

# 侧向刚度与损伤作用下岩体强度及裂纹扩展规律研究

蔡林, 王桂尧, 郑涛, 刘剑航

(长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114)

**摘要:** 为系统揭示侧向刚度对岩体强度劣化及裂纹扩展机制的影响规律, 引入初始损伤系数  $\gamma$  开展含预制裂纹系统试样的双轴压缩试验。试验结果表明: 侧向约束刚度对裂纹诱导的强度折损具有显著抑制作用, 且抑制效应随侧向约束刚度和初始损伤系数 (0.07~0.64) 的增大呈非线性增长趋势; 侧向约束刚度可以提升岩体起裂应力阈值, 促进次生裂纹萌生, 但翼型裂纹抑制效应受裂纹倾角调控; 侧向约束刚度可约束岩体变形, 驱动岩体破坏性质由脆性破坏向塑性破坏转变; 侧向约束刚度促使试样破坏模式由弯折压溃破坏向直接压溃破坏转变。探明了侧向刚度对岩体力学行为及裂纹扩展行为的作用规律, 提出了侧向约束刚度—裂纹倾角—初始损伤程度耦合模型, 为隧道、矿山等支护结构变刚度设计提供了理论支撑, 推动支护结构向动态支护发展。

**关键词:** 侧向刚度; 损伤岩体; 岩体强度; 双轴压缩; 裂纹扩展

**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 01-0156-13

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.027

## Research on Rock Mass Strength and Crack Propagation Law under the Action of Lateral Stiffness and Damage

CAI Lin, WANG Guiyao, ZHENG Tao, LIU Jianhang

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

**Abstract:** As significant support forms in engineering, flexible and rigid supports are widely employed, and their mechanical effects are closely associated with the stiffness characteristics of the support structure. To systematically disclose the influence rules of lateral stiffness on the strength deterioration and crack propagation mechanism of the rock mass, the initial damage coefficient ( $\gamma$ ) was introduced to represent the initial damage degree of the prefabricated crack system specimens. Based on the self-developed test device with adjustable lateral constraint stiffness, biaxial compression tests on the specimens with prefabricated crack systems were conducted. The test results indicate that: The total lateral stiffness has a remarkable inhibitory effect on the strength loss induced by cracks, and the inhibitory effect shows a nonlinear growth trend with the increase of lateral constraint stiffness and the initial damage coefficient (0.07 - 0.64); The lateral constraint stiffness can enhance the crack initiation stress threshold of the rock mass and facilitate the initiation of secondary cracks, but the inhibitory effect on the wing-shaped cracks is regulated by the crack inclination angle; The lateral constraint stiffness can constrain the deformation of the rock mass and drive the failure nature of the rock mass to transform from brittle failure to plastic failure; The lateral constraint stiffness prompts the failure mode of the specimens to change from bending and crushing failure to direct crushing failure. The

作者简介: 蔡林 (2000—), 男, 硕士, 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: 岩土工程与边坡工程。

收稿日期: 2025-03-29

research reveals the evolution law of the rock mass strength and the transformation mechanism of the failure mode under the coupling effect of lateral constraint stiffness and initial damage, and establishes the mapping relationship among support stiffness, initial damage coefficient, and failure mode, providing a theoretical basis for the design of support structures and the assessment of surrounding rock stability.

**Key words:** lateral stiffness; damaged rock mass; rock mass strength; biaxial compression; crack propagation

## 0 引言

近年来,我国基础设施建设呈现迅猛发展态势,公路铁路网络持续优化,隧道工程数量显著增长<sup>[1]</sup>。隧道作为重大基础设施的重要部位,其结构安全可靠关乎人民的生命与财产安全,至关重要不容小觑。同时隧道工程规模持续扩大,地质环境日趋复杂,隧道工程面临多重技术挑战,包括但不限于活动断裂穿越、围岩稳定性控制以及高烈度地震作用下的动力响应等,对支护结构承载能力与抗震可靠性提出了更高要求。而支护结构的支护效果与刚度显著相关<sup>[2]</sup>。

Liu 等<sup>[3]</sup>建议增加支护结构刚度来改善巷道顶板稳定性;余伟健等<sup>[4]</sup>通过提高支护系统的初期支护刚度与强度,阻止巷道裂隙围岩体的拉剪破坏形成松动变形;聂子云等<sup>[5]</sup>运用大刚度支护体系控制隧道围岩变形;然而,Xue 等<sup>[6]</sup>通过试验揭示,杆件内力与支座的侧向刚度呈对数关系;冯冀蒙等<sup>[7]</sup>发现提升二次衬砌的刚度,会导致衬砌压力荷载增大,进一步增加结构开裂风险。以上研究表明刚度增加存在双重效应,在控制围岩变形的同时,由于内力分配失衡诱发内力超限破坏,尤其是在围岩大变形工况下更为显著。

张彪等<sup>[8]</sup>鉴于采用极大刚度被动式强支护的兰渝线毛羽山隧道依旧发生大变形,提出恒阻挤压滑移让压锚杆的柔性支护方式;Feng 等<sup>[9]</sup>发现衬砌越柔性、临时支撑越刚性,结构的耐久性表现越好,同时 Liu 等<sup>[10]</sup>发现小刚度支护结构有利于围岩变形的释放;申玉生等<sup>[11]</sup>提出局部采用小刚度诱导变形,减小地震对隧道衬砌损伤范围;闫高明等<sup>[12]</sup>、禹海涛等<sup>[13]</sup>运用这一理论开展跨断层隧道支护结构的设计;王志龙等<sup>[14]</sup>提出相同刚度支护在不同地质条件变形控制效率存在差异。

岩体裂纹扩展机制研究已取得显著进展,其核心关注点集中于裂纹初始形态影响<sup>[15]</sup>、形态演化差

异<sup>[16]</sup>、材料非均质性<sup>[17]</sup>及应力状态耦合效应<sup>[18]</sup>等,但既有研究忽略了侧向刚度对岩体强度演化及裂纹扩展机制的影响。

针对现有研究存在的问题,采用自制被动式侧向约束装置和不同刚度的垫块来模拟不同侧向刚度,预制多种损伤程度的试样,结合高分辨图像技术捕捉裂纹开展过程进行双轴压缩试验。分析侧向刚度对不同裂纹倾角、损伤系数下试样的峰值应力,评估侧向刚度对损伤岩体强度的提升作用;观察不同侧向刚度下预制裂纹系统试样的裂纹演化及轴向应力的响应,揭示侧向刚度与初始损伤联合作用下的裂纹扩展规律;总结不同侧向刚度、损伤情况下的破坏模式,归纳破坏规律随侧向刚度及损伤情况的变化规律揭示侧向刚度与初始损伤的联合作用机制,构建侧向刚度-初始损伤-破坏模式多参数映射模型,为差异化损伤围岩的刚度适配支护设计提供理论依据。

## 1 双轴压缩试验

### 1.1 试样制作

采用普通石膏与高流动性石膏按 4:6 混合,添加水、缓凝剂通过浇筑成型制备试件(148 mm × 100 mm × 20 mm),水灰比 0.425,缓凝剂掺量 0.02%,材料基本力学参数见表 1。在模具中预埋 0.02 mm 厚聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜预制裂纹系统。预制裂纹系统设置裂纹倾角  $\alpha$  分别为 30°、45°、60°、70°;裂纹长度  $2a$  分别为 6、9、12 mm;裂纹中心距  $d$  为 15、30、45 mm;通过正交组合构建四级损伤梯度(损伤系数  $\gamma \in [0.07, 0.64]$ )。以矩阵坐标为裂纹编号,横向从左至右为 1~4 列(间距  $d$ ),纵向从上至下为 1~4 行(间距  $d$ )。典型裂纹布置如图 1 所示,其中裂纹(2,3)表示第 2 行第 3 列交叉点处的预制裂纹。为更简便描述试样初始损伤程度,引入参数初始损伤系数  $\gamma$ 。

# 岩土力学

$$\gamma = (2a/d)^2 \quad (1)$$

表 1 材料基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of materials

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	单轴抗压 强度/MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	极限抗拉 强度/MPa	弹性模量 /MPa	泊松比
1.51	28.20	6.15	42.23	2.04	6.10	0.17

