



煤岩孔裂隙结构特征对其损伤演化规律影响

赵怡晴 秦文静 金爱兵 曹志国 刘金博 秦琨

引用本文:

赵怡晴, 秦文静, 金爱兵, 等. 煤岩孔裂隙结构特征对其损伤演化规律影响[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 90–101.
ZHAO Yiqing, QIN Wenjing, JIN Aibing. Influence of pore–fracture structure characteristics of coal rock on its damage evolution law[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 90–101.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0153>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤岩孔裂隙结构分形特征及渗透率模型研究

Study on fractal characteristics of coal and rock pore fissure structure and permeability model
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 226–231 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.026>

基于显微CT扫描和统计强度的煤岩损伤破裂特性研究

Study on the damage and fracture characteristics of coal rock based on the X–ray micro–CT scanning technology and statistical strength theory
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 1–12 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2185>

高低温循环冲击作用下砂岩孔裂隙结构的演化特征

Evolutionary characteristics of sandstone pore–fracture structure under the action of high and low temperature cyclic impact
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 139–147 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1774>

超声波功率对煤体损伤特性及能量演化规律的试验研究

Experimental study on damage characteristics and energy evolution of coal by ultrasonic power
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 283–294 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1596>

深部煤储层孔裂隙结构对煤层气赋存的影响

Influence of deep coal pore and fracture structure on occurrence of coalbed methane: a case study of Daning–Jixian Block in eastern margin of Ordos Basin
煤炭科学技术. 2024, 52(8): 106–123 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1334>

浅埋煤层群裂隙演化规律及组合承载结构载荷研究

Research on the fracture evolution law and combined bearing structure load of shallow buried coal seam group
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 65–76 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1108>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

赵怡晴, 秦文静, 金爱兵, 等. 煤岩孔裂隙结构特征对其损伤演化规律影响[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 90–101.

ZHAO Yiqing, QIN Wenjing, JIN Aibing, *et al.* Influence of pore-fracture structure characteristics of coal rock on its damage evolution law[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 90–101.

煤岩孔裂隙结构特征对其损伤演化规律影响

赵怡晴^{1,2}, 秦文静^{1,2}, 金爱兵^{1,2}, 曹志国³, 刘金博^{1,2}, 秦 琨^{1,2}

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
3. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 100011)

摘要:煤岩孔裂隙发育扩展是造成煤岩损伤, 从而导致瓦斯突出、冲击地压、煤柱失稳等矿山灾害的主要原因, 探究煤岩压裂过程中裂隙破裂演化规律及煤岩损伤演化规律是预测煤岩动力灾害的前提。裂隙倾角分布、孔隙率为影响煤岩裂隙破裂规律的重要因素, 采用单轴压缩、CT 电子扫描和核磁共振试验对煤岩力学性能和孔裂隙结构进行分析, 通过煤岩裂隙分形维数和裂隙倾角分布特征, 表征煤岩内部裂隙结构; 同时结合数值模拟对不同裂隙倾角煤岩裂隙扩展和损伤演化规律进行分析。研究结果表明: ①裂隙倾角分布特征为影响煤岩力学特性的主要因素, 孔隙率为影响煤岩力学性质的次要因素。②结合室内试验和数值模拟, 单一裂隙煤岩抗压强度高于复杂裂隙煤岩抗压强度; 且当煤岩裂隙倾角以单一裂隙为主时, 急倾煤岩抗压强度>缓倾煤岩抗压强度>倾斜煤岩抗压强度。③单一裂隙煤岩相较于复杂裂隙煤岩, 复杂程度较低, 煤岩初始损伤较低, 在裂纹加速扩展阶段, 储存的应变能急速剧烈释放, 宏观表现为破碎程度较高的剪切破坏。④基于裂隙发育数量建立包含峰后阶段的煤岩损伤变量, 煤岩损伤演化过程呈指数型增长, 分为近似无损、初始损伤、损伤稳定发展阶段、损伤加速发育阶段、残余损伤阶段, 该损伤规律可为矿山灾害预测提供理论支撑。

关键词:煤岩; 孔裂隙结构; 破裂; 裂隙复杂度; 损伤演化

中图分类号: TD313 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)05-0090-12

Influence of pore-fracture structure characteristics of coal rock on its damage evolution law

ZHAO Yiqing^{1,2}, QIN Wenjing^{1,2}, JIN Aibing^{1,2}, CAO Zhiguo³, LIU Jinbo^{1,2}, QIN Kun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 100011, China)

Abstract: The development and expansion of fractures in coal rocks are the primary causes of mining disasters, such as gas outbursts, rock bursts, and instability of coal pillars. Investigating the fracture evolution process and damage evolution law in coal rocks is crucial for predicting dynamic hazards in coal mines. Fracture inclination angle and porosity are significant factors influencing the propagation behavior of fractures in coal rocks. In this study, we conducted uniaxial compression tests, CT electron scanning, and nuclear magnetic resonance experiments to analyze the mechanical properties and pore-fracture structure of coal rocks. We characterized the fractal dimension of internal fractures in coal rocks by analyzing their distribution characteristics along with fracture inclination angles. Additionally, numerical simulations were employed to analyze the propagation and damage evolution laws of fractures with different inclination angles in coal rocks. The research findings demonstrate that: ① The degree and distribution characteristics of fracture inclination angles significantly impact the complexity and fracturing behavior of coal rock; when a single dominant fracture exists, steeply inclined coal rock exhibits higher

收稿日期: 2024-01-26 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.12438/cst.2024-0153

基金项目: “煤炭开采水资源保护与利用”国家重点实验室 2017 开放基金资助项目 (SHJT-17-42.1); “东部草原区大型煤电基地生态修复与综合整治技术与示范”国家重点研发计划资助项目 (2016YFC0501100)

作者简介: 赵怡晴(1980—), 女, 四川南充人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zyq@ustb.edu.cn

通讯作者: 金爱兵(1974—), 男, 江苏兴化人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: jinaibing@ustb.edu.cn

compressive strength compared to gently inclined or nearly vertical ones; compressive strength is higher for single-fractured coals than complex-fractured ones. ② Porosity is the primary factor influencing the compressive strength of coal rock of the same type. As porosity increases, the compressive strength of coal rock decreases and exhibits a direct correlation with the presence of large pores. ③ Single-fracture coal and rock exhibit a lower level of complexity compared to complex fractured ones. This results in reduced stress concentration during compression, leading to less initial damage. However, during accelerated crack propagation, there is a rapid release of stored strain energy, resulting in higher levels of shear failure. ④ By establishing a variable for coal and rock damage based on the number of developed fractures, it can be observed that the evolution process follows an exponential growth pattern. This process can be divided into stages including approximate intactness, initial damage, stable development of damage, accelerated development of damage, and residual damage. Such observations provide theoretical support for predicting mining disasters.

Key words: coal rock; pore and fissure structure; rupture; crack complexity; damage evolution

0 引 言

煤岩为内部含有大量孔隙和裂隙等缺陷结构的天然损伤体^[1-2], 复杂矿业地质环境中煤层开采和巷道开挖等活动造成遗留煤柱、煤岩巷道等发生变形和破坏, 导致工程地质灾害的产生, 影响工程项目的安全性和稳定性。近年来, 随着煤岩开采数量增多导致浅层煤岩资源枯竭, 开采趋势转向地质环境复杂的深部, 地压、水压和地温^[3-6]等因素的改变使瓦斯突出、冲击地压、煤柱失稳等煤岩动力灾害产生的频率及强度急速增长, 导致煤岩失稳破坏的主要因素为煤岩中孔裂隙缺陷结构的发育扩展。因此, 开展研究煤岩孔裂隙结构特征对其裂隙演化规律和损伤演化规律的影响, 为煤岩动力灾害预测预警、遗留煤柱加固等工程问题的解决提供理论依据, 同时为提高矿业工程项目安全与稳定性提供有益参考。

