裂隙充填对组合缺陷砂岩力学特性与破坏特征的影响研究

李军康[1],易洋来[1*],高剑[1],白永红[1],黄义瑶[2],谭涛[2],张春阳[2]

1.湖南宝山有色金属矿业有限责任公司,湖南 郴州 424400;
2.武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉 430070

摘 要:为讨论注浆充填加固裂隙岩体的力学性能和破坏特征,基于单轴压缩试验和数字图像相关技术(DIC),讨论了裂隙倾角、圆孔半径和充填情况对含组合缺陷试件的力学特性和应变场演化的影响。结果表明:充填试件的峰值应力和起裂应力均大于无充填试件,两类试件的峰值强度和起裂应力均随裂隙倾角的增大而增加,与圆孔半径无相关关系。裂纹主应变的演化规律与裂隙尺寸和倾角无关,其对应于岩石不同损伤阶段的力学行为,可据此确定裂隙岩石的特征应力。无充填试件弹性阶段的应变局部化带位置赋存在组合缺陷周围,并逐渐向缺陷端部转移,而水泥充填试件的最大应变长期位于充填区域,直至充填体破裂后向缺陷端部转移。基于起裂方式和起裂位置,无充填和充填组合缺陷试件的裂纹起裂模式可划分为4类。根据次生裂纹的形成和贯穿方式,无充填和充填组合缺陷试件破坏模式可划分为3类拉—剪复合破坏模式。此外,组合缺陷试件的起裂模式和破坏模式均由裂隙倾角主导,与圆孔半径和充填情况无明显关联。

关键词:裂隙岩体;数字图像技术;组合缺陷;裂隙充填;力学特性;破坏特征

中图分类号:TD853 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2518(2026)04-0989-18 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.294

引用格式:李军康,易洋来,高剑,等.裂隙充填对组合缺陷砂岩力学特性与破坏特征的影响研究[J].黄金科学技术,2026,34(4):989-1006.LI Junkang,YI Yanglai,GAO Jian,et al.Study on the Influence of Crack Filling on the Mechanical Properties and Failure Characteristics of Composite Defect Sandstone[J].Gold Science and Technology,2026,34(4):989-1006.

由于自然环境中岩体内部及其表面受到风化作用、水力作用以及地壳运动和工程开挖扰动,产生不规则分布的裂隙,在外荷载作用下,岩石裂隙周边易发生局部应力集中而引发裂隙扩展、贯通,导致岩体失稳破坏,严重威胁岩体工程的安全运行(杨圣奇等,2009;Wu et al,2018)。诸多学者围绕含直裂隙、孔洞裂隙的岩石试件进行了试验研究,获得含单一缺陷岩石的破坏特征和力学响应(李地元等,2018;陈家嵘等,2023;王雁冰等,2023;陈光波等,2024)。此外,研究人员定义了多种裂纹类型(Wang et al,2018)、岩桥区聚结类型(Yang et al,2019)和破坏模式(Wang et al,2021),以总结归纳不同预制裂隙岩石的裂隙裂纹演化特征。由于工程中裂隙形状各异,且含不同裂隙岩体的力学和破坏特征具有显著差异(杨圣奇等,2012;李元海等,2020;苗胜军等,2025),因此组合缺陷岩体引起了国内外学者的广泛关注(郝燕奎等,2019;Chen et al,2020)。研究人员对完整岩石预制贯穿圆孔和直裂

收稿日期:2025-10-13;**修订日期**:2026-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目"动力冲击下冻融裂隙岩体浆—岩动态协同规律及关联匹配机制研究"(编号:52474108)和"冻融裂隙岩体冲击疲劳损伤致裂定量表征及成灾机理研究"(编号:52174088)联合资助

作者简介:李军康(1973—),男,湖南益阳人,工程师,从事矿山生产及管理工作。E-mail:1920904814@qq.com

*通信作者:易洋来(1982—),男,湖南怀化人,高级工程师,从事矿山生产及管理工作。E-mail:22372753@qq.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

隙形成组合缺陷试件，并结合室内力学试验讨论了其力学特性和破坏行为（朱谭谭等，2015；张科等，2018；刘享华等，2021）。如：Yin et al（2018）在试件中预制了圆孔和斜裂隙的组合缺陷，研究了裂隙倾角和长度对岩石力学特性的影响；Yang et al（2014）基于单轴压缩试验结果，明确了预制组合缺陷岩石的9种裂纹扩展类型。

岩土工程中普遍采用注浆加固的方式来改善裂隙岩体的稳定性。基于此，研究人员采用充填材料注入试件内部缺陷，结合物理力学试验来分析充填缺陷岩体的力学响应和破坏特征（司洁萌等，2019；张科等，2019；Chai et al，2020）。研究发现，充填石膏能够有效抑制含孔洞大理岩试件的裂纹扩展，提升其力学性能（左江江等，2018）。此外，不同充填物对岩石性能的影响不同，三轴压缩条件下砂充填物对裂隙红砂岩强度的提升作用比泥充填物更显著（周春煦等，2024）。充填材料对缺陷岩石破坏模式影响较轻微（Zhao et al，2016），研究人员采用数字图像相关技术（DIC技术）分析了受荷岩石的破坏过程（范杰等，2022；傅帅旸等，2022）。例如：采用3D-DIC技术分析含圆孔岩石试件的裂纹演化过程（刘招伟等，2010；马永尚等，2017），结合单轴压缩试验与DIC技术研究发现，通过试件表面应变场可以确定裂纹扩展路径（Miao et al，2018；Lin et al，2020）。

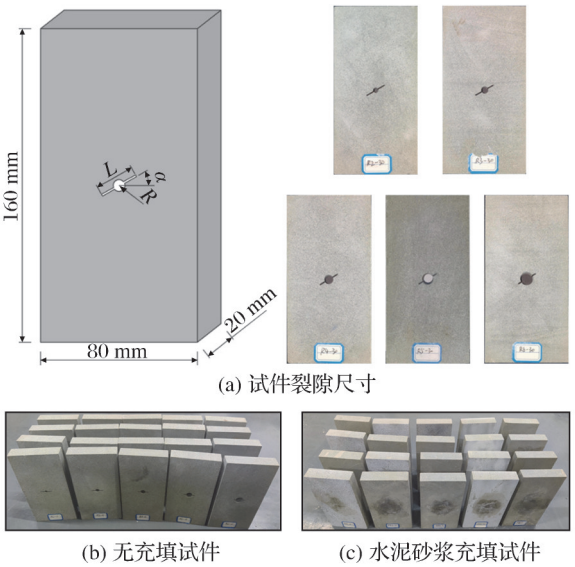
综上所述，国内外学者对组合缺陷岩体进行了诸多研究，但对充填组合缺陷岩体的力学响应和破坏特征研究偏少，对组合缺陷中裂隙尺寸的影响因素缺乏系统分析，如：刘吉祥等（2026）讨论了充填组合缺陷花岗岩的力学特性和能量演化特征，但忽略了裂隙尺寸对力学特性及破坏特征的影响。鉴于此，基于有水泥浆和无水泥浆充填下的含直裂隙—圆孔组合缺陷砂岩单轴压缩试验，采用数字图像技术监测试件表面的裂隙演化规律，探索组合缺陷中圆孔大小、裂隙倾角和充填情况对砂岩裂隙试件的力学响应和破坏特征的影响，从而揭示不同尺寸组合裂隙岩体的破坏规律和充填加固特征，可为裂隙岩体工程建设和注浆加固可行性分析提供基础。

1 试验方法

1.1 试件制备

选取工程中常见的砂岩作为研究对象，为便于监测裂隙的扩展过程和损伤演化规律，取同一块岩样制成高度、宽度和厚度分别为160 mm、80 mm和20 mm的长方体试件（Miao et al，2018），室内试验表明该砂岩的单轴抗压强度为87.35 MPa，弹性模量为19.31 GPa。组合缺陷由直裂隙和贯穿圆孔组成，预制裂隙时使用水刀切割法在完整砂岩试件中心切割出一条长度为20 mm、宽度为1 mm的贯穿直裂隙，并在直裂隙中心分别加工一个贯穿圆孔，圆孔半径分别为2，3，4，5，6 mm，直裂隙倾角分别为0°、30°、60°和90°，典型试件如图1所示。

将K1000型超细硅酸盐水泥按照水灰比为1.5∶1倒入容器中，进行充分搅拌除去液体混合物中气泡及中空形成水泥浆，该浆液凝固28 d后的单轴抗压强度约为7.72 MPa，弹性模量约为2.29 GPa。然后，对预制裂隙试件进行充填处理，使用注射器将浆液注入预制裂隙中，试件另一侧进行密封防止液体漏出，且浆液大于试件表明，以壁面浆液凝收缩无法充满裂隙。注浆后将试件放置于干燥阴凉环境养护28 d，养护完成后使用砂纸对充填体表面进行打磨，完成充填组合缺陷砂岩试件的制备。



