特性进行研究^[5-6]。J. R. Klepaczko 等^[7]对撞击载荷作用下煤的力学特性进行了分析,确定了煤力学参数对应变率的敏感性,首次对高应变率下煤的力学特性进行了研究。近年随着分离式霍普金森压杆(SHPB)技术在高应变率下岩石材料力学特性测试领域的广泛应用^[8-13],一些学者采用这一方法对高应变率下煤的力学特性进行了测试。单仁亮等^[14]对云驾岭煤矿无烟进行了冲击动力学试验,将煤动态力学本构曲线划分为 4 个阶段;刘文震^[15]利用 $\Phi 50 \text{ mm}$ SHPB 试验系统对煤的动态本构曲线进行了测试,结果表明低速冲击条件下煤应力-应变曲线的非线性表现更加明显;解北京等^[16-17]通过试验明确了煤力学特性的应变率效应,指出煤的初始弹性模量、屈服强度和极限强度都随应变率的增大而增大,塑性变形则先增大后减小;刘晓辉等^[18]对不同应变率下煤岩冲击动力特性进行研究,并对煤岩冲击破碎块度分形特征进行了分析,发现煤的破坏程度随应变率的增加逐渐升高,相应的耗能越大。此外,很多学者研究了基于采矿工程背景^[19-24],如瓦斯突出下应力波对煤变形破坏特征的影响,为煤炭安全开采提供了参考。

当前,冲击载荷作用下煤力学特性研究大多是定性分析,研究的应变率范围大多在 100 s^{-1} 以内,对实际采矿工程的指导价值有限。本文利用 SHPB

试验系统对煤进行了动力学试验,明确了煤在 $57.433 \sim 240.100 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内应力-应变曲线的基本特征,同时定量地分析了煤的力学特性参数随应变率的变化规律。研究结果能够为煤炭开采过程中作业参数的确定提供依据。

1 高应变率下煤的单轴压缩试验

1.1 试样采集及制备

本次试验所用煤样采自陕西榆林小纪汗煤矿-350 m 采煤工作面,试样制作在中国矿业大学力学实验室中完成。根据试验方案,试样加工为直径 50 mm、高 25 mm 的圆柱体。加工时首先用岩石取芯机钻取相同直径的岩样,然后用切割机截取相应高度的岩样,最后用打磨机将岩样的两端面磨平,确保试样两端面的平整度($<0.05 \text{ mm}$)和两端面平行度($<0.02 \text{ mm}$)。通过测量,试样加工精度满足《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)要求。

1.2 试验设备

本次试验采用中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的 $\Phi 50 \text{ mm}$ SHPB 试验系统,如图 1 所示,系统装置组成如图 2 所示。整个系统包括加载驱动系统、压杆系统、能量吸收系统、信号采集系统、信号处理系统 5 大部分,试样被夹放在入射杆和透射杆之间,如图 1b 所示。

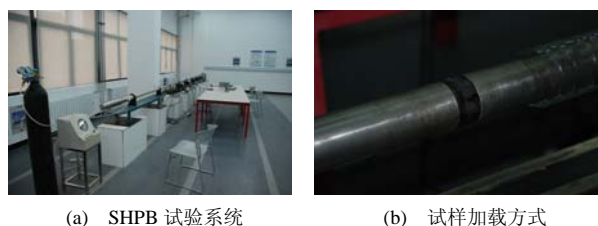


图 1 试验设备及试样加载方式

Fig.1 Test equipment and sample loading

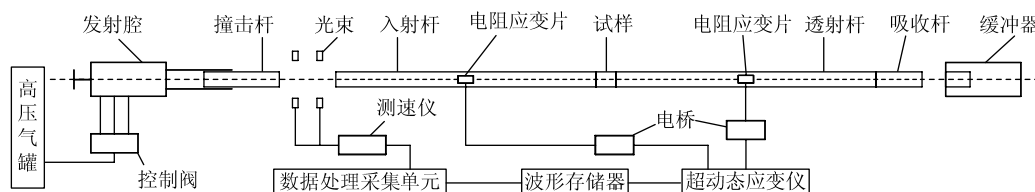


图 2 SHPB 试验系统装置组成

Fig.2 Device component of SHPB test system

试验过程中，撞击杆在高压气体的推动下与入射杆产生碰撞，在入射杆中形成入射脉冲；入射脉冲在入射杆中传播到达试样的两面时，该应力脉冲作用到试样上并在两端试样-杆界面多次反射透射，造成试样的高速变形；与此同时，一部分脉冲被反射，另一部分脉冲通过试样透射到入射杆中，分别形成了反射脉冲信号和透射脉冲信号。通过弹性压杆上的应变片，各信号分别被记录到信号采集系统内。

