

彭岩岩, 郦亦凡, 余虎, 等. 基于真三轴卸载试验不同倾角组合煤岩力学特性研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2): 023037.

PENG Yanyan, LI Yifan, YU Hu, et al. Mechanical properties of coal and rock with different dip angles based on true triaxial unloading test[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): 023037.

基于真三轴卸载试验不同倾角组合煤岩力学特性研究

彭岩岩^{1,2,3}, 郦亦凡^{1,2}, 余虎^{1,2}, 韩攀嵘^{1,2}, 朱淳³, 何满潮³

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴文理学院 浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室, 浙江 绍兴 312000; 3. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为深入研究煤炭开采过程中顶板结构面倾角对煤岩力学特性的影响, 通过自主研发的地声过程模拟试验系统, 开展不同结构面倾角条件下组合煤岩真三轴加卸载试验, 并利用声发射探测系统进行监测。研究表明: 随着结构面倾角的增大, 试样的破坏强度逐步下降, 裂隙发展也逐渐减弱, 其破坏形态从张拉剪切破坏逐渐向剪切破坏转变, 直至倾角达到40°时, 试样整体发生滑移破坏; 在卸载破坏前, 倾角<30°的试样发生充分的塑性变形, 其承载力得到充分发挥, 而倾角≥30°的试样达到临界破坏极限时迅速破坏, 出现部分或完全滑移破坏; 声发射信号集中于卸载破坏阶段, 试样的结构面倾角越大, 声发射累计计数越少, 当倾角达到40°时发生滑移破坏, 最大振铃计数大幅下降, 对其累计计数略有影响。研究成果可为深入认识顶板结构面倾角引起的卸载破坏机制及矿山安全开采提供参考。

关键词: 组合煤岩; 真三轴试验; 结构面倾角; 声发射

中图分类号: TD32

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2024)02-3037-10

Mechanical properties of coal and rock with different dip angles based on true triaxial unloading test

PENG Yanyan^{1,2,3}, LI Yifan^{1,2}, YU Hu^{1,2}, HAN Panrong^{1,2}, ZHU Chun³, HE Manchao³

(1. College of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To delve into the impact of roof structural plane inclination angles on the mechanical properties of coal and rock during coal extraction, this study employed a bespoke acoustic process simulation testing system for conducting true triaxial loading and unloading tests on combined coal and rock specimens under varying structural plane inclination angles, with an acoustic emission detection system for monitoring. Findings indicate that with increasing inclination angles, the specimens' failure strength diminishes and crack development weakens. The failure mode shifts from tensile shear to shear failure, culminating in sliding failure at an inclination angle of 40°. Specimens with an inclination angle under 30° experienced ample plastic deformation, optimizing their load-bearing capacity, whereas those with inclination angles of 30° or more encountered rapid failure upon reaching critical failure thresholds, leading to partial or complete sliding failure. Acoustic emission signals were predomi-

收稿日期: 2023-10-24

修回日期: 2023-12-07

责任编辑: 朱涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42277154)

作者简介: 彭岩岩(1987—), 女, 河南周口人, 副教授, 博士, 主要从事岩体工程物理模拟试验、红外探测技术及边坡灾害的预警与控制等方面的研究工作。E-mail: pyy2013www@163.com

通信作者: 郦亦凡(1999—), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生。E-mail: 1315963008@qq.com

nantly observed during the unloading failure phase, with fewer cumulative counts recorded for specimens at higher inclination angles. At a 40° inclination, sliding failure significantly reduced the maximum ringing count, marginally affecting the cumulative count. These insights provide valuable perspectives on the unloading failure mechanisms triggered by the inclination angle of the roof structural plane, contributing to the advancement of safe mining practices.

Key words: compound coal-rock; true triaxial test; structural plane inclination angle; acoustic emission

随着我国煤炭资源的日渐消耗, 煤炭开采逐步走向深部, 深部煤炭资源的开发利用逐渐趋于常态化。在煤炭开采过程中, 煤岩体受到开采扰动, 其内部受力平衡状态遭到破坏^[1-2], 进而发生诸多安全事故^[3-4]。

国内外学者对煤岩体的力学特性进行了深入研究, 得到了诸多有益的研究成果。针对三轴卸荷条件下组合煤岩的力学特性进行了深入研究。何满潮等^[5]对花岗岩进行岩爆试验, 研究不同卸载速率对其产生的影响, 以此分析得出随着卸载速率地降低, 碎屑数量有减少趋势; 宋勇军等^[6]对经历不同冻融循环次数的红砂岩进行常规单轴压缩试验和单轴循环加卸载试验; 张传玖等^[7]为探究不同围压作用对煤体冲击倾向性的影响, 对煤体进行了多级围压下不同应力下限循环加卸载; 王杰等^[8]为探究深部砂岩破裂演化特征与加载速率的相关性, 开展了3种加载速率下的单轴压缩声发射监测试验, 深入分析了加载速率对深部砂岩微破裂集聚成核机制和多类型破裂源演化特征的影响; 李乐等^[9]为探究冲击载荷下砂岩的动态力学特性及破坏机制, 开展了砂岩的动态力学测试; 郭泽雄等^[10]为研究分级加载速率对无烟煤蠕变特性的影响规律, 进行了4种不同分级加载速率下无烟煤三轴蠕变试验; 彭岩岩等^[11]通过对煤岩的加卸载试验, 分别对中间主应力和卸载速率进行了分析, 得到了其力学及损伤特性; 杨三萍等^[12]开展了不同黏结剂掺量条件下型煤三轴压缩试验; 张晨阳等^[13]利用真三轴试验系统对不同厚度煤砂比例的试样进行加卸载试验, 探究了其力学特性, 并针对冲击破坏的影响规律进行了分析; 张晓悟等^[14]为研究循环加卸载条件下岩石力学特性的温度-围压效应, 设计了5个温度梯度石灰岩三轴循环加卸载试验; 沈文兵等^[15]针对不同倾角煤岩组合体进行了单轴压缩试验, 发现倾角组合体 $\leq 30^\circ$ 时, 裂纹主要位于煤岩部位, 整体完整性较好, 当倾角 $\geq 45^\circ$ 试样受压变形

