

不同含水状态下层理灰岩变角剪切力学特性及微震信号特征研究

张 勇^{1,2}, 李麟玮^{1,2}, 安友豪^{1,2}, 王凯^{1,2}, 向喜琼^{1,2}, 廖德武³

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州地矿基础工程有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要:【目的】顺层岩质滑坡的稳定性及其破坏模式与层状岩体剪切力学行为密切相关, 为深入揭示其相关内在机理, 聚焦于探讨不同剪切角度与含水状态对层理灰岩剪切力学行为的影响。【方法】采用变角剪切试验, 结合数字图像相关 (DIC) 与微震监测技术, 对天然与饱和两种含水状态下不同剪切角度 ($30^{\circ} \sim 60^{\circ}$) 的层理灰岩试样进行分析, 系统研究其力学特性、应变场演化过程及微震信号特征。【结果】结果表明: (1) 随剪切角度增大, 试样峰值剪应力、法向应力及剪切应力均逐渐降低, 且破坏模式由试样岩石基质剪断向试样层理面滑移转变; (2) 在较低剪切角条件下, 试样易形成剪切-张拉复合型破裂, 破坏形态较为破碎, 随着剪切角增大, 法向应力作用减弱, 破坏模式逐步转化为以沿层理面剪切为主导的单一滑移模式; (3) 天然状态下微震活动呈现“活跃-平静-前兆-主震”的清晰序列, 信号峰值高, 表现为典型脆性破坏; 而饱和状态下水分润滑作用使微震活动持续活跃, 但信号峰值明显降低, 具有由脆性破坏向塑性破坏转化的微震信号特点; (4) 剪切角度主导了层理灰岩试样变形破坏模式的宏观表现, 低角度下活动分散, 累积计数高, 高角度下微震前兆信号集中, 平静期显著, 破坏更具突发性。【结论】研究成果通过揭示不同含水状态下层理灰岩变角剪切力学特性及微震信号特征, 为降雨作用下顺层岩质边坡稳定性评价与灾害预警提供了理论与数据支撑。

关键词: 层理灰岩; 变角剪切; 剪切角度; 含水状态; 力学特性; 微震信号特征; 降雨; 灾害预警

中图分类号: P642.3

文献标志码: A



开放科学 (资源服务) 标志码 (OSID):

Variable-angle shear mechanical properties and

microseismic signal characteristics of bedded limestone under different water-bearing states

ZHANG Yong^{1,2}, LI Linwei^{1,2}, AN Youhao^{1,2}, WANG Kai^{1,2}, XIANG Xiqiong^{1,2}, LIAO Dewu³

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. Guizhou Geological and Mineral Foundation Engineering Co., Ltd., Guiyang 550081, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] The stability and failure modes of bedding rock slopes are closely related to the shear mechanical behavior of layered rock masses. To thoroughly reveal the underlying mechanisms, the effects of different shear angles and water-bearing states on the shear mechanical behavior of bedded limestone are investigated. [Methods] Variable-angle shear tests were conducted, combining with digital image correlation (DIC) and microseismic monitoring techniques, on bedded limestone specimens under both natural and saturated water-bearing states at different shear angles (30°–60°). Their mechanical properties, strain field evolution, and microseismic signal characteristics were systematically studied. [Results] The results demonstrated that: (1) with increasing shear angle, the peak shear stress, normal stress, and shear stress of the specimens gradually decreased, while the failure mode transitioned from shear fracture of the rock matrix to slip along the bedding planes. (2) At lower shear angles, the specimens tended to develop shear-tensile composite fractures with relatively fragmented failure patterns. As the shear angle increased, the effects of normal stress weakened, and the failure mode gradually transformed into a single slip mode dominated by shear along the bedding planes. (3) Under the natural state, microseismic activity exhibited a clear sequence of “active-quiet-precursor-mainshock” with high signal peaks, indicating typical brittle failure. Under the saturated state, the lubricating effects of water caused microseismic activity to remain continuously active, but the signal peaks were significantly lower, demonstrating microseismic signal characteristics of a transition from brittle to plastic failure. (4) The shear angle dominated the macroscopic deformation and failure mode of bedded limestone specimens. At lower angles, microseismic activity was dispersed with high cumulative counts, while at higher angles, microseismic precursor signals became concentrated with a significant quiet period, resulting in more sudden failure. [Conclusion] The research findings provide theoretical and data support for stability evaluation and disaster early warning of bedding rock slopes under rainfall conditions by revealing the variable-angle shear mechanical properties and microseismic signal characteristics of bedded limestone under different water-bearing states.

Keywords: bedded limestone; variable-angle shear; shear angle;

water-bearing state; mechanical properties; microseismic signal characteristics; rainfall; disaster early warning

收稿日期: 2025-10-31; **修回日期:** 2025-12-23; **录用日期:** 2025-12-24; **网络出版日期:** 2026-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42367022); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般127, 黔科合基础-ZK[2023]一般066)

作者简介: 张勇(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土体稳定性方面研究。E-mail: 15285997868@163.com

通信作者: 李麟玮(1993—), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩土体稳定性与地质灾害预测预报研究。E-mail: lwli@gzu.edu.cn

© Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

0 引言

薄层状构造灰岩分布广泛, 其力学行为常表现出随层理倾角变化的显著各向异性^[1-3], 给相关区域的工程建设带来了重大挑战。究其原因, 主要是在构造运动作用下, 薄层状构造灰岩内部的层理界面易产生层间剪切错动。在此情况下, 加之受到降雨或地下水等环境因素的影响, 层间错动带内的岩土物质往往易发生软化与泥化, 导致其抗剪强度参数显著下降, 进而诱发岩体变形与裂隙发育。这些裂隙在长期地质应力下扩展、贯通, 最终形成沿层理的岩体软弱面, 使上部岩体与下部母岩逐渐脱离^[4-5]。因此, 层理面尤其容易成为控制薄层状灰岩坡体的关键结构面, 其力学性能的演化直接控制着整个岩质坡体的稳定性与破坏模式。

岩体的宏观破坏是复杂应力条件下内部损伤累积至临界阈值的结果, 其中剪切破坏是主要的失稳形式之一, 主要由压应力、剪应力或其共同作用引发^[6-7]。为揭示变角剪切下岩石的力学响应与变形破坏机制, 学者开展了广泛研究。凡奥奇等^[8]对变角剪切作用下磷块岩的力学响应机制进行研究, 结果表明剪切角度影响破坏模式。张塑彪等^[9]发现花岗岩的剪切破坏具有脆性特征, 且随剪切角度增大, 其峰值荷载减小, 各变形阶段缩短。针对层理结构对岩体抗剪强度参数的控制性作用问题, 闫宪洋等^[10]通过对多岩层损伤演化物理模型试验分析了在垂直匀速加载作用下多层砂岩裂缝产生—扩展—贯通全过程。张永泽等^[11]通过对页岩的物理力学特征及其各向异性, 指出当倾角为 0° 、 45° 和 90° 时, 破坏模式分别为张拉破坏、沿着层理面的单一剪切破坏、贯穿层理面的张拉破坏。YOU等^[12]研究指出层理岩样的剪切参数随层理角度呈“U”形分布。此外, 处于富水环境中的岩体, 受地下水渗透作用影响, 水-岩作用易导致其力学特性劣化, 并加剧岩体失稳。骆祚森等^[13]和贾汝铎等^[14]的研究均表明, 含水率增高会显著劣化岩体的抗剪强度与微观结构。综上, 不难发现, 不同含水状态下层理岩样在变角剪切作用下的力学行为存在明显差异^[15-18], 具有重要的研究价值。

当前, 多种现代监测技术被广泛应用于捕捉岩石破坏过程中的力学响应与损伤演化。于洪彪等^[19]和陈博等^[20]结合数字图像相关法全场应变监测, 系统揭示了灰岩裂纹的萌生、扩展及分阶段演化规律。数字图像相关技术以其全场、非接触及高精度等特点, 被广泛用于揭示岩石表面应变局部化与裂纹扩展行为^[21-22]。同时, 为进一步捕捉岩石破坏过程中的不可见内部损伤, 微震技术已成为实现实时监测的有效手段。刘玉春等^[23]研究表明, 在破裂发展阶段微震信号事件数与信号强度显著上升; 而饱和含水状态下煤岩的峰值强度及其冲击倾向性均低于自然干燥状态, 微震信号事件数与强度也相应降低。SHI等^[24]发现, 微震计数率的突增往往指示花岗岩宏观裂缝的形成, 计数率大小可反映其宏观破坏强度。通过分

析微震活动的时序演化特征,可有效反演岩石内部裂隙从萌生、扩展至贯通的全过程。累积微震事件呈指数增长趋势,通常与内部裂纹的加速扩展密切相关^[25-30]。DIC与微震监测的组合实现了优势互补,能够全面捕捉从表面应变局部化到内部裂纹萌生、扩展直至贯通的破坏演化全过程,为揭示不同含水状态下层理灰岩变角剪切破坏模式奠定了基础。

综上所述,针对含水状态与剪切角度影响层理灰岩力学行为的关键问题,本研究设计了多技术融合的室内试验方案。通过充分利用力学加载设备、DIC光学测量与微震监测,系统获取了不同工况下层理灰岩试样的宏观力学响应、表面变形场与内部微破裂信息,揭示了其变角剪切过程中的变形破坏模式与微震信号演化特征。研究成果旨在为层状岩质边坡的稳定性判断与失稳预警提供理论参考与技术依据。

1 试样材料、试验设备及方案设计

1.1 取样地点

如图 1(a)所示,本次试验岩石试样取自贵州省六盘水市水城区勺米镇范家寨村保卫组某层理灰岩顺层岩质滑坡。试样整体呈青灰色,具有明显的层理结构,位于三叠系中下统嘉陵江组(T_{1-2j})底层,其具体矿物成分统计如表 1 所列。不难发现,该试样方解石占比 60.0%,黏土矿物占比 11.2%,石英占比 16.9%,铁白云石占比 11.9%,为典型的含泥含云层理灰岩。

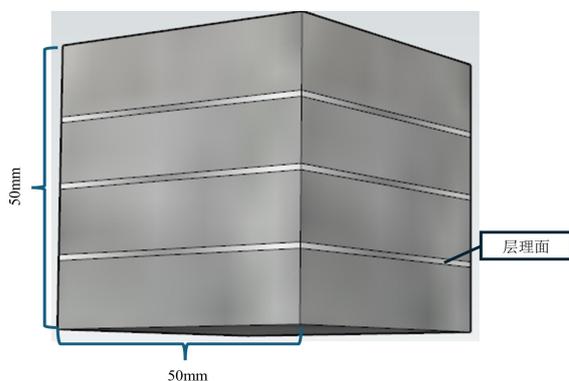
该岩样原状试样的室内基础物理性质试验结果表明,试样孔隙率为 2.55%,相对密度为 2.558 g/cm³,天然状态下含水率为 0.93%,饱和状态含水率为 1.87%。在后续试验制备过程中,为制取具有多个连续水平状层理的灰岩岩样,严格垂直于试样平行层理方向进行切割制样,如图 1(b)(c)所示,制备好的试样尺寸为 50mm×50mm×50mm。为最大限度降低试样离散性对试验结果的影响,不同含水状态下每个剪切角度均制备 3 个试样,共制备 24 个试样。如图 1(d)所示,制作的试样为含层理灰岩,加工时确保其层理面与试验装置中上剪切盒的底面平行,从而使预设的剪切面与层理面始终平行一致。通过改变加载角度 θ ,即预设剪切面法向与轴向荷载方向的夹角,研究沿层理方向的变角剪切强度特性。



