

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2152

裂隙充填影响巴西圆盘抗拉力学特性试验研究

滕尚永^{1,2}, 杨圣奇^{1,2}, 黄彦华^{1,2}, 田文岭^{1,2}

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 裂隙是影响岩石力学特性和破裂模式最重要的因素之一, 通过试验、数字照相技术和声发射监测对完整和含不同裂隙倾角 α 单裂隙、不同岩桥与裂隙夹角 γ 双裂隙充填与非充填类岩石材料巴西圆盘的抗拉强度和破裂模式进行研究, 探讨了随着 α 、 γ 的不断变化和裂隙充填与否对试样最终破坏机制的影响。试验结果表明: (1) 随着裂隙倾角 α 不断增大, 单裂隙试样的抗拉强度先减小后增大, 然后又减小; 预制裂隙尖端萌生的翼裂纹贯通造成试样破坏; (2) 双裂隙试样的抗拉强度随着 γ 的增大先减小后增大; 预制裂隙尖端萌生的翼裂纹和远场裂纹的扩展导致试样破坏; (3) 在 α 、 γ 相同的情况下, 充填试样抗拉强度明显要高于非充填试样; 预制裂隙充填与否对试样裂纹扩展的时间和裂纹数目影响较大; (4) 加载初期, 声发射较为平稳; 宏观裂纹出现或者抗拉强度跌落时声发射将会变的异常活跃; 在 α 、 γ 相同的情况下充填试样声发射的起伏变化更为剧烈。

关 键 词: 类岩石材料; 预制裂隙; 破坏机制; 抗拉强度; 声发射

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)12-4493-16

Experimental study of influence of crack filling on mechanical properties of Brazilian discs

TENG Shang-yong^{1,2}, YANG Sheng-qi^{1,2}, HUANG Yan-hua^{1,2}, TIAN Wen-ling^{1,2}

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Fissure is one of the most important factors affecting mechanical properties and failure modes of rocks. Based on experimental results, digital photographic technology and acoustic emission (AE) monitoring to investigate tensile strength and failure modes of intact, and containing different crack angles α single, different angles between rock bridge and crack γ double filled and unfilled pre-existing fissures rock-like material Brazilian disc samples. The effects on final failure mechanisms of samples with the change of filling condition, α and γ are also discussed. The results show that the tensile strength of single pre-existing fissure filled samples decreases firstly and then increases and finally decreases with the increase of α . The wing cracks initiate from the tip of the pre-fissure, and then cut-through, finally the samples show brittle destruction. The tensile strength of those samples containing two pre-existing fissures decreases firstly and then increases with the increase of γ . The propagation and evolution of wing cracks initiated from two pre-existing fissures and far-field cracks lead to the the destruction of samples. The tensile strength of filled samples is higher than unfilled samples obviously, when the corresponding values of α and γ are the same. Whether the pre-existing fissure filling has a great impact on the crack propagation time and the number of cracks. At the initial loading stage, the cumulative acoustic emission counts are relatively stable. When the surface of samples initiated cracks initially or the tensile strength increases to the peak, the acoustic emission activities become extremely active. When the corresponding values of α and γ are the same, the fluctuation of acoustic emission counts of the filled samples is more violent than that of the unfilled.

Keywords: rock-like materials; pre-existing fissures; failure mechanism; tensile strength; acoustic emission

收稿日期: 2017-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51734009, No.51179189); 江苏省第五期“333”工程培养资金资助项目; 中国博士后创新人才支持计划项目 (No.BX20180359); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (No.KYCX18_1969)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51734009, 51179189), the Fifth Phase of Jiangsu Province "333" Project, the National Postdoctoral Program for Innovative Talents (BX20180359) and the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX18_1969).

第一作者简介: 滕尚永, 男, 1991 年生, 硕士, 主要从事深部岩石力学与地下工程方面的研究工作。E-mail: 18361207509@163.com

通讯作者: 杨圣奇, 男, 1978 年生, 博士(博士后), 教授, 博士生导师, 主要从事深部岩石力学与地下工程方面的研究工作。E-mail: yangsqi@hotmail.com

1 引言

岩石的力学行为是采矿、隧道开挖、水利工程所需要考虑的主要问题之一,自然界中岩石普遍存在着裂隙,裂隙的位置分布、数量、几何形状等等因素,都会对岩石的力学性质产生影响。岩石中裂隙的研究已经成为国内外许多学者的重要课题,目前诸多学者通过单轴、双轴、三轴试验并结合数值模拟探究了加载方式、裂隙数量、裂隙长度、裂隙的几何分布情况、层理角度、温度、围压、孔洞等因素在试验过程中对岩石或者类岩石材料的强度、裂纹演化机制的影响^[1-9]。

岩石大多呈现脆性特性,而由于拉伸试验操作起来相对比较困难,所以对于处于拉伸状态下的研究相对较少,而岩石的破坏大多又以拉伸破坏为主,所以岩石的抗拉特性的研究就变得尤为重要。对于岩石的拉伸强度的测试一般采用直接拉伸和间接拉伸两种试验方法,而直接拉伸试验难度较大,因而一般采用间接拉伸试验即巴西圆盘试验进行岩石抗拉强度的测试。许多学者通过巴西试验和数值模拟研究了预制裂隙、孔洞、不同应变速率、饱水、不同颗粒粒度、不同层理角度、高温、裂隙充填与否等等因素影响下试样的抗拉强度、拉伸敏感系数、径向应变、声发射能量、破坏模式、裂纹演化的变化规律,从而为保障不同环境下岩体的稳定与安全提供重要的理论支持和技术指导^[10-20]。

上述试验对不同因素影响下巴西圆盘的抗拉强度、破坏模式等进行了分析,但对于含充填与非充填裂隙巴西试样的研究较少。本文在前人研究的基础之上,通过试验、数字照相技术和声发射对含充填与非充填裂隙试样的抗拉强度和裂纹演化规律进行了探讨。

2 试样制作

类岩石材料便于制作,可以制作含不同节理、不同数量和倾角的预制裂隙,便于对岩石的力学行为和裂纹扩展进行研究和探讨。试样制作使用水泥、石英砂、自来水、云母片等试验材料。水泥标号为C75,石英砂直径在0.106~0.212 mm范围之间,而云母片作为充填材料参与充填与非充填裂隙试样的制作。先按照水泥:石英砂:水=1:0.85:0.35的配合比制作混合砂浆制作直径为50 mm、高为100 mm的试样。模具的底座上有预先切好了槽孔以便将云母片插入。浇筑的过程中首先将厚度为0.8 mm的云母片插入模具底座上,在一部分试样还未完全凝固

的时候将云母片拔出,而另一部分试样中的云母片需要充当充填材料从而不必拔出,通过这种方式制作充填与非充填的试样。试样浇筑完成之后在水浴箱中养护28 d,养护完成待试样完全干燥后进行端面磨平,然后切割、打磨,制作成直径为50 mm,高度为25 mm的巴西圆盘。本文的试验共制作了3种巴西圆盘,分为完整巴西圆盘、充填与非充填单裂隙巴西圆盘、充填与非充填双裂隙巴西圆盘。单裂隙巴西圆盘裂隙倾角分别为0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°;共7组;双裂隙巴西圆盘岩桥与下端裂隙倾角 γ 分别为45°、90°、180°、225°、270°;共5组。除完整圆盘,其他试样的裂隙厚度均为0.8 mm,长度均为8 mm,岩桥的长度均为10 mm。图1是加工试样所使用的模具、完整试样和含单裂隙、双裂隙的几何分布示意图。

3 试验过程及结果分析

试验在中国矿业大学深部岩土国家重点实验室的DNS300试验机上完成,试样采用位移加载方式,加载速率设为0.1 mm/min进行轴向加载。试验过程中采用数字照相技术和声发射系统对试验过程中试样的破坏过程和裂纹扩展进行图像的记录和信息采集(如图2所示)。对完整、单裂隙、双裂隙巴西圆盘进行抗拉强度的测试,然后将3种试样的应力-位移曲线进行对比,分析完整和含预制裂隙圆盘的应力、位移、破裂模式。通过对数字照相、声发射系统采集的信息对完整、单裂隙、双裂隙的破坏过程和裂纹的演化过程进行研究和探讨。试验过程中每种裂隙特征相同的圆盘重复进行3次试验,从中选取试验结果、破裂模式相近的作为最终的试验结果,从而减少试验误差。

图3是直径为50 mm,高度为100 mm的圆柱体试样及完整巴西圆盘在单轴压缩下的应力-应变曲线、应力-位移曲线和试样最终破裂模图。从图3(a)中可以看出,圆柱体试样的应力-应变曲线大致呈倒V字型,在加载过程中试样最大轴向应力增至87.52 MPa后缓慢降低,呈现延性破坏。从图3(b)中可以看出,完整圆盘的抗拉强度增至峰值6.85 MPa后应力跌落,试样强度不断下降最终破坏。从图3(c)中可以看出,在单压缩过程圆柱体试样表面裂纹不断萌生、扩展。随着轴向应力的不断增大试样内部的损伤随之逐渐增加,裂纹的数量、宽度也随之增加,且裂纹在加载过程中不断延伸、扩展,最终裂隙在整个试样表面贯通,试样丧失承载力而破坏。从图3(d)中可以看出,完整巴西圆盘

