文章编号：1001-4888(2023)01-0028-09

边切斜裂缝岩石单轴压缩缝尖起裂机理试验研究*

何强，卓莉，刘怀忠，谢红强，肖明砾
（四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，水利水电学院，四川成都 610065）

摘要： 为研究岩石在压剪荷载作用下的断裂特性，在岩石试样侧边切斜裂缝，预制角度分别为30°、45°、60°的初始裂纹，利用 TAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机进行单轴压缩断裂试验。试验结果表明：边切斜裂缝岩石单轴压缩试样表现为明显脆性，其峰值荷载随初始裂纹角度的增大而增大，大角度初始裂纹具有更高的安全性；试样从预制裂纹尖端开始起裂，并产生向荷载作用方向扩展的翼型裂纹或反翼裂纹，缝尖裂纹扩展初期先受到压剪应力作用，随着裂纹逐渐扩展过程转变为拉应力作用，试样的最终破坏由张拉裂纹主导破坏，初始裂纹角度为45°、60°时伴随部分剪切破坏；裂纹起裂角度随初始裂纹角度的增大而呈现增大趋势，且在初始裂纹角度为 60°时，同时出现了反翼裂纹与翼裂纹，起裂模式及角度的控制因素为沿扩展路径方向上法向应力值的相对大小。

关键词： 砂岩；断裂机理；边裂纹；裂纹扩展；起裂角
中图分类号： TU452 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-22-090

0 引言

岩体含有大量节理、裂隙等缺陷，这些缺陷的数量及贯通情况严重影响岩体的变形及破坏特征，诸多岩体工程的失稳均是由缺陷的扩展贯通和相互作用诱发的[1-3]。因此，对岩石内部裂隙的萌生、扩展、贯通机理进行研究具有重要工程意义。

岩石等脆性材料的平面断裂模式可以分为 I 型和 II 型，目前国内外学者针对 I 型断裂开展了大量的试验研究[4-8]，而关于 II 型断裂的试验研究相对缺乏。为了实现 II 型剪切裂纹优先起裂，Rao[9]、Reinhardt[10]、Backers[11]等分别提出了采用剪切盒试验、两端切口纯剪断裂试验、围压下的冲压剪切试验研究 II 型断裂。2012 年，国际岩石力学学会(ISRM)建议采用 Backers 等[11]的试验方法确定 II 型断裂韧度，这也是 ISRM 建议的首个 II 型断裂韧度的测试方法。与这些标准试验方法不同，单轴压缩断裂试验由于测试简单，常被用于研究预制裂纹的扩展问题。Fujii 等[12]对边切斜裂缝的岩石和砂浆试件进行单轴压缩试验，观察到了优先起裂的剪切单裂纹。刘伟韬等[13]对含预制 45°中心裂纹的圆柱试样开展不同围压力学试验，探究了围压对裂纹起裂的影响。曹平等[14]通过室内试验研究了单轴加载下预制中心裂纹的贯通模式、多裂纹试样的破坏模式、压剪复合作用下混合裂纹间的贯通类型与破碎规律。董晗[15]对含中心斜裂纹的岩石试样开展试验，研究了考虑塑性区的裂纹扩展规律。鲜于文攀[16]对含预制裂纹类岩石材料开展双轴压缩试验，并对裂隙破坏过程进行了划分。徐军[17]对非穿透裂纹的扩展和连接特性开展了试验研究，将裂纹扩展分为翼裂纹、次生裂纹以及连接裂纹，认为预制裂纹的初始角度对裂纹的产生和扩展具有影响。郭奇峰等[18]采用声发射等多种监测手段对预制裂隙花岗岩的裂纹起

* **收稿日期：** 2022-04-10；**修回日期：** 2022-05-19
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项目(2019M653402)资助
通信作者： 卓莉(1986－)，女，博士，副教授。主要研究领域：岩石力学与工程。Email：zhuoli@scu.edu.cn

裂机理开展了研究。此外，张保良等[19]对脆性类岩石材料边缘裂纹扩展规律开展了试验与数值模拟研究，认为试样的破坏不因裂纹宽度改变而改变，试样最终破坏均是以拉伸破坏为主。