由于煤岩的天然性, 其内部孔裂隙结构特征具有明显的各项异性^[7-8], 孔裂隙结构的复杂程度, 如孔隙率、裂隙倾角、裂隙分布规律均会对其裂隙演化规律产生影响^[9]。为研究煤岩孔裂隙结构特征, 国内外学者开展大量室内试验研究, 任建业等^[10]基于 Fluent 软件模拟分析裂隙分形维数、开度对煤岩基质的影响, 构建了不同分形维数和裂隙开度的二维裂隙煤岩体模型, 证明分形维数是影响裂隙发育扩展的主要因素。PU 等^[11]对带有预制闭合多裂隙的岩石试样进行单轴压缩试验, 研究证明裂缝倾角是影响岩体破坏模式的主要因素。武旭等^[12]通过对不同分布状态的正交型交叉裂隙岩石试样进行单轴压缩试验, 同时采用声发射探究裂隙对岩石力学特性及破裂特征的影响规律, 研究表明裂隙与加载方向的夹角是影响岩石强度的最主要因素。姜琳婧等^[13]通过对平行和垂直层理煤岩进行单轴压缩试验, 分析得煤岩层理是影响其力学性质的主要因素。基于此可发现分形维数与裂隙倾角均影响煤岩力学性质, 但

鲜少有学者研究分形维数与裂隙倾角之间关系, 笔者基于 CT 扫描数据探究煤岩分形维数与裂隙倾角之间关系。

国内外学者借助 CT 扫描、核磁共振等技术对煤岩内部孔裂隙结构特征进行分析^[14], 同时结合力学试验探究裂隙结构特征对煤岩压裂特性影响规律。李杰林等^[15]、孙中光等^[16]、周科平等^[17]利用核磁共振技术结合单轴压缩试验对岩石的孔隙结构进行了研究, 结果表明孔隙率越小, 岩石单轴抗压强度越高。程志林等^[18]基于 CT 扫描技术, 采用有限元方法开展了孔隙尺度下微观变形模拟试验, 研究表明随着孔隙率的增加, 有效模量几乎呈指数递减, 孔隙率对岩石力学性质影响大。但由于煤岩内部结构松散, 且在地压等外部环境下, 裂隙结构发育较多对煤岩力学性质造成较大影响。在裂隙分布对岩石力学性质影响方面, 任晓龙等^[19]沿不同层理角度制作了多个煤岩, 结合单轴压缩试验, 研究了层理角度对煤岩单轴力学特性和破坏模式的影响规律, 分析发现变形破坏方式与破坏模式随层理角度的不同而表现不同。卢志国等^[20]对 3 组不同层理角度标准煤样采用超声波测速、单轴压缩试验以及扫描电镜细观分析, 探究了层理对煤岩破裂的影响。由于煤岩内部结构复杂, 单一的室内试验无法定量分析孔裂隙结构特征对煤岩压裂性质的影响规律。范文臣等^[21]通过压剪试验和 RFPA2D 数值模拟, 探究了压剪复合作用下节理倾角对岩体破坏模式的影响和节理岩体破坏机理, 结果表明不同倾角的节理在不同程度上弱化了类岩石试件的抗剪强度。BAHAADDINI 等^[22-23]采用离散元软件 PFC2D、PFC3D 对岩石进行数值模拟, 研究了节理长度对岩石剪切特性的影响以及节理的方向、间距等几何参数对岩体破坏机理、单轴抗压强度的影响。

为研究孔裂隙结构对煤岩强度的影响机理, 对煤岩裂隙扩展规律及损伤演化规律进行研究。LIANG

等^[24]使用 RFP3D 研究了岩石异质性和预先存在的缺陷倾角对 3D 裂隙萌生和扩展的影响,研究发现岩样单轴抗压强度与缺陷倾斜度相关。许江等^[25]开展了不同加载速率剪切载荷作用下,含水平和垂直表面原生裂隙煤岩的裂隙开裂扩展时空演化模式、宏观裂隙形态及细观裂隙贯通机制的研究。陈新等^[26]采用 Rankine 最大拉应力准则和 Mohr-coulomb 压剪破坏准则分别作为拉伸和压剪破裂的判据,采用理论分析和数值模拟分析了两种破裂判据对应的破裂函数、开裂位置及开裂临界荷载,较好地解释了裂隙岩体起裂及贯通的力学机制。ZHANG 等^[27]基于应力阈值探究煤岩体在渐进破坏中的裂纹演化特征,该研究为注浆优化设计提供理论指导。依据裂隙演化规律对煤岩损伤进行研究分析可为注浆优化提供更为可靠理论支撑,EREMIN^[28]基于 Drucker-Prager 准则与连续损伤力学,研究了孔隙率对岩石单轴抗压强度的影响,使用有限差分法进行数值模拟并验证了模型的准确性。胡振襄等^[29]采用 NMR 技术研究了卸载岩体内部孔隙结构细观损伤演化规律,结果表明岩样的孔隙率随卸荷围压比的增大而增大,大直径孔隙对大理岩的损伤和破坏起主导作用。田彦德^[30]研究了页岩三轴压缩作用下的裂隙发展规律,分析发现孔隙率越大对岩石强度弱化越明显,且岩石损伤主要与裂隙数增加和裂隙贯通相关。LIU 等^[2]通过循环冲击荷载试验,发现煤岩表面裂纹扩展更

符合损伤因子的划分特征,但有关裂隙扩展数量与煤岩损伤演化的研究较少,笔者通过数值模拟建立裂隙扩展数量与煤岩损伤模型之间的量化关系。

综上所述,笔者基于 CT 扫描和核磁共振对煤岩孔隙率结构进行量化分析,同时采用室内试验和数值模拟相结合的手段,研究煤岩裂隙倾角分布对煤岩裂隙演化规律的影响,建立基于裂隙数量的煤岩损伤演化模型,表征煤岩在压裂过程中的损伤过程曲线,为煤岩动力灾害预测预警和遗留煤柱的加固提供理论基础和参考。

1 试验材料和方案

1.1 煤样准备

煤岩取自陕西省神木县大柳塔镇大柳塔煤矿的同一块煤岩,为保证试验结果的可靠性,煤样均按同一取芯方向钻取,且钻取过程中保持煤岩原生结构分布状态。按照岩石力学试验规程,将所取煤岩加工为直径 50 mm、高 100 mm 的标准圆柱试样用于单轴压缩、CT 扫描和核磁共振试验,根据煤岩裂隙表观走向将煤岩分单一裂隙煤岩和复杂裂隙煤岩两组。一般试验过程中,为消除单个样品导致的试验误差,通常每组选取 3 个典型煤样进行试验,考虑到复杂裂隙煤岩样品复杂度,B 组煤岩选取 6 个煤样进行试验;且根据 1:3 的比例 A、B 两组分别选用 1、2 个进行 CT 扫描试验,如图 1 所示。

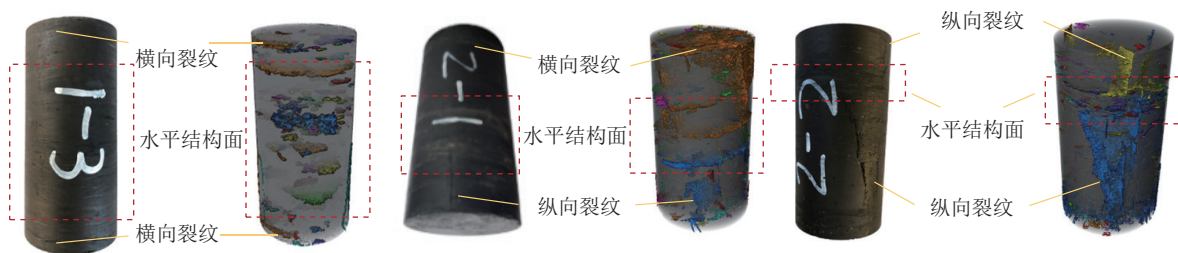


图 1 煤岩试样

Fig.1 Coal samples

1.2 微观检测试验

为获取煤样内部裂隙的分布特征,采用 CT 扫描技术和核磁共振技术对两组煤样的典型试样进行检测,试样分别为 1-3、2-1 和 2-2。CT 扫描设备为三英精密仪器有限公司 Nano Voxel 350 2E 型高分辨率工业显微 CT 系统,该设备最高分辨率 0.5 μm ,扫描仪最大扫面范围为 300 mm \times 300 mm,光耦合探测器对应像素为 2 048 \times 2 048。如图 2 所示,CT 扫描技术包括扫描系统、探测系统和控制系统 3 部分组成;

