不同角度交叉裂纹岩石劈裂力学性能的颗粒流模拟①

何昌耀[1]，陈俊智[2]，任春芳[2]
（1.昆明理工大学 公共安全与应急管理学院，云南 昆明 650093；2.昆明理工大学 国土资源与工程学院，云南 昆明 650031）

摘　要：为理解岩石内部交叉裂纹的劈裂拉伸行为，基于室内试验获取的岩石物理力学参数，开展二维颗粒流（PFC^{2D}）离散元劈裂模拟试验。结果表明：预制裂纹试样抗拉强度低于完整试样，主裂纹与受力方向夹角为 0°～60°时，试样峰值强度随次裂纹角度增大而减小，60°～90°时，试样峰值强度随次裂纹角度增大而增大，总体上试样抗拉强度遵循“主次裂纹角度差值越大，抗拉强度越小”的规律；劈裂作用下，预制裂纹不改变试样的受力类型，仅降低其受力强度；交叉裂纹试样的微裂纹以拉伸微裂纹为主，微裂纹萌生于预制裂纹尖端附近，随荷载施加向加载端扩展、贯穿，导致试样失效；岩石破坏时内部能量发生不可逆转化，当加载至弹性应变能储存极限时，其迅速转化为耗散能，用于微裂纹发育扩展、颗粒移动等，此时伴随大量声发射事件，微裂纹数量呈指数增加。

关键词：岩石力学；裂隙岩体；交叉裂纹；劈裂试验；力学性能；微裂纹行为；能量转化；颗粒流模拟
中图分类号：TD313　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.003
文章编号：0253-6099（2026）04-0016-011

Particle Flow Simulation of Splitting Mechanical Properties of Rock with Cross-Cracks at Different Angles

HE Changyao[1], CHEN Junzhi[2], REN Chunfang[2]
(1.*Faculty of Public Safety and Emergency Management*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650093, *Yunnan*, *China*; 2.*Faculty of Land Resources Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650031, *Yunnan*, *China*)

Abstract: To understand the splitting-tensile behavior of internal cross-cracks in rock, discrete element splitting simulation tests were carried out by using a particle flow code (PFC^{2D}) based on the physical and mechanical parameters of rock obtained from laboratory tests. The results show that the tensile strength of specimens with pre-fabricated cracks is lower than that of intact specimens. When the angle between the main crack and the loading direction ranges from 0° to 60°, the peak strength of specimens decreases with the increase of the secondary crack angle; when the angle ranges from 60° to 90°, the peak strength increases with the increase of the secondary crack angle. In general, the tensile strength of specimens follows the rule that the larger the angle difference between the main and secondary cracks, the smaller the tensile strength. Under splitting loading, pre-fabricated cracks do not change the loading mode of specimens but only reduce their bearing strength. Micro-cracks in cross-crack specimens are dominated by tensile micro-cracks, which initiate near the tips of pre-fabricated cracks, propagate toward the loading ends and coalesce with increasing load, resulting in specimen failure. Irreversible transformation of internal energy occurs during rock failure. When the loading reaches the storage limit of elastic strain energy, the elastic strain energy is rapidly converted into dissipated energy for micro-crack initiation and propagation as well as particle movement. A large number of acoustic emission events occur simultaneously, and the number of micro-crack increases exponentially.

Key words: rock mechanics; fractured rock mass; cross crack; splitting test; mechanical property; micro-crack behavior; energy conversion; particle flow simulation

① **收稿日期**：2026-05-13
基金项目：国家自然科学基金（U1602232）
作者简介：何昌耀（2000—），男，贵州水城人，硕士研究生，从事岩石力学方面的研究工作。E-mail：Cyhe858808@163.com
通信作者：陈俊智（1974—），男，陕西定边人，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事岩石力学及矿山安全方面的科研与教学工作。E-mail：465424873@qq.com

特殊的地质构造与工程扰动使矿山围岩体普遍存在裂纹、节理等自然缺陷,显著影响原岩力学性能,进而对岩体力学响应产生负面影响[1-4]。为了明晰含裂岩体的力学行为和破坏响应过程,学者们开展了多方向重点研究。

在荷载作用方面,部分学者通过对内部含裂纹的岩石及类岩石材料进行动态单轴压缩试验[5]、三轴压缩试验[6]、压剪试验[7],并结合数字图像系统[8],研究压缩荷载下闭合裂纹的起裂模式与扩展规律;另有学者围绕含裂岩石的拉伸特性展开研究[9-11],对比分析含裂试样在直接拉伸与间接拉伸下的破坏行为[12];还有学者预制平行裂隙试样开展劈裂试验,指出岩石破坏的重要标志为内部裂缝的渗透[13]。上述研究均针对含裂岩石在荷载作用下的力学响应过程,但多数研究中,含裂试样仅对应单一特定工况,或对裂纹产状的考虑过于理想化,其力学响应规律仅适用于特定岩体,因此,其研究成果不能指导其他工程中裂纹岩体的荷载响应分析。

在裂纹产状方面,学者们研究含裂岩体力学特性时,充分考虑了预制裂纹的长度、角度、形状和数量[14-16]等因素,对预制裂纹不同产状进行了比对分析,但在作业扰动或外荷载作用下,岩体裂纹持续发育,而根据裂纹长度和试样直径之比(A/D,以下简称长径比)预制裂纹,避免理想化设置裂隙长度[17]。通过调整长径比实现裂隙尺度的动态调控,更贴合岩体实际工况。

在数值模拟方面,大量研究证实,离散元法模拟含裂纹岩石受力扩展与变形破坏具有可行性[18-20],但针对含拟动态交叉裂纹试样劈裂力学性能的离散元研究仍鲜有报道。

鉴于此,本文基于原岩室内力学试验所得物理力学参数,采用 PFC^{2D}离散元软件建立不同长径比的中心交叉裂纹圆盘模型,研究预制交叉裂纹模型在劈裂荷载作用下的力学行为与破坏规律;通过应力曲线判断不同交叉组合试样强度特性,分析不同裂纹交叉角度对模型力学性能的影响规律;分析微裂纹的种类、数量及萌生发育方向,进而总结破坏模式;对比分析裂纹交叉角度对试样应力响应阶段的能量转化模式的影响。

1　数值模型与参数

1.1　模型建立

PFC^{2D}颗粒流二维模型忽略了模型厚度方向应力,具有直观性,在微裂纹萌生与扩展研究中被广泛应用[21]。为使模型具备强度,需在粒子间应用黏结接触模型,其中平行黏结模型(PBM)基于弹簧刚度与弹性材料相互作用传递力和力矩,且可通过较少的参数准确表征岩石力学性质[22]。本文基于 PFC^{2D}数值软件,采用 PBM 建立不同长径比的交叉裂纹岩样模型,如图 1 所示。模型为直径 50 mm 的圆盘,内部含 7 192 个颗粒、16 367 个接触;通过移除指定区域颗粒预制交叉裂纹,模型上下端设伺服墙以模拟加载,其加载速度足够小,约为 3.68×10^{-7} mm/步,加载收敛于裂纹贯穿。

