

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.S2.027

裂隙形式对岩体强度特征及破坏模式影响的试验研究

刘学伟¹, 刘泉声¹, 陈元², 李强³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 武汉荆力工程设计咨询有限公司, 湖北 武汉 430071; 3. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 利用 RMT-150C 电液伺服机对含不同预制裂隙形式(单、双、T 形交叉及 X 形交叉裂隙)的类岩石试样进行了单轴压缩试验, 系统地研究了裂隙形式对试样强度特征及失稳模式的影响。试验发现, (1) 不同裂隙形式下裂隙的起裂破坏模式主要表现为初始裂隙起裂破坏, 裂隙形式与破坏模式关系不突出; (2) 单轴抗压强度受裂隙形式影响明显, 随着裂隙形式由单裂隙到 X 形交叉裂隙变化, 裂隙试样抗压强度呈现增高趋势, 同时试样起裂和失稳时的声发射总能量也逐渐增大。进一步对裂隙形式影响强度特征的机制进行了初步分析, 研究成果可以反映不同裂隙形式组合对工程岩体稳定性的影响规律。

关键词: 裂隙形式; 破坏形式; 岩体强度特征; 试验研究

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)增2-0208-07

Experimental study of effects of fracture type on strength characteristics and failure modes of fractured rockmass

LIU Xue-wei¹, LIU Quan-sheng¹, CHEN Yuan², LI Qiang³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Wuhan JingLi Engineering Design Consulting Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Mid-South Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: A series of uniaxial compression tests is carried out on the gypsum specimens with different fracture types, including single fracture, two coplanar fractures, T-shape and X-shape cross-fractures, through the electrohydraulic servo machine RMT-150C. Then, influences of fracture types on failure modes and strength characteristics are investigated. The experimental results show that: (1) The failure mode is initial fractures propagation for all the specimens with different fracture types, which means that the relationship between failure mode and fracture type is not obvious. (2) The fracture type can affect the uniaxial compressive strength (UCS) of specimens significantly, with the fracture type transfer from single fracture to the X-shape cross-fractures, the UCS increase gradually; and the total acoustic emission energy of fracture specimens initiation and unstable increase too. Furthermore, the mechanism of how the fracture type affects the UCS is studied preliminarily. The research results can reflect the influence laws of different fracture types on the stability of rock mass.

Keywords: fracture type; failure mode; rockmass strength characteristic; experimental study

1 引言

天然岩体中断层、节理等裂隙对岩体力学性质和工程稳定性有很大影响。一方面, 岩体的变形破坏过程实质就是裂隙在工程扰动条件下的萌生、扩展、相互作用和贯通的过程。另一方面, 岩体中赋

存的复杂裂隙形式改变了岩体受力状态, 进一步影响了工程岩体的破坏形式及失稳过程。因此, 开展岩体裂隙形式对强度特征及破坏模式影响规律及影响机制的研究有较强的实际意义。

岩体中裂隙分布看似杂乱无序, 形式各异, 实际存在一定规律。对于原生裂隙, 沉积作用使得裂

收稿日期: 2014-11-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No.2014CB046904); 国家自然科学基金重点基金(No.41130742); 中国科学院重点部署项目(No.KZZD-EW-05-03)

第一作者简介: 刘学伟, 男, 1987年生, 博士, 助理研究员, 主要从事深部裂隙岩体力学理论及其数值模拟方法的研究工作。E-mail: Liuxw87@126.com