主要通过 X 射线技术无损识别煤样内部结构,并将煤样特征通过三维可视化进行显示。根据研究需求,本实验中扫描仪的扫描电压和扫描电流为 170 kV 与 50 μA ,分辨率为 31.6 μm ,最大曝光时间为 0.5 s,最大扫面范围为 300 mm \times 300 mm,光耦合探测器对应像素为 2 048 \times 2 048。

由于煤样尺寸较大,CT 实验中分辨率为 31.6 μm ,核磁共振技术受样品尺寸影响较小,故采用核磁共振技术检测煤样中小于 31.6 μm 的孔隙结构,

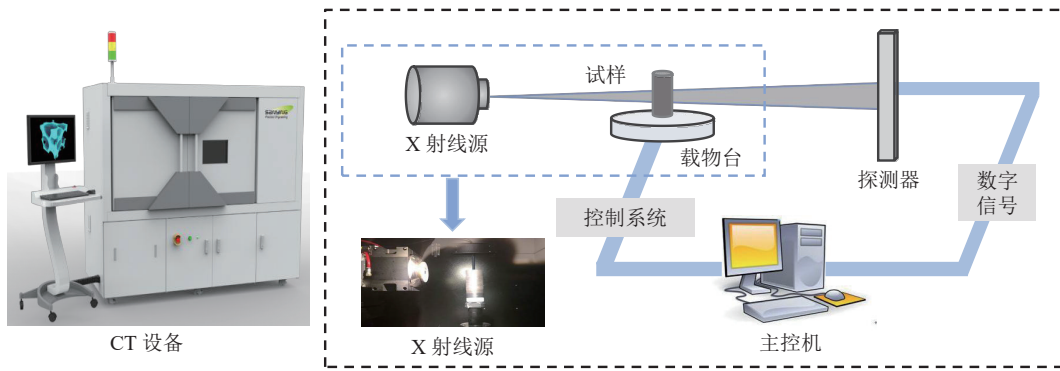


图 2 高分辨 X 射线三维扫描成像系统

Fig.2 High resolution X-ray three-dimensional scanning imaging system

核磁共振实验包括饱水处理以及煤样检测,如图 3 所示。饱水处理设备为南通华兴石油仪器有限公司生产的 ZYB-II 型真空加压饱和装置,设备加压舱尺寸为 5 cm,高度为 30 cm,真空压力<-0.1 MPa,最大加压值为 60 MPa;煤样检测设备为纽迈电子科技有

限公司生产的 MesoMR23-060H-1 岩体微细观结构分析系统,该设备共振频率为 23 MHz,磁体控温 25 ~ 35 ℃。首先将煤样在 15 MPa 压力下饱水 12 h,保证煤样孔隙中 100% 充满水;饱水后采用检测设备对所有煤样进行核磁共振弛豫测定。

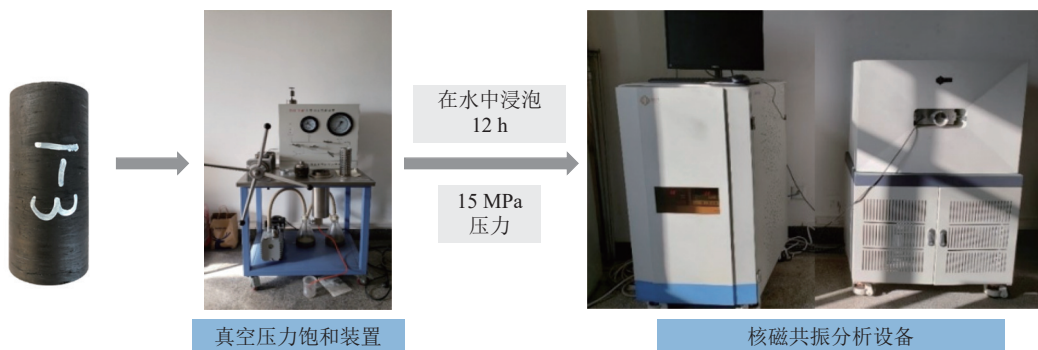


图 3 核磁共振实验设备

Fig.3 NMR test process

1.3 力学性能试验

单轴压缩试验采用压力测试装置为冠腾自动化公司生产的 YAW-600 型微机控制电液伺服岩石压力试验机,设备具有较高的精度和稳定性;包括单轴压缩系统和液压伺服控制两个系统,最大压力为 600 kN;可根据试验要求选择作用力或位移控制加载。在本实验中,采用位移加载控制,设定 0.001 5 mm/s 的加载速度,试样破坏时停止加载;加载过程中,同时记录应力-位移曲线,确保对试验过程进行完整监测。

2 室内试验结果分析

2.1 基于 CT 扫描的煤岩三维重构

2.1.1 煤岩裂隙结构三维重构及量化分析

为获得两组煤样的三维重构模型,对原始切片图像进行降噪滤波、阈值分割处理,如图 4 所示。在 CT 切片图像中,白色是高密度物质,代表杂质(矿

物质);黑色是低密度物质,代表孔裂隙;剩下的灰色部分是煤基质,如图 4a 所示。为提高切片的质量,降低噪声对后续三维模型的影响,依据灰度直方图对图像进行中值滤波处理,如图 4a 所示。为提取煤岩裂隙结构信息,通过设定合适的阈值,将灰度在一定范围内的目标分离出来,达到提取的目的。取煤样上中下 3 个部位的切片图像,选取 (30, 40)、(30, 45)、(30, 60) 三个阈值段对图像进行阈值分割。由图 4b 可以看出,选取 (30, 40) 的阈值段处理后煤岩裂隙仅有少部分,即该阈值范围小于裂隙灰度范围;选取 (30, 60) 的阈值段处理后煤岩裂隙附近的大量煤基质同时被选中,即该阈值范围大于裂隙的灰度值范围;经过调整阈值范围,最终确定 (30, 45) 为合适阈值段,即确定为裂隙的灰度值范围。经过图像处理得到如图 4c 所示的 2 组煤样的三维重构模型,其中灰色为煤基质、彩色为裂隙、不同颜色代表不同裂隙,图中从左往右依次为原始煤样、煤样三维重构

模型、裂隙提取模型。基于 CT 扫描技术的煤岩三维重构模型结果表明,煤岩表现裂隙与内部裂隙具有方向上的一致性。其中, A 组煤岩裂隙均匀性较好,裂隙倾角主要以水平为主; B 组煤岩两块煤岩裂隙均匀性较差,裂隙分布较为复杂,裂隙倾角存在多种类型。通过三维重构模型仅能对煤岩内部裂隙进行定性分析,为清晰对煤岩内部裂隙进行表征,利用体积分数和分形维数表征煤岩内部裂隙分布情况和复杂程度。利用盒维数可以求得煤岩内裂隙结构三维空间的分形维数 D 。盒维数法是用边长为 a 的立方

体盒子覆盖目标集合, $N(a)$ 记为盒子的最小数目, 则

$$D = -\frac{\lg N(a)}{\lg a} \quad (1)$$

裂隙的体积分数为裂隙空间像素总体积比上试件的体积, 计算结果见表 1。

三维空间内依据裂隙的体积分数和分形维数, 可看出计算所得分形盒维数介于 2~3 间, 且单一裂隙的分形维数小于复杂裂隙煤岩的分形维数, 即随着裂隙复杂程度减弱, 分形维数降低, 从数据还可看出裂隙体积分数与裂隙分形维数之间没有必然联系。