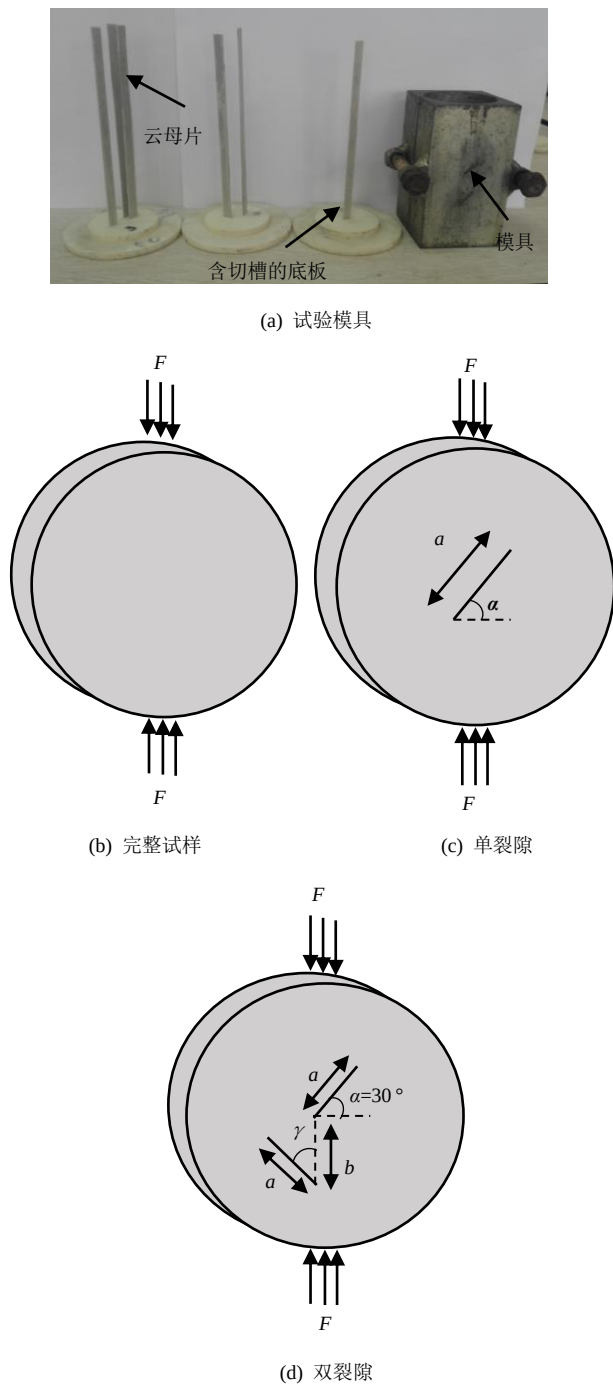


图 1 试验模具和裂隙几何分布图

Fig.1 The module of experiment and geometric distribution of fissures

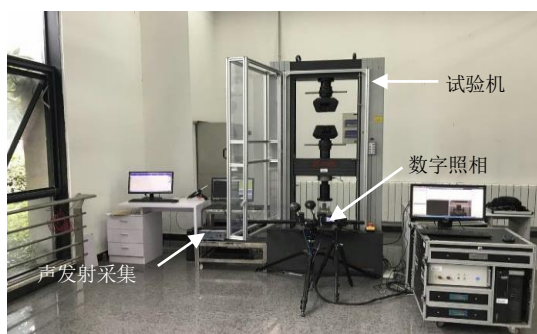
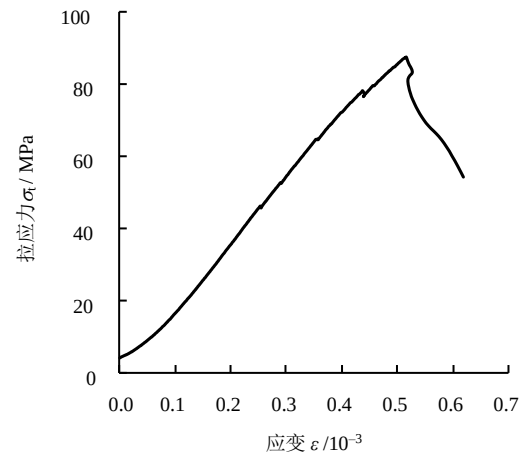
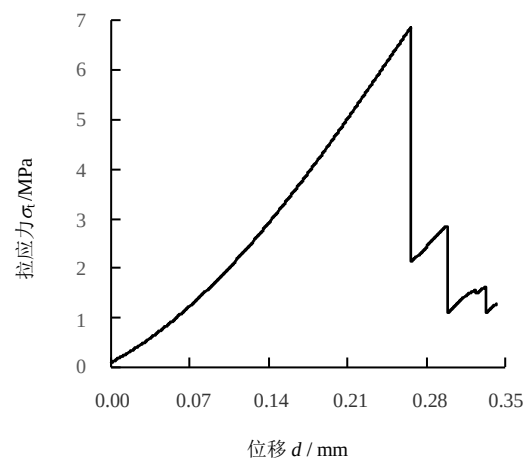


图 2 试验设备

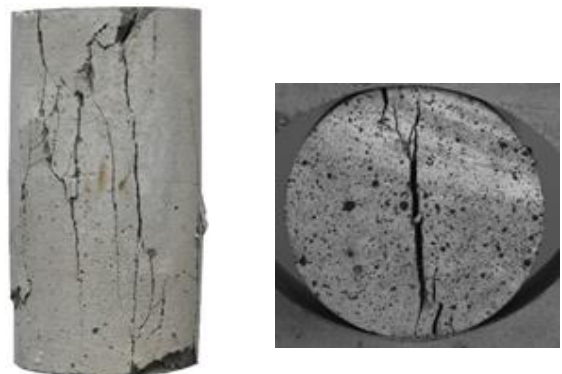
Fig.2 Photo of experimental equipment



(a) 标准圆柱体试样单轴压缩应力-应变曲线



(b) 完整巴西圆盘应力-位移曲线



(c) 标准圆柱体试样单轴压缩破坏模式 (d) 完整巴西圆盘破裂模式

图 3 完整试样的力学特性及破坏模式

Fig.3 Mechanical properties and failure mode of intact samples

试样表面裂纹最终贯通，在远场裂纹的共同作用下试样完全丧失承载力而破坏。

3.1 单裂隙巴西圆盘力学特性及裂纹扩展

图 4 是完整圆盘和含不同裂隙倾角充填与非充填单裂隙圆盘的应力-位移曲线和抗拉强度峰值随

裂隙倾角的变化图。随着裂隙倾角的不断增大其应力-位移曲线、峰值强度也随之发生变化。通过图 4 可以看出,在裂隙倾角在 0° 时,预制裂隙与加载方向垂直,充填与完整试样的位移-应力曲线走势相似,且充填裂隙试样的抗拉强度峰值和位移同完整试样相差很小,而非充填试样抗拉强度相对较小。结合图 4 可以看出,随着预制裂隙倾角的增大充填裂隙试样的抗拉强度峰值先减小, 45° 时最小,然后又增大,直至倾角为 75° 后又开始减小,而且在倾角为 45° 和 60° 的时候出现了峰后脆性向延性转化的现象;从图 4(b)、4(c)可以看出,非充填裂隙试样最终大多呈现脆性破坏,抗拉强度在峰值之后迅速跌落,试样产生很小的位移之后就已经破坏,随着裂隙倾角的增大其抗拉强度峰值呈现先减小,后增大,然后又减小,最后增大的趋势,其抗拉强度峰值变化规律和充填裂隙试样相似。图 4(c)表明,在裂隙倾角为 45° 和 60° 的时候充填与非充填裂

隙试样的强度峰值相差不大,而在其他几组裂隙倾角下二者峰值强度的相差比较大,可以看出,裂隙倾角相同的情况下充填裂隙试样的抗拉强度明显要大于非充填裂隙试样。在裂隙倾角相同的情况下充填与非充填裂隙试样的应力、位移、峰值强度受到试样自身充填与否的影响。

Zhuang 等^[20]对充填与非充填单裂隙立方体试样的研究表明,充填比非充填裂隙试样的应力峰值相对较大,且同一裂隙倾角下二者初始裂纹对应的角度也不同。图 5 通过对相同裂隙倾角下充填与非充填试样的应力-位移曲线分析进一步探讨二者间力学特性的差异。从图 5 中可以看出,预制裂隙倾角 α 从 0° 到 90° 间变化时,在同一裂隙倾角下充填裂隙试样的拉应力峰值明显大于非充填裂隙试样,但随着裂隙倾角的增大充填裂隙试样内部的充填材料与加载方向的夹角不断减小,同一裂隙倾角对应的拉应力峰值间的差距渐渐减小。另外除

