

DOI: 10.11779/CJGE202204013

基于 CT 扫描的砂岩主次裂纹扩展特征及影响因素研究

王 帅^{1, 2}, 许 莹^{1, 2}, 张艳博^{1, 2}, 姚旭龙^{1, 2}, 刘祥鑫^{1, 2}, 梁 鹏^{1, 2}

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 华北理工大学河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山 063210)

摘 要: 为了研究岩石在压应力条件下主次裂纹的萌生及扩展规律, 对砂岩在单轴压缩条件下的破裂过程进行 CT 扫描试验, 分析了砂岩中主次裂纹的形貌特征; 同时, 定量探讨了砂岩在不同变形阶段主裂纹的表面积和体积以及次生裂纹的分形维数, 并运用 Image pro plus 6.0 和 Image J 软件计算了砂岩在不同高度位置主次裂纹的长度和数量, 研究了主次裂纹的扩展及其影响因素。研究结果表明, 主导砂岩破裂的是萌生于砂岩表面两种不同方向的主裂纹, 主裂纹表面积和体积的增长速率随着荷载水平的增加而不同。在主裂纹的周围产生了许多次生裂纹, 次生裂纹的分形维数随着荷载水平的增加而非线性增加。不同荷载水平下, 砂岩在不同高度位置的主次裂纹长度和数量变化各不相同。在砂岩破坏前, 影响砂岩主次裂纹扩展的主要因素是主裂纹的长度, 在砂岩破坏后, 影响砂岩主次裂纹扩展的主要因素是次生裂纹的长度。该结论对未来岩石破坏失稳的预测分析奠定了理论基础。

关键词: CT 扫描试验; 主裂纹; 次生裂纹; 荷载水平

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)04-0702-10

作者简介: 王 帅(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事岩石破裂与失稳的研究。E-mail: wangshuai@ncst.edu.cn。

Characteristics and influencing factors for propagation of primary and secondary cracks in sandstone based on CT scan

WANG Shuai^{1, 2}, XU Ying^{1, 2}, ZAHNG Yan-bo^{1, 2}, YAO Xu-long^{1, 2}, LIU Xiang-xin^{1, 2}, LIANG Peng^{1, 2}

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Mining Development and Technology Safety Key Lab of Hebei Province, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: In order to study the initiation and propagation of the primary and secondary cracks under compressive stress conditions, the CT tests are conducted on the fracture process of sandstone under uniaxial compression, and the morphological characteristics of the primary and secondary cracks in sandstone are analyzed. Meanwhile, the surface area and volume of the primary cracks and the fractal dimension of the secondary cracks are quantitatively discussed at different deformation stages of sandstone. The length and number of the primary and secondary cracks are calculated at different heights of sandstone using the software Image pro plus 6.0 and Image J to study the propagation and influencing factors of the primary and secondary cracks. The results show that the primary cracks initiate on the sandstone surface in two different directions, and the growth rates of the surface area and the volume of the primary cracks vary with the increase of the load level. Many secondary cracks are produced around the primary cracks. The fractal dimension of the secondary cracks increases nonlinearly with the increase of the load level. Under different load levels, the length and number of the primary and secondary cracks at different heights of sandstone vary. Before the failure of sandstone, the main factor affecting the propagation of the primary and secondary cracks is the length of the primary cracks. After the failure of sandstone, the main factor affecting the propagation of the primary and secondary cracks is the length of the secondary cracks. The conclusion lays a theoretical foundation for the prediction and analysis of rock failure and instability in the future.

Key words: CT scanning test; primary cracks; secondary crack; load level

0 引 言

岩石内部裂纹的萌生、扩展以及贯通是引起岩体破裂失稳的重要原因, 但是主导岩石破裂的通常是一些具有一定规模和尺度的主控裂纹。例如: 在边坡工程中, 岩石内部分布着的微裂纹或缺陷在荷载作用下

不断的扩展, 逐渐形成岩石破裂过程中的主控裂纹, 导致边坡失稳; 在煤矿开采中, 引起瓦斯突出或涌水

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51774138); 河北省高校基本科研业务费项目(JQN2020039)

收稿日期: 2021-03-08

***通信作者** (E-mail: xuyingddddd@163.com)

通道的形成通常是一些分布在围岩或煤岩中的主控裂纹和次生裂纹^[1-3]。由此可见,岩石在破裂失稳过程中主次裂纹的萌生和扩展对于工程活动的稳定性具有重要的意义。然而,主次裂纹的萌生、扩展以及贯通发生在岩石内部,具体地分析岩石内部裂纹的变化仍具有一定的挑战性。因此,利用 X 射线计算机断层成像(CT)的可视化技术,对岩石的破裂过程进行原位测试,探索单轴压缩条件下岩石主次裂纹的萌生、扩展以及岩石的破裂过程,对于解决实际工程问题具有重要的参考价值。

岩石内部多种预先存在或应力诱导的缺陷使得岩石最初破坏基本上发生在局部范围,在荷载作用下,裂纹的萌生、累积、扩展以及聚集会使得岩石从局部破裂发展为宏观破坏。岩石内部原有的缺陷会引起局部的应力集中,从宏观上看,裂纹一般在应力集中处萌生,并逐步的扩展和合并成主控裂纹,达到极限抗压强度后,形成贯穿整个试件的破裂面^[4]。Haeri 等^[5]对裂纹的萌生、扩展和聚集展开了数值分析和试验研究,通过观察裂纹的扩展路径,发现微缺陷的存在是影响脆性材料发生断裂的主要原因。刘泉声等^[6]基于 Griffith 强度理论和多种应变响应分析了裂纹的萌生机制,确定了岩石在缺陷端部产生了局部张拉应力集中,张拉破坏主导了裂纹的萌生。杨圣奇等^[7]采用扫描电镜系统监测了含单个孔洞的大理岩在不同应力作用下裂纹的萌生、扩展、演化和贯通特征,研究发现在孔洞周边的拉伸应力集中区域萌生了裂纹,产生的裂纹随着应力的增加,逐渐地向试样端部扩展。黄彦华等^[8]分析了孔槽式圆盘试样中裂纹的扩展规律,结果表明当裂隙倾角较小时,孔洞引起主裂纹的萌生,裂隙倾角较大时,裂隙引起主裂纹的萌生。师访等^[9]基于扩展有限元方法模拟了含缺陷的岩石类材料在压剪破坏过程中主、次裂纹的萌生和扩展,发现 Mohr-Coulomb 准则可以用于判断粗糙裂隙面次生压剪型裂纹的萌生。上述的研究从室内试验和数值模拟的角度解释了岩石内部存在的微裂纹、孔洞等缺陷是引起裂纹萌生与扩展的主要原因,对于裂纹的萌生与动态扩展过程仅局限于推测判断,还不能直观地分析裂纹的萌生与扩展演化过程,而且很少对岩石破裂过程中主次裂纹的萌生和扩展进行三维可视化的研究。

