



预制孔洞煤样冲击力学特性及能量耗散试验研究

何杰 吴拥政 孙卓越 李军臣

引用本文:

何杰, 吴拥政, 孙卓越, 等. 预制孔洞煤样冲击力学特性及能量耗散试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 92–103.
HE Jie, WU Yongzheng, SUN Zhuoyue. Experimental study on impact mechanical properties and energy dissipation of predrilled hole coal samples under impact load[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 92–103.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1789>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击荷载下煤的动态力学性质研究

Study on dynamic mechanical properties of coal under impact loading

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/16c655c5-fe13-4725-afd1-099c1d129a80>

非静水压条件下深部岩石能量耗散规律及破坏特征试验研究

Experimental study on energy dissipation and failure characteristics of rock at depth under non-hydrostatic pressure condition

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 83–96 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1504>

冲击荷载下聚丙烯纤维水泥砂浆力学特性研究

Study on mechanical properties of polypropylene fiber cement mortar under impact load

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 68–74 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e263d01c-bab1-4608-afca-6accf80b6841>

易弹射煤体力学特性及能量演化机制

Mechanical properties and energy evolution mechanism of coal prone to ejection

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 51–66 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0834>

冲击荷载下锚杆托板及组合构件力学性能试验研究

Experimental study on mechanical properties of anchor plate and combination components under impact load

煤炭科学技术. 2022, 50(11): 1–11 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b1f7c090-f716-4ef2-b060-54f42b32570a>

拉剪作用下椭圆孔洞砂岩力学及破坏特征模拟研究

Simulation on mechanical and failure characteristics of sandstone with elliptical hole under tension-shear effect

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 86–96 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0656>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

何杰, 吴拥政, 孙卓越, 等. 预制孔洞煤样冲击力学特性及能量耗散试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 92–103.

HE Jie, WU Yongzheng, SUN Zhuoyue, *et al.* Experimental study on impact mechanical properties and energy dissipation of pre-drilled hole coal samples under impact load[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 92–103.

预制孔洞煤样冲击力学特性及能量耗散试验研究

何杰^{1,2,3,4}, 吴拥政^{1,2,3,4}, 孙卓越^{1,2,3,4}, 李军臣^{1,2,3,4}

(1. 煤炭科学研究总院有限公司 开采研究分院, 北京 100013; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 3. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 4. 煤炭科学研究总院 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013)

摘要: 为研究冲击载荷下预制孔洞煤样力学特性及能量耗散规律, 制备含轴向孔洞的直径 50 mm, 高 50 mm 圆柱体煤样, 利用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置, 开展 8 个孔洞尺寸和 3 个冲击气压水平的加载试验研究, 借助平面场应变测量技术 (VIC-2D) 和高速摄像机, 分析了冲击加载过程中试件动态应力、动态应变、裂纹演化、破坏失效及能量耗散特性。结果表明: ①在试验涉及的孔洞直径范围内, 冲击载荷下完整与孔洞煤样动态应力-应变过程均呈现微裂隙压密阶段、弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段。同一冲击气压下, 随孔径增大, 煤样动态抗压强度、动态峰值应变均降低; 孔径由 0 增大至 8 mm 时, 煤样动态抗压强度和峰值应变下降出现快-慢分区特征。与完整煤样以拉伸裂纹破坏为主不同, 孔洞煤样主要以拉伸裂纹-剪切裂纹复合破坏为主, 且随着孔径增加, 试件内部裂纹扩展能力变弱。②揭示了冲击载荷下孔洞煤样的能量耗散规律: 孔洞煤样透射能、吸收能与孔径呈负相关, 反射能与孔径呈正相关, 这主要由孔洞改变试件过波面积造成。随孔径增大, 煤样过波面积降低, 其吸收能和透射能随之降低, 与冲击载荷下孔洞煤样破碎度与孔径负相关结论相一致。研究成果有利于明晰冲击地压巷道钻孔卸压机理, 为冲击地压防治提供理论支持。

关键词: 岩石动力学; 分离式霍普金森压杆; 孔洞; 力学特性; 能量耗散

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)02-0092-12

Experimental study on impact mechanical properties and energy dissipation of pre-drilled hole coal samples under impact load

HE Jie^{1,2,3,4}, WU Yongzheng^{1,2,3,4}, SUN Zhuoyue^{1,2,3,4}, LI Junchen^{1,2,3,4}

(1. Coal Mining and Designing Branch, Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co Ltd, Beijing 100013, China; 4. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and energy dissipation law of pre-drilled coal samples under impact loads, the cylindrical coal samples with a diameter of 50 mm and a height of 50 mm containing axial holes were prepared. a split Hopkinson pressure bar (SHPB) was used to conduct loading experiments with 8 hole sizes and 3 impact pressure levels. Using plane field strain measurement technology (VIC-2D) and high-speed cameras, the dynamic stress, dynamic strain, crack evolution, failure modes and energy dissipation characteristics of the specimens were analyzed. The results indicate that the dynamic stress-strain curve of intact and porous coal samples under impact load exhibit micro crack compaction stage, elastic stage, plastic stage, and failure stage. Under the same impact pressure, as the hole size increases, the dynamic compressive strength and dynamic peak strain both decrease. When the diameter of the hole increases from 0 to 8 mm, the dynamic compressive strength and peak strain of the coal sample show a fast-slow zoning characteristic. Unlike intact coal samples which mainly exhibit tensile failure, porous coal samples mainly exhibit tensile-shear composite failure, and as the hole size increases, the internal crack propagation ability of the specimen weakens. In addition, this article reveals the energy dissipation law of

收稿日期: 2023-10-20 责任编辑: 常琛 DOI: 10.12438/cst.2023-1789

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174080); 天地科技股份有限公司科技创新创业专项资助项目(2021-TD-MS011)

作者简介: 何杰(1984—), 男, 河南长葛人, 研究员。Tel: 010-84263126, E-mail: tiandihjie@163.com

通讯作者: 吴拥政(1978—), 男, 河南焦作人, 研究员, 博士生导师。Tel: 010-84263911, E-mail: tiandiwyzy@163.com

coal samples with hole under impact loads. The transmitted energy and dissipated energy of coal samples with hole are negatively correlated with hole size, while the reflected energy is positively correlated with hole size. This is mainly caused by the changes in the wave impedance of the specimen caused by the hole. As the hole size increases, the wave impedance of the coal sample decreases, and its dissipated and transmitted energy also decrease, which is consistent with the conclusion that the fragmentation degree of coal samples under impact load is negatively correlated with the hole size. The research results are beneficial for clarifying the mechanism of drilling pressure relief in rock burst roadways and providing theoretical support for the prevention and control of rock burst.

