

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.017

高压空气爆破作用下煤体裂纹扩展及 振动特性模拟试验研究*

严少洋¹,高富强¹,杨小林²,褚怀保²,王昌³,叶红宇¹

(1. 洛阳理工学院 土木工程学院, 洛阳 471023; 2. 河南理工大学 土木工程学院, 焦作 454000;
3. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 为了探讨高压气体爆破对煤体裂纹扩展和振动特性的影响,采用模拟煤体基于自主研发的高压空气爆破装置开展气体爆破试验,试验过程中利用爆破速度采集仪和爆破振动采集仪分别对表面裂纹扩展速度及质点振动进行测试,分析高压空气爆破作用诱发的裂纹扩展发育过程及质点振动能量变化特性。运用扫描电镜(SEM)分析气爆前后试件孔裂隙演化规律。试验结果表明:在高压空气爆破设计压力为15 MPa的条件下,诱导试件表面裂纹沿围压加载方向发育扩展,裂纹发育扩展速度有 $v_{双向不等压} > v_{无围压} > v_{双向等压}$;不同围压条件下裂纹随距致裂孔距离的增加呈快速发育和稳态发育两个阶段发育扩展;诱发质点振动信号分布在0~250 Hz的范围内,振动信号中主频带的能量较其他子频带的能量有明显的区别,振动主频带信号在0~31.25 Hz低频带较为集中。研究成果以期优化高压气体爆破致裂孔分布和提高瓦斯抽采效果提供理论依据和指导。

关键词: 高压空气爆破;煤体;裂纹扩展;振动信号;振动能量

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)01-0142-09

Experimental Study on Crack Propagation and Vibration Characteristics of Coal under High-pressure Air Blasting

YAN Shao-yang¹, GAO Fu-qiang¹, YANG Xiao-lin², CHU Huai-bao², WANG Chang³, YE Hong-yu¹

(1. College of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: This study explored the influence of high-pressure gas blasting on coal's crack propagation and vibration characteristics. Using independently developed high-pressure air blasting devices, the high-pressure air blasting experiments were carried out on the simulated coal specimens. The surface crack propagation speed and particle vi-

收稿日期 (Date of reception): 2024-04-13

网络首发日期 (Published online): 2025-03-15

作者简介: 严少洋(1994-),男,河南长垣人,博士、讲师,主要从事气爆作用机理、隧道与地下工程等方面的研究工作, (E-mail) yanshaoyang1994@126.com。

通讯作者: 高富强(1981-),男,河北石家庄人,博士、教授,主要从事爆炸冲击动力学、隧道与地下工程等方面的研究工作, (E-mail) lygaofq@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(高压气体冲击作用下含瓦斯煤体的裂纹扩展及扰动规律研究-51874123); 河南省自然科学基金面上项目(深部环境下岩石的冲击力学特性及破坏机制研究-242300421255)

About the author: YAN Shao-yang (1994-), male, from Changyuan, Henan Province, Ph. D, lecturer, mainly engaged in research on the mechanism of gas explosion, tunnel and underground engineering, (E-mail) yanshaoyang1994@126.com.

Corresponding author: GAO Fu-qiang (1981-), male, from Shijiazhuang, Hebei Province, Ph. D, professor, mainly engaged in research on explosion impact dynamics, tunnels and underground engineering, (E-mail) lygaofq@163.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China General Project (Study on the crack propagation and disturbance law of coal containing gas under the impact of high-pressure gas-51874123), Henan Provincial Natural Science Foundation General Project (Research on impact mechanical properties and failure mechanisms of rocks in deep environment-242300421255)

bration of the specimen were measured using a blasting speed acquisition instrument and a blasting vibration acquisition instrument, respectively. Furthermore, the crack propagation and fracture induced by high-pressure air blasting and the variation characteristics of particle vibration energy were analyzed. Scanning electron microscopy (SEM) was used to examine the evolution of pore cracks in specimens before and after blasting. The experimental results indicate that the surface cracks on the specimen are induced to develop and propagate along the direction of confining pressure loading at a design pressure of 15 MPa, and the crack development and propagation speed is $v_{\text{Bi-directional unequal pressure}} > v_{\text{no confining pressure}} > v_{\text{Bi-directional equal pressure}}$. Besides, The crack development and propagation speed vary under different confining pressure conditions, exhibiting two stages: rapid development and steady-state development as the distance from the crack initiation hole increases. The induced particle vibration signal is distributed in the range of 0 ~ 250 Hz, with the energy in the main frequency band of the vibration signal significantly different from that in other sub-bands and the vibration main frequency band significantly differing from other sub-bands. The primary vibration signal is concentrated in the low-frequency band of 0 ~ 31.25 Hz. These findings provide a theoretical basis and guidance for optimizing the distribution of fractures induced by high-pressure gas blasting and improving the effectiveness of gas extraction.

