

双轴加载条件下红砂岩基本力学特性及破坏机制

马兴印^{1,2}, 公绪飞^{1,2}, 卞立国³, 尹宝杰⁴, 王超⁵, 王方方⁵, 郭伟耀^{1,2}, 张鹏飞^{1,2}

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

3. 开滦(集团)有限责任公司 能源化工股份有限公司, 河北 唐山 063000;

4. 开滦(集团)有限责任公司 技术中心, 河北 唐山 063000;

5. 兖矿能源股份有限公司, 山东 济宁 273500)

摘要:为研究巷道开挖卸荷后岩体的变形破坏机理,开展了不同侧压条件下红砂岩双轴加载试验,分析侧压影响下双向应力状态红砂岩基本力学特性及声发射演化规律,揭示侧压影响下双向应力状态红砂岩破坏机制。结果表明:随着侧压增大,红砂岩峰值强度及弹性模量呈先增大后减小趋势,而峰值应变呈逐渐减小趋势,其破坏模式由劈裂破坏向剪切破坏转变;加载过程中声发射累计能量随侧压增大而逐渐减小,但试样破坏阶段声发射能量逐渐增大,表明双轴加载情况下剪切破坏释放能量大于劈裂破坏。研究结果可为巷道围岩控制及冲击地压灾害防治提供一定的理论支撑。

关键词:红砂岩;双轴加载;侧压;力学特性;声发射;破坏机制

中图分类号:TU45

文献标志码:A

Basic mechanical properties and failure mechanism of red sandstone under biaxial loading condition

MA Xingyin^{1,2}, GONG Xufei^{1,2}, BIAN Ligu³, YIN Baojie⁴, WANG Chao⁵,
WANG Fangfang⁵, GUO Weiyao^{1,2}, ZHANG Pengfei^{1,2}

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Energy Chemical Co. Ltd, Kailuan(Group) Limited Liability Corporation, Tangshan, Hebei 063000, China;

4. Technology Center, Kailuan(Group) Limited Liability Corporation, Tangshan, Hebei 063000, China;

5. Yankuang Energy Group Co. Ltd, Jining, Shandong 273500, China)

Abstract: In order to study the deformation and failure mechanism of rock mass after excavation and unloading of roadway, biaxial loading tests of red sandstone under different lateral pressures were carried out. The basic mechanical properties and acoustic emission evolution law of red sandstone under bidirectional stress state under the influence of lateral pressure were analyzed and the failure mechanism of red sandstone under bidirectional stress state under the influence of lateral pressure was revealed. The results show that with the increase of lateral pressure, the

收稿日期:2021-11-22

基金项目:山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2019ZD13);山东省自然科学基金博士基金项目(ZR2019BD063);山东省重点研发计划重大科技创新工程项目(2019SDZY01)

作者简介:马兴印(1996—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事矿山岩石力学及冲击地压机理研究。

公绪飞(1988—),男,山东临沂人,讲师,博士,主要从事地球物理探测在冲击地压机理与监测中的应用研究,本文通信作者。E-mail: gongxufei@sdust.edu.cn

peak strength and elastic modulus of red sandstone increase first and then decrease, while the peak strain decreases gradually and the failure mode changes from splitting failure to shear failure. The cumulative energy of acoustic emission decreases with the increase of lateral pressure during the loading process, but the energy of acoustic emission increases gradually during the failure stage, indicating that the released energy of shear failure is greater than that of splitting failure under biaxial loading. The results can provide theoretical reference for roadway support and rock burst mitigation.

Key words: red sandstone; biaxial loading; lateral pressure; mechanical properties; acoustic emission; failure mechanism

随着矿井开采深度增加,巷道围岩大变形破坏、冲击地压破坏等灾害频发,对煤炭资源安全高效开采造成重大威胁^[1-3]。研究开挖卸荷巷道围岩破裂特征及其力学演化过程,可为深井巷道围岩控制和冲击地压防治提供重要依据。巷道开挖后,围岩应力状态由近似单向受力状态向双向应力状态和三向应力状态转变^[4]。针对巷道围岩的三种应力状态,众多学者开展了大量煤岩体单轴加载、双轴加载、三轴加载等试验研究。

