含充填型裂隙砂岩的破裂特征分析*

叶腾飞[1]，杨道学[1]，赵奎[1,2]，杨安闽[1]，阴文杰[1]

（1.江西理工大学 土木与测绘工程学院， 江西 赣州市 341000；
2.江西理工大学 资源与环境工程学院， 江西 赣州市 341000）

摘要：为探究裂隙倾角与充填物对岩体力学特性的影响机制，采用数字图像相关（DIC）技术和声发射（AE）技术，对单轴荷载作用下含不同倾角及充填物的裂隙砂岩进行力学试验。通过DIC技术捕捉试件表面应变分布及裂纹扩展形态，利用AE技术监测裂纹演化过程，分析RA-AF参数分布特征。研究结果表明：充填物使裂隙砂岩弹性变形阶段延长、脆性增强，其对抗压强度的影响随裂隙倾角的增大而减弱；无充填试样的弹性模量与裂隙倾角呈正相关，而充填试样弹性模量不受裂隙倾角影响。充填后试样应变分布更均匀，裂纹扩展路径集中；无充填条件下，裂隙倾角为0°～15°的砂岩呈翼形张拉破坏，裂隙倾角为30°～90°的砂岩呈翼形剪切破坏；充填试样则均为拉-剪复合破坏。AE分析结果表明，无充填试样裂纹扩展与DIC结果一致，而充填试样以张拉裂纹为主、剪切裂纹为辅。充填物显著改变了裂隙砂岩力学行为，其破坏模式和裂纹演化受充填状态与裂隙倾角的协同控制。研究结果可为含充填型裂隙岩体工程稳定性分析提供理论依据。

关键词：充填裂隙砂岩；单轴加载；数字图像相关技术；声发射技术；裂纹扩展

中图分类号：TD315　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)03-0162-10

Analysis of Fracture Characteristics in Filled-Type Fissured Sandstone

YE Tengfei[1], *YANG Daoxue*[1], *ZHAO Kui*[1,2], *YANG Anmin*[1], *YIN Wenjie*[1]

(1. School of Civil Engineering and Surveying & Mapping Engineering,
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
2. School of Resources and Environmental Engineering,
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: To investigate the influences of fissure dip angle and filling material on the rock mechanical properties, uniaxial compression tests were conducted on fissured sandstone specimens containing fractures with varying dip angles and filling materials. Digital Image Correlation (DIC) and Acoustic Emission (AE) techniques were employed to monitor the deformation and fracture processes. DIC was used to capture surface strain distribution and crack propagation morphology, and AE was utilized to monitor the crack evolution processes. The distribution characteristics of the RA-AF parameters were analyzed. The results indicate that the filling material prolongs the elastic deformation stage of the fissured sandstone and enhances its brittleness. The effect on the compressive strength diminishes as the inclination angle of the fissures increasing. The elastic modulus of the unfilled specimens is positively correlated with the dip angle of the fissures, while the elastic modulus of the filled specimens is not affected by the dip angle of the fissures. After filling, the strain distribution of the specimens is more uniform, and the crack propagation path becomes concentrated. The unfilled sandstone specimens with a fissure dip angle of 0° to 15° exhibit wing-shaped tensile failure, while those with angles of 30° to 90° show wing-shaped shear failure. All filled specimens exhibit mixed tensile-shear failure. The AE analysis results show that the crack propagation in the unfilled specimens is consistent with the DIC results, while in the filled specimens, tensile cracks are the main type and shear cracks are secondary. The filling materials significantly alter the mechanical behaviors of fissured sandstone. The failure mode and crack evolution are jointly controlled by the filling state and the dip angle of the fissures. The research results provide a theoretical

* **收稿日期**：2025-04-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52164004)；江西省自然科学基金资助项目(20224BAB213052)
作者简介：叶腾飞(2000—)，男，江西赣州人，硕士，主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail：tengfeiye@163.com
通信作者：赵奎(1969—)，男，安徽六安人，博士，教授，博导，主要从事采矿工程、岩石力学与工程稳定性方面的研究。E-mail：yglmf_zk@163.com

basis for the stability analysis of engineering involving filled-fissured rock masses.

Key words: Filled-type fissured sandstone, Uniaxial compression, Digital image correlation technology, Acoustic emission technology, Crack propagation

0 引言

受长期地质构造运动的影响，岩体中形成了节理、孔隙和弱夹层等各种错综复杂的结构。岩石在荷载作用下的破坏过程，本质上是岩石中各种原始裂隙的破坏过程，这些裂隙的存在使得岩体在承载过程中的应力集中程度增大，导致其力学性能下降，对地质工程的安全构成了极大的威胁[1]。然而，岩石裂隙并非处于开放状态，而是常被各类物质充填[2]：一类是天然形成的软弱材料，如软泥、破碎的岩石碎片及黏土；另一类则是人工添加的灌浆材料，如砂浆、混凝土等。

以往研究多数集中在开放性或封闭性裂隙上，王春萍等[3]、袁媛等[4]以单个或者两个预先存在的裂隙试件进行单轴压缩试验，探讨了裂隙岩石的力学特性及破坏模式。FENG 等[5]、GUO 等[6]、余伟健等[7]研究了多条预制的合并裂隙，以及裂隙倾角角度、长度、裂隙形状和裂隙相对位置对岩石力学行为的影响，探究了岩石的裂纹扩展行为。王煜等[8]、孙浩等[9]、李群等[10]通过单轴压缩试验对具有开放和闭合缺陷的试样进行了比较，发现摩擦因数是导致裂纹聚结应力和破坏模式差异的主要因素，并对具有开放或闭合缺陷的试样进行了数值模拟研究，使用数值模拟的应力分布结果，分析了缺陷表面接触条件对试样翼裂纹扩展路径的影响。

尽管已对开放和封闭缺陷的试样进行了许多研究，但由于缺陷中存在充填材料，使得充填缺陷试样的力学响应和裂纹行为更加复杂。目前，关于填充缺陷的研究仍然很少。HAN 等[11]、孙立臣等[12]为评估无充填和充填缺陷砂岩的力学性能，对有无充填条件下试样的破坏过程进行了数值模拟研究。MIAO 等[13]对不同缺陷倾角 0°～90°和不同充填材料的砂岩试样进行了单轴压缩试验，并通过声发射(AE)和数字图像相关(DIC)技术揭示和追踪了试样的损伤过程，研究了充填材料和缺陷倾角对砂岩开裂过程的影响。

