移动扫码阅读

王　磊，刘化强，陈礼鹏，等. 煤张开型裂隙三维宏细观演化特征及扰动因素探究[J]. 煤炭科学技术，2024，52(5)：71−83.

WANG Lei, LIU Huaqiang, CHEN Lipeng, *et al*. Study on three-dimensional mesoscopic evolution characteristics and disturbance factors of coal open fractures[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 71−83.

煤张开型裂隙三维宏细观演化特征及扰动因素探究

王　磊，刘化强，陈礼鹏，刘怀谦，李少波，朱传奇，范　浩

（安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室，安徽 淮南　232001）

摘　要：裂隙演化方式受控于诸如矿物特征及围压条件等内外环境，为探究含裂隙煤体裂隙宏细观演化特征及影响因素的围压效应，基于工业 CT 扫描系统及其搭载的三轴加载系统对含裂隙煤体开展三轴静载试验，以多角度联合表征，对原生裂隙、矿物及围压的内外条件相互作用机制做出合理解释。结果表明：①围压会改变煤体初始损伤显著区位置，使其随围压升高由裂隙尖端过渡至煤体上、下端，且微孔隙和大尺寸裂隙之间比微孔隙和微孔隙之间更易相互贯通，并产生新的宏观裂纹。②围压升高使得三维动态分形维数由缓慢增加、快速增加和平稳增加转变为平稳增加、快速增加和缓慢增加的发展阶段，可表征裂隙的时间演化规律。③含裂隙煤体在单轴或低围压下呈纵向拉伸破坏，高围压会使其破坏方式趋于剪切，并通过 2 种途径提升煤体强度。④起裂角理论值偏离试验值程度随围压增加而增加，与煤体由矿物分布引起的离散度数值关系一致。⑤根据裂隙的受力成分及矿物分布特征将裂隙扩展行为分为直驱、绕核和错核 3 种类型，该扩展行为受围压对裂隙的作用力成分影响，由相对纯粹拉应力、拉伸–剪切复合应力和相对纯粹剪应力作用的裂纹分别对应以上 3 种扩展行为，即对裂隙的扩展影响形式表现为以围压为主，矿物赋存形态为辅。

关键词：张开型裂隙；CT 实时扫描；孔隙分布；分形维数；矿物分布特征

中图分类号：TD313　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253−2336(2024)05−0071−13

Study on three-dimensional mesoscopic evolution characteristics and disturbance factors of coal open fractures

WANG Lei, LIU Huaqiang, CHEN Lipeng, LIU Huaiqian, LI Shaobo, ZHU Chuanqi, FAN Hao

(*State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *China*)

Abstract: The evolution of fractures is affected by internal and external environments such as the distribution characteristics of mineral particles and confining pressure conditions. In order to explore the macro-meso evolution characteristics and influencing factors of fractures in fractured coal under different confining pressures, based on the industrial CT scanning system and its equipped triaxial loading system, the triaxial static load test of fractured coal was carried out. The interaction mechanism of internal and external conditions of primary fractures, mineral particles and confining pressure is reasonably explained by multi-angle joint characterization. the results showed: ① The confining pressure will shift the significant area of the initial damage of the coal body, so that it transits from the fracture tip to the upper and lower ends of the coal body with the increase of confining pressure, and it is easier to connect between micropores and large-sized fractures than between micropores and micropores, and new macroscopic cracks are generated. ② The increase of confining pressure will lead to the change of three-dimensional dynamic fractal dimension from slow increase, rapid increase and steady increase to the development stage of steady increase, rapid increase and slow increase, which can be used to characterize the time evolution law of frac-

收稿日期：2023−10−11　　**责任编辑：**常　琛　　**DOI:** 10.12438/cst.2023-1635

基金项目：安徽省科技重大专项资助项目 (202203a07020010)；安徽理工大学研究生创新基金资助项目 (2022CX2033)；深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金课题资助项目 (SKLMRDPC22KF10)

作者简介：王　磊(1980—)，男，山东济宁人，博士生导师，博士。E-mail: Leiwang723@126.com

通讯作者：刘化强(1996—)，男，河南信阳人，硕士研究生。E-mail: 1527189884@qq.com

tures. ③ The fractured coal body exhibits longitudinal tensile failure under uniaxial or low confining pressure. The high confining pressure will change its failure mode and tend to shear failure, and enhance the strength of the coal body through two ways. ④ The deviation between the theoretical value and the experimental value of the cracking angle increases with the increase of confining pressure, which is consistent with the discrete numerical relationship caused by the distribution of mineral particles in coal. ⑤ According to the stress composition of the fracture and the distribution characteristics of mineral particles, the fracture propagation behavior is divided into three types: direct drive, bypassing mineral particles and staggering mineral particles. The above propagation behavior depends on the confining pressure to change the force component of the crack. The cracks under the action of relative pure tensile stress, tensile-shear composite stress and relative pure shear stress correspond to the above three propagation behaviors, that is, the influence form of crack propagation is mainly confining pressure, supplemented by the occurrence form of mineral particles.

Key words: opening fractures; CT real-time scanning; pore distribution; fractal dimension; mineral particle distribution characteristics

0 引　言

裂隙煤岩体是自然界中普遍存在的工程体，在外力作用下易引起煤岩体结构破坏失稳而诱发工程事故，尤其对于深部煤炭开采过程，往往面临着复杂的围岩应力状态变化，致使含裂隙煤体强度、裂隙扩展及破坏模式发生变化[1]。而煤岩体失稳本质在于其内部裂隙成核、稳态扩展过渡至失稳扩展最终逐渐贯通，进而引起宏观承载能力逐步劣化的力学过程[2]。因此实时监测不同围压条件下煤体内部裂隙宏细观演化规律，以及失稳过程的力学变化本质，对研究不同采深下开采活动的含裂隙煤体失稳机制，及推动深部矿山资源安全开采具有一定的指导意义。

诸多学者对含预制裂隙煤岩体相关问题进行了大量研究，其中多数以声学行为及表面监测为研究手段阐述煤岩体力学特性及裂纹演化规律，如采用声发射 (Acoustic Emission, AE) 及数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 技术，前者具有精度高和无损监测的优点，因此备受学者追捧并广为应用，后者具有极高的精度，可实现对受载岩石表面微应变演化规律的细观阐述。如郭奇峰等[3] 采用声发射与表面应变监测等手段结合岩石压破过程，确定了裂隙端部起裂位置及顺序，发现翼裂纹最先产生于裂隙尖端，且随外荷载增加，反翼裂纹产生并致使试件失稳；CHEN 等[4] 采用数字散斑相关技术捕获含裂隙岩石实时应变场，分析了实时应变累积、裂隙萌生、扩展和合并。上述方法的大量使用为含裂隙煤岩体研究提供了许多有益的理论支撑，但仍然存在一定的局限性，声学行为作为一种量化指标来表征煤岩体内部微裂纹的萌生、发育等现象，缺少定性的相互验证，表面观测及 DIC 虽可以同时实现定性和定量描述，但仅对于表面裂纹，也具有一定的局限性。为解决该类问题，数字岩心 CT 扫描系统应运而生逐渐进入工业领域，凭借其可视化的优越条件，备受诸多学者青睐，其可对煤岩体内部微细观特征进行精细描述。众多学者采取工业 CT 系统对含裂隙煤岩体进行了大量实验研究，如谭皓等[5] 通过 CT 技术获取不同冻融次数与应力状态下的细观图像，分析岩石的损伤演化特征，以及李静等[6] 基于 CT 扫描试验重构三维数字岩心，研究了页岩储层岩石的细观损伤机制。而扫描毕竟是独立运作的，如无法实现在加载的过程中扫描，以及随时观测岩石受压状态，这很大程度上限制了它的研究广泛度。因此一些学者在此基础上，研制了能够搭载 CT 扫描系统的加载系统，如李兆霖等[7] 通过自研搭配 CT 扫描系统的真三轴加载实验装置，开展了不同应力条件下的含裂隙岩石加载实时 CT 扫描试验，得出了中间主应力对岩石内部萌生裂纹扩展方向起到决定性的作用，岩石内部裂隙扩展发育过程强烈依赖中间主应力方向等结论，以及王登科等[8] 为观测受载煤样裂隙演化过程，对单轴受载煤样采取工业 CT 扫描系统进行 CT 实时扫描试验，综合描述了煤样裂隙的动态演化特征和分形规律。此外，在数据后处理方面，如伪影、噪音等的去除、图像的精细处理等，也有诸多学者[9] 进行了详尽的论述，各类前沿手段的研究及投入使用为 CT 的岩石力学发展提供了重要的技术和理论支撑。

