



移动扫码阅读

张风达, 张玉军, 于秋鸽. 不同加卸载路径下岩石卸荷劣化特征及机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 117-127.
ZHANG Fengda, ZHANG Yujun, YU Qiuge. Unloading deterioration and mechanism of rock under different loading and unloading stress paths[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 117-127.

不同加卸载路径下岩石卸荷劣化特征及机制研究

张风达^{1,2,3}, 张玉军^{1,2,3}, 于秋鸽^{1,2,3}

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013;
3. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013)

摘要:为研究深部煤层底板卸荷劣化破坏机理, 开展了轴压不变卸围压、加轴压卸围压、卸轴压卸围压不同加卸载应力路径下的假三轴力学试验, 分析并拟合了不同应力路径下岩石弹性模量、广义泊松比与围压的变化关系; 构建了岩石断裂力学模型, 分析了不同加卸载路径下, 分支裂纹端部应力集中程度; 从偏应力、能量、声发射事件等方面剖析了卸荷过程中岩石力学参数劣化机制。研究表明: ①不同轴压加载方式下岩样的弹性模量劣化程度和泊松比变化幅度依次为加轴压>轴压保持不变>卸轴压; 相同轴压不同围压卸载速率下, 岩样的弹性模量劣化程度和泊松比变化幅度与卸荷速率呈正相关变化。②围压卸荷过程中, 轴向加载或保持不变的应力路径相比于轴向卸载的应力路径, 岩石积聚的能量增长幅度较大; 在围压卸载至一定程度时, 内部闭合的微裂隙和原生裂隙重新被打开, 用于裂纹扩展的能量迅速增加, 泊松比和弹性模量变化比例明显增大, 声发射事件振铃数呈现出非线性增长的特点。③不同加卸载路径下, 偏应力是诱发岩石失稳破坏的根本原因, 偏应力增长越快, 岩石弹性模量劣化程度和泊松比变化程度越明显。工作面附近处于压剪破坏区偏应力相对较大, 岩体劣化程度相对较为严重, 这与工作面底板突水事故多发生在工作面附近相一致。

关键词: 岩石力学; 断裂力学; 加卸载; 卸荷点; 深部底板; 卸荷劣化

中图分类号: TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2022)12-0117-11

Unloading deterioration and mechanism of rock under different loading and unloading stress paths

ZHANG Fengda^{1,2,3}, ZHANG Yujun^{1,2,3}, YU Qiuge^{1,2,3}

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study the failure mechanism of deep coal seam floor under unloading, pseudo-triaxial mechanical tests were carried out under different loading and unloading stress paths. The relationship between rock elastic modulus, generalized Poisson ratio and confining pressure under different stress paths was analyzed and fitted. The rock fracture mechanics model was constructed, and the stress concentration at the end of the branch crack under different loading and unloading paths was analyzed. The deterioration mechanism of rock mechanical parameters during unloading was analyzed from the aspects of deviatoric stress, energy and acoustic emission events. ① The research showed that the degree of deterioration of the elastic modulus of the sample and the change range of Poisson ratio under different axial compression loading methods were in the order of axial compression > axial compression remain unchanged > unloading axial pressure. Under the same axial pressure and different confining pressure unloading rates, the elastic modulus deterioration degree and Poisson ratio change of the sample were in a positive correlation with the unloading rate. ② Compared with the increase of the deviator stress at the unloading point, it changed in a positive correlation with the deterioration degree of the elastic modulus of the rock sample and the change of Poisson's ratio. During the unloading process of the confining pressure, the energy accumulated in the path that the axial load

收稿日期: 2022-03-09 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.QN21-008

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51704158); 天地科技股份有限公司开采事业部科技创新基金资助项目(KJ-2019-TDKCMS-02, KJ-2021-KCMS-06)

作者简介: 张风达(1988—), 男, 河南鹤壁人, 副研究员, 博士。Tel: 010-84263134; E-mail: fdzhang123@126.com

or remain unchanged was larger than the stress path of axial unloading. When the confining pressure was unloaded to a certain extent, the internal closed micro-cracks and primary fissures were reopened, and the energy used for crack propagation increased rapidly, and the ratio of change to elastic modulus and the Poisson's ratio increased significantly, and the number of acoustic emission event ringing showed a characteristic of non-linear growth. ③ Under different loading and unloading paths, the deviatoric stress was the fundamental cause of rock instability and failure. The faster the deviatoric stress increased, the more obvious the degradation degree of rock elastic modulus and Poisson ratio changed. Under the action of loading and unloading, the deterioration degree of rock mass was the most serious under the influence of advanced abutment pressure, which was consistent with the fact that the water inrush accidents in the floor of working face mostly occur near the working face.

Key words: rock mechanics; fracture mechanics; loading and unloading; unloading point; deep bottom plate; unloading degradation

0 引言

随着我国浅部煤炭资源的日益枯竭,深部开采逐渐成为趋势。深部煤炭资源开挖扰动造成周围岩体的变形破坏,其变形破坏机理已成为当前岩土力学的重点内容之一。部分学者认为岩体开挖扰动是一种加卸载过程,针对不同动静载荷作用下岩体变形破坏特征进行了研究。通过实验室试验和数值模拟分析了不同加卸载路径下岩石(体)变形模量、泊松比等力学参数的变化特征。王平等^[1]研究发现深部高地应力环境下开挖卸载对岩石强度有弱化作用。张黎明等^[2]分析指出加轴压卸围压过程中闪长岩弹性模量、泊松比与围压分别呈非线性降低、非线性增加的关系。ABBAS Taheri等^[3]从循环加卸载的角度分析得出加卸载幅度较大且造成岩石损伤破坏时,岩石的泊松比、杨氏模量在循环加卸载过程中分别呈增大、减小的趋势。纪维伟等^[4]以裂纹体应变为着手点,分析指出深埋硬岩开挖卸载产生的宏观裂纹扩展相比于卸荷点存在滞后性。李地元等^[5]分析了不同应力路径下花岗岩的力学响应特征,研究指出变形模量随卸荷比的增大而减小,而泊松比随卸荷比的增大而增大。部分专家学者从能量积聚与耗散的角度分析卸荷过程中岩石变形破坏特征,黄达等^[6]从能量积聚与耗散的角度研究得出高应力强卸荷条件下大理岩具有峰后弹性应变能快速释放和耗散的特征,并产生与卸荷方向近似垂直的张性破裂面。李景龙等^[7-8]开展了峰前不同卸载点和加卸载路径下大理岩能量破坏耗能演化特征与岩石破坏形态,分析指出耗散能密度与卸荷点呈正相关,与卸荷速率呈负相关。赵国彦等^[9]研究指出卸荷前围压越大,卸荷释放的能量越大。朱珍德等^[10]运用数字成像技术获取了卸围压条件下岩石细观损伤的分形维数,研究发现卸荷作用加剧了岩石的损伤破坏程度。杨小彬等^[11]利用 CCD 相机对单轴循环加卸载过程中岩石的非线性变形演化特征进行了分析。

