

# 单轴压缩下预制正交裂隙类岩石材料试验

卢振兴<sup>1</sup>, 万文<sup>1,2\*</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为探究正交裂隙对岩石力学特性及裂纹扩展的影响规律,利用类岩石材料制成不同裂隙倾角的预制正交裂隙试件进行单轴压缩试验,同时借助应变仪对裂隙端部局部应变进行监测.研究表明:裂隙倾角是影响试件峰值强度的主要因素;峰值强度随着裂隙倾角的增大呈先减小后增大的变化规律,当裂隙倾角 $\alpha=45^\circ$ 时,试件的力学指标达到最小值;正交裂隙试件的主裂隙或次裂隙端部更容易发生起裂,起裂顺序及裂纹发展方式与裂隙倾角有关,主要呈翼型发展.

**关键词:**类岩石材料;正交裂隙;单轴压缩;裂纹扩展

中图分类号:TU452 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2023)02-0023-06

## Experimental Research on Rock-Like Materials with Orthogonally Crossed Cracks Under Uniaxial Compression

LU Zhenxing<sup>1</sup>, WAN Wen<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of orthogonal cracks on rock mechanical properties and crack growth, rock-like materials are used to make prefabricated orthogonal crack specimens with different crack inclination angles for uniaxial compression test, at the same time, the local strain at the end of the crack is monitored with the aid of a strain gauge. The research results show that the inclination angle of the crack is the main factor affecting the rock strength. The rock strength first decreases and then increases with the increase of the crack inclination angle. When  $\alpha=45^\circ$ , the mechanical index of the specimen reaches the minimum. The end of the main crack or the secondary crack in the orthogonal crack specimen is more prone to cracking, the crack initiation sequence and crack development mode are related to the crack inclination, mainly developed as an airfoil.

**Keywords:** rock-like materials; orthogonally cracks; uniaxial compression; crack growth

岩石是一种复杂的地质体,经过亿万年岩层构造和地质作用的影响,其内部含有各种各样尺度不等的缺陷(如断层、节理及裂隙等),而岩石内部裂隙的分布(如裂隙长度、裂隙倾角及岩桥长度等)对其强度、变形及破坏特征有着重要影响<sup>[1]</sup>.在外荷载的作用下,岩石材料的破坏过程实质上是裂隙的产生、扩展及贯通的过程,因而开展岩石材料裂纹扩展的研究,对于保障节理裂隙岩体工程的稳定与安全具有理论意义.

国内外学者研究了裂隙岩石在各种应力条件下的破坏规律.杨圣奇等<sup>[2-4]</sup>研究单轴压缩下不同裂隙倾角单条裂隙对大理石试样破坏特性及微裂纹发育扩展的影响,并进一步探讨裂隙分布对大理石岩强度及变形特性的影响规律;赵延林等<sup>[5-8]</sup>针对有序多裂隙类岩石材料进行单轴压缩实验,研究断续岩石裂纹

产状特性对岩石强度的影响和岩桥破断规律;武旭<sup>[9-11]</sup>、郭奇峰等<sup>[12]</sup>对单裂隙花岗岩进行单轴压缩试验,探究裂隙岩石的强度特性、裂纹起裂模式及破坏过程中的能量演化规律;陈伟等<sup>[13]</sup>对双裂隙砂岩进行单轴压缩,研究高湿环境对裂隙砂岩变形特性、裂纹演化以及破坏模式的影响;赵程等<sup>[14]</sup>采用一种高强度速凝石膏制成的类岩石材料,进行不同倾角的单裂隙类岩石试件的单轴压缩试验,并利用数字图像相关方法研究裂纹扩展规律及岩体细观损伤演化机制;Wang等<sup>[15]</sup>利用数值分析等手段研究含多条预制裂隙的类岩石材料在双轴加载下的试件破坏形式及开裂过程,并分析裂纹的开裂、扩展及贯通的破坏行为机理;刘新荣等<sup>[16]</sup>对含不同夹角V型相交裂隙岩体试件进行常规单轴压缩试验,详细分析试件的应力-应变曲线、强度与变形特性、裂纹演化与破坏模式及能量耗散特征;张国凯等<sup>[17]</sup>对裂隙花岗岩进行单轴压缩下的声发射试验,研究裂隙花岗岩强度特征及破坏过程中裂纹扩展特征和相互变化关系。

