

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.102



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于声发射的致密砂岩细观破裂模拟研究

李皋, 吴雪锋, 杨旭, 冯佳歆, 李红涛

(西南石油大学 石油与天然气工程学院; 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

摘要:为了揭示三轴压缩下砂岩的细观破裂规律,以砂岩室内三轴压缩试验为基础,结合非均质晶质模型(grain-based model, GBM)和矩张量理论模拟砂岩内部裂纹衍生、声发射事件及破裂强度发展特征,推导砂岩内微裂纹衍生过程、声发射响应特征规律,从细观尺度上综合分析裂纹以及声发射事件的时空演化过程。结果表明:在三轴压缩下,砂岩起裂阶段微裂纹在试样内部随机分布,位移场呈水平层状分布;随着载荷的增加,微裂纹增多,并逐渐贯通成两条宏观裂纹,位移场偏移且非均质性明显;裂纹在孕育期发展缓慢,当达到发展期时,裂纹以极高的非线性速率增长,其发展顺序为晶间拉伸裂纹、晶间剪切裂纹、晶内拉伸裂纹、晶内剪切裂纹;试样内部拉伸裂纹占比达 83.2%,以拉伸破坏为主;试样声发射事件数与裂纹条数呈负指数关系,单次声发射事件产生一条微裂纹次数占比为 75.60%,声发射事件数、微裂纹数与破裂强度近似呈正态分布。

关键词:致密砂岩; 细观非均质; 离散元模拟; 裂纹扩展; 矩张量; 声发射

中图分类号:TU458 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)05-0125-10

Mesoscopic fracture simulation of dense sandstone based on acoustic emission

LI Gao, WU Xuefeng, YANG Xu, FENG Jiaxin, LI Hongtao

(School of Petroleum and Natural Gas Engineering; State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China)

Abstract: This paper aims to investigate the mesoscopic fracture mechanisms of sandstone under triaxial compression. We conducted triaxial compression tests of sandstone and integrated the Grain-Based Model (GBM) and moment tensor theory to simulate the development characteristics of internal cracks, acoustic emission events, and fracture strength in sandstone. The derivation process of microcracks and the characteristics of acoustic emission response in sandstone are derived, and the spatiotemporal evolution process of cracks and acoustic emission events at the micro scale is comprehensively analyzed. The results indicate that microcracks are randomly distributed in the sandstone sample during the initiation stage of fracture under triaxial compression, and the displacement field shows a horizontally layered distribution. As the loading increases, the number of microcracks increases, penetrates gradually into two macroscopic cracks, and shifts the displacement field to a significant heterogeneity pattern. The cracks in the incubation period show slow development, and

收稿日期:2023-04-08

基金项目:国家自然科学基金(61731016);四川省自然科学基金(2023NSFSC0929)

作者简介:李皋(1976-)男,博士,研究员,主要从事地质工程一体化、欠平衡钻井研究,E-mail:swpuligao@qq.com。

Received: 2023-04-08

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 61731016); Natural Science Foundation of Sichuan Province of China (No.2023NSFSC0929)

Author brief: LI Gao (1976 -), PhD, researcher, main research interests: integration of geological engineering and underbalanced drilling, E-mail: swpuligao@qq.com.

cracks grow at extremely high nonlinear rates. The order of crack development follows a sequence of intergranular tensile cracks, intergranular shear cracks, intragranular tensile cracks, and intragranular shear cracks. The simulation analysis revealed that the majority of internal cracks triaxial compression (83.2%) are tensile cracks resulting from tensile failure. The number of acoustic emission events in the samples has a negative exponential correlation with the number of cracks, and a single acoustic emission event generates 75.60% of microcracks. Finally, the analysis of acoustic emission events, the number of microcracks, and the fracture strength indicates that the three factors approximately follow a normal distribution.

Keywords: tight sandstone; meso heterogeneity; discrete element simulation; crack propagation; moment tensor; acoustic emission

砂岩作为一种具有明显非均质性的沉积岩,受到不同荷载作用时会表现出不同的力学响应特征,内部也会产生微破裂,并伴随着瞬态弹性波的释放^[1-2]。在砂岩压缩试验中,常采用声发射对砂岩的渐近性破坏过程进行实时监测。然而,现有研究表明^[3-5],室内声发射监测难以直接观测到岩石内部裂纹的衍生规律,且实际岩心具有唯一性,不可重复多次试验。结合数值仿真技术对砂岩三轴压缩模拟进行研究,推导出砂岩内微裂纹衍生过程、声发射响应特征规律,从而从细观尺度上揭示砂岩三轴压缩破裂机制。

已有大量学者采用室内试验和数值仿真技术开展了岩石在压缩试验中的裂纹发育及声发射响应规律研究。邵国勇等^[6]论述了CT扫描技术在微裂缝识别方面的进展,研究岩石内部发育微裂缝扩展规律。王相龙等^[7]结合扫描电镜、微米CT扫描和数字图像处理技术对煤岩中的裂隙发育特征、分布规律进行研究,探讨了裂隙对渗透性的影响规律。周喻等^[8]结合矩张量理论,探讨了岩石裂纹发展贯通与声发射参数的时空关系,从而揭示了岩石的破裂机制。Qin 等^[9]采用颗粒流数值仿真软件,研究砾石试样在压缩过程中力链分布、破裂规律和声发射能量特征,从细观上揭示宏观变形机制。单军杰等^[10]利用离散元数值模拟分析颗粒破碎与颗粒不破碎对高填方变形和稳定性的影响,模拟了高填方的变形演化过程。Liu 等^[11]采用颗粒流程序构建数值模型,研究不同煤岩高度比的力学特征和声发射特性。Castro-Filgueira 等^[12]结合裂隙和完整花岗岩三轴测试,采用三维颗粒流模型再现裂纹的扩张趋势。周军华等^[13]结合声发射分析了具有不同裂隙形态的岩石在压缩过程中的损伤演化规律及裂纹扩展特征。段宇等^[14]基于矩张量理论并采用颗粒流数值模型分析了不同方解石含量对岩石能量损耗、声发射频率和破裂强度的关系。Haeri 等^[15]采用PFC2D 颗粒流软件,将模拟结果与试验结果对比,研究法向载荷对不同角度裂纹产生形态的影响。

