

岩石力学特性

煤试样 SHPB 动态力学特性实验及其长径比效应

SHPB Testing on Dynamic Mechanical Behavior of Coal Specimens: Effects of Slenderness Ratio

张卫东, 周杰 (山西潞安环保能源开发股份有限公司五阳煤矿, 山西 长治 046200)

摘要:本研究旨在探究长径比对煤样动态力学性能的影响,采用矩形子弹以 $3.107 \sim 7.108 \text{ ms}^{-1}$ 范围内不同冲击速度,对四种长径比(0.5、1、1.5、2)的圆柱体原煤试件进行加载破坏试验,研究了煤试件的长度对其动态力学性能的实验测试的影响。研究表明:①由于煤试样自身所含层理分布不均和应变率效应共同作用,较高冲击速度条件下的应变率时程曲线均表现出两种典型形态:一种是恒应变率平台整体变化平缓,另一种是恒应变率平台后部分出现明显波动;②不同长径比试样均表现出明显的应变率效应,长径比从0.5到2,获得的应力应变曲线形态由“尖峰”型、多形态、“山丘”型到多形态之间变化,表现出弹性、塑性变形的不同作用过程;③考虑煤的层理结构和 SHPB 测试原理,过长和过短的试样都不适合用来研究煤冲击动态应力破坏特征,四种试样中 $L=50 \text{ mm}$ 最佳,其次是 $L=75 \text{ mm}$ 。

关键词:动力学特性; SHPB 技术; 尺寸效应; 煤冲击破坏

中图分类号: TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)04-0016-07

Abstract: This study investigates the effect of length-to-diameter ratios (L/D) on dynamic mechanical properties of coal samples using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) experimental device, using rectangular bullets in different impact velocity within $3.107 \sim 7.108 \text{ m per-second}$ to load and break the cylinder of raw coal specimen, the draw ratio of that in 0.5, 1, 1.5, 2. Researching the impact of the length of raw coal sample with on the dynamic mechanical properties. The results indicate that: ① due to the combination of the uneven distribution of the coal specimen self-contained bedding and strain rate effect, in the condition with relatively high impact velocity, strain-rate time-history curves showed two typical forms: the one is constant strain rate platform change gently, the other is the posterior part of constant strain-rate platform has obvious fluctuation; ② The samples with different draw-ratio show obvious strain rate effect, the shapes of the stress-strain curve of that range from 0.5 to 2 change in peaks, hills and polymorphism, showing different process of effects of elastic and plastic deformation; ③ With regard to the bedding structure of coal and the theory of SHPB test, whatever which are too long or too short, the samples are not suitable for studying the breakage features of the impact dynamic strain of coal. The sample with $L=50 \text{ mm}$ is the best, that of 75 mm is inferior.

Key words: dynamic characteristics; SHPB technique; size effect; coal impact damage

1 前言

在煤炭开采过程中往往遇到许多动力学问题,煤的动态力学性能也越来越受到行业学者的关注。而分离式霍普金森压杆实验系统作为广泛应用于岩土类材料的动态力学试验手段^[1-4],已成为研究煤

炭动态力学性能的重要方法。

近年来,岩石强度随试样长径比增加而降低的现象,得到了国内外学者的广泛关注,对于大理岩、灰岩、砂岩等脆性岩石试样抗压强度研究表明,无论静载荷还是动载荷均会有很强的尺寸效应^[5-11]。考虑到端部效应岩石等脆性材料试样在进行静载单轴强度测试时,通常采用 ASTM 标准要求混凝土准静态加载实验压缩强度的试样的长径比为 2:1,然而有的学者通过数值模拟的方法认为单轴和三轴压缩试验岩石试样的最佳的长径比为 3:1^[12]。利用 SHPB 进行脆性岩石动态抗压强度测试时还需要考虑试样的一维应力平衡和应变率加载的问题,并考

[作者简介] 张卫东(1990—),男,辽宁沈阳人,工程师,主要从事矿井“一通三防”工作。

[基金项目] 山东省矿山灾害预防控制重点实验室开放基金(SMDPC20404)

[引用格式] 张卫东,周杰. 煤试样 SHPB 动态力学特性实验及其长径比效应[J]. 中国矿山工程,2025,54(4):16-22.