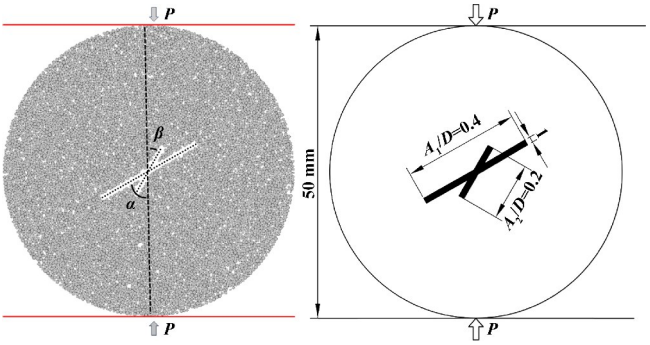


图 1　交叉裂纹岩样模型

Fig. 1　Model of cross-crack rock specimens

1.2　模拟试验设计

巴西劈裂试验中,微裂纹初始集中在加载端,随着荷载增加,引发试样破裂的裂纹则起始于中部[9],而预制含长径比裂纹的岩石试样,其峰值荷载随长径比增大而减小,且长径比越大试样失效越快,此时微裂纹较少,难以预测其萌生发育规律[17]。因此,为在微观层面更清晰地观测含裂纹试样微裂纹的扩展过程,预制中心交叉主裂纹 $A_1/D=0.4$,次裂纹 $A_2/D=0.2$,固定裂纹宽度 1 mm。其中,α、β 分别为主、次裂纹与法向的夹角,参照文献[15]的工程案例,α 与 β 均设置为 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°,每个 α 值对应 7 个 β 值水平,共 49 种交叉工况,当 $\alpha=\beta$ 时,试样仅含 $A_1/D=0.4$ 的主裂纹。此外,圆盘模型具有对称性,需探明大角度(>90°)对试验结果的影响,故设置主裂纹 120°、次裂纹 150°的交叉工况,作为主裂纹 30°、次裂纹 60°的镜像对照,共 12 组对照工况。

1.3　细观参数标定

为确保模拟结果的合理性与准确性,需调整细观参数,使模拟结果与岩石室内试验的宏观力学行为相似[23]。试验所用原岩取自云南省玉溪市某灰岩矿山,选取完整性好的岩块加工成岩样后,开展单轴压缩与巴西劈裂试验以获取物理力学参数,再以室内力学试验为基础开展数值模拟,采用文献[24]提出的标定方

法,经过反复试验,使数值模拟结果与室内试验结果相似。最终得到完整岩石细观参数,见表 1,宏细观试验结果相对误差对比见表 2。

表 1 完整岩石细观参数

Table 1 Microscopic parameters of intact rock

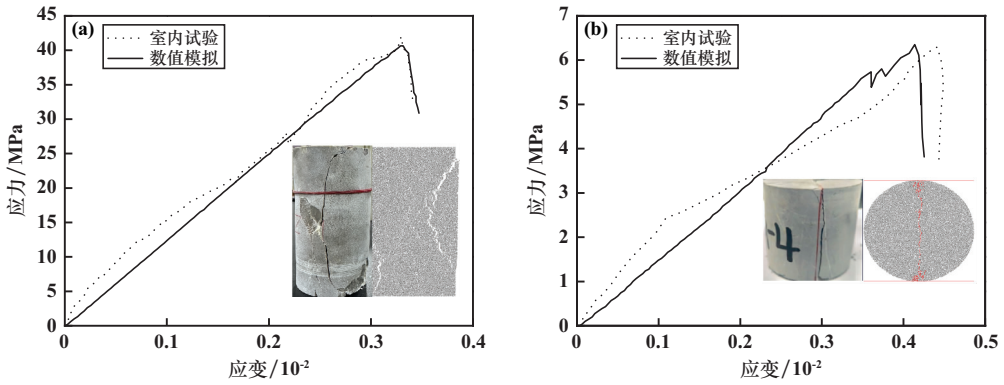
细观参数	单位	取值
最小颗粒半径	mm	0.25
颗粒粒径比	—	1.75
颗粒密度	$kg \cdot m^{-3}$	2 600
弹性模量	GPa	7.72
刚度比	—	1.8
摩擦因数	—	0.71
平行黏结模量	GPa	7.72
平行黏结刚度比	—	1.8
平行黏结切向强度	MPa	20.6
平行黏结法向强度	MPa	17.0
内摩擦角	(°)	45.6

表 2 宏细观试验结果相对误差

Table 2 Relative errors of macro- and micro-test results

项目	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦因数
室内试验	42.6	6.16	12.9	0.20	0.71
数值模拟	41.1	6.23	12.4	0.19	0.71
相对误差	0.035 2	0.011 4	0.038 8	0.05	0

室内完整岩石力学试验和 PFC^{2D}数值模拟结果对比如图 2 所示,二者应力-应变曲线变化趋于一致,可认为该模型岩样细观参数能较准确表征该类岩石的力学行为[25]。值得注意的是,完整岩石数值模型中无原生裂隙、颗粒接触紧密,而天然岩石中含微裂隙,故数值模拟的应力-应变曲线缺失原生裂纹压密闭合阶段,导致峰前曲线存在差异,该差异已被证实具有可接受性[26]。结合表 2,宏细观试验参数相对误差较小,可认为此次细观参数设置合理。



(a) 单轴压缩试验; (b) 巴西劈裂试验

图 2 室内试验与数值模拟结果对比图

Fig. 2 Comparison between laboratory test and numerical simulation test

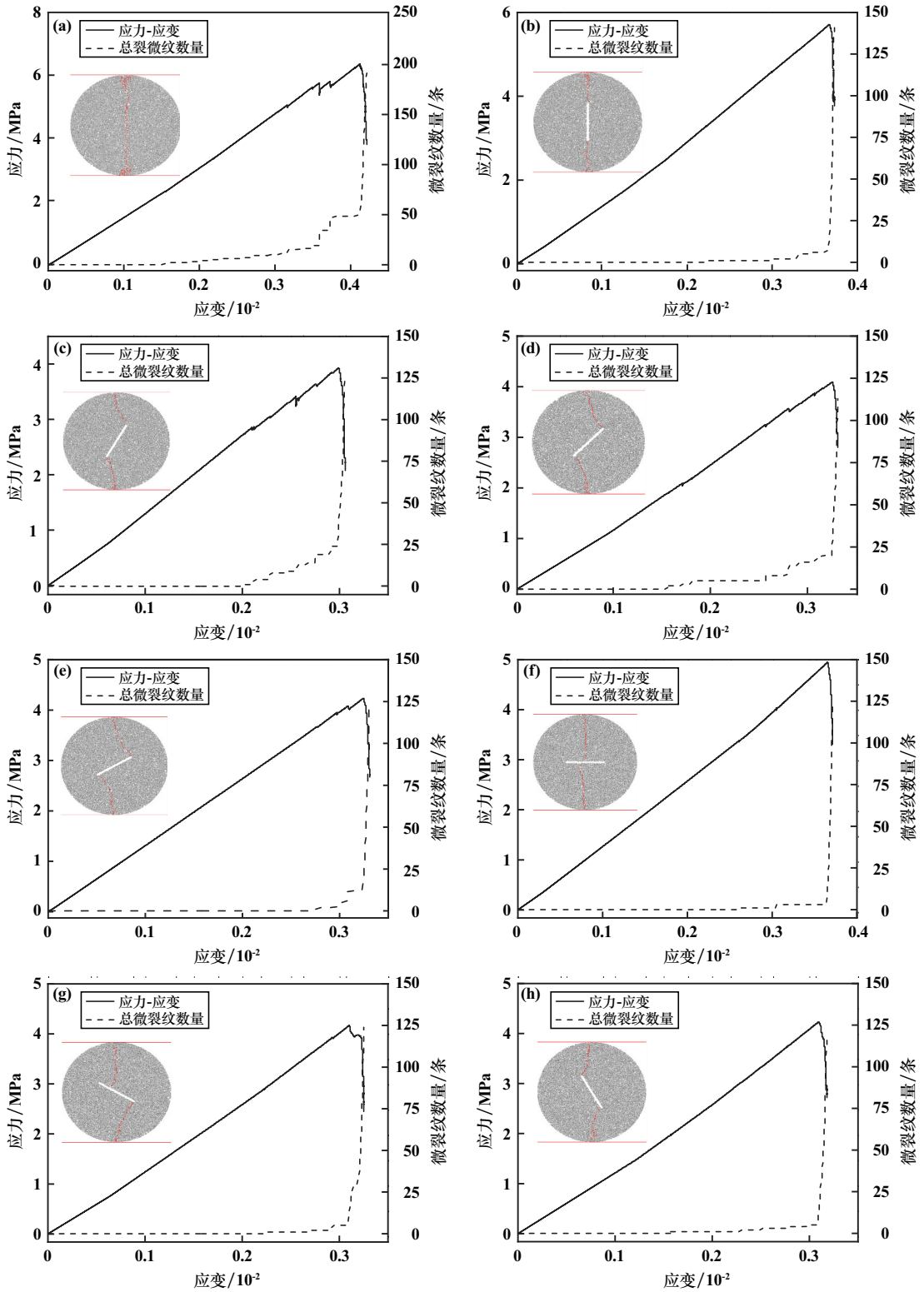
2 试验结果分析

2.1 裂纹角度对试样强度影响

试样破坏的本质是在外部荷载作用下,其内部微裂隙不断萌生、扩展并贯穿,最终导致失效。预制裂纹会改变试样内部微裂隙的发育路径,进而影响其最终破坏时的峰值应力与弹性模量。