周喻等^[16]结合矩张量理论,研究煤岩在破坏过程中的强度特征、破坏模式及裂纹分布随层理倾角变化的变化规律。Chang 等^[17]采用 PFC3D 模拟软件,研究含裂纹脆性材料的宏观力学行为和裂纹扩展过程,探讨细观参数对破坏形式的影响。赵奎等^[18]基于 PFC2D 软件建立 GBM 模型,研究了不同粒径对花岗岩声发射相对平静期的影响。Huang 等^[19]通过对预制裂隙岩石强度及破坏行为的研究,加深了对岩石破裂机制的认识,探讨了裂隙岩石裂纹特征和内部应力演化规律。Cheng 等^[20]基于室内试验和矩张量理论,研究了人工矿柱断裂时微裂纹演化过程和机理。但是,上述研究中室内试验主要通过 CT 扫描技术对岩石进行扫描来识别裂隙发育特征,难以实时观测到岩石破坏过程中裂纹的发育规律。而对数值模拟压缩试验中岩石声发射响应及规律的研究均较少,且缺乏声发射事件与裂纹空间、破裂强度的关联研究,将砂岩的声发射规律与岩石破裂相结合的研究较少。

笔者以室内三轴压缩试验为基础,利用颗粒流仿真软件建立致密砂岩细观非均质 GBM 模型,数值压缩模拟直接观测裂纹发育规律及定量描述裂纹发育数量,并结合矩张量理论对三轴压缩下的砂岩开展声发射模拟研究,从细观尺度上分析砂岩应力-应变、声发射事件、裂纹衍生和破裂强度相互之间的内在联系,进而分析砂岩在三轴压缩过程中的细观破裂规律。

1 室内三轴试验及声发射监测

以须家河组露头砂岩为研究对象,将现场取的露头砂岩岩块切割打磨后加工成直径为 25 mm、高为 50 mm 的标准圆柱形试件。

1.1 试验设备

试验设备为西南石油大学自制的岩石三轴测试系统,如图 1 所示,该设备最大轴向压力为 60 kN、最大围压为 80 MPa、实验控制精度为:压力 0.01 MPa、变形 0.001 mm。声发射接收仪器为普源精电公司

DS1000E型声发射监测系统。根据岩样的波速采集规范,在岩样两端涂抹耦合剂,使发射和接收换能器分别紧贴岩样两端,记录岩样声波的变化规律。

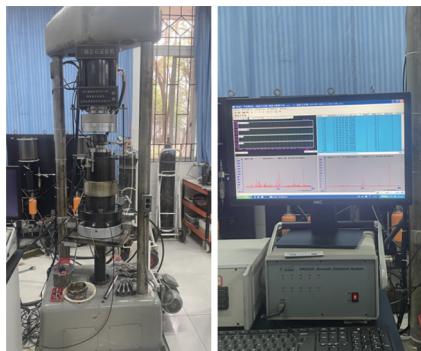


图1 三轴力学试验机和声波测试系统

Fig. 1 Triaxial mechanical testing machine and acoustic testing system

1.2 试验结果

采用恒定应变速率加载方式对标准圆柱形试件进行三轴压缩试验,得到30 MPa围压下应力-应变曲线(图2),可以为GBM模型的参数标定提供依据,同时可为分析岩石破裂过程中的声发射特征提供相应参考。

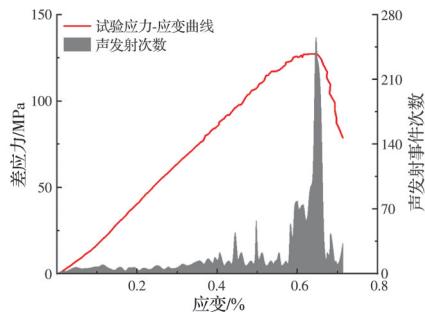


图2 应力-应变曲线和声发射示意图

Fig. 2 Stress-strain curve and acoustic emission diagram

2 致密砂岩细观非均质模型的构建

砂岩内部的矿物种类、颗粒大小、排列方式及黏结方式等因素共同决定砂岩的材料特性。基于泰森多边形镶嵌方法(voronoi tessellations method, VTM)对生成的矿物颗粒进行泰森多边形划分,并对各区域进行不同的细观参数标定,最终形成GBM模型。自从该模型提出以来,大量学者证明了该模型能很好地表征岩石的压拉比以及微观裂纹的时空演化特征。

2.1 GBM模型构建及参数设置

以须家河组致密砂岩为研究对象,通过对砂岩试样进行XRD定量分析得到砂岩试样中各种矿物所占比例:斜长石52.6%,石英16.6%,钾长石15.9%,黏土总量14.9%。GBM模型也是基于得

到的砂岩矿物组分含量(图3)进行的相关参数标定。

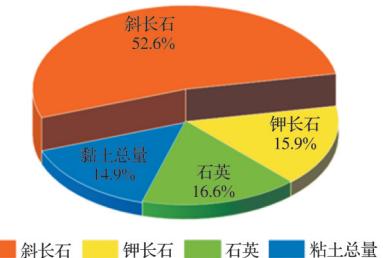


图3 砂岩矿物组分图

Fig. 3 Mineral composition diagram of sandstone

GBM(grain-based model)模型构建方法:1)根据矿物种类和矿物大小生成泰森多边形种子;2)根据种子生成泰森多边形作为矿物晶体边界;3)在PFC中生成颗粒集合,并根据生成的矿物边界进行分组;4)根据标定情况对晶内接触以及晶间接触分别赋予相应参数的接触。模型生成步骤如图4所示。

