

循环荷载下双裂隙砂岩弹性模量及裂纹动态演化

王述红, 庄贤鹏, 王菲, 赵乾百
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为研究不同岩桥倾角砂岩在循环荷载作用下的弹性模量变化和裂纹动态演化规律, 对裂隙倾角固定为 45° , 岩桥倾角分别为 $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ$ 的砂岩试件开展了单轴循环加、卸载试验和PFC^{2D}模拟。结果表明, 不同裂隙砂岩的弹性模量随循环荷载作用得到了明显的强化; 在循环荷载作用下, 应力-应变曲线与离散元模拟得到的试件瞬时微裂纹演化曲线存在对应关系; 岩桥倾角对砂岩的破坏模式有影响, PFC^{2D}模拟的裂纹动态演化可以合理地反映岩石中裂纹的萌生位置、扩展方向。基于微裂纹数目所定义的损伤与破坏模式很好地对应, 岩桥倾角为 45° 时原始损伤是最大的。

关键词: 双裂隙砂岩; 循环荷载; 弹性模量; 应力-应变曲线; PFC^{2D}; 破坏模式; 损伤变量
中图分类号: P 642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2024)03-0361-11

Elastic Modulus and Dynamic Evolution of Fracture in Double-Fractured Sandstone Under Cyclic Loading

WANG Shu-hong, ZHUANG Xian-peng, WANG Fei, ZHAO Qian-bai

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: shwangneu@126.com)

Abstract: In order to study the changes in elastic modulus and the dynamic evolution of cracks in sandstones with different inclination angles of rock bridges under cyclic loading, uniaxial cyclic loading and unloading tests, along with PFC^{2D} simulations were carried out on sandstone specimens with rock bridge inclination angles of $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ and 105° when the fissure inclination angle was fixed at 45° . The results show that a significant strengthening of the elastic modulus of sandstone with different fissures due to cyclic loading. There is a correlation between the stress-strain curve and the instantaneous microcrack evolution curve of specimens obtained from discrete element simulation under cyclic loading. The rock bridge inclination angle has an influence on the damage mode of sandstone, and the dynamic crack evolution in the PFC^{2D} simulation can reasonably reflect the initiation location and growth direction of cracks in the rock. The damage defined based on the number of microcracks, corresponds well to the damage pattern, with the maximum original damage at a rock bridge inclination angle of 45° .

Key words: double-fractured sandstone; cyclic loading; elastic modulus; stress-strain curve; PFC^{2D}; failure mode; damage variables

岩石是具有微小节理裂缝等天然缺陷的原始材料, 这些固有结构面的存在影响着相关裂纹的形成和积累, 使得岩石的力学性质和破坏模式变得多样且复杂, 相应的理论研究与工程问题的解决也变得困难^[1-3]。裂隙岩石在钻机机械等循环

荷载反复作用下的力学性质变化、裂纹扩展及最终如何破坏对于工程中的稳定性控制具有重要的意义。因此, 针对预制裂隙岩石的力学性质、裂纹动态演化及最终破坏模式展开研究十分有必要。近年来, 针对原位试验开展的不利条件, 国内

收稿日期: 2022-10-06

基金项目: 中国-中东欧国家高校联合教育项目(2021111); 国家外国专家项目(DL2021128001L); 国家自然科学基金资助项目(U1602232); 辽宁省重点科技计划项目(2019JH2-10100035); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2101018, N180701005)。

作者简介: 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师。

外学者围绕预制裂隙岩石的力学性质和裂纹扩展行为展开了大量的室内试验研究.Sun等^[4]通过对不同形状(方形和矩形)和不同材料(各向异性页岩和各向同性砂岩)的双裂纹试件进行单轴压缩试验,总结了正交各向异性页岩试样的起裂尖端、起裂角度和起裂机理的试验结果,验证了新的多裂纹萌生准则的有效性;Cao等^[5]通过加载带有2个和3个预先存在缺陷的类岩石试样进行研究,分析了3个裂隙相较于2个裂隙对裂纹扩展过程的影响,试验表明多裂纹相互作用会导致岩体宏观力学性质的不断退化;Tang等^[6]通过对冻融循环的预裂类岩石材料进行单轴加载试验,结果表明,霜裂(冻融后的裂隙)倾向于沿最大主应力方向扩展,初始裂缝的位置、方向和偏移量,以及裂缝间完整岩石桥的方向,对2条霜裂之间的相互作用效应应有显著影响.然而,关于循环荷载作用下裂隙岩石力学性质及裂纹动态演化的研究较少.

声发射(acoustic emission, AE)因其可以实时跟踪检测岩石中微裂纹的产生和扩展的特点而受到广泛运用.Wang等^[7]利用AE定位技术研究了单轴压缩条件下不同裂纹倾角预制岩样的声发射特征、裂纹动态扩展过程及其损伤断裂演化规律,得到了裂纹角为 45° 的岩石样品的初始损伤和损伤率是最大的;CT技术在岩石无损探测方面有着不可比拟的优点,王宇等^[8]采用声发射检测系统辅以CT扫描后处理相结合的手段,通过对裂隙倾角为 50° 的矿山岩石进行了增幅循环加载试验,结果表明裂隙岩石的声发射响应与裂纹扩展行为受控于加载频率;然而,AE技术对检测对象的材料性质非常敏感,受到外界各种因素的影响时检测到的声发射信号往往与实际有较大差别,CT扫描则无法实时监测岩石内部裂纹的变化,此时数值模拟方法为岩石力学领域的研究提供了新思路.

本文在室内循环加、卸载试验的基础上结合PFC^{2D}对含有不同的岩桥倾角预制双裂隙砂岩进行模拟,分析了弹性模量的变化规律和宏观、模拟裂纹的扩展及动态演化,引入裂纹数定义的损伤变量旨在揭示裂隙砂岩的破坏机理.

1 试验方案及流程

1.1 试验材料

选用长方体砂岩为试验对象,对应尺寸高度、宽度与长度分别为100,50,50 mm.其中人工测量的密度均值为 $2\ 357\text{ kg/m}^3$,且试样差异性小.

为了探究预制双裂隙对砂岩试样力学特性与贯通机理的影响,利用水刀将本试验砂岩长方体切割,如图1所示的裂隙.保持裂隙倾角为 45° 不变的情况下使得岩桥倾角为 $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 和 105° ,并定义上岩桥上端到下岩桥下端矩形范围内为损伤区域,预制裂隙的长度、宽度分别约为10,2 mm.单轴循环加、卸载试件的基本参数见表1,每组试件数均为3,表中各组参数为3个试件平均值.为了方便比较各组试件的力学性能,取每组中具有代表性的试件,其应力-应变曲线见图2.

