

文章编号: 1001-4888(2024)02-0195-13

# 压剪荷载作用下红砂岩裂纹尖端应变 分布特征及起裂机理研究\*

左金涛<sup>1,2</sup>, 卓莉<sup>1,2</sup>, 刘怀忠<sup>1,2</sup>, 谢红强<sup>1,2</sup>, 何江达<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川成都 610065; 2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川成都 610065)

**摘要:** 岩石在纯剪切荷载作用下, 断裂类型都为 I 型或者复合型断裂, 为了研究 II 型断裂, 有必要探索压剪荷载共同作用下的断裂机理。本文首先利用剪切盒装置对双边切口的红砂岩试样进行加载试验, 然后通过数字图像相关(DIC)技术对试样切口尖端及岩桥上的应变状态进行分析, 最后对裂纹起裂机理做出判断。试验结果显示, 剪切角为  $30^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$  时, 试样均从切口尖端起裂, 并且起裂裂纹沿岩桥所在平面有不同程度偏转; 剪切角为  $70^{\circ}$  时, 试样从岩桥中部起裂, 起裂裂纹沿着岩桥所在平面扩展。分析试样断裂特征及 DIC 试验数据后得到的主要结论如下: 随着剪切角的增大, 起裂平面张拉位移最大值和滑移位移最大值之比逐渐增大, 起裂机理逐渐由剪切断裂转变为张拉断裂; 当剪切角为  $30^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$  时, 试样岩桥在初始裂缝平面上的应力状态始终处于压剪状态, 起裂机理为剪切主导的拉剪复合型断裂; 当剪切角为  $50^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$  时, 在加载前期, 试样岩桥在初始裂缝平面上的应力状态处于压剪状态, 但随着荷载进一步增大, 岩桥应力状态逐渐转变为拉剪状态, 起裂机理为拉剪复合型断裂; 当剪切角为  $70^{\circ}$  时, 试样岩桥上的应力状态在加载过程中始终存在拉应力, 并且随着荷载增大, 切口尖端也出现拉应力, 不能达到压剪状态, 裂纹起裂机理为张拉断裂。

**关键词:** 剪切盒试验; 压剪断裂; 数字图像相关(DIC)技术; 断裂机理

**中图分类号:** TU452 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-139

## 0 引言

1986 年, MELIN<sup>[1]</sup> 提出了一个问题: II 型断裂在什么样的条件下才能产生? 时至今日, 许多研究都在致力于寻找岩石产生 II 型断裂的起裂条件, 并尝试通过试验得到纯 II 型裂纹, 但始终没有得到确切的答案。

根据预制裂纹所处的应力状态, 断裂模式包括 3 种基本类型: mode I (张拉型)、mode II (平面内剪切型) 和 mode III (撕开型)<sup>[2-3]</sup>。按照此分类, 纯 II 型裂纹会在纯剪切荷载作用下扩展。基于此原理, 国内外学者提出了各种形态的岩石测试试样, 包括圆盘形试样<sup>[4-6]</sup>、围压冲剪试样、方形剪切盒试样等。对于圆盘型试样, JI 等<sup>[7]</sup> 的研究发现, 中心裂纹巴西圆盘试样(CCBD)和半圆盘弯曲试样(SCB)等在纯剪荷载条件下并不能产生纯 II 型断裂, 而只能产生 I 型断裂<sup>[8]</sup>。试样在纯 II 型荷载加载过程中都处于无围压状态, 并且试样的起裂机理为张拉断裂, 因此, 研究 II 型断裂有必要考虑围压状态<sup>[9]</sup>。

为了研究岩石在压剪荷载作用下的断裂机理, 合适的试验方法和有效的断裂机理判别方法缺一不

\* 收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-11-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52109135); 中国博士后科学基金面上资助项目(2019M653402)

通信作者: 卓莉(1986-), 女, 博士, 高级实验师。主要研究领域: 岩土力学实验。Email: zhuoli@scu.edu.cn

可。在众多Ⅱ型断裂韧度测试方法中,围压冲剪试验和剪切盒试验考虑了围压作用以抑制张拉裂纹的产生。BACKERS等<sup>[10]</sup>在2002年提出了围压冲剪试验,随后该试验方法被国际岩石力学学会建议为岩石Ⅱ型断裂韧度测试的标准方法<sup>[11]</sup>。但是,由于围压冲剪试样的圆形预制裂缝位于试样内部,使得试样制作相对烦琐且不容易对断裂机理做出判断。孙宗顺等<sup>[12]</sup>提出的剪切盒试验也考虑了围压,剪切盒试样在加载过程中同时受到法向力和剪切力作用,法向力使得试样在加载过程中处于有围压状态。剪切盒试验方法提出后,在断裂力学领域得到了广泛关注,RAO等<sup>[13]</sup>对脆性岩石在剪切盒加载时的断裂机理做了深入研究,CAO等<sup>[14]</sup>利用剪切盒装置研究了多裂隙混凝土的渐进破坏过程。相较于围压冲剪试样,剪切盒试样的直裂纹制作更加方便,并且剪切盒试样具有自由表面,方便对断裂机理做出判断,所以本文采用剪切盒试验开展研究。

数字图像相关(DIC)技术是一种有效的断裂机理判别技术,能够测量物体表面的位移场和应变场,具有全场性、非接触、试验设置简单和实时性的优点<sup>[15-16]</sup>。这些优点使得它被广泛应用于断裂研究<sup>[17]</sup>。BAHRAMI等<sup>[18]</sup>利用DIC技术测量了含切口有机玻璃板的复合断裂应力强度因子。吕琪等<sup>[19]</sup>基于DIC技术对花岗岩Ⅰ型断裂的渐进断裂特征进行了研究。

在本文研究中,制作了一系列双边切口的正方形板试样,通过可变角度剪切盒试验系统对试样进行不同角度的剪切加载,利用DIC技术对试样在加载过程中的表面位移及应变场进行深入分析,并对试样裂纹尖端的起裂机理进行判别。

## 1 试样制备与试验装置

### 1.1 试样制备

本文测试的岩石为四川省的红砂岩。通过单轴压缩试验得到该红砂岩的弹性模量为3.24GPa,泊松比为0.279。试样采用双边切口的正方形板(图1),尺寸为长度 $w=120\text{mm}$ 、宽度 $h=120\text{mm}$ 、厚度 $b=30\text{mm}$ ,在两对称边制作深度为 $a=24\text{mm}$ 的三角形切口作为初始切口。这样制作的原因有2个:(1)邱一平等<sup>[20]</sup>指出试样相对缝深 $2a/w \geq 0.6$ 时,岩板可沿预制裂纹尖端连线发生Ⅱ型剪切断裂,但两裂缝相互干扰较大,因此本文测试采用的相对缝深为 $2a/w=0.4$ ,以便减小两初始切口尖端应力场的相互影响。(2)在试样加载过程中,法向压力不断增大,三角形切口不会被压闭合,可有效避免闭合裂纹对测试产生影响。