上述单轴压缩断裂试验大多在岩石内部预制初始裂纹，容易在裂纹边壁产生平行于加载方向的张拉翼型裂纹，不利于缝尖断裂机理研究，而在岩石表面预制初始裂纹能够有效克服这一缺点，但相关研究较少。因此，本文对含边裂纹的岩石材料开展单轴压缩试验，旨在研究缝尖起裂特征和扩展规律，分析岩石表面初始裂缝倾角与裂纹起裂角的关系。

1　试样制备及试验设计

测试试样青砂岩是一种经风化、剥蚀、搬运、沉积在盆地中硅质胶结的沉积岩，取自四川省隆昌市。通过开展常规单轴、三轴试验和巴西劈裂试验获取了青砂岩的基本力学参数，其弹性模量为 11.55GPa，泊松比为 0.21，单轴抗压强度为 49.14MPa，抗拉强度为 5.06MPa，内摩擦角为 31°，黏聚力为 22.64MPa。

1.1　断裂试样制备

将岩石试样切割、打磨加工为边切斜裂缝矩形体，尺寸为：宽度 $w=60$mm，高度 $h=120$mm，厚度 $t=60$mm。预制裂隙为贯穿裂隙，长度 $a_0=20$mm，缝宽 $t_0=1$mm，裂隙与水平方向的夹角为 φ。为研究不同初始倾角对裂纹扩展模式及角度的影响，等角度间距预制初始裂隙，分别预制倾角为 30°、45°、60° 的裂隙，裂隙分布特征如图 1 所示。

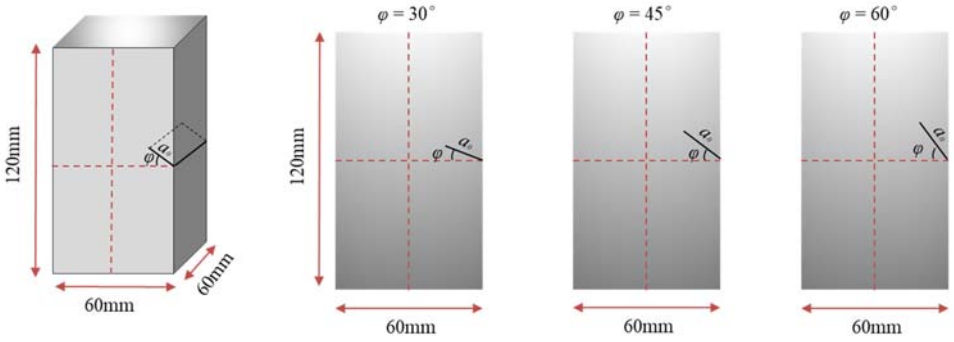


图 1　边切直裂缝矩形体试样示意图

Fig. 1　Sketches of rectangular samples with edge cutting straight crack

为了预制尖锐缝尖，首先在机床上将斜裂缝深度加工至 18mm，之后使用刀刃被研磨锋利的锯条对各试样进行二次精削，使裂纹深度和尖端形态均满足试验要求，缝尖切削前后对比图如图 2 所示。各试样尺寸及质量见表1。

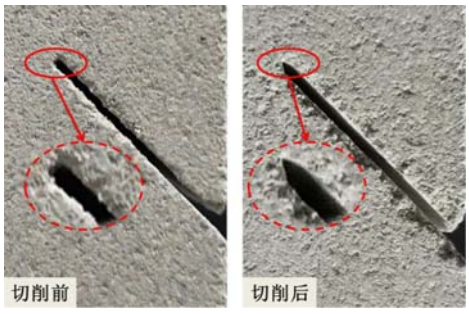


图 2　缝尖切削前后对比图

Fig. 2　Comparison ofcrack tip before and after cutting

表 1 试样尺寸及质量

Tab. 1 Sample size and quality

试样编号	初始裂纹角度 φ/(°)	高度 h /mm	宽度 w /mm	厚度 t /mm	裂缝深度 a_0 /mm	质量 m /g
s-30-1	30	119.86	59.99	59.92	19.30	989.20
s-30-2	30	119.68	59.98	59.97	19.30	984.00
s-30-3	30	119.67	59.85	59.90	19.45	986.80
s-45-1	45	119.83	60.03	60.05	19.70	992.80
s-45-2	45	119.79	60.05	60.19	20.05	989.80
s-45-3	45	119.66	59.98	60.02	19.70	985.90
s-60-1	60	119.63	60.06	60.02	19.40	988.00
s-60-2	60	119.72	60.04	60.05	19.35	985.20
s-60-3	60	119.62	60.04	60.08	19.40	986.60