根据前述可知，广大学者对煤岩体预制裂隙问题进行了大量研究[10–11]，但仍存在一些未深入之处，如裂隙演化过程中其应力–应变曲线的变化特征、围压对煤体承载力的提升本质以及不同性质力作用下的裂隙形态，包括弯曲度、裂隙面粗糙度及平整度等研究，且对不同围压条件下含单裂隙煤体内部可视化裂隙宏细观损伤、扩展规律，以及孔裂隙、矿物分布特征对裂隙的演化扰动影响研究也较为缺乏。因此本文采用数字岩芯 CT 扫描系统结合常规三轴加载系统，开展不同围压下煤体预制裂隙的力学特征及裂隙演化研究，通过定性描述、理论分析、损伤演

化特征、分形维数等多角度分析不同围压条件下试样失稳过程中内部裂隙扩展演化规律，揭示不同深度围岩条件下的采动煤体失稳机制。

1　试验方法

1.1　试样描述

试验试件为致密原煤，为减少非均质性对煤样的影响，试样均取自于同一大块原煤，加工成ϕ25 mm×50 mm 的圆柱形试样并对试样端面进行仔细打磨，使其不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm[12]。于试样侧面中心位置预制一条与水平方向夹角为 30°、长度为 8 mm、宽度为 2 mm 的贯穿裂隙，如图 1 所示。

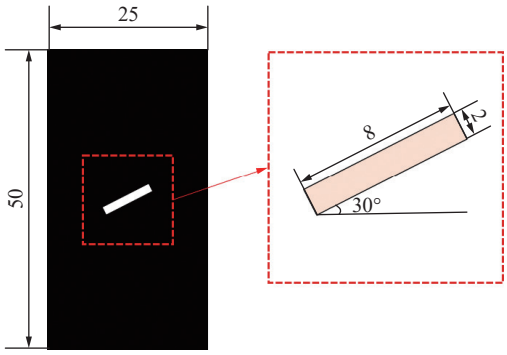


图 1　含裂隙试样几何尺寸

Fig.1　Geometric dimensions of cracked specimen

1.2　试验方案

为探究张开型裂隙煤体在不同围压条件下内部裂隙演化规律，采用安徽理工大学国家重点实验室的受载煤岩工业 CT 扫描系统[13–14]，如图 2 所示。采用该系统对试件开展三轴加载实时扫描试验，将围压设置为 3.5、7 和 9 MPa，煤样编号分别为 A_1，A_2，A_3 和 A_4，轴向加载速率设置为 0.3 mm/min，同时设置无围压煤样为对照组。

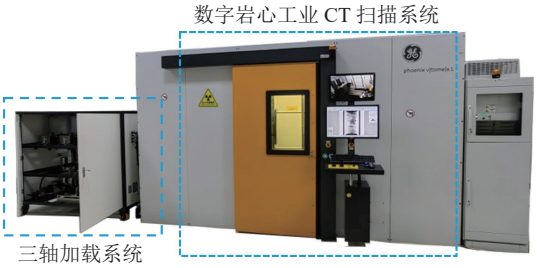


图 2　受载煤岩体试验系统

Fig.2　Loaded coal rock test system

试验步骤阐述如下：

1) 准备阶段，开启 CT 装置并做机械轴复位、系统排气及热机等工作。

2) 装样阶段，将有皮套的煤样装至夹持器并固定在扫描转台上并分别连接轴压、围压及驱替管路，如图 3 所示。

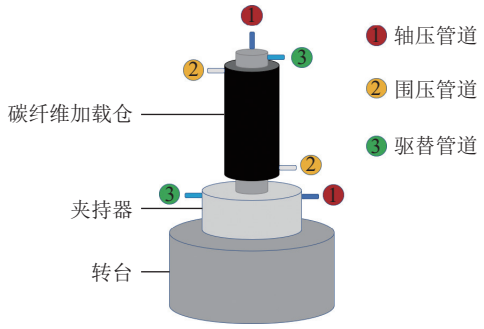
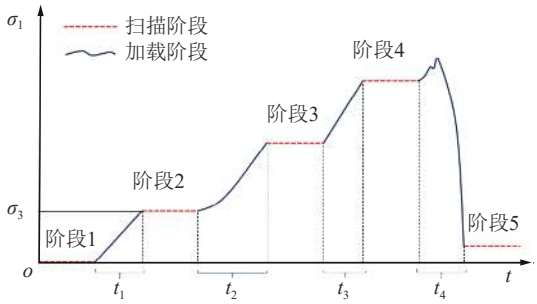


图 3　煤样安装操作

Fig.3　Coal sample installation operation diagram

3) CT 扫描及三轴加载阶段，设置 CT 扫描参数，实验扫描参数设置为：180 kV，190 μA，27 μm，曝光时间 1 000 ms，拍摄张数为 1 800 张。根据受载过程及应力–应变曲线将扫描次数设置为 5 次，对原始状态试件进行第 1 次扫描，加围压后进行第 2 次扫描；自第 2 次扫描后，每隔时间 t 进行一次可视化观测，当裂隙尖端出现明显损伤时进行第 3 次扫描；明显塑性阶段时进行第 4 次扫描；应力跌落后进行第 5 次扫描，且加载过程实时观测，扫描阶段的时间–应力曲线如图 4 所示。通过三轴加载控制系统，开展围压为 3 MPa 的三轴试验。



σ_1—加载应力；σ_3—设置的围压值；$t_1 \sim t_4$—两个扫描阶段中间加载阶段的时长

图 4　实时扫描加载的时间–应力曲线

Fig.4　Real-time scanning loading time-stress curve

4) 重复上述步骤，完成剩余围压 (5, 7, 9 MPa) 下的三轴加载试验。

5) 后处理阶段，试验结束后，导出力学及原始扫描图像等数据，采取相应数据处理软件进行处理分析。

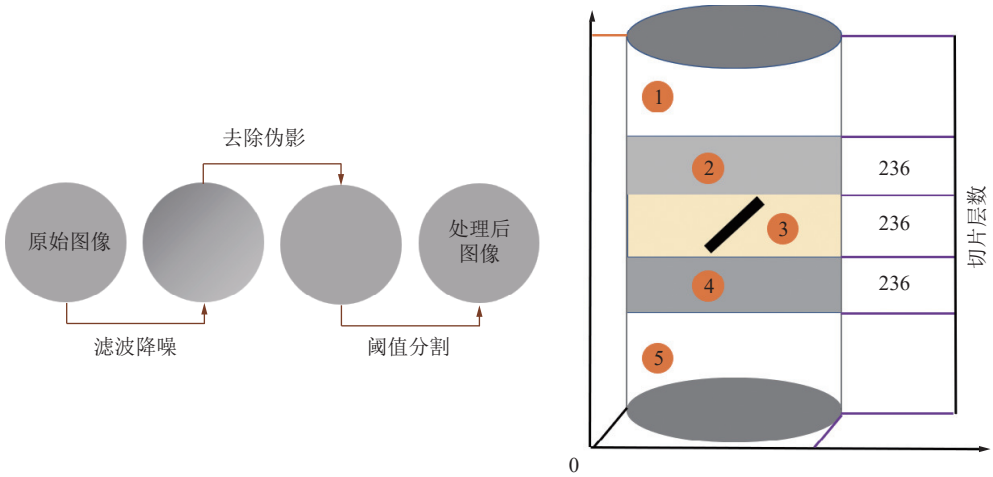
2　围压对裂隙演化的影响

裂隙演化包括裂隙的孕育和扩展，更加细致可划分为裂隙尖端损伤、成核、起裂和扩展几个步骤，分别涉及到细观及宏观层面，细观层面的讨论颇具难度，而宏观表象受控于细观变化特征，即探究细观

变化规律具有一定意义。因此该部分分别从损伤演化、分形维数、定性描述等层面进行分析，对裂隙的萌生行为、扩展行为及扩展形态的围压效应进行分析，以期对含裂隙煤体致灾机理做出合理解释。

2.1　含裂隙煤体细观损伤演化规律探究

CT 后处理包括滤波降噪、伪影去除及阈值分割，由于射束硬化会对二值化阈值分割及后期重建产生影响，因此为消除影响，采用灰度束阈值分割方法[15]对煤体扫描数据进行了阈值分割并重构。本实验对煤体 CT 扫描自上而下共约 1 800 层切片，以预制裂隙位置为基准，将含裂隙试件进行分区，为裂隙区，上、下尖端区及上、下端部区。由于预制裂隙过程可能产生工艺上的上下偏移，因此试件各分区并非对应固定的某个范围，因此根据扫描结果的裂隙率分布特征表征各区域，后处理流程及试件分区结果如图 5 所示。对试件裂隙及其附近区域分为上尖端区、裂隙区及下尖端区，根据裂隙率的分布特征图得出裂隙区所对应的切片层数，3 个区域均为 236 层。



1—上端部区；2—裂隙上尖端区；3—裂隙区；4—裂隙下尖端区；5—下端部区

图 5　后处理流程及试件按层分区

Fig.5　Post-processing flow and specimen layer partition diagram

经 Avizo 软件的裂隙率计算模块得出相关数据，并导入 origin 软件进行处理，得出裂隙率随切片层数 (自下而上) 的变化特征，以此表征含裂隙煤体损伤演化规律，不同切片层裂隙率变化曲线如图 6 所示。

