

# 含不同数量和间距平行裂隙岩体裂纹 扩展及强度特征研究

庄巍<sup>1,2</sup>, 钟禹文<sup>1</sup>, 冯明杰<sup>1</sup>, 张春雷<sup>1</sup>, 钱荣<sup>1</sup>

(1. 淮阴工学院, 江苏 淮安 223001; 2. 正军项目管理集团有限公司, 江苏 淮安 223010)

**摘要:** 为探究平行裂隙数量和间距对岩体力学特征的影响,以含裂隙岩石试样为研究对象,通过建立 RFPA 数值模型,探究平行裂隙数目、裂隙间距对裂隙岩体裂纹扩展和强度特征的影响规律。结果表明:无论平行裂隙间距大小,随着裂隙数量的增加,含平行裂隙岩体的闭合应力、起裂应力、损伤应力、峰值应力以及试样达到特征应力值对应的应变值均逐渐减小,间距 7 mm 时,裂隙数量从 4 增加到 7 时,试样整体强度降低 44.3%;裂隙数量不变,随着裂隙间距的增加,裂隙岩体强度减小,试样破坏模式由拉-剪混合破坏转为剪切破坏,裂隙数量为 3 时,间距从 5 mm 增加到 7 mm,试样整体强度降低 43.2%,说明裂隙分布范围对岩体强度和破坏模式有显著影响。

**关键词:** 平行裂隙; 裂隙扩展; 强度; 间距

**中图分类号:** TU452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2025)06-0170-07

## Research on Crack Propagation and Strength Characteristic of Rock Mass with Different Number and Spacing Parallel Cracks

ZHUANG Wei<sup>1,2</sup>, ZHONG Yuwen<sup>1</sup>, FENG Mingjie<sup>1</sup>, ZHANG Chunlei<sup>1</sup>, QIAN Rong<sup>1</sup>

(1. Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223001, China;

2. Zhengjun Project Management Group Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223010, China)

**Abstract:** This work aims to investigate the influence of the number and spacing of parallel cracks on the mechanical characteristics of rock masses. It focuses on cracked rock as the research object and employs the Rock Failure Process Analysis (RFPA) numerical model to explore the laws governing the crack propagation and strength characteristics of cracked rock masses under varying numbers and spacings of parallel cracks. The results indicate that regardless of the crack spacing, an increase in the number of parallel cracks leads to a gradual reduction in the closure stress, initiation stress, damage stress, peak stress, and corresponding strain values at characteristic stress levels in the cracked rock mass, when the spacing is 7 mm, the strength decreases by 44.3% as the number of cracks increases from 4 to 7. Conversely, when the number of cracks remains constant, an increase in crack spacing results in a decrease in the strength of the rock mass, the failure mode of the specimen transitions from combined tensile-shear failure to shear failure, when the number of cracks is 3, the overall strength of the sample decreases by 43.2% as the spacing increases from 5 mm to 7 mm, highlighting the impact of the crack distribution range on the overall strength and failure mode.

**Keywords:** parallel cracks; crack propagation; strength; crack evolution; spacing

当前我国正在推进铁路、公路、水电、深地工程等重大工程建设,这些工程建设中不可避免的要开

挖各类岩体。岩体主要由岩块和岩块之间的结构面(节理、裂隙、断层等)组成,大量工程实践表明,岩

体的稳定性与结构面的几何分布、尺寸等密切相关,岩体内部节理、微裂隙等结构面的扩展和贯通是导致其强度劣化和破坏失稳的主要原因之一。因而深入探究岩体内部结构面扩展规律及其强度、变形特征对岩体加固和工程建设具有极其重要的理论价值和实践意义。