在单轴加载方面,李庶林等^[5]通过岩石单轴受压破坏试验研究了岩石破坏全过程的声发射(acoustic emission, AE)特征;苏承东等^[6]对砂岩进行单轴压缩下的声发射试验,分析了砂岩破坏的声发射前兆信息;刘保县等^[7-8]通过煤岩单轴压缩变形及声发射试验研究,建立了基于声发射特性的单轴压缩煤岩损伤模型。在双轴加载方面,黎立云等^[9]进行了双向加卸载试验,通过红外监测技术研究了岩石能量的释放规律;徐世达等^[10]开展了不同侧压下花岗岩试样的双轴加载试验,分析了抗压强度、声发射活动与侧向压力的关系。在三轴加载方面,李建林等^[11]基于三轴卸荷破坏试验,研究了砂岩在三轴卸荷状态下的应力-应变曲线及破坏特征;刘新荣等^[12]开展了不同初始卸荷水平的三轴加卸载试验,研究了加卸载对砂岩的强度、变形及扩容特征的影响;杨永杰等^[13]通过不同加、卸荷路径的煤样三轴加载试验,分析了煤样破坏过程中的能量演化规律;刘婕等^[14]开展了花岗岩真三轴加卸载试验,分析了不同路径下的特征应力、破坏形式和能量演化特征;荣浩宇等^[15]开展岩石真三轴扰动卸荷试验,分析了不同应力路径下的力学参数及岩石变形破坏特征。上述文献主要针对单向和三向应力状态下岩石变形破坏过程进行了大量的研究,但双向应力状态下岩石破坏机制研究还不够充分。

为研究巷道开挖卸荷后围岩的破坏特征,利用自制的简易双轴加载装置,对红砂岩试样开展了不同侧压下双轴加载试验,研究了双向应力状态下红砂岩变形破坏及声发射演化规律,从能量角度探讨了双向应力状态下红砂岩破坏机制,对煤矿现场巷道围岩控制及冲击地压灾害防治有一定理论指导意义。

1 试验方案及试验过程

1.1 试样制备及试验方案

鉴于红砂岩质地均匀,取样离散性因素可控^[16],选取红砂岩进行研究。将红砂岩加工成尺寸为50 mm×50 mm×100 mm的长方体试样,保证其试样端面不平行度和不垂直度小于0.02 mm。为减少试样差异性,对制备好的试样进行纵波速度测试,选取波速在2 100~2 300 m/s的红砂岩试样。共选取18块试样进行力学试验,其中3块进行单轴抗压强度试验,以获得该尺寸下的单轴力学特性,其他试样进行5种侧压下的双轴试验。具体试验方案见表1。

表1 试验方案
Tab. 1 Test scheme

试样编号	侧压/MPa	轴压/MPa	加载速率/(mm/min)
s-0-1, s-0-2, s-0-3	0		
s-1-1, s-1-2, s-1-3	1		
s-3-1, s-3-2, s-3-3	3		
s-5-1, s-5-2, s-5-3	5	加载至破坏	0.25
s-8-1, s-8-2, s-8-3	8		
s-10-1, s-10-2, s-10-3	10		

1.2 试验过程

试验系统由加载系统和声发射系统两部分组成,如图1所示。加载系统包括RLJW-2000型岩石试验机和自主设计的简易双轴加载装置,双轴加载装置侧向加载面高度97 mm,保证与轴向加载面存在一定间隙。采用AMSY-6声发射系统,门槛值设置为40 dB,采样频率为10 MHz;在自由面布置一个声发射探头,探头与试样之间涂抹凡士林,提高接触面耦合度且降低信号损失。试验过程中,根据表1的试验方案进行双轴加载试验,具体为:首先以0.1 MPa/s的加载速率同时施加轴压与侧压至设定值,之后保持侧压不变;然后,以0.25 mm/min的位移加载速率施加轴压,同步收集试样载荷-位移数据和声发射数据,直至试样发生破坏。

