



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

任建喜,云梦晨,张 琨,等.静动组合三轴加载煤岩强度劣化试验研究[J].煤炭科学技术,2021,49(11):105-111. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.11.014

REN Jianxi, YUN Mengchen, ZHANG Kun, *et al.* Experimental research on coal and rock strength deterioration under combined static and dynamic triaxial loading [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (11) : 105 - 111. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.11.014

静动组合三轴加载煤岩强度劣化试验研究

任建喜,云梦晨,张 琨,景 帅

(西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054)

摘 要:基于煤岩力学伺服三轴压缩试验系统,辅以声发射检测,对彬长矿区某矿煤岩进行高应力下不同频率动载试验,研究煤岩动载诱发后破坏机理与强度劣化规律。结果表明:煤岩动载扰动后强度劣化明显,峰值强度、应变与动载频率呈负相关;动载扰动后煤岩内部裂隙进一步发育,提前进入屈服变形;煤岩破坏首先从内部开始,逐渐延伸至表面,破坏形式由剪切破坏变为横向拉伸破坏。声发射定位点由中心向外部扩展,大量分布在煤岩表面,与煤岩裂隙发育区域及主要破坏方向基本保持一致;声发射能量事件主要发生在动载加载初期阶段及峰值阶段且峰值阶段达到最大,能量与煤岩应力水平呈正相关,破坏后能量迅速回落。煤岩动载结束后继续静载加载到其动载最大应力阶段前无声发射能量事件产生,发生明显凯泽现象;临近峰值破坏阶段声发射能量迅速回落,此特性可作为预测煤岩破坏的前兆。

关键词:煤岩力学;三轴压缩试验;声发射检测;动载试验

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)11-0105-07

Experimental research on coal and rock strength deterioration under combined static and dynamic triaxial loading

REN Jianxi, YUN Mengchen, ZHANG Kun, JING Shuai

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the servo-triaxial compression test system of coal and rock mechanics, supplemented by acoustic emission detection, a dynamic load test of coal and rock under high stress at different frequencies in Binchang mining area was carried out to study the failure mechanism and strength degradation law of coal and rock induced by dynamic load. The results show that the strength of coal and rock is obviously degraded after dynamic load disturbance. The peak strength and strain are negatively correlated with the dynamic load frequency; after the dynamic load disturbance, the internal cracks in the coal and rock further develop and enter the yield deformation ahead of time; the failure of coal and rock first starts from the inside and gradually extend to the surface, the failure mode changes from shear failure to transverse tensile failure. Acoustic emission positioning points extend from the center to the outside and are distributed in large numbers on the surface of coal and rock, which are basically consistent with the development area of coal and rock fissures and the main failure directions; acoustic emission energy events mainly occur in the initial stage and peak stage of dynamic load loading and reach the maximum in the peak stage, the energy value is positively correlated with the stress level of coal and rock, and the energy drops rapidly after failure. After the coal dynamic loading is over, the silent emission energy event occurs before the static load continues to the maximum stress stage of the dynamic load, and the obvious Kaiser phenomenon occurs; the acoustic emission energy drops rapidly near the peak failure stage, this feature can be used as a precursor to predict coal and rock failure.

Key words: coal and rock mechanics; triaxial compression test; acoustic emission detection; dynamic load test

0 引 言

随着我国煤炭资源开采深度的增加,地质条件

复杂而导致巷道围岩失稳现象愈加频繁^[1]。深埋特厚煤层坚硬顶板及特厚煤柱可储存大量弹性能,煤岩巷道长期处于高地应力环境^[2]。当有施工或

收稿日期:2021-03-21;责任编辑:郭 鑫

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11872299,12072259);陕西省自然科学基金基础研究计划—煤岩联合基金资助项目(2019JLP-01)

作者简介:任建喜(1968—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,博士。E-mail:renjianxi1968@163.com