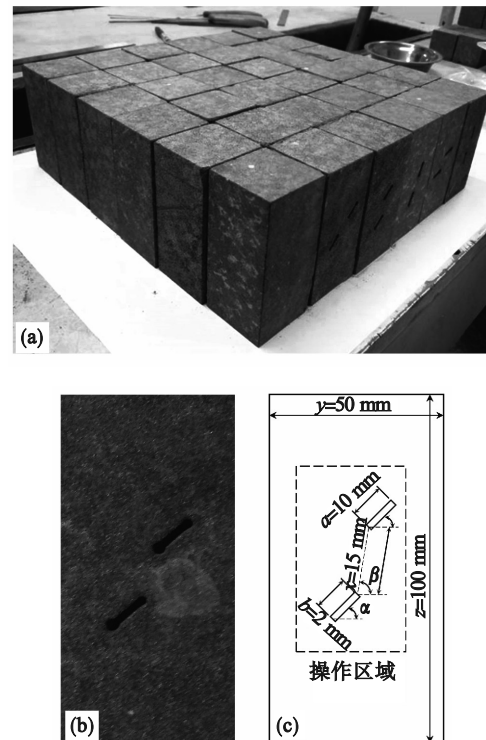


图1 砂岩试件及预制裂隙示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sandstone specimens and prefabricated fractures

(a)—全部试件;(b)—预制裂隙;(c)—尺寸示意图.

表1 试样单轴循环加、卸载参数

Table 1 Uniaxial cyclic loading and unloading parameters of samples

试件	岩桥倾角 $\beta/(^\circ)$	裂隙倾角 $\alpha/(^\circ)$	质量/g	体积 cm^3	密度 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	峰值强度/MPa
Y1	15	45	585.1	248.7	2.35	36.10
Y2	45	45	581.4	245.5	2.37	29.83
Y3	75	45	579.6	243.5	2.38	30.30
Y4	90	45	585.9	249.6	2.35	32.37
Y5	105	45	585.8	250.9	2.33	35.50

1.2 试验设备

试验加载仪器采用YAW-2000B液压伺服压力机,压力机所能提供最大轴向试验力为

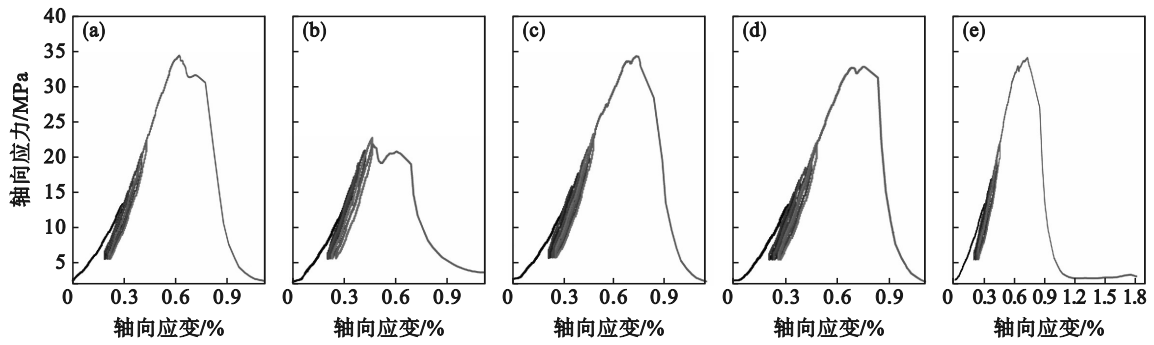


图2 试件应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of specimens

(a)—Y1; (b)—Y2; (c)—Y3; (d)—Y4; (e)—Y5.

2 000 kN;采用计算机控制,能够自动采集加载过程中的试验力与位移.将岩样放置在试验机中心,必须严格对中;调整上下压板位置,压板位置固定后调整千分表的位置,保证千分表位于试件中部,且与试件表面垂直,用以测量岩样的横向变形;调整摄像机位置,对准焦距,并在试验开始前将千分表数据清零;准备工作就绪后,同时打开摄像机和压力机,保证相对时差不超过1 s,试验过程中实时记录岩样的破坏情况.

1.3 试验方法

具体的加载路径见图3.试验前用凡士林涂抹砂岩试件,进一步基于砂岩试件的单轴压缩结果合理地进行各级循环应力上限的选取.试验采用循环下限不变的加载方式,加、卸载速率均为200 N/s;每级循环的应力幅值下限位于试件的压密阶段之上且均为6 MPa,而预制裂隙试件的应力幅值上限则逐渐提高并依次为13.2, 15.0, 16.8, 18.6, 20.4, 22.2 MPa,最后加载直至破坏.

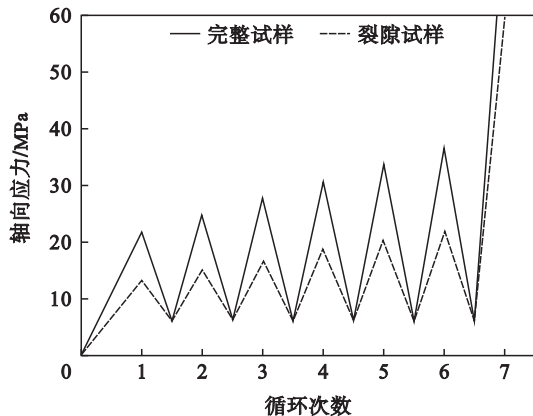


图3 岩石试样加载路径

Fig. 3 Rock specimen loading path

1.4 数值模拟

PFC^{2D}是一种基于离散单元法,利用二维圆盘颗粒运行相互作用来模拟长方体的二维颗粒

流软件,常应用于还原室内岩石在外界各种条件下的力学响应;相邻颗粒间的力学关系遵从牛顿第二定律.PFC^{2D}软件的接触模型是指颗粒间的相互作用,对于不同属性的研究材料都有多种相对应的接触模型可供选择.Cho等^[9]在2007年通过模拟程序研究表明,平行键模型是岩石类材料更现实的键模型,通过平行键黏结可能在拉伸或剪切中断裂,并伴随着刚度的降低.为了更好地还原室内砂岩在外荷载下的力学行为,采用平行键黏结接触模型作为本模型的模拟基础.

按照李坤蒙等^[10]的方法,通过实测得到颗粒密度 ρ 、内摩擦角 φ 等数据,借助电镜扫描仪及相关绘制手法获取晶粒粒级分布曲线,确定最大粒径尺寸 D_{max} 、最小粒径尺寸 D_{min} ,借助单轴物理实验获取岩石的弹性模量 E 与峰值强度 σ .进一步基于黄彦华等^[11]所进行的PFC^{2D}微观参数敏感性分析结果可以得到相对应的颗粒流模拟微观参数校准步骤:

- 1) 通过调整程序中的颗粒接触模量和平行黏结模量,从而改变模型的弹性模量;
- 2) 通过调整程序中的颗粒刚度比和平行黏结刚度比,从而改变模型的泊松比和宏观破坏模式;
- 3) 通过调整程序中的平行黏结法向强度和切向强度,从而改变模型的峰值强度包络线.