Key words: rock dynamics; split hopkinson pressure bar; bore hole; mechanical properties; energy dissipation

0 引 言

随着煤矿开采向深部发展,冲击地压灾害越发严重,冲击地压治理成为我国煤矿安全领域的工作重点^[1-4]。钻孔卸压为冲击地压矿井最常用的防冲治理手段之一,通过在冲击危险区域巷帮施工一排或多排钻孔,改变钻孔附近煤岩体力学性质、应力和冲击能量分布状态,实现减弱或消除冲击地压发生的可能性^[5-7]。部分学者对钻孔卸压机理开展研究,发现钻孔孔径对卸压效果具有明显影响。马斌文等^[8]认为卸压钻孔使煤岩界面黏聚力和内摩擦角降低,改变了煤体承载结构,破坏了冲击地压发生的条件。王猛等^[9]认为钻孔卸压实质为人为破坏钻孔周边围岩结构完整性,并确定了充分卸压时的钻孔关键参数。贾传洋等^[10]实验室试验得到孔径、孔深、孔间距对钻孔卸压效果有直接影响。齐燕军等^[11]采用相似模拟法制作了含不同孔径卸压孔的巷帮煤体模型,发现孔径对卸压效果具有明显的尺寸效应。

冲击发生过程中煤岩体力学特性及能量耗散规律是揭示冲击地压机制和防治的基础^[12-14],为深入研究钻孔对卸压作用的影响机制,弄清冲击载荷下钻孔煤岩体力学特性及能量耗散规律非常有必要。杨圣奇等^[15]对含孔洞砂岩进行准静载试验,发现其力学参数降幅与孔洞直径和分布相关。李地元等^[16]通过单轴压缩试验发现含孔洞花岗岩试样总是从孔洞周边起裂,且相较完整试样存在更多声发射事件突变点位。刘招伟等^[17]认为最大剪应变-轴向位移曲线可作为含孔洞岩石变形演化特征参数,且峰值强度点的局部化变形最强。一些学者对含孔洞煤岩体在动载荷下的力学响应开展了研究,周子龙等^[18]研究了孔洞数量及分布方式对冲击载荷下砂岩变化演化规律的影响。王爱文等^[19]基于预制单孔、双孔和三孔煤样试件,采用试验方法研究了含钻孔煤样的冲击倾向性和能耗规律。李地元等^[20]发现含孔洞砂岩在 45°层理倾角时动态强度最大,能量吸收最多。戴兵等^[21]推导了含孔洞岩石损伤计算理论公式,并通过试验分析了循环冲击载荷下损伤特性。TAO 等^[22]

通过试验分析了不同初始静载和同一动载耦合下的花岗岩宏观破坏机制。以上研究主要集中在以含孔洞岩石为对象的动静载试验研究,冲击地压矿井多是在煤帮布置钻孔实现卸压,因此,开展预制孔洞煤样冲击力学特性及能量耗散试验研究对于指导冲击地压防治具有指导意义。

为揭示冲击载荷下预制孔洞煤样力学及能量耗散特性,制备了 8 个级别直径孔洞的圆柱体煤样,采用霍普金森压杆试验装置测试了动态力学特性,获取了动态应力-应变曲线、破坏演化及全场应变图像,分析了孔洞直径对煤样动力学响应影响规律。

1 单轴压缩冲击试验

1.1 试件制备

试验煤样取自陕西彬长矿区,取样煤层具有弱冲击倾向性,取样地点埋深 710 m。现场获取的大块煤样较为完整,实验室测得基本物理力学参数见表 1,煤样规格为直径 50 mm,高 50 mm 的圆柱体^[23],采用取心机加工时保持垂直层理钻心,并保证打磨后试件端面平行度和不垂直度均小于 0.02 mm^[24],沿试件轴向中部垂直钻 1 个圆孔,孔洞直径为 0~14 mm,加工好的试件如图 1 所示。

表 1 基本物理力学参数
Table 1 Basic physical and mechanical parameters

密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	单轴抗压 强度/MPa	单轴抗拉 强度/MPa	弹性能 量指数
1 541	1.72	0.23	16.54	1.81	2.97

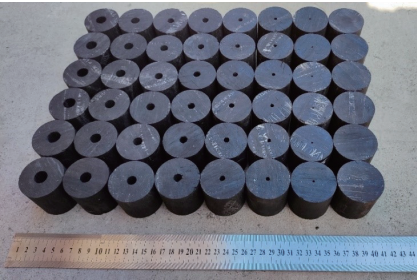


图 1 制备好的试样
Fig.1 Prepared samples

1.2 试验装置及原理

试验采用中国矿业大学(北京)SHPB冲击加载装置,如图2所示。试验装置压杆直径均为50 mm,由长度为3 000 mm的入射杆、2 500 mm的透射杆、1 000 mm的吸收杆和400 mm的子弹组成。压杆采用低碳钢材质,弹性模量206 GPa,密度

$7\,740\text{ kg/m}^3$ 。在入射杆和透射杆靠近试件位置各粘贴两枚动态应变片,用于采集冲击过程中的电压信号,通过数据处理系统得到应力-应变曲线。运用数字散斑技术、VIC-2D非接触全场应变分析软件及高速摄像机,测量试件在冲击过程中的真实位移场和应变场。

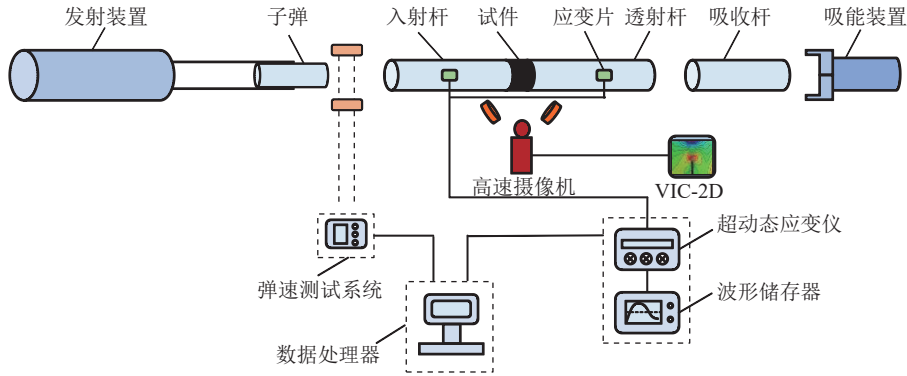


图2 SHPB冲击加载装置

Fig.2 SHPB impact loading apparatus

采用三波法计算平均动态应力 $\sigma_s(t)$ 、应变 $\varepsilon_s(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$,计算公式如下^[25]:

$$\begin{cases} \sigma_s(t) = \frac{A_0 E_0}{2A_s} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \\ \varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \\ \dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_s} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_I(t)$ 、 $\varepsilon_R(t)$ 、 $\varepsilon_T(t)$ 分别为入射波、反射波、透射波在 t 时刻的应变脉冲; A_0 和 A_s 分别为压杆和试件截面积; C_0 、 E_0 分别为压杆纵波波速和弹性模量; l_s 为试件高度。

1.3 试验方案

采用质量、密度和纵波波速对试件进行筛分,选取物理参数相近的试件开展试验,以降低试件间均质性差异对试验结果造成的不利影响。试件预制孔洞直径设为8个级别,分别为0、2、4、6、8、10、12和14 mm,对应采用H0、H2、H4、H6、H8、H10、H12和H14表示。冲击气压设为3个水平,分别为0.1 MPa、0.2 MPa和0.3 MPa,对应采用D0.1、D0.2和D0.3表示。在入射杆前端薄涂二硫化钼并粘贴紫铜薄片,使入射波形成为具有较缓上升沿的半正弦波^[26]。将二硫化钼薄涂于各压杆接触界面,以减弱端面摩擦效应对试验结果影响。每种工况冲击3枚试件,3次试验结果一致性较好,则试验结果有效。每次冲击前均将子弹推入发射腔最内部,从而使子弹在相同冲击气压下得到相近冲击速率。

