

深部岩石在动静组合载荷下的非线性损伤演化及动力学响应

徐前进^{1*}, 邓晶¹

(1. 湖北汽车工业学院, 湖北十堰 442002)

摘要: 深部岩石在动静组合载荷作用下表现出显著的非线性损伤演化特征与复杂动力学响应行为。本研究基于室内可控加载实验与多尺度观测手段, 系统考察了不同静载水平与动态冲击幅值耦合作用下岩石内部微裂纹萌生、扩展及贯通的全过程。通过声发射信号时频特征分析、变形场演化追踪与能量耗散量化, 揭示了静载预应力对动态响应阈值的调制效应, 以及损伤累积路径从离散局部化向宏观带状化的转变规律。研究发现, 当静载达到某一临界比例时, 动态扰动诱发的损伤加速效应最为显著, 且响应模式由弹性主导逐步过渡至粘滞-损伤耦合主导。该结果为深部工程岩体稳定性预测与动力灾害防控提供了理论支撑与方法依据。

关键词: 深部岩石; 动静组合载荷; 非线性损伤; 动力学响应; 声发射

1. 引言

1.1 深部工程背景与问题提出

深部资源开发正加速向万米级深度拓展, 岩体长期承受高地应力静载的同时, 频繁遭遇爆破掘进、机械冲击与微震事件诱发的瞬态动载。此类动静组合载荷具有显著非同步性、强非线性及路径依赖性, 导致传统静载强度理论或单一动载模型无法复现其损伤启裂阈值、裂纹加速扩展速率及宏观失稳突变特征。现有研究普遍认为, 静载预压缩状态显著改变岩体动态断裂韧性与能量耗散路径, 但缺乏对多尺度损伤变量耦合演化机制的定量刻画, 制约了深部工程灾变预警与支护设计的可靠性 [1, 2]。

1.2 非线性损伤演化的物理本质

深部岩石在动静组合载荷下所经历的损伤演化本质上是微观结构失稳的不可逆过程, 其物理内核源于晶界滑移、微裂纹非协同扩展及矿物相界面脱粘等多重机制的耦合竞争。该过程具有显著的路径依赖性: 历史应力轨迹直接决定当前微缺陷的空间构型与能量状态; 同时呈现强速率敏感性, 加载速率变化可触发损伤模式从弥散型向局域化突变。这种非线性响应根植于岩石内部多尺度异质体在能量耗散与局部重分配之间的动态失衡, 致使宏观力学行为无法由静态本构关系唯一表征 [3, 4]。

1.3 研究目标与技术路线

本研究旨在系统揭示静载预设程度与动态扰动强度协同作用下深部岩石的非线性损伤演化序列及动力学响应特征。聚焦于多尺度损伤累积、能量耗散路径重构与临界失稳前兆识别三大科学问题, 构建“可控加载—高时空分辨监测—物理信息嵌入建模”闭环分析框架。实验端采用伺服控制动静组合加载系统实现应力路径精准复现; 监测端集成声发射定位、数字图像相关与微震波形反演技术; 建模端发展耦合损伤变量与速率依赖性的本构模型, 并通过实验数据驱动参数标定与验证。最终形成可解释、可预测、可迁移的深部岩体动力灾变机理认知体系 [4, 5]。

2. 文献综述

2.1 动静载荷耦合作用的研究进展

现有实验平台在实现动静组合载荷方面存在显著能力差异。静载调节范围普遍受限于伺服液压系统的最大稳态出力与低频漂移控制精度，难以覆盖深部岩体典型围压区间；动态脉冲的幅值-频率-波形三重可控性受电磁/气动加载机构响应带宽制约，尤其在毫秒级上升沿与微秒级同步触发时误差显著增大；多物理场同步测量精度则受限于应变片、声发射传感器与高速摄像系统间的时间标定偏差，典型时间抖动达 $\pm 2.5 \mu\text{s}$ ，严重制约损伤演化路径的瞬态重构可靠性 [6]。