平行裂隙是真实工程岩体中裂隙存在的主要形式之一,目前,国内外学者在岩体裂隙起裂和扩展方面做了大量的研究。在岩体单一裂隙起裂及扩展方面:Brace 等<sup>[1]</sup>最早研究了含单一裂隙脆性岩石的裂隙起裂行为,发现起裂方向偏离原裂隙面 70°左右;Bombolakis 等<sup>[2]</sup>对含预置裂隙试件开展单轴压缩试验,得到了张拉型翼裂纹;李银平等<sup>[3]</sup>通过含单一裂隙大理岩进行单轴压缩试验,发现翼裂纹起裂角约为 52°~68°;林鹏等<sup>[4]</sup>对含单一裂隙的花岗岩试件进行分析,明确了其裂隙扩展过程与破坏模式,同时建立了上述指标同裂隙角度的联系;蒲成志等<sup>[5]</sup>将单轴压缩试验和数值模拟结合,探究含水平单裂缝类岩石材料的破坏机制。在含多裂隙岩体裂隙起裂、扩展及贯通对岩体力学性能影响方面,Wong 等<sup>[6]</sup>含 3 条平行裂隙试件,分析总结了其裂隙起裂、扩展及贯通规律;Park 等<sup>[7]</sup>则对含 3 条平行预置裂隙石膏试件进行压缩试验,阐明了翼裂纹、二次裂隙的出现规律及裂隙连通规律;黎立云等<sup>[8]</sup>通过对含平行多裂隙的类岩石试件进行双轴加载试验,结果表明,多裂隙倾角接近 45°时试件强度处于最低值;陈卫忠等<sup>[9]</sup>则探究了含 2 条平行裂隙岩体在单双轴作用下裂隙扩展与贯通规律;张波等<sup>[10]</sup>通过类岩石材料探究了主、次裂隙角度变化对交叉裂隙岩体破坏模式及力学性能的影响;Zhou 等<sup>[11]</sup>在含预制多裂隙的类岩石材料的单轴压缩试验中,发现了不同类型的裂纹扩展模式;文怀宇等<sup>[12]</sup>通过单轴压缩试验和 PFC2D 数值模拟方法,研究了预制平行双裂隙类岩石材料在单轴压缩条件下的裂纹扩展规律及其影响因素;张晗等<sup>[13]</sup>采用颗粒程序模拟含平行双裂隙石膏试样的单轴压缩试验,对双预制裂隙在不同相对位置时试样内出现的裂纹贯通模式进行了分类。

以上关于含裂隙岩体试样力学特性的研究,多是针对裂隙数目较少(一般少于 3 条)的情况,对位于沿试样中心分布的平行双裂隙研究较少,关于含平行裂隙岩体在不同间距以及数量下的力学特性研究更少,还需要进一步的探究和完善。因此,本文运用 RFPA 数值模拟软件,开展单轴压缩模拟,综合考

虑裂隙的间距、数量对岩体强度的影响,通过数值计算软件所得数据,探究含不同数量及间距平行裂隙岩体裂纹扩展及强度特征。

### 1 模拟方案设计

谢和平等<sup>[14]</sup>基于断裂力学理论计算获得节理面摩擦系数 $f=0$ 时,45°倾角节理最易断裂的结论,而目前已有大量学者对 45°裂隙进行研究,因此本研究只选取平行裂隙与水平倾角为 60°时开展研究。试样模型的几何尺寸均为长 100 mm,宽 50 mm,裂隙的长度为 30 mm,裂隙均匀分布在试样中部,模型示意图如图 1 所示。裂纹面摩擦系数取 0.1,以裂纹数目 $n$ 和裂隙间距 $d$ 为变量,使用摩尔库仑条件进行强度计算,并使用平面-变形的模式,在全荷载的全过程中,以位移的形式进行计算,并在每个阶段施加位移量 $\Delta s=0.002$  mm。为便于叙述,以“ $d \times n$ ”的形式对裂隙试样编号,如“ $d5n3$ ”代表的就是“含间距为 5 mm 的 3 条裂隙”。裂隙布置方案见表 1。

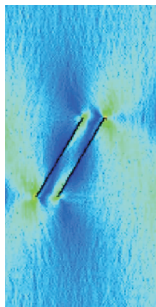


图 1 模型示意图

表 1 裂隙布置方案

| 裂隙间距 $d/\text{mm}$ |   | 裂隙数量 $n/\text{条}$ |   |   |   |   |   |   |
|--------------------|---|-------------------|---|---|---|---|---|---|
|                    |   | 1                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 5                  | 1 | 2                 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |   |
| 7                  | 1 | 2                 | 3 | 4 | 5 | — | — | — |
| 9                  | 1 | 2                 | 3 | — | — | — | — | — |
| 11                 | 1 | 2                 | 3 | — | — | — | — | — |

以某区域含裂隙砂岩为研究对象,根据完整砂岩岩石试样室内单轴压缩试验结果,通过试错法对细观参数进行了反复调试和校核,最终得出了一组与室内试验结果基本吻合的模拟应力-应变曲线,其对应的模型细观参数见表 2。

表 2 模型细观物理力学参数

| 均值<br>度 | 单轴抗压<br>强度/MPa | 弹性模量<br>/GPa | 摩擦角<br>/(°) | 泊松<br>比 | 密度<br>/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |
|---------|----------------|--------------|-------------|---------|--------------------------------------------|
| 4       | 105.2          | 42.2         | 51          | 0.28    | 2800                                       |