以往研究主要集中在裂隙倾角对裂隙岩石力学参数的影响，且裂隙岩石裂纹演化特征的分析主要集中在贯通裂隙岩石上，学者们通过不同方法，总结定义了裂隙多种扩展类型。然而，关于充填裂隙岩石力学参数变化的研究依然较少，特别是充填裂隙岩石裂纹演化特征。因此，本文重点研究了有无充填和不同裂隙倾角对具有单个填充缺陷砂岩的力学响应和裂纹行为的影响。对具有不同缺陷倾角的砂岩试样进行单轴压缩试验，并通过声发射(AE)、数字图像相关(DIC)技术对裂隙试样的开裂过程进行监测，旨在揭示不同倾角下充填裂隙砂岩的力学响应及裂纹演化特征。

1 试样制备与试验方法

1.1 制备试样

砂岩因具有良好的均匀性而被用于试验，测试了砂岩各项物理力学参数，结果见表 1。将岩块制作成直径为 50 mm、长度为 100 mm 的圆柱形试样，如图 1 所示。试样中心的贯通裂隙由高压水射流切割预制，裂隙长 21 mm、宽 1.8 mm。本研究考虑了裂隙与相对水平线的夹角分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75°和 90°。

表 1 砂岩基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of sandstone

密度/(kg/m³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	波速/(m/s)	含水率/%
2 253.0	8.73	0.23	58.20	6.74	2 235	1.5

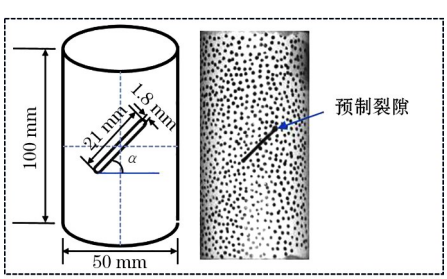


图 1 具有倾角 α 试样示意

Fig.1 Schematic of specimens with inclination angle α

为了研究不同倾角充填裂隙对单轴压缩下试样强度、变形和破坏模式的影响，选择石膏作为填充材料，并准备了无充填处理的裂隙试样作为对照组。石膏填料中水与石膏的配合比为 0.3，采用注浆充填

工艺对预制裂隙进行修复处理。基于岩体加固工程中注浆材料的普适性原则,选取高强度石膏作为充填介质,表征天然风化矿物胶结作用。充填工艺流程如下:首先,采用去自然水对预制裂隙表面进行润湿处理,以增强界面黏结性能;然后,通过注射器将石膏浆分 3 次充填于裂隙腔体,对试样的正反面不断地轻微振压,以保证充填的密实度;最后,用指压棒刮掉表面多余的充填材料,并放入养护室养护 7 d。

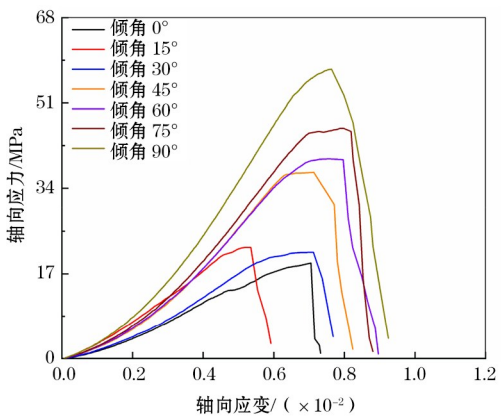
1.2 试验方法

在 WAW-600B 型电液伺服万能试验机上开展单轴压缩力学试验,以 0.2 kN/s 的轴向力加载速率施加轴向载荷。DIC 技术被用来定量测量试样表面,该系统包含一个高分辨率相机、一个白光源和一台带有图像采集软件的计算机。相机传感器平行于试样表面固定,以记录加载过程中试样表面的数字图像。在测试之前,调整光源的位置,以保持试样表面的适度亮度。在试样表面喷涂白色油漆,再用黑色油笔进行点图,形成随机的灰色强度分布,使用图像采集软件以 9 帧/s 的速率记录一系列高分辨率图像。这些数字图像可用于识别宏观裂纹模式,也可以通过图像相关软件进行分析,以确定任何给定时刻的位移场或应变场。AE 技术用于检测加载过程中试样的损伤情况。用于监测发射技术的试验装置包括 AE 传感器、前置放大器和数字 AE 数据采集系统,试验采用两只传感器并固定在试样两侧,以记录 AE 活动,AE 信号的预放大由增益设置为 40 dB 的前置放大器提供,AE 记录的阈值水平设置为 45 dB,以避免背景噪声。

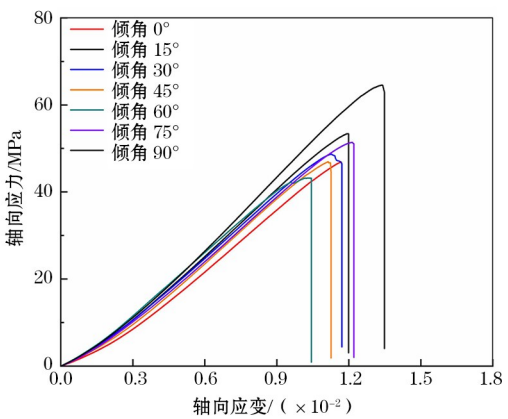
2 试验结果与分析

2.1 力学性能分析

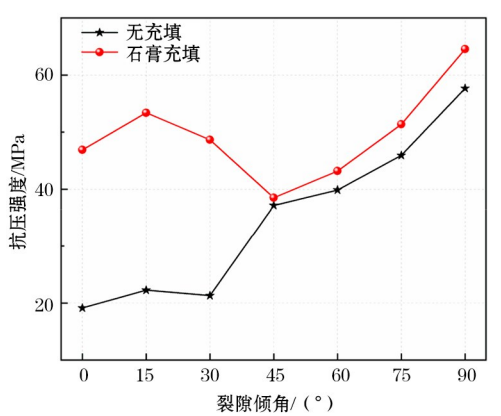
在单轴压缩条件下,无充填和充填两种情况下各裂隙倾角砂岩试样的应力-应变曲线及力学参数变化如图 2 所示。



