岩土力学

双轴压缩下含闭合多裂隙类岩石破坏特征及分形研究

刘剑航，王桂尧，郑 涛，蔡 林

（长沙理工大学 土木工程学院，长沙 410114）

摘 要：为分析不同侧向围压条件下闭合多裂隙对类岩石试件力学行为、变形特征及破坏模式的影响，采用高强度石膏并通过预埋抽条法制作含闭合多裂隙的类岩石试件，对其开展双轴压缩试验，引入盒维数法计算裂纹分形维数，定量表征试件的损伤破裂程度，并探究抗压强度与裂纹分形维数的关系。结果表明：中低围压时，试件的起裂应力、抗压强度、弹性模量和峰值应变随裂隙倾角的增大均先减小后增大，在裂隙倾角为 45°时最小。高围压时，试件的抗压强度、弹性模量和峰值应变出现下降趋势；在不同的围压和裂隙形式下，试件破坏模式主要包括拉伸破坏、剪切破坏、拉剪复合破坏和压溃破坏；裂纹分形维数随着裂隙倾角的增大先增大后减小，在裂隙倾角为 45°时最大。裂纹分形维数随侧向围压的增大逐渐减小，试件的抗压强度和裂纹分形维数近似服从负相关关系。研究结果不仅丰富了多裂隙岩石理论体系，还为隧道和边坡支护等工程问题提供了参考。

关键词：双轴压缩；岩体强度；岩体变形；破坏模式；分形维数

中图分类号：TU458 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-8249（2026）05-0056-08

DOI：10. 19860/j. cnki. issn1005-8249. 2026. 05. 009

Failure Characteristics and Fractal Study of Rock with Multiple Fractures under Biaxial Compression

LIU Jianhang, WANG Guiyao, ZHENG Tao, CAI Lin

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To analyze the influence of closed multi-cracks on the mechanical behavior, deformation characteristics and failure mode of rock-like specimens under different lateral confining pressures, high-strength gypsum was used and rock-like specimens with closed multi-cracks were fabricated by the pre-installed strip method. Biaxial compression tests were conducted on these specimens. The box dimension method was introduced to calculate the fractal dimension of cracks, and the degree of damage and fracture of the specimens was quantitatively characterized. The relationship between compressive strength and the fractal dimension of cracks was also explored. The research results show that under medium and low confining pressure conditions, the initiation stress, compressive strength, elastic modulus and peak strain of the specimens all decrease first and then increase with the increase of the fracture inclination Angle, and are the smallest when the fracture inclination Angle is 45°. Under the condition of high confining pressure, the compressive strength, elastic modulus and peak strain of the specimens

作者简介：刘剑航（2000—），男，硕士研究生，研究方向：岩土工程。

通信作者：王桂尧（1963—），男，博士，教授，研究方向：岩土工程。

收稿日期：2025-04-09

showed a downward trend. Under different confining pressures and fracture forms, the failure modes of specimens mainly include tensile failure, shear failure, combined tensile－shear failure and crushing failure. The fractal dimension of the crack first increases and then decreases with the increase of the crack inclination Angle, and it is the largest when the crack inclination Angle is 45°. The crack fractal dimension gradually decreases with the increase of lateral confining pressure, and the compressive strength of the specimen and the crack fractal dimension approximately follow a negative correlation. The research results not only enrich the theoretical system of multi-fracture rocks, but also provide references for engineering problems such as tunnel and slope support.

Key words: biaxial compression; rock mass strength; rock mass deformation; failure mode; fractal dimension

0　引言

在隧道挖掘和边坡开挖等工程活动中，岩体通常由三向应力状态向二向应力状态转变，荷载变化会引发岩体内部裂隙的起裂、扩展和贯通，最终导致岩体破坏，给工程安全带来潜在风险。因此，研究含闭合多裂隙岩体在双轴压缩下的力学行为、变形特征及破坏模式，对于工程应用具有重要的参考价值。