2 平行裂隙岩体的特征应力值的确定

岩体强度特征主要是通过岩石试样的特征应力来描述的,特征应力又可分为裂纹闭合应力 $\sigma_{cc}$ 、起裂应力 $\sigma_{ci}$ 、损伤应力 $\sigma_{cd}$ 和峰值应力 $\sigma_c$ ,这是因为岩石的力学特性是随着其破裂发展过程而变化的,具体过程如图 2 所示。由图 2 可以看出,4 个特征应力按照顺序分别出现在第 I、II、III、IV 阶段的末尾(即轴向应力 $\sigma_1$ 与特征应力相等时所对应的应变值 $\varepsilon$ ),并将应力-应变曲线划分成了 5 个阶段。第 I 阶段为岩石的孔隙裂隙压密阶段,应力-应变曲线呈现下凹型,自加载起,岩石内部原有的孔隙裂隙会逐渐闭合,直至轴向应力 $\sigma_1$ 等于裂纹闭合应力 $\sigma_{cc}$ ,该阶段整个加载过程不会有任何新的裂隙产生;第 II 阶段为岩石的弹性变形阶段,应力-应变曲线呈近似直线,孔隙裂隙被进一步压实,在轴向应力 $\sigma_1$ 尚未达到起裂应力 $\sigma_{ci}$ 时,若卸载岩石仍可以恢复原来的形态;第 III 阶段为岩石的裂隙稳定发育阶段,由于轴向应力 $\sigma_1$ 已经超过了起裂应力 $\sigma_{ci}$ ,岩石内部开始产生新的裂隙,但这些新裂隙仍在可控的情形下发展,即卸去荷载岩石将回归稳定的状态;第 IV 阶段为岩石的裂隙非稳定发育阶段,自轴向应力 $\sigma_1$ 达到损伤应力 $\sigma_{cd}$ 起,岩石内部的裂隙开始前一阶段产生的裂隙交汇,裂隙发育失控,岩石体积开始膨胀,直至岩石破坏(即轴向应力 $\sigma_1$ 达到峰值应力

$\sigma_c$ ),此阶段即使卸去荷载岩石内部裂隙仍会继续发育;第 V 阶段为岩石的峰后阶段,该阶段为加压荷载超过岩石的承载能力(即峰值应力 $\sigma_c$ 大于轴向应力 $\sigma_1$ )后岩石发生整体破坏后的阶段,根据峰后曲线可以进一步分析岩石的破坏形式,若峰后曲线较为陡峭则岩石主要表现为脆性破坏,若峰后曲线较为缓和则岩石主要表现为塑性破坏。

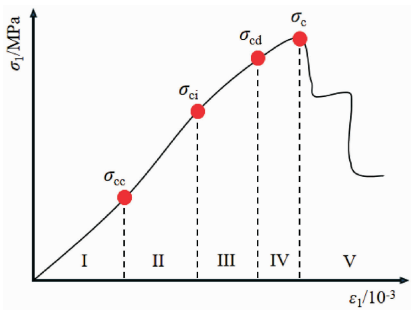


图 2 裂隙岩体应力应变曲线及特征应力示意图

本文采用“试验数据+轴向应变刚度”联合的方法<sup>[15]</sup>确定裂纹闭合应力 $\sigma_{cc}$ 、起裂应力 $\sigma_{ci}$ ,表 3 列出了含不同平行裂隙数量和间距岩体的特征应力值。通过声发射特征参数的演化特征确定了损伤应力 $\sigma_{cd}$ ,随着轴向应力的增加,声发射累积计数曲线可分为三个阶段:缓慢增加阶段、稳定阶段和急剧增加阶段,其中急剧增加阶段开始的点为损伤应力点<sup>[16]</sup>。

表 3 含平行裂隙岩体的特征应力值

| 试样编号  | 闭合应力                  |                          | 起裂应力                  |                          | 损伤应力                  |                          | 峰值应力                  |                       |
|-------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
|       | $\varepsilon/10^{-2}$ | $\sigma_{ci}/\text{MPa}$ | $\varepsilon/10^{-2}$ | $\sigma_{cc}/\text{MPa}$ | $\varepsilon/10^{-2}$ | $\sigma_{cd}/\text{MPa}$ | $\varepsilon/10^{-2}$ | $\sigma_c/\text{MPa}$ |
| d5n1  | 0.020                 | 6.489                    | 0.040                 | 13.305                   | 0.050                 | 15.669                   | 0.066                 | 18.579                |
| d5n2  | 0.018                 | 5.327                    | 0.038                 | 11.592                   | 0.050                 | 14.733                   | 0.058                 | 16.207                |
| d5n3  | 0.016                 | 4.244                    | 0.034                 | 9.186                    | 0.048                 | 12.503                   | 0.054                 | 13.560                |
| d5n4  | 0.016                 | 3.748                    | 0.038                 | 7.178                    | 0.046                 | 10.085                   | 0.060                 | 11.351                |
| d5n5  | 0.014                 | 2.738                    | 0.030                 | 5.996                    | 0.042                 | 7.120                    | 0.074                 | 8.297                 |
| d5n6  | 0.014                 | 2.135                    | 0.026                 | 3.988                    | 0.040                 | 5.433                    | 0.078                 | 5.659                 |
| d5n7  | 0.012                 | 1.261                    | 0.026                 | 2.885                    | 0.032                 | 3.308                    | 0.038                 | 3.550                 |
| d7n2  | 0.016                 | 4.553                    | 0.038                 | 11.087                   | 0.046                 | 13.147                   | 0.058                 | 15.384                |
| d7n3  | 0.014                 | 3.406                    | 0.032                 | 8.052                    | 0.042                 | 9.908                    | 0.052                 | 10.568                |
| d7n4  | 0.014                 | 2.768                    | 0.028                 | 5.611                    | 0.038                 | 6.959                    | 0.048                 | 8.110                 |
| d7n5  | 0.014                 | 2.028                    | 0.026                 | 3.765                    | 0.032                 | 4.176                    | 0.040                 | 4.518                 |
| d9n2  | 0.016                 | 4.441                    | 0.036                 | 10.387                   | 0.048                 | 13.130                   | 0.058                 | 15.188                |
| d9n3  | 0.018                 | 4.240                    | 0.034                 | 7.861                    | 0.040                 | 8.648                    | 0.056                 | 9.282                 |
| d11n2 | 0.016                 | 4.354                    | 0.036                 | 10.074                   | 0.052                 | 13.537                   | 0.064                 | 15.416                |
| d11n3 | 0.014                 | 3.011                    | 0.032                 | 6.864                    | 0.036                 | 7.456                    | 0.040                 | 7.705                 |