岩石是一种不透明的脆性材料,要想真实地表征内部的结构特征具有一定的难度,但是,随着成像技术的发展, X 射线计算机断层扫描已经成为一种无损表征的新技术^[10],能够通过 CT 图像和三维重构对岩石材料内部的构造进行可视化,表征岩体内部的细观结构、裂纹形貌特征以及裂纹扩展特征^[11]。Duan

等^[12]基于 CT 切片和三维重构图像,定性地确定了页岩在水平和垂直方向上裂纹扩展演化特征,通过加载过程中裂纹面积的变化揭示了裂纹的扩展演化规律。Ghamgosar 等^[13]运用三维 CT 扫描技术对循环加载条件下的岩石进行三维 CT 扫描图像分析,确定了岩石破裂过程中裂纹的扩展和演化模式,发现岩石破裂过程中微裂纹的萌生和聚集是岩石内部裂纹扩展的主要特征。Gupta 等^[14]通过 CT 扫描技术研究层状页岩宏观破坏特征与微观微裂纹几何形态之间的相关性,页岩层理面的取向影响着微裂纹的扩展方向,垂直于层状页岩的轴向微裂纹扩展显著,而平行于层状页岩的轴向微裂纹扩展不显著。Kumari 等^[15]对压缩条件下花岗岩中裂纹的扩展过程进行实时 CT 扫描,从宏观和微观尺度上研究了裂纹的扩展路径,研究表明裂纹扩展路径主要受应力状态和岩石基质的非均质性控制,裂纹倾向于沿着矿物晶界和大颗粒石英、黑云母等矿物扩展演化。付裕等^[16]通过对加载前后的煤岩进行了 CT 扫描试验,分析了在不同围压作用下,原始裂隙的方向与新产生的主裂纹方向之间的关系,结果表明原始裂隙的存在会影响次生裂纹的扩展,新产生的主裂纹会沿着原有裂隙的最大方向扩展。朱红光等^[17]通过 CT 图像中灰度值的变化分析了微裂纹的扩展演化过程,得出微裂纹由萌生效应转化为压缩闭合效应,再转化为后期的扩展、汇集效应。Yang 等^[18]采用三维重建技术与图像阈值分割相结合的方法,从不同变形阶段的 CT 图像中提取了不同尺度的裂纹,通过记录裂纹闭合,产生,扩展以及贯通过程,发现了带状黄铁矿的存在影响着裂纹的萌生和演化。

上述的研究对于分析裂纹的萌生和扩展具有很好的参考价值,但是,在 CT 扫描试验中,采用的试验试样主要是煤岩、花岗岩、大理岩,并且这些试验试样的尺寸都比较小,很难有一定的代表性,对于分析裂纹的扩展演化过程,也是进行静态的原位扫描观察。因此,本文的主要目的是采用大尺寸的砂岩试样,在对其进行单轴压缩试验之后,利用显微 CT 系统对不同变形阶段的砂岩进行大尺度试样的动态原位扫描试验,同时运用图像阈值分割和三维重构技术,观察砂岩试样的破裂过程以及破坏后主次裂纹的形貌特征,通过计算不同变形阶段下主裂纹表面积和体积的变化以及次生裂纹分形维数的变化,研究砂岩破坏过程中主次裂纹的萌生和扩展特征。此外,基于砂岩破坏后裂纹的结构特征和二维 CT 切片中主次裂纹的长度和数量,研究了在单轴压缩条件下影响砂岩主次裂纹扩展的因素,旨在为岩石破裂过程的理论研究和工程问题的解决提供一种新的思路和方法。

1 单轴压缩下砂岩的 CT 扫描试验

1.1 试件准备

如图 1 所示的砂岩试样，均采自于江西省吉安市露天采石场。采石场内的砂岩成分以砾石为主，含有少量的石英、长石以及碳酸盐类矿物。试验中将采集的砂岩进行加工处理，在加工过程中确保加载端面的不平整度误差小于 0.05 mm，得到了尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体岩块。



图 1 砂岩试件

Fig. 1 Specimen of the sandstone

1.2 单轴压缩和 CT 扫描试验

(1) 单轴压缩试验

首先，采用伺服控制单轴压力机对同一批次的 4 块砂岩进行单轴压缩预试验，试验中，设定法向加载速率为 0.15 mm/min，得到了每个砂岩试样的单轴抗压强度，分别为 36.32, 41.96, 49.53, 39.92 MPa，其均值为 41.93 MPa。其次，根据预试验中 4 个试样的抗压强度和岩石应力 - 应变曲线的特点，通过荷载水平确定了砂岩在试验过程中不同变形阶段的轴向加载应力，试验中每个变形阶段的轴向加载应力如表 1 所示。最后，根据不同变形阶段的加载应力对砂岩试件进行单轴加载和卸载试验，并且在每次卸载试验之后对砂岩进行 CT 扫描。为了确保砂岩破裂之后能进行 CT 扫描试验，在砂岩周围裹一层塑料薄膜，防止破坏后的碎块脱落。

岩石在破坏过程中要经历裂隙压密阶段、线弹性阶段、破裂发展阶段、软化阶段^[19]，并且在各个变形阶段，岩石内部裂纹的变化各不同，因此，用荷载水平 P 表示岩石破坏过程中的各个变形阶段，即不同变形阶段的加载荷载与砂岩试件的极限荷载的比值，计算公式为

$$P = \frac{P_L}{P_{\max}}, \tag{1}$$

式中， P 为荷载水平， P_L 为不同变形阶段的加载荷载， P_{\max} 为 4 个试样极限荷载的均值，为 419.3 kN。

表 1 不同变形阶段的荷载水平和加载应力

Table 1 Load levels and loading stresses at different deformation

stages		
变形阶段	荷载水平 $P/\%$	加载应力/MPa
加载前	0	0
压密阶段	30	12.58
线弹性阶段	70	29.35
破裂发展阶段	90	37.74
软化阶段	试件破坏后	33.54

