

文章编号: 1001-4888(2023)01-0081-10

双交叉裂隙岩桥相互作用与破坏行为试验研究^{*}

陈康, 邵亚建, 王西钰, 马国伟

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 双交叉裂隙是工程岩体中构成断续交叉裂隙的基本单元。裂隙几何参数的变化, 会带来裂隙之间岩桥组合形态的改变, 并形成岩桥相互作用, 对双交叉裂隙的起裂、扩展、贯通及断裂产生直接影响。本文以光敏树脂 3D 打印技术制备不同次裂隙长度的双交叉裂隙试样, 并低温处置使其脆化; 开展单轴压缩试验以获得试样的力学性能, 利用 DIC (Digital Image Correlation, 数字图像相关技术) 分析试样的变形行为, 采用高速摄像机捕捉裂纹萌生和裂隙扩展过程。结果表明, 随次裂隙长度的增加, 双交叉裂隙试样的峰值强度呈先增大后减小的趋势; 试样压缩破坏过程中, 最短岩桥(主导岩桥)的两端最先形成应力集中, 主导着初始裂纹的形成; 尖端裂纹的扩展路径主要受到剪切路径的影响, 而剪切路径随加载进程动态变化, 由外侧向主导岩桥位置逐步靠拢, 控制着次生裂纹的扩展角度。

关键词: 交叉裂隙; 力学行为; 破坏模式; 3D 打印; DIC 分析

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-100

0 引言

工程岩体中赋存大量的层理、节理、裂纹、裂隙、层面以及断层等结构弱面, 在扰动作用下, 结构弱面的萌生、扩展、贯通以及开裂会导致岩体失稳破坏^[1-3]。工程实践中, 常遇到以断续交叉裂隙形式为主的岩体工况, 交叉裂隙的几何参数多样、分布形态多变, 使得此类裂隙岩体的破坏行为和力学特性异常复杂。

近年来, 国内外学者以裂隙岩体为核心, 探究了裂纹起裂位置、开裂角度、扩展路径以及断裂能量特性等破坏行为^[4-8]。蒲成志等^[9]对不同裂隙开度岩石试样开展试验研究, 结果表明, 由于裂隙开度的不同, 试样呈现出 2 种破坏模式, 即对角线最大剪应力破坏和裂隙上部拉伸破坏。Li 等^[10]对不同裂隙倾角类岩石试样开展试验研究, 发现由于裂隙倾角的不同, 试样呈现出翼形拉伸裂纹和二次剪切裂纹 2 种扩展模式。Yang 等^[11]基于类岩石材料的试验结论, 在单裂隙破坏过程中观察到拉伸、剪切、侧向、远场裂纹和表面剥落等多种破坏现象。Lee 等^[12]利用有机玻璃、花岗岩和石膏 3 种材料预制含裂隙试样, 探究了双裂隙试样的裂纹产生、扩展和贯通机制。Cheng 等^[13]利用岩石材料制备了不同裂隙长度、开度、倾角、间距以及夹角的三裂隙试样, 分析了不同裂隙分布形态下三裂隙试样的破坏规律, 在单轴压缩试验中观测到翼裂纹、反翼裂纹、同向二次裂纹、斜向二次裂纹和准同向二次裂纹 5 种裂纹类型, 且在岩桥两端翼裂纹和反翼裂纹优先于同向二次裂纹和斜向二次裂纹萌生。韩震宇等^[14]对含端部双裂隙的大

^{*} 收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(52104124, 51627812, U1965204)

通信作者: 马国伟(1968—), 男, 博士, 教授, 博导。主要研究领域: 岩石力学, 3D 打印混凝土, 地下防护工程。Email: guowei.ma@hebut.edu.cn

邵亚建(1988—), 男, 博士, 讲师。主要研究领域: 岩石力学, 地质结构 3D 打印。Email: yajian.shao@hebut.edu.cn

理岩试样进行单轴压缩试验,研究了端部裂隙长度和倾角对大理岩裂纹扩展规律及能量特性的影响,结果表明,应变能、输入能及能量利用率等参数变化趋势与抗压强度一致,裂隙的存在会导致试样储能程度降低。

双交叉裂隙是构成断续交叉裂隙的基本单元,裂隙几何参数的变化,带来裂隙之间岩桥组合形态的改变,影响着岩体的破坏行为与力学特性。Zhang 等^[15]对双平行裂隙和双交叉裂隙试样开展单轴压缩试验研究,观察到 2 种组合裂隙的岩桥存在显著不同的聚结行为。Zhou 等^[16]利用低温脆化的有机玻璃模拟岩石材料,制备 9 种不同形态的双十字交叉裂隙试样,探究了裂隙间岩桥区域的裂纹扩展与贯通模式。双交叉裂隙岩体的裂隙空间形态多样,现有研究多集中于某一几何参数对裂隙破坏行为的影响,如交叉裂隙夹角、裂隙组间距、裂隙组倾角等,然而,针对岩桥组合形态及其相互作用对破坏行为的影响机制尚少有分析。

综上所述,本文首先利用光敏树脂 3D 打印技术制备双交叉裂隙试样,并进行低温脆化处理,开展单轴压缩试验以测试其力学性能;然后,利用 DIC 技术和高速摄像技术分别监测试样表面的变形特性和内部裂隙的破坏行为,以探究不同次裂隙长度对双交叉裂隙试样的峰值强度、弹性模量、破坏模式以及形变特征的影响;最后,文中着重分析了岩桥相互作用对试样破坏行为的影响机制,以揭示双交叉裂隙变形破坏机理。

