

# 基于室内试验与数值模拟的煤岩围压效应研究

刘晓辉<sup>1,2</sup>, 康佳辉<sup>1</sup>, 余洁<sup>1</sup>, 郝齐钧<sup>1</sup>

(1. 西华大学 流体及动力机械教育部重点试验室, 四川 成都 610039;

2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点试验室, 北京 100084)

**摘要:** 为研究不同围压下煤岩的变形破坏特征,对0、8、16、25 MPa 4种不同围压下的煤岩采用MTS 815岩石力学实验和RFPA 2D数值模拟软件展开应力应变特征、强度特征、声发射特征等研究,旨在揭示不同围压作用下煤岩的围压效应。结果表明:围压对煤岩的变形破坏特征影响显著,随着围压的增大,煤岩最大抗压强度线性增大,煤岩逐渐由脆性破坏向延性破坏转变,破坏形态以单轴压缩下的压剪-劈裂破坏和三轴压缩下的剪切破坏为主;煤岩强度特征参数随围压增大而增大,弹性模量随围压增大呈非线性增大,围压越大,则塑性应变越大,残余应变增大;声发射现象在煤岩单轴压缩状态下十分强烈,但随着围压的升高,声发射现象、应变能释放等声发射特征参数均趋于稳定;RFPA可再现煤岩在不同围压下裂纹萌生、扩展至完全破坏的渐进破坏过程,模拟结果与室内试验耦合度较好,验证了数值模拟的可靠性。

**关键词:** 煤岩; 围压效应; 三轴压缩; 真实破裂过程分析系统; 和声发射测试系统; 变形破坏

中图分类号:TD313+.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0212-08

## Effect of coal-rock confining pressure effect based on laboratory test and numerical simulation

LIU Xiaohui<sup>1,2</sup>, KANG Jiahui<sup>1</sup>, YU Jie<sup>1</sup>, HAO Qijun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;)

**Abstract:** In order to understand the deformation and failure characteristics of coal-rock under different confining pressures and reveal the mechanism of confining pressure effect, the stress-strain characteristics, strength characteristics and acoustic emission (AE) characteristics of coal-rock under different confining pressures (i. e. 0, 8, 16 and 25MPa) were studied by MTS 815 rock mechanics testing system four and RFPA 2D(realistic failure process analysis system) numerical simulation software. The results show that the confining pressure has a significant influence on the deformation and failure characteristics of coal-rock. With the increase of the confining pressure, the maximum compressive strength of coal-rock increases linearly, and the failure form of coal-rock gradually changes from brittle failure to ductile failure. The main failure modes are compression shear splitting failure under uniaxial compression and shear failure under tri-axial compression. The strength characteristic parameters of coal-rock increase with the confining pressure, and the elastic modulus increases nonlinearly with the confining pressure. The greater the confining pressure, the higher the plastic strain, the larger the residual strain. AE of coal-rock under uniaxial compression is superactive; however it remains stable with the increase of confining pressure, so does the strain energy release. RFPA can reproduce the progressive failure process of coal-rock from crack initiation to propagation to complete failure under different confining pressures. The simulation results are consistent with that of the laboratory test, which verifies the reliability of the numerical simulation.

收稿日期:2019-10-18; 修回日期:2019-12-31

基金项目:四川省教育厅重点项目(18ZA0457); 水沙科学与水利水电工程国家重点试验室开放研究基金课题(sklhse-2018-D-03); 西华大学自然科学基金项目(Z17113); 西华大学流体及动力机械教育部重点试验室创新基金课题(ycej2018040)

作者简介:刘晓辉(1977-),女,四川成都人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水利工程、岩土工程等相关研究。

**Key words:** coal-rock; confining pressure effect; triaxial compression; realistic failure process analysis (RFPA 2D); mechanics testing system(MTS); deformation and failure

## 1 研究背景

随着地表资源逐渐枯竭,深部能源开采势在必行,煤炭作为我国最重要的支柱型产业,其资源开采不断走向深部。处于深部高地应力状态下的煤岩,其相互作用关系势必增强,上层岩体的开挖扰动所引起的岩层扰动问题更加复杂,岩层突出灾害现象更为频繁,归根结底是由于煤岩的力学响应机理发生了变化<sup>[1-2]</sup>。因此,研究不同围压下煤岩的变形破坏特征,对安全、高效开采地下煤炭资源具有重要科学意义和现实价值。