根据表 1 中不同变形阶段的加载应力，在岩石的应力 - 应变曲线图中分别标注出每个阶段对应的荷载水平和砂岩中裂纹的变化图。如图 2 所示，荷载水平 $P=30\%$ 时，砂岩的破坏处于压密阶段，试样逐渐的被压密。荷载水平 $P=70\%$ 时，砂岩的破坏处于线弹性阶段，在砂岩内部形成新的裂纹或起始扩展的裂纹。荷载水平 $P=90\%$ 时，砂岩破坏处于破裂发展阶段，砂岩内部开始出现主裂纹，此阶段是贯通性主裂面形成的主要孕育阶段。试件破坏后阶段，砂岩处于完全破坏阶段，形成的贯通性主裂面标志着砂岩完全破坏。

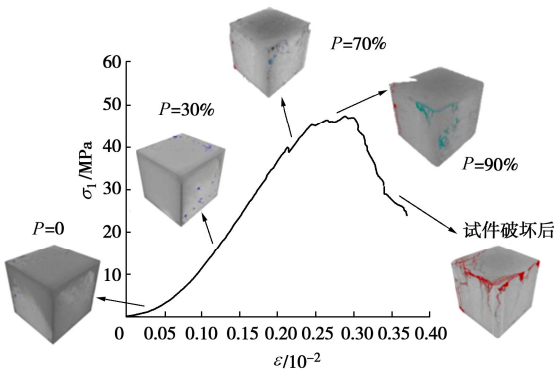


图 2 砂岩的应力 - 应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of sandstone

(2) CT 扫描试验与三维裂纹重构

CT 扫描试验采用的是德国通用电气公司生产的 Phoenix V|tome|x m 工业 X 射线 CT 机，它能够清晰地展示被检测物体内部的结构、组成、材质和缺损状况。试验中扫描得到的 CT 图像质量受试件的尺寸的影响，随着试样尺寸的增加，CT 图像质量下降^[20]。

在 CT 扫描过程中，不同的矿物组分和缺陷在 CT 图像中表现为灰度值的不同，根据 CT 扫描的原理，被扫描材料对 X 射线的吸收系数与材料密度成正比^[21]。根据 CT 图像中灰度值的不同，可以对砂岩在不同变形阶段中裂纹的萌生与扩展特征进行分析。

从同一个砂岩试样的加载面由上到下扫描得到不同扫描层的 CT 图像，在每个荷载水平下分别选取了在试样高度为 10, 30, 50, 70, 90 mm 的 5 个扫描层面的二维 CT 图像进行观察，图 3 为同一个试样在不同扫描层面的 CT 扫描切片图。

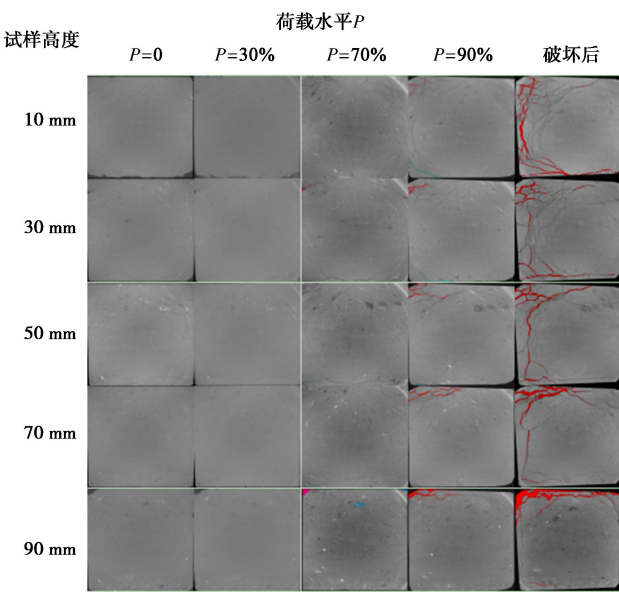


图 3 CT 扫描切片图

Fig. 3 CT scanning images

三维重构是将扫描得到的二维 CT 切片图像重构成三维立体结构模型。通过对二维 CT 切片图像中有裂纹的区域重新定义, 导入 VG Studio MAX 3.0 图像分析系统, 建立三维裂纹结构模型, 定性和定量分析不同变形阶段的裂纹特征。图 4 为上一—后—左方位的砂岩试样扫描图像和破坏后的砂岩试件。

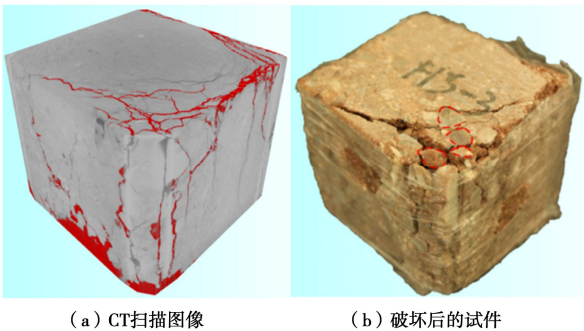


图 4 CT 扫描图像和破坏后的试件

Fig. 4 CT scanning image and damaged specimen

2 砂岩主次裂纹的萌生及扩展

2.1 砂岩破坏后裂纹的形貌特征

砂岩破坏的实质是裂纹萌生、扩展以及贯穿的过程, 随着荷载的增加, 岩石内部形成了主导砂岩破坏的主裂纹以及诱导裂纹扩展的次生裂纹, 这些主裂纹和次生裂纹使得砂岩破坏表现出复杂的形貌特征。其中主裂纹是贯通砂岩试样且能够达到稳定状态的裂纹, 次生裂纹是在主裂纹区域外产生的裂纹^[22]。

图 5 为砂岩完全破坏后的裂纹形貌, 从砂岩试样不同方位的视图可知, 主导砂岩破坏的主要是贯穿于

整个砂岩试样的主裂纹。在主裂纹周围产生了次生裂纹, 它们之间相互贯通, 形成了复杂的裂纹网络。从砂岩左表面和后表面的视图看, 主裂纹贯穿了整个砂岩试样, 主导着砂岩的破坏。从砂岩的上表面和前表面视图看, 主次裂纹相互连接在一起, 相对于其他方位的视图而言, 裂纹形貌更复杂。