已有众多学者对裂隙岩体进行了一系列研究。针对单裂隙岩体，赵程等[1] 研究了类岩石材料在单轴压缩下的裂纹扩展，发现裂纹扩展的控制应力受到裂纹倾角的影响；王春萍等[2] 研究了单裂隙花岗岩单轴压缩下的力学特性，结果表明抗压强度、损伤应力和弹性模量随着裂隙倾角的增大而下降；赵娜等[3] 通过单轴压缩试验结合声发射技术，观测了单裂隙岩体内部裂纹的演化过程；刘涛影等[4] 利用颗粒流软件模拟了含不同倾角裂隙岩石的单轴压缩试验，发现裂隙倾角为 30°时试样的强度和微裂纹数目最小；李修磊等[5] 对含不同裂隙倾角的花岗岩试样开展了单轴压缩试验，发现岩石的强度、起裂应力和峰值应变随裂隙倾角的增大而增大。在双裂隙岩体研究方面，孙冰等[6] 通过单轴压缩试验研究了裂隙倾角和岩桥长度等参数对试件强度和破坏形式的影响；杨平[7] 对预制双裂隙混凝土板试件进行了双轴压缩试验，发现了 7 种裂纹贯通模式；田文岭等[8] 利用 PFC 2D 模拟了共面双裂隙砂岩在不同围压下的破裂过程，结果表明，随着裂隙倾角的增加，峰值强度呈现总体上升趋势；肖桃李等[9] 对含共面双裂隙岩样开展了单轴压缩试验，发现岩桥贯通模式受裂隙倾角和结构面控制。在多裂隙岩体研究方面，易婷等[10] 研究了裂隙倾角和数量对低强度岩体在单轴压缩下的强度和变形影响；刘杰等[11] 通过 PFC 2D 对花岗岩开展单轴压缩试验，研究了 3 种平面布置下裂隙倾角对岩体破坏的影响；陈少辉等[12] 利用 PFC 2D 对含多条有序裂隙岩石开展了单轴压缩试验，发现破坏模式以拉伸破坏和剪切破坏为主；苏海健等[13] 研究了含平行裂隙群类岩石试样在单轴压缩下的强度和变形规律；张科等[14-15] 利用 RFPA 2D 研究了含孔多裂隙岩石试件单轴压缩下的破裂及分形特征。

目前，关于裂隙岩体在单轴压缩下的研究较为丰富，且集中于贯通单裂隙和双裂隙岩体的破坏研究，而缺少对闭合多裂隙岩体在双轴压缩下的破坏研究。因此，针对当前裂隙岩体研究的不足之处，对闭合多裂隙岩体在不同侧向围压条件下的破坏特征展开研究，并通过计算裂纹分形维数来定量表征多裂隙岩体的破裂程度，以及探讨分形维数与多裂隙岩体强度的相关性。

1　试验方案

1.1　试件制备

选用高强度石膏作为类岩石材料制备试件，材料质量比例石膏：水：缓凝剂为 1：0.425：0.000 8。在经过充分搅拌后，浇筑到可拆卸的钢模具中，模具尺寸为 160 mm×100 mm×30 mm。浇筑完成后，在常温下静置 24 h 以完成拆模，随后放入温度为 45°的恒温箱中干燥 48 h，试件的密度稳定不变后，取出打磨平整。所得试件具有强度高、脆性和剪胀性等岩石特性，完整试件的物理力学参数见表 1。

岩土力学

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

材料	干燥密度/（g/cm^3）	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/（°）
石膏	1.51	31.09	2.04	8.06	0.17	6.15	42.23

1.2 闭合裂隙空间布置及预制方法

预制裂隙的空间布置采用两种排列方式，一种为均匀的棋盘形排列方式，为Ⅰ型试件，另二种为交错的梅花形排列方式，为Ⅱ型试件。在这两种排列方式下，裂隙长度 L 为 12 mm，中心距 h 为 15 mm，倾角 α 分别为 30°、45°、60°和 70°。裂隙的空间布置及几何参数如图 1 所示。试验采用预埋抽条法预制闭合裂隙。由于 PET 薄膜表面光滑且不易变形，选择厚度为 0.1 mm 的 PET 薄膜制作长条，并将其固定在模具上下盖板的预定位置。在试件浇筑前，测定石膏的初凝时间。浇筑完成后，待石膏即将初凝时，将 PET 薄膜抽出，石膏裂隙面在后续的凝固和发热膨胀作用下进行一定程度的愈合和闭合，从而形成预制的闭合裂隙。对含不同倾角的闭合单裂隙试件进行单轴压缩试验，根据库伦强度理论对闭合裂隙面的黏聚力和内摩擦角进行拟合，结果分别为 3.15 MPa 和 7.41°。

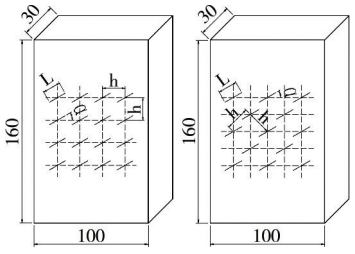


图 1 裂隙的空间布置及几何参数

Fig. 1 Spatial layout and geometric parameters of fractures

1.3 试验装置

试验装置由加载系统和观测系统两部分组成。轴向加载系统采用电液伺服万能试验机。观测系统采用 Basler 工业相机，可在加载过程中进行高速拍摄，详细记录闭合裂隙的起裂、扩展和贯通过程，试验装置如图 2 所示。对试件施加初始侧向围压，分别为 0.05、0.5、0.75 MPa，随后在轴向上采用荷载控制的方式进行加载，加载速率设定为 50 N/s，直至试件发生破坏。为减少试件在加载过程中的摩擦和端部效应，在试验前试件的四周垫上四氟乙烯薄膜，有助于确保试件受力均匀，试验数据准确。