1.3 试验方法

试验中，通过改变系统输入气压为试样提供相应的应变率，试验设计了 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 和 0.55 MPa 计 6 组气压。通过测速仪测得了不同冲击载荷对应的撞击杆速度，利用三波法对试验数据进行了处理，得到了不同冲击载荷对应的煤试样的应变率。撞击杆速度与应变率随气压的变化规律如表 1 所列。

表 1 撞击杆速度 v 与试样应变率 $\dot{\epsilon}$ 随气压 p 的变化规律
Table 1 Speeds of bullet and strain rates of specimen under different pressures

| 编号 | 试样尺寸 (高×直径)/mm | 冲击气压 p / MPa | 撞击杆速度 v /(m·s ⁻¹) | | 平均应变率 $\dot{\epsilon}$ /s ⁻¹ | |
|----|-------------------|-------------------|---------------------------------|--------|---|---------|
| | | | 单块试样 | 算数平均值 | 单块试样 | 算数平均值 |
| 1 | 25.11×50.00 | 0.30 | 9.546 | 9.540 | 57.465 | 57.433 |
| 2 | 25.02×50.00 | | 9.554 | | 61.233 | |
| 3 | 24.99×50.00 | | 9.519 | | 53.602 | |
| 4 | 25.04×50.00 | | 14.228 | | 65.311 | |
| 5 | 25.21×50.00 | 0.35 | 14.551 | 14.380 | 66.870 | 68.666 |
| 6 | 25.11×50.00 | | 14.362 | | 73.818 | |
| 7 | 24.08×50.00 | | 17.112 | | 78.554 | |
| 8 | 25.25×50.00 | | 17.252 | | 76.801 | 79.751 |
| 9 | 25.10×50.00 | 0.40 | 17.411 | 17.258 | 83.899 | |
| 10 | 25.22×50.00 | | 18.662 | | 135.214 | |
| 11 | 25.08×50.00 | | 18.610 | | 131.529 | |
| 12 | 24.87×50.00 | | 18.785 | | 148.096 | |
| 13 | 25.12×50.00 | 0.45 | 20.514 | 18.686 | 187.214 | 138.280 |
| 14 | 24.96×50.00 | | 20.665 | | 187.358 | |
| 15 | 25.01×50.00 | | 20.653 | | 188.273 | |
| 16 | 24.98×50.00 | | 22.221 | | 237.287 | |
| 17 | 25.08×50.00 | 0.50 | 22.236 | 20.611 | 239.981 | 240.100 |
| 18 | 25.10×50.00 | | 22.451 | | 243.031 | |

为了获得可靠的应力-应变曲线，本文采用波形整形技术改善波形。当前 SHPB 试验研究过程中，波形整形器的材料有多种，如黄铜片、胶布等。通过测试，本文试验采用正方形橡胶片作为波形整形器，其边长 10 mm、厚度 3 mm。图 3 给出了使用波形整形器后的煤 SHPB 试验波形图，从中可以看出：应力波在传播过程中未出现显著的横向振动波形，能够较高地满足一维传播假设；入射波近似呈半正弦波形，具有较缓的上升沿，有利于试样实现应力均匀；反射波波形与入射波类似，透射波为半正弦波，其波峰值远小于其他 2 组波。

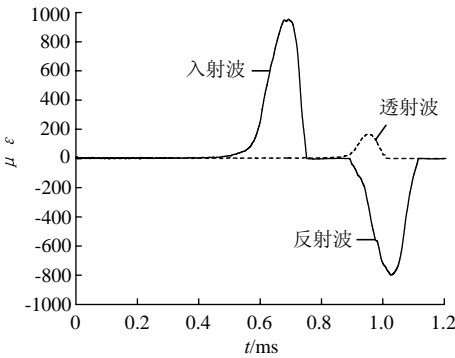


图 3 煤 SHPB 试验典型波形图
Fig.3 Typical waveform signals of coal in SHPB experiment

2 应力-应变曲线的变化特征

2.1 应力-应变曲线基本特征

图 4 给出了不同应变率下煤的全过程应力-应变曲线,从图中可得,高应变率下煤应力-应变曲线变化过程大致可分为以下 5 个阶段:

1) 压密阶段($d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$)。该阶段应力-应变曲线呈现下凹变化特征,造成这一特征的原因有 2 个: ① 压杆与试样之间逐渐压实。试验中,试样被夹持在入射杆和投射杆之间,由于试样表面涂抹了润滑剂,压杆与试样之间并不是完全密实接触,因此,试验初期压杆与试样之间会存在一个压实的过渡期。② 试样内部微裂纹的闭合。原始状态下,煤试样内部存在大量的微裂纹和微孔隙,在轴向应力的作用下,内部微裂纹逐渐闭合,微孔隙等缺陷逐渐收缩。压密阶段,试样在宏观上表现为抗变形能力不断增加。

2) 弹性变形阶段($d^2\sigma/d\varepsilon^2 = 0$)。该阶段应力随应变的增加基本呈直线上升,应力波在试样中经过多次反射达到应力、应变均匀。在这一阶段,作用在试样上的应力并不足以使试样中的裂纹扩展演化或者产生新的裂纹,仅能够使试样中原始裂纹处于稳定状态,或者产生小幅值的扩展,弹性能不断积聚,但试样的弹性变形状态没有发生质的变化。该阶段曲线斜率基本保持不变,可以作为煤的动态弹性模量。

3) 微裂纹演化阶段($d^2\sigma/d\varepsilon^2 < 0$)。该阶段应力随应变的增长缓慢增加,曲线呈上凸特征。由于作用在试样上的应力持续增加,导致试样内部的微裂纹逐渐扩展,并产生新的裂纹。由于微裂纹的发育和新裂纹的产生,塑性变形逐渐成为试样变形的主导。

4) 裂纹非稳定扩展阶段($d^2\sigma/d\varepsilon^2 < 0$)。该阶段应力-应变曲线呈现上凸特征,原有裂纹快速扩展,新裂纹大量产生,并与主裂纹贯通并最终导致试样贯穿。该阶段末,试样应力达到最大值,曲线斜率趋近于 0,此时的应力值即为峰值应力,对应的应变为峰值应变。

5) 卸载阶段($d\sigma/d\varepsilon < 0$)。该阶段应力随应变的增长快速下降。峰值应力后,两侧压杆对试样的夹持作用迅速下降,由于破碎试样迅速变形,压杆与试样的接触关系较为复杂,因此,不同试样的曲线变化特征差异性很大。

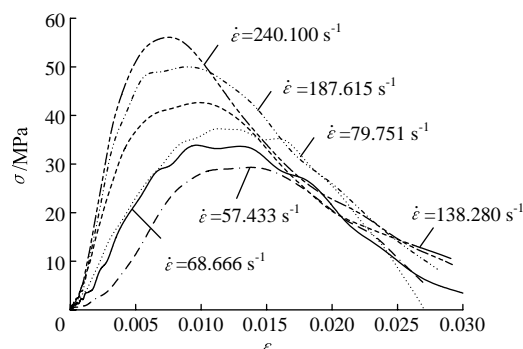


图 4 不同应变率下煤的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of coal at different strain rates

2.2 应变率对应力-应变曲线的特征影响

不同应变率下煤应力-应变曲线变化过程基本相似,但受到应变率的影响,不同曲线特征存在一定的差异。通过图 4 中各应变率下曲线特征的对比,可以看出:

1) 较低应变率下,试样压密阶段占峰前曲线比例较大,57.433 s⁻¹下达到 40%;随着应变率的升高,比例逐渐降低,在 240.100 s⁻¹下,压密阶段仅占峰前曲线的 5%左右。这是由于:较低应变率下,试样在初始阶段获得较低的能量,原始裂纹的闭合和微孔隙的收缩速度较慢,因此压密阶段较长;在高应变率下,试样内部原裂纹与为孔隙迅速闭合,导致压密阶段不明显。

