

锁固型滑坡损伤演化与声发射前兆研究综述

段溥源

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: 2026年1月10日; 录用日期: 2026年2月2日; 发布日期: 2026年2月13日

摘要

锁固型边坡作为一种典型的岩质边坡, 其稳定性主要受控于锁固段的力学特性, 其失稳过程往往呈现出显著的复杂性和突发性特征。随着人类对大自然的过度开采和利用, 锁固型边坡失稳问题愈发严重。本文系统阐述了锁固型滑坡的概念模型与研究方法, 重点聚焦于数字图像相关(DIC)和声发射(AE)无损监测技术, 对锁固段损伤演化规律与识别破坏前兆特征方面的应用现状。并系统地探讨了AE技术与数字图像相关(DIC)技术联合监测的应用价值, 总结了当前研究的成果与存在的不足, 并对未来多技术融合、智能预警的发展方向进行了展望。

关键词

锁固型滑坡, 声发射, 锁固段, 损伤演化, 滑坡前兆

Overview of Research on Damage Evolution and Acoustic Emission Precursors of Locked Landslides

Puyuan Duan

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

Received: January 10, 2026; accepted: February 2, 2026; published: February 13, 2026

Abstract

As a typical rock slope, the stability of the locked-type slope is primarily governed by the mechanical properties of the locked segment, and its instability process often exhibits significant complexity and suddenness. With human over exploitation and utilization of nature, the instability issue of locked-type slopes has become increasingly severe. This paper systematically expounds on the conceptual model and research methods of locked-type landslides, with a focus on the application

status of digital image correlation (DIC) and acoustic emission (AE) nondestructive monitoring technologies in the damage evolution law of the locked segment and the identification of precursor characteristics of failure. It also systematically discusses the application value of combined monitoring using AE technology and DIC technology, summarizes the current research achievements and existing deficiencies, and looks forward to the future development direction of multi-technology integration and intelligent early warning.

Keywords

Lock-Type Landslide, Acoustic Emission, Locked Segment, Damage Evolution, Landslide Precursor

Copyright © 2026 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

我国多山，山地丘陵占我国总面积的三分之二以上，地质构造复杂，加之随着经济科技的快速发展和人口的不断增加，人类与地质环境作用加剧，造成重大地质灾害极为发育。据《全国地质灾害通报》和国家统计局年鉴，2000~2019年期间，全国地质灾害数量约40.1万起[1]，其中三分之二以上是滑坡灾害。其发生频率高，危害程度大，是重要的灾害防治对象。研究滑坡启滑机理、实现滑坡预测对此具有重要的科学价值。

许多学者指出，大型滑坡的潜在滑面上通常存在具有高承载力、承受应力集中的结构——锁固段[2]-[4]，并据此将边坡划分为锁固型与非锁固型两大类。演化过程受锁固段控制的滑坡被称为锁固型滑坡，在锁固型滑坡中锁固段不解锁，滑坡不启滑[5][6]。因此，研究锁固段的变形破坏过程，对预测此类滑坡具有重要意义。

在此背景下，声发射(AE)技术和数字图像相关(DIC)技术，前者作为一种能够灵敏捕捉材料内部微破裂所释放弹性波信号的无损监测手段，为从细观尺度揭示锁固段损伤演化规律和捕捉其破坏前兆信息提供了独特而强大的工具；后者能够非接触、全场式地监测试样表面的应变场演化，与声发射技术形成有效互补，被广泛应用于与锁固型滑坡相关的研究中[7]。