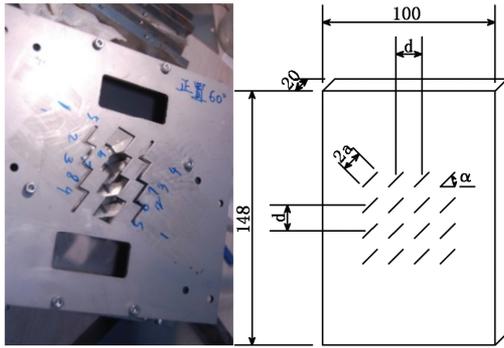


图 1 预制裂纹试样示意图及模具

Fig. 1 Schematic diagram of prefabricated crack specimen and mold

## 1.2 试验装置与试验方法

试验采用微机控制电液伺服万能试验机配合自主研发的被动式约束装置提供侧向约束，如图 2 所示。侧向约束刚度定义为装置对试样横向变形的约束能力，其可通过更换不同刚度的垫块调节，亦可基于螺栓预紧力主动控制约束力幅值。该被动式约束装置通过刚性框架与试样接触面间的机械联结构建侧向约束条件，模拟实际工程中支护结构与围岩的相互作用机制。相较于主动加载系统，被动约束模式更贴近支护结构受围岩变形触发被动响应的真实工况，精准表征支护刚度对岩体强度弱化及裂纹扩展路径的调控效应。

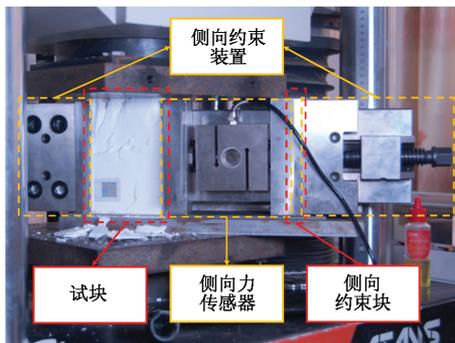


图 2 试验装置

Fig. 2 Experimental setup

试验采用可变刚度约束：刚质约束块（弹性模量 200.00 GPa，对应高侧向约束刚度条件，简称高刚度，代号 S）与橡胶约束块（弹性模量 19.35 MPa，对

应低侧向约束刚度条件，简称低刚度，代号 R），通过材料本征刚度差异构建刚度对比试验组，同时设置单轴对照组（代号为 U）。试验中设定初始围压为 0.5 MPa，模拟浅层岩体原位应力状态。刚质约束块通过高弹性模量特性实现刚性边界效应，可有效抑制试样侧向应变；橡胶约束块则通过低弹性模量特性允许可控的侧向变形，构建柔性支护等效工况。

## 2 侧向刚度及初始损伤对岩体强度的影响研究

峰值应力增长率  $\eta_{in}$  定义为双轴压缩条件下不同侧向约束刚度试样峰值应力  $\sigma_{bcs}$  和单轴压缩条件峰值应力  $\sigma_{ucs}$  与单轴压缩条件峰值应力的相对增量百分比，反映侧向约束对强度的提升程度。

$$\eta_{in} = \frac{|\sigma_{bcs} - \sigma_{ucs}|}{\sigma_{ucs}} \times 100\% \quad (2)$$

### 2.1 侧向刚度及裂纹角度影响研究

在 0.5 MPa 初始围压条件下，侧向约束刚度对试样峰值应力的提升作用幅度受裂纹倾角调控，同时受侧向约束刚度影响，如图 3 所示。不同裂纹倾角试样在高刚度条件下峰值应力均较低刚度条件下更高，70° 裂纹倾角试样在两种刚度条件下的峰值应力接近。在 0.5 MPa 初始围压条件下，侧向约束刚度对预制裂纹系统试样的峰值应力增长率如图 4 所示。 $\eta_{in}$  在 30° 时取得最小值，在 70° 时取得最大值，在高刚度条件下 45° 试样与 70° 试样有接近的峰值应力增长率（差值仅为 0.03%）。

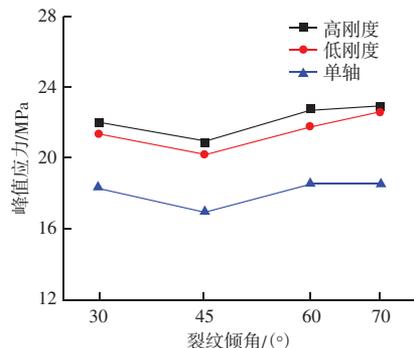


图 3 峰值应力  
Fig. 3 Peak stress

侧向约束刚度对试样峰值应力有提升作用，其作用效果与侧向约束刚度呈正相关，且受裂纹倾角调控。侧向约束刚度约束试样的侧向位移，抑制裂纹开展，延缓试样破坏。高刚度通过施加更加显著

的侧向位移约束，产生更大侧向约束力，从而显著提升试样峰值应力。

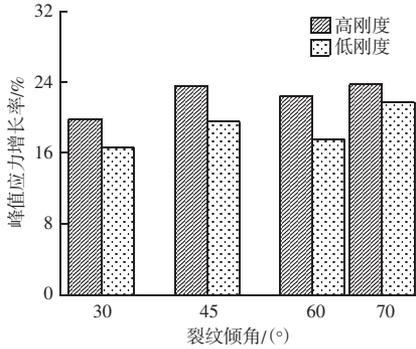


图 4 峰值应力增长率

Fig. 4 Peak stress growth rate

## 2.2 侧向刚度对裂纹的影响分析

由图 5 可知，试样峰值应力随初始损伤系数增长有所降低。由图 6 可知，高刚度侧向约束条件下的  $\eta_{in}$  高于低刚度下  $\eta_{in}$ ，同时 45° 试样的  $\eta_{in}$  较 30° 试样更高。在 45° 试样中， $\eta_{in}$  在  $\gamma=0.16$  与  $\gamma=0.64$  的差值，低刚度条件下为 0.43%，高刚度下为 1.41%，高刚度对预制裂纹系统试样的峰值应力提升效果更显著。

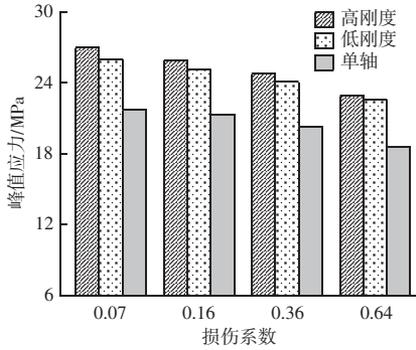


图 5 70° 预制裂纹系统试样峰值应力

Fig. 5 70° peak stress of the specimen in the prefabricated crack system

在  $\gamma=0.07$  时，其初始损伤对试样的峰值应力影响较小，试样峰值应力接近材料强度，降低了试样峰值应力对于侧向约束条件的敏感度。随着损伤系数的增长， $\eta_{in}$  表现出不同程度的提升。对于越容易破坏的试样， $\eta_{in}$  越高。被动式侧向约束在试样发生侧向变形并挤压约束装置时，会对试样施加作用力，随着  $\gamma$  逐渐增大，侧向约束对试样损伤的抑制效果更加显著。由于 45° 试样较其他裂纹倾角试样更加容易破坏，因此对其抑制损伤、峰值增长的作用

更显著。

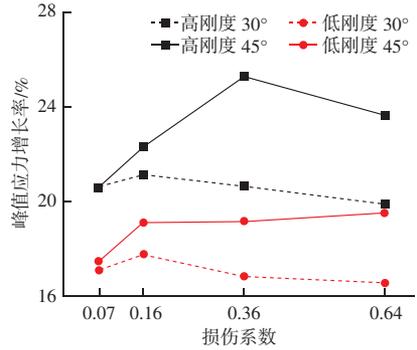


图 6 峰值应力增长率

Fig. 6 Peak stress growth rate

## 3 侧向刚度对裂纹扩展影响分析

### 3.1 侧向刚度对起裂应力影响研究

由图 7 可知，双轴压缩试验中，70° 试样在高刚度约束条件下，其破坏方式以端部压溃主导，裂纹从压溃处扩展，起裂应力随裂纹倾角变化趋势与峰值应力随倾角变化规律一致，呈现出以 45° 角为拐点，先减后增的趋势。

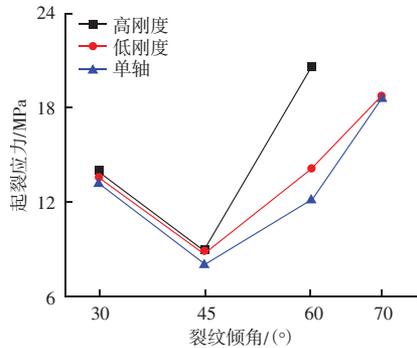


图 7  $\gamma=0.64$  试样起裂应力

Fig. 7  $\gamma=0.64$  specimen cracking stress

高刚度条件下，起裂应力随裂纹倾角变化呈现显著异化特征。具体表现为，倾角从 30° 增长到 45°，起裂应力呈下降趋势，倾角从 45° 增长到 60° 起裂应力显著提升，45° 为起裂应力最低点与低刚度下起裂应力持平，且高于单轴条件下起裂应力水平。