为配合DIC测量技术准备工作,需在试验前对试件进行人工散斑制作。试验过程中采用高速摄像机拍摄,分辨率 924×768 ,拍摄帧率500 000 fps,曝光时间200 ns,延迟时间230 μs 。将高速摄像机与超动态应变仪连接以实现TTL信号同步触发。

将试件看作一个质点,冲击载荷下试件两端需达到动态应力平衡方能保证试验结果有效。以试件H6-D0.1为例,冲击加载过程中两端动态应力波曲线如图3所示。可以看出,在应力波作用时长内,入射波和反射波的叠加波大体与透射波吻合,表明试件在冲击加载中能够达到动态应力平衡,SHPB试验结果有效。

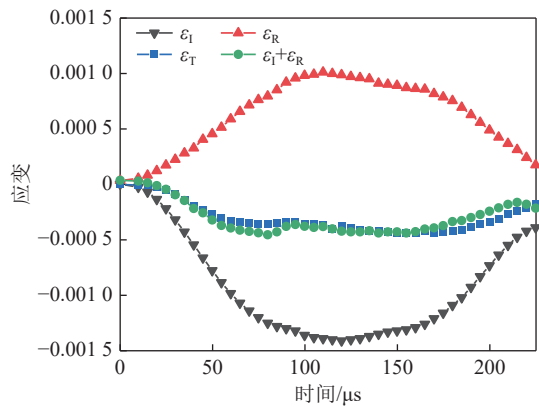


图3 应力平衡

Fig.3 Stress equilibrium curves

1.4 试验结果

表2给出了不同孔径和冲击气压下预制孔洞煤

表 2 冲击加载试验结果
Table 2 Impact loading test results

试样编号	L/mm	D/mm	m/g	P/MPa	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	σ_d/MPa	ϵ
H0-D0.1	49.88	49.07	141.595	0.1	7.458	123	66.37	0.008 79
H0-D0.2	49.97	49.20	150.430	0.2	10.757	191	69.01	0.009 59
H0-D0.3	49.28	49.95	148.220	0.3	12.980	241	71.22	0.010 95
H2-D0.1	50.05	49.08	146.645	0.1	7.040	118	60.61	0.008 21
H2-D0.2	50.58	49.14	145.967	0.2	10.479	186	62.53	0.009 13
H2-D0.3	49.13	50.30	142.738	0.3	12.768	238	65.95	0.009 77
H4-D0.1	50.00	49.07	139.421	0.1	7.543	121	57.88	0.007 57
H4-D0.2	50.03	49.10	136.000	0.2	10.827	194	61.14	0.008 61
H4-D0.3	49.15	50.26	140.034	0.3	12.987	238	63.67	0.009 21
H6-D0.1	49.92	49.06	140.825	0.1	7.662	125	53.89	0.007 16
H6-D0.2	50.06	49.21	144.027	0.2	10.831	184	56.86	0.007 97
H6-D0.3	49.10	50.07	141.348	0.3	13.123	234	59.25	0.008 46
H8-D0.1	49.16	49.36	131.521	0.1	7.459	124	52.08	0.006 82
H8-D0.2	49.21	50.12	130.141	0.2	10.841	186	55.60	0.007 22
H8-D0.3	49.10	50.18	125.859	0.3	13.376	236	58.56	0.007 59
H10-D0.1	49.95	49.10	143.876	0.1	7.167	124	45.81	0.006 67
H10-D0.2	50.04	49.12	133.123	0.2	10.796	184	50.26	0.006 89
H10-D0.3	49.18	50.37	139.914	0.3	13.203	238	53.52	0.007 14
H12-D0.1	49.89	49.11	135.533	0.1	7.566	127	40.00	0.006 40
H12-D0.2	50.04	49.17	134.318	0.2	10.979	189	42.47	0.006 69
H12-D0.3	49.11	50.18	127.250	0.3	13.126	243	47.71	0.006 86
H14-D0.1	49.98	49.07	127.682	0.1	7.439	124	32.96	0.005 43
H14-D0.2	49.93	49.06	130.580	0.2	10.792	197	36.49	0.006 12
H14-D0.3	49.26	49.97	124.046	0.3	13.085	244	37.50	0.006 64

注： L 为长度； D 为直径； m 为质量； P 为冲击气压； v 为冲击速度； $\dot{\epsilon}$ 为应变率； σ_d 为动态峰值应力； ϵ 为动态峰值应变。

样冲击加载试验结果。

2 动态抗压强度与变形破坏特征

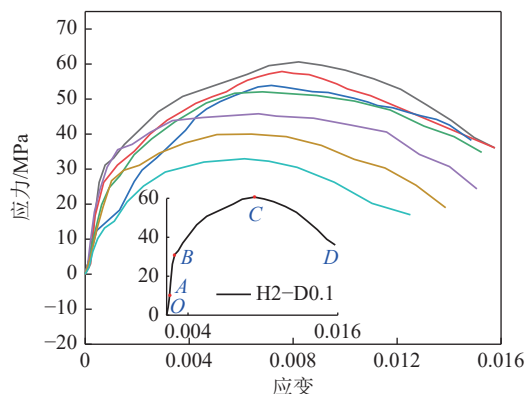
2.1 动态应力-应变曲线

采用式 (1) 对采集到的电压信号进行处理, 得到预制孔洞试件动态应力-应变曲线, 如图 4 所示。图 5 为完整试件在不同冲击气压下的动态应力-应变曲线。试验中所有试件在冲击载荷下均发生宏观破碎, 其动态峰值应力即动态抗压强度。

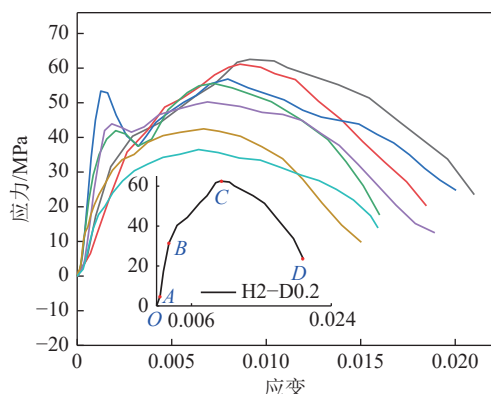
由图 4 可知, 冲击载荷下预制孔洞煤样动态应力-应变过程可分为微裂隙压密阶段 (OA 段)、弹性阶段 (AB 段)、塑性屈服阶段 (BC 段) 和破坏阶段 (CD 段)。在微裂隙压密阶段, 煤样自身微裂隙及孔洞被压缩, 曲线呈小幅度上凹, 继而进入弹性变形阶段, 动态应力与应变基本呈线性攀升, 此后进入塑性

屈服阶段, 曲线斜率较弹性变形阶段有不同程度降低, 产生相同应变所需应力变小; 峰值应力点之后, 进入破坏阶段, 应力快速下降, 应变持续增加, 直至试件丧失承载能力发生整体破坏。