此外,部分学者针对岩石卸荷破坏形式与机理开展相关研究。刘泉声等^[12]研究得出卸载作用缩短了岩石的屈服进程,峰后脆性破坏特性明显增加。周小平等^[13]分析指出岩石在卸荷过程中因裂纹面张开导致裂纹面间摩擦阻力减小,致使其更易发生失稳破坏。张黎明等^[14]研究指出随着卸荷速度的不断增加,岩石破坏形式由剪切破坏向张拉-剪切破坏过度。上述研究成果丰富了岩石卸荷力学特性的研究,但关于加卸载过程中岩石力学参数的卸荷劣化规律及其能量变化特征缺乏系统分析,未能较好地结合声发射数据,针对性地剖析岩体的变形破坏特征与机理。

笔者选取邯邢矿区石炭二叠系深部煤层底板细砂岩为研究对象,分析不同加卸载路径下岩石弹性模量、泊松比等参数的损伤劣化率,同时结合能量变化特征和声发射事件研究岩石卸荷劣化破坏机理。

1 采动影响下深部煤层底板应力变化特征

随着工作面自开切眼不断推进,上覆部分岩层逐渐达到抗拉强度产生裂隙,并发生回转变形,上覆岩层通过采空区周边向底板传递应力,并在采空区周边一定范围内形成应力集中带。在煤壁附近,存在垂向应力集中与垂向应力释放两种状态,传递到煤层底板则可划分为4个区域^[15],即压缩区、压剪破坏区、张剪破坏区、拉张破坏区,具体如图1所示。压缩区为处于轴向应力和侧向应力均增长的应力状态区域;压剪破坏区为轴向应力增加、侧向应力减小的应力状态区域;张剪破坏区为轴向应力小幅减小或不变、侧向应力减小的应力状态区域;拉张破坏区为轴向应力减小、侧向应力减小的应力区域。

不同的应力路径对岩体的变形破坏影响较大,为分析深部煤层底板岩体的变形破坏机理,结合压剪破坏区、张剪破坏区和拉张破坏区的底板应力分布特征,设计相应的应力路径,借助实验室试验机进行加卸载试验,分析深部煤层底板岩体卸荷劣化破坏特征。

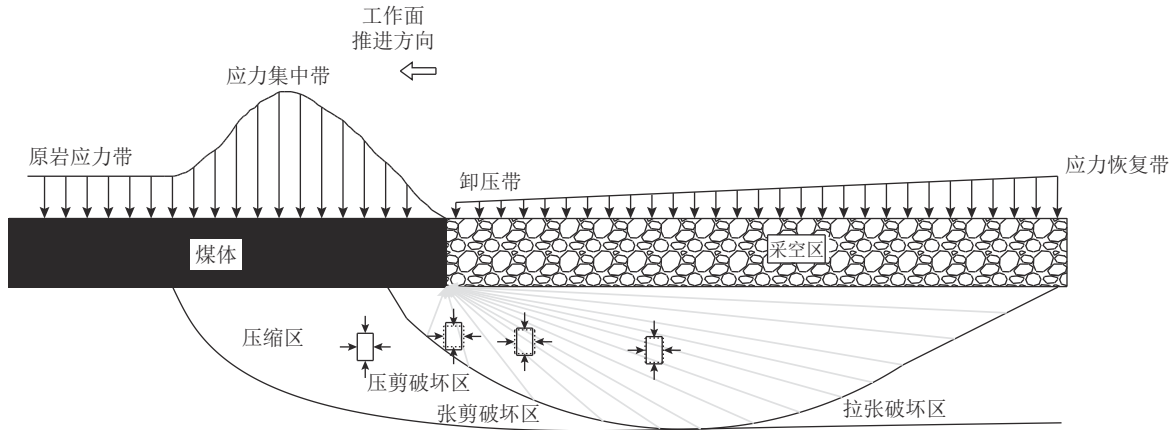


图 1 深部煤层底板采动破坏分区

Fig.1 Mining failure zone of deep coal seam floor

2 试验仪器与试验方案

2.1 试验仪器

试验在 GCTS RTX-4000 三轴岩石试验机(图 2)上完成的,最大轴向力为 4 600 kN,最大围压为 140 MPa。各个加载系统采用独立的伺服控制。采用的 Micro- II Digital AE system 声发射系统是用于检查和监视应用的声发射设备。测试频率为 20~400 kHz,采样速度为 1 MSPS,波长 1 k,本次设置声发射设置阈值为 50 dB。



图 2 GCTS 岩石力学试验系统

Fig.2 GCTS rock mechanics test system

2.2 试验方案

依据实际岩体开挖方式不同,按照围压卸载速率不变、轴压加载方式不同,轴压卸载速率不变、围压卸载速率改变的方式进行加卸载,具体如图 3 所示。在此基础上,增加 2 组轴压卸载速率相同、围压卸载速率不同的应力路径,对比分析不同围压卸载速率岩样变形破坏特征,具体如图 4 所示。

通过完成围压为 40 MPa 的岩样三轴力学试验获取岩石的峰值强度为 239.68 MPa;按照峰值强度

的 85% 设定为卸载临界值,按照设定的 5 种应力路径开展相关力学试验,具体如下所述。

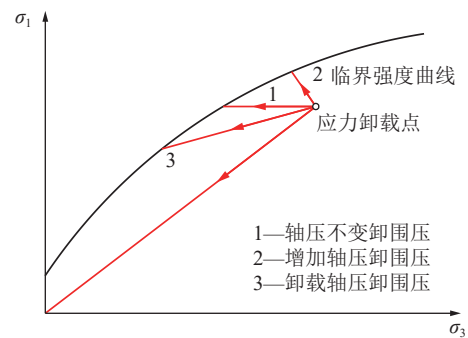


图 3 不同加卸载应力路径

Fig.3 Different loading and unloading stress paths

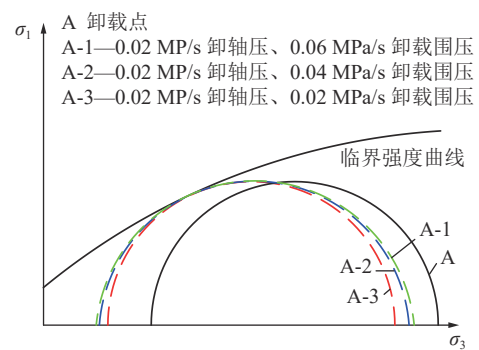


图 4 不同围压卸载速率下岩样破坏的莫尔圆

Fig.4 Mohr circle of rock failure under different confining pressure unloading rates

方案 1: 保持轴压恒定的同时卸除围压。试验步骤为: ①将围压施加至 40 MPa; ②将轴压施加至预定值并保持稳定; ③按照 0.02 MPa/s 的速度逐渐卸除围压直至试件破坏。

方案 2: 增加轴压的同时卸除围压。试验步骤为: ①将围压施加至 40 MPa; ②将轴压施加至预定值并

保持稳定;③按照 0.001 mm/s 的速度增加轴压的同时,按照 0.02 MPa/s 的速度逐渐卸除围压直至试件破坏。

方案 3:卸除轴压的同时卸除围压。试验步骤为:①将围压施加至 40 MPa;②将轴压施加至预定值并保持稳定;③按照 0.02 MPa/s 的速度卸除轴压的同时,按照 0.02 MPa/s 的速度逐渐卸除围压直至试件破坏。