时, 结构面附近出现明显破坏并有滑移现象; 彭岩岩等^[16]为研究不同几何位置的节理倾角对灰岩破坏与裂纹发展的影响, 分别预制2组节理灰岩试样进行了对比试验; 郭东明等^[17]针对不同倾角组合煤岩进行了压缩试验和数值模拟研究, 得出了在单、三轴压缩条件下不同倾角组合煤岩的宏观破坏机制, 并分析了不同倾角结构面对组合煤岩整体变形破坏造成的影响; 赵宏林等^[18]基于颗粒离散元程序PFC建立了“顶板-煤层”结构的岩-煤数值模型, 研究了不同倾角对组合煤岩破坏机制及冲击倾向的影响; 彭岩岩等^[19]通过自主研发的地声过程模拟试验系统开展不同中间主应力条件下煤岩的真三轴加、卸载试验; 冯小磊等^[20]通过电液伺服机对红页岩进行三轴压缩试验, 研究了不同干湿循环作用下红页岩试样峰值强度特征、力学特性和能量演化规律; 孔凯等^[21]采用数字散斑应变测量系统进行灰岩-煤组合体试样单轴压缩变形破坏演化试验, 分析了组合体试样变形局部化带和能量演化特征。

此外, 声发射探测系统^[22-24]是一种无损监测设备, 在岩石探测领域拥有广泛应用, 通过接收岩体内部裂隙发育所产生的信号波, 感应其释放能量, 以此反应岩石内部劣化损伤情况。国内外众多学者针对岩石的声发射特征进行了大量的研究, 采用多种分析手段, 并以此取得重要成果^[25-29]。以上研究成果对深入研究不同倾角组合煤岩力学性质的影响机制具有重要意义。

综上所述, 前人大多利用常规三轴或单轴试验进行研究, 基于室内真三轴试验模拟不同倾角组合煤岩的破坏试验鲜有报道。因而, 笔者利用自主研发的地声过程模拟试验系统, 针对组合煤岩进行真三轴加卸载试验, 以结构面倾角作为研究变量, 全程利用声发射系统进行监测, 分析不同结构面倾角对组合煤岩的影响机制, 旨在为结构面附近的煤炭开采提供指导。

1 试验设备及方案

1.1 试验设备与试样制备

试验使用自主研发的DRTB-1000型地声过程模拟试验系统进行试验, 其由机械系统、油源动力系统和数据采集系统等设备组成。该设备配有6个伺服加载作动器, 可实现三向六面独立加卸载。DRTB-1000型地声过程模拟试验系统设备如图1所示。



图1 DRTB-1000型地声过程模拟试验系统

Fig. 1 DRTB-1000 ground sound process simulation test system

试验所使用的煤岩和砂岩均取自内蒙古某矿区, 组合煤岩由同体积的砂岩与煤岩通过云石胶相接触黏合组成, 各组试样以中心为轴, 等比例组合成为 0° , 10° , 20° , 30° , 40° 等5种不同结构面倾角, 整体尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$, 试样如图2所示。



图2 组合煤岩试样

Fig. 2 Composite coal rock samples

1.2 试验方案

为了研究不同结构面倾角条件下组合煤岩力学特性及其破坏规律, 笔者进行了真三轴加载和真三轴卸载两组试验, 并利用声发射监测系统对其进行全程监测。考虑到组合煤岩的差异性以及试验的离散性, 每组试验设置两组平行试样, 试验步骤

如下。

真三轴加载试验: 以 0.2 MPa/s 的速率同时加载三轴围压, 使最小主应力和中间主应力分别到达 5 MPa 和 6 MPa , 继续加载最大主应力, 直至试样破坏, 得到煤岩破坏时的轴向应力峰值。试验路径如图3所示。

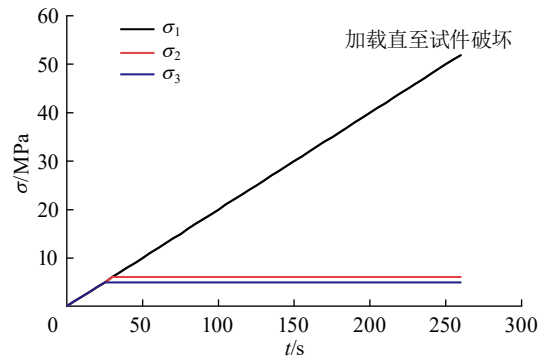


图3 真三轴加载试验路径

Fig. 3 True triaxial loading test path

真三轴卸载试验: 以 0.2 MPa/s 的速率同时加载三轴围压, 使最小主应力和中间主应力分别到达 5 MPa 和 6 MPa , 最大主应力加载至加载应力峰值的85%, 保载 120 s 后, 以 0.5 MPa/s 的速率卸载最小主应力。直至试样发生破坏时停止试验, 并观察煤岩的破坏状态。若最小主应力卸载至 0 时, 试样仍未破坏, 则静置 60 s 后继续以 0.2 MPa/s 的速率加载最大主应力, 直至试样破坏。试验路径如图4所示。