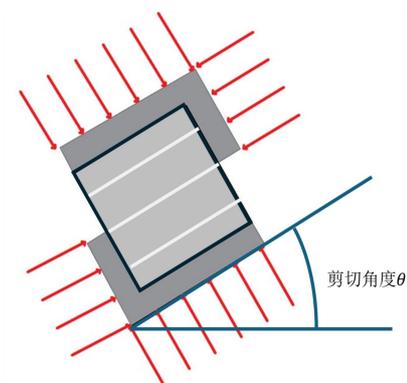
(a) 贵州省六盘水市勺米镇顺层滑坡



(b) 制备层理灰岩试验



(c) 岩样层理及尺寸示意图



(d) 剪切角度示意图

图 1 滑坡现场、试样尺寸及剪切角度说明

Fig.1 Schematic diagrams of landslide site, specimen dimensions, and shear angle

表 1 矿物组分统计

Table 1 Statistics of mineral composition

类型	组分	含量/%
非黏土矿物	石英	16.9
	方解石	60.0
	铁白云石	11.9
黏土矿物	伊利石	4.3
	高岭石	0.2
	绿泥石	1.4
	伊/蒙混层	5.3

1.2 试验设备、试验流程及试验方案

如图 2 所示, 在本试验中采用 AWM-1000kN 型微机控制电液伺服万能试验机和变角剪切夹具进行层理灰岩剪切试验。在变角剪切过程中, 采用 SmartSolo 公司生产的三分量微震信号传感器 (型号为 IMU-3C, 采样率为 1000 Hz, 前置增益为 18 dB) 采集剪切过程中的微震信号, 并借助 MATLAB 平台进行数据分析处理。同时, 通过高速工业摄像机 (型号为 MV-CH120-20UC, 采集频率为 20fps) 拍摄层理状灰岩的剪切变形、破坏过程, 并

利用 VIC-2D 软件处理图像，获得变角剪切过程中的试样表面主应变场监测结果。

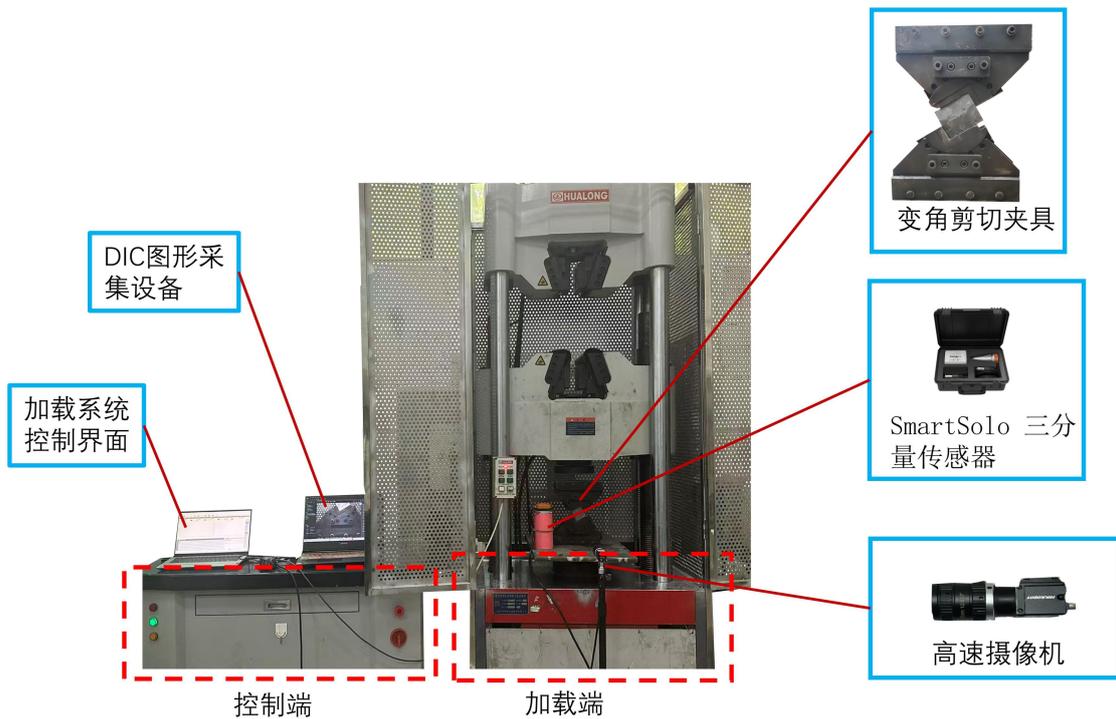


图 2 试验设备

Fig.2 Schematic diagram of test setup

不同含水状态下层理灰岩变角剪切试验的流程如下。

(1) 层理灰岩散斑制备：采用黑色哑光耐高温漆在层理灰岩试件表面均匀喷涂密集分布的黑色散斑。

(2) 层理灰岩试样安装：将夹具剪切角调整至 30° ，置于微机控制电液伺服万能试验机中，安装立方体试样并施加预应力，确保夹具与试样系统稳定。

(3) 剪切设备加载设置：设置压力试验机为恒位移加载模式，以 5 mm/min 速率预加载至轴向应力达 1 kN ，判定试验正式启动；随后切换至 0.1 mm/min 加载速率进行层理灰岩试样剪切试验。

(4) 多角度剪切试验：每个含水状态及剪切角度下进行两组平行试验。如图 3 所示，在完成 30° 剪切角下不同含水状态试样的测试后，依次将剪切角度 θ 调整为 40° 、 50° 和 60° ，重复上述试验流程直至完成所有试样的剪切试验，具体的变角剪试验方案如表 2 所列。

表 2 变角剪试验方案

Table 2 Variable-angle shear test schemes

岩样状态	样品编号	样品尺寸/mm	天然质量 m/g	饱和质量 m/g	变角剪夹具角度/ $^\circ$
天然含水状态	R1-1	50.04×49.97×50.16	318.38	—	30
	R1-2	50.10×49.98×49.95	321.92	—	30
	R1-3	50.02×50.11×50.09	339.00	—	30
	R2-1	49.95×50.09×49.97	318.87	—	40
	R2-2	50.01×50.13×50.11	328.06	—	40
	R2-3	49.97×50.02×50.04	327.50	—	40
	R3-1	50.19×49.43×49.87	311.41	—	50

	R3-2	49.94×50.09×50.01	311.21	—	50
	R3-3	49.10×49.40×50.04	49.10	—	50
	R4-1	49.87×50.04×50.29	326.06	—	60
	R4-2	50.18×49.97×50.20	326.53	—	60
	R4-3	50.06×49.81×50.02	323.43	—	60
饱和含水状态	H1-1	50.28×50.05×49.91	320.6	323.5	30
	H1-1	50.12×50.53×49.43	322.6	335.9	30
	H1-3	49.12×50.03×50.20	328.6	335.9	30
	H2-1	50.43×50.06×50.28	328.9	332.7	40
	H2-2	50.11×50.13×50.30	329.5	333.3	40
	H2-3	50.05×50.03×49.73	327.5	329.3	40
	H3-1	50.04×50.36×50.06	323.6	326.9	50
	H3-2	50.03×50.02×50.27	321.2	324.1	50
	H3-3	50.10×49.87×50.06	331.2	334.1	50
	H4-1	50.14×50.15×50.20	326.0	329.7	60
	H4-2	50.18×50.05×50.51	327.0	330.8	60
	H4-3	50.07×50.06×49.95	321.0	322.8	60

2 试验结果分析方法

2.1 变角剪切试验分析方法

在本研究中,通过改变剪切模具和水平向间的夹角来进行层理灰岩的变角剪切试验。根据《岩石物理力学性质试验规程》(DZ/T 0276.25—2015),同时考虑到承压板与变角剪切夹具间的摩擦力作用,变角剪切试验过程中试件发生剪切破坏时的剪应力 τ 和正应力 σ 计算公式分别如下

$$\tau = \frac{P}{A}(\sin \theta - f \cos \theta) \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{P}{A}(\cos \theta - f \sin \theta) \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{nd} \quad (3)$$

式中, P 为峰值载荷(N); A 为岩样剪切面面积(mm^2); θ 为剪切角度($^\circ$); f 为滚轴摩擦系数; n 为滚轴根数; d 为滚轴直径(mm)。

试验结束后,根据摩尔-库仑定律,利用最小二乘法将试验测试得到的平均正应力(σ)和剪应力(τ)进行线性拟合,继而可以计算得出黏聚力 c 与内摩擦角 φ 。公式为

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (4)$$

式中, φ 为岩样内摩擦角($^\circ$); C 为岩样黏聚力(MPa)。

2.2 应变场分析方法

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术是一种基于非接触式光学测量的全场变形分析方法。本文借助VIC-2D分析软件,通过对物体表面变形前后采集的散斑图像进行相关匹配计算,获取全场位移分布,并基于拉格朗日描述计算应变场。在VIC-2D分析流程中,首先将参考图像划分为一系列均匀分布的网格子区。设参考图像中某一子区的中心点为 $A(x_0, y_0)$,其灰度分布记为 $f(x, y)$;变形后对应子区的中心点移动至 $B(x_0',$

y_0), 灰度分布为 $f(x', y')$ 。软件通过数字图像相关算法, 追踪以 A 为中心的区域 $f(x, y)$ 在变形后图像中的对应位置 $f(x', y')$, 从而确定该子区的位移。对于参考子区内任意一点 $C(x, y)$, 变形后移至 $C'(x', y')$, 两者之间的坐标映射关系可表示为

$$x' = x + u(x, y) \quad (5)$$

$$y' = y + v(x, y) \quad (6)$$

式中, $u(x, y)$ 和 $v(x, y)$ 分别为该点在 x 和 y 方向上的位移分量。

在 VIC-2D 软件中, 通过图像相关计算获得全场位移分布后, 进一步基于拉格朗日应变张量进行应变分析。拉格朗日应变张量 E 的定义为

$$E = \frac{1}{2}(F^T F - I) \quad (7)$$

式中, F 为变形梯度张量, I 为单位张量。变形梯度张量 F 由位移场的梯度计算得出:

$$F = I + \nabla u \quad (8)$$

在 Vic-2D 软件中, 应变场的计算通常基于位移场数据通过数值方法实现。本文采用软件内置的逐点最小二乘拟合法进行应变分析。该方法的基本思路是: 在位移场中选取一定范围的数据窗口, 利用二次多项式函数对该窗口内的位移分布进行最小二乘拟合, 通过拟合得到的位移梯度计算中心点的拉格朗日应变张量分量。将该拟合过程依次应用于全场所有计算点, 即可获得整个观测区域内各点的应变分布。该方法能有效抑制位移数据中的噪声, 具有良好的数值稳定性, 适用于复杂变形场的应变分析。

2.3 微震信号特征分析方法

在声发射计数理论的基础上, 本研究引入了微震计数 (MSC) 的概念, 用于描述岩石破坏过程中微震 (MS) 信号的活跃度。在任意 MS 采样时间点 t , 若信号幅值 $A(t)$ 超过阈值, 则该时刻的 MS 信号被认定为有效计数; 反之, 则不计数。公式为

$$MSC = \begin{cases} 1, A(t) > y \\ 0, A(t) < y \end{cases} \quad (9)$$

岩石破坏全过程中 MS 计数的累积值称为累积微震计数 (CMSC), 可以大致反映岩石的破坏程度, 计算公式为

$$CMSC(t) = \sum_{i=0}^t \{A(t) \geq y\} \quad (10)$$

CMSC 可作为岩石破坏全程中破坏程度的近似度量。在微震监测中, MSC 作为核心特征参数, 能有效反映岩石内部裂隙形成与扩展过程中释放的能量大小。本文通过系统整理与分析试验数据, 为消除数据采集系统及传感器灵敏度差异对分析结果的影响, 并实现信号幅度的标准化处理, 采用了一种基于信号归一化的 MSC 方法。首先, 对原始 MS 信号进行幅度归一化处理, 将其幅值统一转换至 $[-1, 1]$ 的区间。归一化系数为分析时间窗口内信号的最大绝对值。随后, 基于归一化后的信号设定 MSC 阈值。该阈值通过对试验前测得的纯背景噪声段进行同样的归一化处理, 并计算其统计特性 (如振幅) 来确定。最终, 将计数阈值设定为略高于归一化后噪声的典型幅值。