目前,关于裂隙岩体及裂隙扩展规律的相关研究,已有诸多成果,但针对裂隙尖端应变集中现象的研究不够深入.故本文针对正交裂隙类岩石材料进行单轴压缩试验,利用应变测量手段对裂隙尖端局部应变进行监测,研究不同裂隙倾角下试件的力学特性及裂纹扩展与裂隙尖端应变集中的变化规律。

## 1 试验概况

### 1.1 试件制备

本研究采用相似模拟方法制备岩样,由相似性材料(p.o.32.5水泥、细沙、水组成的水泥砂浆)制备正交裂隙类岩石试件,水泥砂浆质量比为 $m_{\text{水泥}} : m_{\text{细沙}} : m_{\text{水}} = 26 : 25 : 10$ .将搅拌均匀的砂浆浇入钢制模具,经振捣、密实、抹平、预制裂隙后,制备长×宽×高为150 mm×150 mm×30 mm的预制正交裂隙类岩石试件,12 h后脱模,放入标准养护室养护28 d.

试件正交裂隙的空间布置如图1所示,裂隙长度分别为30 mm和20 mm,裂隙宽度均为1 mm,其中长度为30 mm的裂隙定义为主裂隙,主裂隙与水平方向夹角定义为裂隙倾角( $\alpha$ ),裂隙倾角分别设置为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ .

### 1.2 试验设备及加载方式

试验前将试件进行编号,分别为UCS-0, UCS-15, UCS-30, UCS-45, UCS-60, UCS-75,并且在主次裂隙上端分别贴2组正交电阻式应变片,使用DH3815N静态应变仪来测量加载过程中裂隙端部的局部应变.使用RYL-600剪切流变仪进行单轴压缩试验(如图2所示),加载前用润滑油涂抹试件两端,以避免加载时发生端部效应.采用荷载控制的加载方式进行加载,正式加载前先加载至0.5 kN进行预压,待其受力均匀稳定后以100 N/s的速度进行加载直至破坏,加载全程使用佳能750D数码相机记录试件裂纹萌生、发展、破坏的过程。

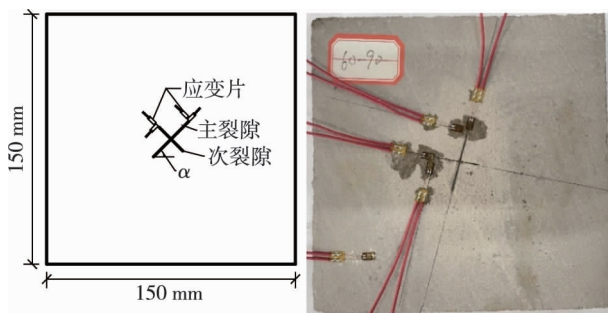


图1 试件尺寸及试件



图2 RYL-600剪切流变仪及试验装置

## 2 正交裂隙类岩石试件力学特性

### 2.1 单轴压缩下完整试件破坏分析

为研究正交裂隙对类岩石试件力学性质的影响,首先使用RYL-600剪切流变仪对完整试件进行单轴压缩试验,得到该配比下类岩石材料的物理力学性质,如表1所示。

表 1 完整试件物理力学性质

密度/(g/cm <sup>3</sup> )	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	极限应变/10 <sup>-2</sup>
2.13	19.85	1.55	1.82

将完整试件的应力-应变的数据绘制成图(图 3).由图 3 可知:单轴压缩下完整试件表现出塑性-弹性-塑性的性质,当应力较低时,应力-应变曲线向上弯曲,应力增加到一定值时,变形曲线变为直线,最后向下弯曲,大致符合“S”形曲线.完整试件压缩破坏过程经历 4 个阶段:裂隙压密阶段、弹性变形阶段、非稳定破裂发展阶段、破裂后阶段.