1 试样制备和试验准备

1.1 试验材料与试验设备

已有研究表明^[17, 18],低温处理后的光敏树脂材料与天然岩石具有相似的力学性能;且该材料基质无色透明,透过该材料可清晰地观测试样内部裂纹萌生、扩展及破坏过程,很适合研究人员对试样的破坏模式进行分析。为此,本研究选用光敏树脂为原材料,采用光固化成型 3D 打印工艺制备裂隙试样。试验用光敏树脂型号为 WaterShed RC, 3D 打印机型号为联泰 RS Pro 450,打印层厚为 0.05mm。试样打印完成后置于傲雪 DW-60W258 型低温养护箱内,在 -30°C 的低温环境下冷冻 48h 以上使其脆化,而后进行力学性能测试与数据采集。

制备双交叉裂隙试样的同时,制备无裂隙完整试样,并进行基本力学性能测试,具体参数见表 1。试样抗压强度为 80.30MPa,抗拉强度为 12.24MPa,压拉比为 6.56。打印试样的压拉比与砂岩相当^[19],该试样具有较高脆性。

表 1 低温脆化 3D 打印光敏树脂力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of low-temperature treated 3D printing photosensitive resin

抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	弹性模量 E/GPa	屈服应变 $\epsilon_y/\%$	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$
80.30	12.24	8.50	3.30	1.12

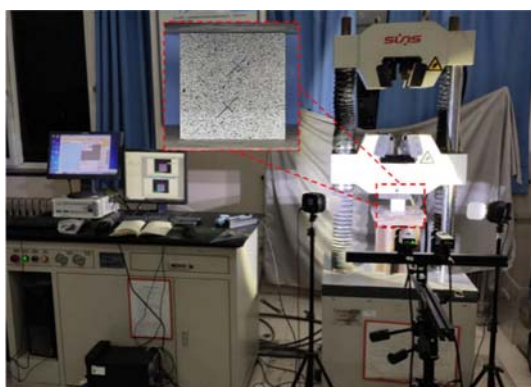


图 1 强度测试与 DIC 采集系统

Fig. 1 Strength test and DIC acquisition system

本文单轴压缩试验采用 SUNS WAW-200 电液伺服万能试验机进行,试验机最大加载值为 200.00kN,精度为 $\pm 0.50\%$ 。加载过程采用位移行程控制方式,加载速率为 1.00mm/min。试验时,室内环境温度约 12°C ,单个试样强度测试时长约 3min。

DIC 技术是一种非接触式高精度全场位移、应变测量方法,利用该技术可获得加载过程中试样表面的应变场和位移场,目前已被广泛应用于对岩石、类岩石材料变形行为的监测^[20, 21]。本文采用 VIC-3D DIC 系统对试样表面应变行为进行监测,图像采集速率为 2fps,分辨率为 2448pixel

×2048pixel。与此同时,使用高速摄像机对试样在试验中的破坏过程进行实时摄录,摄像频率为 30fps,分辨率为 1920pixel×1080pixel,试验系统如图 1 所示。

1.2 试验方案设计

试验前对不同试样尺寸进行预测试,发现宽度与厚度比大于 10 时,试验中易出现挠曲破坏;当宽度与厚度比小于 5 时,裂隙试样易出现塑性破坏,不满足研究需要。基于已有研究经验^[17, 22],本文试样的几何尺寸为长 70.00mm、宽 70.00mm、厚 8.00mm,裂隙宽度为 1.00mm。

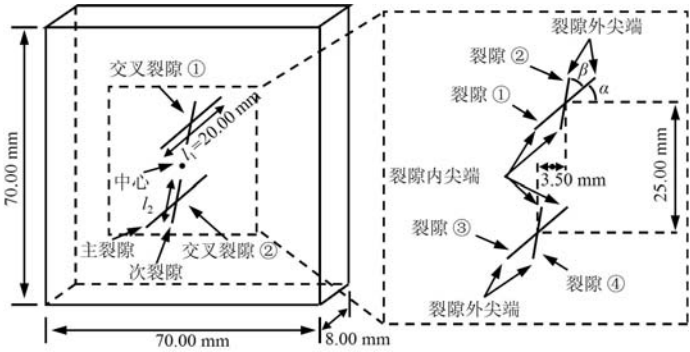


图 2 双交叉裂隙试样示意图

Fig. 2 Schematic of the double-cross-flaw specimen

为探究岩桥相互作用对双交叉裂隙破坏行为的影响,采用主裂隙几何尺寸保持不变,改变次裂隙长度以改变岩桥位置的试验设计方案。两组交叉裂隙呈中心对称布置,主裂隙长度设置为 $l_1 = 20.00$ mm,主裂隙倾角(与水平方向夹角) $\alpha = 45^\circ$,主次裂隙夹角 $\beta = 30^\circ$;次裂隙长度 l_2 为变量, l_2 由 4.00mm 依次增加到 20.00mm,同时,设置平行裂隙作为对照组,即对应次裂隙长度 $l_2 = 0.00$ mm 试样,试样几何参数与裂隙参数设计如图 2 和表 2 所示。为方便描述,将两组交叉裂隙岩桥两侧裂隙尖端称为内裂尖,靠近试样上下边缘的裂隙尖端称为外裂尖,双交叉裂隙试样 3D 打印成品如图 3 所示。

