非均布载荷下砂岩裂隙填充力学响应与裂纹演化机制

刘　刚[1,2,3]，昝永龙[1,2]，王盛旋[1,2]，王　淼[4]
（1. 黑龙江科技大学 矿业工程学院，黑龙江 哈尔滨　150022；2. 黑龙江科技大学 黑龙江省煤矿深部开采地压控制与瓦斯治理重点实验室，黑龙江 哈尔滨　150022；3. 宝泰隆新材料股份有限公司，黑龙江 七台河　154604；4. 黑龙江省水利科学研究院，黑龙江 哈尔滨　150080）

摘要：巷道围岩常受其内部裂隙结构及复杂非均布载荷的耦合作用，引起应力分布畸变和局部破坏加剧，导致其整体承载能力降低并增加了失稳风险. 为探究非均布载荷作用下不同裂隙特征砂岩的裂纹扩展演化规律，以完整砂岩试样、预制矩形裂隙试样和填充裂隙试样为研究对象，采用自研非均布载荷试验装置，结合DIC全场应变测量、声发射技术及FLAC^{3D}数值模拟，对非均布载荷下裂隙试样的裂纹扩展、声发射特征、应力场与塑性区演化进行了分析. 试验结果表明：砂岩峰值强度受形态控制显著，不同试样峰值强度表现为完整试样＞填充裂隙试样＞预制裂隙试样；引入损伤因子P来量化试样劣化程度，完整、预制裂隙、填充裂隙试样的劣化程度呈先增后减趋势. 加载方式决定砂岩裂纹扩展路径，形态特征决定破坏模式：完整试样以拉伸破坏为主，预制裂隙试样为拉-剪混合破坏，填充裂隙试样为剪切破坏. 试样声发射活动均由静息期向活跃期转化，累计振铃计数呈阶梯式递增，其与b值呈显著负相关关系；完整试样在静息期保持较高的b值，而预制裂隙试样在失稳破坏阶段表现出显著的b值下降；不同结构试样的声发射峰值频率分布特征表现出明显差异. 砂岩内部应力表现出与局部载荷正相关的梯度分布，不同区域峰值强度存在延迟性；应力梯度控制塑性区演化，决定裂纹扩展路径与贯通程度. 研究可为含裂隙岩体支护设计与围岩稳定性分析提供理论依据.

关键词：裂隙注浆；声发射；非均布载荷；DIC应变特征；数值模拟
中图分类号：TD 313　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-1964(2026)02-0465-19

Mechanical response and crack evolution mechanism of sandstone with fracture infilling under non-uniform loading

LIU Gang[1,2,3], ZAN Yonglong[1,2], WANG Shengxuan[1,2], WANG Miao[4]
(1. College of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150022, China; 2. Heilongjiang Ground Pressure & Gas Control in Deep Mining Key Laboratory, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150022, China; 3. Baotailong New Materials Co., Ltd., Qitaihe, Heilongjiang 154604, China; 4. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Roadway surrounding rock is often subjected to the coupled influence of internal fracture structures and complex non-uniform loads, leading to stress redistribution, aggravated local failure, re-

收稿日期：2025－08－21　　**修回日期：**2025－10－24　　**DOI：**10.13247/j.cnki.jcumt.20250339
基金项目：黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2023E039)；国家自然科学基金项目(52374199)
通信作者：刘　刚(1986—)，男，黑龙江省伊春市人，副教授，硕士生导师. E-mail：liugang@usth.edu.cn
引用格式：刘　刚，昝永龙，王盛旋，等. 非均布载荷下砂岩裂隙填充力学响应与裂纹演化机制[J]. 中国矿业大学学报，2026，55(2)：465-483.
LIU Gang, ZAN Yonglong, WANG Shengxuan, et al. Mechanical response and crack evolution mechanism of sandstone with fracture infilling under non-uniform loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 465-483.

duced overall bearing capacity, and increased instability risk. To investigate the crack propagation and evolution characteristics of sandstone with different fracture features under non-uniform loading, three types of specimens that include intact sandstone, sandstone with prefabricated rectangular fractures, and sandstone with filled fractures were tested. A self-developed non-uniform loading apparatus was employed in combination with digital image correlation (DIC) for full-field strain monitoring, acoustic emission (AE) techniques, and FLAC^{3D} numerical simulations to analyze crack propagation, AE response, stress field evolution, and plastic zone development. The experimental results reveal that the peak strength of sandstone is significantly controlled by fracture morphology, following the order: intact > filled fracture > prefabricated fracture. Based on the introduced damage factor P, the damage evolution of the three types specimens exhibits a trend of initial increase followed by a subsequent decrease. The loading mode determines the crack propagation path, whereas fracture morphology governs the failure mode: tensile failure dominates in intact specimens, tensile-shear mixed failure occurs in prefabricated fracture specimens, and shear failure prevails in filled fracture specimens. AE activity transitions from a quiescent stage to an active stage, with cumulative ringing counts increasing stepwise. A significant negative correlation exists between the b-value and cumulative ringing counts; the intact specimen maintains a relatively high b-value during the quiescent period, whereas the prefabricated fracture specimen exhibits the most pronounced b-value decrease at failure. Moreover, the peak frequency distribution differs markedly among specimen types. The internal stress of sandstone shows a gradient distribution positively correlated with local load intensity, with delayed peak strength across different regions. Stress gradients govern plastic zone evolution and determine crack propagation paths and coalescence behavior. This study provides theoretical insights for the support design of fractured rock masses and the stability evaluation of roadway surrounding rock.

Key words: racture grouting; acoustic emission; non-uniform loading; DIC strain characteristics; numerical simulation

岩石作为天然的工程地质材料,其表面及内部由于风化演变、地质构造及工程扰动等因素而产生大量的裂隙缺陷,缺陷的存在降低了岩体的承压能力及稳定性[1-2]. 已有研究结果表明,处于非均布载荷作用下岩石的力学破坏机制与处于均布载荷下的具有差异性[3]. 为揭示非均布载荷对煤岩体行为的实质影响,已有研究从试样尺度到工程灾害效应展开了探索:文献[4]以梯形截面试样为载体,探究了等效非均布载荷下岩石的基本力学响应机制,提供了非均布载荷表征的试验依据;在此基础上,文献[5]从整体力学强度角度归纳了煤岩在非均布载荷下的力学特性;文献[6]聚焦偏心载荷与孔洞缺陷的耦合作用,揭示了缺陷煤岩的致损机理,补充了非均布载荷条件下的微观诱损路径;文献[7]将非均布载荷引入室内模拟试验中,系统分析了其对煤与瓦斯突出的影响,使研究从力学响应延展至灾害致因层面;文献[8]则揭示了含孔试样在非对称载荷作用下的渐进破坏机制及损伤特征. 以上研究成果为非均布载荷下岩石力学响应及裂纹演化机制研究提供了重要的理论基础与试验参考,然而针对填充裂隙岩体在非均布载荷作用下失稳破坏行为的研究鲜有报道. 因此,研究非均布载荷模式下裂隙岩体失稳破坏机制对于评价复杂载荷下含裂隙岩体稳定性和控制具有重要的参考意义和工程价值.

多年以来,学者们针对含裂隙岩石的力学特性及失稳破坏演化情况,借助剪切试验[9-10]、单轴压缩试验[11-12]、双轴压缩试验[13]及三轴压缩试验[14-15]等室内试验,对裂隙角度[16]、裂隙数目[17]、裂隙位置[18]等不同变量进行了广泛且详细的研究. 结果表明:随着裂隙倾角增大,试件平均轴向峰值载荷呈先减小后增大随后再减小的趋势;裂隙数目与岩石的峰值强度及弹性模量呈负相关;裂隙位置对岩石失稳破坏模式存在导向作用. 学者们针对注浆加固裂隙岩体的研究亦开展了大量工作. 例如,文献[19]进行了不同裂隙倾角下注浆裂隙岩体试样单

轴压缩试验，对注浆裂隙岩体力学特性影响因素进行了讨论研究，提出了浆-岩界面相关系数 k，结果表明裂隙倾角及岩石基质共同控制注浆裂隙岩体的力学行为；文献[20]通过对不同填充形式及裂隙几何形状的砂岩进行单轴压缩试验，发现裂隙试样的力学性能与填充物的强度呈正相关；文献[21]通过对有、无裂隙填充试样进行单轴压缩试验，发现裂隙填充岩体峰值强度及峰后塑性变形能力均得到增强．除此之外，学者们针对复杂工况下含裂隙岩体的力学特性及裂纹扩展模式亦开展了相关研究．例如，文献[22]利用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置对双裂隙岩石进行冲击压缩试验，总结了6种裂纹聚集形式，划分了试件渐进破坏阶段；文献[23]开展了轴压及孔压低频循环加卸载条件下单裂隙砂岩的应力-渗流耦合试验，揭示了倾斜单裂隙岩石的力学响应特征，得出流量与分形维数 D、裂隙连通率 Φ 呈正相关．

为了对岩石细观破坏特征及失稳破坏模式进行细致观测及研究，目前声发射技术(AE)[24-26]、数字图像相关技术(DIC)[27-29]等方法得以广泛应用．例如，文献[30-33]通过对声发射参数进行分析总结，得出了裂隙砂岩破坏前兆响应系数、岩石损伤变形阶段与AE信号频率之间的对应关系以及损伤变量演化规律；文献[34-36]通过DIC技术对单轴压缩下岩石试件裂纹起裂、扩展及失稳破坏模式进行了实时监测，获取了岩石试件全场应变数据，为岩石裂纹演化提供了数据支持．为从多角度探究岩石细观特征，学者们结合数值模拟方法对试样的破坏模式、裂纹演化规律进行了探究．例如，文献[37]结合离散元数值模拟软件对注浆裂隙岩体传力机制、声发射响应特征及裂纹扩展规律进行了模拟验证，揭示了裂隙角度与拉剪裂纹分布的关系．总之，既往研究通过多种监测手段及数值模拟方法探究了岩石细观破坏特征，为揭示裂隙岩石在不同条件下的失稳破坏机制提供了重要支撑．

综上所述，国内外学者针对完整岩石、预制裂隙岩石、注浆裂隙岩石的力学特性及破坏损伤规律开展了大量研究工作，取得了丰硕的研究成果．但以上研究成果均是基于常规单轴压缩、双轴压缩或三轴压缩等均匀载荷条件下获取的，对非均布载荷条件下含裂隙岩石的破裂演化规律研究涉及较少．因此，本试验基于非均布载荷条件进行预制裂隙岩石的单轴压缩试验，结合声发射技术、DIC技术和数值模拟等方法，探究预制裂隙岩石的应变场演化规律及裂纹扩展模式，以期为复杂载荷加载条件下填充裂隙岩体加固及支护体系设计提供科学依据．

1　试验研究

1.1　非均布载荷加载方式

在工作面回采过程中，围岩受力并不是理想化的均布状态，而是普遍表现为复杂的非均布载荷，如图1所示．首先，受超前支承应力作用，煤壁前方的应力峰值集中于一定范围内，并呈空间非对称分布，使巷道顶板与两帮承受压力不均；其次，由于侧向采空区的存在，围岩一侧失去支撑，上覆岩层产生悬臂梁效应并向采空区方向弯曲下沉，导致巷道顶板靠近采空区一侧形成高应力集中，而远离采空区一侧则表现为卸载或张拉状态．工程实践表明，巷道围岩破坏往往呈“一侧片帮，另一侧相对稳定”或“顶板斜向冒落”的典型不对称破坏模式．因此，可认为非均布载荷并非偶然情况，而是煤矿开采条件下常见且普遍存在的力学现象．