目前对岩石力学特性的研究主要有两种方法。一种是基于室内试验的三轴压缩试验,试验时分别在试件的轴向和横向施加荷载从而模拟岩石在不同赋存条件下的应力状态。再者就是基于数值模拟方法,通过给定细观力学参数,建立本构关系及破坏准则,从而模拟岩石受载破坏过程。王水林等<sup>[3]</sup>、郑宏等<sup>[4-5]</sup>基于物理试验对脆塑性岩体的破坏原理进行了研究,张慧梅等<sup>[6]</sup>对岩石在冻融循环和围压双重作用下的力学性质进行了研究,均取得较好的试验结果。朱泽奇等<sup>[7]</sup>采用室内试验方法研究了三峡花岗岩在三轴压缩状态下的侧向脆性特征和损伤机理,发现花岗岩等脆性岩石在不同应力路径和不同加载控制方式下均以侧向损伤为主。张春生等<sup>[8]</sup>对锦屏二级电站深埋的大理岩进行了室内单轴压缩-声发射试验,分析了岩石的启裂强度和损伤强度关系,为引水隧洞的围压深度预测提供了理论参考。

煤作为一种远古地表腐植物沉积演化的岩类矿物,是典型的含有大量原始微观损伤的非均质体,对于它的研究,长期以来也一直倍受广大学者关注。刘保县等<sup>[9]</sup>基于室内试验对煤岩在单轴压缩条件下的变形损伤和声发射特性进行了研究,认为煤岩单轴压缩应力应变全过程可分为4个阶段。高保彬等<sup>[10]</sup>通过室内试验对煤岩的声发射和分形维度进行了研究,对煤岩的变形破坏作了更为深入的讨论,观察到分形维值在煤岩破坏前会出现突降现象,为预测煤岩动力灾害提供了依据。苏承东等<sup>[11]</sup>通过三轴压缩试验探讨了煤在三轴压缩和卸围压条件下的变形和强度特征,认为煤在两种状态下的峰值强度均呈线性关系。薛东杰等<sup>[12]</sup>通过单、三轴试验研究了不同加载速率下煤岩采动力学的响应及破坏机

制,对煤岩在单轴和三轴压缩状态下的破坏进行了探讨。Liu 等<sup>[13]</sup>采用 MTS 815 (mechanics testing system) 和声发射测试系统研究了平行和垂直层理方向的煤岩声发射特征,阐述了煤岩在压缩变形过程中的能量释放特征。孔海陵等<sup>[14]</sup>采用 FLAC 2D 模拟了不同围压下煤岩的破坏情况,对煤岩的破坏强度、破断角度、屈服极限等进行了讨论。李建乐等<sup>[15]</sup>采用 PFC 离散元软件模拟研究了不同加载条件下的煤岩破坏特征。学者们尝试运用不同的试验方法来研究煤岩的破坏特征和力学特性,但研究中所采用的试验或模拟方法往往比较单一,所得试验结果无法相互佐证,且由于煤自身的离散性和不均匀性使所得结果差异较大。若对某矿井采集的煤岩同时进行室内试验和数值模拟来分析其变形破坏特征,势必更具优越性。

因此,本文对某矿井采集的煤岩同时进行室内单、三轴压缩试验和模拟试验,通过数值模拟与室内试验的对比,验证数值模拟的可靠性,进而重现不同围压下煤岩的变形破坏过程,揭示煤岩在不同围压下的变形破坏机理,为煤炭资源开采提供一定理论依据和现实指导。

## 2 研究设备及方法

### 2.1 室内试验设备及方法

室内试验所用岩样取自四川省宜宾市芙蓉白皎煤矿,煤层埋深 300 ~ 450 m,经钻芯取样制作成直径 50 mm × 高度 100 mm 标准试验煤样<sup>[16]</sup>,试样上、下面经抛光打磨平整,误差控制在  $\pm 0.02$  mm<sup>[17]</sup>,试验条件满足规范要求。考虑到煤岩层理和节理具有明显的非均质性和各向异性,在煤岩试样制备过程中均选择平行层理方向进行钻芯取样和制样。考虑到单个煤岩的偶然性因素可能对试验结果产生较大的影响,每组围压下均设置对照组,煤岩试样编号、尺寸等物理参数如表 1 所示。

室内试验采用的是 MTS 815 Flex Text GT 岩石力学测试系统,如图 1 所示。加载应变率为  $10^{-5}$  /s,采用 LVDT 轴向位移控制加载,配备 PCI-2 声发射系统,信号采集阈值为 40 dB。

### 2.2 RFPA 2D 数值模型

数值模拟采用基于弹性损伤理论开发出的真实破裂过程分析系统 RFPA 2D (realistic failure process analysis),该系统可模拟岩石在应力作用下裂纹从

萌生到扩展直至宏观破坏的全过程。

试验模型尺寸为直径 50 mm × 高度 100 mm, 划分单元数为 10 000 个, 数值模拟计算模型示意图如图 2 所示。模型底部完全固定, 顶部自由, 采用轴向位移加载方式控制, 单步增量为 0.002 mm<sup>[18]</sup>, 围压为均布荷载, 采用应力加载方式进行控制, 其破坏准则为 Mohr - Coulomb 准则, 有关 RFPA 2D 的介绍详见文献[19 - 21]。