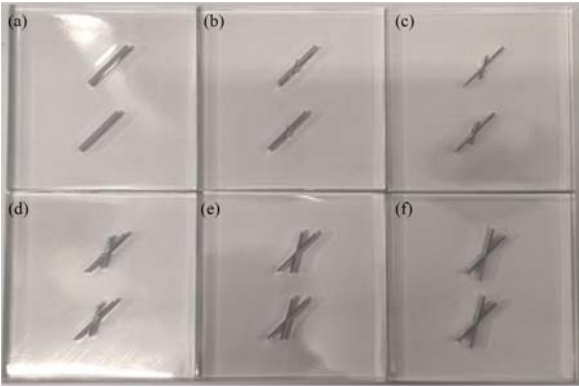


图 3 不同次裂隙长度双交叉裂隙试样成品

Fig. 3 Specimens with different minor-flaw lengths

表 2 双交叉裂隙试样参数表

Tab. 2 Parameter table of the double-cross-flaw specimens

试件编号	①	②	③	④	⑤	⑥
主裂隙倾角/(°)				45		
主次裂隙夹角/(°)				30		
主裂隙长度 l_1 /mm				20.00		
次裂隙长度 l_2 /mm	0.00	4.00	8.00	12.00	16.00	20.00

2 试验结果分析

2.1 力学性能分析

基于试样单轴压缩试验结果可知,试样的变形特性与岩石材料相似,单轴压缩试验中的应力应变曲线可分为 4 个阶段:裂隙压密闭合阶段、弹性变形至微弹性阶段、非稳定破裂阶段、破裂后阶段,加载过程中,不同次裂隙长度双交叉裂隙试样应力-应变曲线如图 4 所示。

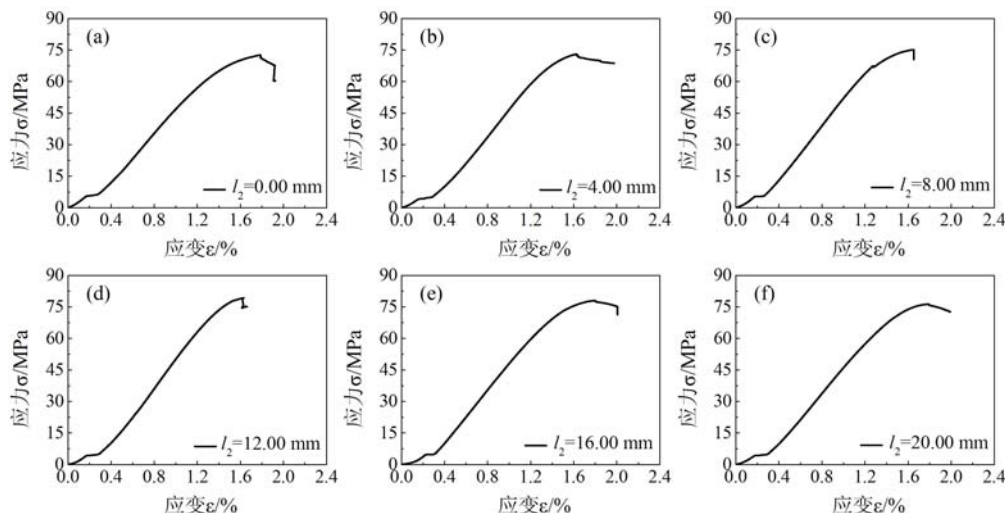


图 4 不同次裂隙长度双交叉裂隙试样应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of double-cross-flaws specimens with different minor-flaw lengths

对不同次裂隙长度双交叉裂隙试样的峰值强度进行统计分析,可发现随着次裂隙长度的增加,峰值强度呈现先增大后减小的趋势(图 5)。当次裂隙长度为 12.00mm 时,峰值强度达到最大的 79.27MPa,此时,试样整体结构更协调,岩桥两端应力集中的趋势得到缓解,这一特性会使试样强度提高。

对双交叉裂隙试样的弹塑性进行分析,为保证数据处理的一致性,将峰值应变 40%~80%间的变形阶段视为弹性变形,取该阶段应力-应变数据进行弹性模量计算。弹性模量与次裂隙长度没有显著的相关关系,呈上下波动趋势,且整体上变化幅度不大,如图 6 所示。随着次裂隙长度的增加,试样加载过程中应力分布状态改变,但材料属性未变,试样整体刚性(弹性)无明显变化。

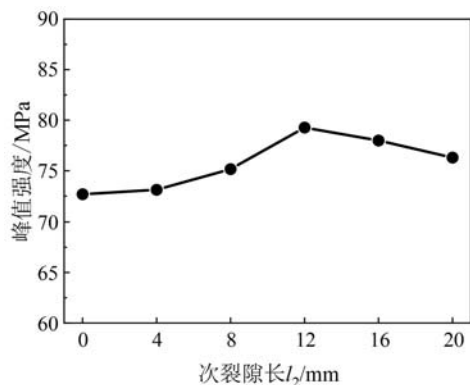


图 5 不同次裂隙长度双交叉裂隙试样峰值强度

Fig. 5 Peak strength of double-cross-flaws specimens with different minor-flaw lengths