2. 锁固型滑坡研究现状

2.1. 锁固型滑坡概化模型

基于对滑坡力学机制的深刻认识，秦四清等[8]对锁固段进行了定义，即分布于边坡滑动面的特定区域、高强度并对坡体稳定状态起控制性作用的关键地质结构。并据此将边坡划分为锁固型与非锁固型两大类。锁固型边坡的失稳是一个典型的渐进性“三段式”破坏过程，如图1所示：在第一段，滑移面的软弱夹层发生损伤；随后，应力向锁固段转移并集中，导致锁固段内部损伤逐渐累积、发生裂纹萌生与扩展；最终导致锁固段发生脆性破坏，失去承载能力，从而发生滑坡。这一机制决定了锁固型滑坡通常难以预测且突发性强，传统监测手段难以有效预警。因此，深入研究锁固段的损伤演化规律，精准捕捉其破坏前兆特征，对于实现锁固型滑坡的实时监测与超前预警具有至关重要的理论与工程实际指导意义。

2.2. 锁固段变形破坏的阶段性特征

锁固段的损伤过程遵循岩石压剪破坏的基本规律。如图2所示，其过程可分为5个阶段[9]：岩石

内部先存微裂纹及孔隙压密闭合的压密阶段(I); 岩石几乎不产生破裂, 应力应变曲线近似线弹性的弹性变形阶段(II); 岩石内部微裂纹开始稳定扩展的稳定破裂阶段(III); 岩石内部先存微裂纹加速扩展, 并继续产生新的破裂的非稳定破裂阶段(IV); 以及峰后阶段(V)。其中, 体积膨胀点(C点)是变形破坏过程中的关键力学特征点, 在该点呈现破裂自发进行、变形加速和声发射事件丛集的特征, 可作为岩石宏观破裂前可判识前兆, 监测该点的变形特征和声发射情况至关重要。图2直观展示了这一完整的剪切应力-应变过程。

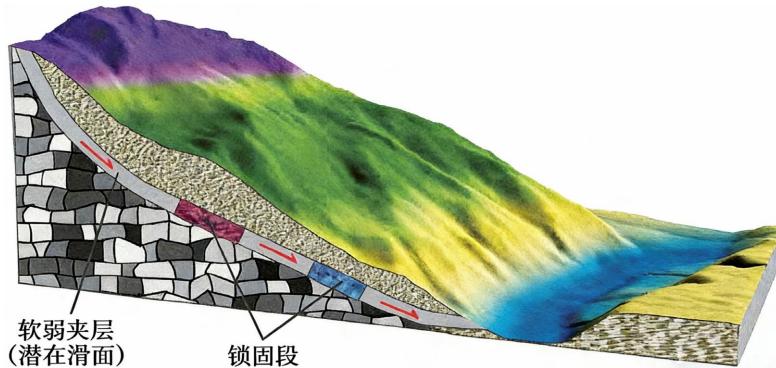


Figure 1. Instability model of locked slope
图 1. 锁固型边坡失稳模型

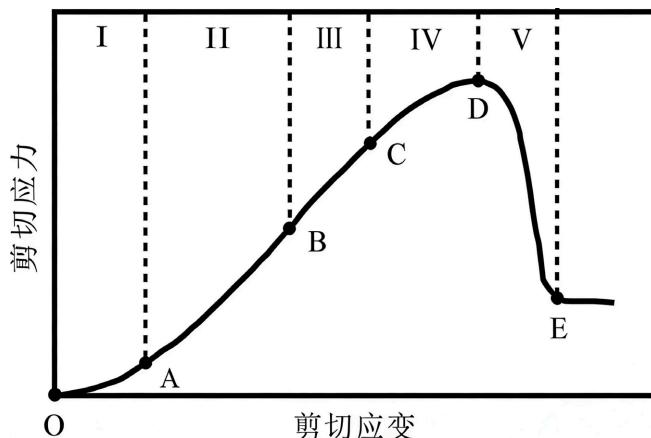


Figure 2. Stress strain curve of rock
图 2. 岩石应力-应变曲线

2.3. 锁固型滑坡的主要研究方法

根据以上模型及理论, 国内外学者发展并结合了多种研究方法。在理论分析方面, 早期的研究明确了锁固段的概念及其关键承载作用。在物理模型试验上, 学者们通过制备不同几何参数(如后缘拉裂隙长度、锁固段尺寸、软弱夹层倾角)的缩尺模型, 开展单轴压缩、直剪或大型振动台试验, 以直观揭示锁固段的破坏模式与力学响应。王闯等[10]设计了三段式锁固型边坡模型进行振动台试验, 分析了其动力响应特征。李娜等[11]则通过单轴压缩试验结合表面应变监测, 探究了锁固段破坏的前兆信号。