表 1 煤岩试样的物理力学参数

| 煤岩<br>编号 | 围压/<br>MPa | 直径/<br>mm | 高度/<br>mm | 密度/<br>(g · cm <sup>-3</sup> ) |
|----------|------------|-----------|-----------|--------------------------------|
| M - 1    | 0          | 47.74     | 101.10    | 1.46                           |
| M - 2    | 0          | 47.55     | 96.37     | 1.42                           |
| M - 3    | 8          | 47.45     | 98.19     | 1.51                           |
| M - 4    | 8          | 47.35     | 102.06    | 1.48                           |
| M - 5    | 16         | 47.32     | 100.31    | 1.54                           |
| M - 6    | 16         | 47.22     | 99.15     | 1.54                           |
| M - 7    | 25         | 47.33     | 98.68     | 1.50                           |
| M - 8    | 25         | 47.32     | 101.1     | 1.51                           |



图 1 MTS 815 Flex Text GT 岩石力学测试系统

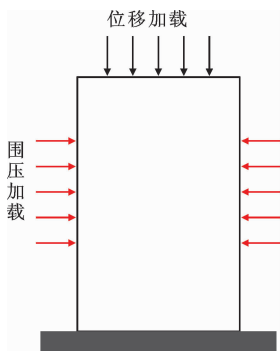


图 2 数值模拟计算模型示意图

在数值试验过程中, 由于细观单元和岩石试件整体强度之间的差异, 计算参数  $E_m f_m$  的确定十分重要, 因此在利用 RFPA 2D 进行数值模拟分析时, 需将岩石宏观力学参数和细观力学参数通过均质度

系数  $m$  按公式(1) 进行转换:

$$\begin{aligned} \frac{f_c}{f_m} &= 0.2602 \ln m + 0.0233 \quad (1.2 \leq m \leq 50) \\ \frac{E_c}{E_m} &= 0.1412 \ln m + 0.6476 \quad (1.2 \leq m \leq 10) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $E_m$  和  $f_m$  分别为 Weibull 分布赋值时的细观弹性模量和细观强度均值;  $E_c$  和  $f_c$  分别为试样宏观弹性模量和宏观强度均值。

均质度系数定义了材料的强度分布, 直接关系到模型强度特性, 为与室内试验达到较好的一致性, 经多次试验, 最终确定计算采用的均值度系数  $m$  为 4, RFPA 2D 中其他细观力学参数如表 2 所示。

表 2 RFPA 2D 计算参数值

| 控制参数     | 参数值 | 控制参数     | 参数值            |
|----------|-----|----------|----------------|
| 残余强度/MPa | 0.1 | 内摩擦角/(°) | 30             |
| 残余泊松比    | 1.1 | 拉压比      | 10             |
| 最大拉应变    | 1.5 | 每步加载量/mm | 0.002          |
| 最大压应变    | 200 | 破坏准则     | Mohr - Coulomb |

### 3 煤岩破坏过程分析

图 3 为煤岩在不同围压条件下最终破坏状态的室内试验和数值模拟结果。由图 3 可以看出, 煤岩的破坏形式与围压密切相关。当围压为 0 时, 即在单轴压缩状态时, 煤岩从中部发生双向剪切破坏, 破坏角较大, 煤岩的破坏形式为剪切 - 劈裂破坏, 破坏后呈碎裂块状, 破碎块较多; 当有围压存在时, 煤岩均从中部发生单一剪切破坏, 破坏角随围压的增大而逐渐增大, 煤岩破坏形式为剪切破坏, 破坏后呈较完整块状, 破碎块较少。

为更好地描述煤岩变形破坏过程, 将数值模拟中围压为 0 和 16 MPa 的煤岩渐进破坏过程列出, 如图 4 所示, 图中圆圈内为煤岩在受压过程中产生的宏观裂纹。由图 4 可以看到, 在单轴压缩状态下(围压为 0 时), 煤岩右下部最先产生拉裂纹, 随着进一步加载, 煤岩出现宏观横向扩容, 体积增大, 最终因失去承载能力而发生剪切 - 劈裂破坏。当围压为 16 MPa 时, 煤岩初始起裂点出现在试样中部, 随着轴向荷载不断增加, 微裂缝不断产生、扩展, 最终贯穿整个试样而形成剪切破坏。在此过程中煤岩几乎没有出现较大的横向扩容, 这主要是因为围压的存在限制了煤岩的横向扩展, 且围压越大, 限制作用越明显。