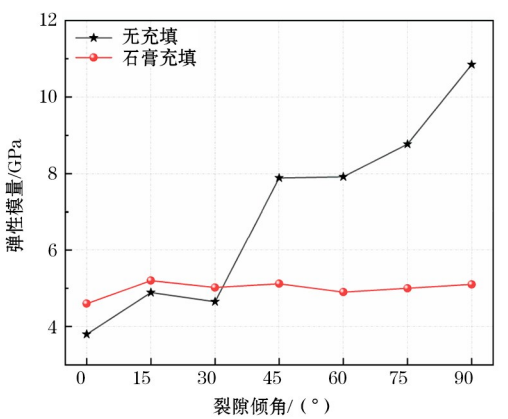
(a) 无充填裂隙试样的应力-应变曲线



(b) 充填裂隙试样的应力-应变曲线



(c) 峰值强度



(d) 弹性模量

图 2 应力-应变及力学参数随裂隙倾角的变化曲线

Fig.2 Variation curves of stress-strain and mechanical parameters of sandstone specimens with fracture dip angle

从图 2(a)中可以看出,裂隙试样应力-应变曲线均显示了 4 个不同的阶段,即压实阶段、弹性变形

阶段、塑性变形阶段和峰后阶段。试样达到峰值强度后，岩石迅速破坏，应力在极短时间内下降到峰值的10%以下。由图2(b)可知，与无充填试样相比，充填试样应力-应变曲线的弹性变形阶段更为显著，峰后阶段表现出更为明显的脆性。

由图2(c)和图2(d)可知，裂隙倾角对砂岩的抗压强度有着显著影响。无充填砂岩试样的峰值强度随着裂隙倾角的增加而增大，这是因为裂隙倾角越大，试样有效承载面积越大，承载能力也相应增大。经充填后裂隙试样的峰值强度随着裂隙倾角的增大呈先减小后增大的变化趋势，当裂隙倾角为0°～45°时，试样抗压强度从46.89 MPa减小至38.50 MPa；当裂隙倾角为45°～90°时，抗压强度从38.50 MPa增大至64.55 MPa。相较于无充填试样，充填试样的抗压强度显著提升，当裂隙倾角为15°时，试样抗压强度提升了140%；当裂隙倾角为75°时，试样抗压强度提升了3.7%。

如图2(d)可知，对于无充填试样，当裂隙倾角为0°～30°时，试样弹性模量整体呈上升状态，在45°时急剧增大，当裂隙倾角为45°～90°时，试样弹性模量又持续上升，表明裂隙倾角对无充填试样弹性模量的影响较为显著。相较于无充填，充填试样的弹性模量受裂隙倾角的影响较低，说明试样在充填处理后，其弹性变形特性得到了有效调整，使得岩石在不同裂隙倾角下的弹性模量差异相对较小。

2.2　DIC结果分析

研究断裂岩石的力学性质，需深入认识其内部裂纹的演化过程，众多学者在该领域做出了重要贡献。ZHAO等[14]、YANG等[15]将单轴压缩下单缺陷岩石的裂纹扩展归纳为翼形、反翼形、共面剪切、远拉、远切等7种基本类型，如图3所示。

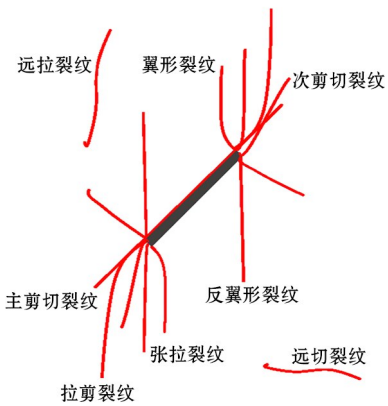


图3　单轴压缩下裂隙试样的裂纹类型

Fig.3　Crack types of cracked specimens under uniaxial compression

LIN等[16]、CHENG等[17]、CUI等[18]将这些裂纹分为其他7种类型，如图4所示。这两种分类方法在不同角度上是相辅相成的。图4所示裂纹类型即是对图3的补充和细化。

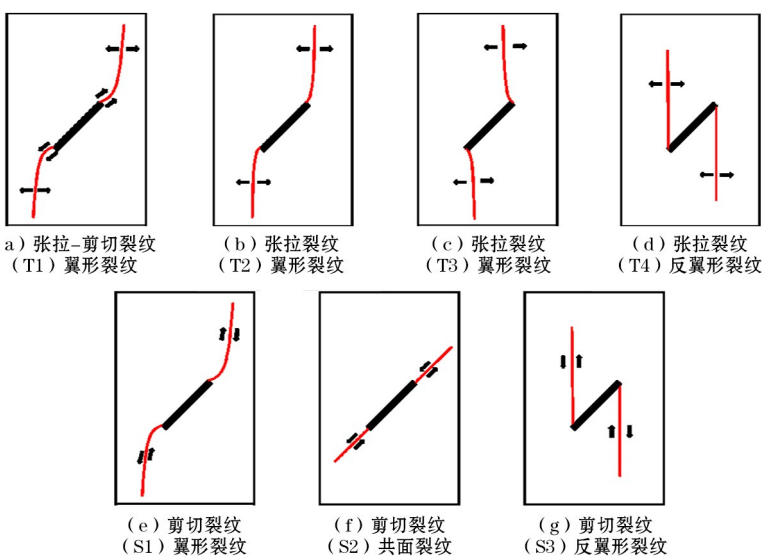


图4　预制裂隙引发的裂纹类型

Fig.4　Crack types caused by prefabricated cracks

在裂纹演化分析中，试样的高应变带演变和裂纹扩展特性具有良好的一致性[19-21]。因此，通过分析应变场的演化过程，研究充填物对裂纹萌生、扩展和贯通的影响是可行的。DIC技术可用于更好地识别