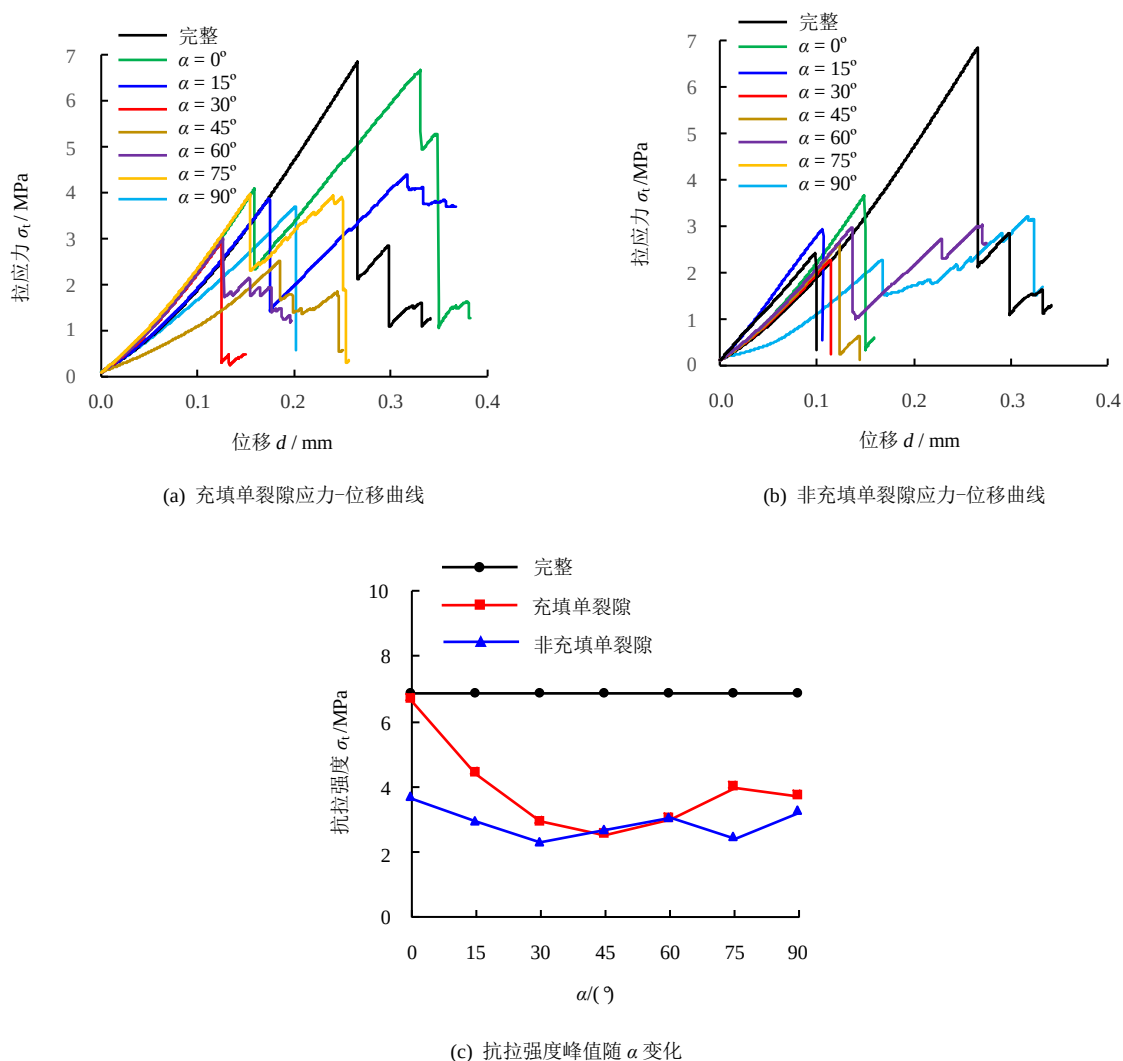
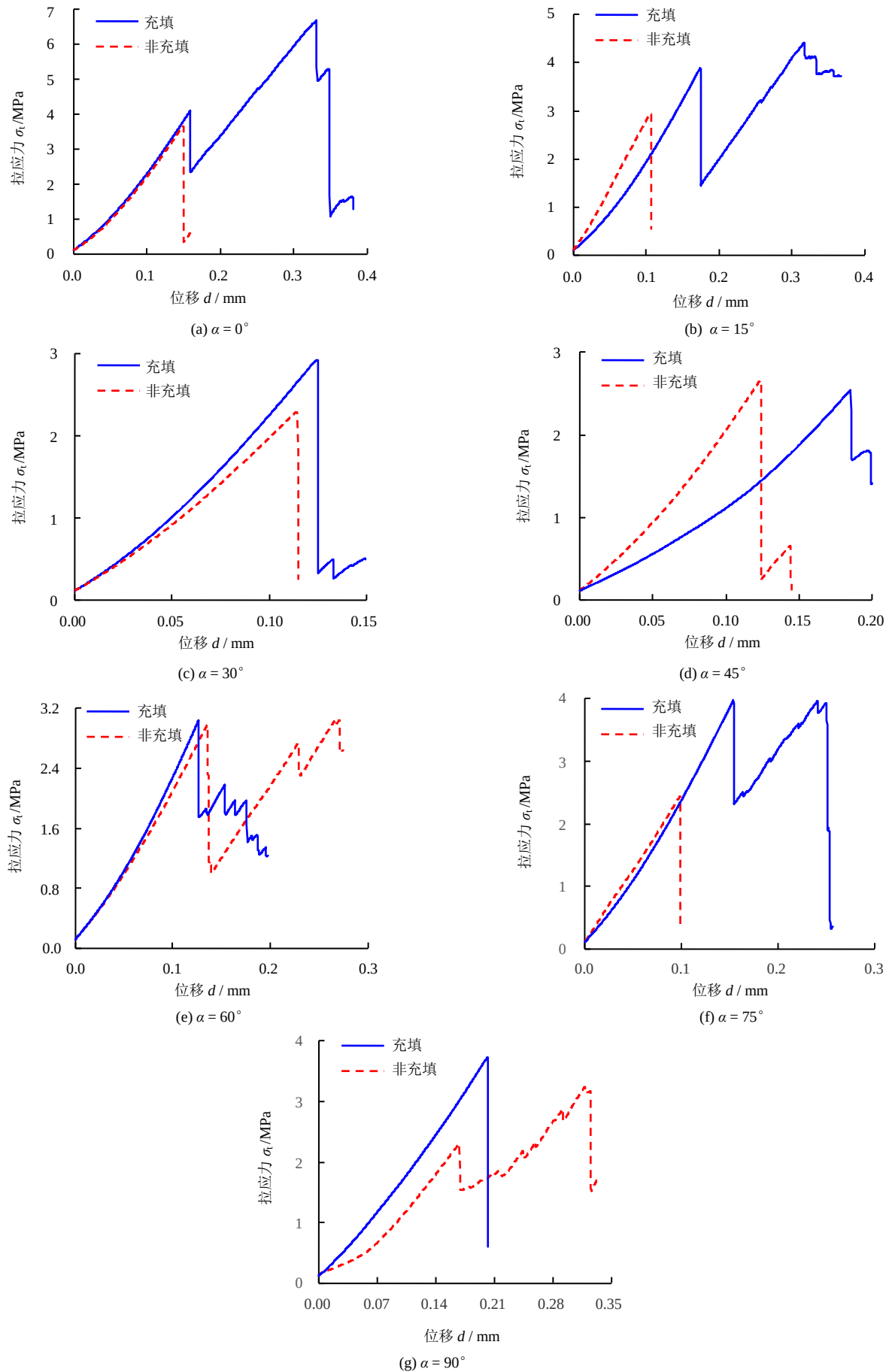


图 4 单裂隙试样位移-应力曲线和峰值强度随 α 的变化

Fig.4 Stress-displacement curves of samples with single pre-existing fissure and the peak strength with different values of α

图 5 充填与非充填试样随 α 变化的应力-位移曲线Fig.5 Stress-displacement curves of filled and unfilled samples with the change of α

60° 和 90° 外应力峰值对应的位移均大于非充填裂隙试样, 非充填裂隙试样在拉应力峰值跌落后发生脆性破坏, 而充填裂隙试样在峰值过后还有一定的应力残留, 非充填裂隙试样应力跌落较早, 在发生较小位移的时候拉应力就开始跌落。当试样应力增至峰值后, 随着加载的继续部分裂纹之间的孔洞、裂隙再次被压实从而使试样仍然具有一定的强度, 因而部分试样的应力-位移曲线出现多次峰值(例如 α 为 15° 时)。从应力-位移曲线可以看出, 非充填与充填裂隙试样相比脆性特征更为明显, 相同的加载条件下更容易发生破坏。由此可见, 在加载过程中充填材料在一定程度上保证了试样的完整性, 提高了试样抵抗破坏的能力, 增强了试样的延性和抗拉强度, 但是充填材料无法完全保证试样的完整性, 随着裂隙倾角的增加充填材料与加载方向渐渐平行, 充填材料抵抗破坏的能力渐渐减弱, 充填与非充填试样在拉应力较小的时候就已经开始破坏, 因此, 充填与非充填试样拉应力峰值差距渐渐减小。

图 6 为充填与非充填单裂隙不同裂隙倾角下巴西圆盘的最终破裂模式。从图中可以看出, 随着预制裂隙倾角变化充填与非充填裂隙试样的裂纹扩展和破裂模式发生变化, 在预制裂隙倾角相同的情况下充填与非充填裂隙试样破裂模式相似, 充填与非充填裂隙试样的破坏是由于在加载过程中翼裂纹贯通、远场裂纹的延伸共同作用导致的。在加载过程中预制裂隙处属于缺陷区, 而试样的破坏均是从预制裂隙处开始, 随着 α 的逐渐增大预制裂隙渐渐与加载方向平行, 裂隙尖端更容易萌生裂纹。非充填

试样预制裂隙处在加载过程中无法传递应力, 从而在预制裂隙处导致应力集中, 因此, 预制裂隙尖端裂纹迅速萌生、贯通。而充填试样预制裂隙处含充填材料, 在试样加载过程中充填材料同样会承受、传递一部分力, 然而充填材料(云母片)的强度无法与试样本身相比, 充填试样预制裂隙处同样会出现应力集中的情况, 当加载到一定程度时预制裂隙处应力较大, 预制裂隙尖端处翼裂纹萌生, 随着加载的继续裂纹最终贯通整个试样。从图 6 中可以看出, 随着裂隙倾角 α 的不断增大, 试样表面宏观裂纹的数量逐渐减少。在 α 为 0° 时预制裂隙与加载方向垂直, 充填与非充填试样预制裂隙尖端萌生的翼裂纹无法沿着预制裂隙贯通整个试样, 因此, 试样此时的抗拉强度相对较高, 而由于充填试样预制裂隙处存在充填材料, 所以充填试样的抗拉强度较高。当预制裂隙倾角 $\alpha > 0^\circ$ 时预制裂纹尖端的翼裂纹向试样上下两端延伸, 而由于预制裂隙与加载方向的夹角逐渐减小, 裂纹与预制裂隙迅速贯通, 最终导致试样破坏。充填与非充填试样的裂隙倾角相同的情况下虽然充填试样内部的充填材料能够减缓裂纹的扩展速度, 但是随着 α 的不断增大, 预制裂隙与加载方向逐渐平行, 在试样的加载过程中充填材料对于力的承受和传递作用逐渐降低, 裂纹在沿预制裂隙扩展过程中受到充填材料的阻碍随着 α 的增大而减弱。当 α 为 90° 时充填材料的作用降至最低, 预制裂隙尖端的翼裂纹最终会与预制裂隙迅速贯通, 因此, 充填与非充填试样的抗拉强度都较低, 而由于裂纹演化受到的阻碍作用较小, 因此,