图 3 展示了主次裂纹角度重合($\alpha=\beta$)时试样的应力-应变曲线和微裂纹数量。加载初期,伺服墙速度极小且与试样接触颗粒数量少,应力曲线呈线性增长,此时试样内部未产生微裂纹;随着加载持续,试样表现出典型弹性变形,达峰值应力后转为塑性变形,直至失效。对比完整试样的应力曲线,预制裂纹试样的抗拉强度均有所下降,其中裂纹角度 30°时降至最低,为 3.93 MPa;当裂纹角度为 0°和 90°时,预制裂纹试样的抗拉强度较高,分别为 5.67 和 4.95 MPa。对比发现,裂纹角度 30°的试样与镜像对照 150°的试样,以及 60°的试样与镜像对照 120°的试样,具有相近的应力峰值与应变值,这表明预制裂纹角度增大至 90°时,可满足交叉角度对试样强度影响的研究需求。在微裂纹总数量方面,完整试样的微裂纹数量最多(190 条),这是因为试样破坏失效需内部微裂纹发育贯穿,而内部含裂纹的试样,加载时微裂纹发育扩展路径变短,导致微裂纹提前贯穿,表现为应力达到峰值后迅速下降,且总裂纹数量显著减少。

交叉角度对试样强度的影响如图 4 所示。主裂纹 α 值为 0°~60°时,次裂纹 β 值越大,试样峰值强度越小;α 值为 60°~90°时,现象相反,试样峰值强度随 β 值增大而升高;次裂纹同一 β 值时,试样峰值强度随 α 值增大亦呈现类似变化趋势。由此可知,主次裂纹交叉



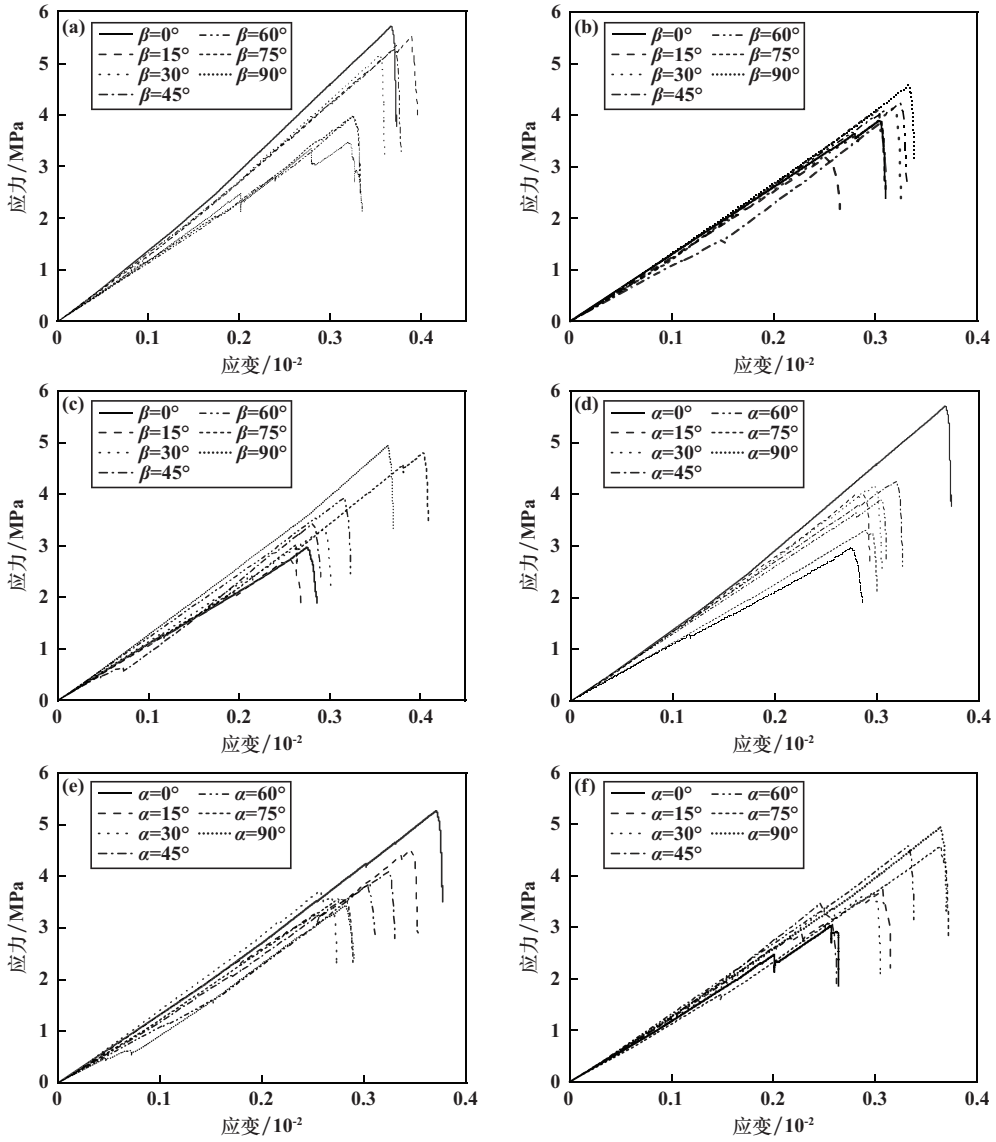
(a) 完整试样;(b) $\alpha=\beta=0°$;(c) $\alpha=\beta=30°$;(d) $\alpha=\beta=45°$;(e) $\alpha=\beta=60°$;(f) $\alpha=\beta=90°$;(g) $\alpha=\beta=120°$;(h) $\alpha=\beta=150°$

图 3　裂纹角度重合时试样的应力-应变曲线和微裂纹数量

Fig. 3　Stress-strain curves and micro-crack number of specimens with coincident crack angles

组合的角度显著影响试样的抗拉性能,随着裂纹交叉角度增大,试样抗拉强度峰值呈先减小后增大的 U 形变化趋势。

试样失效断裂的影响随主次裂纹交叉值的增大逐渐增强:交叉组合角度较小($\leqslant 30°$)时,表现出较好的抗拉性能;当任一预制裂纹角度越大,试样越易破坏,



(a) $\alpha=0°$; (b) $\alpha=60°$; (c) $\alpha=90°$; (d) $\beta=0°$; (e) $\beta=45°$; (f) $\beta=90°$

图4 交叉裂纹角度对试样强度的影响

Fig.4 Effect of cross-crack angle on specimen strength

其中主裂纹角度起主导作用。主裂纹角度较大时,试样失效破坏程度大于次裂纹角度较大时的工况。交叉试样在 $\alpha=0°$ 且 $\beta=0°$ 条件下抗拉强度最大(5.67 MPa),在 $\alpha=90°$ 且 $\beta=15°$ 条件下抗拉强度最小(2.73 MPa)。