2) 随着应变率的升高,试样弹性阶段占峰前曲线比例逐渐增大,应变率由 57.433 s⁻¹提高到 240.100 s⁻¹,这一比例由 15%左右增长到近 60%,提高了约 3 倍。这一差异的原因是由于高应变率下更多的裂纹参与到试样的变形中,从而导致试样抵抗变形的能力更强。

3) 应变率在 57.433~187.615 s⁻¹之间,应力-应变曲线峰值后存在一定的应变软化过程,而 240.100 s⁻¹下应力-应变曲线峰后不存在明显的应变软化过程。这是由于在高应变率下,达到峰值应力之后,反射应力波较大导致压杆与试样迅速分离,相互作用快速消失,作用在试样两端的应力快速下降。

3 煤力学特性的应变率效应

根据不同应变率下煤应力-应变曲线,得到了煤动态弹性模量 E_d 、峰值应力 σ_d 、峰值应变 ε_d 随应变率的变化规律,如表 2 所列。

表 2 煤力学特性参数随应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的变化规律
Table 2 Mechanical parameters of coal changing with strain rate $\dot{\varepsilon}$

| 编号 | 平均应变率 $\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$ | 动态弹性模量 E_d/GPa | | 峰值应力 σ_d/MPa | | 峰值应变 ε_d | |
|----|--|-------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------|----------|
| | | 单块试样值 | 算数平均值 | 单块试样值 | 算数平均值 | 单块试样值 | 算数平均值 |
| 1 | 57.433 | 4.152 | 4.310 | 29.112 | 29.319 | 0.013 3 | 0.013 8 |
| 2 | | 3.843 | | 29.308 | | 0.013 9 | |
| 3 | | 4.935 | | 29.537 | | 0.014 2 | |
| 4 | | 6.011 | | 31.256 | | 0.013 6 | |
| 5 | 68.666 | 4.133 | 4.971 | 36.415 | 33.655 | 0.012 5 | 0.013 0 |
| 6 | | 4.769 | | 33.294 | | 0.012 9 | |
| 7 | | 6.384 | | 36.441 | | 0.011 7 | |
| 8 | | 7.551 | | 36.554 | | 0.011 1 | |
| 9 | 79.751 | 6.012 | 6.649 | 38.800 | 37.265 | 0.011 4 | 0.011 4 |
| 10 | | 12.664 | | 45.446 | | 0.010 6 | |
| 11 | | 10.319 | | 41.443 | | 0.008 35 | |
| 12 | | 9.525 | | 41.019 | | 0.010 84 | |
| 13 | 138.280 | 13.994 | 10.836 | 48.774 | 42.636 | 0.008 85 | 0.009 93 |
| 14 | | 11.661 | | 49.225 | | 0.009 94 | |
| 15 | | 14.293 | | 52.025 | | 0.008 21 | |
| 16 | | 13.552 | | 59.475 | | 0.006 97 | |
| 17 | 240.100 | 14.325 | 14.430 | 56.117 | 56.083 | 0.007 64 | 0.007 54 |
| 18 | | 15.413 | | 52.657 | | 0.008 01 | |

3.1 动态弹性模量 E_d 的变化特征

动态弹性模量是煤在高应变率下抗变形能力的量度，图 5 给出了煤动态弹性模量 E_d 随应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的变化曲线。

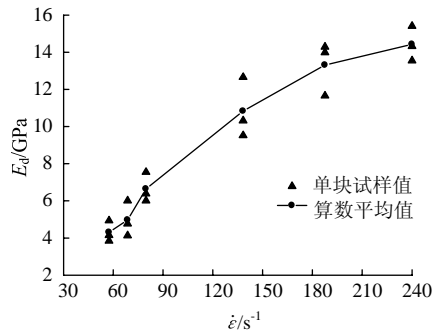


图 5 动态弹性模量 E_d 随应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的变化曲线
Fig.5 Changing curve on dynamic modulus of elasticity E_d changing with the strain rate $\dot{\varepsilon}$

由于试样之间的差异，导致同一应变率下煤动态弹性模量存在一定的离散性。但整体上，随着应变率的升高，动态弹性模量逐渐增加，应变率由 57.433 s^{-1} 升高到 240.100 s^{-1} ，动态弹性模量提高了约 2.35 倍。煤动态弹性模量随应变率的变化特征具体表现在：1) 应变率由 57.433 s^{-1} 升高到 79.751 s^{-1} ，动态弹性模量基本呈指数形式增长，由 4.310 GPa