隙一般表现为层状平行形式。对于构造裂隙，裂隙根据其力学形成机制可以划分为雁形和共轭交叉两种基本形式。目前国内外学者对裂隙形式影响岩体力学行为的试验研究一般可分为两类：一类是有序裂隙试样的压缩破坏试验，杨圣奇等^[1-3]对红砂岩裂隙试样在单轴压缩条件下的扩展过程以及裂隙倾角对强度及变形参数的影响规律进行了研究。苏海健等^[4]研究了单轴压缩条件下含纵向裂隙砂岩试样的强度、变形及破坏形态。赵延林等^[5]开展了单轴压缩下类岩石材料有序多裂纹体破断试验，研究了不同裂隙倾角和裂隙密度对峰值强度和贯通模式的影响。蒲成志等^[6]通过对预制多裂隙试样的单轴压缩试验，研究了裂隙分布密度对试件断裂破坏强度的影响。靳瑾等^[7]基于混凝土材料预制裂纹试件单轴压缩试验结果，研究了裂隙参数(裂隙倾角和岩桥倾角)对试件破坏模式和单轴抗压强度的影响规律。Wong 等^[8]基于含多条平行预置裂隙类岩石材料的单轴压缩试验，研究了多裂隙的萌生、扩展和贯通机制。陈新等^[9]研究了单轴压缩条件下节理倾角和连通率对岩体强度、变形特征的影响。蒋昱州等^[10]根据非贯通预制裂纹大理岩的单轴压缩试验结果，对裂纹间距、裂纹长度、裂纹数目、裂纹倾角等因素与试验岩样抗压强度之间的相互关系进行了分析研究。另一类是交叉裂隙试样的压缩破坏试验，目前研究和试验较少，刘东燕等^[11]基于石膏模型试验讨论了 X 型断续节理的压剪强度特性及破坏机制。刘欣宇等^[12]研究了交叉充填节理对类岩石强度特征和变形特性的影响。张波等^[13-14]系统地研究了主、次裂隙之间角度变化情况下对含交叉裂隙节理试样的破坏模式及力学性能的影响，并进一步基于有限元计算程序 Abaqus 对含交叉裂隙节理岩体试件进行了应力场及应力强度因子分析，研究了含交叉裂隙节理岩体试件的破坏机制。

裂隙形式包含两方面的涵义，一方面是裂隙自身参数，包括倾角、长度等，另一方面是不同裂隙的分布与组合型式。通过分析可以发现上述研究有以下特点：(1) 对于单裂隙情况，现有成果较多的集中在其自身参数的变化对于试样强度变形特征的影响研究。(2) 对于多裂隙情况，目前试验主要集中在同一裂隙形式下不同分布形态及几何关系对强度特性的影响。显然，上述成果较少地进行不同裂隙形式之间的横向比较研究。为此，本次开展了含单裂隙、双裂隙及交叉裂隙类岩石试样的单轴压缩试验，系统地研究了单轴压缩条件下不同裂隙形式试样的破坏模式及强度特征之间的相互关系，并初

步分析了裂隙形式对强度特征的影响机制。对探究不同裂隙形式岩体稳定性及失稳机制有一定的帮助作用。

2 试验概况

2.1 试样制备

试样尺寸(长×宽×高)为 60 mm×40 mm×120 mm，选用高强石膏按水灰比为 1 的比例配置，在可拆卸方形钢模具浇筑而成，内置裂隙采用在试样浇筑后插入 0.8 mm 钢片的方法制作，形成张开裂隙试样。通过对标准试样的一系列试验获得材料的基本物理力学参数见表 1。

表 1 材料物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of material

抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	黏聚力 /MPa	摩擦角 /($^{\circ}$)	密度 /(g/cm ³)
5.45	0.90	1.30	2.44	9.03	0.84

试样的裂隙形式包括单裂隙、双裂隙、T 形及 X 形交叉裂隙 4 种。为表述方便，约定试样中预制裂隙为“初始裂隙”，在加载过程中萌生的裂隙为“新生裂隙”。单裂隙、双裂隙、T 形及 X 形裂隙分别以“I、II、III、IV 类裂隙”代称。裂隙的空间布置如图 1 所示，不同裂隙形式的几何参数及试验工况见表 2。

