含交叉裂隙岩体裂纹扩展与能量演化研究①

唐晞源[1], 周宗红[2], 徐阳[1], 刘剑[2], 李怀鹏[3]

(1.昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650000; 2.昆明理工大学 国土资源与工程学院, 云南 昆明 650000; 3.云南云天化聚磷新材料有限公司, 云南 昆明 650000)

摘 要: 基于 PFC^{2D}构建数值模型,系统分析了围压与裂隙倾角对交叉裂隙岩体裂纹扩展、破坏模式及能量演化的影响。结果表明,随着围压增加,破坏模式由低围压下的张拉或混合型破坏转为高围压下的剪切主导破坏。随着倾角增大,破坏路径由次裂隙主导转为主裂隙主导。围压显著影响裂纹的扩展形态与数量,但倾角主要影响裂纹起裂位置和扩展路径。围压提升岩样的储能能力,促进应变能积累,增强结构的整体韧性。倾角主要影响能量分配路径,交叉裂隙倾角 45°时试样具有极高的能量储存能力和延迟破坏行为,表明其承载能力强,但岩爆风险较高;交叉裂隙倾角 60°时试样的储能极限较低且能量释放更突然,表现出典型的脆性破坏特征。

关键词: 岩石力学; 交叉裂隙; 围压效应; 裂纹扩展; 能量演化; 储能极限; 破坏模式; 裂隙倾角; 应变能; 耗散能

中图分类号: TD313 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.006

文章编号: 0253-6099(2026)02-0036-08

Crack Propagation and Energy Evolution of Rock Mass with Cross-Fractures

TANG Xiyuan[1], ZHOU Zonghong[2], XU Yang[1], LIU Jian[2], LI Huaipeng[3]

(1.*Faculty of Public Safety and Emergency Management*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650000, *Yunnan*, *China*; 2.*Faculty of Land Resources Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650000, *Yunnan*, *China*; 3.*Yunnan Yuntianhua Polyphosphate New Materials Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650000, *Yunnan*, *China*)

Abstract: Based on PFC^{2D}, a numerical model was constructed to systematically analyze the effects of confining pressure and fracture dip angle on the crack propagation, failure modes, and energy evolution of rock mass with cross-fractures. The results show that with the increase of confining pressure, the failure mode transitions from tensile or mixed failure mode under low confining pressure to shear-dominated failure under high confining pressure. As the dip angle increases, the secondary fracture - dominated fracture is shifted to primary fracture - dominated fracture. The confining pressure significantly affects the propagation morphology and quantity of cracks, whereas the dip angle mainly influences the crack initiation location and propagation path. The confining pressure enhances the energy storage capacity of rock samples, promotes strain energy accumulation, and strengthens the overall toughness of the structure. The dip angle mainly affects the energy allocation path. When the dip angle of cross-fractures is 45°, the specimen exhibits an extremely high energy storage capacity and delayed failure behavior, indicating a strong load-bearing capacity but a high rockburst risk. When the dip angle of cross-fractures is 60°, the lower energy storage limit of the specimen leads to sudden burst of energy, demonstrating typical brittle failure characteristics.

Key words: rock mechanics; cross-fracture; confining pressure effect; crack propagation; energy evolution; energy storage limit; failure mode; fracture dip angle; strain energy; dissipated energy

岩体在地质构造及长期应力作用下,内部产生各种各样的裂隙,这些裂隙显著影响岩体的力学性质,导致岩体更易失稳破坏[1]。在深部岩体工程施工过程中,裂隙发育的岩体极易诱发冒顶、片帮和隧道突水等灾害。因此,开展复杂裂隙岩体的力学行为研究尤为重要。

① **收稿日期**: 2025-10-16
基金项目: 国家自然科学基金(52264019,51864023);云南省基础研究计划项目青年项目(202401AU070175)
作者简介: 唐晞源(1999—),男,云南曲靖人,硕士研究生,研究方向为采矿安全与岩石力学。E-mail:15924778965@163.com
通信作者: 周宗红(1967—),男,安徽宿州人,教授,博士研究生导师,研究方向为采矿与岩石力学。E-mail:zhou20051001@163.com

交叉裂隙岩体作为典型不连续地质结构,由于裂隙间的相互作用,应力集中效应更为突出,岩体破坏过程呈现多尺度特征,从微观裂纹萌生到宏观失稳贯通,均表现出与完整岩体或单一裂隙岩体更复杂的力学响应[2-3]。部分学者通过室内试验和数值模拟方法,对交叉裂隙岩体的力学性质、裂纹扩展及能量演化等进行研究[4-7],然而大多数工作仍聚焦于几何特征(如裂隙数量、长度、倾角和间距等)对交叉裂隙岩体力学行为的影响。

实际工程中的岩体通常处于多轴应力状态,围压对裂隙岩体的强度、破坏模式及能量分配具有关键作用[8],且围压会抑制裂纹的侧向扩展,促进共面剪切裂纹的形成,并显著改变裂隙岩体的最终贯通模式[9-11]。目前,关于围压对交叉裂隙岩体的力学行为影响的研究较少,特别是围压与裂隙倾角的耦合效应对裂纹扩展路径、贯通机制及能量演化的影响机制尚不明确。因此,本文基于颗粒流离散元方法(PFC),结合不同围压(0~24 MPa)和裂隙倾角(0°~60°)条件,系统研究交叉裂隙岩体的变形破坏特征、裂纹扩展全过程及能量演化规律,为深部工程岩体的稳定性评估与灾害防控提供理论依据。