考虑岩石的非均质性,所以大直径更短的试样往往更容易满足测试要求^[13]。Davies 等^[14]通过研究得出最佳长度半径比,并在金属材料上得到很好的测试效果。李胜林等^[15]通过研究混凝土试件动态冲击压缩试验的长度效应,得出长度半径比在 0.4 ~ 1.0 之间实验结果可信的结论。高文蛟、李明、刘文震、解北京、刘晓辉等^[16-20]均采用长径比 1:1 的煤试样利用大直径的分离式霍普金森杆冲击加载系统,对煤进行冲击压缩试验,研究煤在冲击载荷下动态力学特性。然而煤是一种生物高聚合物沉积岩,具有明显的非均质性和各向异性,岩体中分布着大量的孔隙、裂隙、层理等诸多缺陷,与常见的岩石具有很大的差异^[21],煤 SHPB 冲击破坏动力学试验最佳长径比尺寸仍需要通过试验来确定。

2 试验简介

2.1 试件制备

本实验所用大块煤样取自山西同煤塔山矿 8204 综放工作面,煤的坚固性系数 f 值达到 0.923 1^[22]。考虑到层理对煤岩试样强度的影响^[23-24],所有试样统一在垂直层面取样,实验中在垂直层理方向上加载冲击动载荷,避免因层理结构导致各向异性的差异。为使试件满足应力均匀假定,试件的两端采用磨床精密打磨,保证两端面不平行度小于等于 0.02 mm;为减少压杆与试样之间的摩擦效应的影响,在压杆与试件界面间涂抹凡士林润滑。试件实物如图 1 所示。

2.2 试验设备及原理

本试验在中国矿业大学(北京)深部岩土实验室的 SHPB 系统上进行,试验装置如图 2 所示。

该系统主要包括圆柱体撞击子弹、压杆、测速系统、超动态应变仪和数据存储处理系统。输入及输出压杆直径均为 50 mm,输入杆和输出杆长度均为 3 mm。分别在输入杆和输出杆上距离试件相等的距离处表面贴有保证灵敏度的半导体应变片,采用屏蔽双绞线连接到超动态应变仪。高速存储记录仪采样速率为 1.25×10^7 S/s,满足高速动态采集的要求。

SHPB 实验的基本原理是细长杆中弹性应力波的传播理论,需要满足两个基本假定:一维应力假定和应力均匀假定。一维应力假定忽略压杆质点横向运动引起的弥散效应、试件端面与压杆断



(a) 原煤试样加工



(b) 原煤试件成品

图 1 原煤试件加工及成品

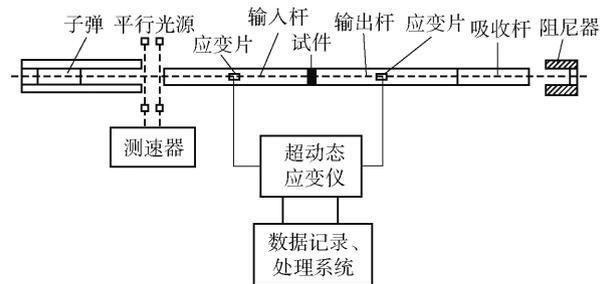


图 2 SHPB 试验装置

面间的摩擦效应和二维效应,认为应力波在细长杆内的传播过程中,弹性杆中的每个横截面始终保持平面状态;应力均匀假定忽略试件质点惯性运动引起的惯性效应和波在试件中传播引起的波动效应,认为试件中的应力处处相等。得简化计算公式如下。

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

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

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

式中, $\dot{\varepsilon}(t)$ 、 $\varepsilon(t)$ 、 $\sigma(t)$ 分别为加载应变率、试样应变、试样加载应力; E 、 C 、 A 分别为压杆的弹性模量、波速和横截面积; A_0 和 L_0 分别为试件的横截面积和厚度。