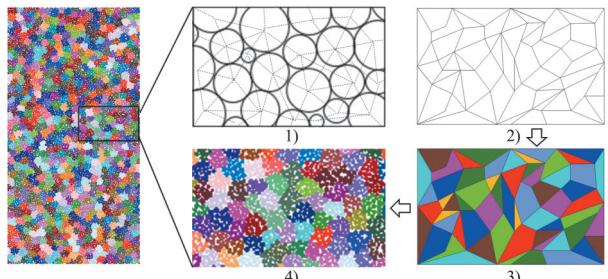


图4 模型生成步骤图

Fig. 4 Model generation step diagram

在最初提出的GBM模型中^[21],晶体内接触为平行黏结模型,晶间接触模型为光滑节理模型。如图5所示,光滑节理模型的破坏路径沿光滑平面,而实际矿物晶间是不光滑面。根据表1中对GBM黏结模型的对比,晶内、晶间接触模型都选用更符合岩石特性的平行黏结模型。

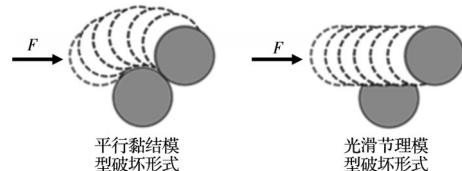


图5 平行黏结模型和光滑节理模型胶结破坏图

Fig. 5 Bond failure diagram of parallel bond model and smooth joint model

为尽可能考虑岩石的非均质性,GBM模型中不同矿物之间的接触参数设置也不相同。一般通过统一的折减公式考虑晶间接触两边矿物的性质,笔者采用式(1)对晶间接触进行设置^[22]。

表 1 GBM 黏结模型对比表

Table 1 Comparison of GBM bonding models

模型	特性
平行黏结模型	弹性相互作用; 绕颗粒运动; 平行键可以在接触块之间传递力和力矩
光滑节理模型	线弹性相互作用; 光滑平面运动; 黏结或摩擦界面具有膨胀行为

$$x = x_{\text{coe}} \times \left(\sum_{i=1}^{n_1} x_{Ai}^* + \sum_{i=1}^{n_2} x_{Bi}^* \right) / (n_1 + n_2) \quad (1)$$

式中: x 为晶间平行黏结接触中的某个细观参数 (σ_i 、 c 、 φ 、 μ 、 emod 、 pb_emod); x_{coe} 为参数 x 的取值系数; n_1 为该接触一端的颗粒 A 的总接触数量; n_2 为该接触另一端的颗粒 B 的总接触数量; $\sum_{i=1}^{n_1} x_{Ai}^*$ 为颗粒 A 的接触中参数 x 取值的总和; $\sum_{i=1}^{n_2} x_{Bi}^*$ 为颗粒 B

表 2 非均质数值模型细观参数表

Table 2 Mesoscopic parameters of heterogeneous numerical model

矿物	含 量/%	$R_{\min}/$ mm	$R_{\min}/$ R_{\max}	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$E^*/$ GPa	k^*	μ	$\overline{E}^*/$ GPa	\overline{k}^*	$\bar{c}/$ MPa	$\bar{\sigma}_e/$ MPa	$\overline{\Phi}/(^{\circ})$	$\overline{E}_{\text{coe}}^*$	μ_{coe}	\bar{c}_{coe}	$\bar{\sigma}_{\text{coe}}$	$\overline{\Phi}_{\text{coe}}$
斜长石	52.6	0.1	1.6	2 720	28	1.6	0.6	28	1.6	91	91	34					
钾长石	15.9	0.1	1.6	2 660	24	1.5	0.6	24	1.5	82	82	33					
石英	16.6	0.1	1.6	2 650	18	1.6	0.6	18	1.6	65	65	36			0.4	1.0	0.5
黏土	14.9	0.1	1.6	1 300	10	1.3	0.6	10	1.3	48	48	36					0.3
																	1.0

2.2 GBM 模型模拟结果

如图 6 所示, 通过对比室内试验得到的砂岩应力-应变曲线和模拟得到的应力-应变曲线可以发现, 应力-应变曲线和声发射事件曲线重合度较高, 表明构建的 GBM 模型符合真实砂岩的宏观力学特征, 也能够开展砂岩在双轴压缩下的声发射特性数值模拟研究。但在加载初期的压密阶段, 模拟拟合程度有些许误差, 这是由于实际岩石首先要经历微观裂隙压密阶段, 岩石在此阶段也会发生声发射事件。在应力-应变曲线的初始阶段为非线性发展, 但在 PFC 中岩石是 ball-ball 集合体, 内部不存在天然

的接触中参数 x 取值的总和。

由于离散元数值模拟所需的细观参数不能通过室内试验直接获取, 故采用“试错法”来获取力学参数。为更好地体现致密砂岩特征, 将模型中的孔隙度设置为 0.08, GBM 模型的标定分为晶内以及晶间接触参数的标定, 标定过程较复杂。首先依据“试错法”对 4 种矿物依次进行标定, 接着根据晶间参数折减公式进行晶间参数标定。参考 4 种组分的宏观强度关系^[23-24], 细观参数调试中将 4 种组分强度顺序确定为: 斜长石 > 钾长石 > 石英 > 黏土, 即力学参数由斜长石、钾长石、石英、黏土依次递减调试, 对于误差较大的力学参数, 针对性调节影响该宏观力学特征的细观参数。标定的 GBM 数值模型细观参数如表 2 所示。