1.2 试验方案及控制方式

采用单轴加载方式,研究岩石初始裂纹角度对裂纹起裂情况的影响。本文边切直裂缝矩形体单轴压缩试验在图 3 所示的 TAW-2000 岩石力学试验系统上开展。试验时将端部涂抹好凡士林的砂岩试样放置在试验机刚性压头与底座之间,并对试样进行对中,控制加载底座提升至试样与加载压头接触。启动试验并以 0.05mm/min 位移加载速率控制加载,直至试样破坏,并记录裂纹扩展过程。试验完成后对破坏后的试样进行分析描述,讨论起裂机理并测量裂纹起裂角度。



图 3 TAW-2000 试验系统

Fig. 3 TAW-2000 testing system

2 破坏机理及起裂角分析

2.1 荷载位移曲线

利用加载过程中的荷载和位移数据分别绘制不同初始裂纹角度下各试样的轴向荷载位移曲线,如图 4 所示。由图可知,含预制裂纹岩样的荷载位移曲线与完整岩样单轴压缩的应力应变曲线变化趋势相似,均有压密阶段、弹性阶段和破坏阶段。随着轴向应力的逐渐增大并接近峰值应力,各试样的轴向荷载位移曲线均出现了相对明显的荷载降低,首次下降点所对应的荷载为该试样的裂纹初始起裂荷载。试样在此阶段发出声响,说明试样内有裂纹产生并扩展。继续增大荷载,试样仍能继续承受轴向荷载,此时并未产生贯通型破坏面。

各试样峰值荷载与初始裂纹角度的关系如图 5 所示。由图可知,试样峰值荷载随初始裂纹角度的增大而增大,初始裂纹角度为 60°时,试样所承受的荷载最大,说明大角度初始裂纹相对小角度初始裂纹具有更高的安全性。