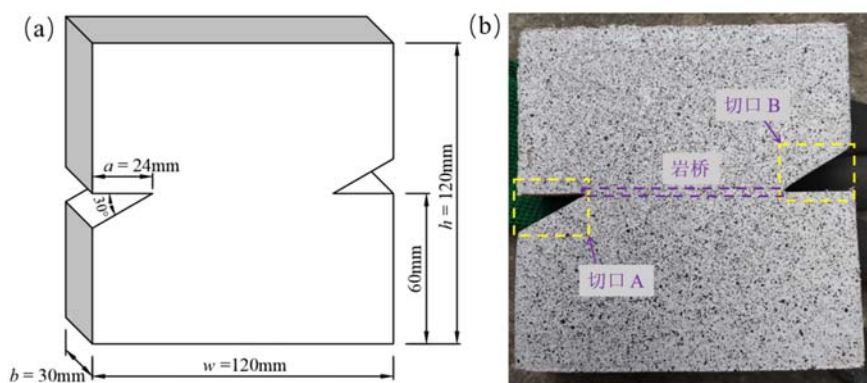


图1 测试试样:(a)几何示意图;(b)岩样及散斑形态

Fig.1 Test sample: (a) geometric diagram; (b) rock sample and speckle pattern

本文试验用DIC技术来判别岩石试样的断裂机理,试样表面散斑的制作对试验结果的准确性起着至关重要的作用,分布良好的散斑会增强散斑图形的对比性,并减小测量结果的偏差和噪点<sup>[17]</sup>。本文试验散斑的制作步骤如下:(1)用白色喷漆在试样表面轻喷一层;(2)待白色喷漆干了之后,再重复步骤(1)3到4次;(3)用黑色喷漆在白色表面进行喷制,喷制过程中控制黑点的大小,最终形成黑白相间的散斑。图1(b)展示了本文试验试样表面的散斑。

1.2 试验装置

将试样置于华龙液压伺服万能试验机上进行加载,其最大加载力为 2000kN。试验装置及 DIC 测试装置如图 2 所示。轴向荷载施加方向为竖直方向,采用位移控制,速率为 1mm/min。加载过程中,切向位移和法向位移分别用置于切向和法向的位移传感器进行记录,其中切向指预制切口尖端连线方向,法向与切口连线方向垂直。

剪切盒装置的夹具是可以旋转的,旋转范围为  $\alpha=0\sim 70^\circ$ (后文称  $\alpha$  为剪切角),不同旋转角度可以产生不同的法向力与剪切力比值。本文试验的剪切角  $\alpha$  分别设置为  $30^\circ、40^\circ、50^\circ、60^\circ、70^\circ$ ,每个剪切角条件下测试 2 个试样,共 10 个试样。试样的编号“RS-70-1”中,“RS”代表红砂岩,“70”代表剪切角  $\alpha$ ,“1”代表试样测试的序号。试样的几何尺寸、质量和加载角度见表 1。



图 2 剪切盒试验系统与 DIC 测试系统

Fig. 2 Shear box test system and DIC test system

表 1 红砂岩试样信息表

Tab. 1 Information of red sandstone samples

试样编号	加载角度/ $^\circ$	无切口边 /mm	有切口边 /mm	厚度 /mm	切口 A 深度/mm	切口 B 深度/mm	质量/g
RS-30-1	30	119.99	120.07	30.34	24.12	24.10	924.7
RS-30-2	30	119.64	119.83	30.11	23.95	24.11	926.2
RS-40-1	40	120.02	120.03	30.27	23.97	23.98	917.9
RS-40-2	40	119.98	119.92	30.23	24.22	23.92	915.1
RS-50-1	50	120.04	119.97	30.29	24.03	24.07	922.6
RS-50-2	50	119.86	119.79	30.11	23.85	24.00	884.1
RS-60-1	60	119.90	119.89	30.13	24.17	24.26	895.4
RS-60-2	60	119.82	119.74	30.20	24.20	24.09	912.5
RS-70-1	70	119.60	119.80	30.32	23.92	23.63	905.4
RS-70-2	70	120.12	120.33	30.39	24.26	24.15	925.5

DIC 测量系统包含 1 个高速相机、2 个 LED 灯和 1 台采集图像的计算机,高速相机的分辨率为  $2448\text{pixel}\times 2048\text{pixel}$ 。高速相机被固定在试样前面并与试样保持一定距离,镜头轴线垂直于喷有散斑的试样前表面,并且应保证试样在加载过程中不会移出镜头视野范围。LED 灯应调整到合适的位置,使得试样表面具有均布、柔和的光。利用图像采集软件以每秒 1 张的速度获取图像,利用 Ncorr 开源程

序<sup>[21]</sup>对这些图像进行处理,可以得到任意时刻的位移场、应变场,从而判断试样的起裂机理。利用 Ncorr 开源程序进行处理时,经过敏感性分析,设置主要参数子集半径为 20、子集间距为 5、应变半径为 25。

在试样后面布置 1 台普通彩色数码摄像机,以每秒 1 张的频率获取试样后表面的高清图像。与喷有散斑的前表面相比,从后表面的图像上可以直观地观察到试样表面裂纹的产生、扩展以及试样的破坏形态。通过对比试样前后表面的破坏形态,可以校核试样是否为偏心受压,若两者形态基本一致,则可认为试样为轴心受压,同时表明试验结果具有合理性。

## 2 试验结果分析

### 2.1 试样的变形与强度特征

通过试验可以获取的曲线有轴向荷载-轴向位移曲线、轴向荷载-切向位移曲线、轴向荷载-法向位移曲线。这里采用轴向荷载-切向位移曲线和轴向荷载-法向位移曲线来观察试样在不同剪切角条件下的变形和强度特征。

图 3(a)为不同剪切角对应的轴向荷载-切向位移曲线,由图可以看出,随着轴向荷载的增大,试样依次经历了压密阶段、弹性阶段、裂纹产生和扩展阶段、破坏阶段。在试验过程中首先将试样预加载至 1kN 来检查其偏心程度,故曲线均未从 0kN 开始。当剪切角为 30°时,弹性段持续的荷载范围最长,大致为 1535kN。随着加载角度的增大,弹性段持续的荷载范围逐渐减小。当剪切角为 70°时,弹性段持续的荷载范围最小,试样在进入弹性段后很快有宏观裂纹的产生和扩展。随着加载角度的增大,微观裂纹产生、扩展和聚集所需的荷载水平逐渐降低。在试样强度方面,随着剪切角的增大,试样所能承受的最大荷载逐渐减小。

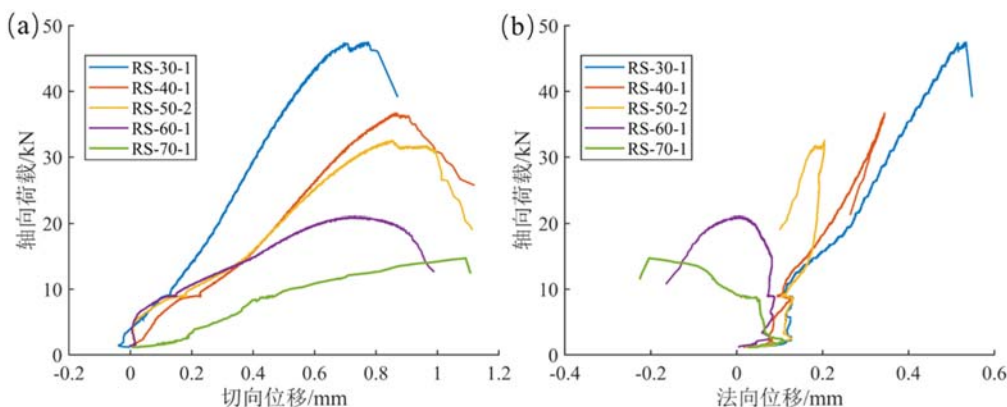


图 3 荷载-位移曲线:(a)轴向荷载-切向位移曲线;(b)轴向荷载-法向位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve: (a)axial load-tangential displacement curve;(b)axial load-normal displacement curve