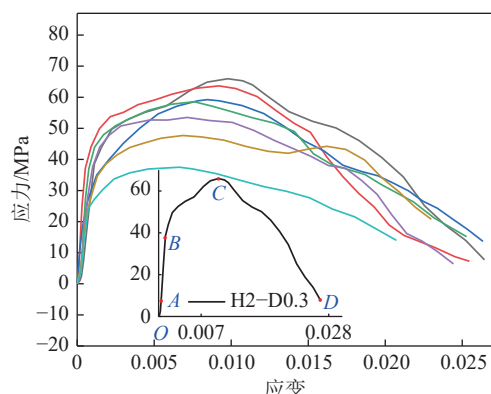
不同工况下动态应力-应变曲线表现出一定的相似性, 但也存在差异。具体表现为: ①在相同冲击气压下, 随着孔径增大, 峰值应力和峰值应变均呈降低趋势。②相同孔径下, 随着冲击气压增大, 试件峰值应力和峰值应变均呈增大趋势。③试件应力-应变曲线在应力屈服阶段总体呈缓慢攀升趋势, 但个别试件曲线呈间歇性攀升特征, 即曲线在达到某一较高应力点后产生应力跌落, 跌至某一较低应力点后再次攀升, 整个曲线呈双峰特征。其原因为试件 H6-D0.2, H8-D0.2, H100-D0.2 内存在原生损伤, 试件在受载过程中发生结构性调整。



(a) 冲击气压 0.1 MPa



(b) 冲击气压 0.2 MPa



(c) 冲击气压 0.3 MPa

— H2-D0.3 — H4-D0.3 — H6-D0.3
— H8-D0.3 — H10-D0.3 — H12-D0.3 — H14-D0.3

图4 预制孔洞试件的动态应力-应变曲线

Fig.4 Dynamic stress-strain curve of specimens with hole defects

由图5可知,完整试件冲击载荷下应力-应变过程与孔洞试件基本一致,但同一冲击气压下的峰值应力和峰值应变均要高于预制孔洞试件。冲击气压越低,试件越早进入应力屈服阶段。

2.2 动态抗压强度

预制孔洞煤样随孔径变化的应力行为特征如图6所示。由图6可知,在试验涉及的冲击气压和孔径范围内,同一孔径下随冲击气压增大,试件动态抗压强度呈增大趋势;同一冲击气压下随孔径增大,

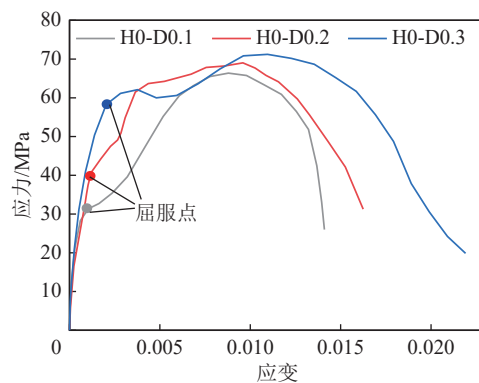


图5 完整试件的动态应力-应变曲线

Fig.5 Dynamic stress-strain curve of complete specimens

试件动态抗压强度呈降低趋势。为量化各区段动态抗压强度随孔径变化的降幅,采用“每2 mm孔径区间平均降幅 D ”进行量化。根据降幅程度,将孔径在0~14 mm的动态抗压强度-孔径曲线分为两个区段,分别为孔径0~8 mm和8~14 mm。孔径由0增至8 mm,冲击气压0.1~0.3 MPa时 D 分别为5.9%、5.2%、4.8%,呈缓慢降低特征;孔径由8 mm增至14 mm,冲击气压0.1~0.3 MPa时 D 分别为14.1%、13.1%、13.6%,呈快速降低特征。

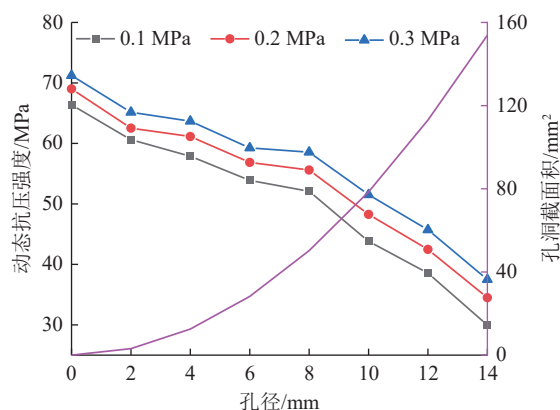


图6 预制孔洞煤样在冲击下的应力特征

Fig.6 Stress characteristics of coal samples with pore defects under impact load

究其原因,当孔径由0增至8 mm时,试件预制孔洞截面积随之增大,孔洞截面积越大则试件有效承载面积越小,进而导致试件整体承载能力降低。经过计算,此区段孔洞截面积在3.14~50.24 mm²范围,孔洞截面积变化幅度为47.10 mm²,变化区间相对较小,故动态抗压强度降幅不大。当孔径由8 mm增至14 mm时,此区段孔洞截面积处在50.24~153.86 mm²,孔洞截面积变化幅度为103.62 mm²,变化区间相对较大,从而表现为动态抗压强度随孔径增加而快速降低。以上研究表明,当煤样中孔洞直

径较小时,对动态抗压强度影响较小,但当孔洞直径达到一定程度时,动态抗压强度受孔洞大小影响强烈,试件表现为随孔径增大而加速丧失承载能力。

2.3 动态变形

预制孔洞煤样随孔径变化的应变行为特征如图 7 所示。由图 7 可知,在试验涉及的冲击气压范围内,同一孔径下随冲击气压增大,试件动态峰值应变(指应力峰值点对应的应变)呈增大趋势。在试验涉及的孔径范围内,同一冲击气压下随孔径增大,试件动态峰值应变呈降低趋势。根据降幅大小,将孔径在 0~14 mm 的动态峰值应变-孔径曲线分为两个区段,分别为 0~8 mm 和 8~14 mm。为量化各区段动态峰值应变随孔径变化的降幅,仍采用“每 2 mm 孔径区间平均降幅 D ”进行量化。孔径由 0 mm 增至 8 mm,冲击气压 0.1~0.3 MPa 时 D 分别为 6.1%、6.8%、8.7%,呈快速降低特征;孔径由 8 mm 增至 14 mm,冲击气压 0.1~0.3 MPa 时 D 分别为 3.5%、3.8%、4.4%,呈缓慢降低特征。

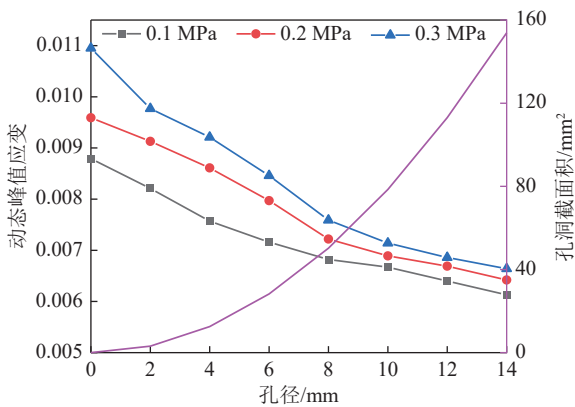


图 7 预制孔洞煤样在冲击下的应变特征

Fig.7 Strain characteristics of coal samples with pore defects under impact load

究其原因,经过筛选后的 $\varnothing 50 \times h 50$ mm 完整圆柱体试件力学性能基本相近,其峰前总变形量亦在较小范围波动,孔洞越大则试件有效承载区域越小,试件抗破坏能力越弱,即孔洞越大,试件在达到动态抗压强度时没有能力发生较大变形量,从而表现为动态峰值应变与孔径呈负相关关系。当孔径由 0 mm 增至 8 mm 时,试件有效承载区域减小,峰前总变形量随之减小,此阶段试件整体变形量较充裕,呈快速降低特征。当孔径大于 8 mm 时,试件动态峰值应变曲线降速明显放缓,其原因为孔径超过 8 mm 后,试件整体变形能力大幅降低,剩余有效承载区域的可变形量亦大幅减小,表现为动态峰值应变随孔径继续增加呈缓慢降低特征。