综上,随着 α 值增大,β 值对试样拉伸破坏的影响逐渐增强,在 $\alpha=90°$ 时影响达到最大;裂纹交叉状态下,主次裂纹间角度差值越大,试样力学性能越弱。

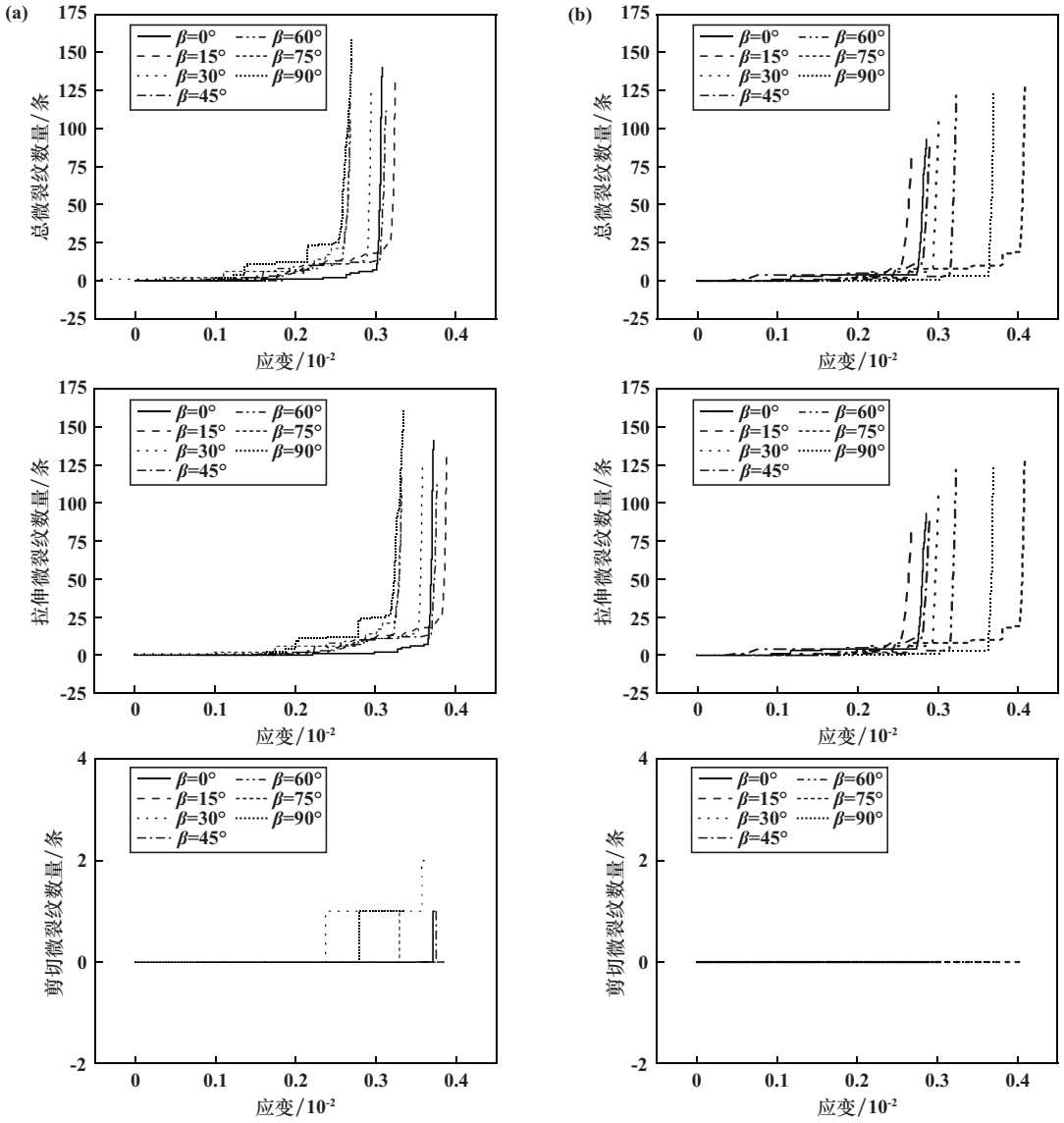
2.2 交叉裂纹劈裂过程中微裂纹变化

试样破坏通常由内部微裂纹扩展贯穿引发。加载过程中微裂纹种类及数量变化,可在一定程度上反映试样劈裂拉伸破坏过程。图5以主裂纹平行($\alpha=0°$)、垂直($\alpha=90°$)于加载方向的两类交叉组合为对象,展示其加载过程中微裂纹变化,进而呈现交叉裂纹试样在劈裂作用下的微裂纹数量与类型特征。

本次试验中,拉伸微裂纹数量随径向加载呈指数增长,不仅数量远多于剪切微裂纹,且萌生时间更早,因此总裂纹数量变化趋势与拉伸微裂纹一致;剪切微裂纹滞后于拉伸微裂纹产生,且数量随 α 值增大而减少,部分交叉组合下甚至未产生剪切微裂纹[见图5(b)],说明劈裂过程中试样失效破坏主要由拉应力控制,表现为典型的拉伸破坏。

径向加载时应力集中于加载端及预制裂纹顶端,导致 α 值较小时加载端与预制裂纹顶端的微裂纹发育贯穿路径较短,微裂纹数量随之减少。结合图4可知,含预制交叉裂纹试样加载过程中,微裂纹数量与应力变化规律一致,均随 α 值增大而逐渐下降;对比裂

纹重合时的微裂纹数,当 $\alpha<90°$、β 值为 15°~75°时,同一 α 值,β 值越大,微裂纹数量越多,表明主裂纹小于 90°、次裂纹为 15°~75°时,增大 β 会逐渐增强试样失效的破碎程度。