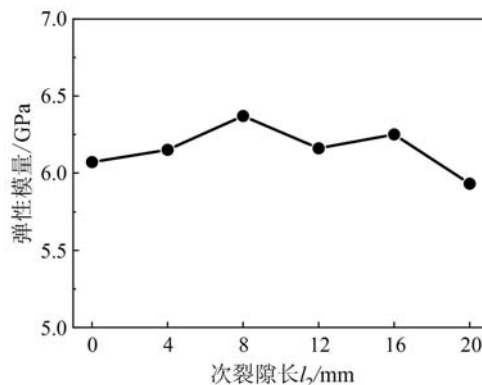


图 6 不同次裂隙长度双交叉裂隙试样弹性模量

Fig. 6 Elastic modulus of double-cross-flaws specimens with different minor-flaw lengths

2.2 破坏模式分析

双交叉裂隙试样由于次裂隙长度的改变,岩桥间裂纹的扩展形式存在显著不同,可归纳为 2 种压缩破坏模式,即主裂隙破坏和主次裂隙破坏。

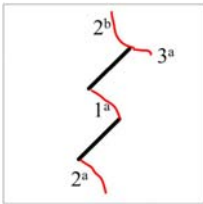
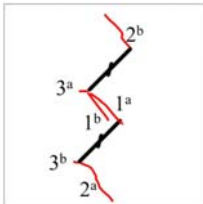
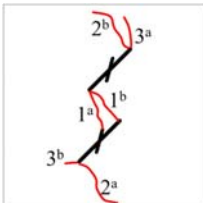
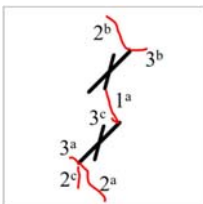
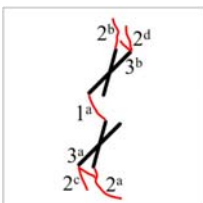
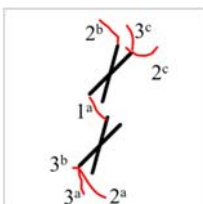
(1)主裂隙破坏:内裂纹由主裂隙内裂尖处经岩桥向中心扩展,直至两条内裂纹贯通,如表 3-①中“1^a”所示;随后外裂纹由主裂隙外裂尖向上下两端扩展,贯通整个试样,如表 3-①中“2^a,2^b”所示。次裂隙长度在 0.00mm、4.00mm 时,双交叉裂隙试样主要表现为主裂隙破坏。

(2)主次裂隙破坏:内裂纹由主裂隙内裂尖处经岩桥向中心扩展,两条内裂纹未直接贯通,而是向对侧次裂隙内裂尖延伸并贯通,如表 3-⑤中“1^a”所示;随后外裂纹由主裂隙外裂尖向上下两端扩展,贯通整个试样,如表 3-⑤中“2^a,2^b”所示。次裂隙长度在 12.00mm、16.00mm、20.00mm 时,双交叉裂隙试样主要表现为主次裂隙破坏。

(3)在次裂隙长度为 8.00mm 时,处于主裂隙破坏向主次裂隙破坏过渡阶段,此时,试样中存在主裂隙裂纹和主次裂隙裂纹 2 种类型,如表 3-③中“1^a,1^b”所示。

表 3 双交叉裂隙试样破坏模式

Tab. 3 Cracking model of the double-cross-flaw specimens

试件编号	次裂隙长度/mm	破坏后试样	裂隙扩展图	裂纹标记
①	$l_2=0.00$			T: 2 ^a , 2 ^b ; S: 3 ^a ; T-S: 1 ^a ;
②	$l_2=4.00$			T: 2 ^a , 2 ^b , 1 ^b ; S: 3 ^a , 3 ^b ; T-S: 1 ^a
③	$l_2=8.00$			T: 2 ^a , 2 ^b , 3 ^a ; S: 3 ^b ; T-S: 1 ^a , 1 ^b
④	$l_2=12.00$			T: 2 ^a , 2 ^b , 3 ^a , 3 ^c , 2 ^c ; S: 3 ^b ; T-S: 1 ^a
⑤	$l_2=16.00$			T: 2 ^a , 2 ^b , 2 ^c , 2 ^d , 3 ^a , 3 ^b ; T-S: 1 ^a ;
⑥	$l_2=20.00$			T: 2 ^a , 2 ^b , 3 ^a , 3 ^c ; S: 3 ^b , 2 ^c ; T-S: 1 ^a

注: T 为拉伸破坏, S 为剪切破坏, T-S 为拉伸-剪切破坏; 1、2、3 为裂纹的萌生顺序编号; a、b、c 为同一时刻产生的多条裂纹标记。

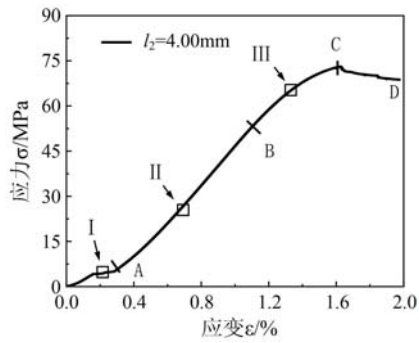


图 7 应力-应变曲线 DIC 分析标记

Fig. 7 DIC analysis markers of stress-strain curve

2.3 形变特性分析

在单个试样加载过程中, DIC 摄像机采集约 800 张散斑照片, 分别取试样加载的初始加载、弹性变形、塑性变形 3 个阶段的一小段标记为 I、II、III 阶段, 并进行主应变场分析, DIC 分析标记如图 7 所示。