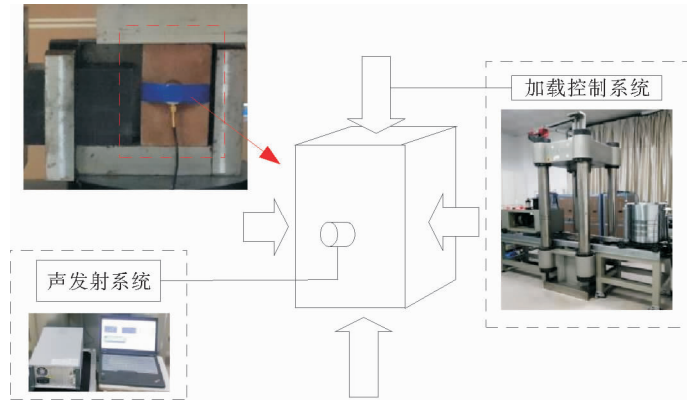


图1 试验系统
Fig. 1 Testing system

2 试验结果分析

2.1 基本力学特性

图2给出了不同侧压下典型红砂岩试样应力-应变曲线,所提到的应力均指偏应力。可以看出,应力-应变曲线可划分成4个阶段,即压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段;随着侧压增大,应力-应变曲线中压密阶段占比逐渐减小(曲线斜率变化较小时进入弹性阶段,标志着压密阶段结束)。对不同侧压下压密阶段占比进行统计,如图3所示。当侧压为0时,压密阶段应变占整个应变的57.38%,而侧压增大到10 MPa时,压密阶段应变仅占总应变19.20%,表明侧压增大可显著减小压密阶段应变占比。

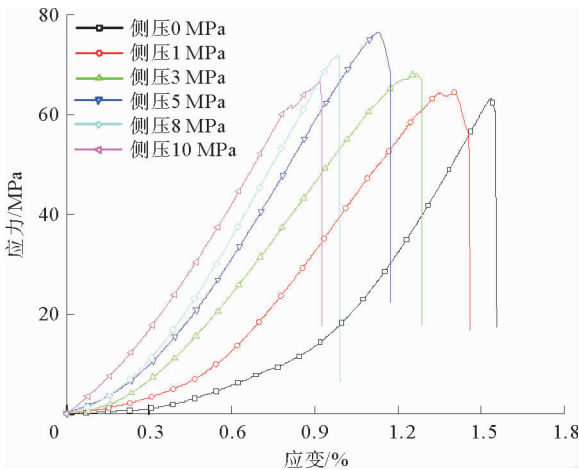


图2 不同侧压下红砂岩应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of red sandstone under different lateral pressures

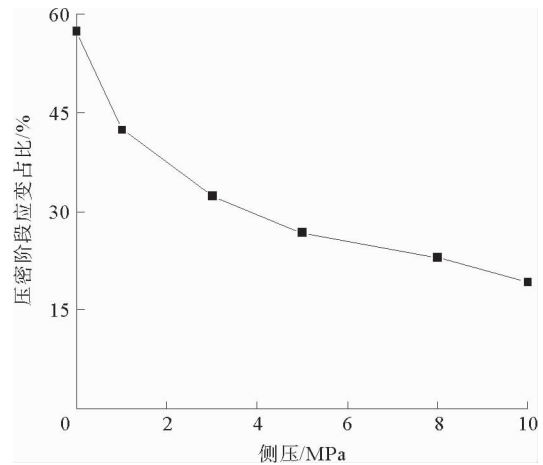


图3 不同侧压下压密阶段应变占比
Fig. 3 Strain ratio in compaction stage under different lateral pressures

图4给出了试样峰值强度、峰值应变、弹性模量与侧压的关系,其中3个参数为平均值。侧压对红砂岩基本力学参数有显著影响,随着侧压增大,峰值强度呈先增大后减小的变化趋势。当侧压为0时,峰值应力为56.81 MPa,之后随侧压增大峰值强度逐渐增大;当侧压为5 MPa时,峰值强度取最大值为76.23 MPa。峰值应变随侧压增大呈逐渐减小的趋势,当侧压为0时,峰值应变最大为1.6%,而当侧压增大到10 MPa

时,峰值应变减小到 0.93%,较侧压为 0 时减小了 41.9%。随着侧压增大,弹性模量呈先增大后减小的趋势,其变化趋势与峰值强度类似,当侧压从 0 增大到 5 MPa 时,试样的弹性模量由 7.33 GPa 增加到 9.13 GPa,增大了 24.6%,而当侧压增大到 10 MPa 时,弹性模量减小到 8.31 GPa。