3 试验结果分析

3.1 试验测试信号处理

对每一组试样用不同速度的子弹加载冲击载荷,并记录下的应变脉冲,利用希尔伯特-黄变换(HHT)信号分析法滤波分析^[25]。信号曲线经过滤

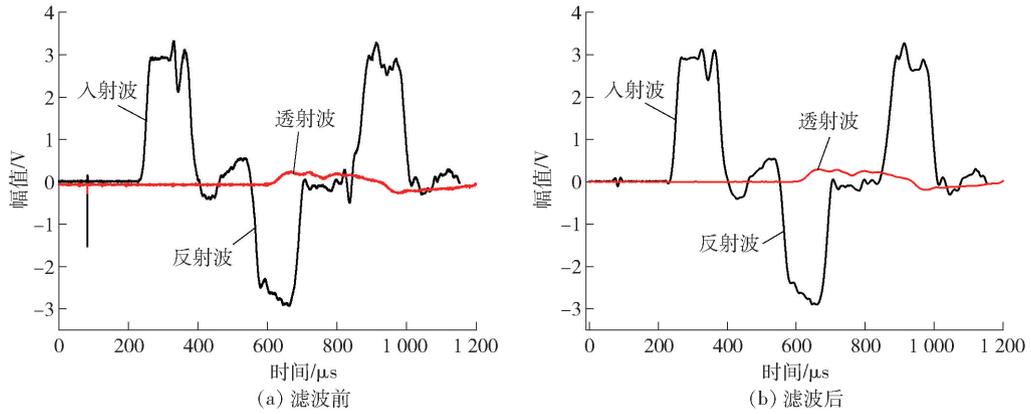


图3 B6试样应变曲线滤波

3.2 试验数据汇总

试验共完成了24次冲击压缩,冲击速度(v)范围为4~8 m/s。实验中钢质压杆的弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$ 、波速 $C = 5\,060 \text{ m/s}$ 、横截面积 $A = A_0 =$

波去噪后,去掉了高频噪声,限于篇幅仅以B6试样在 6.181 ms^{-1} 冲击速度下的应变曲线滤波前后的对比效果为例,具体如图3所示。由图3(a)、图3(b)可见,去噪后的信号幅值并未改变,有效数据特征被很好的保存下来。

625 mm^2 ,试件的横截面积 A_s 为 625 mm^2 。经过式(1)~(3)计算绘制出煤样在不同长径比、不同应变率下的应力-应变曲线,获得动态力学特性曲线。实验数据统计见表1。

表1 SHPB冲击破坏试验数据统计

试件编号	试件尺寸 $D \times L /$ mm \times mm	冲击速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	平均应变率 $\bar{\dot{\epsilon}} / \text{s}^{-1}$	最大应变率 $\dot{\epsilon}_{\max} / \text{s}^{-1}$	破坏应变 $\epsilon_b / \%$	$\sigma_{\max} / \text{MPa}$	破坏情况
A1	$\phi 50 \times 25$	3.107	91.41	104.85	3.80	6.03	碎裂大块
A2(a3)	$\phi 50 \times 25$	4.465	124.84	136.68	23.68	14.88	粉碎
A3(a4)	$\phi 50 \times 25$	4.615	110.47	126.93	14.88	23.68	粉碎
A4(a1)	$\phi 50 \times 25$	5.236	120.60	145.87	18.40	18.40	粉碎
A5	$\phi 50 \times 25$	5.354	127.38	155.24	10.80	32.57	粉碎
A6(a2)	$\phi 50 \times 25$	5.722	141.44	150.18	32.57	10.80	粉碎
B1(b1)	$\phi 50 \times 50$	3.569	91.03	108.07	3.17	3.17	碎裂大块
B2	$\phi 50 \times 50$	4.437	121.33	139.02	8.61	9.43	碎裂大块
B3	$\phi 50 \times 50$	4.540	123.77	139.93	10.49	13.78	粉碎
B4(b4)	$\phi 50 \times 50$	4.781	114.32	121.84	9.43	8.68	粉碎
B5(b3)	$\phi 50 \times 50$	5.234	125.72	135.45	13.78	10.49	粉碎
B6(b2)	$\phi 50 \times 50$	6.181	142.24	155.58	12.77	12.77	粉碎
C1(c1)	$\phi 50 \times 75$	3.125	98.67	111.71	5.93	5.93	碎裂大块
C2	$\phi 50 \times 75$	4.801	115.24	128.27	9.07	9.07	碎裂大块
C3	$\phi 50 \times 75$	5.108	125.58	135.89	6.31	6.31	粉碎
C4(c3)	$\phi 50 \times 75$	5.193	124.47	136.14	10.88	10.88	粉碎
C5(c2)	$\phi 50 \times 75$	5.775	137.31	155.38	8.12	8.82	粉碎
C6(c4)	$\phi 50 \times 75$	6.215	163.36	187.33	16.02	16.02	粉碎
D1(d1)	$\phi 50 \times 100$	3.380	94.33	101.23	6.74	6.74	局部碎裂
D2	$\phi 50 \times 100$	5.281	129.00	200.81	9.85	11.45	中部断裂
D3(d3)	$\phi 50 \times 100$	5.309	125.94	155.00	11.45	12.74	中部断裂
D4(d2)	$\phi 50 \times 100$	6.178	135.16	162.21	12.75	14.05	轴向劈裂
D5(d4)	$\phi 50 \times 100$	6.540	153.57	173.93	14.05	9.85	碎裂大块
D6	$\phi 50 \times 100$	7.108	184.25	200.81	14.98	14.98	粉碎