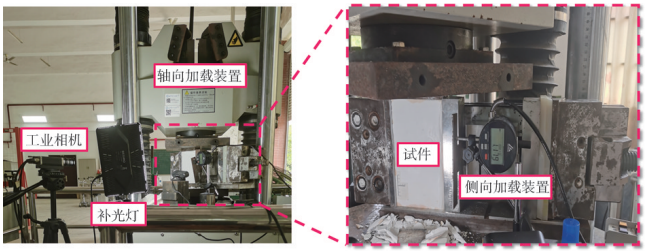


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Test device diagram

2 试验结果与分析

2.1 力学特性

含闭合多裂隙试件双轴压缩下裂隙面的应力状态如图 3 所示，根据式（1）和式（2）可计算闭合裂隙面上的正应力 σ 和剪应力 τ。根据滑动裂纹模型理论，闭合裂隙面上的有效剪应力 τ_e 驱使着裂隙面产生相对滑动，促进了裂隙尖端微裂纹的产生，有效剪应力计算公式为式（3）。

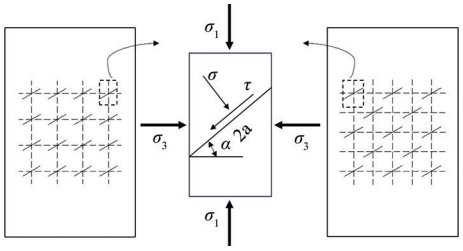


图 3 双轴压缩下裂隙面应力状态

Fig. 3 Stress state of fracture surface under biaxial compression

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos 2\alpha \tag{1}$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin 2\alpha \tag{2}$$

$$\tau_e = \tau - \mu\sigma \tag{3}$$

式中：μ 为闭合裂隙面摩擦因素，且 μ 与裂隙面内摩擦角 φ 的关系为 $\mu = \tan\varphi$。

将式（1）和式（2）代入式（3），得到有效剪应力 τ_e 的表达式（4）。为求得当裂隙倾角为何值时，有效剪应力 τ_e 取极值，对式（4）裂隙倾角 α 求导

并令其为 0，得到裂隙倾角 α 的表达式（5）。

$$\tau_e = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}(\sin 2\alpha - \mu\cos 2\alpha) - \mu\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\arctan\mu \tag{5}$$

试验测得的裂隙面内摩擦角 φ 为 7.41°，已知 $\mu=\tan\varphi$，计算可知当 $\alpha=48.71°$时有效剪应力 τ_e 取极值，裂隙倾角 $\alpha=48.71°$为优势破裂倾角。

为了分析有效剪应力 τ_e 与侧向围压 σ_3 的关系，对式（4）进行变形得：

$$\tau_e = -\frac{(\sin 2\alpha - \mu\cos 2\alpha + \mu)}{2}\sigma_3 + \left(\frac{\sigma_1(1-\mu)(\sin 2\alpha - \mu\cos 2\alpha)}{2}\right) \tag{6}$$

当裂隙倾角 α 在 0～90°内，（sin 2α−μcos 2α+μ）>0，由此可知，有效剪应力 τ_e 与侧向围压 σ_3 成负相关，即随着侧向围压 σ_3 的增加，有效剪应力 τ_e 会减小，有效抑制裂纹的起裂。

双轴压缩下，含闭合多裂隙试件的起裂应力与裂隙倾角的关系如图 4 所示。裂隙呈Ⅰ型和Ⅱ型排列方式下，闭合多裂隙试件的起裂应力表现出随着裂隙倾角的增加先减小后增大的趋势，当裂隙倾角为 45°时，试件的起裂应力达到最低点，与理论预测的优势破裂倾角 48.71°接近。随着侧向围压的增加，含不同裂隙倾角试件的起裂应力普遍增加。

