

不同种类裂隙岩体破坏特征研究：理论、方法与应用综述

徐昂暄，宫浩林

华北水利水电大学地球科学与工程学院，河南 郑州

收稿日期：2025年10月14日；录用日期：2025年11月5日；发布日期：2025年11月20日

摘 要

裂隙岩体作为地质工程中的重要组成部分，其力学行为对工程设计与安全评估具有重要影响。本论文综述了裂隙岩体的破坏机理，重点论述单裂隙和多裂隙系统的破坏特征。通过分析裂隙的几何参数、加载条件及其相互作用，揭示了裂纹萌生、扩展与贯通的机制。现有研究在三维裂隙网络、裂纹萌生过程的实时观测和动静荷载耦合作用下的破坏特征等方面存在局限。论述该领域未来将通过三维数值模拟和精细化实验，探索裂隙岩体的复杂破坏行为，填补相关研究空白。将为岩体力学和工程稳定性评估提供理论支持，推动裂隙岩体破坏机理的深入理解。

关键词

裂隙岩体，破坏机理，翼形裂纹，裂隙间相互作用

Research on the Failure Characteristics of Different Types of Fractured Rock Masses: A Review of Theories, Methods, and Applications

Angxuan Xu, Haolin Gong

College of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: October 14, 2025; accepted: November 5, 2025; published: November 20, 2025

文章引用：徐昂暄，宫浩林. 不同种类裂隙岩体破坏特征研究：理论、方法与应用综述[J]. 土木工程, 2025, 14(11): 2658-2668. DOI: 10.12677/hjce.2025.1411285

Abstract

As an important component in geological engineering, the mechanical behavior of fractured rock masses has a significant impact on engineering design and safety assessment. This paper reviews the failure mechanisms of fractured rock masses, focusing on the failure characteristics of single-fracture and multi-fracture systems. By analyzing the geometric parameters of fractures, loading conditions, and their interactions, the mechanisms of crack initiation, propagation, and penetration are revealed. Existing studies have limitations in aspects such as three-dimensional fracture networks, real-time observation of crack initiation processes, and failure characteristics under coupled dynamic and static loads. The discussion suggests that future research in this field will explore the complex failure behavior of fractured rock masses through three-dimensional numerical simulations and refined experiments, filling gaps in relevant studies. This will provide theoretical support for rock mechanics and engineering stability assessment, and promote a deeper understanding of the failure mechanisms of fractured rock masses.

Keywords

Fractured Rock Mass, Compressive-Shear Failure, Crack Evolution, Fracture Interaction, Mechanical Mechanism

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言——为何要研究裂隙岩体的破坏特征

在大型岩土工程(如边坡、隧道、地下洞室及水工坝基)中,岩体破坏往往决定着工程稳定性与安全性。实际工程表明,压剪破坏是岩体结构中最常见且最具灾变性的失稳模式。这类破坏不仅导致岩体的承载力显著衰减,还常引发大规模滑塌、岩爆或渗透失稳等次生灾害,对工程构筑物及人员安全构成严重威胁。因此,深入认识岩体在复杂应力状态下的破坏特征,尤其是压剪耦合作用下的裂隙演化规律,对科学评估工程风险与优化支护设计具有重要意义。

与理想的完整岩石不同,天然岩体普遍发育有节理、裂隙及层理等结构面,使其表现出典型的非连续介质特征。这些结构面不仅削弱了岩体的整体强度与刚度,还在外加载荷作用下形成复杂的应力集中区,导致裂纹萌生、扩展与贯通行为显著不同于均质材料。裂隙的存在使岩体破坏过程具有明显的各向异性与非线性演化特征,从而使工程岩体的力学响应和失稳机理难以直接用传统连续介质力学理论加以描述。

近年来,学者们通过实验与数值模拟等手段对含裂隙岩体的破坏机制开展了大量研究。例如,肖桃李[1]等以锦屏大理岩为原型,采用相似材料制作不同倾角与长度的预制裂隙试样,开展了三轴压缩试验,系统分析了裂隙参数与围压条件对岩样破坏模式的影响。结果表明,试样在压剪荷载下主要出现三类裂纹:I型拉伸裂纹、II型滑移裂纹及III型撕开(花瓣状)裂纹,其中III型裂纹最为普遍;随着围压升高,破坏模式由拉剪复合型向沿裂隙面剪切型转变。研究还发现,裂隙倾角是控制新裂纹起裂的关键因素,倾角增大有利于III型裂纹的扩展,而裂隙长度主要影响裂纹扩展的尺度[1]。这说明裂隙几何形态与应力条件的耦合控制了岩体破坏的空间分布与演化机制,是岩体非连续性力学行为的核心特征之一。