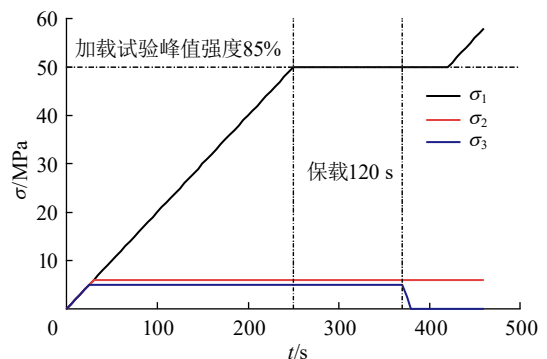


图4 真三轴卸载试验路径

Fig. 4 True three-axis unloading test path

2 试验结果分析

2.1 强度分析

由于试样在加工规格、原生裂隙等多方面存在差异, 导致同规格试样之间也存在着强度差异。

组合煤岩试样峰值强度见表1, 根据表1数据绘制不同结构面倾角的组合体试样峰值强度散点图, 并进行拟合分析, 如图5所示。

表1 组合煤岩试样峰值强度
Table 1 Table of peak strength of composite coal and rock samples

试件编号	最小主应力/MPa	中间主应力/MPa	最大主应力/MPa
JZ0-a			61.9
JZ0-b			64.8
JZ10-a			62.6
JZ10-b			62.5
JZ20-a	5	6	58.0
JZ20-b			59.5
JZ30-a			57.3
JZ30-b			56.1
JZ40-a			50.9
JZ40-b			47.6
XZ0-a			54
XZ0-b			
XZ10-a			53
XZ10-b			
XZ20-a	5	6	49
XZ20-b			
XZ30-a			48
XZ30-b			
XZ40-a			41
XZ40-b			

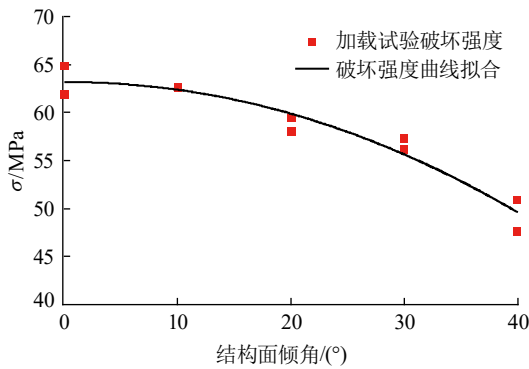


图5 真三轴加载试验峰值强度

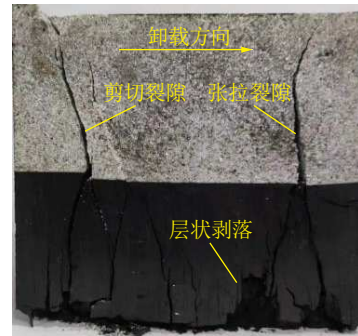
Fig. 5 Peak strength of true triaxial loading test

由图5可知, 随着组合煤岩结构面倾角的增大, 组合煤岩试样整体强度呈下降趋势: 当结构面倾角 $\leq 30^\circ$ 时, 其强度下降速度较为缓慢, 当结构面倾角 $> 30^\circ$ 时, 试样强度明显地大幅下降。究其原因, 在结构面倾角为 0° 时, 只受到三向应力的影响, 而随着结构面倾角不断增大, 试件结构面对其整体影响

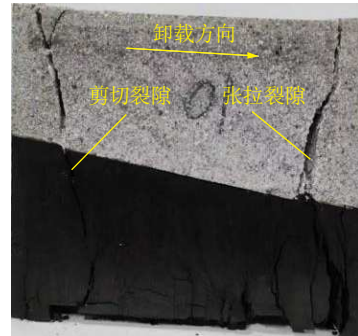
越来越大, 当结构面倾角达到 40° 后, 试件不仅发生剪切破坏, 还会受到结构面倾角的影响, 发生滑移破坏, 这使得试件强度出现大幅下降。