与图 3(a)相比,轴向荷载-法向位移曲线并没有明显的阶段区分,如图 3(b)所示。整体来看,剪切角为 30°和 40°时,法向位移随着荷载的增大一直在增大;剪切角为 50°时,开始出现法向位移随荷载增大而减小的现象,这种现象产生的原因是岩石的剪胀效应,随着剪切角进一步增大,法向荷载分量逐渐减小,这种剪胀效应越来越明显。

### 2.2 试样的断裂特征

通过架立于试样前面的高速相机和后面的普通彩色数码相机,可以得到试样在加载过程中的裂纹起裂、扩展图像,进而利用这些图像分析试样在不同剪切角条件下的断裂特征。为了与后续 DIC 数据分析保持一致,这里采用试样前表面图像分析裂纹的产生过程以及裂纹形态。

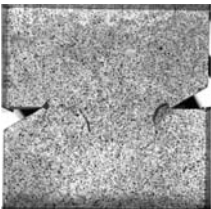
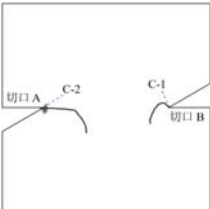
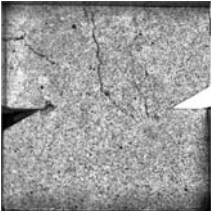
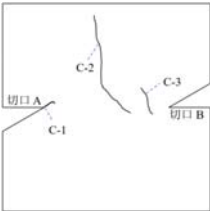
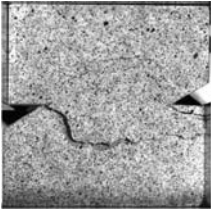

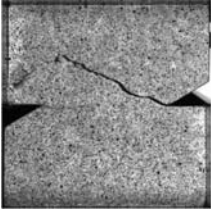
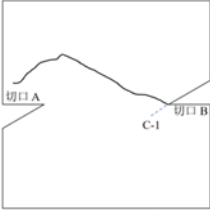
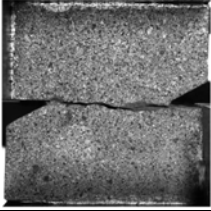
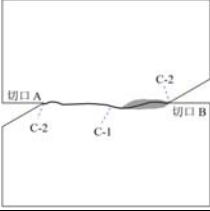
表 2 列举了试样在不同剪切角条件下的破坏形态以及相应的裂纹形态素描图。图中展示的是试样的最终破坏形态,为了反映裂纹的产生顺序,将 C-1、C-2 等裂纹编号标注在素描图中,代表裂纹的产生次序,例如 C-1 起裂早于 C-2。

对于 RS-30-1 试样,试样首先起裂于切口 B,然后再在切口 A 起裂并扩展,试样最终破坏时裂纹并

没有扩展很长,并且裂纹形态为曲线。对于 RS-40-1,试样首先在切口 A 起裂,但并没有进一步扩展,而是在试样中部出现 C-2 裂纹,之后在靠近切口 B 附近出现 C-3 裂纹。试样 RS-50-2 在加载过程中,首先在切口 A 起裂,然后不断向切口 B 扩展,最终形成了一条明显的宏观裂纹,此外在切口 B 附近出现了局部破坏。对于 RS-60-1,试样起裂于切口 B 并向切口 A 扩展,这条宏观裂纹的产生导致了试样的最终破坏。通过观察图像可见,试样 RS-70-1 并没有起裂于切口尖端,而是首先在岩桥中部 C-1 位置起裂,之后才在两切口附近起裂,岩桥中部的裂纹不断向两切口扩展,最终形成一条宏观裂纹,这是岩石劈裂的典型特征。剪切角为 70°的试样从岩桥中部起裂的原因在于:两切口尖端应力强度因子达到其断裂韧度之前,岩桥中部的拉应力已达到抗拉强度,故率先从岩桥中部起裂。整体来说,随着剪切角的增大,产生的裂纹由弯曲变得逐渐平直,试样的破坏由多条裂纹控制转变为由一条宏观裂纹控制。同时,由于剪切角在 30°~60°条件下试样均从切口尖端起裂,可以归为一类;试样在 70°的破坏可以单独归为一类,因为其裂纹从岩桥中部起裂。

表 2 不同剪切角条件下的试样断裂特征

Tab. 2 Fracture characteristics of specimens under different shear angles

试样编号	破坏后的试样	裂纹素描图	裂纹描述
RS-30-1			切口 B 先起裂并扩展
RS-40-1			切口 A 先起裂,试样中部和切口 B 后续起裂
RS-50-2			切口 A 起裂并扩展
RS-60-1			切口 B 起裂并扩展
RS-70-1			岩桥中部起裂向两侧扩展

### 3 基于 DIC 技术的断裂机理分析

#### 3.1 切口尖端及岩桥应变状态分析

根据线弹性断裂力学,Ⅱ型断裂(只有滑移没有张拉)应当在裂缝尖端处于纯剪应力状态下产生。

在剪切盒试验中,法向力和切向力同时作用在试样上,然而在加载过程中,切口尖端沿岩桥方向是否处于剪切应力和法向压应力共同作用仍然不得而知,因此,有必要分析切口尖端及岩桥上的应力状态。

通过 DIC 技术,可以直接得到试样表面的全场位移,通过式(1)~(3),可以计算得到相应的全场应变,式中  $u$ 、 $v$  为 2 个位移分量,  $\epsilon_{xx}$ 、 $\epsilon_{yy}$ 、 $\epsilon_{xy}$  为 3 个应变分量。

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left[ 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left[ 2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (3)$$

图像处理中,首先将不同剪切角下所获得的图像都分别逆时针旋转  $\alpha$  角,然后沿着岩桥方向和其法向建立 XOY 坐标系,用 Ncorr 开源程序计算切口面的剪应变  $\epsilon_{xy}$ 、法向正应变  $\epsilon_{yy}$  和切向正应变  $\epsilon_{xx}$ 。在 DIC 应变计算结果中,正值代表拉,负值代表压。

### 3.1.1 弹性阶段应变分析

图 4 展示了各剪切角条件下试样在弹性阶段的切口尖端及岩桥上应变  $\epsilon_{xx}$ 、 $\epsilon_{xy}$ 、 $\epsilon_{yy}$  的分布情况,其中试样 RS-30-1、RS-40-1、RS-50-2、RS-60-1 和 RS-70-1 均处于弹性加载阶段,应力状态分别为峰值荷载的 60%、60%、70%、70% 和 75%。图中  $\epsilon_{xx}$ 、 $\epsilon_{xy}$  代表岩桥在初始切口平面上的应变值,  $\epsilon_{yy}$  代表切口 A、切口 B 以及岩桥中部垂直方向的应变分量,图中各应变分量以  $10^{-3}$  计。