由试样表面主应变场结果(图 8)可知, 随着荷载的增加, 主应变场在不断变化。在 I 阶段, 试样处于初始加载阶段, 试样上下端面局部接触, 因此在试验边缘出现局部主应变集中区, 如图 8(a)-I~(f)-I 所示; 在 II 阶段, 试样处于弹性变形阶段, 没有新裂纹萌生, 此时, 主应变集中区分布在双交叉裂隙的主裂隙岩桥两侧, 如图 8(b)-II~(c)-II 所示; 在 III 阶段, 试样处于破坏阶段, 新的裂纹刚刚形成, 此时,

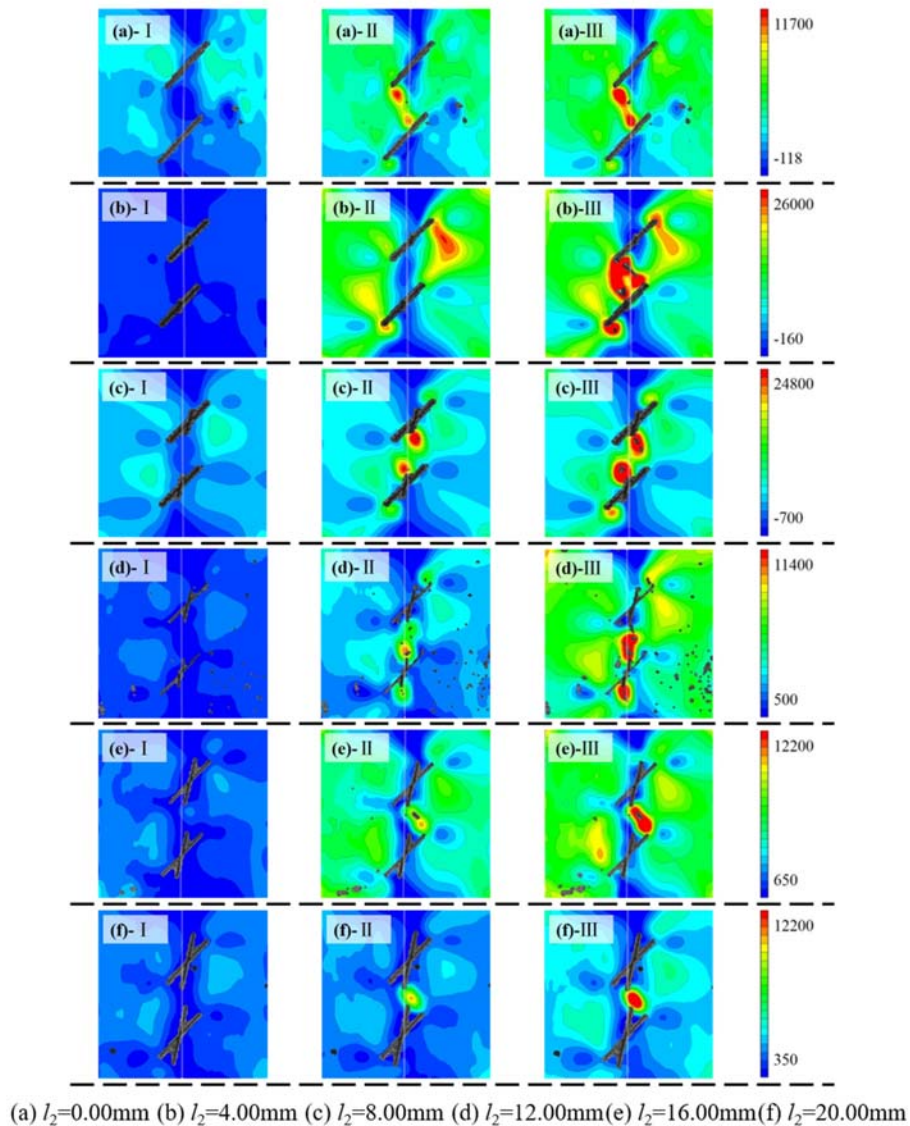


图 8 试样加载过程主应变场(单位: \$\mu\epsilon\$)

Fig. 8 Principal strain fields of the specimen loading process (unit: \$\mu\epsilon\$)

主应变集中区即为新裂纹位置, 如图 8(d)-III~(e)-III。随着次裂隙长度的增加, 试样表面主应变集中区域的分布存在一定差异, 主要表现在 II 阶段。在次裂隙为 0.00mm 和 4.00mm 时, 主应变集中区域

比较分散,且集中在一侧,如图 8(a)-II~(b)-II 所示;当裂隙延长到 8.00mm 之后,主应变集中区域分布在两条主裂隙中间的两侧区域,且呈现出显著的反对称形式,如图 8(c)-II~(f)-II 所示,这意味着试样加载过程中,整体变形更为协调,这也是试样荷载峰值强度较平行裂隙试样有不同程度提高的内在原因。