Key words: high-press air blasting; coal; crack propagation; vibration signal; vibration energy

随着我国城镇化、工业化进程的不断推进,浅部资源逐渐枯竭,向地球深部大规模开发资源已成为新常态^[1,2]。然而,当深部煤层进行炸药爆破施工时,受地质构造、高地应力以及水文条件等众多地质因素的影响,爆源产生的能量以冲击波、振动波等方式在围岩介质中向外传播,对周围岩体结构在一定程度上会造成扰动损伤,时常会诱发冲击地压、瓦斯突出及突水等各类矿山灾害事故发生,严重威胁了人员和生产设备的安全^[3-5]。而高压气体爆破致裂技术作为一种新型的无水化物理膨胀爆破致裂措施,其具有环保节能、安全高效、操作简单等突出优势,是在复杂环境下无法实施炸药爆破作业的一种有利补充措施^[6-8]。

近年来,国内外专家学者借助物理试验、数值模拟和现场测试等方法对高压气体爆破致裂破岩效果及动态响应等方面等领域展开了大量的研究并取得了丰硕的研究成果,为后续深入研究奠定了基础。Wang L等通过CO₂压裂试验研究页岩裂纹起裂机理、扩展过程和裂隙的形态分布^[9]。Gao J等基于高压气体试验测试孔内压力荷载峰值^[10],分析高压气体不同压力条件对裂纹扩展的影响。Zhang Y N等基于室内试验结果建立二氧化碳破岩动力学模型^[11],分析二氧化碳爆破对致裂孔周围裂纹扩展和破坏效果的影响。Yang X L等建立了基于LS-DYNA下的高压气体冲击煤体的数值计算模型^[12],得到了高压气体冲击下煤体内应力波衰减及裂纹扩展规律,并模拟了不同地应力条件对裂纹扩展的影响规律。Chu H B等基于固体推进剂爆破试验^[13],测试了煤体的损伤和裂纹扩展速度,基于试验结果分析了煤体断裂损伤过程和机理^[14]。以上研究发现

高压气体泄出量、冲击方式和围压加载方式等对煤岩体起裂方式、裂纹扩展规律有着较大的影响。陈冠等基于液态二氧化碳相变破岩开展了振动信号监测试验^[15],借助小波包变换分析了振动信号的能量分布规律。褚怀保等为探究炸药爆破和高压气体爆破振动的特征差异^[16],开展了模拟岩体炸药爆破和高压气体爆破试验,对比分析了两种爆破振动持续时间和振动速度。夏祥等、彭怀德等和谢晓峰等在现场借助测振仪分别测试高压气体致裂破岩和与其同等能量条件下炸药破岩的振动速度和振动波形^[17-19]。以上研究分析发现,与炸药爆破相比,高压气体爆破具有更短的振动波持续时间、更快的振动速度衰减、更少的高频成分,并且在相同能量下的中远区范围内具有更显著的阻尼效应,减震效果更好。然而,目前有关高压气体爆破技术的研究主要从岩体爆破机理等方面开展的,关于煤体高压气体爆破裂纹扩展速度和振动效应的研究分析较少。

因此,本文基于自行研制的高压空气爆破试验装置开展气体爆破模拟试验,研究分析高压空气爆破作用下模拟煤体试件裂纹扩展规律和质点振动效应。借助爆速仪和爆破振动仪分别测试不同围压和高压气体爆破共同作用下煤体表面裂纹发育扩展规律和质点振动特性。运用扫描电镜(SEM)探明气爆前后试件孔裂隙演化规律。采用小波包分析将振动时域信号转换为频域信号,分析高压气体爆破诱发的振动能量变化特性。以期为高压气体爆破参数优化研究提供参考。

1 试验材料及方法

鉴于煤体自身物理力学性能参数的特殊性和复

杂性,导致煤体的实际物理力学参数具有很大的不确定性和离散型。鉴于煤体具有参数的离散型和孔隙结构的多样性,不利于进行规律性和重复性的试验研究。为解决煤体试验重复性和规律性差等问题,根据相似理论选取人工制作模拟煤岩体试块进行高压空气爆破试验。

1.1 试件制作

以河南赵固矿的煤样进行分析和测试,得出天然煤样的力学参数范围如表1所示。为了更为真实

的模拟煤样,以天然煤体的强度、波速、弹性模量及密度等参数为依据,采用人工搅拌的方法将河砂、石膏、水泥等材料按照配合比搅拌制作6块尺寸为500 mm×300 mm×300 mm的煤体模拟试件^[7,8],模拟煤体配合比及测试结果如表2所示,试件制作过程中,在距试件一端150 mm处预留垂直向下的致裂孔,孔深200 mm,直径为12 mm的致裂孔,待试件在标准条件下养护28 d后进行高压气体爆破试验。

表1 煤样的基本力学参数范围

Table 1 Basic mechanical parameters of coal samples

抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	弹性模量/ GPa	泊松比
12~18	0.8~2.0	1.4~1.6	1800~2000	2.3~3.2	0.2~0.3

表2 模拟煤体配合比及测试结果(kg/m^3)

Table 2 Simulated coal mix proportions and test results(kg/m^3)

配合比	水泥	砂子	石膏	水	珍珠岩	云母	发泡剂
	100	280	14	43	2	2	0.35
模拟煤体 测试结果	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔隙率	弹性模量/ GPa
	12.82	1.06	1.638	0.26	2152	6.68	2.52

1.2 高压空气爆破试验

采用自行研制的高压空气爆破试验装置进行试验测试。高压空气爆破试验装置主要由气体增压系统(由空气压缩机、增压泵和压力釜组成)和控制释放系统(数控表及电磁阀组成)、双向加压系统和测试系统四个部分组成。高压气体冲击测试试验原理为:采用由空气压缩机、增压泵和压力釜组成的气体增压系统将气体进行压缩增压,增压过程中的气体储存在压力釜中;当压力釜中的气体压力增加至试验设定压力(即数控表设定压力)时,数控表控制打开电磁阀瞬间释放压力釜中的高压空气进行气爆试验,采用监测元件及数据采集与处理系统对不同试验条件下的气爆试验结果进行获取及分析。高压空气爆破试验装置如图1所示。