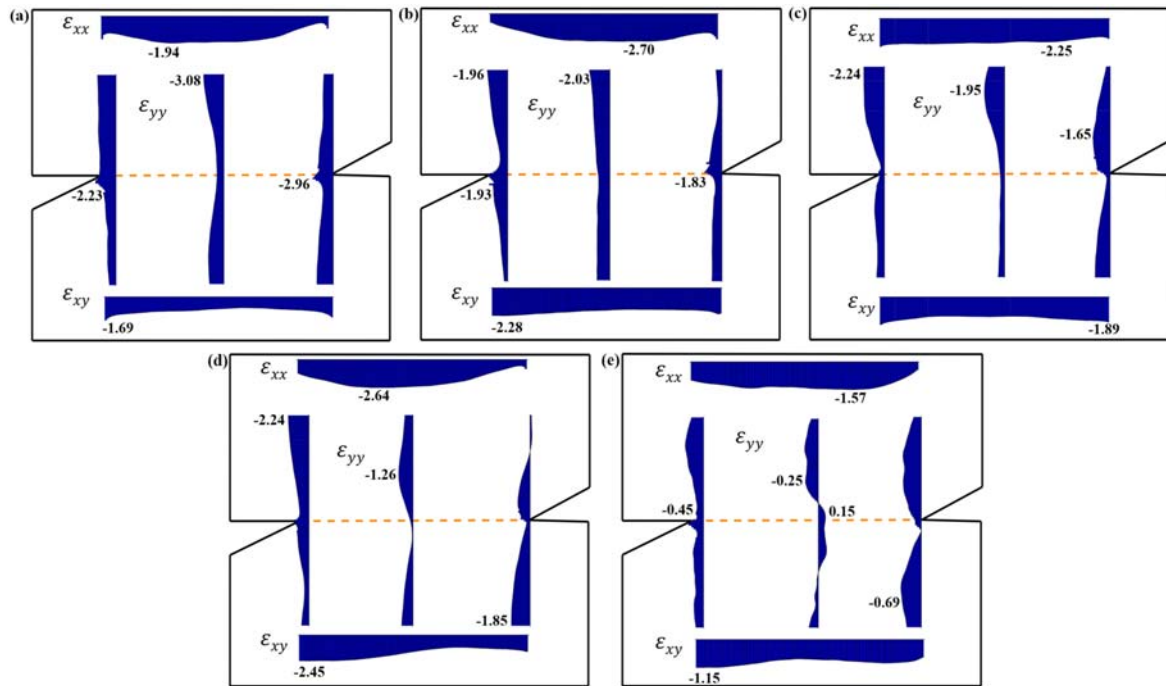


图 4 试样在弹性变形阶段的应变分量分布 ( $\times 10^{-3}$ ): (a) RS-30-1; (b) RS-40-1; (c) RS-50-2; (d) RS-60-1; (e) RS-70-1

Fig. 4 Strain component distribution of sample in elastic deformation stage ( $\times 10^{-3}$ ):

(a) RS-30-1; (b) RS-40-1; (c) RS-50-2; (d) RS-60-1; (e) RS-70-1

当剪切角为  $30^\circ$ 、 $40^\circ$  时,应变分量  $\epsilon_{yy}$  在切口 A、切口 B 尖端及岩桥中部都为负值,这说明切口尖端及岩桥上均为压应力。此外,切口两端都存在剪应变  $\epsilon_{xy}$ , 并且其值都为负值,说明两切口剪切方向一致;岩桥上的剪应变也为负值,说明岩桥上仍然存在剪应力,并且其方向与切口尖端的剪应力方向基本一致,因此,两切口尖端及岩桥均受到压剪应力共同作用。

当剪切角增大至  $50^\circ$ 、 $60^\circ$  时,应变分量分布规律基本与剪切角为  $30^\circ$  时的分布规律一致,即两切口尖端均受到压剪应力共同作用。但是剪切角为  $50^\circ$ 、 $60^\circ$  时,切口 B 附近的  $\epsilon_{yy}$  明显小于其余部位,这意味着相比于  $30^\circ$ ,在切口尖端压应力对于张拉断裂的抑制作用减弱。

当剪切角为  $70^\circ$  时,在切口尖端和岩桥上仍然可以观察到一定量值的剪应变  $\epsilon_{xy}$ ,说明剪应力仍然存在。然而  $\epsilon_{yy}$  的分布产生了明显的变化,虽然在远离岩桥的位置依然存在着压应变,但是岩桥中心出现了拉应变,这意味着岩桥上的压剪应力状态被打破。

综上所述,当剪切角在  $30^\circ \sim 70^\circ$  时,随着剪切角的增大,试样切口尖端以及岩桥上一直存在剪切应力,但是法向压应力逐渐减小,对切口尖端及岩桥上拉应力的抑制效果逐渐减弱。当剪切角在  $30^\circ \sim 60^\circ$  时,切口尖端及岩桥处于压剪应力状态;当剪切角为  $70^\circ$  时,由于拉应力的出现,岩桥上的压剪状态被打破。

### 3.1.2 峰值荷载阶段应变分析

随着荷载的进一步增大,宏观裂纹的产生可能会导致应力状态的改变,因此有必要分析裂纹刚产生时试样切口尖端及岩桥上的应力状态。图 5 展示了不同剪切角条件下试样切口尖端和岩桥在峰值荷载作用下的应变分布。

对于 RS-30-1 试样和 RS-40-1 试样,法向压力作用使得  $\epsilon_{yy}$  分量基本都为负值(压应变),同时岩桥上一直存在剪切应变  $\epsilon_{xy}$ 。说明在这种荷载条件下,试样切口尖端和岩桥在整个加载过程中均能始终维持压应力和剪切应力共同作用。对于 RS-50-2 和 RS-60-1 试样, $\epsilon_{xx}$  和  $\epsilon_{xy}$  分量在量值上相较于弹性段的量值有所增长,但分布形态并没有太多改变,说明岩桥上一直存在着剪应力。而切口尖端及岩桥上均出现了拉应变,说明随着轴向荷载的增大,法向压应力不足以抑制拉应力范围的扩大,切口尖端及岩桥上压剪应力状态逐渐被打破。当剪切角为  $70^\circ$  时,岩桥在弹性阶段就存在拉应变分量,随着轴向荷载不断增大,切口尖端也出现拉应变,如图 5(e) 所示,虽然  $\epsilon_{xy}$  分量也逐渐增大,但从岩桥上的  $\epsilon_{yy}$  应变分布可以看出,拉应变已经占据了主导地位。