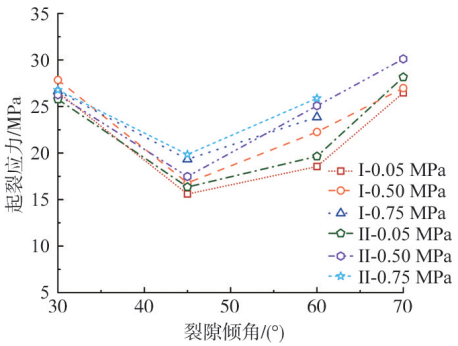


图 4　起裂应力随裂隙倾角变化图

Fig. 4　Diagram of crack initiation stress variation with crack angle

含闭合多裂隙试件的轴向抗压强度与裂隙倾角的关系如图 5 所示。裂隙呈Ⅰ型和Ⅱ型排列方式下，闭合多裂隙试件的轴向抗压强度随着裂隙倾角的增加先减小后增大，当裂隙倾角为 45°时，试件的抗压强度达到最低点，裂隙倾角接近 30°或 70°时，闭合多裂隙对试件轴向抗压强度的影响较小。随着侧向围压的增加，裂隙倾角和裂隙排列方式相同时，试件的轴向抗压强度表现出先增大后减小的趋势。当侧向围压在 0.05～0.5 MPa 范围内时，试件的抗压强度随侧向围压的增大而增大，侧向围压的增加有效抑制了裂纹的起裂，较好地保护了试件的结构完整性，从而提升了试件的抗压强度。当初始侧向围压从 0.5 MPa 增至 0.75 MPa 时，试件的抗压强度出现了下降趋势。较大的侧向围压显著抑制了裂纹的萌生和扩展，而试件在加载过程中积累了大量能量，导致在裂纹扩展和贯通之前发生了表面剥落和局部压溃。其中，含裂隙倾角为 70°的试件在初始侧向围压为 0.75 MPa 下的加载过程中未出现裂纹的萌生，最终因局部压溃而破坏。随着侧向围压的增大，试件的轴向抗压强度与裂隙倾角关系曲线逐渐变平缓，侧向围压的增加减小了裂隙倾角对试件力学性能带来的劣化作用。

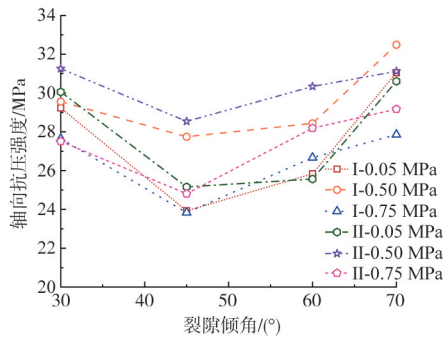


图 5　抗压强度随裂隙倾角变化图

Fig. 5　Diagram of compressive strength variation with crack angle

2.2　变形特征

双轴压缩下，含闭合多裂隙试件的弹性模量和轴向峰值应变与裂隙倾角的关系分别如图 6、7 所示。当侧向围压较低时，裂隙倾角对多裂隙试件的弹性模量和轴向峰值应变有着显著的影响，随着裂隙倾角的增大，试件的弹性模量和轴向峰值应变均表现出先减小后增大的趋势。在裂隙倾角为 45°时，试件的弹性模量和轴向峰值应变达到最小值，表明此时试件抵抗变形的能力最差。当初始侧向围压在 0.05～0.5 MPa范围内，随着侧向围压的增大，试件

岩土力学

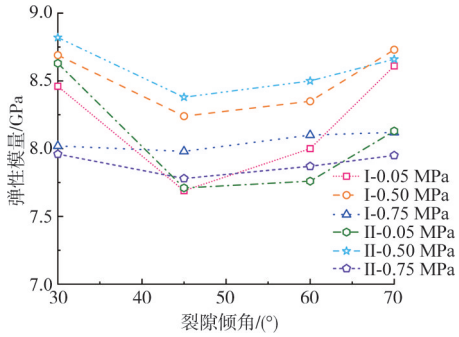


图 6 弹性模量与裂隙倾角关系图

Fig. 6 Relationship between elastic modulus and crack inclination

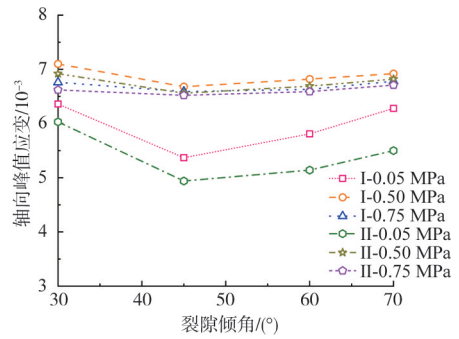


图 7 轴向峰值应变与裂隙倾角关系图

Fig. 7 Relationship between axial peak strain and crack inclination

的弹性模量和轴向峰值应变均显著提高。这是因为侧向围压的增加有助于抑制裂纹的扩展，提升了试件的整体刚度和抗变形能力。然而，当初始侧向围压进一步增加至 0.75 MPa 时，试件的轴向峰值应变略有减小，而弹性模量则明显下降。这一现象与试件在高围压下破坏模式的变化密切相关。在达到一定变形限度后，试件提前发生局部压溃，表现为弹性模量的下降。