1　数值模拟方法

1.1　室内力学参数标定

本文以云南某金矿 510~560 m 中段的闪长岩为研究对象,取样后制成标准圆柱试样(Φ50 mm×100 mm)开展力学特性测试。闪长岩角闪石含量较高,并含有少量黑云母、碱性长石和石英,密度为 2 813 kg/m^3,纵波波速约 5 500 m/s。岩石力学试验在河南理工大学国家重点实验室的 GCTS RTX-3000 试验系统上完成。该设备采用全数字伺服控制,应变测量使用高精度链条式环向引伸计,加载速率为 0.002 mm/s,以保证准静态加载条件。

基于试验结果,采用颗粒流离散元方法(PFC^{2D})中的平行黏结模型(PBM)建立数值模型[12],通过试错法对细观参数进行系统标定,PFC 细观参数如表 1 所示。数值模拟结果与试验结果对比如图 1 所示,模型准确再现了试样的剪切破坏特征,应力-应变曲线吻合良好。室内试验与数值模拟结果对比如表 2 所示,偏应力和弹性模量误差均小于 5%,表明所建立的数值模型能够准确反映闪长岩的力学行为特性。

1.2　数值模型构建及模拟方案设置

本文构建了与物理试样尺寸一致的二维模型。参考文献[13],设置主裂隙长 14 mm、次裂隙长8 mm,宽度均为 1 mm,主次裂隙呈正交布置,主裂隙与轴向夹角定义为倾角 α,α 分别设置为 0°、30°、45°和 60°,围压分别为 0、6、12、24 MPa,共计 16 组工况。交叉裂隙试样数值计算模型如图 2 所示。裂隙通过颗粒删除法嵌入模型,确保几何一致性。最终模型含 8 801 个颗粒和 21 102 个接触点。加载方式采用位移控制,通过上下刚性壁以 0.002 mm/s 速率施加轴压,在此速率下,1 mm 轴向压缩对应约 30 万个时间步计算,满足准静态加载条件,保证模拟结果具备良好的物理可比性。

表 1　PFC 细观参数

Table 1　PFC mesoscopic parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
颗粒最小半径/mm	0.30	颗粒刚度比	1.20
颗粒密度/(kg·m^{-3})	2 813	平行黏结刚度比	1.20
接触模量/GPa	43.60	颗粒间摩擦因数	0.20
平行黏结模量/GPa	43.60	切向黏结强度/MPa	68.24
法向黏结强度/MPa	64.04	内摩擦角/(°)	55.00

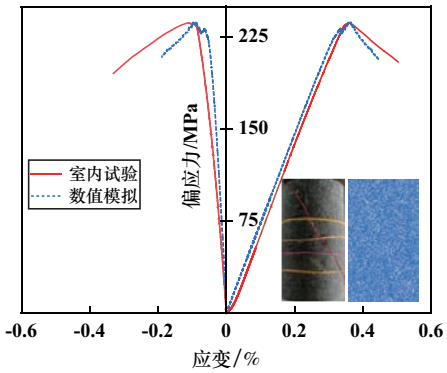


图 1　数值模拟结果与试验结果的对比

Fig. 1　Comparison between numerical simulation result and experimental result

表 2　室内试验与数值模拟结果对比

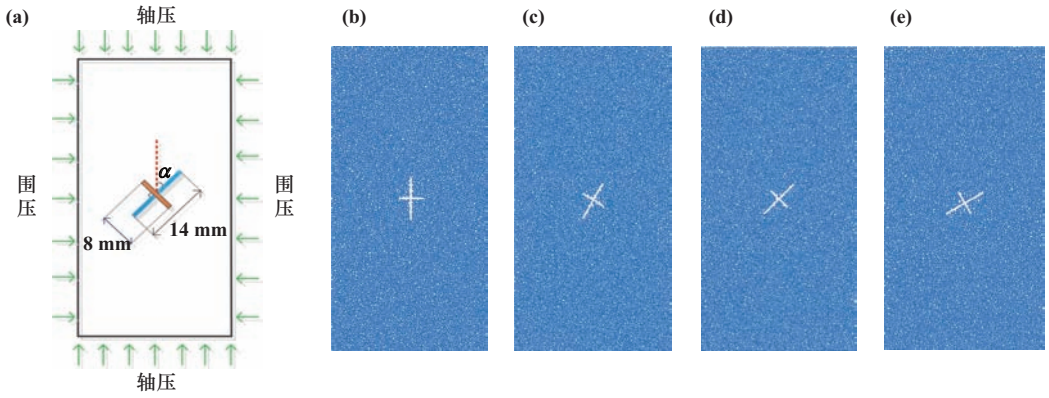
Table 2　Comparison between laboratory test and numerical simulation results