3 岩桥相互作用与破坏行为

随着次裂隙长度的增加,双交叉裂隙试样破坏模式会发生改变,这种改变主要是由多组岩桥形态特征改变所引起的。为方便描述,定义主裂隙内裂尖岩桥为主裂隙岩桥,主裂隙与次裂隙内裂尖岩桥为主次裂隙岩桥,次裂隙与次裂隙内裂尖岩桥为次裂隙岩桥。双交叉裂隙试样的压缩破坏是由裂隙尖端应力集中驱动裂纹萌生、扩展,直至贯通引起的,为此,本文将基于 DIC 和高速摄像结果分析不同岩桥相互作用下的裂隙尖端应力集中和扩展路径。

3.1 岩桥尖端应力集中

双交叉裂隙试样加载破坏过程中,应力集中于最短岩桥的两端,主导着起裂裂纹的形成,对应的岩桥称为主导岩桥;随着次裂隙长度的增加,双交叉裂隙主导岩桥也在动态变化。

在次裂隙长度较短,主裂隙岩桥长度显著低于其他岩桥时,裂隙破坏以主裂隙岩桥位置剪切、拉伸破坏为主。试样次裂隙长度为 0.00mm 和 4.00mm 时,主裂隙岩桥长度为 15.00mm,次裂隙岩桥长度为 21.03mm,主次裂隙岩桥长度为 17.55mm,岩桥长度参数如图 9(a)、(b)所示。主裂隙岩桥长度显著低于其他岩桥,为此,在拉、剪荷载下,主裂隙内裂尖处形成应力集中,并形成贯通裂纹,主裂隙岩桥区域的应变场如图 8(a)、(b)所示。

随着次裂隙长度增加,当主次裂隙岩桥和次裂隙岩桥与主裂隙岩桥长度接近时,主裂隙岩桥的主导地位被取代。试样次裂隙长度为 8.00mm、12.00mm 时,主次裂隙岩桥长度分别为 14.55mm 和 12.93mm,岩桥长度参数如图 9(c)、(d)所示。主次裂隙岩桥长度较其他岩桥长度更低,在裂隙扩展中占据主导地位,次裂隙内裂尖处形成应力集中,次裂隙岩桥区域的应变场如图 8(c)、(d)所示。

随着次裂隙长度进一步增加,主次裂隙岩桥开始占据主导地位。试样次裂隙长度为 16.00mm、20.00mm 时,次裂隙岩桥长度分别为 9.31mm 和 5.67mm,岩桥长度参数如图 9(e)、(f)所示,较其他岩桥长度更低,在裂隙扩展中占据主导地位,主次裂隙内裂尖处形成应力集中,主次裂隙岩桥区域的应变场如图 8(e)、(f)所示。

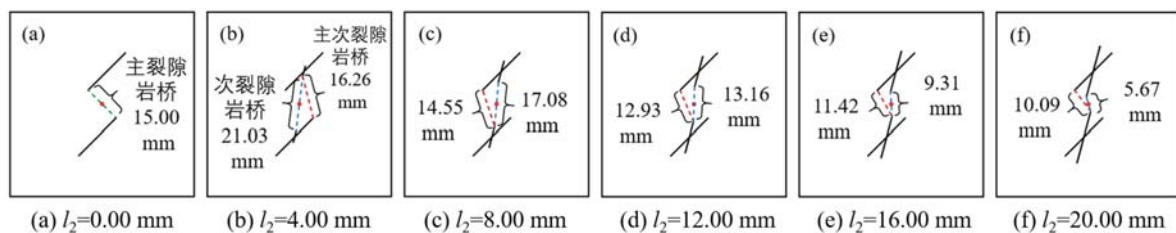


图 9 双交叉裂隙岩桥演化分析图

Fig. 9 Rock bridge evolution diagram of double-crossed cracks

3.2 岩桥尖端裂纹扩展路径

尖端裂纹的扩展路径主要受到剪切路径的影响,随着加载进程的推进,岩桥剪切路径处于动态变化的状态,其变化趋势为由外侧逐步向主导岩桥位置靠拢,为此,剪切路径直接影响着次生裂纹的扩展角度。

在次裂隙长度为 0.00mm 和 4.00mm 时,主导岩桥为主裂隙岩桥。在初始荷载阶段,剪切路径为主裂隙两端构成的双剪切线,即图 10(a)、(b)中的 CA、BD 两条黑色虚线,主裂隙和双剪切线形成一个近似平行四边形的受压区,如图 8(a)-II~(b)-II 所示。单轴压缩的试样在竖直方向处于压应力状态,水平方向处于拉应力状态,因此,随着荷载的提高,剪切线逐步向控制裂纹萌生的主裂隙岩桥靠拢。剪切线的起点在 A、D 不变,而终点则由 C、D 分别经过 H、E 点向 D、A 靠拢,最终两条剪切线合并于主裂

隙岩桥 AD 处,此现象与 3.1 节所讨论的次裂隙长度较短(或为零)时,主裂隙岩桥 AD 主导裂纹萌生的机理一致。

在次裂隙长度为 8.00mm 和 12.00mm 时,主导岩桥为二次裂隙岩桥。剪切线的起点在 A、D 不变,而终点则由 C、D 分别转向 H、E,最终两条剪切线分别转移至二次裂隙岩桥 AH 和 GE 处,如图 10(c)、(d)所示,此时,二次裂隙岩桥主导裂尖裂纹的萌生与扩展。