2.2 破坏分析

不同结构面倾角组合煤岩具有不同的破坏特征。通过记录试样卸载破坏后卸载方向侧面的裂隙, 观察裂隙贯通强弱程度, 分析其破坏形态。试样破坏断面如图6所示。



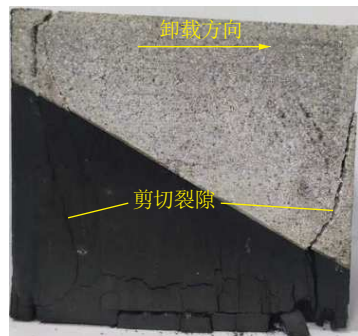
(a) 结构面倾角 0°



(b) 结构面倾角 10°



(c) 结构面倾角 20°



(d) 结构面倾角 30°



(c) 结构面倾角40°

图 6 真三轴卸载试验破坏断面

Fig. 6 True triaxial unloading test failure section diagram

由图6(a), (b)可知, 结构面倾角为0°和10°的试样破坏表现较为相似, 试件在卸载方向两侧出现明显的贯通裂隙, 主要呈剪切裂隙, 并伴有部分张拉裂隙, 其破坏形态表现为局部张拉的剪切破坏。煤岩部分除两条贯通裂隙外, 还分布有众多细小的剪切裂纹, 且底部出现明显层状剥落。砂岩部分破坏表现为顺延煤岩部分贯通裂隙出现的张拉剪切裂隙。

由图6(c)可知, 结构面倾角为20°的试样在卸载方向两侧附近依然存在两条贯通裂隙, 但背向卸载方向的贯通裂隙较0°和10°的试样破坏程度明显变小, 且煤岩底部的细小裂纹较少, 卸载方向仍有层状剥落。其破坏形态表现为局部张拉的剪切破坏。

由图6(d)可知, 结构面倾角为30°的试样在卸载方向两侧附近的两条剪切裂隙未完全贯通, 沿结构面方向仍出现部分细小裂隙, 其破坏形态表现为剪切破坏。

由图6(e)可知, 结构面倾角为40°的试样中煤岩部分和砂岩部分都较为完整, 除结构面附近存在部分裂隙和剥落, 其破坏形态表现为沿结构面方向的滑移破坏。

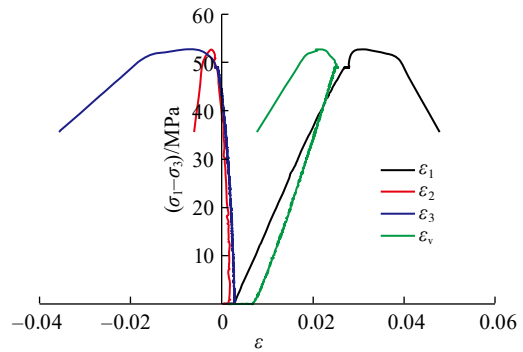
由图6可知, 在三轴围压作用下, 组合煤岩破坏主要集中在煤岩部位, 究其原因是煤岩内部节理较为发育, 非均质特性较砂岩明显, 煤岩内部非均匀程度随着应力增大逐渐增大, 引起其内部原有节理扩展并逐渐贯通, 发生破坏并出现层状剥落。而通过煤岩部分的贯通裂隙, 与其强度差距较大的砂岩部分也随之贯通。根据研究表明^[30], 当煤岩部分裂隙扩展到组合煤岩结构面时, 应力在裂隙尖端聚集, 受到两种岩石物理特性的差异性影响, 结构面

处的砂岩强度遭到“弱化”, 而当应力超过“弱化”后的砂岩强度时, 裂隙通过结构面扩展到顶板砂岩中, 导致顶板砂岩发生张拉剪切破坏。

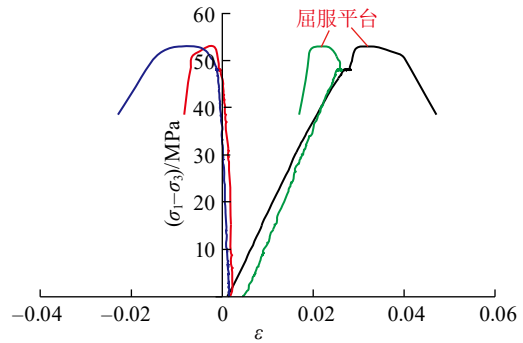
观察整个煤岩破坏形态可以发现, 当结构面倾角 $\leq 30^\circ$ 时, 随着试件结构面倾角的不断增大, 试件破坏面、裂隙发展和层状剥落都在减弱, 同时试件整体破坏程度也逐步降低, 试件的破坏模式由张拉剪切破坏向剪切破坏转变。当结构面倾角 $> 30^\circ$ 时, 煤岩与砂岩部分均较为完整, 试件的破坏模式变为沿结构面方向的滑移破坏。

2.3 应力-应变分析

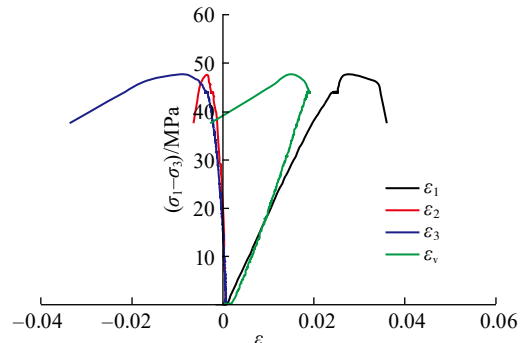
笔者对试验数据进行整理后, 得到不同结构面倾角下组合煤岩的应力-应变曲线, 如图7所示。图7中 ε_1 , ε_2 , ε_3 及 ε_v 分别表示最大主应变、中间主应变、最小主应变以及体积应变。组合煤岩试件在破坏时对应的各主应变值见表2。