者地质构造引起的动荷载扰动巷道煤体时,极易引发围岩失稳、巷道破坏,严重时可诱发冲击地压^[3],对井下工作人员的人身安全及开采施工问题造成极大安全隐患^[4]。研究在深埋条件下煤岩巷道的变形破坏机理已成为分析巷道稳定性的重要参考^[5]。国内外学者对于煤岩变形破坏规律研究采用三轴静载试验、霍普金森动载试验、CT 扫描及声发射检测等试验手段,对冲击地压作用下煤岩的强度变化规律进行了大量的研究工作,取得了丰硕的成果。杨慧明^[6]采用岩石力学试验系统,辅以声发射检测手段,得到不同应力条件对煤的破坏特征及声发射活动特征具有重要影响作用。邓志刚^[7]以强度尺寸效应为切入点结合最弱链理论得出冲击倾向性煤岩的强度具有明显的尺寸效应。薛东杰等^[8]对煤岩进行不同围压、不同加载速率的试验,建立了采动力学条件下考虑加卸载过程中材料损伤的煤岩黏弹性模型屈服准则。通过总结前期 CT 扫描技术,以标准煤样为研究对象,进行常规三轴力学试验,利用三维重构的方法,得到煤岩内部裂隙分布状况及煤岩破坏程度与体分形维值的定量关系^[9-10]。刘晓辉等^[11]采用霍普金森压杆加载系统,对煤岩进行不同应变率的加载试验,得出煤岩破坏过程中能量转变

规律。江红祥等^[12]以断裂力学为理论基础,定量研究了动力特性下煤岩破坏的特征关系。通过不同加载条件研究动力影响和煤体破坏机制^[13-15]以及通过对不同物理力学特性的煤岩加载试验研究其声发射规律^[16-18]。刘少虹等^[19-20]以波动力学为基础研究煤岩在动、静荷载作用下的应力波传播机制及能量耗散变化影响规律,提出煤岩动、静载组合与其结构的相互影响是诱发冲击地压的重要因素。但由于问题的复杂性,不同加载频率下弱冲击倾向性煤岩强度劣化规律仍需进一步研究。以彬长矿区煤岩为对象,进行不同频率下煤岩三轴压缩状态下动载破坏试验,研究动载下煤岩强度劣化规律,目的是为冲击地压工作面煤岩顺槽围岩稳定性评价及支护参数的确定提供参考依据。

1 煤岩冲击倾向性测定及分析

煤岩冲击倾向性是其发生冲击地压的主要内部因素,国家规定主要采用的冲击倾向指标有单轴抗压强度、弹性能量指数、冲击能量指数和动态破坏时间。当煤岩的 4 个冲击倾向指标测定结果不一致时,采用模糊综合评价法,其中 4 个指标的权重分别为 0.3、0.2、0.2、0.3,判别标准见表 1。

表 1 煤岩冲击倾向性分类标准
Table 1 Classification criteria of coal shock tendency

项目	I 类	II 类	III 类
冲击倾向	无	弱	强
动态破坏时间 T_D/ms	$T_D>500$	$50<T_D\leq 500$	$T_D\leq 50$
弹性能量指数 W_{ET}	$W_{ET}<2$	$2\leq W_{ET}<5$	$W_{ET}\geq 5$
冲击能量指数 K_E	$K_E<1.5$	$1.5\leq K_E<5$	$K_E\geq 5$
单轴抗压强度 R/MPa	$R<7$	$7<R<14$	$R\geq 14$

经过对彬长矿区某矿煤岩初步室内试验得到其冲击倾向性指标测定结果如下:

单轴抗压强度 R/MPa	9.29
弹性能量指数 W_{ET}	1.349
冲击能量指数 K_{ES}	5.16
动态破坏时间 T_D/ms	332

单轴抗压强度为弱冲击倾向性,弹性能量指数为无冲击倾向性,冲击能量指数为强冲击倾向性,动态破坏时间为弱冲击倾向性,4 个指标判定结果不一致,因此根据规范采用综合判断 4 类冲击倾向指标,整体判别为弱冲击倾向性,具备发生冲击地压的能力。其中冲击能指数明显较高,说明煤岩破坏前集聚弹性能力较强,破坏后能量释放更易达到煤岩破坏强度的限值。

2 动静载下煤岩破坏特性试验

2.1 试验仪器与试验系统

试验所用仪器 DTAW-8000 为自主研发的煤岩力学伺服三轴压缩试验系统(图 1),由加载系统、控制系统、油压系统、数据采集系统 4 部分组成。加载系统由动载加载系统与静载加载系统组成,其中静载加载系统可用位移控制及力控制 2 种控制方式,位移加载速率为 0.001~7.000 mm/s,力加载速率为 0.01~300 kN/s,系统最大轴向荷载 8 000 kN,最大围压 50 MPa;动力加载系统荷载幅值±200 kN,位移幅值±1 mm,频率<10 Hz,动载波形为正弦波、正切波、矩形波、三角波等。采用 PAC 数字化声发射检测系统进行 6 通道定位检测,前置放大器为 40 dB,滤波器下限 100 kHz,上限 1 MHz。