在方案 3 的基础上,增加方案 4 和方案 5 两种应力路径,用于分析轴压卸载速率不变、不同围压卸载速率时的岩石破坏特征。

方案 4:卸除轴压的同时卸除围压。试验步骤为:①将围压施加至 40 MPa;②将轴压施加至预定值并保持稳定;③按照 0.02 MPa/s 的速度卸除轴压的同时,按照 0.04 MPa/s 的速度逐渐卸除围压直至试件破坏。

方案 5:卸除轴压的同时卸除围压。试验步骤为:①将围压施加至 40 MPa;②将轴压施加至预定值并保持稳定;③按照 0.02 MPa/s 的速度卸除轴压的同时,按照 0.06 MPa/s 的速度逐渐卸除围压直至试件破坏。

3 岩石力学参数卸荷劣化规律

3.1 力学参数计算方法

岩石卸载过程中,其变形参数需考虑侧向变形和围压的影响,为此,根据广义胡克定律,采取以下公式计算岩石弹性模量、广义泊松比^[16]。

$$E = (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) / \varepsilon_1 \quad (1)$$

$$\mu = (B\sigma_1 - \sigma_3) / [\sigma_3(2B - 1) - \sigma_1] \quad (2)$$

$$B = \varepsilon_3 / \varepsilon_1 \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; μ 为广义泊松比; σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力; ε_1 为轴向应变; ε_3 为侧向应变; B 为侧向应变与轴向应变之比。

岩石总能量 U 包括轴向应力做功 U_1 和侧向围压做功 U_3 。即岩石总能量为

$$U = U_1 + U_3 \quad (4)$$

轴向应力作用和侧向围压做功可从定积分的角度,采用微小条形面积求和得出,即

$$U_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_1^i + \sigma_1^{i+1}) (\varepsilon_1^{i+1} - \varepsilon_1^i) \quad (5)$$

$$U_3 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_3^i + \sigma_3^{i+1}) (\varepsilon_3^{i+1} - \varepsilon_3^i) \quad (6)$$

式中: i 为应力计算分段点数; n 为应力计算分段总数。

岩石总能量 U 可转化为可释放的弹性应变能 U_e 和用于裂纹扩展所消耗的能量 U_d , 即

$$U = U_e + U_d \quad (7)$$

其中,可释放的弹性应变能 U_e 可通过下式进行求解

$$U_e = \frac{1}{2E_v^t} [\sigma_{1t}^2 + 2\sigma_{3t}^2 - 2\mu_v^t (2\sigma_{1t}\sigma_{3t} + \sigma_{3t}^2)] \quad (8)$$

式中: σ_{1t} 、 σ_{3t} 、 μ_v^t 、 E_v^t 分别为 t 时刻的轴向应力、侧向应力、泊松比和弹性模量。

则卸荷过程中,岩石裂纹扩展所消耗的能量 U_d 可表示为

$$U_d = U - U_e \quad (9)$$

3.2 实验室试验结果分析

通过开展不同加卸载路径下的岩石三轴力学试验,获取典型力学试验数据见表 1。

表 1 力学参数对比

Table 1 Comparison of mechanical parameters

样品编号	应力路径	临界破坏围压/MPa	临界破坏轴压/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
U1	轴压不变、0.02 MPa/s卸围压	28.01	203.41	13.69	0.336
U2	0.001 mm/s加载轴压、0.02 MPa/s卸围压	29.93	252.93	18.20	0.343
U3	0.02 MPa/s卸轴压、0.02 MPa/s卸围压	25.45	188.45	10.94	0.383
U4	0.02 MPa/s卸轴压、0.04 MPa/s卸围压	26.43	197.03	12.90	0.384
U5	0.02 MPa/s卸轴压、0.06 MPa/s卸围压	29.76	199.96	13.20	0.355

3.2.1 不同轴压加卸载方式下的卸围压力学试验

1)弹性模量劣化特征。随着围压卸载量的不断增加,岩样的弹性模量、泊松比随之变化。考虑到岩样失稳破坏时,泊松比丧失其基本意义,为此,重点

对比分析不同应力路径下岩石未丧失承载能力时的弹性模量和泊松比的变化特征,以卸载点的弹性模量和泊松比为参数,对比分析围压每卸载 10 MPa 时的参数变化程度,具体如图 5、图 6 所示。

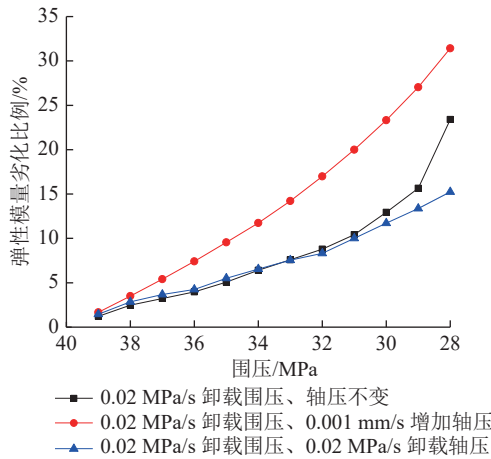


图 5 不同轴压加卸载方式下围压与弹性模量劣化比例
Fig.5 Deterioration ratio of confining pressure and elastic modulus under different axial pressure loading and unloading modes

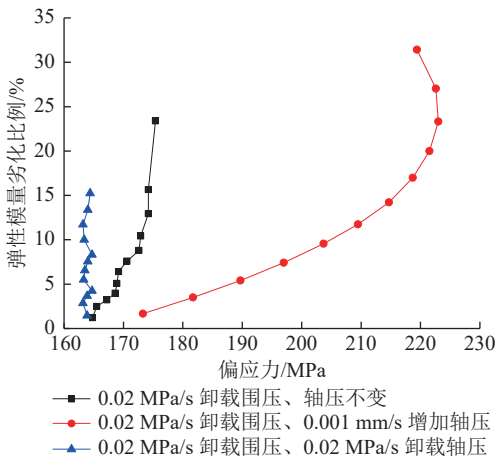


图 6 不同轴压加卸载方式下偏应力与弹性模量劣化比例
Fig.6 Deterioration ratio of deviatoric stress and elastic modulus under different axial compression loading and unloading modes

由图 5 可知,随着围压不断卸载,轴向应力加卸载方式不同,弹性模量劣化程度也存在较大差异;围压卸载至 28 MPa 时,增轴压、轴压不变、卸轴压 3 种应力路径下对应的弹性模量劣化比例依次为 31.43%、23.40%、15.23%。按照 0.001 mm/s 速度增加轴压的岩样,在卸载过程中,岩样自身的弹性模量劣化比例明显大于另外 2 种应力路径。保持轴压不变和 0.02 MPa/s 卸载轴压 2 种应力路径,在围压由 39 MPa 减小至 31 MPa 的过程中,弹性模量变化相差较小。随着围压卸载量进一步减小,保持轴压不变的岩样内部逐渐产生贯穿裂纹,岩体自身的弹性模量迅速减小。