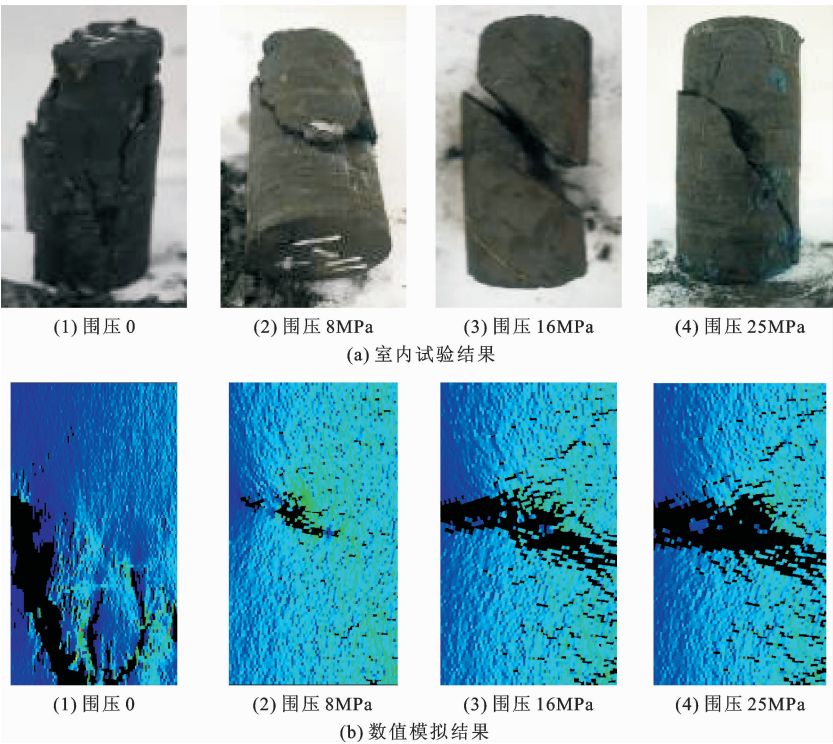


图 3 不同围压下煤岩最终破坏状态的室内试验和数值模拟结果

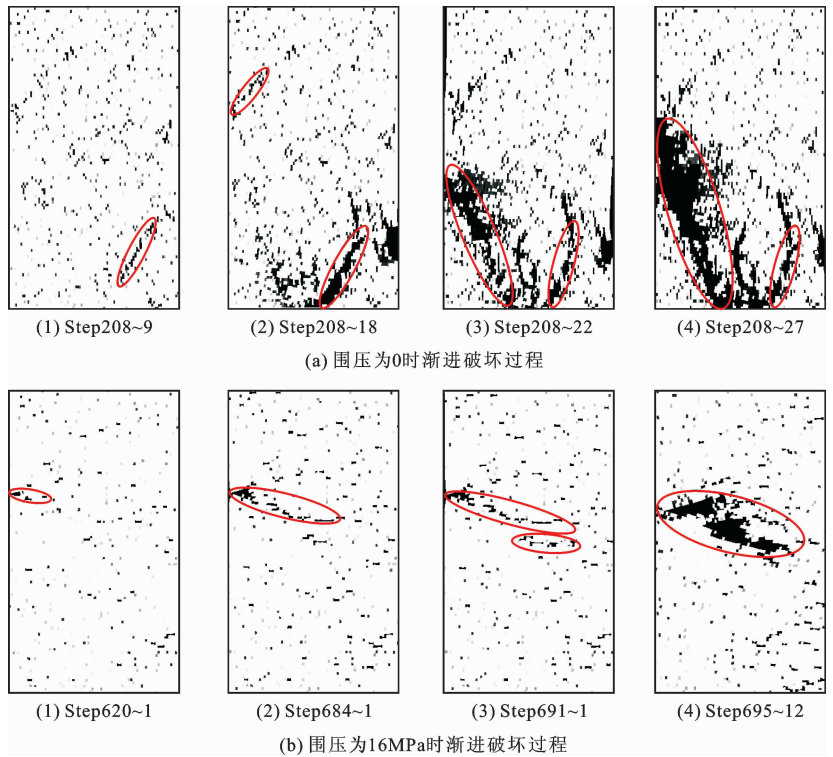


图 4 数值模拟煤岩试件渐进破坏过程

## 4 煤岩应力变形及抗压强度分析

### 4.1 应力 - 应变曲线分析

煤岩在不同围压下的应力 - 应变关系如图 5 所

示。由图 5 可以看到,室内试验与数值模拟的整体变化趋势较为一致,说明了数值模拟的可靠性。进一步分析发现,随着围压增大,煤岩轴向应力和轴向变形均增大且塑性应变和残余应变也显著增加。在



单轴压缩状态下,煤岩峰值抗压强度最低,脆性破坏特征明显。随着围压增大,煤岩峰值抗压强度显著增大,破坏前的应变增大,破坏类型由突发失稳转变为渐进失稳<sup>[22]</sup>。随着围压由 0 向 25 MPa 变化,煤岩线弹性阶段占峰前轴向应力-应变曲线段的比例逐渐提高,弹性模量逐渐增大,这主要是因为围压增大使煤岩抗侧向变形能力和刚度逐渐提高。