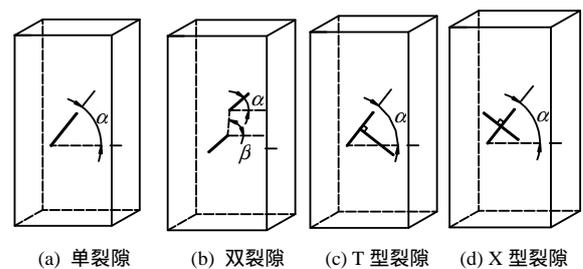


图 1 裂隙试样的几何图
Fig.1 Geometrical arrangement diagrams of fractured specimens

表 2 裂隙试样几何参数
Table 2 Geometric parameters of fractured specimens

裂隙类型	倾角 α /($^{\circ}$)	裂隙长度 /mm	倾角 β /($^{\circ}$)	岩桥长度 /mm
	0、30、45、60、90	20		
	45	15、20、25、30		
	45	10	45、60、75、105、120	10
	75	10	45、60、75、105、120	10
	0、30、45、90	20		
	0、30、45、60	20		

2.2 试验设备

本试验主要包括试样轴向加载设备和声发射监测设备两个基本设备。试样加载设备采用中国科学院武汉岩土力学研究所自行研制的 RMT-150C 数字控制式电液伺服试验机(见图 2)。该设备垂直最大出力为 1 MN, 水平最大出力为 0.5 MN, 三轴压缩最大围压为 50 MPa, 机架刚度为 5 MN/mm。可采用位移或载荷方式控制加载, 试验过程数据自动采集, 实时显示, 具有很好的动态响应功能。本试验采用载荷控制加载方式, 加载速率为 0.02 kN/s。



图 2 试验系统
Fig.2 Testing system

声发射测试采用美国物理声学公司生产的 PCI-II 声发射测试分析系统。试样表面放置 4 个声发射传感器, 对称分布于试样前后面, 同时在试样和四周垫片之间加垫聚四氟乙烯薄膜, 实现减摩祛噪。

3 试验结果

对不同裂隙形式的试样均进行了多组单轴压缩试验, 获取了各试验条件下的应力-应变曲线、裂隙扩展和破坏形式。篇幅所限, 本文介绍较典型的试验结果。

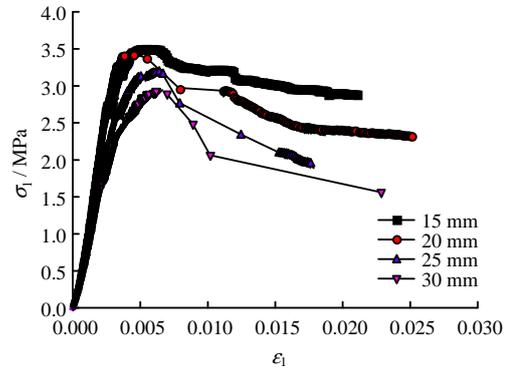
3.1 应力-应变关系曲线

不同裂隙形式下各试样的应力-应变曲线如图 3 所示, 其中图 3(c)中数字表示主裂隙倾角。从图中可以看出, 对于不同裂隙分布形式的试样, 应力-应变关系曲线均包含压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段。其中, I 类裂隙试样由于裂隙数目较少, 因此压密段较短, 甚至直接进入弹性段, II 类及 IV 类裂隙试样均存在明显的压密段, 这一现象同时也表明单轴压缩条件下裂隙试样中张开裂隙的闭合是构成试样压密的主要因素。