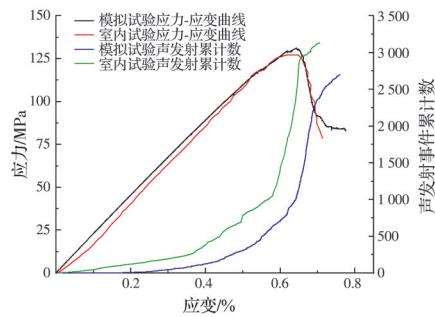


图 6 室内试验与模拟试验对比图

Fig. 6 Stress-strain curves fitting diagram for indoor and simulated tests

裂隙, 应力-应变曲线为线性发展, 此阶段没有声发射事件发生。

3 砂岩变形过程及声发射模拟分析

3.1 砂岩变形特征及裂纹扩展

综合图 7 应力-应变曲线各个阶段和图 8 不同阶段裂纹及位移场演化规律可知, 结合微裂纹增长速率和砂岩应力-应变曲线各个阶段, 将砂岩变形破坏过程划分为 5 个阶段。其裂纹和随轴向应力加载有如下特征:

1) 无裂纹阶段 OA 段: 刚开始加载, 试样处于压密阶段, 试样内部微裂隙缓慢闭合, 还未达到满足

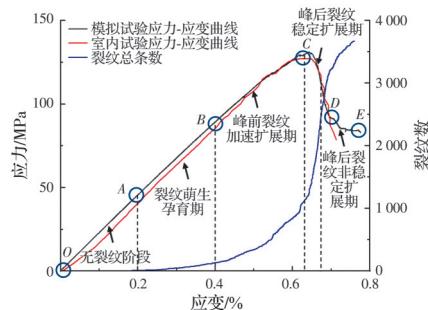


图 7 应力-应变曲线阶段划分

Fig. 7 Stage division of stress-strain curves

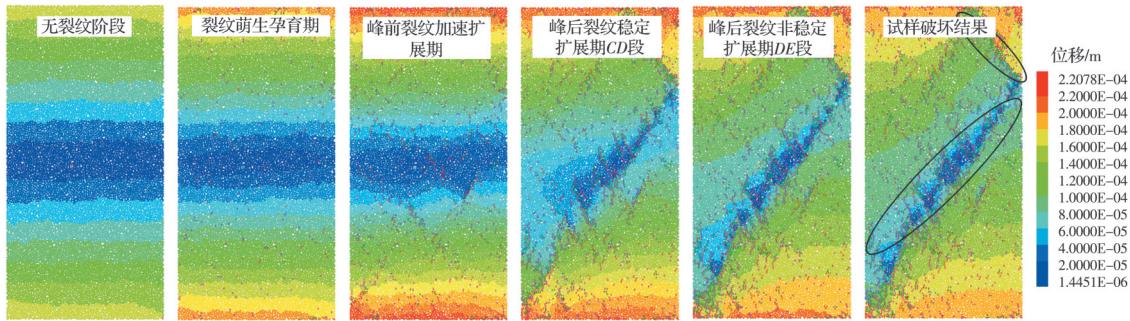


图8 砂岩的裂纹扩展及位移场演化特征

Fig. 8 Characteristics of crack propagation and displacement field evolution in sandstone

产生裂纹的应力阈值,没有裂纹产生,应力-应变曲线呈线性上升。

2)裂纹萌生孕育期AB段:随着轴向载荷持续增大,当超过产生裂纹的应力阈值时,晶间接触被破坏,应力-应变曲线呈线性关系。微裂纹在试样内随机分布,位移场呈水平层状对称分布,微裂纹主要散布在高位移变形区域,两端裂纹大致保持对称关系。随着高位移变形区域面积的逐渐增大,微裂纹逐渐向中部扩展。

3)峰前裂纹加速扩展期BC段:裂纹进入加速扩展期,载荷继续增大,微裂纹数量明显增加,呈现出非线性增加趋势,增长速率变大,试样内的微裂纹继续随机增长,试样中部的低位移区进一步变小,进而呈现非对称性。微裂纹逐渐集中,汇聚出两条明显的剪切带,其中第1条由左下端向中部右区域延展,第2条由左上端向中部右区域延展,第2条剪切带明显短于第1条。

4)峰后裂纹稳定扩展期CD段:当达到增长曲线拐点D点时,试样内部的接触强度达到极限,薄弱面增多,试样的整体强度降低,微裂纹数量急剧增加且裂纹扩展剧烈。同时,裂纹贯通和剪切特征明显,进一步汇聚成两条宏观破裂带,裂纹数的增长幅远大于应力-应变曲线的变化幅度。试样中部低位移区继续减小,逐渐沿右上方偏转,在宏观破裂带两侧表现出明显的非均质性。

5)峰后裂纹非稳定扩展期DE段:宏观裂纹贯通至试样边缘,整体被破坏。围压设置为30 MPa,颗粒间的接触力较强,导致峰后裂纹增长速率下降,试样的低位移区偏转,非均质性和剪切特征明显。

根据接触破裂后微裂纹位置(晶体内部或晶体边界)以及微观破裂机制(剪切或拉伸破坏),将岩石破裂过程中产生的裂纹分为4类:晶间拉伸裂纹、晶间剪切裂纹、晶内拉伸裂纹、晶内剪切裂纹,如图9所示。这4种裂纹的产生顺序依次为晶间拉伸裂纹、晶间剪切裂纹、晶内拉伸裂纹、晶内剪切裂纹。现根据砂岩的应力-应变阶段对4种裂纹的增长趋

势进行说明。

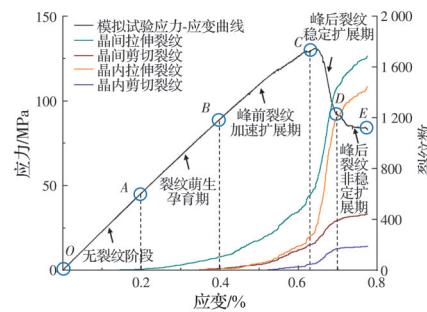


图9 应力-应变曲线与4种微裂纹衍生规律图

Fig. 9 Stress-strain curves and four types of microcrack derivation patterns

无裂纹阶段OA段:未达到产生裂纹的应力阈值时,砂岩内部没有裂纹产生。

裂纹萌生孕育期AB段:当加载到应力阈值时,晶体间容易发生相对滑动,晶内相对较稳定,所以砂岩内部最先产生晶间拉伸裂纹。随着轴向应力的不断加载,晶体内拉应力也会随之增大,随后伴随着少量的晶内拉伸裂纹。