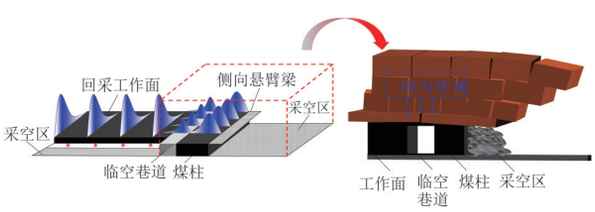


图1　工程背景

Fig. 1　Engineering background

为实现单轴压缩下的非均布载荷加载，本试验依据胡克定律选用不同弹性模量的金属垫片作为传递介质．不同垫片在相同载荷下变形差异导致接触界面形成非均布应力区．为筛选合适垫片，先进行弹性模量标定，即对多组金属垫片开展一次加卸载单轴压缩试验．参考常规单轴试验所得峰值载荷平均值175.7 kN，标定试验以1 kN/s的速率加载至220 kN后卸载，绘制应力-应变曲线并计算弹性模量，如图2a所示，最终选取3类垫片，其峰值应变分别为0.30%，0.31%，0.32%，弹性模量分别为345，430，538 GPa，依次标记为SY-1，SY-2，SY-3．

如图2b所示，通过对试样上方垫片的排列顺序进行组合，可以实现对试样的非均布载荷加载．本试验共进行3种垫片排列组合，用以模拟实际工况中所遇到的复杂载荷环境．

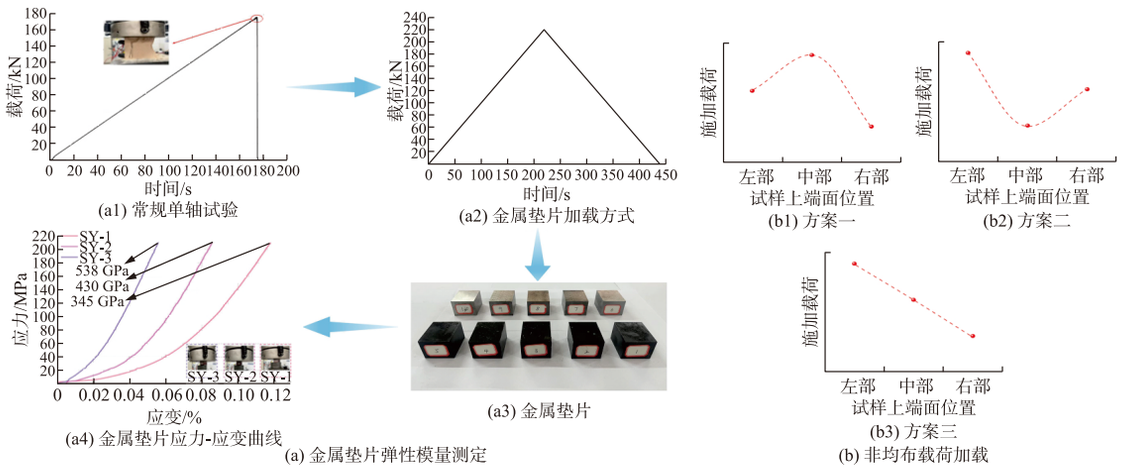


图 2 非均布载荷加载

Fig. 2 Non-uniformly distributed load application

1.2 试样制备

为研究非均布载荷下填充裂隙岩石的裂纹演化规律,选取砂岩为基质岩石. 依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013),对完整砂岩取芯制备 4 个标准圆柱试样(编号:YSB-1, YSB-2, YSB-3, YSB-4),经波速测试确认其均质性. 随后将原岩加工得到 27 个长方体试样(尺寸为 100 mm×100 mm×30 mm),其中 21 个试样在中心预制尺寸为 20 mm×10 mm 的矩形裂隙. 试样分为 3 组:JXW(完整试样)、JXQ(裂隙试样)、JXT(填充裂隙试样,填充材料为硅酸盐水泥). 为实现全过程全应变场监测,采用 DIC 技术并进行散斑喷涂;加载方式为单轴压缩,利用不同弹性模量金属垫片实现非均布载荷. 试样制备及试验流程如图 3 所示.



图 3 试样制备及试验流程

Fig. 3 Flowchart of specimen preparation and testing procedures

1.3　试验设备及试验方案

试验设备主要由4部分组成：试验加载与控制系统、声发射采集系统、数字散斑监测系统、高速摄像机和应变采集系统．1）试验加载与控制系统采用黑龙江科技大学TAW-2000型微机控制电液伺服试验机，该试验机为交流电机伺服驱动，支持开环加载、位移加载、载荷加载3种控制方式，轴向试验力测量最大值为2 000 kN，设备稳定性高、测量精度高，可实现岩石单轴及三轴抗压、蠕变试验等常规试验．2）声发射采集系统采用SH-Ⅱ声发射系统，可对岩石破坏全过程进行监测．本试验设定门槛值为40 dB、采样频率为10 MHz，为确保探头与岩石紧密贴合，在接触面涂抹工业凡士林，并采用专用固定装置固定探头．3）数字散斑监测系统采用DSE三维全场应变测量系统，主要包括工业级测头、高精度数采控制器、高性能计算机、高亮度光源和DSE三维全场应变测量系统软件等设备，在本次试验中采集频率设置为5帧/s．4）高速摄像机像素为100万，设置采集频率为20帧/s．在试验开始时，多设备同步进行监测，保证获取相同时间参数，便于后续数据处理分析．

为全面探究非均布载荷作用下含裂隙岩体裂纹扩展演化规律，本次试验按照金属垫片排列顺序共设计3组方案，每组的垫片排列顺序分别为：1）SY-2，SY-3，SY-1；2）SY-3，SY-1，SY-2；3）SY-3，SY-2，SY-1．每组方案均对完整试样、预制裂隙试样、填充裂隙试样进行单轴压缩对比试验，采用1 kN/s的加载速率进行加载控制，同时进行数据采集，具体试验方案见表1．

为保证试验结果的可靠性，对不同方案下的3类试样均进行3组重复非均布载荷单轴压缩试验，结果如图4所示．

表1　试验方案

Table 1　Experimental scheme

方案编号	金属垫片排列(从左至右)	试样编号	试样尺寸(长×高×宽)/(mm×mm×mm)	加工状态
方案一	SY-2，SY-3，SY-1	JXW-1	100.01×100.03×30.05	完整试样
		JXW-2	100.05×100.04×30.02	
		JXW-3	100.03×100.07×30.03	
		JXQ-1	100.06×100.04×30.08	预制裂隙试样
		JXQ-2	100.04×100.02×30.01	
		JXQ-3	100.04×100.04×30.02	
		JXT-1	100.05×100.06×30.04	填充裂隙试样
		JXT-2	100.06×100.06×30.06	
		JXT-3	100.02×100.03×30.04	
方案二	SY-3，SY-1，SY-2	JXW-4	100.06×100.04×30.04	完整试样
		JXW-5	100.06×100.04×30.12	
		JXW-6	100.02×100.04×30.08	
		JXQ-4	100.06×100.14×30.04	预制裂隙试样
		JXQ-5	100.06×100.06×30.12	
		JXQ-6	100.14×100.12×30.04	
		JXT-4	100.06×100.10×30.18	填充裂隙试样
		JXT-5	100.16×100.02×30.06	
		JXT-6	100.04×100.06×30.04	
方案三	SY-3，SY-2，SY-1	JXW-7	100.06×100.04×30.18	完整试样
		JXW-8	100.04×100.14×30.08	
		JXW-9	100.10×100.12×30.02	
		JXQ-7	100.12×100.04×30.12	预制裂隙试样
		JXQ-8	100.06×100.04×30.10	
		JXQ-9	100.04×100.04×30.16	
		JXT-7	100.06×100.04×30.08	填充裂隙试样
		JXT-8	100.02×100.02×30.06	
		JXT-9	100.16×100.14×30.12	

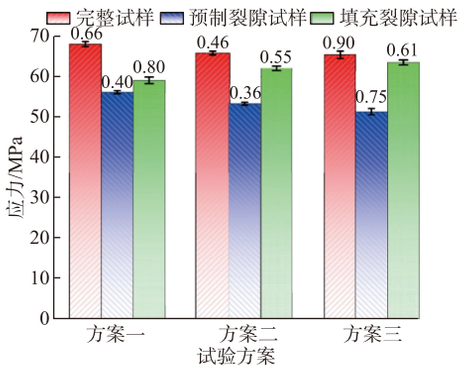


图 4 试样误差分析

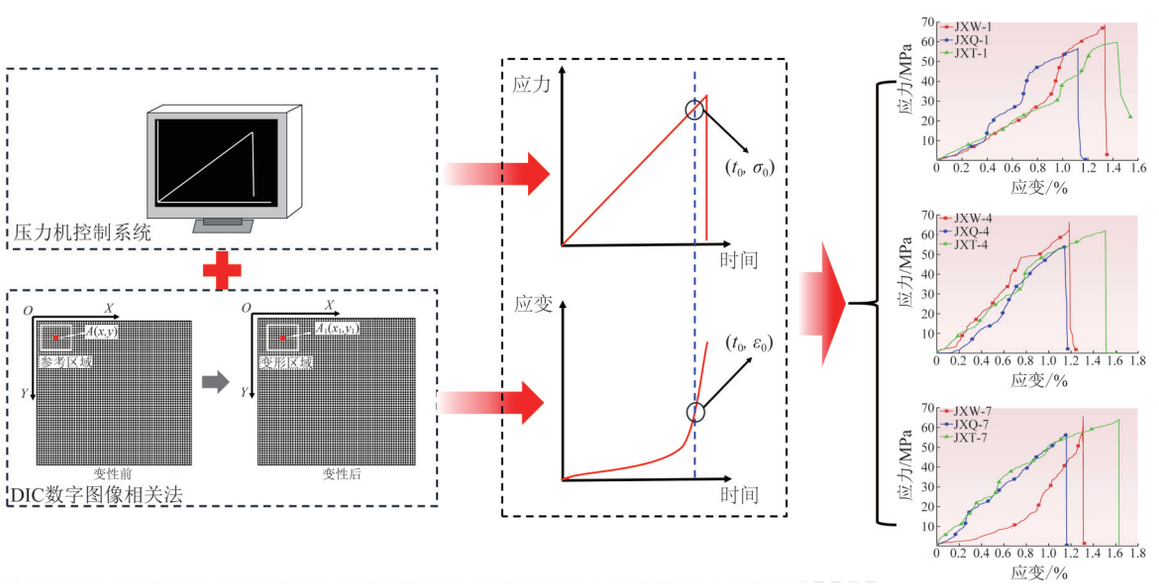
Fig. 4 Error analysis of specimens

由图 4 可知，方案一中 JXW，JXQ，JXT 试件平均单轴抗压强度分别为 67.9，55.9，59.0 MPa；方案二中 JXW，JXQ，JXT 试件平均单轴抗压强度分别为 65.7，53.1，62.0 MPa；方案三中 JXW，JXQ，JXT 试件平均单轴抗压强度分别为 65.3，51.2 和 63.3 MPa. 误差棒表示标准差，通过统计结果可知，各组结果标准差为 0.36～0.90 MPa，相较于试样平均单轴抗压强度仅占 0.6%～1.5%，整体波动性较小，表明试验结果重复性良好，数据较稳定. 因此，在后续研究分析中，每组分别选取其中一个典型试样进行细致讨论.