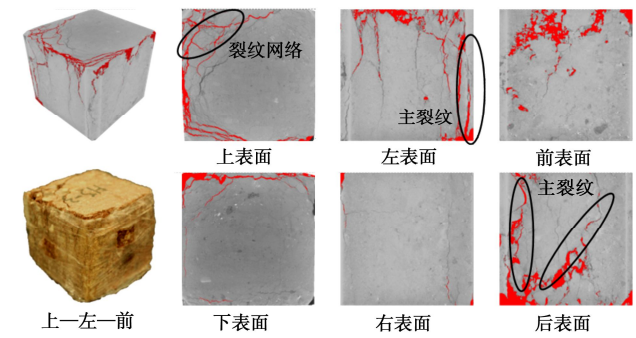


图 5 砂岩破坏后的裂纹形貌

Fig. 5 Crack morphology after sandstone failure

2.2 主次裂纹的萌生与扩展特征

基于砂岩的三维立体结构, 选取不同荷载水平下主次裂纹进行分析。在未加载前和荷载水平小于 30% 的情况下, 砂岩试样处于裂纹发育和压密阶段, 不会有明显的裂纹产生。因此, 从荷载水平大于 30% 的情况下对 CT 重构图像进行分析。图 6 为上一—左—前和上一—后—左两个不同方位的砂岩三维重构 CT 图。

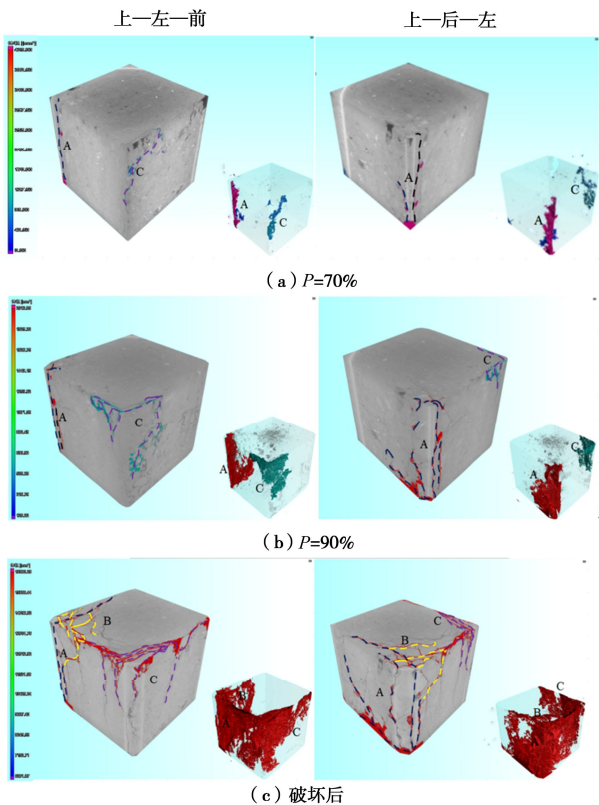


图 6 不同方位的三维重构 CT 图像

Fig. 6 Different directions of three-dimensional reconstruction CT images

(1) 主裂纹的扩展特征

从图 6 可知, 裂纹从萌生到砂岩破坏的过程中, 主导砂岩破坏的主要是分布在 A、C 区域的主裂纹, 随着荷载的增加, 主裂纹在不同方位贯穿了整个砂岩试件, 形成贯通性主裂面, 使得砂岩试件发生破裂。

为了定量地表征砂岩破坏过程中主裂纹的扩展特征, 利用 VG Studio Max 3.0 软件分别提取出 A、C 区域的主裂纹, 并且计算了主裂纹的表面积和体积。通过主裂纹表面积和体积随荷载水平的变化可知, 在不同荷载水平下, 主裂纹表面积和体积增长速率的不同表明了砂岩在破裂过程中主裂纹的扩展演化特征。

图 7 为 A、C 区域主裂纹的表面积和体积随荷载水平增加的变化曲线, 表 2 为主裂纹表面和体积的变化, 从图 7 可知, 在砂岩破坏过程中 A、C 区域的主裂纹表面积和体积都随着荷载水平的增加而增加, 表现出先轻微增加, 再缓慢增加, 最后急剧增加的变化规律。从表 2 可知, A 区域主裂纹的表面积和体积最大值分别为 213200 mm²、28170 mm³。C 区域主裂纹的表面积和体积最大值分别为 112400 mm²、15850 mm³。主裂纹扩展演化的具体特征如下:

a) 在荷载水平 $P=70\%$ 时, 主裂纹开始萌生和扩展, 如图 6 (a) 所示, 主裂纹萌生在砂岩试件的表面, 形成 A、C 两个裂纹区域, 从图 7 和表 2 可知, 裂纹的表面积和体积与荷载水平 $P=30\%$ 时相比, 只发生了微小的变化。

b) 在荷载水平 $P=70\%$ 增加到 90% 的过程中, 主裂纹扩展演化, 如图 6 (b) 所示, A 区域的主裂纹在竖直方向上贯通了砂岩试样, 在水平方向上向试件内部扩展, C 区域的主裂纹沿着竖直方向向上扩展, 在水平方向上向试件端部位置扩展。从图 7 和表 2 可知, A、C 区域主裂纹的表面积和体积明显增加, 曲线斜率明显增大。

c) 在荷载水平 $P=90\%$ 增加到试件破坏后的过程中, 主裂纹迅速扩展演化, 逐渐达到稳定状态, 如图 6 (c) 所示, A、C 区域的主裂纹贯通了整个砂岩试样, 在砂岩中形成了贯通性主裂面, 使得砂岩完全破坏。从图 7 和表 2 可知, 主裂纹表面积和体积增长量最大, 曲线的斜率最大, A 区域主裂纹的表面积和体积增长量分别为 158900 mm², 19570 mm³, C 区域主裂纹的表面积和体积增长量分别为 86100 mm²、10150 mm³。

(2) 次生裂纹的扩展特征

如图 6 所示, 随着荷载水平的增加, A、C 区域的次生裂纹逐渐增多, A 区域产生的次生裂纹主要集中在初始主裂纹萌生的位置, C 区域产生的次生裂纹

主要分布在试件内部。在裂纹 A 区域, 产生的次生裂纹使未连接的微裂纹聚结, 形成裂纹网络 B 区域。在裂纹 C 区域, 产生的次生裂纹一部分与 A 区域和 B 区域的裂纹聚集贯通, 另一部分继续沿着试件表面延伸和扩展, 形成复杂的裂纹网络, 诱导砂岩完全破坏。