岩体参数	偏应力/MPa	弹性模量/GPa
室内试验	236.710	65.317
数值模拟	237.444	65.667
误差	0.3%	0.5%

2　数值结果分析

2.1　交叉裂隙岩石破坏特征分析

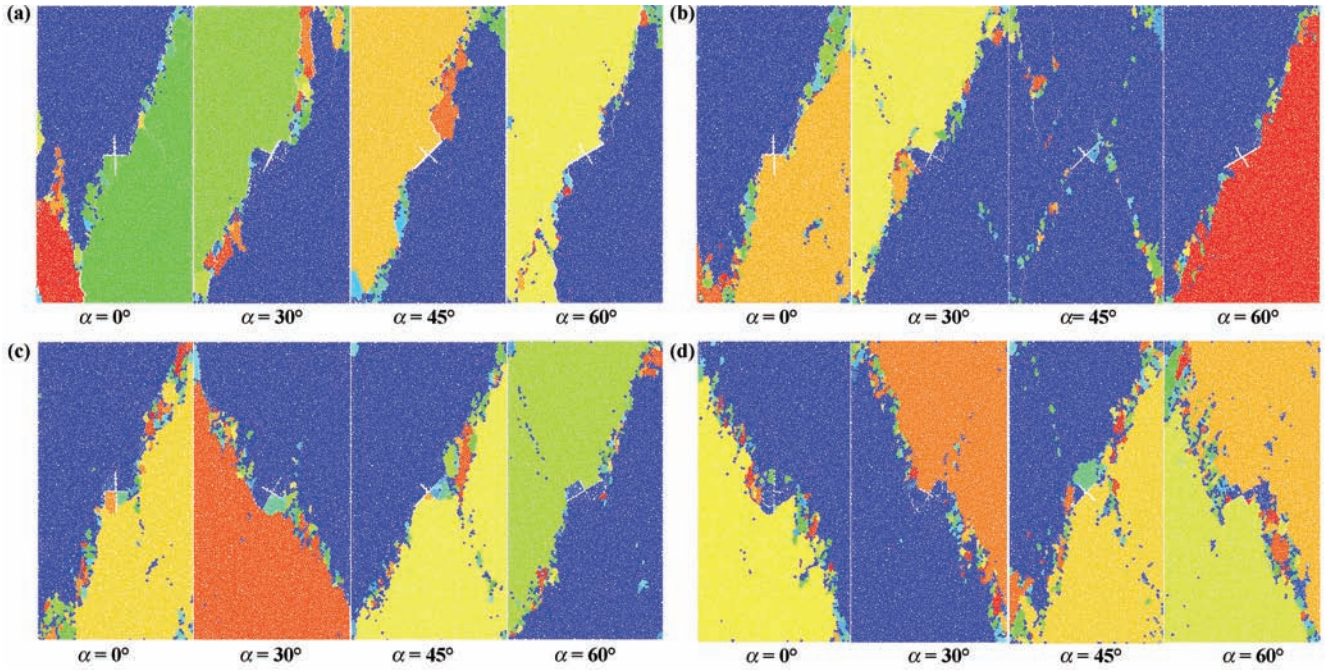
块体图能较好地反映岩样最终破坏的块体数量和模式,其中颜色表示岩样破碎程度和破坏位置,各围压与倾角下含交叉裂隙试样的破碎形态如图 3 所示。围压和倾角的变化显著影响破坏形态。围压为0时,裂



(a) 计算模型；(b) α=0°；(c) α=30°；(d) α=45°；(e) α=60°

图 2 交叉裂隙试样数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model of specimen with cross-fracture



(a) 0；(b) 6 MPa；(c) 12 MPa；(d) 24 MPa

图 3 各围压与倾角下含交叉裂隙试样的破碎形态

Fig. 3 Morphologies of specimen with cross-fracture at different dip angles under different confining pressures

纹扩展过程中应力集中区域易引发拉伸裂纹，且翼裂纹和远场裂纹共同参与，导致试样主要呈现拉伸-剪切复合破坏，破碎程度较低。随着围压增加，拉伸裂纹扩展受到抑制，剪切滑移逐渐主导破坏过程，30°与 45°倾角出现了“X”形共轭剪切破坏，但破坏模式总体趋于剪切破坏；且由于围压限制了颗粒间的侧向变形，块体在承受荷载时更多以破碎的方式释放能量，因此破碎程度随着围压增大而增大。从裂隙倾角的影响机制看，倾角为 0°时主裂隙与加载方向平行，其尖端应力集中较弱，对裂纹萌生扩展作用有限，破坏路径主要由次裂隙引导；随着倾角增大，主裂隙与加载方向形成夹角，尖端应力集中增强，主裂隙逐渐主导裂纹起裂与扩展过程，此时宏观破坏模式主要由主裂隙控制，次裂隙起引导和调整裂纹扩展路径的作用。