高压空气爆破设计压力为15 MPa,围压分别为 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ MPa、 $\sigma_1 = 4$ MPa、 $\sigma_2 = 2$ MPa和 $\sigma_1 = \sigma_2 = 4$ MPa。为了消除边界效应对试验测试的误差,在试块四周表面涂上一层厚度为4~6 mm的耦合剂,加载过程中确保每个围压板与试块的边界表面直接接触。为了有效获取孔壁压力,在致裂孔孔底布置聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜传感器,封孔时预留50 mm的裸眼压裂段,利用动态应变仪和VIB系列动态信号转换器联合进行测试;为了能有效地获取

高压气体爆破下试件表面的裂纹发育扩展速度,选用 $\phi 0.3 \sim 0.5$ mm的纯铜细漆包线作为探针传感器贴在试件表面,探针之间的间隔为50 mm,借助智能五段高精度新型爆速仪(型号为BSW-3A)进行测试。

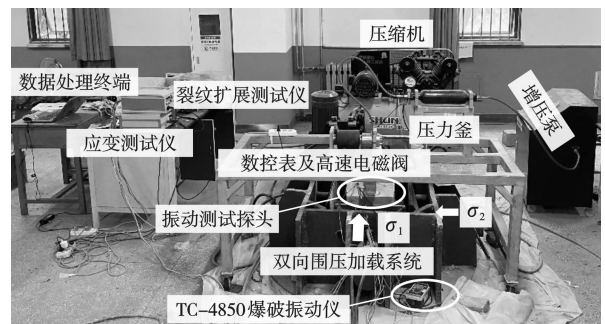


图1 高压空气爆破试验装置

Fig. 1 High-pressure air blasting test device

其测试原理是:气爆作用促使试件内部孔裂隙产生应力集中,促使孔裂隙发育形成裂纹,进而导致试件表面探针随着裂纹发育依次断开,探针断开后会产生脉冲信号,爆速仪会对脉冲信号的时间进行记录,通过相近两探针之间的距离和断开时间计算出气爆产生的裂纹扩展速度;采用爆破测振仪(型号为TC-4850)获取高压空气爆破诱发得质点振动

的波形,分析高压空气爆破的振动特征,振动测试点数据致裂孔 110 mm。测点布置如图 2 所示。

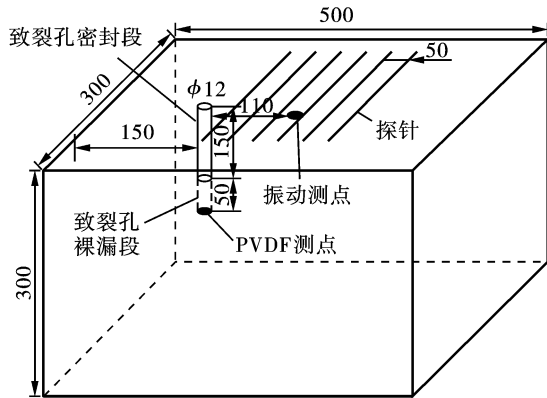
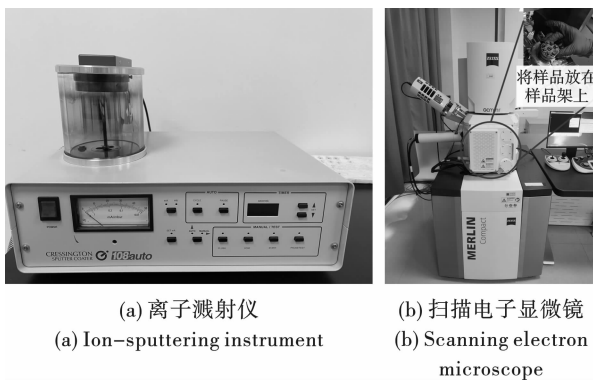


图 2 测点布置示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of measurement point layout(unit:mm)

1.3 电镜扫描试验(SEM)

为了获取高压气体爆破前后试件内部孔-裂隙的表现特性,采用人工取样的方法在致裂孔(爆源)近区取尺寸约为 1 cm^3 的试样,借助 Merlin Compact 型扫描电镜显微镜对试件进行扫描。为了确保聚焦扫描,将试样切片并选择放置在样品袋中保存。在试验过程中取出封闭样品,并用导电胶固定在样品台上。固定样品的样品台置于离子溅射设备中进行镀金,如图 3(a) 所示。将镀金后的样品放置样品台座上,然后选择适当的束斑值,并进行 SEM 测试,如图 3(b) 所示。



(a) 离子溅射仪
(a) Ion-sputtering instrument

(b) 扫描电子显微镜
(b) Scanning electron microscope

图 3 离散溅射仪及扫描电子显微镜
Fig. 3 Discrete sputtering instrument and scanning electron microscope