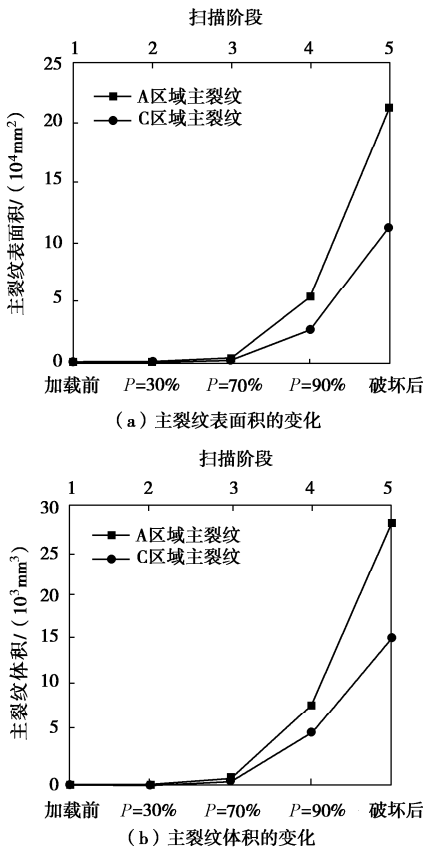


图 7 主裂纹表面积和体积随荷载水平变化的曲线
Fig. 7 Curves of surface area and volume of primary crack changing with load level

表 2 主裂纹表面和体积的变化				
Table 2 Variation of surface area and volume of primary cracks				
荷载水平	A 区域主裂纹表面积	A 区域主裂纹体积	C 区域主裂纹表面积	C 区域主裂纹体积
P/%	/(10 ⁴ mm ²)	/(10 ³ mm ³)	/(10 ⁴ mm ²)	/(10 ⁴ mm ³)
0	0	0	0	0
30	0	0	0	0
70	0.28	0.80	0.11	0.40
90	5.43	8.60	2.63	5.70
破坏后	21.32	28.17	11.24	15.85

为了描述次生裂纹的扩展特征, 根据三维计盒维数法^[20], 基于 MATLAB 软件编辑的程序计算了次生裂纹的分形维数, 三维计盒维数的大小可通过如下公式计算:

$$D = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\lg N(S)}{\lg(1/S)}$$

(2)

式中, S 为立方体的边长, $N(S)$ 为覆盖次生裂纹的立方体最小数目, D 为三维分形维数。

图 8 为三维分形维数随荷载水平增加的变化曲线, 从图 8 中可知, 随着荷载水平的增加, 次生裂纹的分形维数非线性增加, 这一趋势间接地描述了次生裂纹的扩展特征, 其具体特征如下:

a) 荷载水平 $P=30\%$ 到 70% 阶段, 次生裂纹的三维分形维数从 0 开始增加到 2.19, 表明在荷载水平 $P=30\%$ 时, 几乎没有次生裂纹的产生, 在荷载水平 $P=70\%$ 时, 有次生裂纹的产生。

b) 荷载水平 $P=70\%$ 到 90% 阶段, 次生裂纹萌生和扩展, 分形维数从 2.19 增加到 2.28, 曲线增长缓慢, 萌生的次生裂纹较少。

c) 荷载水平 $P=90\%$ 到砂岩破坏后阶段, 次生裂纹的聚集和相互贯通, 三维裂纹的分形维数从 2.28 增加到 2.74, 相对于荷载水平 $P=70\%$ 到 90% 阶段, 曲线斜率较大, 分形维数增长幅度增加。在砂岩破坏后阶段, 分形维数达到最大, 最大值为 2.74, 这表明砂岩完全破坏, 裂纹充分发育, 形成了复杂的裂纹网络。

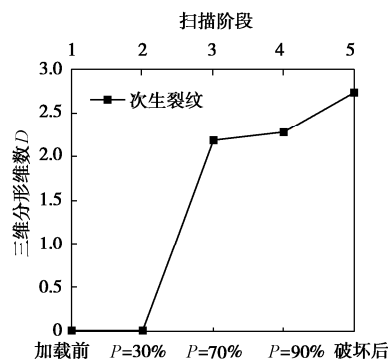


图 8 次生裂纹的三维分形维数

Fig. 8 Three-dimensional fractal dimensions of secondary cracks

3 影响主次裂纹扩展的因素

3.1 主次裂纹数量和长度的变化

为了分析主次裂纹数量和长度的变化, 利用 Image pro plus 6.0 和 Image J 软件分别测量了在荷载水平 P 为 70% , 90% 和试件破坏后阶段, 砂岩高度为 $10, 30, 50, 70, 90\text{ mm}$ 扫描层面的二维 CT 图像中主次裂纹的长度和数量。表 3 为在荷载水平 P 为 70% , 90% 和试件破坏后阶段, 砂岩不同高度位置的二维裂纹切片图像, 图中红线代表主裂纹 A: 黄线代表次生裂纹 B: 黑色代表主裂纹 C。

(1) 不同砂岩高度主次裂纹数量的变化

如表 3 所示, 在砂岩破坏的整个过程, 主导砂岩破坏主要是 A, C 两条主裂纹, 随着砂岩高度的增加, 主裂纹的数量不变。表 4 为不同荷载水平下, 砂岩不

同高度位置次生裂纹数量的变化。从表 4 可知, 在 A, C 主裂纹周围, 分别产生许多次生裂纹, 次生裂纹的数量随着砂岩高度位置的增加而变化不同。荷载水平 $P=70\%$ 阶段, 在砂岩高度 70 mm 位置, 产生一条次生裂纹。荷载水平 $P=90\%$ 阶段, 在砂岩不同的高度位置都有次生裂纹的产生, 在砂岩高度为 10 mm 和 70 mm 的位置, 产生的次生裂纹数量最多。砂岩破坏后阶段, 次生裂纹的数量逐渐增多, 在砂岩高度为 10 mm 的位置, 产生的次生裂纹数量最多。

表 3 X-Y 切面中不同高度的 CT 切片

Table 3 CT slices of different heights in X-Y section

高度/mm	P=70%	P=90%	试件破坏后
10			
30			
50			
70			
90			

表 4 不同荷载水平下, 砂岩不同高度位置次生裂纹数量

Table 4 Number of secondary cracks at different heights of sandstone under different load levels

砂岩不同高度/mm	次生裂纹数量/个		
	P=70%	P=90%	试件破坏后
10	0	3	12
30	0	1	9
50	0	1	10
70	1	3	8
90	0	2	7

分析上述主次裂纹数量随砂岩高度位置的变化可知, 砂岩试样在应力的作用下, 主裂纹 A, C 贯穿了

整个砂岩试样。主裂纹 A、C 周围的次生裂纹，在砂岩不同的高度位置，其数量各不相同，表明沿着加载方向，砂岩在不同的高度位置受到的应力不同，有的次生裂纹会沿着加载方向扩展演化，有的次生裂纹会受主裂纹的影响而新产生。