通过曲线拟合得出相同围压卸载、不同轴压加卸载路径下的方程如下:

$$y_{E1} = e^{10.262 94 - 0.575 47x + 0.005 55x^2} \quad (0.02 \text{ MPa/s 卸载围压、轴压不变}) \quad (10)$$

$$y_{E2} = e^{-5.270 67 + 0.405x - 0.009 24x^2} \quad (0.04 \text{ MPa/s 卸载围压、} 0.001 \text{ mm/s 增加轴压}) \quad (11)$$

$$y_{E3} = e^{-2.991 37 + 0.193 37x - 0.005 5x^2} \quad (0.02 \text{ MPa/s 卸载围压、} 0.02 \text{ MPa/s 卸载轴压}) \quad (12)$$

由图 6 可知,随着围压不断卸载量不断增加,弹性模量劣化比例不断增大,相同围压卸载量下,偏应力越大,弹性模量劣化比例越高。对于按照 0.001 mm/s 的速度增加轴压的应力路径,在围压卸载至 30 MPa 时,偏应力达到 223 MPa,随着继续卸载,岩样的偏应力逐渐减小,说明岩体已达到峰值强度。当围压卸载至 29 MPa 时,岩样的弹性模量劣化程度由 15.6% 迅速增大至 23.3%。说明该阶段岩样内部产生较为明显的贯穿裂隙,弱化了岩石自身承载能力。

2)泊松比变化特征。泊松比是反映侧向变形与轴向变形的比例,在一定程度上反映岩样抵抗外部载荷作用的变形程度,侧面反映岩样内部裂隙扩展特征,为此,分析不同应力路径下的岩样泊松比变化特征,具体如图 7、图 8 所示。

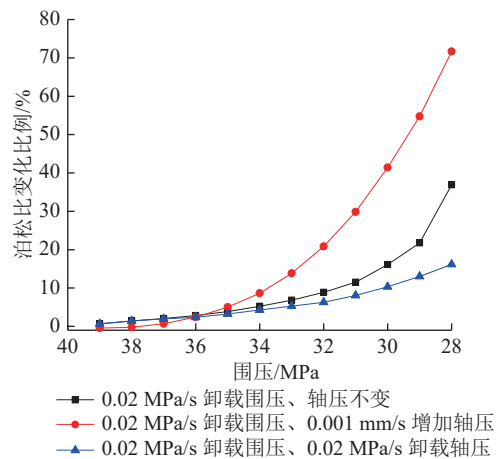


图 7 不同轴压加卸载方式下围压与泊松比变化比例
Fig.7 Ratio of confining pressure to Poisson ratio under different axial pressure loading and unloading

从图 7 可知,随着围压不断卸载,不同应力路径下的岩样泊松比均呈现非线性变化的特点;围压卸载至 28 MPa 时,增轴压、轴压不变、卸轴压的泊松比变化比例依次为 71.69%、36.89%、16.17%。在围压卸载至 36 MPa 以下,3 种应力路径的泊松比变化比例呈现出明显的差异,0.001 mm/s 增加轴压的应力路径下泊松比变化比例相比于轴压不变和卸围压

2种应力路径明显增大。

通过曲线拟合得出相同围压卸载、不同轴压加卸载路径下的方程如下所示:

$$y_{\mu 1} = e^{21.515 67 - 1.183 57x + 0.013 52x^2}$$

(0.02 MPa/s 卸载围压、轴压不变) (13)

$$y_{\mu 2} = e^{-10.918 54 + 0.982 39x - 0.021 59x^2}$$

(0.04 MPa/s 卸载围压、0.001 mm/s 增加轴压) (14)

$$y_{\mu 3} = e^{2.262 53 - 0.074 51x - 0.002 55x^2}$$

(0.02 MPa/s 卸载围压、0.02 MPa/s 卸载轴压) (15)

从图8可知,加轴压、卸围压应力路径下的岩体泊松比变化幅度明显增加,当围压卸载至34 MPa时,偏应力与泊松比变化比例的斜率呈现出明显增大的趋势;当围压卸载至31 MPa时,偏应力达到223 MPa,岩样内部裂隙迅速扩展,并逐渐丧失原有承载能力,说明该岩样变形破坏程度明显加剧。轴压不变应力路径下的岩样在围压卸载量较小时,泊松比变化比例也相对较小,当偏应力达到169.2 MPa时,泊松比变化比例呈现出明显增大的趋势。

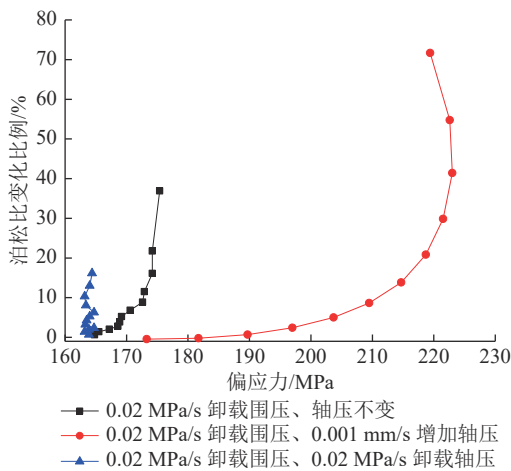


图8 不同轴压加卸载方式下偏应力与泊松比变化比例

Fig.8 Ratio of deviatoric stress to Poisson ratio under different axial compression loading and unloading modes

对比图6和图8可以看出,泊松比的变化比例与弹性模量劣化趋势基本一致,卸围压、增轴压的应力路径下,泊松比变化比例明显大于弹性模量劣化比例。保持围压不变卸围压的应力路径下,泊松比变化比例略大于弹性模量劣化比例,尤其是在围压由29 MPa卸载至28 MPa后,泊松比增大幅度达到15.16%,相比于弹性模量劣化比例达到7.75%,说明泊松比的变化明显超前于弹性模量劣化的力学响应。而同时卸载轴压和围压的应力路径,弹性模量劣化

比例与泊松比变化的趋势基本一致,说明岩体内部裂隙扩张变形程度优先于其承载能力,即岩体内部裂隙扩展到一定程度后才能反映到岩体内部的承载能力。

3.2.2 不同围压卸载方式下的卸轴压力学试验

考虑到0.06 MPa/s 卸载围压、0.02 MPa/s 卸载轴压应力路径下,围压未卸载至28 MPa,岩石发生变形破坏,为此,仅对比3种应力路径下围压由39 MPa卸载至29 MPa的弹性模量劣化比例与泊松比变化比例,具体如图9、图10所示。

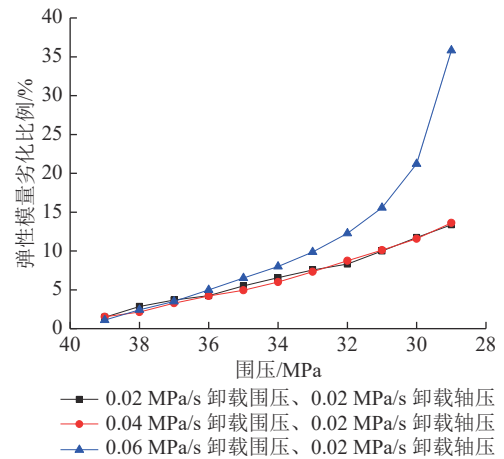


图9 不同围压卸载方式下围压与弹性模量劣化比例

Fig.9 Deterioration ratio of confining pressure and elastic modulus under different unloading modes