峰前裂纹加速扩展期BC段:晶间拉伸裂纹、晶间剪切裂纹持续发育,晶内拉伸裂纹、晶内剪切裂纹相继开始出现。晶间拉伸裂纹的增长速率比晶间剪切裂纹大,这是因为拉伸破坏的强度小于剪切破坏强度,所以二者均呈非线性正增长趋势。

峰后裂纹非稳定扩展期CD段:在到达峰值应力C点时,4种裂纹增长速率加剧,此时裂纹发展出现不稳定状态,特别是晶间拉伸裂纹、晶内拉伸裂纹增长速度明显超过稳定扩展阶段,且晶内拉伸裂纹增长速度超过晶间拉伸裂纹增长速度,晶间相对滑动和晶内相对滑动同时进行,晶内拉伸破坏会加剧矿物晶体内部滑动,带动晶内剪切裂纹产生。

峰后裂纹非稳定扩展期DE段:试样产生了宏观裂纹,重新达到平衡状态,4种微裂纹产生速率均下降,均保持相对平缓的速率继续增长。

此外,在颗粒流数值模型中,微裂纹的形成是由颗粒之间的接触断裂造成的,因而微裂纹的几何

特征能反映试样的破坏机制。

裂纹在模型内的演化特征差异本质上是模型内不同种类矿物晶体力学属性差异造成的。基于 XRD 试验,确定砂岩内矿物比例,其中黏土矿物含量 14.9%,而黏土矿物属于弱矿物,在外部载荷下,弱矿物本身由于力学属性较弱,发生晶内错动,其晶体内部更易产生裂纹。图 10 为三轴压缩过程中砂岩内部 4 种微裂纹占比的分布统计,从图 10 可知,拉伸裂纹占比为 83.2%,剪切裂纹占比为 16.8%。表明砂岩内部主要以拉伸破坏为主,这是由于抵抗拉伸破坏的强度小于抵抗剪切破坏的强度。其次晶间裂纹占比为 56.5%,晶内裂纹占比为 43.5%,因为晶间结构弱于晶内结构,但这两类裂纹占比差不多,晶间和晶内滑动是相辅相成的,晶间破坏会加剧晶内滑动,带动产生晶内裂纹。

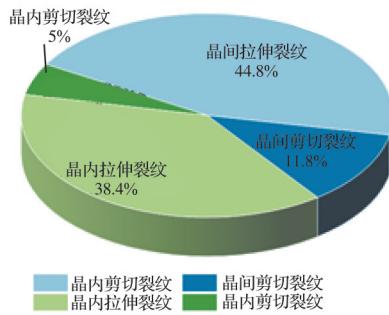


图 10 4 种微裂纹占比分布统计图

Fig. 10 Statistical diagram of the percentage distribution of four types of microcracks

3.2 基于矩张量的声发射模拟依据

采用颗粒流数值模拟不仅能直接观察到砂岩内部的裂纹扩展情况,还能基于矩张量理论开展声发射模拟,进行岩石破裂内在机制及破坏特征的研究^[25-27]。

在颗粒流软件模拟试样加载过程中,采用矩张量理论构建声发射模拟方法^[28-29]。矩张量的获取方式采用动能进行计算,即根据裂纹产生时受影响颗粒受到的力及位移计算动能,最终合成矩张量。

图 11 为一次张拉微裂纹的声发射事件^[8],基于矩张量的声发射模拟,先假设开始接触的颗粒为源颗粒,以微破裂中心为圆心,最大颗粒直径为半径,

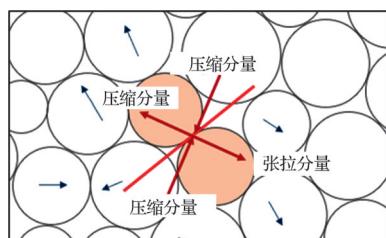


图 11 一次张拉裂纹声发射事件

Fig. 11 An acoustic emission event of a tension crack

在受力加载、变形过程中,颗粒间的黏结接触可能被破坏,该区域被视作微破裂区域。最后将颗粒源上接触力产生的变化量乘以对应的力臂(接触点位置与微裂纹中心距离)并求和,得到矩张量的分量,由此得到试样加载过程中的声发射事件数,其表达式为^[30-31]

$$M_{ij} = \sum_s (\Delta F_i R_j) \quad (2)$$

式中: ΔF_i 为接触力变化量的第 i 个分量; R_j 为接触力与微裂纹中心距离的第 j 个分量。

模型中颗粒粒径相差不大,若将一次破裂看作一次声发射事件,则每次破裂强度和释放能量差异性相似,与室内声发射试验现象显著不符。通过计算一次声发射事件产生的全部裂纹的中心位置来确定该声发射事件的空间位置,其强度则是该事件的强度;如果声发射事件产生多条裂纹,多条裂纹所形成的区域中心就是该次声发射事件的几何空间位置,区域内所有声发射强度总和为该次声发射事件强度,应将同一空间、时间范围内的声发射事件看作同一事件。

3.3 声发射模拟结果分析

按照基于矩张量的声发射模拟依据,结合 30 MPa 围压下砂岩的应力-应变曲线,将声发射演化分为 4 个时期,如图 12 所示,砂岩试样的声发射演化在 4 个时期具有以下特征:

1) 平静期:在加载初期,由于数值模拟中砂岩试样是由具有黏结强度的颗粒组成的理想模型,载荷并未达到破坏时的强度,因此模拟试验中并未检测出声发射事件。但在砂岩的三轴压缩室内试验中,由于在此时期其内部孔隙被逐渐压实,所以也会检测出声发射事件。