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线变化特征

本试验利用压力机获取时间-应力曲线，采用 DIC 技术获取时间-应变曲线，并基于时间同步原理协同绘制应力-应变曲线，如图 5 所示. 由该图可知，完整试样、预制裂隙试样及填充裂隙试样在不同应力梯度下的应力-应变曲线变化规律整体相似，均可划分为初始压密阶段、稳定弹性阶段、塑性屈服阶段和失稳破坏阶段. 初始压密阶段曲线平缓上升；弹性阶段曲线稳步上升并出现“缓台”现象，这主要源于非均布载荷下局部区域应变增长不同步，形成应变协调滞后效应；进入屈服阶段后曲线波动频繁，反映裂纹不断萌生与扩展，试样逐渐由稳定向失稳过渡；在失稳破坏阶段载荷达到试样峰值强度后，应力急剧下降，试样最终丧失承载能力.



注：t_0 为某一时刻；ε_0 及 σ_0 分别为该时刻对应的应变及应力.

图 5 应力-应变曲线特征

Fig. 5 Characteristics of the stress-strain curve

为更直观地表征预制裂隙和填充手段对试样承载能力的宏观影响，定义“劣化”为相同非均布载荷加载下因预制裂隙和填充手段导致试样宏观承载能力下降的现象. 以完整试样在相同非均布载荷加载下的峰值强度 σ_1 为参照，采用损伤因子 P 量化劣化程度，得到相对于完整试样的强度损失百分比，其计算公式为：

$$P=\frac{\sigma_1-\sigma_2}{\sigma_1}\times 100\%, \tag{1}$$

式中 σ_2 为预制裂隙试样或填充裂隙试样的峰值强度.

所得 P 值越大，表明试样劣化程度越严重；当 $P=0$ 时说明无劣化；若 $P<0$，则表明试样的承载能力相对于完整试样有所提升.

不同方案下试样强度特征对比如图 6 所示.

不同类型试样在同一组方案中的峰值强度均表现为：完整试样＞填充裂隙试样＞预制裂隙试样．试样峰值强度总体呈先减后增的周期性变化趋势．方案一至方案三中完整试样、填充裂隙试样、预制裂隙试样的峰值强度依次为：68.0，56.0，59.1，66.2，53.0，62.0，65.3，52.0和64.0 MPa．不同类型试样在同一组方案中的劣化程度大小为：预制裂隙试样＞填充裂隙试样＞完整试样，劣化程度总体呈先增后减的趋势，预制裂隙试样劣化程度处于17.6%～20.4%区间内，填充裂隙试样劣化程度处于2.0%～13.1%区间内，其中方案三中的JXQ-7含裂隙试样劣化程度最高且峰值强度最低．

不同试样峰值强度与劣化程度的差异表明岩体状态与载荷类型密切相关．完整试样始终保持最高强度，预制裂隙试样最低，说明结构完整性是承载能力的主控因素，注浆可显著提升强度．劣化分析结果显示预制裂隙试样最不稳定，不同加载方式下预制裂隙试样的劣化程度由大到小依次为JXQ-7，JXQ-4，JXQ-1．同类试样在不同非均布载荷下亦表现出差异性，说明加载路径与岩体形态耦合作用显著，共同决定试样的承载与劣化性能．

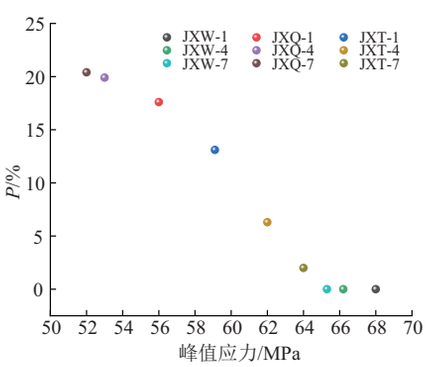


图 6　试样强度对比

Fig. 6　Comparison of specimen strength

2.2　非均布载荷作用下岩石裂纹扩展及应变演化联合监测分析

为全面分析破坏特征与裂纹演化规律，本文结合高速摄像机、DIC全场应变监测仪及声发射监测仪进行联合研究．其中声发射参数A_F与R_A是判别拉伸与剪切破坏的关键指标：剪切裂纹表现为A_F低、R_A高，拉伸裂纹则相反．其计算公式如下：

$$A_F=\frac{t_R}{B}, \tag{2}$$

式中：t_R为上升时间，ms；B为振幅，V．

$$R_A=\frac{C_R}{t_D}, \tag{3}$$

式中：C_R为振铃计数，次；t_D为持续时间，ms．

当振幅单位为dB时，可通过以下公式对振幅单位进行转化：

$$B_{dB}=20\lg\left(\frac{B}{V_r}\right), \tag{4}$$

式中：B为振幅，V；V_r为参考电压，其值为1 μV；B_{dB}为单位转换后的振幅，dB．

方案一、方案二和方案三中不同类型试样的宏观破坏图、DIC全过程主应变演化云图和声发射R_A-A_F特征参数如图7～9所示．如图7所示，在非均布载荷下3类试样裂纹扩展模式差异显著．对于完整试样，中低应力区以贯穿式拉伸裂纹为主，并伴随剥落，高应力区则以拉剪复合裂纹为主．预制裂隙试样裂纹萌生于应力过渡区并向裂隙尖角扩展，高、低应力区以拉伸裂纹为主，低区多贯穿裂纹，中区则以剪切裂纹为主．填充裂隙试样中应力区出现碎片弹射现象，低应力区裂纹先为拉伸扩展后转为剪切，最终形成贯穿式复合裂纹；高应力区未见贯穿裂纹，因注浆材料增强了试样的承载力，可抑制尖角裂纹扩展并提高试样局部稳定性．

通过DIC全过程最大主应变云图直观反映非均布载荷作用下试样的裂隙演化与应变场集中特征．为清晰展示全过程，选取初始阶段、应变集中带显现阶段、裂纹扩展阶段和失稳破坏阶段进行分析．结果表明：完整试样在加载初期、高应力区、中应力区均出现明显的应变集中，随后应变场由高应力区逐步向中、低应力区扩散；其中，中应力区应变集中范围最大，并最早发生裂纹萌生与扩展，伴随局部弹射；继而高应力区形成拉伸与剪切裂纹贯通，最终低应力区出现贯穿裂纹，导致试样整体失稳破坏．与完整试样相比，预制裂隙试样在加载初期便在裂隙上、下方出现应变集中，随后扩散至裂隙尖角及不同应力区边界，并在裂隙尖角及过渡区诱发裂纹，导致试样失稳破坏．对于填充裂隙试样，应变集中首先出现在裂隙填充缺陷附近，并逐渐向中、低应力区扩散；在加载后期，裂隙尖角及低应力区出现明显应变集中并相互连通，最终引发中应力区出现弹射现象并导致试样失稳破坏．

如图8所示，试样受非均布载荷作用，上部应力自左至右依次为高、中、低区，不同类型试样裂纹扩展差异显著．对于完整试样，其高应力区域及中应力区域均出现贯穿式拉伸裂纹，低应力区域出现分裂型拉伸裂纹，由中心向两侧扩展，与高应

力区域及低应力区裂纹连接. 试样宏观破裂模式以拉伸裂纹为主导,剪切裂纹以“联结”裂纹的形式存在,引导不同应力区域间的拉伸裂纹扩展连接,最终导致试样整体失稳破坏. 对于预制裂隙试样,初始裂隙显著削弱其结构完整性,裂纹破坏主要集中于高、低应力区,表现为贯穿式拉伸裂纹并伴随剥落;而中应力区裂纹相对较少,主要在预制裂隙尖端形成剪切翼型裂纹. 预制裂隙试样的宏观破裂模式主要以拉伸裂纹为主导,剪切裂纹是试样不同应力区域裂纹扩展连接的主要裂纹形式. 填充裂隙试样相比预制裂隙试样表现出更强的延性特征. 注浆增强了预制裂隙区域的黏结性,使裂纹不再沿裂隙尖端扩展,而是转变为围绕裂隙形成的包围状拉剪复合裂纹;破坏模式也由贯穿型大裂纹演化为细密的小裂纹,并伴随次生裂纹数量增多. 同时相较于完整试样及预制裂隙试样,不再出现贯穿性拉伸裂纹. 填充裂隙试样的宏观破裂模式也由拉伸裂纹主导转换为剪切裂纹主导.

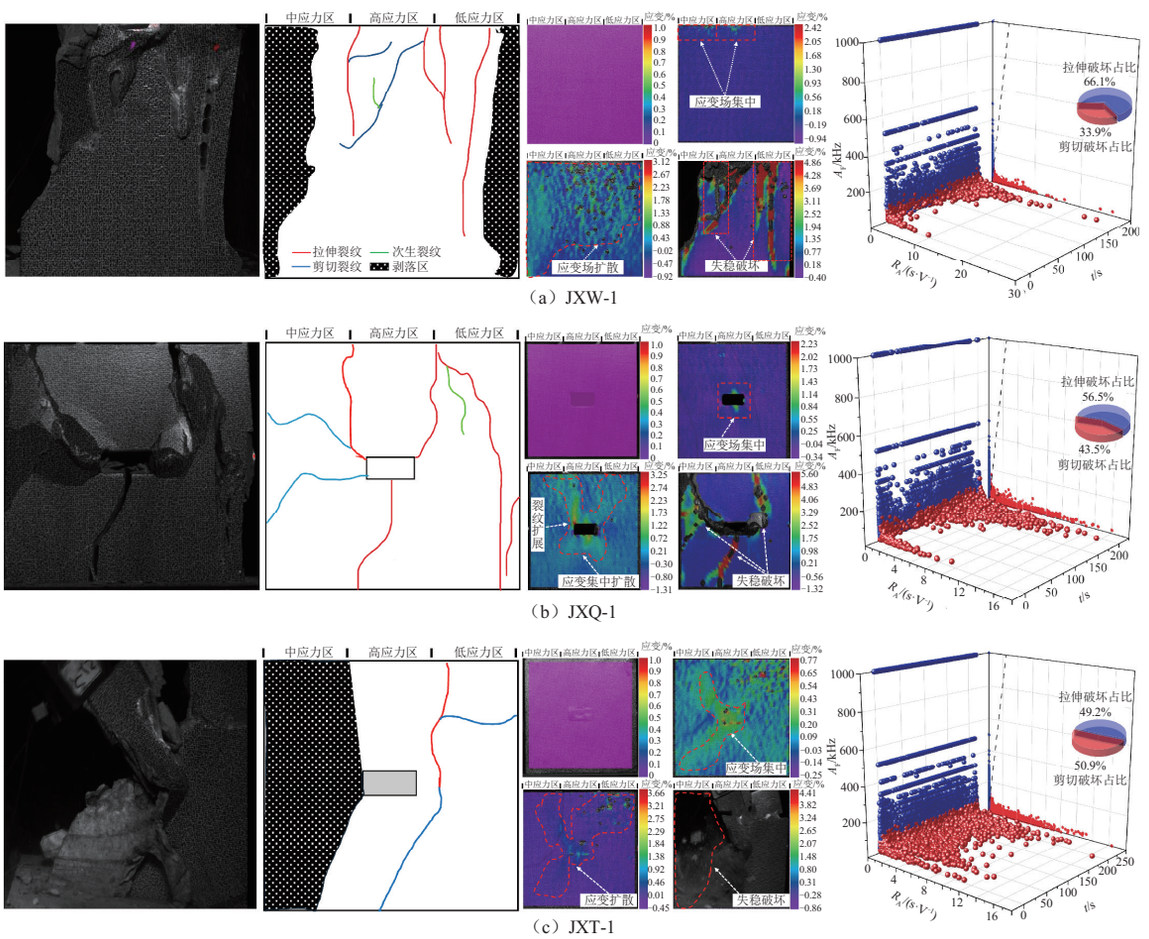


图 7 方案一试样裂纹演化及扩展

Fig. 7 Crack initiation and propagation of specimens in scheme I

3组试样虽在形态上存在差异,但均揭示了非均匀载荷对裂纹演化的主导作用. 对于完整试样,高应力区率先出现应变集中并萌生裂纹,随后由拉伸裂纹逐渐转化为剪切裂纹向中应力区扩展,形成以剪切裂纹驱动的破坏模式. 对于预制裂隙试样,裂隙尖端的应变集中效应显著改变了应变集中带分布,使裂纹在尖端优先萌生并与高应力区裂纹贯通,最终诱发失稳破坏. 对于填充裂隙试样,应变集中首先出现在裂隙上部边界,说明浆液填充形成的局部高刚度带在裂纹演化过程中具有重要影响.