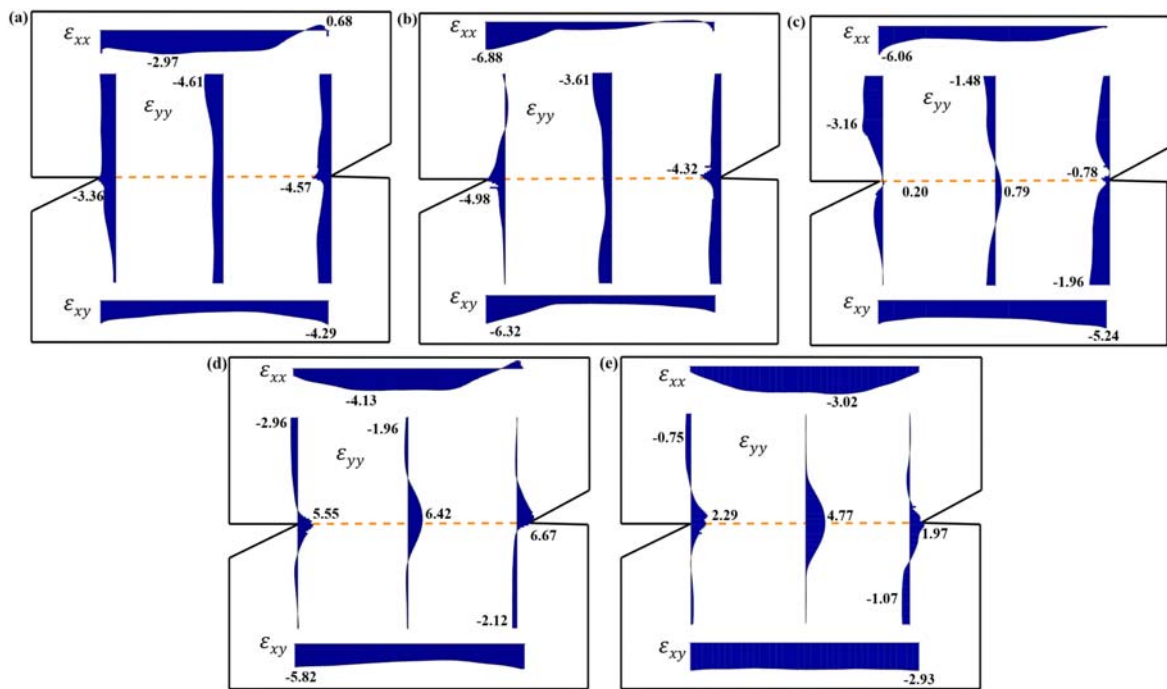


图 5 试样在峰值荷载作用下的应变分量分布 ( $\times 10^{-3}$ ): (a)RS-30-1; (b)RS-40-1; (c)RS-50-2; (d)RS-60-1; (e)RS-70-1

Fig. 5 Strain component distribution of sample under peak load ( $\times 10^{-3}$ ):

(a)RS-30-1; (b)RS-40-1; (c)RS-50-2; (d)RS-60-1; (e)RS-70-1

综合弹性阶段及峰值荷载阶段的应变分析,可以大致将不同剪切角代表的荷载条件分为 3 类:当剪切角为  $30^\circ$  和  $40^\circ$  时,试样切口尖端在加载过程中始终处于压剪状态;当剪切角为  $50^\circ$  和  $60^\circ$  时,试样切口尖端在加载前期处于压剪状态,但随着荷载的进一步增大,压剪状态逐渐被打破;当剪切角为  $70^\circ$  时,试样岩桥在加载过程中始终存在拉应力,随着荷载增大,拉应力范围逐渐扩大。

### 3.2 起裂机理分析

根据 2.2 节中对试样断裂特征的分析结果,试样在加载角为  $70^\circ$  时产生了明显的劈裂破坏,而试样在加载角为  $30^\circ \sim 60^\circ$  时的起裂机理还不能确定,本节将进一步利用 DIC 技术对其起裂机理进行分析。

断裂机理可以通过分析断裂面上的位移状态进行判断。比如,如果垂直于断裂面的位移为张拉位移,那么断裂机理为 I 型断裂;如果平行于断裂面的位移为滑移位移,那么断裂机理为 II 型断裂<sup>[7]</sup>。因此,通过分析 DIC 所获得的全场位移数据,可以识别以下断裂机理:(1) I 型断裂,断裂面位移为张拉位移;(2) II 型断裂,断裂面位移为滑移位移;(3)复合型断裂,断裂面位移包括张拉位移和滑移位移。通过断裂面上的位移状态判断断裂机理这一方法是 LIN 等<sup>[22]</sup>所提出的一种实用有效的方法,本文将采用此方法。

在 Ncorr 开源程序中,默认的坐标系为 XOY 坐标系,如图 6 左上角所示,为了将 XOY 坐标系转化为断裂面的坐标系  $X_1O_1Y_1$  ( $O_1$  为裂纹尖端,  $Y_1$  轴平行于断裂面,  $X_1$  轴垂直于断裂面),本文基于开源程序 Ncorr 进行了二次开发,位移转换流程如下:

- (1) 将各个加载角度的图像相应地逆时针旋转  $\alpha$  角,通过 DIC 分析可以得到 XOY 坐标系下的位移分量  $u$  和  $v$ 。
- (2) 根据 2.2 节的断裂特征分析结果,可以判断出最先起裂的切口尖端以及起裂的方向。
- (3) 基于式(4)和式(5),将位移分量  $u$  和  $v$  转化成断裂面  $X_1O_1Y_1$  坐标系下的位移分量  $u_1$  和  $v_1$ 。

$$u_1 = v \sin \theta + u \cos \theta \quad (4)$$

$$v_1 = -u \sin \theta + v \cos \theta \quad (5)$$

式中:  $u_1$  为沿着  $X_1$  轴的位移分量;  $v_1$  为沿着  $Y_1$  轴的位移分量;  $\theta$  为坐标变换角度,坐标轴顺时针旋转取  $\theta$  为正值,如图 6 所示。表 3 中总结了各试样的起裂特征以及坐标变换角度  $\theta$ 。

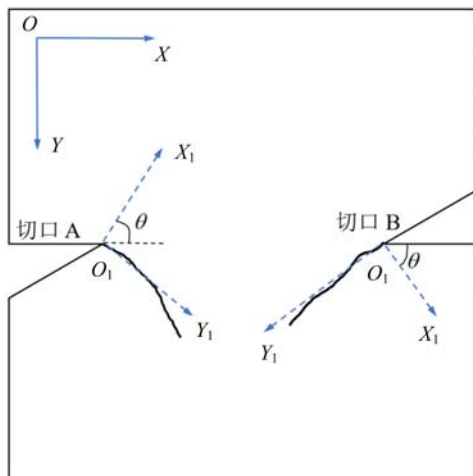


图 6 坐标转换示意图

Fig. 6 Coordinate conversion diagram

通过转换,位移分量  $u_1$  可代表垂直于起裂裂纹的法向位移,位移分量  $v_1$  可代表平行于起裂裂纹的切向位移。

当加载角度为  $30^\circ$  时,通过观察试验获得的 DIC 图像和图 3 中的荷载位移曲线,可确定右端切口最先产生裂缝,因此,在右端切口建立局部坐标系,如图 7 所示,此时试样处于峰值荷载阶段。从图中可以看出,裂纹起裂时,位移分量  $u_1$  等值线大致垂直穿过  $Y_1$  轴且在  $Y_1$  轴两侧分布较为对称,说明断裂面处的法向位移在  $Y_1$  轴两侧差异较小;位移分量  $v_1$  等值线在裂纹尖端附近平行于  $Y_1$  轴且在  $Y_1$  轴两侧颜色差异较为明显,说明断裂面处的切向位移在  $Y_1$  轴两侧差异较大,存在滑移位移。



表 3 各试样起裂特征  
Tab. 3 Cracking characteristics of each sample

试样编号	起裂位置	坐标变换角度 $\theta$
RS-30-1	切口 B	142°
RS-30-2	切口 B	149°
RS-40-1	切口 A	-138°
RS-40-2	切口 B	48°
RS-50-1	切口 B	132°
RS-50-2	切口 A	-52°
RS-60-1	切口 B	116°
RS-60-2	切口 B	98°
RS-70-1	岩桥中部	90°
RS-70-2	岩桥中部	90°