2 高压空气爆破试验结果及分析

2.1 高压空气爆破作用下致裂孔内压力时程曲线分析

为了精确的对比分析数据采集系统的结果,在

统计分析试验数据的过程中,可采用相对时间作为时间标准进行试验结果的后续分析。高压空气爆破设计压力为 15 MPa 条件下致裂孔壁的压力时程曲线如图 4 所示。

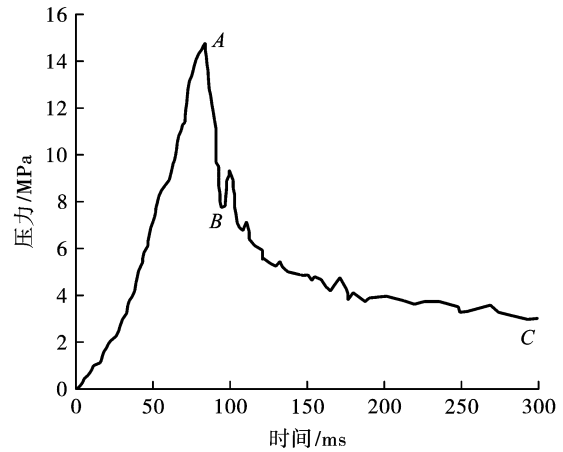


图 4 高压气体爆破冲击下致裂孔壁的压力时程曲线

Fig. 4 Pressure curve of cracking hole wall under high-pressure gas blasting

由图 4 可知,高压空气爆破冲击下致裂孔压力时程曲线可分为快速上升阶段、快速下降阶段和缓慢下降阶段。快速上升阶段(OA 段):当高压气体增压达到数控表预先设定的压力时,数控表打开电磁阀的开关释放气体,被释放的气体瞬间充满致裂孔且气体压缩膨胀达到峰值压力;快速下降阶段(AB 段):作用在致裂孔壁上的应力(压应力和拉应力等)大于煤体介质的动态抗压(抗拉)强度会引起煤体介质内部初始损伤(微孔-裂隙)产生压缩或拉伸等变形,进而造成微孔-裂隙进一步发育扩展,值得注意的是,致裂孔内压力随着微孔-裂隙的发育扩展呈瞬间快速下降;缓慢下降阶段(BC 段):在此阶段,气体进一步充填和穿透前一阶段发育扩展形成的裂隙,压力缓慢下降,直至气体压力降至为零。

2.2 高压空气爆破作用下试件表面裂纹扩展速度及破坏形态分析

2.2.1 高压空气爆破作用下试件表面裂纹扩展速度

对高压空气爆破设计压力为 15 MPa 不同围压条件下试件表面裂纹发育扩展速度的有效结果进行统计汇总如表 3 所示。不同工况条件下煤体表面裂纹发育扩展速度曲线如图 5 所示。

由表 3 和图 5 可知,围压在一定程度上对高压空气爆破诱发试件表面裂纹发育扩展有一定的影响,双向不等压(围压为 $\sigma_1 = 4, \sigma_2 = 2\text{ MPa}$) > 无围压((围压为 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0\text{ MPa}$) > 双向等压(围压为

$\sigma_1 = \sigma_2 = 4$ MPa) 条件下的裂纹发育扩展速度。以无围压条件下高压气体爆破诱发的裂纹发育扩展为参照组进行分析, 在双向不等压(围压为 $\sigma_1 = 4$, $\sigma_2 = 2$ MPa) 和高压气体爆破共同作用下, 与无围压相比, 双向不等压条件下的围压对主裂纹发育起到

诱导促进作用, 高压气体爆破诱发裂纹沿最大主应力 σ_1 的方向发育扩展形成主裂纹, 导致双向不等压条件下的裂纹发育扩展速度较大; 当双向压力相等(围压为 $\sigma_1 = \sigma_2 = 4$ MPa) 时, 与无围压相比, 裂纹发育受到抑制, 导致裂纹发育扩展速度相对较小。

表 3 不同工况下煤体表面裂纹发育扩展速度测试结果

Table 3 Test results of surface crack propagation velocity of coal under different conditions

围压/MPa	设计压力/MPa	测点间距/mm	测点数	时间间隔/ μs	裂纹扩展速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
$\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ MPa			1	104.12	480.24
			2	211.58	236.32
			3	392.81	127.29
			4	524.89	95.26
			5	590.53	84.67
$\sigma_1 = 4$ MPa $\sigma_2 = 2$ MPa	15	50	1	89.50	558.66
			2	130.59	382.88
			3	220.07	227.20
			4	343.10	145.73
			5	481.51	103.84
$\sigma_1 = \sigma_2 = 4$ MPa			1	114.45	436.87
			2	154.75	163.65
			3	479.25	104.33
			4	701.61	71.26
			5	/	/

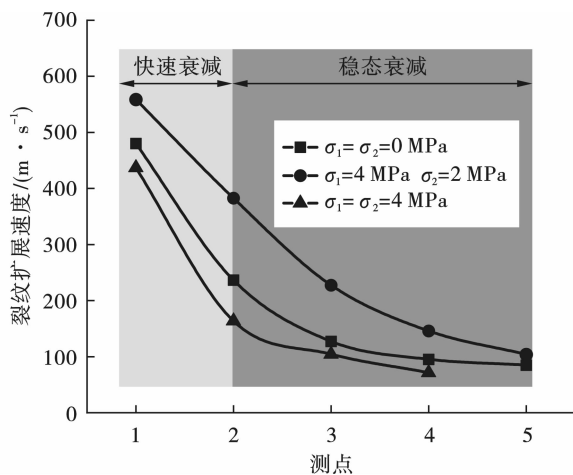


图 5 不同工况条件下煤体表面裂纹发育扩展速度曲线
Fig. 5 Curve of surface crack growth rate of coal under different conditions