肉眼难以观察到的裂纹和裂纹的顺序。通过总结试样的破坏特性,发现其破坏模式可分为 3 种类型,且随着节理角度的增加,破坏模式会发生变化。根据 DIC 结果,对应 3 种不同破坏模式($\alpha=15°$、45°和 75°)的试样,分析其裂纹的萌生、扩展和贯通过程。即将试样在加载过程中的 5 个应力阶段下的主应变云图进行展示与分析,通过比较每个应力阶段下应变场的演化规律,区分充填物对裂隙砂岩的影响效果。

15°倾角裂隙试样在不同应力阶段的主应变云图如图 5 所示,其中,σ_f 表示应力。由图 5(a)可知,15°倾角裂隙试样的应变场呈不均匀分布,翼裂纹从预制裂隙的上下尖端开始出现,并沿着力加载方向向上下两端扩展,裂纹类型为张拉裂纹(T3)。随着轴向载荷的增加,在预制裂隙界面还伴生了多条张拉裂纹。在整个加载过程中,多条翼形张拉裂纹从裂隙开始扩展并贯通,直至试样被破坏。试样整体呈张拉破坏。

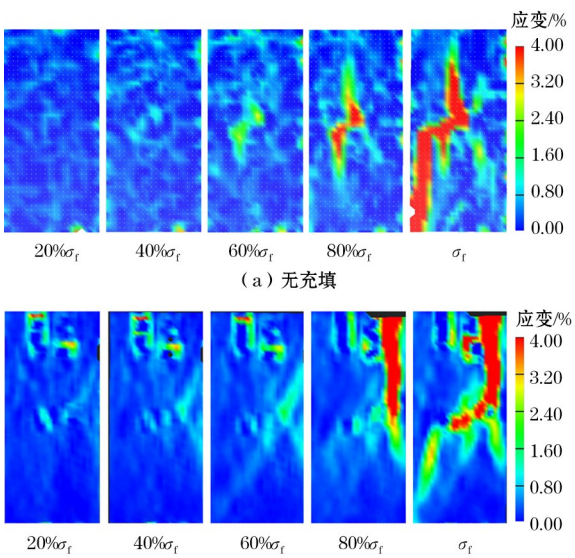


图 5 15°倾角裂隙试样在不同应力阶段的主应变云图

Fig.5 Main strain cloud diagrams of fractured specimens with 15° dip angle in different stress stages

由图 5(b)可知,试样应变场的变化首先发生在充填物中,随后,翼形裂纹从充填裂隙的上下两尖端开始萌生,并沿着力加载方向扩展,形成张拉-剪切裂纹(T1)。值得注意的是,每个尖端都有次生翼形裂纹产生,这是因为充填物具有一定的厚度且尖端为半圆形,容易在半圆的底端和弧尖形成应力集中,次生翼裂纹更容易被引发和扩展。随着轴向载荷的增加,次生翼形裂纹难以扩展,仅存在于裂隙尖端周围。裂隙下端与试样左下边界之间发生的滑动摩擦导致剪切裂纹贯通,同时在节理右上端形成明显的张拉应变集中带。在整个加载过程中,翼形裂纹从充填裂隙右上端开始扩展,然后在右上边界贯通导致试样被破坏。试样整体呈张拉-剪切复合破坏。

45°倾角裂隙试样在不同应力阶段的主应变云图如图 6 所示。由图 6(a)可知,在加载初始阶段,应变场呈不均匀分布,随后,翼裂纹从预制裂隙的上下尖端开始出现,预制裂隙尖端和试样边界附近的应变最大,翼形裂纹为张拉裂纹(T3)。随着轴向载荷的增加,在整个加载过程中,翼形张拉裂纹从裂隙开始扩展并贯通,直至试样被破坏。另外,在试样右下角还出现一条远端剪切裂纹。试样破坏模式整体呈张拉-剪切复合破坏。

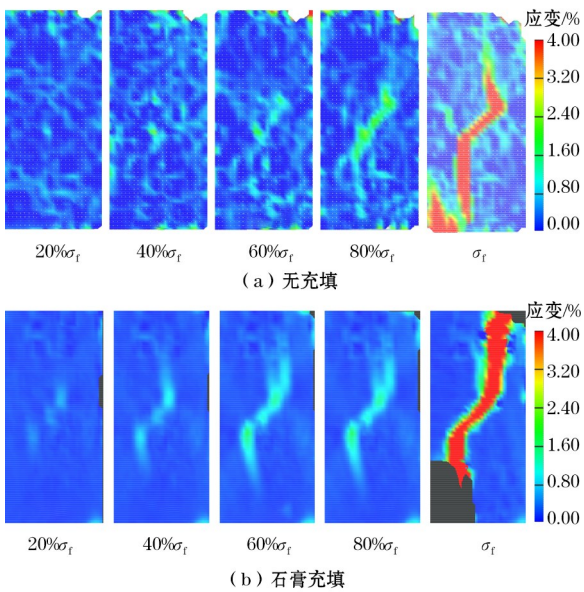


图 6 45°倾角裂隙试样在不同应力阶段的主应变云图

Fig.6 Main strain cloud diagrams of fractured specimens with 45° dip angle in different stress stages

由图 6(b)可知,相较于无充填试样,充填后试样表面应变分布更加均匀。应变不均匀变化首先出现在充填物中,随后翼裂纹从充填裂隙的上下尖端开始扩展,裂纹类型为张拉型裂纹。值得注意的是,45°裂隙倾角裂隙尖端并未出现二次裂纹,裂纹扩展路径单一。随着轴向载荷的增加,翼形裂纹持续扩展并贯通导致试样被破坏。另外,试样左下角出现远端剪切裂纹致使块体剥落。整个试样呈现张拉-剪切复合破坏。