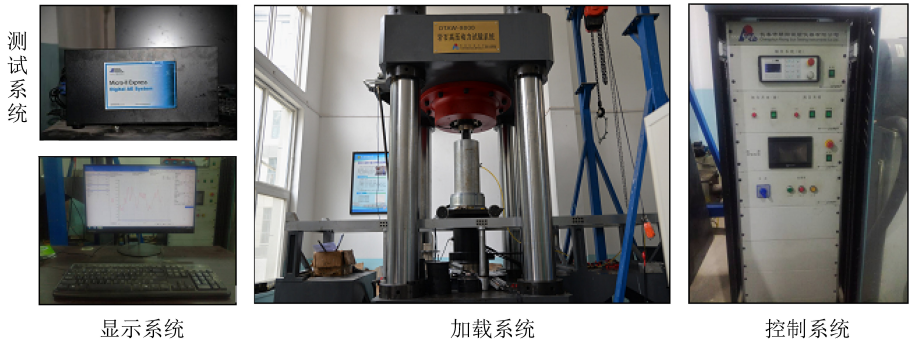


图 1 动静三轴试验系统
Fig.1 Dynamic and static triaxial test system

2.2 试样制备

试验采用国际标准圆柱试样,试样尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ (图 2)。采用 NM-48 超声波检测分析仪测得各试件的纵波波速,剔除物理参数异常、表面有肉眼可见的明显缺陷的试样。并根据有关规范完成了标准尺寸煤样的密度、波速、含水率、孔隙率等物理及力学参数的测定结果见表 2 和表 3。



图 2 标准煤样
Fig.2 Some coal samples

表 2 煤岩物理参数

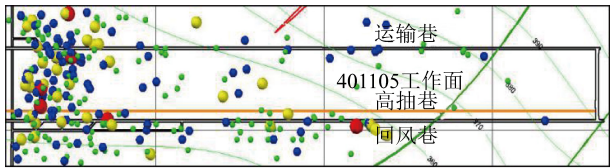
Table 2 Physical parameters of coal and rock sample			
天然密度 $\rho /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	波速 $P /$ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	含水率/%	孔隙率/%
1.48	1.81	3.77	6.3

表 3 煤岩力学参数

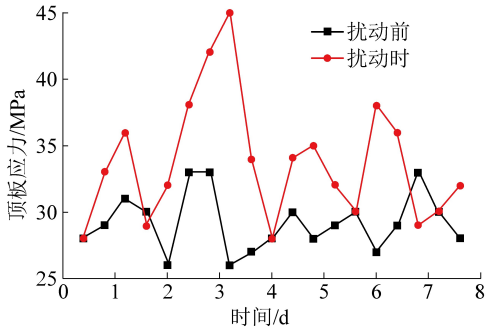
Table 3 Mechanics parameters of coal and rock sample					
弹性模量/ GPa	泊松 比	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强 度/MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
3.78	0.26	9.29	1.31	1.98	35.84

2.3 试验工况

根据震源附近动载扰动监测情况可知(图 3),彬长矿区某矿采煤工作面区段平巷动载主要由工作面掘进施工及回采所导致得矿山压力显现及地质运动,震源能量级为 $10^4 \sim 10^6\text{ J}$ (图 3a 中红色震源能量级 $>10^6\text{ J}$,黄色震源能量级 $>10^5\text{ J}$,蓝色震源能量级 $<10^5\text{ J}$),动载频率小于 10 Hz,主频段区间主要处于



(a) 工作面震源能量分布



(b) 工作面不同时段顶板压力分布

图 3 动载扰动监测情况

Fig.3 Dynamic load disturbance monitoring

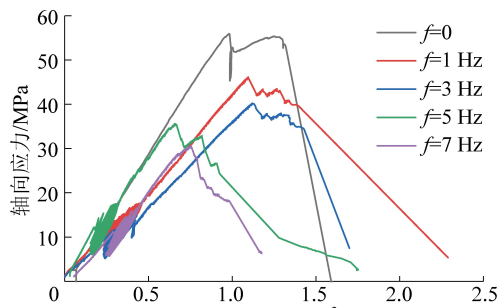
3~5 Hz,动载持续时间通常为几十秒到几分钟,由图 3b 可知,动载后压力稳定增长 5 MPa,煤岩所受原岩应力约为 12 MPa。研究表明:煤层周期来压级地震荷载接近于正弦波,煤岩主要变形阶段发生在动载 300 个周期内。由静载试验可知,煤岩轴向应力 10 MPa 时基本为压密阶段结束、弹性阶段开始时的应力状态。为防止煤岩塑性变形对动载诱发导致变形的影响,采用单一变量法控制原则选取此状态为煤岩动载加载初始状态。因此,本次不同频率的动载试验共设置 4 个频率,振幅为 5 MPa,频率分别为 1、3、5、7 Hz 的 300 个周期的正弦应力波动载试验,动载后再次以静载加载至破坏,并对整个试验过程对声发射 AE 能量数和定位点进行监测。选取 15 个波速、密度相差小于 5%,表面无明显节理的标准煤样,分为 5 组,每组 3 个试件。①静载对比试验:第 1 组进行围压 12 MPa 的三轴压缩试验,加载以应变控制加载速率 $v=0.01\text{ mm/s}$,轴向加载至破