增加到 6.649 GPa ，幅值约为 54.27%；2) 应变率由 79.751 s^{-1} 升高到 240.100 s^{-1} ，动态弹性模量基本呈直线形式增长，由 6.649 GPa 增加到 14.430 GPa ，提高了约 1.17 倍。

根据动态弹性模量随应变率的变化特征，利用曲线拟合方法得到了二者之间的函数关系：

$$E_d = 7.477 \ln \dot{\varepsilon} - 26.185 \quad R^2 = 0.9941 \quad (1)$$

从式(1)可以看出，随着应变率的升高，煤抗变形能力逐渐增强，在较高应变率下，增强趋势逐渐减缓。

3.2 峰值应力 σ_d 的变化特征

峰值应力即煤的单轴抗压强度，表征高应变率下煤的极限承载能力，是割煤过程重要的工艺参数。根据不同应变率下煤应力-应变曲线，得到了煤峰值应力 σ_d 随应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的变化曲线，如图 6 所示。从图 6 可看出，随着应变率的升高，煤峰值应力逐渐增大，整个变化过程分为 2 个阶段：1) 应变率由 57.433 s^{-1} 升高到 79.751 s^{-1} ，峰值应力呈直线形式迅速增加，由 29.319 MPa 增加到 37.265 MPa ，幅值约为 27.11%。2) 应变率由 79.751 s^{-1} 升高到 240.100 s^{-1} ，峰值应力以直线形式增加，但幅度较前一阶段减小，由 37.265 MPa 增加到 56.083 MPa ，幅值约为 50.50%。根据峰值应力随应变率的变化特征，得

到二者之间的函数关系:

$$\sigma_d = 17.266 \ln \dot{\varepsilon} - 39.767 \quad R^2 = 0.9769 \quad (2)$$

由式(2)可看出,峰值应力随应变率的变化趋势与动态弹性模量的变化趋势类似,表明应变率提高了煤的极限承载能力,但在较高应变率下煤的极限承载能力随应变率的升高增加趋势减缓。

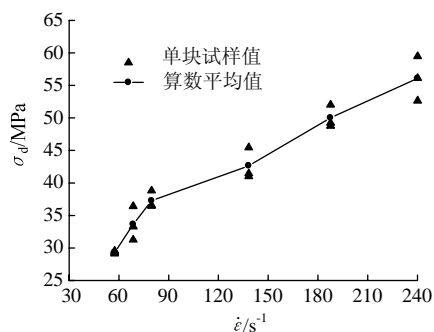


图 6 峰值应力 σ_d 随应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的变化曲线

Fig.6 Changing curve of peak stress σ_d changing with the strain rate $\dot{\varepsilon}$

3.3 峰值应变 ε_d 的变化特征

峰值应变是煤的基本力学特性参数之一,表征高应变率下煤的极限变形程度。峰值应变 ε_d 随应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的变化曲线如图 7 所示。

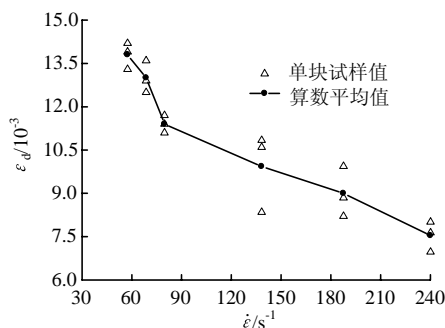


图 7 峰值应变 ε_d 随应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的变化曲线

Fig.7 Changing curve of peak strain ε_d changing with the strain rate $\dot{\varepsilon}$

从图 7 可看出,随着应变率的升高,煤的峰值应变逐渐减小,整个变化过程大致分为 2 个阶段:

1) 应变率由 57.433 s^{-1} 升高到 79.751 s^{-1} , 峰值应变呈直线形式迅速减小,由 0.013 8 减小到 0.011 4,幅值约为 17.39%; 2) 应变率由 79.751 s^{-1} 升高到 240.100 s^{-1} , 峰值应变以直线形式减小,但幅度较前一阶段降低,由 0.011 4 减小到 0.007 54,幅值约为 33.86%。基于这一变化特征,利用曲线拟合方法得到煤峰值应变与应变率之间的函数关系:

$$\varepsilon_d = 0.00405 \ln \dot{\varepsilon} + 0.0299 \quad R^2 = 0.9685 \quad (3)$$