2.4 裂纹演化与失效模式

分析预制孔洞对煤样裂纹演化过程,获取孔洞对煤样开裂行为的影响。表 3 为高速摄像机拍摄的裂纹演化过程,可以看出,预制孔洞煤样宏观裂纹主要分为两类:沿轴向方向扩展的拉伸裂纹和相对于轴向应力斜向扩展的剪切裂纹。宏观裂纹形式随孔洞直径增大呈现一定差异,孔洞直径在 0 时(即完整试件)以拉伸裂纹为主,孔洞直径在 2~14 mm 时以拉伸裂纹和剪切裂纹复合为主。选取典型试件进行分析:① H0-D0.3 为完整试件在冲击气压 0.3 MPa 下的裂纹演化,应力波进入试件 26 μ s,试件中上部出现起裂点 0^a 和 0^b ;在 32 μ s, 0^a 和 0^b 贯通形成拉伸裂纹 1^a ,并在试件右上、右下、左下出现新的起裂点 0^c 、 0^d 和 0^e ;在 56 μ s, 0^c 和 0^a 贯通形成拉伸裂纹 1^b 、 0^d 和 0^a 贯通形成拉伸裂纹 1^c , 0^e 和 0^a 贯通形成拉伸裂纹 1^d ,总体来看试件以起裂点 0^a 为中心,向整体扩展形成拉伸裂纹,最终导致试件拉伸破坏。② H8-D0.3 为孔洞直径 8 mm 试件在冲击气压 0.3 MPa 下的裂纹演化,应力波进入试件 30 μ s,试件中部及下部多发起裂点;在 62 μ s,起裂点 0^a , 0^b 和 0^c 贯通形成剪切裂纹 1^a , 0^a 和 0^d 贯通形成拉伸裂纹 2^a , 0^a 和 0^e 贯通形成拉伸裂纹 2^b ,在试件左上部出现新的起裂点 0^f ;在 90 μ s, 0^f 和 2^b 贯通形成剪切裂纹 1^b , 0^f 和试件入射端面贯通形成拉伸裂纹 2^c ,总体来看试件以起裂点 0^a 为中心,向两端面延伸形成拉伸裂纹,并沿径向扩展剪切裂纹,最终导致试件呈拉伸-剪切复合破坏。

表 4 为冲击载荷下不同孔洞直径煤样的最终失效模式。可以看出,试件实物失效模式与 DIC 技术获得的应变场和位移场吻合良好。由于端面摩擦效应及 VIC-2D 软件局限,试件分析区域不包括应变场和位移场图像的上下左右 4 个边界。当孔洞直径由 0 增至 6 mm 时,最大应变值由 26.80% 增加至 87.50%,水平位移值由 1.810 mm 增加至 3.660 mm;当孔洞直径由 6 mm 增至 14 mm 时,最大应变值由 87.50% 降至 16.10%,水平位移值由 3.660 mm 降至 1.830 mm,表明孔洞直径为 6 mm 时,应变场梯度最大,应变场峰值区域煤岩更为破碎。由应变场图像可以看出,完整试件的最终失效由拉伸破坏引起,预制孔洞试件的最终失效由剪切和拉伸破坏复合引起。

3 冲击能量特征

3.1 能量计算

对 SHPB 试验数据进行处理后可得到入射应变、反射应变和透射应变随时间变化曲线 $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 和

表 3 试件裂纹演化过程
Table 3 Crack Evolution Process of Specimens

试件编号	裂纹演化照片				素描图
H0-D0.3	0 μs	26 μs	32 μs	56 μs	
H2-D0.3	0 μs	30 μs	50 μs	70 μs	
H4-D0.3	0 μs	26 μs	42 μs	50 μs	
H6-D0.3	0 μs	30 μs	50 μs	70 μs	
H8-D0.3	0 μs	30 μs	62 μs	90 μs	
H10-D0.3	0 μs	38 μs	58 μs	78 μs	
H12-D0.3	0 μs	38 μs	48 μs	58 μs	
H14-D0.3	0 μs	24 μs	44 μs	78 μs	

$\varepsilon_T(t)$, 冲击加载中入射能 W_I 、反射能 W_R 和透射能 W_T 计算公式^[27] 分别为

$$\begin{cases} W_I = A_0 C_0 E_0 \int_0^\tau \varepsilon_I^2(t) dt \\ W_R = A_0 C_0 E_0 \int_0^\tau \varepsilon_R^2(t) dt \\ W_T = A_0 C_0 E_0 \int_0^\tau \varepsilon_T^2(t) dt \end{cases} \quad (2)$$

式中, τ 为应力波延续时间。

吸收能 W_S 可由下式计算:

$$W_S = W_I - W_R - W_T \quad (3)$$

单位体积吸收能 w_d 计算方法如下:

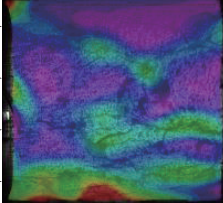
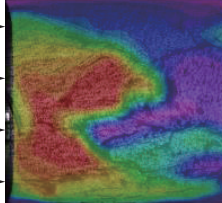
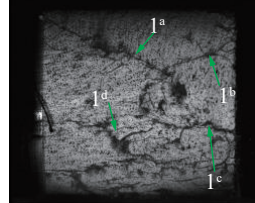
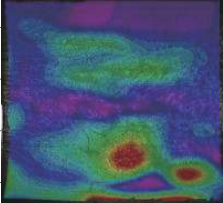
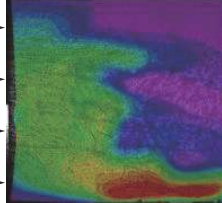
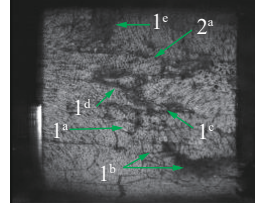
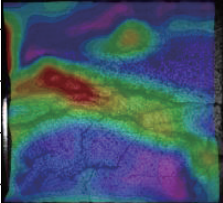
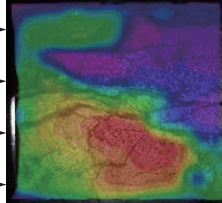
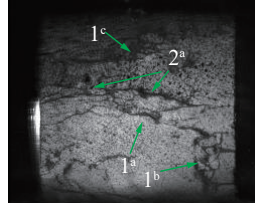
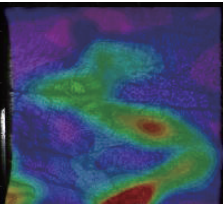
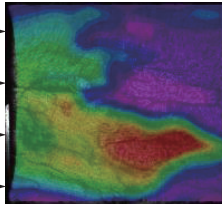
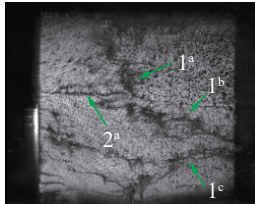
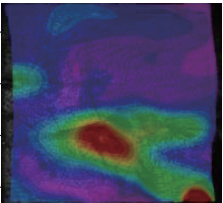
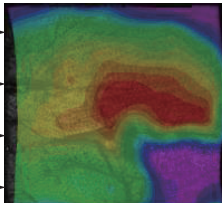
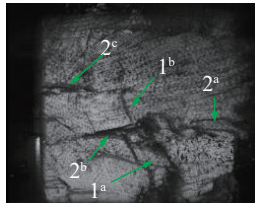
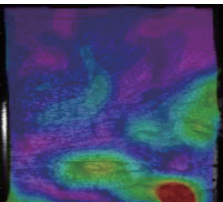
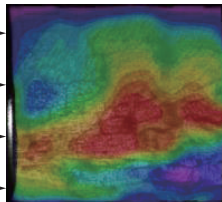
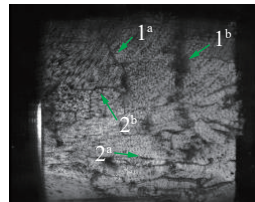
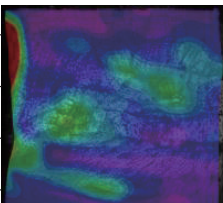
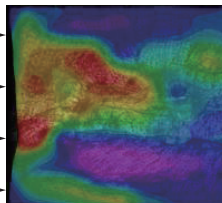
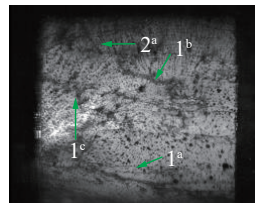
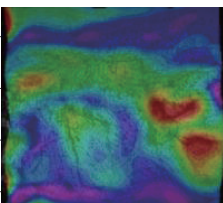
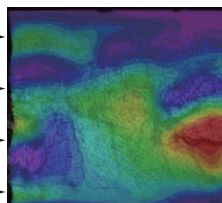
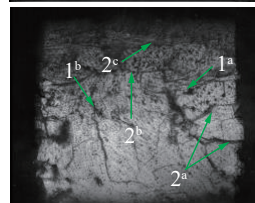
$$w_d = \frac{W_S}{V_S} \quad (4)$$

式中, V_S 为试件体积。

3.2 能耗特性

预制孔洞煤样在不同冲击气压下的能耗特性如图 8 所示。由图 8 可知, 试件反射能与孔径呈正相关关系, 透射能和吸收能与孔径呈负相关关系。孔径由 0 增至 14 mm, 冲击气压 0.1 ~ 0.3 MPa 时反射能占比 (反射能与入射能之比) 分别由 47.8% 增至

表 4 试件最终失效模式
Table 4 Final failure modes of test pieces

试件编号	应变场	位移场	实物
H0-D0.3	 应变/ 10^{-2} 26.80 19.80 12.90 5.95 -1.00	 位移/mm 1.810 1.390 0.970 0.550 0.130	
H2-D0.3	 应变/ 10^{-2} 24.80 18.15 11.50 4.85 -1.80	 位移/mm 2.000 1.512 1.025 0.537 0.050	
H4-D0.3	 应变/ 10^{-2} 63.50 45.87 28.25 10.62 -7.00	 位移/mm 3.140 2.330 1.520 0.710 -0.100	
H6-D0.3	 应变/ 10^{-2} 87.50 64.25 41.00 17.75 -5.50	 位移/mm 3.660 2.735 1.810 0.885 -0.040	
H8-D0.3	 应变/ 10^{-2} 68.00 50.62 33.25 15.87 -1.50	 位移/mm 3.580 2.735 1.890 1.045 0.200	
H10-D0.3	 应变/ 10^{-2} 38.20 28.70 19.20 9.70 0.20	 位移/mm 2.210 1.687 1.165 0.642 0.120	
H12-D0.3	 应变/ 10^{-2} 61.50 45.12 28.75 12.37 -4.00	 位移/mm 1.990 1.395 0.800 0.205 -0.390	
H14-D0.3	 应变/ 10^{-2} 16.10 11.97 7.85 3.72 -4.00	 位移/mm 1.830 1.395 0.960 0.525 0.090	

83.3%, 58.2% 增至 81.2%, 60.9% 增至 83.8%, 透射能占比 (透射能与入射能之比) 分别由 17.7% 降至 4.6%, 17.4% 降至 4.6%, 15.5% 降至 4.1%, 吸收能占比 (吸收能与入射能之比) 分别由 34.4% 降至 12.1%, 24.4% 降至 14.3%, 23.6% 降至 12.1%。

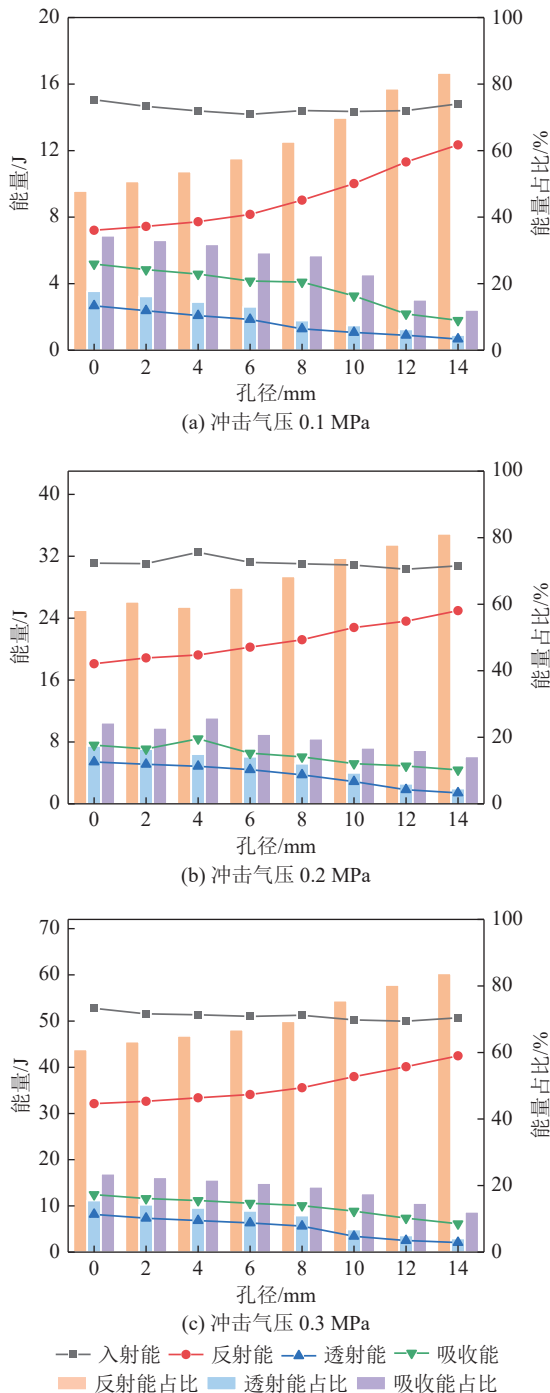


图8 不同冲击气压下的能耗特性

Fig.8 Energy consumption characteristics under different impact pressures

究其原因, 试件过波面积随孔径增大而降低, 而过波面积与应力波穿过试件能力呈正相关关系^[28], 即孔径越大, 应力波穿过试件能力越弱, 故入射波在

进入试件后更多以反射波形式返回, 同时应力波通过试件难度增大, 导致透射能呈降低趋势。随孔径增大, 预制孔洞试件体积减小, 能够吸收能量的载体也随之减小, 导致吸收能与孔径呈负相关关系。以上研究表明, 预制孔洞煤样的能量耗散机制为通过降低试件过波面积将携带能量的应力波更多地反射回去, 故孔径越大, 反射能越高, 预制孔洞煤样的吸收能和透射能越低, 文献^[29]的研究成果在一定程度上佐证了这一论点。