坏,整个试验过程采用声发射仪器实时检测。为动载试验提供参数依据及对比数据。②不同频率动载试验:其余各组试样首先加载围压至 12 MPa,加载以应变控制加载速率 $v=0.01$ mm/s,轴向静载加载预加力至 10 MPa;每组 3 个试样作为平行对比试验,分别施加振幅 5 MPa,1、3、5、7 Hz 四种频率的正弦应力波动载试验,动载过后再进行静载加载直至试样破坏,整个试验过程监测其声发射分布规律。

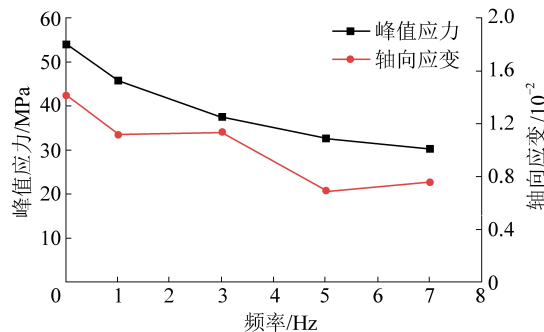
3 试验结果分析

3.1 不同频率动载试验应力-应变曲线分析

对煤岩进行不同频率动载应力-应变曲线对比分析如图 4a 所示:在加围压至 12 MPa,以应变控制加载速率 $v=0.01$ mm/s 的静载即频率 $f=0$ 作用下轴向加载至试样破坏,所得煤岩峰值强度为 54.3 MPa,极限应变为 1.42;在施加振幅 5 MPa,动载频率为 1、3、5、7 Hz 四种频率下,煤岩峰值强度分别为 45.8、37.7、32.8、30.5 MPa,极限应变分别为 1.12、1.14、0.69、0.76。可知煤岩在不同频率的动载加载下,内部裂隙二次发育,导致后期应力-应变曲



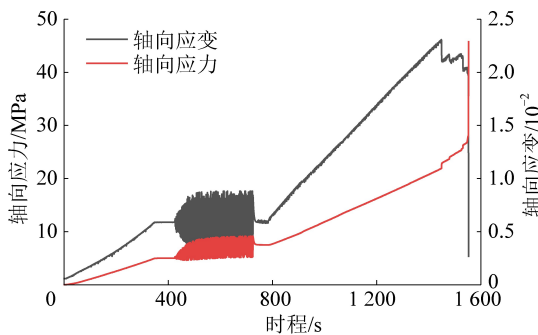
(a) 不同频率下煤岩应力-应变曲线



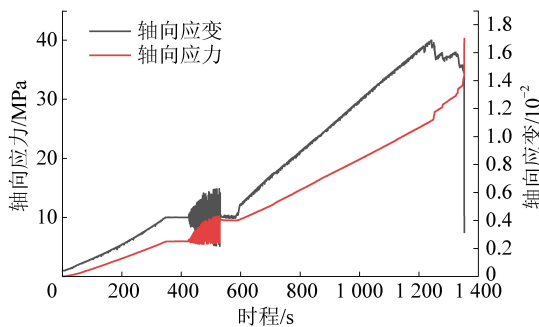
(b) 煤岩强度劣化与频率曲线

图 4 幅值 5 MPa 不同频率煤岩动载试验曲线

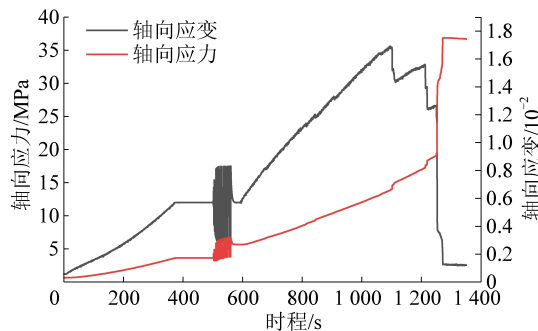
Fig.4 Dynamic load test curves with amplitude of 5 MPa at different frequencies