### 3 含同间距不同数量平行裂隙岩体裂纹扩展及强度特征分析

图 3 给出了裂隙间距为 7 mm 时含不同数量裂隙岩体的剪应力演化云图,因篇幅限制,仅展示  $n = 2, 3, 4, 5$  时的演化云图。step 代表加载步数,每一步代表一个位移加载量  $\Delta s$ ,通过四组图片对比可以观察到: $n = 2$  时:两条裂隙中的裂缝的扩展几乎是在同一时间发生的,左侧裂隙上端产生向上扩展的裂纹,右侧裂隙下端产生向下扩展的裂纹,并逐步发展主裂纹,左边裂隙上端裂纹扩展方向与垂直方向大概呈  $15^\circ$  夹角,右侧裂隙下端随着裂纹的扩展逐渐平行于试件轴向扩展。主裂纹扩展不久后,当  $\text{step} = 14$  时,沿着两条主裂隙又产生了相向扩展的次生裂纹,并随着次生裂纹的扩展两条裂隙不断靠近并最终贯通,当  $\text{step} = 26$  时,两条裂隙已经贯通。随着应力的不断增大,当  $\text{step} = 29$  时,两条裂隙在发生主裂纹的另一端也产生次生裂纹,左侧次生裂纹沿下方偏左  $30^\circ$  扩展,右侧次生裂纹沿下方偏右  $30^\circ$  扩展,和主扩展裂纹一样不断扩展,最终使岩体

产生宏观破坏,根据宏观破坏面可以看到处于上方的主扩展裂纹作用较大。当  $n = 3, 4, 5$  时:都是外侧两端的裂隙发生主扩展裂纹,最左侧的裂隙上端产生向上扩展的裂纹,最右侧的裂隙下端产生向下扩展的裂纹,与含两条裂隙的情况基本相同,到后面基本将岩体整体覆盖。分别在  $\text{step} = 12, 14, 13$  时,两条裂隙之间开始产生次生裂纹,不断扩展,当  $\text{step} = 21, 22, 20$  时,各条平行裂隙之间的岩桥基本贯通。而当  $\text{step} = 17, 13, 14$  时,两条裂隙的另一端产生次生裂纹。当裂隙数量为 3 时,左侧次生裂纹沿上方偏左  $30^\circ$  扩展,右侧次生裂纹沿下方偏右  $30^\circ$  扩展。当裂隙数量为 4 和 5 时,因为数量较多,布置的裂隙左侧距边界较近,所以左侧次生裂纹扩展分支较多,右侧次生裂纹依然沿下方偏右  $30^\circ$  扩展。而且从主扩展裂纹中也不断萌生分支裂纹,主裂纹也在不断扩大,最终使岩体产生宏观破坏。裂纹数量较少时,左侧裂纹主裂纹的扩展对试样的整体强度影响较大,随着裂隙数量的增加,最左侧裂隙上端和最右侧裂隙下端所产生的主裂纹控制着岩体强度,中间裂纹的相互扩展和贯通加快了裂纹的破坏。