在保证边界、加载及停止条件等与物理试验一致的基础上,开展数值模拟试验.通过步骤1)~步骤3)不断尝试加载模型(试错法^[12])得到其力学性质,以此确定颗粒流模型的宏观力学参数,其中最小颗粒半径为0.5 mm、颗粒粒径比为1.66、颗粒密度为2 407 kg/m³,表2为最后确定的微观物理力学参数.为了验证模型所取微观参数是否合理,本模型给出了试验及其模拟的加载曲线对比,如图4所示.可以很明显地看到,两者在外荷载的作用下曲线峰值与斜率相似,相差均小于0.5%.利

用PFC^{2D}软件通过调节不同岩桥倾角,最终得到的岩石试件与PFC^{2D}所模拟的试件如图5所示.

表2 PFC^{2D} 微观参数
Table 2 Micro-parameters in PFC^{2D}

参数	取值
最小颗粒半径/mm	0.5
颗粒粒径比	1.66
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2 407
颗粒间摩擦系数	0.5
接触模量/GPa	3.5
连接刚度比	1.0
平行接触模量/GPa	3.5
平行黏结刚度比	1.0
法向黏结强度/MPa	14.1
切向黏结强度/MPa	50.0
内摩擦角/(°)	40.0
法向临界阻尼比	0.7

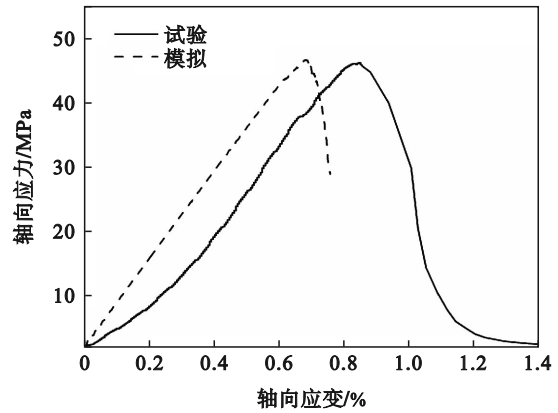


图4 试验及其模拟的加载曲线对比

Fig. 4 Comparison of loading curves between experiments and simulations

2 结果与讨论

由于每组试验的3个岩石试件都表现出较为一致的破坏特征与规律,故以下将围绕试件Y1,

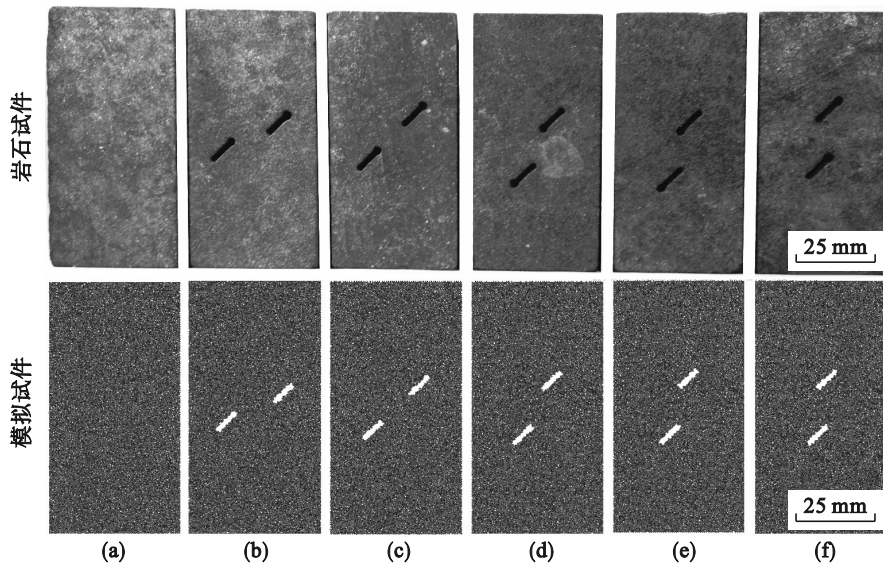


图5 岩石试件与PFC^{2D}模拟试件对比

Fig. 5 Comparison of rock specimens with PFC^{2D} simulated specimens
(a)—完整试件; (b)— $\beta=15^\circ$; (c)— $\beta=45^\circ$; (d)— $\beta=75^\circ$; (e)— $\beta=90^\circ$; (f)— $\beta=105^\circ$.

Y2, Y3, Y4, Y5 展开研究.

2.1 砂岩力学性质与PFC^{2D}微裂纹数目演化

2.1.1 循环荷载与预制裂隙对力学性质的影响

图6给出了不同裂隙砂岩在循环加、卸载下弹性模量随循环次数的演化柱状图,从图6可以看出:随着循环次数的增加,除了极个别弱化现象之外,大多砂岩的弹性模量呈现强化的效果.在第1个循环内,Y1~Y5组的弹性模量差异不大,其值在4.11~4.59 GPa之间;经过第2个循环后,整体的弹性模量显著增长,达到了6.25~6.66 GPa,其中Y1组增幅最大,总体增长2.34 GPa;随后的第3~第7循环中,弹性模量稳步增长.值得一提

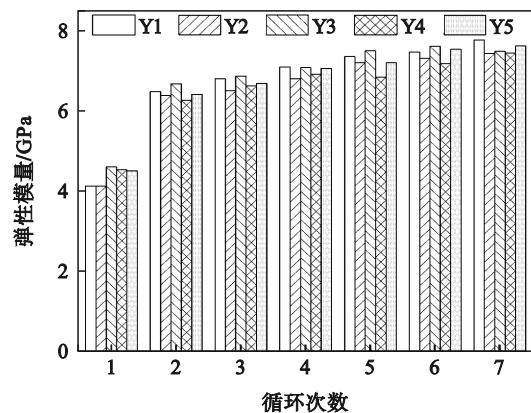


图6 不同裂隙砂岩弹性模量随循环次数的变化规律
Fig. 6 Variation law of elastic modulus of different fractured sandstones with the number of cycles

的是,对于Y3组试样,第6个循环时的弹性模量达到最大值7.59 GPa;对于Y4组试样,第5个循环时的弹性模量相对于前一个循环出现了弱化现象,但整体仍为稳步增长的趋势.最后对比Y1~Y5柱状图可以发现,此时岩桥倾角不是影响强化现象的因素.