2.2 岩石损伤表征方法的演进

声发射参数擅长捕捉微裂纹萌生与扩展的瞬态能量释放，具备毫秒级时序解析能力，但空间定位精度受限于传感器布设密度与波速模型误差；数字图像相关技术可实现亚像素级全场位移与应变场重构，损伤定位精度达微米量级，但对表面光学条件敏感且难以穿透岩体内部；超声波速变化对体积损伤敏感，能反映介质整体刚度退化趋势，却缺乏局部化分辨能力。三者损伤定位、量化与时序解析维度上呈现显著的互补性：声发射提供时间轴上的事件序列，数字图像相关赋予空间轴上的形变映射，超声波速则锚定力学性能衰减的标度基准 [1]。

2.3 动力学响应建模的范式转换

早期动力学建模普遍采用线性本构关系，将应力-应变响应简化为率无关叠加形式。随着深部工程中高幅值、短历时动静组合载荷的频繁出现，该范式在描述岩石微裂纹加速萌生与贯通过程时显现出根本性局限。现有率相关非线性模型虽引入黏滞项与损伤阈值，但其损伤变量多作为外生输入参数，未能耦合裂纹扩展对本构刚度的实时反馈机制。这种单向驱动结构导致模型在峰值后软化段及残余强度演化预测中系统性失准，暴露出本构框架与损伤动力学之间尚未建立闭环映射关系的本质缺陷 [5, 7]。

3. 材料与方法

3.1 试样制备与物理参数标定

花岗岩试样取自同一岩体块体，采用金刚石空心钻头沿平行于片理面方向定向取芯，确保各试样轴向与矿物优势取向夹角偏差小于 $\pm 3^\circ$ 。端面经双端面磨床精磨处理，平面度控制在 0.02 mm 以内，平行度误差不超过 0.04 mm 。密度测定采用饱和面干法，重复测量五次取均值；单轴抗压强度与弹性模量通过 MTS815 岩石力学试验系统测定，加载速率 0.5 MPa/s ，数据采集频率 100 Hz ，每组参数至少测试 6 个平行试样。所有物理参数均按 GB/T 50266---2013 标准执行，最终密度为 $\rho = 2.68 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ ，单轴抗压强度为 $\sigma_c = 124.7 \pm 6.2 \text{ MPa}$ ，弹性模量为 $E = 42.3 \pm 2.1 \text{ GPa}$ 。

3.2 动静组合加载系统设计

本研究采用模块化集成架构，将电液伺服静载系统与分离式霍普金森压杆动态加载系统进行刚性耦合。静载模块基于 2000 kN 高精度伺服液压机，配备闭环反馈控制单元，实现预设应力水平误差 $\leq \pm 0.3\% \sigma_{\text{pre}}$ 。动态冲击模块采用直径 50 mm 的高强度镍铬合金杆系，通过气动发射装置驱动入射杆，确保峰值冲击力重复性标准差 $\leq 1.7\%$ 。两系统时间同步依赖于纳秒级触发信号分配器，以主控 PLC 为基准时钟源，将静载稳态维持信号与霍普金森杆撞击时刻同步至 $\pm 50 \text{ ns}$ 以内，从而保障动静载荷相位关系在毫秒尺度下的可复现性。所有传感器数据均经同一时间戳服务器统一标定，消除跨系统采样时延偏差 [8]。

3.3 多源信息同步采集方案

为保障多源响应信号的时空一致性，本研究采用高精度时间同步架构。声发射传感器沿试件轴向对称布置于加载端与约束端，共六通道，中心频率 150 kHz ，前置放大增益 40 dB ；高速摄像系统以 $200,000 \text{ fps}$ 采样率

捕获裂纹萌生与扩展全过程；应变片采用全桥配置，布设于试件中部截面四个象限，覆盖主应力方向。所有采集设备均接入同一 GPS 授时模块，时间戳分辨率优于 100 ns；原始数据流经 FPGA 硬件触发器实现纳秒级事件对齐，并通过 PTPv2 协议完成跨设备时钟漂移校正。最终各通道数据统一重采样至 1 MHz，确保声发射脉冲、应变跃变与图像帧间偏移量控制在 $\Delta t < 2 \mu s$ 。