综合来看,裂隙岩体的力学响应受结构面的几何特征、力学属性及其相互作用所主导,其破坏过程

表现出拉剪复合、局部滑移、剪切贯通等多种形式。对其破坏特征的深入研究, 不仅有助于揭示裂隙控制下岩体失稳的细观机理, 也为复杂地质条件下岩体工程的稳定性分析与防护设计提供理论依据。基于此, 本文的综述将重点围绕压剪荷载条件下裂隙岩体的破坏特征展开, 系统总结从单裂隙到多裂隙(尤其双裂隙)岩体的破坏演化规律与控制机制, 旨在为后续实验研究和数值分析奠定理论基础。

2. 裂隙岩体破坏的理论基础与研究方法

2.1. 描述裂隙岩体强度与破坏的理论体系

(1) 连续介质强度准则(经验/半经验)

Mohr-Coulomb 准则: 以内摩擦角与粘聚力刻画材料的剪切失稳准则, 能够简洁地描述均质/近均质岩体在主应力条件下的破坏包络, 便于工程计算与极限状态判定。但其本质是假定连续、均质介质, 难以直接反映裂隙、构造面引起的应力集中、位移突变和剪切滑移等非连续过程。

Hoek-Brown (及其改进): 针对岩体整体强度通过经验参数考虑了块体结构和破碎度, 对风化或块状化岩体有较好工程适用性; 但同样基于连续体假设, 对明显示裂隙体系内部的微观裂纹萌生、裂隙面摩擦滑移与贯通过程描述不足。

(2) 断裂力学与格里菲斯(Griffith)理论

Griffith 断裂理论/线弹性断裂力学(LEFM): 适合描述单一裂纹或明显裂尖处的裂纹起裂条件(能量释放率、应力强度因子 K_I/K_{II}), 能够解释裂纹在临界条件下的快速扩展。对研究单裂隙起裂、翼裂纹萌生具有直观的物理意义。但 LEFM 要求线弹性和尺寸比例(裂纹尺寸与试样尺寸的关系), 对大变形、摩擦滑移占主导的剪切破坏以及裂隙多重相互作用情形适用性受限。

弹塑性断裂/摩擦 - 断裂耦合: 为考虑裂隙面摩擦、接触与闭合/张开效应, 研究者发展了包含摩擦和弹塑性区的断裂模型(例如考虑 Mode II、摩擦耗能的修正形式), 以模拟裂隙在压剪加载下既有张开又有滑移的复合行为。

(3) 损伤力学与连续介质 - 损伤耦合模型

损伤力学以连续场(损伤变量)刻画微裂纹密度增长与刚度退化, 能够描述裂纹从微观分布(疲劳/风化诱发)发展到宏观失稳的全过程, 适合于研究宏观力学响应(应力 - 应变软化、刚度丧失)与能量耗散。其优势是可与有限元方法耦合以模拟整体变形, 但对离散裂缝的几何形态、穿通及相互作用的显式表征欠缺。

(4) 多尺度与混合理论框架

当前研究倾向于采用断裂力学(描述裂尖与局部扩展) + 损伤力学(描述宏观刚度退化) + 离散元/接触力学(描述裂隙面摩擦滑移与大位移)的混合/多尺度方法, 以期既刻画裂纹起裂与扩展的物理机制, 又能反映宏观工程尺度的整体强度与变形特征。

(5) 含渗流/热 - 水 - 力耦合理论

对于水工坝基、地下含水层或注采工程, 裂隙的渗流行为对力学响应有显著影响(如孔隙压力改变有效应力), 需采用耦合渗流 - 变形本构与渗透张量构建方法[2], 以揭示渗流对破坏阈值与破坏模式的调制作用[2]。

经典强度准则便于工程极限分析, 但对含明显裂隙的非连续体描述不足; 断裂力学适合裂纹起裂与扩展的局部过程; 损伤力学描述宏观刚度退化; 工程问题通常需要将上述理论以耦合或多尺度方式联合应用, 特别是在存在裂隙摩擦、闭合/张开和渗流耦合时。

2.2. 主要研究方法与技术手段

研究裂隙岩体破坏特征的手段可分为物理实验(实验室/模型试验)、数值模拟、物理实验与数值模拟

的融合方法与现场/原位监测。下文分别列举主流方法并讨论优缺点与适用场景。

2.2.1. 物理实验方法

(1) 常规单轴/三轴压缩试验(含真三轴)

该试验在可控围压和轴向加载下得到应力 - 应变响应、峰值/残余强度、模量与膨胀/缩短特性; 通过在试样中预制裂隙(不同倾角、长度、粗糙度)可以直接观察裂纹萌生与扩展过程[3]。其优点是直接、直观, 易于控制裂隙几何与加载路径; 实验数据是验证数值模型与理论的金标准。但是样本尺度小, 边界效应与尺寸效应明显; 实验量大且耗时; 对裂隙相互作用、复杂裂网或原位地质条件(温度、渗流、地应力场非均匀)模拟受限。