在次裂隙长度为 16.00mm 和 20.00mm 时,主导岩桥为二次裂隙岩桥。剪切线的终点在实时改变的同时,起点也在动态变化。初始阶段剪切线的起点在 A、D 不变,而终点则由 C、D 分别转向 H、E,而后,起点由 A、D 向 E、H 移动,最终两条剪切线合并于二次裂隙岩桥 EH 处,如图 10(e)、(f)所示,此时,二次裂隙岩桥主导裂尖裂纹萌生与扩展。

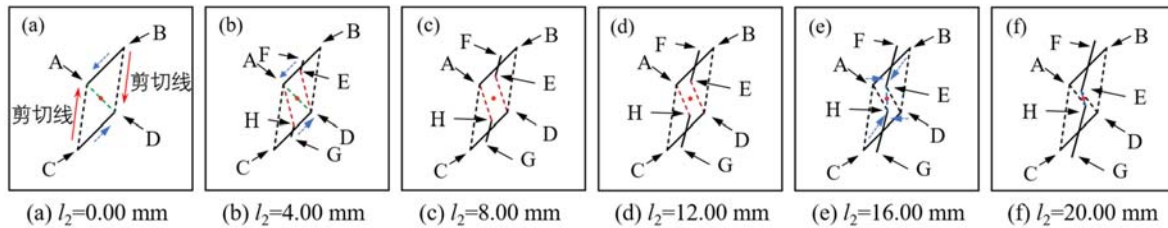


图 10 双交叉裂隙剪切路径图

Fig. 10 Shear road analysis diagram of double-crosse-flaws

本小节中的讨论均基于理论模型,在现实的物理试验过程中,试样难以保证绝对均质,加载环境也难以做到完全平行。在实际破坏过程中,裂纹会沿着两条剪切路径中的一条扩展,同时,剪切线转变过程也未必完全转移至主导岩桥处才会破裂。这也解释了为什么即便岩桥很短时,破裂路径也未在此岩桥上,即 $l_2=20.00\text{mm}$ 时,裂纹位于二次裂隙岩桥,而非主导岩桥(主裂隙岩桥),如表 3-⑥所示。

4 结论

(1) 随着次裂隙长度的增加,双交叉裂隙试样的峰值强度呈现先增加后减小的趋势。峰值强度在次裂隙长度为 12.00mm 时较平行裂隙试样增加 9.08%,此时,主裂隙岩桥和二次裂隙岩桥长度接近,整体结构受力协调,缓解了裂隙尖端应力集中的趋势,使得试样峰值强度提高。

(2) 双交叉裂隙试样由于次裂隙长度的改变,组合岩桥间裂纹的扩展形式存在显著不同,双交叉裂隙试样表现出 2 种压缩破坏模式,即主裂隙破坏和二次裂隙破坏。主裂隙破坏:内裂纹由主裂隙内裂尖处经岩桥向中心扩展,直至两条内裂纹贯通。二次裂隙破坏:内裂纹由主裂隙内裂尖处经岩桥向中心扩展,两条内裂纹未直接贯通,而是向对侧次裂隙内裂尖延伸并贯通。

(3) 双交叉裂隙试样压缩破坏过程中,应力集中于最短岩桥的两端,主导着起裂裂纹的形成,对应的岩桥称为主导岩桥,随着次裂隙长度的增加,双交叉裂隙主导岩桥也在动态变化。剪切路径随加载进程动态变化,其变化趋势为由外侧逐步向主导岩桥位置靠拢,尖端裂纹的扩展路径主要受到剪切路径的影响。随着加载进程的推进,岩桥剪切路径处于动态变化的状态,其变化趋势为由外侧逐步向主导岩桥位置靠拢,由此可见剪切路径直接影响着次生裂纹的扩展角度。

参考文献:

- [1] 蒲诚,刘奉银,陈蕴生. 非贯通裂隙岩体试件峰后力学特性的研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6):1121-1128 (PU Cheng, LIU Fengyin, CHEN Yunsheng. The study on post-peak mechanical properties of non-penetrating rock-like specimen[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1121-1128 (in Chinese))
- [2] Lin Q, Cao P, Wen G, et al. Crack coalescence in rock-like specimens with two dissimilar layers and pre-existing double parallel joints under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 139:104621.
- [3] 张艳博,徐跃东,刘祥鑫,等. 基于 CT 的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究[J]. 岩土力学, 2021, 42