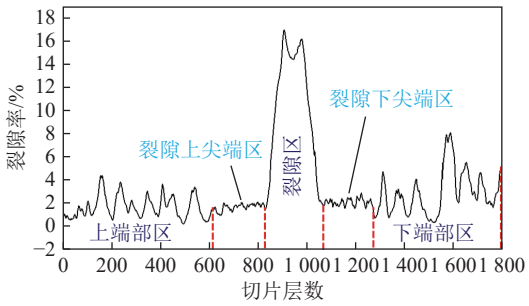


图 6　裂隙率随切片层数变化规律

Fig.6　Fissure rate changes with the number of slice layers

该图为 3 MPa 围压状态下煤体的层裂隙率变化图，由图可知，各切片层裂隙率变化幅度较大，其中裂隙区裂隙率最大，上、下尖端区裂隙率走向几乎对称于裂隙区且平均值约等于端部区平均水平，该变化规律可真实地反应出原始含裂隙煤体的裂隙分布特征。

为评估不同围压下含裂隙煤体细观损伤演化特征，将不同围压第 2 次扫描 (加围压状态) 和第 3 次扫描 (损伤阶段) 下的 CT 图像进行处理，得出不同围压条件下裂隙率随切片层数变化特征如图 7 所示。

由图可知，第 3 次扫描阶段煤体相较于第 2 次扫描整体裂隙率上升，表明煤体发生了全局性的损伤，从局部上分析，自上而下计算出 5 个区域 2 个扫描阶段的平均裂隙率增加量，见表 1。

将裂隙率增幅程度定义为损伤，2 者呈正相关的数值关系。上述数据表明，煤体损伤存在明显的局部差异，将相对损伤大的区域称为强损伤集中区，对于不同围压下的试件，其强损伤集中区也会不同。3 MPa 围压下，上尖端区较下尖端区具有更高的损伤程度，属于强损伤集中区，因此翼裂纹会以起裂裂纹的形式首发于裂隙上尖端区；5 MPa 围压下，各分区裂隙率增加量均小于 3 MPa 围压下，表明围压对孔裂隙扩张存在一定的抑制作用，另外，强损伤集中区处于下尖端区，因此裂纹由裂隙下尖端起裂；随围压

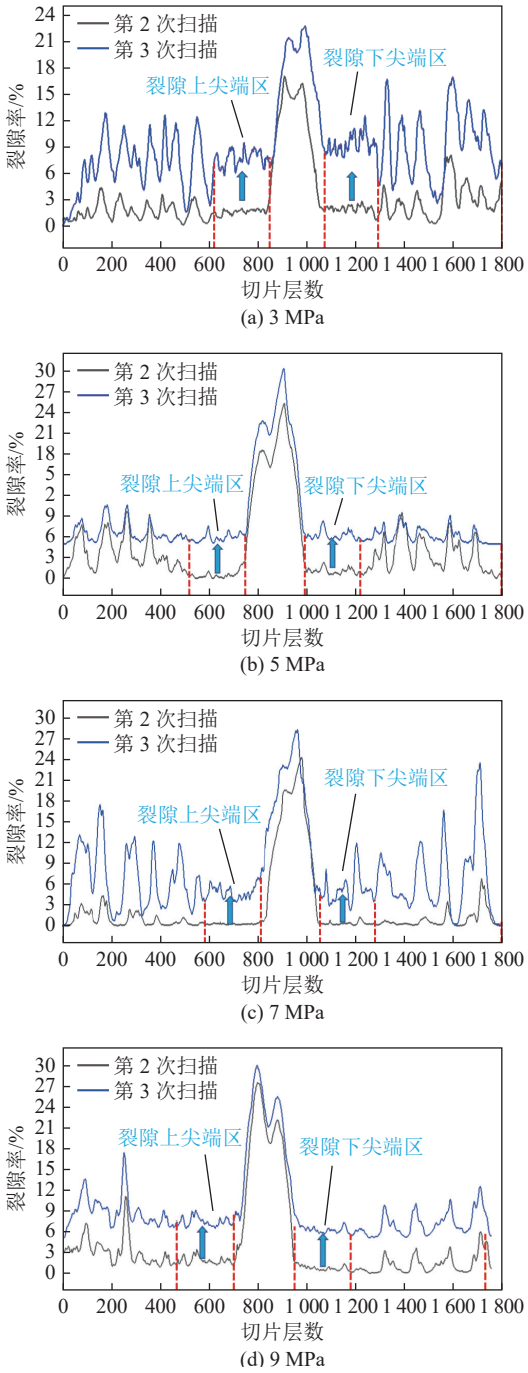


图 7　不同围压下 2 次扫描随切片层数裂隙率变化特征

Fig.7　Change characteristics of fissure rate of two scans with number of slices under different confining pressures

继续升高至 7 MPa 时，强损伤集中区不再处于尖端，而主要分布于上、下端部区，上尖端区损伤程度次之，表明此时围压对于大尺寸裂隙扩展存在较强的抑制作用，但对于细观孔裂隙的孕育及扩张存在促进作用。由于上尖端区相对损伤较大，因此裂隙由主裂隙上尖端起裂；围压为 9 MPa 时，围压对于大尺寸裂隙扩展的抑制作用进一步增强，试件尖端区和端部区损伤程度几乎相同，表明在高围压下除裂隙区外其余各分区损伤较为均匀。总结上述分析，损伤显著区受围压影响较大，随围压增加，损伤显著区会由裂隙尖端过渡至试件的端部，原因在于，部分张开度较高的微裂隙面对高围压时会产生逆围压效应，反而使得其由原本的闭合变为扩展，而端部的端部效应属于应力集中区，因此会加剧端部的损伤。但整体而言，宏观裂隙依旧会由预制裂隙尖端起裂，端部区平均损伤程度最高，但未产生宏观裂纹，表明较微孔裂隙之间相互贯通而言，微孔隙同大尺寸裂隙更易相互贯通并产生新的宏观裂纹。原因在于，微孔隙在受压时会逐步趋于闭合，致使其扩展受阻，而宏观裂纹由于张开度较大，很难实现完全闭合，便通过扩展来产生闭合倾向抵御持续增加的外界压力。

表 1　不同围压下试件各分区裂隙率增长值

Table 1　Fissure rate growth value of each partition of specimen under different confining pressures

围压/MPa	2次扫描阶段的平均裂隙率增量/%				
	下端部区	下尖端区	裂隙区	上尖端区	上端部区
3	5.22	5.79	5.78	7.00	5.39
5	2.97	5.31	4.04	5.13	2.83
7	5.86	4.47	4.53	4.87	5.85
9	5.66	5.65	3.44	5.61	5.73

2.2　基于显微 CT 图像的岩芯分形维数

分形维数反映了复杂形体占有空间的有效性[16–18]，其数值大小和物体物理结构稳定性呈负相关性。含有大量孔隙的岩石是一种分形体，其孔隙表面的变形、裂隙率、渗透率及其物理性质均具有分形特征[19–20]。宏观破碎本质是由微破裂组成的，而微破裂又是由更小的缺陷、裂隙演化汇通形成，这种链式自相似性行为必然导致破碎后碎块块度也具有自相似的特征，因此可采取分形维数量化煤体破碎程度。为观测不同围压条件下含预制裂隙受载煤样裂隙演化过程，采用 Avizo 软件相应模块通过分析和计算得到了煤样内部结构的裂隙三维分形维数。综合分析煤样裂隙的分形规律，得到不同围压及扫描阶段下煤体内部裂隙三维分形维数见表 2。

以上数据表明，各原始状态试件三维分形维数均值相当，而围压的施加会降低该数值，且降低效果与围压呈正相关性，主要归因于围压对孔裂隙的压密作用。此后，随加载进行，煤体内部裂隙三维分形维数均呈持续增高的变化规律，表明裂隙网纹的复杂性逐渐增大，其与煤体的破坏程度呈正相关性。随围压的增加，后一扫描阶段较前一阶段分形维数的增长率降低，体现出围压可降低裂纹网络复杂化程度，既具有抑制裂纹发育的作用，也充分突出分形

表 2　含裂隙煤样内部裂隙的三维分形维数

Table 2　Three-dimensional fractal dimension of internal cracks in fractured coal samples

围压/MPa	扫描次数	分形维数	增长率/%
3	第1次	2.12	—
	第2次	2.09	−1.42
	第3次	2.18	4.31
	第4次	2.41	10.55
	第5次	2.59	7.47
5	第1次	2.1	—
	第2次	2.07	−1.43
	第3次	2.15	3.86
	第4次	2.35	9.30
	第5次	2.48	5.53
7	第1次	2.11	—
	第2次	2.05	−2.84
	第3次	2.12	3.41
	第4次	2.31	8.96
	第5次	2.37	2.60
9	第1次	2.12	—
	第2次	2.03	−4.24
	第3次	2.09	2.96
	第4次	2.22	6.22
	第5次	2.27	2.25