在不同围压加载条件下, 高压空气爆破诱发试件表面裂纹发育扩展可近似分为快速发育扩展和稳态发育扩展两个阶段。高压空气爆破诱发裂纹的发育和扩展是由高压空气爆破产生的冲击波、高压气体的准静态驱动力以及围压等耦合作用的结

果^[7,20]。高压空气爆破产生的应力波促使径向裂纹发育并以 0.2 倍左右的应力波传播速度向外扩展, 由于应力波随距离的增加呈幂函数趋势衰减, 导致应力波携带的能量进一步降低, 进而引起裂纹发育扩展速度快速衰减。随着距致裂孔距离的增加, 弱应力波和高压气体渗透的准静态驱动力共同作用于裂纹的尖端, 此时, 裂纹发育扩展主要以高压气体准静态驱动力为主, 高压气体渗透驱动力作用下裂纹发育扩展近似呈稳态扩展。

2.2.2 高压空气爆破作用下试件表面破坏形态分析

对基于不同围压条件下高压空气爆破后试件表面的破坏形态进行统计, 试件表面裂纹发育扩展形态如图 6 所示。高压空气爆破作用前后试件内部孔-裂隙发育微观结构如图 7 所示。

由图 6 和图 7 从宏观和微观角度进行分析可得, 高压空气爆破设计压力为 15 MPa 冲击试验结果发现致裂孔周围未发现明显的破碎区。无围压条件下的试件在高压气体爆破后产生 4 条主裂纹随机分布; 在有围压(双向等压)条件下的试件表面有 4 条主裂纹, 且裂纹走向基本上沿着 σ_1 和 σ_2 应力方向

扩展;在有围压(双向不等压)条件下的试件表面有 2 条沿最大主应力方向(σ_1)扩展的主裂纹。

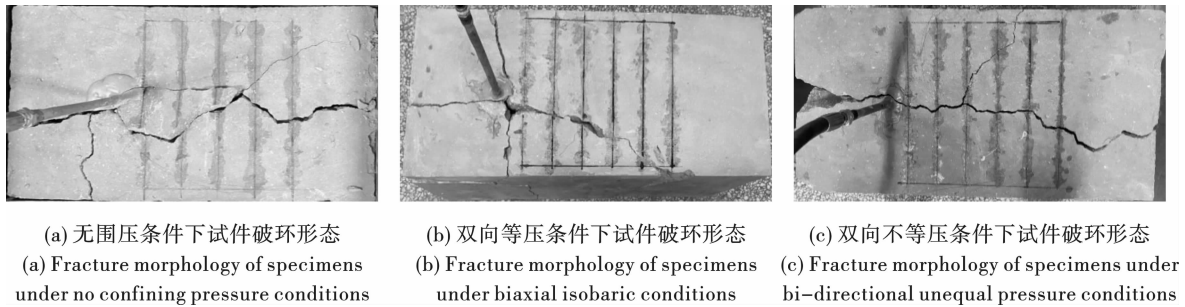


图 6 不同围压条件下试件表面裂纹发育扩展形态

Fig. 6 Surface crack growth patterns of specimens under different confining pressure

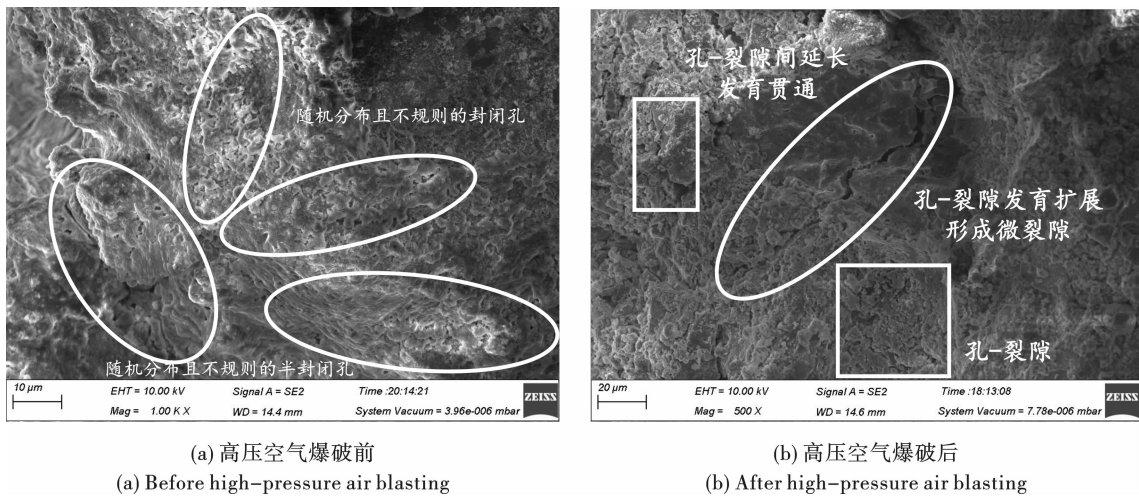


图 7 高压空气爆破前后试件内部孔-裂隙发育微观结构

Fig. 7 Microscopic structure of internal hole crack development in specimens before and after high-pressure air blasting