随着计算机技术的发展, 数值模拟方法如有限差分法(FDM)和离散元法(DEM), 被广泛应用于模拟锁固型边坡在开挖、降雨等工况下的渐进破坏过程。例如, Li 等[12]采用 FLAC3D 模拟了不同锁固段长度对边坡开挖稳定性的影响。Pan 等[13]则结合 FDM 与机器学习算法, 提出了定量分析锁固段形状及其控

制作作用的新方法。

近年来,研究趋势则突出表现为多技术手段的同步融合监测。在室内试验中,声发射(AE)技术和数字图像相关(DIC)技术凭借其优势被广泛应用于锁固段的研究中[7],前者是一种能够捕捉材料内部微破裂所释放弹性波信号的无损监测手段,可从细观尺度揭示锁固段损伤演化规律并捕捉其破坏前兆信息;后者能够非接触、全场式地监测试样表面的应变场演化,与声发射技术形成内外结合的有效互补。这种内外结合的监测体系为全方位揭示锁固段从微裂纹萌生、汇聚到宏观破裂贯通的完整演化链条提供了前所未有的数据支撑,是当前该领域研究方法的重要进展。

3. 基于 DIC 技术的锁固段裂纹动态演化规律研究

数字图像相关(DIC)技术作为一种非接触式的全场光学监测方法,改变了以往岩土材料变形监测采用应变计的传统研究模式,通过高分辨率相机捕捉试样表面人工散斑域的图像序列,并利用图像匹配与追踪算法,实现对物体表面位移及应变等变形参数的精准分析。该技术因其非接触性、高精度、强适应性及低环境要求等优势,在岩体损伤变形研究领域得到了广泛应用。

3.1. DIC 技术在锁固段损伤演化观测中的直观揭示

在锁固型滑坡研究中,DIC 技术的应用极大地提升了对锁固段损伤演化过程监测的准确性。其能够将加载系统记录的宏观力学行为(如应力-时间曲线)与试样表面的全场应变演化云图进行精确同步与对应,从而直观揭示力学响应与细观变形之间的内在联系。通过系统的监测,研究者可以清晰捕捉到锁固段试样表面出现的应变集中现象,并追踪其随荷载变化的过程。在锁固型边坡的室内物理模型试验中,闫宇航通过 DIC 技术观测“三段式”概化锁固型边坡模型的表面应变场演化[14],揭示了不同后缘拉裂隙长度及岩石材料性质对裂纹起裂位置与扩展路径的控制规律。这种基于全场应变云的观测,直观证实了主导破坏的“起裂点”会随结构面几何参数发生转移,从而决定了不同的宏观破坏模式。

3.2. 基于 DIC 位移场的破坏模式定量判别与细观机制关联

除了定性观察,DIC 技术的实用性更体现在其对破坏模式的定量化判别能力上。研究表明,锁固型试样的破坏通常是多机制共同作用的结果[15]。对于锁固型岩石试样,通过对其细观位移的分析证实,宏观上表现的次生共面剪切裂纹式主导的破坏形式,其剪切作用在位移场中表现显著;但随着后缘拉裂隙长度增大,张拉作用明显增强,破坏形式呈现出由剪切破坏向张拉破坏过渡的趋势。宋义敏等[16]通过使用 DIC 技术在萌生的主裂纹两侧预设标识点,并追踪分析标识点的切向位移与法向位移,从定量角度精确区分裂纹的破坏类型(张拉、剪切或复合型)。这些基于 DIC 位移场的定量分析,成功地将宏观破坏模式与微观变形机理有机联系起来,极大地深化了对锁固段破裂物理过程的理解。