(2) 直剪/剪切盒试验与单裂隙滑动试验

该试验专门用于测定裂隙面摩擦特性(摩擦系数、摩擦随位移演化、黏滑行为)以及剪切诱发的位移与孔隙变形。其优点是可直接获得裂隙面的摩擦 - 位移曲线与残余强度参数, 便于在数值模拟中作为接触/摩擦模型的输入。但是通常为二维/局部测试, 难以同时获取裂隙扩展的动态过程。

(3) 真三轴/多轴与卸荷试验

真三轴设备可独立施加三个主应力, 较好地模拟实际地应力状态与复杂应力路径吴刚[3]所做卸荷试验即体现了不同卸荷路径对变形与强度的影响)。其优点是能研究压剪耦合作用、卸荷/加载路径效应、非轴对称应力状态下的破坏机理。但是设备复杂且成本高; 对裂隙面几何与组合的可控性受限; 实验时间长。

(4) 物理模拟与相似材料模型(岩石替代材料)

使用高强砂浆、粉砂等相似材料制备可控裂隙的模型体(适用于可视化观测、力学行为放缩试验), 肖桃李等[1]即采用相似材料与薄钢片预制裂隙开展研究。其优点是易观测裂纹萌生/演化、能做参数化研究(多角度/长度组合); 便于结合高速相机/数字图像相关(DIC)等技术。但是材料本构与真实岩石仍有差异, 尺度换算与相似率需谨慎。

(5) 监测与成像手段(用于实验室与现场)

包括声发射(AE)、超声波检测、数字图像相关(DIC)、X-CT (X 射线断层扫描)、微-CT、光学显微、扫描电镜(SEM)等。这些手段能在不同尺度上提供裂纹起裂、扩展路径、微裂缝密度、开度变化与内部孔隙结构演化的直接证据, 为机制解释提供强有力的微观/中观支撑。

2.2.2. 数值与理论模拟方法

(1) 离散元法(DEM)/基于接触的数值模型(如 PFC、UDEC/3DEC)

显式模拟块体与裂隙面的接触、滑移、分离与再接触, 适合研究裂隙相互作用、裂隙网络的逐步贯通与宏观强度的来源。其优点是对非连续性、位移突变、摩擦耗能表征自然; 便于模拟裂隙间的相互作用(加强/屏蔽)与大位移区的力学演化。其优点计算量大, 对材料微观参数敏感且标定困难; 难以直接获取能量消耗的精确分布(但可估计); 尺度放大仍具挑战。

(2) 有限元法(FEM)与连续介质 - 损伤耦合模型

通过损伤力学或连续裂缝模型(XFEM 等)在连续框架中模拟裂纹扩展与刚度退化, 适合宏观力学响应预测与工程尺度问题。其优点成熟、数值稳定, 便于与工程边界条件耦合(如渗流 - 变形耦合、温度场)。其优点对裂隙的显式几何演化与摩擦滑移的处理需要特殊方法(断裂跟踪、界面单元或 XFEM), 在裂隙密集或强非线性接触问题上表现不如 DEM。

(3) 基于格点/格子/随机场的断裂网络模型(如 RFPA、裂缝网络模拟)

通过随机场或格网模拟微裂缝的演化与聚合, 能够连接微观缺陷分布与宏观破坏模式, 适用于研究

裂纹群体行为与统计特性。其优点有助于揭示破坏的统计性质与能量释放分布; 便于做参数敏感性分析。其优点与离散裂缝的直接几何表征和摩擦滑移耦合存在困难: 数值实现需要较细网格, 计算量大。

2.2.3. 物理实验与数值模拟的融合方法论

在现代裂隙岩体力学研究中, 单纯的物理实验或数值模拟已难以满足对破裂机理深层次认知的需求。因此, “物理实验 - 数值模拟”的协同研究范式应运而生, 它构成了一个不断迭代优化的闭环研究系统。该范式并非简单并列, 而是强调二者在模型构建、过程验证与机理揭示上的深度融合。以物理实验测得的宏观响应(如应力 - 应变曲线、峰值强度)以及观察到的细观现象(如裂纹起裂应力、扩展路径)作为目标输出, 通过反复调整数值模型中的细观参数(如颗粒接触刚度、粘结强度、断裂能等), 使数值模拟的输出能够最佳地拟合这些实验观测结果[4]。但也存在以下问题:

(1) 参数的非唯一性与主观性: 不同的参数组合可能拟合出相似的宏观响应, 导致标定结果不唯一, 严重依赖研究者的经验。

(2) 多目标标定的复杂性: 同时匹配宏观应力 - 应变曲线和细观裂纹模式, 远比只匹配峰值强度困难得多。这要求标定过程必须综合考虑多种数据源。

(3) 尺度效应: 实验室尺度的试件参数如何有效地外推至工程尺度的岩体, 仍是尚未完全解决的难题。

2.2.4. 现场/原位监测与反演方法

包括地质雷达、地震活动/声发射网络、微震监测、原位三轴/井下加载试验、渗流 - 压裂耦合监测等。现场方法优势在于能反映真实地质条件下的裂隙网络、地应力场与多物理场耦合行为, 但常常受测量不确定性、空间分辨率限制及边界复杂性的影响。陈平[1]等强调在水工坝基等工程中必须进行渗流 - 应力耦合分析, 指出现场与数值耦合的重要性。