(a) 结构面倾角0°



(b) 结构面倾角10°



(c) 结构面倾角20°

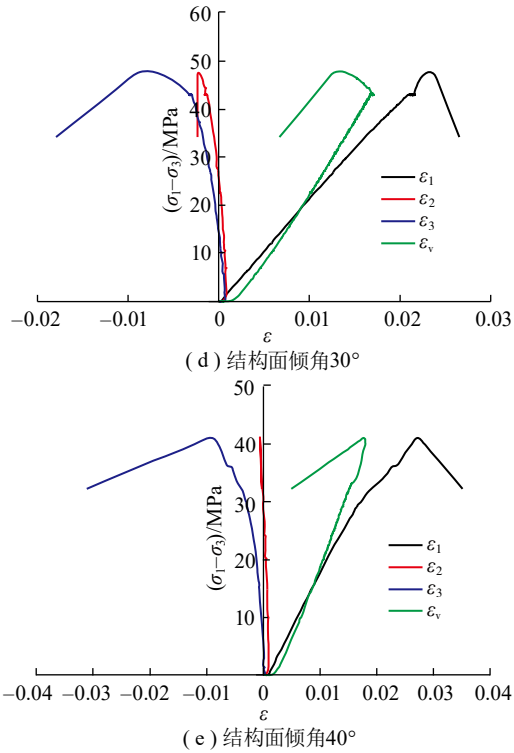


图 7 真三轴卸载试验的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain diagram of true triaxial unloading test

表2 试件破坏时各主应变

Table 2 Main strain gauges during specimen failure

试件	$\varepsilon_1 / \%$	$\varepsilon_2 / \%$	$\varepsilon_3 / \%$	$\varepsilon_v / \%$
XZ0	3.03	-0.22	-0.64	2.19
XZ10	3.02	-0.19	-0.60	2.26
XZ20	2.69	-0.34	-0.80	1.57
XZ30	2.33	-0.23	-0.81	1.31
XZ40	2.73	-0.05	-0.93	1.78

由图7可知,不同结构面倾角的组合煤岩应力-应变曲线整体变化趋势大致相似。在应力加载阶段,试样内部原生裂隙在外力的作用下充分压密,三向应变变形较为同步,表现是差应力为0时,三轴应变较为邻近。随着侧向应力达到预设值,轴向应力不断增大,轴向应变继续增大,侧向应变开始缓慢减小,此时试样变形主要表现为压缩变形。当轴向应力达到预设值时,试验进入120 s保载阶段,期间轴向应变缓慢增大,侧向应变缓慢减小,图中可以看到出现较短的平台期。在卸载阶段,临空面应力迅速卸载,试件的承载能力开始逐渐下降,结构面倾角为0°到20°的试件达到临界破坏极限后,在应力-应变曲线中呈现屈服平台,由此可以推断试样在破坏前产生塑性变形,其承载能力充分发

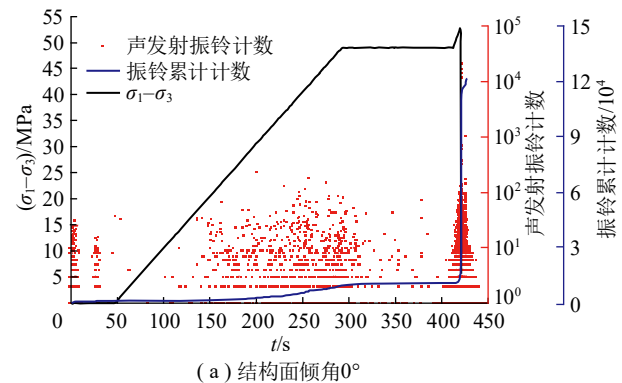
挥,导致动态破坏时间相对延长。而结构面倾角为30°和40°的试件达到临界破坏极限后,应力-应变曲线出现明显的反弯点,这说明试件的塑性变形未得到充分发展,结构面倾角对试件整体造成影响,出现部分或完全滑移,其动态破坏时间相对缩短。故在开挖过程中应同步采取支护措施,特别是结构面倾角较大处,需要保持巷道三向应力的稳定,从而抑制巷道变形确保开挖的安全性。

由图7和表2数据可知,结构面倾角为0°到30°试件的 ε_1 , ε_3 和 ε_v 逐渐降低而到结构面倾角为40°试件却有所回弹。究其原因是因为结构面倾角越大,组合煤岩试件的轴向承载能力和承载变形能力越小,从而导致破坏时最大主应变下降,根据泊松效应,最小主应变和体积应变也随之下降。而当试件结构面倾角达到40°时,在发生滑移破坏前,试件内部出现沿着结构面方向的裂隙,卸载方向出现较小的位移,导致最大主应变和最小主应变较小。

3 声发射特性分析

声发射信号与岩石内部损伤紧密相关,笔者利用声发射系统全程监测,并对记录的声发射信号进行分析,深入了解不同结构面倾角条件下组合煤岩内部裂隙发育的演化规律。通过试验数据整理分析,得到组合煤岩在不同结构面倾角条件下的差应力、声发射振铃计数及累计振铃计数随时间的变化曲线,如图8和图9所示。

由图8可知,可将整个试验过程分为3个阶段。在加载阶段前期,煤岩内部存在的原生裂隙随着试验程序进行开始压密,此时组合煤岩处于弹性变形阶段,声发射振铃计数出现小幅波动,并随着轴向应力的不断上升,呈现上升趋势,这表明随着轴向应力逐步增加,试件内部开始萌生出新的微小裂纹,并开始扩展,其内部弹性能逐渐积聚,从试样