2.2 试样表面裂纹扩展规律分析

根据徐军[17]对裂纹扩展形态的分类,预制裂纹的扩展包含翼裂纹和次生裂纹。翼裂纹产生在预制

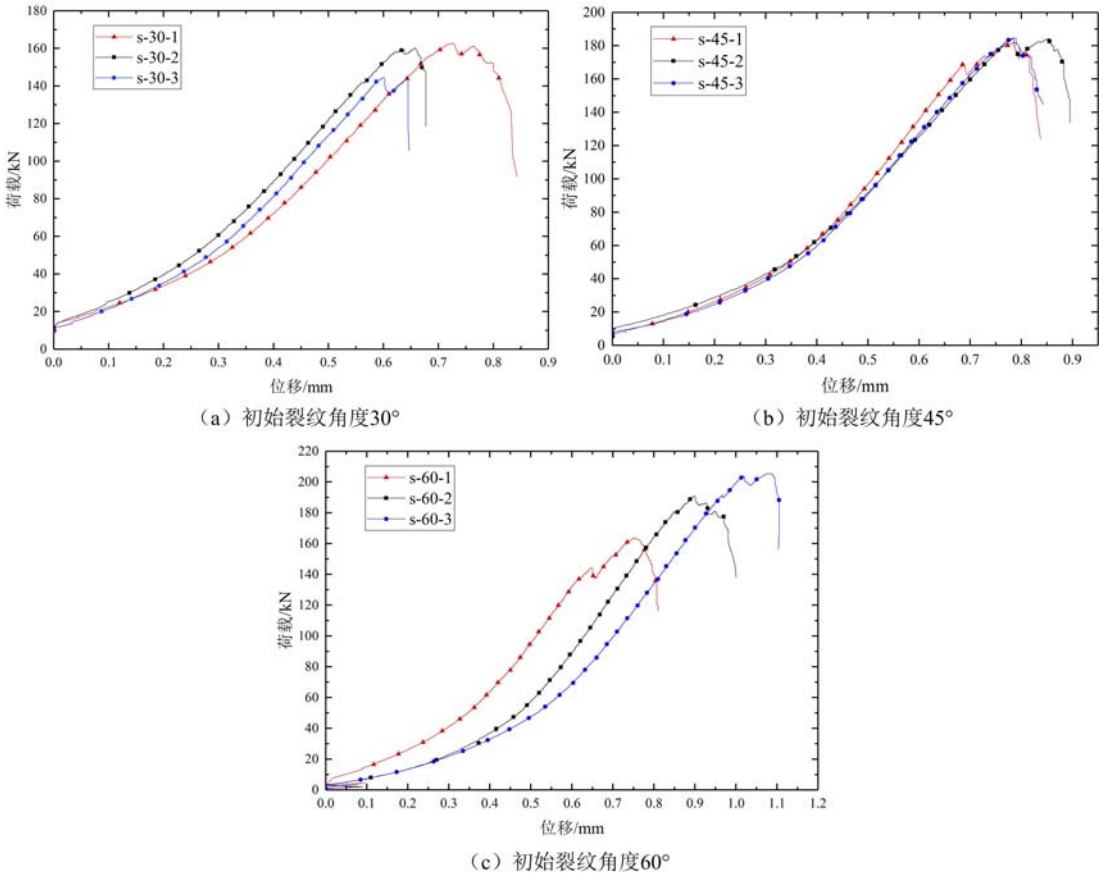


图 4　不同初始裂纹角度下试样轴向荷载位移曲线

Fig. 4　Axial load displacement curves for specimens with different initial crack angles

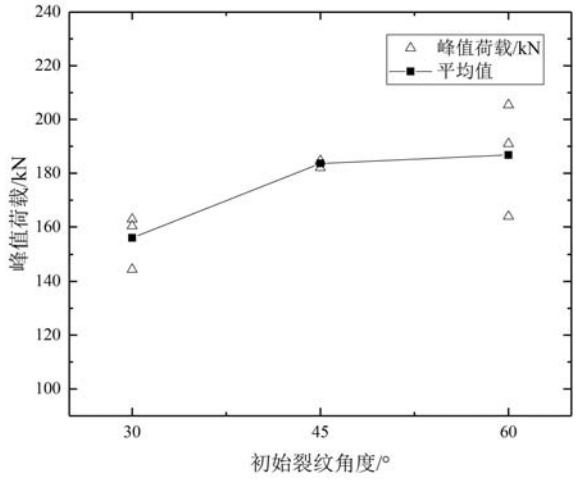


图 5　初始裂纹角度与峰值荷载的关系

Fig. 5　Correlation of the initial crack angle with the peak load

裂纹端部，扩展路径为光滑曲线且沿荷载方向扩展，可分为翼裂纹和反翼裂纹；而次生裂纹扩展路径多样且存在较多拐折。单轴压缩荷载作用下边切直裂纹试样表面裂纹从试样应力集中较大部位优先起裂，具体表现为在试样的裂纹尖端开始起裂，图 6 为裂纹角度分别为 30°、45°、60°时的试样破坏形态及示意图。

初始裂纹角度为 30°时，其裂纹扩展路径如图 6(a)所示，裂纹首先由尖端开始向下扩展，随着荷载的增大，裂纹逐步扩展，形成图中 A1 所示的反翼型裂纹；试样端面由于部分应力集中，产生张拉裂纹 A2。初始裂纹角度为 45°时，其裂纹扩展路径如图 6(b)所示，试样裂纹扩展情况与 30°时较为相似，均