- (10):2659—2671 (ZHANG Yanbo, XU Yuedong, LIU Xiangxin, et al. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10):2659—2671 (in Chinese))
- [4] 陈蕴生, 李光明, 韩铁林, 等. 单轴压缩荷载下“十字形”交叉裂隙类岩石试件的破坏模式与力学特性试验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(3):511—520 (CHEN Yunsheng, LI Guangming, HAN Tielin, et al. Experimental study on failure modes and mechanical properties of crisscross fractured rock samples under uniaxial compression conditions[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(3):511—520 (in Chinese))
- [5] 武旭. 非贯通交叉型节理岩体巷道围岩定向破裂机理与控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019 (WU Xu. Directional failure and control of surrounding rock with non-through cross-type jointed for tunnels[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019 (in Chinese))
- [6] Xiao P, Li D Y, Zhao G Y, et al. Mechanical properties and failure behavior of rock with different flaw inclinations under coupled static and dynamic loads[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10):2945—2958.
- [7] Wong L N Y, Einstein H H. Crack coalescence in molded gypsum and carrara marble: part 1. macroscopic observations and interpretation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(3):475—511.
- [8] Zhou X, Fu L, Cheng H, et al. Cracking behaviours of rock-like materials containing three preexisting flaws after high-temperature treatments[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, 44(3):622—635.
- [9] 蒲成志, 曹平, 陈瑜, 等. 不同裂隙相对张开度下类岩石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 (PU Chengzhi, CAO Ping, CHEN Yu, et al. Fracture test and failure mechanism of rock-like material of relatively different fracture apertures[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(8):2394—2399 (in Chinese))
- [10] Li S J, Zhang D M, Bai X, et al. Experimental study on mechanical properties, acoustic emission energies and failure modes of pre-cracked rock materials under uniaxial compression[J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(2):4519—4532.
- [11] Yang S Q, Jing H W. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression[J]. International Journal of Fracture, 2011, 168(2):227—250.
- [12] Lee H, Jeon S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(6):979—999.
- [13] Cheng H, Zhou X, Zhu J, et al. The effects of crack openings on crack initiation, propagation and coalescence behavior in rock-like materials under uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9):3481—3494.
- [14] 韩震宇, 李地元, 朱泉企, 等. 含端部裂隙大理岩单轴压缩破坏及能量耗散特性[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12):1588—1596 (HAN Zhenyu, LI Diyuan, ZHU Quanqi, et al. Uniaxial compression failure and energy dissipation of marble specimens with flaws at the end surface[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(12):1588—1596 (in Chinese))
- [15] Zhang B, Li Y, Yang X Y, et al. Influence of two cross-flaws geometry on the strength and crack coalescence of rock-like material specimens under uniaxial compression[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(8):04020134.
- [16] Zhou X P, Zhang J Z, Wong L N Y. Experimental study on the growth, coalescence and wrapping behaviors of 3D cross-embedded flaws under uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(5):1379—1400.
- [17] Ma G W, Dong Q Q, Wang L. Experimental investigation on the cracking behavior of 3D printed kinked fissure[J]. Science China(Technological Sciences), 2018, 61(12):1872—1881.
- [18] 张端. 类岩石材料三种非直裂隙破坏行为的试验与数值模拟研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020 (ZHANG Duan. Experimental and numerical simulation study on failure behavior of three non-straight fissures in rock-like materials[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020 (in Chinese))
- [19] 王宇, 李晓, 武艳芳, 等. 脆性岩石起裂应力水平与脆性指标关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2):

- 264—275 (WANG Yu, LI Xiao, WU Yanfang, et al. Research on relationship between crack initiation stress level and brittleness indices for brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2):264—275 (in Chinese))
- [20] 郭奇峰, 武旭, 蔡美峰, 等. 预制裂隙花岗岩的裂纹起裂机理试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2):476—483 (GUO Qifeng, WU Xu, CAI Meifeng, et al. Crack initiation mechanism of pre-existing cracked granite[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2):476—483 (in Chinese))
- [21] 王本鑫, 金爱兵, 孙浩, 等. 基于 DIC 的含不同角度 3D 打印粗糙交叉节理试样破裂机制研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2):439—450, 461 (WANG Benxin, JIN Aibing, SUN Hao, et al. Study on fracture mechanism of specimens with 3D printed rough cross joints at different angles based on DIC[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2):439—450, 461 (in Chinese))
- [22] Ma G W, Dong Q Q, Fan L F, et al. An investigation of non-straight fissures cracking under uniaxial compression [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 191:300—310.

Experimental study on rock bridges interaction and failure characteristics of double-cross-flaw

CHEN Kang, SHAO Yajian, WANG Youyu, MA Guowei

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: A double-cross-flaw is the basic unit of non-persistent cross joints in the engineering rock mass. The change of the geometric parameters of the flaws brings about the change in the rock-bridge combination, and forms the rock-bridge interaction, which has a direct impact on the initiation, expansion, penetration, and failure of the double-cross-flaw. In this paper, double-cross-flaw specimens with different minor-flaw lengths were prepared by 3D printing with photosensitive resin, and treated at low temperatures to make them brittle. The uniaxial compression test was carried out to obtain the mechanical properties of the specimen, the deformation behavior of the specimen was analyzed by DIC (Digital Image Correlation), and the crack initiation and propagation process were captured by a high-speed camera. The results show that with the increase of the minor-flaw length, the peak strength of the double-cross-flaw specimen showed a trend of increasing first and then decreasing. During the compression failure process of the specimen, the two ends of the shortest rock bridge (or the dominant rock bridge) were the first to generate stress concentration, which dominated the formation of the initial crack. The propagation path of the tip crack is mainly affected by the shear path, and the shear path changes dynamically with the loading process, that is, it gradually moves closer to the dominant rock bridge position from the outside, which controls the propagation angle of the secondary crack.

Keywords: cross-flaw; mechanical behavior; failure mode; 3D printing; DIC analysis