2.2.5. 方法比较

对于实验(室内)更加直接、可控、观测力强; 但尺度效应、材料差异与成本限制。数值(DEM/FEM 混合)可模拟复杂裂隙相互作用与工程边界条件; 但参数标定困难、计算成本高且结果对模型假设敏感。成像与声学技术可提供微观 - 中观证据, 能揭示裂纹演化细节; 但分辨率与样品制备/扫描条件限制结果解释。物理实验与数值模拟试验结合可以宏观响应与细观参数对比, 达到最佳地拟合这些实验观测结果。但同时要严重依赖经验。现场监测可提供工程尺度真实响应, 便于风险评估; 但数据解释需结合模型并受测量误差与非唯一反演问题影响。

2.3. 衡量裂隙岩体破坏特征的主要指标

为实现可比性与机制解析, 研究中常采用一组定量指标来描述裂隙岩体在压剪加载下的力学行为与破坏演化, 主要包括:

(1) 强度指标

峰值强度(Peak strength): 材料或裂隙体在加载路径上所能承受的最大主应力差(或有效剪应力), 常作为破坏准则与设计验算依据。残余强度(Residual strength): 破坏后稳定滑动或贯通后的剪切承载能力, 受裂隙面摩擦、磨损与位移历史影响, 对滑坡/坝基稳定性评估尤为重要。

(2) 变形与刚度参数

初始弹性模量与切变模量: 描述小变形阶段刚度; 受裂隙开闭与接触状态影响显著。卸载/膨胀行为(体积应变演化、孔隙率变化): 吴刚等指出卸荷可引起体积先压缩后膨胀, 并影响最终失稳模式与变形规模[3]。

(3) 裂纹/损伤阈值与过程特征

裂纹闭合/起裂应力(Crack closure/initiation stress): 裂缝从闭合到初生微裂纹的应力水平, 用于划分弹性、微裂纹萌生与宏观失稳阶段。损伤演化参数(损伤变量、裂纹密度): 通过损伤力学或声发射事件率/能量统计获取, 表征微裂纹的产生与聚集。

(4) 位移/滑移与表面几何演化

滑移位移与滑动摩擦曲线: 直接影响残余承载力与破坏后稳定性。裂隙开度/贯通长度: 描述贯通过程与破坏扩展尺度。

(5) 能量相关指标

弹性应变能、耗散能与断裂能(能量释放率): 用于从能量视角解释破坏临界性与突发性(例如翼裂纹扩展或剪切贯通的能量释放差异)。

(6) 动力学/声学指标

声发射(AE)事件率、累积能量、频谱特征: 常用于早期预警与裂纹活动定位。超声波速度/衰减变化: 反映内部裂缝密度与连通性变化。

(7) 渗流/多场耦合指标(针对含水/渗透耦合问题)

渗透系数变化、孔压演化: 陈平等强调渗流-应力耦合会显著改变坝基等工程体的应力场与破坏阈值, 应作为重要评价量。[2]

2.4. 本节小结

综上, 描述裂隙岩体压剪破坏的理论工具包括连续强度准则、断裂力学、损伤力学及其耦合/混合形式; 研究手段横跨物理试验、先进成像技术、各种数值方法等等, 每种方法在空间尺度、物理过程捕捉能力与工程可行性上存在权衡。衡量裂隙岩体破坏的指标既包括传统的峰值/残余强度、模量等宏观量, 也包括裂纹起裂阈值、能量释放与声发射等微观-动力学量。

3. 单裂隙岩体的破坏特征研究进展

在对复杂裂隙系统进行深入研究之前, 理解单裂隙岩体的破坏特征是至关重要的基础工作。单裂隙岩体的力学行为是裂隙岩体研究的核心单元, 通过剖析单裂隙在不同几何参数、加载条件下的破坏规律, 可以为复杂裂隙网络的研究提供理论依据。本文将总结与分析单裂隙岩体的破坏模式、裂纹扩展机制以及加载条件对其破坏路径的影响。

3.1. 单一裂隙的几何参数对岩体强度、变形行为和破坏模式的控制

(1) 裂隙倾角

裂隙的倾角是决定岩体破坏模式和强度特性的关键几何参数之一。倾角的变化直接影响裂隙面上的应力分布和滑移行为。

倾角较小(接近水平)时, 裂隙主要表现为沿裂隙面的滑移破坏, 破坏强度较高, 裂隙难以承受较大的轴向应力; 倾角较大(接近垂直)时, 岩体在剪切作用下可能会出现更多的拉伸或剪切断裂, 裂隙产生的破坏模式则表现为更多的裂纹扩展、翼形裂纹的产生与扩展[5]。综上, 裂隙倾角对破坏模式和裂纹的扩展路径有显著影响, 同时影响岩体的压缩强度和残余强度。