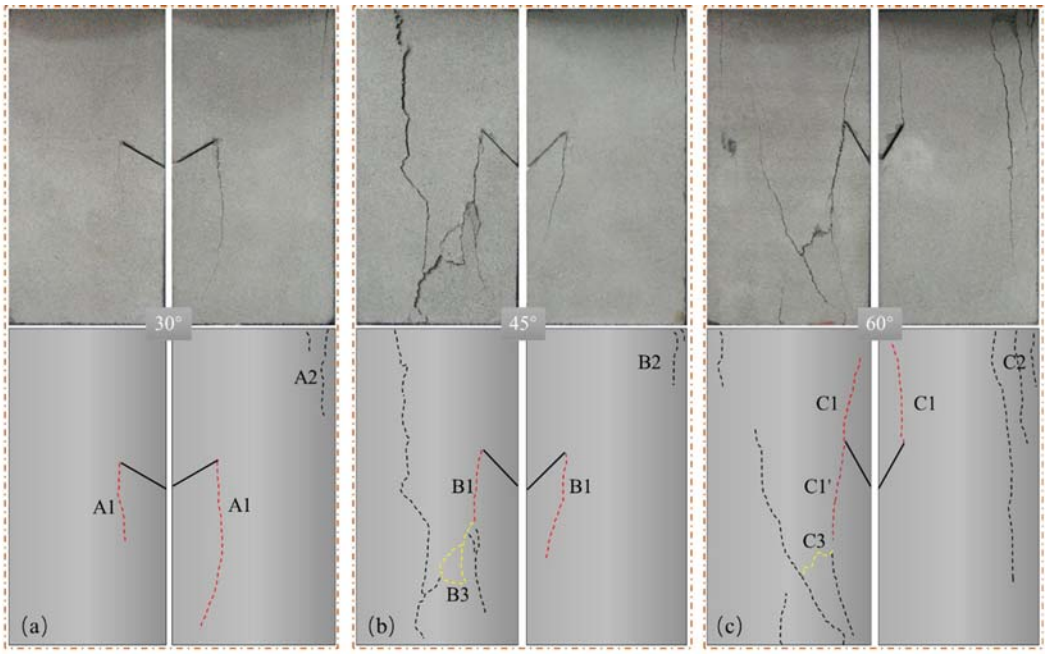


图 6 试样破坏形态

Fig. 6 Failure pattern of specimen

由裂纹尖端起裂,并随荷载增大迅速扩展,形成反翼型裂纹 B1;在单轴荷载作用下,试样最终以拉伸破坏为主,破坏同时产生次生裂纹 B3,其破坏形式为剪切破坏。初始裂纹为 60°时,其裂纹扩展路径如图 6(c)所示,裂纹尖端出现翼型裂纹 C1 与反翼型裂纹 C1′,破坏时试样出现大量拉伸裂纹,同时在翼裂纹与拉伸裂纹间由次生裂纹 C3 连接,试样主体呈现拉伸破坏,伴随部分剪切破坏。

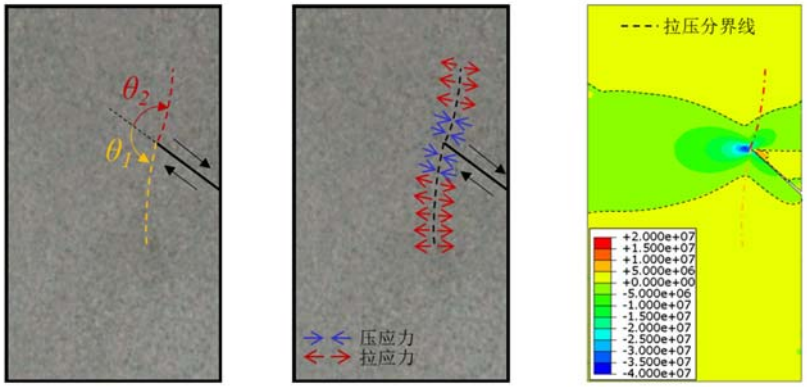
在单轴荷载作用下边切直裂缝试样破坏主要呈现拉伸破坏,破坏时裂纹贯穿整个试样,试样裂纹形式以翼型、反翼型裂纹为主,同时伴随少量次生裂纹。翼型、反翼型裂纹的主要特征为起裂角度随初始裂纹角度的改变而改变,翼型裂纹扩展后,其路径为近似光滑的曲线,且均向荷载作用方向(竖直方向)扩展。在初始裂纹角度为 45°和 60°时拉伸裂纹间由次生剪切裂纹贯通,且 45°和 60°时的裂纹起裂较为相似。各试样破坏时均在端部产生拉伸裂纹,此现象由端部应力集中所导致,因刚性压头不可活动而产生的偏心或应力集中可在后续试验中通过压头改进而消除。

2.3 起裂角度分析

在荷载作用下边裂纹起裂角度正负号规定如图 7(a)所示,θ_1、θ_2 为起裂角度方向,其中 θ_1 为正值,θ_2 为负值。图 7(b)给出了扩展裂纹路径的法向应力状态,通过数值模拟软件建立等尺寸二维平面有限元计算模型,模型共划分了 8776 个节点,8705 个单元,单元类型以四边形(CPS4R)为主,局部采用三角形(CPS3)过渡,有限元模型在试件底部施加法向约束,并在底部中心同时施加水平约束,在试件顶部施加竖直向下的位移荷载。通过有限元分析计算得到图 7(c)所示的试样水平应力分布图,图中虚线将试件分为受拉和受压两个区域,由图可知,沿 θ_1 和 θ_2 方向的反翼裂纹与翼裂纹均先受到压应力,随着裂纹的扩展之后受到拉应力,最后整体呈现拉伸破坏。