不同孔径下预制孔洞煤样体积存在差异, 孔径越大, 孔洞体积越大, 试件真实体积就越小, 故研究单位体积吸收能可更好表征试件吸能情况。不同冲击气压下预制孔洞煤样单位体积吸收能如图9所示。由图9可知, 在试验涉及的孔径范围内, 同一冲击气压下随孔径增大, 试件单位体积吸收能呈降低趋势; 当孔径相同时, 单位体积吸收能与冲击气压呈正相关关系, 表现出显著的应变率效应。孔径由0增至14 mm, 冲击气压0.1~0.3 MPa时单位体积吸收能分别降低62.5%、37.3%、46.5%。已有研究表明^[24], 试件吸收能绝大部分转化为破碎耗能, 小部分转化为动能和声、光、热等能量。破碎耗能主要用于冲击破坏过程中裂纹扩展, 故同一冲击气压下试件孔径越大, 预制孔洞煤样在冲击载荷下的裂纹扩展程度越低, 则试件破碎的程度则越低。

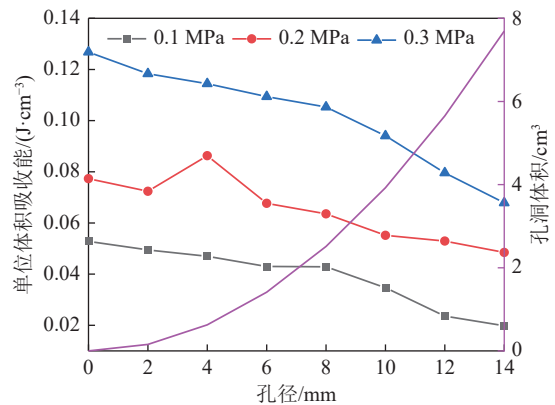


图9 不同冲击气压下的单位体积吸收能

Fig.9 Absorbed energy per unit volume under different impact pressures

3.3 冲击破坏形态

冲击后煤样的破坏形态与能量耗散密切相关, 以0.3 MPa冲击气压为例, 预制孔洞煤样在不同孔径下的破坏形态如图10所示, 冲击后的试件碎块形状主要是长方体和锥体, 说明破坏模式主要为拉伸破坏和剪切破坏。由图10可知, 对于完整试件 (孔径为0), 破碎程度整体较高, 破碎块度粒径较小, 局部

高度破碎成煤屑。对于孔径 2 mm 和 4 mm 试件,亦呈高度破碎状态,但未出现较多煤屑,取而代之的是大量小粒径碎块。对于 6 mm 和 8 mm 试件,小粒径碎块仍大量存在,但开始出现一些尺寸较大碎块。对于孔径为 10 mm 和 12 mm 试件,尺寸较大碎块继续增加,且宏观碎块尺寸亦随之增大。当孔径达到 14 mm 时,试件主要为几个尺寸较大碎块和少部分小粒径碎块。可以看出,在试验涉及的孔径范围内,同一冲击气压下随孔径增大,试件破坏程度随之降

低,即冲击载荷下试件破碎程度与孔径呈负相关关系。究其原因,试件宏观破坏主要源于其内部裂纹萌生、扩展、贯通等演化行为,裂纹演化的动力源为试件吸收能量,吸收能量大部分转化为破碎耗能,由图 9 可知单位体积吸收能随试件孔径增大而降低,故孔径越大,试件裂纹演化能力越弱,宏观上表现为破碎成若干个较大碎块。孔径越小,试件单位体积吸收能越高,裂纹演化能力越强,宏观上表现为破碎成若干小粒径碎块。

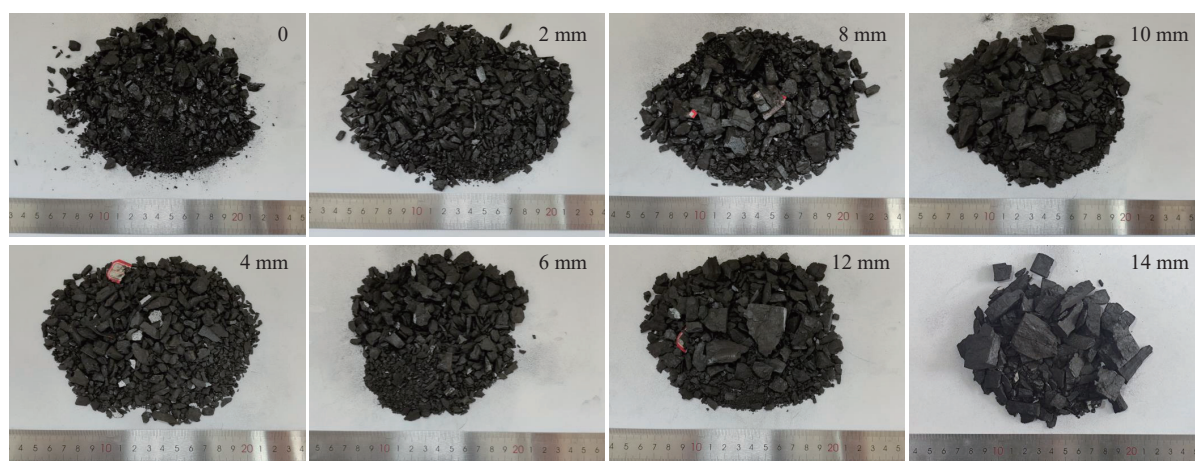


图 10 不同孔径试件破坏形态 (冲击气压为 0.3 MPa)

Fig.10 Failure morphology of specimens with different pore sizes (impact pressure 0.3 MPa)

4 结 论

1) 冲击载荷下预制孔洞煤样动态应力-应变过程分为微裂隙压密阶段、弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段。在试验涉及的孔径范围内,同一冲击气压下随孔径增大,试件动态抗压强度和动态峰值应变均呈降低趋势。同一孔径下随冲击气压增大,试件动态抗压强度和动态峰值应变均呈增加趋势。当孔径达到 8 mm,试件动态抗压强度和峰值应变下降分别呈现由缓慢到快速、由快速到放缓的分区特征。

2) 与完整煤样以拉伸裂纹破坏为主不同,预制孔洞煤样主要以拉伸裂纹-剪切裂纹复合破坏为主,随着孔径增加,裂纹扩展能力变弱。孔洞直径为 6 mm 时,应变场梯度最大,应变场峰值区域煤岩更破碎。

3) 揭示冲击载荷下孔洞煤样的能量耗散规律,试件反射能与孔径呈正相关,透射能和吸收能与孔径呈负相关。这主要与孔洞引发试件过波面积变化有关,煤样过波面积随着孔径增大而降低,其吸收能和透射能随之降低,与冲击载荷下预制孔洞煤样试件破碎程度与孔径呈负相关一致。