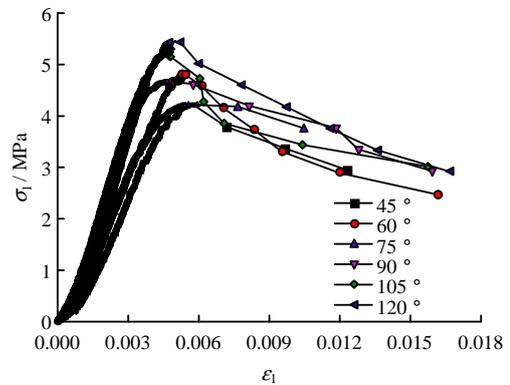
3.2 试样破坏形式

单轴压缩载荷作用下试样侧向变形没有受到限

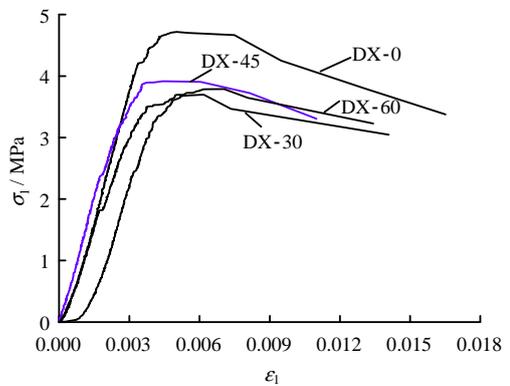
制, 不同裂隙分布形式试样典型破坏形式分别如图 4~7 所示。



(a) 不同裂隙长度的 I 类试样



(b) 不同岩桥倾角的 II 类试样



(c) 不同主裂隙倾角的 IV 类试样

图 3 不同裂隙形式试样应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves for specimens with different fracture types

图 4 为不同长度单裂隙试样的最终破坏形态。从图中可以看出, 对于单裂隙而言, 不同裂隙长度下试样破坏形式基本一致, 且具有相应的破坏特征: 宏观新生裂隙率先在初始裂隙尖端产生, 并且基本对称出现, 一般新生宏观裂隙均比较细小, 随着载荷的增加, 新生裂隙沿着主加载方向不断向前扩展延伸, 同时裂隙不断加宽加长, 试样中其他地方基本不出现新生裂隙, 最后在失稳破坏前试样边缘生

成部分随机劈裂裂隙。

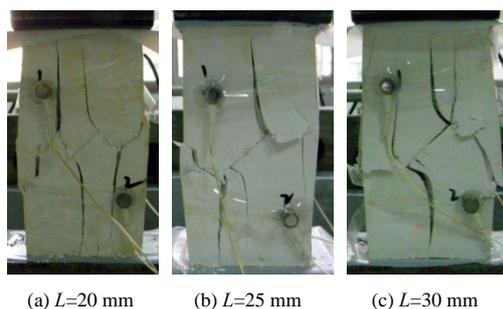


图 4 不同裂隙长度的 类裂隙试样破坏形式

Fig.4 Failure modes of class fracture specimens with different fracture lengths

图 5 为双裂隙试样的典型破坏形态。不同裂隙倾角和岩桥倾角的双裂隙试样破坏形式具有以下共同的特征：加载初期，部分初始裂隙尖端会出现新生裂隙，随着载荷的增加，内部新生裂隙贯通造成岩桥断裂，外部新生裂隙不断向两端发展，两者共同作用最终导致失稳破坏。

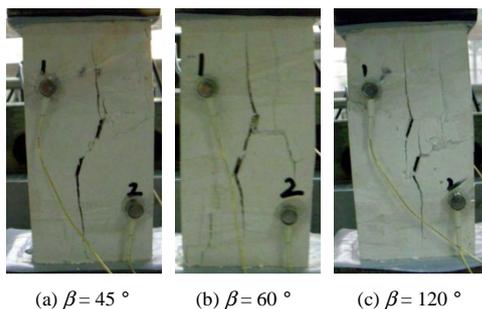


图 5 不同岩桥倾角的 类裂隙试样破坏形式

Fig.5 Failure modes of fracture specimens class with different rock bridge angles

图 6、7 分别为 T 形和 X 形交叉裂隙试样的典型破坏形态。同双裂隙试样类似，不同主裂隙倾角下试样的破坏形式保持一致：无论主裂隙还是次裂隙，新生裂隙均自初始裂隙端产生，随着加载的深入，T 形裂隙试样中各初始裂隙尖端处的新生裂隙独立向前扩展，X 形裂隙试样中主、次裂隙产生的新生裂隙在各自的扩展过程中会交汇而形成一条裂隙。新生裂隙的不断扩展贯通最终造成试样破坏。

4 结果分析

4.1 裂隙形式对破坏模式的影响

笔者等曾根据相同试样的双轴压缩试验将裂隙试样的破坏模式分为初始裂隙起裂破坏、侧向劈裂破坏和表面剥落破坏 3 种^[15]。根据这一分类标准，上述 4 种不同裂隙分布形式的试样在单轴压缩条件