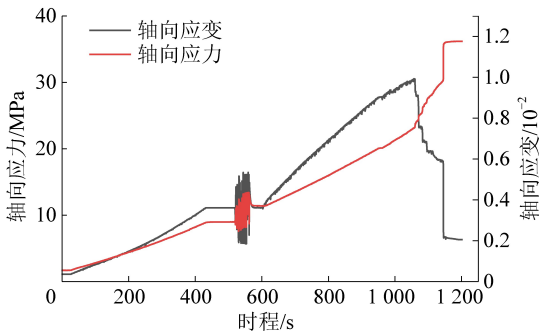
(a) 频率 1 Hz 正弦波加载



(b) 频率 3 Hz 正弦波加载



(c) 频率 5 Hz 正弦波加载



(d) 频率 7 Hz 正弦波加载

图 5 应力-应变与时程曲线

Fig.5 Stress-strain and time history curve of coal

线局部缺陷明显增多,提前进入塑性变形阶段。如图 4b 所示:说明与静载相比煤岩在动载频率 1、3、5、7 Hz 下峰值强度降低明显分别为 15.7%、30.

6%、39.6%、43.8%,峰值强度平均值降低约 30% 左右,强度劣化明显,且动载频率越高,强度劣化越明显,但随着频率增加其强度劣化趋势逐渐降

低,最终强度劣化趋于稳定值。当动载频率较高时,其强度劣化基本保持在45%左右,说明此时动载振幅为强度劣化的主导因素,频率影响煤岩强度劣化减弱。

3.2 不同频率下煤岩动载过程中强度劣化时程分析

煤岩不同频率动载过程中应力-应变与时程曲线对比分析如图5所示;煤岩在轴向力10 MPa(弹性阶段)时分别进行频率为1、3、5、7 Hz,振幅为5 MPa的正弦应力波振动300个周期。动载频率分别为1、3、5、7 Hz下,动载完成后应变增长分别为0.128%、0.149%、0.096%、0.078%,平均增长值为0.113%。说明煤岩在低应力阶段承受不同频率的正弦波动荷载后,内部裂隙二次发育,应变有所增长,但均未达到破坏。图中不同频率动载下煤岩应力、应变同步振动,动载过后应力恢复到10 MPa的初始应力状态时,应变未完全恢复,说明动载导致煤岩在弹性(低应力)阶段发生屈服变形。

3.3 不同频率下煤岩动载扰动后声发射特性分析

对不同频率动载扰动后煤岩进行应力-声发射

能量的时程关系分析如图6所示。不同频率动载扰动下,煤岩声发射能量事件变化趋势相同,即:动载前由于应力水平较低,煤岩处于弹性阶段且先期在围压阶段裂隙基本压密导致内部裂隙基本不发育,声发射能量事件基本不发生。动载加载时,随着煤岩轴向应力周期振动变化发生能量跃迁现象,说明在动载过程中煤岩内部裂隙二次发育。动载过后加载至其动载峰最大应力阶段前无声发射能量事件产生。当煤岩强度达到峰值时能量水平突然达到最高且能量跃迁频繁发生,说明内部裂隙进一步发育直至煤岩破坏,峰值后由于煤岩破坏而应力释放导致能量迅速回落至较低值。研究表明,在煤岩应力局部释放、动载加载及煤岩应力接近峰值时等阶段均会出现能量跃迁现象,但能量值最高点均发生在煤岩应力峰值阶段,此后应力骤降能量迅速回落,不同频率动载扰动后声发射能量回落均比应力变化超前,因此特性可作为提前预测煤岩破坏的征兆。不同频率煤岩动载后静态加载至其动载最大应力水平前均无声发射能量事件产生,煤岩动载扰动后发生声发射凯泽效应。