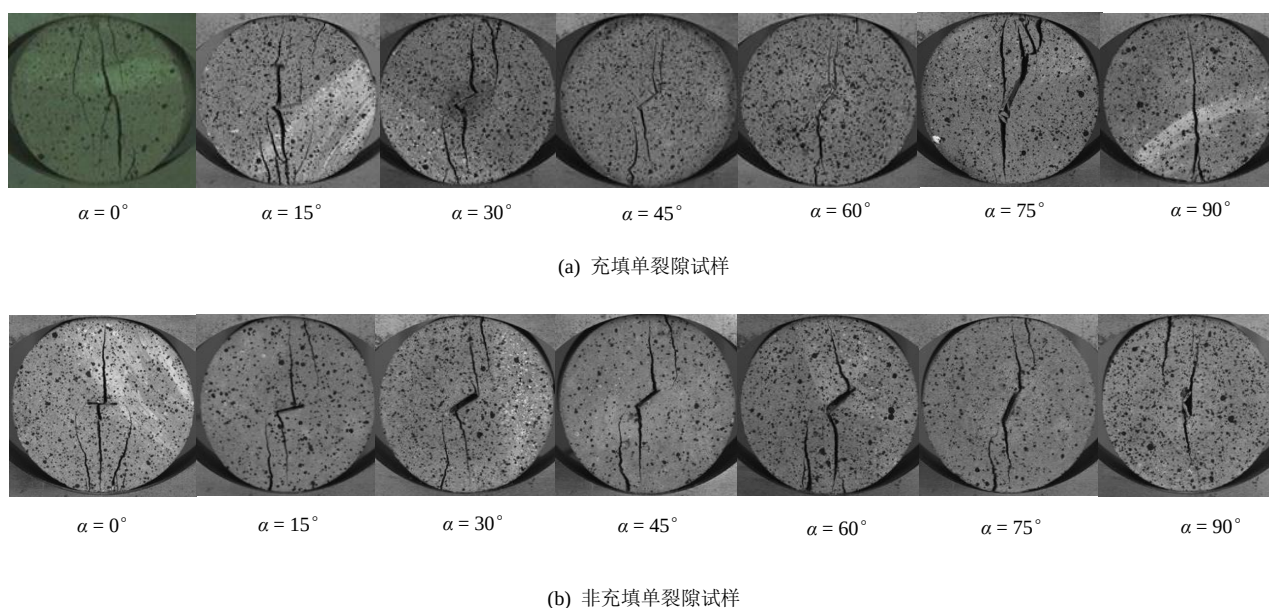


图 6 不同 α 的单裂隙试样最终破裂模式

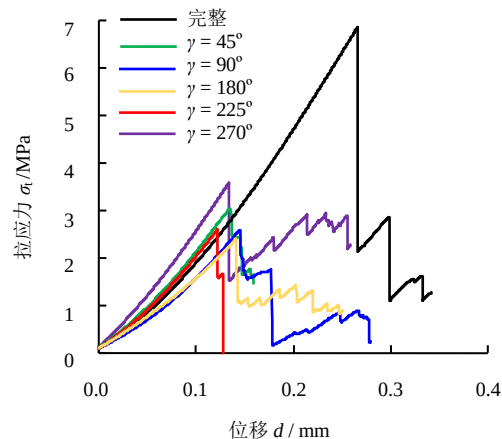
Fig.6 The final failure modes of filled and unfilled samples containing single pre-existing fissure with different values of α

试样表面产生的裂纹数目就相对较少。

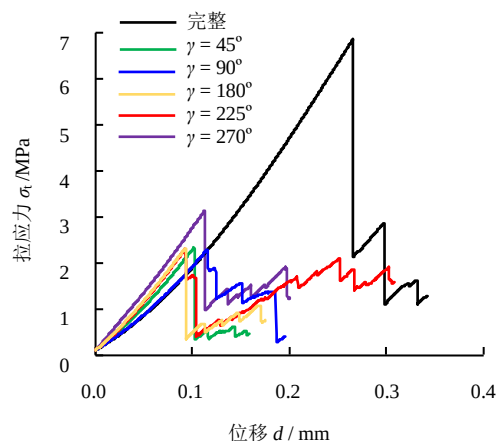
3.2 双裂隙巴西圆盘力学特性及裂纹扩展

与单裂隙试样相比双裂隙试样在加载过程中力学行为和裂纹扩展更为复杂。图 7 为充填、非充填双裂隙的应力-位移曲线图和抗拉强度峰值随 γ 的变化折线图。Haeri 等^[21]通过试验和模拟研究了两条预制裂隙的类岩石材料巴西圆盘的裂纹扩展机制，以及试验对不同倾角和裂隙长度对试样裂纹演化机制的影响，试验结果表明，预制裂隙尖端的翼裂纹在加载过程中沿着加载方向扩展、贯通最终导致试样破坏。从图 7 可以看出，随着 γ 的变化充填双裂隙试样的抗拉强度逐渐降低，后增大。在 γ 为 225° 时降至最低， γ 为 270° 时试样的抗拉强度陡增。 γ 为 225° 时以外其他试样均出现脆性向延性转化的现象。充填与非充填双裂隙试样随着 γ 的变化其抗拉强度峰值呈现先减小后增大的规律。在 γ 为 180° 时充填与非充填双裂隙试样的抗拉强度最小，当裂隙倾角为 270° 时抗拉强度增至最大。随着 γ 的增大充填与非充填双裂隙试样的抗拉强度峰值的差距越来越小，在 γ 为 180° 时候距最小，在 γ 为 45° 和 270° 时抗拉强度峰值差距较大，在 γ 为 45° 时差距最大。

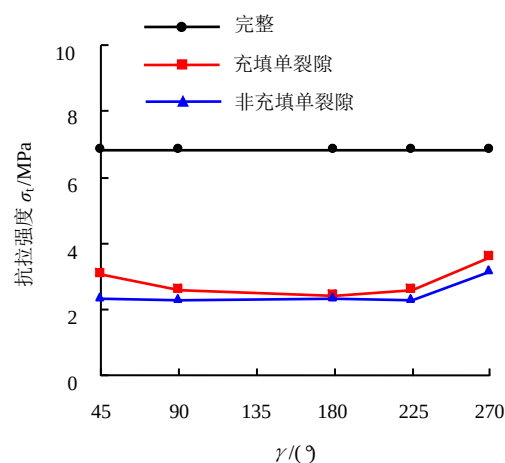
图 8 将同一 γ 下充填与非充填双裂隙试样的应力-位移曲线进行对比，通过对图 8 的观察可以看出，充填与非充填双裂隙试样的应力-位移曲线形状相似，且在拉应力增至峰值后均出现多次峰值的情况。与图 5 进行比较，虽然单裂隙试样仅含一条预制裂隙，截面的完整性较好，但是由于在加载过程中预制裂隙尖端翼裂纹通过预制裂隙迅速扩展，拉应力增至峰值后裂纹已经贯通整个试样，试样呈脆性破坏，几乎无残余强度。而双裂隙试样在峰后仍然具有一定的残余强度，且出现多次峰值和脆性向延性转化的情况。由于充填与非充填双裂隙试样含两条预制裂隙，在加载过程中预制裂隙尖端萌生的翼裂纹数目较多，拉应力增至峰值后裂纹并未完全贯通整个试样，随着加载的继续部分裂纹与孔隙被压密，双裂隙试样具有一定的残余强度。当再次应力跌落，试样内部应变能得到释放，应力进行重新调整，因此，双裂隙试样拉应力增至峰后会出现多次峰值和脆性向延性转化的情况。非充填双裂隙试样预制裂隙处无充填材料，拉应力跌落后，随着加载的继续试样再次出现应力跌落，应力重新调整，试样内部积累的应变能较多，残余强度有所提高，所以非充填试样在应力跌落后产生的应力台阶普遍呈上升趋势。充填双裂隙试样存在充填材料预制裂隙处处



(a) 充填双裂隙应力-位移曲线



(b) 非充填双裂隙应力-位移曲线



(c) 抗拉强度峰值随 γ 变化

图 7 双裂隙试样应力-位移曲线和峰值强度随 γ 的变化
Fig.7 Stress-displacement curves of samples with two pre-existing fissures and the peak strength with different values of γ