3.3 冲击速度与加载应变率之间关系

对冲击加载产生的平均应变率、最大应变率与冲击速度关系进行线性拟合,具体如图4所示。由图4可见,加载应变率与冲击速度均呈现出较好的线性相关性,说明实验加载基本符合细长杆中弹性应力波的传播理论。

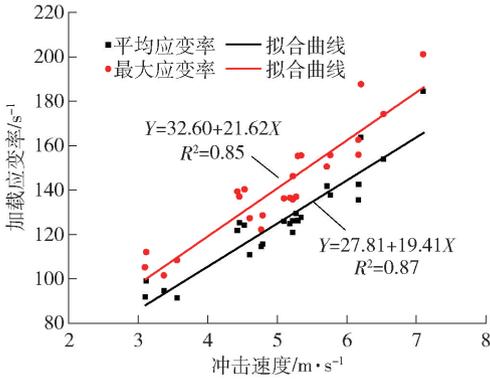


图4 加载应变与冲击速度线性拟合

3.4 相同长径比不同加载率分析

姜锡权等^[26]研究认为,对于混凝土试件粉碎性 SHPB 冲击破坏应变时间曲线与实测应变时间曲线在应变破坏前比较吻合。由于试验中不同长径比在

不同的加载速率下既有粉碎性破坏,又有局部碎裂、轴向劈裂、破碎成大块等不同破坏状态,同时考虑到煤试件的均质性与混凝土试件的差异性,本试验保留了完整加载的应变率时间时程曲线。相同长径比煤样不同 SHPB 加载应变率时程曲线图,具体如图5所示。

由图5(a)~(d)可见,长径比相同的煤试样在较高速度的 SHPB 冲击破坏下,由反射应变计算出来的应变率时程,表现出两种曲线形态:一种是恒应变率平台整体变化平缓,如图5(d)标注所示;另一种是恒应变率平台后部分出现明显波动,如图5(b)标注所示。出现这种现象可能是由于煤试样自身所含层理分布不均和应变率效应共同作用所致。

3.5 煤样冲击破坏动力学特征分析

煤岩材料具有显著的应变率效应,已被许多测试试验所证实。

由图6(a)可见,长径比为 $L/D = 0.5$ 的应力应变曲线均呈现缓慢波动上升和线性下降的“尖峰”形态,塑性变形占主导地位;而图6(b)长径比为 $L/D = 1$ 的应力应变曲线,随着应变率的增加表现出由硬化向软化过渡多种形态,最能够表现出煤在高、低