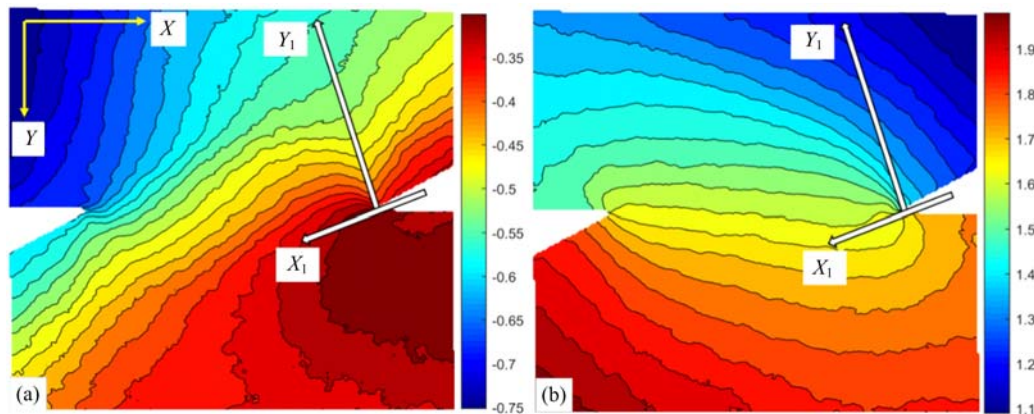


图 7 试样 RS-30-1 在局部坐标系下的位移分量：(a)位移分量  $u_1$ ；(b)位移分量  $v_1$

Fig. 7 Displacement component of sample RS-30-1 in local coordinate system:

(a) displacement component  $u_1$  ; (b) displacement component  $v_1$

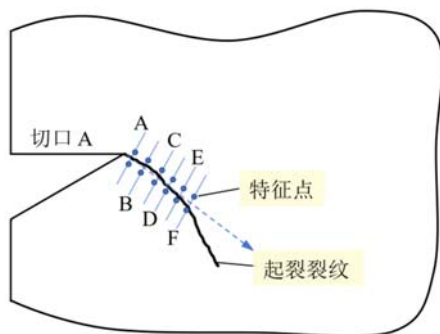


图 8 特征点与初始切口平面的相对位置关系

Fig. 8 The relative position of the feature points to the initial notch plane

为了更精确地判别断裂机理,在断裂面两侧( $X_1 = \pm 0.6\text{mm}$ )对称地选取 6 组特征点,6 组特征点形成垂直于断裂面的 6 个剖面,各组特征点与初始切口平面的位置关系如图 8 所示,6 个剖面与切口尖端的距离分别为 1mm、2mm、3mm、4mm、5mm、6mm,原点位置为切口尖端。图 8 中,由于起裂裂纹并非是一条严格的直线,为了便于分析,选取垂直于切口尖端起裂裂纹面切线方向(即图 8 中带箭头虚线)的剖面开展分析。分析每组特征点的位移分量差值在加载过程中的变化情况,位移分量  $u_1$  的差值变化情况即为张拉位移的变化,位移分量  $v_1$  的差值变化情况即为滑移位移的变化。这样分析的原因有以下几个方面:(1)理想的裂纹是一条线,但现实的裂纹是一个条带,沿裂纹方向左右两侧一定范围都属于破坏区。(2)越靠近裂纹产生的区域,位移的分布会变得越来越复杂,这可能会导致 DIC 计算结果产生较大的误差。(3)在不同剪切角条件下用于 DIC 分析的图像中,切口尖端裂纹扩展的最小长度大致为 6mm,所以特征剖面与切口尖端的最大距离取为 6mm。

为了更精确地判别断裂机理,在断裂面两侧( $X_1 = \pm 0.6\text{mm}$ )对称地选取 6 组特征点,6 组特征点形成垂直于断裂面的 6 个剖面,各组特征点与初始切口平面的位置关系如图 8 所示,6 个剖面与切口尖端的距离分别为 1mm、2mm、3mm、4mm、5mm、6mm,原点位置为切口尖端。图 8 中,由于起裂裂纹并非是一条严格的直线,为了便于分析,选取垂直于切口尖端起裂裂纹面切线方向(即图 8 中带箭头虚线)的剖面开展分析。分析每组特征点的位移分量差值在加载过程中的变化情况,位移分量  $u_1$  的差值变化情况即为张拉位移的变化,位移分量  $v_1$  的差值变化情况即为滑移位移的变化。这样分析的原因有以下几个方面:(1)理想的裂纹是一条线,但现实的裂纹是一个条带,沿裂纹方向左右两侧一定范围都属于破坏区。(2)越靠近裂纹产生的区域,位移的分布会变得越来越复杂,这可能会导致 DIC 计算结果产生较大的误差。(3)在不同剪切角条件下用于 DIC 分析的图像中,切口尖端裂纹扩展的最小长度大致为 6mm,所以特征剖面与切口尖端的最大距离取为 6mm。

图9展示了试样RS-30-1的特征点在加载过程中张拉位移和滑移位移的变化情况。随着试验的进行,断裂面张拉位移和滑移位移的差值都在不断增大,直至试验结束;并且越靠近切口尖端,位移的差值越大,说明在切口尖端起裂过程中,断裂面既存在法向张拉位移也存在沿断裂面的滑移位移,即断裂机理为复合型断裂。张拉位移的最大值为0.046mm,而滑移位移的最大值为0.132mm,远大于前者,这可以说明剪切应力在尖端宏观裂纹产生过程中占据了主导地位。剪切角为 $40^\circ$ 条件下的位移差值变化规律与上述规律基本一致,其起裂机理也为剪切应力主导的复合型断裂。

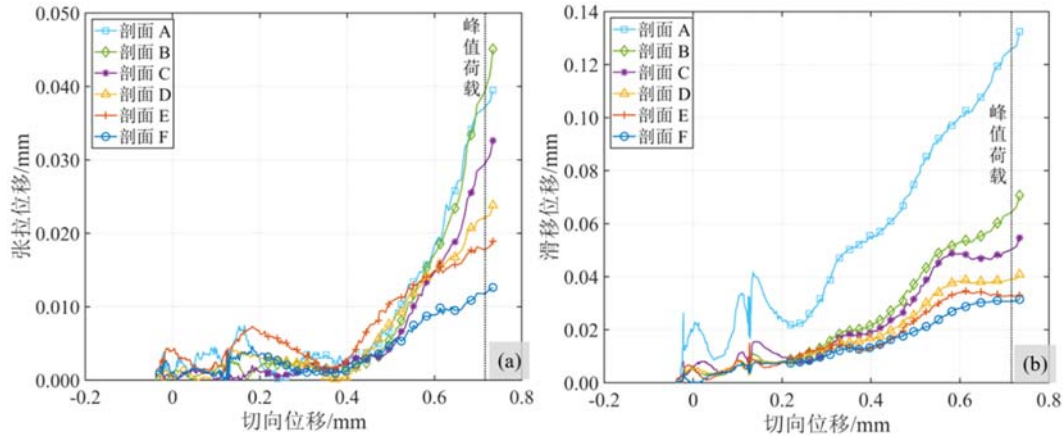


图9 试样RS-30-1特征点法向位移差值变化和切向位移差值变化:(a)张拉位移;(b)滑移位移

Fig.9 The change of normal displacement difference and tangential displacement difference of sample RS-30-1 feature points:(a) tensile displacement;(b) sliding displacement