(a) 试件裂隙尺寸

(b) 无充填试件　(c) 水泥砂浆充填试件

图1 试件制备过程

Fig. 1 Preparation process of specimens

1.2 试验系统

采用TAW-2000岩石压力试验机对无充填和充填组合缺陷砂岩进行单轴试验，结果如图2所示。试验开始前，在试件两端均匀涂抹一层凡士林

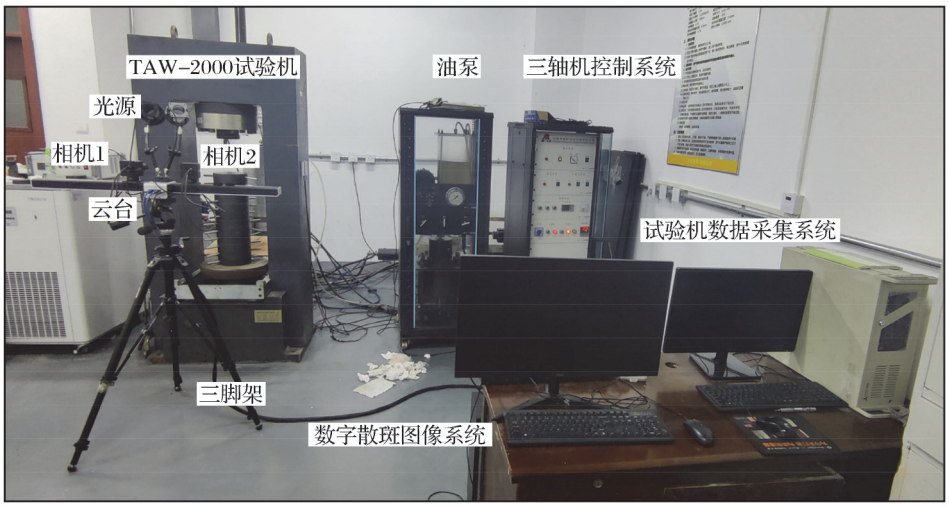


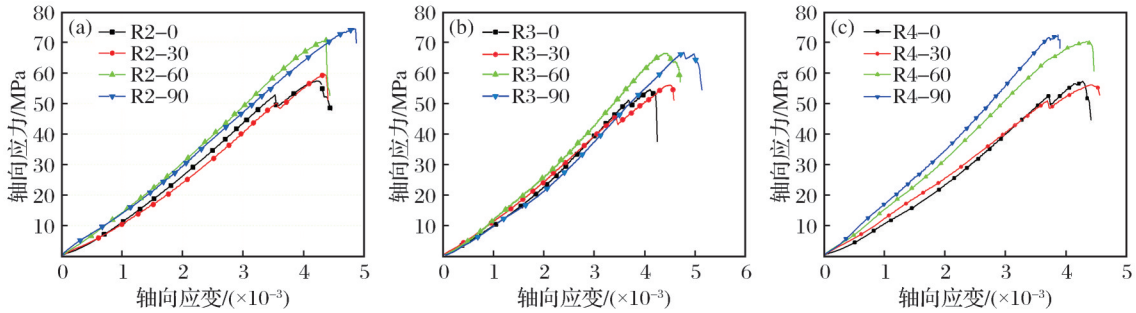
图2　单轴压缩试验系统

Fig. 2　Test system of uniaxial compression

以降低端部摩擦,然后施加2 kN载荷固定试件,正式加载时以0.10 mm/min的恒定加载速度向试件施加轴向载荷,直至试件破坏。在整个加载过程中,使用3D-DIC设备同步监测试件变形特征,记录间隔为10帧/s。

1.3　试验结果

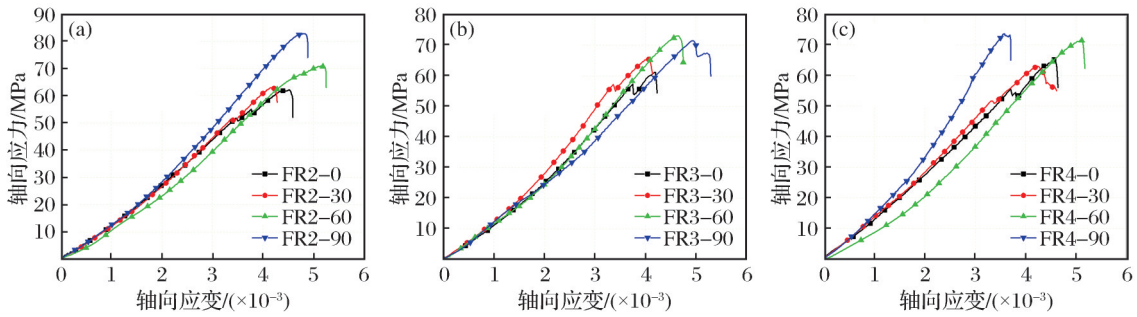
图3和图4所示分别为典型单轴压缩无充填和充填组合缺陷试件的应力—应变曲线。图中编号R代表无充填缺陷试件,FR代表充填缺陷试件,“-”前的数字代表圆孔半径大小,“-”后的数字代表直裂隙倾角,例如:R3-60和FR3-60分别表示圆孔半径为3 mm、预制裂隙倾角为60°的无充填和充填水泥砂浆的组合缺陷试件。如图3和图4所示,所有试件的应力—应变曲线均可划分为4个典型阶段,即初始压密阶段、弹性变形阶段、裂纹扩展阶段和峰后阶段。在初始压密阶段,无论裂隙几何形状和充填情况如何,曲线在此阶段均具有良好的一致性,呈现出典型的下凸状,这主要归因于试件原始孔隙的闭合和缺陷。随着载荷的增加,试件进入弹性阶段,轴向应力与轴向应变呈近似线性关系。随着加载继续,应力—应变曲线出现明显的脆性跌落特征,试件进入微裂纹扩展阶段,这是由于预制裂隙尖端发生应力集中,产生局部破坏而导致应力突然下降。相较而言,充填裂隙的应力下降较为轻微,这是由于充填材料的支撑作用,在一定程度上有效缓解了应力集中效应。随着加载继续,试件内部应力重新分布后变得稳定,应力继续上升,然而裂纹快速扩展,在达到第2个峰值时试件彻底失稳破坏。



(a)圆孔半径为2 mm,预制裂隙倾角分别为0°、30°、60°和90°;(b)圆孔半径为3 mm,预制裂隙倾角分别为0°、30°、60°和90°;(c)圆孔半径为4 mm,预制裂隙倾角分别为0°、30°、60°和90°

图3　无充填试件的应力—应变曲线

Fig. 3　Stress-strain curves of unfilled specimens



(a)圆孔半径为2 mm,预制裂隙倾角分别为0°、30°、60°和90°;(b)圆孔半径为3 mm,预制裂隙倾角分别为0°、30°、60°和90°;(c)圆孔半径为4 mm,预制裂隙倾角分别为0°、30°、60°和90°

图4 充填试件的应力—应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of filling specimens

图5所示为无充填和充填缺陷组合试件的峰值强度。由于试件为板状,且预制裂隙几何结构相对复杂,其在外界荷载下的力学机制复杂,因此在不同裂隙倾角下,试件的峰值强度随圆孔半径变化呈现出不同的变化规律。例如:随着圆孔半径的增大,倾角为0°和30°试件的峰值强度呈现增大、减小再增大的变化趋势;倾角为60°试件的峰值强度呈现增大再减小的变化趋势;倾角为90°试件的峰值强度呈现减小、增大再减小的变化趋势。尽管如此,充填水泥砂浆能够有效提升裂隙试件的承载力,不同圆孔和裂隙倾角情况下,充填试件的峰值强度始终高于无充填缺陷试件。