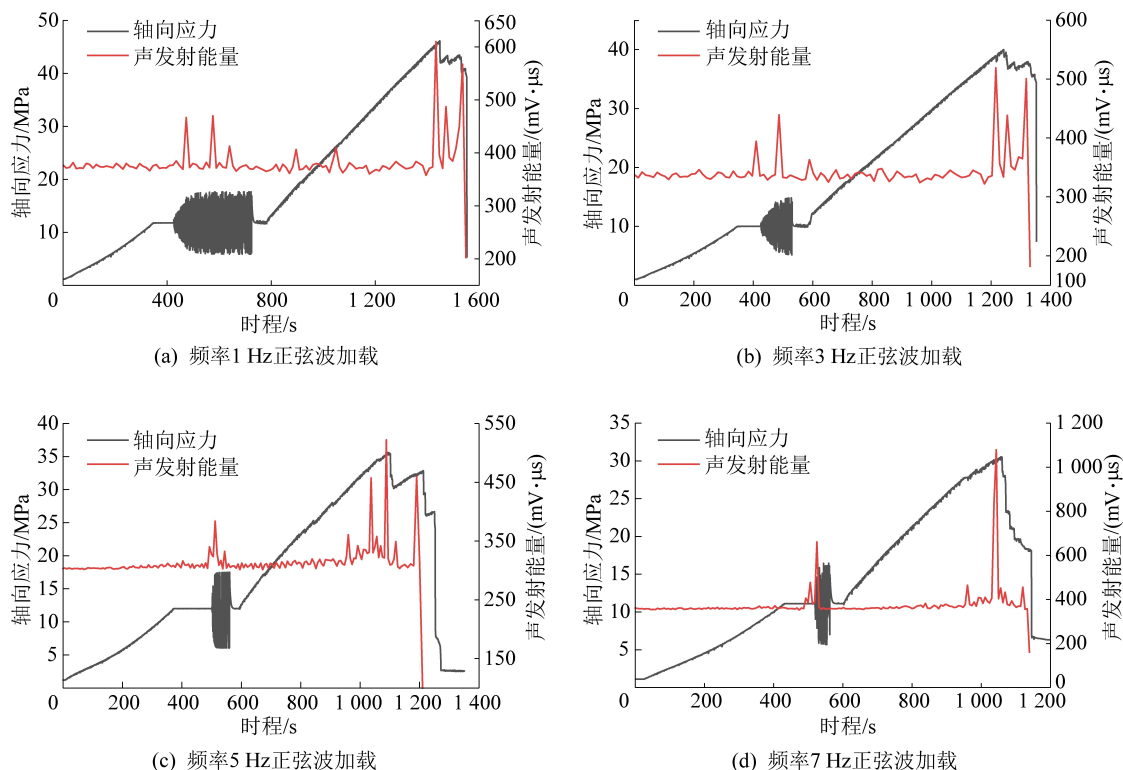


图6 煤岩应力-声发射能量时程曲线

Fig.6 Stress acoustic emission energy time history curve of coal

3.4 静、动载煤岩破坏对比及声发射破坏定位分析

围压12 MPa下静载、振幅为5 MPa动载的煤岩典型破坏模式及声发射定位对比分析表明,煤岩在静、动加载下破坏形式有明显差异(图7、图

8)。图7a表明静载下煤岩呈剪切破坏,具有明显贯通的单向剪切破坏面;对比图7b—图7e动载扰动后煤岩破坏呈横向拉伸破坏,表面呈现数条竖向裂缝,说明动载扰动后煤岩内部裂隙二次发育,

煤岩破坏程度逐渐加大,明显比静载下严重;如图 7e 在动载频率为 7 Hz 时,煤岩破坏最为严重,破坏后竖向裂缝明显增多,顶部开裂成碎屑状,说明煤岩在同振幅下频率越高,破坏越严重,强度劣化越明显。图 8a 表明煤岩破坏后声发射定位点主要分布破裂面附近,由煤岩中心沿破坏面向两侧扩展形成一条明显的倾斜破裂面,说明煤岩破坏首先是从内部开始逐渐延伸至表面,最终形成贯通的破裂面导致煤岩破坏;对比图 8b—图 8e 在动载加载下声发射定位点在煤岩内部及表面大量产生且动载频率越高声发射定位点越密集,说明煤岩破坏从内部开始扩展至表面且表面出现多条竖向破坏裂缝,破坏形式由单向剪切破坏变为横向拉伸破坏,与煤岩破坏后表面所呈现的主要破裂面形状基本吻合。