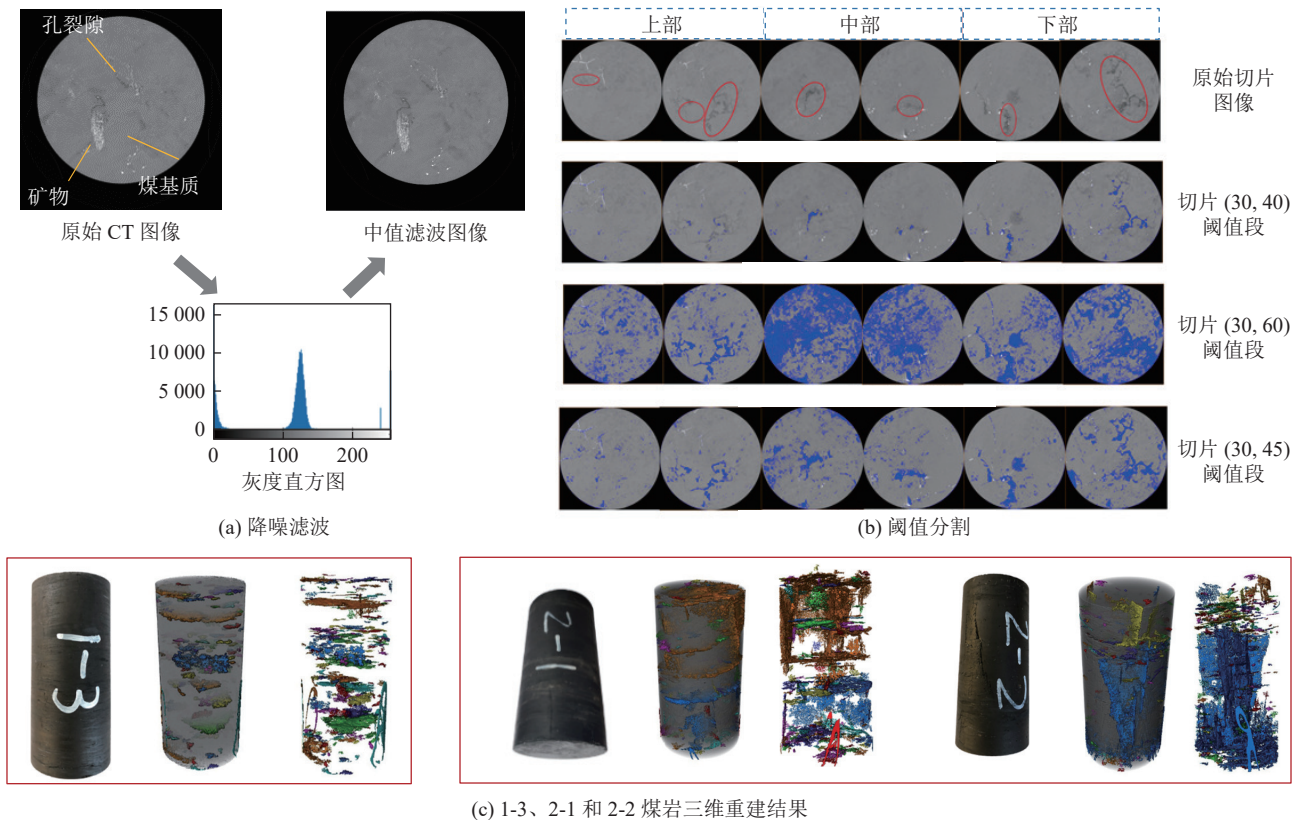


图 4 3 组不同裂隙煤样的三维重构模型

Fig.4 Three-dimensional reconstruction model of three groups coal samples

表 1 2 组煤样的裂隙结构统计

Table 1 Statistical analysis of fracture structures in two sets of coal samples

类型	编号	分形维数	裂隙体积分数
A组(单一裂隙煤岩)	1-3	2.20	0.42
B组(复杂裂隙煤岩)	2-1	2.27	0.40
	2-2	2.23	0.36

2.1.2 煤岩裂隙倾角量化分析

参考矿体倾角分类方法, 将煤岩裂隙倾角分为缓倾 ($0^\circ \sim 30^\circ$)、倾斜 ($30^\circ \sim 60^\circ$)、急倾 ($60^\circ \sim 90^\circ$) 3 类。为探究煤岩裂隙倾角对裂隙复杂程度的影响,

对煤岩裂隙倾角含量及分布情况进行分析, 基于 CT 数据统计得裂隙主要倾角分布表 (表 2), 其中体积分数为各倾角体积占总裂隙体积的体积分数。根据统计结果可得: A 组煤岩裂隙倾角分布主要以缓倾为主, 为单一裂隙煤岩; B 组煤岩两块试件缓倾、倾斜分布较为一致, 为复杂裂隙煤岩。

对 2 组煤岩三维重构模型进行裂隙倾角分布分析, 研究煤岩裂隙倾角对煤岩复杂程度的影响情况。图 5a 为 A 组煤岩试样 1-3 的裂隙倾角分布和三维重构模型剖面, 可看出其中缓倾、倾斜、急倾体积占比分别为 87.06%、4.81%、8.13%; 根据煤岩 1-3 的三维剖面可见, 裂隙自上而下均匀分布于煤样内部; 在

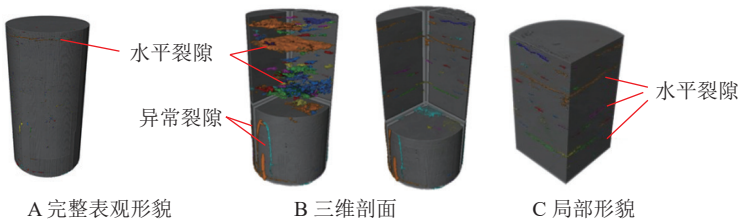
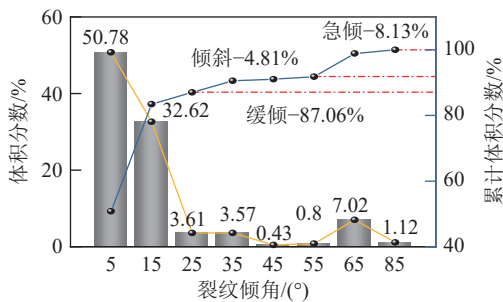
表 2 2 组煤样的裂隙倾角分布

Table 2 Distribution characteristics of fracture dip angles in two sets of coal samples

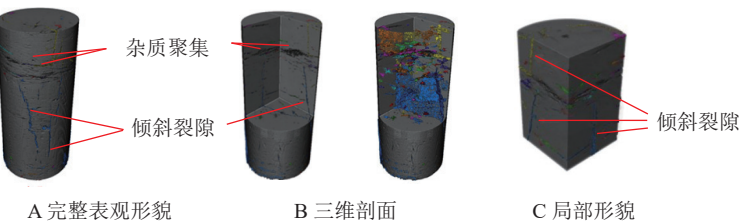
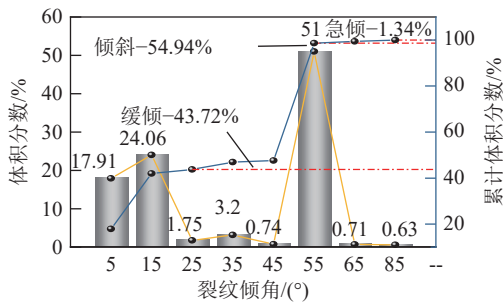
1-3			2-1			2-2		
倾角类型	倾角范围/(°)	体积占比/%	倾角类型	倾角范围/(°)	体积占比/%	倾角类型	倾角范围/(°)	体积占比/%
缓倾	0~10	50.78%	缓倾	0-10°	17.91%	缓倾	0-10°	19.91%
	10~20	32.67%		10-20°	24.06%		10-20°	21.03%
	20~30	3.61%		20-30°	1.75%		20-30°	9.93%
倾斜	30~40	3.57%	倾斜	30-40°	3.20%	倾斜	30-40°	3.51%
	40~50	0.43%		40-50°	0.74%		40-50°	1.14%
	50~60	0.80%		50-60°	51.00%		50-60°	42.23%
急倾	60~70	7.02%	急倾	60-70°	0.71%	急倾	60-70°	1.79%
	80~90	1.12%		80-90°	0.63%		80-90°	0.45%

煤样下半部分有非水平方向的黄色、蓝色异常裂隙，从三维重构模型中可知，该裂隙只存在于煤样外表面，在内部煤样体现，故不属于煤岩的原生裂隙。图 5b 为 B 组煤样的 2-1 试件缓倾、倾斜、急倾体积占比分别为 43.72%、54.94%、1.34%；2-2 试件缓倾、倾斜、急倾体积占比分别为 50.87%、46.88%、2.24%；从剖