2.1.2 基于PFC^{2D}的微裂纹数目演化

当施加荷载大于程序所生成的圆盘颗粒之间相互的黏结力时,颗粒之间出现黏结断裂.选定的接触模型在模拟荷载下会出现不同次数的

黏结断裂,一次黏结断裂对应一次微破裂,微破裂次数达到一定峰值时会导致许多微裂纹扩展贯通而形成宏观裂纹.通过在模拟试验中采用与室内试验相同的加载方式,可以实时记录模型中微裂纹生成的数量.值得注意的是,在PFC^{2D}中,微裂纹的产生数目代表颗粒之间的断裂数量,因此可以通过微裂纹数目的变化来确定岩石内部裂纹的发育进程.图7给出了利用PFC^{2D}模拟统计不同应变段瞬时微裂纹产生数目和对应的应力-应变曲线.

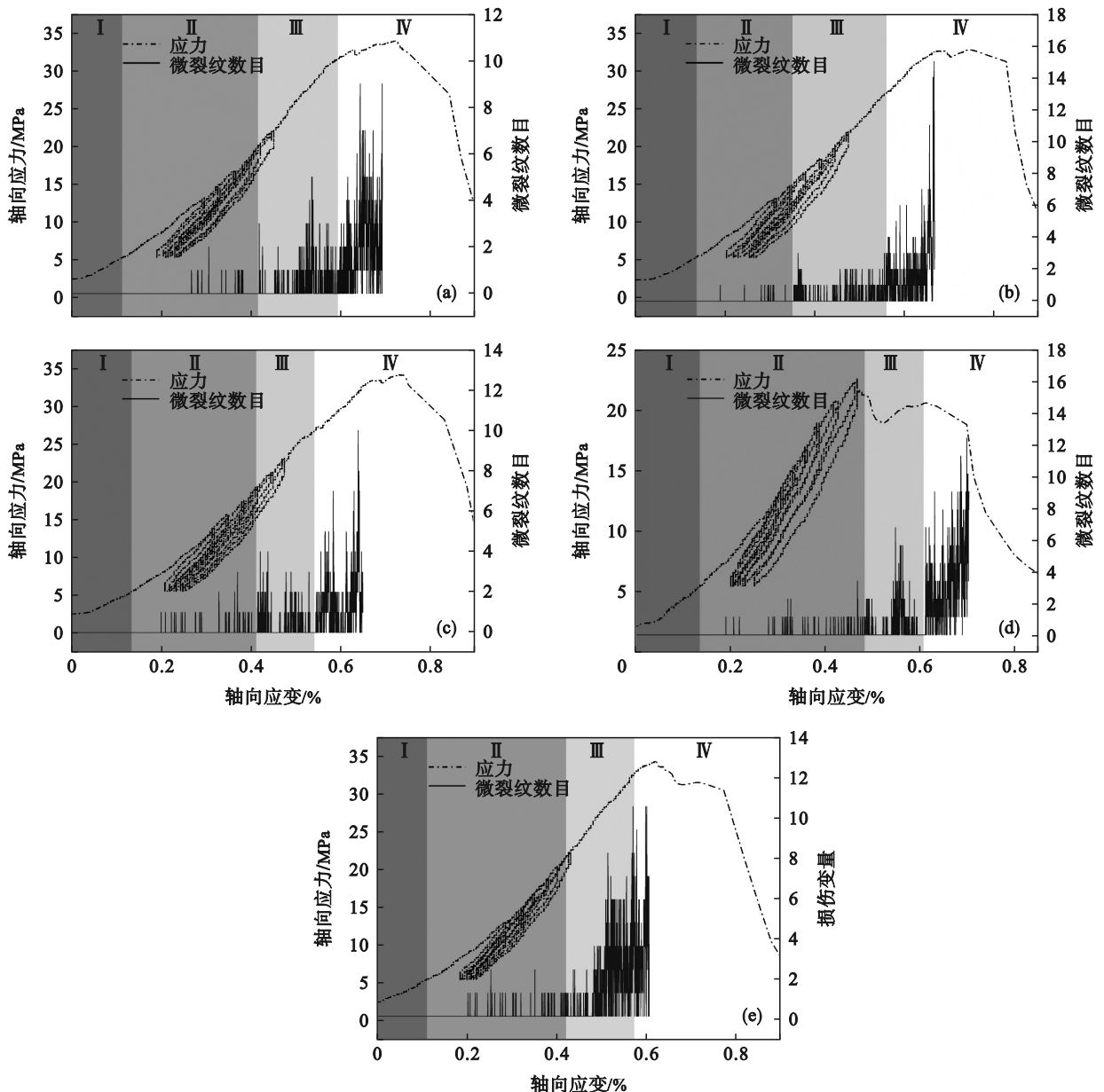


图7 应力、微裂纹数目与应变演化曲线

Fig. 7 Stress, microcrack number vs. strain evolution curves
(a)—Y1; (b)—Y2; (c)—Y3; (d)—Y4; (e)—Y5.

由图7可以看出,不同岩桥倾角下微裂纹数目演化的规律基本相同,本文根据各异的曲线特征将微裂纹数目-应变曲线用由深至浅的灰色背

景划分为4个阶段: I. 压密阶段,在试件的初始加载阶段,PFC^{2D}中并未识别到微裂纹的出现,微裂纹数目保持为零; II. 裂纹萌生阶段,试件在进

入循环加、卸载之后, PFC^{2D}中开始出现少量的微裂纹, 随着轴向应变的增长, 微裂纹数目发育保持在较低的水平; Ⅲ. 裂纹扩展阶段, 试件进入循环-单轴过渡期时, 裂纹数目发育水平开始加快, 裂纹数目曲线开始变得密集, 表明岩石加载过程中更多应变段出现裂纹; Ⅳ. 裂纹激增阶段, 微裂纹数目曲线在保持密集的同时达到了更高的发育水平.

对于岩桥倾角为 15° 和 105°, 微裂纹开始萌生的时刻都在进入循环加、卸载之后, 这使得试件 Y1 和 Y5 的力学性质相较于其他组试件更好; 对于岩桥倾角为 45°, 应力-应变曲线表现出最为显著的二次峰值强度, 并且每次应力跌落时微裂纹数目曲线都会相应出现微裂纹突增现象. PFC^{2D}模拟的加载过程不存在压密阶段且微裂纹停止发育即预示着模拟试件的破坏. 值得一提的是, 除了试件 Y2 外, 模拟试件破坏时刻均出现在实际试件破坏之前, 这表明 PFC^{2D}可以为实际工程安全施工提供一定的参考价值, 当工程结构中出现裂隙倾角-岩桥倾角均为 45° 的情况应当重点监测防护.