试件的破坏形态主要分为应力波作用下动态加载阶段和高压气体准静态驱动加载阶段。高压空气爆破前试件孔隙表面较为平整,随机分布且不规则的封闭孔和半封闭孔较为发育,高压空气爆破产生的应力波促使煤体介质内孔-裂隙尖端出现应力集中,集中应力达到微裂隙尖端的动态强度因子被激活,沿着初始缺陷(微孔-裂隙)的弱点成长发育扩展形成贯通的裂纹。在围压和高压空气爆破共同作用下,高压空气爆破产生的应力波、气体准静态的驱动力和围压相互叠加,从而促使随机分布的微孔-裂隙进一步沿应力方向的薄弱点发育形成微裂纹,微裂纹发育汇集连接贯通形成细观裂纹,其他方向的扩展受到抑制,细观裂纹发育扩展到一定程度形成宏观裂纹,进而出现断裂破坏。

2.3 高压空气爆破作用下试件表面质点振动分析

选取垂直于煤体介质表面 Z 方向的振动结果进行分析。冲击压力为 15 MPa 条件下 110 mm 处的监测点 Z 方向的时域谱图如图 8 所示。

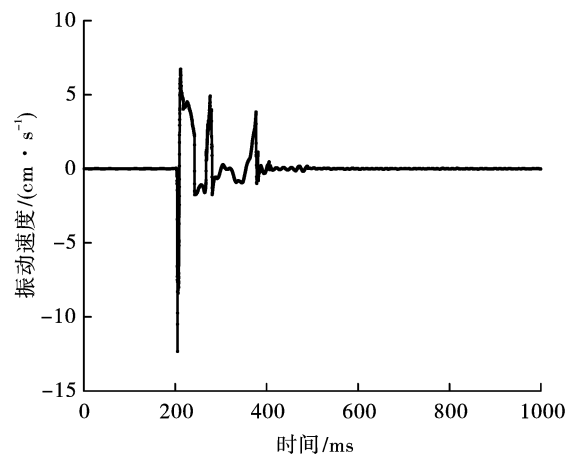


图 8 110 mm 处的监测点 Z 方向的时域谱图

Fig. 8 Time domain spectrum of monitoring point Z direction at 110 mm

为了进一步了解高压空气爆破引起的振动能量的变化特性,采用 MATLAB 运算软件对图 8 中振动时域信号进行小波包处理分析,小波基选取 Sym8。根据 TC-4850 测振仪的采样频率和高压空气爆破

振动信号特征确定小波包分解层数为7层,可将振动信号分解为带宽为7.8125 Hz的128个子频带。通过对小波包分解结果统计汇总得出0~250 Hz范

围内子频带振动能量占比如表4所示。各个子频带振动能量变化曲线如图9所示。

表4 子频带振动能量占比

Table 4 Proportion of vibration energy of each subband

子频带范围/Hz	冲击压力/15 MPa	子频带范围/Hz	冲击压力/15 MPa
0~7.81	12.94	78.13~85.94	10.49
7.81~15.63	17.81	85.94~93.75	3.66
15.63~23.44	6.09	93.75~101.56	2.29
23.44~31.25	24.17	101.56~109.38	0.53
31.25~39.06	2.54	109.38~117.19	1.41
39.06~46.88	10.49	117.19~125.00	0.43
46.88~54.69	3.66	125.00~156.25	3.36
54.69~62.50	2.29	156.25~187.50	0.85
62.50~70.31	0.53	187.50~218.75	0.08
70.31~78.13	1.41	218.75~250.00	0.81

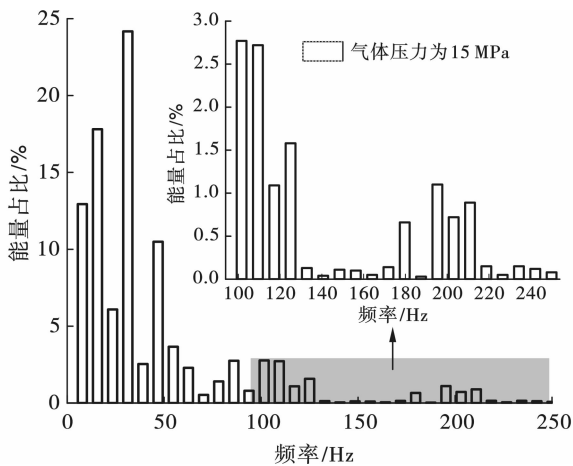


图9 子频带振动能量变化曲线

Fig. 9 Sub-band vibration energy variation curve

由表4和图9可知,在试验中采用设计气压为15 MPa爆破诱发的试件质点振动信号分布在0~250 Hz的范围内,由小波包分析可知,设计气压为15 MPa爆破诱发的振动信号在0~78.13 Hz低频段范围中的能量占比范围为81.93%。高压空气爆破诱发的振动信号中主频带的能量较其他子频带的能量有明显的区别,表现的较为突出,诱发振动信号的频率区间较为单一,振动信号主频带主要集中在0~31.25 Hz,其能量占比为61.01%。综上所述,低气压爆破冲击煤体介质诱发的振动主频带信号在0~31.25 Hz低频带较为集中。

3 结论

利用自行研制的高压空气爆破试验系统开展了

气爆模拟试验,探讨了不同围压条件下高压空气爆破作用下煤体的裂纹扩展及质点振动特性,结合扫描电镜(SEM)对高压空气爆破前后试件孔裂隙结构演化进行表征,得出以下结论:

(1)在高压空气爆破设计压力为15 MPa条件下,无围压条件下主裂纹随机分布,有围压条件下的试件表面裂纹走向基本上沿着 σ_1 和 σ_2 应力方向扩展,其他方向受到抑制;与无围压和双向等压条件下裂纹发育扩展速度相比,双向不等压条件下的裂纹发育扩展速度较大。

(2)高压气体爆破诱发煤体表面裂纹发育扩展可近似分为快速发育扩展和稳态发育扩展两个阶段。在近区,试件内部随机分布的微孔-裂隙在高压气体动态冲击下达到微裂隙尖端的动态强度因子被激活,促使随机分布的微孔-裂隙进一步沿着初始缺陷(微孔-裂隙)的薄弱点发育、扩展、贯通形成宏观裂纹,随着距离的增加,应力波作用降低,主要依靠高压气体渗透驱动力驱动初始缺陷(微孔-裂隙)发育。

(3)高压气体爆破诱发煤体质点振动信号分布在0~250 Hz的范围内,通过小波包分析可知,设计气压为15 MPa冲击压力诱发的振动信号在0~78.13 Hz低频段范围中的能量占比范围为81.93%。高压气体冲击诱发的振动信号中主频带的能量较其他子频带的能量有明显的区别,表现得较为突出,高压气体诱发振动信号的频率区间较为单一,振动主频带信号在0~31.25 Hz低频带较为集中。

参考文献 (References)

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [1] XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China; deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305. (in Chinese)
- [2] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
- [2] YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725. (in Chinese)
- [3] 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.
- [3] ZHANG Song-wen, SONG Ye-xiang, LIU Jin-liang, 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. (in Chinese)
- [4] 杨建华, 卢文波, 胡英国, 等. 隧洞开挖重复爆炸荷载作用下围岩累积损伤特性[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 511-518.
- [4] YANG Jian-hua, LU Wen-bo, HU Ying-guo, et al. Accumulated damage in surrounding rocks due to repeated blasting loads during blasting excavation of tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 511-518. (in Chinese)
- [5] 段军彪, 梁为民, 褚怀保. 多次爆破下混凝土振动能量变化特征分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(10): 16-20.
- [5] DUAN Jun-biao, LIANG Wen-min, CHU Huai-bao. Analysis on vibration energy characteristics of concrete under multiple blasting[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(10): 16-20. (in Chinese)
- [6] 魏海霞, 祝杰, 杨小林, 等. 高压气体爆破作用下层状岩体的地表振动效应预测方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(20): 1-11.
- [6] WEI Hai-xia, ZHU Jie, YANG Xiao-lin, et al. Prediction method of ground vibration effect of layered rock mass under high-pressure gas blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(20): 1-11. (in Chinese)
- [7] YAN Shao-yang, YANG Xiao-lin, CHU Huai-bao, et al. Experimental study on the dynamic response and pore structure evolution of coal under high-pressure air blasting[J]. ACS Omega, 2022, 7(28): 24475-24484.
- [8] YAN Shao-yang, YANG Xiao-lin, CHU Huai-bao, et al. Experimental study on dynamic response and damage evolution of coal under shocks by multiple high-pressure air blasting[J]. Geofluids, 2022, 2022: 1-12.
- [9] WANG Lei, YAO Bo-wen, XIE Hao-jun, et al. CO₂ injection-induced fracturing in naturally fractured shale rocks[J]. Energy, 2017, 139: 1094-1110.
- [10] GAO Jie, WANG Hai-feng, QIN Wei, et al. Experimental study on high-pressure air blasting fracture for coal and rock mass[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-10.
- [11] ZHANG Ya-nan, DENG Jun-ren, DENG Hong-wei, et al. Peridynamics simulation of rock fracturing under liquid carbon dioxide blasting[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2018, 28(7): 1038-1052.
- [12] YANG Xiao-lin, WANG Chang, CHU Huai-bao, et al. Study on the stress field and crack propagation of coal mass induced by high-pressure air blasting[J]. Minerals, 2022, 12(3): 300.
- [13] CHU Huai-bao, YU Meng-fei, SUN Bo, et al. Experimental study on damage fracture law of coal from solid-propellant blasting[J]. Energies, 2022, 15(21): 8104.
- [14] 李真珍, 于建新, 杨小林, 等. 深部煤层水压爆破裂纹扩展规律[J]. 高压物理学报, 2022, 36(3): 181-190.
- [14] LI Zhen-zhen, YU Jian-xin, YANG Xiao-lin, et al. Crack propagation regularity of hydraulic blasting in deep coal seam[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(3): 181-190. (in Chinese)
- [15] 陈冠, 李启月, 刘小雄, 等. 液态CO₂相变破岩振动信号能量分布特征[J]. 爆破, 2018, 35(2): 155-163.
- [15] CHEN Guan, LI Qi-yue, LI Xiao-xiong, et al. Research on energy distribution characters about liquid CO₂ phase-transition broken rock vibration signal[J]. Blasting, 2018, 35(2): 155-163. (in Chinese)
- [16] 褚怀保, 余梦飞, 严少洋, 等. 高压气体爆破与炸药爆破振动试验研究[J]. 爆破, 2022, 39(4): 177-185.
- [16] CHU Huai-bao, YU Meng-fei, YAN Shao-yang, et al. Comparison analysis on high-pressure gas cracking and explosive blasting vibration[J]. Blasting, 2022, 39(4): 177-185. (in Chinese)
- [17] 夏祥, 李海波, 王晓炜, 等. 核电工程中的CO₂致裂与炸药爆破地表振动传播规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1350-1356.
- [17] XIA Xiang, LI Hai-bo, WANG Xiao-wei, et al. Comparison analysis of ground vibrations induced by CO₂ gas fracturing and explosive blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(7): 1350-1356. (in Chinese)
- [18] 彭怀德, 刘敦文, 褚夫蛟, 等. 硬岩隧道高压气体膨胀破岩开挖试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 242-248.
- [18] PENG Huai-de, LIU Dun-wen, CHU Fu-jiao, et al. Test on high pressure gas expansion rock fragmentation in hard rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 242-248. (in Chinese)
- [19] 谢晓锋, 李夕兵, 李启月, 等. 液态CO₂相变破岩桩井