(a) $\alpha=0°$; (b) $\alpha=90°$

图 5　交叉裂纹试样劈裂过程中微裂纹变化

Fig. 5　Micro-crack evolution during splitting of cross-crack specimens

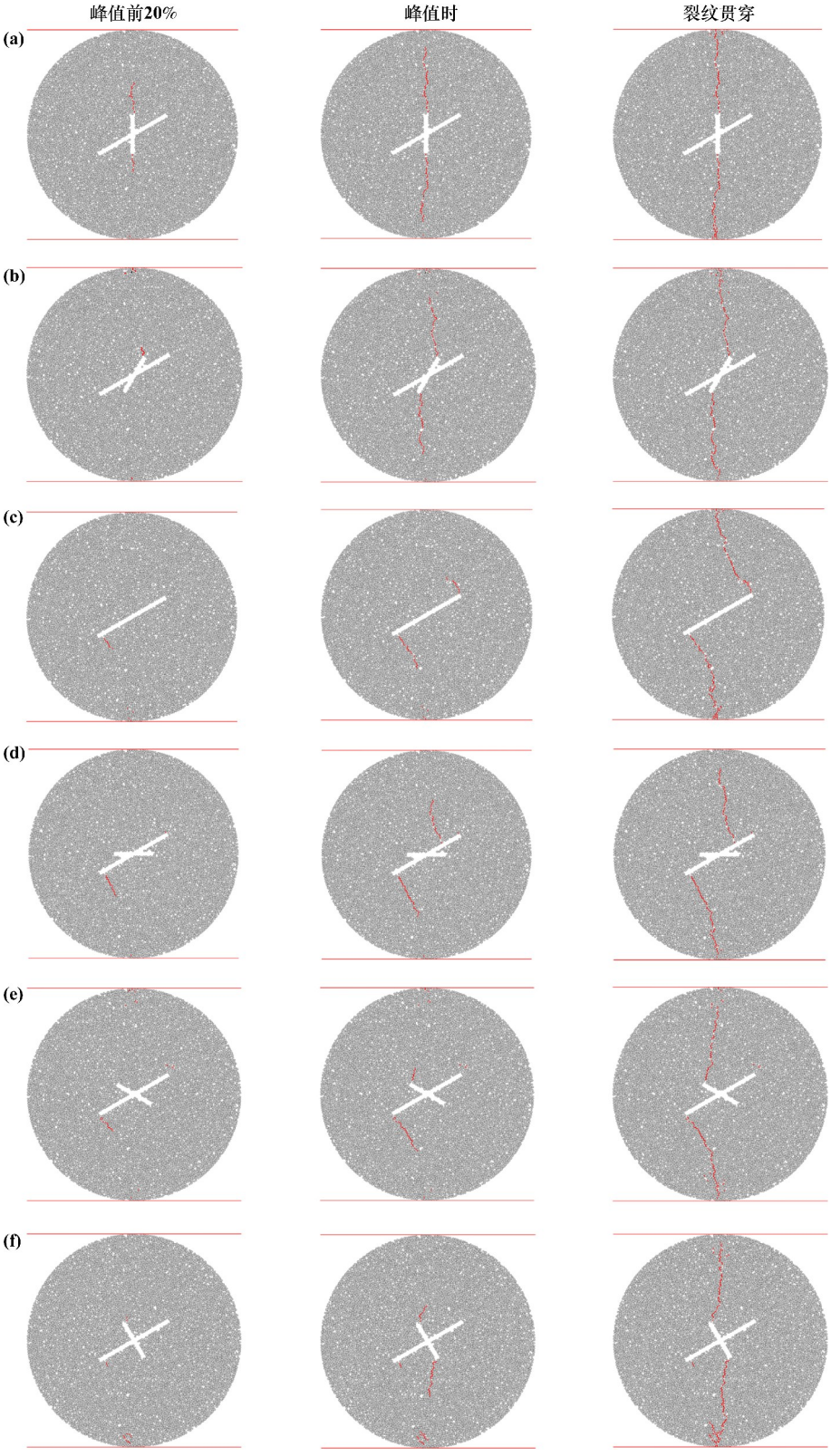
2.3　交叉裂纹倾角对试样微裂纹发育影响

岩石微裂纹的扩展路径与其失效特性紧密相关。外力作用下,微裂纹从岩石内部闭合缺陷处萌生,经延伸贯穿后导致岩体破坏[25,27]。PFC^{2D}可记录持续加载过程中,含裂纹试样内部颗粒接触公切线处产生的微裂纹,当颗粒间应力超过其承载能力时,软件会记录颗粒受应力方向产生的微裂纹。本文中,拉应力引发的拉伸微裂纹用红色标注,剪切微裂纹用黑色标注(可见电子版)。

图 6、图 7 分别为主裂纹 α 值 60°、次裂纹 β 值 150°时,试样内部微裂纹随加载进行的发育扩展过程。为清晰分析微裂纹发育扩展特征,记录裂纹角度每 30°为一档递增变化的交叉模型在峰值前 20%、峰值及裂纹贯穿阶段的微裂纹发育特征。结果表明,预制交叉裂纹试样的裂纹扩展路径受主次裂纹倾角的显著影响。α 值 60°时,随着 β 值增大,微裂纹先在次裂纹尖端萌生扩展($\beta=0°$、30°),后在主裂纹尖端萌生发育($\beta=60°$、90°),当 β 值增至 150°时,微裂纹再次从次裂纹尖端处萌生发育至加载端,这与其镜像对照($\beta=30°$)微裂纹萌生发育特征一致;β 值 150°时,微裂纹发育扩展规律相反,随着 α 值增大,内部微裂纹先从主裂纹尖端发育($\alpha=0°$、30°),后从次裂纹尖端贯穿($\alpha=$

60°、90°)。这表明,试样微裂纹的萌生与发育规律受预制交叉裂纹夹角、裂纹尖端至加载端距离的共同影响,夹角较小时,微裂纹从更靠近加载端的预制裂纹尖端处萌生扩展。

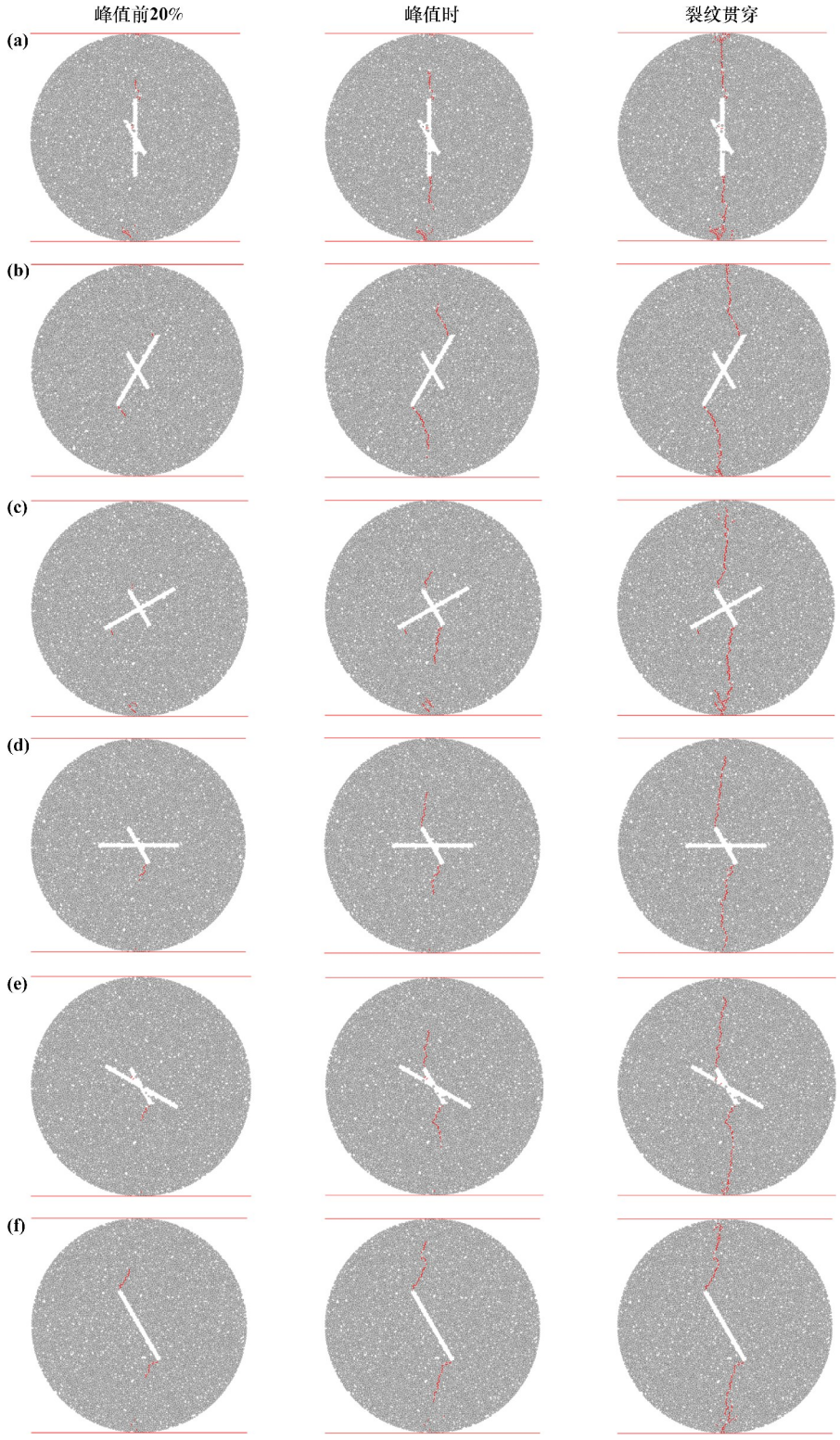
无论预制交叉裂纹采用何种组合形式,劈裂作用下试样内部的微裂纹均以拉伸微裂纹为主;剪切微裂