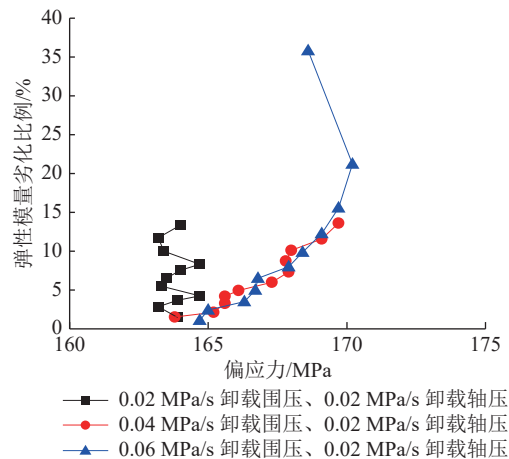


图10 不同围压卸载方式下偏应力与弹性模量劣化比例

Fig.10 Deterioration ratio of deviatoric stress and elastic modulus under different confining pressure unloading modes

从图9可知,在按照0.02 MPa/s 卸载围压和按照0.04 MPa/s 卸载围压时,弹性模量劣化比例基本一致,均明显小于按照0.06 MPa/s 卸载围压的岩样。按照0.02 MPa/s 卸载围压、0.04 MPa/s 卸载围压、0.06 MPa/s 卸载围压3种应力路径对应于围压卸载至29 MPa时的弹性模量劣化比例分别为13.37%、

13.63%、35.81%。

通过曲线拟合得出相同轴压卸载、不同围压卸载路径下的方程如下：

$$y'_{E3} = e^{-4.059\ 03+0.257\ 44x-0.006\ 46x^2}$$

(0.02 MPa/s 卸载围压、0.02 MPa/s 卸载轴压) (16)

$$y_{E4} = e^{-5.204\ 43+0.341\ 08x-0.007\ 96x^2}$$

(0.04 MPa/s 卸载围压、0.02 MPa/s 卸载轴压) (17)

$$y_{E5} = e^{22.919\ 08-1.253\ 98x+0.014\ 72x^2}$$

(0.06 MPa/s 卸载围压、0.02 MPa/s 卸载轴压) (18)

从图 10 可知，轴压按照 0.02 MPa/s 卸载同时围压按照 0.06 MPa/s 进行卸载时，在围压由 31 MPa 卸载至 30 MPa，偏应力由 169.7 MPa 增大至 170.2 MPa，该阶段弹性模量劣化程度相比于之前明显增大，随着围压继续卸载，偏应力开始减小，说明此时岩样内部裂隙扩展明显，已丧失部分承载能力，即受到较小应力时，变形量呈现出较为明显的增大。不同卸载速率，在围压卸载到一定程度，即偏应力达到岩石变形破坏临界状态时，岩石变形破坏存在突变性。

从图 11 可知，随着围压卸载速度的不断增加，泊松比变化趋势越明显；围压卸载至 29 MPa 时，按照 0.02 MPa/s 卸载围压、0.04 MPa/s 卸载围压、0.06 MPa/s 卸载围压 3 种应力路径对应的泊松比变化比例分别为 13.01%、16.84%、54.49%。在围压卸载至 31 MPa 时，按照 0.06 MPa/s 卸载围压的应力路径对应的泊松比变化量远大于按照 0.02 MPa/s 卸载围压和 0.04 MPa/s 卸载围压的 2 种应力路径。

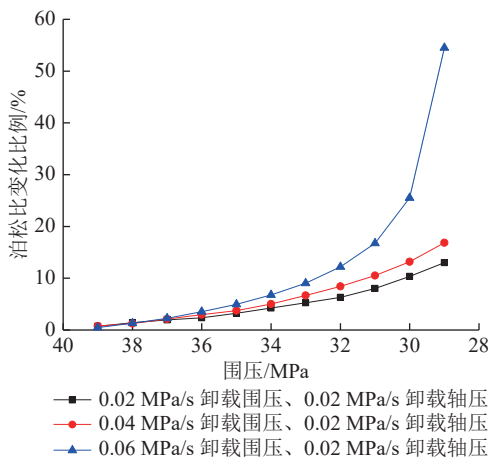


图 11 不同围压卸载方式下围压与泊松比变化比例
Fig.11 Ratio of confining pressure to poisson ratio under different unloading modes

通过曲线拟合得出相同轴压卸载、不同围压卸载路径下的方程如下：

$$y'_{\mu3} = e^{1.938\ 84-0.054\ 77x-0.002\ 85x^2}$$

(0.02 MPa/s 卸载围压、0.02 MPa/s 卸载轴压) (19)

$$y_{\mu4} = e^{-1.280\ 59+0.174\ 17x-0.006\ 61x^2}$$

(0.04 MPa/s 卸载围压、0.02 MPa/s 卸载轴压) (20)

$$y_{\mu5} = e^{44.851\ 77-2.502\ 82x+0.032\ 22x^2}$$

(0.06 MPa/s 卸载围压、0.02 MPa/s 卸载轴压) (21)

由图 12 可知，围压卸载速率越大，岩样所承受的偏应力越大，泊松比变化比例随之增加；当偏应力达到峰值后，泊松比变化呈现出跳跃式增长，以 0.06 MPa/s 卸载围压的应力路径为例，在偏应力达到 170.2 MPa 后，泊松比变化比例增加明显，说明该阶段岩体内部裂隙扩展明显，受外部载荷扰动影响下，易进一步扩张，加剧岩体变形程度。

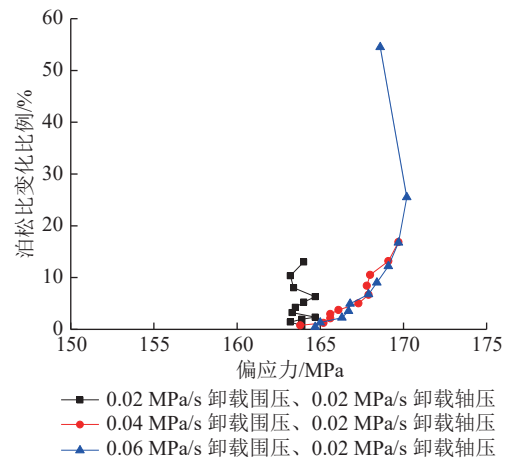


图 12 不同围压卸载方式下偏应力与泊松比变化比例
Fig.12 Ratio of deviatoric stress to poisson ratio under different confining pressure unloading modes

4 卸荷变形破坏机理分析

4.1 理论分析

为分析不同加载方式下岩石破坏机理，构建裂隙岩体断裂力学模型^[17]，假设单位长度岩块内，赋存有长度为 $2a$ 的裂纹，在最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 的共同作用下，产生长度为 l 的分支裂纹，分析加卸载作用下分支裂纹端部的应力集中程度，为揭示岩体卸荷破坏特征提供参考，具体如图 13 所示。