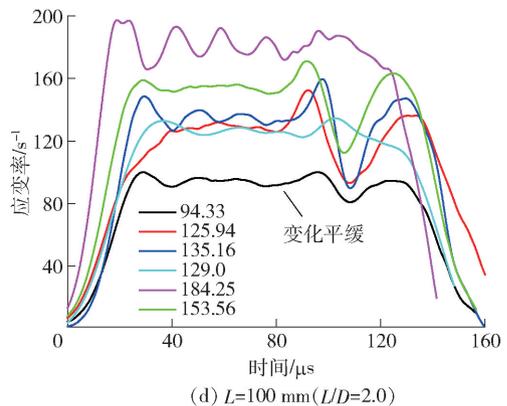
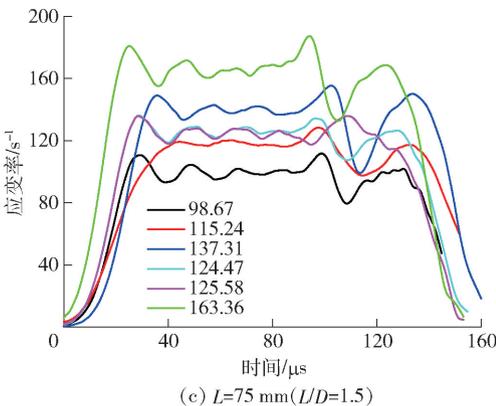
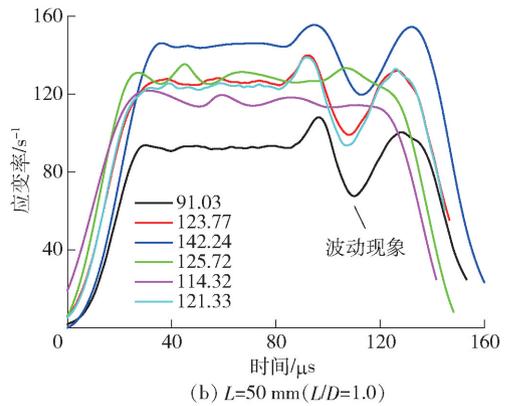
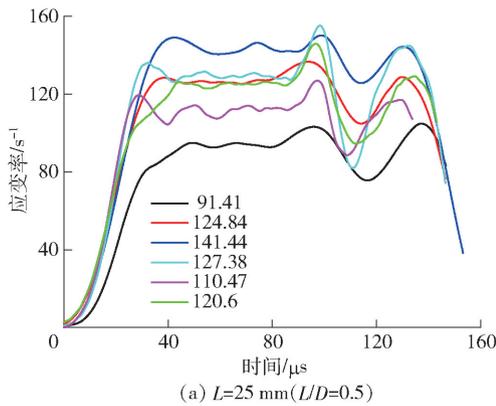