由上述分析可知,随着侧压增大,峰值强度呈先增大再减小的变化规律,当侧压为 5 MPa 时(约为单轴抗压强度的 10%),峰值强度达到最大;而超过此侧压,峰值强度会逐渐降低,但同样高于单轴抗压强度,这与文献[17]研究结果相一致。这可能与侧压对裂纹的作用状态有关,当侧压较低时,侧向压力会限制垂直方向的裂纹扩展,因此可以明显增强岩石承载能力,而随侧压增大,较大的侧压与轴压产生的切应力造成了岩石内部损伤,导致裂纹加速发育进而弱化岩石承载能力。

2.2 破坏模式

红砂岩试样破坏产生的宏观裂纹主要分布于侧向加载面,将不同侧压下侧向加载面的破坏形态进行了素描,如图 5 所示。同时,表 2 给出了试样破坏过程中的现象描述。

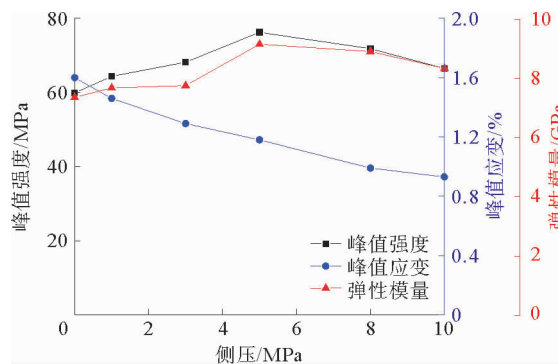


图 4 峰值强度、峰值应变、弹性模量与侧压的关系图

Fig. 4 Relationship between peak strength, peak strain, elastic modulus and lateral pressure

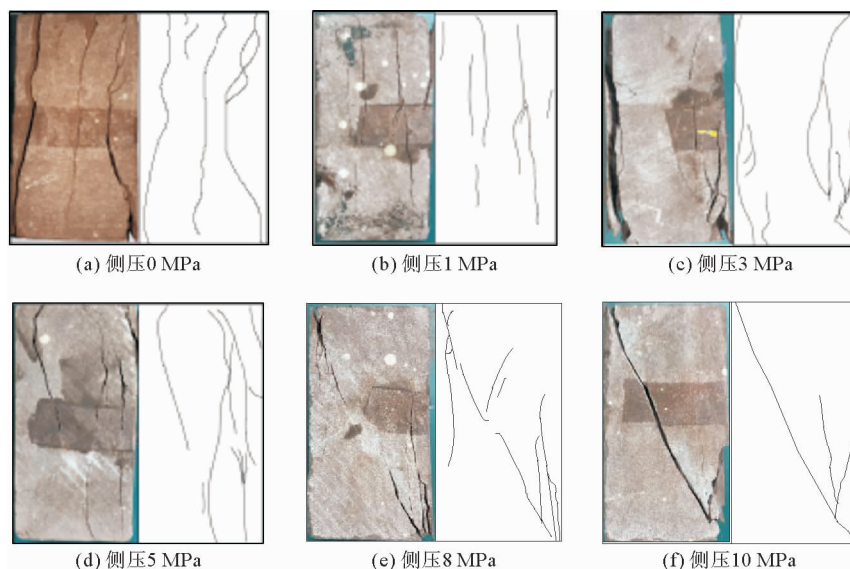


图 5 不同侧压下双轴加载红砂岩侧向加载面破坏形态图

Fig. 5 Failure mode diagram of lateral loading surface of biaxial loading red sandstone under different lateral pressures

由图 5 和表 2 可知,随着侧压增大,红砂岩破坏模式由劈裂破坏向剪切破坏转变。当侧压为 0、1 或 3 MPa 时,试样沿轴向方向产生多条贯穿裂纹,发生明显的劈裂破坏,即为拉伸破坏机制。当侧压增大到 5 MPa 时,靠近自由面区域产生多条轴向宏观裂纹,而远离自由面位置产生一条倾斜剪切裂纹,表明在远离自由面过程中,试样内部由劈裂破坏向剪切破坏转变。侧压为 8 MPa 时,破裂面存在一条明显剪切裂纹,且自由面区域发生局部劈裂破坏,红砂岩试样主要发生剪切破坏。当侧压增大到 10 MPa 时,沿对角线方向产生一条剪切裂纹,且自由面区域未见明显裂纹发育,试样发生剪切破坏。