2) 发展期:随着轴向载荷的增加,当试件内的黏结强度被破坏时,晶间开始发生滑动,微裂纹以

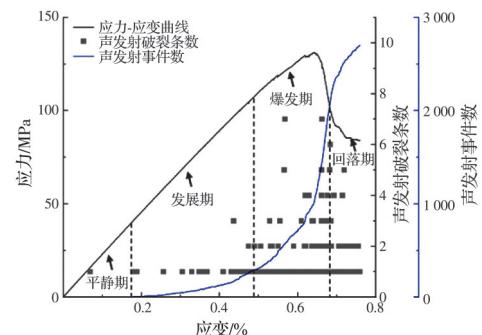


图 12 三轴压缩下砂岩的声发射事件演化

Fig. 12 Acoustic emission event evolution of sandstone under triaxial compression

拉伸裂纹为主,主要集中在晶质体边缘,试样内部损伤增加,积聚形成裂纹核及其宏观裂纹发育方向,开始产生少量的声发射事件。基本上表现为一次声发射事件只产生一条微裂纹,所以砂岩的总体声发射响应不够强烈,试样内部逐渐被破坏,并为声发射“爆发期”蓄力。

3)爆发期:声发射事件急剧增加,试件整体黏结强度变弱,微裂纹沿裂纹核四周扩散,晶间和晶内裂纹快速增加,试样内的细观损伤程度继续增加,裂纹逐渐形成宏观的裂隙带,并开始积聚出现第2条宏观裂隙,同时产生高振幅和能量大的声发射事件。其中一次声发射事件产生多条微裂纹,逐渐形成宏观裂纹。

4)回落期:试件被破坏,产生了宏观裂纹,由于

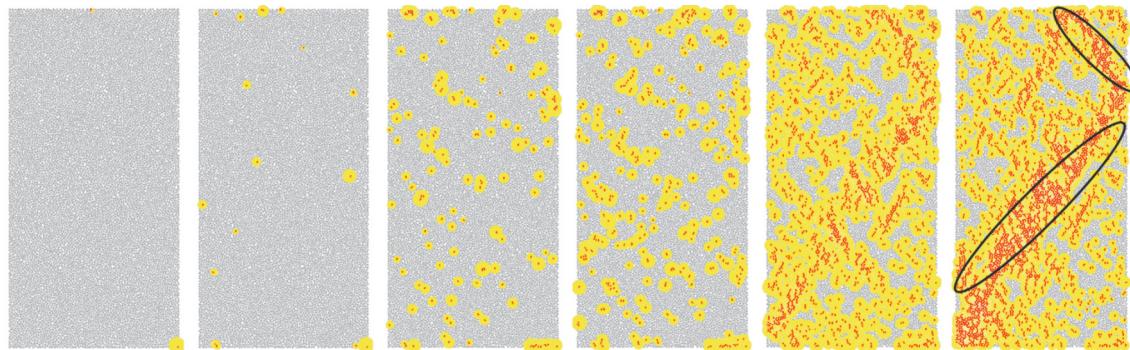


图13 砂岩内部裂纹扩展与声发射事件空间分布对比

Fig. 13 Comparison of spatial distribution of internal crack propagation and acoustic emission events in sandstone

图14为声发射事件次数与微破裂条数的关系,在所有声发射事件中,一次声发射事件产生一条微裂纹的次数为2 042,占声发射事件总数的75.60%,试样以一次破裂数对应一次声发射事件为主。随着载荷的增大,试样内部微裂纹越来越多,声发射次数降低,包含5条及以上微破裂的声发射次数仅为25次,占声发射事件总数的0.93%。主要原因是,为了方便计算,将同一区域产生的裂纹声发射事件视为同一声发射事件,声发射事件数与破裂条数呈负指数关系。

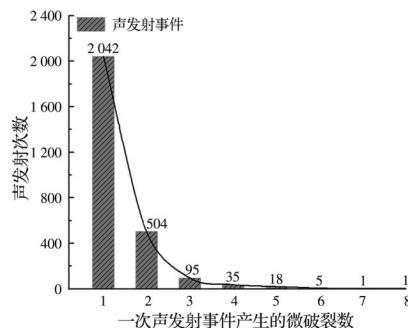


图14 声发射次数与微破裂数的关系

Fig. 14 Relationship between the number of acoustic emissions and the number of micro fractures

试样内部结构被破坏,晶内裂纹逐渐增多,沿两条裂纹核尖端方向迅速发展成宏观破坏裂隙,裂纹发育增长速率仍然较高。由于存在围压,试样保持一定强度,声发射事件依然继续发生,但相较于爆发期,次数开始明显降低。

图13是三轴压缩下砂岩内部裂纹扩展与声发射事件的空间分布对比。从图13可看出,声发射事件主要集中在微裂纹附近,微裂纹越集中,声发射事件也越集中,并且声发射事件分布云图的最终形态与砂岩的宏观裂纹形态保持一致。室内试验和模拟结果的声发射规律基本相符,声发射事件与裂纹衍生符合正相关关系,这也再次表明能够基于声发射次数来判断岩石的破坏程度。

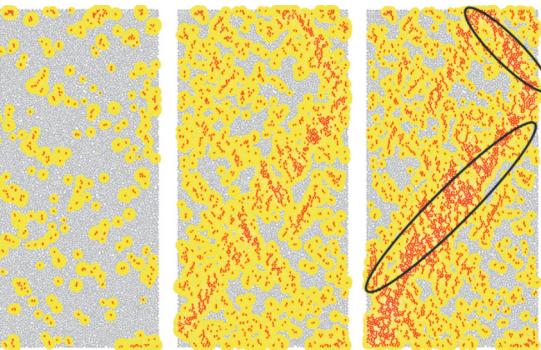


图15 微破裂次数、声发射事件数与破裂强度的关系

图15为微破裂次数、声发射事件数与破裂强度的关系,试样声发射事件的最大破裂强度为-3.0,最小破裂强度为-5.8,破裂强度在-5.0~-3.9之间的破裂数和声发射数最多。破裂数和声发射数分别占比为75.53%、65.63%,当破裂强度处于-5.8~-5.5和-3.4~-3.0的最小和最大区间时,破裂数和声发射数都较少。破裂数和声发射数均随着破裂强度的增加而增加,整体近似呈正态分布。