式(3)表明,随着应变率的升高,煤的极限变形程度以对数形式逐渐降低;这主要是由于随着应变率的升高,更多的裂纹对试样的破坏产生作用,使得试样在较小变形范围被贯穿。

3.4 煤试样的破坏特征

图 8 给出了不同应变率下煤试件的破坏形态,从图中可以看出,不同应变率下煤试样均已破坏。在 57.433 s^{-1} 及 68.666 s^{-1} 应变率下,试样破坏程度较低,存在原试件轴向等高的碎块,具有良好的块煤度。应变率由 79.751 s^{-1} 增加到 240.100 s^{-1} , 试样破坏后小体积碎块数量逐渐增多。

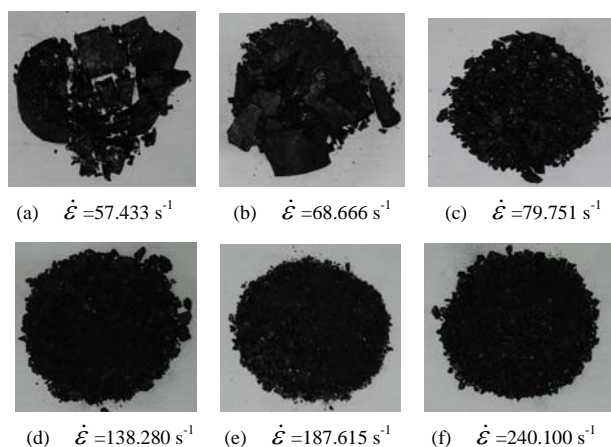


图 8 不同应变率下煤的破坏形态

Fig.8 Failure modes of coal at different strain rates

利用分级筛对试样碎块进行筛分,将其分为 0~2.5, 2.5~5.0, 5.0~8.0, 8.0~10.0, 10.0~12.0, 12.0~15.0, 15.0~20.0, >20.0 mm 共 8 组粒径,粒径编号分别为 1~8。筛分完成之后,利用天平称量得到了各个粒径下碎块的质量,通过计算得到了各粒径($n=1, 2, \dots, 8$)碎块质量占整体质量的百分比 W_{sn} 。

为了定量分析应变率对煤试样破坏程度的影响,定义块度分布系数 r 来描述试样破坏程度,其表达式如式(4)所示。由式(4)可知, r 值越大,小粒径碎块占整体质量比重越大,试样破坏程度越高。

$$r = \sum_{n=1}^8 \frac{W_{sn}}{n} \quad (4)$$

表 3 给出了各粒径($n=1, 2, \dots, 8$)碎块质量占整体质量的百分比 W_{sn} 与块度分布参数 r 随应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的变化规律。

表 3 碎块质量百分比 W_{sn} 与块度分布参数 r 随应变率 $\dot{\epsilon}$ 的变化规律
Table 3 Mass percentage of fragments W_{sn} and parameters of block distribution r changed with train rate $\dot{\epsilon}$

| 平均应变率 $\dot{\epsilon}/s^{-1}$ | 总质量 W/g | $W_{sn}/\%$ | | | | | | | | r |
|----------------------------------|-----------|-------------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 57.433 | 185.70 | 1.29 | 3.07 | 3.07 | 5.17 | 3.55 | 3.55 | 4.85 | 75.45 | 16.57 |
| 68.666 | 189.60 | 1.74 | 5.70 | 9.49 | 8.39 | 8.39 | 14.40 | 6.48 | 45.41 | 20.53 |
| 79.751 | 183.60 | 30.23 | 26.31 | 25.00 | 10.95 | 3.27 | 4.24 | — | — | 55.82 |
| 138.280 | 187.50 | 45.13 | 23.21 | 17.65 | 7.21 | 3.22 | 3.58 | — | — | 65.66 |
| 187.615 | 189.90 | 62.08 | 25.12 | 10.43 | 0.79 | 1.58 | — | — | — | 78.63 |
| 240.100 | 186.60 | 66.56 | 21.54 | 9.49 | 2.41 | — | — | — | — | 81.10 |