于较密实状态，试样内积累应变能相对较少，应力再次跌落后应变能释放，应力进行重新调整，残余

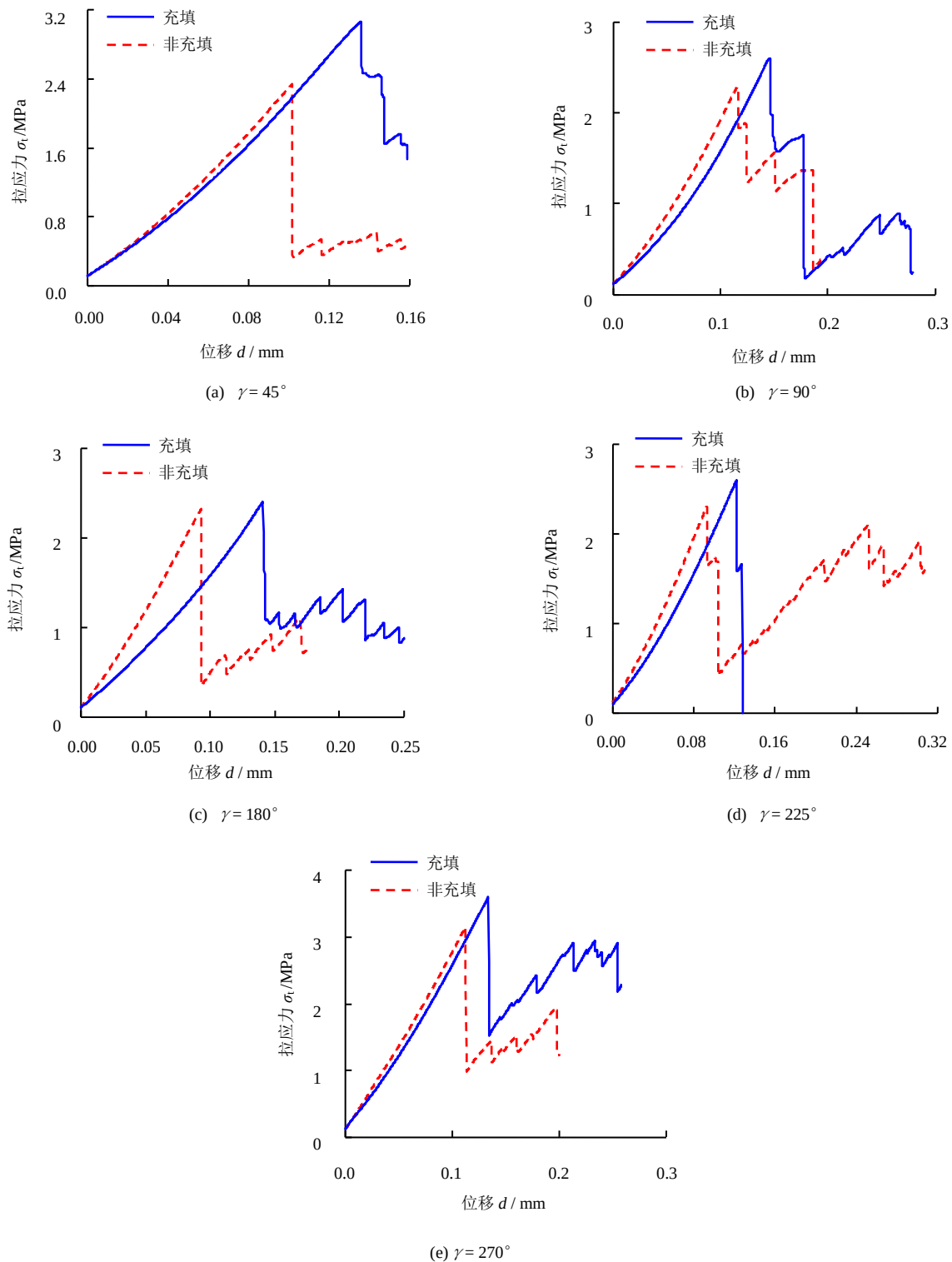


图 8 充填与非充填试样应力-位移曲线随 γ 的变化

Fig.8 Stress-displacements curves of filled and unfilled samples with different values of γ

强度有所降低, 所以充填试样在应力跌落后产生的应力台阶普遍呈下降趋势。

图 9 为充填与非充填双裂隙试样的最终破坏模式和裂纹几何分布情况, 随着 γ 的增加, 试样裂纹的分布和扩展发生变化。

从图 9 可以看出, 试样的最终破坏主要是由于

裂隙尖端产生的翼裂纹和预制裂隙贯通最终导致试样破坏。预制裂隙处属于缺陷, 充填与非充填双裂隙试样在加载过程中预制裂隙尖端均会出现应力集中的情况。非充填双裂隙试样由于预制裂隙处无充填材料, 应力集中较为迅速, 试样裂纹萌生速度较快, 而充填试样内部充填材料可传递和承受部分应

力, 因此, 应力集中较为缓慢, 裂纹萌生速度较慢。从图 9 可以看出, 在 γ 为 45° 时, 随着试样所受的荷载增加, 在裂隙尖端萌生了翼裂纹, 并在试样上、下端萌生了远场裂纹, 充填材料致使翼裂纹的扩展速度减慢, 而无充填材料的试样预制裂隙尖端的翼裂纹扩展比较迅速, 虽然翼裂纹没有在加载方向上完全贯通, 但在翼裂纹和远场裂纹的共同作用下试样最终发生破坏。随着 γ 的增大试样下端预制裂隙的倾角不断变化, 在加载过程中试样下端预制裂隙尖端翼裂纹萌生和扩展的难易程度不断变化。从 90° 到 180° 试样下端的预制裂隙与加载方向的夹角不断减小, 裂隙尖端翼裂纹的发育和扩展所受的阻碍减弱, 在 γ 为 180° 时下端预制裂隙与加载方向

平行, 裂隙尖端的翼裂纹扩展速度较快, 沿加载方向贯通, 在远场裂纹和翼裂纹的共同作用下试样最终破坏, 因而相对于其他角度而言, 180° 时试样的抗拉强度更低, 更容易破坏。在 γ 为 270° 时由于试样下端裂隙倾角与加载方向的夹角增大, 裂隙尖端翼裂纹的扩展受到的阻碍作用增大, 所以试样的抗拉强度相对而言较高。从图 7(c)中可以看出, 充填与非充填双裂隙试样的抗拉强度峰值相差不是很大, 且在 γ 为 180° 时二者的抗拉强度相差很小, 相比较单裂隙试样的破坏而言, 由于裂隙数量的增加和裂隙几何分布的变化充填与非充填双裂隙试样间抗拉强度差值减小, 充填材料在裂隙发育和扩展过程中的阻碍作用减弱。

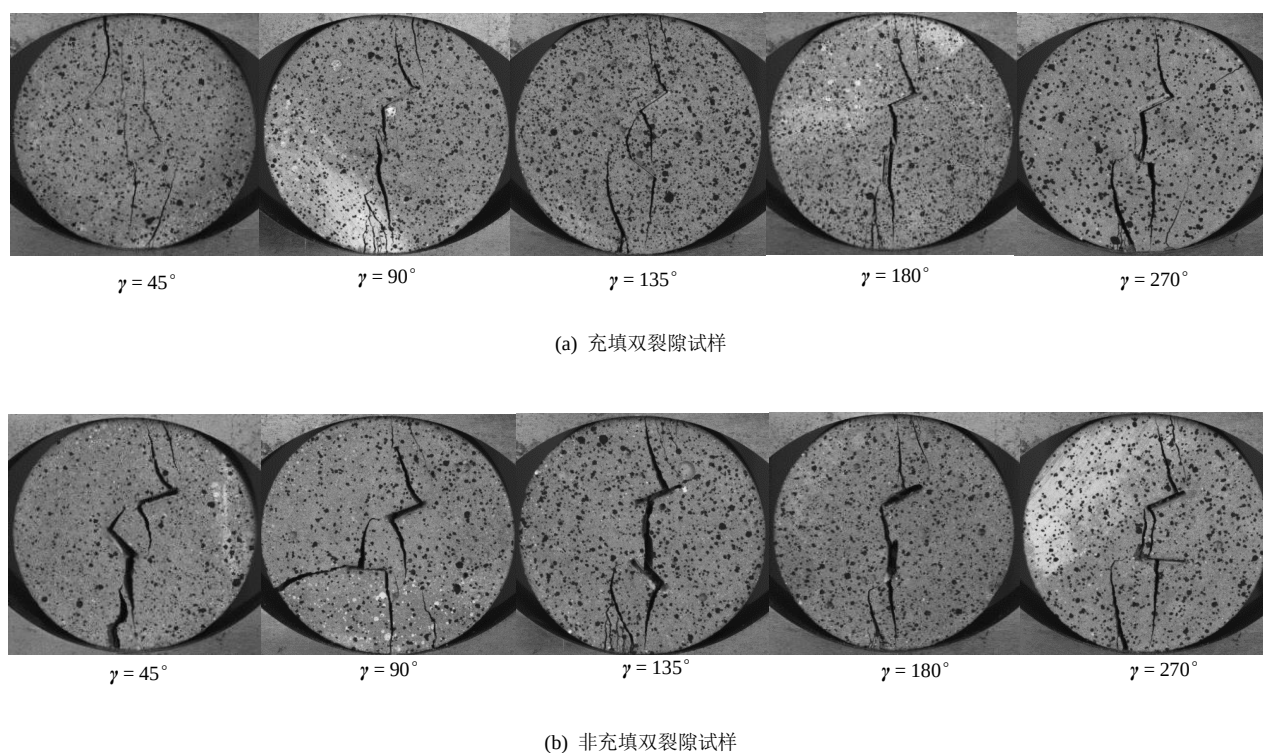


图 9 不同 γ 的双裂隙试样最终破裂模式

Fig.9 The final failure modes of filled and unfilled samples containing two pre-existing fissures with different values of γ

4 声发射特性及裂纹演化分析

自然界中真实岩石内部存在裂隙、孔洞等缺陷, 在作用下内部强度较低的微原体在局部应力集中达到一定程度时发生破坏, 造成损伤, 使局部应力松弛, 产生应力下降, 造成局部区域快速卸载, 产生声发射^[22]。利用声发射可以监测岩石内部的裂纹扩展, 目前许多学者在利用声发射对完整、含缺陷岩石的裂纹扩展进行研究和分析^[23-28]过程中对

完整试样及含单、双裂隙充填与非充填裂隙试样进行声发射监测, 对所测结果分析和研究从而探讨在加载过程中裂纹演化机制和扩展特征。

4.1 完整试样的声发射特性及裂纹演化

图 10 为完整试样的拉应力、振铃计数、累计声发射次数随时间的变化曲线和试样在加载过程中裂隙的萌生、演化、贯通过程。利用数字照相技术拍摄完整试样在不同的应力状态下试样的裂纹演化情况, 从图中可以看出, 随着应力的变化裂纹在几

何分布、数量、宽度上发生变化。

通过数字照相拍摄照片可以看出,完整试样在应力跌落之前只在内部产生微观裂纹,而微观裂纹的聚集还未在试样表面以宏观裂纹的形式表现出来,如图 10(a)所示。在试样的拉应力达到峰值前试样内部的损伤和缺陷较小,试样内部所释放的应变