(a) $\beta=0°$; (b) $\beta=30°$; (c) $\beta=60°$; (d) $\beta=90°$; (e) $\beta=120°$; (f) $\beta=150°$

图 6 $\alpha=60°$时试样裂纹发育扩展过程

Fig. 6 Crack growth and propagation process of specimens at $\alpha=60°$



(a) $\alpha=0°$; (b) $\alpha=30°$; (c) $\alpha=60°$; (d) $\alpha=90°$; (e) $\alpha=120°$; (f) $\alpha=150°$

图 7　$\beta=150°$时试样裂纹发育扩展过程

Fig. 7　Crack growth and propagation process of specimens at $\beta=150°$

纹仅分布于加载端区域,且数量远少于拉伸微裂纹。这说明主次裂纹的夹角变化不会改变试样劈裂失效的受力属性,仅会降低其破坏强度。

总体而言,交叉裂纹试样内部微裂纹的萌生发育位置遵循 2 项规律:一是微裂纹沿与径向加载面夹角较小的预制裂纹尖端附近萌生发育;二是交叉裂纹夹

角较大时,微裂纹沿与加载面距离较短的预制裂纹尖端处萌生发育。其中,规律1与预制交叉裂纹试样压剪破坏[15]、单裂纹圆盘劈裂破坏[17]及交叉裂纹单轴压缩破坏[23]的微裂纹萌生发育特征相似,均表现为从加载端与预制裂纹夹角较小的裂纹处萌生发育;规律2与文献[28]预制相同长度交叉裂纹破坏时观察到的"4个尖端同时发育"现象不同,这是由于试样内部存在次裂纹时,荷载传递至各裂纹的有效路径存在长短差异,与加载面距离较短的裂纹更早形成应力集中,微裂纹沿其裂纹尖端向主应力方向延伸直至试样失效。

3 交叉裂纹试样能量转化规律

岩石失效破坏与内部损伤累积密切相关,能量转化是其物理变化的本质特征。文献[29]将岩体单元假设为封闭系统(受力过程无外界热交换),定义外力总输入能为 U,结合热力学第一定律得:

$$U = U^{d} + U^{e} \tag{1}$$

式中:U^{d}为耗散能;U^{e}为应变能。

由此可知,在岩石试样持续加载至失效的过程中,能量会发生不同形式的不可逆转化。

3.1 交叉裂纹试样的能量转化

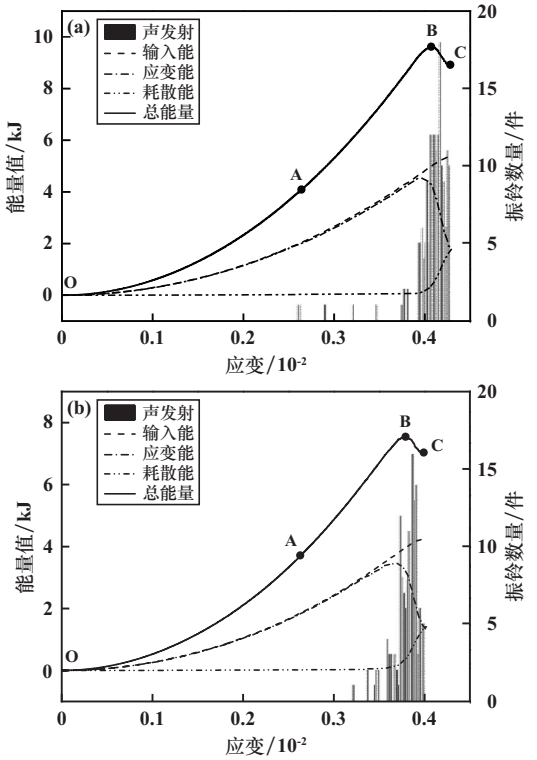
PFC^{2D}离散元软件可监测试样从加载初期至失效阶段的各类能量转化,并依据有效荷载与位移记录能量值。据其操作手册[30],边界能为加载输入的总能量来源,随应力增大克服颗粒间接触力;可储存的弹性应变能分为线性应变能与黏结能,分别作用于颗粒应变与黏结;摩擦能与阻尼能为加载中的耗散能分量,对应颗粒间摩擦及阻尼作用;动能反映颗粒运动程度,其变化平缓,表明试样失效破裂较平缓。

随着应力持续加载,岩石试样内部损伤逐渐累积,试样的每一次损伤在PFC^{2D}中可记录为一次声发射事件(即产生一条微裂纹)。结合径向加载中单位时间声发射事件数与能量转化曲线,可更直观地分析试样加载过程中能量转化与微裂纹萌生发育的关系。以$\alpha=60°$为例,分析其与对照工况$\alpha=120°$交叉角度试样的能量转化与声发射规律,如图8所示。图8中,总能量为试样加载过程中所有转化能量的累计和;输入能即边界能;应变能为线性应变能与黏结能之和;耗散能为阻尼能、动能和摩擦能之和。对比图4可知,图8中总能量曲线与对应的应力-应变曲线变化趋势相似,大致分为三个阶段。

初始压缩阶段(OA):输入能以应变能形式存储于试样中,随径向加载持续储能,此阶段几乎无能量耗散与微裂纹萌生。

线弹性变形至塑性屈服点阶段(AB):输入能大部分转化为弹性应变能,仅少量耗散;越接近B点,能量耗散越频繁,且输入能与应变能曲线开始分离。通过声发射监测可见,此阶段有少量微裂纹萌生并呈扩展趋势。

加速破坏阶段(BC):随输入能持续增加,应变能达储能极限后迅速释放,转化为耗散能,并用于微裂纹扩展、颗粒移动及克服摩擦与阻尼,耗散能曲线斜率增大;此时声发射事件数显著波动,表明微裂纹迅速扩展贯穿,岩石试样失效。



(a) $\alpha=60°$、$\beta=120°$; (b) $\alpha=120°$、$\beta=60°$

图8 主裂纹60°、120°时试样能量转化与声发射对照图

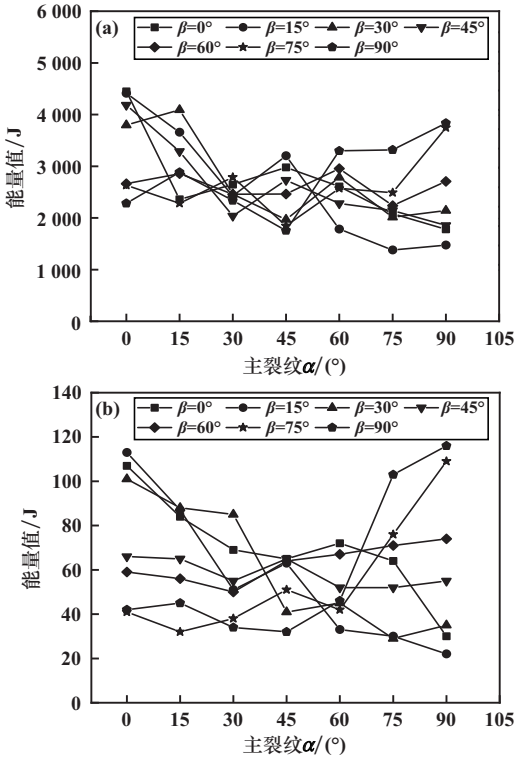
Fig. 8 Comparison of energy conversion and acoustic emission for primary cracks at angles of 60° and 120°

3.2 交叉裂纹组合对能量指标的影响

不同交叉组合试样在径向加载峰值时的储能极限与耗散能变化情况如图9所示。次裂纹$\beta<60°$时,试样储能极限随主裂纹α值增大而整体降低;当$60°<\beta<90°$时,α值越大试样储能极限越高。该现象与应力变化规律强相关:随主、次裂纹角度增大,交叉裂纹试样抗拉强度先降后升。