75°倾角裂隙试样在不同应力阶段的主应变云图如图 7 所示。

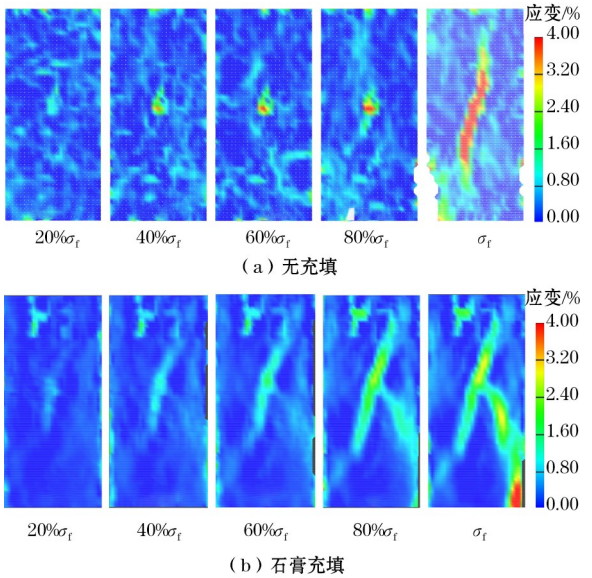


图 7　75°倾角裂隙试样在不同应力阶段的主应变云图

Fig.7　Main strain cloud diagrams of fractured specimens with 75° dip angle in different stress stages

由图 7(a)可知，试样的应变分布呈不均匀分布。随后，翼形剪切裂纹(S1)从预制裂隙的上下尖端开始出现，预制裂隙尖端和试样边界附近的应变最大。产生剪切裂纹的原因是，裂隙倾角越大，裂隙尖端承受的剪切应力越大，这使得颗粒易沿裂隙方向发生滑动摩擦，导致剪切裂纹扩展。随着轴向载荷的增加，在整个加载过程中，裂纹从裂隙开始扩展并贯通，直至试样被破坏。试样整体呈现剪切破坏。

由图 7(b)可知，相较于无充填，充填裂隙试样应变分布均匀。在加载初期，应变首先出现在充填物中，并沿着填充裂隙持续增加，随后，形成一条共面剪切裂纹(S2)。在加载后期，裂隙尖端出现反翼形裂纹，并和右下界面裂纹合并。试样破坏呈张拉-剪切复合破坏。

2.3　不同倾角充填裂隙砂岩的破坏形态特征

为了揭示不同倾角下充填裂隙砂岩的宏观破坏现象，对倾角为 0°～90°的试样破坏模式进行分析，结果如图 8 所示。

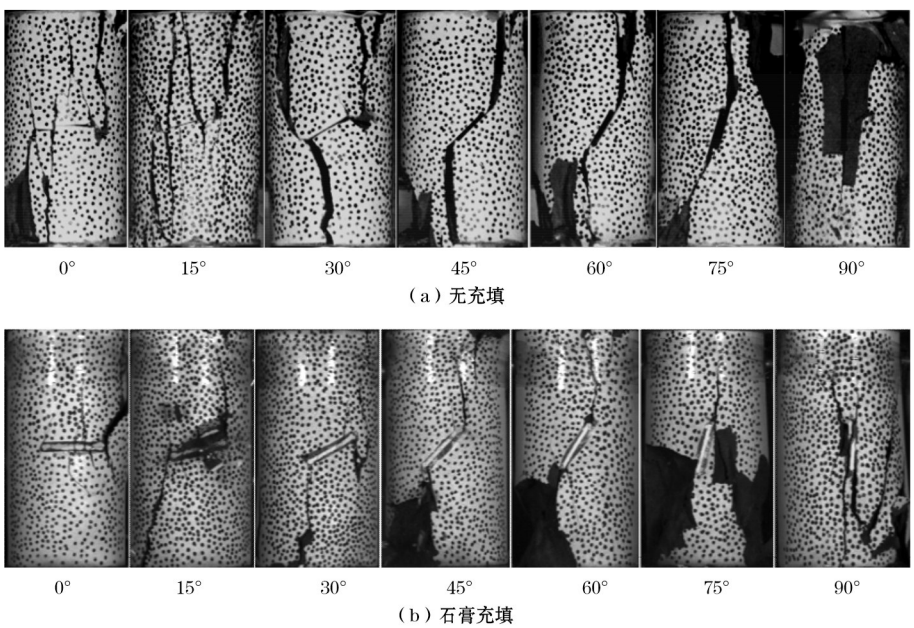


图 8　无充填与充填状态下 0°～90°倾角裂隙试样破裂图像

Fig.8　Fracture images of fractured specimens with 0°－90° dip angle under unfilled and filled conditions

由图 8(a)可知，当裂隙倾角为 0°、15°时，岩石在加载应力作用下，裂隙端部应力集中明显，破坏模式主要表现为沿裂隙面的张拉破坏，宏观裂纹多从裂隙端部及裂隙面萌生并向岩石内部扩展，呈现复杂的裂纹网络，岩石破碎较为严重，表现出较强的延性破坏特征。当裂隙倾角为 30°、45°时，岩石所受的剪切应力分量增大，张拉应力分量减小，破裂模式逐渐转变为剪切破坏，同时伴有小部分张拉破坏，导致岩石发生崩坏。裂纹大多沿着裂隙方向开始萌生，并与加载方向呈一定夹角向试样两端扩展。除了从裂隙端部扩展的主宏观裂纹外，还出现了一些次生裂纹，岩石破碎程度依然较高，但裂纹扩展方向相对 0°、15°时更为集中。当裂隙倾角为 60°、75°时，试样主要受剪切应力作用，破坏模式接近纯剪切破坏，宏观裂纹沿着与加载方向夹角较大的方向发展，形成较为明显的剪切破裂面，试样破碎块体大于裂隙倾

角为0°～45°的试样,但仍具有延性破坏的特征。当裂隙倾角为90°时,由于预制裂隙与加载方向平行,试样承受张拉应力,发生劈裂破坏,试样出现一条与裂隙平行的宏观裂隙。