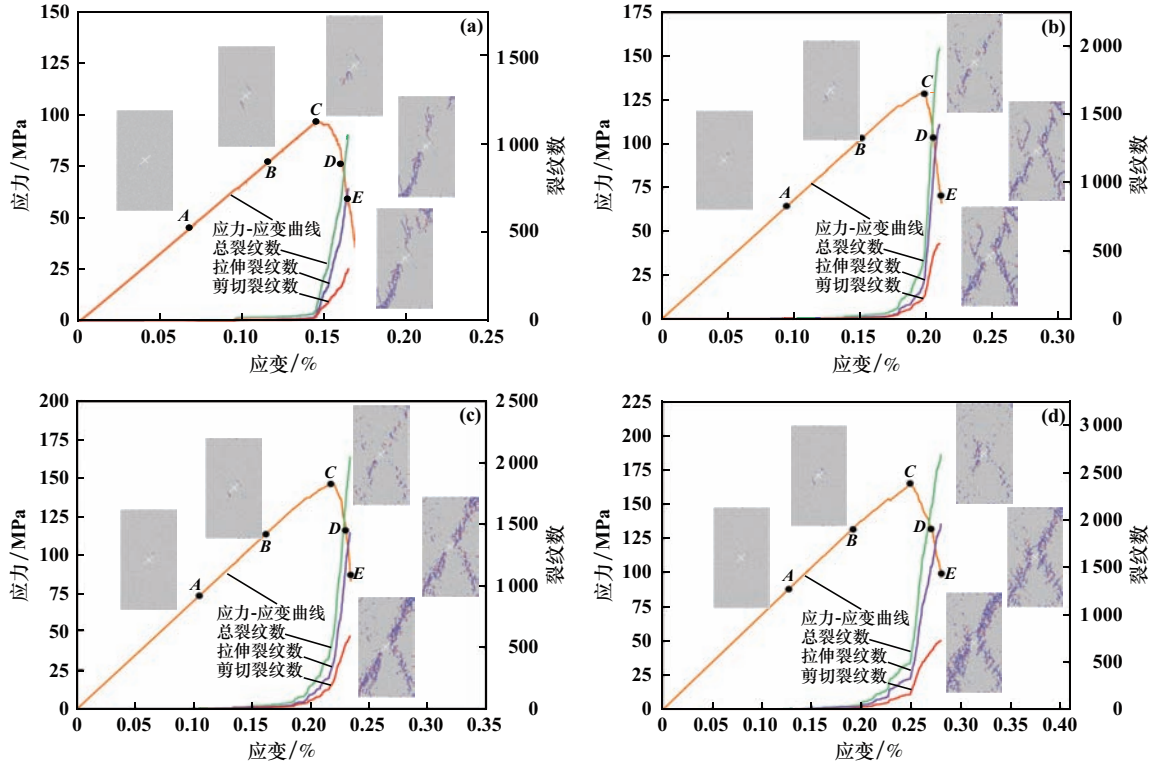
2.2 交叉裂隙岩石裂纹扩展过程分析

由前文研究可知，围压与裂隙倾角对裂纹演化过程具有显著调控作用，其协同作用会直接导致岩石呈现不同的破坏模式。限于篇幅，并考虑到 45°倾角是最常见的剪切裂隙倾角，易诱发沿裂隙面的滑移与裂纹扩展，因而在研究岩石破裂机制和裂纹演化行为中被广泛采用；而 6 MPa 围压属于中等围压水平，在该应力条件下，裂隙影响尚未被围压完全抑制，便于激发

岩石材料典型的剪切破裂模式,具有良好的敏感性与代表性。基于此,本文分别设计 45°倾角下不同围压工况,以及 6 MPa 围压下不同倾角工况,通过 2 组试验的对比分析,系统探究围压与裂隙倾角对裂纹起裂及扩展特征的影响规律。为了深入解析围压与裂隙倾角的作用机制,本文定义了 5 个关键应力特征点:*A* 点(裂纹起裂)、*B* 点(峰值强度前 80%)、*C* 点(峰值强度)、*D* 点(峰值强度后 80%)和 *E* 点(峰值强度后 60%),以此系统分析裂纹演化的全过程。

45°倾角交叉裂隙试样在不同围压下的裂纹演化过程如图 4 所示。不同围压下裂纹均始于主裂隙尖端并形成翼裂纹,但围压能显著改变扩展路径。无围压时,随载荷增加,主裂隙下端翼裂纹区域出现次生裂纹,改变了原有扩展路径,同时主裂隙上端翼裂纹也不断向外延伸。随后试样中出现远场裂纹,最终翼裂纹贯穿试样上下表面时整体发生破坏。而围压 6 MPa 下,除主裂隙尖端处的裂纹外,次裂隙区域也出现次生裂纹,并演化为反翼裂纹。随着加载的持续,最终由主裂隙萌生的翼裂纹与次裂隙区域演化出的反翼裂纹共同扩展,导致试样破坏。在较高围压条件下(12 和 24 MPa),随着加载的推进,这些裂纹不仅发展为翼裂纹,还有部分向次裂隙尖端扩展,最终导致主裂隙与次裂隙之间的贯通。此现象在围压 24 MPa 条件下尤为明显,表明高围压显著改变了裂纹从起裂初期开始的扩展路径。

此外,不同围压下,试样的起裂应力随着围压增大而增大[14],分别为 44.897、65.842、73.676 和 88.080 MPa,是相应峰值应力的 46.26%、50.83%、51.59%与 53.35%。达到峰值点 *C* 时,裂纹总体呈台阶式增长,并随着围压增大,增长速率加快;当超过峰值强度后,即 *C* 点至 *E* 点阶段,裂纹呈指数增长,围压越大,裂纹的产生越滞后,岩样的破坏时间更长,最终在 *E* 点时总裂纹数分别为 1 039、1 969、2 028 和 2 689 个,直至贯穿试样的上下边界,最终导致整体结构破坏。