图 8 给出了预制裂纹试样在单轴荷载作用下正、反面的裂纹起裂角情况,角度测量结果见表 2。从图表可以看出,初始裂隙角度是影响起裂角的重要因素,不同初始裂纹情况下,翼型裂纹起裂角度均不同,裂纹起裂角度随初始裂纹角度的增大而增大。原因是不同初始裂隙角度试样将发生剪切断裂或压剪复合型断裂,裂纹尖端应力强度因子不同,其对应 $K_{\mathrm{I}}(\theta)$(I 型断裂应力强度因子)与 $K_{\mathrm{II}}(\theta)$(II 型断裂应力强度因子)不同,从而引起应力强度因子比的变化进而导致裂纹起裂角的变化。

初始裂纹角度为 30°、45°时试样均产生反翼型裂纹,起裂角为正值;初始裂纹为 60°时的裂纹扩展情况较为复杂,出现翼型裂纹或反翼裂纹,起裂角度既有正值也有负值。导致这一现象的原因是在初始角度为 30°、45°时,起裂角度沿 θ_1 扩展路径方向上的法向应力值大于沿 θ_2 方向的法向应力值,因此在试样



(a) 起裂角方向规定　(b) 裂纹扩展应力状态　(c)试样水平应力分布图

图 7　裂纹扩展角度示意图

Fig. 7　Schematic diagram of crackpropagation angle

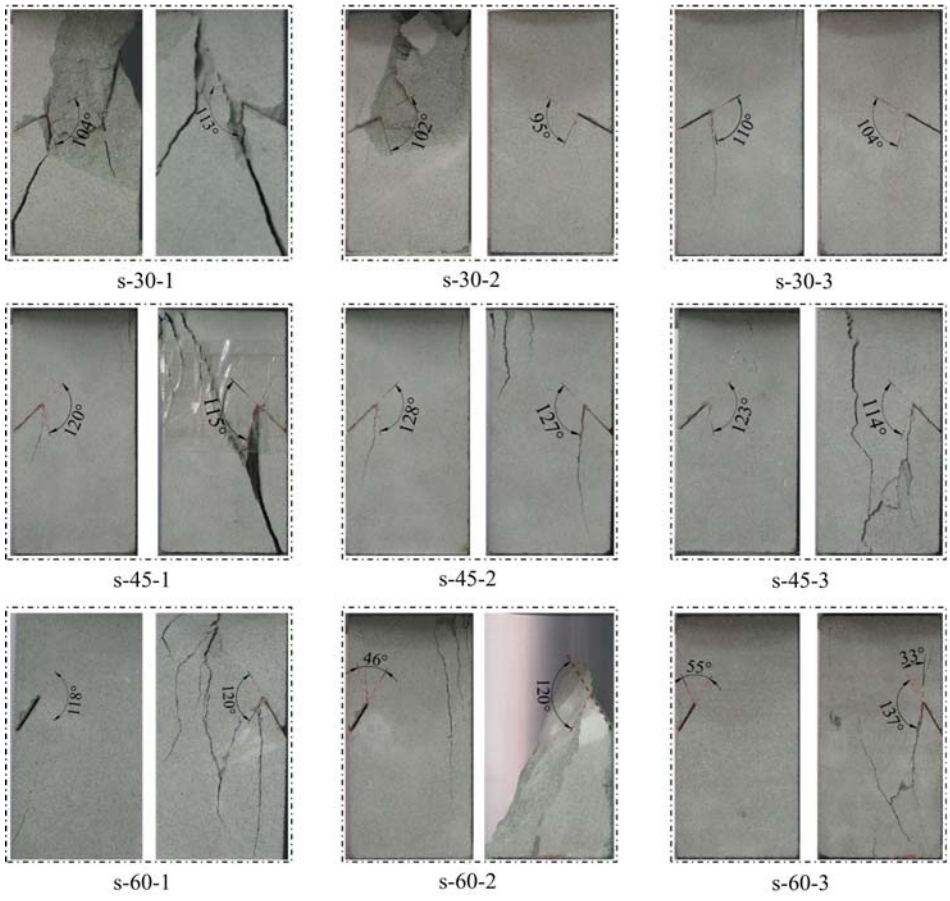


图 8　各试样起裂角度

Fig. 8　Crack Angle of each sample

加载过程中 θ_1 扩展路径方向优先达到起裂荷载，故试样破坏表现为沿 θ_1 方向起裂；当初始裂纹角度为 60°时，起裂角度沿 θ_1 和 θ_2 扩展路径方向上的法向应力值大小相当，故在加载过程中荷载增大时几乎同时达到起裂荷载，考虑到岩石材料的随机性，试样的破坏可能表现为同时产生两个方向的起裂角度。