图5 应变率时程曲线

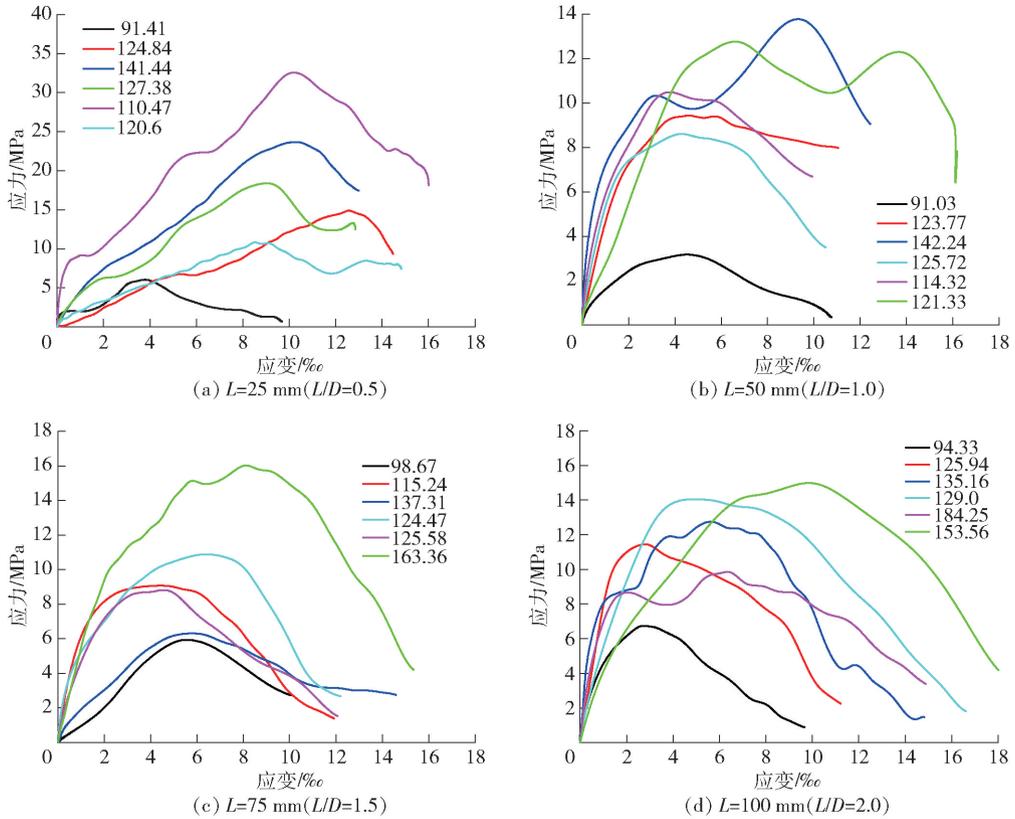


图6 应力应变曲线

应变率下冲击破坏的动态力学特征^[27];图6(c)长径比为 $L/D=1.5$ 的应力应变曲线主要呈现出线弹性加载和波动卸载的“山丘”形态,弹性和塑性共同作用;而图6(d)长径比为 $L/D=2$ 的应力应变曲线又呈现出多样性的特征,但通过煤样破坏形态分析,是由于煤样局部破坏和反射拉伸破坏导致的结果,不能反应材料的整体动态力学特性。

图7所示为四种煤试样的应变率与动态抗压强度、破坏应变的关系。其中将破坏时间应力应变曲线的峰值应力处或出现应力平台处的应变值为试件

的破坏应变值,详细数值见表1。

由图7(a)可见, $L=25\text{ mm}$ 试样由于试样较短不能很好的表征煤的层理构造特征,测试的结果中加载应变率与动态抗压强度线性相关性较差,而其他三组长径比中 $L=50\text{ mm}$ 试样的相关性最好,其次是 $L=50\text{ mm}$ 试样。由图7(b)可见,加载应变率与试样破坏应变中 $L=75\text{ mm}$ 的线性相关性最好,其次是 $L=50\text{ mm}$ 试样, $L=100\text{ mm}$ 试样最差;可能是较长的试样虽然能更最大限度的表征煤的层理构造特征,同时也是SHPB测试应力波反射拉伸作用增

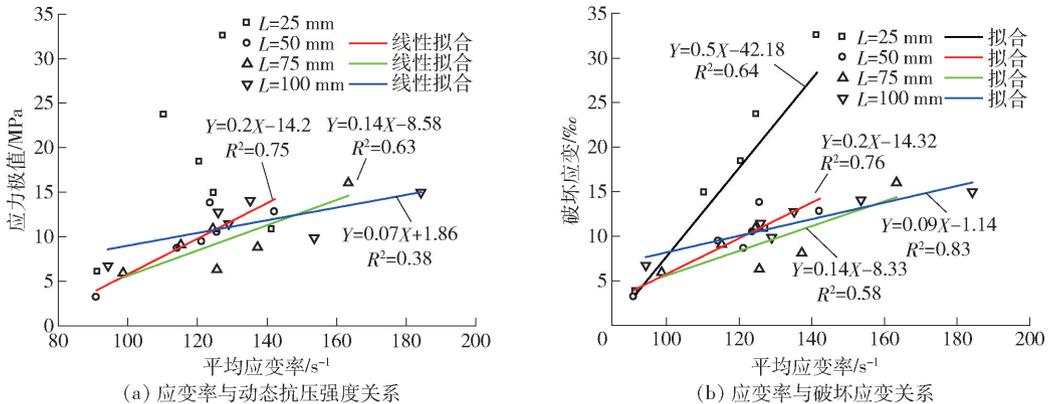


图7 应变率与动态抗压强度、破坏应变的关系

强,当试样超过一定长度后其内部薄弱层理的分布不均导致在反射拉伸应力的作用下产生较小破坏应变和较低的抗压强度。

3.6 相近加载率不同长径比动态力学特征

不同长径比煤试样在相近加载率条件下也表现出不同的动态力学特征,四组试样在应变率约为 95 s^{-1} 和应变率约为 125 s^{-1} 的应力应变曲线如图 8 所示,其破坏形态如图 9 所示。