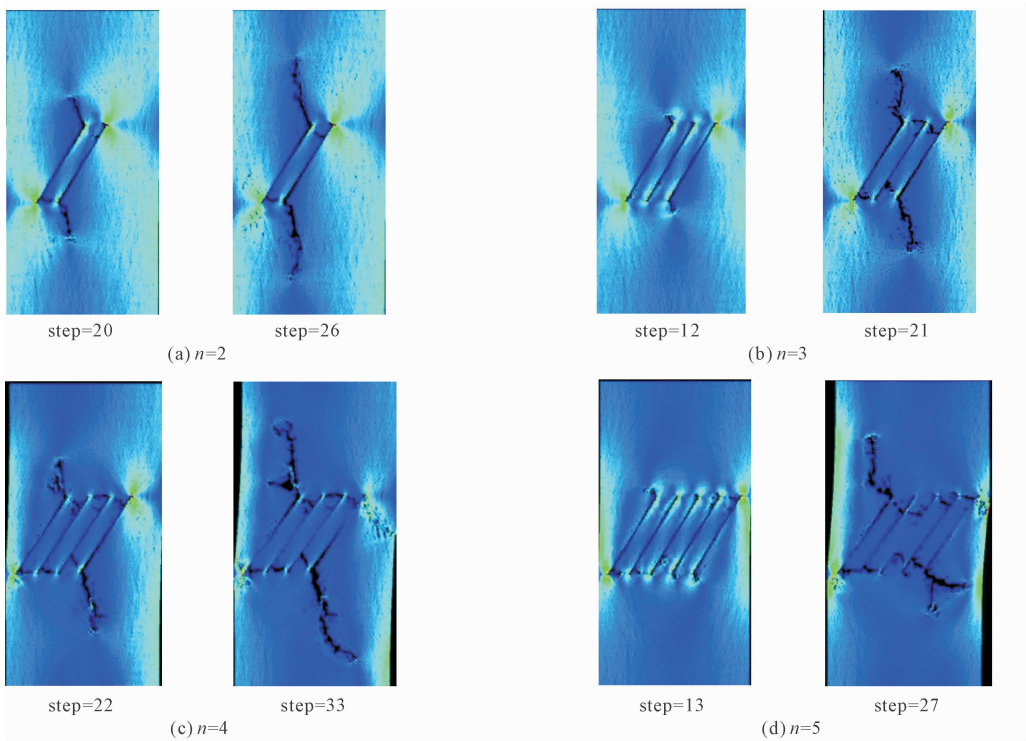


图 3  $d = 7\text{ mm}$  时剪应力演化过程云图

综合上述分析,各组含平行裂隙的岩石试样破坏过程是相似的,其裂纹围绕着裂隙尖端产生并进一步扩展,随着加载步数的增加,裂纹从裂缝的端部

开始出现,主裂纹基本沿着轴向方向扩展,越靠近边界逐渐倾斜,最后贯穿试样形成一个断裂的面,从而造成试样的损坏。并且各组试样次生裂纹产生的时

间基本相近,在  $\text{step} = 12 \sim 14$  之间,除含两条裂隙岩体裂隙间贯通速度较慢外,其他三组时间也相近,表明裂纹数量越多,裂纹尖端更易扩展贯通。

含有不同数量平行裂隙岩体的应力-应变关系如图 4 所示,所有曲线的走向趋势基本是相同的,岩石强度和变形的数值差异显著表明了裂隙的数量对试样强度和变形特征的影响。从图 4 可以看出:对于含有不同数目的裂缝的岩石,在初始的加载阶段,其应力-应变曲线基本是上升的,而在应力到达极限的时候,就会开始降低,下降至一定程度时,基本趋于稳定。当裂隙数量为 5 时,岩石试样峰值强度最低,可以说峰值强度随着裂隙数量的减小而增大。结合表 3 可以看出:除孔隙裂隙压密阶段的 4 个阶段开始的时间均随着裂隙数量的增多,基本呈现下降的趋势;压密阶段总的轴向应变随着裂隙数量的增加,其并没有显著差别;弹性变形阶段总的轴向应变随着裂隙数量的增加而减小;裂纹稳定扩展阶段总的轴向应变的变化先增长再减小;裂纹不稳定扩展阶段总的轴向应变随着裂隙数量的增加而减小;峰后破坏阶段总的轴向应变随着裂隙数量的增加而增大。

岩石试样峰值强度与裂隙数量之间的关系如图 5 所示,由图 5 可以看出,在单轴压缩条件下,随着裂隙数量的增多,含平行裂隙岩石试样峰值强度和峰值应变都呈现减小的趋势。当平行裂隙数量为 5 时,岩石试样峰值强度和峰值应变最低。当裂隙数量从 3 到 4 之间,减小幅度最小,为 23%,当裂隙数量为 4 增加到 5 之间减小幅度最大,为 44.3%。

试样各特征应力随裂隙数量的变化如图 6 所示。由图 6 可以看出:随着裂隙数量的增大,各特征应力  $\sigma_{ci}$ 、 $\sigma_{cc}$ 、 $\sigma_{cd}$ 、 $\sigma_c$  全都在减小,闭合应力减小的幅度最小,峰值应力减小幅度最大。