表 2 各试样裂纹起裂角度结果

Tab. 2 Crack initiation angle results for each sample

试样编号	初始裂纹角度/(°)	起裂角度/(°)		
		正面	反面	均值
s-30-1	30	104	113	108.5
s-30-2		102	95	98.5
s-30-3		110	104	107
s-45-1	45	120	115	117.5
s-45-2		128	127	127.5
s-45-3		123	114	118.5
s-60-1	60	118	120	119
s-60-2		−46	120	—
s-60-3		−59	137	—

3 结论

本文以青砂岩为研究对象,在岩石试样侧面预制了相同长度、不同角度(30°、45°、60°)的初始裂纹,通过单轴压缩断裂试验,研究青砂岩的裂纹起裂机理,得到主要结论如下:

(1) 在单轴压缩荷载作用下,边切斜裂缝岩石的荷载位移曲线表现为脆性破坏,其峰值荷载随初始裂纹角度的增大而增大,大角度初始裂纹相对小角度初始裂纹具有更高的安全性。

(2) 边切斜裂缝岩石试样表面裂纹均从裂纹尖端开始起裂,扩展过程首先出现翼型裂纹,翼型裂纹均向荷载作用方向扩展,破坏时试样表面呈现大量拉伸裂纹,为整体拉破坏,试样完全破坏时伴随较为明显的端部效应。初始裂纹角度为 45°、60°时翼型裂纹与拉伸裂纹间由次生裂纹连接,伴随部分剪切破坏。

(3) 试验结果表明预制裂纹的倾角会对裂纹扩展产生影响,具体表现为裂纹起裂角度随初始裂纹角度的增大而增大,且在初始裂纹角度较大时,同时出现了反翼裂纹与翼裂纹,裂纹扩展模式及角度的控制因素为沿 θ_1、θ_2 扩展路径方向上的法向应力值的相对大小。数值模拟结果显示反翼裂纹与翼裂纹均先受到压应力,随着裂纹的扩展之后受到拉应力,最后整体呈现拉伸破坏。

参考文献:

[1] 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 (REN Li, XIE Heping, XIE Lingzhi, et al. Preliminary study on strength of cracked rock specimen based on fracture mechanics[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2):156−162 (in Chinese))

[2] 宋选民, 顾铁凤, 柳崇伟. 受贯通裂隙控制岩体巷道稳定性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12):1781−1785 (SONG Xuanmin, GU Tiefeng, LIU Chongwei. Experimental study on roadway stability in rockmass with connected fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12):1781−1785 (in Chinese))

[3] 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 (CHEN Weizhong, LI Shucai, ZHU Weishen, et al. Experimental and numerical research on crack propagation in rock under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1):18−23 (in Chinese))

[4] 李兴海, 于静, 丛铖东, 等. 沥青混合料Ⅰ型断裂试验方法研究综述[J]. 中外公路, 2017, 37(4):219−223 (LI Xinghai, YU Jing, CONG Chengdong, et al. A review of research on mode I fracture test methods for asphalt mixtures[J]. Chinese and Foreign Highways, 2017, 37(4): 219−223 (in Chinese))

[5] 张安林，张朝鹏，李存宝，等. 岩石断裂尺寸效应测试装置研制及实验研究[J]. 实验力学，2021，36(1)：69－79 (ZHANG Anlin，ZHANG Zhaopeng，LI Cunbao，et al. The development of testing device and experimental study on size effect of rock fracture[J]. Journal of Experimental Mechanics，2021，36(1)：69－79 (in Chinese))

[6] 张盛，李小军，李大伟. 岩石Ⅰ型断裂韧度测试技术和理论研究综述[J]. 河南理工大学学报(自然科学版)，2009，28(1)：33－38 (ZHANG Sheng，LI Xiaojun，LI Dawei. A review of test technique and theory of mode I rock fracture toughness[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)，2009，28(1)：33－38 (in Chinese))

[7] 赵文峰，张盛，王猛，等. 用两种 ISRM 推荐圆盘试样测试岩石断裂韧度的试验研究[J]. 实验力学，2020，35(4)：702－711 (ZHAO Wenfeng，ZHANG Sheng，WANG Meng，et al. Experimental study on testing rock fracture toughness with types of disc specimens recommended by ISRM[J]. Journal of Experimental Mechanics，2020，35(4)：702－711 (in Chinese))

[8] 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. Study of fracture characteristics of Lu-grey granite based on digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics，2018，33(4)：627－633 (in Chinese))

[9] 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.