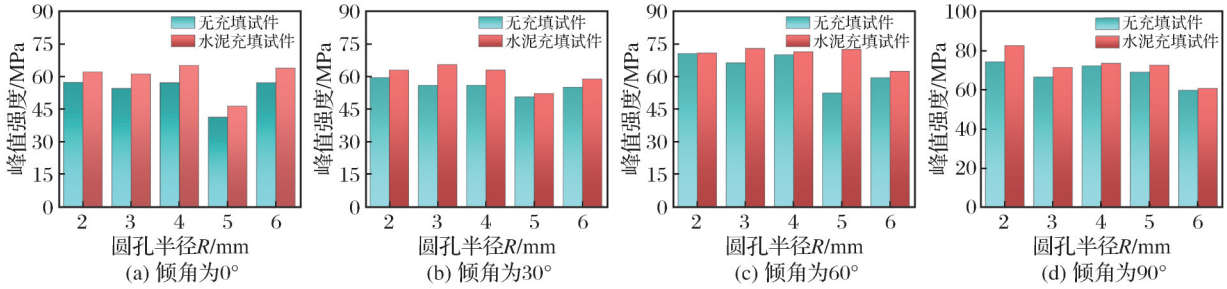


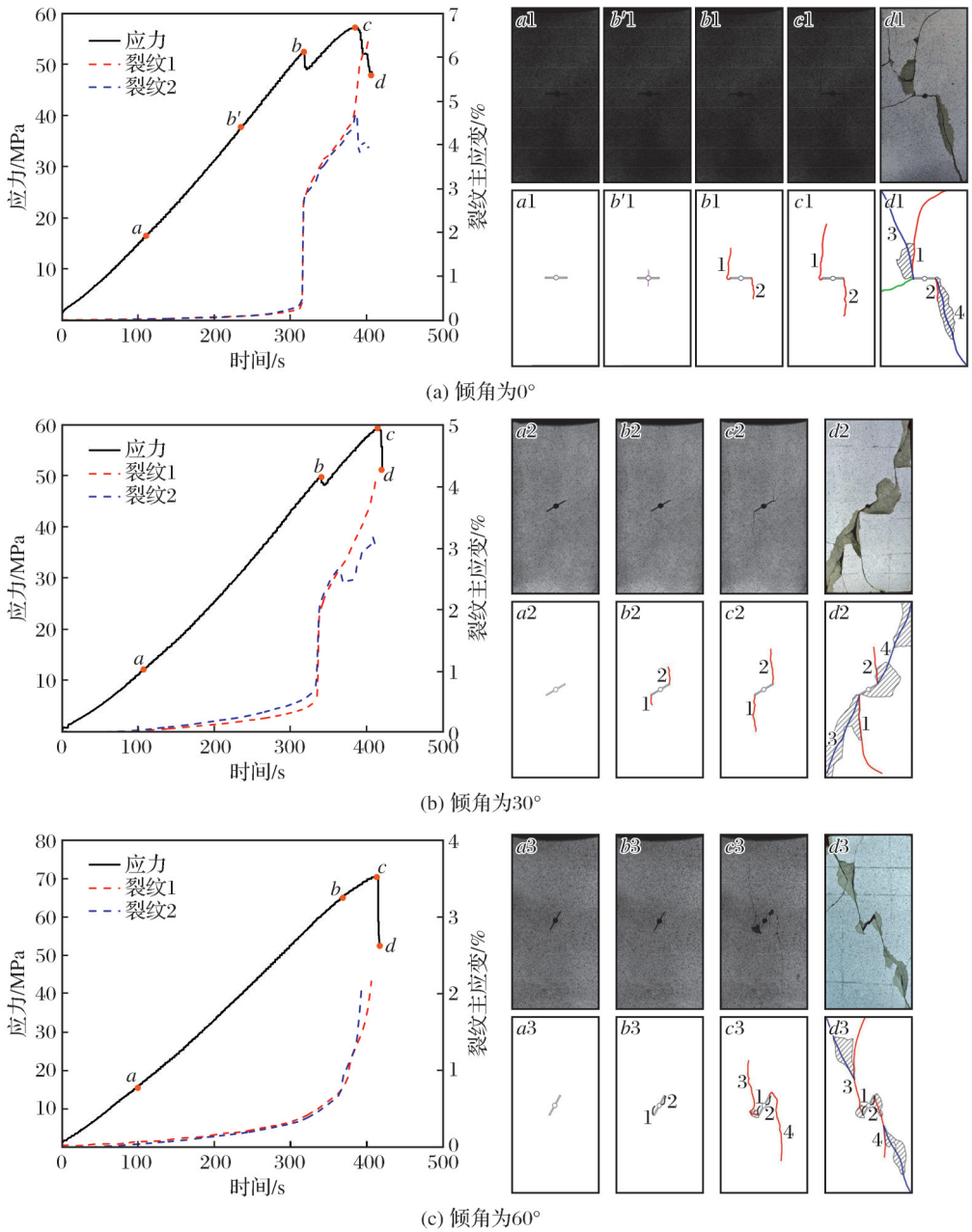
图5 无充填和充填缺陷组合试件的峰值强度

Fig. 5 Peak strength of unfilled and filling defect combination specimens

2 裂纹演化特征

DIC技术能够精确定位微裂纹起始萌生位置,实时追踪次生裂纹(翼型裂纹、反翼型裂纹和次生共面裂纹等)的演化路径,清晰地展示多条裂隙之间如何通过应变局部化带(应变高度集中的狭窄区域)相互连接、相互作用,最终形成宏观贯通破裂面的全过程,可为裂隙岩体的破坏特征提供分析手段。在单轴压缩下,裂纹萌生与扩展会导致周边区域的应变快速累积,将应变突增后对应区域的应变平均值视为裂纹的最大主应变。本研究基于3D-DIC监测技术,获得了预制缺陷附近断裂区裂纹的最大主应变随时间的演化特征及裂纹的扩展过程,并分析单轴压缩下试件的微裂纹演化特征和裂纹主应变变化规律。

图6所示为圆孔半径为2 mm时,试件裂纹主应变—时间曲线和裂纹扩展特征。图中a点为压密阶段结束对应点,b和b'点为宏观裂纹起裂点,c点为峰值应力点,d点为最终破坏点。右侧裂纹演化图中红色线段代表翼裂纹和反翼裂纹,蓝色线段代表非共面次级裂纹,绿色线段代表共面次级裂纹,洋红色线段代表圆孔萌生的拉伸裂纹,青蓝色线段代表圆孔萌生的剪切裂纹,阴影部分为试件表面剥落。如图6(a)所示,倾角为0°试件的轴向应力加载至b'点37.83 MPa时,圆孔上下同时产生2条微裂纹,但加载至b点52.78 MPa时,反翼裂纹1和2



(a) 倾角为0°

(b) 倾角为30°

(c) 倾角为60°

图6　不同倾角下试件的裂纹扩展过程

Fig. 6　Crack propagation process of specimens under different inclination angles

在直裂隙尖端萌生,2条微裂纹被挤压闭合。同时应力发生跌落,跌落幅度约为3.73 MPa,2条裂纹处的主应变突增,之后裂纹主应变呈加速增长趋势。加载至峰值点c时,2条反翼裂纹扩展至试件1/4处附近,峰后应力快速下降,随后2条非共面次级裂纹瞬间贯通试件并最终破坏。

如图6(b)所示,倾角为30°试件的轴向应力加载至b点49.95 MPa时,应力发生跌落,跌落幅度为1.57 MPa,此时,在拉应力作用下翼裂纹1和2[图6(b)中$b2$]在直裂隙尖端萌生,裂纹处的主应变突增,然后裂纹主应变增长速度加快。加载至峰值点c时,2条裂纹扩展至试件约1/4处,峰后应力快速下降,随后2条非共面次级裂纹在直裂隙尖端瞬间贯通试件导致其破坏[图6(b)中$d2$]。如图6(c)所示,倾角为60°试件的轴向应力加载至b点65.22 MPa时,短裂纹1和2在试件尖端萌生,但无应力跌落现

象产生，2处裂纹主应变突增，曲线进入裂纹扩展阶段。此试件虽为Ⅲ型起裂模式，但短裂纹萌生致使加载进入裂纹扩展阶段，因此曲线中无b'点。当应力加载至峰值点c点70.67 MPa时，反翼裂纹3和4在直裂隙尖端萌生向试件两端扩展，直裂隙尖端附近表面剥落导致DIC监测失效，2条非共面次级裂纹在直裂隙尖端瞬间贯通导致试件最终破坏。值得注意的是，由于裂隙附近表面剥离时，岩石内部已形成宏观破坏面，岩石处于破坏后d点，其对裂纹和应变场的演化过程没有影响。此外，倾角为90°试件的轴向应力加载至b点71.23 MPa时，2条短裂纹1和2在圆孔两侧孔壁萌生，同时2条裂纹处的主应变突增，当轴向应力加载至峰值点c点74.36 MPa时，2条剪切裂纹在圆孔两侧孔壁萌生并向试件两端扩展导致试件破坏。

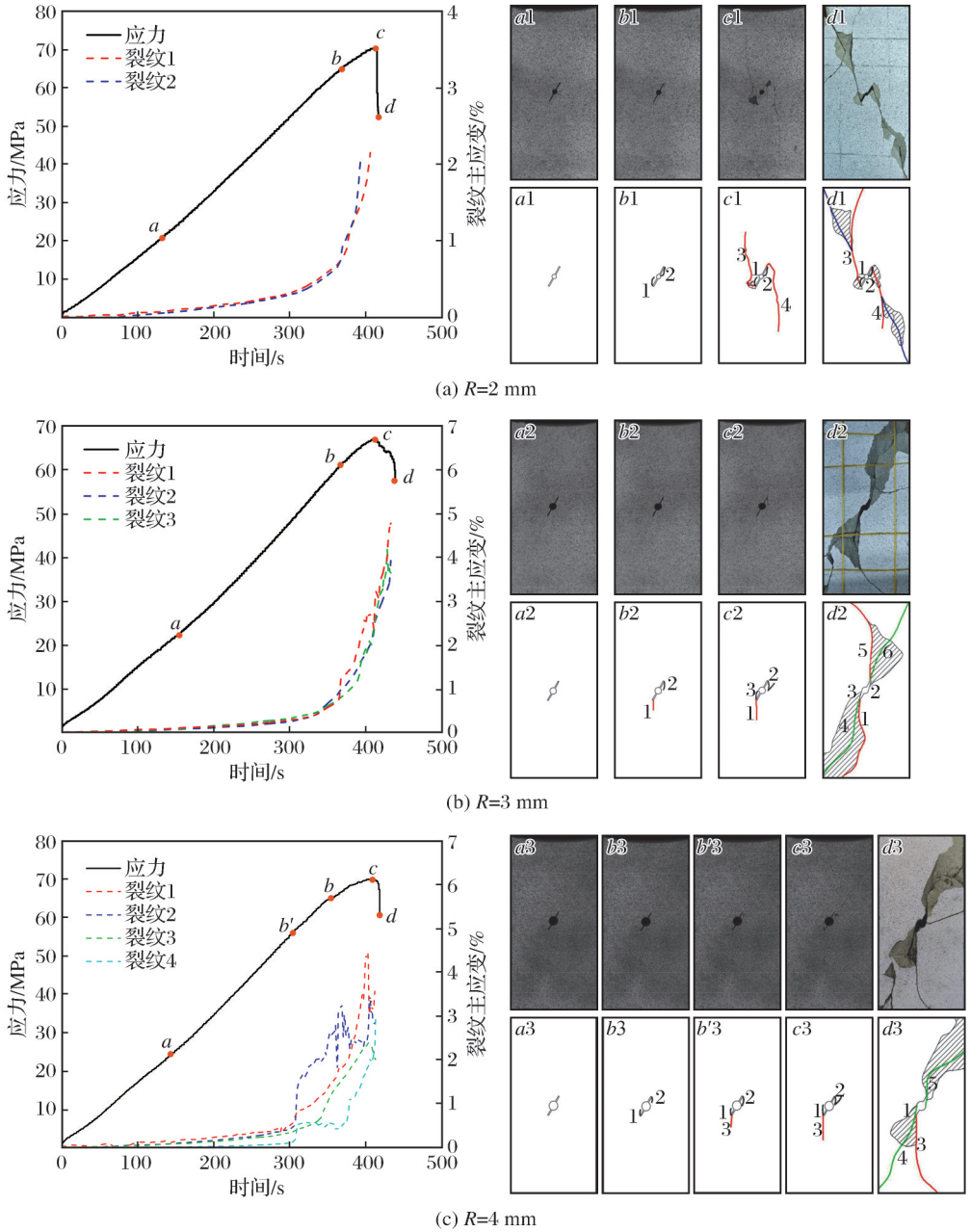
图7显示了裂隙倾角为60°时不同圆孔半径下试件应力、裂纹主应变和裂纹扩展随时间的变化特征，图中a点为压密阶段结束对应点；b'点为圆孔微裂纹或直裂隙尖端短裂纹萌生点，仅出现在Ⅰ型和Ⅲ型起裂模式过程中；b点为弹性阶段结束点；c点为峰值应力点；d点为最终破坏点，数字仅代表裂纹萌生顺序。如图7(a)所示，R2-60试件的轴向应力加载至b点65.22 MPa时，短裂纹1和2在直裂隙尖端萌生，但无应力跌落现象产生，此时2处的裂纹主应变突增，曲线进入裂纹扩展阶段。当应力加载至峰值点c点70.67 MPa时，反翼裂纹3和4在直裂隙尖端萌生并向试件两端扩展，直裂隙尖端附近表面剥落导致DIC监测失效，2条非共面次级裂纹在直裂隙尖端萌生并瞬间贯通试件导致最终破坏。