(a) 结构面倾角0°

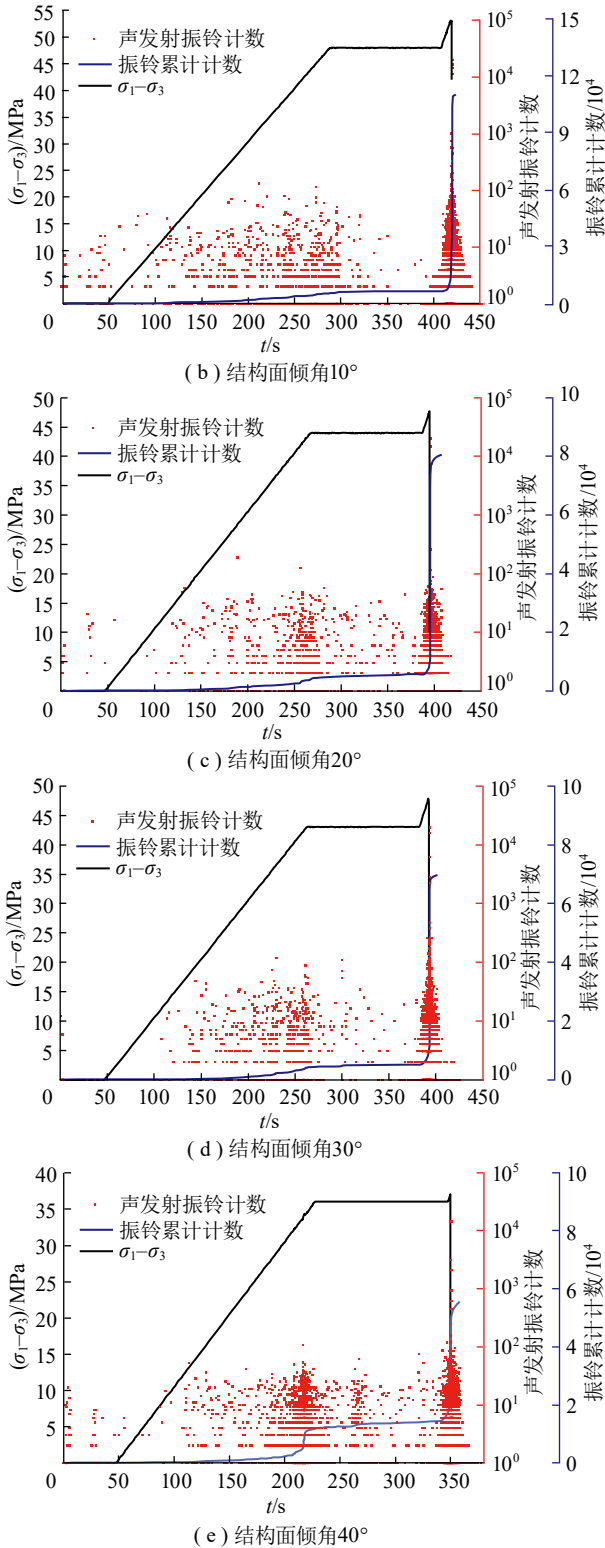


图8 真三轴卸载试验应力差-声发射曲线
Fig. 8 True triaxial unloading test stress difference acoustic emission curves

整体观察, 内部裂隙的扩展只在小范围内存在, 所以仍处于线弹性阶段; 在中期保载阶段, 煤岩内部孔隙裂隙被压密, 并逐渐趋于稳定, 此时累计振铃计数无明显增长; 在后期卸载破坏阶段, 煤岩内部结

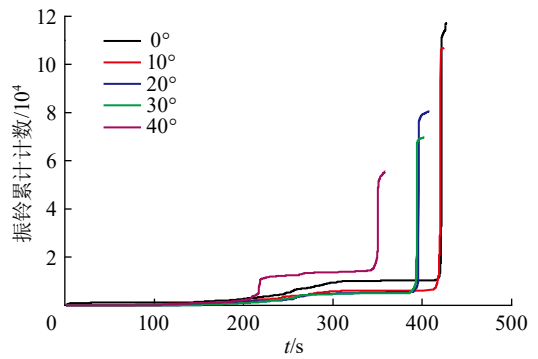


图9 真三轴卸载试验声发射累计计数曲线
Fig. 9 True three-axis unloading test cumulative count curves of acoustic emission

构开始发生变化, 新的裂隙开始萌生, 此时累计振铃计数开始加速增长, 当卸荷临近破坏点前, 振铃计数开始急速增长, 并在试件破坏时达到最大值。

结合图9数据可知, 试样的结构面倾角较小时, 破坏形态较为剧烈, 承载力发挥较为充分, 其声发射振铃累计计数较多, 随着结构面倾角不断增大, 试样的破坏形态逐渐缓和, 承载能力发挥不充分, 其声发射振铃累计计数不断减少, 说明受到的损伤随着结构面倾角的增大而减小, 与其破坏形态相对应。而当结构面倾角达到40°时, 其最大声发射振铃计数和声发射振铃累计计数出现明显下降, 究其原因结构面倾角到达40°后, 其破坏形态从张拉剪切破坏转化为沿结构面发生的滑移破坏, 而发生剪切破坏时释放的能量远超滑移破坏释放的能量, 所以最大声发射振铃计数出现大幅下降, 但试件在进入保载阶段前出现较为密集的振铃计数, 说明它在保载阶段前发生了部分破坏, 导致其累计计数没有发生较大的变化。