(a) 0; (b) 6 MPa; (c) 12 MPa; (d) 24 MPa

图 4　45°倾角交叉裂隙试样在不同围压下的裂纹演化过程

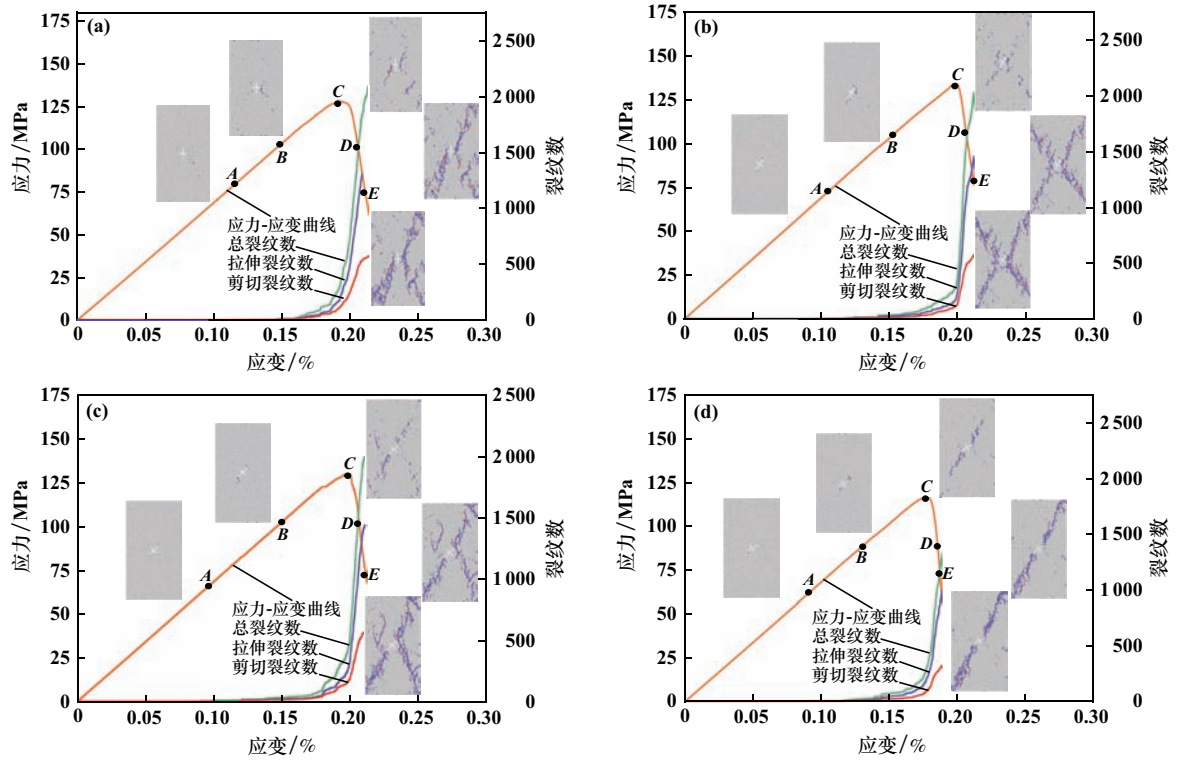
Fig. 4　Crack evolution processes of specimen with cross-fracture at a 45° dip angle under different confining pressures

围压 6 MPa 条件下不同倾角交叉裂隙试样的裂纹演化过程如图 5 所示。

倾角 0°时,裂纹首先出现在次裂隙尖端,此后这些裂纹演化为翼裂纹并在右下角产生次生及远场裂纹,随着翼裂纹进一步扩展逐渐贯通试样表面,远场裂纹与次生裂纹相互连通并延伸至试样侧面,最终发生破坏。倾角 30°时,裂纹在主裂隙尖端萌生,但扩展路径偏向次裂隙尖端,促使主、次裂隙贯通;随后主裂隙尖端形成翼裂纹,次裂隙尖端形成反翼裂纹,二者沿加载方向扩展并贯通试样上下边界,最终呈现典型的

“X”形裂纹破坏模式。倾角 45°时的裂纹演化过程具体细节已在图 4 中分析,此处不再赘述,从宏观扩展路径来看同样呈现“X”形,但裂纹演化路径不同于倾角 30°,其翼裂纹和反翼裂纹均由主裂隙尖端萌生并扩展。倾角 60°时,裂纹也在主裂隙尖端萌生,并进一步演化为翼裂纹,沿加载方向扩展直至试样破坏,且未向次裂隙尖端发展。

整体来看,除倾角 0°时裂纹在次裂隙尖端萌生,其余倾角条件下裂纹均在主裂隙尖端产生,且试样在 A 处的起裂应力分别为 79.508、72.183、65.842 和 62.342 MPa。表明试样起裂应力随着裂隙倾角增大而减小,且倾角增大后,主裂隙尖端主导裂纹萌生与扩展,而次裂隙仅对裂纹扩展路径起导向作用。总体来看,倾角 60°时裂纹数量显著减少。倾角 60°时裂纹多为主裂隙尖端迅速扩展形成的翼裂纹,过程较少有次生裂纹参与,因而裂纹总数偏少。该规律与文献[5]的试验结论一致。进一步对比不同围压下的结果发现,裂纹起裂位置在不同围压条件下基本一致,说明围压虽能显著影响裂纹后期扩展路径与破坏模式,但对裂纹初始萌生部位的影响较小。



(a) 0°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°

图 5 围压 6 MPa 条件下不同倾角交叉裂隙试样的裂纹演化过程

Fig. 5 Crack evolution processes of specimen with cross-fracture at different dip angles under a confining pressure of 6 MPa

2.3 交叉裂隙岩石能量演化分析

岩石受载时内部裂纹不断发生萌生、扩展与贯通等演化行为,实质是能量的积聚、耗散与释放的动态转化过程。基于热力学第一定律,试样加载过程中所做的功 W 全部转化为岩石吸收的能量 U[15]:

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

式中:U 为总能量;U^{e} 为弹性应变能;U^{d} 为耗散能。

本文研究不同裂隙倾角下交叉裂隙岩石试样在双轴压缩过程中的能量演化特征。基于岩石试样所受外部功及其弹性响应,岩体内部各类能量的表达式为:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon_1 + 2\int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 \mathrm{d}\varepsilon_3 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} U^{e} &= \frac{1}{2E_i}[\sigma_1^{\,2} + 2\sigma_3^{\,2} - 2\mu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^{\,2})] \\ &\approx \frac{1}{2E_0}[\sigma_1^{\,2} + 2\sigma_3^{\,2} - 2\mu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^{\,2})] \end{aligned} \tag{3}$$

$$U^{d} = U - U^{e} \tag{4}$$

式中:σ_1 与 ε_1 分别为轴向应力与轴向应变;σ_3 与 ε_3 分别为侧向应力与侧向应变;E_i 为卸荷弹性模量;E_0 为初始弹性模量;μ 为试样的泊松比。

为进一步揭示不同围压与倾角作用下,裂隙岩石受载过程中的能量演化规律及其与结构破坏之间的关系,统计了交叉裂隙岩样在不同条件下的特征能量,如表 3 所示。

表 3　交叉裂隙岩样在不同条件下的特征能量

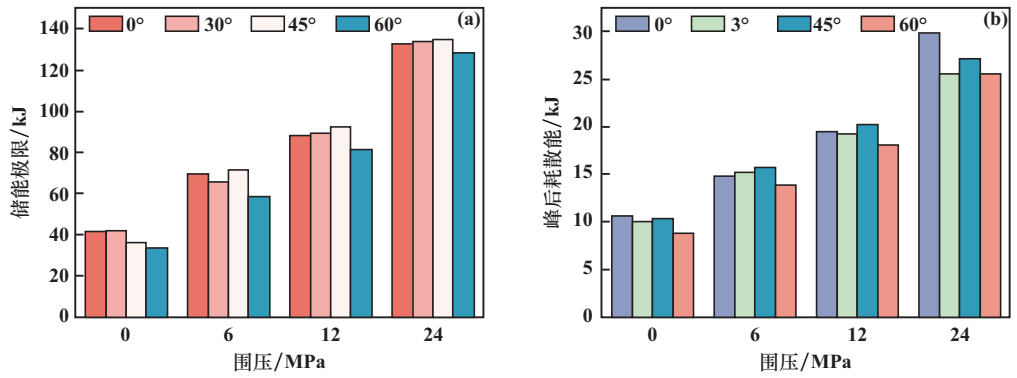
Table 3　Characteristic energy of cross-fractured rock samples under different conditions

围压/MPa	倾角/(°)	应变能/kJ			耗散能/kJ		
		峰前	峰值点	峰后	峰前	峰值点	峰后
0	0	26.599	41.453	29.244	0.518	1.207	10.503
	30	26.688	41.809	29.080	0.563	1.430	10.001
	45	23.477	36.179	26.612	0.534	1.026	10.318
	60	21.575	33.401	22.525	0.505	1.167	8.816
6	0	44.000	69.011	46.778	0.984	2.669	14.811
	30	41.840	65.423	43.974	1.065	2.781	15.214
	45	45.241	71.186	46.571	1.054	3.054	15.702
	60	37.628	58.344	35.887	0.874	1.891	13.895
12	0	57.181	88.049	63.429	1.370	3.285	19.434
	30	56.006	88.456	60.453	1.454	4.256	19.292
	45	59.422	92.079	60.276	1.440	3.691	20.267
	60	52.124	81.641	56.548	1.277	4.238	18.045
24	0	83.279	133.176	87.187	2.239	8.852	29.952
	30	88.883	133.613	94.712	3.150	6.125	25.581
	45	89.382	134.675	98.457	2.280	5.829	27.221
	60	84.049	128.118	90.640	3.709	8.548	25.595

表 3 结果表明，峰前总能量主要以应变能的形式存在，耗散能占比小，此阶段主要为弹性变形，颗粒间未出现明显滑移，结构处于稳定状态。

试样储能极限对比如图 6(a)所示。围压越大，试样的储能能力越强，是因为较高围压能有效延缓损伤集中，提升岩体韧性和整体承载能力。进一步比较不同倾角试样可见，60°时峰值应变能(储能极限)始终最低。这是源于倾角对裂纹起裂与贯通路径的影响。60°倾角使裂隙面与主应力方向更接近岩石剪切破坏的最不利角度，更易诱发裂纹快速发展，导致局部失稳提前发生，表现出更强脆性和更低破坏门槛。峰后阶段，应变能迅速释放并转化为耗散能，伴随裂纹快速扩展与贯通，宏观破裂面形成，结构迅速失稳，此时能量由可恢复(应变能)向不可逆(耗散能)转化。

试样峰后耗散能对比如图 6(b)所示。图 6(b)结果表明，$\alpha=60°$试样的峰后耗散能显著偏低，这表明其破坏过程更集中、剧烈，能量释放速率高。这与其裂纹



(a) 储能极限；(b) 峰后耗散能

图 6　不同围压与倾角下试样储能极限和峰后耗散能对比

Fig. 6　Comparison of energy storage limit and post-peak dissipated energy of specimens at different dip angles under different confining pressures

在加载后期迅速贯通、应变能尚未完全释放即失稳密切相关。综上所述，倾角和围压显著影响能量演化路径与破坏方式：高围压提升储能极限，增强结构韧性；而大倾角(如 60°)削弱储能能力、加剧突发破坏。