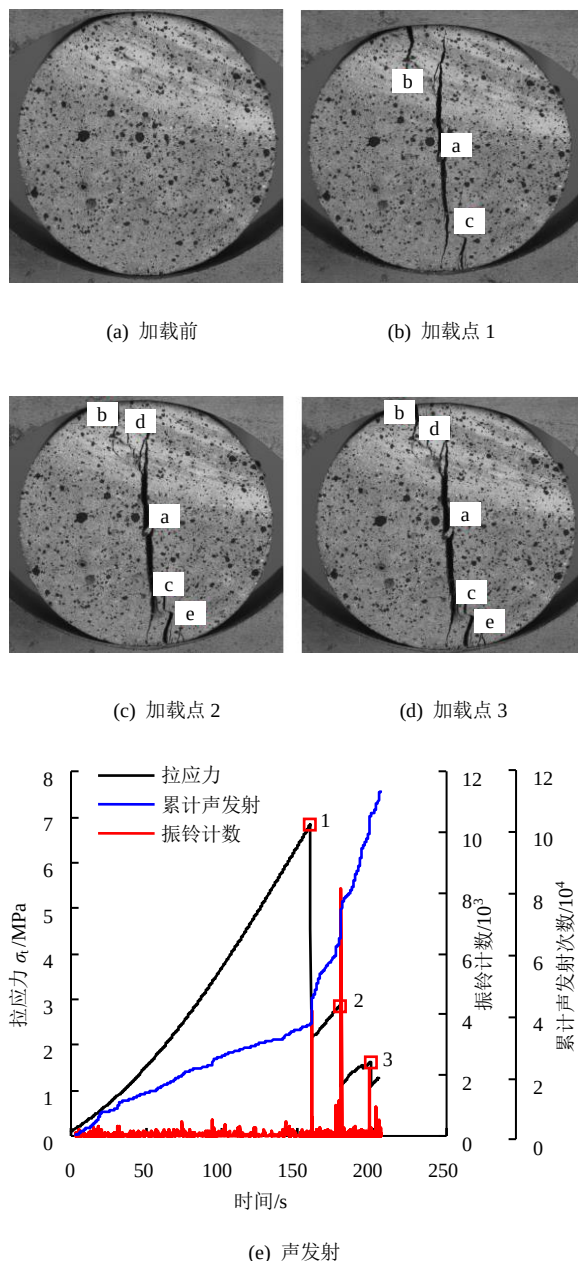


图 10 完整试样声发射曲线和裂纹演化过程

Fig.10 AE counts and crack evolution process of rock-like intact samples

能少,所以从初始加载到试样应力跌落声发射不太活跃,累计声发射曲线比较平缓,随着应力的不断增大,当拉应力达至应力曲线“1”的位置时拉应力为 6.84 MPa 时试样表面萌生了 a、b、c 3 条裂纹如图 10(b)所示,裂纹 a 沿加载方向贯穿试样中心,裂

纹 b 从与夹具接触的位置沿加载方向向下延伸,裂纹 c 位于试样底部,宽度较小,沿着加载方向向上延伸。当试样的拉应力达到峰值时由于试样内部的微观裂纹聚集形成宏观裂纹 a、b、c,试样内部产生较大的损伤,释放的应变能较大导致振铃计数急剧增加,累计声发射曲线陡增。拉应力达到 6.84 MPa 后应力跌落,随后又继续增长,当试样的拉应力达至应力曲线“2”的位置时拉应力为 2.84 MPa,试样开始第 2 次应力跌落,试样内部产生新生裂纹 d 和 e,如图 10(c)所示。d 裂纹是 a 裂纹的次生裂纹,而 e 裂纹位于试样下端,呈 X 状。在拉应力达到“2”位置的过程中试样内部微裂隙不断聚集,在 d、e 裂纹产生的同时伴随着应变能的释放,所以振铃计数第 2 次急剧增长,声发射累计曲线再次陡增。当拉应力达至应力曲线的“3”位置时拉应力为 1.62 MPa,试样的裂纹扩展如图 10(d)所示,此时裂纹 a、b、c、d、e 的宽度有所增加,并且在加载过程中试样表面有碎屑颗粒脱落,所以在该过程中试样内部还是有损伤产生,并且伴随着应变能的释放,振铃计数第 3 次急剧增加,累计声发射曲线进一步陡增。当试样第 3 次应力跌落后最终破坏。

4.2 单裂隙试样的声发射特性及裂纹演化

对于单裂隙试样选取裂隙倾角为 45° 的充填和非充填裂隙试样的声发射特性和裂纹演化过程进行分析。

图 11 为 α 为 45° 时充填单裂隙试样的应力、振铃计数、累计声发射随时间变化的曲线和裂纹在不同加载阶段的演化情况。在试样的拉应力达至峰值之前振铃计数较低,累计声发射曲线增长缓慢,此时试样在加载过程中内部的损伤较小,微观裂纹不断聚集,但试样表面还没有形成宏观裂纹,如图 11(a)所示。当试样的拉应力达至应力曲线上“1”的位置时拉应力达到峰值,即将发生应力跌落,此时预制裂隙 I 两端出现 a、b 两条分别向上、下延伸的翼裂纹,如图 11(b)所示。此时试样内部产生较大损失伴随着较大应变能的释放,所以振铃计数急剧增长,累计声发射曲线此时陡增。随后试样应力跌落,当拉应力达至应力曲线的“2”的位置时试样即将发生第 2 次应力跌落,试样表面产生了第 3 条裂纹 c,如图 11(c)所示。c 裂纹为沿加载方向向上延伸的远场裂纹,而裂纹 a、b 的宽度也有所增加。c 裂纹的产生和 a、b 裂纹的延伸伴随着应变能的释放,在“2”位置处对应的振铃计数较高,声发射累计曲第 2 次陡增。在试样达至应力曲线的“3”、“4”位置时虽然没有新的裂隙增加但是 a、b、c 裂隙不

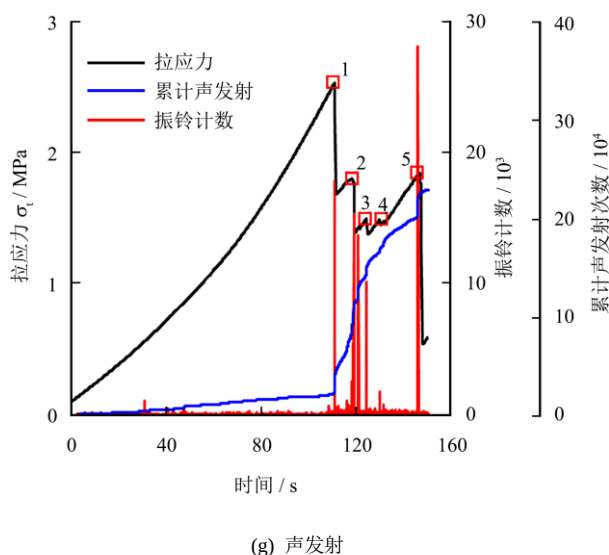
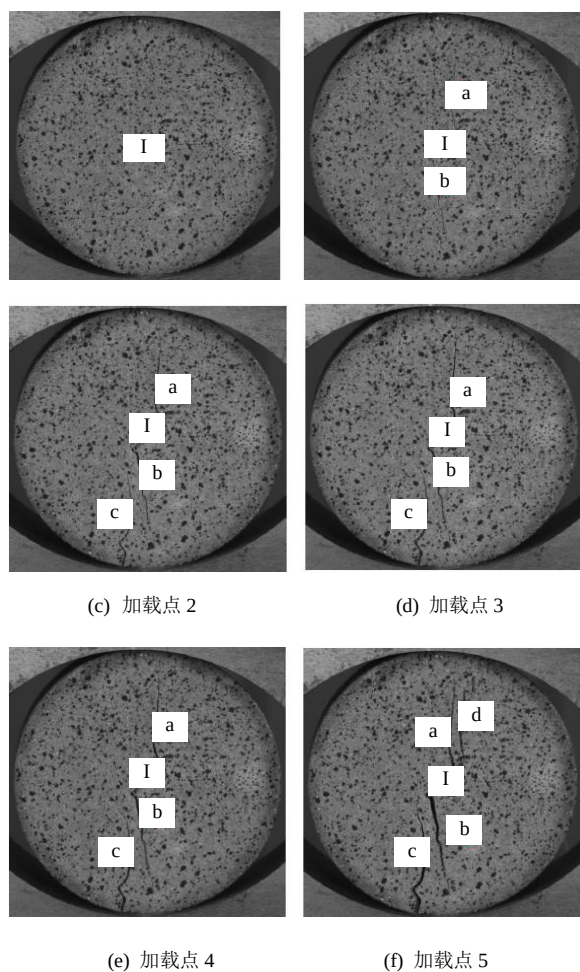


图 11 充填单裂隙试样声发射曲线和裂纹演化过程

Fig.11 AE counts and crack evolution process of rock-like sample containing a single filled fissure

断延伸，宽度增加，试样加载过程中有碎屑颗粒脱落，分别如图 11(d)、11(e)所示。在“3”、“4”位置处发生了第 3、4 次应力跌落，试样内部产生的损伤所释放的应变能导致振铃计数增加，累计声发射曲

线急剧增长。当拉应力达至应力曲线“5”的位置时试样表面产生新的裂纹 d，如图 11(f)所示。d 裂纹位于 a 裂纹右侧，沿加载方向向上延伸。新裂纹 d 产生的同时试样内部损伤所释放的应变能增大，导致振铃计数第 5 次急剧增加，累计声发射曲线进一步陡增，随后试样第 5 次应力跌落，试样完全破坏。

图 12 为 α 为 45° 时非充填裂隙试样应力、振铃计数、累计声发射随时间变化的曲线和裂纹在不同加载阶段的演化情况。

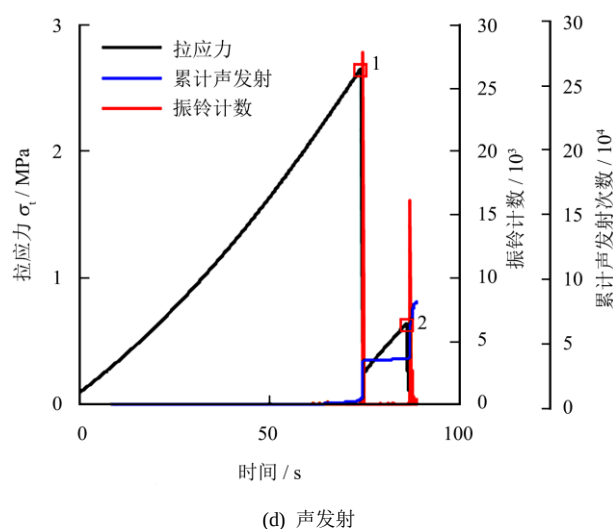
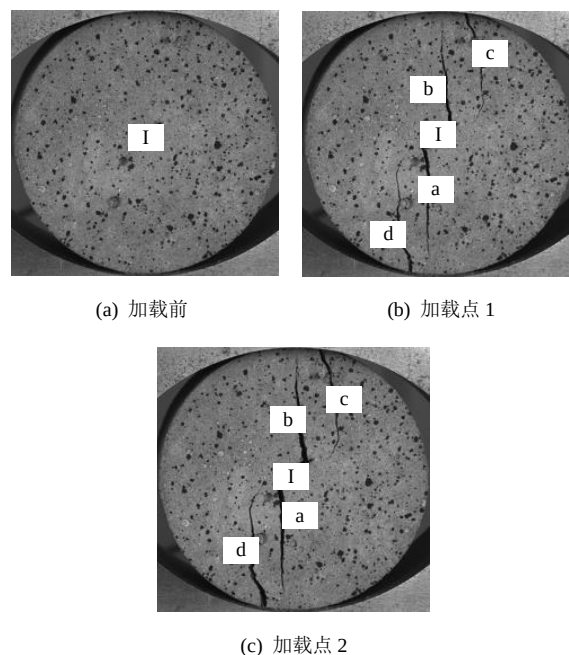