通过受力分析得出裂纹面所受的正应力 σ_{ne} ，如式(22)所示。

$$\sigma_{ne} = \sigma_1 \sin^2 \beta + \sigma_3 \cos^2 \beta \quad (22)$$

式中： σ_{ne} 为外力作用在裂纹面的法向应力，MPa。

通过计算得出剪应力 τ_{ne} ，如式(23)所示。

$$\tau_{nc} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \quad (23)$$

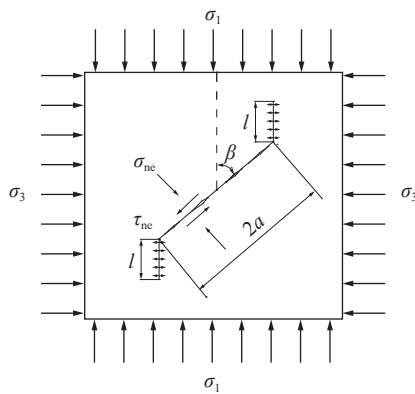
根据断裂力学,将在裂纹端部受拉伸应力时,裂纹端部的应力强度因子 K_I [18],如式(24)所示。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (24)$$

分支裂纹在剪应力 τ 作用下,产生垂直于翼状裂纹的拉伸变形,水平方向应力 σ_3 则限制裂纹拉伸扩展变形,结合式(22)一式(24),计算得出双轴应力状态下裂纹面端部的应力强度因子 K_I ,如式(25)所示。

$$K_I = \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} [\sin 2\beta - f(1 - \cos 2\beta)] - f\sigma_3 \right\} \sqrt{\pi a} \quad (25)$$

式中: f 为岩体裂纹面的摩擦因数。



β —裂纹面与最大主应力方向的夹角

图13 卸载过程中分支裂纹扩展示意

Fig.13 Diagram of branch crack propagation during unloading

轴压不变且 0.02 MPa/s 卸围压、0.001 mm/s 加轴压且 0.02 MPa/s 卸围压、0.02 MPa/s 卸轴压且 0.02 MPa/s 卸围压 3 种应力路径下的偏应力增加幅度依次是 0.001 mm/s 加轴压且 0.02 MPa/s 卸围压 > 轴压不变且 0.02 MPa/s 卸围压 > 0.02 MPa/s 卸轴压 > 0.02 MPa/s 卸围压。从式(25)可以看出,在围压变化速率相同的情况下,加轴压易增大最大主应力与最小主应力之间的偏应力增量,裂纹端部应力集中系数相比于轴压保持不变或卸载轴压 2 种应力路径较大,从而造成岩样在卸载过程中更易发生破坏,反映在岩样的泊松比变化程度和弹性模量劣化程度等方面更为明显。

对于 0.02 MPa/s 卸轴压且 0.02 MPa/s 卸围压、0.02 MPa/s 卸轴压且 0.04 MPa/s 卸围压、0.02 MPa/s 卸轴压且 0.06 MPa/s 卸围压 3 种应力路径下,随着围压卸载速率的不断增大,裂纹面垂直应力不断减小,而裂纹面剪应力不断增大,从而导致岩体更易发

生剪切破坏,岩样的损伤劣化程度随之增大。

4.2 不同加卸载路径下岩石能量演化特征和声发射事件分析

为进一步分析不同加卸载路径下岩样变形破坏特征,分别从能量变化特征和声发射事件的角度进行剖析,具体如图14、图15所示。

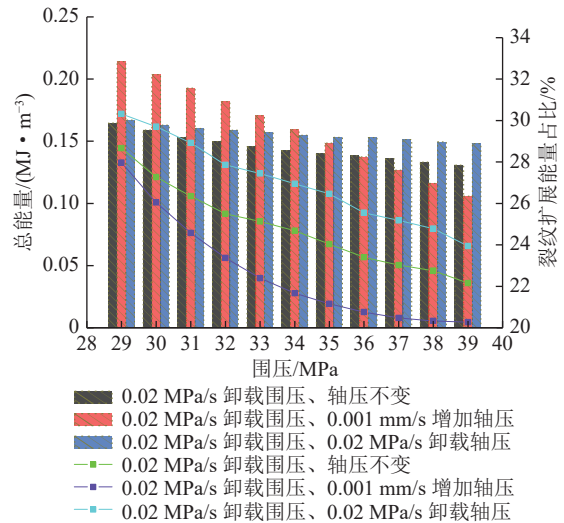


图14 不同轴压加卸载方式下岩石能量变化特征

Fig.14 Energy variation characteristics of rock under different axial compression loading and unloading modes

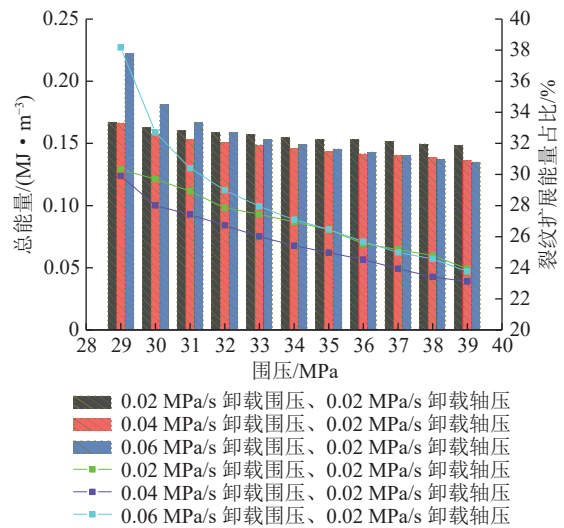


图15 不同围压卸载方式下岩石能量变化特征

Fig.15 Characteristics of rock energy under different confining pressure unloading modes

4.2.1 岩石能量演化特征

1)不同轴压加卸载方式下的卸围压力学试验。由图14可知,在相同卸围压的条件下,0.001 mm/s 增加轴压的应力路径导致岩样内部积聚的总能量逐渐增大;裂纹扩展所消耗的能量与岩石总能量的比值在卸载初期基本稳定于 21% 左右,在围压卸载至

34 MPa 以后, 裂纹扩展所消耗的能量占比迅速增加, 说明岩体内部积聚能量增量超过了完整岩石自身承载能力, 并以裂纹扩展的形式进行能量释放, 岩石变形破坏且弹性模量迅速劣化。与之相对应的保持轴压不变、轴压以 0.02 MPa/s 进行卸载 2 种应力路径, 总能量变化幅度较小, 说明该应力路径下, 岩体内部积聚的能量相对稳定, 但在卸载过程中, 仍有部分能量转变为裂纹扩展能进行消耗。对比发现, 保持轴压不变、轴压以 0.02 MPa/s 进行卸载 2 种应力路径下的岩样内部能量积聚程度, 滞后于增加轴压的应力路径。即煤层回采过程中, 在围压卸载过程中, 煤层底板处于轴压增加的区域优先于轴压稳定或卸载的区域应力集中程度明显, 即岩体易发生破坏。