由图 8 所示,在应变率约为 95 s^{-1} 和应变率约为 125 s^{-1} 的条件下, $L = 25\text{ mm}$ 试样极限应力强度变化最大,而从图 9(a)、(e) 可见,其破坏形态属于

粉碎性破坏,大部分能量消耗于形成更小的煤颗粒,不能表征其材料真实的动态特征。其余三种长径比试样应力应变虽保持了较好应力增长趋势,但从图 9 可见,相近应变率下长径比的越大的试样整体破坏程度越差,当 $L = 100\text{ mm}$ 时,如图 9(d)、(h) 仅发生了局部和中部断裂破坏,也不能用于分析煤材料真实的动态响应特征。可见,过长和过短的试样都不适合用来研究煤冲击动态应力破坏特征,考虑到煤的层理结构和应变率效应,四种试样中 $L = 50\text{ mm}$ 试样最佳,其次是 $L = 75\text{ mm}$ 试样。

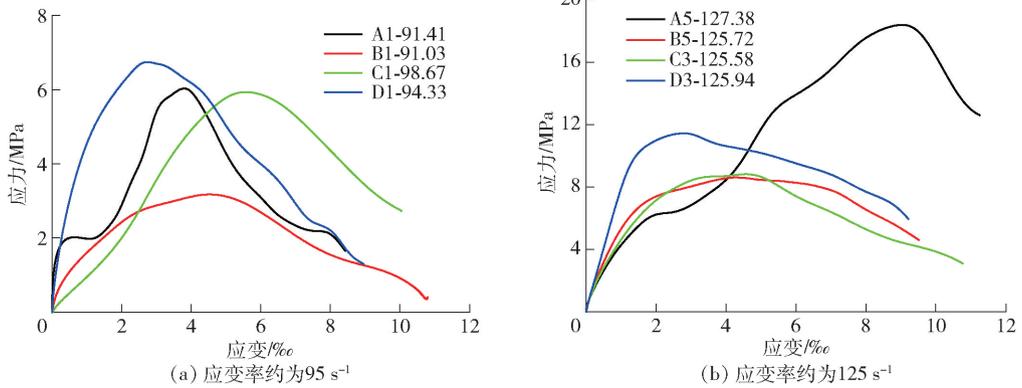


图 8 相近应变率应力应变曲线

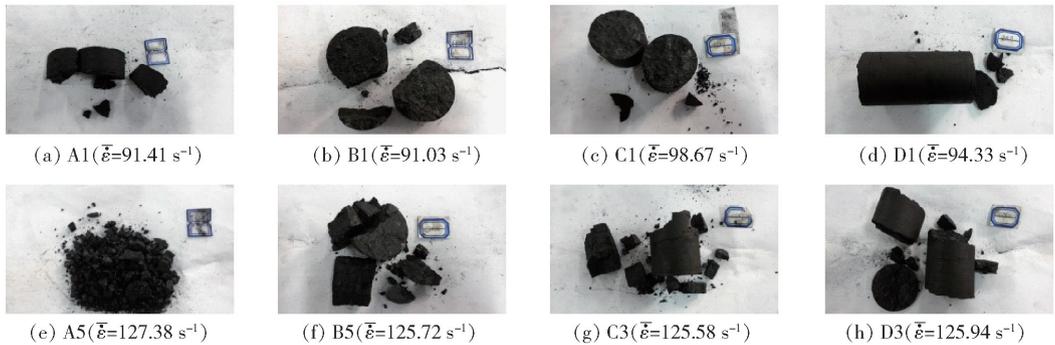


图 9 相近应变率煤试样破坏照片

4 结论

(1) 不同长径比煤样的 SHPB 试验中,由于煤试样自身所含层理分布不均和应变率效应共同作用,较高冲击速度条件下的应变率时程曲线均表现出两种典型形态:一种是恒应变率平台整体变化平缓,另一种是恒应变率平台后部分出现明显波动。