(2) 裂隙长度

裂隙的长度决定了裂纹扩展的空间范围。较长的裂隙通常会导致岩体的整体强度降低, 容易发生更为显著的宏观破坏。在压缩加载下, 长裂隙会促进裂纹沿裂隙扩展, 导致岩体发生剪切滑移破坏。长裂隙在三轴围压条件下的破坏过程会表现为裂隙起裂后, 裂纹逐渐沿着主应力方向扩展至裂隙的另一端。长裂隙通常会引发翼形裂纹的产生, 进而导致剪切破坏。

(3) 裂隙粗糙度

裂隙面粗糙度的变化对裂隙的摩擦特性有重要影响, 进而影响岩体的强度与破坏模式。粗糙的裂隙面可以增加摩擦力, 抑制裂纹的扩展。粗糙裂隙面通常表现为较高的摩擦力, 裂纹扩展受到一定抑制, 岩体破坏过程中会伴随较高的抗剪强度。光滑裂隙面则可能导致较低的摩擦力, 易于裂纹的扩展和滑移, 进而使岩体在较低的应力下发生失稳。

(4) 裂隙张开度

裂隙的张开度控制裂隙面之间的接触情况, 进而影响岩体的破坏行为。张开度较大的裂隙会减弱裂隙面之间的接触力, 导致裂隙更容易扩展。大张开度裂隙表现为较低的接触强度和较强的扩展趋势, 岩体容易在外力作用下发生裂隙面滑移。小张开度裂隙则表现为更强的接触力, 破坏模式通常表现为裂隙处的压缩破坏或撕裂模式。

3.2. 单裂隙岩体在荷载下的典型裂纹萌生、扩展与贯通机制

(1) 裂纹萌生与扩展

在单裂隙岩体的加载过程中, 裂纹通常从裂隙的尖端或裂隙面的局部弱区开始萌生。在单轴压缩条件下, 裂隙两侧的应力集中促使裂纹从裂隙尖端起裂, 初期裂纹通常为翼形裂纹, 沿裂隙方向扩展。随着加载的增加, 裂纹可能会发展成纵向或斜向的剪切裂纹。在三轴围压条件下, 围压提供的约束作用会使裂纹扩展受到抑制。裂隙面上的张开与滑移行为更加复杂, 裂纹扩展不仅沿裂隙面, 还可能沿与主应力方向成一定角度的路径扩展。此时, 裂隙会产生次生裂纹, 且扩展方向可能转向更有利于剪切滑动的方向。

(2) 裂纹贯通机制

裂隙的贯通通常是由于裂纹的扩展与累积, 最终导致整个岩体的失稳。翼形裂纹: 当裂隙面上的应力达到某一临界值时, 裂纹从裂隙两端迅速扩展并沿主应力方向发展, 形成典型的翼形裂纹。此类裂纹通常会伴随裂隙沿主应力方向的贯通。次生裂纹的形成: 当外部加载或围压条件下, 裂隙发生滑移或变形时, 次生裂纹会沿着主裂隙方向或垂直方向形成。这些裂纹的生成加速了裂隙的扩展, 并最终导致裂隙的贯通。次生裂纹通常表现为撕裂或拉伸模式, 在压剪作用下, 裂纹扩展的同时, 可能会出现剪切贯通和拉伸贯通两种不同类型的贯通方式。

3.3. 加载条件对单裂隙破坏路径的影响

不同的加载条件会显著改变单裂隙岩体的破坏路径与裂纹扩展机制。以下对常见的加载条件进行比较分析。

(1) 单轴压缩加载

在单轴压缩加载下, 裂隙岩体表现出明显的剪切破坏特征。裂纹从裂隙尖端起裂并沿主应力方向扩展, 通常形成翼形裂纹。由于外部加载方向是单一的, 裂隙扩展方向较为明确, 破坏路径较为简单。此时, 岩体的强度主要由裂隙的几何参数(如倾角、长度、粗糙度)控制, 裂纹的扩展较为规则。

(2) 三轴围压加载

在三轴围压下, 围压对裂隙的扩展有显著影响。围压的存在抑制了裂纹的扩展, 裂隙的张开度受到围压的压制, 导致裂纹扩展路径更加复杂。围压作用下, 裂纹不仅沿裂隙面扩展, 还可能沿其他路径(如斜裂纹)扩展。低围压条件下, 裂隙的扩展路径与单轴压缩类似, 但裂隙的扩展速度较慢, 岩体的破坏强度有所提升。高围压条件下, 围压对裂隙的约束增强, 裂隙扩展的方向可能发生变化, 次生裂纹的生成变得更加明显。

3.4. 本节小结

通过对单裂隙岩体破坏特征的总结, 可以得出以下关键结论:

(1) 几何参数的影响: 裂隙的倾角、长度、粗糙度和张开度显著影响岩体的强度、变形行为和破坏模式。倾角和裂隙长度主要控制裂隙的扩展路径和破坏强度, 粗糙度和张开度则影响裂隙面的摩擦特性与滑移行为。

(2) 裂纹扩展与贯通机制: 裂纹通常从裂隙尖端起裂, 并沿主应力方向扩展, 形成翼形裂纹或次生裂纹。围压条件下, 裂隙扩展受到抑制, 但也可能形成更为复杂的裂纹扩展路径。

(3) 加载条件的影响: 单轴压缩与三轴围压加载条件下, 岩体的破坏路径有所不同, 围压条件下裂纹扩展受到约束, 但同时可能引发次生裂纹, 导致更复杂的破坏模式。

4. 多裂隙(重点双裂隙)岩体的破坏特征研究进展

多裂隙岩体的破坏特征在裂隙间相互作用下显得尤为复杂, 尤其是双裂隙系统, 其破坏过程受到裂隙间相互作用、裂隙几何布局、加载条件等多种因素的共同影响。当前的研究聚焦于裂隙间相互作用的机理, 探讨其对岩体强度、变形特性以及破坏模式的影响。本节将结合最新的研究成果, 系统总结多裂隙岩体的破坏特征, 并进一步探讨双裂隙系统在不同条件下的复杂性。

4.1. 双裂隙之间的空间布局如何影响裂纹的萌生位置、扩展路径和贯通模式

(1) 裂隙间距与排列方式

裂隙的空间布局, 尤其是裂隙间距和排列方式(平行、交叉、正交等), 显著影响裂纹的萌生与扩展路径。裂隙间距较小时, 裂隙之间的相互作用增强, 容易发生应力集中现象, 导致裂纹在裂隙交点或相邻区域萌生。裂隙排列方式对扩展路径的影响尤为显著。平行裂隙往往沿裂隙面扩展, 表现为较为简单的贯通模式; 而交叉裂隙或正交裂隙则容易在交点处形成应力集中, 诱发新的裂纹, 扩展路径复杂, 且可能引发剪切破坏[6]。

(2) 岩桥长度与倾角

裂隙间的岩桥(连接两裂隙之间的岩体部分)的长度和倾角是决定裂纹扩展路径和破坏模式的关键因素。岩桥长度对岩体的强度影响较大, 较长的岩桥在加载过程中更易受到破坏。较长岩桥的裂隙系统通常表现为先沿岩桥处发生破裂, 进而导致裂隙贯通。岩桥倾角的变化会影响裂纹扩展的方向性, 倾角较小时, 裂纹更容易沿主应力方向扩展, 而倾角较大时, 裂纹可能沿较为复杂的路径扩展, 表现出非线性扩展。

(3) 裂隙倾角对破坏模式的影响

裂隙的倾角对破坏模式有直接影响。在主裂隙倾角较小(接近水平)时, 裂纹会沿裂隙面发生滑移, 破坏模式较为简单。主裂隙倾角较大(接近垂直)时, 裂隙面上的应力更易集中, 导致裂纹发生翼形裂纹扩展或次生裂纹的形成。这种情况常常发生在裂隙交点或者岩桥处, 产生复杂的剪切破坏。

4.2. 多裂隙相互作用的主要类型及其对岩体整体强度与脆 - 延性转变的影响

(1) 应力屏蔽效应

在多裂隙岩体中, 裂隙间的相互作用可能引发应力屏蔽效应。当裂隙之间的间距较小时, 某些裂隙的应力作用可能会被其他裂隙部分“屏蔽”, 使得某些区域的应力得到减弱, 从而减缓裂纹扩展的速度和破坏的进程。这种效应通常在裂隙数量较多的情况下较为显著, 导致岩体在初期阶段表现出更高的强度。应力屏蔽效应使得裂隙系统在局部区域的失稳被抑制, 破坏通常集中在某些应力集中的部位。

(2) 协同增强效应

与应力屏蔽效应相对的,是协同增强效应。在某些情况下,裂隙之间的相互作用可能导致应力的强化,裂隙间的相互影响形成局部的应力集结区,进而加速裂纹的萌生与扩展。这种效应常见于裂隙之间排列紧密,尤其是在交叉裂隙系统中,裂隙之间的应力交互作用可能导致应力集中,从而加强岩体的局部破坏。

(3) 岩体强度与脆 - 延性转变

多裂隙岩体的破坏过程常常表现出脆 - 延性转变的特点。在较低的加载速率和较低的围压条件下,岩体容易表现为脆性破坏,裂隙易于在高应力集中区域扩展,岩体表现为脆性破坏。随着围压的增加或加载速率的增大,岩体的强度逐渐增大,破坏模式则逐渐转为延性破坏,裂纹扩展变得更加复杂且具有更强的可塑性。这一转变与裂隙间的相互作用密切相关,尤其是在裂隙之间存在较强协同作用的情况下,岩体的破坏过程会更加复杂。