结合表 2 给出的破坏现象进行分析,当侧压为 0、1 或 3 MPa 时,试样在破坏阶段产生了较大声响,破裂

面比较干净,试样发生劈裂破坏而失去承载力。当侧压增大到 5 和 8 MPa 时,试样在破坏阶段产生了较大声响,且沿剪切面产生砂岩粉末,表明其形貌是由剪切滑移机制产生,与文献[18-19]研究结果一致。而当侧压增大到 10 MPa 时,除上述现象外,试样自由面还产生了岩块抛出等现象,表明随着侧压增大,试样破坏过程更加剧烈。

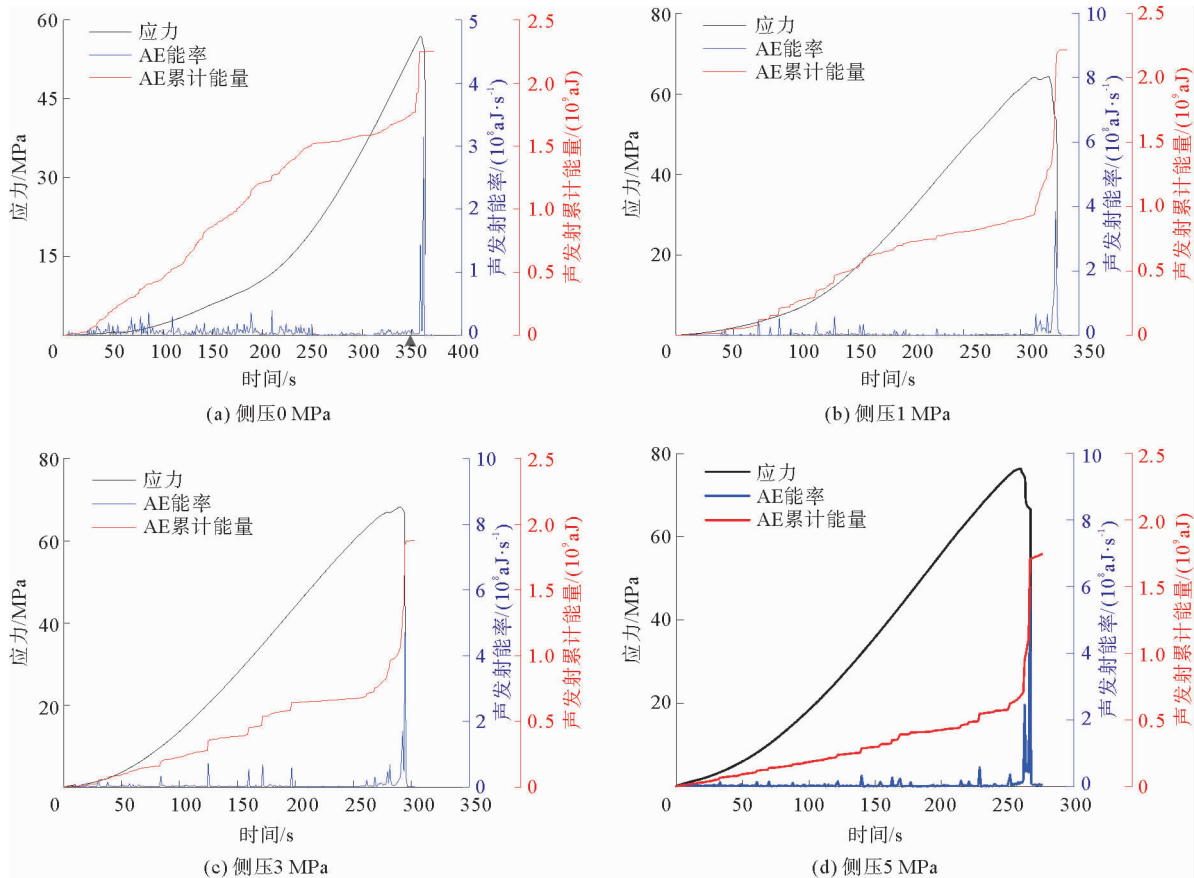
表 2 试样破坏描述

Tab. 2 Description of specimen failure mode

侧压/MPa	破坏形态	破坏模式	其他试验现象
0、1、3	多条轴向贯穿裂纹	劈裂破坏	破坏产生较大声响
5、8	多条轴向贯穿裂纹,产生倾斜剪切裂纹,但未发育至边界	约束面附近剪切破坏,自由面附近劈裂破坏	破坏产生较大声响,剪切面有砂岩粉末
10	1条贯穿倾斜裂纹	剪切破坏	破坏产生较大声响,伴有岩块抛出,剪切面有砂岩粉末