煤岩峰后应力跌落随围压升高逐渐增大,且在

相同围压下,数值模拟过程中的峰后应力跌落明显大于室内试验。其原因可能是由于数值模拟采用的是理想弹-塑性本构关系,无法真实还原煤岩峰后阶段的非线性变化过程,故在煤岩破坏时出现应力骤降现象。梁正召等<sup>[23]</sup>在采用 RFPA 模拟各项同性岩石的破裂过程中也曾出现过类似现象,故笔者认为可针对 RFPA 独特的加载控制方式展开进一步的研究讨论。

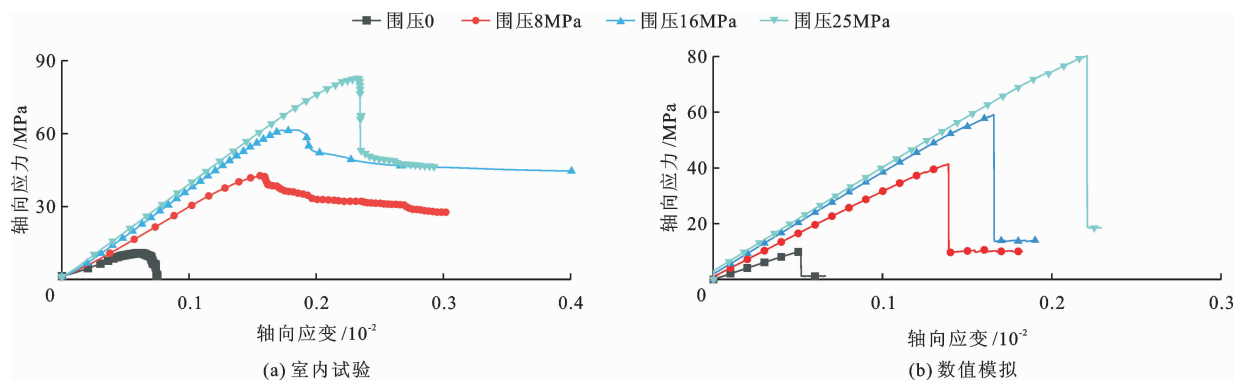


图5 煤岩在不同围压下的室内试验与数值模拟应力-应变曲线

#### 4.2 煤岩典型应力-应变曲线

围压对煤岩的变形破坏影响较大,为进一步分析煤岩在围压状态下的力学特性,以煤岩在围压 8 MPa 下的应力-应变曲线为例进行分析,如图 6 所示。由图 6 可以看到,在围压 8 MPa 下,煤岩变形破坏具有明显的 4 个变化阶段:Ⅰ压密阶段、Ⅱ弹性阶段、Ⅲ塑性阶段、Ⅳ破坏阶段。

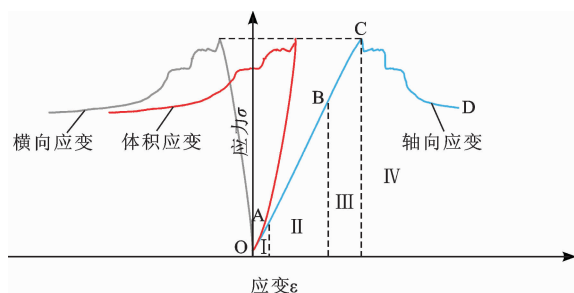


图6 煤岩在围压 8 MPa 下的应力-应变曲线

Ⅰ压密阶段(OA段):此阶段在轴向荷载作用下,细微裂隙受压闭合,煤岩应变增长较快,且应变增长速率大于应力增长速率。宏观上表现为煤岩体积减小,轴向应变增加,密度增大,随着围压的增大,煤岩横向变形减小。

Ⅱ弹性阶段(AB段):此阶段随着轴向荷载增大,煤岩原生裂隙被压密闭合,煤岩应力-应变曲线线性增大,弹性模量保持不变。由于围压效应的存在,8 MPa 围压下煤岩的弹性模量明显大于 0 围压

(如图 5 所示),说明围压的存在提高了煤岩刚度。

Ⅲ塑性阶段(BC段):此阶段为煤岩塑性软化阶段,随着轴向荷载的增大,平行于荷载轴方向内开始大量地产生新的细微裂纹,而围压效应又使新产生的细微裂纹压密闭合,煤岩内部变形处于动态平衡,应力-应变曲线为上凸趋势。

Ⅳ破坏阶段(CD段):此阶段煤岩微粒间黏聚力和摩擦力因无法抵抗剪切应力而产生滑动,煤岩细微裂纹逐渐增多并贯通形成宏观裂纹,局部破坏导致煤岩出现应力降现象,峰后应力呈阶梯状下降,并最终趋于稳定,但围压的存在使煤岩破坏后仍具有一定的承载能力。