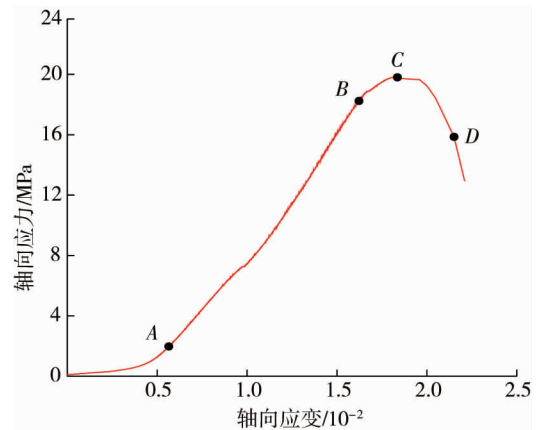


图 3 完整类岩试件应力-应变曲线

1) 裂隙压密阶段(OA 段):加载初期,试件中原有的内部微裂隙逐渐压密,应力-应变曲线呈凹型,形成早期的非线性变形.

2) 弹性变形阶段(AB 段):随着轴向应力的继续增大,试件整体呈现弹性变形,应力-应变曲线近似呈直线,符合胡克定律.此阶段末端,试件内部开始出现微裂纹.

3) 非稳定破坏阶段(BC 段):B 点之后,试件进入塑性变形,应力-应变曲线呈凸型,内部微裂纹进一步发展,试件表面开始脱落,出现宏观裂纹,直至破坏.

4) 破裂后阶段(CD 段):试件承载力达到峰值强度之后,裂隙快速发展,交叉且相互联合贯通形成宏观断裂,轴向应力急剧下跌,但并不为零,说明试件存在一定残余强度.

## 2.2 预制正交裂隙类岩石试件破坏分析

岩石强度是力学性质的重要指标,其与裂隙倾角关系密切,单轴压缩下的单裂隙、双裂隙试件强度随裂隙倾角呈“U”型变化.根据收集的试验数据,绘制出不同裂隙倾角下正交裂隙试件曲线图,如图 4 所示.与完整试件类似,正交裂隙试件应力-应变曲线总体呈“S”型,表现出塑性-弹性-塑性的性质.相较于完整试件,正交裂隙试件峰值强度都有所降低,如表 2 所示.随着裂隙倾角  $\alpha$  的增大,试件峰值强度呈现出先减小后增大的分布规律,裂隙倾角为 45°时最低,降幅达 44.18%.

表 2 裂隙试件峰值强度

试件编号	裂隙倾角/(°)	极限应变/10 <sup>-2</sup>	峰值强度/MPa	降幅/%
UCS-0	0	1.51	14.18	28.56
UCS-15	15	1.44	13.32	32.89
UCS-30	30	1.49	11.54	41.86
UCS-45	45	1.26	11.08	44.18
UCS-60	60	1.54	11.95	39.80
UCS-75	75	1.47	13.39	32.54

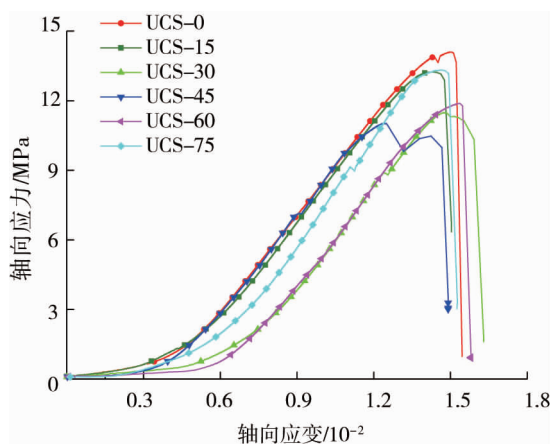


图 4 裂隙试件应力应变曲线

### 3 局部应变规律及裂纹扩展分析

静态应变仪能够记录试件在加载过程中预制裂隙端部应变的分布规律,将裂隙尖端4个测点数据及对应试件应力数据绘制成图,如图5所示.由图5可知:USC-0试件整体呈现拉剪破坏,试件受压后,裂隙端部产生应力-应变集中现象,随着轴力的增大,1<sup>#</sup>应变片处先产生起裂,拉应变值达 $0.161\ 9\times 10^{-2}$ ,并逐渐向试件端部扩展,最终形成翼型裂纹.USC-15试件裂纹扩展规律见图6,加载初期,2<sup>#</sup>处应变值急剧增大,极值达 $0.889\ 7\times 10^{-2}$ ,次裂隙两端产生裂纹,并向边缘扩展,最终导致破坏.