原因在于浆液填充提高了承载能力,但在裂隙与浆液边界形成强度差异过渡带,易诱发局部应变集中. 随非均布载荷作用,高应力区首先出现拉-剪复合裂纹并向填充裂隙扩展,最终贯通高、中应力区底部. 底部失稳后载荷无法下传而横向传递至低应力区,使裂纹以剪切形式扩展并导致整体破坏.

如图9所示,试样上部应力分布从左至右依次为高应力区、低应力区及中应力区. 在该种非均布

载荷加载作用下，不同类型试样裂纹扩展形式均不相同但均呈现明显的分区特征．对于完整试样，高应力区裂纹主要表现为贯穿式拉伸裂纹，裂纹扩展密集，表明该区域为荷载集中区，也是主要破裂起始区；中应力区同样以贯穿式拉伸裂纹为主，并伴随次生剪切裂纹的萌生．在该区域中部裂纹连续贯通并在此形成裂纹汇集区，表征该区域所受载荷较强且裂纹扩展路径明显，受载荷传递方向影响显著；低应力区域作为高应力区域及中应力区域的连接过渡区，其破裂形态主要以剪切裂纹为主．完整试样的整体破裂形态反映了在该非均布载荷作用下，应力集中促发多类型裂纹协同扩展特征．

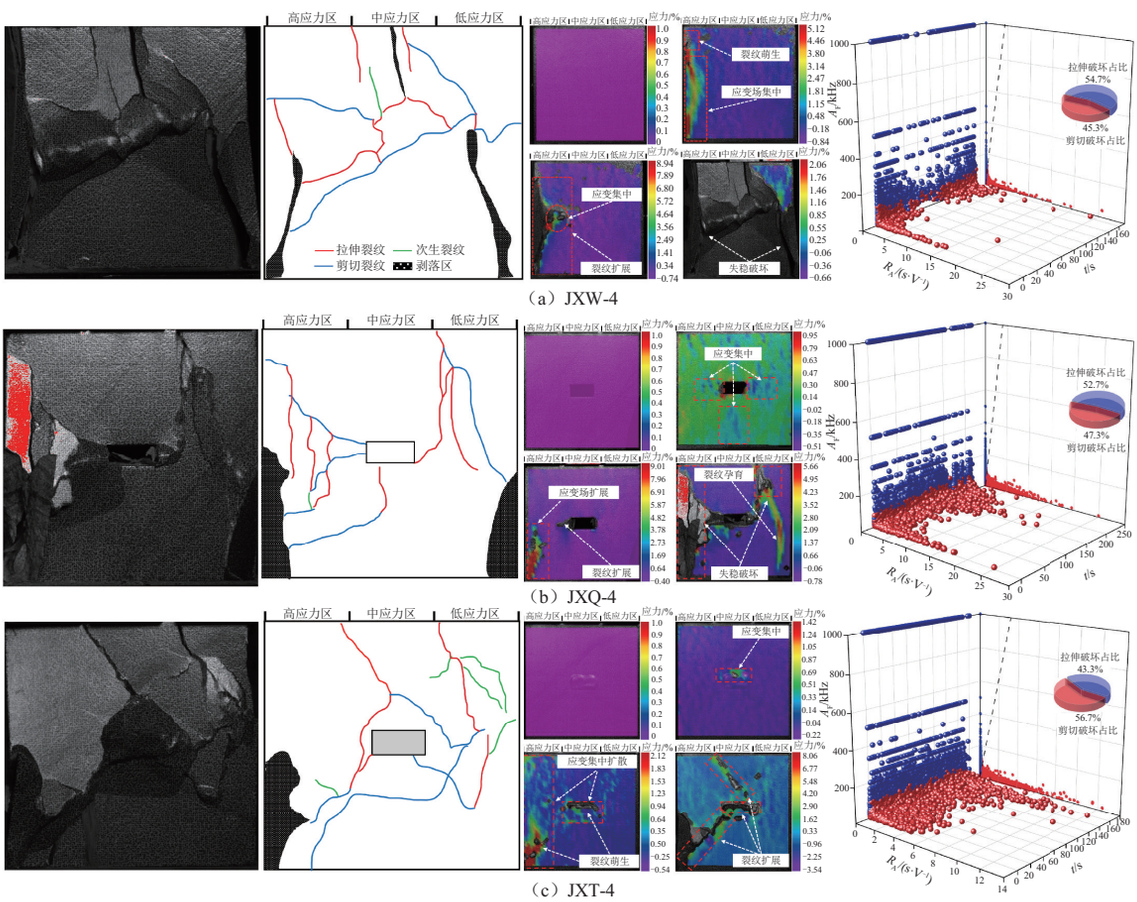


图 8　方案二试样裂纹演化及扩展

Fig. 8　Crack initiation and propagation of specimens in scheme II

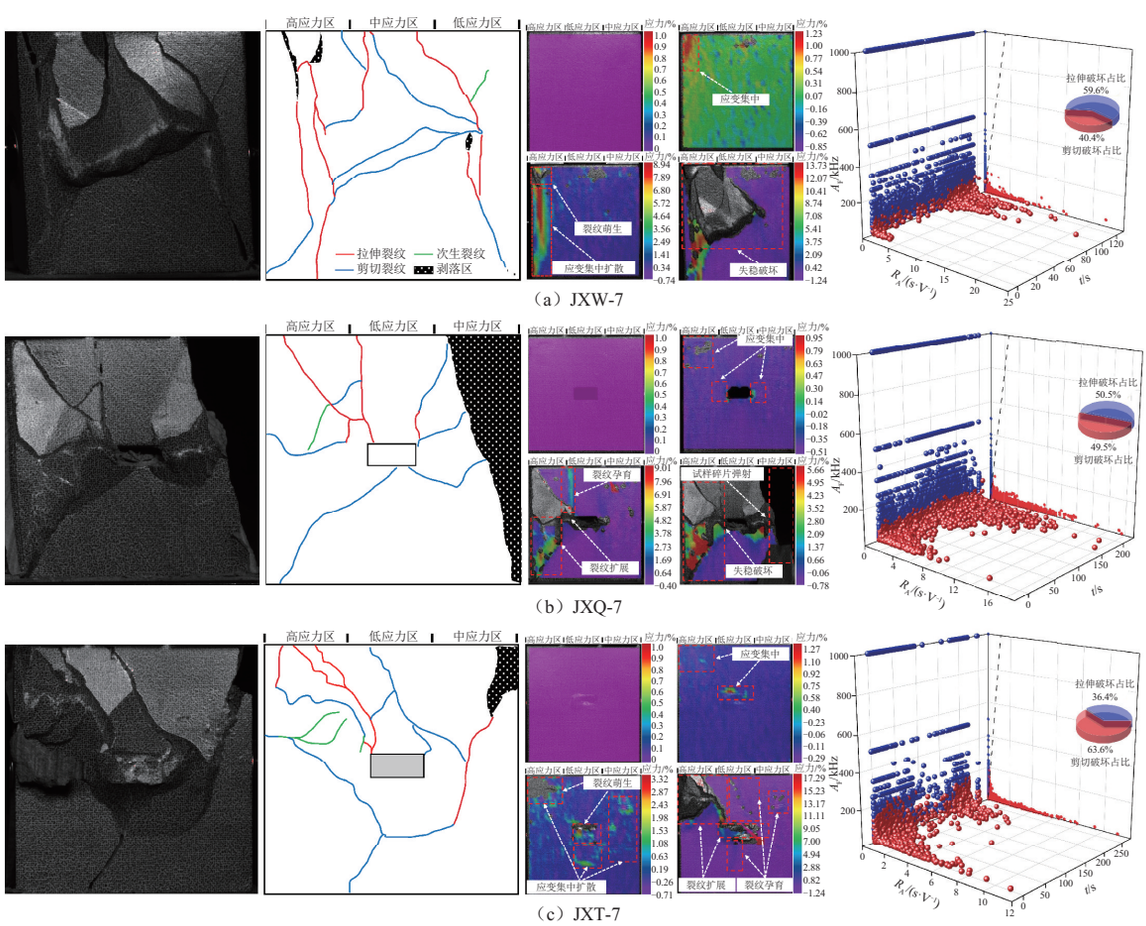
对于预制裂隙试样，高应力区以密集的拉伸-剪切复合型裂纹为主，扩展路径复杂且伴随严重碎裂，反映该区承受较高载荷；中部低应力区裂纹数量较少、扩展清晰，且以预制裂隙为中心呈放射状发育．中应力区域出现碎片弹射现象，且在中应力区域及低应力区域过渡区开始裂纹类型由拉伸转为剪切．

对于填充裂隙试样，高应力区以拉伸裂纹为主，形成多条主控裂纹，并伴随部分剪切裂纹及次生裂纹，整体裂纹密集度较高；中应力区未出现贯穿式拉伸裂纹，而是以拉剪复合裂纹为主，向低应力区扩展发育．相较于预制裂隙试样，填充裂隙试样中应力区域未出现大面积碎片弹射现象，而是以剪切裂纹形式向中部低应力区域滑移扩展．低应力区域由于注浆填充，使得其整体强度大大提升，对裂纹扩展发育形成阻滞作用，使得高应力区域主控裂纹及中应力区域主控裂纹在该区域发生偏折现象，呈现明显的裂纹规避特征，使得高应力区域及中应力区域主控裂纹在填充裂隙下方扩展并贯通，最终失稳破坏．

全应变场分析结果表明，3 类试样在非均布载荷作用下均首先在高应力区域出现明显的应变集中带，但其后续裂纹扩展规律存在显著差异．对于完整试样，高应力区最先萌生贯穿式拉伸裂纹，导致该区域迅速失去承载能力；随后裂纹类型由拉伸向剪切转化，并逐步向低应力区扩展发育．随着

中、低应力区相继失效，试样整体进入失稳破坏阶段．对于预制裂隙试样，由于裂隙尖端的应变集中效应，除高应力区外，裂隙两端亦表现出显著的集中现象．在加载过程中，高应力区裂纹路径受到裂隙尖端的引导作用，逐渐向其扩展并与之贯通，最终诱发中部低应力区的破坏，表现出由尖端效应控制的裂纹扩展模式．对于填充裂隙试样，除高应力区形成应变集中外，浆液与试样过渡区亦出现应变集中．在非均布载荷持续作用下，高应力区裂纹逐渐向填充裂隙区域扩展并连通．由于浆液对裂隙的加固效应与外部荷载的共同作用，低应力区产生了较多剪切裂纹和次生裂纹．当高、低应力区相继失去承载能力后，中应力区裂纹不再直接向裂隙尖端延伸，而是呈现避让特征，转向注浆区下方扩展，最终导致整体失稳破坏．