如图7(b)所示，当R3-60试件的轴向应力加载至b点61.25 MPa时，翼裂纹1和短裂纹2分别在不同侧的直裂隙尖端萌生，2处裂纹的主应变突增，随后短裂纹3在左侧直裂隙尖端萌生，当加载至峰值时，在短裂纹2附近有裂纹产生导致表面剥落，试件破坏后，2条共面次级裂纹萌生并迅速贯通导致试件破坏。如图7(c)所示，R4-60试件的轴向应力加载至b'点55.88 MPa时，短裂纹1和2的主应变发生突增，说明已在直裂隙尖端萌生，但未对试件的承载能力产生较大影响，当加载至b点65.08 MPa时，翼裂纹3在左侧直裂隙尖端萌生，随后曲线进入裂纹扩展阶段，斜率明显降低；当加载至峰值时，短裂纹2附近表面剥落，随后2条共面次级裂纹萌生并迅速贯通导致试件破坏。R5-60试件的轴向应力加载至b'点40.35 MPa时，翼裂纹3和4的主应变有所变化，这说明短裂纹1和2在直裂隙尖端萌生，但未对试件的承载能力产生较大影响；当加载至b点48.45 MPa时，翼裂纹3和4萌生且主应变突增，应力产生跌落，幅度为2.12 MPa，当翼裂纹扩展至试件1/4处时，试件破坏，峰后2条共面次级裂纹萌生并迅速贯通导致试件破坏。R6-60试件加载至b'点46.50 MPa时，直裂隙尖端产生2条短裂纹1和2，但因监测问题缺失了此时2条裂纹的主应变，后续加载至b点58.92 MPa时短裂纹1和2的扩展致使圆孔崩塌，但裂纹扩展阶段极短，到峰值点c点时，在崩塌的位置分别萌生出2条反翼裂纹与短裂纹合并导致试件破坏，因此裂纹1和2处的主应变在峰值处突增，随后2条裂纹扩展至试件上下边界形成宏观破裂面。

图8展示了倾角为60°、半径为6 mm的充填组合缺陷试件的裂隙演化图，当轴向应力加载至62.24 MPa时，拉伸裂纹1和2在圆孔两侧起裂，2处的裂纹主应变大幅增加，随即到峰值后2条裂纹发展到时间1/4处，剪切裂纹3和4在圆孔两侧起裂，迅速扩展形成宏观破坏面。由图7(e)可知，试件的裂纹扩展过程受充填影响较小。

由图7和图8可知，圆孔半径、裂隙倾角和充填水泥对裂纹应变的演化规律无明显影响，试件裂纹主应变—时间曲线可划分为3个阶段：第一阶段，裂纹主应变基本无变化，对应于应力—应变曲线的压密阶段；第二阶段，裂纹主应变增长缓慢，增长不超过0.5%，对应弹性变形阶段，此阶段试件表面无裂纹产生；第三阶段，裂纹主应变突增，之后增长速度大幅加快，试件表面出现宏观裂纹，裂纹快速扩展，对应裂纹扩展阶段。因此，可根据裂纹主应变的变化规律快速划分岩石的变形损伤阶段，确定特征应力。图9(a)所示为组合缺陷试件的起裂应力变化规律，不同裂隙倾角下起裂应力随圆孔半径的增加而略有降低，不同圆孔半径下起裂应力随倾角的增加而总体增大。

图9(b)所示为水泥充填试件的起裂应力变化规律，试件起裂应力随倾角的变化规律与无充填试件一致，不同倾角试件起裂应力随圆孔半径的增加



(a) R=2 mm

(b) R=3 mm

(c) R=4 mm

图7　60°倾角无充填试件的裂纹扩展过程

Fig. 7　Crack propagation process of unfilled specimens with 60° inclination angle

呈波动式下降趋势。通过对比图9与图10发现,除个别试件外,大部分情况下水泥充填试件的起裂应力均大于无充填试件,说明水泥充填提高了试件的起裂应力,反映出水泥浆充填能提高岩体结构稳定性。

3　应变场演化特征分析

以圆孔半径为2 mm试件为例,分析裂隙倾角对应变场的影响。图10所示为圆孔半径为2 mm试件的应变场演化特征,其中A、B、C、D点分别对应图7中的a、b、c、d点。由图10可知,随着裂隙倾角的增加,在弹性阶段(AB段)的应变集中带位置发生变化:0°倾角试件应变集中带位置位于圆孔上下,30°倾角试件位于组合裂隙周围或圆孔上下,60°~90°倾角试件位于组合裂隙周围。但是,最大应变位置略有差异,如:0°倾角试件位于圆孔上下,

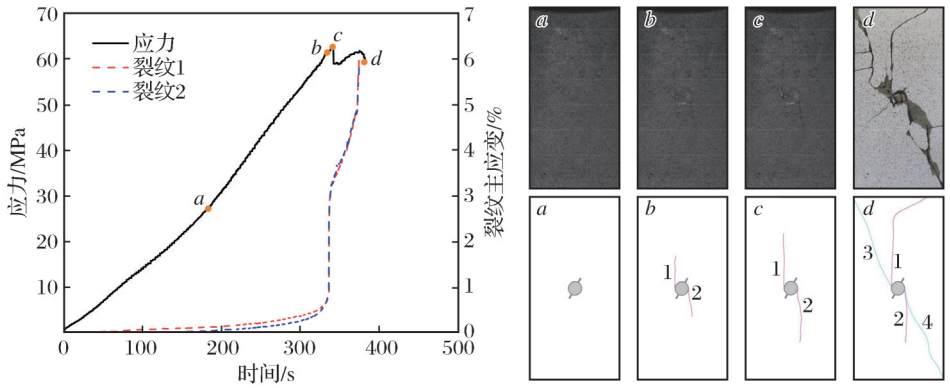


图8 FR6-60试件的裂纹扩展过程

Fig. 8 Crack propagation process of FR6-60 specimen

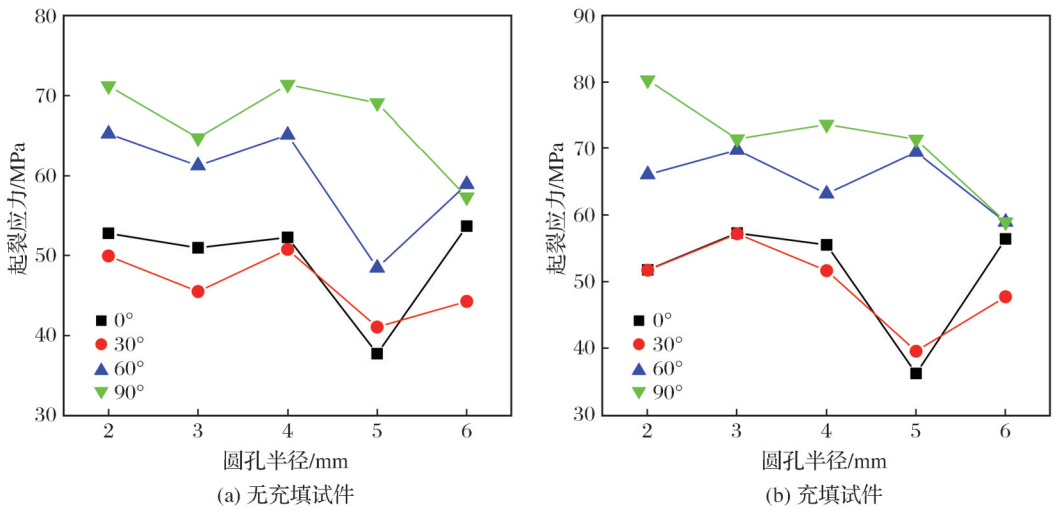


图9 所有试件的起裂应力

Fig. 9 Crack initiation stress of all specimens

30°倾角试件位于左侧直裂隙下部、右侧直裂隙上部或圆孔上下，60°倾角试件位于直裂隙周围，90°倾角试件位于圆孔上下。随着加载的继续，0°~60°倾角试件应变集中带逐渐向直裂隙尖端转移，而90°倾角试件应变带向圆孔左右孔壁转移。

图11所示为裂隙倾角为30°的无充填试件应变场演化过程。在弹性阶段，不同圆孔半径(R)下裂隙倾角为30°试件的应变集中带位置存在差异，R=2~3 mm试件的应变集中带位于组合裂隙周围，最大应变位于直裂隙尖端，R=4~6 mm试件的应变集中带位于圆孔周围，最大应变位于圆孔上下端。随着加载的继续，不同位置的应变带转移到预制直裂隙尖端，翼裂纹在直裂隙尖端起裂。而R6-30试件圆孔两侧也存在应变带，这是因为直裂隙尖端与圆孔位置较近，从而产生使圆孔塌陷的短裂纹。应力达到峰值时，试件内部无新裂纹产生，位于直裂隙尖端的条状应变带随翼裂纹扩展逐渐变长。应力峰值后，可观察到新的倾斜应变带在直裂隙尖端产生，非共面次级裂纹萌生并迅速贯通试件形成宏观破坏面。总之，圆孔半径对应变场有一定的影响，具体表现在：(1)在弹性阶段，应变集中带位置随着圆孔半径的增大由直裂隙周围变成圆孔上下，最大应变分布由直裂隙尖端变成圆孔上下端；(2)60°倾角试件在短裂纹起裂时，半径为3 mm试件的最大应变位于左侧直裂隙下部与右侧直裂隙下部，其余半径下试件最大应变位于左侧直裂隙上部与右侧直裂隙下部，圆孔半径为4~6 mm试件的翼裂纹应变带出现在峰值强度附近。