下均表现为典型的初始裂隙起裂破坏模式，即新生裂隙总是自初始裂隙尖端开始起裂，并在扩展过程中相互贯通导致试样的失稳破坏。

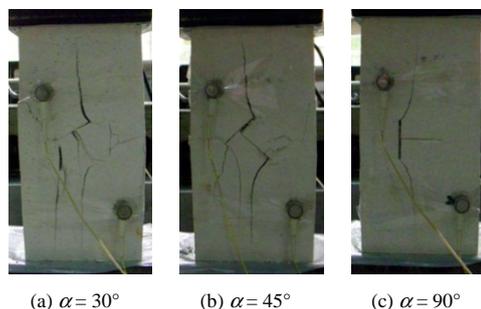


图 6 不同主裂隙倾角的 类裂隙试样破坏形式

Fig.6 Failure modes of fracture specimens class with different main fracture inclination angles

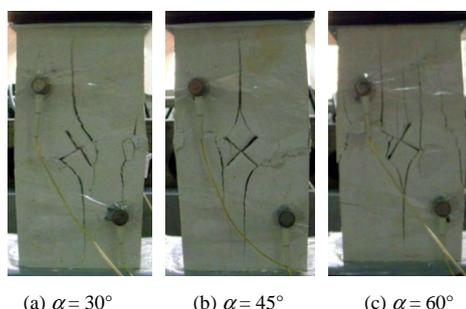


图 7 不同主裂隙倾角的 类裂隙试样破坏形式

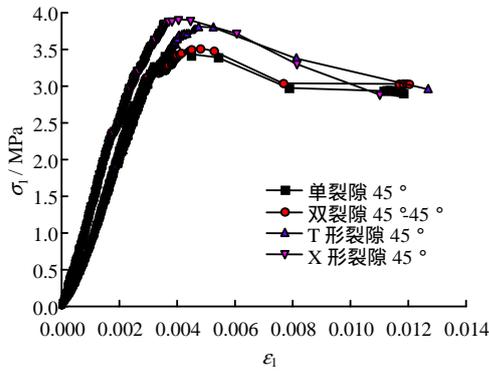
Fig.7 Failure modes of fracture specimens class with different main fracture inclination angles

这一现象同时也表明，单轴压缩加载条件下裂隙组合形式不会对试样的破坏模式造成较大影响。对比双轴压缩试验的研究成果可知，试样加载受力条件是影响破坏模式的主要因素，裂隙形式对破坏模式不起主要控制作用。这一结论对工程实践具有一定的指导意义，工程岩体中总是赋存有大量的裂隙网络，对于简单受力情况，不论裂隙形式的复杂程度如何，岩体的失稳总是与原生裂隙的扩展失稳相联系。

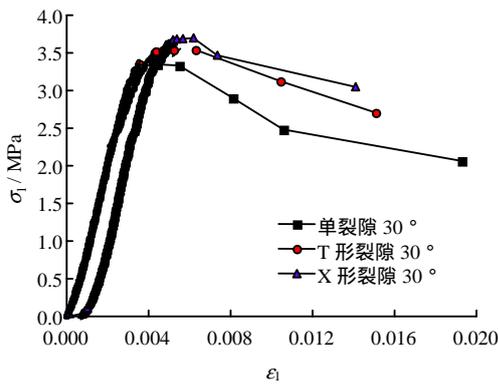
4.2 裂隙形式对强度特征的影响

本节针对裂隙形式与单轴抗压强度的相互关系进行分析。选取裂隙倾角 α 分别为 30° 和 45° 的上述 4 类试样，其中，双裂隙缺少裂隙倾角为 30° 的试样。绘制 30° 和 45° 系列试样应力-应变关系曲线如图 8 所示。根据图中获取各试样的强度参数，绘制两种裂隙倾角下不同裂隙形式与抗压强度的关系如图 9 所示。图中，横坐标数值 1~4 表示裂隙类型。从图中可以看出，对于裂隙倾角为 30° 的试样，X 形裂隙试样抗压强度最大，达到 3.70 MPa，而单裂隙和 T 形裂隙试样分别为 3.35 MPa 和 3.55 MPa；