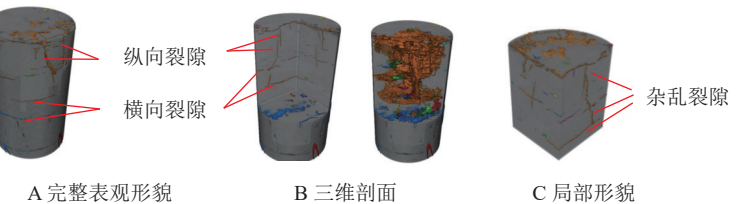
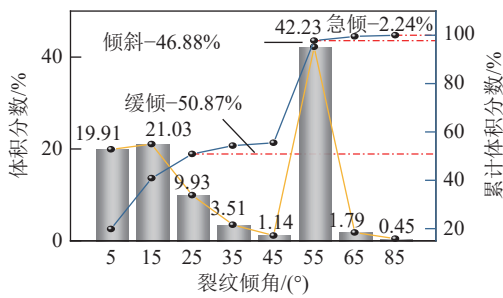
面可看出 2 块煤岩试样内部存在清晰的横线和不同倾角的裂隙面，从整体模型上可看出，煤样内部裂隙分布杂乱，均匀性较差，与煤样表面观形态一致。基于 CT 三维数据分析，可看出单一裂隙煤岩为一种优势倾角占比大于 80%，复杂裂隙煤岩存在 2 种倾角占比大于 40%。



(a) 1-3 煤岩裂隙倾角分布图和三维重构



(b) 2-1 煤岩裂隙倾角分布图和三维重构



(c) 2-2 煤岩裂隙倾角分布图和三维重构

图 5 煤样倾角分布图及三维剖析

Fig.5 Distribution diagram and three-dimensional analysis diagram of coal sample inclination angle

2.2 煤岩孔隙率和孔径分析

煤岩体内部除含较大裂隙之外,还有大量孔隙结构存在,孔隙结构在受压情况下可向裂隙结构转换,裂隙结构可萌生新的孔隙结构。为有效对这些

孔-裂隙结构进行量化分析,基于核磁共振原理和 T_2 数据,将煤岩试样内部孔隙分为:微小孔 ($r < 0.3 \mu\text{m}$)、中孔 ($0.3 \mu\text{m} \leq r < 3 \mu\text{m}$)、大孔 ($r \geq 3 \mu\text{m}$) 3 类,其中, r 为孔径。表 3 为所有煤岩试样孔隙率统计。

表 3 煤样孔隙率统计
Table 3 Statistics of coal sample porosity

类型	编号	孔隙率/%	平均孔隙率/%	孔径分布占比/%		
				$r < 0.3 \mu\text{m}$	$0.3 \leq r < 3 \mu\text{m}$	$r \geq 3 \mu\text{m}$
单一裂隙煤岩	1-1	17.98	18.26	0.968	0.032	0.001
	1-2	18.15		0.895	0.101	0.003
	1-3	18.66		0.948	0.049	0.002
复杂裂隙煤岩	2-1	14.78	15.09	0.925	0.066	0.009
	2-2	14.98		0.916	0.073	0.011
	2-3	14.38		0.935	0.059	0.005
	2-4	14.92		0.943	0.054	0.003
	2-5	15.74		0.903	0.087	0.010
	2-6	15.77		0.907	0.085	0.008

图 6 为 2 组煤岩试样孔径占比分布,图中曲线积分面积代表煤岩孔隙率数量,积分面积越大,对应孔径的孔隙数量就越多。且根据孔径曲线形态可分为单峰和双峰类型,通过计算可知,单峰类型中微小孔占比为 95% 左右,双峰类型中微小孔占比为 91% ~ 93%,明显单峰类型的煤岩孔隙率高于双峰类型煤岩孔隙率,说明微小孔是决定煤岩孔隙率高低的因素。根据表 3 可知,各煤样的第 1 个峰和第 2 个峰面积之和均占总谱面积的 99% 左右,表明煤岩的微小孔和中孔发育良好,大孔发育差。且根据图 7 可看出,单一裂隙煤岩的孔径分布为单峰曲线,复杂裂隙煤岩的孔径分布为双峰曲线,由此可知

煤岩孔隙和裂隙之间存在相关性。

2.3 孔裂隙结构对煤岩力学特性影响分析

表 4 为煤岩单轴压缩测试结果统计,由于 1-2 试样的数据偏差较大,故剔除 1-2 数据进行分析。根据数据统计得 A、B 两组煤岩的平均单轴抗压强度分别为 35.48、20.25 MPa;弹性模量分别为 1.79、1.72 GPa。根据图 7b 可知,在煤岩试样达到承载能力开始屈服之前,煤岩试样的变形并不受孔裂隙结构的影响,孔裂隙结构仅影响煤岩峰值强度和峰值附近的屈服过程。因此,A 组煤岩抗压强度远高于 B 组煤岩抗压强度,A 组煤岩弹性模量略高于 B 组煤岩弹性模量。