由图8(b)可知,在充填状态下,当裂隙倾角为0°、15°时,试样的完整性得到增强,破坏模式依然表现为沿裂隙面的张拉-剪切复合破坏,但裂纹数量相较于无充填时明显减少,裂纹扩展也较为集中。当裂隙倾角为30°、45°、60°时,充填对裂纹扩展的抑制作用更加明显,裂纹主要沿充填物-岩石界面两端或绕过充填物扩展,扩展路径相对较为规则,次生裂纹数量少,岩石的破坏模式相对单一,以张拉破坏为主,试样的脆性增强。当裂隙倾角为75°、90°时,试样发生以剪切为主、张拉为辅的破坏模式,充填使得裂纹扩展相对稳定,形成较为平滑的剪切破裂面,岩石破碎块体相对均匀。然而,由于充填物自身强度有限,在高应力作用下,充填物可能会先于试样发生破坏,导致裂纹扩展控制能力有所下降,出现如90°裂隙倾角下充填物断裂导致的裂纹扩展复杂现象。

2.4 不同倾角充填裂隙砂岩裂纹演化特征

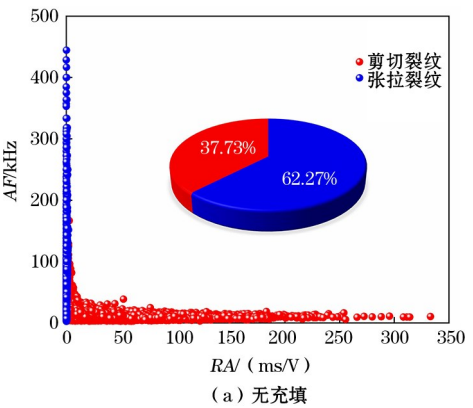
基于外荷载作用下微裂纹扩展机制的差异性,可以将其划分为拉伸型和剪切型两类损伤模式。声发射监测数据表明,两类裂纹在时频域呈现显著的分异性特征:剪切型微裂纹激发的声发射信号具有瞬态波形特征,表现为上升时间短、变化幅度大;与之相对,张拉型微裂纹则呈现缓变型波形特征[22-23]。因此,声发射特征参数可以从微观角度区分剪切裂纹和张拉裂纹,*AF* 值较高、*RA* 值较低的裂纹为张拉裂纹;而较低 *AF* 值和较高 *RA* 值的裂纹为剪切裂纹。*RA* 和 *AF* 值由式(1)和式(2)计算得出。

$$RA=\frac{\text{上升时间}}{\text{幅值}} \tag{1}$$

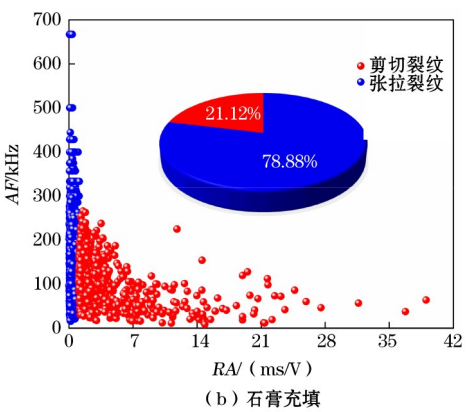
$$AF=\frac{\text{振铃计数}}{\text{持续时间}} \tag{2}$$

由于篇幅限制,本节只分析裂隙倾角为15°、45°、75°时,无充填和充填裂隙砂岩 *RA-AF* 值的变化特征及张拉、剪切裂纹占比,如图9至图11所示。

由图9可知,裂隙倾角为15°时,充填裂隙砂岩张拉裂纹占比为78.88%,剪切裂纹占比为21.12%,砂岩破坏过程中裂纹演化以张拉裂纹为主。张拉裂纹的 *AF* 值分布区域为0～700 kHz,分布密集区域为0～400 kHz;*RA* 值主要分布在0～1 ms/V之间。剪切裂纹的 *AF* 值分布区域为0～300 kHz,分布密集区域为0～200 kHz;*RA* 值主要集中分布在1～20 ms/V。无充填裂隙砂岩裂纹演化过程中以张拉裂纹为主,其中张拉裂纹占比62.27%,剪切裂纹占比37.73%,张拉裂纹的 *AF* 值分布区域为0～500 kHz,分布密集区域为0～300 kHz,张拉裂纹的 *RA* 值主要分布在0～5 ms/V之间;剪切裂纹的 *AF* 值主要分布区域为0～100 kHz,*RA* 值主要分布在5～350 ms/V之间。



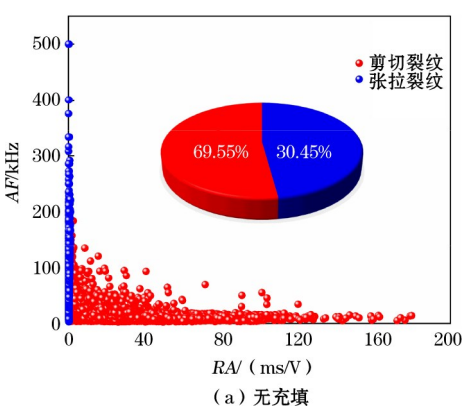
(a) 无充填



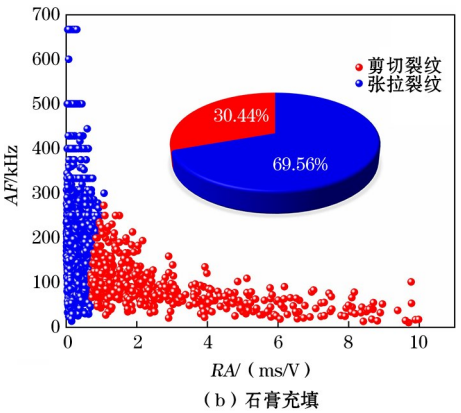
(b) 石膏充填

图9 15°倾角裂隙砂岩 *RA-AF* 变化情况及其裂纹分类结果

Fig.9 *RA-AF* variation and crack classification results of fractured sandstone with 15° dip angle