依据 R_A-A_F 结果，对不同类型试样进行裂纹分类．完整试样和预制裂隙试样主要以拉伸裂纹为主，填充裂隙试样以剪切裂纹为主．对于完整试样，在加载初期，A_F 值主要集中在 0～250 kHz 范围内，R_A 值主要集中在 0～5 s/V 范围内．随非均布载荷的增加，A_F 值集中在 0～200 kHz 范围内，R_A 值出现空白期．而进入加载后期，A_F 值主要范围重新扩大至 0～250 kHz，R_A 值主要范围重新扩大至 0～5 000 kHz. 对于预制裂隙试样，在加载全过程，A_F 值主要集中在 0～200 kHz 范围，整体呈现出较为稳定趋势．而 R_A 值在加载全过程呈现不同趋势，加载初期阶段，R_A 值主要集中在 0～6 s/V 范围；加载中期阶段，R_A 值主要集中在 0～5 s/V 范围；加载后期阶段，R_A 值主要集中在 0～10 s/V 范围，R_A 值整体呈现出先增后减再增趋势．与预制裂隙试样类似，填充裂隙试样在加载全过程中，A_F 值主要集中在 0～300 kHz 范围内，整体呈现出较为稳定趋势．R_A 值在加载全过程呈现不同趋势．加载初期阶段，R_A 值主要集中在 0～6 s/V 范围内；进入加载中期阶段，R_A 值主要集中在 0～4 s/V 范围内；进入加载后期阶段，R_A 值主要集中在 0～10 s/V 范围内，R_A 值整体出现先增后减再增趋势．



（a）JXW-7

（b）JXQ-7

（c）JXT-7

图 9　方案三试样裂纹演化及扩展

Fig. 9　Crack initiation and propagation of specimens in scheme III

非均布载荷加载机制和试样形态对岩石破坏模式产生显著影响，图 10 从裂纹类型角度揭示了在 3 种非均布载荷加载条件下，不同形态类型岩样（完整试样、中心预制矩形裂隙试样、中心填充裂隙试样）所展现的裂纹破坏机制响应规律．

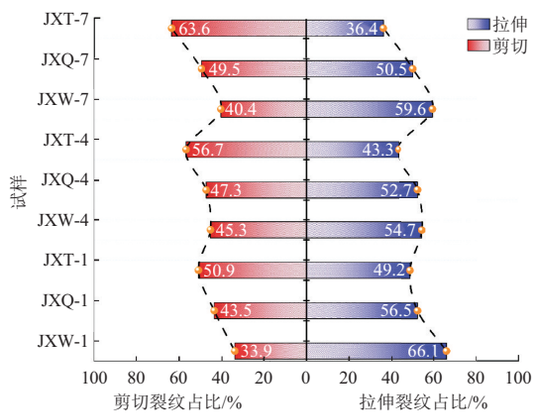


图 10　不同方案试样裂纹类型对比

Fig. 10　Comparison of crack types of specimens in different schemes

从方案一至方案三，完整试样、预制裂隙试样和填充裂隙试样的剪切裂纹所占比例呈现上升趋势，拉伸裂纹所占比例呈现下降趋势，裂纹的主导破坏机制发生显著变化．其中完整试样破坏模式以拉伸破坏为主，预制裂隙试样破坏模式以拉-剪混合破坏为主，填充裂隙试样破坏模式以剪切破坏为主．表明在相同加载路径下，试样形态是控制裂纹类型转化的关键因素．然而，在不同非均布载荷加载下相同类型试样的裂纹扩展模式呈现出明显的差异性．究其原因，由于不同加载机制，致使试样内部应力场分布呈现差异化，诱导裂纹扩展路径呈现不同特征．表明非均布载荷施加方式决定了岩体中主应力分布与裂纹诱发路径，最终影响裂纹的扩展模式．

2.3　非均布载荷声发射特征参数分析

声发射技术可实时监测岩石在加载过程中因微裂纹起裂、扩展及贯通而产生的高频弹性波信号．振铃计数、b 值和峰频是表征破裂演化的重要参数，其中全过程动态 b 值能有效度量裂纹发育状态．b 值变化趋势与岩体破裂过程密切相关：b 值减小时表明大事件比例增加，裂纹扩展加剧；b 值增大则表示小事件比例增加，裂纹相对缓慢发育；b 值稳定则说明大小事件均匀发生，裂纹处于稳定扩展阶段；当 b 值大幅下降时，则预示岩体裂纹急剧扩展并即将失稳破坏．b 值可以采用 Gutenberg-Richter 关系或最大似然估计法进行计算．本文依据修正后的最大似然估计法[38]计算声发射 b 值，如式(5)所示：

$$b=\frac{20\lg e}{\bar{M}-M_{\min}},\tag{5}$$

式中：$\bar{M}$ 为声发射事件振幅平均值，dB；$M_{\min}$ 为振幅最小阈值，dB；e 为自然常数，lge=0.434 3.

图 11 展示了 3 类试样在不同非均布载荷下的声发射 b 值及振铃计数演化特征．在不同的非均布载荷加载过程中，均可将声发射事件和裂纹演化分为静默期和活跃期．加载初、中期阶段，3 类试样 AE 振铃计数次数均处于静默状态，主要处于 0～1 000 次范围内．加载后期，声发射事件进入活跃期，3 类试样的 AE 振铃计数呈现不同趋势，但整体呈现双峰或多峰趋势，且累积振铃计数均呈现“阶梯式”增长．究其原因是试样受非均布载荷作用，形成高、中、低应力区，不同区域裂纹萌生与扩展存在时序差异，导致振铃计数出现延迟多峰特征．

对于完整试样，b 值在静默期维持在较高量值，主要在 1.0～1.8 范围内上下波动．较高的 b 值表明在此阶段，岩石内部裂纹扩展缓慢且未形成贯通裂纹．随非均布载荷加载，进入声发射事件活跃期．由于非均布载荷的加载，使得不同区域裂纹发育情况不同，高应力区域裂纹优先萌生并扩展，使得 b 值呈现不稳定的上下波动趋势．当振铃计数进入峰值时，对应 b 值呈现骤降趋势，岩石宏观裂纹贯通，最终发生失稳破坏．对于预制裂隙试样，b 值在静默期维持在 1.0～1.6 范围内上下波动．由于预制裂隙的存在，使得试样在非均布载荷作用下更易出现应力集中现象，有利于岩石内部的裂纹扩展．

因此，相较于完整试样，预制裂隙试样在加载全过程中振铃计数表现为多峰分布，且 b 值持续大幅下降．这表明其内部裂纹扩展更为剧烈，持续时间更长，破裂层次也更为复杂．对于填充裂隙试样，由于采用浆液对预制裂隙进行填充，其 b 值整体趋势与预制裂隙试样呈现差异性．如图 11 所示，其中 JXT-1 和 JXT-7 试样 b 值在静默期基本维持在 1.0～1.7 区间内，呈现相对稳定趋势，表征岩石内部裂纹处于稳定扩展阶段．JXT-4 试样在静默期出现较大幅度下降及上升现象，与静默期声发射振铃计数出现骤升现象对应．究其原因，b 值在静默期出现下降趋势，由于应力重分布导致试样内部裂隙被激活，出现裂隙局部贯通联结．随后 b 值大幅度上升反映试样内部裂隙仍呈现稳定扩展趋势．进入活跃期，3 组填充裂隙试样 b 值均呈现波动下降趋

势，此时试样内部裂纹扩展联结进入高频状态，大尺寸裂纹扩展现象逐渐增多，当声发射振铃计数达到峰值时，b值降至最低值，此时表征试样发生失稳破坏．预制裂隙存在会加快裂纹扩展并复杂化破裂过程，而填充加固可有效延缓裂纹发育、延长稳定阶段，并在失稳前呈现更易识别的预警特征．

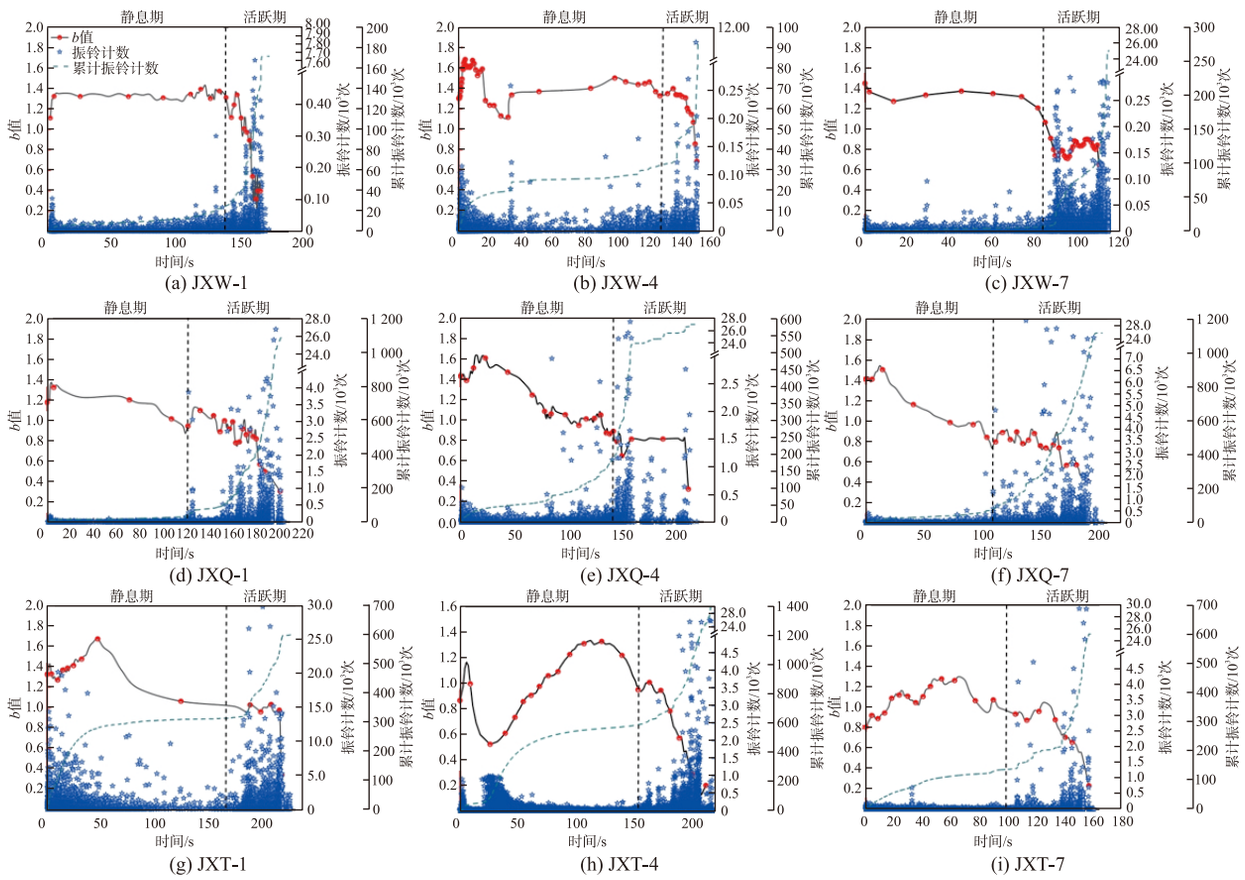


图 11　不同方案下试样声发射参数特征

Fig. 11　Acoustic emission parameter characteristics of specimens under different schemes

图 12 展示了完整试样、预制裂隙试样和填充裂隙试样在非均布载荷作用下的声发射峰频时序演化规律．由图 12 可知，声发射峰频呈现明显的分区特性，按照峰频范围带将 0～70 kHz 划分为低频区域（Ⅰ）、70～150 kHz 划分为中频区域（Ⅱ）、150～250 kHz 划分为高频区域（Ⅲ）及 250 kHz 以上划分为超高频区域（Ⅳ）．峰频主要集中在 4 个不同区域，表征试样在加载过程中存在多种裂纹类型共同作用，且试样的形态类型与非均布载荷加载机制共同影响其声发射峰频参数的分布．