[10] Reinhardt H W，Ozbolt J，Xu S L，et al. Shear of structural concrete members and pure mode II testing[J]. Advanced Cement Based Materials，1997，5(3-4)：75－85.

[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] Fujii Y，Ishijima Y. Consideration of fracture growth from an inclined slit and inclined initial fracture at the surface of rock and mortar in compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2004，41(6)：1035－1041.

[13] 刘伟韬，申建军. 含单裂纹真实岩石试件断裂模式的力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(6)：1182－1189 (LIU Weitao，SHEN Jianjun. Experimental study of propagation mode of crack in real rock specimens with a single crack[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2016，35(6)：1182－1189 (in Chinese))

[14] 曹平，曹日红，赵延林，等. 岩石裂纹扩展-破断规律及流变特征[J]. 中国有色金属学报，2016，26(8)：1737－1762 (CAO Ping，CAO Rihong，ZHAO Yanlin，et al. Propagation-coalescence and rheologic fracture behavior of rock cracks[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2016，26(8)：1737－1762 (in Chinese))

[15] 董晗. 单轴压缩下岩石斜裂纹扩展规律研究[D]. 重庆：重庆大学，2016 (DONG Han. Study the inclined rock crack propagation under uniaxial compression[D]. Chongqing：Chongqing University，2016 (in Chinese))

[16] 鲜于文攀. 压缩条件下含预制裂纹类岩石破坏过程研究[D]. 成都：成都理工大学，2018 (XIANYU Wenpan. Study on the failure process of pre-crack rocks under compression[D]. Chengdu：Chengdu University of Technology，2018 (in Chinese))

[17] 徐军. 非穿透裂纹诱导的岩石破裂过程及失效判据研究[D]. 南京：东南大学，2018 (XU Jun. Study on fracture process and criterion of rocks induced by non-penetrating flaw[D]. Nanjing：Southeast University，2018 (in Chinese))

[18] 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))

[19] 张保良，沈宝堂，张金虎，等. 脆性类岩石材料边缘裂纹扩展规律试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报，2020，2(3)：63－72 (ZHANG Baoliang，SHEN Baotang，ZHANG Jinhu，et al. Experimental study of edge-opened cracks propagation in rock-like materials[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering，2020，2(3)：63－72 (in Chinese))

Experimental study on crack tip fracture initiation mechanism of straightly edge-cracked rock under uniaxial compression

HE Qiang, ZHUO Li, LIU Huaizhong, XIE Hongqiang, XIAO Mingli

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering,
College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In order to study the fracture characteristics of rocks under compression-shear loading, oblique cracks were cut on the side of the rock specimens with prefabricated crack angles of 30°, 45°, and 60°, and uniaxial compression fracture tests were carried out using the TAW-2000 microcomputer-controlled electro-hydraulic servo rock triaxial testing machine. The test results show that: Uniaxially compressed specimens of edge-cut diagonally cracked rock exhibit significant brittleness, with peak loads increasing with the angle of the initial crack, with large-angle initial cracks offering greater safety; the specimen starts cracking from the tip of the prefabricated crack and produces a wing-shaped crack or anti-wing crack that expands in the direction of the load action, the crack at the tip of the seam is first subjected to compressive shear stress at the beginning of the crack expansion, and then changes to tensile stress as the crack gradually expands, the final damage of the specimen is dominated by the tensile cracks, with partial shear damage accompanying the initial crack angles of 45° and 60°; the crack initiation angle tends to increase with the initial crack angle, and at the initial crack angle of 60°, anti-wing cracks and wing cracks appear at the same time. The control factor of the cracking mode and angle is the relative size of the normal stress value along the crack expansion path.

Keywords: sandstone; fracture mechanism; edge crack; crack propagation; crack angle