当剪切角为 $50^\circ$ 时,通过观察试验获得的DIC图像和图3中的荷载位移曲线,可以确定左端切口最先产生裂缝,因此,在左端切口建立局部坐标系。试样RS-50-2的位移分量 $u_1$ 、 $v_1$ 等值线分别如图10所示,此时试样处于峰值荷载阶段。位移分量 $u_1$ 等值线在切口附近平行于 $Y_1$ 轴且在 $Y_1$ 轴两侧颜色差异较大,说明断裂面存在显著的张拉位移。此外,位移分量 $v_1$ 等值线在 $Y_1$ 轴两侧也存在一定的差异,因此可以初步判断,试样RS-50-2的起裂机理为复合型断裂。试样RS-50-2特征点法向位移差值变化和切向位移差值变化如图11所示,特征点位移差值变化规律与剪切角为 $30^\circ$ 条件下的变化规律基本一致。特征点张拉位移的最大值约为0.34mm,而滑移位移的最大值约为0.30mm,两者较为接近。剪切角为 $60^\circ$ 条件下的位移差值变化规律与上述规律基本一致,因此试样在剪切角为 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 条件下的起裂机理为复合型断裂。

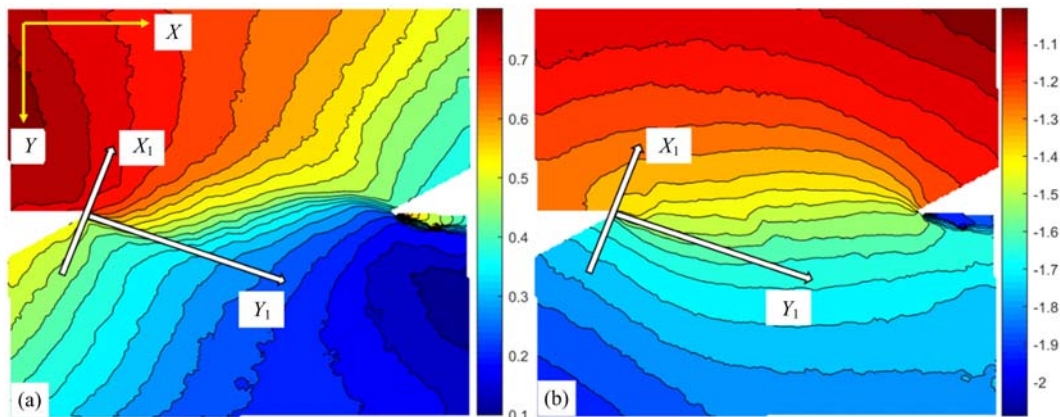


图10 试样RS-50-2在局部坐标系下的位移分量:(a)位移分量 $u_1$ ;(b)位移分量 $v_1$

Fig.10 Displacement component of sample RS-50-2 in local coordinate system;

(a) displacement component  $u_1$ ; (b) displacement component  $v_1$

将表2中典型破坏试样的张拉位移和滑移位移情况统计在表4中,表中将张拉位移最大值与滑移

位移最大值的比值定义为比值  $\beta$ , 该值能在一定程度上反映拉应力和剪应力在裂纹产生过程中的影响。随着剪切角的增大, 比值  $\beta$  逐渐增大, 说明拉应力对于裂纹产生的影响逐渐超过剪应力。值得注意的是, 在剪切角处于  $40^\circ$  和  $50^\circ$  之间时, 比值  $\beta$  从小于 1 变为大于 1, 这意味着在该范围内存在拉应力和剪应力影响趋于一致的阶段, 当剪切角小于该范围时, 剪切应力在裂纹的产生过程中占据主导地位, 当剪切角大于该范围时, 拉应力则占据主导地位。

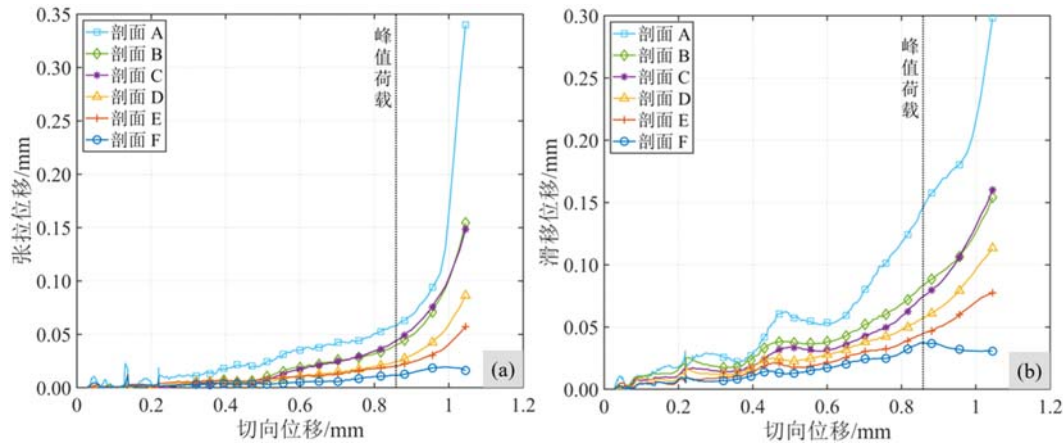


图 11 试样 RS-50-2 特征点法向位移差值变化和切向位移差值变化: (a) 张拉位移; (b) 滑移位移

Fig. 11 The change of normal displacement difference and tangential displacement difference of sample RS-50-2 feature points: (a) tensile displacement; (b) sliding displacement

表 4 典型试样断裂特征参数

Tab. 4 Fracture characteristics of typical samples

试样编号	张拉位移最大值/mm	滑移位移最大值/mm	比值 $\beta$	断裂机理
RS-30-1	0.046	0.132	0.348	剪应力主导型复合断裂
RS-40-1	0.170	0.210	0.810	剪应力主导型复合断裂
RS-50-2	0.340	0.300	1.133	拉应力主导型复合断裂
RS-60-1	0.170	0.150	1.133	拉应力主导型复合断裂

## 4 结论

本文采用剪切盒试验及 DIC 全场应变分析技术, 研究了双边切口红砂岩试样在不同剪切角条件下的断裂机理, 得出如下结论:

(1) 随着剪切角的增大, 试样的轴向峰值荷载减小; 在剪切角为  $30^\circ \sim 60^\circ$  时, 试样均从切口尖端起裂, 起裂裂纹沿岩桥所在平面产生偏转; 在剪切角为  $70^\circ$  时, 试样从岩桥中部起裂, 并且起裂裂纹沿着岩桥所在平面扩展。

(2) 通过分析弹性阶段及峰值荷载阶段切口尖端及岩桥上的应变状态可得, 试样的应力状态可以分为 3 类: 当剪切角为  $30^\circ, 40^\circ$  时, 试样岩桥在初始裂缝平面上的应力状态在加载过程中始终处于压剪状态; 当剪切角为  $50^\circ, 60^\circ$  时, 试样岩桥在初始裂缝平面上的应力状态在加载前期处于压剪状态, 但随着荷载的进一步增大, 压剪状态逐渐被打破; 当剪切角为  $70^\circ$  时, 试样岩桥上的应力状态在加载过程中始终存在拉应力, 并且随着荷载增大, 拉应力范围逐渐扩大。