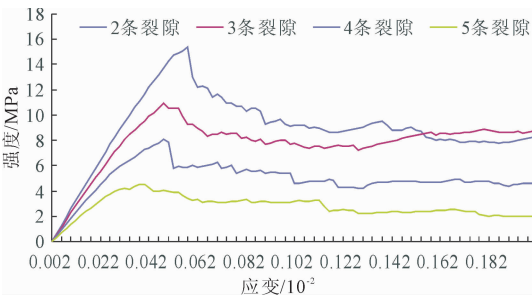


图 4  $d = 7 \text{ mm}$  时岩体应力-应变曲线

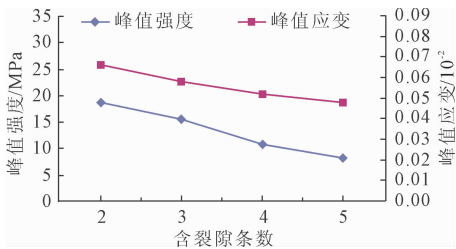


图 5  $d = 7 \text{ mm}$  时岩体峰值强度和峰值应变曲线

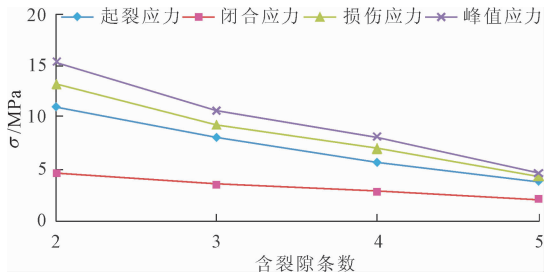


图 6  $d = 7 \text{ mm}$  时应力阈值曲线

#### 4 含同数量不同间距平行裂隙岩体裂纹扩展及强度特征分析

图 7 给出了裂隙数量为 3 时不同间距的岩体的剪应力演化图(部分图)。通过四组图片的对比可以发现,各组不同间距含平行裂隙的岩石试样破坏过程也基本是相似的,其裂纹围绕着裂隙尖端产生并进一步扩展,随着加载步数的增加,裂纹扩展基本在轴向方向扩展,靠近边界时发生转弯,逐渐倾斜。

各组裂隙的情况也是基本相同,也都是最左侧的裂隙上端产生向上扩展的裂纹,最右侧的裂隙下端产生向下扩展的裂纹,到后面基本将岩体整体覆盖。在主裂纹扩展开始不久后,分别在  $\text{step} = 18$ 、 $\text{step} = 12$ 、 $\text{step} = 14$ 、 $\text{step} = 10$  时,各条裂隙产生次生裂纹,并不断扩展,在  $\text{step} = 35$ 、 $\text{step} = 21$ 、 $\text{step} = 23$ 、 $\text{step} = 22$  时,各条平行裂隙之间的岩桥基本贯通。而当  $\text{step} = 17$ 、 $\text{step} = 17$ 、 $\text{step} = 13$ 、 $\text{step} = 14$  时,各条裂隙产生次生裂纹。裂隙间距为 5 mm 和 9 mm 时,左侧次生裂纹沿下方偏左  $30^\circ$  扩展,右侧次生裂纹沿上方偏右  $60^\circ$  扩展。裂隙间距为 7 mm 和 11 mm 时,左侧次生裂纹沿下方偏左  $30^\circ$  扩展,右侧次生裂纹沿下方偏右  $30^\circ$  扩展。而且从主扩展裂纹中也不断萌生分支裂纹,同时主裂纹不断扩大,最终使岩体产生宏观破坏。当裂隙间距为 5 mm、7 mm 时,裂隙间应力叠加效应较为显著,促进裂隙尖端翼裂纹(主裂纹)萌生和扩展,裂隙间次生裂纹贯穿速度较快,翼裂纹优先沿最大主应力方向(垂直载荷)扩展,并

连接相邻裂隙,形成宏观剪切带,翼裂纹在峰值强度前完成相邻裂隙连接,形成单一贯穿裂纹,属于拉伸-剪切混合破坏模式。随着裂隙间距增大,当裂隙间距为 9 mm、11 mm 时,裂隙间应力场独立性增强,