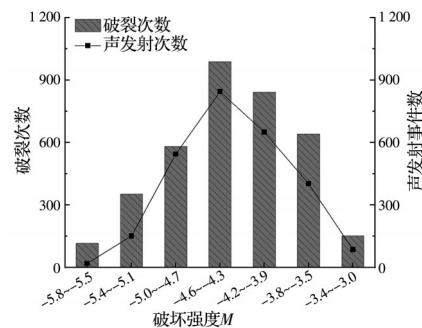


图15 微破裂次数、声发射事件数与破裂强度的关系

Fig. 15 Relationship between the number of micro fractures, acoustic emission events, and fracture strength

4 结论

1) 在双轴压缩砂岩的起裂阶段,微裂纹在试样内部随机分布,位移场呈水平层状分布,随着载荷的增大,微裂纹呈非线性增加。微裂纹积聚成核并沿核四周快速扩散发展,逐渐演化成两条宏观裂隙带,形成交错且互相贯通的裂纹网络。中部低位移场区域减小,位移场沿右上方45°方向偏转,试样的非均质性和剪切特征明显。

2) 根据微裂纹位置和微观破裂机制,将岩石破裂过程中产生的裂纹分为4类,其发育顺序为:晶间拉伸裂纹、晶间剪切裂纹、晶内拉伸裂纹、晶内剪切裂纹。在峰后裂纹稳定扩展期,4种裂纹增长速率最大,在裂纹孕育期和加速扩展期,试样破坏以晶间裂纹为主,在裂纹非稳定扩展期,试样内部结构被破坏,整体强度减小。晶间破坏带动晶内滑动,产生大量晶内裂纹,在30 MPa围压下砂岩试样内部拉伸裂纹占比为83.2%。

3) 声发射事件空间分布主要集中在宏观裂纹周边,与微裂纹位置呈对应关系。在发展期,试样内部黏结未被破坏,声发射事件数较少。在爆发期和回落期,试件内部结构被破坏,导致声发射事件数最多。由于存在围压,试样仍保持有一定强度,回落期声发射事件数的增速依旧很快。声发射事件次数与微裂破裂呈负指数关系,声发射事件只产生一次破裂占比为75.6%,声发射事件数、裂纹数与破裂强度近似呈正态分布关系。

参考文献

- [1] 张敏超, 刘新荣, 王鹏, 等. 不同含石量下泥岩土石混合体剪切特性及细观破坏机制[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 17-26.
ZHANG M C, LIU X R, WANG P, et al. Shear properties and failure meso-mechanism of soil-rock mixture composed of mudstone under different rock block proportions [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 17-26. (in Chinese)
- [2] 张毅, 李皋, 王希勇, 等. 川西须家河组致密砂岩高温后微组构特征及对力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2249-2259.
ZHANG Y, LI G, WANG X Y, et al. Microfabric characteristics of tight sandstone of Xujiahe formation in western Sichuan after high temperature and the effect on mechanical properties [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2249-2259. (in Chinese)
- [3] 董志凯, 李浩然, 欧阳作林, 等. 单轴荷载下大理岩声发射时空演化特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊2): 609-615.
DONG Z K, LI H R, OUYANG Z L, et al. Research on temporal and spatial evolution characteristics of acoustic emission in marble under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Sup 2): 609-615. (in Chinese)
- [4] WANG Y Q, PENG K, SHANG X Y, et al. Experimental and numerical simulation study of crack coalescence modes and microcrack propagation law of fissured sandstone under uniaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 115: 103060.
- [5] WANG Y L, XU J M. Particle flow analysis of acoustic emission features of rock under rock burst stress path [J]. Geofluids, 2022, 2022: 1-17.
- [6] 邵国勇, 熊伟, 沈瑞, 等. CT扫描技术在页岩油气储层微观结构表征中的应用进展[J]. 应用化工, 2023, 52(6): 1785-1789, 1799.
SHAO G Y, XIONG W, SHEN R, et al. Application progress of CT scanning technology in characterization of shale oil and gas reservoir microstructure [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(6): 1785-1789, 1799. (in Chinese)
- [7] 王相龙, 潘结南, 王凯, 等. 微米CT扫描尺度下构造煤微裂隙结构特征及其对渗透性的控制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1325-1334.
WANG X L, PAN J N, WANG K, et al. Characteristics of micro-CT scale pore-fracture of tectonic ally deformed coal and their controlling effect on permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1325-1334. (in Chinese)
- [8] 周喻, 吴顺川, 许学良, 等. 岩石破裂过程中声发射特性的颗粒流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 951-959.
ZHOU Y, WU S C, XU X L, et al. Particle flow analysis of acoustic emission characteristics during rock failure process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 951-959. (in Chinese)
- [9] QIN T, GUO X, HUANG Y L, et al. Study on macro-meso deformation law and acoustic emission characteristics of granular gangue under different loading rates [J]. Minerals, 2022, 12(11): 1422.
- [10] 单军杰, 刘汉龙, 肖杨, 等. 考虑颗粒破碎特性的机场高填方变形与稳定性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 17-22.
SHAN J J, LIU H L, XIAO Y, et al. Deformation and stability analysis of airport high coarse-granular fills considering particle breakage characteristics [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 17-22. (in Chinese)
- [11] LIU W R, YUAN W, YAN Y T, et al. Analysis of acoustic emission characteristics and damage constitutive