#### 4.3 抗压强度与围压关系

由于煤岩在三轴应力状态下主要发生剪切破坏,根据 Coulomb 强度准则有:

$$\tau_m = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中:  $\tau_m$  为抗剪强度,MPa;  $\sigma$  为破坏面上的正应力,MPa;  $c$  为黏聚力,MPa;  $\varphi$  为内摩擦角( $^\circ$ )。当用主应力表示时,Coulomb 强度准则为:

$$\sigma_s = Q + K\sigma_3 \quad (3)$$

式中:  $\sigma_s$  为最大主应力,MPa;  $\sigma_3$  为最小主应力,MPa;  $Q$  和  $K$  为强度准则参数,表示不同应力状态对煤岩承载能力的影响情况,其中  $K$  与内摩擦角  $\varphi$  满足:

$$K = \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \quad (4)$$

由公式(3)可知,单个煤岩所承受的最大轴向

应力  $\sigma_{lmax}$  应与围压  $\sigma_c$  呈线性关系。

图7为煤岩峰值抗压强度与围压关系,由图7可以看到,煤岩峰值抗压强度与围压关系密切,随围压  $\sigma_c$  的增加而线性增大,单轴状态下的抗压强度较三轴状态下的明显偏低,究其原因是在单轴状态下煤岩破坏形式虽然属于剪切型劈裂破坏,但其抗压强度并非完全由剪切破坏所决定。但在三轴压缩状态下,围压的存在限制了煤岩侧向变形能力,煤岩破坏模式为单一的剪切破坏,围压的增大提高了煤岩抗压强度。

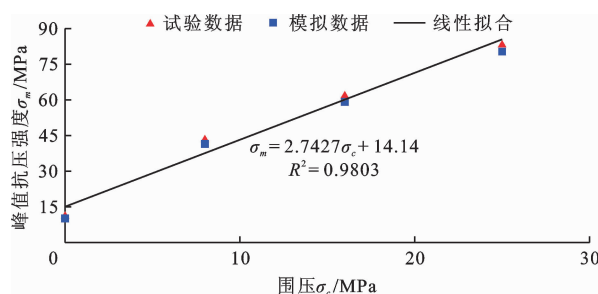


图7 煤岩峰值抗压强度与围压关系

煤岩破坏时峰值应力对应的轴向最大应变与围压关系如图8所示。

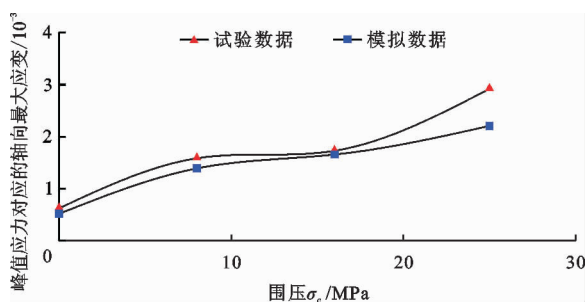


图8 煤岩峰值应力对应的轴向应变与围压关系

由图8可以看到,围压的增大显著提高了煤岩应变能力。在单轴压缩状态下,煤岩仅经历了短暂的压缩变形后即被压坏,当围压升高到8 MPa时,应变值提高了近1.5倍,煤岩经过较长时间的压缩变形后才破坏。这主要是因为煤岩内部变形受裂隙面上的内摩擦力影响,而内摩擦力与正应力有关,正应力又与围压有关,围压的存在强化了这一作用效果<sup>[24]</sup>。进一步分析发现,当围压在0~8 MPa范围内时,煤岩峰值应力对应的轴向应变随围压的增长较快,但围压在8~16 MPa范围内时,其最大应变随围压的增长反而减缓,而在16~25 MPa范围内时,其应变值随围压的增长又加剧,数值模拟与室内试验均得到相似规律。说明围压的存在确实提高了煤岩的应变能力,但该部分应变应包括煤岩因自身无

法抵抗变形而发生的形变和煤岩因内部裂隙面压密闭合而产生的形变的叠加。当围压足够大使裂隙面迅速被压密闭合时,这种叠加效应就减弱了,故在围压为16 MPa附近时,应变值出现跌落。

#### 4.4 弹性模量与围压关系

围压对弹性模量的影响,不同岩石力学试验所得出的结果差异较大。最早关于大理岩单轴和三轴压缩的试验结果表明,岩石的弹性模量并不随围压的变化而变化,如张流等<sup>[25]</sup>对我国6种岩石在高围压下的强度特性试验研究表明,围压对弹性模量没有影响。但也有其他试验得出不同结论,如刘泉声等<sup>[26]</sup>对高应力下原煤三轴压缩力学特性的研究表明,煤岩所受围压越大弹性模量越大,弹性模量随围压增大而增大。杨永杰等<sup>[24]</sup>对鲍店煤矿3#煤进行常规三轴压缩试验,发现煤岩弹性模量随围压增大而非线性增大,压缩强度随围压增大而线性增大。通过对大量岩石力学试验的分析发现,弹性模量随围压的变化可能与煤岩内部缺陷及致密程度有关,由于煤岩离散程度较大,势必导致不同试验所得结论差异较大。故弹性模量采用较为可靠的应力-应变关系曲线法进行计算,如公式(5)所示:

$$E_{50} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{50}}{\varepsilon_{h50}} \quad (5)$$