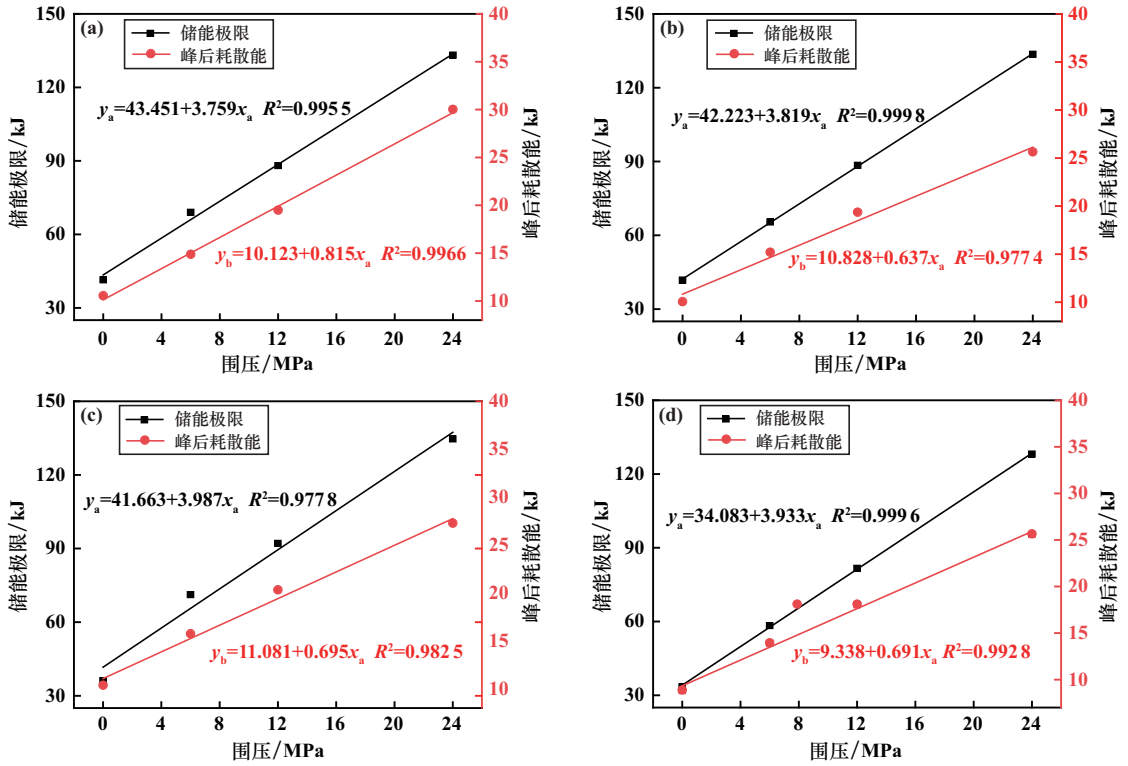
不同角度下，储能极限和峰后耗散能随着围压的变化趋势如图 7 所示。

无论裂隙倾角多大，储能极限和峰后耗散能均与围压呈良好线性关系，拟合决定系数均超过 0.97。不同裂隙倾角试样在能量演化特性上存在明显差异。$\alpha=0°$时峰后耗散能增长率最高，说明能量释放路径更偏向非弹性耗散。由于裂隙方向与主应力方向一致，围压促使裂隙强烈闭合，提升摩擦阻力，有效延缓破坏过程，提升耗散能。$\alpha=45°$时，储能极限随着围压增长最快(斜率 3.987)，具有更强的储能能力。因其裂隙与主应力斜交，剪切应力集中显著，围压下结构承载力增强。但其峰后耗散能斜率较低(0.695)，说明更易发生突然释放，存在较高的动力失稳风险。

3　结论

1) 不同围压与倾角耦合作用下试样破坏模式较为多样化，总体归结为拉剪混合破坏、“X”形共轭剪切破坏和剪切破坏。

2) 起裂应力和微裂纹数量随着围压增加而增加，高围压下试样中微裂纹数量增多，主次裂隙尖端更易



(a) 0°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°

图 7 储能极限和峰后耗散能随着围压的变化趋势

Fig. 7 Variation of energy storage limits and post-peak dissipated energy with confining pressure

发生贯通;倾角增大使主裂隙逐渐主导裂纹萌生与扩展,起裂应力随着倾角增大而减小,且倾角 60°下裂纹数量最少。

3) 围压提升了岩样的储能能力,增强了结构的整体韧性。交叉裂隙倾角主要影响能量分配路径,交叉裂隙倾角 45°时,岩石储能能力极强;交叉裂隙倾角 60°时,岩石应变能与峰后耗散能极低,表现出典型的脆性破坏。

参考文献(References):

[1] 刘婷婷,向昌,张超,等. 二维静载作用下含正交型交叉裂隙岩体动态力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024,43(2):371-384.
LIU Tingting, XIANG Chang, ZHANG Chao, et al. Research on dynamic mechanical properties of rock mass with orthogonal intersecting cracks under two-dimensional static loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(2):371-384.

[2] LI K S, LUAN Y Q, ZHANG J P, et al. Experimental study on mechanical behavior, AE response and energy evolution of fissure-filled sandstone from mine roadway under conventional triaxial compression[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024,130:104334.