- model of coal-rock combined body based on particle flow code [J]. Symmetry, 2019, 11(8): 1040.
- [12] CASTRO-FILGUEIRA U, ALEJANO L R, IVARS D M. Particle flow code simulation of intact and fissured granitic rock samples [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(5): 960-974.
- [13] 周军华,杨坤,房凯,等.裂隙对含孔洞砂岩力学及损伤演化特征的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(4): 968-975.
ZHOU J H, YANG K, FANG K, et al. Effect of fissure on mechanical and damage evolution characteristics of sandstone containing hole defect [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50 (4): 968-975. (in Chinese)
- [14] 段宇,徐国宾.不同方解石含量微生物胶结砂体细观损伤研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(11): 1155-1162.
DUAN Y, XU G B. Study of mesodamage characteristics of microbial cemented sand with different calcite contents [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(11): 1155-1162. (in Chinese)
- [15] HAERI H, SARFARAHI V, ZHU Z M. Effect of normal load on the crack propagation from pre-existing joints using Particle Flow Code (PFC) [J]. Computers and Concrete, 2017, 19(1): 99-110.
- [16] 周喻,李程,王文林,等.单轴压缩条件下含层理煤岩力学特性的细观研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10): 4036-4047.
ZHOU Y, LI C, WANG W L, et al. A meso-level study on mechanical properties of bedding coal under uniaxial compression [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(10): 4036-4047. (in Chinese)
- [17] CHANG S L, WANG Z Q, CONG Y. Macroscopic mechanical properties of brittle materials with a 3D internal crack based on particle flow simulations [J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4563.
- [18] 赵奎,刘永光,曾鹏,等.基于颗粒流GBM模型的花岗岩声发射相对平静期特征研究[J].金属矿山,2021(9): 27-36.
ZHAO K, LIU Y G, ZENG P, et al. Study on the acoustic emission characteristics of granite in relative calm period based on GBM model of particle flow code [J]. Metal Mine, 2021(9): 27-36. (in Chinese)
- [19] HUANG Y H, YANG S Q, TIAN W L, et al. Experimental and DEM study on failure behavior and stress distribution of flawed sandstone specimens under uniaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 118: 103266.
- [20] CHENG A P, SHU P F, DENG D Q, et al. Microscopic acoustic emission simulation and fracture mecha-nism of cemented tailings backfill based on moment tensor theory [J]. Construction and Building Materials, 2021, 308: 125069.
- [21] 胡训健,卞康,谢正勇,等.细观结构的非均质性对花岗岩强度及变形影响的颗粒流模拟[J].岩土工程学报,2020,42(8): 1540-1548.
HU X J, BIAN K, XIE Z Y, et al. Influence of meso-structure heterogeneity on granite strength and deformation with particle flow code [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(8): 1540-1548. (in Chinese)
- [22] 陈鹏宇,余宏明.平直节理黏结颗粒材料宏细观参数关系及细观参数的标定[J].土木建筑与环境工程,2016,38(5): 74-84.
CHEN P Y, YU H M. Relationship between macroparameters and microparameters of flat-jointed bonded-particle material and calibration of microparameters [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(5): 74-84. (in Chinese)
- [23] 谭杰,周克明,曾理,等.火山岩晶质及非晶质矿物组分定量分析方法:以四川盆地西部二叠系火山岩为例[J].天然气工业,2022,42(5): 24-33.
TAN J, ZHOU K M, ZENG L, et al. Quantitative analysis method for crystalline and amorphous components in volcanic rocks: A case study on Permian volcanic rocks in the western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 24-33. (in Chinese)
- [24] 王穗丰,赵先宇,张利平,等.基于晶粒织构模型的花岗岩矿物晶粒形状及朝向对其力学特性影响研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(10): 2515-2527.
WANG S F, ZHAO X Y, ZHANG L P, et al. Influence of grain shape and orientation of granite on mechanical property based on the grain texture model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2515-2527. (in Chinese)
- [25] ZHANG S G, CHEN L, LU P P, et al. Analysis of the energy and damage evolution rule for sandstone based on the particle flow method [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2022, 26(3): 531-546.
- [26] 沙鹏,杨丹莲,邬一鑫,等.花岗岩巴西劈裂渐进破坏特征与能量演化研究[J].工程地质学报,2021,29(5): 1258-1266.
SHA P, YANG D L, WU Y X, et al. Progressive failure characteristics and energy evolution of granite in Brazilian disc tests [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1258-1266. (in Chinese)
- [27] 高文根,段会强,杨永新.周期荷载作用下煤岩声发射特征的颗粒流模拟[J].应用力学学报,2021,38(1): 262-268.
GAO W G, DUAN H Q, YANG Y X. Particle flow simulation of acoustic emission characteristics of coal sample subjected to cyclic loading [J]. Chinese Journal of

- Applied Mechanics, 2021, 38(1): 262-268. (in Chinese)
- [28] YANG Y S, CHENG W, ZHANG Z R, et al. Energy evolution law of marble failure process under different confining pressures based on particle discrete element method [J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 665955.
- [29] 刘洪磊, 王培涛, 杨天鸿, 等. 基于离散元方法的花岗岩单轴压缩破裂过程的声发射特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1790-1795.
- LIU H L, WANG P T, YANG T H, et al. Mechanical characteristics of granite under uniaxial compressive and AE monitoring test using particle flow code [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1790-1795. (in Chinese)
- [30] ZHANG Q, WANG X A, TIAN L G, et al. Analysis of mechanical and acoustic emission characteristics of rock materials with double-hole defects based on particle flow code [J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-11.
- [31] 王俊, 蔚艳庆, 丁尧, 等. 单轴压缩下碳化混凝土的声发射特性[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 498-505.
- WANG J, WEI Y Q, DING Y, et al. Study on acoustic emission characteristics of carbonated concrete under uniaxial loading [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020, 47(4): 498-505. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)