耗散能变化趋势与储能极限变化趋势基本一致,总体随主裂纹α值增大先降后升,且应变能越大,对应耗散能也越大;交叉组合中,主、次裂纹角度差值越大,试样抗拉强度越小,相应的应变能储存极限也越

小,如 $\alpha=0°$、$\beta=90°$与 $\alpha=90°$、$\beta=0°$两组交叉组合,储能极限较小,分别为 2 298.186、1 789.531 J,且主裂纹的影响大于次裂纹的影响。



(a) 储能极限;(b) 耗散能

图 9　不同交叉组合试样储能极限与耗散能变化

Fig. 9　Variations of energy storage limit and dissipated energy for specimens with different cross-crack combinations

4　工程建议

基于交叉裂纹岩石劈裂力学特性、微裂纹演化规律及能量转化机制的研究结论,可为矿山裂隙围岩的稳定性管控与工程治理提供一定参考。

1) 在岩体工程勘察与风险分级阶段,应将交叉裂纹的产状组合纳入围岩稳定性评价指标体系,重点排查主次裂纹角度差值较大的裂隙发育带,将该类区域划定为围岩失稳高风险区段,适当加密勘察测点与日常监测频次。

2) 在支护加固设计环节,针对仅发育单条裂纹的岩体,需重点关注裂纹与主应力方向夹角处于 15°~30°的部位,该工况下岩体抗拉强度折减最显著;针对具有长短主次裂纹交叉发育的岩体,应优先对主次裂纹夹角差值大的组合区域实施补强处理,通过锚杆加密、局部注浆等方式分散裂纹尖端的应力集中,抑制微裂纹的萌生与贯通。

3) 在开挖施工过程中,应优化开挖工序与爆破参数,降低围岩所受的径向拉伸扰动,延缓裂纹尖端的损伤累积速率。此外,可依托微裂纹发育与声发射事件的联动规律,在交叉裂隙高发的高危区域布设声发射监测系统,将声发射事件的指数式增长作为围岩失稳的预警信号,实现围岩损伤演化的动态监测与风险预判,保障矿山巷道、采场等岩体工程的施工与运营安全。

5　结论

1) 含预制交叉裂纹的试样抗拉强度低于完整试样;峰值强度随主次裂纹角度变化呈先降后升趋势,主次裂纹角度差值越大,试样抗拉强度越小,且主裂纹对强度的影响占主导。

2) 劈裂作用下试样微裂纹以拉伸微裂纹为主,交叉裂纹夹角变化仅降低试样破坏强度,不改变其拉伸失效的受力类型;微裂纹多萌生于与荷载方向夹角较小的裂纹尖端,向加载端扩展贯通后引发试样失效。

3) 岩石劈裂破坏伴随能量不可逆转化,弹性应变能达到储存极限后迅速转化为耗散能,同步伴随声发射事件激增、微裂纹指数增长;主次裂纹角度差值越大,试样应变能储能极限越小。

4) 工程勘察阶段应重点排查主次裂纹角度差值较大的裂隙发育带;支护加固时,重点关注单裂纹岩体裂纹与主应力夹角为 15°~30°的部位,优先对交叉裂纹岩体角度差值大的区域实施补强;在高危区域布设监测系统,以声发射事件激增作为失稳预警信号,提升围岩安全管控水平。

参考文献(References):

[1] 陈卫忠,王鲁瑀,谭贤君,等. 裂隙岩体地下工程稳定性研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(10):1945-1961.
Chen Weizhong, Wang Luyu, Tan Xianjun, et al. State-of-the-art and development tendency of the underground engineering stability of fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(10):1945-1961.

[2] Ma S Z, Liu K W, Guo T F, et al. Experimental and numerical investigation on the mechanical characteristics and failure mechanism of cracked coal & rock-like combined sample under uniaxial compression[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022,122:103583.

[3] 唐晞源,周宗红,徐阳,等. 含交叉裂隙岩体裂纹扩展与能量演化研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):36-43.
Tang Xiyuan, Zhou Zonghong, Xu Yang, et al. Crack propagation and energy evolution of rock mass with cross-fractures[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):36-43.

[4] 孙钱程,刘越,王庆文,等. 硬岩开挖诱发扰动应力旋转规律及其

对岩体破裂的影响[J]. 岩土力学, 2023,44(11):3128-3140.
Sun Qiancheng, Liu Yue, Wang Qingwen, et al. Law of disturbed stress rotation induced by hard rock excavation and its influence on rock fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023,44(11):3128-3140.

[5] 刘艳章,王瑾,尹东,等. 冻融作用下单裂隙类砂岩冻胀力与强度变化规律研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):115-119.
Liu Yanzhang, Wang Jin, Yin Dong, et al. Experimental study on frost heaving pressure and strength variation of single crack quasi-sandstone under freeze-thaw process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):115-119.

[6] 徐阳,周宗红,杨渊,等. 三轴压缩下裂隙岩体破坏模式及能量演化研究[J]. 高压物理学报, 2024,38(5):203-216.
Xu Yang, Zhou Zonghong, Yang Yuan, et al. Study on failure mode and energy evolution of fractured rock body under triaxial compression[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024,38(5):203-216.

[7] 陈家嵘,周昌台,周韬,等. 压剪荷载下含单一裂隙砂岩的应变演化与破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(7):1743-1758.
Chen Jiarong, Zhou Changtai, Zhou Tao, et al. Experimental study on strain evolution and failure behavior of sandstone containing a single pre-existing flaw under compressive-shear loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(7):1743-1758.

[8] 杨恩光,杨立云,胡桓宁,等. 单轴压缩荷载下闭合裂纹扩展的试验和数值研究[J]. 岩土力学, 2022,43(增刊1):613-622.
Yang Enguang, Yang Liyun, Hu Huanning, et al. Experimental and numerical research on propagation of closed cracks under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022,43(S1):613-622.

[9] 吴顺川,马骏,程业,等. 平台巴西圆盘研究综述及三维启裂点研究[J]. 岩土力学, 2019,40(4):1239-1247.
Wu Shunchuan, Ma Jun, Cheng Ye, et al. Review of the flattened Brazilian test and research on the three dimensional crack initiation point[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(4):1239-1247.

[10] 刘建锋,梁超,王璐,等. 基于一种普适性直接拉伸方法的岩石拉伸测试及问题分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(9):2140-2147.
Liu Jianfeng, Liang Chao, Wang Lu, et al. Rock tensile testing and problem analysis based on a universal direct tensile approach[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(9):2140-2147.

[11] 黄耀光,王连国,陈家瑞,等. 平台巴西劈裂试验确定岩石抗拉强度的理论分析[J]. 岩土力学, 2015,36(3):739-748.
Huang Yaoguang, Wang Lianguo, Chen Jiarui, et al. Theoretical analysis of flattened Brazilian splitting test for determining tensile strength of rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(3):739-748.

[12] Shams G, Rivard P, Moradian O. Tensile strength and failure behavior of rock-mortar interfaces: direct and indirect measurements[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024,16(1):41-55.

[13] Bai Y, Sun P, Dou H Y, et al. Experiment and particle flow simulation on mechanical properties and crack evolution mechanism of Brazilian discs containing two flaws[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2023,20(6):1227-1241.

[14] Chen L X, Guo W Y, Zhang D X, et al. Experimental study on the influence of prefabricated fissure size on the directional propagation law of rock type-I crack[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022,160:105274.

[15] 冯豪天,陈俊智,任春芳. 含裂隙岩石裂纹扩展与剪切特性的数值研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022,18(6):134-140.
Feng Haotian, Chen Junzhi, Ren Chunfang. Numerical study on crack propagation and shear properties of rock with flaws[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022,18(6):134-140.