维数作为裂隙发育规律及围压效应的量化指标具有一定可行性。

另外，围压对裂隙扩展速率存在一定影响，对 2 ~ 5 次扫描分形维数的增长率进行绘图，如图 8 所示。

当围压为较低水准 (3,5 MPa) 时，受载煤样裂隙分形维数主要经历了相对缓慢增加、快速增加和平稳升高 3 个动态发展阶段，当围压为较高水准 (7, 9 MPa) 时，分形维数主要经历相对平稳增加、快速增加和缓慢升高 3 个动态发展阶段，体现出裂隙网格的复杂度的发展规律，间接描述了不同围压条件下受载煤样裂隙发展的动态演变过程。

2.3　裂纹演化围压效应的定性描述

围压会通过抑制拉伸裂纹发育从而促进剪切裂纹的发育[21]，最终会使得煤岩的破坏模式由纵向拉

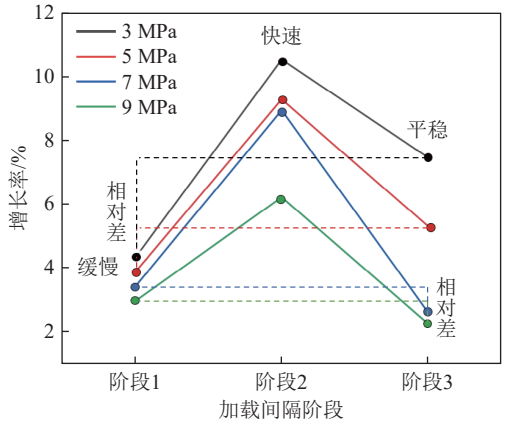


图 8　不同围压条件下煤体三维分形维数增长率

Fig.8　Growth rate of three-dimensional fractal dimension of coal under different confining pressure conditions

伸破坏逐步过渡到纯剪切破坏，不同围压下煤岩破坏特征如图 9 所示。

为探究围压对裂隙发展的作用机理，构建荷载煤岩体的基本力学–裂隙特征模型，建立该模型之前，要精准对裂隙种类进行区分，在有技术限制的前提下，一般通过裂隙走向判定，但走向判定准确性值得商榷。此外，由于裂隙的不同受力特征，致使其表面平整度不同，一般认为[22]，剪切力作用会产生较为平整的裂隙面，拉应力作用反之，而 CT 的微米级可视化功能可对裂隙形态及表面光滑度等进行精准描述，因此本文通过裂隙面的平整度对裂隙种类进行精准区分，各试件裂隙面平整度如图 10 所示。

根据结果发现，剪切裂隙面平整度更高，但完整性较低，表面较为粗糙，原因在于，剪切裂隙受错向力形成，面与面会相互摩擦形成平整光滑面，但由于质地硬，密度大的矿物颗粒存在，使得裂隙面残缺化及粗糙化。反之，拉伸裂隙面平整度较低，但完整性高，表面粗糙度适中，因为其固有的法向受力性质，使其扩展几乎不受路径上的矿物颗粒影响，因此具有较高的完整性，关于矿物的相关影响研究于本文最后具体分析。对比发现，采用裂隙面平整度和裂隙走向判定的裂隙类型几乎是相同的，因此后者一般可用于技术限制前提下的平替判定方法，荷载煤

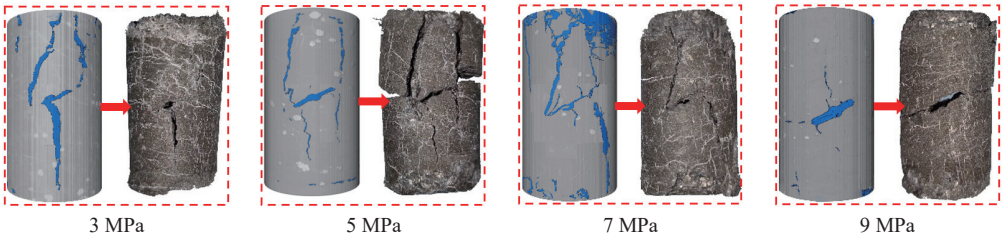
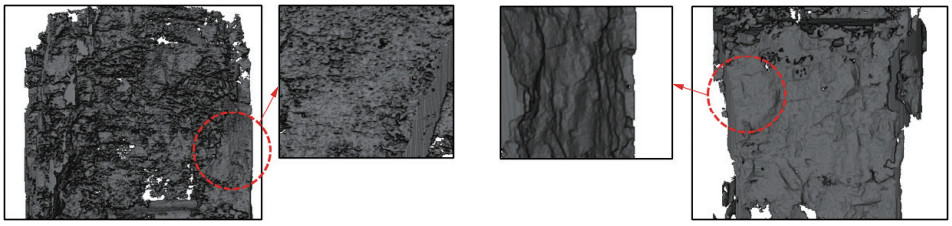


图 9　不同围压下的煤岩破坏模式

Fig.9　Failure modes of coal rock under different confining pressures



(a) 剪切裂隙面　　(b) 拉伸裂隙面

图 10　裂隙面平整度

Fig.10　Flatness of fracture surface

岩体的基本力学–裂隙特征模型如图 11 所示。

上图很明确的展示出裂隙扩展效果的围压效应，库伦认为[22]：煤岩的破坏主要是剪切破坏，强度取决于黏聚力及摩擦分量，而含有预制裂隙的煤岩在单轴荷载或较低围压条件下，无论是理论计算还是实际情况，裂隙总是沿着最大主应力方向扩展并形成平行于最大主应力的裂纹，使得煤岩体造成纵向拉伸破坏，又基于断裂力学理论[23]，拉伸破坏较剪切破坏而言更容易发生，即裂隙的存在实质是通过改变新裂纹萌生及扩展的方向来改变新裂纹的受力性质，从而实现降低煤体强度的本质。而随着围压增加，轴向的拉伸倾向被限制，使得拉伸裂纹发育被限制，相反，轴向的压缩倾向增加，使得出现沿预制裂隙扩展的剪切裂纹概率增加。另外，已知摩尔–库伦抗剪强度公式

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \tag{1}$$

式中，τ 为剪切强度，MPa；σ 为剪切面上的正应力，MPa；c 为黏聚力，MPa；ϕ 为内摩擦角，(°)。

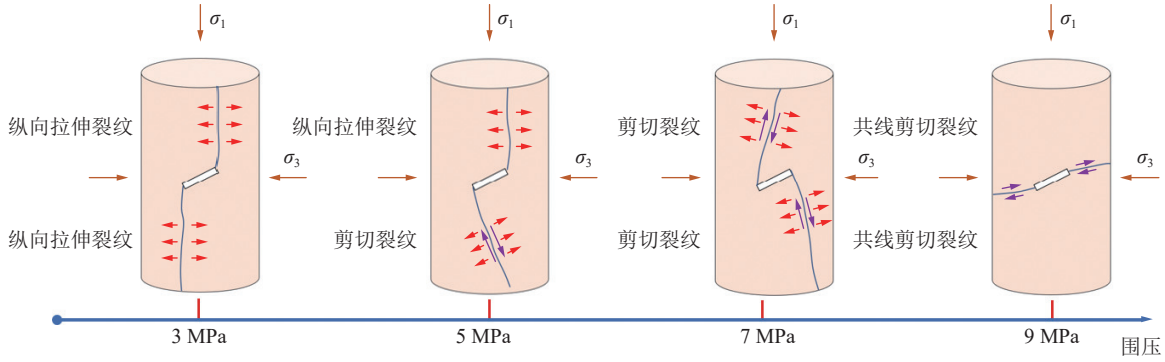


图 11　围压对裂隙形态的影响

Fig.11　Effect of confining pressure on fracture morphology

对试件受力进行分解得出

$$\sigma = \sigma_1 \sin^2\theta + \sigma_3 \cos^2\theta \tag{2}$$

式中，σ_1 为轴向应力 (轴压)，MPa；σ_3 为径向应力 (围压)，MPa，θ 为破坏角，(°)。

将式 (2) 代入式 (1) 得到

$$\tau = c + (\sigma_1 \sin^2\theta + \sigma_3 \cos^2\theta) \tan \phi \tag{3}$$

式 (3) 表明随围压增大，煤岩体抗压剪强度增加，综合而言，围压会增加剪切裂纹比例以及抗剪强度，从而实现改变煤体破坏方式及增强煤体峰值强度的目的。

2.4　围压及细观裂纹对宏观裂隙的发育影响机制

上节阐述指出，围压可使试件由拉伸破坏过渡至剪切破坏。而剪切破坏的发生条件首先是要抑制裂隙端部的拉伸破坏，研究表明，远场围压效应和共线剪切互锁效应分别在宏观和微观层面对拉伸破坏产生抑制作用，而 2 种效应都有裂隙前缘介质必须充分弱化的前提。微观层面的互锁效应实际上只能使岩石这类非均匀介质发生剪切破坏，这取决于岩石内部蕴含的微观裂纹系，可形成分形结构，以相似形式继续发育，最终导致破碎，直至充分弱化其前缘介质，充分弱化后的前缘介质，又称为“成核”，满足了发生宏观剪切互锁效应的前提条件。