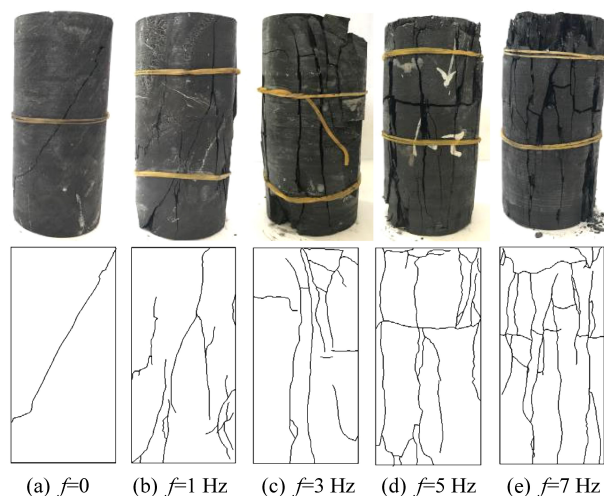


图 7 不同条件静、动载下煤岩破坏形式

Fig.7 Failure modes of coal-rock under dynamic and static loads under different conditions

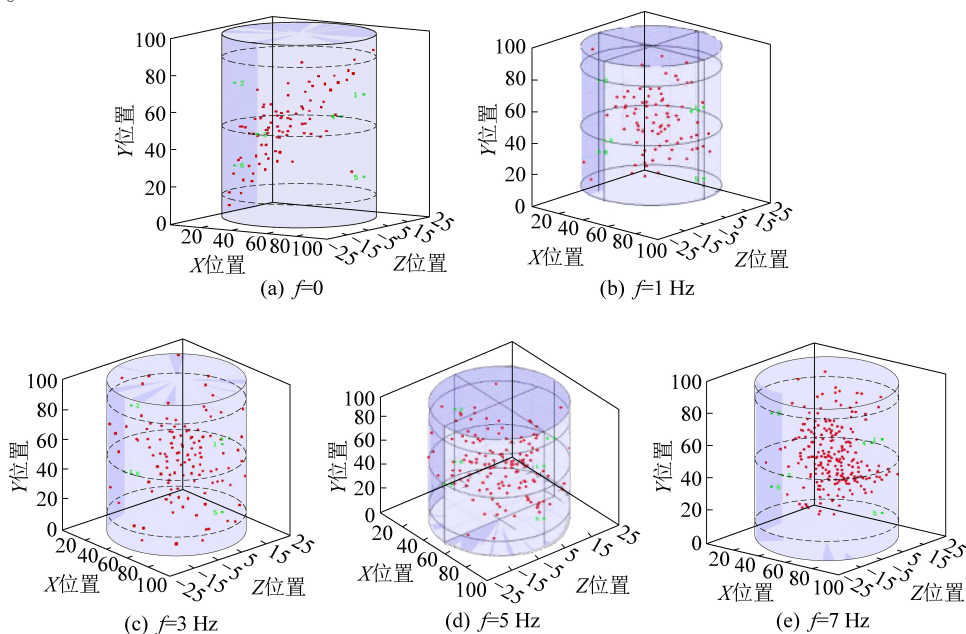


图 8 不同条件静、动载下煤岩破裂面位置确定

Fig.8 Location of fracture surface of coal-rock under dynamic and static loading

4 结 论

1) 煤岩经过幅值 5 MPa 不同频率动载扰动后,强度劣化明显,其峰值强度与动载频率呈负相关。随着动载频率增加,煤岩强度劣化逐渐趋于稳定,说明高频率下动载幅值为强度劣化的主导因素。

2) 煤岩动载加载阶段,应力与应变随时间呈同步振动变化,动载结束后应力恢复原始水平,但应变有增长,动载过后煤岩在弹性阶段发生提前屈服,峰值强度降低,破坏后强度劣化明显。煤岩在静、动加载下破坏形式差异明显,表面呈现多条竖向裂缝,由剪切破坏变为横向拉伸破坏,动载扰动后煤岩破坏程度明显增大。

3) 煤岩声发射能量事件在动载加载及峰值阶段均有发生,峰值时能量跃迁现象频繁发生并达到最大值,能量值与煤岩应力水平呈正相关。声发射定位点由中心向外部扩展,大量分布在煤岩内部及表面,与破坏形式保持一致。煤岩动载过后继续静载加载至其动载最大应力阶段前无声发射能量事件产生,临近峰值破坏阶段声发射能量迅速回落,此特性可作为预测煤岩破坏的前兆。

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.