对于完整试样，JXW-1 试样峰频分布较为均匀，高频区域信号出现较早且持续时间较长，表明其裂纹扩展过程较为渐进；JXW-4 试样主要以中频区域（Ⅱ）信号为主，超高频区域（Ⅳ）信号较少，表征其破坏过程较为平稳，无突发性破坏；JXW-7 试样在加载后期，高频区域（Ⅲ）信号及超高频区（Ⅳ）信号出现集中爆发式增长，表现出典型的突发性脆性破坏特征．究其原因，由于在非均布载荷加载过程中，应力不断累积后，发生失稳破坏导致应力迅速释放所致．对于预制裂隙试样，其峰频信号与完整试样相比更为离散，且超高频区域（Ⅳ）更早出现且时间基本贯穿试样加载全过程．具体而言，JXQ-1 试样在加载初期，高频及超高频区域（Ⅳ）出现密集峰频信号，表明此阶段已发生高频脆性微裂隙扩展；随着载荷继续增加，中后期再次出现密集的高频（Ⅲ）及超高频（Ⅳ）信号，表征试样失稳并发生脆性破坏．JXQ-4 及 JXQ-7 试样在加载初期出现大量的低频区域（Ⅰ）信号及中频区域（Ⅱ）信号，且其活跃贯穿整个试样全过程．在中后期，JXQ-4 及 JXQ-7 试样在高频区域（Ⅲ）信号及超高频区域（Ⅳ）信号均呈现出活跃状态，但与 JXQ-1 试样不同，其峰频分布更为离散，且不同区域信号呈现共存现象，表征裂纹活动的复杂性与不稳定性．对于填充裂隙试样，JXT-1 试样在加载

全过程中，除中频区域（Ⅱ）信号处于静默状态，其余 3 个区域均呈现活跃状态．其中，超高频区域（Ⅳ）信号及高频区域（Ⅲ）信号最为密集，表明其破裂过程具备一定的突发性；JXT-4 试样高频信号主要集中在中后期，前期以低频区域（Ⅰ）信号为主，整体峰频信号分布较为均匀，表征非均布载荷使得应力集中在局部发展，裂纹扩展呈现渐进扩展特征；JXT-7 试样则表现更为明显的“低频主导”特征，超高频区域（Ⅳ）信号活跃较低，且主要集中在中后期．

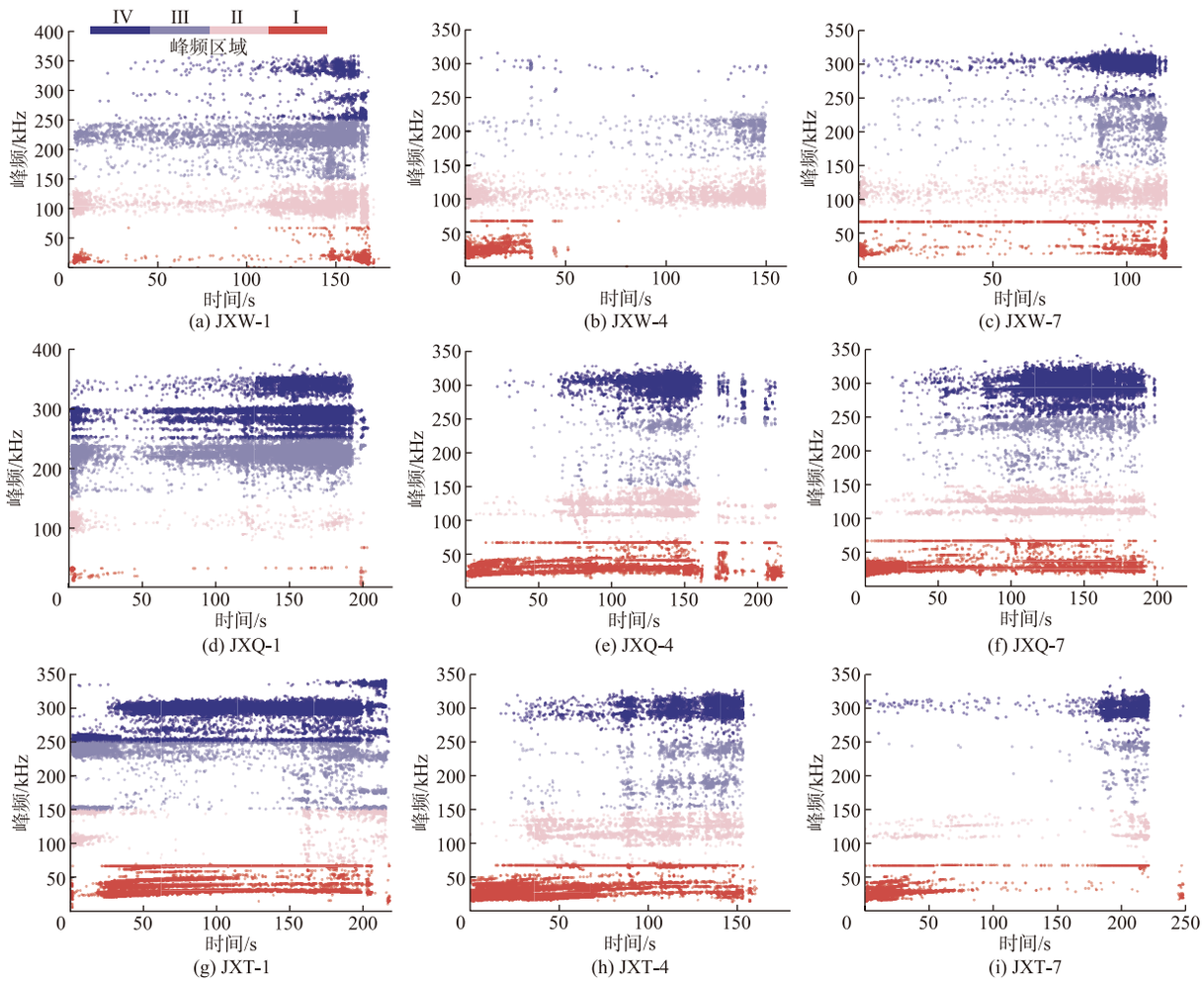


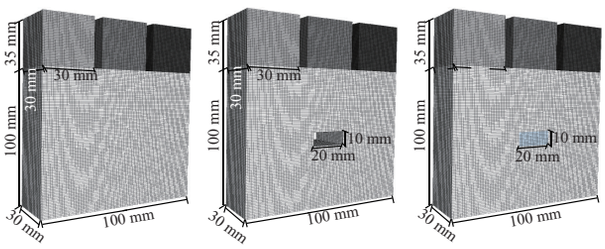
图 12　不同方案下试样声发射峰频特征

Fig. 12　Acoustic emission peak frequency characteristics of specimens under different scheme

综合分析表明，完整试样高频信号主要集中在加载中后期，峰频分布集中，体现延迟破裂特征；预制裂隙试样则高频信号提前出现、分布离散，说明裂隙削弱稳定性并加速脆性破坏；填充裂隙试样在加载早期即激发大量超高频信号并贯穿全过程，显示注浆虽增强黏结，但在非均布载荷下易诱发连续裂纹扩展，形成“频繁高频激发＋脆性破坏潜势”的耦合效应．在非均布载荷作用下，填充增强未必完全抑制破裂突发性，反而可能因刚性增强导致裂纹沿强界面剧烈扩展，从而加剧峰频响应．

2.4　非均布载荷下试样数值模拟研究

为分析不同方案试样在非均布载荷过程中的应力场分布及试样内部塑性区分布特征，采用有限差分数值模拟软件 FLAC^{3D} 进行研究[39]．图 13 所示为 JXW 型、JXQ 型及 JXT 型试样的数值模型．为提高数值模型计算准确度，模型网格划分精度为 1 mm．不同类型试样因裂隙存在与否，其单元数量略有变化．JXW 型试样及 JXT 型试样单元数量约为 394 500 个，节点数量约为 417 136 个；JXQ 型试样单元数量约为 388 500 个，节点数量约为 411 835 个．为确保模拟结果具有可靠性，分别以 JXW-1，JXQ-1 以及 JXT-1 试样的应力-应变曲线作为标准，采用试错法[39]对模型参数进行标定．

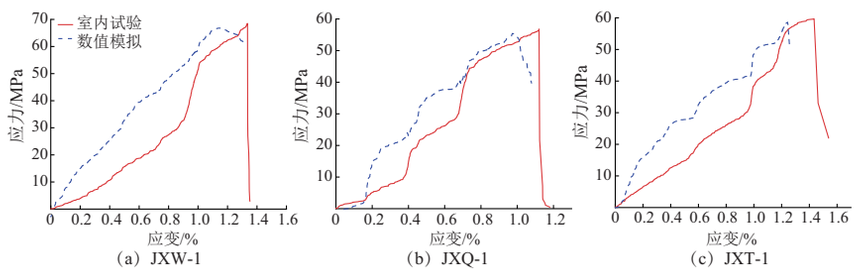


（a）完整试样 （b）裂隙试样 （c）填充裂隙试样

图 13 数值模型

Fig. 13 Numerical model

参数标定试验结果如图 14 所示. 由图 14 可知，JXW，JXQ，JXT 试样的室内试验峰值强度分别为 68.0，56.0，59.1 MPa，对应数值模拟结果分别为 66.74，55.46，58.64 MPa，误差仅为 1.87%，0.97% 和 0.78%，表明数值模拟结果可靠. 但由于数值模拟模型较真实试样内部无初始微裂隙，故其峰值应变较小. 对比验证表明，该模型可用于模拟不同方案下非均布载荷作用时试样内部应力场与塑性区演化，具体参数由试错法确定（见表 2）.



（a）JXW-1 （b）JXQ-1 （c）JXT-1

图 14 参数标定试验结果

Fig. 14 The result of parameter calibration test

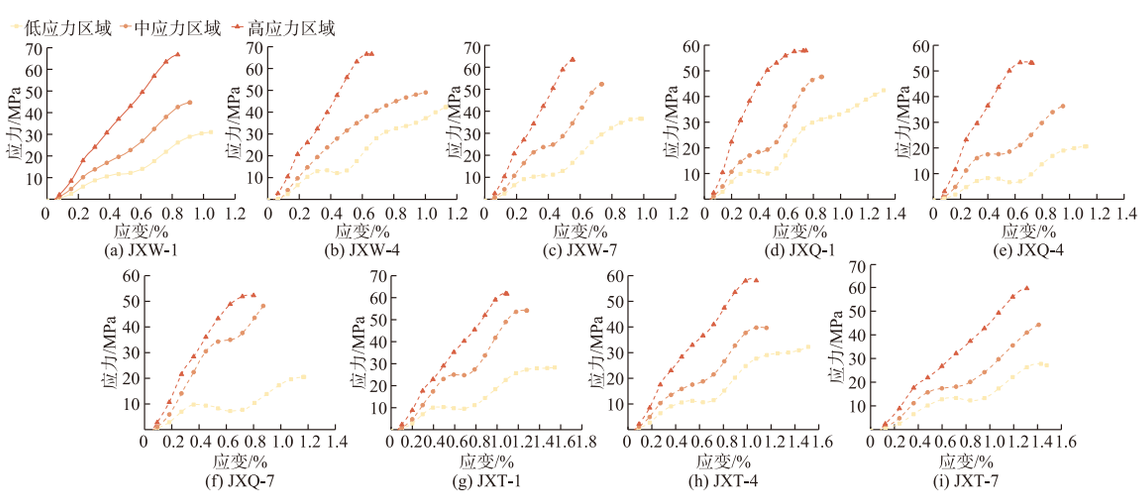
表 2 数值模拟细观参数

Table 2 Mesoscopic parameters for numerical simulation

参数类型	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg·m^{-3})	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
砂岩	9.0	5.4	35	2 400	3.0	1.0
浆液	17.8	13.3	35	2 450	8.3	3.2

2.4.1 非均布载荷下试样不同区域应力演化分析

为分析非均布载荷下试样全过程应力演化规律，在数值模拟中于高、中、低应力区布设监测点. 试样梯度应力对比如图 15 所示. 由该图可见，不同区域应力呈现明显梯度差异，且峰值出现具有延迟性. 高应力区为应力积聚与塑性萌生首发位置，增长最快并最早达到峰值；中应力区在高应力区屈服或释放后出现补偿性上升；低应力区起始水平最低，后期因应力再分配而提升. 完整试样中梯度差异稳定，高区长期承载主应力；预制裂隙试样中高区提前屈服，促使应力向中、低区迁移，分布趋于均化；填充裂隙试样延缓高区屈服，抑制再分配，梯度保持更久. 整体上，应力梯度排序决定区域应力增长的时序与幅度，试样形态通过调节应力传递和再分配模式影响塑性演化与破坏路径.