图 12 非充填单裂隙试样声发射曲线和裂纹演化过程

Fig.12 AE counts and crack evolution process of rock-like sample containing a single unfilled fissure

在试样加载过程之中利用数字照相技术对裂纹萌生、扩展情况进行实时记录。试样加载初期内部微观裂纹不断萌生、聚集，但在试样拉应力增长至应力曲线“1”位置之前还没有宏观裂纹出现，

如图 12(a)所示。在这个过程中试样内部损伤较小,所引起的声发射比较平静,振铃计数变化不大,累计声发射曲线比较平缓。当试样的拉应力增长至应力曲线“1”位置时试样表面产生了 a、b、c、d 4 条裂纹,如图 12(b)所示。其中 a、b 裂纹是在预制裂隙尖端萌生的翼裂纹,而 c、d 裂纹为试样上、下端萌生的远场裂纹,分别向下和上延伸。a、b、c、d 4 条宏观裂纹的形成表明试样内部产生较大的损伤,大量应变能的突然释放使振铃计数突然急剧增加,而累计声发射曲线迅速增长。随着荷载的增大,当应力位于应力曲线“2”位置处时裂纹 a、b、c、d 不断延伸,最终在加载方向上贯通,如图 12(c)所示,此时振铃计数再次激增,累计声发射曲线随之大幅度增长,随后裂纹快速扩展,试样应力跌落后破坏。

4.3 双裂隙试样的声发射特性及裂纹演化

对于含双裂隙的试样挑选 γ 为 180° 时的充填双裂隙试样和 γ 为 180° 时非充填双裂隙试样的声发射和裂纹萌生、扩展进行分析。

图 13 为 γ 为 180° 时充填双裂隙试样的拉应力、振铃计数、累计声发射曲线和不同加载阶段宏观裂纹的扩展和几何分布图片。在加载初期试样内部微观裂纹不断萌生、聚集,但是试样表面无宏观裂纹产生,如图 13(a)所示,其中 I 和 II 为预制裂隙。由于内部损伤较少,所释放的应变能引起的声发射较为平静。当拉应力增长至应力曲线的“1”位置时拉应力达到峰值,在试样表面产生了 a、b、c、d 四条宏观裂纹,如图 13(b)所示。a 裂纹是在预制裂隙 II 两端萌生的翼裂纹;b、c 裂纹在预制裂隙 I 上、下端萌生的翼裂纹,而 d 裂纹是在试样下端萌生的远场裂纹。当拉应力增长到“1”位置时试样表面产生 a、b、c、d 裂纹,振铃计数突然激增,累计声发射曲线突然上升。当拉应力位于应力曲线“2”、“3”位置时应力小幅度波动,试样表面没有新裂纹产生但裂纹不断延伸,如图 13(c)、13(d)所示。当拉应力位于应力曲线“4”位置处时试样表面产生了新裂纹 e,如图 13(e)所示。e 裂纹是在试样下端萌生的远场裂纹,沿加载方向向上扩展。当拉应力位于应力曲线“5”位置时试样表面新生 f 裂纹,且其他几条裂纹的宽度和长度有所增加,如图 13(f)所示。f 裂纹是在试样右上方萌生的远场裂纹,沿加载方向向下延伸,新裂纹的产生伴随着试样内部应变能的释放,在应力曲线“5”位置处对应的振铃计数剧增,累计声发射曲线陡增。当拉应力位于应力曲线“6”、“7”位置时试样表面没有新裂纹产生,如图 13(g)、13(h)所示,此时裂纹的宽度和长度进一步增加,试样表面有碎

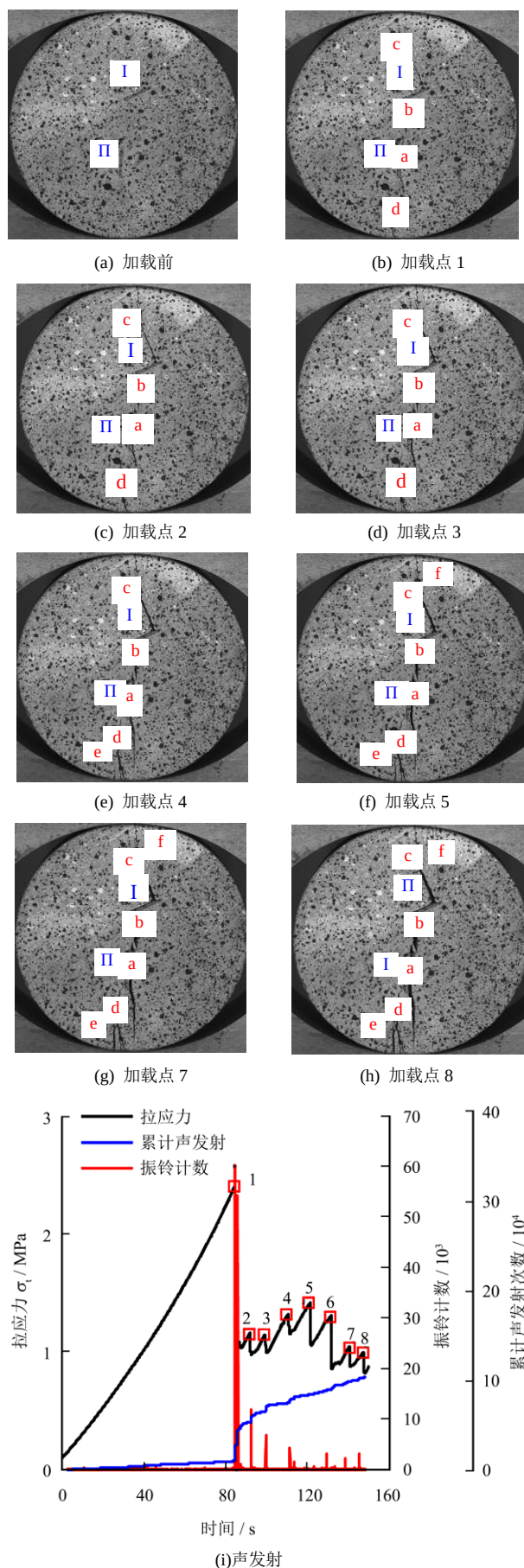


图 13 充填双裂隙试样声发射曲线和裂纹演化过程
Fig.13 AE counts and crack evolution process of rock-like sample containing two filled fissures

屑颗粒脱落，振铃计数急剧增加，累计声发射曲线迅速增长。当拉应力位于应力曲线“8”位置处时试样内部损伤较大，应力跌落后完全丧失承载力，最终破坏。

图 14 为 γ 为 180° 时非充填双裂隙试样拉应力、振铃计数、累计声发射随时间的变化图和拍摄的试样表面裂纹演化过程的图片。加载初期试样表面无宏观裂纹出现，如图 14(a)所示，I、II 是预制裂隙。拉应力增长至应力曲线的“1”位置时，试样表面产生了 a、b、c、d、e 5 条裂纹，如图 14(b)所示。a 裂纹是在预制裂隙 I 中间位置处萌生的翼裂纹；b 裂纹是在预制裂隙 II 上部尖端萌生的翼裂纹；c 裂纹是在预制裂隙 II 下部尖端萌生的翼裂纹；d 裂纹是在试样下端萌生的远场裂纹；e 裂纹是在试样上端萌生的远场裂纹。a、b、c、d、e 裂纹的产生伴随着较大应变能的释放，试样内部的损伤较大，振铃计数突然急剧增长，累计声发射曲线陡增。然而随着加载的继续及裂纹数目的增多，部分裂纹、孔隙在荷载作用下逐渐闭合，使试样在第 1 次应力跌落后仍然有较大的应力残留，从而致使试样的应力曲线在第 1 次应力跌落后呈现台阶式的增长。当拉应力增长至应力曲线“2”位置处时即将发生第 2 次应力跌落，试样表面虽然没有新生裂纹产生但宏观裂纹均有所发育，如图 14(c)所示。在应力曲线“2”位置处应力第 2 次跌落，振铃计数再次急速升高，累计声发射曲线再次陡增。同样当拉应力分别位于“3”、“4”、“5”位置时试样表面没有新裂纹产生，但是裂纹的宽度和长度都有明显的增加，且加载过程中有碎屑颗粒脱落，如图 14(d)~14(f)所示。在“3”、“4”、“5”置处试样内部同样产生较大的损伤，应变能的释放导致振铃计数迅增长，累计声发射曲线也随之大幅度增长。当增至应力曲线“5”的位置处时，试样第 5 次应力跌落后裂纹和预制裂隙贯通，在二者共同作用下试样最终破坏。

5 结 论

(1) 当裂隙倾角 α 为 0° 时充填单裂隙巴西圆盘的抗拉强度与完整巴西圆盘的抗拉强度相近，且最终破坏模式相似，充填与非充填单裂隙试样的抗拉强度随着裂隙倾角 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间不断增加时呈现先减小后增加最后又减小的规律，在加载过程预制裂隙尖端萌生的端翼裂纹不断扩展、贯通导致试样破坏，试样在应力跌落后就已经破坏，均呈现出明显的脆性特性。