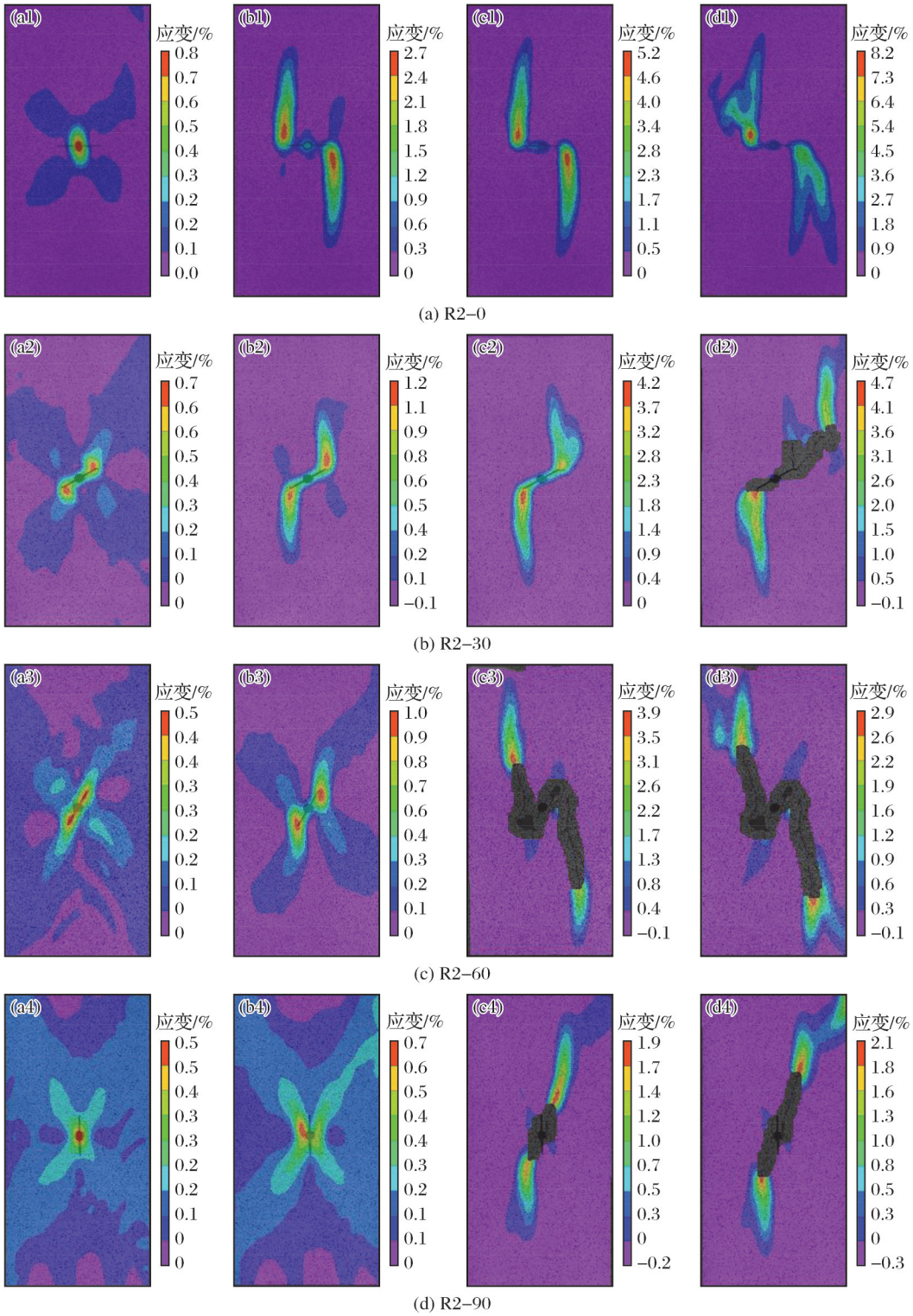


图 10　圆孔半径 *R*=2 mm 的无充填试件的应变场演化特征

Fig. 10　Strain field evolution characteristics of unfilled specimen with a circular hole radius of *R*=2 mm

为了对比分析充填与无充填裂隙试件在加载过程中应变场演化的异同,图 12 给出了圆孔半径 *R*=2 mm 水泥浆充填试件应变场的演化过程。通过对比图 10 与图 12 发现:充填前后,根据主应变场演

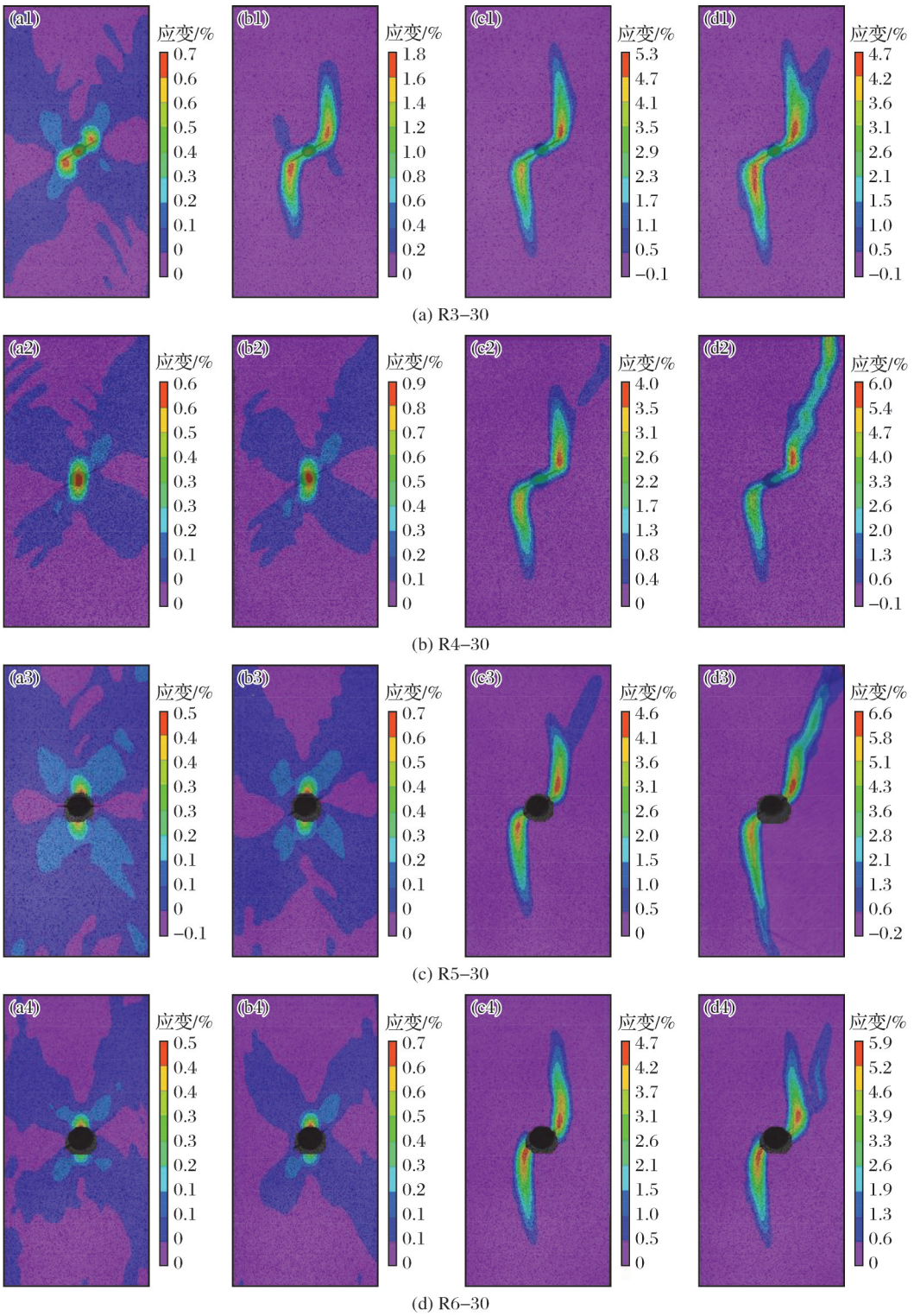


图 11　30°裂隙倾角试件应变场

Fig. 11　Strain field of specimens with 30° crack inclination

化过程可得出充填对试件应变场演化的影响，充填试件在起裂之前（a 点）与无充填试件岩石内部的应变带分布基本一致，试件裂隙处的应变值大于岩石内部的应变值，这是因为在外界应力压缩下无充填