主压应力集中区出现局部化特征,翼裂纹单独扩展至一定长度后停滞,次生裂纹在中部逐渐扩展并跨越岩桥贯通,属于压-剪破坏模式。

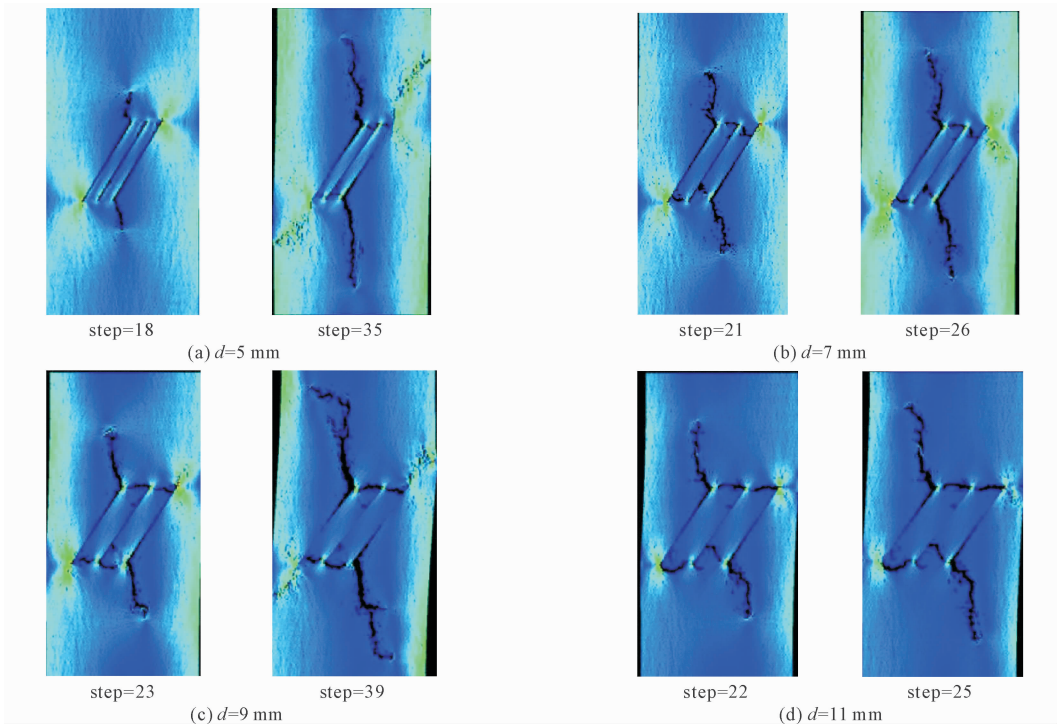


图 7  $n=3$  时剪应力演化过程云图

图 8 为含有不同间距平行裂隙岩体的应力-应变关系,由图 8 可以看出:对于含有不同间距裂隙的岩体,在初始的加载阶段,其应力-应变曲线也是上升的,而在应力到达极限的时候,就会开始降低,下降至一定程度时,出现轻微回弹,曲线呈现上升趋势,上升的幅度很小。裂隙间距为 11 mm 时,岩石试样峰值强度最低,可以说明峰值强度随着裂隙间距的减小而增大。结合表 3 可以看出:弹性变形阶段、裂纹稳定扩展阶段开始时间相近;而裂纹不稳定扩展阶段开始时间随着裂隙数量的增多而下降;而峰后破坏阶段开始的时间在裂隙间距为 5 mm~9 mm 时相差不大,到间距为 11 mm 时,减小幅度较大。压密阶段总的轴向应变随着裂隙间距的增加依然没有明显差别;弹性变形阶段总的轴向应变也没有明显差别;裂纹稳定扩展阶段总的轴向应变随着裂隙间距增长而减小;裂纹不稳定扩展阶段总的轴向应变随着裂隙间距增加先增长后再减小;峰后破坏阶段总的轴向应变随着裂隙间距的增加而增大。

岩石试样峰值强度与裂隙间距之间的关系如图 9 所示,由图 9 可以看出,随着裂隙间距的增大,含平行裂隙岩石试样峰值强度逐渐减小;在裂隙间距为 9 mm 时,峰值应变突然增大,除此之外峰值应变

整体上也是逐渐减小的。含平行裂隙间距为 5 mm 时,岩石试样峰值强度最大。含平行裂隙间距从 7 mm 到 9 mm 之间,减小幅度最小,为 12.2%,含平行裂隙间距为 5 mm 到 7 mm 之间减小幅度最大,为 22.1%,间距从 5 mm 到 7 mm,试样整体强度降低 43.2%。

试样各特征应力随裂隙间距的变化如图 10 所示。由图 10 可以看出:随着裂隙间距的增加,各特征应力  $\sigma_{ci}$ 、 $\sigma_{cc}$ 、 $\sigma_{cd}$ 、 $\sigma_c$  也基本呈现减小的趋势。闭合应力随裂隙间距的变化较为曲折,其先减小后增大再减小后又增大,起裂应力减小的幅度最小,峰值应力减小幅度最大。