### 3.2 侧向刚度对裂纹率影响研究

基于裂纹形态特征与扩展原理将裂纹分为翼型裂纹与次数裂纹两种。采用图片处理技术提取裂纹，定义裂纹率  $\rho_c$  为图中黑色像素点占总像素点数量的百分比， $\rho_{cw}$  表示翼型裂纹像素点占比， $\rho_{cs}$  表示次生裂纹像素点占比，上述三个参数可在一定长度上表

## 岩土力学

征裂纹的面积率。由图 8 可知, 在  $30^\circ \sim 60^\circ$  范围内, 单轴条件下的翼型裂纹率最高, 在  $60^\circ$  时为 1.20%, 其他约束条件下翼型裂纹率高于次生裂纹率。高刚度条件下, 裂纹率以  $45^\circ$  为拐点先增后减, 其中翼型裂纹率与次生裂纹率差值逐步减小, 在  $60^\circ$  时差值为 0.01%, 待至  $70^\circ$  试样被直接压溃, 裂纹未开展。低刚度条件下,  $\rho_{cw}$  与  $\rho_{cs}$  差值在  $45^\circ$  最大为 0.31%,  $70^\circ$  试样次生裂纹率高于翼型裂纹率, 差值为 0.08%。

试样裂纹率与裂纹倾角呈现显著相关性, 在  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  时裂纹率较高, 在  $30^\circ$ 、 $70^\circ$  时裂纹率较低。侧向约束条件显著改变裂纹扩展模式, 在单轴条件下翼型裂纹占主导地位, 翼型裂纹率较高, 而在侧向约束条件下, 翼型裂纹开展受到明显抑制,  $\rho_{cw}$  较单轴大幅降低,  $\rho_{cs}$  稍有降低。进一步分析表明, 高刚度条件对翼型裂纹的抑制效果较低刚度下更显著, 与此同时, 次生裂纹率较低侧向约束刚度下呈增长态势。

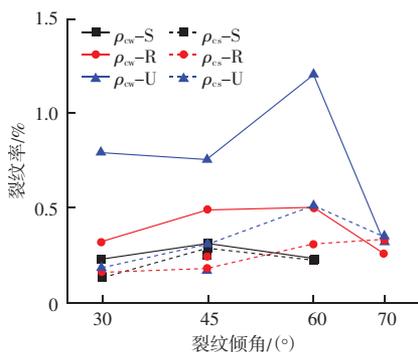


图 8  $\gamma = 0.64$  试样裂纹率  
Fig. 8  $\gamma = 0.64$  specimen crack rate

由图 9 可知,  $45^\circ$  试样在  $\gamma = 0.07$  的单轴条件下, 次生裂纹率趋近于零;  $60^\circ$  试样在  $\gamma = 0.07$  到  $\gamma = 0.64$  的单轴条件下翼型裂纹率与次生裂纹率与损伤系数呈正相关, 且翼型裂纹率的增长幅度大于次生裂纹率的增长幅度。就总裂纹率而言, 在损伤系数 0.16 ~ 0.64 区间内,  $60^\circ$  试样持续高于同损伤程度的  $45^\circ$  试样, 仅在初始损伤系数为 0.07 时二数值者相近。

由图 10 可知,  $\gamma = 0.16$  试样在高、低刚度条件下和  $\gamma = 0.36$  试样在高刚度条件下均发生直接压溃破坏, 未捕捉到从预制裂纹处萌发的裂纹, 裂纹率未标注在图中。侧向约束刚度对裂纹的作用效果表现出明显的初始损伤系数依赖性, 在  $\gamma = 0.64$  时效果最为明显。

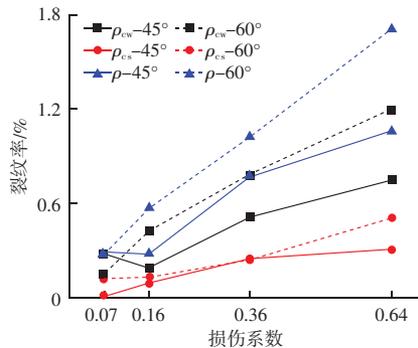


图 9 单轴  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  试样裂纹率  
Fig. 9 Crack rate of uniaxial  $45^\circ$  and  $60^\circ$  specimens under uniaxial compression

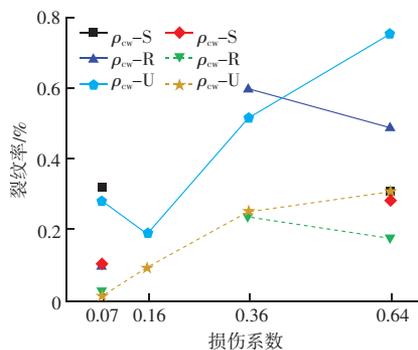


图 10  $45^\circ$  试样裂纹率  
Fig. 10 Crack rate of uniaxial  $45^\circ$  specimens

被动式侧向约束装置针对结构位移响应进行调控, 约束效果与试样位移表现出显著相关性。试样破坏侧向位移对裂纹的角度和试样初始损伤程度呈现出依赖性, 对于破坏侧向位移显著的试样, 被动式侧向约束装置调控作用愈加显著, 对试样施加更大的侧向约束力, 试样裂纹尖端应力集中更加明显。侧向约束造成的压应力影响了裂纹尖端的应力场, 由原来单纯的张拉破坏变成了压剪破坏, 在裂纹尖端的压应力集中区次生裂纹产生, 表现出对次生裂纹扩展的促进作用, 同时最大拉应力集中效应被显著削弱<sup>[19]</sup>。翼型裂纹的产生与拓展是这些拉应力的集中造成的, 随着拉应力集中效应的削弱, 翼型裂纹扩展减缓或者停滞, 部分翼型裂纹出现“愈合”现象, 表现出对翼型裂纹的抑制作用。随着侧向约束刚度的增加, 次生裂纹大量萌发, 翼型裂纹抑制效果愈加显著。

### 3.3 裂纹扩展与轴向应力的动态响应分析

基于试验的力学响应分析表明, 轴向应力与裂纹演化存在动态响应机制: 随轴向应力的递增诱发裂纹扩展, 导致承载能力降低, 引发轴向应力骤降。

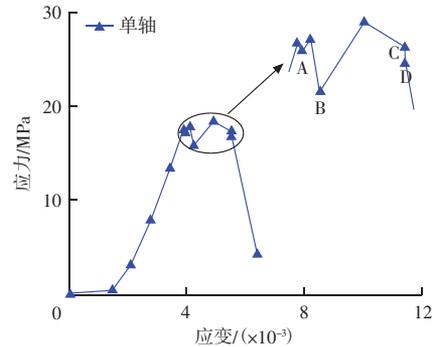
值得注意的是，初始损伤系数  $\gamma = 0.64$  时裂纹扩展演化最为明显，聚焦该损伤状态下的试样裂纹演化规律。

### 3.3.1 单轴压缩下的动态响应

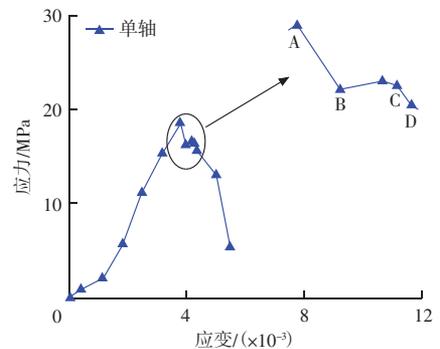
图 11 (a) 与图 12 为  $30^\circ$  试样在单轴条件下的动态应力 - 应变响应与裂纹演化过程。峰值应力前围初始损伤阶段，其中 A 点的轴向应力为 17.18 MPa，较前一个点降低了 0.32 MPa，裂纹 (2, 3) 与裂纹 (1, 4) 次生裂纹贯通，试样处于裂纹扩展阶段。随后轴向应力继续增长，进入裂纹贯通阶段，突然发出材料断裂声，紧接着发出材料连续剪切破坏的声音 (岩桥被陆续剪断)，此后 (4, 1), (3, 2), (2, 3), (1, 4) 四条裂纹搭接贯通，轴向应力骤降 2.02 MPa 至 B 点。B 点后轴向应力又继续上升至峰值应力后，第一列的前三行裂纹的两端萌发出翼型裂纹，并迅速扩展轴向应力再次出现骤降至 C 点，此时试样已无法稳定，进入持续破坏阶段，持续发出材料摩擦的声音，试样上部沿贯通裂纹路径 (4, 1), (3, 2), (2, 3), (1, 4) 发生滑移，(4, 1) 下端发出的翼型裂纹与 (1, 4) 上端发出的翼型裂纹持续扩宽，直至试样被破坏。