(a) JXW-1 (b) JXW-4 (c) JXW-7 (d) JXQ-1 (e) JXQ-4

(f) JXQ-7 (g) JXT-1 (h) JXT-4 (i) JXT-7

图 15 试样梯度应力对比

Fig. 15 Comparison of gradient stress of specimens

2.4.2　非局部载荷下试样应力场及塑性区特征分析

非局部载荷下试样应力场及塑性区演化过程如图 16 所示．由该图可知，不同非均布载荷下试样内部应力场与塑性区演化均表现出由高应力区向中、低应力区依次发展的特征，且延迟显现与上部载荷大小密切相关．完整试样应力场连续稳定，分区清晰；预制裂隙试样受形态影响显著，裂隙两壁出现不对称应力集中，中部应力传递路径向裂隙尖端偏移，局部峰值显著升高，导致承载性能下降；填充裂隙试样应力集中明显减弱，应力分布趋于均匀，表明注浆材料在一定程度恢复了裂隙处的应力传递通道，从而提升整体稳定性．

试样的塑性区分布特征与其应力场分布及试样形态紧密相连．依据试样塑性演化过程将其划分为：初始阶段、塑性萌生阶段、塑性发育阶段和失稳破坏阶段．3 组完整试样的塑性区均表现出由局部向整体逐步发展的规律，整体分布呈现依次扩展特征．具体表现为高应力区首先发生塑性破坏，随即向中应力区扩展发育，最后低应力区贯通连接．3 组试样塑性区起裂位置和扩展特征随上部

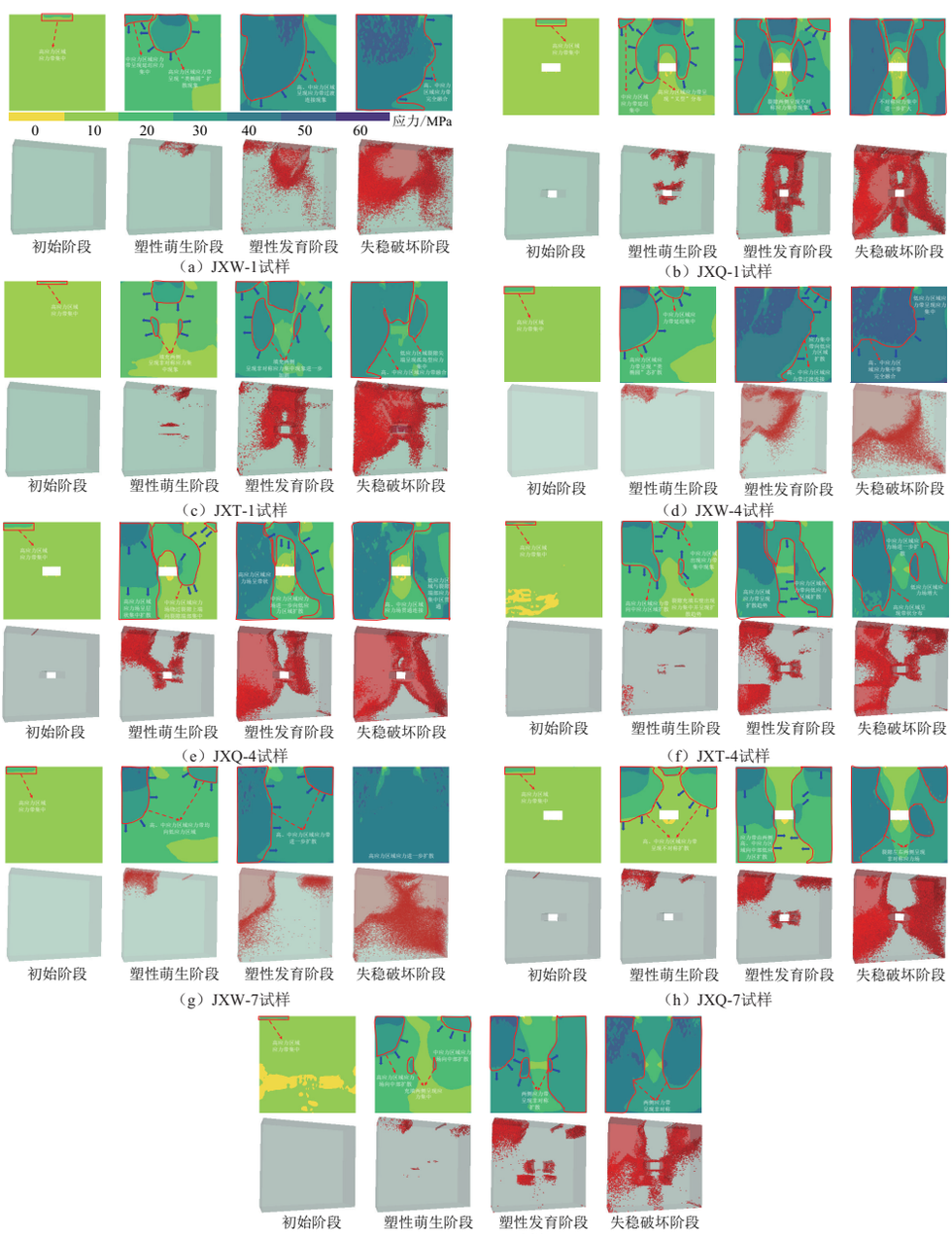


图 16　应力场及塑性区演化过程

Fig. 16　Evolution process of stress field and plastic zone

应力场分布而显著不同. 对于JXW-1试样,塑性区首先在试样中部的高应力区域起裂,随后其塑性扩展路径向中应力区域以及低应力区域扩展,呈现由中部向两侧的塑性扩展特征;对于JXW-4试样,塑性区首先在试样左侧的高应力区域起裂,随后向右侧中应力区域扩展,最后贯通低应力区域,呈现由高至低的梯度扩展特征;对于JXW-7试样,塑性区首先在左侧高应力区域起裂,随后右侧中应力区域发生塑性破坏,最后向中部低应力区域扩展发育,形成由两侧向中心的双向贯通特征. 然而预制裂隙试样受裂隙影响,呈现明显的塑性破坏路径.

3组预制裂隙试样在不同上部应力场下的塑性区呈现明显差异,但均在应力过渡带首先出现塑性破坏,随后沿高应力路径向中心预制裂隙端部扩展发育. 对于JXQ-1试样,塑性萌生阶段,裂隙端部和上部高应力区率先形成塑性带,塑性发育阶段塑性区沿上下方向加速扩展,并在失稳破坏阶段贯通形成自上而下的破坏通道;对于JXQ-4试样,高应力区在塑性萌生阶段即出现塑性带,在塑性发育阶段及出现塑性贯通现象,并最终形成偏对称的破坏模式;对于JXT-4试样,高应力区与中应力区在初始阶段和塑性萌生阶段同时推动塑性扩展,塑性发育阶段时已在裂隙左右形成2个独立塑性带,并最终在失稳破坏阶段汇合,发生塑性贯通破坏. 预制裂隙试样的塑性区演化表现为“塑性区过渡带起裂—裂隙端部扩展—左右塑性带贯通—整体失稳”.

填充裂隙试样的塑性区演化均表现为应力过渡带首先塑性破坏,但其上部应力场分布显著影响后续破坏模式,对于JXT-1试样和JXT-4试样,高应力区域在加载中期即出现集中塑性带,并沿中心或一侧向下扩展发育,最终与注浆端部塑性区贯通. 对于JXT-7试样,高应力区域和中应力区域在加载后期同时驱动塑性区向中心注浆区域扩展,并在填充裂隙处汇合,呈现双向扩展贯通特征.

总体而言,高应力区位置决定起裂位置,应力梯度的排序决定塑性区的扩展通道与贯通程度. 且应力场的不对称分布会显著影响破坏模式的空间形态. 注浆加固能够延缓塑性区的萌生与扩展,但高应力区仍是控制破坏演化的主导因素,高应力区域的位置决定了塑性区的主要扩展方向与最终破坏模式.

3 结 论

1)基于应力-应变曲线分析表明,形态特征对砂岩试件峰值强度具有显著影响,不同加载方式下砂岩峰值强度大小具有统一性,即完整试样>填充裂隙试样>预制裂隙试样;引入损伤因子P,量化试样劣化程度,同一加载方式下,不同形态试样的劣化程度呈先增后减的趋势,且预制裂隙试样劣化程度最大.

2)不同非均布载荷加载方式对砂岩试样裂纹扩展路径具有决定性作用. 形态特征对试样的破坏模式具有决定性作用. 完整试样破坏模式以拉伸破坏为主,预制裂隙试样以拉-剪混合破坏为主,填充裂隙试样以剪切破坏为主.

3)振铃计数表现为延迟多峰,累积振铃计数阶梯式增长;动态b值与振铃计数呈负相关. 完整试样在静息期b值较高,裂纹扩展较少且稳定;预制裂隙试样b值下降更明显,失稳破坏程度最高. 不同试样峰频分布差异显著:完整试样分布均匀,预制裂隙试样高频与超高频信号持续活跃,填充裂隙试样则以超高频信号持续活跃为主.

4)砂岩试样在非均布载荷下呈现明显应力梯度,其峰值强度具有延迟性. 塑性区扩展通道由应力梯度排序控制,决定了贯通模式. 试样应力场受区域应力与形态共同作用. 完整试样应力带均匀,预制裂隙试样在裂隙端部形成不对称应力集中;填充裂隙试样因注浆作用应力集中明显减弱,应力传递通道部分恢复,应力分布趋于均匀.

参考文献:

[1] 陈卫忠,李术才,邱祥波,等. 岩石裂纹扩展的实验与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(1):18-23.
CHEN Weizhong, LI Shucai, QIU Xiangbo, et al. Experimental and numerical research on crack propagation in rock under compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 18-23.

[2] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(10):1945-1956.
QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956.

[3] 王 涛,葛丽娜,赵洪宝,等. 非对称荷载下含中心孔洞煤岩变形损伤特性与本构模型[J]. 煤炭学报,

2022,47(11):4040-4054.
WANG Tao, GE Lina, ZHAO Hongbao, et al. Deformation damage characteristics and constitutive model of raw coal and briquette with central hole under asymmetric loading [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 4040-4054.

[4] 余伟健,潘　豹,吴根水,等.等效非均匀荷载条件下梯形截面岩石力学特性试验研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(3):108-117.
YU Weijian, PAN Bao, WU Genshui, et al. Experimental study on mechanical characteristics of rock of trapezoidal cross section under the equivalent non-uniform loading conditions [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(3): 108-117.