（2）不同砂岩高度主次裂纹长度的变化

表 5 为不同荷载水平下，在砂岩不同高度位置主裂纹 A、C 的长度变化。图 9 为主裂纹 A、C 长度随着砂岩不同高度位置变化的曲线图。表 6 为不同荷载水平下，在砂岩不同高度位置次生裂纹的长度变化。从图 9 和表 5、6 可知，在相同荷载水平下，主次裂纹的长度随着砂岩高度位置的增加变化规律不同，其具体的变化如下：

a) 荷载水平 $P=70\%$ 时，在砂岩的不同高度位置都有主裂纹的形成，主裂纹 A 的长度随着砂岩高度的增加而增加，从 11.4 mm 增加到 19.9 mm。主裂纹 C 的长度随着砂岩高度的增加先增加后减小，从 6.3 mm 增加到 18.9 mm 再减小到 0 mm。在砂岩高度为 70 mm 的位置，主裂纹 A 周围产生了长度为 7.5 mm 的次生裂纹。

b) 荷载水平 $P=90\%$ 时，主裂纹 A 的长度随着砂岩高度的增加先增加后减小，从 12.7 mm 增加到 58.0 mm 再减小到 52.4 mm。主裂纹 C 的长度随着砂岩高度的增加先减小后增加，从 51.6 mm 减小到 24.3 mm 再增加到 27.1 mm。次生裂纹的总长度随着砂岩高度的增加先减小后增加再减小，从 24.2 mm 减小到 19.3 mm 后增加到 46.9 mm 再减小到 19.8 mm。

c) 在砂岩试件破坏后，主裂纹 A 的长度随着砂岩高度的增加先增加后减小再增加，从 82.8 mm 增加到 89.0 mm 后减小 72.6 mm 再增加到 83.7 mm。主裂纹 C 的长度随着砂岩高度的增加先增加后减小，从 82.3 mm 增加到 82.8 mm 再减小到 19.1 mm。次生裂纹的总长度随着砂岩高度的增加先减小后增加再减小，从 267.5 mm 减小到 175.9 mm 后增加到 189.9 mm

再减小为 185.7 mm。

3.2 主次裂纹长度的影响

为了分析不同的荷载水平下，主裂纹 A、C 长度和次生裂纹长度对裂纹扩展程度的影响，分别计算了主裂纹 A 的长度，主裂纹 C 的长度和次生裂纹的长度与裂纹总长度的比值 ξ_1 ， ξ_2 ， ξ_3 ，通过比值的大小来反映砂岩在破坏过程中，主次裂纹长度对裂纹扩展的影响，比值越大，表明对裂纹扩展的影响越显著，定义的比值计算公式如下：

$$\xi_1 = \frac{L_A}{L_z}, \quad \xi_2 = \frac{L_C}{L_z}, \quad \xi_3 = \frac{L_s}{L_z}, \quad (3)$$

式中， L_A 为主裂纹 A 的长度， L_C 为主裂纹 C 的长度， L_s 为次生裂纹的长度， L_z 为裂纹的总长度。

表 5 不同荷载水平下，砂岩不同高度位置主裂纹长度的变化
Table 5 Change in length of the primary crack at different heights of sandstone under different load levels

高度 /mm	长度/mm					
	$P=70\%$		$P=90\%$		破坏后	
	主裂 纹 A	主裂 纹 C	主裂 纹 A	主裂 纹 C	主裂 纹 A	主裂 纹 C
10	11.4	6.3	12.7	51.6	82.8	82.3
30	13.1	9.2	19.4	24.3	89.0	82.8
50	14.5	18.9	51.8	27.1	85.1	68.5
70	18.0	11.7	58.0	0	72.6	29.0
90	19.9	0	52.4	0	83.7	19.1

图 10 为不同荷载水平下，比值 ξ_1 ， ξ_2 ， ξ_3 与砂岩不同高度位置之间的关系曲线，从图 10 可以看出，在荷载水平 $P=70\%$ 阶段，主裂纹 A、C 的比值 ξ_1 ， ξ_2 比次生裂纹的比值 ξ_3 大；在荷载水平 $P=90\%$ 阶段，在砂岩高度小于 50 mm 时，主裂纹 C 的比值 ξ_2 比次生裂纹的比值 ξ_3 大，在砂岩高度大于 50 mm 时，主裂纹 A 的比值 ξ_1 比次生裂纹的比值 ξ_3 大；在砂岩破坏后阶段，次生裂纹的比值 ξ_3 比主裂纹 A、C 的比值 ξ_1 ， ξ_2 大。也即在砂岩破坏前不同主裂纹均在其产生和发展区域具有比次生裂纹明显的发展趋势，而在砂岩破坏后，次生裂纹在所有区域的发展趋势均占上风。

表 6 不同荷载水平下，砂岩不同高度位置次生裂纹的条数及长度

Table 6 Number and length of secondary cracks at different heights of sandstone under different load levels

荷载水平 $P/\%$	不同高度位置处次生裂纹的条数及各自的裂纹长度									
	10 mm		30 mm		50 mm		70 mm		90 mm	
	条数	长度/mm	条数	长度/mm	条数	长度/mm	条数	长度/mm	条数	长度/mm
70	0	—	0	—	0	—	1	7.52	0	—
90	3	12.11, 6.05, 6.05	1	19.3	1	19.3	3	10.47, 14.37, 22.10	2	9.14, 10.67
破坏后	12	18.9, 32.5, 17.2, 29.6, 40.8, 9.0,	9	20.6, 20.3, 8.7, 6.6, 26.9, 22.8,	10	4.4, 6.0, 47.5 22.8, 10.9, 26.9, 12.0,	8	14.4, 20.1, 29.0, 14.4, 14.4, 8.1,	7	19.3, 43.5, 7.5, 18.7, 41.5, 31.0,
		4.9, 2.0, 37.2,		21.2, 14.8,		15.7, 12.8,		39.8, 49.7		24.2
		5.69, 16.1, 2.4		55.2		16.9				