图 11 (b)、图 13 为  $70^\circ$  试样在单轴条件下的动态应力 - 应变响应与裂纹演化过程。其中 A 点为峰值应力后一点，此时第一列翼型裂纹瞬间萌发、开展、贯通，试样其他预制裂纹仅有少部分在尖端出现翼型裂纹，此时试样已无法稳定，裂纹持续扩展，在 (1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4) 方向形成贯通裂纹，成为破坏的主要路径 (裂纹开展主要方向)，试样沿该路径上的次生裂纹滑移，D 点 3、4 列裂纹搭接贯通，同时路径上翼型裂纹持续扩展，试样发生破坏。

图 11 (a) 在峰值应力前呈现显著应力跌落现象，显现出双峰值应力特征。两个主应力峰值间距对应较大的轴向应变差值，表明试样破坏前存在明显的塑性变形蓄能过程。图 11 (b) 所示应力 - 应变曲线在首次应力骤降后呈现失稳特征，试样内部裂纹网络发生动态扩展，导致承载能力渐进衰减。值得注意的是，在 B 点后的应力回升阶段，其增幅幅度及持续时间均处于微观尺度，未能扭转材料脆性破坏的本质属性。单轴压缩条件下，预制裂纹系统试样随裂纹倾角异化呈现显著破坏特性差异。



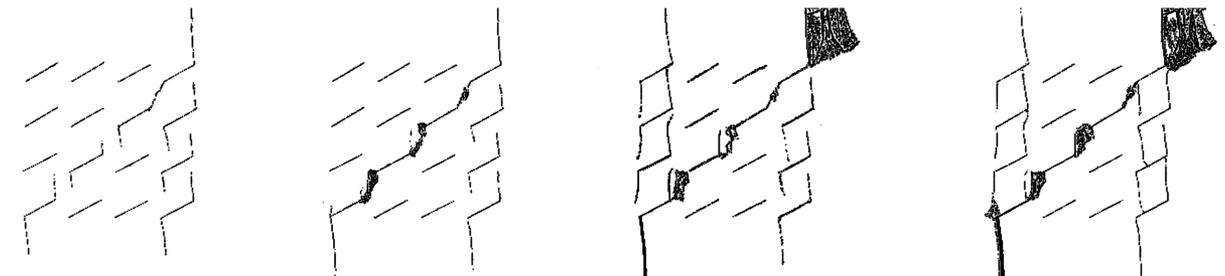
(a)  $30^\circ$  预制裂纹系统试样



(b)  $70^\circ$  预制裂纹系统试样

图 11 单轴压缩条件下轴向应力应变曲线

Fig. 11 Axial stress-strain curves under uniaxial compression



(a) 次生裂纹搭接

(b) 主要路径出现

(c) 翼型裂纹搭接

(d) 沿主要路径破坏

图 12 单轴  $30^\circ$  试样

Fig. 12 Specimen at  $30^\circ$  under uniaxial compression

# 岩土力学

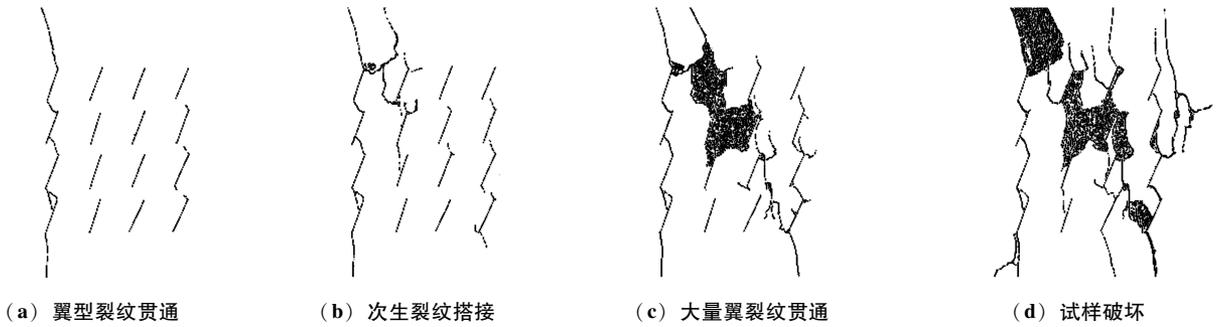


图 13 单轴 70° 试样

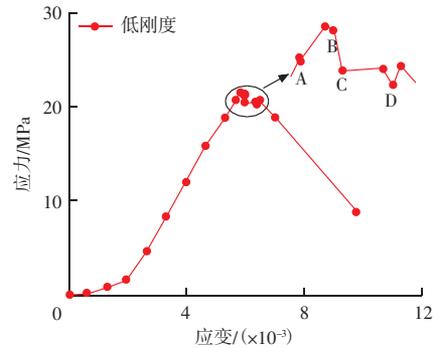
Fig. 13 Specimen at 70° under uniaxial compression

### 3.3.2 低约束刚度下的动态响应

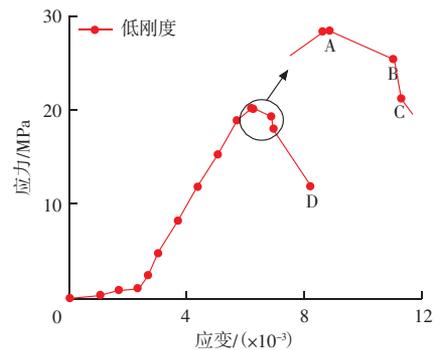
图 14 (a) 和图 15 为低侧向约束刚度双轴压缩条件下 30° 试样的动态应力 - 应变响应与裂纹演化过程, 14 (a) 应力 - 应变曲线在临近峰值应力前的 A 点出现轻微应力降现象 ( $\Delta\sigma = 0.07$  MPa), 该阶段对应翼型裂纹 (2, 1), (1, 2) 从非连续状态发展为搭接型次生倾斜裂纹的转变过程。此阶段裂纹搭接仅引发局部微裂纹网络的应力重分布, 试样整体承载能力无明显降低, 试件仍维持稳定轴向变形特征。在峰值应力后的 B 点 (4, 1), (3, 2) 次生裂纹搭接, (1, 1), (1, 2) 翼型裂纹搭接, 造成轴向应力下降 0.12 MPa。此时试样仍处于不稳定状态, 裂纹持续扩展, (3, 2) 上端次生裂纹萌发, 原有的两条翼型裂纹合并重组, 形成主控裂纹并伴随次生裂纹的弱化消失 (难以观察到), 同时 (2, 2), (3, 1) 次生裂纹搭接, (2, 2) 上端翼型裂纹持续扩展。随损伤累积, 轴向应力衰减至 C 点, 经短暂稳定后再次衰减, 至 D 点, 此时 (4, 1), (3, 2), (2, 3), (1, 4) 的次生裂纹完全搭接, (4, 1) 下端的翼型裂纹接近贯通, 试样沿此路径发生渐进式滑移破坏。

图 14 (b) 和图 16 为低侧向约束刚度 0.5 MPa 初始围压双轴压缩条件下 45° 试样的动态应力 - 应变响应与裂纹演化过程。图 14 (b) 在 A 点 (2, 1), (3, 1), (4, 1) 翼型裂纹搭接, (2, 1), (3, 2), (4, 3) 次生裂纹搭接; B 点第一列翼型裂纹完全搭接; C 点 (3, 4), (4, 4) 间多条裂纹发生搭接, 至此形成 (1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 4) 的主要路径, 在 D 点主要路径上的翼型裂纹扩宽, 试样沿次生裂纹滑移, 诱发主要路径附近表面的局部破坏。相较于 30° 试样, 由裂纹扩展引发的轴向应力骤降现