式中:  $E_{50}$  为弹性模量, GPa;  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{50}$  为50%主应力差的应力值, MPa;  $\varepsilon_{h50}$  为抗压强度50%时的纵向应变值。

图9为采用应力-应变关系曲线法计算得到的弹性模量与围压变化关系。由图9可以看到,试验与数值模拟方法所得结果较为一致,进一步验证了数值模拟的可靠性。同时也发现,煤岩的弹性模量  $E$  随围压升高呈增大趋势,这主要是由于煤岩中含有大量原生裂隙,内部微结构发育,在围压作用下,原生裂隙被压密闭合,煤岩刚度提高,弹性模量随之增大。该结论与范铁刚等<sup>[27]</sup>关于煤的有效弹性力学性质的研究结果相一致。

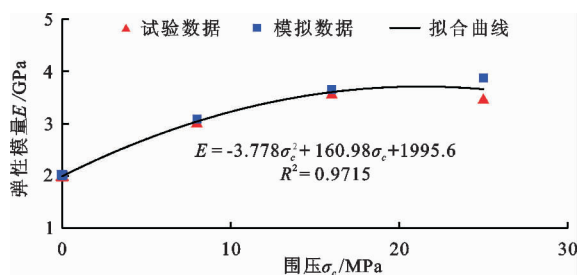


图9 煤岩弹性模量与围压关系

## 5 声发射特性分析

声发射现象是反映岩石材料内部微破裂的损伤特征的表征,声发射累积数则能够反映出煤岩在渐进破坏过程中不同时刻的损伤累积量,损伤越严重,则声发射累积数越多<sup>[28]</sup>。RFPA 自带的声发射监测功能能够对岩石从最初的裂纹萌生直至完全破坏进行实时监测,从而分析岩石破坏过程中的能量释放特征。

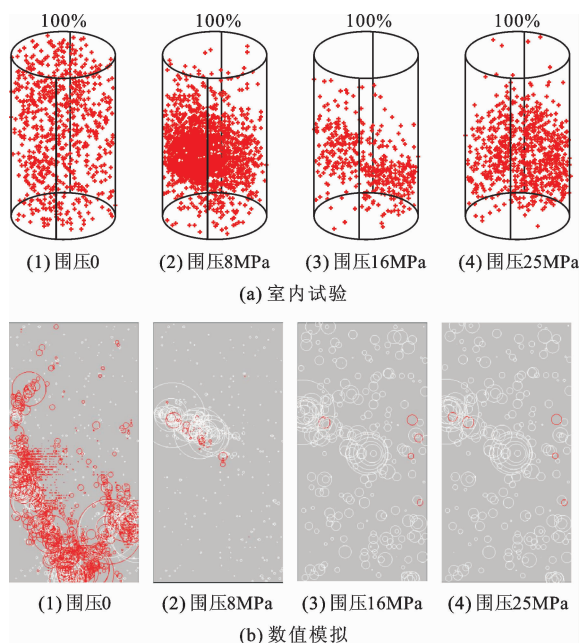


图 10 不同围压下煤岩破坏时声发射图

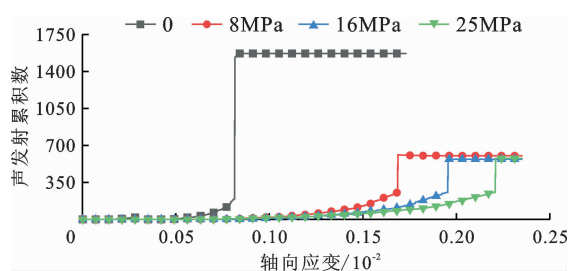


图 11 不同围压下煤岩轴向应变与声发射累积数关系

图 10 为煤岩在不同围压下破坏时的声发射图,其中图 10(a)为室内试验采集得到的声发射事件经 MATLAB 三维重构的结果,红点表示声发射事件;图 10(b)为数值模拟的结果,图中红色代表拉破坏,白色代表压剪破坏。由图 10 可以看出,初始围压对煤岩力学特征和破坏特征具有显著的影响。围压为 0 时,煤岩主要产生大量拉破坏,宏观上表现为剪切-劈裂破坏;围压为 8~25 MPa 时,煤岩在产生大量压剪破坏的同时仅伴有少量的拉破坏,宏观上表现为剪切破坏。