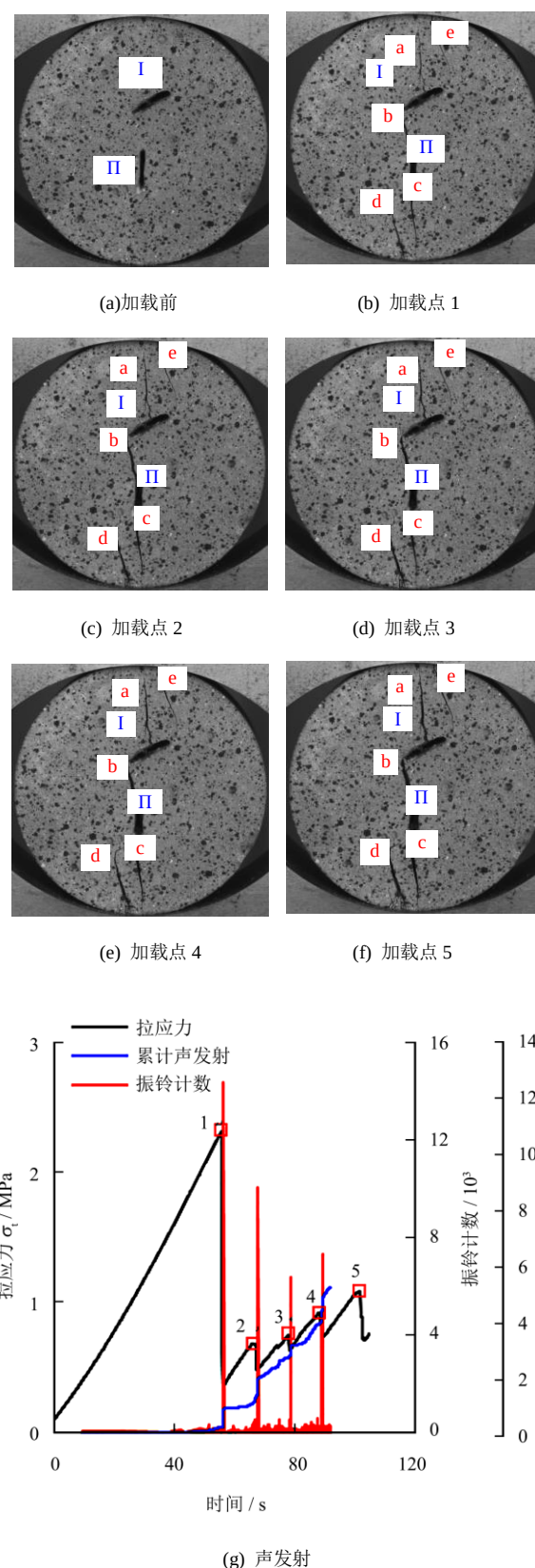


图 14 非充填双裂隙试样声发射曲线和裂纹演化过程
Fig.14 AE counts and crack evolution process of rock-like sample containing two unfilled fissures

(2) 充填与非充填类岩双裂隙类岩石材料的巴西试样的抗拉强度随着岩桥与下端预制裂隙夹角 γ 在 $45^\circ \sim 270^\circ$ 之间不断增加呈现先减小后增大的

规律,在 γ 为 180° 时抗拉强度降至最低,在加载过程中试样两条预制裂隙 I、II 尖端萌生的翼裂纹不断扩展、贯通,结合远场裂纹的扩展导致试样最终破坏,且充填与非充填试样在应力跌落后均出现了脆性向延性转化的现象。

(3) 对于含单、双裂隙类岩材料的巴西试样,在 α 、 γ 相同的情况下含充填材料的试样的抗拉强度明显要大于不含充填材料的试样;双裂隙试样峰后仍有较大的残余强度,而单裂隙试样峰后几乎无残余强度;充填材料在加载过程中对裂纹的萌生、扩展具有一定的抵制作用,但随着 α 、 γ 的不断增大,充填材料与加载方向的夹角逐渐减小,充填材料的抵抗作用也随之减小;含充填材料的试样在加载过程中裂纹的数目明显多于非充填试样,裂纹演化的时间也相对较长。

(4) 在加载初期阶段试样内部微裂纹不断聚集,处于初始损伤阶段,声发射比较平静,试样表面无宏观裂纹产生;当试样表面开始出现较细小的宏观裂纹时声发射明显较为活跃,试样内部损伤稳定积累;当抗拉强度增至峰值时试样内部损伤加剧增长,声发射异常活跃,试样表面宏观裂纹进一步扩展;当应力跌落后试样破坏或者仍保留一定的承载力,声发射仍会出现较活跃的情况,损伤不断增加,表面的裂纹加剧扩展,最终试样破坏;同一 α 、 γ 下充填试样在裂纹演化过程中声发射活动明显较为活跃。

参考文献

- [1] HUANG YAN-HUA, YANG SHENG-QI, ZENG WEI. Experimental and numerical study on loading rate effects of rock-like material specimens containing two unparallel fissures[J]. **Journal of Central South University**, 2016, 23(6): 1474—1485.
- [2] YANG Sheng-qi, 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
- [3] 李露露, 高永涛, 周喻, 等. 单轴压缩条件下含三叉裂隙类岩石试样力学特性的细观研究[J]. **岩土力学**, 2018, 39(10): 3668—3675.
LI Lu-lu, GAO Yong-tao, ZHOU Yu, et al. Meso research on the mechanical properties of rock-like material containing trident cracks under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 3668—3675.
- [4] 尹乾, 靖洪文, 苏海健, 等. 高温后花岗岩断裂特性的加载速率效应研究[J]. **中国矿业大学学报**, 2015, 44(4): 597—603.
YIN Qian, JING Hong-wen, SU Hai-jian, et al. Loading rate effect on fracture properties of granite after high temperature[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2015, 44(4): 597—603.
- [5] CAO P, WANG H, JIN J, et al. Experimental study of the fracture failure of sandstone containing hole and fissure under seepage water pressure[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2018, 47(2): 240—246, 263.
- [6] ZHU W, JIANG M, LI L, et al. A numerical study on mechanical behavior of pre-fissured sandstone under triaxial compression by three-dimensional distinct element method[C]//Geoshanghai International Conference. Singapore: Springer, 2018.
- [7] 杨圣奇, 刘相如, 李玉寿. 单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(2): 3539—3546.
YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru, LI Yu-shou. Experimental analysis of mechanical behavior of sandstone containing hole and fissure under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 3539—3546.
- [8] 黄彦华, 杨圣奇. 非共面双裂隙红砂岩宏细观力学行为颗粒流模拟[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(8): 1644—1653.
HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi. Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of red sandstone containing two pre-existing non-coplanar fissures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(8): 1644—1653.
- [9] 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.
- [10] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华. 非共面闭合裂隙巴西圆盘试验与颗粒流模拟研究[J]. **中国矿业大学学报**, 2017,

- 46(3): 537—544.
- TIAN Wen-ling, YANG Sheng-qi, HUANG Yan-hua. An experiment and particle flow study of Brazilian disk containing two non-complanar filled fissures[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2017, 46(3): 537—544.
- [11] MOAZZAMI M, AYATOLLAHI M R, CHAMANI H R, et al. Determination of higher order stress terms in cracked Brazilian disc specimen under mode I loading using digital image correlation technique[J]. **Optics & Laser Technology**, 2018, 107: 344—352.
- [12] LIU Y, DAI F, XU N, et al. Experimental and numerical investigation on the tensile fatigue properties of rocks using the cyclic flattened Brazilian disc method[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 2018, 105: 68—82.
- [13] 黄彦华, 杨圣奇, 鞠杨, 等. 岩石巴西劈裂强度与裂纹扩展颗粒尺寸效应研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 1272—1281.
- HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi, JU Yang, et al. Study on particle size effects on strength and crack coalescence behavior of rock during Brazilian splitting test[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2016, 47(4): 1272—1281.
- [14] WEI M D, DAI F, XU N W, et al. Experimental and numerical investigation of cracked chevron notched Brazilian disc specimen for fracture toughness testing of rock[J]. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, 2018, 41(4): 197—211.
- [15] 王慧文, 李江腾, 高吉超. 林杭干燥及饱水状态下基于巴西劈裂法的板岩抗拉强度[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(4): 1044—1048.
- WANG Hui-wen, LI Jiang-teng, GAO Ji-chao, et al. Tensile strength of slates under Brazilian splitting test in dry and saturated condition[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2017, 48(4): 1044—1048.
- [16] WANG M, CAO P. Experimental study on the validity and rationality of four Brazilian disc tests[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2018, 36(1): 63—76.
- [17] 黄彦华, 杨圣奇. 高温后含孔花岗岩拉伸力学特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 783—790.
- HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi. The tensile mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2017, 46(4): 783—790.
- [18] KUNDU JAGADISH, MAHANTA BANKIM, SARKAR KRIPAMOY, et al. The effect of lineation on anisotropy in dry and saturated himalayan schistose rock under Brazilian test conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 51(1): 1300—1305.
- [19] YANG S Q. 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.
- [20] ZHUANG XIAO-YING, CHUN JUN-WEI. A comparative study on unfilled and filled crack propagation for rock-like brittle material[J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2014, 72(1): 110—120.
- [21] HAERI H, SHAHRIAR K, MARJI M F, et al. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014, 67(4): 20—28.
- [22] 秦四清, 李造鼎, 张俤元, 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993: 57—78.
- QIN Si-qing, LI Zao-ding, ZHANG Zhuo-yuan, et al. An introduction to acoustic emission techniques in rocks[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993: 57—78.
- [23] THAM L G, LIU H, TANG C A. et al. On tension failure of 2D rock specimens and associated acoustic emission[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2005, 38(1): 1—19.
- [24] 杨小彬, 韩心星, 刘恩来, 等. 循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2732—2739.
- YANG Xiao-bin, HAN Xin-xing, LIU En-lai, et al. Study on the acoustic emission characteristics of non-uniform deformation evolution of granite under cyclic loading and unloading test[J]. **Rock and Soil Mechanics**. 2018, 39(8): 2732—2739.