2) 不同围压卸载方式下的卸轴压力学试验。由图 15 可知, 随着轴压、围压不断卸载, 岩样变形不断增加, 受外部载荷影响, 岩样内部积累的能量呈现出先慢后快的增长趋势, 主要是前期岩样以较小的变形量承受岩样内部的受力变化, 随着变形的不断增加, 内部裂隙逐渐萌生并扩展, 从而产生较大的变形。在围压卸载至 32 MPa 时, 围压按照 0.06 MPa/s 卸载的岩样表现出消耗能量占比大幅增加的特点, 分析该阶段岩样内部产生大量的裂纹。

4.2.2 岩石变形破坏声发射振铃数分析

岩体内部裂纹扩展明显, 当岩样内部变形量增长较快时, 体现为外部载荷作用于岩样的能量增长较快, 而岩样用于裂纹扩展的能量基本也呈现较为相近的趋势, 即岩样内部较多能量用于裂纹扩展。为此, 结合声发射振铃数分析岩石加卸载过程中, 裂纹扩展分布特征。

1) 不同轴压加载方式下的卸围压力学试验。从图 16 中可以看出, 相比于偏应力保持不变的情况, 轴压保持不变卸围压和增轴压卸围压两种应力路径下, 岩石的声发射事件均明显增多, 尤其是在围压卸载至 36 MPa 后, 声发射事件振铃数呈现出非线性增长的特点, 分析产生该现象的主要原因是围压卸载产生的位移, 为岩石侧向变形提供了外在条件; 偏应力增加, 导致岩石内部积聚的能量增大, 致使岩石内部产生较为明显的剪切和张拉裂纹, 同时伴有明显的裂纹扩展事件发生, 为裂纹扩展提供了内在条件, 综合体现为声发射事件振铃数明显增大。声发射振铃数的分布特征与泊松比变化比例较好吻合, 说明该阶段岩石的变形破坏程度明显增大。

2) 不同围压卸载方式下的卸轴压力学试验。从图 17 中可以看出, 轴压相同卸载速率下, 不同围压

卸载速率声发射事件增长趋势存在一定的差异性。在围压由 39 MPa 卸载至 31 MPa 的过程中, 岩石声发射事件的振铃数变化较小。在围压卸载至 31 MPa 时, 按照 0.06 MPa/s 卸载围压的岩样偏应力达到了自身承载的极限, 内部形成大量扩展裂纹, 伴随着大量声发射事件发生, 与岩样的用于裂纹扩展的能量变化、弹性模量劣化比例和泊松比变化比例基本一致。进一步说明岩样弹性模量劣化程度的大小与岩样内部裂纹扩展程度呈明显的相关性。

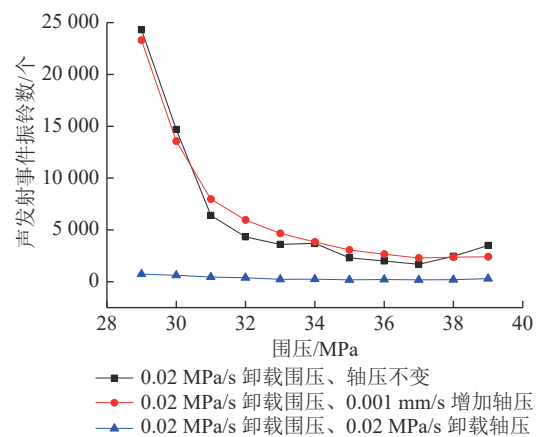


图 16 不同轴压加卸载方式下声发射事件振铃数演化特征
Fig. 16 Evolution characteristics of ringing number of acoustic emission events under different axial compression loading and unloading modes

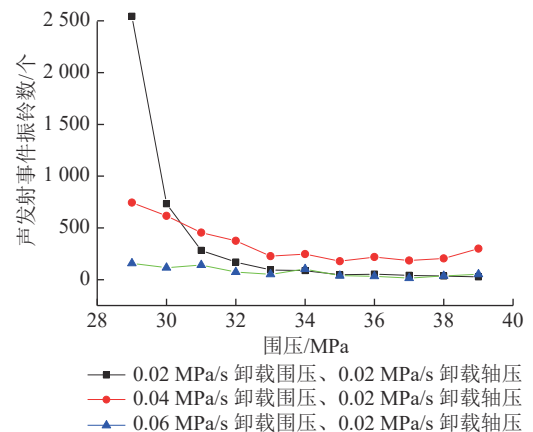


图 17 不同围压卸载方式下声发射事件振铃数演化特征
Fig. 17 Evolution characteristics of ringing number of acoustic emission events under different confining pressure unloading modes

综合不同应力路径可以看出, 轴向应力保持不变或增加、同时偏应力不断增大的应力路径, 在围压卸载至一定程度时, 岩石内部裂纹变形和扩展程度不断加剧, 伴随着大量的声发射事件振铃数明显增多; 相比于同时卸载轴压和围压的应力路径, 岩石声发射事件振铃数较少。分析产生该现象的主要原因

是增加轴压的应力路径致使岩石内部的偏应力增大,使得岩石发生变形破坏,剪切破坏程度明显增大,内部破裂程度加剧,当围压卸载至一定程度后,内部微裂隙发生扩展,产生宏观破裂面。从而导致该应力路径下岩石的弹性模量劣化程度和泊松比变化程度明显增大。

位于工作面附近的底板岩体,在工作面回采过程中,处于轴向压力增加、围压减小的状态,该处受超前支承压力影响已处于塑性状态的底板岩体在加卸载作用下,岩体劣化程度最为严重,这与工作面底板突水事故多发生在工作面附近相一致,尤其是深部煤层底板应力变化较大,底板卸荷程度较为明显,进一步加剧了底板岩体的弹性模量的卸荷劣化程度。随着工作面推过后,处于采空区的底板岩体逐渐进入卸压带,已处于塑性状态的岩体,应力得到进一步减小,岩体卸荷劣化程度进一步加剧,增大了采空区突水风险。

4.3 破坏特征分析

与常规三轴力学试验相比,围压卸载作用相当于在卸载方向施加一个拉应力,岩石易产生较为明显的膨胀变形和裂隙,即卸载过程中岩石的泊松效应较为明显。由于岩样在加载过程中已内部产生微小裂隙,围压卸载作用加剧了岩石的脆性破坏特征^[19],即岩石更易发生破坏。当岩石发生变形破坏时,岩石所处的围压最小降低至 25.45 MPa,岩石仍以剪切破坏为主^[20],具体如图 18 所示。

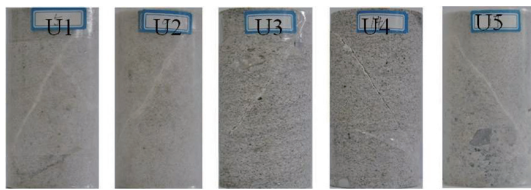


图 18 典型砂岩三轴卸荷破坏形态

Fig.18 Typical failure modes of sandstone in triaxial unloading tests

5 结 论

1)通过开展不同轴压加载方式、相同围压卸载方式的力学试验,分析指出不同轴压加载方式下岩样的弹性模量劣化程度和泊松比变化幅度依次为:加轴压>轴压保持不变>卸轴压。通过开展相同轴压卸载方式、不同围压卸载方式的力学试验,分析指出相同轴压卸载方式下,围压卸载速率越大,岩石弹性模量劣化程度与泊松比变化幅度越大。围压卸载速率为 0.06 MPa/s 的岩样在卸载至 30 MPa 时,偏应力