2.3 裂纹扩展路径及破坏模式

裂纹提取处理流程如图 8 所示，在轴向加载过程中，随着荷载的增加，闭合裂隙处的应力逐渐增大，随后有细小的粉末被挤出，并形成初始裂纹。当闭合裂隙面处的有效剪应力增大一定程度后，其两侧产生相对滑移，端部开始起裂。翼形裂纹通常最先出现，并以曲线形式稳定扩展，其表面平滑，无剪切摩擦痕迹，偶尔可见微小弯折，属于拉伸型裂纹。次生裂纹出现较晚，其表面粗糙，呈波浪状或锯齿状，具有明显的剪切摩擦痕迹，属于剪切型裂纹。次生裂纹分为次生共面裂纹和次生倾斜裂纹，前者与预制裂隙角度一致，后者与预制裂隙成一定角度，方向与翼形裂纹相反。

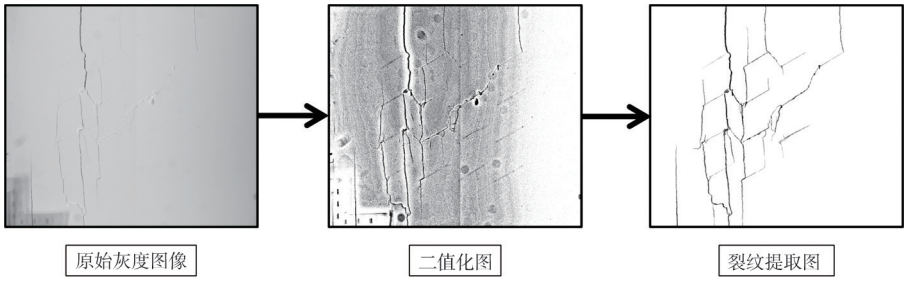
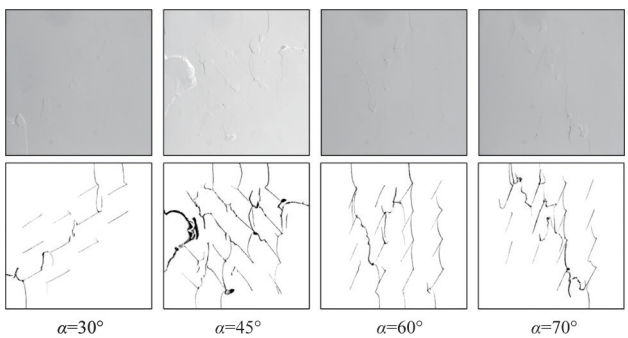


图 8 裂纹提取流程图

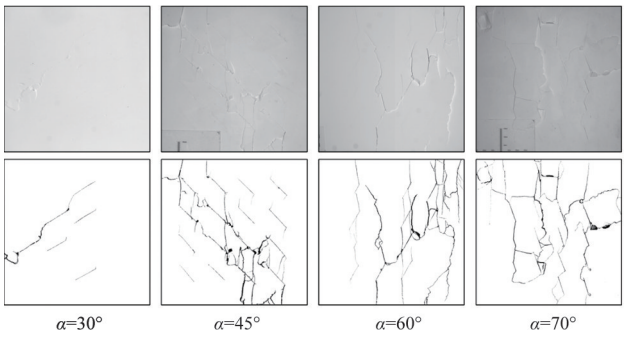
Fig. 8 Crack extraction flow chart

由图 9（a）~（b）可知，当裂隙的倾角为 30°且侧向围压较小时，裂纹的扩展路径主要以试件的纵向和斜向对角扩展为主，预制裂隙通过翼形裂纹和次生裂纹的组合连接，表现为拉剪复合破坏。在初始侧向围压为 0.5 MPa 下，预制裂隙仅通过次生共面裂纹形成一条斜向的剪切破裂带，最终表现为剪切破坏。当裂隙的倾角为 45°时，预制裂隙端部裂纹起裂的数量相较于其他角度时更多，裂纹的扩展路径也更加丰富。当侧向围压较小时，预制裂隙在纵向、横向和斜向分别通过翼形裂纹、次生倾斜裂纹和次生共面裂纹连接，形成裂纹网格，最终表现为拉剪复合破坏。在侧向围压为 0.5 MPa 下，试件的破坏模式依然表现为拉剪复合破坏，但随着侧向围压的增加，翼形裂纹的数量相对减少，有向剪切破坏转变的趋势。当裂隙的倾角为 60°和 70°时，在侧向围压为 0.05、0.5 MPa 下，裂纹的扩展路径均为沿纵向扩展，预制裂隙端部的翼形裂纹随着轴向荷载的增加向最大主应力方向不断扩展，形成多条纵向的拉伸破裂带，最终表现为拉伸破坏，随着侧向围压的继续增大，试件的表面出现剥落现象。