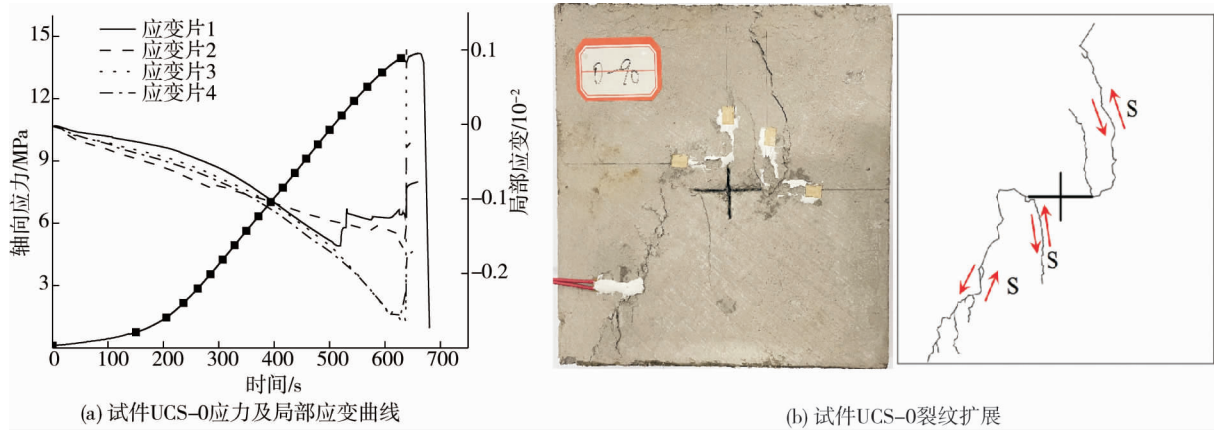


图5 编号 UCS-0 试件局部应变及裂纹扩展

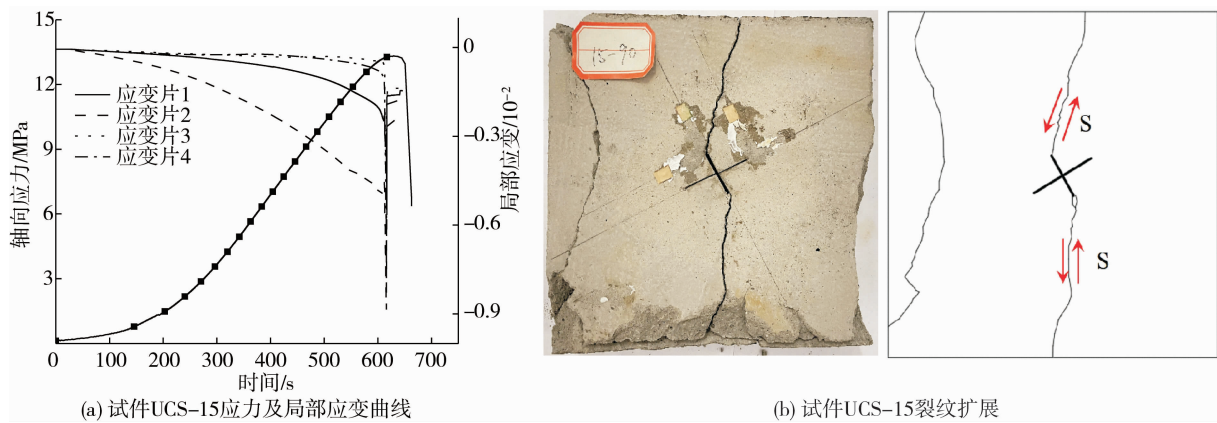


图6 编号 UCS-15 试件局部应变及裂纹扩展

裂纹扩展规律与裂隙倾角 $\alpha$ 关系密切,分别将 $\alpha$ 为 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 试件的裂隙尖端局部应变值及应力数据绘制成图,如图7和图8所示.当 $\alpha=30^\circ$ 时,主裂隙上下端部先产生初始裂纹,随着轴力的增大,4个应变片均记录到不同程度的应力-应变集中现象,初始裂纹向次裂隙端部汇集,然后呈翼型形态向试件两端扩展,其中2<sup>#</sup>应变值急剧增大至 $0.414\ 1\times 10^{-2}$ ,最后贯通破坏;当 $\alpha=45^\circ$ 时,主裂隙上端产生初始裂纹,2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>应变值增长较快,2<sup>#</sup>处应变值达 $0.332\ 8\times 10^{-2}$ ,4<sup>#</sup>处应变值达 $0.269\ 3\times 10^{-2}$ ,一部分向次裂隙方向发展汇集,连通次裂隙后向试件顶部发展,最终形成翼型剪切裂纹,另一部分分别向试件上下端部形成拉剪复合裂纹.