在本研究中, 后文 (见图 12、图 13) 展示了 8 个典型灰岩试样剪切全过程的 MSC 变化, 其值是将 MS 信号幅值设定为不同的阈值后进行归一化处理得到的数值。将计数阈值设置为 y , 其中天然含水状态下的阈值分别是 $y_{R1-1}=0.030$ 、 $y_{R2-1}=0.011$ 、 $y_{R3-1}=0.039$

和 $y_{R4-1}=0.051$, 饱和含水状态下的阈值分别是 $y_{H1-1}=0.040$ 、 $y_{H2-1}=0.078$ 、 $y_{H3-1}=0.075$ 和 $y_{H4-1}=0.102$, 基于此, 进一步计算微震计数率与累积微震计数, 旨在探讨不同角度水平下层理灰岩试样在加载作用下 MSC 的演化特征。

3 试验结果

3.1 不同含水状态下层理灰岩变角剪切应力应变特性

在本研究中, 受限于整体篇幅, 每个含水状态和剪切角度下仅选择一个试验进行应力应变曲线与应变场分析。其中, 对于天然含水状态试样, 选择 R1-1 (30°)、R2-1 (40°)、R3-1 (50°) 和 R4-1 (60°) 四个试样进行分析; 对于饱和含水状态试样, 则选择 H1-1 (30°)、H2-1 (40°)、H3-1 (50°) 和 H4-1 (60°) 四个试样进行分析。

大量研究人员对岩石单轴压缩试验和三轴剪切试验进行研究^[2-10], 将其应力-应变曲线划分为四个阶段, 虽然具体描述形式略有不同, 但其揭示的岩石剪切过程中孔隙压缩、弹性变形、损伤发展及岩石破坏的本质是相同的。因此, 在本文中也采用相同的应力-应变曲线分析框架对压力机记录的岩石变角剪切过程进行分析。具体来说, 如图 3—图 10 所示, 根据应力-应变曲线的斜率变化, 可将层理灰岩的变角剪切过程划分为四个阶段: (1) 压密阶段 (即第Ⅰ阶段), 随着应变增加, 曲线斜率增大, 试件中的原始裂纹、孔隙、节理开始闭合; (2) 线弹性阶段 (即第Ⅱ阶段), 试件整体呈现弹性, 剪应力与剪应变呈固定比例增长; (3) 塑性屈服与稳定破裂阶段 (即第Ⅲ阶段), 岩石内部微裂纹开始逐渐增加, 甚至出现局部破裂, 但整体并未完全破坏, 此时曲线斜率开始出现一定程度的降低, 并在岩石达到峰值抗剪强度时趋于平缓; (4) 峰后破坏阶段 (即第Ⅳ阶段), 岩石在达到其峰值剪切强度后, 曲线斜率急速下降, 岩石完全破坏。在后文中, 将通过详细分析这四个阶段对应的四个特征时刻 (即 P1、P2、P3 和 P4 时刻) 的试样应变场分布, 系统地阐明天然与饱和含水状态下层理灰岩变角剪切过程中的应力应变特性。

如图 3 和图 4 所示, 在 30° 剪切角条件下, 天然与饱和含层理岩石试样的主应变场演化过程因水分影响而呈现出差异: (1) 第Ⅰ阶段, 天然试样表现为均匀的低应变场, 而饱和试样已出现沿层理方向的集中应变区; (2) 第Ⅱ阶段, 天然试样应变场表现出明显的各向异性, 出现垂直层理的应变集中带, 而饱和试样沿层理的集中应变带则进一步扩大; (3) 第Ⅲ阶段, 天然试样发展出明显的垂直层理应变集中带, 并出现宏观张拉裂隙, 而饱和试样沿层理应变带虽贯通但向基质扩展有限; (4) 第Ⅳ阶段, 天然试样呈现剪张复合破坏, 并伴随多条高角度张裂隙, 而饱和试样则呈现出压剪复合破坏。上述结果表明, 在试样饱和后, 水分通过软化层理间物质, 使岩石破坏模式由剪张复合型向以剪切主导的压剪复合型转化。

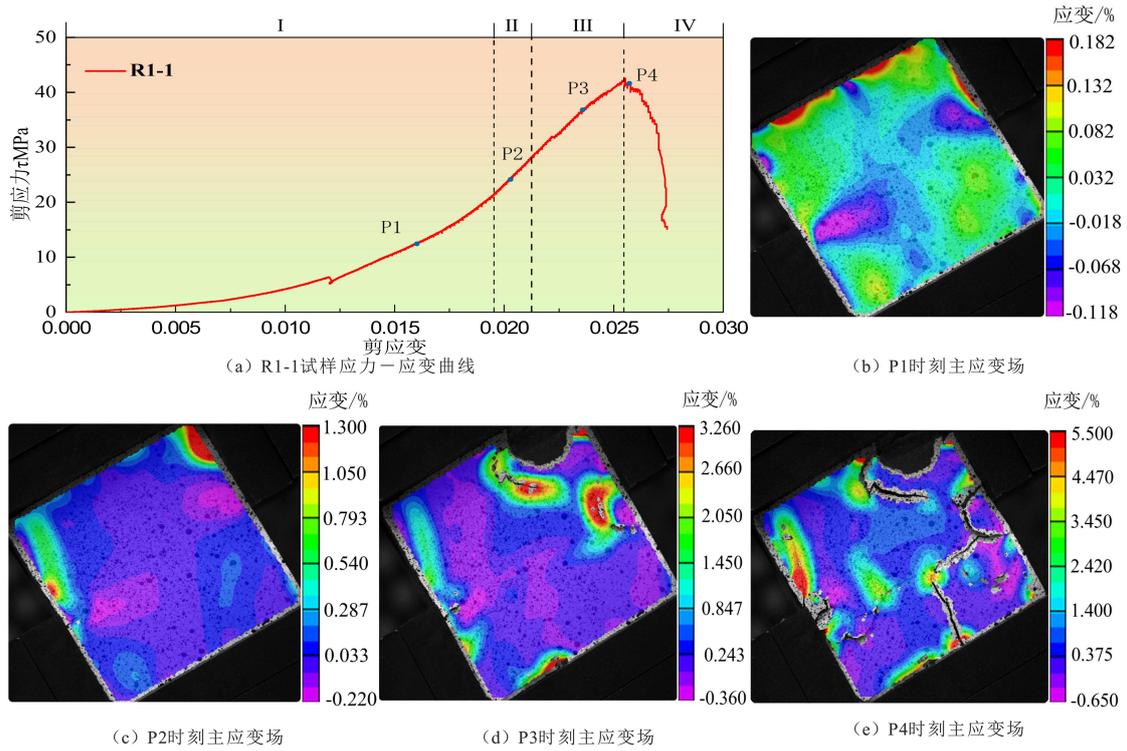


图 3 R1-1 试样的应力-应变曲线及其特征时刻主应变场分布情况

Fig.3 Stress-strain curve of specimen R1-1 and its corresponding distribution of principal strain field at characteristic moments

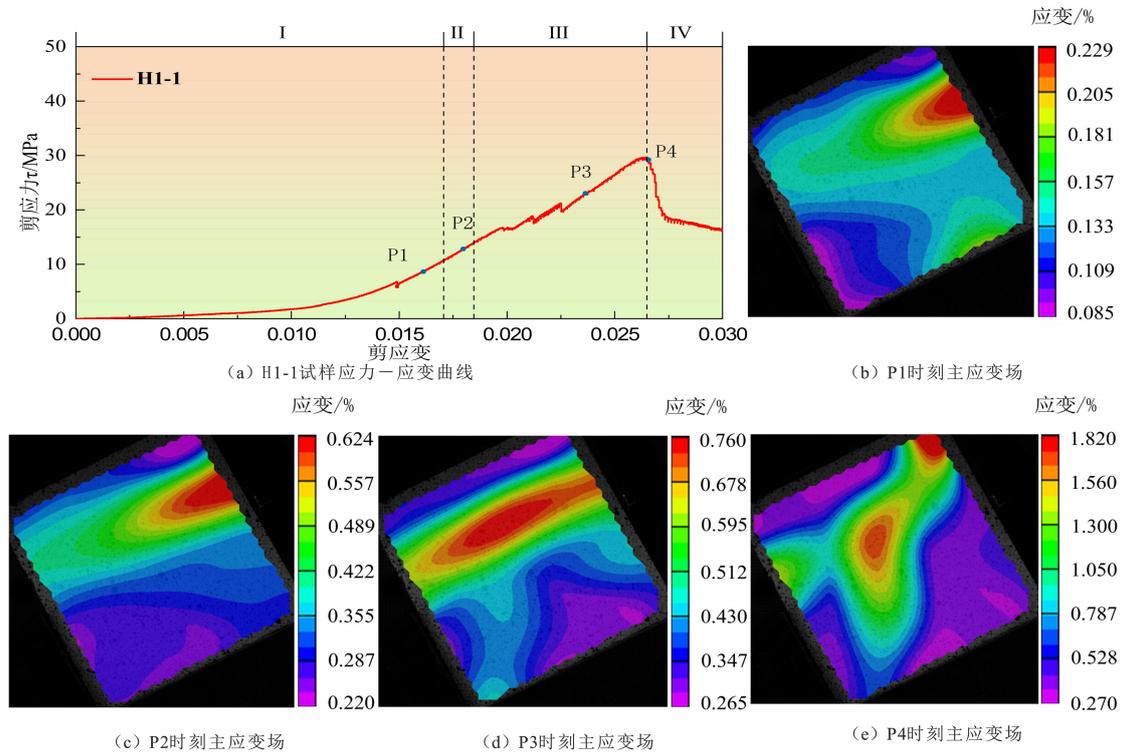


图 4 H1-1 试样的应力-应变曲线及其特征时刻主应变场分布情况

Fig.4 Stress-strain curve of specimen H1-1 and its corresponding distribution of principal strain field at characteristic moments

如图 5 和图 6 所示，在 40° 剪切角条件下，天然与饱和含层理岩石试样的主应变场演

化过程因水分影响而呈现出与 30°条件不同的显著差异：（1）第I阶段，天然试样主应变场整体呈压缩特征，而饱和试样虽同样处于整体压缩状态，但沿层理方向已形成较为明显的局部应变集中区，这充分反映了水分对层理面强度的弱化作用，使其成为变形的优势路径；（2）第II阶段，天然试样垂直于层理方向的应变响应明显增强，饱和试样在垂直层理方向的应变同样急剧增加，且沿层理的应变集中也有所增大；（3）第III阶段，天然试样出现竖向应变集中带与层理面应变集中带的连通，而饱和试样的应变则进一步集中于层理方向的集中带，并显示出沿层理延伸的趋势；（4）第IV阶段，天然试样表现为以沿层理面剪切为主的剪切破裂，伴生多条高角度竖向张性裂隙，而饱和试样也是以沿层理方向贯通的宏观应变带为主，且岩石基质裂纹与层理面相互连接形成完整破裂网络，体现了层理面作为现存软弱结构面对破裂发展的控制作用。上述结果表明，在试样饱和后，水分通过软化层理间物质，使岩石破坏模式由单一层理面滑移剪切主导的压剪复合型破坏转化为多层次层理面滑移剪切主导的压剪复合型破坏。