4.3. 多裂隙岩体的破坏模式的独特性和复杂性

与单裂隙岩体相比,多裂隙岩体的破坏模式显得更加复杂,主要体现在以下几个方面:

(1) 多裂隙系统的破坏路径

单裂隙岩体的破坏通常是沿单一裂隙面发生的,而多裂隙岩体的破坏则表现为多个裂隙之间的相互作用。裂隙之间的交点、岩桥部分等区域易形成应力集中区,裂纹可能在交点或岩桥部分萌生,并沿多个裂隙扩展,破坏路径较为复杂。不同裂隙的起裂应力、扩展路径、相互作用使得破坏模式不再单一,常表现为裂纹间的交叉、剪切、拉伸等多种模式的综合体现。

(2) 裂隙交叉的剪切破坏

在交叉裂隙系统中,裂隙交点会产生显著的应力集中,易形成新的裂纹并沿剪切路径扩展。相比单裂隙岩体的剪切破坏,多裂隙岩体的破坏模式更加多变,裂纹不仅沿原裂隙扩展,还可能从交点向其他区域扩展,形成复杂的剪切破坏区域[7]。

(3) 多裂隙系统的力学行为

多裂隙岩体的力学性能通常比单裂隙岩体更为复杂。根据实验结果[8],多裂隙岩体在不同加载条件下表现出不同的强度与变形特性,裂隙数量、裂隙的相互作用、裂隙的几何布局都会显著影响岩体的整体力学行为。在某些情况下,多裂隙系统可能表现出比单裂隙岩体更高的峰值强度,而在其他条件下(如裂隙数量过多),其强度可能低于单裂隙岩体。

(4) 破坏模式的多样性

在多裂隙岩体的破坏过程中,不仅会产生传统的剪切破坏,还可能出现拉伸破坏、裂隙贯通、剪拉混合等复杂的破坏模式。特别是在双裂隙或交叉裂隙系统中,裂纹可能呈现出拉剪混合贯通的破坏模式,表现出复杂的应力 - 应变关系[6]。

4.4. 本节小结

在多裂隙岩体的研究中,裂隙之间的相互作用是决定岩体破坏模式的关键因素。裂隙的空间布局、裂隙间距、岩桥的长度与倾角等几何参数都会影响裂纹的扩展路径与最终的破坏模式。通过分析裂隙之间的应力屏蔽效应与协同增强效应,研究者能够更好地理解多裂隙岩体的力学行为及其脆 - 延性转变。相比单裂隙岩体,多裂隙岩体的破坏模式表现出更强的复杂性和多样性,

5. 研究现状评述与展望

在裂隙岩体的破坏机理研究中,学术界已逐步形成了一些共识,并取得了显著进展。然而,当前的

研究仍存在明显的局限性和研究空白,尤其是在复杂裂隙网络、裂纹萌生与扩展的细致观察,以及动静荷载耦合作用下的破坏机制等方面。本节将总结当前学界的研究进展,并明确指出现有研究的不足之处,同时引出该领域未来需要解决的科学问题与创新点。

5.1. 当前学界对裂隙岩体破坏机理的共识

(1) 翼形裂纹的普遍性

在裂隙岩体破坏的过程中,翼形裂纹的形成被认为是普遍存在的现象。大量的实验研究表明,无论是单裂隙岩体还是多裂隙岩体,裂纹在应力作用下常常呈现出翼形扩展的模式,尤其是在单轴压缩条件下。翼形裂纹的形成与岩石的内部微结构、裂隙的几何特征以及应力场分布密切相关[6][9]。这一现象为裂隙岩体的破坏分析提供了重要的理论依据。

(2) 裂隙倾角的关键作用

裂隙倾角是影响裂隙岩体力学行为的重要因素。实验表明,裂隙倾角的变化直接影响岩体的破坏模式和强度。特别是在交叉裂隙或双裂隙系统中,裂隙的倾角对裂纹萌生位置、扩展路径和最终的贯通模式有着显著影响[10]。当裂隙倾角较小时,裂隙的滑移破坏更为显著;而倾角较大时,裂隙的扩展路径则更为复杂,可能表现为剪切或拉伸破坏的混合模式。

(3) 多裂隙相互作用的影响

对于多裂隙岩体的破坏机理,研究发现裂隙之间的相互作用对于破坏过程至关重要。裂隙的相对位置、间距、交叉方式等几何因素决定了裂纹的扩展路径及最终的破坏模式。现有研究普遍认为,裂隙间的协同增强效应和应力屏蔽效应是影响破坏行为的主要因素,这两种效应在不同裂隙系统中交替作用,导致破坏模式的多样性[6][8]。

5.2. 现有研究的局限性与空白

尽管目前的研究已取得了一些显著的进展,但仍然存在以下几个方面的局限性和研究空白:

(1) 对复杂三维裂隙网络的研究不足当前大部分研究集中于单一裂隙或简单的双裂隙系统,而对于复杂的三维裂隙网络的研究明显不足。裂隙岩体中裂隙的分布、形态和相互作用通常具有较高的空间复杂性,尤其是在实际工程应用中,裂隙系统往往呈现出三维不规则分布,导致破坏过程更加复杂。因此,复杂三维裂隙网络的力学行为仍是一个亟待解决的重要问题。

(2) 裂纹萌生和初始扩展的实时、精细化观测不足尽管已有研究采用了不同的实验方法探讨了裂隙岩体的破坏特征,但大多数研究聚焦于裂纹扩展后的宏观力学行为,裂纹萌生和初始扩展的实时观测依然是一个空白领域。裂纹初期的扩展通常受到微观因素的影响,精细化的实验观察对于揭示岩体破坏过程中的微观机制至关重要。然而,由于实验技术的限制,现有研究难以进行精确的裂纹萌生和扩展过程追踪,尤其是针对动载荷下裂隙岩体的微观行为。

(3) 动静荷载耦合作用下的破坏特征研究不足。现有研究大多集中于静态荷载作用下的裂隙岩体破坏,而对于动静荷载耦合作用下的裂隙岩体破坏特征研究尚显不足。许多工程实践中,裂隙岩体承受的荷载往往是动态的,例如地震、爆破等动态事件,这些荷载对岩体的影响与静态荷载大不相同。因此,动静荷载耦合作用下裂隙岩体的破坏机理仍是一个亟待深入探讨的研究方向。

(4) 数值模拟方法的精度与适用性。目前,数值模拟方法,如有限元法(FEM)、离散元法(DEM)、颗粒流法(PFC)等在裂隙岩体破坏机理研究中已得到广泛应用,但由于裂隙形态复杂、相互作用多样,这些模拟方法仍存在精度不足和适用范围有限的问题。特别是在面对复杂的裂隙网络时,现有的数值模拟方法常常难以准确反映裂纹的萌生、扩展过程及其与岩体的相互作用。

5.3. 该领域未来需要解决的科学问题与创新点

针对上述研究空白, 该领域未来将需要解决以下几个科学问题, 并提出创新的研究方案:

(1) 复杂三维裂隙网络的力学行为研究

未来需要通过三维数值模拟和实验验证相结合, 研究复杂裂隙网络的破坏机制, 探索裂隙网络的空间布局、裂隙间的相互作用对岩体整体破坏行为的影响。与现有研究不同, 未来需要聚焦于实际工程中常见的复杂裂隙系统, 并通过精确的数值模拟揭示裂隙间复杂相互作用的细致机制。

(2) 裂纹萌生与初始扩展的实时观测

未来需要采用高精度声发射技术与数字图像相关技术(DIC)等先进技术, 精确记录裂纹的萌生与初始扩展过程。这一创新点能够为裂隙岩体破坏提供更加精细化、实时的观测数据, 揭示裂纹萌生与扩展的微观机制。

(3) 动静荷载耦合作用下的破坏特征研究

针对动静荷载耦合下的岩体破坏行为, 未来需要通过动态试验与动态数值模拟相结合, 研究裂隙岩体在动态荷载作用下的破坏机制, 探索动静荷载耦合对岩体强度和变形行为的影响, 为实际工程中的安全评估提供理论依据。

5.4. 该领域未来研究的意义与价值

该领域未来研究将深入揭示裂隙岩体的破坏机理, 特别是对于复杂三维裂隙网络的力学行为和裂纹萌生与扩展的精细化过程提供新的理论依据。研究结果将为岩体力学、岩土工程、地下工程等领域的设计与稳定性评估提供重要参考, 具有显著的理论价值和工程应用价值。通过解决当前研究中的关键问题, 也将推动裂隙岩体破坏机理研究的深入发展, 并为裂隙岩体的工程应用提供新的视角与方法。

参考文献

- [1] 肖桃李, 李新平, 郭运华. 三轴压缩条件下单裂隙岩石的破坏特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3251-3256.
- [2] 陈平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994(4): 299-308.
- [3] 吴刚, 孙钧. 卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998(6): 615-621.
- [4] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1-16.
- [5] 王国艳. 采动岩体裂隙演化规律及破坏机理研究[D]: [博士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.
- [6] 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.
- [7] 吴文渊, 贺桂成, 陈科旭, 等. 非共面断续裂隙类岩石试件破断试验与分析[J]. 有色金属工程, 2021, 11(3): 107-116.
- [8] 刘相如. 断续裂隙岩石常规三轴压缩力学行为及破坏机理研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [9] 王利戈. 多裂隙岩体的破坏机理试验及数值分析研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.
- [10] 武旭, 王帆, 席迅, 等. 正交型交叉裂隙岩石强度特征与破裂机理试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2681-2690.