2.3 声发射演化规律

图 6 给出了不同侧压下试样加载过程中应力、声发射能量与时间的关系。当侧压为 0 和 1 MPa 时,整个加载过程的声发射活动较为活跃,声发射累计能量近似呈台阶状上升;而当侧压增大到 3 和 5 MPa 时,加载前期声发射活动相对减弱,破坏阶段产生的声发射能量明显增加,表现为破坏阶段累计能量大幅度增加;当侧压增大到 8 和 10 MPa 时,上述规律进一步增强,破坏阶段的声发射能量占比进一步增加。



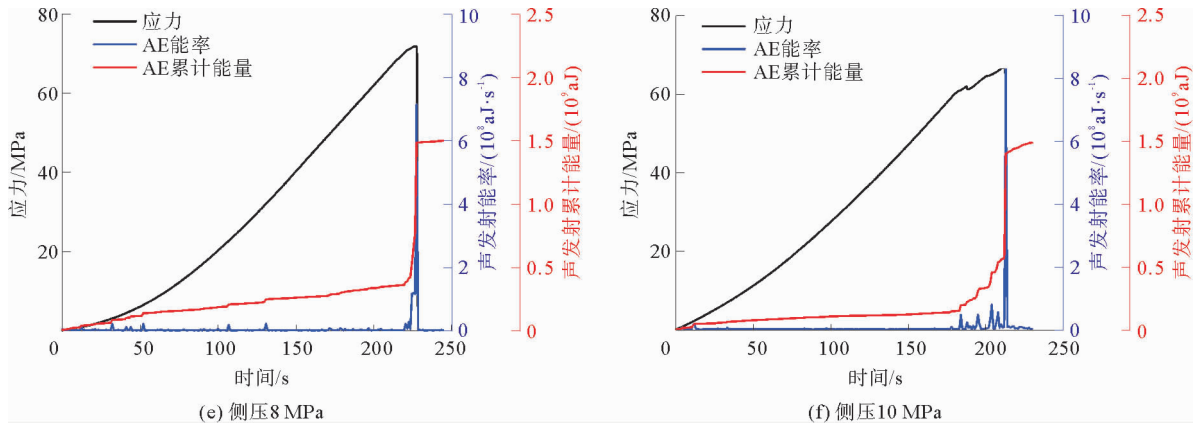


图 6 不同侧压下 AE 能量参数、应力随时间演化规律

Fig. 6 AE energy parameters and stress evolution with time under different lateral pressures

为进一步分析破坏阶段声发射能量释放规律,对不同侧压下红砂岩试样破坏阶段的声发射能量进行统计分析,如图 7 所示。随着侧压增大,破坏阶段的声发射能量占比近似线性增加,表明破坏阶段释放能量随侧压增大而增加。结合试样破坏模式由劈裂破坏向剪切破坏转变可知,双轴加载情况下剪切破坏释放能量大于劈裂破坏。

3 讨论

如图 8 所示,侧向加载面约束力随侧压增大而增大,限制了垂直于最小主应力方向的裂纹产生,最小主应力方向的拉伸应变开始减小,试样峰值强度逐渐增大,而随着轴向压力应力增大,试样内部剪应力开始增大,最终发生破坏。低侧压时,红砂岩破坏机制以拉伸破坏为主,试样破坏与轴向裂纹发育有关,未有剪切裂纹贯穿;高侧压时,红砂岩破坏机制以剪切破坏为主,试样破坏与剪切裂纹贯穿有关,沿剪切裂纹形成倾斜破裂面。