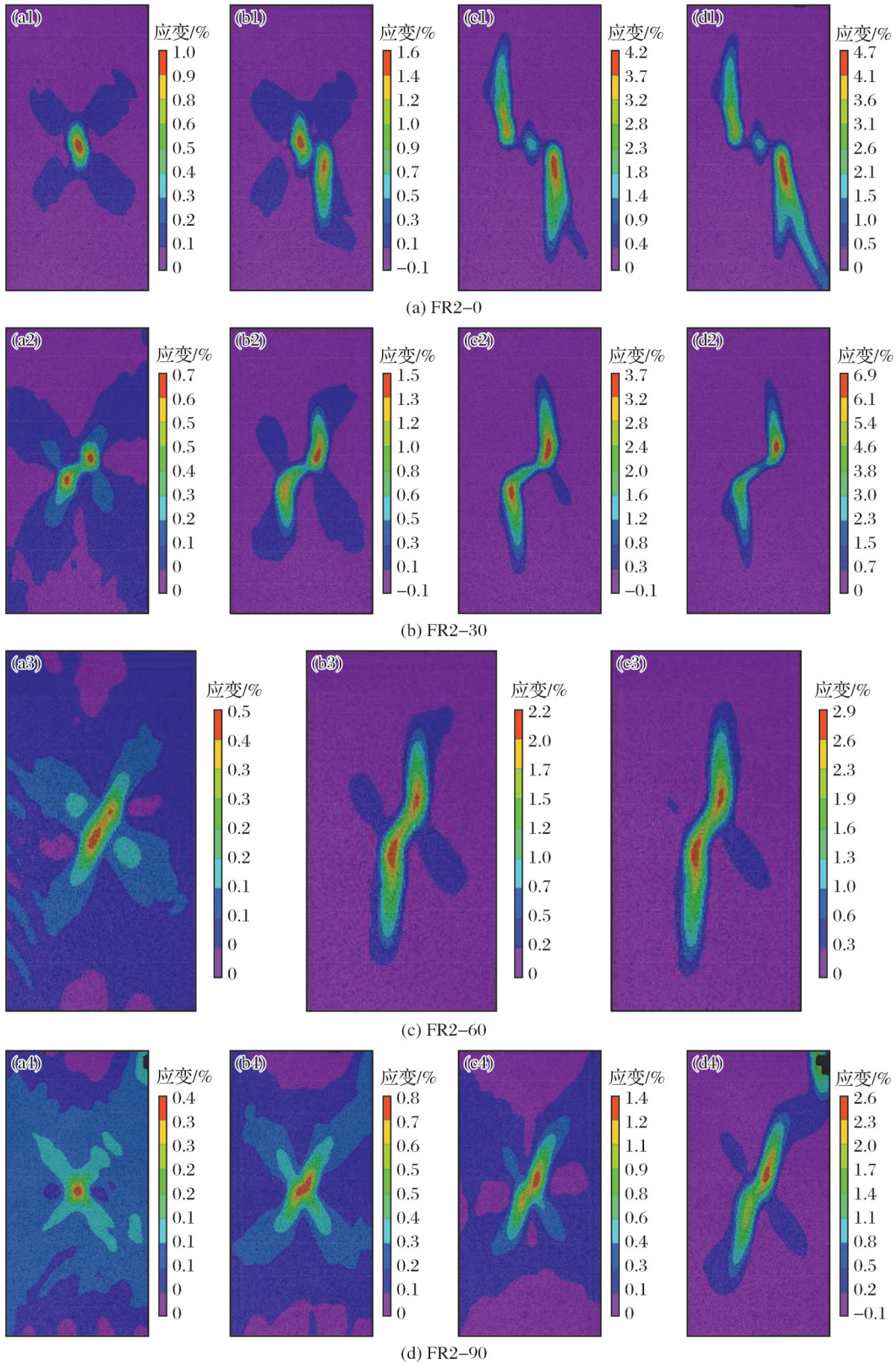


图 12　圆孔半径 *R*=2 mm 时水泥充填试件的应变场演化特征

Fig. 12　Strain field evolution characteristics of cement filling specimens with a circular hole radius of *R*=2 mm

裂隙逐渐闭合，而充填材料力学性质较弱，可变性较高，其在外界应力下更容易发生变形而向裂隙壁面提供承载力，充填裂隙内部有明显的应变集中带。随着应力持续增大，当试件发生起裂后（*b*点），有无充填缺陷试件的应力分布发生较大变化，随着裂隙闭合，无充填试件裂隙端部发生较大应变集中带，进而形成裂隙，但是由于充填材料的支撑作用，充填裂隙试件的应变集中带仍发生在裂隙内部，直至充填物破坏后应变集中带逐渐转移至缺陷端部，岩石才发生起裂，并在外界应力作用下逐渐扩展贯穿（*c*点）。总的来说，充填材料不仅能够有效支撑裂隙壁面，防止其发生较大变形，而且自身能够发生变形，吸收大量外界输入能量，提高了试件整体的起裂难度，增强了宏观力学性能。

4 裂纹起裂模式

在单轴压缩下，随着裂隙倾角和圆孔半径的变化，裂隙附近的应力分布会发生改变，当某一处的应力超过材料承受极限时，试件发生破坏，产生微裂隙。为了进一步讨论试件起裂特征，根据微裂纹初始萌生位置总结了4种起裂模式（图13），分别为圆孔上下端和直裂隙尖端萌生微裂纹（Ⅰ型起裂），直裂隙尖端萌生翼裂纹或反翼裂纹（Ⅱ型起裂），圆孔两侧部分区域坍塌、直裂隙尖端萌生翼裂纹和反翼裂纹（Ⅲ型起裂），圆孔两侧萌生拉伸（Ⅳ型起裂）。需要说明的是，由于充填材料水泥浆的力学性能低于砂岩，在岩石试件起裂前，充填水泥介质会首先破坏。

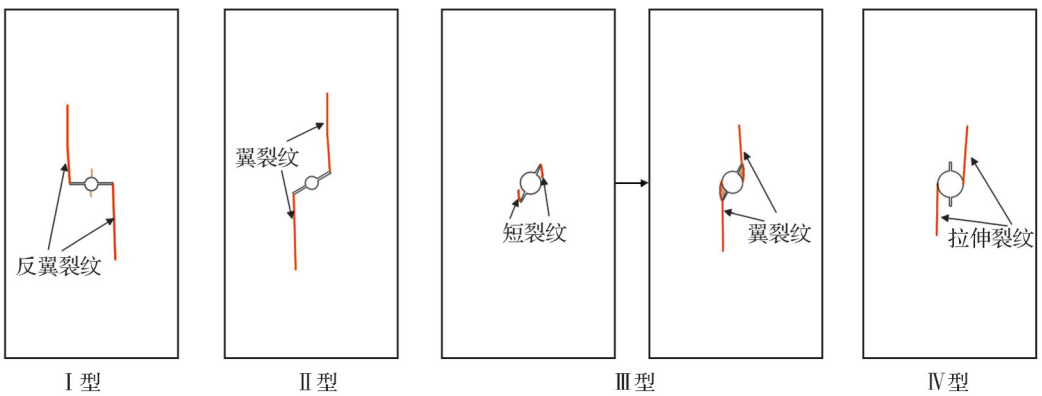


图13 裂纹起裂模式

Fig. 13 Crack initiation mode

表1所示为各类型试件的起裂模式，对于含单一圆孔裂隙试件，次生裂纹主要在孔的上下或侧面萌生，其与加载方向近似平行（Yang et al，2014；Ma et al，2022），而含单一直裂隙岩石的次生裂纹主要由直裂隙尖端萌生（陈家嵘等，2023）。对于含圆孔—直裂隙的组合缺陷砂岩试件，大部分次生裂纹主要从直裂隙尖端萌生，这反映组合缺陷中圆孔与直裂隙的次生裂纹起裂存在竞争机制，多数情况下直裂隙对起裂模式起主导作用。此外，裂隙倾角对起裂模式影响较为显著，例如：当裂隙倾角由0°增加至90°时，圆孔半径为2~3 mm试件的起裂模式变化顺序为“Ⅰ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅳ”，圆孔半径为4~5 mm试

表1 试件裂纹起裂模式统计

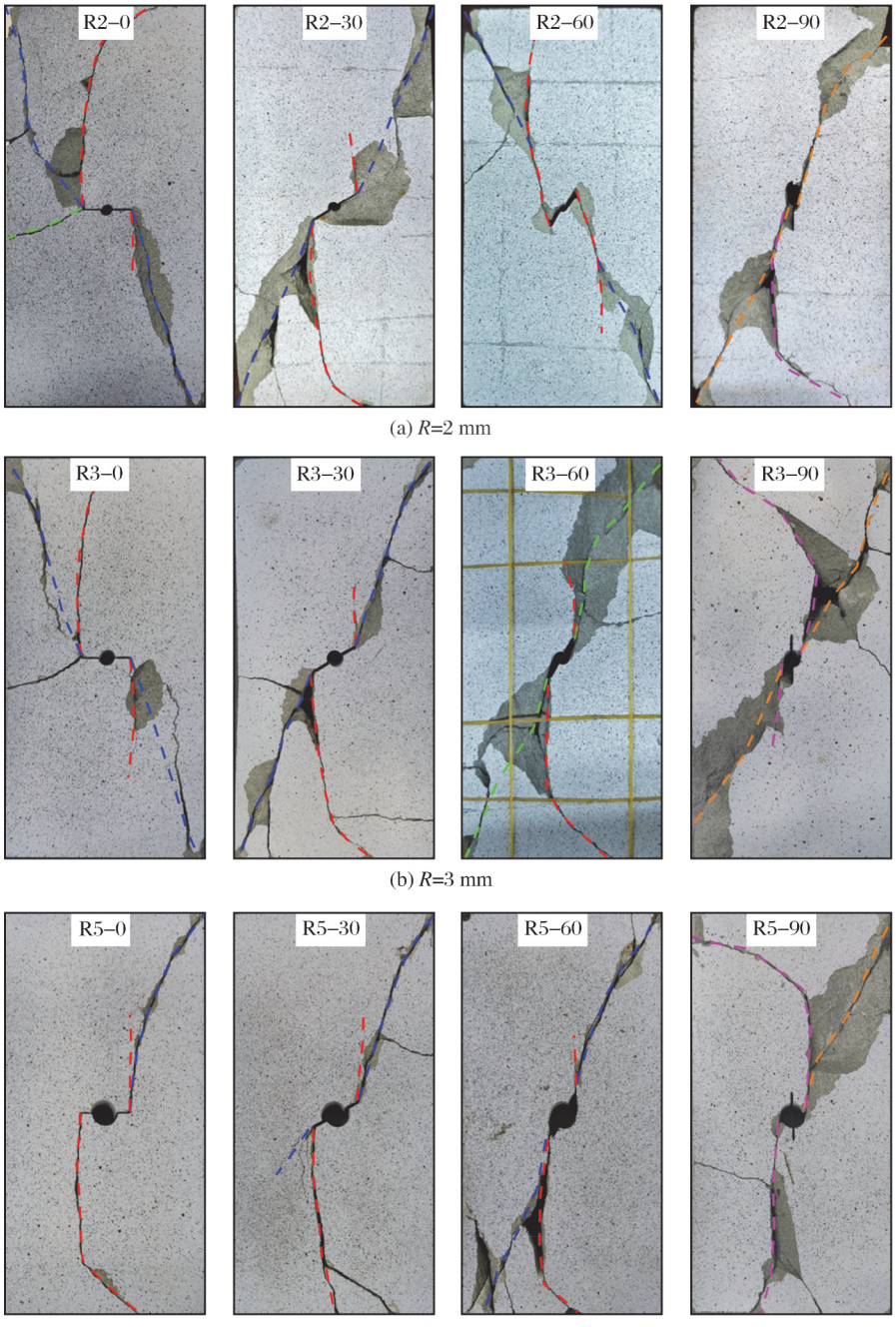
Table 1 Statistics of crack initiation modes of specimens

裂隙倾角 α/(°)	*R*=2 mm		*R*=3 mm		*R*=4 mm		*R*=5 mm		*R*=6 mm	
	无充填	有充填	无充填	有充填	无充填	有充填	无充填	有充填	无充填	有充填
0	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
30	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
60	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ
90	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ

件的起裂模式变化顺序为“Ⅰ→Ⅰ→Ⅲ→Ⅳ”。由此可见,随着圆孔半径的增加,试件起裂模式会发生一定的变化。此外,水泥浆充填对试件起裂模式的影响仅存在于倾角为60°、半径为6 mm时,其原因是该半径下充填体尺寸较大,单轴压缩下其对岩石缺陷的支撑作用较强,微裂纹从圆孔两端起裂。

5 破坏模式

图14和图15所示分别为裂隙试件和水泥浆充填组合缺陷试件的破坏模式。图14中红色虚线表示由预制裂隙尖端萌生的翼裂纹与反翼裂纹,蓝色虚线表示由预制裂隙尖端萌生的非共面次级裂纹,



(a) R=2 mm

(b) R=3 mm

(c) R=5 mm

图14 组合缺陷砂岩试件的破坏模式

Fig. 14 Failure modes of sandstone specimens with combined defects

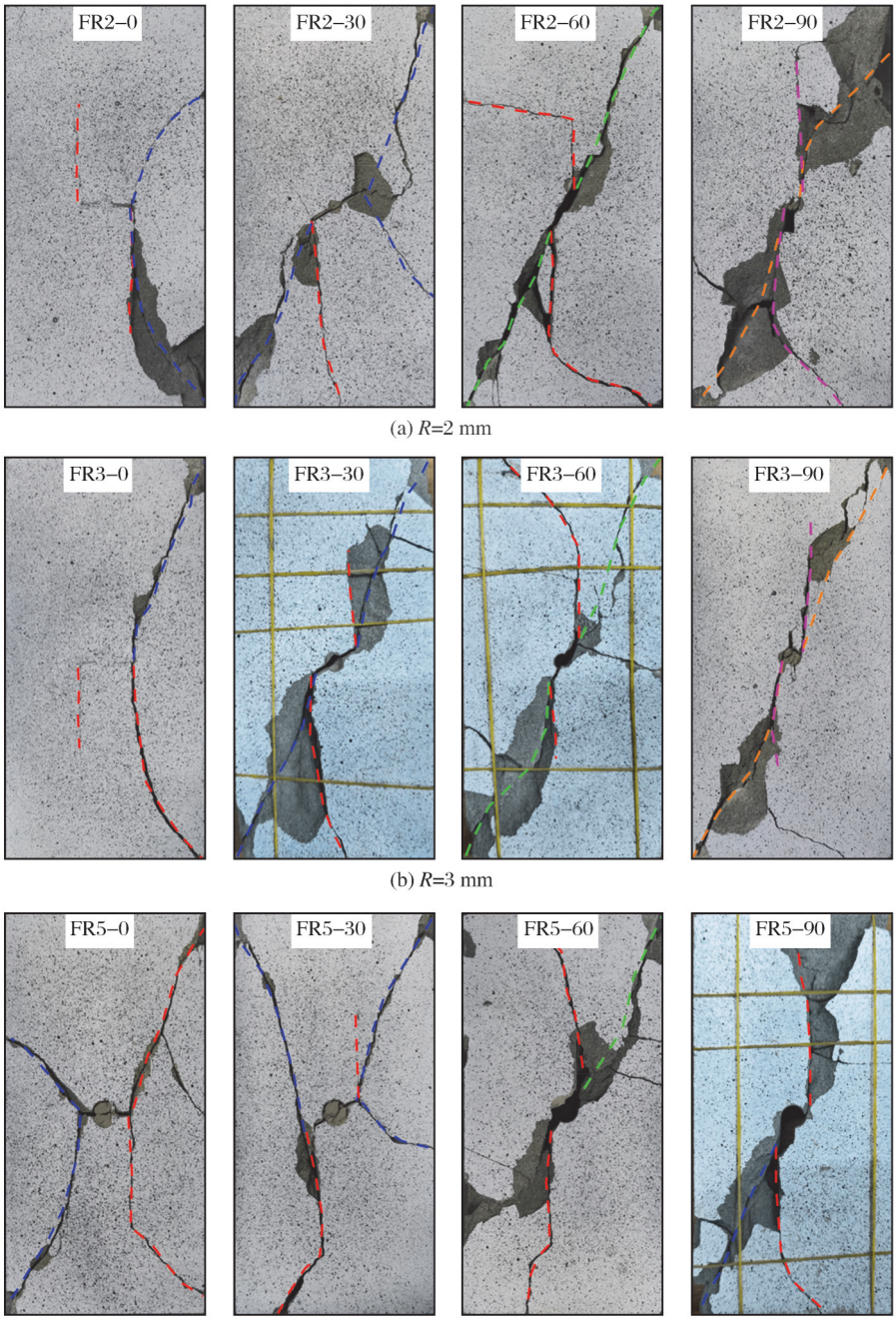


图 15　水泥充填砂岩试件的破坏模式

Fig. 15　Failure modes of cement-filled sandstone specimens

绿色虚线表示由预制裂隙尖端萌生的共面次级裂纹，洋红色虚线表示圆孔萌生的拉伸裂纹，橙色虚线表示由圆孔萌生的剪切裂纹，黑色虚线表示远场裂纹。由图 14 可知，裂隙试件的破坏模式均为拉—剪复合破坏模式，因其由不同类型裂纹主导，将其细化为 3 类破坏模式：由翼裂纹或反翼裂纹和非共面次级裂纹主导的拉—剪复合破坏（Ⅰ型）；由翼裂纹和共面次级裂纹主导的拉—剪复合破坏（Ⅱ型）；由圆孔侧壁萌生的拉伸裂纹和剪切裂纹主导的拉—剪复合破坏（Ⅲ型）。裂隙倾角和圆孔半径的影响较小，仅对次生裂纹类型有一定影响。其中，裂隙倾角为 0°和 30°组合缺陷试件为Ⅰ型拉—剪复

合破坏,裂隙倾角为60°组合缺陷试件表现为Ⅰ型(圆孔半径为2 mm和6 mm)和Ⅱ型(圆孔半径为3~5 mm)拉—剪复合破坏,倾角为90°试件表现为Ⅲ型拉—剪复合破坏。

由图15可知,水泥浆充填组合缺陷试件的破坏模式呈现出明显的Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ型拉—剪复合破坏。通过对比图14和图15发现,水泥充填基本不改变试件破坏模式,但圆孔半径较大时充填试件破坏时的裂纹数量较多。这是因为含大尺寸缺陷试件的力学性能较差,其轻微的裂隙演化会导致岩石破坏,而充填水泥砂浆后,缺陷试件的结构稳定性得到显著改善,在外界应力加载下的承受能力更强,破坏所需要的能量更多,产生的裂纹数量相对较多。

6 结论

(1)水泥浆充填能够有效提升含组合裂隙岩体的强度,峰值应力和起裂应力量均大于无充填试件。此外,无充填和充填组合试件的峰值强度和起裂应力随着裂隙倾角的增加而增大,而与圆孔半径无明显相关关系。

(2)通过DIC技术获得试件的表面位移,得到单轴压缩下试件的裂纹主应变,发现圆孔半径、裂隙倾角和充填水泥对裂纹主应变的演化规律无明显影响,试件裂纹主应变—时间曲线可划分为基本无变化、缓慢增长和突增3个阶段,其分布对应于岩石的不同变形阶段,因而可根据裂纹主应变的变化规律快速划分岩石的变形损伤阶段,确定特征应力。

(3)单轴压缩下,无充填与充填组合缺陷试件的起裂模式可划分为4种类型。根据具体次生裂纹的生成方式,无充填与充填组合缺陷试件的破坏模式可划分为3种类型,分别是由翼裂纹或反翼裂纹和非共面次级裂纹主导的拉—剪复合破坏(Ⅰ型),由翼裂纹和共面次级裂纹主导的拉—剪复合破坏(Ⅱ型),由圆孔侧壁萌生的拉伸裂纹和剪切裂纹主导的拉—剪复合破坏(Ⅲ型)。无充填与充填试件的起裂模式和破坏模式分类体系相同,受裂隙倾角的影响较为显著,而受圆孔半径和充填的影响较弱。

(4)试件表面应变场的演化与裂纹扩展规律一致,无充填试件的应变集中区域受裂隙倾角和圆孔半径的影响,位于圆孔上下或组合裂隙周围,但随着加载的进行,应变局部化带位置向直裂隙尖端或圆孔两侧转移。由于充填材料的支撑作用,充填试件的应变局部化带长期处于充填体内部,直至充填体破坏后逐渐向裂隙端部转移。

通过对比分析充填前后含组合缺陷砂岩的力学特性与破坏特征,发现充填处理能够支撑裂隙壁面,有效改善裂隙周边的应变集中现象,从而提高岩石的强度和刚度。该研究结果有效揭示了裂隙充填加固的变形机制,可为注浆加固可行性分析提供参考。然而,随着材料科学的发展,各式新型材料的研制为注浆加固工程中浆液选取提供了多种选择,由于不同注浆材料对裂隙岩石的影响不一致,今后将开展不同注浆材料的充填复杂裂隙岩体研究,为岩土工程建设中浆液的选取和研制提供基础理论参考。

参考文献(References):

Chai S B, Wang H, Yu L Y, et al, 2020. Experimental study on static and dynamic compression mechanical properties of filled rock joints[J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 17(3): e264.

Chen S J, Xia Z G, Feng F, 2020. Numerical simulation of strength, deformation, and failure characteristics of rock with fissure hole defect[J]. Advances in Materials Science and Engineering, (1): 7048645.

Lin Q B, Cao P, Cao R H, et al, 2020. Mechanical behavior around double circular openings in a jointed rock mass under uniaxial compression[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 20(1): 19.

Ma W B, Chen Y L, Yi W, et al, 2022. Investigation on crack evolution behaviors and mechanism on rock-like specimen with two circular-holes under compression[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 118: 103222.

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

Wang Y L, Tang J X, Dai Z Y, et al, 2018. Experimental study on mechanical properties and failure modes of low-strength rock samples containing different fissures under uniaxial

compression [J]. Engineering Fracture Mechanics, 197: 1-20.

Wang Y Q, Peng K, Shang X Y, et al, 2021. Experimental and numerical simulation study of crack coalescence modes and microcrack propagation law of fissured sandstone under uniaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 115: 103060.