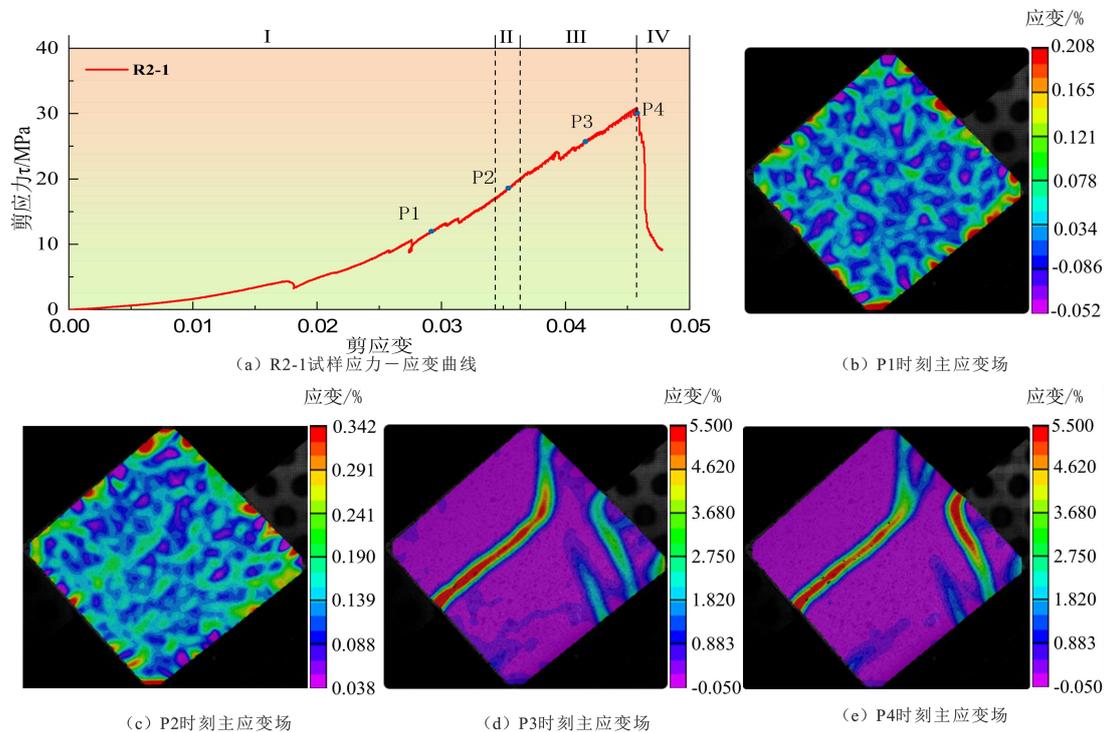


图 5 R2-1 试样的应力-应变曲线及其特征时刻主应变场分布情况

Fig.5 Stress-strain curve of specimen R2-1 and its corresponding distribution of principal strain field at characteristic moments

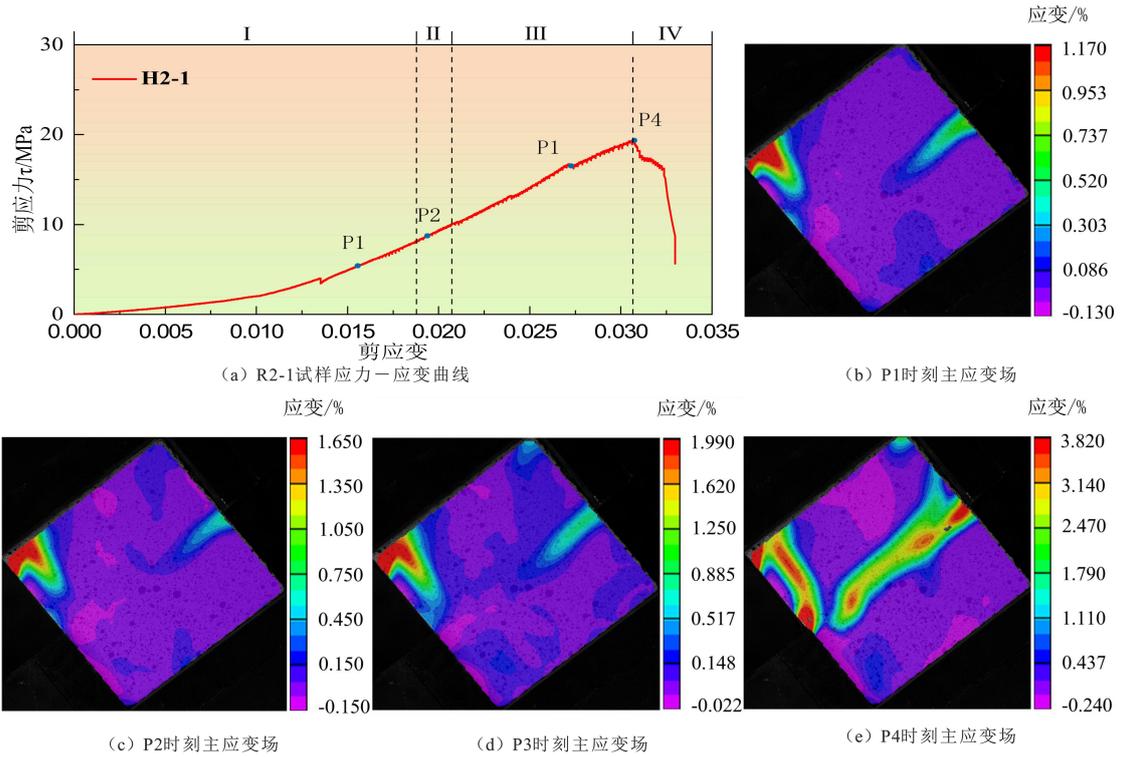


图 6 H2-1 试样的应力-应变曲线及其特征时刻主应变场分布情况

Fig.6 Stress-strain curve of specimen H2-1 and its corresponding distribution of principal strain field at characteristic moments

如图 7 和图 8 所示，在 50° 剪切角条件下，天然与饱和含层理岩石试样的主应变场演化路径进一步揭示了高剪切角对破坏模式的调控作用及水分的差异化影响：（1）第 I 阶段，天然试样整体处于压缩应变状态，而饱和试样虽整体压缩应变水平更低，但局部已出现明显应力集中；（2）第 II 阶段，天然试样沿层理方向形成局部应变带，反映出层理结构已开始主导变形路径，而饱和试样则已出现更为明显的应变集中区；（3）第 III 阶段，天然试样的集中应变带进一步发展但尚未贯通，而饱和试样则形成空间分布更为宽泛的明确应变带，充分体现了水分对岩石力学性质的弱化促进了剪切变形的广泛发展；（4）第 IV 阶段，两者均沿层理方向形成贯通的宏观应变集中带，其中天然试样形成两条贯通应变带，而饱和试样则形成单一贯通带。上述结果表明，在高角度剪切中，水分的作用在于进一步弱化层理面强度，使饱和试样的应变局部化过程更早启动、应变分布更宽泛，并最终在更高角度剪切下由单一层面剪切滑移破坏转变为多层层面剪切滑移破坏。

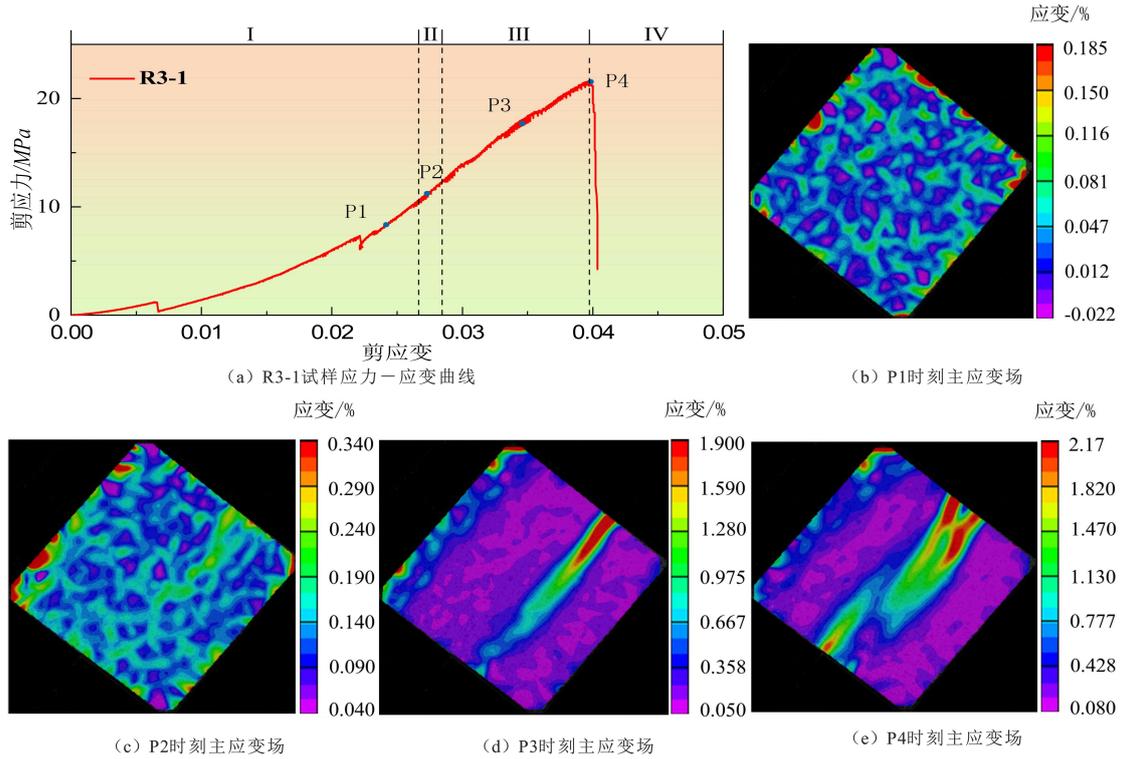


图 7 R3-1 试样的应力-应变曲线及其特征时刻主应变场分布情况

Fig.7 Stress-strain curve of specimen R3-1 and its corresponding distribution of principal strain field at characteristic moments

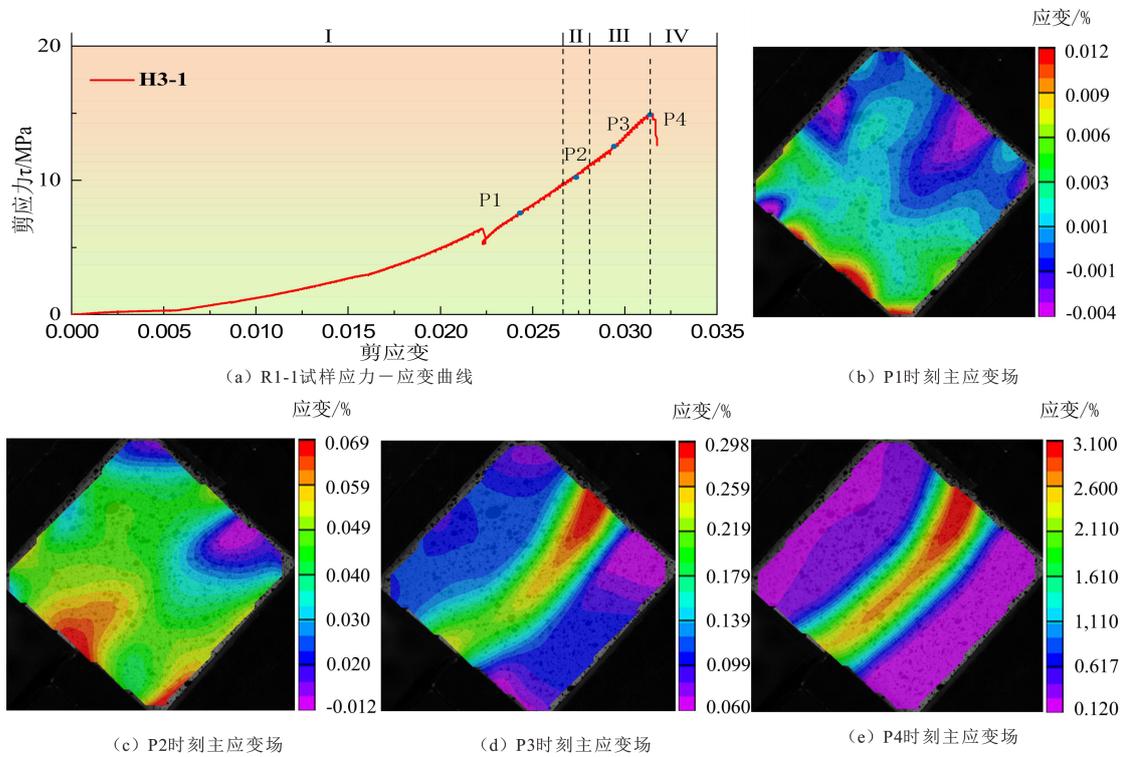


图 8 H3-1 试样的应力-应变曲线及其特征时刻主应变场分布情况

Fig.8 Stress-strain curve of specimen H3-1 and its corresponding distribution of principal strain field at characteristic moments

strain field at characteristic moments

如图 9 和图 10 所示,天然与饱和含层理岩石试样的主应变场演化表明,在极高剪切角度 (60°) 下,水分对变形路径和破坏机制的调控作用与中低角度的情况存在显著差异:

(1) 第 I 阶段,天然试样整体压缩应变状态较低,而饱和试样虽整体压缩应变水平更低,但局部已出现更大范围的应力集中,这表明高剪切角与饱和状态的耦合促使了更早的初始非均匀变形;(2) 第 II 阶段,天然试样尚未形成沿层理的压缩应变集中带,而饱和试样则表现为整体均匀的微量应变增长,且在夹具剪切口附近出现了局部应力集中区域;(3) 第 III 阶段,天然试样内部开始形成沿潜在剪切面的应变集中带,而饱和试样应力集中区也出现关键转变,开始呈现成带趋势;(4) 第 IV 阶段,天然试样应变集中带最终沿剪切面贯通,表现为典型的单一层理面剪切破坏,而饱和试样同样最终沿剪切层理方向形成完整贯通应变带,该带贯穿多层层理,两者均表现为典型的受层理控制的剪切滑移破坏模式。上述结果表明,相较于中低角度的情况,水分的作用在于进一步弱化层理面强度,由更高角度剪切下单一层理面剪切滑移破坏转变为多层层理面剪切滑移破坏。

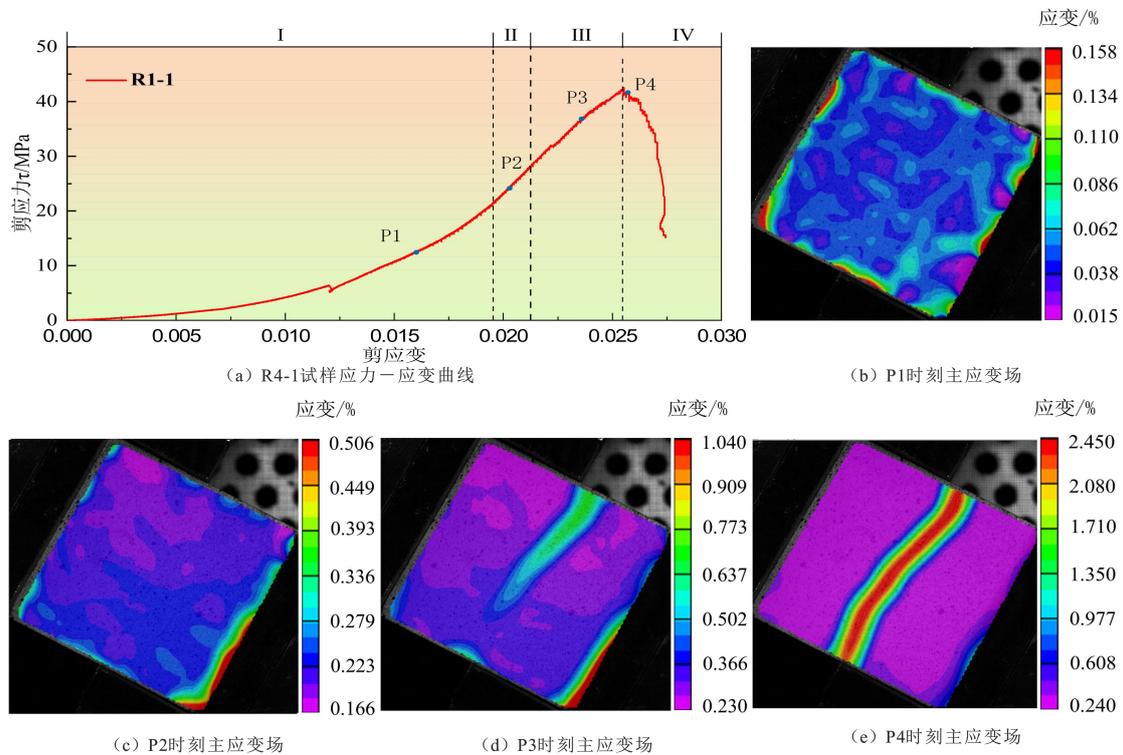


图 9 R4-1 试样的应力-应变曲线及其特征时刻主应变场分布

Fig.9 Stress-strain curve of specimen R4-1 and its corresponding distribution of principal strain field at characteristic moments

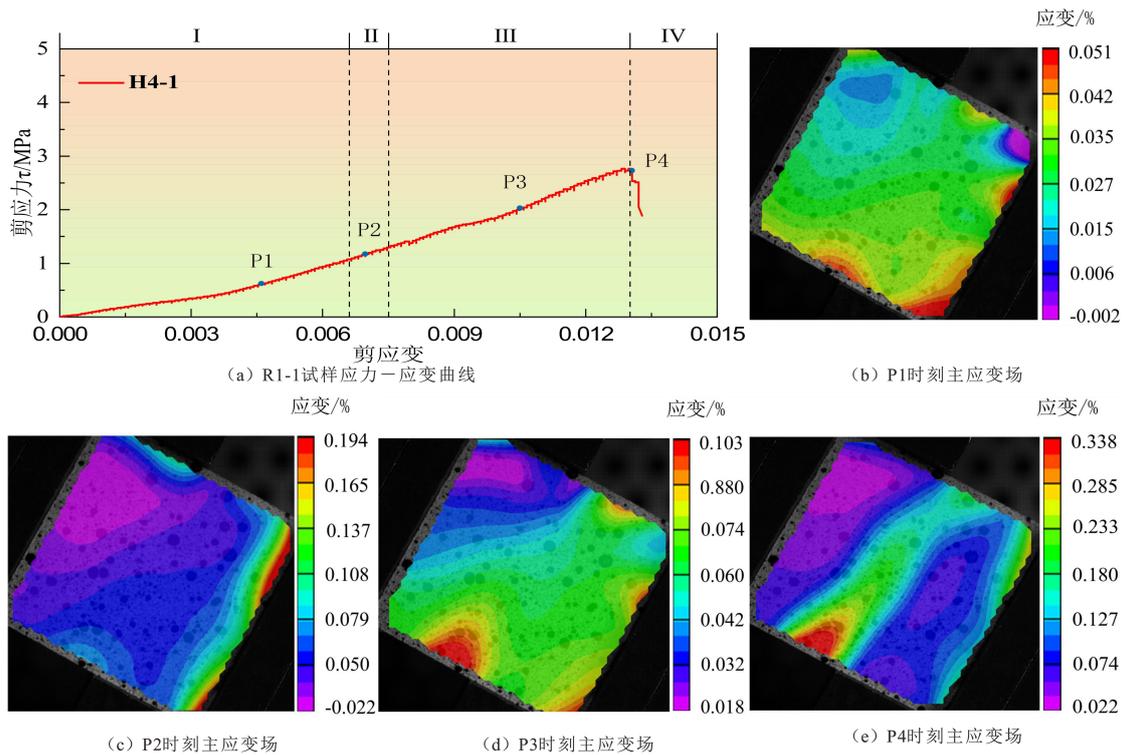


图 10 H4-1 试样的应力-应变曲线及其特征时刻主应变场分布情况

Fig.10 Stress-strain curve of specimen H4-1 and its corresponding distribution of principal strain field at characteristic moments

综上所述，在中低剪切角（ $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ）下，水的作用表现为显著的弱化效应，饱和状态显著抑制了天然试样中典型的竖向张性裂隙独立发育，促使变形能优先沿被软化的层理面发生。此时，其破坏模式从天然试样的张剪复合破裂，转变为以单一层面剪切滑移破坏为主的压剪复合型破坏和多层理面剪切滑移破坏为主的压剪复合型破坏。这符合水岩耦合作用下，破裂易沿软弱面发展的普遍认识。而在高剪切角（ $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ）下，水的作用则体现为强化结构面控制与协调变形。尽管天然与饱和试样均以剪切破坏为主导，但破坏路径存在差异。剪切应力使天然试样的破裂路径为层理控制，发展为单一倾斜剪切破裂。与此相对，饱和试样因层理面被进一步弱化，其剪切带反而更严格地受弱化后的层理面控制，表现为典型的沿多层面剪切滑移破坏。破坏前的应变场往往呈现更为弥散或均匀的特征，反映了水分对变形的协调作用。不同剪切角度下的破坏形式统计如表 3 所列。

表 3 不同角度下变角剪切岩石破坏模式统计分析

Table 3 Statistical analysis of rock failure modes at different shear angles

剪切角度 $\theta/(^{\circ})$	岩石状态	同一角度下平行试验名称	破坏模式
30°	天然	R1-1、R1-2、R1-3	剪张拉复合型破坏
	饱和	H1-1、H1-2、H1-3	压剪复合型破坏
40°	天然	R2-1、R2-2、R2-3	单一层面滑移剪切主导的压剪复合型破坏
	饱和	H2-1、H2-2、H2-3	多层面滑移剪切主导的压剪复合型破坏
50°	天然	R3-1、R3-2、R3-3	单一层面剪切滑移破坏
	饱和	H3-1、H3-2、H3-3	多层面剪切滑移破坏

60°	天然	R4-1、R4-2、R4-3	单一层面剪切滑移破坏
	饱和	H4-1、H4-2、H4-3	多层面剪切滑移破坏

3.2 不同含水状态下层理灰岩变角剪切强度特性

结合数字图像相关 (DIC) 技术监测获得的试样破坏应变场分析, 不同剪切角度下的破坏模式呈现显著差异。当剪切角度为 40°、50°和 60°时, 试样的破坏面主要沿层面发展, 表明在该应力状态下层面为薄弱环节, 因此所获得的强度数据可有效反映层面对岩石抗剪切强度的控制作用。而在 30°剪切角度下, 破坏面切穿岩石基质, 相关结果反映的是岩石基质本身的强度, 故将不纳入层面剪切强度的有效数据集中。基于此, 后续将选取 40°、50°和 60°条件下的试验数据, 用于系统分析层理灰岩在不同含水状态下的剪切强度特性。

天然含水状态下各层理灰岩试样的变角剪切力学参数如表 4 所列。从中不难发现, 试样剪切峰值随剪切角度增大而显著下降, 40°时最高达 122.70 kN, 60°时最低为 26.10 kN。所对应的正应力 σ 和剪应力 τ 也呈现类似趋势, 40°时分别为 37.82 MPa 和 31.07 MPa, 60°时降至 5.94 MPa 和 8.96 MPa。饱和含水状态下各层理灰岩试样的变角剪切力学参数如表 5 所列。从表中不难发现, 试样剪切峰值随剪切角度增大而显著下降, 40°时最高达 78.09 kN, 60°时最低为 7.61 kN。所对应的正应力 σ 和剪应力 τ 也呈现类似趋势, 40°时分别为 22.84 MPa 和 18.76 MPa, 60°时降至 1.54 MPa 和 2.61 MPa。整体数据表明随剪切角度增大, 试样剪切强度逐渐减弱, 且同剪切角度下平行样品之间的变角剪切力学参数波动较小。

表 4 天然和饱和含水状态下试样基本信息和变角剪切力学参数

Table 4 Basic information and variable-angle shear mechanical parameters of specimens under natural and saturated states