象呈现出显著的滞后效应。峰值应力之前的裂纹已呈现裂纹网络显著扩展特征, (1, 2), (2, 3), (3, 4) 次生裂纹搭接, 但倾斜角度为 45°, 同时具有 0.5 MPa 初始围压的低刚度侧向位移约束, 一定程度上抑制了裂纹的快速扩展, 提升了裂纹开展后试样的承载能力, 与裂纹开展造成的承载力损失相互抵消, 致使试样在峰值应力前未表现出轴向应力骤降。



(a) 30° 预制裂纹系统试样



(b) 45° 预制裂纹系统试样

图 14 低刚度条件下轴向应力应变曲线

Fig. 14 Axial stress - strain curves under low stiffness

### 3.3.3 高约束刚度下的动态响应

图 17 (a)、图 18 为高侧向约束刚度双轴压缩条件下 45° 试样的动态应力 - 应变响应与裂纹演化过程。峰值应力后, 轴向应力骤降至 A 点, (3, 3) 与 (1, 1),

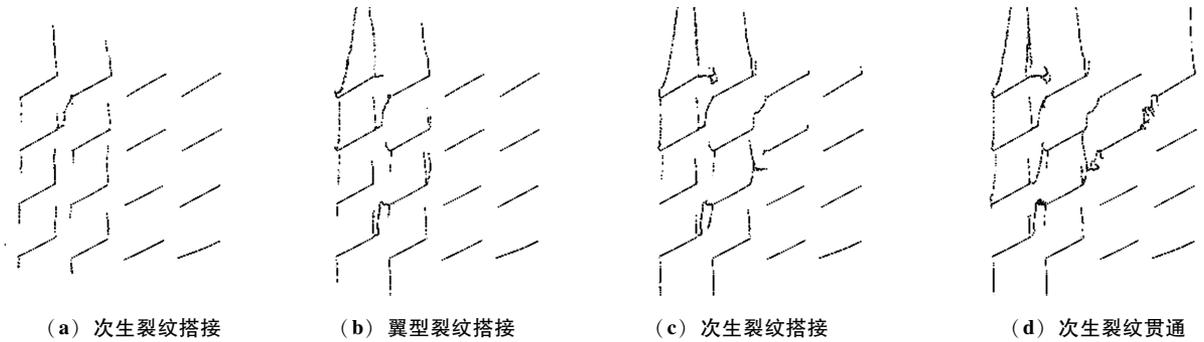


图 15 低刚度条件下 30° 预制裂纹系统试样

Fig. 15 Specimen of 30° prefabricated crack system under low stiffness

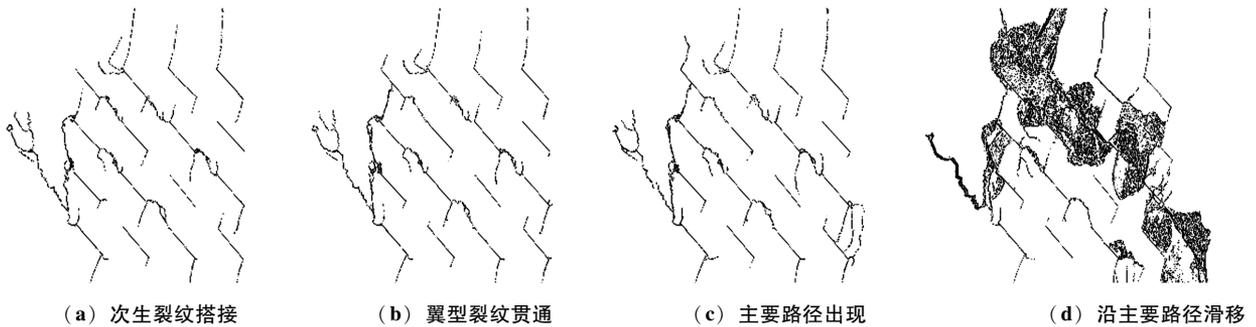
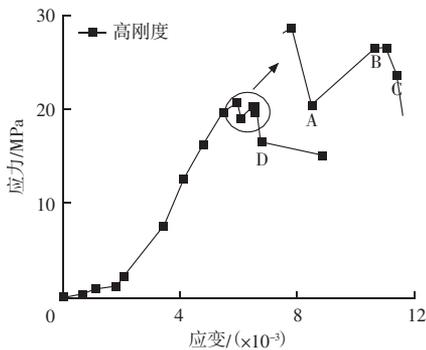


图 16 低刚度条件下 45° 预制裂纹系统试样

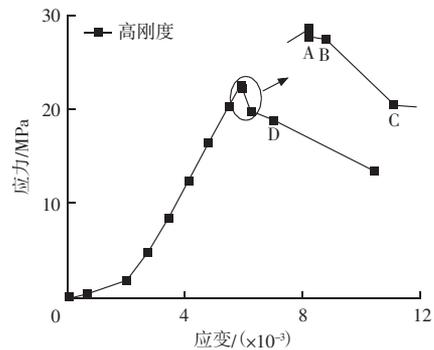
Fig. 16 Specimen of 45° prefabricated crack system under low stiffness

(2, 2) 次生裂纹搭接, 试样进入短暂稳定状态, 轴向应力逐步回升至峰值附近 ( $\Delta\sigma = 0.43$  MPa); 在 B 点 (2, 1), (3, 2) 次生裂纹搭接, 触发二次应力下降, 但降幅较首次明显减弱; 在 C 点 (1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4) 次生裂纹贯通, 主导应力释放。随后裂纹持续开展, 试样沿主要路径滑移, 直至试样破坏。

图 17 (b)、图 19 为高侧向约束刚度双轴压缩条件下 45° 试样的动态应力 - 应变响应与裂纹演化过程。在峰值应力后触发应力降, 但降幅轻微, 至 C 点 (3, 2), (2, 2), (1, 2) 翼型裂纹搭接与 (4, 1) 次生裂纹交汇形成完全贯通裂纹, 此后轴向应力呈现渐进式衰减, 裂纹持续扩展。D 点 (2, 2) 与 (1, 3) 裂纹搭接, 形成主要路径。



(a) 45° 预制裂纹系统试样



(b) 60° 预制裂纹系统试样

图 17 高侧向约束刚度条件下轴向应力应变曲线

Fig. 17 Axial stress - strain curves under high lateral constraint stiffness

70° 试样单轴压缩条件下呈现脆性破坏; 30° 试样在单轴压缩试验和低刚度双轴压缩条件下发生塑性破坏; 45° 试样在低刚度条件下破坏显现一定的塑性,

在高刚度约束条件下轴向应力应变曲线呈现出双峰值, 破坏初期伴随较大变形, 呈现明显的塑性; 60° 试样在高刚度约束条件下依旧发生脆性破坏。试验

## 岩土力学

结果表明, 裂纹倾角减小 ( $\alpha \leq 30^\circ$ ) 的试样在单轴压缩条件下表现出更显著的塑性变形特征, 侧向约束刚度对破坏性质有调控作用。

单轴压缩条件下试样呈现翼型裂纹快速扩展的主导特征, 侧向约束条件显著改变裂纹扩展模式, 翼型裂纹率降低, 次生裂纹率增长。在较小倾斜角

度下, 裂纹开展多以次生裂纹为主; 在较大倾斜角度下多以翼型裂纹为主。侧向刚度与裂纹倾角的联合作用下, 在低角度、高刚度的条件下次生裂纹显著发育, 次生裂纹作为轴向应力降低的主要影响因素, 次生裂纹的扩展贯通导致应力骤降, 使得试样破坏前出现明显预兆。

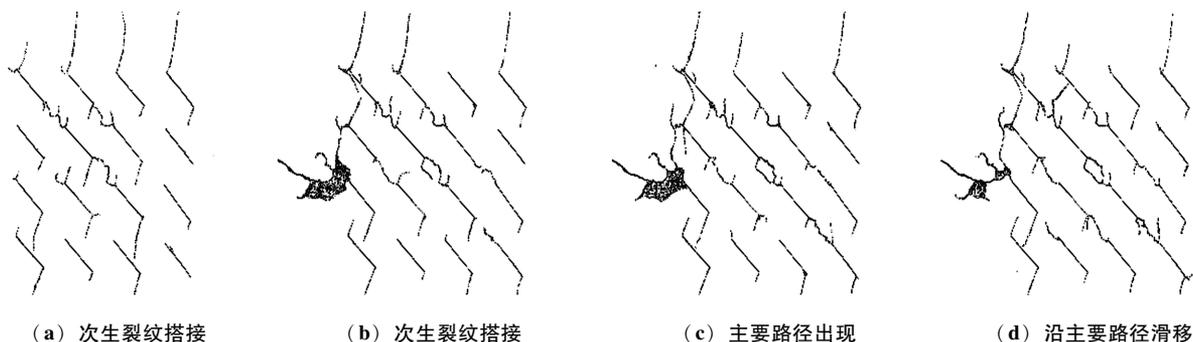


图 18 高侧向约束刚度条件下  $45^\circ$  预制裂纹系统试样  
Fig. 18 Specimen of  $45^\circ$  prefabricated crack system under high lateral restraint stiffness