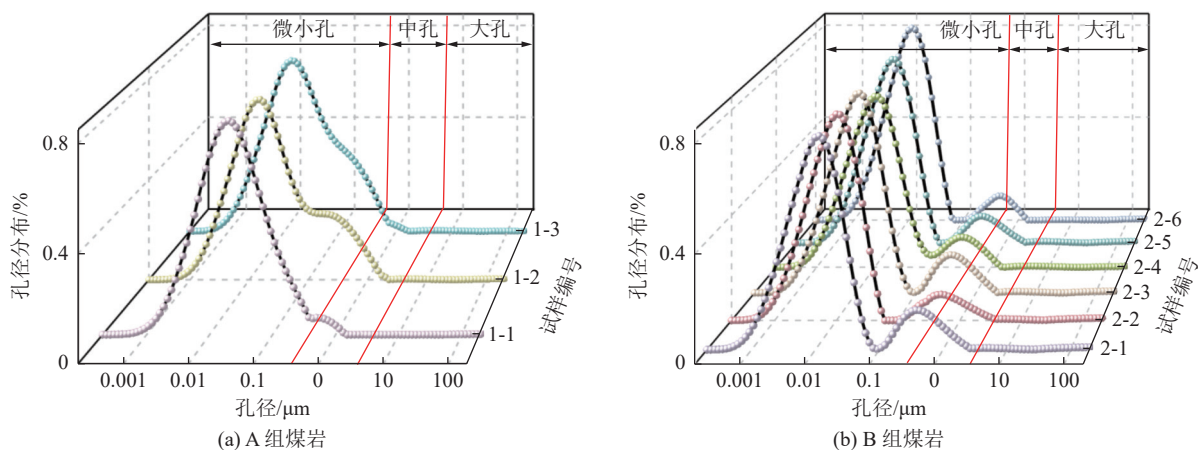


图 6 煤样孔径占比分布
Fig.6 Distribution map of coal sample pore size proportion

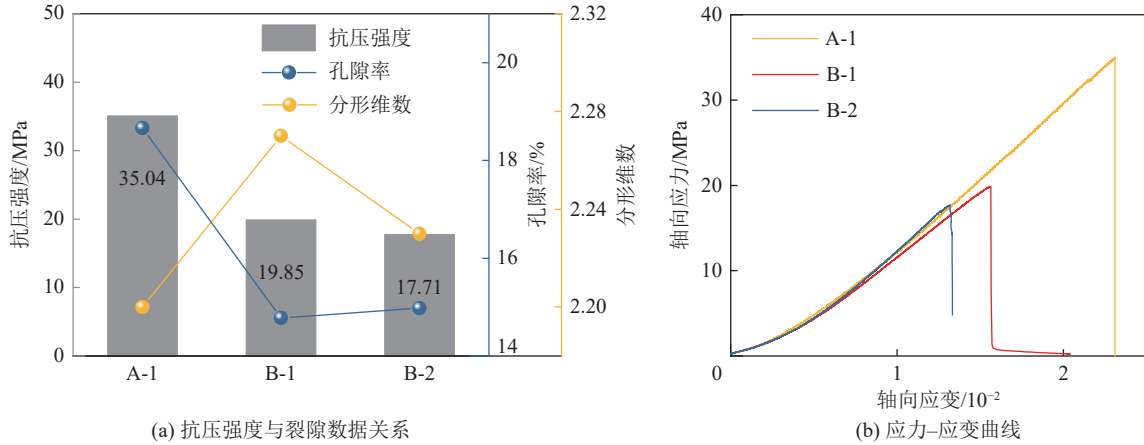


图 7 煤样力学性质数据曲线

Fig.7 Coal sample mechanical property data curves

表 4 煤样单轴压缩测试结果

Table 4 Uniaxial compression test results of coal samples

类型	编号	主要倾角	孔隙率/%	孔隙率均值/%	σ_c /MPa	σ_c 均值/MPa	E /GPa	E 均值/GPa
A 单一裂隙煤岩	1-1	缓倾	17.98	18.26	35.04	35.48	1.79	1.79
	1-2		18.15		14.28			
	1-3		18.66		35.91			
B 复杂裂隙煤岩	2-1	2种以上主要倾角	14.78	15.09	19.85	20.25	1.54	1.72
	2-2		14.98		17.71		1.62	
	2-3		14.38		22.27		1.60	
	2-4		14.92		22.18		1.84	
	2-5		15.74		17.08		1.71	
	2-6		15.77		22.39		2.01	

根据岩石孔隙效应理论可知，岩石微观孔隙结构会影响岩石组分间的黏聚力，从而影响岩石的强度，即随着孔隙率增高，抗压强度降低。比较表 4 中 2 组煤岩的孔隙率可知，A 组 (1-3) 煤样孔隙率 > B 组 (2-1、2-2) 煤样孔隙率，但 A 组 (1-3) 煤样 σ_c > B 组 (2-1、2-2) 煤样 σ_c 。因此，对于含局部孔裂隙等缺陷结构的煤岩而言，煤岩孔隙结构对于煤岩抗压强度的影响不甚明显，即煤岩孔隙率并非影响煤岩力学强度的主要因素。

为具体分析孔裂隙结构特征对煤岩力学强度的影响作用，对 1-3、2-1、2-2 三个含 CT 数据的试样进行分析，如图 7 所示。对比 A、B 两组分形维数的关系 (图 7a)，A 组 (1-3) 煤样分形维数 < B 组 (2-1、2-2) 煤样分形维数，结合图 7b 发现，随着煤岩裂隙倾角分布复杂程度增高，煤岩力学强度随之降低。煤岩材料为联系又非联系的介质，其内部裂隙结构存在影响岩石组分间的接触，故其分形维数与抗压强度存在很好相关性。综上所述，裂隙倾角的复杂程度是煤岩力学性质的主要因素，孔隙率为影响煤岩

力学性质的次要因素。

3 数值模拟试验

为量化分析煤岩在单轴压缩过程中的损伤程度，使用 PFC3D 模拟不同工况下煤岩单轴压缩试验，探究单轴压缩过程中煤岩损伤情况。

3.1 模型构建

为探究单一裂隙倾角下煤岩裂隙演化规律的变化趋势，在 PFC3D 中建立直径为 50 mm、高为 100 mm、裂隙分布服从高斯分布的煤岩模型，基于 A-1 煤岩试样力学特性设定煤岩模型参数见表 5，模拟结果应力-应变曲线与室内试验结果基本一致，如图 8a 所示，经过计算可得，煤岩试样的抗压强度相对误差仅为 0.004%。为验证模型的可行性，保证其他参数不变，将缓倾、倾斜、急倾裂隙占比调整为 49%、49%、2%，模拟复杂煤岩模型单轴压缩，结果如图 8b 所示，煤岩试样的抗压强度和弹性模量和 B 组 2 块煤岩的相对误差为 0.019%。可以看出该数值模型参数可以较好的模拟煤岩的单轴压缩试验过程。

但由于数值模型中刚性颗粒在相互作用过程中难以发生变形或损伤,不能模拟初始压密阶段,导致模拟的峰值应变通常低于试验值。

基于此模型参数,模拟 3 组单一裂隙煤岩模型和 3 组复杂裂隙煤岩模型,测试结果见表 6。A'-1、A'-2、A'-3、B'-1、B'-2、B'-3 的单轴抗压强度分别为:35.20、32.08、54.55、19.14、24.47、30.22 MPa。可看出,单一类型煤岩裂隙强度高于复杂裂隙煤岩,验证裂隙倾角的复杂度是煤岩力学各向异性的本质原因。

表 5 数值模拟参数

Table 5 Numerical simulation parameters

PFC3D数值模型细观参数	煤岩数值
deformemod	1.2×10^9
krat	1.0
pb_deformemod	1.2×10^9
krat	4.9
pb_ten	40.2×10^6
pb_coh	40.2×10^6

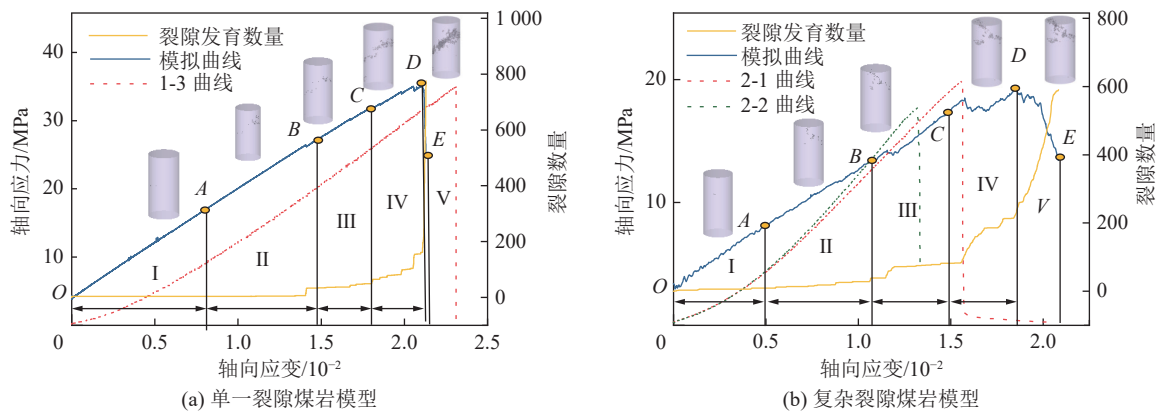


图 8 数值模拟与室内试验结果对比

Fig.8 Comparison between numerical simulation and indoor test results

表 6 数值模拟单轴压缩测试结果

Table 6 Numerical simulation uniaxial compression test results

类型	编号	缓倾占比/%	倾斜占比/%	急倾占比/%	抗压强度/MPa
单一裂隙煤岩	A'-1	87.06	6.47	6.47	35.20
	A'-2	6.47	87.06	6.47	32.08
	A'-3	6.47	6.47	87.06	54.55
复杂裂隙煤岩	B'-1	49	49	2	19.14
	B'-2	49	2	49	24.47
	B'-3	2	49	49	30.22

3.2 煤岩裂隙倾角对煤岩裂隙演化规律

通过对不同裂隙倾角的煤岩模型进行单轴压缩模拟,得如图 9 所示的应力-应变曲线和裂隙数量发育,结合图 8 观察可知:随着裂隙倾角的不同煤岩表现除不同的裂隙扩展和破坏模式。分析 3 组煤岩的裂隙演化规律:由于数值模型中刚性颗粒在相互作用过程中难以发生变形或损伤,不能模拟初始压密阶段,故将第 1 个裂隙起裂时间之前定为压密阶段(OA 阶段),起裂位置位于 A 点;可发现起裂时间主要与煤岩强度有关,随着煤岩强度的增加,起裂时间越晚。AB-BC 阶段为新裂隙萌生和发育阶段,新裂隙的萌生主要与倾角走向与强度有关,裂隙发育的走