(3) 当剪切角为  $30^\circ \sim 60^\circ$  时, 通过对位移云图及断裂面两侧特征点位移的分析可知, 断裂面两侧同时存在着张拉位移和滑移位移, 试样切口起裂机理均为复合型断裂; 剪切角为  $30^\circ, 40^\circ$  时, 张拉位移与滑移位移比值  $\beta$  小于 1, 表现为剪切应力主导的复合型断裂; 随着加载角度的增大, 张拉位移与滑移位移比值  $\beta$  逐渐增大并且大于 1, 张拉效应逐渐增强; 当剪切角为  $70^\circ$  时, 试样的起裂机理呈现为典型的岩桥中部张拉劈裂破坏。

## 参考文献:

- [1] MELIN S. When does a crack grow under mode II conditions? [J]. *International Journal of Fracture*, 1986, 30(2):103–114.
- [2] 杨秀锟, 谢秦, 刘希灵, 等. II型加载条件下页岩断裂行为的预测研究[J]. *实验力学*, 2023, 38(1):109–118 (YANG Xiukun, XIE Qin, LIU Xiling, et al. Prediction of shale fracture behavior under mode II loading[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2023, 38(1):109–118 (in Chinese))
- [3] 何强, 卓莉, 刘怀忠, 等. 边切斜裂缝岩石单轴压缩缝尖起裂机理试验研究[J]. *实验力学*, 2023, 38(1):28–36 (HE Qiang, ZHUO Li, LIU Huaizhong, et al. Experimental study on the mechanism of tip initiation in uniaxial compression fracture of rock with slope fracture[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2023, 38(1):28–36 (in Chinese))
- [4] BAHRAMI B, NEJATI M, AYATOLLAHI M R, et al. Theory and experiment on true mode II fracturing of rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 240(10):25–44.
- [5] CHANG S H, LEE C I, JEON S. Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens[J]. *Engineering Geology*, 2002, 66(2):79–97.
- [6] AYATOLLAHI M R, ALIHA M R M. On determination of mode II fracture toughness using semi-circular bend specimen[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43(17):5217–5227.
- [7] JI W W, PAN P Z, LIN Q, et al. Do disk-type specimens generate a mode II fracture without confinement? [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 87(10):48–54.
- [8] 谢海峰, 饶秋华, 谢强, 等. 脆性岩石高温剪切(II型)断裂的微观机理[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8):1534–1540 (XIE Haifeng, RAO Qiuhua, XIE Qiang, et al. Microscopic mechanism of high temperature shear (mode II) fracture of brittle rock[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(8):1534–1540 (in Chinese))
- [9] 何廉, 朱哲明, 任利, 等. 法向压缩载荷对II型裂纹扩展的影响规律研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(增刊2):80–85 (HE Lian, ZHU Zheming, REN Li, et al. Study on the effect of normal compression load on type II crack propagation[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2016, 48(Supp. 2):80–85 (in Chinese))
- [10] BACKERS T, STEPHANSSON O, RYBACKI E. Rock fracture toughness testing in mode II – punch-through shear test[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(6):755–769.
- [11] BACKERS T, STEPHANSSON O. ISRM suggested method for the determination of mode II fracture toughness [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(6):1011–1022.
- [12] 孙宗颀, 饶秋华, 王桂尧. 剪切断裂韧度( $K_{IIc}$ )确定的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(2):199–203 (SUN Zongqi, RAO Qiuhua, WANG Guiyao. Study on determination of shear fracture toughness ( $K_{IIc}$ ) [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2):199–203 (in Chinese))
- [13] RAO Q H, SUN Z Q, STEPHANSSON O, et al. Shear fracture (mode II) of brittle rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(3):355–375.
- [14] CAO R H, CAO P, LIN H, et al. Failure characteristics of intermittent fissures under a compressive-shear test: experimental and numerical analyses[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2018, 96:740–757.
- [15] LIN Q, JI W W, PAN P Z, et al. Comments on the mode II fracture from disk-type specimens for rock-type materials[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 211:303–320.
- [16] 郝元灏, 李艳杰, 张昊, 等. 基于DIC的退火NiTi合金断裂力学行为研究[J]. *实验力学*, 2022, 37(2):243–252 (HAO Yuanhao, LI Yanjie, ZHANG Hao, et al. Fracture mechanical behavior of annealed NiTi alloy based on DIC[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(2):243–252. (in Chinese))
- [17] PAN B, QIAN K, XIE H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6):65–79.
- [18] BAHRAMI B, AYATOLLAHI M R, TORABI A R. Application of digital image correlation method for determination of mixed mode stress intensity factors in sharp notches[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124(1):105–114.

- [19] 吕琪, 高经武, 武晋文, 等. 基于数字图像相关方法的鲁灰花岗岩断裂特性研究[J]. 实验力学, 2018, 33(4):627—633 (LÜ Qi, GAO Jingwu, WU Jinwen, et al. Fracture characteristics of luhui granite based on digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4):627—633 (in Chinese))
- [20] 邱一平, 戚靖骅, 吴雪萍, 等. 大理岩 II 型断裂规律试验及数值模拟分析[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(4):553—560 (QIU Yiping, QI Jinghua, WU Xueping, et al. Experimental and numerical simulation analysis of mode II fracture law of marble[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(4):553—560 (in Chinese))
- [21] BLABER J, ADAIR B, ANTONIOU A. Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(6):1105—1122.
- [22] LIN Q, YUAN H, BIOLZI L, et al. Opening and mixed mode fracture processes in a quasi-brittle material via digital imaging[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 131:176—193.

## Study on strain distribution characteristics and fracture initiation mechanism at crack tip of red sandstone under compressive shear load

ZUO Jintao<sup>1,2</sup>, ZHUO Li<sup>1,2</sup>, LIU Huaizhong<sup>1,2</sup>, XIE Hongqiang<sup>1,2</sup>, HE Jiangda<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** In the pure shear state of rock, the fractures are all mode I or mixed mode. In order to study the mode II fracture, it is necessary to explore the fracture mechanism under the combined action of compressive shear load. In this paper, the shear box device was used to load the doubled-edge notched red sandstone samples. The strain state on the sample's notch tip and rock ligament was analyzed using the digital image correlation (DIC) technique, and the crack initiation mechanism was determined. The test results revealed that when the shear angle was  $30^\circ$  to  $60^\circ$ , all samples cracked from the notch tip, with varying degrees of fracture deflection along the rock bridge plane. When the shear angle was  $70^\circ$ , the sample cracked from the middle of the rock bridge, and the fracture propagated along the rock bridge plane. By analyzing the fracture characteristics of samples and DIC test data, the main conclusions were drawn: with the increase of shear angle, the ratio of maximum tensile displacement and maximum sliding displacement gradually increased, and the fracture mechanism changed from shear fracture to tensile fracture. when the shear angle was  $30^\circ$  and  $40^\circ$ , the stress state of the sample rock bridge at the initial fracture plane remained in the compressive shear state, with the fracture mechanism dominated by shear-induced tensile shear mode. When the shear angle was  $50^\circ$  and  $60^\circ$ , the stress state of the rock bridge initially remained in the compressive shear state, but with further load increase, it gradually transitioned to a tensile shear state, resulting in a mixed fracture mechanism of tensile shear. When the shear angle was  $70^\circ$ , tensile stress always existed in the loading process of the specimen rock bridge. Moreover, with increased load, tensile stress also appeared along the initial crack plane of the notch tip, which cannot reach the compression shear state, and the crack initiation mechanism is a tensile fracture.

**Keywords:** shear box test; compressive shear fracture; digital image correlation technique; fracture mechanism