- 开挖技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8):2031-2038.
- [19] XIE Xiao-feng, LI Xi-bing, LI Qi-yue, et al. Liquid CO₂ phase-transforming rock fracturing technology in pile-well excavation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(8):2031-2038. (in Chinese)
- [20] 褚怀保, 王 昌, 杨小林, 等. 煤体高压空气爆破模拟试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(20):54-60, 157.
- [20] CHU Huai-bao, WANG Chang, YANG Xiao-lin, et al. A simulation experimental study on high-pressure air blasting of coal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(20):54-60, 157. (in Chinese)
-
- (上接第 141 页)
- [9] CUI Y, LIU D, ZHANG Y, et al. The microstructure and mechanical properties of TA1-low alloy steel composite plate manufactured by explosive welding[J]. Metals, 2020, 10(5):663.
- [10] CROSSLAND B. Explosive welding of metals and its application[M]. Oxford:Oxford University Press, 1982.
- [11] DERIBAS A. Science of explosive welding: state of art [C]//4 th International Symposium Impact Engineering. 2001:527-534.
- [12] KAHRAMAN N, GÜLENCB, FINDIK F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(2):127-133.
- [13] ZHOU Q, LIU R, RAN C, et al. Effect of microstructure on mechanical properties of titanium-steel explosive welding interface[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 830:142260.
- [14] KAHRAMAN N, GÜLENCB, FINDIK F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(2):127-133.
- [15] SUN W, ZHANG W, GUO J, et al. Cracking behavior in tensile and bending test of underwater explosive-welded AZ31/Cu laminated composite[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 103:102256.
- [16] ZHANG L J, PEI Q, ZHANG J X, et al. Study on the microstructure and mechanical properties of explosive welded 2205/X65 bimetallic sheet[J]. Materials & Design, 2014, 64:462-476.
- [17] 周 恒, 马宏昊, 沈兆武, 等. TiNi 合金/Q235 钢爆炸复合界面微观结构特性及其演化[J]. 工程爆破, 2022, 28(3):82-90.
- [17] ZHOU Heng, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, et al. Microstructural characteristics and evolution of the explosive composite interface between TiNi alloy and Q235 steel[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(3):82-90. (in Chinese)
- [18] CHEN X, XIE X, HU J, et al. Experimental and numerical study on the mechanism of interlayer explosive welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30:5529-5546.
- [19] LIANG G, HUANG J, ZHOU D, et al. Study on explosive welding A7075 and Ti - 6Al - 4 V with aluminum or copper interlayer [J]. Journal of Materials Science, 2024, 59(33):15883-15903.
- [20] 孙玉玲, 马宏昊, 沈兆武. 316L/CuCrZr 界面开孔爆炸复合板的实验研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(1):55-61.
- [20] SUN Yu-ling, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu. Experimental study on explosive cladding plates with long holes opened at the 316L/CuCrZr interface [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(1):55-61. (in Chinese)
- [21] 曾翔宇, 李晓杰, 王小红, 等. 爆炸焊接波状界面的形成和发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(6):1977-1983.
- [21] ZENG Xiang-yu, LI Xiao-jie, WANG Xiao-hong, et al. Formation and development of wavy interfaces in explosive welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(6):1977-1983. (in Chinese)
- [22] WRONKA B. Testing of explosive welding and welded joints. The microstructure of explosive welded joints and their mechanical properties[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45:3465-3469.
- [23] 张仲一, 郭子如, 周佐玉, 等. 双层爆炸复合中覆板最小可焊厚度的分析[J]. 工程爆破, 2021, 27(3):83-88.
- [23] ZHANG Zhong-yi, GUO Zi-ru, ZHOU Zuo-yu, et al. Analysis of the minimum weldable thickness of the cladding plate in double-layer explosive cladding[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(3):83-88. (in Chinese)
- [24] GREENBERG B A, IVANOV M A, INOZEMTSEV A V, et al. Wave formation process upon explosive welding: electron microscopic observations and imitating experiments[J]. arXiv preprint arXiv:1608.06655, 2016.
- [25] ZHANG T, WANG W, ZHANG W, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an AA6061/AZ31B alloy plate fabricated by explosive welding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735:1759-1768.
- [26] LI B, ZHANG M, ZHANG K, et al. The nucleation and growth of fine austenitic grain at interface of the L415QS/N08825 bimetallic composite pipe by explosive welding[J]. Materials Letters, 2024, 367:136593.