[3] FENG P, XU Y, DAI F. Effects of dynamic strain rate on the energy dissipation and fragment characteristics of cross-fissured rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138:104600.

[4] 张波,李术才,杨学英,等. 含交叉多裂隙类岩石材料单轴压缩力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(9):1777-1785.
ZHANG Bo, LI Shucai, YANG Xueying, et al. Mechanical property of rock-like material with intersecting multi-flaws under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(9):1777-1785.

[5] XU R C, ZHAO Y, HU Y B, et al. Experimental investigation on the effect of preexisting orthogonal cross flaws on cracking behaviors and acoustic emission characteristics of red sandstone[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022,122:103634.

[6] 马燕,刘泽霖,王则. 饱水状态下含弯折裂纹岩石断裂特征试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):22-27.
MA Yan, LIU Zelin, WANG Ze. Experimental study on fracture characteristics of rocks with bent cracks under saturated conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):22-27.

[7] 梁东旭,张农,荣浩宇. 交叉裂隙岩体裂纹扩展试验及混合有限-离散元数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2023,44(4):1217-1229.
LIANG Dongxu, ZHANG Nong, RONG Haoyu. Experiment and hybrid finite-discrete element modelling of crack propagation in cross-fissured rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023,44(4):1217-1229.

[8] 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):206-216.
XU Yang, ZHOU Zonghong, YANG Yuan, et al. Study on failure mode and energy evolution of fractured rock body under triaxial com-

pression[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(5):203-216.

[9] YANG S Q, JIANG Y Z, XU W Y, et al. Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008,45(17):4796-4819.

[10] HUANG Y H, YANG S Q, TIAN W L. Crack coalescence behavior of sandstone specimen containing two pre-existing flaws under different confining pressures[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2019,99:118-130.

[11] 张梅丽,梁正召,高敏,等. 含交叉裂隙岩体力学性质数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020,16(3):758-769.
ZHANG Meili, LIANG Zhengzhao, GAO Min, et al. Numerical simulation of mechanical properties of rock specimens with cross-crack under different confining pressure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020,16(3):758-769.

[12] 刘剑. 闪长岩加卸荷失稳破裂前兆信息研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2022.
LIU Jian. Study on the precursor information of diorite plus unloading instability rupture[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[13] 李宏强,姚忠劭,曾志杭,等. 冻融循环单轴压缩下不等长交叉裂隙砂岩变形破坏特征研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024,46(6):65-72.
LI Hongqiang, YAO Zhongshao, ZENG Zhihang, et al. Study on deformation and failure characteristics of sandstone with unequal length cross cracks under uniaxial compression of freeze-thaw cycle[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2024, 46(6):65-72.

[14] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(8):1329-1364.

[15] 郭佳奇,刘希亮,乔春生. 自然与饱水状态下岩溶灰岩力学性质及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(2):296-308.
GUO Jiaqi, LIU Xiliang, QIAO Chunsheng. Experimental study of mechanical properties and energy mechanism of karst limestone under natural and saturated states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(2):296-308.

引用本文: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.

(上接第 35 页)

[10] VARFOLOMEEV I, YAKIMCHUK I, SAFONOV I. An application of deep neural networks for segmentation of microtomographic images of rock samples[J]. Computers, 2019,8(4):72.

[11] SHRIVASTAVA S, DEB D, BHATTACHARJEE S. Prediction of particle size distribution curves of dump materials using convolutional neural networks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(1):471-479.

[12] 张宗华,刘巍,刘国栋,等. 三维视觉测量技术及应用进展[J]. 中国图象图形学报, 2021,26(6):1483-1502.
ZHANG Zonghua, LIU Wei, LIU Guodong, et al. Overview of the development and application of 3D vision measurement technology[J]. Journal of Image and Graphics, 2021,26(6):1483-1502.

[13] 郑太雄,黄帅,李永福,等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J]. 自动化学报, 2020,46(4):631-652.
ZHENG Taixiong, HUANG Shuai, LI Yongfu, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: A review[J]. Acta Automatica Sinica, 2020,46(4):631-652.

[14] 李小菁,黄振宇,凌珊. 基于光栅结构光双目视觉的动态三维测量方法研究[J]. 中国测试, 2018,44(9):35-38.
LI Xiaojing, HUANG Zhenyu, LING Shan. Dynamic 3D measurement method based on raster binocular stereo vision sensor[J]. China Measurement & Testing Technology, 2018,44(9):35-38.

[15] 吴琼,刘宝龙,王科,等. 双目立体视觉技术的实现及其进展[J]. 中国新通信, 2020,22(2):166.
WU Qiong, LIU Baolong, WANG Ke, et al. Realization and progress of binocular stereo vision technology[J]. China New Telecommunications, 2020,22(2):166.

[16] 魏振忠,冯广堃,周丹雅,等. 位姿视觉测量方法及应用综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023,60(3):134-166.
WEI Zhenzhong, FENG Guangkun, ZHOU Danya, et al. A review of position and orientation visual measurement methods and applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023,60(3):134-166.

[17] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. Youonly look once: unified, real-time object detection[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, 2016:779-788.

引用本文:黄磊,陶明,刘玉龙,等. 露天矿爆破块度动态识别模型研究与应用[J]. *矿冶工程*, 2026,46(2):28-35.
HUANG Lei, TAO Ming, LIU Yulong, et al. Research and application of dynamic recognition model for blast fragmentation in open-pit mines[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):28-35.