当裂隙倾角为 45°时, X 形裂隙试样抗压强度最高, 为 3.91 MPa, 第 I 类单裂隙试样抗压强度则仅为 3.44 MPa, 第 II、III 类试样抗压强度分别为 3.52 MPa 和 3.81 MPa。显然, 不同的裂隙倾角试样均表现出一致的规律性, 即随着裂隙形式由第 I 类到第 IV 类的变化, 抗压强度呈现增加趋势。



(a) 45°试样系列



(b) 30°试样系列

图 8 不同裂隙形式试样应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of specimens with different fracture types

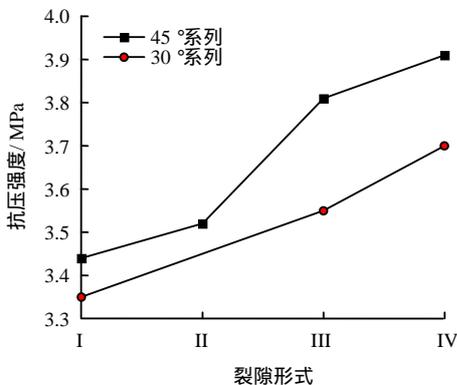


图 9 裂隙形式与试样抗压强度关系

Fig.9 Relationships between fracture types and UCS

对于同一尺寸试样, 随着裂隙长度和数量的增加, 材料的强度会逐渐降低, 单裂隙试验结果也验

证了这一规律。如图 10 所示, 随着裂隙长度由 15 mm 增加至 30 mm, 抗压强度由 3.52 MPa 降为 2.95 MPa, 弹性模量则由 1.17 GPa 降为 0.69 GPa。然而, 随着第 I 到第 IV 类裂隙试样裂隙长度及数量逐渐增加, 强度参数却表现出降低趋势, 因此其内在机制不能简单的通过裂隙数量来描述。

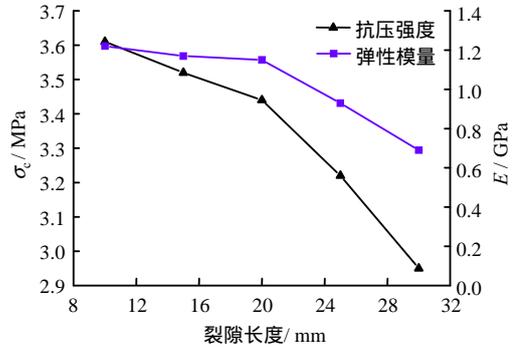


图 10 强度参数与裂隙长度关系

Fig.10 Relationships between strength parameter and fracture length

4.3 强度特征影响机制初步分析

试验对加载过程中的声发射特征进行了监测, 采集的声发射指标有声发射能量、累积总能量、声发射计数和累积总计数等。选取试验过程中总的声发射能量为特征参数, 绘制连续加载条件下 45°和 30°不同裂隙试样的声发射总能量曲线如图 11 所示。需要说明的是, 图声发射总能量并不是试样加载过程中时释放的绝对能量, 而是声发射监测系统处理后的相对能量, 为量纲为 1 的量。

从图 11、12 可以看出, 对于不同裂隙倾角, 随着裂隙形式由单裂隙到 X 交叉裂隙变化, 裂隙形式与声发射总能量总是具有相同的规律: (1) 试样起裂所对应的总能量逐渐增加, 其中 45°裂隙试样声发射总能量值由 27 193 逐渐增加至 69 015, 30°裂隙试样声发射总能量值由单裂隙时的 31166 增加到了 X 形交叉裂隙时的 75 623; (2) 试样起裂所对应的加载时间逐渐增加, 对于 45°裂隙试样, 起裂时加载时间分别为 230、256、260、278 s, 30°裂隙试样起裂时间分别为 230、269、281 s; (3) 试样失稳时所对应的总能量逐渐增加, 其中 45°裂隙试样失稳时声发射总能量由单裂隙时的 45 556 增加到 X 形交叉裂隙时的 77 886, 30°裂隙试样则由 44 951 增加到 75 061。