4 结论

(1)在真三轴加卸载试验中, 随着组合煤岩结构面倾角的增大, 试样强度逐步下降, 同时裂隙发展逐渐减弱, 破坏形态从张拉剪切破坏逐渐向剪切破坏转变, 直至倾角达到40°时, 试样整体发生滑移破坏。

(2)在真三轴卸载破坏前, 结构面倾角 < 30°的试样发生较为充分的塑性变形, 其承载力得到充分发挥; 而倾角 ≥ 30°试样的塑性变形未得到充分发展, 达到临界破坏极限时, 应力-应变曲线出现明显的反弯点, 试样发生部分或完全滑移破坏。

(3)在真三轴卸载试验中声发射信号特征可分为3个阶段: 加载阶段的声发射信号逐渐增多; 保载阶段的声发射信号较少且趋于平稳; 卸载破坏阶段出现大量且集中的声发射信号。整体试验过程中结构面倾角越大, 声发射累计计数越少, 当倾角达到40°时, 试件发生滑移破坏, 最大振铃计数出现大幅下降, 与岩石破坏的力学机理一致。

参考文献(References):

- [1] 何满潮, 钱七虎. 深部岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 何满潮, 朱国龙. “十三五”矿业工程发展战略研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(1): 1-6.
HE Manchao, ZHU Guolong. Research on development strategy of mining engineering in the thirteenth five-year plan[J]. Coal Engineering, 2016, 48(1): 1-6.
- [3] 齐庆新, 赵善坤, 李海涛, 等. 我国煤矿冲击地压防治的几个关键问题[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 135-143, 151.
QI Qingxin, ZHAO Shankun, LI Haitao, et al. Several key problems of coal bump prevention and control in China[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 135-143, 151.
- [4] 张锋刚, 苗伟东. 大倾角综放开采下平巷冲击地压发生机理及防治研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(8): 256-262.
ZHANG Fenggang, MIAO Weidong. Study on mechanism and prevention of rock burst in the lower level roadway of fully-mechanized caving with large dip angle[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(8): 256-262.
- [5] 何满潮, 赵菲, 杜帅, 等. 不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2737-2747, 2793.
HE Manchao, ZHAO Fei, DU Shuai, et al. Rockburst characteristics based on experimental tests under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2737-2747, 2793.
- [6] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 冻融后循环荷载作用下红砂岩力学特性试验研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(2): 112-117.
SONG Yongjun, ZHANG Leitao, REN Jianxi, et al. Experimental study on mechanical properties of red sandstone under cyclic loading after freezing-thawing cycles[J]. Coal Engineering, 2019, 51(2): 112-117.
- [7] 张传玖, 杜涛涛, 任建慧, 等. 多级围压变应力下限循环加卸载煤体冲击倾向性特征研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(10): 107-116.
ZHANG Chuanjiu, DU Taotao, REN Jianhui, et al. Study on bump-prone property of coal under multi-stage confining pressure variable stress lower limit cyclic loading and unloading[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(10): 107-116.
- [8] 王杰, 袁国涛. 不同加载速率下深部砂岩的声发射与破裂响应特征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(4): 043024.
WANG Jie, YUAN Guotao. Acoustic emission and fracture characteristics of deep sandstone under different loading rates[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(4): 043024.
- [9] 李乐, 王成, 张红成, 等. 冲击载荷下砂岩的动态力学特性及破坏机制[J]. 煤炭工程, 2023, 55(9): 140-145.
LI Le, WANG Cheng, ZHANG Hongcheng, et al. Dynamic mechanical properties and failure mechanism of sandstone under impact loads[J]. Coal Engineering, 2023, 55(9): 140-145.
- [10] 郭泽雄, 张东峰, 王开, 等. 分级加载速率对无烟煤蠕变特性的影响规律试验研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(8): 1-7.
GUO Zexiong, ZHANG Dongfeng, WANG Kai, et al. Experimental study on effect of graded loading rate on creep characteristics of anthracite[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(8): 1-7.
- [11] 彭岩岩, 秦奇, 宋南, 等. 基于真三轴卸荷试验的煤岩力学及损伤特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(4): 95-102.
PENG Yanyan, QIN Qi, SONG Nan, et al. Study on mechanical and damage characteristics of coal rock based on true triaxial unloading test[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(4): 95-102.
- [12] 杨三萍, 刘鹏珍, 卢卫永. 不同黏结剂掺量条件下型煤试样三轴压缩试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(2): 023027.
YANG Sanping, LIU Pengzhen, LU Weiyong. Study on triaxial compression tests on briquette coal specimens with different binder contents[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(2): 023027.
- [13] 张晨阳, 潘俊锋, 夏永学, 等. 真三轴加卸载条件下组合煤岩冲击破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1522-1533.
ZHANG Chenyang, PAN Junfeng, XIA Yongxue, et al. Research on impact failure characteristics of coal-rock combination bodies under true triaxial loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1522-1533.
- [14] 张晓悟, 徐金海, 孙垒, 等. 三轴循环加卸载条件下热损伤石灰岩力学特性演化规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 043011.