达到岩石临界破坏点,岩石变形破坏呈现突变性。

2)构建了岩石断裂力学模型,研究了不同加载路径下分支裂纹端部应力集中因子变化特征,分析指出,加卸载路径下偏应力是诱发岩样失稳破坏的根本原因。

3)增轴压卸围压的应力路径下,岩石试件失稳破坏前,其轴向应力和偏应力相比于卸荷点均呈增大状态,岩石内部剪切破坏程度加剧,岩石内部积聚的能量逐渐增加,在围压卸载至一定程度时,内部闭合的微裂隙和原生裂隙重新被打开,泊松比变化比例明显增大,声发射事件振铃数呈现出非线性增长。卸轴压卸围压的应力路径相比于增轴压或保持轴压不变的应力路径,偏应力明显偏小,在卸载过程中,岩石内部积聚的能量逐渐释放,岩石内部剪切裂纹相对较少,即岩石内部损伤程度偏低,体现为弹性模量和泊松比变化比例较小,而且岩石临界破坏时,声发射事件相对较少。

参考文献(References):

- [1] 王平,朱永建,冯涛,等.砂岩试件加载-卸荷-加载损伤弱化试验分析[J].煤炭学报,2016,41(12):2960-2967.
WANG Ping, ZHU Yongjian, FENG Tao, et al. Test and analysis of sandstone damage-weakening under loading-unloading-loading[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 2960-2967.
- [2] 张黎明,王在全,孙辉,等.岩石卸荷破坏的变形特征及本构模型[J].煤炭学报,2009,34(12):1626-1631.
ZHANG Liming, WANG Zaiquan, SUN Hui, et al. Failure characteristics and constitutive model of rock under unloading condition[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1626-1631.
- [3] ABBAS Taheri, NOORFAIZAH Hamzah, QIEN Dai. Degradation and improvement of mechanical properties of rock under triaxial compressive cyclic loading[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2017, 5(2): 71-78.
- [4] 纪维伟,潘鹏志,苏方声,等.基于裂纹体应变的深埋大理岩加、卸荷破坏机制研究[J].岩土力学,2016,37(11):3079-3088.
JI Weiwei, PAN Pengzhi, SU Fangsheng, et al. Failure mechanism of deep-buried marble under loading-unloading conditions based on crack volumetric strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3079-3088.
- [5] 李地元,孙志,李夕兵,等.不同应力路径下花岗岩三轴加卸载力学响应及其破坏特征[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3449-3457.
LI Diyuan, SUN Zhi, LI Xibing, et al. Mechanical response and failure characteristics of granite under different stress paths in triaxial loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3449-3457.
- [6] 黄达,谭清,黄润秋.高应力强卸荷条件下大理岩损伤破裂的应变能转化过程机制研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2483-2493.

- HUANG Da, TAN Qing, HUANG Runqiu. Mechanism of strain energy conversion process for marble and fracture under high stress and rapid unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2483–2493.
- [7] 李景龙, 朱子涵, 蔚立元, 等. 大理岩峰前卸荷损伤表征及再承载破坏耗能特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2429–2438.
- LI Jinglong, ZHU Zihan, WEI Liyuan, *et al.* Dissipative characteristics investigation of marble during reloading process considering pre-peak unloading damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2429–2438.
- [8] 朱子涵, 蔚立元, 李景龙, 等. 峰前卸荷大理岩变形演化规律及破坏耗能特征[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S1): 181–190.
- ZHU Zihan, WEI Liyuan, LI Jinglong, *et al.* Deformation evolution and dissipated energy characteristics of marble under pre-peak unloading conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 181–190.
- [9] 赵国彦, 戴兵, 董隴军, 等. 不同应力路径下岩石三轴卸荷力学特性与强度准则研究[J]. *岩土力学*, 2016, 36(11): 3121–3127, 3149.
- ZHAO Guoyan, DAI Bing, DONG Longjun, *et al.* Experimental research on mechanical characteristics and strength criterion of rock of triaxial unloading tests under different stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 36(11): 3121–3127, 3149.
- [10] 朱珍德, 李道伟, 李术才, 等. 基于数字图像技术的深埋隧洞围岩卸荷劣化破坏机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(7): 1396–1401.
- ZHU Zhende, LI Daowei, LI Shucan, *et al.* Study of unloading damage on immersed tunnel rock based on digital image processing technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1396–1401.
- [11] 杨小彬, 韩心星, 刘恩来, 等. 循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的声发射特征试验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 449–456.
- YANG Xiaobin, HAN Xinxing, LIU Enlai, *et al.* Experimental study on the acoustic emission characteristics of non-uniform deformation evolution of granite under cyclic loading and unloading test[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 449–456.
- [12] 刘泉声, 刘恺德, 卢兴利, 等. 高应力下原煤三轴卸荷力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 3429–3438.
- LIU Quansheng, LIU Kaide, LU Xingli, *et al.* Study of mechanical properties of raw coal under high stress with triaxial unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 3429–3438.
- [13] 周小平, 哈秋龄, 张永兴, 等. 峰前围压卸荷条件下岩石的应力-应变全过程分析和变形局部化研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(18): 3236–3245.
- ZHOU Xiaoping, HA Qiuling, ZHANG Yongxing, *et al.* Analysis of localization of deformation and complete stress-strain relation for mesoscopic heterogenous brittle rock material when axial stress is held constant while lateral confinement is reduced[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(18): 3236–3245.
- [14] 张黎明, 高速, 王在泉, 等. 大理岩加卸载破坏过程的能量演化特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(8): 1572–1578.
- ZHANG Liming, GAO Su, WANG Zaiquan, *et al.* Analysis of marble failure energy evolution under loading and unloading condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(8): 1572–1578.
- [15] 张风达. 深部煤层底板变形破坏机理及突水评价方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- ZHANG Fengda. Study on deformation failure mechanism of deep coal seam floor and evaluation method of water inrush mining above confined aquifer[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016.
- [16] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 456–460.
- GAO Chunyu, XU Jin, HE Peng, *et al.* Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(3): 456–460.
- [17] 张风达, 申宝宏, 康永华. 考虑卸荷作用的底板突水破坏机制研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(2): 431–438.
- ZHANG Fengda, SHEN Baohong, KANG Yonghua. Study on water inrush failure mechanism of mining floor under unloading effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 431–438.
- [18] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- FAN Tianyou. Theoretical basis of fracture[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [19] 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.
- 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.
- [20] 王云飞, 焦华喆, 李震, 等. 白砂岩卸围压强度与损伤破坏特征[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(8): 2787–2794.
- WANG Yunfei, JIAO Huazhe, LI Zhen, *et al.* Strength and damage failure characteristics of white sandstone under unloading confining pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(8): 2787–2794.