煤岩轴向应变与声发射累积数关系如图 11 所示。由图 11 可以看出,在单轴压缩状态下,煤岩声发射事件十分活跃,煤岩从初始加载至最终破坏时的应变较小。而当围压分别为 8、16、25 MPa 时,煤岩声发射事件相差不大,但破坏时的声发射累积数随围压的提高反而逐渐降低,煤岩从初始加载至最终破坏时的应变随围压升高而逐渐增大,并出现延性破坏。同时,根据图 11 变化规律,围压应力差越大,煤岩声发射现象增长越剧烈,但当煤岩初始缺陷压密后,其声发射现象趋势相对稳定。说明煤岩在加载过程中,初始围压对其损伤破坏活动的影响很大,故在深部煤岩开采活动中,初始地应力的影响是不容忽视的。

## 6 结 论

本文综合利用 MTS 815 试验机和 RFPA 2D 数值模拟方法对四川省宜宾芙蓉白皎煤矿煤岩进行 4 种不同围压下的煤岩变形破坏特征分析,结果表明:

(1) 围压与煤岩破坏特征密切相关。围压对煤岩的变形破坏特征影响显著,随着围压的增大,煤岩最大抗压强度线性增大,破坏形式由脆性破坏向延性破坏转变,破坏形态多以单轴压缩下的压剪-劈裂破坏和三轴压缩下的剪切破坏为主。煤岩的强度参数随围压增大呈非线性增大,围压越大,煤岩越密实,刚度越大,塑性应变和残余应变越大。

(2) 煤岩在低围压下损伤剧烈,破碎严重。围压对煤岩声发射活动影响显著,单轴压缩状态下的声发射累积数明显高于三轴压缩状态,但随着围压的增加,声发射活动逐渐趋于稳定。说明初始围压对煤岩损伤破坏活动的影响很大,故在深部煤岩开采活动中,初始地应力的影响不容忽视。

(3) 数值模拟与室内试验所得结果较为一致,验证了数值模拟的可靠性。说明采用 RFPA 再现煤岩在不同围压下裂纹萌生、扩展至完全破坏的渐进破坏过程是可行的,这为进一步研究煤岩等岩石材料的变形特性和力学特性提供了一种有力的工具。

## 参考文献:

- [1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535-542.
- [2] 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.
- [3] 王水林,郑宏,刘泉声,等. 应变软化岩体分析原理及

- 其应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 609–622.
- [4] 郑宏, 葛修润. 节理岩体的变分不等式模型[J]. 中国科学(B辑 化学 生命科学 地学), 1995, 25(9): 986–993.
- [5] 郑宏, 葛修润, 李焯芬. 脆塑性岩体的分析原理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(1): 9–22.
- [6] 张慧梅, 夏浩峻, 杨更社, 等. 冻融循环和围压对岩石物理力学性质影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 441–448.
- [7] 朱泽奇, 盛谦, 张占荣. 脆性岩石侧向变形特征及损伤机理研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2137–2143.
- [8] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1999–2009.
- [9] 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.
- [10] 高保彬, 李回贵, 刘云鹏, 等. 单轴压缩下煤岩声发射及分形特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 986–991.
- [11] 苏承东, 翟新献, 李永明, 等. 煤样三轴压缩下变形和强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2963–2968.
- [12] 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.
- [13] LIU X, ZHAO X, LIU J. A study on the acoustic emission characteristics of the coal rock on different bedding direction[J]. Computer Modelling & New Technologies, 2014, 18(5): 308–313.
- [14] 孔海陵, 王路珍. 围压效应下煤岩强度及破坏特征的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2013, 44(7): 38–40.
- [15] 李建乐, 郑参, 颜港, 等. 不同加载条件下的煤岩体压缩试验模拟研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(1): 17–20.
- [16] 腾俊洋, 唐建新, 王进博, 等. 层状复合岩体损伤演化规律及分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3263–3278.
- [17] 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.
- [18] 芮勇勤, 唐春安. 岩石剪切破坏过程的 RFPA<sup>2D</sup>数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 364–368.
- [19] 纪多辙, 石祥峰. 横观各向同性圆柱土样轴对称 Biot 固结的解析解[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 765–769.
- [20] 朱万成, 林天革, 唐春安, 等. 混凝土拉伸断裂过程及尺寸效应的数值模拟[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 147–151.
- [21] 唐春安, 唐烈先, 李连崇, 等. 岩土破裂过程分析 RFPA 离心加载法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 71–76.
- [22] 宿辉, 李长洪. 不同围压条件下花岗岩压缩破坏声发射特征细观数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(11): 1312–1318.
- [23] 梁正召, 唐春安, 李厚祥, 等. 单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 57–62.
- [24] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 150–153.
- [25] 张流, 王绳祖, 施良骥. 我国六种岩石在高围压下的强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1985, 4(1): 10–19.
- [26] 刘泉声, 刘恺德, 朱杰兵, 等. 高应力下原煤三轴压缩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 24–34.
- [27] 范铁刚, 张广清, 丁云宏, 等. 中阶煤有效弹性力学性质研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 204–210.
- [28] 陈忠辉, 傅宇方, 唐春安. 岩石破裂声发射过程的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(1): 66–71.