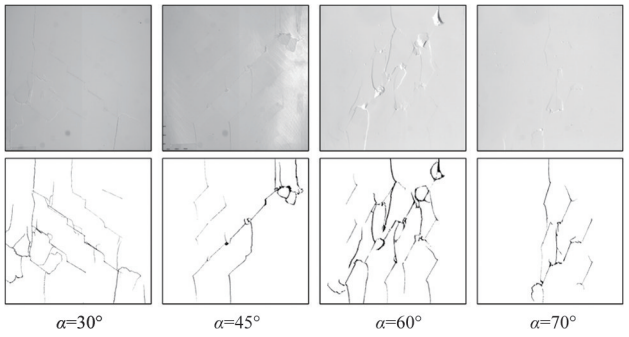
由图 9（c）~（d）可知，当裂隙的倾角为 30°，且初始侧向围压为 0.05 MPa 时，裂纹主要沿试件的纵向和斜向对角扩展，试件的左侧形成了一条由翼形裂纹组成的拉伸破裂带，同时预制裂隙与翼形裂纹连接形成了三条斜向的剪切破裂带，表现为拉剪复合破坏。在初始侧向围压为 0.5 MPa 下，预制裂隙和翼形裂纹共同构成了沿斜向对角扩展的路径，表现为三条阶梯状的剪切破裂带，呈现剪切破坏模式。当裂隙的倾角为 45°时，在初始侧向围压为 0.05 MPa 下，裂纹的扩展有两条路径，一条由预制裂隙和次生共面裂纹组成的斜向扩展路径，另一条为预制裂隙、次生倾斜裂纹和翼形裂纹三者组成的阶梯状扩展路径，最终的破坏模式为拉剪复合破坏。当初始侧向围压为 0.5 MPa 时，翼形裂纹的起裂和扩展受到显著的抑制作用，斜向排列的预制裂隙通过次生倾斜裂纹连接形成一条剪切破裂带，为剪切破坏模式。当裂隙的倾角为 60°时，在初始侧向围压为 0.05 MPa 下，预制裂隙通过翼形裂纹和次生裂纹形成复杂的扩展路径网络，总体表现为拉剪复合破坏。当初始侧向围压为 0.5 MPa 时，预制裂隙端部的裂纹主要为翼形裂纹和次生倾斜裂纹，而翼形裂纹的扩展受到抑制，最终预制裂隙和次生倾斜裂纹组成了一条斜向的扩展路径，表现为剪切破坏。当裂隙的倾角为 70°时，裂纹的数量显著减少，在初始侧向围压为 0.05 MPa 下，裂纹的扩展路径主要沿纵向和斜向扩展，分别形成了拉伸破裂带和剪切破裂带，表现为拉剪复合破坏。当初始侧向围压为 0.5 MPa 时，裂纹的起裂和扩展受到显著抑制，试件在上部发生压溃破坏。



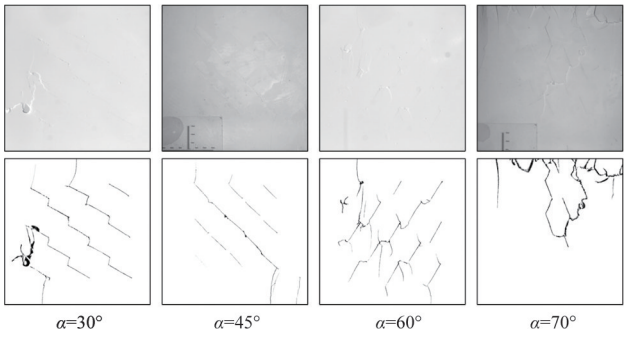
（a）初始侧向围压为 0.05 MPa 时 Ⅰ 型试件破坏图



（b）初始侧向围压为 0.50 MPa 时 Ⅰ 型试件破坏图



（c）初始侧向围压为 0.05 MPa 时 Ⅱ 型试件破坏图



（d）初始侧向围压为 0.50 MPa 时 Ⅱ 型试件破坏图

图 9　不同裂隙形式试件破坏图

Fig. 9　Failure diagram of specimen with different crack forms

3　分形定量分析

对闭合多裂隙试件在峰值强度下的裂纹进行提取并计算分形维数，结果如图 10 所示。在不同的裂隙排列方式和初始侧向围压下，裂纹分形维数均随着裂隙倾角的增大先增大后减小，在裂隙倾角为 45°时达到最大值，表明裂纹扩展最充分，试件破裂损伤程度最大。试件在加载时积累的能量通过裂纹扩展不断消耗，裂隙倾角为 45°时裂纹发育最充分，能量消耗最多，导致抗压强度最低。随着侧向围压的