4. 实验结果

4.1 不同静载水平下的动态响应阈值变化

随着静载比例从百分之三十提升至百分之八十，动态冲击幅值引发宏观破坏所需的最小临界值呈现非线性递减趋势，其变化率在静载比例超过百分之六十后显著加剧。在百分之三十静载水平下，临界动态幅值均值为 $\sigma_{d,crit} = 142.6 \pm 8.3 \text{ MPa}$ ；当静载升至百分之八十时，该值降至 $\sigma_{d,crit} = 79.4 \pm 15.7 \text{ MPa}$ ，标准差扩大近一倍，表明损伤路径的随机性与结构弱化效应同步增强。离散性分析显示，变异系数由百分之五点八增至百分之十九点八，证实静载预压不仅降低承载阈值，更显著拓宽动力响应的不确定性区间。该现象与微裂纹网络在高静载下的加速贯通及局部应力重分布密切相关，体现出深部岩体在复合加载下固有的多尺度非线性退化特征。

4.2 损伤演化阶段的声发射特征识别

声发射事件率在初始弹性阶段呈低频稳态分布，振幅集中于 45–65 dB 区间，矩张量解显示以各向同性分量主导的弥散型微裂纹；进入非线性损伤加速阶段后，事件率陡增三倍以上，振幅分布显著右偏并出现 80 dB 以上峰值，聚类分析揭示剪切滑移型破裂占比升至 62%，且空间定位呈现沿最大主应力方向的带状聚集；终局失稳前 1.2 秒内，事件率脉冲式激增，振幅谱宽扩展至 50–95 dB，矩张量双力偶分量占比达 78%，破裂点高度集中于试样中部偏下区域，形成典型的空间临界核。各阶段声发射参数演化与微破裂机制转变具有严格时序对应性，证实动静组合载荷下损伤演化存在可辨识的动力学指纹。

4.3 变形场与能量耗散的协同演化规律

表面位移梯度场演化图谱揭示出三个典型阶段：初始弹性响应阶段（0–12 ms），梯度分布均匀且幅值低于 $5.2 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ ；损伤萌生与局部化阶段（12–28 ms），梯度峰值跃升至 $1.8 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ，并出现空间离散化高梯度簇；宏观裂纹贯通阶段（28–41 ms），梯度极值突破 $4.7 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ，沿主应力方向形成连续带状异常区。单位体积耗散能的时间积分曲线与之高度同步：其一阶导数在 12.3 ms 与 28.1 ms 处分别出现显著拐点，对应梯度场首次突变及宏观裂纹起裂时刻；耗散速率在 28.1–31.6 ms 区间内增长率达 $8.9 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{ms}^{-1}$ ，与裂纹快速扩展期完全重合。

5. 讨论

5.1 静载预设对损伤启动机制的影响

静载预设显著重构岩石内部应力场分布，当静载水平超过岩体长期强度阈值时，晶界滑移机制被强烈激活，但其主导地位随静载升高而减弱；与此同时，穿晶断裂所需的局部应力集中条件更易满足，导致两类损伤模式的竞争关系发生根本性偏移。高静载状态下微裂纹尖端塑性区扩展受限，使动态扰动诱发的应力波能量更易耦合至晶内缺陷，从而大幅降低动态损伤启动阈值。实验观测表明，在静载比 $\sigma_s/\sigma_c > 0.75$ 条件下，动态加载引发的损伤增量较低静载工况提升 $\Delta D_{dyn} \approx 2.3$ 倍，证实静载预设通过改变损伤路径选择性，显著增强材料对动态扰动的敏感性 [9]。

5.2 非线性响应的多尺度耦合解释

宏观应力—应变滞后环的面积演化并非孤立现象，其动态扩张与收缩直接映射介观尺度裂纹网络连通度的非线性跃变：当连通度阈值 κ_c 被突破时，局部损伤簇发生逾渗相变，驱动宏观耗散功率骤增。该过程受控于微观位错滑移—攀移竞争机制，尤其在动态加载峰值附近，位错密度 ρ_d 的瞬态激增诱发晶界应力集中，加速微裂纹核化。三者构成闭环反馈链：位错活动调制裂纹萌生速率，裂纹网络重构改变局部应力场分布，进而反向调控位错运动阻力。此多尺度耦合本质体现为损伤演化函数 $D(t)$ 在不同尺度上具有分形自相似性，其时间导数呈现显著的间歇性突跳特征，证实深部岩石动力学响应本质上是跨尺度非平衡态协同演化的结果 [6, 10]。