2.2 砂岩破坏模式与 PFC^{2D} 裂纹扩展模拟

2.2.1 不同岩桥倾角下砂岩破坏模式

含有不同岩桥倾角的预制缺陷砂岩通常会围绕损伤区域出现 3 种主要的裂纹扩展形式, 分别是翼型裂纹、次生倾斜裂纹和次生共面裂纹, 如图 8 所示.

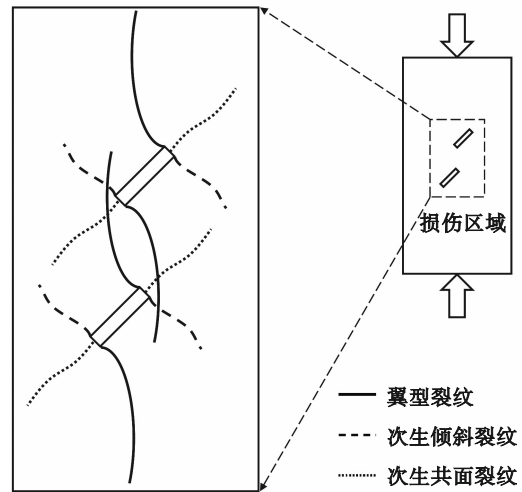


图 8 3 种主要裂纹扩展形式示意图

Fig. 8 Schematic diagram of three main forms of crack growth

翼型裂纹以张拉模式在预制缺陷尖端出现并开始扩展, 随后沿着主应力方向继续发育, 翼型裂纹主要由平行于裂纹端部的拉应力产生. 次生倾斜裂纹与次生共面裂纹则以剪切模式在预制缺陷尖端出现并发展, 主要由沿裂纹扩展方向的剪应力产生. 不同的是, 次生倾斜裂纹通常与预制缺陷形成一定角度出现, 而次生共面裂纹一般与预制缺陷共线生成.

图 9 为不同岩桥倾角试件的最终破坏形态, 通过回放摄像机中的视频利用大写字母标示出不同裂纹的起裂顺序, 利用下标数字标出同一时间出现的不同裂纹.

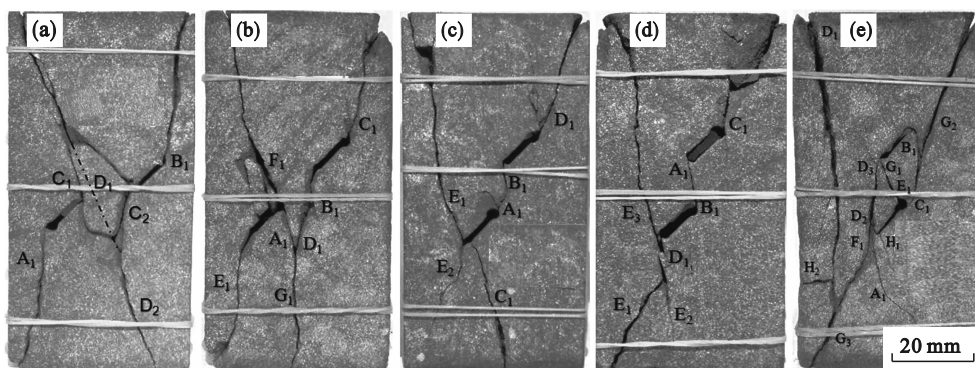


图 9 不同岩桥倾角下砂岩破坏模式

Fig. 9 Sandstone damage pattern under different rock bridge inclination angles

(a)—Y1; (b)—Y2; (c)—Y3; (d)—Y4; (e)—Y5.

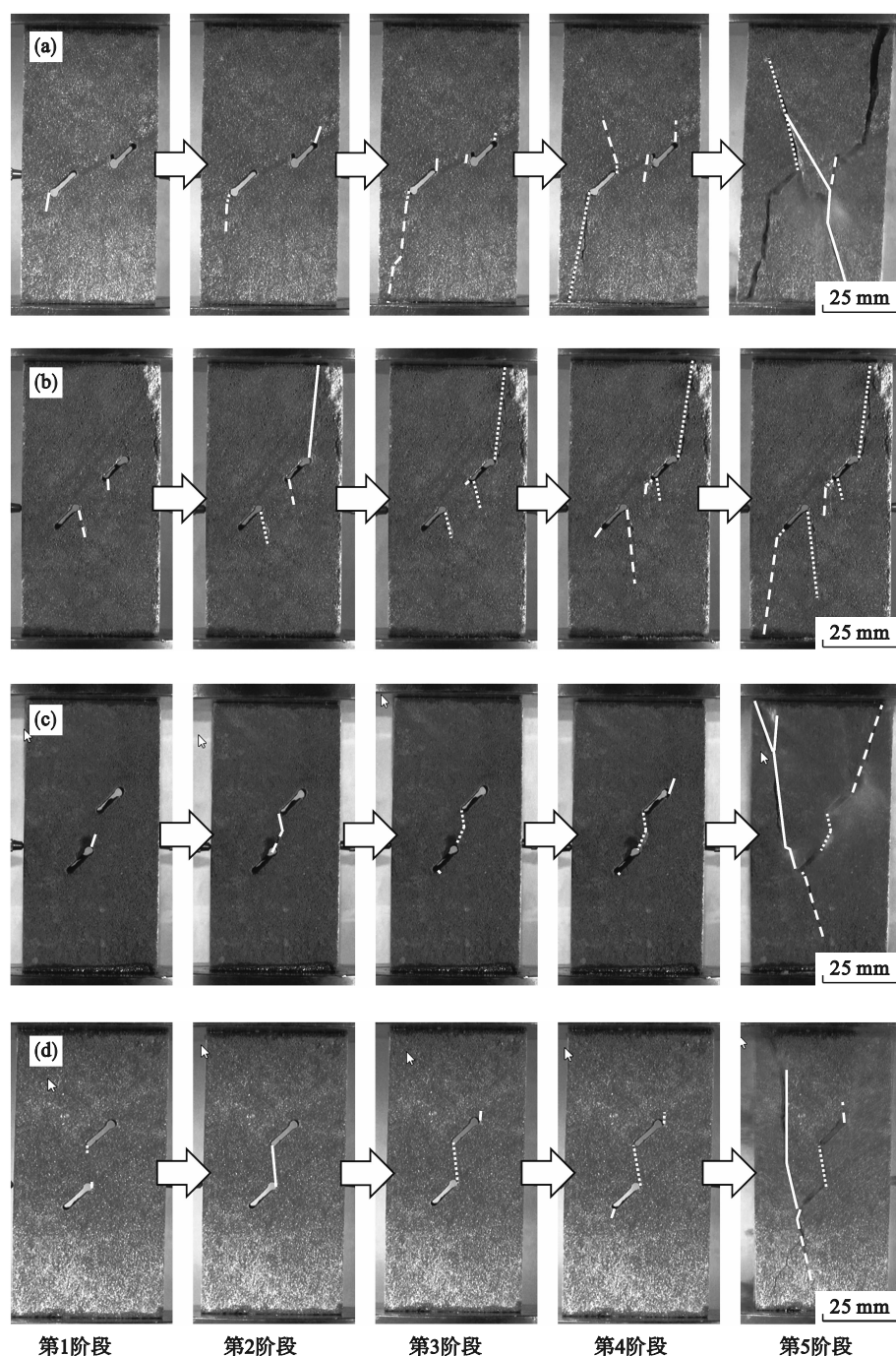
由图 9 可以看出, 不同岩桥倾角砂岩试样的破坏模式并不相同. 当岩桥倾角为 15° 时, 翼型裂纹首先从预制缺陷的外部尖端起裂, 随后次生倾斜裂纹 C₁, C₂ 从内部尖端开始向外发育直到与剪切裂纹 D₁, D₂ 搭接, 最后共同扩展到试件