3.3. 从应变场特征指标化到失稳前兆预警的 DIC 技术前沿探索

DIC 技术的研究前沿在于将观测到的应变场演化特征指标化,以发掘其在岩石失稳预警方面的价值。例如,通过计算应变局部化带的分异速率、应变方差或制定有效的应变协方差矩阵指标,可以量化分析和判定试件的破裂前兆行为。在锁固段研究中,这种思路表现为通过 DIC 监测识别裂纹起裂前应变积聚的速率突变点。研究发现,对于锁固型试样,在峰值应力附近,应变场会出现显著的局部化条带,且条带两侧的位移分量可能发生反向,这些定量指标可作为破坏预警的重要参考[17]。DIC 系统能够清晰记录加载过程中不同时刻点的全局应变场,并与应力-时间曲线精确对应,从而帮助确定损伤加速发展的特征应力阈值。这充分证实了 DIC 技术在灾害空间定位(锁定锁固段损伤区)和岩体失稳前兆指标提取方面的实用价值。

4. 声发射(AE)技术在锁固型滑坡研究中的核心应用

声发射本质上是材料受载过程中出现变形或损伤时，通过弹性波释放储能特征的物理响应机制。在锁固型边坡研究中，通过对加载全过程的 AE 信号进行采集与分析，可以深入探究锁固段的损伤演化阶段并识别失稳前的关键前兆特征。其分析方法主要分为参数分析法和波形分析法，前者通过分析振铃计数、幅值等特征参数来研究声发射源特性，具有操作便捷的优势；后者对原始 AE 波形进行定量解析，能承载更丰富的破裂源信息，更适用于实验室尺度的精细研究。

4.1. 基于 AE 参数的损伤演化与宏观前兆识别

在 AE 参数中，振铃计数是记录岩石微破裂事件数量的关键指标，其演化过程直接反映了锁固段损伤的累积进程。研究表明[18]，锁固型试样在加载初期，由于内部原生裂隙压密，AE 振铃计数处于较低水平；随着荷载增加，振铃计数开始增多并变得活跃；当临近峰值强度时，振铃计数会变得密集且徒增，表明锁固段内部损伤加速、宏观破裂即将发生。

基于振铃计数等参数的时序数据，可以应用临界慢化理论识别系统在相变临界点附近恢复力变弱、波动性增强的特征[19]。临近破坏时，方差会呈现显著阶跃式增长，自相关系数趋于 1。在锁固型试样研究中，通常将方差的突变点作为识别失稳前兆的主要依据。

4.2. 基于频谱与统计特征的定量前兆指标提取

除了时域参数，AE 信号的频谱与统计特征为失稳预警提供了更为量化的指标。平均质心频率表征了 AE 信号频谱能量的分布重心。当岩体临近宏观失稳时，其平均质心频率会呈现急剧下降趋势，同时低频声发射事件显著增多。在锁固型试样加载试验中，平均质心频率的显著衰减可作为判定岩体进入临界破坏状态的关键预警指标。

在统计特征方面，声发射动态 b 值(反映大小事件能量分布比例)的急剧下降被广泛认为是岩石临近宏观破裂的显著前兆[20]。 b 值会从较高的初始值逐渐降低。当岩石临近宏观失稳时，内部大尺度裂纹开始萌生和汇聚， b 值会出现大幅度突降。对于锁固型试样，这一“明显大幅度突降”点可作为非常可靠的破坏前兆特征，且能提供较长的预警时间，其突变信号清晰，降低了识别难度。