向与裂隙倾角走向几乎一致,BC 阶段裂隙发育程度随着煤岩强度的增加而减少。CD 阶段为新裂隙开裂扩展阶段,随着应力加载,裂隙沿着主裂隙发育扩展逐渐形成宏观剪切破坏,随着煤岩强度增加,破坏时产生的裂隙数量越少。在破坏形成时,煤岩模拟内依旧存在残余应变,即 DE 阶段-峰后阶段,随着强度的增加,煤岩模型残余强度越高,峰后阶段越久,裂隙此时生成的数量越多;且由图 9b 可以看出,在峰后阶段,若裂隙继续扩展阶段受到煤岩体内坚硬颗粒的影响,裂隙角度便会发生变化,裂隙扩展受阻,导致峰值后未出现大幅度降低,但随着裂隙继续加载,最终形成应力降低,煤岩完全贯通破坏。

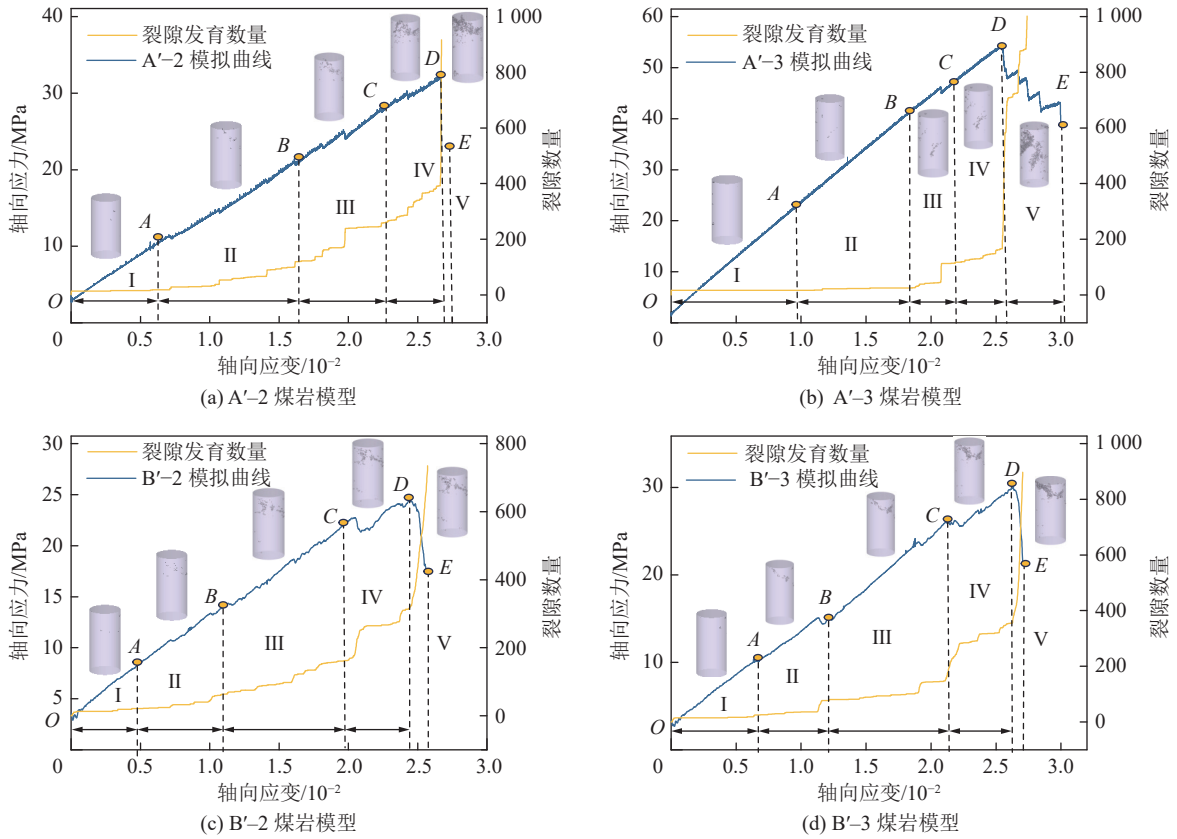


图 9 数值模拟应力应变、裂隙发育趋势曲线

Fig.9 Numerical simulation stress-strain and fracture development trend curves

3.3 基于裂隙扩展数量的煤岩损伤演化分析

煤岩的损伤演化过程可以看作是煤岩变形破坏中的裂隙发育过程，脆性较强煤岩在压缩过程中易发生突发性破坏，脆性较弱煤岩在压缩过程中为渐进破坏。为描述煤岩在单轴压缩过程中损伤累积，基于裂隙数量发育数量定义损伤变量为

$$D = \frac{N_n}{N_{max}} \quad (2)$$

式中： N_n 为任意状态下的裂隙发育数量，且 $N_n \in [0, N_{max}]$ ； N_{max} 为岩石完全破坏时裂隙发育数量； $D=0$ 为煤岩未开始裂隙萌生， $D=1$ 为煤岩完全发生破坏。

该模型优势为同时考虑岩石峰后阶段，计算结果如图 10 所示。结合图 9 所示的应力-应变曲线，可将煤岩损伤演化过大致分为 5 个阶段：第 1 阶段—近似无损阶段：此阶段煤岩处于压密状态，没有次生裂隙萌生，原生裂隙在应力作用下压密闭合，随着裂隙复杂程度增加，此阶段时间越短。第 2 阶段—初始损伤阶段：当第 1 个次生裂隙开始萌生，煤岩损伤进入此阶段，损伤变量开始增加，但增幅较小。第 3 阶段—损伤稳定发展阶段：该阶段新裂隙的萌生发育耗散部分能量，损伤逐渐增加；单一裂隙煤岩脆性较强，故此阶段损伤依旧保持稳定。第 4 阶段—损

伤加速发育阶段：当煤岩内部裂隙贯通形成宏观裂隙时，煤岩发生脆性破坏，此时能量迅速释放，试样达到峰值强度，煤岩损伤加剧。第 5 阶段—残余损伤阶段：煤岩达到峰值强度后，依据存在残余强度，此时损伤演化曲线增速减缓，并达到峰值。由此可见，基于裂隙表征损伤演化过程较好的反映煤岩单轴压缩破坏的整个过程。

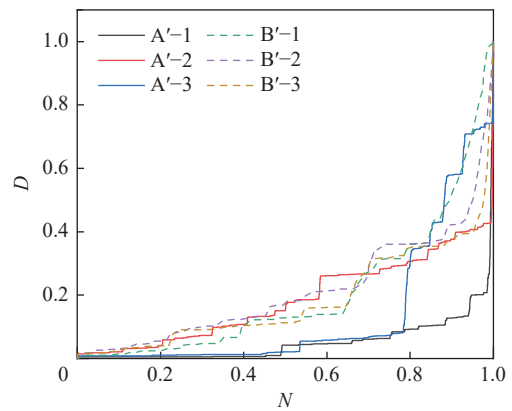


图 10 煤岩裂纹数量-损伤变化

Fig.10 Coal rock crack quantity damage variation chart

4 结 论

1) 煤岩表观裂隙形态与 CT 扫描裂隙形态高度

一致,单一裂隙煤岩的优势裂隙倾角体积占比大于80%,复杂裂隙煤岩存在两组体积大于40%的裂隙倾角。

2) 煤岩裂隙倾角分布特征为影响煤岩力学特性的主要因素,煤岩孔隙率为影响煤岩力学性质的次要因素。

3) 单一裂隙煤岩抗压强度高于复杂裂隙煤岩抗压强度;且当煤岩裂隙倾角以单一裂隙为主时,急倾煤岩抗压强度>缓倾煤岩抗压强度>倾斜煤岩抗压强度。

4) 单一裂隙煤岩相较于复杂裂隙煤岩,复杂程度较低,煤岩初始损伤较低,在裂纹加速扩展阶段,储存的应变能急速剧烈释放,宏观表现为破碎程度较高的剪切破坏。

5) 建立的损伤演化模型包含煤岩压缩过程中的峰后阶段,该模型较好反映煤岩内部微裂隙压密闭合、裂隙萌生、裂隙发育扩展贯通至煤岩宏观破坏的整个过程,分为近似无损、初始损伤、损伤稳定发展阶段、损伤加速发育阶段、残余损伤阶段。