[5] 王　晓,文志杰,MIKAEL Rinne,等.非均布荷载作用下煤岩力学强度特性试验研究[J].岩土力学,2017,38(3):723-730.
WANG Xiao, WEN Zhijie, Mikael Rinne, et al. Experimental study of strength properties of coal-rock under non-uniformly distributed load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 723-730.

[6] 葛丽娜.偏心荷载下含孔洞缺陷煤岩力学特性与致损机理研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2022.
GE lina. Study on mechanical properties and dama mechanism of coal and rocks with hole defects under eccen tric load [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.

[7] 许　江,刘　东,尹光志,等.非均布荷载条件下煤与瓦斯突出模拟实验[J].煤炭学报,2012,37(5):836-842.
XU Jiang, LIU Dong, YIN Guangzhi, et al. Simulation experiment of coal and gas outburst under non-uniform load [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 836-842.

[8] 赵洪宝,吉东亮,程　辉,等.非对称载荷作用下含孔试样渐进破坏机制与损伤表征[J].中国矿业大学学报,2023,52(3):478-491.
ZHAO Hongbao, JI Dongliang, CHENG Hui, et al. Study on progressive failure mechanism and quantitative analysis of specimen containing the central hole subject to asym mentric load [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(3): 478-491.

[9] 张清照,佟泽昊,石振明,等.高循环剪切速率条件下岩石结构面动力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(5):1146-1165.
ZHANG Qingzhao, TONG Zehao, SHI Zhenming, et al. Study on the dynamic characteristics of rock discontinuities under high cyclic shear rate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(5): 1146-1165.

[10] 代万里,张　强,谷邱鑫,等.法向动载条件下粗糙岩质节理面剪切力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(7):1751-1762.
DAI Wanli, ZHANG Qiang, GU Qiuxin, et al. Experimental study on the shear mechanical behaviors of a rough rock joint surface under dynamic normal load boundary condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1751-1762.

[11] 史昀辑,郭育霞,冯国瑞,等.不同岩石强度对岩-充-岩组合体单轴受压承载特征影响研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(5):1326-1339.
SHI Yunji, GUO Yuxia, FENG Guorui, et al. Effect of different rock strength on the uniaxial compression bearing characteristics of rock-backfill body-rock combination[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(5): 1326-1339.

[12] 刘海明,倪晨阳,王希辉,等.单轴压缩条件下交叉双节理岩石裂纹扩展特征颗粒流分析[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增2):3710-3721.
LIU Haiming, NI Chenyang, WANG Xihui, et al. Particle flow analysis of crack propagation characteristics of cross jointed rock under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Sup 2): 3710-3721.

[13] 刘洪涛,刘勤裕,陈子晗,等.高偏应力场中脆硬煤层巷道塑性区恶性扩展诱发动力灾害机理[J/OL].中国矿业大学学报,1-20[2025-10-22]. https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcumt.20250246.
LIU Hongtao, LIU Qinyu, CHEN Zihan, et al. Mechanism of dynamic disaster induced by malignant expansionof roadway plastic zone in brittle-hard coal seamin high deviatoric stress field [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1-20 [2025-10-22]. https://doi. org/10.13247/j. cnki. jcumt.20250246.

[14] 马衍坤,唐定邹,袁　亮,等.高瓦斯环境含钻孔煤样承载破坏特征真三轴试验[J].中国矿业大学学报,2025,54(5):984-1001.
MA Yankun, TANG Dingzou, YUAN Liang, et al. True triaxial test on bearing damage characteristics of drilled coal samples in high gas environment [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(5): 984-1001.

[15] 储超群,包兴佳,毛明发,等.深地灰岩三轴压缩声发射特征及破坏形式试验研究[J].岩土力学,2025,46(7):2049-2061.
CHU Chaoqun, BAO Xingjia, MAO Mingfa, et al.

Experimental study of acoustic emission characteristics and failure forms of deep-buried limestone under triaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(7): 2049-2061.

[16] 陈家嵘,周昌台,周 韬,等.压剪荷载下含单一裂隙砂岩的应变演化与破坏特征研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(7):1743-1758.
CHEN Jiarong, ZHOU Changtai, ZHOU Tao, et al. Experimental study on strain evolution and failure behavior of sandstone containing a single pre-existing flaw under compressive-shear loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7): 1743-1758.

[17] 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.

[18] 戴 兵,赵桂锋,张 雷,等.不同加载速率作用下含平行裂隙岩石的试验研究:能量耗散与损伤演化[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增1):3397-3412.
DAI Bing, ZHAO Guifeng, ZHANG Lei, et al. Experimental study of rock with parallel cracks under different loading rates: Energy dissipation and damage evolution [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Sup 1): 3397-3412.

[19] 刘学伟,王 赛,刘 滨,等.不同注浆材料填充双裂隙类岩石试样力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(3):623-638.
LIU Xuewei, WANG Sai, LIU Bing, et al. Effect of filling grouting material on mechanical properties and mechanism of rock-like samples with double crack [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 623-638.

[20] JANEIRO R P, EINSTEIN H H. Experimental study of the cracking behavior of specimens containing inclusions(under uniaxial compression)[J]. International Journal of Fracture, 2010, 164(1): 83-102.

[21] 张 波,李术才,张敦福,等.含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩试验及断裂损伤研究[J].岩土力学,2012,33(6):1647-1652.
ZHANG Bo, LI Shucai, ZHANG Dunfu, et al. Uniaxial compression mechanical property test, fracture and damage analysis of similar material of jointed rock mass with filled cracks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1647-1652.

[22] 张庆海,许晓亮,李建林,等.冲击荷载下双裂隙砂岩渐进破坏特性及裂纹扩展机制研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(5):1242-1256.
ZHANG Qinghai, XU Xiaoliang, LI Jianlin, et al. Study on progressive failure characteristics and crack propagation mechanism of double-flawed sandstone under impact load [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(5): 1242-1256.

[23] 唐劲舟,唐文豪,杨 科,等.循环荷载作用下含倾斜单裂隙砂岩力学响应特征及渗流演化规律[J].岩土力学,2025,46(1):199-212.
TANG Jinzhou, TANG Wenhao, YANG Ke, et al. Mechanical response characteristics and seepage evolution pattern of sandstone with an inclined single fracture under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(1): 199-212.

[24] 肖福坤,刘 刚,秦 涛,等.拉-压-剪应力下细砂岩和粗砂岩破裂过程声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增2):3458-3472.
XIAO Fukun, LIU Gang, QIN Tao, et al. Acoustic emission (AE) characteristics of fine sandstone and coarse sandstone fracture process under tension-compression-shear stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 2): 3458-3472.

[25] 刘 刚,肖福坤,秦 涛.小尺寸效应下岩石力学特性及声发射规律[J].岩石力学与工程学报,2018,37(增2):3905-3917.
LIU Gang, XIAO Fukun, QIN Tao, et al. Rock mechanics characteristics and acoustic emission rule under small-size effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup 2): 3905-3917.

[26] 马永安,于 崇,李海波,等.三轴及循环加卸载下花岗岩力学特性与能量演化研究[J/OL].岩石力学与工程学报,1-13 [2025-07-03]. https://link.cnki.net/urlid/42.1397.o3.20250114.1041.002.
MA Yongan, YU Chong, LI Haibo, et al. Study on the mechanical properties and energy evolution of granite under triaxial and cyclic loading and unloading conditions [J/OL]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1-13 [2025-07-03]. https://link.cnki.net/urlid/42.1397.o3.20250114.1041.002.

[27] 王本鑫,金爱兵,赵怡晴,等.基于DIC的含3D打印起伏节理试样破裂特性及损伤本构[J].工程科学学报,2022,44(12):2029-2039.
WANG Benxin, JIN Aibing, ZHAO Yiqing, et al. Fracture characteristics and the damage constitutive model of 3D printing undulating joint samples based

on DIC [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(12): 2029-2039.

[28] 齐飞飞,张　科,谢建斌.基于DIC技术的含不同节理密度类岩石试件破裂机制研究[J].岩土力学,2021,42(6):1669-1680.
QI Feifei, ZHANG Ke, XIE Jianbin. Fracturing mechanism of rock-like specimens with different joint densities based on DIC technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1669-1680.

[29] 彭守建,冉晓梦,许　江,等.基于3D-DIC技术的砂岩变形局部化荷载速率效应试验研究[J].岩土力学,2020,41(11):3591-3603.
PENG Shoujian, RAN Xiaomeng, XU Jiang, et al. Experimental study on loading rate effects of sandstone deformation localization based on 3D-DIC technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3591-3603.

[30] 王创业,隋青瑞,刘成城,等.单轴压缩下正交型交叉裂隙砂岩的破坏前兆试验研究[J].振动与冲击,2024,43(19):202-212.
WANG Chuangye, SUI Qingrui, LIU Chengcheng, et al. Test study on failure precursors of orthogonal cross fractured sandstone under uniaxial compression [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(19): 202-212.

[31] 于天佑,蒋关鲁,饶千竺,等.基于声发射参数分析的红层泥岩高周循环加卸载损伤及变形特性[J].中国铁道科学,2024,45(1):12-25.
YU Tianyou, JIANG Guanlu, RAO Qianzhu, et al. Investigation of damage and deformation characteristics of soft red mudstone using acoustic emission parameter analysis under high-cycle cyclic loading condition [J]. China Railway Science, 2024, 45(1): 12-25.

[32] 宋勇军,程柯岩,孟凡栋.冻融作用下裂隙岩石损伤破坏声发射特性研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(2):408-419.
SONG Yongjun, CHENG Keyan, MENG Fandong. Research on acoustic emission characteristics of fractured rock damage under freeze-thaw action [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 408-419.

[33] LIU G, ZAN Y L, WANG D W, et al. Numerical simulation of fracture failure propagation in water-saturated sandstone with pore defects under non-uniform loading effects [J]. Water, 2025, 17(12): 1725.

[34] 金爱兵,王树亮,王本鑫,等.基于DIC的3D打印交叉节理试件破裂机制研究[J].岩土力学,2020,41(12):3862-3872.
JIN Aibing, WANG Shuliang, WANG Benxin, et al. Fracture mechanism of specimens with 3D printing cross joint based on DIC technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 3862-3872.

[35] 赵　康,伍　俊,严雅静,等.尾砂胶结充填体裂纹演化多尺度特征[J].岩石力学与工程学报,2022,41(8):1626-1636.
ZHAO Kang, WU Jun, YAN Yajing, et al. Multi-scale characteristics of crack evolution of cemented tailings backfill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1626-1636.

[36] 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.

[37] 李振华,刘孟森,杜　锋,等.贯通裂隙注浆体浆岩双介质力学特性及传力机制研究[J/OL].煤炭科学技术,1-15[2025-07-04].https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250703.1838.010.
LI Zhenhua, LIU Mengsen, DU Feng, et al. Study on mechanical characteristics and load transfer mechanism of grout-rock dual media in penetrative fracture grouting [J/OL]. Coal Science and Technology, 1-15[2025-07-04]. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250703.1838.010.

[38] 董陇军,张凌云.岩石破坏声发射b值的误差分析[J].长江科学院院报,2020,37(8):75-81.
DONG Longjun, ZHANG Lingyun. Error analysis of b-value of acoustic emission for rock fracture [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(8): 75-81.

[39] 蒋宇静,张孙豪,栾恒杰,等.剪切载荷作用下岩体结构面动态接触特征数值模拟[J].煤炭学报,2022,47(1):233-245.
JIANG Yujing, ZHANG Sunhao, LUAN Hengjie, et al. Numerical simulation on the 3D surface dynamic contact characteristics of rock discontinuity subject to shear loading [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 233-245.

（责任编辑　沈春妮　仝　腾）