4.3. 基于波形信号复杂性与多方法综合预警

对 AE 波形信号的深入分析能够揭示损伤演化的复杂性。多重分形理论适用于分析具有复杂尺度特性的 AE 时间序列(如振铃计数序列)。通过对序列进行多重分形谱计算，可以提取谱宽等多重分形参数。研究发现，在锁固型试样失稳破坏前，谱宽等参数会出现显著的突变。例如，可以将谱宽的突增作为试样失稳破坏的预警前兆。这种方法的优势在于其参数的波动性能够揭示裂纹在不同尺度上的动态演化特征。

为对比不同前兆方法的敏感性并构建综合预警体系，可引入前兆响应系数(PrC)进行分析。研究表明，对于多数锁固型试样，PrC 的大小顺序依次为：动态 b 值特征 > 平均质心频率特征 > 多重分形特征 > 临界慢化特征。这一结果说明，动态 b 值特征在多种方法中表现出最强的敏感性和可靠性[21]。在实际工程监测预警中，应倡导多种 AE 前兆识别方法(如动态 b 值、平均质心频率、临界慢化)的联合使用，通过多指标交叉验证，以获取更全面、更可靠的预警信息，提高预警的准确性与时效性。

5. DIC 与 AE 协同监测的时空关联性研究

DIC 与 AE 技术的协同应用，核心价值在于实现了对锁固段内部微裂纹和外部宏观破坏的同步性、

全面性观测，并能在时间和空间上建立精确的对应关系。这种内外联动的分析方法，是揭示锁固段渐进性破坏完整链条的关键。

5.1. 时间序列上的损伤演化同步性

研究发现，在锁固段损伤的稳定破裂阶段(III)至非稳定破裂阶段(IV)，DIC 监测到的表面应变局部化现象开始加剧，与此同时，AE 振铃计数开始增多并变得活跃。临近峰值强度时，DIC 应变场会出现显著的局部化条带，且条带两侧的位移分量可能发生反向，而 AE 振铃计数会变得密集且徒增，动态 b 值出现大幅度突降[22]。这种在时间轴上同步出现的多参数突变，构成了锁固段失稳的复合前兆信号，显著提高了预警的可靠性。

5.2. 空间定位上的损伤源与变形场对应性

声发射技术和 DIC 技术的协同监测更深刻的价值体现在空间定位上。AE 震源定位技术可以描绘出锁固段内部微裂纹萌生、扩展和汇聚的三维空间演化过程，而 DIC 技术则能高精度地捕捉试样表面因内部损伤所引发的应变集中区与位移场分异。研究表明[23]，当内部 AE 事件从集于某一潜在破裂面时，DIC 位移场可能在该区域上方表现出显著的剪切滑移分量，这定量地将宏观破坏模式与微观变形机理有机联系起来。这种空间对应关系不仅验证了损伤演化的内在一致性，更能实现对潜在宏观破裂面空间位置的超前预测，为工程防治提供精准靶向。

6. 结论与展望

综上所述，锁固型滑坡的失稳是一个由锁固段损伤演化主导的渐进性破坏过程。声发射(AE)无损监测技术在其中扮演着不可替代的角色，基于时域(临界慢化)、频域(平均质心频率)、统计(动态 b 值)及多重分形理论的多维度前兆识别方法体系，为捕捉锁固段失稳前的隐蔽信号提供了有效手段，其中动态 b 值特征表现出突出的敏感性与可靠性。AE 技术与 DIC 技术的协同应用，实现了对损伤“内 - 外”联动过程的全面观测。断裂力学理论则从机理上解释了裂纹扩展行为，并可用于工程稳定性定量评价。

然而，研究仍存在不足与挑战。未来需在以下方向重点突破：

- (1) 加强多物理场耦合(如渗流 - 应力 - 冻融)下锁固段损伤机制研究；
- (2) 发展基于机器学习与人工智能的 AE 等多源监测数据智能融合与实时预警技术，特别需要研发能有效滤除环境噪声、增强有效信号的算法，并建立适用于不同地质条件和尺度的前兆指标阈值库；
- (3) 开展更符合地应力条件的真三轴加载试验与模拟；