本文将煤岩分为单一裂隙煤岩和复杂裂隙煤岩,通过对两组煤岩孔裂隙结构特性进行量化分析,探究裂隙复杂度对裂隙煤岩的裂隙破裂演化规律和损伤演化的影响,为煤矿工程的灾害预防提供理论与工程实际意义,研究中仅对裂隙倾角进行了分析,今后也会研究将裂隙倾向引入煤岩裂隙破裂演化规律中,并继续开展相应的压裂机理研究和探索。

参考文献(References):

- [1] 冯增朝,赵阳升. 岩体裂隙尺度对其变形与破坏的控制作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 78-83.
FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng. Control effect of fissure scale on deformation and failure of rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 78-83.
- [2] LIU Y H, ZHAO H B, WANG A W, et al. Influence of cyclic dynamic disturbance on damage evolution and zoning effect of coal-rock under local static load constraint[J]. *Geohazard Mechanics*, 2023, 1(4): 263-276.
- [3] GU H L, TAO M, LI X B, et al. Dynamic response and meso-deterioration mechanism of water-saturated sandstone under different porosities[J]. *Measurement*, 2021, 167: 108275.
- [4] 李业学,张启明,周炜,等. 干燥和饱水砂岩孔隙度对应力波能耗的影响[J]. 实验力学, 2020, 35(1): 174-182.
LI Yexue, ZHANG Qiming, ZHOU Wei, et al. On the influence of dry and saturated sandstone porosity on stress wave energy consumption[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(1): 174-182.
- [5] 杨永明,鞠杨,陈佳亮,等. 温度作用对孔隙岩石介质力学性能的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 856-864.
YANG Yongming, JU Yang, CHEN Jialiang, et al. Mechanical properties of porous rock media subjected to temperature effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 856-864.
- [6] WANG K, ZHANG X, DU F, et al. Numerical study on damage response and failure mechanism of gas-containing coal-rock combination under confining pressure effect[J]. *Fuel*, 2023, 349: 128683.
- [7] SUN Z, ZHAO Y X, GAO Y R, et al. Effect of size and anisotropy on mode I fracture toughness of coal[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, 129: 104170.
- [8] HEIDARI MOGHADDAM R, GOLSHANI A. Experimental study on fracture propagation in anisotropy rock under cyclic hydraulic fracturing[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 295: 109775.
- [9] 杨琪,于岩斌,崔文亭,等. 单轴压缩下煤岩微观结构参数表征及演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 88-95.
YANG Qi, YU Yanbin, CUI Wenting, et al. Fracture evolution of coal under uniaxial compression based on X-ray microscopic imaging[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(4): 88-95.
- [10] 任建业,李雨成,张欢,等. 单裂隙结构特征对煤岩体内瓦斯流动特性的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3): 633-642.
REN Jianye, LI Yucheng, ZHANG Huan, et al. The influence of single fracture structure characteristics on the gas flow properties in coal-rock mass[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(3): 633-642.
- [11] PU C Z, CAO P. Failure characteristics and its influencing factors of rock-like material with multi-fissures under uniaxial compression[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(1): 185-191.
- [12] 武旭,王帆,席迅,等. 正交交叉裂隙岩石强度特征与破裂机理试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2681-2690.
WU Xu, WANG Fan, XI Xun, et al. Experimental investigation on the strength characteristics and fracture mechanism of rock with orthogonally crossed cracks[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2681-2690.
- [13] 姜琳婧,赵会杰,赵怡晴,等. 层理煤岩浸水前后力学性质研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 97-108.
JIANG Linjing, ZHAO Huijie, ZHAO Yiqing, et al. Study on mechanical properties of coal before and after flooding considering bedding direction[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 97-108.
- [14] ZHAO Y Q, QIN W J, JIN A B, et al. Research and analysis of the impact of the pore structure on the mechanical properties and fracture mechanism of sandstone[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 107753.
- [15] 李杰林,刘汉文,周科平,等. 冻融作用下岩石微观结构损伤的低场核磁共振研究[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 266-272.
LI Jielin, LIU Hanwen, ZHOU Keping, et al. An LF-NMR study of the micro-structural deterioration of rocks under the effect of

- freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 38(2): 266–272.
- [16] 孙中光, 姜德义, 谢凯楠, 等. 基于低场磁共振的北山花岗岩热损伤研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 1081–1088.
SUN Zhongguang, JIANG Deyi, XIE Kainan, et al. Thermal damage study of Beishan granite based on low field magnetic resonance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 1081–1088.
- [17] 周科平, 薛轲, 刘涛影. 微波作用下砂岩孔隙结构演化及强度劣化的试验研究[J]. *矿冶工程*, 2020, 40(2): 6–11.
ZHOU Keping, XUE Ke, LIU Taoying. Pore structure evolution and strength degradation of sandstone after microwave treatment[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020, 40(2): 6–11.
- [18] 程志林, 隋微波, 宁正福, 等. 数字岩芯微观结构特征及其对岩石力学性能的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2): 449–460.
CHENG Zhilin, SUI Weibo, NING Zhengfu, et al. Microstructure characteristics and its effects on mechanical properties of digital core[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2): 449–460.
- [19] 任晓龙, 张海江, 张晓云. 煤岩单轴力学特性层理结构效应研究[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(1): 63–65.
REN Xiaolong, ZHANG Haijiang, ZHANG Xiaoyun. Study of effects of bedding structure on uniaxial mechanical properties of coal rock[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(1): 63–65.
- [20] 卢志国, 鞠文君, 王浩, 等. 硬煤冲击倾向各向异性特征及破坏模式试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(4): 757–768.
LU Zhiguo, JU Wenjun, WANG Hao, et al. Experimental study on anisotropic characteristics of impact tendency and failure model of hard coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 757–768.
- [21] 范文臣, 曹平, 张科. 压剪作用下节理倾角对类岩石材料破坏模式的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(4): 1237–1243.
FAN Wenchen, CAO Ping, ZHANG Ke. Influence of joint inclination angle on failure style of rock-like material with compressive-shear[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(4): 1237–1243.
- [22] BAHAAADDINI M, SHARROCK G, HEBBLEWHITE B K. Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 49: 206–225.
- [23] BAHAAADDINI M, HAGAN P C, MITRA R, et al. Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study[J]. *Engineering Geology*, 2014, 181: 212–223.
- [24] LIANG Z Z, XING H, WANG S Y, et al. A three-dimensional numerical investigation of the fracture of rock specimens containing a pre-existing surface flaw[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 45: 19–33.
- [25] 许江, 程立朝, 谭皓月, 等. 原生裂纹对煤岩剪切破坏宏观演化规律的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1): 33–40.
XU Jiang, CHENG Lichao, TAN Haoyue, et al. Effects of original cracks on macro-meso evolution law of coal shear failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1): 33–40.
- [26] 陈新, 彭曦, 李东威, 等. 基于两种破裂判据的裂隙岩体单轴压缩起裂分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(10): 227–235.
CHEN Xin, PENG Xi, LI Dongwei, et al. Analysis on cracking mechanism of fractured rock masses under uniaxial compression based on the two cracking criteria[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(10): 227–235.
- [27] ZHANG T J, JI X, PANG M K, et al. Investigation of the crack evolution characteristics of coal and rock bodies around boreholes during progressive damage based on stress threshold values[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 125: 103935.
- [28] EREMIN M. Influence of the porosity on the uniaxial compressive strength of sandstone samples[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2020, 25: 465–469.
- [29] 胡振襄, 周科平, 李杰林, 等. 卸荷岩体细观损伤演化的核磁共振测试[J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(12): 1567–1574.
HU Zhenxiang, ZHOU Keping, LI Jielin, et al. Meso-damage evolution of unloading rock mass based on nuclear magnetic resonance technology[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(12): 1567–1574.
- [30] 田彦德. 不同初始孔隙度页岩的三轴压缩强度及裂隙发育规律[J]. *矿业工程研究*, 2019, 34(4): 40–43.
TIAN Yande. Triaxial compression strength and fracture development of shale with different initial porosity[J]. *Mineral Engineering Research*, 2019, 34(4): 40–43.