岩土力学

增加，裂纹分形维数逐渐减小，侧向围压的增加抑制了裂纹的起裂和扩展，减小了试件的损伤破裂程度。当初始侧向围压为 0.75 MPa 时，因侧向围压过大，试件最终因表面剥落和压溃而破坏，试件的损伤破裂程度较低。对比Ⅰ型和Ⅱ型试件的裂纹分形维数发现，在相同的裂隙倾角和侧向围压下，总体上Ⅰ型试件比Ⅱ型试件的裂纹分形维数更大，说明Ⅰ型试件的裂纹发育更充分，导致的损伤破裂程度更大。

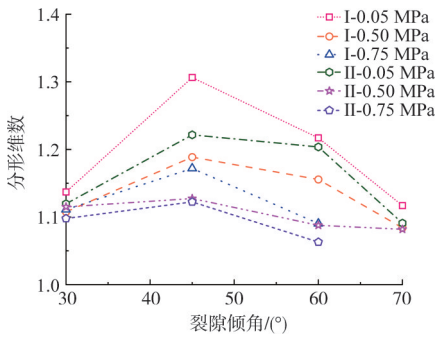


图 10 分形维数与裂隙倾角关系图

Fig. 10 Relationship between fractal dimension and crack inclination

为进一步探究轴向抗压强度与裂纹分形维数的关系，对两者进行线性拟合分析，结果如图 11 所示。可以发现轴向抗压强度与分形维数近似服从负相关关系，拟合公式为：

$$\sigma = -33.53D + 67.74 \quad (R^2 = 0.834) \qquad (7)$$

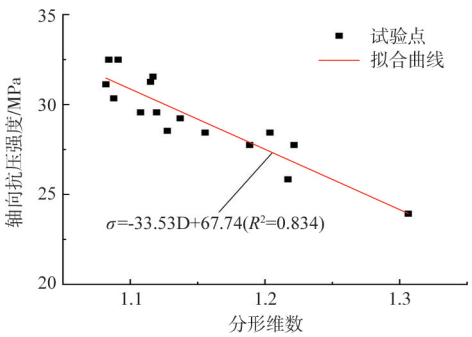


图 11 抗压强度与分形维数拟合图

Fig. 11 Fitting graph of compressive strength and fractal dimension

4 结论

对含闭合多裂隙类岩石试件开展双轴压缩试验，探究了不同侧向围压下，裂隙的倾角和排列方式对试件力学、变形及破坏模式的影响，并对试件破裂程度进行了定量表征，主要结论如下：

（1）对于裂隙形式为棋盘形均匀排列的Ⅰ型试件和梅花形交错排列的Ⅱ型试件，在中低围压条件下，其起裂应力、轴向抗压强度、弹性模量和轴向峰值应变随裂隙倾角的增大均呈现出先减小后增大的趋势，在裂隙倾角为 45°时达到最小值，与基于滑动裂纹模型理论计算的优势破裂角度 48.71°接近。随着围压的增加，各参数逐渐提高，围压的增加抑制了裂隙对试件强度和刚度的劣化作用。当围压过高时，试件的轴向抗压强度、弹性模量和轴向峰值应变出现下降趋势。

（2）在双轴压缩作用下，含不同裂隙形式的试件破坏模式主要包括拉伸破坏（中低围压：Ⅰ型试件，$\alpha=60°$和 70°）、剪切破坏（中围压：Ⅰ型试件，$\alpha=30°$和 45°；Ⅱ型试件，$\alpha=30°$、45°和 60°）、拉剪复合破坏（低围压：Ⅰ型试件，$\alpha=30°$和 45°；Ⅱ型试件，$\alpha=30°$、45°、60°和 70°）和压溃破坏（中围压：Ⅱ型试件，$\alpha=70°$；高围压）。侧向围压对裂隙均匀排列和交错排列方式下试件的破坏模式影响显著，当裂隙倾角较大时，裂隙均匀排列和交错排列方式下试件破坏模式出现了较大的差异。

（3）裂隙倾角、裂隙排列方式和侧向围压对试件的分形维数均有着较大的影响，随着裂隙倾角的增大，裂纹分形维数先增大后减小，在裂隙倾角为 45°时最大。随着侧向围压的增大，裂纹分形维数逐渐减小。在相同的裂隙倾角和侧向围压下，裂隙均匀排列方式下试件的裂纹分形维数普遍比交错排列方式下的大。对试件的轴向抗压强度和裂纹分形维数进行线性拟合发现，两者近似服从负相关关系。

参 考 文 献

[1] 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（增刊 2）：3626-3632.