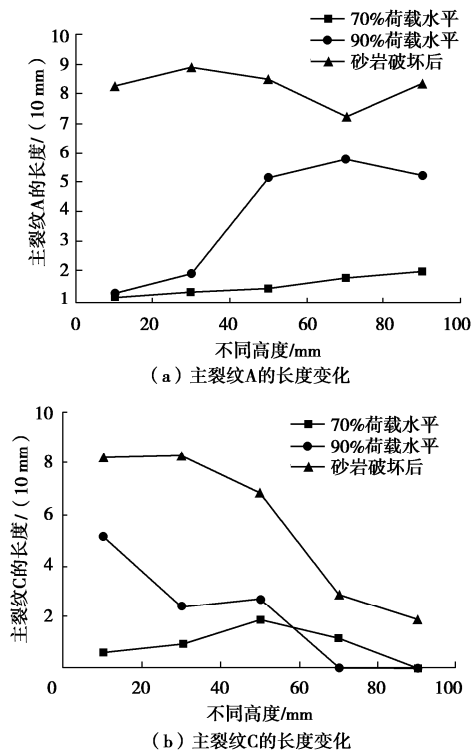


图9 主裂纹长度与砂岩不同高度的关系

Fig. 9 Relationship between length of primary cracks and different heights of sandstone

上述的分析可知, 砂岩在荷载水平 $P=90\%$ 阶段之前, 也就是未达到极限抗压强度之前, 在砂岩的不同高度位置, 主裂纹 A, C 的长度占裂纹总长度的比值大。在荷载水平为 90% 时, 也就是接近极限抗压强度时, 在砂岩不同高度位置, 主裂纹 A 或者主裂纹 C 的长度占裂纹总长度的比值大。由此可知, 砂岩在破坏前, 影响砂岩主次裂纹的扩展主要是主裂纹的长度, 其主要原因是砂岩试样在未破坏前, 随着荷载的增加, 主裂纹失稳扩展并基本贯通形成。

在砂岩破坏后, 也就是达到极限抗压强度之后, 在砂岩的不同高度位置, 次生裂纹的长度占裂纹总长度的比值大, 由此可知, 砂岩在破坏后, 影响砂岩主次裂纹的扩展主要是次生裂纹的长度, 其主要原因是砂岩破坏后, 失去了承载能力, 主裂纹达到稳定状态, 在荷载作用下, 次生裂纹沿着扩展阻力最小的路径扩展, 使得次生裂纹长度和数量增加, 裂纹更容易扩展。

由此可以得出结论, 预测砂岩失稳的关键指标可以以主裂纹长度数量不再增加, 次生裂纹快速增加的微观节点来进行综合判断, 为未来岩石破坏失稳的预测分析奠定理论基础。

砂岩是一种非均质体, 由不同类型的矿物和微结构面组成, 在荷载作用下, 裂纹开始萌生和扩展, 在扩展演化过程中, 由于矿物组分、矿物大小以及微结

构的不同使得在主裂纹扩展的路径上会产生的复杂的次生裂纹, 这些次生裂纹会沿着扩展阻力最小的路径扩展, 影响着砂岩的破坏程度。因此, 对于从微观角度分析影响裂纹的萌生和扩展以及砂岩的破坏程度因素还需要进一步的研究。

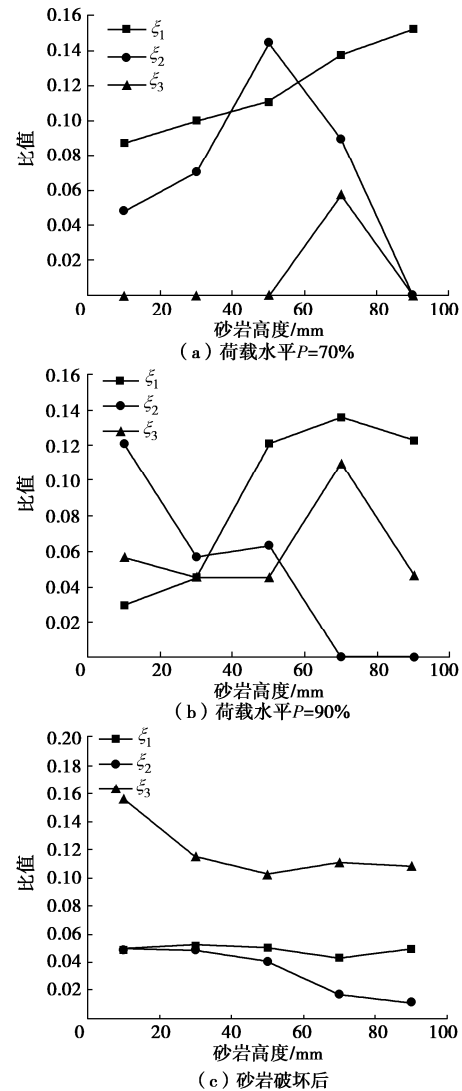


图10 比值与砂岩高度的关系

Fig. 10 Relationship between scaling coefficient and sandstone height

4 结 论

(1) 在不同荷载水平下, 主裂纹表面积和体积增长速率的不同反映了砂岩在破裂过程中主裂纹的扩展演化特征。主导砂岩破裂的主要是萌生于砂岩表面的主裂纹, 并且主裂纹的表面积和体积随着荷载的增加先轻微增加, 再缓慢增加, 最后急剧增加。

(2) 在主裂纹周围产生了许多次生裂纹, 形成了复杂的裂纹网络, 在不同的荷载水平下, 次生裂纹的分形维数随着荷载水平的增加而非线性增加, 在试件

破坏后, 次生裂纹的三维分形维数达到最大, 裂纹复杂程度最大。

(3) 在不同荷载水平下, 砂岩试样中产生主次裂纹的长度和数量变化存在差异, 影响着砂岩主次裂纹的扩展。在砂岩破坏前, 影响砂岩主次裂纹扩展的主要因素是主裂纹的长度, 在砂岩破坏后, 影响砂岩主次裂纹扩展的主要因素是次生裂纹的长度。对于岩石失稳预测而言, 可以以主裂纹长度数量不再增加, 次生裂纹快速增加的微观节点来进行综合判断。

参考文献:

- [1] 席婧仪, 陈忠辉, 朱帝杰, 等. 岩石不等长裂纹应力强度因子及起裂规律研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(4): 727 - 733. (XI Jing-yi, CHEN Zhong-hui, ZHU Di-jie, et al. Stress intensity factors and initiation of unequal collinear cracks in rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(4): 727 - 733. (in Chinese))
- [2] 付金伟, 朱维申, 谢富东, 等. 岩石中三维双裂隙组扩展和贯通过程的试验研究和弹脆性模拟[J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2489 - 2495. (FU Jin-wei, ZHU Wei-shen, XIE Fu-dong, et al. Experimental studies and elasto-brittle simulation of propagation and coalescence process of two three-dimensional flaws in rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(9): 2489 - 2495. (in Chinese))
- [3] 于庆磊, 杨天鸿, 郑超, 等. 岩石微观结构对其变形强度影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(11): 3468 - 3472. (YU Qing-lei, YANG Tian-hong, ZHENG Chao, et al. Numerical analysis of influence of mesostructure on its deformation and strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(11): 3468 - 3472. (in Chinese))
- [4] LIU S X, WANG Z X, ZHANG L Y. Experimental study on the cracking process of layered shale using X-ray microCT[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2018, **36**(2): 297 - 313.
- [5] HAERI H, MARJI M F, SHAHRIAR K, et al. On the HDD analysis of micro crack initiation, propagation, and coalescence in brittle materials[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, **8**(5): 2841 - 2852.
- [6] 刘泉声, 魏莱, 刘学伟, 等. 基于 Griffith 强度理论的岩石裂纹起裂经验预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(7): 1561 - 1569. (LIU Quan-sheng, WEI Lai, LIU Xue-wei, et al. A revised empirical method for predicting crack initiation based on Griffith strength criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(7): 1561 - 1569. (in Chinese))
- [7] 杨圣奇, 吕朝辉, 渠涛. 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观试验和模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2009, **38**(6): 774 - 781. (YANG Sheng-qi, LÜ Zhao-hui, QU Tao. Investigations of crack expansion in marble having a single pre-existing hole: experiment and simulations[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009, **38**(6): 774 - 781. (in Chinese))
- [8] 黄彦华, 杨圣奇. 孔槽式圆盘破坏特性与裂纹扩展机制颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(8): 2269 - 2277, 2285. (HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi. Particle flow simulation of fracture characteristics and crack propagation mechanism of holed-cracked Brazilian disc specimen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(8): 2269 - 2277, 2285. (in Chinese))
- [9] 师访, 高峰, 李玺茹, 等. 模拟岩石压剪状态下主次裂纹萌生开裂的扩展有限元法[J]. 岩土力学, 2014, **35**(6): 1809 - 1817. (SHI Fang, GAO Feng, LI Xi-ru, et al. Modeling initiation and propagation of main and secondary cracks of rock under combined compression and shear loading using extended finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(6): 1809 - 1817. (in Chinese))
- [10] ZHAO Z, ZHOU X P. Digital energy grade-based approach for crack path prediction based on 2D X-ray CT images of geomaterials[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019, **42**(6): 1292 - 1307.
- [11] 郎颖娴, 梁正召, 董卓. 玄武岩三维细观孔隙模型重构与直接拉伸数值试验[J]. 工程科学学报, 2019, **41**(8): 997 - 1006. (LANG Ying-xian, LIANG Zheng-zhao, DONG Zhuo. Three-dimensional microscopic model reconstruction of basalt and numerical direct tension tests[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, **41**(8): 997 - 1006. (in Chinese))
- [12] DUAN Y, LI X, ZHENG B, et al. Cracking evolution and failure characteristics of Longmaxi shale under uniaxial compression using real-time computed tomography scanning[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, **52**(9): 3003 - 3015.
- [13] GHAMGOSAR M, ERARSLAN N, WILLIAMS D J. Experimental investigation of fracture process zone in rocks damaged under cyclic loadings[J]. Experimental Mechanics, 2017, **57**(1): 97 - 113.
- [14] GUPTA N, MISHRA B. Experimental investigation of the influence of bedding planes and differential stress on

microcrack propagation in shale using X-ray CT scan[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, **39**(1): 213 – 236.

[15] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Hydraulic fracturing under high temperature and pressure conditions with micro CT applications: Geothermal energy from hot dry rocks[J]. Fuel, 2018, **230**: 138 – 154.

[16] 付 裕, 陈 新, 冯中亮. 基于 CT 扫描的煤岩裂隙特征及其对破坏形态的影响[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(2): 568 – 578. (FU Yu, CHEN Xin, FENG Zhong-liang. Characteristics of coal-rock fractures based on CT scanning and its influence on failure modes[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(2): 568 – 578. (in Chinese))

[17] 朱红光, 谢和平, 易 成, 等. 岩石材料微裂隙演化的 CT 识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(6): 1230 – 1238. (ZHU Hong-guang, XIE He-ping, YI Cheng, et al. CT identification of microcracks evolution for rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(6): 1230 – 1238. (in Chinese))

[18] YANG B C, XUE L, ZHANG K. X-ray micro-computed tomography study of the propagation of cracks in shale during uniaxial compression[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(18): 1 – 9.

[19] 张 萍, 刘冠国, 庞超明, 等. 试件尺寸对 X-CT 测试效果影响规律研究[J]. 混凝土, 2013(11): 56 – 57, 60. (ZHANG Ping, LIU Guan-guo, PANG Chao-ming, et al. Study of specimen size effects on the X -CT test results[J]. Concrete, 2013(11): 56 – 57, 60. (in Chinese))

[20] 张艳博, 徐跃东, 刘祥鑫, 等. 基于 CT 的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(10): 2659 – 2671. (ZHANG Yan-bo, XU Yue-dong, LIU Xiang-xin, et al. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(10): 2659 – 2671. (in Chinese)).

[21] CHEN W X, HE X Q, LIU M J, et al. Meso- and macro-behaviour of coal rock: observations and constitutive model development[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2016, **30**(1): 13 – 24.

[22] 邓远刚, 王述红, 孟嫣然, 等. 基于 CT 扫描的致密砂岩脆性破坏裂纹扩展规律研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, **15**(4): 39 – 43. (DENG Yuan-gang, WANG Shu-hong, MENG Yan-ran, et al. Crack evolution of the tight sandstone of brittle failure based on CT technology[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, **15**(4): 39 – 43. (in Chinese))

彩色插图索引

DOI: 10.11779/CJGE202204002 一文彩色插图	(后插 1)
DOI: 10.11779/CJGE202204004 一文彩色插图	(后插 2)
DOI: 10.11779/CJGE202204009 一文彩色插图	(后插 3)
DOI: 10.11779/CJGE202204010 一文彩色插图	(后插 3)
DOI: 10.11779/CJGE202204011 一文彩色插图	(后插 3)
DOI: 10.11779/CJGE202204013 一文彩色插图	(后插 4)
DOI: 10.11779/CJGE202204014 一文彩色插图	(后插 4)
DOI: 10.11779/CJGE202204015 一文彩色插图	(后插 5)
DOI: 10.11779/CJGE202204017 一文彩色插图	(后插 6)
DOI: 10.11779/CJGE202204019 一文彩色插图	(封 3)
DOI: 10.11779/CJGE202204021 一文彩色插图	(封 3)
DOI: 10.11779/CJGE202204022 一文彩色插图	(封 3, 封 2)