2.1 节结果认为，高围压对大尺度的裂隙扩展抑制效果高于细微观裂隙。因此在此条件下预制裂隙端部高应力集中区的微观裂纹群会充分发育，导致形成弱化带以及延长薄弱带长度，如图 12 所示，高围压延长弱化带范围，该弱化带一般与裂隙端部存在一定距离，随弱化带弱化程度加深，形成细观裂纹，细观裂纹便会同宏观裂纹发生共线剪切互锁效应，进一步抑制拉伸破坏，引导裂隙发生剪切破坏。

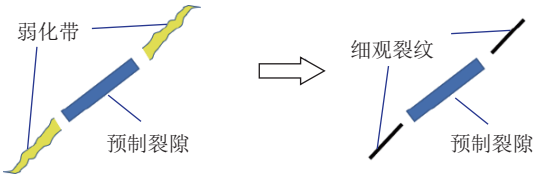


图 12　裂隙尖端弱化带

Fig.12　Weakening zone of crack tip

上述分析表明，岩石通过 2 种方式发生剪切破坏，即围压效应和共线剪切互锁效应，前者在一定程度上可为后者提供服务，前者可促进裂隙尖端一定距离处形成细观裂纹，从而与宏观裂纹形成共线剪切互锁效应而进一步引导预制裂隙扩展方向，增加剪切成分。

3　非均质性对煤体强度及裂隙演化的围压效应

煤岩类材料一般具有强度分布不均匀和材料空间组构随机性的特性，2 者归根结底均源于内部孔裂隙及矿物成分的含量及随机分布，是造成煤岩体非均质性的根本原因。细观结构的不均匀性会对煤体受载的应力–应变曲线、裂隙起裂模式以及煤岩体的破坏特征产生不同程度的影响，而通过围压的加持作用，非均质成分本身或非均质成分造成的影响均会或多或少的被改变。因此，为了探究细观非均质成分对煤岩体峰值强度及裂隙演化特征影响的围压效应，从起裂角、裂隙形态层面出发探究围压的宏细观作用形式，有助于研究非均质性对煤体峰值强度和裂隙演化的影响机理进行分析。

3.1　围压对煤体强度的增强机制

围压对煤岩峰值强度具有积极地增强作用，但当围压超出某个阈值时，便存在逆围压效应。上述问题的研究遍及深浅，然而强化机制的论述却很少涉及，实际上原生缺陷含量及分布特征对煤岩体强度的影响发挥着关键作用，由于试验技术的限制，无法实现对其定量化分析，而本文的可视化描述试验系统弥补了这一缺陷，可对煤岩体内各类物质及缺陷做出精确表征。

在对围压的增强机制分析之前，对试验数据进行处理，摒弃扫描阶段的杂乱部分，所得主应力差–应变曲线如图 13 所示。

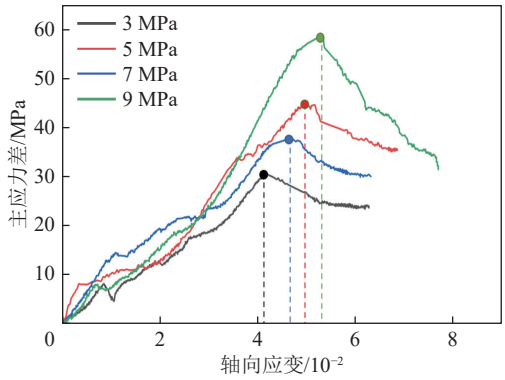


图 13　不同围压下含裂隙煤体主应力差–应变曲线

Fig.13　Principal stress difference-strain curves of fractured coal under different confining pressures

由图 13 分析，三轴荷载作用下，围压对煤体峰值强度及峰值应变存在明显的扩增作用，0, 3, 5, 7 和 9 MPa 围压所对应的峰值强度分别为 24, 31, 38, 45 和 59 MPa，计算得出围压对其强度增长率分别为 29.16%, 58.3%, 87.5% 和 104.1%。以上数据表明，围压对煤体强度的扩增作用随围压增加出现明显的增速匮乏，体现出围压增强效果具有一定上限的本质，而围压对煤岩体的增强机制在于其对煤岩体内部孔裂隙的闭合作用。

为探究围压对裂隙的作用效果，进一步分析其对煤体强度的增强机制，采取相关软件得出加围压前后试件各分区的裂隙率，见表 3。由表 3 得知，加围压后，各分区裂隙率均呈现不同程度的减小，而减小程度和围压大小呈正相关性，原因在于，围压可促使细观缺陷闭合，而细观缺陷的闭合可有效减少应力局部集中现象，以达到应力传播路径均匀，抑制缺陷孕育、发展和贯通，从而实现提升承载力的目的。了解围压的作用机制后，以孔裂隙率为量化指标进一步分析其与煤体强度的数值关系，加围压后，试件 A_1 ~ A_4 总孔裂隙率减小率分别为 7.71%, 13.27%, 16.88% 和 18.62%，与煤体峰值强度增长率关系近似，均呈现出增速减退的现象，体现出围压对煤体强度

表 3　加围压前后煤体各分区和体裂隙率及其总体离散度

Table 3　Fissure rate and its standard deviation of each partition and volume of coal in original state

试样编号	初次扫描状态裂隙率/%					离散度	二次扫描状态裂隙率/%					离散度
	上端部区	上尖端区	裂隙区	下尖端区	下端部区		上端部区	上尖端区	裂隙区	下尖端区	下端部区	
A_1	1.94	1.96	10.92	2.26	3.54	3.86	1.72	1.67	10.61	2.02	3.01	3.84
A_2	4.48	1.41	17.41	1.94	4.00	6.59	3.72	0.64	16.53	1.19	3.28	6.54
A_3	1.42	0.86	14.02	1.03	1.45	5.74	0.90	0.24	13.27	0.38	0.82	5.68
A_4	4.17	2.88	18.23	2.16	2.31	6.91	3.19	1.90	16.96	0.82	1.34	6.83

的改变和煤体内孔裂隙率存在一定数值关系，但并非均匀的，即孔裂隙率对煤体强度影响不具有惟一性，因此考虑到还存在其他因素的影响。

此外，以分区数值标准差表示孔裂隙的离散度，各围压条件下离散度减小率分别为 0.36%，0.84%，1.10% 和 1.14%，对比表中数据可得知，在加围压前后，离散度均表现为减小的数值规律，且减小程度随围压增加而增加，表明围压可以减小由孔裂隙引起的煤体非均质度，也侧面映射出，煤体越均匀，其强度越稳定。而随围压的增加，离散度的减小明显受阻，表明围压很难使煤体内孔裂隙完全闭合，即围压效应存在极限。

3.2　围压对起裂角度的影响

一般而言，矿物颗粒的分布特征会引起裂纹扩展途径及裂纹形态的改变，从而影响煤体的变形及破坏特征，而围压可以此作为“桥梁”改变影响特征，2 者的影响特征具有传递性和相互性。因此本文通过理论计算得出裂隙起裂角的精确解，并结合实际起裂角得出误差率，探究围压致差规律和蕴含机制，为围压和矿物颗粒相互作用机制做出理论铺垫。

根据岩石断裂力学[24] 理论建立双轴压力下裂隙受力模型，如图 14 所示，设样品边缘均匀轴向荷载 P，侧向均匀荷载 P_1，裂隙长度 $2a$=8 mm，方向和 P_1 作用方向夹角为 β=30°。

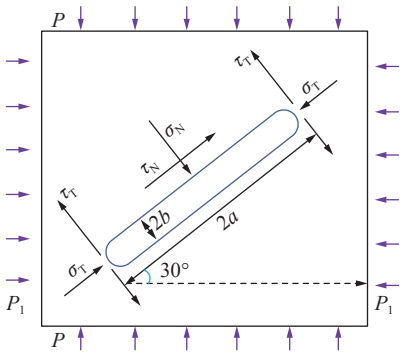


图 14　双轴静载下含裂隙煤体力学模型

Fig.14　Mechanical model of fractured coal under uniaxial static load

利用坐标变换等方法，得出裂纹受双轴压力的远场应力分量为

$$\begin{cases} \sigma_x^{\infty} = p\cos^2\beta + p_1\sin^2\beta \\ \sigma_y^{\infty} = p\sin^2\beta + p_1\cos^2\beta \\ \tau^{\infty} = (p - p_1)\sin\beta\cos\beta \end{cases} \tag{4}$$