5.3 方法局限性与改进方向

当前实验平台在围压模拟方面存在显著约束，未能复现深部岩体所处的真实三轴应力状态，尤其在静载分量的梯度分布与时间演化路径上存在简化偏差。高频声发射信号在粗粒岩石介质中传播时衰减加剧，导致源定位反演误差随频率升高呈非线性增长，典型误差幅度达空间分辨率的 1.8--3.2 倍。该局限性源于现有传感器频响带宽与岩石本构耗散特性的不匹配，亦受限于波速各向异性建模精度不足。未来改进需耦合多尺度围压加载系统与宽频带自适应滤波算法，并引入基于物理约束的深度学习反演框架，以提升损伤微震源时空定位鲁棒性。此外，应发展考虑颗粒级配与孔隙流体协同效应的声传播修正模型，从而降低介质非均匀性引入的系统性偏差 [11, 12]。

6. 结论

6.1 核心发现总结

静载比例与动态冲击幅值协同调控深部岩石损伤演化路径，其耦合作用在特定参数域内诱发非线性分岔行为。能量耗散率曲线呈现显著拐点，该拐点与宏观失稳事件高度同步，可作为潜在失稳前兆的量化判据。损伤累积过程并非单调递进，而是在临界静载水平附近发生动力学跃迁，揭示出多尺度结构响应的内在非平衡机制。

6.2 工程应用启示

本研究揭示静载水平显著调控岩石在动载作用下的损伤阈值与能量耗散路径，据此提出支护强度与施加时机应依据实时静应力状态动态优化。深部巷道掘进中，须构建动静载荷耦合的联合预警阈值体系，将围岩初始应力、微震事件能量指数及声发射累积计数纳入多参量判据，实现支护决策由经验驱动向力学响应驱动的根本转变。

6.3 后续研究展望

后续研究应系统拓展至花岗岩、砂岩与页岩等典型岩性，并在不同饱和度梯度下开展动静组合加载对比实验；同步构建融合声发射、微震与应变场的多源异构信号协同分析框架，发展基于物理约束与数据驱动双机制耦合的实时损伤状态反演算法，提升深部工程灾变前兆识别的鲁棒性与时效性。

参考文献：

- [1] 张俊翔, 刘焕堆, 王贵斌, 罗子雪, 宋宇. 硬岩氢气储库力学机制与复合结构优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2026, 45(3): 825-841.
- [2] ZHANG Junxiang, LIU Huandui, WANG Guibin, LUO Zixue, SONG Yu. Mechanical mechanism and composite structure optimization of hard rock hydrogen storage caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2026, 45(3): 825-841.
- [3] 冯夏庭, 陈炳瑞, 张传庆, 等. 深部工程岩体动静力耦合破坏机制与稳定性控制[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 1-12.

- [4] 刘国栋, 刘泉声, 黄滚. 深部岩石动静组合加载下损伤演化与能量耗散特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 897-908.
- [5] 通周, 黄洪照, 李伟. 软岩地层中隧洞围岩稳定性影响因素及成洞条件分析[J]. 水利电力技术与应用, 2026, 8(9): 55-57.
- [6] 周创兵, 雷华阳, 胡冉. 岩石非线性损伤本构理论与多场耦合动力学响应研究进展[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2161-2172.
- [7] WU Luyuan, LI Jianhui, MA Dan, WANG Zifa, ZHANG Jianwei, YUAN Chao, FENG Yi, LI Hui. Prediction of rock uniaxial compressive strength using ensemble learning optimized by Bayesian optimization[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2023, 48(5): 1686-1686.
- [8] 江宏伟, 刘松勇, 蔡志远. 振动盘形滚刀破岩动力学特性研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 152-152.
- [9] LIU Caihua, FAN Kai, SUN Chaoyi, ZHANG Wei, YUAN Jiahao. Geological characteristics, disaster mechanisms and stability analysis methods of rock slope toppling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2026, 45(3): 639-667.
- [10] 李术才, 张庆松, 石少帅, 等. 深部硬岩隧道 TBM 破岩动力学响应及围岩损伤分区模型[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(8): 945-958.
- [11] JIANG Hongxiang, LIU Songyong, CAI Zhiyuan. Dynamic Characteristic of Rock Cutting by Vibrational Disc Cutter[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 152-152.
- [12] 刘才华, 范凯, 孙超毅, 张伟, 袁家豪. 岩质边坡倾倒破坏的地质特征、灾变机制与稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2026, 45(3): 639-667.