分别将 $\alpha$ 为 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 试件的裂隙尖端局部应变值及应力数据绘制成图,如图9和图10所示.当 $\alpha=60^\circ$ 时,初始裂纹在次裂隙端部产生,4<sup>#</sup>应变值增长较快,主裂隙上端产生小部分裂纹先次裂隙汇集,随着轴力的增加,初始裂纹向试件上下两端发展,4<sup>#</sup>应变极值达 $0.239\ 2\times 10^{-2}$ ,并逐渐贯通导致压剪破坏.当 $\alpha=75^\circ$ 时,主、次裂隙两端均产生初始裂纹,随后主裂隙产生的初始裂纹向试件上下两端发展,形成压剪裂纹;3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>处应变值急剧增加,3<sup>#</sup>应变值达 $0.230\ 9\times 10^{-2}$ ,4<sup>#</sup>应变值达 $0.460\ 9\times 10^{-2}$ ,次裂隙产生的初始裂纹向试件左右两端横向发展,最终贯通破坏.

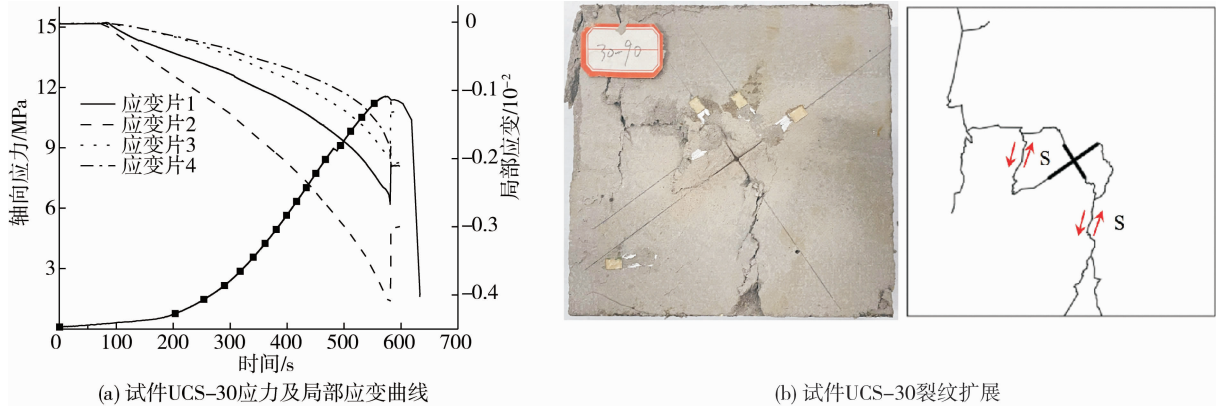