端部形成破坏. 其中, 由于表面岩块在加载过程中迸出, 实质上并未完成岩桥贯通. 当岩桥倾角 ∈ (45°, 90°) 时, 初始起裂位置由预制缺陷的外部尖端转变为内部尖端. 存在区别的是, 当岩桥倾角为 45° 时, 次生倾斜裂纹率先在下裂隙出现,

随后与上裂隙出现的翼型裂纹 B_1, D_1 搭接,与此同时,外部尖端也出现翼型裂纹 C_1, E_1 共同发育形成破坏.当岩桥倾角为 75° 时,次生共面裂纹 A_1 与次生倾斜裂纹 B_1 迅速起裂发育形成了岩桥贯通的现象,伴随着翼型裂纹 C_1, D_1, E_2 的出现与次生倾斜裂纹 E_1 一起扩展到试件端部完成了破坏.当岩桥倾角为 90° 时,翼型裂纹 A_1, B_1 起裂后直接完成岩桥贯通行为,并在随后形成多条翼型裂纹扩展至试件端部破坏,其中 D_1 与剪切裂纹 E_1 出现裂纹搭接现象.当岩桥倾角为 105° 时,起始裂纹又回到了外部尖端,裂纹发育现象十分显著,首次出现了试件端部起裂的现象.翼

型裂纹 B_1 与次生共面裂纹 C_1 完成第一次裂纹搭接,与拉伸裂纹 D_1 起裂的同时,次生倾斜裂纹 D_2 与翼型裂纹 D_3 共同发育,随后次生倾斜裂纹 E_1 和 G_1 迅速扩展完成了第二次裂纹搭接,最后翼型裂纹一直扩展至试件端部与剪切裂纹 H_2 搭接完成破坏过程.

图 10 展示了含预制缺陷砂岩裂纹扩展的全过程,其中实线代表初始萌生的裂纹,虚线代表有明显扩展的裂纹,点线代表该裂纹未有明显变化.由此看来,虽然预制缺陷试件均受到不同程度的拉应力与剪应力组合影响,但当岩桥倾角为 15° 时,裂纹在损伤区域完成 0 次岩桥贯通;当岩桥倾



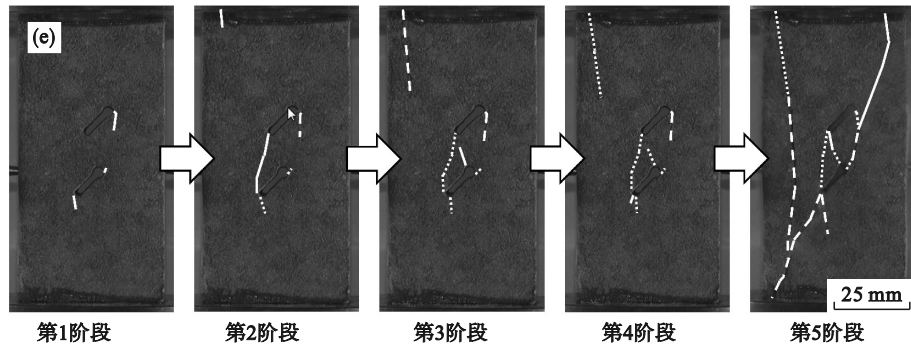


图 10 含预制缺陷砂岩裂纹扩展过程

Fig. 10 Crack growth process in sandstone containing prefabricated defects

(a)—Y1; (b)—Y2; (c)—Y3; (d)—Y4; (e)—Y5.

角为 $45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时, 裂纹在损伤区域完成了 1 次岩桥贯通; 当岩桥倾角为 105° 时, 裂纹在损伤区域完成了 2 次岩桥贯通. 这表明, 循环荷载作用下, 不同岩桥倾角对砂岩试件的破坏特征影响不同.

2.2.2 基于 PFC^{2D} 模拟的裂纹发育形态

通过 PFC^{2D} 对含不同岩桥倾角的预制缺陷试件施加循环荷载, 得到了相对应的裂纹发育趋势和最终的破坏形态, 如图 11 所示. 可以看出, 基于 PFC^{2D} 模拟的试件随着岩桥倾角的变化破坏模式有所不同. 当岩桥倾角为 15° 时, 试件主体由裂隙尖端起裂引起的拉伸破坏构成, 下裂隙上部同样萌生次生倾斜裂纹并扩展到下端部, 全程并未出现岩桥贯通现象, 与实际试件破坏结果一致. 当岩桥倾角为 45° 时, 试件在裂隙尖端拉剪复合起裂并在试件端部完成最终破坏, 其中, 损伤区域同样由次生倾斜裂纹与翼裂纹完成 1 次岩桥贯

通. 当岩桥倾角为 75° 时, 试件表面宏观裂纹相对较少, 同样是拉剪复合破坏. 但 Y3 损伤区域的裂纹发育更为显著, 在裂隙尖端起裂后迅速扩展搭接并完成了岩桥贯通, 此后再未出现类似现象. 当岩桥倾角为 90° 时, 试件的破坏模式与岩桥倾角为 75° 的试件较为相似, 不同的是, 岩桥倾角为 90° 时岩桥贯通现象由单方向裂纹完成, 而岩桥倾角为 75° 时岩桥贯通现象则由双方向裂纹共同完成, 这使得 Y3 的岩桥相较于 Y4 更加迅速地完成了贯通, 所体现的峰值强度平均值也相对更低, 这说明双裂隙砂岩的力学性质与岩桥贯通机理有关. 当岩桥倾角为 105° 时, 试件第一次在垂直方向上存在共同截面, 这导致微裂纹从裂隙尖端起裂后更多地在损伤区域内扩展, 随着外荷载的继续作用, 上裂隙先后与下裂隙的上部完成了 2 次岩桥贯通.