[2] 王春萍，王璐，刘建锋，等. 单轴压缩条件下单裂隙花岗岩力学特性及破坏特征[J]. 西南交通大学学报，2024，59（2）：369-376，446.

[3] 赵娜，卫帅，王来贵，等. 含不同倾角单裂隙岩石单轴压缩破裂演化过程分析[J]. 实验力学，2024，39（4）：518-528.

[4] 刘涛影，樊江苏，彭亮亮. 不同裂隙倾角岩石强度及裂纹扩展分析[J]. 铁道工程学报，2025，42（1）：1-6，19.

[5] 李修磊，谢飞，陈臣，等. 基于声发射的张开型单裂隙岩石裂纹扩展行为特性研究[J]. 水文地质工程地质，2024，51（3）：90-101.

[6] 孙冰，邹春海，曾晟，等. 不同裂隙形式类岩体单轴压缩破坏特征研究[J]. 防灾减灾工程学报，2018，38（6）：959-966.
[7] 杨平. 双轴压缩下混凝土预制双裂纹扩展与应力应变关系研究[J]. 硅酸盐通报，2018，37（2）：737-743，748.
[8] 田文岭，杨圣奇，黄彦华. 不同围压下共面双裂隙脆性砂岩裂纹演化特性颗粒流模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报，2017，34（6）：1207-1215.
[9] 肖桃李，许可，袁浩，等. 含共面双裂隙复合岩石的力学特性与破坏规律研究[J]. 矿业研究与开发，2024，44（1）：94-103.
[10] 易婷，唐建新，王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响[J]. 地下空间与工程学报，2021，17（1）：98-106，134.
[11] 刘杰，杨新龙，马建勇，等. 断续三裂隙花岗岩变形破坏模式单轴压缩颗粒流分析[J]. 公路，2018，63（12）：258-263.
[12] 陈少辉，李尚辉，王锋. 单压下含多条有序裂隙岩石破裂规律分析[J]. 产业创新研究，2021（19）：76-78.
[13] 苏海健，靖洪文，赵洪辉，等. 平行裂隙群岩体强度与破裂特征的试验研究[J]. 工程力学，2015，32（5）：192-197，207.
[14] 张科，刘享华，李昆，等. 含孔多裂隙岩石力学特性与破裂分形维数相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37（12）：2785-2794.
[15] 汪学清，赵云猛，冯莹，等. 含孔洞多裂隙复合岩层裂纹扩展和分形特性模拟研究[J]. 煤矿安全，2024，55（1）：42-49.

（上接第 27 页）

[10] 王自柯，付春豪，赵军. 清水/海水环境下粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土抗冻性试验[J]. 混凝土，2025（4）：28-33.
[11] 原元，赵人达，占玉林，等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的抗碳化性能[J]. 西南交通大学学报，2021，56（6）：1275-1282.
[12] 崔钊玮，杨靖韬，刘荣桂，等. 复掺白云石粉与粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土，2022（12）：96-99，109.
[13] 林芳，陈登. 白云石粉改性粉煤灰基地聚合物的渗碱研究[J]. 非金属矿，2023，46（4）：83-87.
[14] 黄梓谕，丁之尧，曹丹，等. 基于响应面法的多固废基地聚合物配比优化及其表征[J]. 硅酸盐通报，2025，44（2）：569-578.
[15] 于子豪，张彤炜，张彤文，等. 凝灰岩石粉制备胶凝材料及激发剂模数对抗压强度的影响[J]. 工程科学学报，2022，44（12）：2100-2110.

（上接第 49 页）

[17] 刘维正，葛孟源，万家乐，等. 考虑空间效应的桩锚支护深大基坑变形特性及影响因素数值分析[J]. 铁道科学与工程学报，2021，18（12）：3188-3200.
[18] 蒋进，周正华，董青，等. 土体本构模型及简化模型对基坑开挖变形数值分析结果的影响[J]. 震灾防御技术，2020，15（2）：285-292.
[19] 王丹，王国富，路林海，等. 黄河流域冲积层本构模型的深基坑适用性研究[J]. 土木与环境工程学报（中英文），2019，41（1）：36-47.