岩体加载和裂隙的扩展失稳过程对应着能量的聚集与释放, 显然, 声发射总能量越大, 试样起裂失稳所需能量也越大。对比不同裂隙形式试样的声

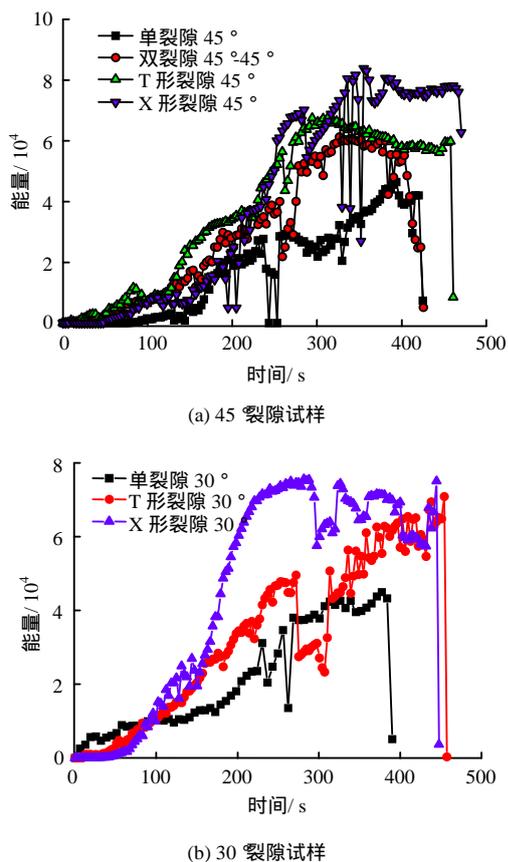


图 11 不同裂隙形式试样声发射总能量曲线
Fig.11 Total AE energy curves of specimens with different fracture types

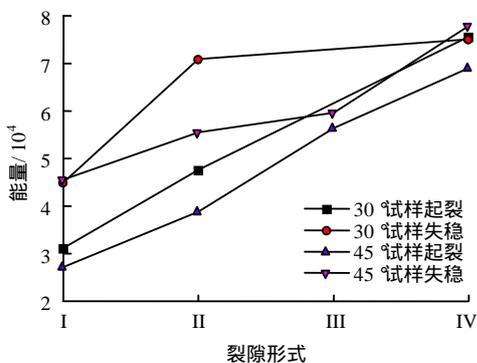


图 12 裂隙形式与声发射总能量关系
Fig.12 Relationships between total AE energy and fracture type

发射特征及强度特征可知，试样的抗压强度与声发射总能量总是呈现正相关关系，即试样的抗压强度越高，则声发射总能量也越大，随之试样起裂也需要更多的能量。因此，通过声发射这一内部监测手段，可以初步认为裂隙形式影响抗压强度的内在机制在于：对于同一试样尺寸形式，不同的裂隙分布形式影响了试样内部受力状态，改变了裂尖及周围区域的应力场，从而导致裂隙起裂及失稳所需能量的差异，宏观上则表现为强度特征的不同。

5 结 论

(1) 裂隙形式不会对试样破坏模式造成较大影响。单轴压缩条件下有 4 种不同的裂隙形式，试样的破坏模式基本一致，均表现为初始裂隙的起裂破坏。

(2) 裂隙形式对试样的强度特征存在显著的影响。对于主裂隙倾角为 30°和 45°的不同裂隙形式，单裂隙试样单轴抗压强度最低，双裂隙和 T 形裂隙试样次之，X 形裂隙试样抗压强度最高。

(3) 随着裂隙形式由单裂隙到 X 形裂隙变化，试样起裂和失稳对应的声发射总能量均呈现增加趋势。

(4) 不同试样通过裂隙形式影响了应力场，从而改变了试样起裂失稳所需能量，成为不同裂隙形式试样抗压强度差异化的主要原因。

参 考 文 献

[1] YANG Sheng-qi. Crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing two coplanar fissures in the process of deformation failure[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(17): 3059 - 3081.