样品编号	剪切角度 $\theta/(^\circ)$	剪切峰值/kN	正应力 σ /MPa	剪应力 τ /MPa
R1-1	30	217.6	75.82	42.73
R1-2	30	216.8	75.43	42.51
R1-3	30	191.85	66.47	38.37
R2-1	40	117.5	36.44	29.93
R2-2	40	122.7	37.82	31.07
R2-3	40	116.5	35.69	29.90
R3-1	50	71.6	18.78	21.92
R3-2	50	70.7	18.39	21.46
R3-3	50	82.27	21.15	25.21
R4-1	60	29.1	5.94	10.04
R4-2	60	26.1	5.22	9.04
R4-3	60	33.85	6.77	11.73
H1-1	30	152.08	52.65	29.67
H1-2	30	133.62	45.97	25.90
H1-3	30	145.48	50.39	29.09
H2-1	40	78.09	23.90	19.64
H2-2	40	74.61	22.84	18.76
H2-3	40	73.64	22.56	18.93
H3-1	50	61.29	15.83	18.47
H3-2	50	50.40	13.11	15.29

H3-3	50	56.66	14.57	17.36
H4-1	60	7.61	1.54	2.61
H4-2	60	9.11	1.85	3.12
H4-3	60	9.51	1.90	3.29

图 11 (a) 为天然含水状态下层理灰岩试样在变角剪切试验中的峰值强度拟合结果。其中, 蓝色圆点表示试样达到剪切峰值时在不同正应力下对应的剪应力数据。红色直线为天然含水状态下层理灰岩的剪切强度拟合曲线, 其拟合公式为 $\tau = \sigma \tan(33.4^\circ) + 7.5$, 拟合优度 R^2 为 0.94。根据拟合结果可知, 天然含水状态下层理灰岩的黏聚力为 7.5 MPa, 内摩擦角为 33.4° 。图 11 (b) 为饱和含水状态下层理灰岩的剪切强度拟合曲线, 其拟合公式为 $\tau = \sigma \tan(32.6^\circ) + 5.7$, 拟合优度 R^2 为 0.96。根据拟合结果可知, 饱和含水状态下层理灰岩的黏聚力为 5.7 MPa, 内摩擦角为 32.6° 。

对于层理状灰岩, 变角剪切试验数据清晰表明, 水的饱和作用对其沿层理面的剪切强度产生了显著的劣化影响。在 40° 至 60° 的剪切角度范围内, 饱和试样的剪切峰值、正应力与剪应力均大幅低于天然试样, 且在角度增大 (法向应力减小) 时强度衰减更为剧烈, 如 60° 时饱和试样的平均剪切应力仅为天然状态的 29%。这一弱化效应的核心机制在于水理作用对岩石内部结构的破坏: 水分侵入层理面及岩石孔隙, 软化或溶解胶结物质, 导致表征岩石内部联结力的黏聚力显著下降了 24%; 而对矿物颗粒间摩擦特性的影响较小, 内摩擦角略有降低。因此, 水的存在主要通过大幅削弱黏聚力, 使层理面更易在剪切作用下发生滑移, 从而威胁岩土工程的抗滑稳定性。

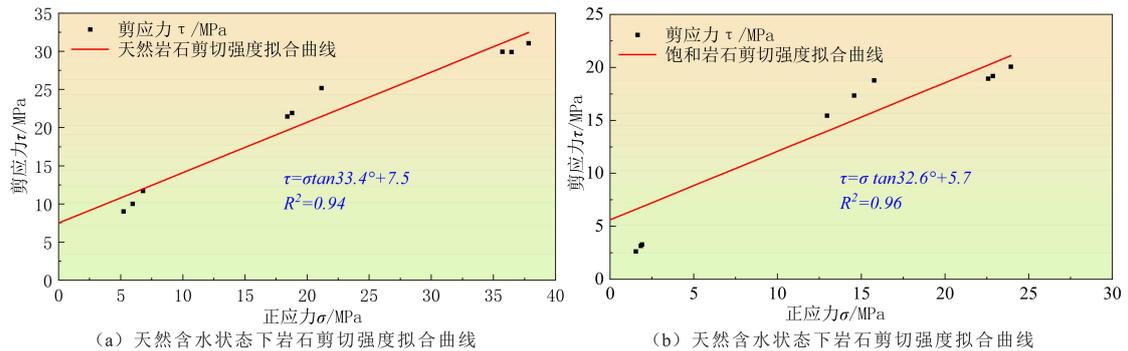


图 11 天然与饱和含水状态下层理灰岩变角剪切强度拟合曲线

Fig.11 Fitted curves of variable-angle shear strength for bedded limestone under natural and saturated states

3.3 不同含水状态下层理灰岩变角剪切微震信号特征

3.3.1 天然含水状态下层理灰岩变角剪切微震信号特征

天然含水状态下层理灰岩变角剪切过程中微震事件监测结果如图 12 所示。图 12 (a) 中 R1-1 试样的微震计数变化表现出如下特征: (1) 在第 I 阶段内, 初期微震活动相对较少, 累积微震计数首先呈现缓慢增长, 然后逐渐趋于平稳。直至 700 s 时, 应力-时间曲线发生陡降并逐渐恢复, 此时微震活动突增, 累积微震计数短时间内发生急剧上升后再次恢复平稳。此后, 在 889~1065 s 期间, 微震事件先大量集中出现, 微震计数最高达 174 次/s, 累积微震计数快速增加, 而后微震活动逐渐减少, 累积微震计数再次趋于平稳。(2) 由第 I 阶段转入第 II 阶段后, 微震活动明显减少, 微震计数趋近于零, 累积微震计数基本趋于平稳。(3) 由第 II 阶段转入第 III 阶段后, 微震活动逐步恢复, 微震计数持续增长, 1400 s 后累积计数先递增后趋于缓慢增长。(4) 在第 IV 阶段, 微震计数骤增至 350 次/s, 试样发生贯通破坏, 累积微震计数最终达到 22501 次。

图 12 (b) 中 R2-1 试样的微震计数变化特征如下：(1) 在第 I 阶段内，在 500 s 与 1000 s 附近，累积微震计数出现两次显著突增。这两次事件与应力-时间曲线的波动同步，表明在剪切荷载作用下，层理面或预制裂缝发生局部压缩滑移或微凸体破碎。(2) 由第 I 阶段转入第 II 阶段后，此阶段微震计数表现为较低的趋势，形成了一个明显的平静期。这标志着初始局部破裂活动暂告段落，内部应力进行重新分布，裂纹扩展进入一个相对稳定的暂歇阶段，为主破裂面的孕育积累能量。(3) 由第 II 阶段转入第 III 阶段后，微震活动恢复并逐渐增强，平均计数稳定在 30 次/s，表明优势剪切破裂面开始形成并稳定扩展。至 1823 s 时，微震计数突增至 80 次/s，释放出强烈的破裂前兆信号，揭示主破裂面已从稳定扩展转向非稳定加速扩展的临界状态。(4) 在第 IV 阶段，微震计数从前期水平急剧跃升至 300 次/s。这一现象记录了主剪切面最终贯通、试样发生宏观失稳破坏的瞬间，是内部累积损伤能急剧释放的最终体现，累积微震计数最终达到 38634 次。

图 12 (c) 中 R3-1 试样的微震计数变化特征如下：(1) 在第 I 阶段，于 250 s 时因机械原因导致微震计数突增，累积微震计数呈阶梯式上升。(2) 进入第 II 阶段后，微震活动显著减弱，微震计数降至 0 次/s，累积计数保持平稳，表明该阶段内部裂纹扩展趋于停滞。(3) 转入第 III 阶段后，微震活动恢复，累积微震计数快速增大，至 1300 s 时出现突变，微震计数急剧上升至 200 次/s，随后累积计数恢复平缓增长，反映优势破裂面进入加速扩展的临界状态。(4) 在第 IV 阶段，微震计数骤然跃升至 350 次/s，试样发生宏观破坏，随后微震计数迅速下降，标志着主剪切面完全贯通与承载能力的丧失，累积微震计数最终达到 9273 次。

图 12 (d) 中 R4-1 试样的微震计数变化特征如下：(1) 在第 I 阶段的 332~450 s，累积微震计数呈阶梯式跃升，与高角度剪切下原生裂隙压密及矿物颗粒破碎有关，是试样在高法向应力下的初始响应。(2) 进入第 II 阶段后，微震活动持续处于极低水平，平静期更为显著，表明高围压下裂纹扩展受到抑制，能量以弹性势能形式积累。(3) 在第 III 阶段，累积微震计数缓慢上升，反映内部损伤开始局部化，至 895 s，微震计数突增至 193 次/s，形成峰值，预示主剪切面即将贯通，随后计数回落并缓慢增长，显示破裂面进入贯通准备阶段。(4) 在第 IV 阶段，微震计数急剧上升至 102 次/s，试样发生宏观破坏，尽管峰值较低，但其急剧上升及与应力暴跌的对应关系体现了高剪切角下脆性破坏的突发特征，累积微震计数最终达到 3706 次。

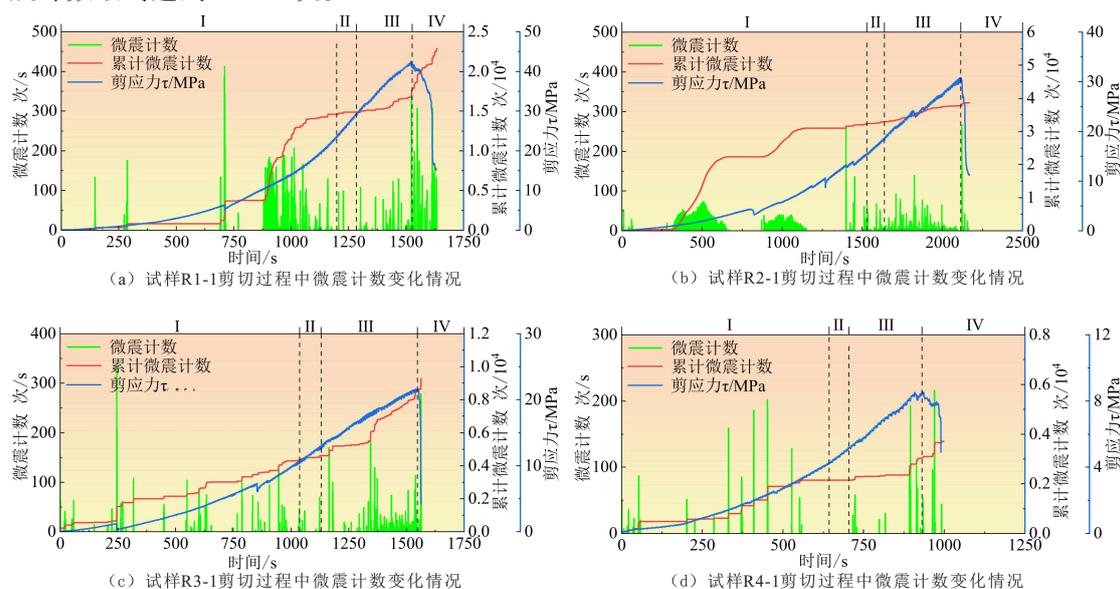


图 12 天然含水状态下层理灰岩试样剪切过程中微震计数变化情况

Fig.12 Variations in microseismic counts during shearing process of bedded limestone specimens under natural state

3.3.2 饱和含水状态下层理灰岩变角剪切微震信号特征

饱和含水状态下层理灰岩变角剪切过程中微震事件监测结果如图 13 所示。图 13 (a) 中 H1-1 试样的微震计数变化特征如下：(1) 在第 I 阶段内，前 1000 s 内微震活动显著，部分时段达到 170 次/s，882 s 时出现 145 次/s 的突增，这反映了饱和水分润滑作用下层理面间的局部滑移和微破裂。高频次的微震计数表明，即使在低应力水平下，水岩相互作用已促使内部损伤快速积累。(2) 由第 I 阶段转入第 II 阶段后，微震计数降为 0 次/s，进入典型的应力调整阶段。此阶段水分在孔隙中的重分布可能缓解了局部应力集中，使得微破裂活动暂时停滞。(3) 由第 II 阶段转入第 III 阶段后，微震活动显著增强，多次突增至 200 次/s，1119 ~ 1373 s 期间累积计数呈现阶梯式增长。这种模式揭示了饱和岩样中裂纹的间歇性扩展特征，水分的存在促进了裂纹的稳定延伸。(4) 在第 IV 阶段，微震计数突增至峰值 40 次/s，试样发生破坏。与天然状态相比，峰值计数显著降低，表明饱和状态改变了最终的破坏模式，使其从剧烈脆性破坏向塑性破坏转化，累积微震计数最终达到 16282 次。