式中：p 为煤样的轴向应力，MPa；p_1 为煤样侧向压力(围压)，MPa；β(β<90°) 为预制裂隙与水平方向夹角，(°)。

裂纹面所承受的正应力为

$$\sigma_N = \sigma_y^{\infty} = p\sin^2\beta + p_1\cos^2\beta \tag{5}$$

现实工程上，多数裂纹模型并不属于格里菲斯线裂纹，而是具有一定张开度，可视作椭圆数字模型[25]，因此模型端部的压应力和剪应力不该被忽略[26]，应力变换后得出张开型裂隙裂纹面的端部应力及剪应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_T = \sigma_x^{\infty} = p\cos^2\beta + p_1\sin^2\beta \\ \tau_N = \tau^{\infty} = (p - p_1)\sin\beta\cos\beta \end{cases} \tag{6}$$

由非闭合裂隙端部面受力引起的 I 型应力强度因子表达式为

$$K_{\mathrm{I}(T)} = 0.5\sigma_T\sqrt{\rho/a}\sqrt{\pi a} \tag{7}$$

式中，ρ 为裂纹尖端曲率半径，m。

对于一般“凹槽”裂隙，其曲率半径可采取真实裂隙模型[27] 进行代替分析，即裂隙端部按照直径为 b 的半圆考虑，此时 ρ=b，则式 (7) 可近似为

$$K_{\mathrm{I}(T)} = 0.5\sigma_T\sqrt{b/a}\sqrt{\pi a} \tag{8}$$

式中，b 为裂隙宽度的一半。

由法向压应力引起的应力强度因子为

$$K_{\mathrm{I}(N)} = \sigma_N\sqrt{\pi a} \tag{9}$$

除尖端压应力外，剪应力也不可忽略，根据叠加原理得出非闭合裂纹尖端 I, II 型应力强度因子：

$$\begin{cases} K_{\mathrm{I}} = K_{\mathrm{I}(T)} + K_{\mathrm{I}(N)} = [p(0.5\cos^2\beta\sqrt{b/a} + \sin^2\beta) + \\ p_1(0.5\sin^2\beta\sqrt{b/a} + \cos^2\beta)]\sqrt{\pi a} \\ K_{\mathrm{II}} = (p - p_1)\sin\beta\cos\beta\sqrt{\pi a} \end{cases} \tag{10}$$

T 应力作为 Williams 无限级数展开项中的非奇异项，一般都被传统断裂力学理论舍弃，然而煤岩作为弹–塑–脆性材料，其裂隙尖端断裂过程区尺寸比一般弹–脆性材料大，因此要考虑到 T 应力对周向应力的影响。本试验煤体直至完全失稳，其裂隙也未发生闭合，因此 T_y 和 T_{xy} 不予考虑，只考虑平行于裂隙面的 T_x。则基于最大周向应力准则得到极坐标系下 Ⅰ–Ⅱ 复合型裂纹尖端 r 处微单元处应力场[26] 为

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}[K_{\mathrm{I}}(1 + \cos\theta) - 3K_{\mathrm{II}}\sin\theta] + T_x\sin^2\theta \tag{11}$$

式中，θ 为极角，(°)；r 为微单元到裂隙尖端的距离，m；σ_θ 为周向应力，MPa；T_x 为平行于裂隙面的非奇异项应力分量，MPa，表达式如下

$$T_x = 0.5[p + p_1 - (p - p_1)\cos 2\beta] \tag{12}$$

将式 (11) 中 θ 微分并令其结果等于 0。可得

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi r}}[K_{\mathrm{I}}\sin\theta+K_{\mathrm{II}}(3\cos\theta-1)]+$$
$$4[p+p_1-(p-p_1)\cos 2\beta]\sin\frac{\theta}{2}\cos\theta=0 \qquad (13)$$

T 应力存在使得在等式进行微分时 r 无法被消除，因此要具体化 r 值，采用相对临界尺寸[28] $\gamma=(2r/a)^{1/2}$，将 K_{I}, K_{II} 代入上式可以得到

$$\begin{aligned}&\frac{1}{2\gamma}[\sin\theta(p(0.5\cos^2\beta\sqrt{b/a}+\sin^2\beta)+\\&p_1(0.5\sin^2\beta\sqrt{b/a}+\cos^2\beta))+\\&(p-p_1)\sin\beta\cos\beta(3\cos\theta-1)]+\\&4[p+p_1-(p-p_1)\cos2\beta]\sin\tfrac{\theta}{2}\cos\theta=0\end{aligned} \qquad (14)$$

令相对临界尺寸 γ=0.1，根据加载过程实时观测，以出现宏观裂纹时的应力为临界起裂荷载 p_{1c}，代入裂隙方位角、长度、宽度和围压等数值，仅考虑 $\theta\geqslant0$，得出最大周应力下裂纹扩展角的解析解，见表 4。

采用经典断裂力学理论计算起裂角与实际值吻合度较高。对于线性闭合裂纹[29–32]而言，理论上起裂角度为定值，而本文基于经典凹槽裂纹模型，考虑到预制裂隙的曲率半径、尖端 T 应力及加载始终非闭合特性的影响，得出预制裂隙起裂角度受诸多因素控制，与试件所受远场围压条件存在极大相关性。表 4 数据表明，随围压增加，起裂角呈不断减小的变化特征，误差率随围压增加而增加。

表 4　含裂隙煤体实际起裂角度及其理论解

Table 4　Actual crack initiation angle of fractured coal and its theoretical solution

试样编号	围压/ MPa	理论起裂角/(°)	实际起裂角/(°)	误差率/%
A_1	3	46.5	47	1.08
A_2	5	44.6	45.5	2.02
A_3	7	43.2	44.5	3.01
A_4	9	29.8	28.3	5.03

3.3　矿物分布与围压的相互作用形式对裂隙形态的影响机理

上节提到围压会使得误差率增加，煤岩体内部矿物含量及分布特征对其裂隙演化方式存在一定影响，因此本节通过描述煤体内部原始矿物含量及分布特征，以含裂隙煤体扩展角度表征响应参数，揭示变围压下原生矿物分布对裂隙演化及起裂角的致差机制。

处理三维重构下矿物分布图并提取各分区体积，以各分区矿物体积标准差来表征非均质指数，非均质指数越大矿物分布越离散，根据分区制作柱状折线图直观体现其各分区矿物含量，如图 15 所示。