结合图 6、图 8 分析可知,低侧压时,试样最终破坏形成多个明显破裂面,轴向裂纹较为发育。这与声发射能量演化相对应,在加载过程中,轴向裂纹发育导致能量多次释放、声发射能率增加,由于能量多次释放,导致破坏瞬间释放能量相对较少;高侧压时,试样最终破坏形成一个明显剪切破裂面,裂纹发育较少,表明加载过程中能量释放较少,剪切破坏时将释放更多能量,导致破坏阶段声发射能量占比进一步提升。

冲击地压防治主要通过对巷道围岩卸压及控制来实现,结合上述试验,可以考虑从减少围岩破坏时释放能量角度入手,降低围岩侧向应力程度。当侧向压力高时,围岩单次释放较高的能量,不利于灾害的防治;而当侧向应力降低时,围岩破坏时能量释放呈高频低能特征。煤矿现场可通过大直径卸压钻孔进行卸压,降低一定深度内侧向应力,释

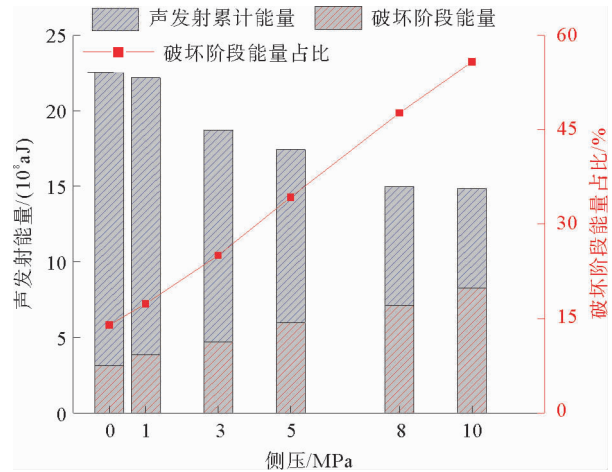


图 7 AE 能量参数随侧压的演化规律

Fig. 7 Evolution of AE energy parameters with lateral pressure

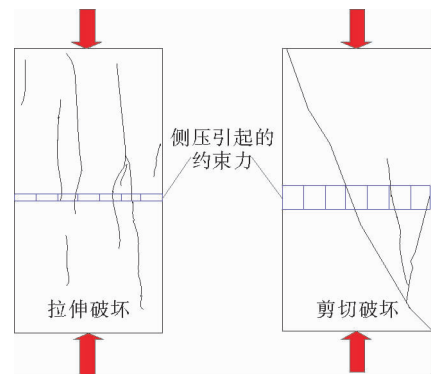


图 8 试样破坏机制示意图

Fig. 8 Diagram of sample failure mechanism

放媒体内部储存的应变能,保证媒体破坏时能够缓慢释放能量,但卸压孔过多会破坏围岩完整性,导致围岩承载能力降低。因此,在冲击地压防治工程实践中,在保证巷道围岩承载力同时,应选择合理的卸压参数以降低围岩侧向应力水平。

4 结论

1) 侧压对红砂岩的基本力学性质影响较大,随着侧压增大,红砂岩峰值强度和弹性模量呈先增大后减小的趋势,而试样的峰值应变呈逐渐减小的趋势。

2) 随着侧压增加,红砂岩的破坏模式由劈裂破坏向剪切破坏转变。低侧压时,红砂岩试样主要发生劈裂破坏,为拉伸破坏机制;高侧压时,红砂岩试样主要发生剪切破坏,为剪切破坏机制。

3) 随着侧压增加,红砂岩试样加载过程中的声发射累计能量逐渐减小,但破坏阶段的声发射能量占比逐渐增大,表明双轴加载情况下剪切破坏释放能量大于劈裂破坏。

参考文献:

- [1] ZHAO T B, GUO W Y, TAN Y L, et al. Case studies of rock bursts under complicated geological conditions during multi-seam mining at a depth of 800m[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51: 1539-1564.
- [2] 谷雪斌, 郭伟耀, 赵同彬, 等. 侧压影响下圆形洞室岩爆双轴物理模拟试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(1): 46-52.
GU Xuebin, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Biaxial physical simulation test of rock burst in circular tunnel under influence of lateral pressure[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2020, 39(1): 46-52.
- [3] 谭云亮, 郭伟耀, 辛恒奇, 等. 煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 160-172.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 160-172.
- [4] 左建平, 魏旭, 王军, 等. 深部巷道围岩梯度破坏机理及模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(3): 478-485.
ZUO Jianping, WEI Xu, WANG Jun, et al. Investigation of failure mechanism and model for rocks in deep roadway under stress gradient effect[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(3): 478-485.
- [5] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(15): 2499-2503.
LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(15): 2499-2503.
- [6] 苏承东, 高保彬, 南华, 等. 不同应力路径下煤样变形破坏过程声发射特征的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(4): 757-766.
SU Chengdong, GAO Baobin, NAN Hua, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics during deformation and failure processes of coal samples under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 757-766.
- [7] 刘保县, 黄敬林, 王泽云, 等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增1): 3234-3238.
LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S1): 3234-3238.
- [8] 刘保县, 赵宝云, 姜永东. 单轴压缩煤岩变形损伤及声发射特性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(4): 647-650.
LIU Baoxian, ZHAO Baoyun, JIANG Yongdong. Study of deformation-damage and acoustic emission character of coal rock under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(4): 647-650.
- [9] 黎立云, 王荣新, 马旭, 等. 双向加压下岩石能量规律的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(12): 2033-2038.
LI Liyun, WANG Rongxin, MA Xu, et al. The energy variety analysis of rock under biaxial compression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 2033-2038.
- [10] 徐世达, 姜坤序, 蔺甲. 基于声发射监测的双轴加载岩石破裂研究[J]. *金属矿山*, 2013(6): 5-8.
XU Shida, JIANG Kunxu, LIN Jia. Research of failure process of rock under biaxial loading based on acoustic emission monitoring[J]. *Metal Mine*, 2013(6): 5-8.
- [11] 李建林, 王瑞红, 蒋昱州, 等. 砂岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 2034-2041.

- LI Jianlin, WANG Ruihong, JIANG Yuzhou, et al. Experimental study of sandstone mechanical properties by unloading triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2034-2041.
- [12] 刘新荣, 刘俊, 李栋梁, 等. 不同初始卸荷水平对深埋砂岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3081-3088.
- LIU Xinrong, LIU Jun, LI Dongliang, et al. Experimental research on the effect of different initial unloading levels on mechanical properties of deep-buried sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3081-3088.
- [13] 杨永杰, 马德鹏. 煤样三轴卸荷破坏的能量演化特征试验分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1208-1216.
- YANG Yongjie, MA Depeng. Experimental research on energy evolution properties of coal sample failure under triaxial unloading testing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1208-1216.
- [14] 刘捷, 张黎明, 丛宇, 等. 真三轴应力路径花岗岩卸荷破坏力学特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2069-2077.
- LIU Jie, ZHANG Liming, CONG Yu, et al. Research on the mechanical characteristics of granite failure process under true triaxial stress path[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2069-2077.
- [15] 荣浩宇, 李桂臣, 赵光明, 等. 不同应力路径下深部岩石真三轴卸荷特性试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3140-3149.
- RONG Haoyu, LI Guichen, ZHAO Guangming, et al. True triaxial test study on mechanical properties of deep rock mass in different stress paths[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3140-3149.
- [16] 陈绍杰, 郭宇航, 黄万朋, 等. 粒度对红砂岩力学性质影响规律与机制试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 8-14.
- CHEN Shaojie, GUO Yuhang, HUANG Wanpeng, et al. Experimental study of influence regularity and mechanism of particle size on mechanical properties of red sandstone[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 36(6): 8-14.
- [17] 郭伟耀. 深部巷道围岩层裂结构失稳及能量释放基础研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
- GUO Weiyao. Basic study on the layer-crack structure instability of deep roadway surrounding rock and energy release[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [18] 周辉, 孟凡震, 刘海涛, 等. 花岗岩脆性破坏特征与机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1822-1827.
- ZHOU Hui, MENG Fanzhen, LIU Haitao, et al. Experimental study on characteristics and mechanism of brittle failure of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1822-1827.
- [19] 高明忠, 王明耀, 谢晶, 等. 深部煤岩原位扰动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2691-2703.
- GAO Mingzhong, WANG Mingyao, XIE Jing, et al. In-situ disturbed mechanical behavior of deep coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2691-2703.

(责任编辑: 吕海亮)