图 13 (b) 中 H2-1 试样的微震计数变化特征如下：(1) 在第 I 阶段内，550 ~ 750 s 加载初期，微震计数显著活跃，最高达 200 次/s。这一现象主要源于饱和层理面在剪切荷载作用下的压缩闭合，水分的润滑作用显著促进了层理面的结构调整过程。(2) 由第 I 阶段转入第 II 阶段后，微震计数持续保持 0 次/s，形成明显的平静阶段。此阶段反映了试样内部应力的重新分布与能量积累过程，为后续的破裂发展做准备。(3) 由第 II 阶段转入第 III 阶段后，从 1000 s 开始，微震计数突增，计数突增至 206 次/s 后保持匀速增长直至 1450 s。这一稳定的增长模式与岩样表面宏观裂纹的发育相对应，体现了饱和状态下裂纹的稳定扩展特征。(4) 在第 IV 阶段，微震计数急剧上升至 220 次/s 的峰值，标志着试样沿剪切面发生宏观贯通破坏，累积微震计数最终达到 18929 次。

图 13 (c) 中 H3-1 试样的微震计数变化特征如下：(1) 在第 I 阶段的 800s 附近出现高达 400 次/s 的微震计数峰值，反映了饱和岩样内部结构的剧烈调整。尽管存在部分外部干扰因素，但高频的微震事件仍揭示了层理面在中等剪切角下的显著滑移趋势。(2) 由第 I 阶段转入第 II 阶段后，微震活动维持在较低水平，显示出典型的内部微裂纹处于稳定扩展阶段。(3) 由第 II 阶段转入第 III 阶段后，累积微震计数呈现明显的上升趋势，表明损伤演化从缓慢积累向加速发展阶段过渡，这一非线性增长模式揭示了饱和岩样破裂前兆的典型特征。(4) 在第 IV 阶段，微震计数急剧增至 330 次/s，清晰地记录了宏观剪切面的最终贯通瞬间，由于受到外部干扰，累积微震计数最终达到 17271 次。

图 13 (d) 中 H4-1 试样的微震计数变化特征如下：(1) 在第 I 阶段，微震计数整体保持在较低水平，反映了高法向应力对初始损伤发展的抑制作用，试样主要表现为整体压缩变形。(2) 由第 I 阶段转入第 II 阶段后，未监测到有效微震事件，显示出典型的能量高度积累特征。(3) 由第 II 阶段转入第 III 阶段后，累积微震计数呈凹形快速上升，体现了高围压下损伤的渐进式发展规律，破裂前兆信号相对较弱但持续。(4) 在第 IV 阶段，微震计数急剧增至 300 次/s，充分展现了高剪切角下饱和岩样的突发性脆性破坏特征，累积微震计数最终达到 2783 次。

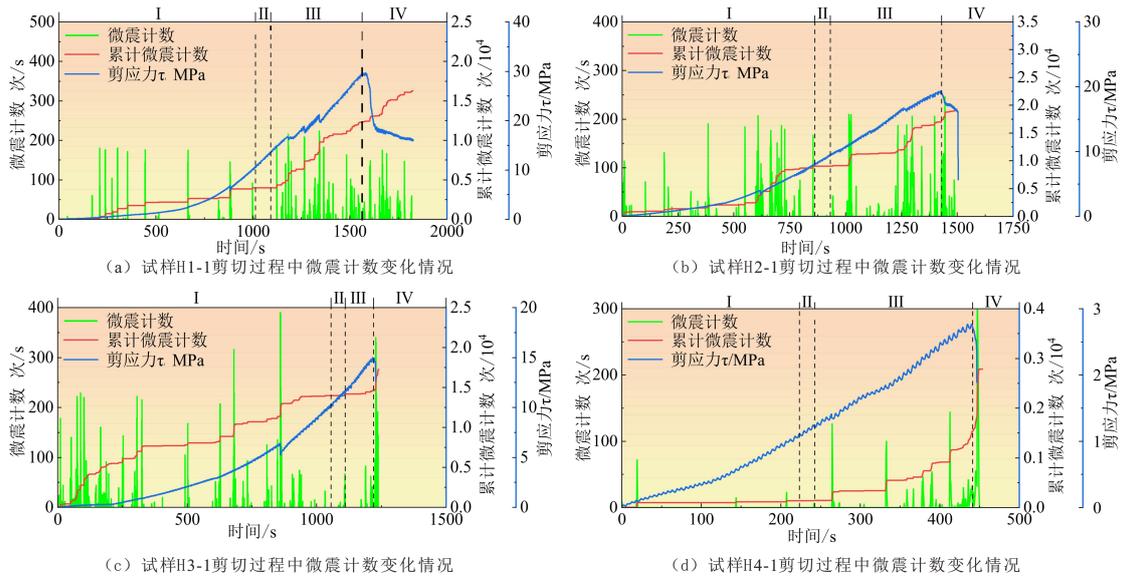


图 13 饱和含水状态下层理灰岩试样剪切过程中微震计数变化情况

Fig.13 Variations in microseismic counts during shearing process of bedded limestone specimens under saturated state

4 讨 论

4.1 含水状态和剪切角度对层理灰岩剪切应力应变特性的影响

第 3.1 节的试验结果表明，含水状态对层理灰岩剪切应力-应变特性的影响并非简单的弱化，而是表现为具有剪切角度依赖的控制作用。具体而言，在低剪切角（ $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ）条件下，岩石处于以压为主，以剪为辅的应力组合状态，易于形成剪切滑移与张拉劈裂共同作用的复合型破坏。此时，水的软化作用会导致岩石层理面物质强度弱化，从而使饱和试样变形更易于沿层理面发育，最终使得其破坏模式由天然试样的脆性剪张复合型破坏转变为以沿软弱面滑移为主的压剪复合型破坏。而在高剪切角（ $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ）条件下，岩石处于以剪为主，以压为辅的应力组合状态。在此条件下，岩石的张拉劈裂破坏被抑制，其破坏模式逐渐由复合型破坏向沿层理面发展的单一剪切滑移破坏转变。此时，水的软化与润滑作用凸显。较天然试样而言，饱和试样的沿层理面滑移破坏被更早激活，其应变响应更敏锐且应力集中带分布也往往更为宽泛，故更易形成贯穿多层层理面的复合滑移带。总的来看，在本文中，天然状态下的层理灰岩剪应变破坏特征与前人对岩变角剪切应变场演化的研究基本一致。但相较于前人普遍强调水分、温度和物质成分对岩石强度的弱化作用^[31]，本文进一步说明水分对应变场演化路径与最终破坏模式的剪切角度依赖性调控作用，即在其余条件不变时，含水状态可以改变含层理岩石应变集中带的发育范围与贯通时间，从而主导破坏模式。

4.2 含水状态和剪切角度对层理灰岩剪切强度特性的影响

第 3.2 节的试验结果表明，剪切角度是控制层理灰岩剪切强度的首要因素。随着剪切角从 40° 增大至 60° ，在相同的压力作用下，作用在层理面上的法向应力急剧降低，而切向剪应力逐渐增加^[32]。这导致天然与饱和试样的峰值剪切力及对应的剪应力均呈现衰减的现象，符合应力分解与库伦强度理论的基本规律。同时，水的饱和作用对层理灰岩剪切强度产生了系统且显著的劣化。具体来说，如图 14 所示，在相同剪切角下，饱和试样的剪切强度全面低于天然试样，尤其在高剪切角条件下弱化效应更为显著。例如，在 60° 剪切角度条件下，饱和试样平均剪切强度仅为天然状态的 29%。究其原因，根据抗剪强度参数拟合结果

(见图 11)，水弱化的核心机制在于显著降低黏聚力（降幅达 24%），而对内摩擦角的影响较小。这揭示了水分主要通过破坏岩石内部联结结构来削弱其抗剪能力，与前人普遍强调“水弱化岩石强度”的结论一致。在此基础上，本文通过变角剪切试验还定量揭示了水弱化效应具有强烈的剪切角度依赖性，即在高剪切角下的强度衰减幅度远大于中低角度的强度衰减幅度，明确了剪切角度（即法向压力与剪切应力的组合状态）是调控水弱化效果的关键变量。

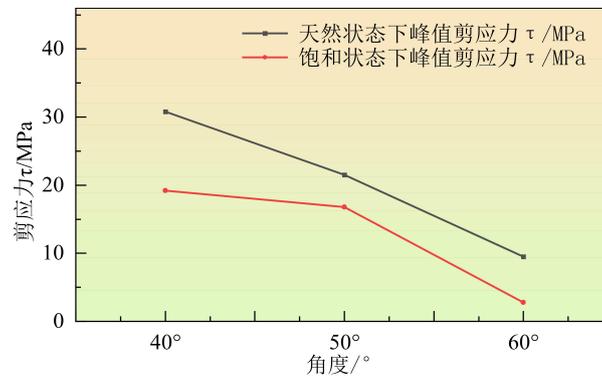


图 14 不同剪切角度下不同含水状态试样抗剪强度变化

Fig.14 Variations in shear strength of specimens under different water-bearing states at different shear angles

4.3 含水状态和剪切角度对层理灰岩微震信号特征的影响

如 3.3 节所述，本研究通过对层理灰岩的变角剪切过程进行微震监测，揭示了含水状态与剪切角度对层理灰岩微震信号特征的协同调控规律。具体而言，研究主要发现含水状态会明显改变微震活动的演化模式与能量释放特征。对于天然试样来说，其主要呈现“初始活跃—显著平静—前兆突增—主破裂”^[33-36]的经典岩石脆性破坏的微震活动信号，标志性的平静期与极高的最终峰值计数是其突发性破坏的典型前兆^[37-38]，这些与前人的研究基本一致。而对于饱和试样来说，其在加载初期即表现出频繁的微震事件活动，反映了水分润滑下岩石层理面的早期滑移与结构调整。同时，其最终破坏的峰值计数显著降低，表明水分促进了破坏过程向更渐进、塑性化的模式转化^[39-41]，大幅度削弱了脆性突变的剧烈程度^[42]，这为强降雨条件下基于微震前兆信号的含层理面岩质边坡失稳预警提供了一定参考。除此之外，饱和状态试样在低剪切角度（30°~40°）条件下通过弱化层理面摩擦，使得微震事件活动更为持续。而在高剪切角度（30°~40°）条件下，水的软化效应促进的岩石塑性破坏趋势与高角度剪切促进的脆性破坏趋势相互作用，共同导致饱和试样的微震事件活动在脆性破裂前呈现出更为复杂的信号特征^[43]。

5 结 论

本文基于天然和饱和两种状态下的层理状灰岩，设计了多技术融合的室内试验方案，通过系统获取不同变角剪切角度下层理灰岩试样的宏观力学响应、表面变形场与内部微破裂信息，分析变角剪切过程中的变形破坏模式与微震信号演化特征，主要得到以下结论。

(1) 水分对含层理灰岩破坏模式的影响随剪切角度变化：在低角度下，水的塑性化作用促使破坏由剪张复合型转为压剪复合型；而在高角度下，弱化效应则使破坏更严格地受层理面控制，形成多层理面剪切滑移。