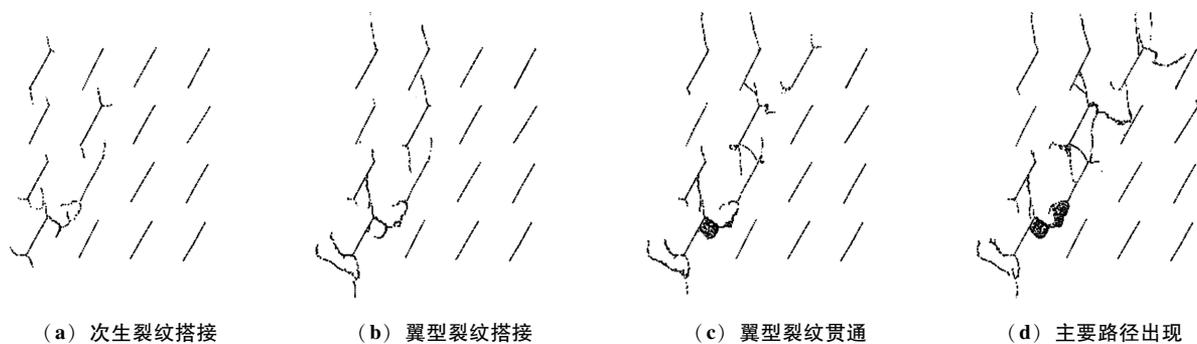


图 19 高刚度条件下  $60^\circ$  预制裂纹系统试样  
Fig. 19 Specimen of  $60^\circ$  prefabricated crack system under high lateral restraint stiffness

## 4 侧向刚度破坏模式影响研究

### 4.1 破坏模式分类

试样的最终破坏模式由侧向约束刚度、损伤系数及裂纹倾角三者的联合作用所主导, 根据破坏形态与力学机制差异可划分为四类典型模式: 弯折压溃破坏、侧向滑移破坏、局部压溃破坏及直接压溃破坏。

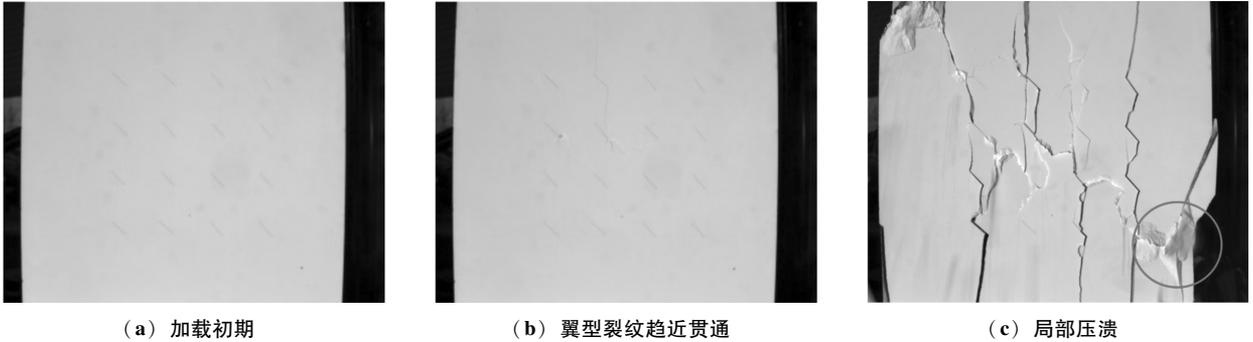
#### 4.1.1 弯折压溃破坏

由图 20 可知, 在单轴条件下试样起裂应力与峰值应力接近, 首次翼型裂纹贯通后试样失稳, 新裂纹持续产生, 原有裂纹持续扩展, 试样被分割成一系列独立的“柱状结构”, 但并不会导致试样承载力的显著降低。随着裂纹地扩展, 部分柱子重心产生

偏移, “柱状结构”在偏心荷载作用下局部被压溃, 如图 20 (c) 中标记位置, 试样承载力显著降低, 试样破坏。试样被分割成一系列独立的“柱状结构”后, 试样的破坏模式亦就与“柱状结构”显著关联。前文描述的是第一种破坏情况, 裂纹扩展或者局部脱落引发“柱状结构”重心偏离力线; 在另外一种情况下, “柱状结构”始终处于受压状态直到被压溃 (如图 21 所示), 或者新裂纹贯通转变为其他破坏形式。

#### 4.1.2 裂纹诱导的局部压溃破坏

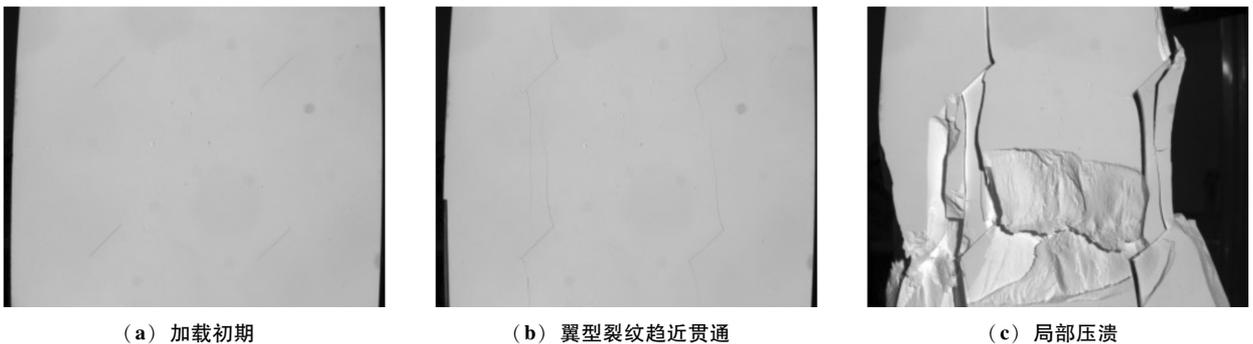
类比于单轴压缩下细长柱的屈曲失稳现象, 可引入侧向约束降低长细比; 对试样施加侧向约束促使破坏模式发生转变。在低侧向约束刚度约束条件下, 侧向约束的抑制作用导致翼型裂纹无法贯通,



(a) 加载初期

(b) 翼型裂纹趋近贯通

(c) 局部压溃

图 20 单轴压缩下  $45^\circ \gamma = 0.16$  试样Fig. 20 Specimen at  $45^\circ \gamma = 0.16$  under uniaxial compression

(a) 加载初期

(b) 翼型裂纹趋近贯通

(c) 局部压溃

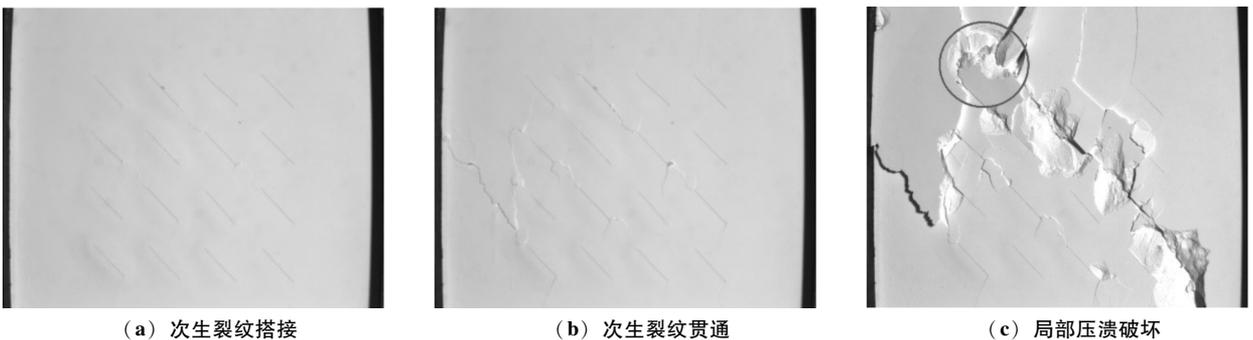
图 21 单轴压缩条件下  $45^\circ \gamma = 0.07$  试样Fig. 21 Specimen at  $45^\circ \gamma = 0.07$  under uniaxial compression