图 9 给出了试样破坏后碎块块度分布系数 r 随应变率 $\dot{\epsilon}$ 变化曲线, 从图中可以看出, 随着应变率的提高, 块度分布参数逐渐增加, 表明其煤试样的破坏程度逐渐增加。从曲线的变化趋势分析, 应变率由 57.433 s^{-1} 增加到 68.666 s^{-1} , r 值由 16.57 增加到 20.53, 幅值为 23.90%; 应变率由 68.666 s^{-1} 增加到 79.751 s^{-1} , r 值陡增, 由 20.53 增加到 55.82, 提高了约 1.72 倍; 应变率由 79.751 s^{-1} 增加到 240.100 s^{-1} , r 值基本呈线性增加, 由 55.82 增加到 81.10, 幅值为 45.29%。由此可以推断, 应变率由 68.666 s^{-1} 增加到 79.751 s^{-1} , 煤破坏程度对应变率的敏感性最为显著。

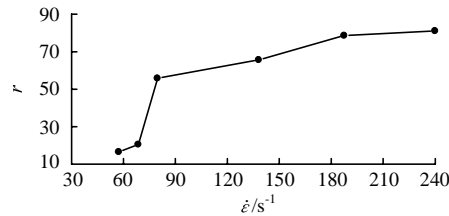


图 9 块度分布系数 r 随应变率 $\dot{\epsilon}$ 变化曲线

Fig.9 Coefficients of fragmentation distribution r changed with strain rate $\dot{\epsilon}$

4 结 论

本文利用 SHPB 试验系统对 57.433 s^{-1} 到 240.100 s^{-1} 应变率范围内煤的力学特性进行了试验研究, 主要结论如下:

1) 高应变率下, 煤的应力-应变曲线大致分为压密阶段、弹性变形阶段、微裂纹演化阶段、裂纹非稳定扩展阶段以及卸载阶段; 随着应变率的升高, 应力-应变曲线压密阶段占峰前曲线比例逐渐减小, 弹性阶段占峰前比例逐渐增大; 240.100 s^{-1} 下应力-应变曲线峰后应变软化特征不明显, 而在 7.433 s^{-1} 至 187.615 s^{-1} 应变率之间, 存在显著的应变软化过程。

2) 煤动态弹性模量与峰值应力随应变率升高近似呈对数增加。应变率由 57.433 s^{-1} 升高到 79.751 s^{-1} , 动态弹性模量与峰值应力分别增加了约 54.27%, 27.11%; 应变率由 79.751 s^{-1} 升高到 240.100 s^{-1} , 动态弹性模量提高了约 1.17 倍, 峰值应力增加了约 50.50%。

3) 随着应变率的升高, 峰值应变逐渐降低, 并近似呈对数形式变化。应变率由 57.433 s^{-1} 升高到 79.751 s^{-1} , 峰值应变减小了约 17.39%; 应变率由 79.751 s^{-1} 升高到 240.100 s^{-1} , 峰值应变减小幅值约为 33.86%。

4) 对不同应变率下破坏后的煤试样碎块进行了块度筛分, 并定义了块度分布参数 r 对试样的破坏程度进行描述。随着应变率的升高, 块度分布参数逐渐增加, 煤的破坏程度逐渐提高, 并且应变率由 68.666 s^{-1} 增加到 79.751 s^{-1} , 煤破坏程度对应变率的敏感性最为显著。

参考文献:

[1] 窦林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 组合煤岩冲击倾向性特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 43-46.
DOU Linming, LU Caiping, MU Zonglong, et al. Rock burst tendency of coal rock combinations sample[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 43-46.

[2] 田取珍, 刘混举, 曹惠斌. 冲击式采煤的研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(6): 625-629.
TIAN Quzhen, LIU Hunju, CAO Huibin. Study on impact coal cutting[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(6): 625-629.

[3] 汪德金. 提高块煤率的爆破采煤技术研究[J]. 煤矿爆破, 1997(3): 9-12.
WANG Dejin. Study on coal mining technology of drilling and blasting for improving coal lump ratio[J]. Coal Ming Blasting, 1997(3): 9-12.