(2) 岩样的峰值剪切强度随剪切角度增大而持续降低，在高剪切角度下尤为明显，并在饱和状态下发生显著劣化，表现为内摩擦角与黏聚力的同步下降。研究表明，水对层理面

抗剪能力的弱化是导致层理灰岩强度丧失的关键。

(3) 层理灰岩变角剪切过程中的微震响应受含水状态与剪切角度协同控制。含水状态主导微震活动模式,天然状态下呈现“活跃—平静—突增—主破裂”的阶段性演化,峰值计数较高,表征脆性破坏模式。饱和状态下水分润滑作用使微震活动持续活跃但峰值降低,破坏模式向塑性转化。剪切角度调控微震时空分布,低角度下活动分散,累积计数高;高角度下微震前兆信号集中,平静期显著,破坏更具突发性。

参考文献

- [1] FAN G, ZHANG J J, FU X, et al. Energy identification method for dynamic failure mode of bedding rock slope with soft strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 959-966.
- [2] 陈旭光, 张强勇. 岩石剪切破坏过程的能量耗散和释放研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 179-184.
CHEN X G, ZHANG Q Y. Research on the Energy Dissipation and Release in the Process of Rock Shear Failure [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(2): 179-184.
- [3] 平琦. 煤矿深部岩石动态力学特性试验研究及其应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
PING Q. Experimental Research and Application of Rock Dynamic Mechanical Properties for Coal Mine Deep Part [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.
- [4] 张闯, 任松, 张平, 等. 水、孔洞及层理耦合作用下的千枚岩巴西劈裂试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1612-1624.
ZHANG C, REN S, ZHANG P, et al. Experimental study on Brazilian splitting of phyllite under the coupling effects of water, pore and bedding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1612-1624.
- [5] 高梁, 杜朋召, 周文朋, 等. 页岩层理面力学参数对水力压裂裂缝扩展影响规律及机制的数值试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 236-250.
GAO L, DU P Z, ZHOU W P, et al. Numerical simulation study on the effects and mechanisms of bedding plane mechanical parameters on hydraulic fracture propagation in shale [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 236-250.
- [6] 高安森, 戚承志, 罗伊, 等. 轴向荷载下岩石剪切破坏时效损伤蠕变模型研究[J]. 金属矿山, 2022(9): 81-86.
GAO A S, QI C Z, LUO Y, et al. Study on Time-dependent Damage Creep Model of Rock Shear Failure under Compression [J]. Metal Mine, 2022(9): 81-86.
- [7] 张培森, 赵成业, 侯季群, 等. 温度-应力-渗流耦合条件下红砂岩渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 1957-1974.
ZHANG P S, ZHAO C Y, HOU J Q, et al. Experimental study on seepage characteristics of deep sandstone under temperature-stress-seepage coupling conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 1957-1974.
- [8] 凡奥奇, 王万禄, 李树建, 等. 变角剪切作用下磷块岩力学响应机制及力学参数确定[J/OL]. 金属矿山, 1-15[2025-10-14].
FAN A Q, WANG W L, LI S J, et al. Mechanical Response Mechanism and Determination of Mechanical Parameters of Phosphorite under Variable Angle Shear Action [J/OL]. Metal Mine, 1-15[2025-10-14].
- [9] 张塑彪, 张帆, 李康文, 等. 高温对不同粒径花岗岩剪切特性影响研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(10): 2981-2993.
ZHANG S B, ZHANG F, LI K W, et al. Influence of high temperature on shear characteristics of granite with different particle sizes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(10): 2981-2993.
- [10] 闫宪洋, 张全, 王超, 等. 基于 DIC 技术的多岩层损伤演化物理模型试验[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(4): 105-112.
YAN X Y, ZHANG Q, WANG C, et al. Experimental study on the damage evolution physical model of multiple rock strata based on DIC technology [J]. Safety and Environmental Engineering, 2025, 32(4):

105-112.

- [11] 张永泽, 刘俊新, 冒海军, 等. 单轴压缩下页岩力学特性的各向异性试验研究[J]. 金属矿山, 2015(12): 33-37.
ZHANG Y Z, LIU J X, MAO H J, et al. Anisotropic experimental study on mechanical properties of shale under uniaxial compression [J]. Metal Mine, 2015(12): 33-37.
- [12] YOU S, SUN J C, WANG H T. Bedding plane effects on mechanical behavior of surrounding rock in mountain tunneling [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 7346061.
- [13] 骆祚森, 曹旭, 邓华锋, 等. 法向动载对不同含水状态灰岩节理面剪切力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2025, 46(6): 1799-1810.
LUO Z S, CAO X, DENG H F, et al. Influence of dynamic normal load on shear mechanical properties of limestone joint surface under different water-bearing states [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(6): 1799-1810.
- [14] 贾汝锋, 许汉华. 不同含水率下金沙峡水电站灰岩动力学特性研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(4): 34-43.
JIA R D, XU H H. Study on limestone dynamic characteristics of Jinshaxia Hydropower Station under different moisture contents [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4): 34-43.
- [15] 张一帆. 微波循环照射下花岗岩力学特性及声发射特征研究[D]. 长沙: 中南大学, 2024.
ZHANG Y F. Study on Mechanical Properties and Acoustic Emission Characteristics of Granite under Microwave Cyclic Irradiation [D]. Changsha: Central South University, 2024.
- [16] 周炳昊, 孙钱程, 徐平, 等. 不同应力路径对岩石剪切力学参数及破坏响应的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(11): 176-187.
ZHOU B H, SUN Q C, XU P, et al. Influence of different stress paths on shear mechanical parameters and failure response of rock [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(11): 176-187.
- [17] 董卓, 申玉杰. 层理页岩水力裂缝扩展特性数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(05): 1712-1722.
DONG Z, SHEN Y J. Numerical simulation study on hydraulic fracture propagation characteristics of bedded shale [J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(05): 1712-1722.
- [18] DU K, LI X F, WANG S, et al. Compression-shear failure properties and acoustic emission (AE) characteristics of rocks in variable angle shear and direct shear tests [J]. Measurement, 2021, 183: 109814.
- [19] 于洪彪, 吴宗旺, 王官通, 等. 灰岩静态破碎 AE-DIC 协同监测研究[J]. 非金属矿, 2025, 48(3): 97-102.
YU H B, WU Z W, WANG G T, et al. AE-DIC synergistic monitoring study of static crushing of graywacke [J]. Non-Metallic Mines, 2025, 48(3): 97-102.
- [20] 陈博, 汪学清, 董泽, 等. 基于 DIC 与声发射技术的裂纹识别与损伤变量分析[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(10): 150-158.
CHEN B, WANG X Q, DONG Z, et al. Crack identification and damage variable analysis based on DIC and acoustic emission techniques [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(10): 150-158.
- [21] 李直勇. AE-DIC 联合监测下裂隙类岩石蠕变力学性能及损伤演化分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.
LI Z Y. Creep Mechanical Properties and Damage Evolution Analysis of Fractured Rocks under AE-DIC Joint Monitoring [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2025.
- [22] 王磊, 张睿, 杨栋, 等. 实时高温富有机质页岩变角剪切力学特性及应变场演化研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2579-2592.
WANG L, ZHANG R, YANG D, et al. Mechanical properties and strain field evolution of organic-rich shale with variable angle shear at real-time high-temperature [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(9): 2579-2592.
- [23] 刘玉春, 赵扬锋, 张超, 等. 含水煤岩单轴压缩微震信号特征试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(2):

51-55.

LIU Y C, ZHAO Y F, ZHANG C, et al. Experimental research on microseismic signal characteristics of moisture-containing coal and rock in uniaxial compression [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(2): 51-55.

- [24] SHI H S, SU G S, QIN Y Z, et al. Influence of the loading rate on the evolution characteristics of AE and MS signals during granite failure[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 152: 107428.
- [25] MANGRIOTIS D M, TAYLOR C A, MAIN G I, et al. Loading of a porous rock with constant micro-seismic event rate suppresses seismicity and promotes subcritical failure [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 19351.
- [26] HE L, LI Q F, AN B F. A study of the characteristics of micro-seismic (ME) and electromagnetic radiation (EMR) signals under the static load conditions of rocks [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(23): 12910.
- [27] JIANG R C, WEI M D. An improved method of local mean decomposition with adaptive noise and its application to microseismic signal processing in rock engineering [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(9): 6977-6995.
- [28] KHAN M, HE X Q, SONG D Z, et al. Extracting and predicting rock mechanical behavior based on microseismic spatio-temporal response in an ultra-thick coal seam mine[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(5): 3725-3754.
- [29] AROSIO D, LONGONI L, PAPINI M, et al. Analysis of microseismic signals collected on an unstable rock face in the Italian Prealps [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 213(1): 475-488.
- [30] GOU R, SONG D Z, XUE Q H, et al. Microseismic response characteristics and stress anomaly zoning in deep outburst-prone coal seams with multi-concealed structures: A case study [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2025, 242: 105932.
- [31] 时旭阳, 才庆祥, 李兆霖, 等. 露天矿边坡岩石剪切力学特性与破裂特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(2): 334-342.
- SHI X Y, CAI Q X, LI Z L, et al. Shear mechanical properties and fracture characteristics of slope rocks in open-pit mining [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(2): 334-342.
- [32] 卢宏建, 牟超, 武捷. 充填体-边界介质组合体剪切力学特性与参数分析[J]. *金属矿山*, 2024(2): 80-87.
- LU H J, MU C, WU J. Shear mechanical properties and parameter analysis of backfill-boundary medium combination [J]. *Metal Mine*, 2024(2): 80-87.
- [33] 高保彬, 李回贵, 李化敏. 不同破坏类型岩石的声发射及分形特征研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(2): 358-363.
- GAO B B, LI H G, LI H M. Study on acoustic emission and fractal characteristics of different damage types of rock [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(2): 358-363.
- [34] ZHANG E H, ZHOU B K, YANG L, et al. Experimental study on the microseismic response characteristics of coal and gas outbursts [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 172: 1058-1071.
- [35] BAI S X, TU Z, ZHANG T, et al. Microseismic response characteristics induced by mining activities: A case study [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 9977589.
- [36] WU C Y, ZHENG Y H, LIU C Y. Effect of coarse aggregate gradation on the acoustic emission and microseismic behavior of concrete under load [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2024, 49(2): 1465-1477.
- [37] LIU J P, WANG R, LEI G, et al. Studies of stress and displacement distribution and the evolution law during rock failure process based on acoustic emission and microseismic monitoring [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132: 104384.

-
- [38] 李慧杰. 不同加载模式下煤层老顶岩石破坏声发射特征研究[J]. 现代矿业, 2025, 41(10): 110-114.
LI H J. Research on Acoustic Emission Characteristics of Main Roof Rock Failure in Coal Seams under Different Loading Modes [J]. Modern Mining, 2025, 41(10): 110-114.
- [39] DONG L J, ZOU W, SUN D Y, et al. Some developments and new insights for microseismic/acoustic emission source localization [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 9732606.
- [40] 蒋睿智,付煜,法艳鹏,等.加载砂岩破坏能量和红外前兆特征试验研究[J].辽宁石油化工大学学报,2024,44(3):54-60.
JIANG R Z, FU Y, FA Y P, et al. Experimental study on the energy and infrared precursors of failure sandstone during loading[J].Journal of Liaoning Petrochemical University,2024,44(3):54-60.
- [41] SU G S, LI L, JIANG J Q, et al. Characteristics of microseism generated during rock shear failure under different normal stress conditions: an experimental study[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(12): 1118.
- [42] LIU J P, XU S D, LI Y H. Analysis of rock mass stability according to power-law attenuation characteristics of acoustic emission and microseismic activities[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2019, 83: 303-312.
- [43] 刘玉春, 潘一山, 赵扬锋, 等. 含水煤岩变形破坏过程电荷感应和微震信号特征试验研究[J]. 实验力学, 2023, 38(1): 119-130.
LIU Y C, PAN Y S, ZHAO Y F, et al. Charge induction and microseismic signal characteristics of the deformation and fracture process of moisture-containing coal and rock [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(1): 119-130.