[16] 刘新荣,尹志明,王艳磊. 含V形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.
Liu Xinrong, Yin Zhiming, Wang Yanlei. Mechanical properties and failure mode of rock mass containing V-type intersecting fissures[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(2):651-659.

[17] Wang H Q, Liu Z X, Guo T F. Study on mechanical properties and fracture behaviours of rock-mortar specimens with an interface crack under radial compression[J]. Construction and Building Materials, 2023,406:133399.

[18] 李恒,杨圣奇,孙博文,等. 双裂隙复合岩层单轴压缩力学性质及损伤机理离散元模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023,54(10):4000-4014.
Li Heng, Yang Shengqi, Sun Bowen, et al. Discrete element simulation of mechanical properties and damage mechanism of composite rock containing two fissures under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023,54(10):4000-4014.

[19] 孙闯,敖云鹤,张家鸣,等. 花岗岩细观破裂特征及宏观尺度效应的颗粒流研究[J]. 岩土工程学报, 2020,42(9):1687-1695.
Sun Chuang, Ao Yunhe, Zhang Jiaming, et al. Particle flow of meso-fracture characteristics and macro-scale effect of granites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020,42(9):1687-1695.

[20] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979,29(1):47-65.

[21] 蒋明镜,陈贺,刘芳. 岩石微观胶结模型及离散元数值仿真方法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(1):15-23.
Jiang Mingjing, Chen He, Liu Fang. A microscopic bond model for rock and preliminary study of numerical simulation method by distinct element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(1):15-23.

[22] 龙恩林,陈俊智. 花岗岩颗粒流模型循环压缩作用下裂纹特征分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019,15(4):39-44.
Long Enlin, Chen Junzhi. Analysis of crack characteristics of granite particle flow model under cyclic compression[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019,15(4):39-44.

[23] 陈鹏宇,孔莹,余宏明. 岩石单轴压缩 PFC^{2D} 模型细观参数标定研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018,14(5):1240-1249.
Chen Pengyu, Kong Ying, Yu Hongming. Research on the calibration method of microparameters of a uniaxial compression PFC^{2D} model for rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018,14(5):1240-1249.

(下转第35页)

时频分析应用研究[J]. 爆破, 2024,41(1):14-20.
Sun Miao, Wu Li, Yang Junkai. Application of time-frequency analysis of blasting vibration of underground cavern based on CEEMDAN-INHT[J]. Blasting, 2024,41(1):14-20.

[9] 宋青波,柏皓博,王海龙,等. 基于 CEEMDAN-交叉小波变换的爆破延时识别[J]. 工程爆破, 2023,29(2):10-16.
Song Qingbo, Bai Haobo, Wang Hailong, et al. Recognition of blasting delay time based on CEEMDAN-cross wavelet transform[J]. Engineering Blasting, 2023,29(2):10-16.

[10] 李晨,梁书锋,刘传鹏,等. 基于改进的集合经验模态分解的爆破振动信号趋势项消除方法[J]. 北京理工大学学报, 2021,41(6):636-641.
Li Chen, Liang Shufeng, Liu Chuanpeng, et al. Trend removing method of blasting vibration signals based on MEEMD[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021,41(6):636-641.

[11] 曲春刚,朱胜翔,冯正兴. CEEMDAN-SE-WT 降噪方法在航空发动机燃油流量信号中的应用[J]. 科学技术与工程, 2024,24(15):6525-6533.
Qu Chungang, Zhu Shengxiang, Feng Zhengxing. Application of denoising method on aviation engine fuel flow signal based on CEEMDAN-SE-WT[J]. Science Technology and Engineering, 2024,24(15):6525-6533.

[12] 刘嘉辉,秦仙蓉,王玉龙,等. 基于双树复小波变换与样本熵的自适应降噪法[J]. 振动、测试与诊断, 2022,42(2):285-291.
Liu Jiahui, Qin Xianrong, Wang Yulong, et al. Adaptive denoising of monitoring signal based on dual-tree complex wavelet transform and sample entropy[J]. Vibration, Testing and Diagnosis, 2022,42(2):285-291.

[13] 郭航伸,郭连军,杨巍,等. 改进的局部均值分解法在爆破振动去噪中的应用[J]. 工程爆破, 2021,27(6):32-38.
Guo Hangshen, Guo Lianjun, Yang Wei, et al. Application of improved local mean decomposition in blasting vibration denoising[J]. Engineering Blasting, 2021,27(6):32-38.

[14] 费鸿禄,山杰. CEEMDAN-小波阈值法在爆破振动信号处理中的应用[J]. 爆破, 2022,39(3):41-47.
Fei Honglu, Shan Jie. Application of CEEMDAN and wavelet threshold method in blasting vibration signal processing[J]. Blasting, 2022,39(03):41-47.

[15] 李祥龙,余林,黄原明,等. 基于 VMD-HHT 的井下预裂爆破振动效应分析[J]. 黄金科学技术, 2024,32(3):501-510.
Li Xianglong, Yu Lin, Huang Yuanming, et al. Vibration effect analysis of downhole pre-splitting blasting based on VMD-HHT[J]. Gold Science and Technology, 2024,32(3):501-510.

[16] 刘志龙,张祚富,盖俊鹏,等. 基于改进 RLMD 的爆破振动信号去趋势方法[J]. 爆破器材, 2025,54(3):48-56.
Liu Zhilong, Zhang Zuofu, Gai Junpeng, et al. Detrending method of blasting vibration signals based on improved RLMD[J]. Explosive Materials, 2025,54(3):48-56.

引用本文:任李林,黄宇,曹庆彬,等. 高边坡爆破振动信号降噪方法及时频特征研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):27-35.
Ren Lilin, Huang Yu, Cao Qingbin, et al. Noise reduction method and time-frequency characteristics of blasting vibration signals for high slopes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):27-35.

(上接第 26 页)

[24] 冯豪天,陈俊智,任春芳,等. 数值试验中胶结结构面参数标定方法的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022,18(6):1824-1833.
Feng Haotian, Chen Junzhi, Ren Chunfang, et al. Numerical experiments of cementation structure surface parameter calibration method research[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2022,19(6):1824-1833.

[25] Zhou T, Zhu J B, Ju Y, et al. Volumetric fracturing behavior of 3D printed artificial rocks containing single and double 3D internal flaws under static uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019,205:190-204.

[26] Luo P K, Li D Y, Zhou A H, et al. Influence of bedding plane on the tensile properties and crack propagation of soft and hard laminated rock-like under Brazilian test[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023,127:104087.

[27] 汤双臣,冯鹏,赵家琛. 含交叉裂隙岩石试样单轴力学特性与破坏机理[J]. 地下空间与工程学报, 2021,17(5):1376-1383.
Tang Shuangchen, Feng Peng, Zhao Jiachen. Uniaxial mechanical properties and failure mechanism of rock specimens containing cross fissures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021,17(5):1376-1383.

[28] 张国凯,李海波,夏祥,等. 岩石单轴压缩下能量与损伤演化规律研究[J]. 岩土力学, 2015,36(增刊 1):94-100.
Zhang Guokai, Li Haibo, Xia Xiang, et al. Research on energy and damage evolution of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(增刊 1):94-100.

[29] 谢和平,鞠杨,黎立云,等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(9):1729-1740.
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(9):1729-1740.

[30] Itasca Consulting Group Inc. PFC 6.0 documentation, user's guide[M]. Minneapolis, MN, USA, 2019.

引用本文:何昌耀,陈俊智,任春芳. 不同角度交叉裂纹岩石劈裂力学性能的颗粒流模拟[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):16-26.
He Changyao, Chen Junzhi, Ren Chunfang. Particle flow simulation of splitting mechanical properties of rock with cross-cracks at different angles[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):16-26.