(2) 不同长径比试样均表现出明显的应变率效应,长径比(0.5、1、1.5、2),获得的应力应变曲线形态由“尖峰”型、多形态、“山丘”型到多形态之间变

化,表现出弹性、塑性变形的不同作用过程。

(3) 考虑到煤的层理结构,试样长度应尽可能大些,同时考虑到 SHPB 应力均衡原理和应变率加载条件试样又需要短些;综合考虑煤的层理结构和应变率效应,过长和过短的试样都不适合用来研究煤冲击动态应力破坏特征,通过不同加载率不同长径比煤试样应力曲线特征和破坏形态综合分析,四种试样中 $L = 50\text{ mm}$ 最佳,其次是 $L = 75\text{ mm}$ 。

[参考文献]

- [1] 卢芳云,陈荣,林玉亮,等. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京:科学出版社,2013:1-2.
- [2] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2014:9-18.
- [3] 刘红岩,邓正定,王新生,等. 节理岩体动态破坏的 SHPB 相似材料试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(3):659-665.
- [4] 马芹永,张经双,陈文峰,等. 人工冻土围压 SHPB 试验与冲击压缩特性分析[J]. 岩土力学,2014,35(3):637-640.
- [5] HUDSON J A, CROUCH S L, FAIRHURST C. Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure[J]. Engineering Geology, 1972, 6(3): 155-189.
- [6] 刘宝琛,张家,杜奇中. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(6):611-614.
- [7] 王青元,朱万成,刘洪磊,等. 单轴压缩下绿砂岩长期强度的尺寸效应研究[J]. 岩土力学,2016,37(4):981-990.
- [8] 朱珍德,邢福东,王军. 基于灰色理论的脆性岩石抗压强度尺寸效应试验研究[J]. 岩土力学,2004,25(8):1234-1238.
- [9] 孙超,刘芳,蒋明镜,等. 岩石抗压强度的尺寸效应及端部约束的离散元数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增2):3421-3428.
- [10] 张后全,徐建峰,贺永年,等. 灰岩单轴压缩实验室尺度效应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增2):3491-3496.
- [11] 洪亮,李夕兵,马春德,等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(3):526-533.
- [12] 尹小涛,葛修润,李春光,等. 基于数值实验的岩石试样最佳长径比研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):3608-3615.
- [13] Weinong W. Chen, Bo Song. Split Hopkinson (Kolsky) Bar Design, Testing and Applications [M]. London: Springer Science Business Media, 2011: 77-80,45-46.
- [14] Davies E. D. H., et al., The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1963. 11(3): p. 155-179.
- [15] 李胜林,刘殿书,李祥龙,等. 直径75 mm 分离式霍普金森压杆试件长度效应的实验研究[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(1):93-97.
- [16] 高文蛟,单仁亮. 无烟煤在冲击载荷下破坏模式与强度特性[J]. 煤炭学报,2012,37(S1):13-18.
- [17] 李明,茅献彪,曹丽丽,等. 高应变率下煤力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2015,3(2):317-324.
- [18] 刘文震. 煤在冲击载荷下的动态力学特性试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2011.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 付玉凯,解北京,王启飞. 煤的动态力学本构模型[J]. 煤炭学报,2013,38(10):1769-1774.
- [22] 刘天乐,张恒,吴飞岐,等. 单轴冲击荷载下冻土能量耗散特性试验研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):1-6.
- [23] 解北京,李晓旭,栾铮,等. 应力波作用下红砂岩复合动态断裂特征研究[J]. 矿业科学学报,2024,9(1):42-52.
- [24] 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.
- [25] 李成武,解北京,杨威,等. 基于 HHT 法的煤冲击破坏 SHPB 测试信号去噪[J]. 煤炭学报,2012,37(11):1796-1802.
- [26] 姜锡权. 水泥砂浆静动态力学行为及短纤维增强性能研究[D]. 合肥:中国科技大学工程科学学院,1996.
- [27] 李成武,解北京,杨威,等. 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):974-981.