(a) 无充填

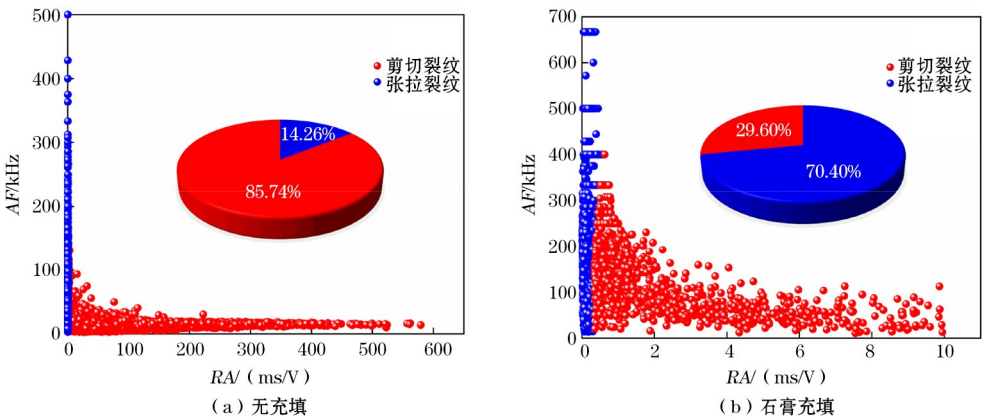


（b）石膏充填

图 10　45°倾角裂隙砂岩 *RA-AF* 变化情况及其裂纹分类结果

Fig.10　*RA-AF* variation and crack classification results of fractured sandstone with 45° dip angle

由图 10 可知，裂隙倾角为 45°时，充填裂隙砂岩张拉裂纹占比为 69.56%，剪切裂纹占比为 30.44%，破坏过程中裂纹演化以张拉裂纹为主，张拉裂纹的 *AF* 值分布区域为 0～700 kHz，分布密集区域为 0～400 kHz；*RA* 值主要分布在 0～1 ms/V 之间。剪切裂纹的 *AF* 值分布区域为 0～300 kHz，分布密集区域为 0～200 kHz；*RA* 值主要集中分布在 1～10 ms/V 之间。无充填裂隙砂岩的剪切裂纹在裂纹演化过程中占据主导地位，其中张拉裂纹占比为 30.45%，剪切裂纹占比为 69.55%。与充填状态相比，无充填裂隙砂岩的剪切裂纹占比较大。在无充填状态下，张拉裂纹的 *AF* 值分布区域为 0～500 kHz，分布密集区域为 0～300 kHz，张拉裂纹的 *RA* 值主要分布在 0～5 ms/V 之间；剪切裂纹的 *AF* 值主要分布区域为 0～200 kHz，分布密集区域为 0～100 kHz，*RA* 值集中分布在 5～200 ms/V 之间。



（a）无充填　（b）石膏充填

图 11　75°倾角裂隙砂岩 *RA-AF* 变化情况及其裂纹分类结果

Fig.11　*RA-AF* variation and crack classification results of fractured sandstone with 75° dip angle

由图 11 可知，裂隙倾角为 75°时，无充填裂隙砂岩裂纹演化过程中以剪切裂纹为主，其中，剪切裂纹占比为 85.74%，张拉裂纹占比为 14.26%。张拉裂纹的 *AF* 值分布区域为 0～500 kHz，分布密集区域为 0～300 kHz；*RA* 值主要分布在 0～5 ms/V 之间。剪切裂纹的 *AF* 值主要分布区域为 0～200 kHz，分布密集区域为 0～100 kHz；*RA* 值集中分布在 5～600 ms/V 之间。充填裂隙砂岩中张拉裂纹占比为 70.40%，剪切裂纹占比为 29.60%。此充填状态下，砂岩破坏过程中裂纹演化以张拉裂纹为主。从 *RA-AF* 值分布情况来看，张拉裂纹的 *AF* 值分布区域为 0～700 kHz，分布密集区域为 0～500 kHz；*RA* 值主要分布在 0～1 ms/V 之间。剪切裂纹的 *AF* 值分布区域为 0～400 kHz，分布密集区域为 0～300 kHz，*RA* 值集中分布在 1～10 ms/V 之间。

综上所述，对于无充填裂隙试样，裂隙倾角为 0°～15°时，试样裂纹演化以张拉裂纹为主；裂隙倾角为 30°～90°时，试样裂纹演化以剪切裂纹为主。充填状态下试样在裂纹扩展中均以张拉裂纹为主，主要产生张拉－剪切复合破坏模式。同时，无充填状态下试样的 *RA* 值分布范围远大于充填状态，而 *AF* 值分布范围小于充填状态，表明无充填状态下试样裂纹扩展更为剧烈，而充填物的存在抑制了裂隙岩石的裂纹扩展活动。

3　结论

（1）添加充填物使得砂岩试样应力－应变曲线的弹性阶段更加明显，充填物对砂岩力学参数的增强效果随着裂隙倾角的增大而减小，充填试样峰值

强度的增长幅度范围为[3.7%,140%]。对于弹性模量,无充填砂岩的弹性模量随裂隙倾角的增加而增大,充填后弹性模量基本不受裂隙倾角影响。

(2) 无充填裂隙砂岩试样表面应变分布复杂,而充填裂隙砂岩应变分布较为均匀,裂纹扩展路径集中。无充填条件下,倾角 0°～15°的裂隙砂岩表现为翼形张拉裂纹贯通的张拉破坏,倾角 30°～90°的裂隙砂岩表现为翼形剪切裂纹贯通的剪切破坏;在含充填物的条件下,无论裂隙倾角大小,充填裂隙砂岩破坏模式均呈现翼形拉剪裂纹贯通的张拉-剪切型复合破坏模式。

(3) 基于声发射 RA 值和 AF 值,采用高斯混合模型聚类算法,区分了单轴压缩过程中的张拉微裂纹和剪切微裂纹,分析了充填状态对裂纹演变特征的影响。结果表明:对于无充填裂隙砂岩,裂隙倾角为 0°～15°时,裂纹演化试以张拉裂纹为主,试样主要发生张拉损伤破坏;裂隙倾角为 30°～90°时,则以剪切裂纹为主,主要产生剪切损伤破坏。相较于无充填试样,充填裂隙砂岩在裂纹扩展中均以张拉裂纹为主,主要产生张拉-剪切复合破坏模式。

参考文献(References):

[1] 张朝俊,吴顺川,储超群,等.裂隙砂岩应变场演化与超声时移衰减特征研究[J].岩土力学,2024,45(5):1284-1296.
ZHANG Chaojun, WU Shunchuan, CHU Chaoqun, et al. Strain field evolution and ultrasonic time-lapse attenuation characteristics of fractured sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics,2024,45(5):1284-1296.