随着荷载的持续增长, 试样内部的应力持续增长, 裂纹尖端的应力强度因子达到或超过断裂韧度, 次生裂纹从预制裂纹尖端开始扩展。在次生裂纹扩展阶段, 随着荷载持续增加, 次生裂纹与翼型裂纹连通, 逐渐构成贯通裂纹路径。尽管发生了次生裂纹贯通, 但由于侧向约束的位移限制作用, 试样无法沿次生裂纹面发生滑移。随着荷载持续增加, 在局部裂纹丰富处, 应力集中导致应力水平超越材料强度诱发局部压溃, 如图 22 所示。

#### 4.1.3 压剪滑移破坏

次生裂纹贯通初期, 裂纹摩擦力与侧向约束力

共同抑制了试样的瞬时失效, 但试样承载力不足以抵抗全部荷载。随着荷载增加, 裂纹尖端剪应力持续增长, 最终剪断岩桥, 导致试样次生裂纹搭接, 试样上部沿次生裂纹贯通面发生滑移, 形成剪切破坏带, 直至破坏。由图 23 可知, 随侧向约束刚度增加, 破坏模式有转变迹象。在高刚度约束条件下, 高侧向约束力抑制裂纹有效扩展, 发生无裂纹扩展的直接压溃破坏风险更大。存在严重的初始损伤 ( $\gamma = 0.64$ ) 的  $30^\circ$  预制裂纹系统试样, 斜向裂纹间岩桥较短, 在高刚度条件下, 试样的破坏模式介于无裂纹扩展的直接压溃破坏与次生裂纹贯通导致的滑



(a) 次生裂纹搭接

(b) 次生裂纹贯通

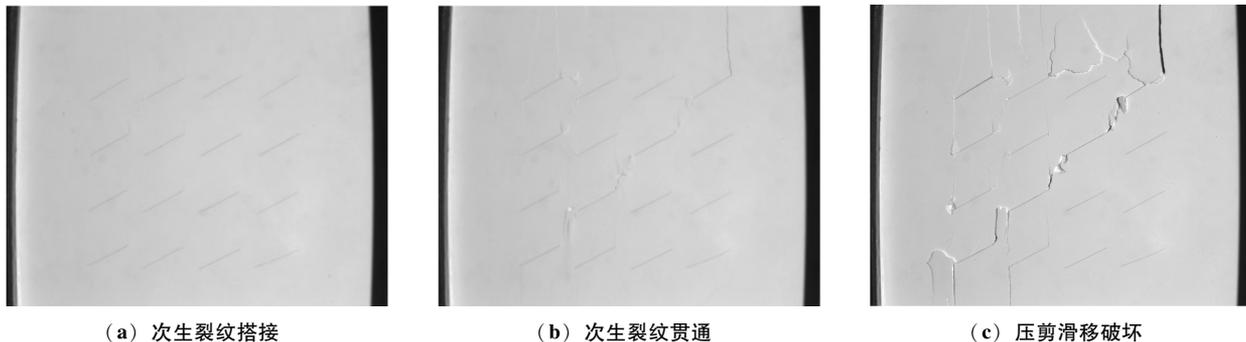
(c) 局部压溃破坏

图 22 低刚度条件下  $45^\circ \gamma = 0.64$  试样Fig. 22 Specimen at  $45^\circ \gamma = 0.64$  under low stiffness

## 岩土力学

移破坏之间,如图 24 所示。 $\gamma=0.64$  的  $30^\circ$  试样,在低刚度条件下,若裂纹倾角增加到  $45^\circ$  表现为裂纹诱发

的局部压溃破坏,如图 22 所示;若降低初始损伤系数,试样破坏模式转变为局部压溃破坏,如图 25 所示。



(a) 次生裂纹搭接

(b) 次生裂纹贯通

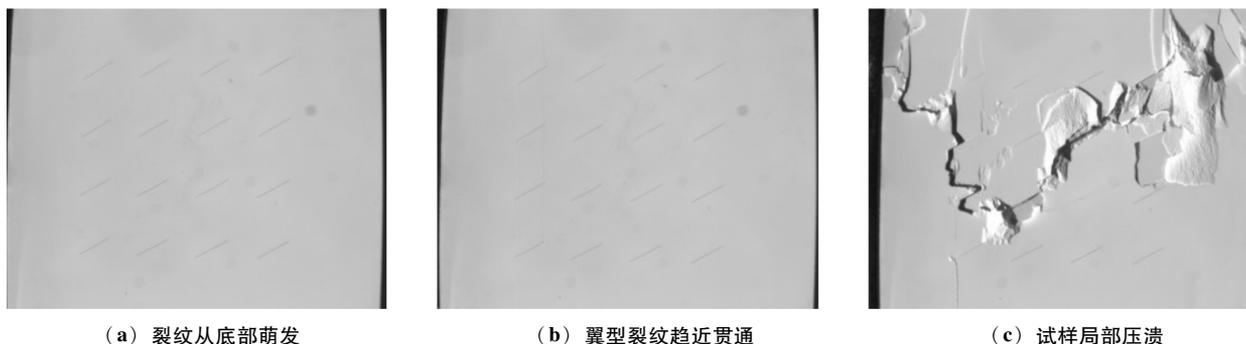
(c) 压剪滑移破坏

图 23 低刚度条件下  $30^\circ \gamma=0.64$  试样Fig. 23 Specimen of  $30^\circ \gamma=0.64$  under low stiffness

(a) 加载初期

(b) 次生裂纹贯通

(c) 试样滑移破坏

图 24 高刚度条件下  $30^\circ \gamma=0.64$  试样Fig. 24 Specimen of  $30^\circ \gamma=0.64$  under high stiffness

(a) 裂纹从底部萌发

(b) 翼型裂纹趋近贯通

(c) 试样局部压溃

图 25 低刚度条件下  $30^\circ \gamma=0.36$  试样Fig. 25  $30^\circ \gamma=0.36$  specimen under low stiffness

### 4.1.4 无裂纹扩展的直接压溃破坏

无裂纹扩展的直接压溃破坏由端部压溃主导,预制裂纹处的裂纹扩展不会改变破坏的模式,不是试样破坏的主要原因。该破坏模式常发生在损伤程度较低、裂纹倾角较大且存在侧向约束的条件下,发生该模式破坏的概率与侧向约束的刚度呈正相关。高损伤试样在特定角度下亦会产生该形式的破坏,高刚度条件下损伤系数为 0.64 的  $70^\circ$  试样破坏过程图,如图 26 所示。

### 4.2 耦合作用下的破坏模式转化

在单轴条件下,由于缺乏侧向约束,试样主要呈现为张拉破坏诱发的弯折压溃破坏。随着裂纹倾角减小到  $30^\circ$ ,较高损伤 ( $\gamma=0.64$ 、 $\gamma=0.36$ ) 试样在单轴条件下的破坏模式发生显著转变,表现为岩桥剪断导致的压剪滑移破坏。

翼型裂纹开展的本质是拉伸破坏,当裂纹扩展方向与主压应力方向一致时裂纹扩展受到的阻力最小,翼型裂纹扩展后向主压应力方向发生偏转。在

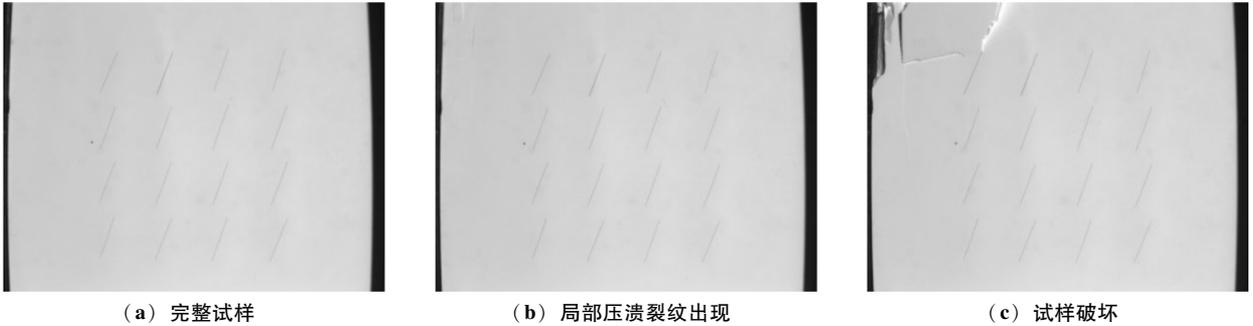


图 26 高刚度条件下  $70^\circ \gamma=0.64$  试样  
Fig. 26 Specimen of  $70^\circ \gamma=0.64$  under high stiffness