推动从理论、监测到工程防治的完整技术链条贯通，形成可业务化运行的锁固型滑坡智能预警方法与指南，切实提升防灾减灾能力。

参考文献

- [1] 唐辉明. 重大滑坡预测预报研究进展与展望[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 1-13.
- [2] Terzaghi, K. (1962) Stability of Steep Slopes on Hard Unweathered Rock. *Géotechnique*, **12**, 251-270. <https://doi.org/10.1680/geot.1962.12.4.251>
- [3] Lajtai, E.Z. (1969) Strength of Discontinuous Rocks in Direct Shear. *Géotechnique*, **19**, 218-233. <https://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.218>
- [4] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
- [5] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 秦四清, 王媛媛, 马平. 崩滑灾害临界位移演化的指数律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 873-880.
- [7] 大久保诚介, 汤杨, 许江, 等. 3D-DIC 系统在岩石力学试验中的应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3263-3273.

- [8] 薛雷, 秦四清, 洪晓华, 等. 锁固型斜坡失稳机理及其物理预测模型[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 179-192.
- [9] 杨百存. 锁固段加速破裂行为的物理自相似律[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [10] 王闯, 董金玉, 刘汉东, 等. 三段式锁固型岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4428-4441.
- [11] 李娜, 张科, 金克盛. 饱水作用对锁固型岩体变形特性影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(4): 100-106.
- [12] Xiaochao, L., Dongdong, L., Wei, G., Jiaming, L. and Xiaoxuan, L. (2024) Deformation Evolution Characteristics and Destabilization Mechanism of Locked Slope Excavation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **28**, 2694-2704. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1120-6>
- [13] Pan, J., Tang, Y., Yuan, W., Luo, J., Chen, Y. and Lin, H. (2024) A Method for Automatically Identifying the Shape of Locking Sections in Slopes. *Environmental Earth Sciences*, **83**, 243-254. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11563-9>
- [14] 闫宇航. 锁固型边坡损伤演化规律及破坏前兆特征研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2025.
- [15] 刘帅, 杨更社, 潘振兴. 冻融环境下“三段式”岩质边坡锁固段损伤破坏及灾变机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2781-2795.
- [16] 宋义敏, 邢同振, 赵同彬, 等. 岩石单轴压缩变形场演化的声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 534-542.
- [17] 袁媛, 潘鹏志, 赵善坤, 等. 基于数字图像相关法的含填充裂隙大理岩单轴压缩破坏过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 339-351.
- [18] 李磊, 张跃兵, 龙坤. 单轴压缩下煤样红外辐射与声发射能量演化特征试验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(4): 1-7.
- [19] 程爱平, 张玉山, 戴顺意, 等. 单轴压缩胶结充填体声发射参数时空演化规律及破裂预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2965-2974.
- [20] 高诗磊, 段东, 李杰. 基于多频声发射的大尺寸花岗岩试件破坏特征的研究[J]. 太原理工大学学报, 2025, 56(4): 750-760.
- [21] 张艳博, 梁鹏, 田宝柱, 等. 花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2248-2258.
- [22] Liu, H., Liu, C., Wu, F., Chen, Z., Yu, X. and Yang, J. (2025) Experimental Investigation of Rock Mechanics Behavior under Multistage Pulsating Load Based on Digital Image Correlation and Acoustic Emission Technology. *Engineering Fracture Mechanics*, **318**, Article ID: 110984. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.110984>
- [23] Liang, P., Zhang, Y., Yao, X., Yu, G., Han, Q. and Liu, J. (2025) Objective Determination of Initiation Stress and Damage Stress in Rock Failure Using Acoustic Emission and Digital Image Correlation. *Alexandria Engineering Journal*, **121**, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.02.077>