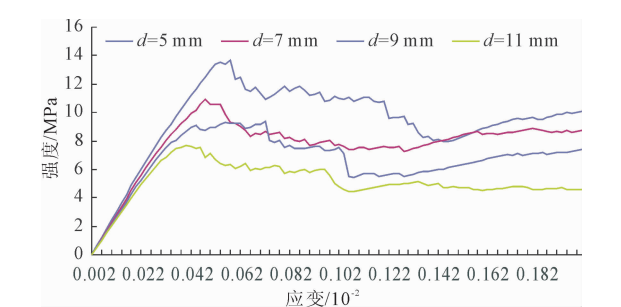


图 8  $n=3$  时岩体应力-应变曲线

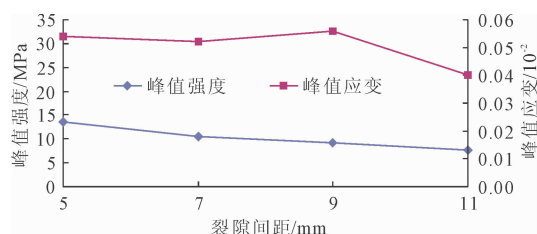


图9  $n=3$  时岩体峰值强度和峰值应变曲线

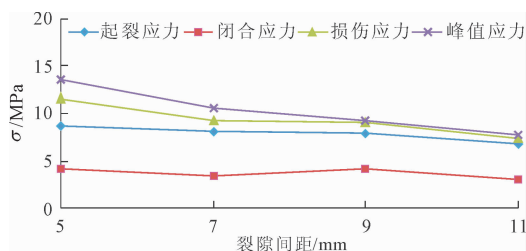


图10  $n=3$  时应力阈值曲线

## 5 结 论

本文基于 RFPA 数值模拟软件模拟了含不同数量和不同间距平行裂隙岩体的裂纹扩展规律和强度特征,并进行了对比分析,主要得到以下结论:

(1) 随轴向应变增大,所有不同工况的岩体内部裂纹演化规律基本一致,先无微裂纹产生,随后缓慢增长,进而快速增长,最后趋于稳定;裂纹的产生与发展均从裂缝的顶端开始,裂纹主要是沿着加载荷载的方向扩展,靠近边界时逐渐倾斜。

(2) 在单轴压缩情况下,含裂隙数量相同时,裂隙间距越大,岩石试样峰值强度越低,试样破坏模式随裂隙间距增大由拉-剪混合破坏转为剪切破坏;裂隙间距相同时,含裂隙数量越多,岩石试样峰值强度也越低。

(3) 试样各特征应力随裂隙间距、数量的均呈现减小的趋势。含裂隙数量相同时,裂隙间距越大,劣化程度越大;裂隙间距相同时,裂隙数量增多加快中间裂纹贯通,进而加快试样破坏。

(4) 含平行裂隙岩石试件的裂纹萌生和扩展围绕裂隙尖端展开。对于含相同数量不同间距裂隙岩石试件,裂隙间距较小时,裂隙间应力叠加效应显著,促进裂隙尖端翼裂纹萌生。

## 参考文献:

[1] Brzce W, Byerlee J. Recent experimental studies of brittle fracture rocks [C]// Proceedings of the Eighth Symposium on Rock Mechanics. New York: AJME, 1967: 57-81.

[2] Bombolakis E G. Photoelastic stress analysis of crack propagation within a compressive stress field [D]. Cambridge: MIT, 1963: 36-38.

[3] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 120-124.

[4] 林 鹏, 黄凯珠, 王仁坤, 等. 不同角度单裂纹缺陷试样的裂纹扩展与破坏行为 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5652-5657.

[5] 蒲成志, 曹 平, 陈 瑜, 等. 不同裂隙相对张开度下类岩体材料断裂试验与破坏机理 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2011, 42(8): 2394-2399.

[6] Wong R H C, Chau K T, Tang C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-part I: experimental approach [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 909-924.

[7] Park C H, Bobet A. Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(14): 2727-2748.

[8] 黎立云, 刘大安, 史孝群, 等. 多裂纹类岩体的双压实验与正交各向异性本构关系 [J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 165-170.

[9] 陈卫忠, 李术才, 朱维申, 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.

[10] 张 波, 李术才, 杨学英, 等. 含交叉裂隙岩体相似材料试件力学性能单轴压缩试验 [J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3674-3679.

[11] Zhou Xiaoping, Cheng Hao, Feng Y F. An experimental study of crack coalescence behaviour in rock-like materials containing multiple flaws under uniaxial compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47: 1961-1986.

[12] 文怀宇. 单轴压缩下预制平行双裂隙类岩石材料的裂纹优势扩展研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.

[13] 张 晗, 张晓平, 张 旗, 等. 含双裂隙试样裂纹贯通细观机理研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(3): 968-980.

[14] 任 利, 谢和平, 谢凌志, 等. 基于断裂力学的裂隙岩体强度分析初探 [J]. 工程力学, 2013, 30(2): 156-162.

[15] 高美奔, 李天斌, 孟陆波, 等. 岩石变形破坏各阶段强度特征值确定方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3577-3588.

[16] Wu Chen, Gong Fengqiang, Luo Yong. A new quantitative method to identify the crack damage stress of rock using AE detection parameters [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 519-531.