侧向约束条件下，试样侧向的位移被限制，导致翼型裂纹扩展被抑制，无法形成翼型裂纹贯通。在侧向约束的作用下，即使翼型裂纹发生贯通亦不会形成“细长柱”发生弯折。裂纹尖端应力随荷载持续增加，应力强度因子达到或超过 II 型断裂韧度后，岩桥被剪断，次生裂纹逐步扩展贯通。

将侧向约束力与轴向荷载在次生裂纹面上进行分解，当轴向荷载平行裂纹面方向的分力（简称滑移驱动力）大于裂纹面摩擦力与侧向约束力平行裂纹面方向分力的合力（简称抗滑阻力）时，试样开始沿次生裂纹面滑移。与此同时，试样的侧向位移增加，侧向约束力增大。初期稳定缓慢滑移，滑移驱动力显著大于阻滑合力时，滑移加速，试样发生压剪滑移破坏。若增加侧向约束刚度，侧向约束力增长的速率提升，滑移驱动力显著大于抗滑阻力前，局部应力超越材料强度，导致试样局部被压溃而破坏（局部压溃破坏）。

裂纹倾角为  $70^\circ$  时，预制裂纹与主应力方向接近，次生裂纹难以开展，同时受高侧向约束刚度约束侧向位移，抑制翼型裂纹扩展，试样可能直接因端部被压溃而发生破坏，此时发生的破坏就是直接压溃破坏。随着损伤系数的降低，发生直接压溃破坏的裂纹临界倾角亦会降低。侧向约束刚度与裂纹倾角联合作用下的破坏模式转化规律见表 2，侧向约束刚度与损伤系数联合作用下的破坏模式转化规律见表 3。

表 2 侧向约束刚度与裂纹倾角  
联合作用下的破坏模式转化 ( $\gamma=0.64$ )

Table 2 Transformation of failure modes under the combined action of lateral restraint stiffness and crack inclination angle ( $\gamma=0.64$ )

侧向约束条件	裂纹倾角			
	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$
单轴	压剪破坏	弯折压溃	弯折压溃	弯折压溃
低刚度	压剪破坏	局部压溃	局部压溃	局部压溃
高刚度	局部压溃	局部压溃	局部压溃	直接压溃

表 3 侧向约束刚度与损伤系数  
联合作用下的破坏模式转化 ( $45^\circ$ )

Table 3 Transformation of failure mode under the combined effect of lateral restraint stiffness and damage coefficient ( $45^\circ$ )

侧向约束条件	损伤系数			
	0.64	0.36	0.16	0.07
单轴	压剪破坏	弯折压剪	弯折压剪	弯折压溃
低刚度	局部压溃	局部压溃	直接压溃	局部压溃
高刚度	局部压溃	直接压溃	直接压溃	直接压溃

## 5 结论

采用自制侧向约束装置，探究双轴压缩下侧向约束刚度对试块强度及裂纹扩展的影响，初步得出如下结论：

(1) 侧向约束刚度对裂纹诱导的强度折损具有显著抑制作用，且抑制效应随侧向约束刚度和初始损伤系数 ( $0.07 \sim 0.64$ ) 的增大呈非线性增长趋势。 $45^\circ$  倾角峰值应力增长率随着损伤系数的增长，低刚度下增幅  $1.63\% \sim 2.03\%$ ，高刚度下增幅  $1.77\% \sim 4.75\%$ ，表明高刚度可以有效补充损伤导致的强度损伤。

(2) 侧向约束刚度可以提升岩体起裂应力阈值，促进次生裂纹萌生，但翼型裂纹抑制效应受裂纹倾角调控。随着初始损伤系数的增长， $\rho_{cw}$  快速增长， $\rho_{cs}$  稳步增长逐渐趋于稳定，在单轴作用下二者差距 ( $\gamma=0.64$  时达  $0.44\%$ ，此时  $\rho_{cs}=0.31\%$ ) 逐渐扩大，在与侧向约束刚度的联合作用下次生裂纹占比持续上升， $\gamma=0.64$  试样在高刚度作用下二者接近 (差值  $0.03\%$ ，此时  $\rho_{cs}=0.28\%$ )。

(3) 侧向约束刚度可提供侧向支撑，约束岩体变形，驱动岩体破坏性质由脆性破坏向塑性破坏转变。 $\gamma=0.64$  试样在单轴条件下， $30^\circ$  倾角以次生裂纹渐近搭接为主，表现为塑性破坏； $70^\circ$  倾角翼型裂

## 岩土力学

纹瞬间贯通,呈突发脆性破坏;低刚度条件下,30°倾角为呈塑性破坏,45°倾角呈塑性过度特征;高刚度下45°倾角塑性破坏,60°倾角表现为脆性破坏。

(4) 侧向约束刚度促使试样破坏模式由弯折压溃破坏向直接压溃破坏转变。试样在单轴下易发生弯折压溃破坏,高损伤( $\gamma = 0.64$ )、小倾角(30°)试样在单轴下或者低刚度下易发生侧向滑移破坏,高损伤试样或者低损伤的45°、60°倾角试样易发生局部压溃, $\gamma = 0.64$ 高刚度70°倾角和其他损伤系数下高刚度试样易发生直接压溃破坏。

## 参 考 文 献

- [1] 中国交通隧道工程学术研究综述 2022 [J]. 中国公路学报, 2023, 35 (4): 1-40.
- [2] ABBAS Q, YOON J, LEE J. A method for characterizing stiffness of a support system for excavation design [J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24 (2): 04023277.
- [3] LIU X, HUA X Z, LIANG Y T, et al. Quantitative research on roof deformation and temporary support stiffness in deep-mine gob-side entry retaining by roof cutting [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (15): 6520.
- [4] 余伟健, 李可, 芦庆和, 等. 裂隙发育岩体巷道围岩工程特征与变形控制 [J]. 煤炭学报, 2021, 46 (11): 3408-3418.
- [5] 聂子云, 谭小兵, 朱占国, 等. 基于大刚度支护体系的新型暗挖技术 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (6): 1332-1338.
- [6] XUE H, WANG H, LIU X G. Effects of supporting-substructure lateral stiffness on the internal forces of grid structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 224: 109155.
- [7] 冯冀蒙, 李洪涛, 张俊儒, 等. 破碎泥质岩隧道滞后形变与衬砌刚度关系规律试验研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38 (7): 1164-1171.
- [8] 张彪, 张志强, 汪波, 等. 让压锚杆在大变形隧道支护应用中试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (7): 2047-2055.
- [9] FENG J M, JIANG H, ZHANG J R, et al. An experimental study on the correlation between composite lining stiffness and bearing capacity in soft ground [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27 (1): 345-355.
- [10] LIU C, ZHANG D L, ZHANG S L, et al. Interaction analysis between composite supports and rheological rock considering progressive hardening characteristic of shotcrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 374: 130876.
- [11] 申玉生, 张熙, 常铭宇, 等. 穿越断层破碎带隧道变刚度衬砌振动台试验研究 [J]. 土木工程学报, 2025, 58 (8): 101-104.
- [12] 闫高明, 赵伯明, 高波, 等. 穿越断层分段柔性接头隧道纵向地震响应解析 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (13): 228-238.
- [13] 禹海涛, 卫一博. 穿断层分段柔性接头隧道纵向地震响应解析 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (5): 912-920.
- [14] 王志龙, 赵大铭, 严志伟, 等. 超前核心土加固对隧道围岩变形规律的影响分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (增刊1): 274-280, 295.
- [15] 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.
- [16] ZHAO Y L, ZHANG L Y, WANG W J, et al. Cracking and stress-strain behavior of rock-like material containing two flaws under uniaxial compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 2665-2687.
- [17] 赵程, 田加深, 松田浩, 等. 单轴压缩下基于全局应变场分析的岩石裂纹扩展及其损伤演化特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (4): 763-769.
- [18] 刘伟韬, 申建军. 含单裂纹真实岩石试件断裂模式的力学试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (6): 1182-1189.
- [19] 李勇, 蔡卫兵, 朱维申, 等. 单轴压缩条件下平行双裂隙演化机理的颗粒流分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50 (12): 3035-3045.