XIE Heping. 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.
- [2] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [3] 宋振骐.我国采矿工程学科发展现状及其深层次发展问题的探讨[J].隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(2): 7-12.
- SONG Zhenqi. Development status of mining engineering discipline in China and discussion on issues of its further development[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(2): 7-12.
- [4] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.
- JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fushan, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [5] 康红普,伊丙鼎,高富强,等.中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J].煤炭学报, 2019, 44(1): 23-33.
- KANG hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, *et al.* Database and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23-33.
- [6] 杨慧明.应力条件对受载煤体声发射活动特征的影响研究[J].煤炭科学技术, 2019, 47(2): 7-13.
- YANG Huiming. Study on effect of stress condition on acoustic emission activity feature of loaded coal in failure process[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 7-13.
- [7] 邓志刚.冲击倾向性煤体强度尺寸效应的影响因素研究[J].煤炭科学技术, 2019, 47(8): 59-63.
- DENG Zhigang. Study on influencing factors of strength size effect based on bump-prone coal[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 59-63.
- [8] 薛东杰,周宏伟,王子辉,等.不同加载速率下煤岩采动力学响应及破坏机制[J].煤炭学报, 2016, 41(3): 595-602.
- XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, WANG Zihui, *et al.* Failure mechanism and mining-induced mechanical properties of coal under different loading rates[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 595-602.
- [9] 文虎,樊世星,马砺,等.煤岩损伤研究的CT扫描技术发展现状及展望[J].煤炭科学技术, 2019, 47(1): 44-51.
- WEN Hu, FAN Shixing, MA Li, *et al.* CT scanning technology on coal-rock damage: a comprehensive review[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 44-51.
- [10] 李果,张茹,徐晓炼,等.三轴压缩煤岩三维裂隙CT图像重构及体分形维研究[J].岩土力学, 2015, 36(6): 1633-1642.
- LI Guo, ZHANG Ru, XU Xiaolian, *et al.* CT image reconstruction of coal rock three-dimensional fractures and body fractal dimension under triaxial compression test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1633-1642.
- [11] 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, *et al.* Dynamic test study of coal rock under different strain rates[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1528-1534.
- [12] 江红祥,杜长龙,刘送永.冲击速度对煤岩破碎能量和粒度分布的影响[J].煤炭学报, 2013, 38(4): 604-609.
- JIANG Hongxiang, DU Changlong, LIU Shongyong. The effects of impact velocity on energy and sizedistribution of rock crushing[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 604-609.
- [13] 何俊,潘结南,王安虎.三轴循环加卸载作用下煤样的声发射特征[J].煤炭学报, 2014, 39(1): 84-90.
- HE Jun, PAN Jienan, WANG Anhu. Acoustic emission characteristics of coal specimen under triaxial cyclic loading and unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 84-90.
- [14] 彭瑞东,鞠杨,高峰,等.三轴循环加卸载下煤岩损伤的能量机制分析[J].煤炭学报, 2014, 39(2): 245-252.
- PENG Ruidong, YAN Yang, GAO Feng, *et al.* Energy analysis on damage of coal under cyclical triaxial loading and unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 245-252.
- [15] 陈岩,左建平,宋洪强,等.煤岩组合体循环加卸载变形及裂纹演化规律研究[J].采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 826-833.
- CHEN Yan, ZUO Jianping, SONG Hongqiang, *et al.* Deformation and crack evolution of coal-rock combined body under cyclic loading-unloading effects[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(4): 826-833.
- [16] 王金贵,张苏.动载作用下煤体损伤特性的电磁显现特征[J].岩土工程学报, 2017, 39(9): 1662-1669.
- WANG Jingui, ZHANG Su. Electromagnetic appearing characteristics of damage properties of coal under impact loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1662-1669.
- [17] 李宏艳,康立军,徐子杰,等.不同冲击倾向煤体失稳破坏声发射先兆信息分析[J].煤炭学报, 2014, 39(2): 384-388.
- LI Hongyan, KANG Lijun, XU Zijie, *et al.* Precursor information analysis on acoustic emission of coal with different outburst proneness[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 384-388.
- [18] 张朝鹏,张茹,张泽天,等.单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 770-778.
- ZHANG Chaopeng, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, *et al.* Experimental research on effects of bedding plane on coal acoustic emission under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 770-778.
- [19] 刘少虹.动静加载下组合煤岩破坏失稳的突变模型和混沌机制[J].煤炭学报, 2014, 39(2): 292-300.
- LIU Shaohong. Nonlinear catastrophe model and chaotic dynamic mechanism of compound coal-rock unstable failure under coupled static-dynamic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 292-300.
- [20] 刘少虹,毛德兵,齐庆新,等.动静加载下组合煤岩的应力波传播机制与能量耗散[J].煤炭学报, 2014, 39(S1): 15-22.
- LIU Shaohong, MAO Debing, QI Qingxin, *et al.* Under static loading stress wave propagation mechanism and energy dissipation in compound coal-rock[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 15-22.