上述数据表明，非均质指数 $A_4>A_3>A_2>A_1$，同理

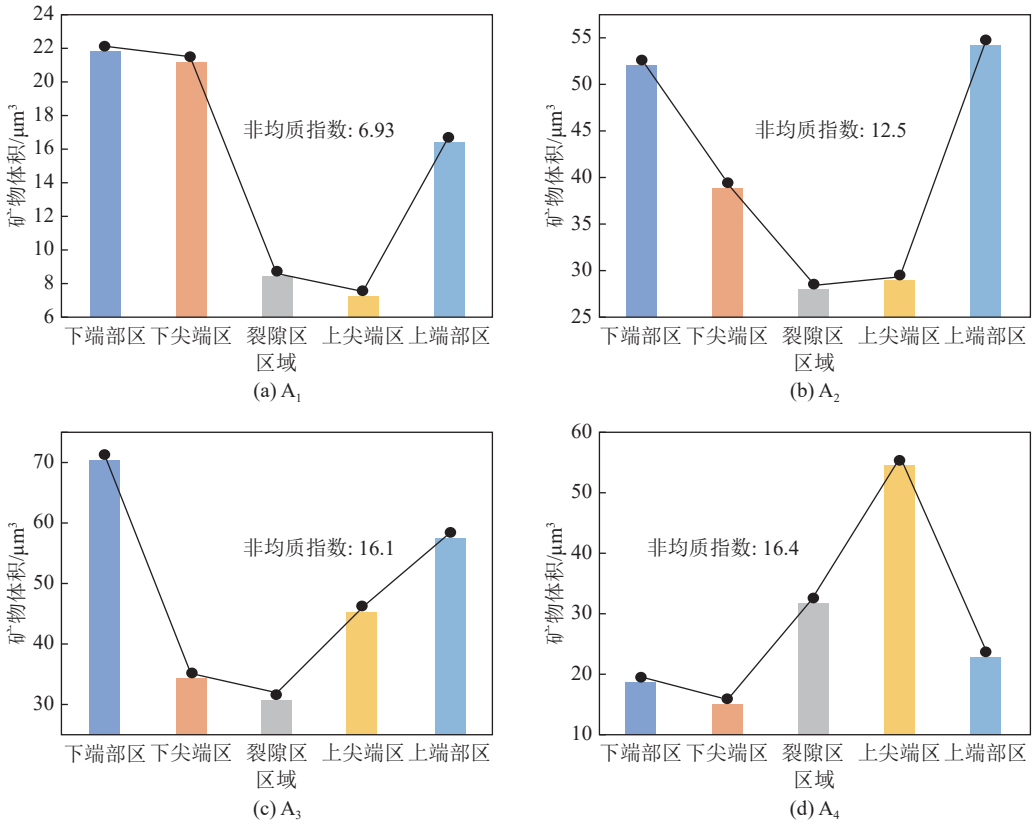


图 15　各试件分区矿物分布

Fig.15　Mineral distribution map of each specimen partition

论计算和实际角度误差率表现规律一致，表现为煤体越均质，偏转角计算误差越小。研究表明[33]，加载进行时矿物周边会产生应力集中现象，而对于矿物离散度较高的试件，应力分布均匀度较低，即会导致应力离散的分布，矿物集中区承担更多的应力，因此应力分布不均是导致误差的一种方式。除应力分布不均外，裂隙扩展路径及周边的矿物赋存状态也会对裂隙的发育形态存在扰动。首先需要了解裂纹的分类和产生条件，翼裂纹于预制裂隙左下端及右上端衍生扩展，由纯拉伸应力导致，属于拉伸裂纹，次生裂纹主要由剪切力导致。基于上述定义及理论将扩展路径含有矿物的裂隙受力方式分为 3 种，为剥离、推剪和剥离–推剪复合方式，前者由相对纯粹拉应力作用，中间由相对纯粹剪切力作用，后者为拉–剪共同作用，如图 16a、图 16b 及图 16c 所示。扩展后裂隙的完整性取决于裂隙的受力方式，由纯粹拉应力引起的剥离方式为直驱行为，会获取更为完整裂隙，而合理比例的拉伸–推剪方式会导致绕核行为[34]，从而劣化裂隙发育的平缓度及完整性，相对纯粹的推剪方式为错核，会导致裂隙呈支离破碎形态。而围压会促进剪切成分，导致剪应力成分升高[35]，因此随围压增加对裂隙完整性的劣化效果越明显。

基于上述理论对矿物分布特征致差的围压效应进一步研究，由图 15a 可以看出，裂隙下端为矿物集中区，该围压条件主导裂隙发育方式表现为翼裂纹完全发育，次生裂纹部分发育，对照图 17a 可知，由试件裂隙左上端及右下端扩展的裂隙完整度极高，原因在于，导致起扩展的属纯拉应力，即以剥离方式发育，而以推剪方式扩展的次生裂纹完整度较低，由于绕核行为的影响，裂隙呈现出蜿蜒曲折的状态；图 15b 可以看出，裂隙上、下端为矿物集中区，该围压条件主导裂隙发育方式表现为翼裂纹和次生裂纹发育相当，对照图 17b 可知，以剥离方式扩展的翼裂纹完整度依旧较高，裂隙周边伴有少量矿物附着，而次生裂纹完整度依旧较低，但绕核行为有所衰减，表现为蜿

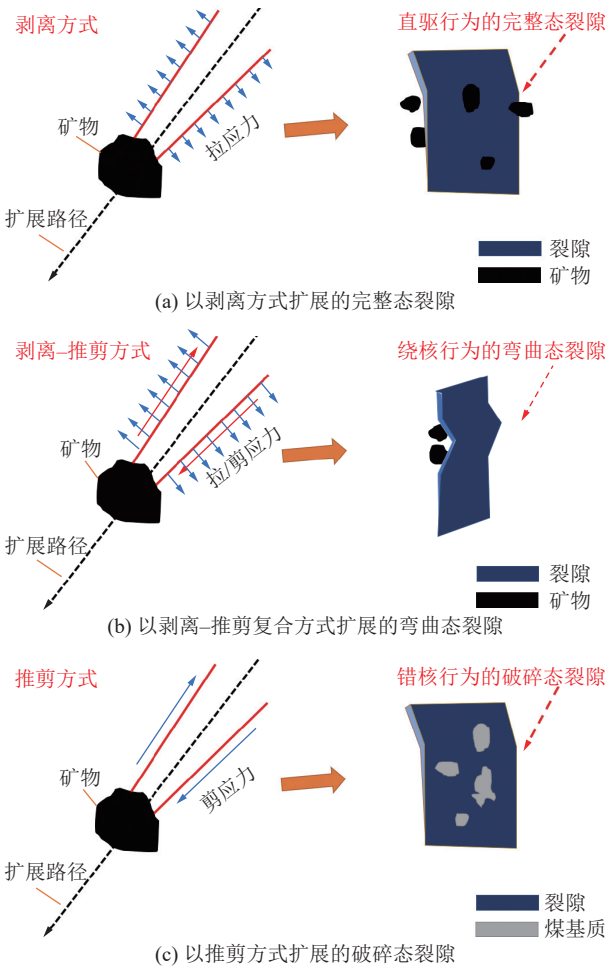


图 16　扩展路径含有矿物的裂隙受力方式及裂纹演绎结构

Fig.16　Crack stress mode and crack deduction structure of crack propagation path containing minerals

蜒曲折程度降低，裂隙趋于平整；随着围压的进一步提升，图 15c 矿物集中区为下端部区，该围压条件主导裂隙发育方式表现为翼裂纹部分发育，次生裂纹完全发育，结合图 17c 可知，翼裂纹发育受限，但未缺失其完整性，而次生裂纹的发育情况由矿物的分布特征可分为 2 种，左上角矿物含量较高，由于围压会增加剪切成分从而抑制拉伸成分，因此随次生裂纹边缘剪切力的进一步与增加，由绕核行为导致的曲折裂纹转变为强推剪作用下的支离破碎态裂纹，

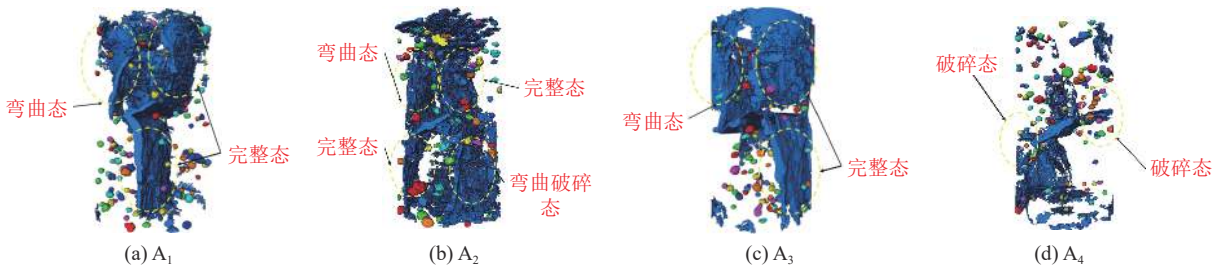


图 17　失稳煤体矿物对裂隙作用形式

Fig.17　Action form diagram of unstable coal mineral on fracture

反观右下角次生裂纹，在其扩展路径上几乎无矿物存在，因此裂隙发育程度极其完整和平缓；图 15d 矿物集中区为上尖端区，而裂隙起裂于尖端区，因此起裂角计算误差率呈跃迁式增加，该围压条件主导裂隙发育方式表现为翼裂纹发育受限，次生裂纹发育完全，结合图 17d 可知，翼裂纹几乎停止发育，且扩展程度和完整性较低，次生裂纹同主裂隙几乎共线发育，走向平缓但残缺度较高，原因在于，围压的进一步增加使得剪切成分和拉伸成分分别提升和降低，进而导致推剪作用强化和剥离作用弱化，由推剪–剥离复合作用导致的绕核行为转变为极致强推剪作用导致的相对滑动行为，因此裂隙残缺度较高。上述实验结果认为，围压为裂隙演化方式的影响主体，煤体由矿物导致的非均质性对于裂隙的演化方式影响次之并建立在围压作用的基础之上。

4　结　　论

1) 不同分区煤体损伤存在明显差异，随围压增加，强损伤区由裂隙尖端过渡到煤体的上下端，且较微裂隙之间相互贯通而言，微裂隙同大尺寸裂隙更易相互贯通并产生新的宏观裂隙。

2) 围压可对裂隙发育产生不同程度的抑制效果。在扩展速率上表现为：围压为 3,5 MPa 时，体现出缓慢增加、快速增加和平稳增加 3 个发展阶段，围压为 7,9 MPa 时，体现出平缓增加、快速增加和缓慢增加 3 个发展阶段，可较好的表征裂隙的时间演化规律。

3) 围压升高使得煤体由拉伸破坏向拉伸–剪切复合破坏向剪切破坏的方式过渡，结合摩尔–库伦强度准则认为：围压会增强煤体的抗剪强度，即围压可通过增加煤体剪切破坏成分和抗剪强度 2 种途径强化其力学性能。

4) 基于断裂力学最大周向应力准则建立双轴加载模型下考虑张开型裂隙张开度的理论分析，并考虑 T 应力求得裂隙起裂角度的精确理论值，结果与实际起裂角符合度较高，且围压增加会使得起裂角理论值和实际值偏差率增加。

5) 围压主导裂隙的演化特征通过改变裂隙受力方式实现，而不同受力方式结合裂隙扩展路径上的矿物分布特征会导致不同的裂隙形态。裂隙的 3 种受力方式为相对纯粹拉应力、拉伸–剪切复合应力和相对纯粹剪应力分别导致直驱、绕核和错核 3 种扩展行为。

参考文献(References):

[1] 张培森，许大强，颜　伟，等. 不同围压下峰后循环载荷对砂岩力学及渗流特性的影响研究[J]. 煤炭科学技术，2023，51(7)：94−105.
ZHANG Peisen, XU Daqiang, YAN Wei, *et al*. Effect of post-peak cyclic load on mechanics and seepage characteristics of sandstone under different confining pressures[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 94−105.