[4] 单仁亮, 程瑞强, 高文蛟. 云驾岭煤矿无烟煤的动态

- 本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2258-2263.
- SHAN Renliang, CHENG Ruiqiang, GAO Wengjiao. Study on dynamic constitutive model of anthracite of Yunjialing coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2258-2263.
- [5] MOOMIVAND H. Effect of size on the compressive strength of coal[C]// Mining Science and Technology '99. Rotterdam: A A Balkema, 1999: 399-404.
- [6] BUTCHER B M, STEVENS A L. Shock wave response of windows rock coal [J]. Int J of Rock Mech and Min Sci and Geomechanics Abstract, 1975, 12(5): 147-155.
- [7] KLEPACZKO J R, HSU T R, BASSIM M N. Elastic and pseudo viscous properties of coal under quasi-static and impact loading[J]. Canadian Geotechnical, 1984, 21(2): 203-212.
- [8] OMIDVAR M, ISKANDER M, BLESS S. Stress-strain behavior of sand at high strain rates[J]. Int J Impact Eng, 2012, 49: 192-213.
- [9] ISLAM M T, BINDIGANAVILE V. Stress rate sensitivity of Paskapoo sandstone under flexure[J]. Can J Civ Eng, 2012, 39(11): 1184-1192.
- [10] DAI F, XIA K, ZHENG H, et al. Determination of dynamic rock mode-I fracture parameters using cracked chevron notched semi-circular bend specimen[J]. Eng Fract Mech, 2011, 78(15): 2633-2644.
- [11] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock Mech Rock Eng, 2014, 47: 1411-1478.
- [12] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 2610-2615.
- YIN Xiaotao, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1): 2610-2615.
- [13] 王洪亮, 范鹏贤, 王明洋, 等. 应变率对红砂岩渐进破坏过程和特征应力的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1340-1346.
- WANG Hongliang, FAN Pengxian, WANG Mingyang, et al. Influence of strain rate on progressive failure process and characteristic stresses of red sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1340-1346.
- [14] 单仁亮, 程瑞强, 高文蛟, 等. 云驾岭煤矿无烟煤的动态本构特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 1): 4658-4662.
- SHAN Renliang, CHENG Ruiqiang, GAO Wengjiao, et al. Experimental study on dynamic constitutive characteristics of anthracite of Yunjialing coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup 1): 4658-4662.
- [15] 刘文震. 煤在冲击载荷作用下的动态力学特性试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- [16] 李成武, 解北京, 杨威. 煤冲击破坏过程中的近距离瞬变磁场变化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 973-981.
- LI Chengwu, XIE Beijing, YANG Wei. Characteristics of transient magnetic nearby field in process of coal impact damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (5): 973-981.
- [17] 解北京. 煤冲击破坏动力学特性及磁场变化特征实验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- [18] 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.
- LIU Xiaohui, ZHANG Ru, LIU Jianfeng. Dynamic test study of coal rock under different strain rates[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1528-1534.
- [19] 马占国, 茅献彪, 李玉寿, 等. 温度对煤力学特性影响的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2005, 22(3): 46-48.
- MA Zhanguo, MAO Xianbiao, LI Yushou, et al. Experimental study on the effect of temperature on the mechanical properties of coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2005, 22(3): 46-48.
- [20] 凌良辅, 王海彦, 关夏农. 提高块煤率生产的探讨与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2003, 20(1): 62-64.
- LING Liangfu, WANG Haiyan, GUAN Xianong. Discussion on improving block coal ratio[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2003, 20(1): 62-64.
- [21] 王家臣, 邵太升, 赵洪宝. 瓦斯对突出煤力学特性影响试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 391-393.
- WANG Jiachen, SHAO Taisheng, ZHAO Hongbao. Experimental study of effect of gas on mechanical properties of outburst coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 391-393.
- [22] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 不同加卸载条件下含瓦斯煤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 981-900.
- YIN Guangzhi, LI Wenpu, LI Minghui, et al. Experimental study of mechanical properties of coal containing methane under different loading-unloading conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 981-900.
- [23] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 含瓦斯煤岩三维蠕变特性及蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2631-2636.
- YIN Guangzhi, WANG Dengke, ZHANG Dongming, et al. Research on triaxial creep properties and creep model of coal containing gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup 1): 2631-2636.
- [24] 李小双, 尹光志, 赵洪宝, 等. 含瓦斯突出煤三轴压缩下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 3350-3357.
- LI Xiaoshuang, YIN Guangzhi, ZHAO Hongbao, et al. Experimental study of mechanical properties of outburst coal containing gas under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1): 3350-3357.