- ZHANG Xiaowu, XU Jinhai, SUN Lei, et al. Mechanical properties evolution of thermally damaged limestone under triaxial cyclic loading and unloading[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(4): 043011.
- [15] 沈文兵, 余伟健, 潘豹. 不同倾角煤岩组合岩石力学试验及破坏特征[J]. *矿业工程研究*, 2021, 36(1): 1–8.
SHEN Wenbing, YU Weijian, PAN Bao. Rock mechanics test and failure characteristics of coal-rock combination with different dip angles[J]. *Mineral Engineering Research*, 2021, 36(1): 1–8.
- [16] 彭岩岩, 周崇, 程啸, 等. 不同节理倾角下灰岩应变场演化及裂纹发展规律[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(4): 043528.
PENG Yanyan, ZHOU Chong, CHENG Xiao, et al. Evolution of strain field and crack development of limestone under different joint inclination angles[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(4): 043528.
- [17] 郭东明, 左建平, 张毅, 等. 不同倾角组合煤岩体的强度与破坏机制研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1333–1339.
GUO Dongming, ZUO Jianping, ZHANG Yi, et al. Research on strength and failure mechanism of deep coal-rock combination bodies of different inclined angles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1333–1339.
- [18] 赵宏林, 赵越. 倾角对煤岩组合体力学及冲击倾向性影响的颗粒流分析[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(3): 198–201.
ZHAO Honglin, ZHAO Yue. Influence of dip angle of coal and rock combination on outburst tendency based on particle flow code[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(3): 198–201.
- [19] 彭岩岩, 邓浩翔, 樊啸. 中间主应力对煤岩力学与声发射特征的影响[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(6): 78–84.
PENG Yanyan, DENG Haoxiang, FAN Xiao. Influence of intermediate principal stress on mechanics and acoustic emission characteristics of coal rock[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(6): 78–84.
- [20] 冯小磊, 马振乾, 陈安民. 干湿循环作用下红页岩力学特性与能量特征研究[J]. *矿业安全与环保*, 2023, 50(4): 47–54.
FENG Xiaolei, MA Zhenqian, CHEN Anmin. Study on mechanical and energy characteristics of red shale under wetting-drying cycle[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 50(4): 47–54.
- [21] 孔凯, 尹大伟, 张虎, 等. 岩-煤组合体试样变形场与能量演化特征试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(5): 30–39.
KONG Kai, YIN Dawei, ZHANG Hu, et al. Experimental study on deformation field and energy evolution characteristics of rock-coal composite samples[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2022, 41(5): 30–39.
- [22] 彭相愿, 高富强, 原贵阳, 等. 煤应变型冲击破坏尺寸效应声发射特征试验研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(3): 033031.
PENG Xiangyuan, GAO Fuqiang, YUAN Guiyang, et al. Experimental study on the size effect of acoustic emission characteristics of coal strainbursts[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(3): 033031.
- [23] 秦涛, 任凯. 煤岩组合体变形破裂声发射特征及损伤演化规律研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(1): 118–123.
QIN Tao, REN Kai. Acoustic emission characteristics and damage evolution of coal and rock combination bodies during deformation and fracture[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(1): 118–123.
- [24] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(1): 147–152.
LI Shulin, TANG Haiyan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(1): 147–152.
- [25] 赵奎, 杨道学, 曾鹏, 等. 基于EEMD-SCBSS的岩石声发射信号去噪方法[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(5): 179–185, 210.
ZHAO Kui, YANG Daoxue, ZENG Peng, et al. Denoising method of rock acoustic emission signal based on EEMD-SCBSS[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(5): 179–185, 210.
- [26] 徐遵玉. 松散煤体声发射特征与损伤本构模型[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(9): 112–116.
XU Zunyu. Acoustic emission characteristics and damage constitutive model of soft coal[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(9): 112–116.
- [27] 杨振, 元宪寅, 冯梦瑶, 等. 基于声发射和DIC特征的层状复合岩石力学损伤试验及模型研究[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(4): 119–126, 133.
YANG Zhen, YUAN Xianyin, FENG Mengyao, et al. Mechanical damage test and modelling of layered composite rock based on acoustic emission and DIC characteristics[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(4): 119–126, 133.
- [28] 张玉良, 吴必胜, 赵高峰. 基于声发射监测的岩石热损伤实时演化研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2945–2958.
ZHANG Yuliang, WU Bisheng, ZHAO Gaofeng. Study on thermal damage evolution of rock based on acoustic emission[J]. *Journal of Central South University(Science*

- and Technology), 2021, 52(8): 2945–2958.
- [29] 宋义敏, 邢同振, 赵同彬, 等. 岩石单轴压缩变形场演化的声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 534–542.
SONG Yimin, XING Tongzhen, ZHAO Tongbin, et al. Acoustic emission characteristics of deformation field development of rock under uniaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 534–542.
- [30] 杨科, 刘文杰, 窦礼同, 等. 煤岩组合体界面效应与渐进失稳特征试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1691–1700.
YANG Ke, LIU Wenjie, DOU Litong, et al. Experimental investigation into interface effect and progressive instability of coal-rock combined specimen[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1691–1700.