[2] 唐博宁,朱传庆,邱楠生,等.雄安新区雾迷山组岩溶裂隙发育特征[J].地质学报,2020,94(7):2002-2012.
TANG Boning, ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, et al. Characteristics of the karst thermal reservoir in the Wumishan Formation in the Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica,2020,94(7):2002-2012.

[3] 王春萍,王璐,刘建锋,等.单轴压缩条件下单裂隙花岗岩力学特性及破坏特征[J].西南交通大学学报,2024,59(2):369-376+446.
WANG Chunping, WANG Lu, LIU Jianfeng, et al. Mechanical properties and failure characteristics of granite intersected with single fractures under uniaxial compression[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2024,59(2):369-376+446.

[4] 袁媛,潘鹏志,赵善坤,等.基于数字图像相关法的含填充裂隙大理岩单轴压缩破坏过程研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(2):339-351.
YUAN Yuan, PAN Pengzhi, ZHAO Shankun, et al. The failure process of marble with filled crack under uniaxial compression based on digital image correlation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(2):339-351.

[5] FENG X H, LIU H L, CHEN X, et al. Acoustic emission characteristics and cracking mechanism analysis of anisotropic shale containing a circular hole under uniaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2025,135:104771.

[6] GUO T F, LIU K W, WANG H Q, et al. Mechanical characteristics and fracturing behavior of rock-concrete composite specimens with two pre-existing parallel flaws under uniaxial compression based on AE and DIC systems [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 136:104866.

[7] 余伟健,周明娟.不同次裂隙数目条件下岩石力学特性及破坏模式[J].采矿与安全工程学报,2025,42(2):394-403.
YU Weijian, ZHOU Mingjuan. Rock mechanics characteristics and failure modes under different number of secondary fractures [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2025,42(2):394-403.

[8] 王煜,付建新,汪杰.单裂隙岩石力学特性的单轴加载速率效应及破裂细观机理研究[J].矿业研究与开发,2020,40(8):66-74.
WANG Yu, FU Jianxin, WANG Jie. Study on uniaxial loading rate effect and fracture mesoscopic mechanism of mechanical properties of single fractured rock[J]. Mining Research and Development,2020,40(8):66-74.

[9] 孙浩,陈帅军,金爱兵,等.含裂隙类岩石试样单轴抗压强度特征及裂纹演化规律[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(3):404-413.
SUN Hao, CHEN Shuaijun, JIN Aibing, et al. Uniaxial compressive strength characteristics and crack evolution laws of rock-like samples with flaws [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(3): 404-413.

[10] 李群,康健,李示波,等.不等长裂隙几何参数对花岗岩强度及裂纹扩展的影响[J].矿业研究与开发,2024,44(10):141-149.
LI Qun, KANG Jian, LI Shibo, et al. Influence of geometric parameters of unequa-length fractures on the strength and crack propagation of granite [J]. Mining Research and Development,2024,44(10):141-149.

[11] HAN Y, LI S C, YUAN C, et al. Investigation of mechanical properties in thin spray-on liner coated sandstone:comparative study of unfilled and filled flaws[J]. Construction and Building Materials,2024,429:136189.

[12] 孙立臣,娄培杰,李成杰,等.基于离散元的平行双裂隙砂岩破裂特征和失稳机理研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):182-189.
SUN Lichen, LOU Peijie, LI Chengjie, et al. Fracture characteristics and instability mechanism of sandstone with parallel double fissures based on discrete element method [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(8): 182-189.

[13] MIAO S T, PAN P Z, WU Z H, et al. Fracture analysis of sandstone with a single filled flaw under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 204:319-343.

[14] ZHAO Z H, LIU H, MA Q, et al. Micro-macro damage, deterioration and cracking of heterogeneous composite rock masses with non-penetrating cracks under uniaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2023,125:103919.

[15] YANG S Q, HUANG Y H, JING H W, et al. Discrete element modeling on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. Engineering Geology,2014,178:28-48.

[16] LIN Q B, CAO P, WEN G P, et al. Crack coalescence in rock-like specimens with two dissimilar layers and pre-existing double parallel joints under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,139:104621.

[17] CHENG H, ZHOU X P, ZHU J, et al. The effects of crack openings on crack initiation, propagation and coalescence behavior in rock-like materials under uniaxial compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2016,49(4): 3481-3494.

[18] CUI J Q, FENG G R, LI Z, et al. Failure analysis of sandstone with filled and unfilled cross-flaws under uniaxial compression [J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2022,47(10):13435-13449.

[19] ZHOU X P, WANG Y T, ZHANG J Z, et al. Fracturing behavior study of three-flawed specimens by uniaxial compression and 3D digital image correlation: sensitivity to brittleness[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019,52:691-718.

[20] ZHAO Y L, ZHANG L Y, LIAO J, et al. Experimental study of fracture toughness and subcritical crack growth of three rocks under different environments[J]. International Journal of Geomechanics,2020,20(8):04020128.

[21] LIN Q B, CAO P, CAO R H, et al. Mechanical behavior around double circular openings in a jointed rock mass under uniaxial compression[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering,2020,20:1-18.

[22] 王远增,万文,赵延林,等.不同加载速率对预制裂隙类岩石材料的力学特性影响及声发射分析[J].矿业研究与开发,2023,43(11):81-88.
WANG Yuanzeng, WAN Wen, ZHAO Yanlin, et al. Mechanical properties and acoustic emission analysis of rock-like materials with prefabricated fractures under different loading rates[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):81-88.

[23] 陈博,汪学清,董泽,等.基于DIC与声发射技术的裂纹识别与损伤变量分析[J].矿业研究与开发,2024,44(10):150-158.
CHEN Bo, WANG Xueqing, DONG Ze, et al. Crack identification and damage variable analysis based on DIC and acoustic emission technology[J]. Mining Research and Development,2024,44(10):150-158.