图 7 编号 UCS-30 试件局部应变及裂纹扩展

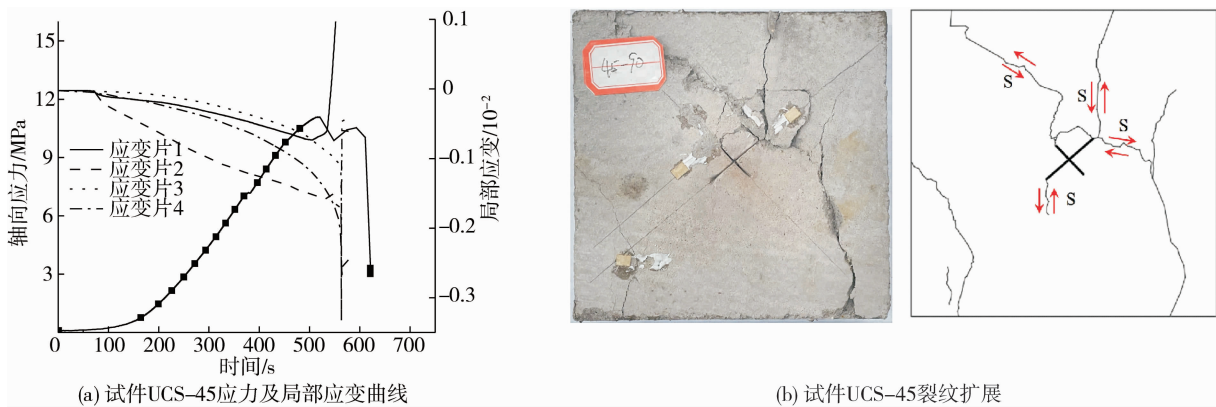


图 8 编号 UCS-45 试件局部应变及裂纹扩展

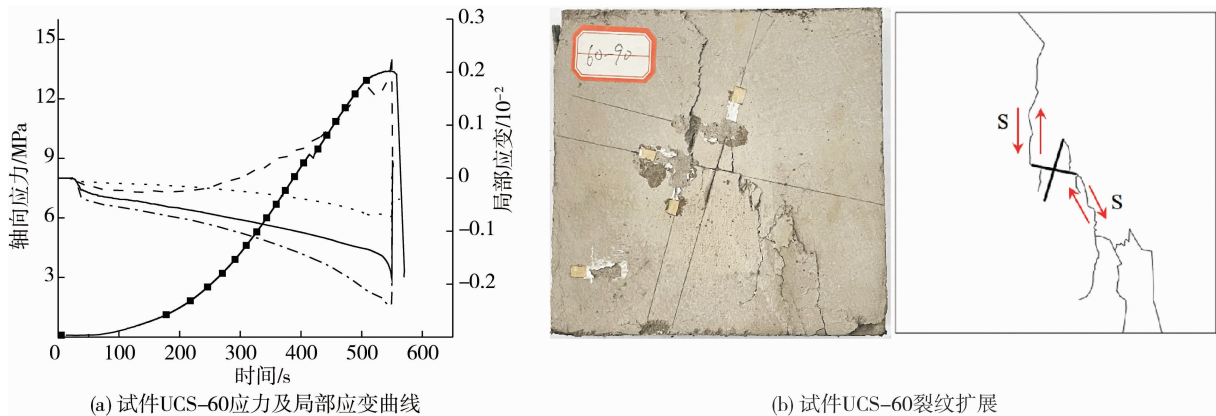


图 9 编号 UCS-60 试件局部应变及裂纹扩展

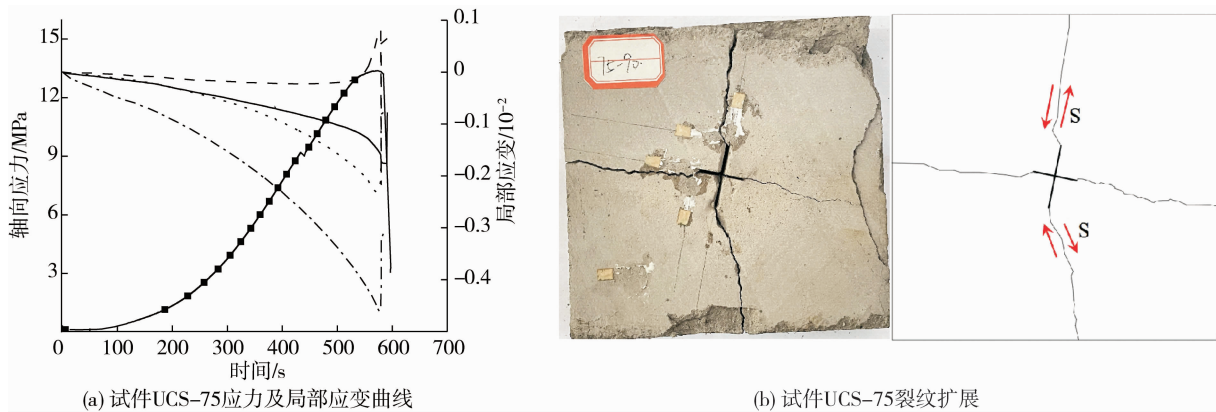


图 10 编号 UCS-75 试件局部应变及裂纹扩展

综上所述,试件裂纹产生、发展及贯通的规律与裂隙倾角关系密切.当 $\alpha=0^\circ$ 时,仅主裂隙端部产生裂纹,并向试件端部发展、贯通,最终导致破坏;当 $\alpha=15^\circ,60^\circ$ 时,仅在次裂隙端部产生裂纹,随后向试件上下端部发展破坏;当 $\alpha=30^\circ,45^\circ$ 时,由主裂隙端部先产生裂纹,随后向次裂隙端部汇集,最后向试件上下端部发展贯通,导致破坏;当 $\alpha=75^\circ$ 时,主次裂隙端部均产生裂纹,随后向试件四周发展,最终贯通导致试件破坏.