[2] HAN Yong, ZHAO Yuemao. Effect of the degree of natural cracks development on the mechanical properties of marble[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(8): 301.

[3] 郭奇峰，武　旭，蔡美峰，等. 预制裂隙花岗岩的裂纹起裂机理试验研究[J]. 煤炭学报，2019，44(S2)：476−483.
GUO Qifeng, WU Xu, CAI Meifeng, *et al*. Crack initiation mechanism of pre-existing cracked granite[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 476−483.

[4] CHEN Miao, YANG Shengqi, Pathegama GAMAGE Ranjith, *et al*. Fracture processes of rock-like specimens containing nonpersistent fissures under uniaxial compression[J]. Energies, 2019, 12(1): 79.

[5] 谭　皓，宋勇军，郭玺玺，等. 冻融裂隙砂岩细观损伤与应变局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报，2022，41(12)：2485−2496.
HAO Tan, SONG Yongjun, GUO Xixi, *et al*. Research on meso-damage and strain localization of fractured sandstone after freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2485−2496.

[6] 李　静，刘　晨，刘惠民，等. 基于数字岩心的页岩储层岩石细观损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2022，41(6)：1103−1113.
LI Jing, LIU Cheng, LIU Huiming, *et al*. Study on meso-damage mechanism of shale reservoir rock based on digital cores[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1103−1113.

[7] 李兆霖，王连国，姜崇扬，等. 基于实时 ct 扫描的岩石真三轴条件下三维破裂演化规律[J]. 煤炭学报，2021，46(3)：937−949.
LI Zhaolin, WANG Lianguo, JIANG Chongyang, *et al*. Three-dimensional fracture evolution patterns of rocks under true triaxial conditions based on real-time ct scanning[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 937−949.

[8] 王登科，曾凡超，王建国，等. Ct 显微工业 ct 的受载煤样裂隙动态演化特征与分形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(6)：1165−1174.
WANG Dengke, ZENG Fanchao, WANG Jianguo, *et al*. Dynamic evolution characteristics and fractal law of loaded coal fractures by micro industrial[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1165−1174.

[9] AlMarzouqi H. Digital rock physics: using ct scans to compute rock properties[J]. Ieee Signal Processing Magazine, 2018, 35(2): 121−131.

[10] CHEN. Lexin, GUO Weiyao, ZHANG Dongxiao, *et al*. Experimental study on the influence of prefabricated fissure size on the directional propagation law of rock type-i crack[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 160: 105274.

[11] 王　磊，刘化强，李少波，等. 不同围压下含预制裂隙煤体裂隙演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报，2023，40(4)：786−797.

WANG Lei, LIU Huaqiang, LI Shaobo, *et al*. Frature evolution characteristics of prefabricated crack coal under different confining pressures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(4): 786−797.

[12] 煤和岩石物理力学性质测定方法 第 1 部分：采样一般规定：GB/T 23561.1—2009[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
Methods for Determining the Physical and Mechanical Properties of Coal and Rock-Part 1: General Requirements for Sampling: GB/T 23561.1—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.(in Chinese)

[13] CHOI C S, LEE Y K, SONG J J. Equivalent Pore Channel Model for Fluid Flow in Rock Based on Microscale X-ray CT Imaging[J]. Materials, 2020, 13: 2619.

[14] SAXENA Nishank, HOWS Amie, HOFMANN Ronny, *et al*. Rock properties from micro-ct images: digital rock transforms for resolution, pore volume, and field of view[J]. Advances in Water Resources, 2019, 134: 103419.

[15] 王　凯，付　强，徐　超，等. 考虑射束硬化的煤岩 ct 数据阈值分割方法及应用[J]. 煤田与地质勘探，2023，51(4)：11−22.
WANG Kai, FU Qiang, XU Chao, *et al*. Threshold segmentation method and application of ct scanning data of coal and rock samples considering beam hardening effect[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 11−22.

[16] SCHMITT RAHNER Mayka, HALISCH Matthias, PERES FERNANDES Celso, *et al*. Fractal dimensions of pore spaces in unconventional reservoir rocks using x-ray nano- and micro-computed tomography[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 55: 298−311.

[17] 张　昆，孟召平，金　毅，等. 不同煤体结构煤的孔隙结构分形特征及其研究意义[J]. 煤炭科学技术，2023，51(10)：198−206.
ZHANG Kun, MENG Zhaoping, JIN Yi, *et al*. Fractal characteristics of pore structures on different coal structures and its research significance[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 198−206.

[18] AFSHARI Moein MOHAMMAD Javad, VALLEY Benoît, Evans KEITH F. Scaling of fracture patterns in three deep boreholes and implications for constraining fractal discrete fracture network models[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(6): 1723−1743.

[19] FERANIE Selly, FAUZI Umar, BIJAKSANA Satria. 3d fractal dimension and flow properties in the pore structure of geological rocks[J]. Fractals, 2011, 19(3): 291−297.

[20] ALFONSO Ismeli, BELTRÁN Alberto, ABATAL Mohamed, *et al*. Fractal dimension determination of rock pores by multi-scale analysis of images obtained using om, sem and xct[J]. Fractals, 2018, 26(5): 1850067.

[21] OHTSU. Acoustic emission (AE) and related non-destructive evaluation (NDE) techniques in the fracture mechanics of concrete [M]. United Kingdom: Woodhead Publishing, 2021.

[22] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京：科学出版社，2013.

[23] ELFGREN L, SHAH S P, HILLERBORG Arne. Analysis of concrete structures by fracture mechanics[M]. London: Chapman and Hall, 1991: 305.

[24] 李世愚. 岩石断裂力学 [M]. 北京：科学出版社，2016.

[25] MUSKHELISHVILI N I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity: fundamental equations, plane theory of elasticity, torsion, and bending[M]. Groningen: P. Noordhoff, 1953: 704.

[26] 赵彦琳，范　勇，朱哲明，等. T 应力对闭合裂纹断裂行为的理论和实验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(6)：1340−1349.
ZHAO Yanlin, FAN Yong, ZHU Zheming, *et al*. Analytical and experimental study on the effect of t-stress on behavior of closed cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1340−1349.

[27] 陈　篪. 论裂纹扩展的判据[J]. 金属学报，1977，13(1, 2)：57−72.
CHEN Chi. On the criterion of crack propagation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1977, 13(1, 2): 57−72.

[28] 王俊杰，黄诗渊，郭万里，等. 考虑裂缝几何特性和 t 应力的类岩石材料压剪张拉断裂准则[J]. 岩土工程学报，2020，42(9)：1622−1631.
WANG Junjie, HUANG Shiyuan, GUO Wanli, *et al*. Compression-shear tension fracture criteria for rock-like materials considering geometric characteristics of cracks and t-stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1622−1631.

[29] LEBLOND JeanBaptiste. Basic results for elastic fracture mechanics with frictionless contact between the crack lips[J]. European Journal of Mechanics – A/Solids, 2000, 19(4): 633−647.

[30] VARVANI-FARAHANI A, MIRANI A S. Derivation of closure-free crack growth rate under biaxial fatigue loading conditions[J]. Scripta Materialia, 2003, 48(3): 241−247.

[31] MOUSAVI S Mahmoud, Aifantis ELIAS C. Dislocation-based gradient elastic fracture mechanics for in-plane analysis of cracks[J]. International Journal of Fracture, 2016, 202(1): 93−110.

[32] ELMHAIA Oussama, BELAASILIA Youssef, ASKOUR Omar, *et al*. Numerical analysis of frictional contact between crack lips in the framework of linear elastic fracture mechanics by a mesh-free approach[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 124: 103749.

[33] GUO Meng, TAN Yiqiu, WANG Linbing, *et al*. A state-of-the-art review on interfacial behavior between asphalt binder and mineral aggregate[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2018, 12(2): 248−259.

[34] 胡训健，卞　康，刘　建，等. 细观结构的非均质性对花岗岩蠕变特性影响的离散元模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(10)：2069−2083.
HU Xunjian, BIAN Kang, LIU Jian, *et al*. Discrete element simulation study on the influence of microstructure heterogeneity on the creep characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2069−2083.

[35] DU Hongbo, DAI Feng, WEI Mingdong, *et al*. Dynamic compression–shear response and failure criterion of rocks with hydrostatic confining pressure: an experimental investigation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(2): 955−971.