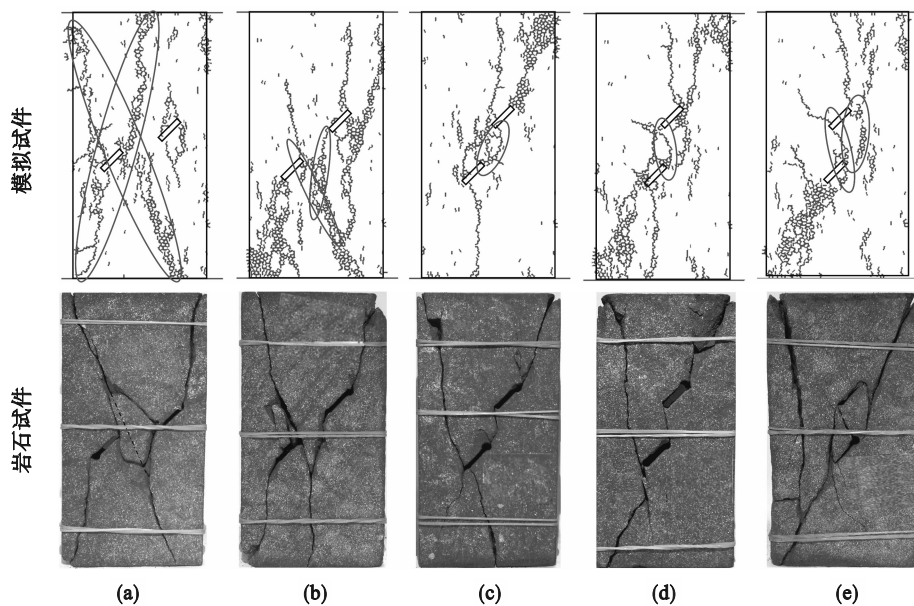


图 11 基于 PFC^{2D} 模拟的宏观裂纹发育趋势

Fig. 11 Macroscopic crack development trend based on PFC^{2D} simulation

(a)—Y1; (b)—Y2; (c)—Y3; (d)—Y4; (e)—Y5.

因此,PFC^{2D}软件可以较好地完成对双裂隙砂岩的循环加载破坏模拟,微裂纹的扩展趋势与实际试件宏观裂纹较为匹配,裂纹发育局部化结果与实际试件损伤区域相对应,进一步验证了不同岩桥倾角对双裂隙砂岩破坏模式的影响。

2.3 砂岩试样损伤演化

2.3.1 砂岩损伤定义

在加载过程中,由岩石材料内部孔隙微裂纹的聚集发育而导致材料产生宏观破坏的渐进演化行为一般采用损伤变量 D 来表示.考虑到PFC^{2D}所模拟的试验结果已被众多学者认可且普遍运用^[13-16],因此,本文利用PFC^{2D}模拟所得到的微裂纹发育结果对损伤变量 D 进行定义:

$$D = \frac{n_t}{n} \quad (1)$$

式中: n_t 是PFC^{2D}模拟岩石循环加、卸载过程中每个时刻的微裂纹数目; n 是整个岩石加载过程中的总微裂纹数目.进一步,利用岩石破坏时所记录到的最终强度对 D 进行修正,则本文最终确定的损伤变量 D 可以表达为

$$D = D_u \frac{n_t}{n} = \left(1 - \frac{\sigma_f}{\sigma_c}\right) \frac{n_t}{n} \quad (2)$$

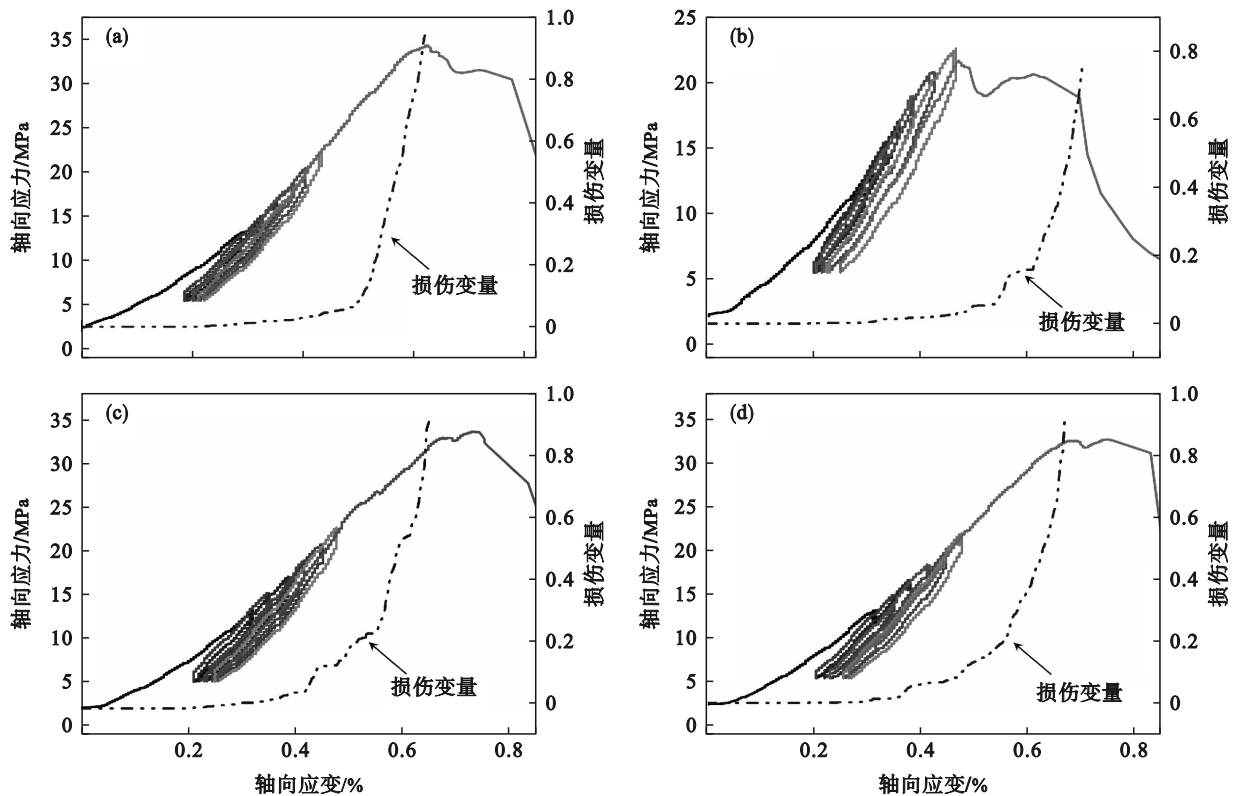
式中: D_u 为临界损伤; σ_f 和 σ_c 分别是该试件破坏时所记录到的最终强度和峰值应力。