[2] YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru, JING Hong-wen. Experimental investigation on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 63: 82 - 92.

[3] 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.

YANG Sheng-qi. Study of strength failure and crack coalescence behavior of sandstone containing three pre-existing fissures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 31 - 39.

[4] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉, 等. 纵向裂隙对砂岩力学特性影响试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(4): 644 - 649.

SU Hai-jian, JING Hong-wen, ZHAO Hong-hui, et al. Experimental study on the influence of longitudinal fissure on mechanics characteristic of sandstone[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(4): 644 - 649.

[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 - 2108.

ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al.

- Fracture experiments on ordered multi-crack body in rock-like materials under uniaxial compression and numerical simulation of wing cracks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(11): 2097 - 2108.
- [6] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. **岩土力学**, 2010, 31(11): 3661 - 3666.
- PU Cheng-zhi, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, et al. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3661 - 3666.
- [7] 靳瑾, 曹平, 蒲成志. 预制裂隙几何参数对类岩材料破坏模式及强度的影响[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2014, 45(2): 529 - 535.
- JIN Jin, CAO Ping, PU Cheng-zhi. Influence of flaw parameters on damage mode and strength of rock-like materials[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2014, 45(2): 529 - 535.
- [8] WONG R H C , CHAU K T , TANG C A , et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws. part I. Experimental approach[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(7): 909 - 924.
- [9] 陈新, 廖志红, 李德建. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(4): 781 - 789.
- CHEN Xin, LIAO Zhi-hong, LI De-jian. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 781 - 789.
- [10] 蒋昱州, 杨圣奇, 徐卫亚, 等. 非贯通裂纹岩石压缩试验及非线性回归分析[J]. **采矿与安全工程学报**, 2008, 25(3): 290 - 296.
- JIANG Yu-zhou, YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, et al. Compression test of intermittent crack under uniaxial and nonlinear regression[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2008, 25(3): 290 - 296.
- [11] 刘东燕, 朱可善, 范景伟. 双向应力作用下 X 型断续节理岩体的强度特性研究[J]. **重庆建筑工程学院学报**, 1991, 13(4): 40 - 46.
- LIU Dong-yan, ZHU Ke-shan, FAN Jing-wei. Strength properties of rock mass with bidirectional intermittent cross joints[J]. **Journal of Chongqing Institute of Architecture and Engineering**, 1991, 13(4): 40 - 46.
- [12] 刘欣宇, 刘爱华, 李夕兵. 充填柱状节理类岩石材料的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(4): 772 - 777.
- LIU Xin-yu, LIU Ai-hua, LI Xi-bing. Experimental study of columnar jointed sandstone-like material with preset filling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(4): 772 - 777.
- [13] 张波, 李术才, 杨学英, 等. 含交叉裂隙岩体相似材料试件力学性能单轴压缩试验[J]. **岩土力学**, 2012, 33(12): 3674 - 3679.
- ZHANG Bo, LI Shu-cai, YANG Xue-ying, et al. Uniaxial compression tests on mechanical properties of rock mass similar material with cross-cracks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3674 - 3679.
- [14] 张波, 李术才, 杨学英, 等. 含交叉裂隙节理岩体单轴压缩破坏机制研究[J]. **岩土力学**, 2014, 35(7): 1863 - 1870.
- ZHANG Bo, LI Shu-cai, YANG Xue-ying, et al. Uniaxial compression failure mechanism of jointed rock mass with cross-cracks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1863 - 1870.
- [15] 刘学伟, 刘泉声, 刘滨, 等. 侧向压力对裂隙岩体破坏形式及强度特征影响的试验研究[J]. **煤炭学报**, 2014, 39(12): 2405 - 2411.
- LIU Xue-wei, LIU Quan-sheng, LIU Bin, et al. Experimental study on effects of lateral pressure on failure modes and strength characteristics of fractured rock mass[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(12): 2405 - 2411.