Wu J Y, Feng M M, Yu B Y, et al, 2018. The length of pre-existing fissures effects on the mechanical properties of cracked red sandstone and strength design in engineering [J]. Ultrasonics, 82: 188-199.

Yang S Q, Jing H W, Xu T, 2014. Mechanical behavior and failure analysis of brittle sandstone specimens containing combined flaws under uniaxial compression [J]. Journal of Central South University, 21(5): 2059-2073.

Yang S Q, Yin P F, Zhang Y C, et al, 2019. Failure behavior and crack evolution mechanism of a non-persistent jointed rock mass containing a circular hole [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 114: 101-121.

Yin Q, Jing H W, Su H J, 2018. Investigation on mechanical behavior and crack coalescence of sandstone specimens containing fissure-hole combined flaws under uniaxial compression [J]. Geosciences Journal, 22(5): 825-842.

Zhao Z H, Zhou D, 2016. Mechanical properties and failure modes of rock samples with grout-infilled flaws: a particle mechanics modeling [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 34: 702-715.

陈光波，唐薇，李谭，等，2024. 裂隙煤岩组合体单轴压缩力学响应及失稳机制[J]. 岩土力学，45(9)：2633-2652. Chen Guangbo, Tang Wei, Li Tan, et al, 2024. Mechanical response and instability model of fractured coal-rock combined body [J]. Rock and Soil Mechanics, 45(9): 2633-2652.

陈家嵘，周昌台，周韬，等，2023. 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，42(7)：1743-1758. Chen Jiarong, Zhou Changtai, Zhou Tao, et al, 2023. 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, 42(7): 1743-1758.

范杰，朱星，胡桔维，等，2022. 基于3D-DIC的砂岩裂纹扩展及损伤监测试验研究[J]. 岩土力学，43(4)：1009-1019. Fan Jie, Zhu Xing, Hu Juwei, et al, 2022. Experimental study on crack propagation and damage monitoring of sandstone using three-dimensional digital image correlation technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 43(4): 1009-1019.

傅帅旸，李海波，李晓锋，2022. 基于DIC方法与声发射的花岗岩断裂过程区范围研究[J]. 岩石力学与工程学报，41(12)：2497-2508. Fu Shuaiyang, Li Haibo, Li Xiaofeng, 2022. Research on the range of fracture process zone of granite based on DIC and acoustic emission [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41(12): 2497-2508.

郝燕奎，聂鑫，2019. 孔洞—裂隙缺陷岩石力学及声发射特征分析[J]. 中国地质调查，6(3)：63-67. Hao Yankui, Nie Xin, 2019. Analysis of mechanical and acoustic emission characteristics of hole-fracture defective rocks [J]. Geological Survey of China, 6(3): 63-67.

李地元，朱泉企，李夕兵，2018. 孔洞形状对大理岩渐进破坏力学特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报，14(1)：58-66. Li Diyuan, Zhu Quanqi, Li Xibing, 2018. Research on the effect of cavity shapes for the progressive failure and mechanical behavior of marble [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 14(1): 58-66.

李元海，刘金杉，唐晓杰，等，2020. 考虑裂隙的含孔洞软岩体力学特性模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报，37(3)：594-603. Li Yuanhai, Liu Jinshan, Tang Xiaojie, et al, 2020. Simulation analysis of mechanical properties of the soft rock mass with holes and fractures [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 37(3): 594-603.

刘吉祥，赵钺，沈彦丞，等，2026. 无充填和石膏充填预制裂隙花岗岩力学特性与能量演化差异研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版)，45(4)：150-158. Liu Jixiang, Zhao Yue, Shen Yancheng, et al, 2026. Mechanical properties and energy evolution of unfilled and gypsum-filled precracked granite [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 45(4): 150-158.

刘享华，张科，张凯，等，2021. 孔洞—多裂隙组合型缺陷岩体破裂及分形演化[J]. 地下空间与工程学报，17(4)：1021-1027. Liu Xianghua, Zhang Ke, Zhang Kai, et al, 2021. Fracturing and fractal evolution of rock mass containing hole-multiple fissures combined flaws [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 17(4): 1021-1027.

刘招伟，李元海，2010. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J]. 工程力学，27(8)：133-139. Liu Zhaowei, Li Yuanhai, 2010. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a

hole undergoing uniaxial compressive load[J]. Engineering Mechanics,27(8):133-139.

马永尚,陈卫忠,杨典森,等,2017.基于三维数字图像相关技术的脆性岩石破坏试验研究[J].岩土力学,38(1):117-123.Ma Yongshang, Chen Weizhong, Yang Diansen, et al, 2017.Experimental study of brittle rock failure based on three-dimensional digital image correlation technique[J].Rock and Soil Mechanics,38(1):117-123.

苗胜军,尚向凡,常宁东,等,2025.含孔洞砂岩双轴压缩力学特性及破裂机制[J].采矿与岩层控制工程学报,7(2):59-72.Miao Shengjun, Shang Xiangfan, Chang Ningdong, et al, 2025.Mechanical properties and fracture mechanism of porous sandstone under biaxial compression[J].Journal of Mining and Strata Control Engineering,7(2):59-72.

司洁萌,郝家旺,2019.基于VIC-3D的含充填裂隙岩石破坏实验研究[J].矿业研究与开发,39(1):68-71.Si Jiemeng, Hao Jiawang, 2019.Experimental study on failure of fracture-filled rock based on VIC-3D[J].Mining Research and Development,39(1):68-71.

王雁冰,张瑶瑶,聂俊文,等,2023.冲击荷载下含孔洞砂岩的力学特性[J].采矿与岩层控制工程学报,5(1):74-84.Wang Yanbing, Zhang Yaoyao, Nie Junwen, et al, 2023.Mechanical properties of sandstone with holes under impact load[J].Journal of Mining and Strata Control Engineering,5(1):74-84.

杨圣奇,戴永浩,韩立军,等,2009.断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究[J].岩石力学与工程学报,28(12):2391-2404.Yang Shengqi, Dai Yonghao, Han Lijun, et al, 2009.Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(12):2391-2404.

杨圣奇,刘相如,李玉寿,2012.单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J].岩石力学与工程学报,31(A2):3539-3546.Yang Shengqi, Liu Xiangru, Li Yushou, 2012.Experimental analysis of mechanical behavior of sandstone containing hole and fissure under uniaxial compression[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(A2):3539-3546.

张科,刘享华,李昆,等,2018.含孔多裂隙岩石力学特性与破裂分形维数相关性研究[J].岩石力学与工程学报,37(12):2785-2794.Zhang Ke, Liu Xianghua, Li Kun, et al, 2018.Investigation on the correlation between mechanical characteristics and fracturing fractal dimension of rocks containing a hole and multi-flaws[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,37(12):2785-2794.

张科,刘享华,杨红宣,等,2019.含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟[J].水文地质工程地质,46(1):79-85,110.Zhang Ke, Liu Xianghua, Yang Hongxuan, et al, 2019.Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting[J].Hydrogeology & Engineering Geology,46(1):79-85,110.

周春煦,冯红春,周文正,2024.充填双裂隙砂岩力学特性及裂隙演化规律研究[J].有色金属科学与工程,15(4):577-587,632.Zhou Chunxu, Feng Hongchun, Zhou Wenzheng, 2024.Mechanical properties and cracks evolution law of sandstone containing two filled fissures[J].Nonferrous Metals Science and Engineering, 15(4):577-587,632.

朱谭谭,靖洪文,苏海健,等,2015.孔洞—裂隙组合型缺陷砂岩力学特性试验研究[J].煤炭学报,40(7):1518-1525.Zhu Tantan, Jing Hongwen, Su Haijian, et al, 2015.Experimental investigation on mechanical behavior of sandstone with coupling effects under uniaxial compression[J].Journal of China Coal Society,40(7):1518-1525.

左江江,李臣林,腾俊洋,等,2018.充填物对含孔洞大理岩力学特性影响规律试验研究[J].工程科学学报,40(7):776-782.Zuo Jiangjiang, Li Chenlin, Teng Junyang, et al, 2018.Experimental study of the influence of the filling material on the mechanical properties of marble with holes[J].Journal of University of Science and Technology Beijing,40(7):776-782.

Study on the Influence of Crack Filling on the Mechanical Properties and Failure Characteristics of Composite Defect Sandstone

LI Junkang[1], YI Yanglai[1], GAO Jian[1], BAI Yonghong[1], HUANG Yiyao[2], TAN Tao[2], ZHANG Chunyang[2]

1.*Hunan Baoshan Nonferrous Metals Mining Co., Ltd., Chenzhou* 424400, *Hunan, China*;

2.*School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *Hubei, China*

Abstract: This study investigates the mechanical properties and failure characteristics of grouting-filled fractured rock masses by examining the influence of fissure inclination, circular hole radius, and filling conditions on the mechanical behavior and strain field evolution of specimens with combined defects. This is achieved through uniaxial compression tests and the application of digital image correlation(DIC) technology. The findings reveal that the peak stress and crack initiation stress of filled specimens are significantly greater than those of unfilled specimens. For both specimen types, peak strength and crack initiation stress increase with fissure inclination angle, while they exhibit no significant dependence on the circular hole radius. The evolution of the principal strain of cracks is independent of fissure size and inclination, correlating instead with the mechanical behavior of the rock at various damage stages. This provides a foundation for determining the characteristic stresses of fractured rock. In specimens without filling, strain localization zones during the elastic phase initially form around the combined defects and progressively migrate toward the defect tips. In contrast, in cement-filled specimens, the maximum strain remains concentrated within the filling zone for a prolonged duration, only transitioning to the defect tips following the fracture of the filling material. Based on the mechanisms and locations of initiation, the crack initiation modes in specimens with combined defects can be classified into four distinct categories. Additionally, the failure patterns, determined by the formation and coalescence of secondary cracks, are categorized into three types of tension-shear composite failure modes. Importantly, both the crack initiation and failure modes are predominantly influenced by the fissure inclination angle, with no significant correlation to the radius of the circular hole or the filling conditions.

Key words: fractured rock mass; digital image technology; composite defects; crack filling; mechanical properties; failure characteristics