参考文献(References):

- [1] 康红普,徐 刚,王彪谋,等.我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J].采矿与岩层控制工程学报,2019,1(1): 013501.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, *et al.* Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1): 013501.
- [2] 姜福兴,张 翔,朱斯陶.煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J].煤炭科学技术,2023,51(1): 203-213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203-213.
- [3] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9): 1-40.
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, *et al.* Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [4] 姜福兴,陈 洋,李 东,等.孤岛充填工作面初采致冲力学机理探讨[J].煤炭学报,2019,44(1): 151-159.
JIANG Fuxing, CHEN Yang, LI Dong, *et al.* Study on mechanical mechanism of rock burst at isolated backfilling working face dur-

- ing primary mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 151-159.
- [5] 鞠文君. 急倾斜特厚煤层水平分层开采巷道冲击地压成因与防治技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- JU Wenjun. Study on reasons of rock burst in roadway and prevention technology of steeply-incline dand extremely thick coal seam with horizontally slicing way[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [6] 张俊文, 宋治祥, 刘金亮, 等. 煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 27-36.
- ZHANG Junwen, SONG Zhixiang, LIU Jinliang, *et al.* Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 27-36.
- [7] 李振雷, 窦林名, 蔡武, 等. 深部厚煤层断层煤柱型冲击矿压机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 333-342.
- LI Zhenlei, DOU Linming, CAI Wu, *et al.* Fault-pillar induced rock burst mechanism of thick coal seam in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 333-342.
- [8] 马斌文, 邓志刚, 赵善坤, 等. 钻孔卸压防治冲击地压机理及影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 35-40.
- MA Binwen, DENG Zhigang, ZHAO Shankun, *et al.* Analysis on the mechanism and influencing factors of drilling pressure relief to prevent rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 35-40.
- [9] 王猛, 王襄禹, 肖同强. 深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1138-1145.
- WANG Meng, WANG Xiangyu, XIAO Tongqiang. Borehole destressing mechanism and determination method of its key parameters in deep roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1138-1145.
- [10] 贾传洋, 蒋宇静, 张学朋, 等. 大直径钻孔卸压机理室内及数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1115-1122.
- JIA Chuanyang, JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng, *et al.* Laboratory and numerical experiments on pressure relief mechanism of large-diameter boreholes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1115-1122.
- [11] 齐燕军, 靖洪文, 孟波, 等. 卸压孔尺寸效应的模型试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 538-544.
- QI Yanjun, JING Hongwen, MENG Bo, *et al.* Experimental modelling on size effect of pressure relief hole[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 538-544.
- [12] 窦林名, 何学秋, REN Ting, 等. 动静载叠加诱发煤矿瓦斯动力灾害原理及防治技术[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 48-59.
- DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, *et al.* Mechanism of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2018, 47(1): 48-59.
- [13] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188-2204.
- JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204.
- [14] 潘一山, 代连朋. 煤矿冲击地压发生理论公式[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 789-799.
- PAN Yishan, DAI Lianpeng. Theoretical formula of rock burst in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 789-799.
- [15] 杨圣奇, 刘相如, 李玉寿. 单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3539-3546.
- YANG Shengqi, LIU Xiangru, LI Yushou. Experimental analysis of mechanical behavior of sandstone containing hole and fissure under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3539-3546.
- [16] 李地元, 李夕兵, 李春林, 等. 单轴压缩下含预制孔洞板状花岗岩试样力学响应的试验和数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1198-1206.
- LI Di yuan, LI Xibing, LI Chunlin, *et al.* Experimental and numerical studies of mechanical response of plate-shape granite samples containing prefabricated holes under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1198-1206.
- [17] 刘招伟, 李元海. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 133-139.
- LIU Zhaowei, LI Yuanhai. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a hole undergoing uniaxial compressive load[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 133-139.
- [18] 周子龙, 孙景楠, 王海泉, 等. 冲击载荷作用下孔洞花岗岩的应变演化及破坏特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 681-692.
- ZHOU Zilong, SUN Jingnan, WANG Haiquan, *et al.* Strain evolution and failure characteristics of granite with cavities under impact load[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(3): 681-692.
- [19] 王爱文, 高乾书, 潘一山, 等. 预制钻孔煤样冲击倾向性及能量耗散规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 959-972.
- WANG Aiwen, GAO Qianshu, PAN Yishan, *et al.* Bursting liability and energy dissipation laws of prefabricated borehole coal samples[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 959-972.
- [20] 李地元, 高飞红, 刘濛, 等. 动静组合加载下含孔洞层状砂岩破坏机制探究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2127-2140.
- LI Di yuan, GAO Feihong, LIU Meng. Research on failure mechanism of stratified sandstone with pre-cracked hole under combined static-dynamic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2127-2140.
- [21] 戴兵, 罗鑫尧, 单启伟, 等. 循环冲击荷载下含孔洞岩石损伤特性与能量耗散分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 69-77.
- DAI Bing, LUO Xinyao, SHAN Qiwei, *et al.* Analysis on damage characteristics and energy dissipation of rock with a single hole under cyclic impact loads[J]. China Safety Science Journal,

- 2020, 30(7): 69–77.
- [22] TAO M, MA A, CAO W, *et al.* Dynamic response of pre-stressed rock with a circular cavity subject to transient loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 99: 1–8.
- [23] ZHOU Y, XIA K, LI X, *et al.* Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 49(1): 105–112.
- [24] 吴拥政, 孙卓越, 付玉凯. 三维动静加载下不同长径比煤样力学特性及能量耗散规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(5): 877–888.
- WU Yongzheng, SUN Zhuoyue, FU Yukai. Mechanical properties and energy dissipation laws of coal samples with different length-to-diameter ratios under 3D coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(5): 877–888.
- [25] ZHAGN X P, WONG L N Y. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression; a numerical study based on parallel bonded-particle model approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(5): 711–737.
- [26] 孙卓越, 吴拥政, 孙久政, 等. 三维动静加载下煤样动态变形模量长径比效应[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(4): 043021.
- SUN Zhuoyue, WU Yongzheng, SUN Jiuzheng, *et al.* Length-to-diameter ratio effect of dynamic deformation modulus of coal samples under three-dimensional dynamic and static loading[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(4): 043021.
- [27] 翟新献, 翟俨伟, 刘勤裕, 等. 冲击作用下含水煤样能量吸收和耗散规律及本构关系研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(6): 202–211.
- ZHAI Xinxian, ZHAI Yanwei, LIU Qinyu, *et al.* Energy absorption and dissipation and the constitutive relation of water-bearing coal specimens under impact load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(6): 202–211.
- [28] 杨仁树, 李炜煜, 方士正, 等. 波阻抗对岩石动力学特性影响的模拟试验研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(3): 178–185.
- YANG Renshu, LI Weiyu, FANG Shizheng, *et al.* Tests for effects of wave impedance on rock's dynamic performance[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(3): 178–185.
- [29] 潘俊锋, 闫耀东, 马宏源, 等. 一次成孔 300 mm 煤层大直径钻孔防冲效能试验[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(5): 053913.
- PAN Junfeng, YAN Yaodong, MA Hongyuan, *et al.* Using 300 mm diameter boreholes for coal burst prevention a case study[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(5): 053013.