2.3.2 砂岩试样损伤演化规律

在工程施工过程中,岩石作为主要承载者对

于结构安全稳定起着非常关键的作用.因此,岩石在外荷载下的损伤演化分析评估对于工程施工中的安全防控及治理至关重要.根据式(2),图12展示了不同岩桥倾角下砂岩试件的应力-应变曲线及损伤演化曲线。

为了更加清楚地得到损伤演化的规律,将损伤为0的曲线段截除.由图12可以看到,损伤演化曲线在初始加载时并无明显变化,呈现缓慢加载的趋势;试件继续加载,曲线先后出现台阶式增长,这表明双裂隙砂岩试件在加载中受到了不同程度的损伤.最后,试件均在应变值大约为0.6%时发生损伤突增现象,随后完成破坏全过程.其中,Y1与Y5的演化曲线在循环加、卸载时间段内并未出现损伤不稳定增长现象,这使得Y1和Y5的力学性质相较于其他试件更好.当岩桥倾角 ϵ (15°,45°)时,损伤曲线在峰值强度之后才逐渐达到某一定值;当岩桥倾角 ϵ (75°,105°)时,损伤曲线在峰值强度之前就已经突增至某一定值.认为这与裂纹是否在岩桥区域内贯通有关,由图12可知,Y1,Y2虽然在给定损伤区域内出现一定破坏现象,但并未在岩桥区域实现贯通效应,这使得对应的损伤演化曲线相较于其他试件更缓慢地到达定值.值得一提的是,Y2的损伤变量最大值明显小于0.8,而其余4个试件的损伤变量最大值均超过了0.9,这表明当双裂隙砂岩的裂隙倾角为45°时,岩桥倾角为45°的原始损伤最大。



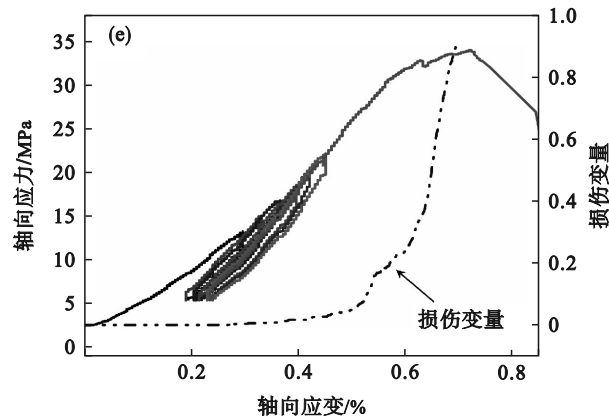


图 12 不同砂岩试件的应力-应变曲线及损伤演化曲线

Fig. 12 Stress-strain curves and damage evolution curves of different sandstone specimens

(a)—Y1; (b)—Y2; (c)—Y3; (d)—Y4; (e)—Y5.

3 结 论

1) 循环荷载使不同岩桥倾角砂岩的弹性模量得到了强化,利用PFC^{2D}模拟所得到的实时微裂纹数目曲线分阶段探讨得出实际工程应当重点关注裂隙倾角45°及岩桥倾角45°的情况。

2) 不同岩桥倾角下砂岩的破坏模式主要围绕的损伤区域由3种裂纹扩展所致.当岩桥倾角在(15°,105°)时,裂纹在损伤区域完成了0~2次不等的岩桥贯通行为.通过PFC^{2D}模拟所得到二维裂纹动态扩展结果,结合实际试件破坏模式,可以得到双裂隙砂岩在循环荷载下裂纹发育局部化结果与实际试件损伤区域相对应,进一步验证了不同岩桥倾角对双裂隙砂岩破坏模式的影响。

3) 岩桥倾角对试件破坏模式有重要影响.基于PFC^{2D}所得到的微裂纹数目结合最终强度修正建立损伤变量演化曲线,认为扩展裂纹的岩桥贯通效应与损伤突增现象相关,试件岩桥倾角为45°的损伤变量最大值低于0.8,说明其原始损伤最大。

参考文献:

[1] Bobet A, Einstein H H. Fracture coalescence in rock-type material under uniaxial and biaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(7): 863-888.

[2] Li Y P, Chen L Z, Wang Y H. Experimental research on pre-cracked marble under compression [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42(9): 2505-2516.

[3] Yang S Q, Dai Y H, Han L J, et al. Experimental study on mechanical behavior of brittle marble samples containing different flaws under uniaxial compression [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(12): 1833-1845.

[4] Sun D L, Rao Q H, Wang S Y, et al. A new prediction method for multi-crack initiation of anisotropic rock [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 118:

103269.

[5] Cao P, Liu T Y, Pu C Z, et al. Crack propagation and coalescence of brittle rock-like specimens with pre-existing cracks in compression [J]. *Engineering Geology*, 2015, 187: 113-121.

[6] Tang X H, Tao S J, Li P, et al. The propagation and interaction of cracks under freeze-thaw cycling in rock-like material [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 154: 105112.

[7] Wang Y Y, Deng H C, Deng Y, et al. Study on crack dynamic evolution and damage-fracture mechanism of rock with pre-existing cracks based on acoustic emission location [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201: 108420.

[8] 王宇,高少华,孟华君,等.不同频率增幅疲劳荷载下双裂隙花岗岩破裂演化声发射特性与裂纹形态研究[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(10):1976-1989.
(Wang Yu, Gao Shao-hua, Meng Hua-jun, et al. Investigation on acoustic emission characteristics and fracture network patterns of pre-flawed granite subjected to increasing-amplitude fatigue loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(10): 1976-1989.)

[9] Cho N, Martin C D, Sego D C. A clumped particle model for rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, 44(7): 997-1010.

[10] 李坤蒙,李元辉,徐帅,等.PFC^{2D}数值计算模型微观参数确定方法[J].*东北大学学报(自然科学版)*,2016,37(4): 563-567.
(Li Kun-meng, Li Yuan-hui, Xu Shuai, et al. Method to determine microscopic parameters of PFC^{2D} numerical model [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(4): 563-567.)

[11] 黄彦华,杨圣奇.非共面双裂隙红砂岩宏观细观力学行为颗粒流模拟[J].*岩石力学与工程学报*,2014,33(8):1644-1653.
(Huang Yan-hua, Yang Sheng-qi. Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of red sandstone containing two pre-existing non-coplanar fissures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1644-1653.)

[12] Zhang X P, Wong L N Y. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: a numerical study based on parallel bonded-particle model approach [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(5): 711-737.

[13] 王述红,王子和,王凯毅,等.循环荷载下含双裂隙砂岩弹