## 4 结论

1)与完整试件相似,预制正交裂隙类岩石试件应力-应变曲线呈“S”型,其破坏过程同样经历裂隙压密阶段、弹性变形阶段、非稳定破裂发展阶段、破裂后阶段这4个阶段,表现出塑性-弹性-塑性的力学性质.

2)正交裂隙的存在对试件的峰值强度有明显的削弱,不同裂隙倾角的裂隙对峰值强度的削弱程度不同.随着裂隙倾角的增大,试件的峰值强度呈现出先减小后增大的变化规律,裂隙倾角为 $45^\circ$ 时降幅最大,达到44.18%.

3)裂隙倾角对裂纹的产生、发展的影响作用显著.当 $\alpha=0^\circ$ 时,仅主裂隙端部产生裂纹,并向试件端部发展、贯通,最终导致破坏;当 $\alpha=15^\circ,60^\circ$ 时,仅在次裂隙端部产生裂纹,随后向试件上下端部发展破坏;当 $\alpha=30^\circ,45^\circ$ 时,由主裂隙端部先产生裂纹,随后向次裂隙端部汇集,最后向试件上下端部发展,导致破坏;当 $\alpha=75^\circ$ 时,主次裂隙端部均产生裂纹,随后向试件四周发展,最终贯通导致试件破坏.

## 参考文献:

- [1] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2013.
- [2] 杨圣奇.断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究[J].岩土力学,2013,34(1):31-39.
- [3] 董晋鹏,杨圣奇,李斌,等.共面双裂隙类岩石材料抗拉强度试验研究[J].工程力学,2020,37(3):188-201.
- [4] 杨圣奇,张鹏超,滕尚永,等.含三裂隙巴西圆盘抗拉强度和裂纹特征试验研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):90-98.
- [5] 赵延林,万文,王卫军,等.类岩石材料有序多裂纹体单轴压缩破断试验与翼形断裂数值模拟[J].岩土工程学报,2013,35(11):2097-2109.
- [6] 赵延林,曹平,万文,等.岩石裂纹亚临界扩展实验与压剪流变断裂模型[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(1):276-286.
- [7] 连帅龙,万文,赵延林.双轴加压下双裂隙类岩石材料破坏试验与数值[J].矿业工程研究,2018,33(4):45-50.
- [8] 赵延林,刘强,刘欢,等.水-力耦合作用下单裂隙灰岩三轴压缩与声发射试验及压剪断裂模型[J].煤炭学报,2021,46(12):1-12.
- [9] 武旭,王帆,席迅,等.正交型交叉裂隙岩石强度特征与破裂机理试验研究[J].煤炭学报,2020,45(7):2681-2690.
- [10] 武旭,张丽媛,孙景来,等.单轴压缩下交叉裂隙花岗岩变形与能量演化分析[J].北京交通大学学报,2021,45(3):77-83.
- [11] 武旭,郭宇明,孙景来,等.正交型裂隙岩石单轴压缩作用下的能量演化规律[J].地下空间与工程学报,2021,17(S1):114-119.
- [12] 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.
- [13] 陈伟,万文,赵延林,等.高湿环境平行双裂隙砂岩单轴压缩破坏及裂纹扩展特性[J].岩土工程学报,2021,43(11):2094-2104.
- [14] 赵程,刘丰铭,田加深,等.基于单轴压缩试验的岩石单裂纹扩展及损伤演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3626-3632.
- [15] WANG M, LU Z, WAN W, et al. A calibration framework for the microparameters of the DEM model using the improved PSO algorithm[J]. Advanced Powder Technology, 2021,32(2):358-369.
- [16] 刘新荣,尹志明,王艳磊.含V型相交裂隙岩体的力学特性及破坏模式试验[J].煤炭学报,2020,45(2):651-659.
- [17] 张国凯,李海波,王明洋,等.单裂隙花岗岩破坏强度及裂纹扩展特征研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2760-2771.