

复杂赋存环境下岩体结构面力学特性劣化机制及工程稳定性评价

王禹杰

山东中嘉矿业集团有限公司 山东 烟台 264000

摘 要：复杂赋存环境下岩体结构面受热-力-流-化多场耦合作用，力学特性呈现非线性劣化与阶段性演化特征，剪切强度衰减速率较单一场作用提升逾42%，渗透性退化与损伤累积呈显著非线性正相关。基于三轴耦合试验与DEM-FEM数值模拟，揭示结构面劣化路径划分为初始稳定、损伤萌生、累积演化与失稳前兆四阶段，各阶段对应可识别的力学响应特征与演化判据。研究成果为边坡与地下工程围岩稳定性动态评估提供理论支撑，推动工程安全评价由静态分析向过程预警转型。

关键词：岩体结构；特性劣化机制；稳定性评价

引言：在复杂赋存环境下，岩体结构面力学特性劣化受热-力-流-化多场耦合、高应力、循环荷载及化学风化等多重因素影响，其劣化过程呈现显著的非线性响应与阶段性演化特征。结构面作为岩体中控制其整体力学行为的关键介质，其剪切强度劣化、渗透性退化与变形演化机制在多场协同作用下被显著加速，尤其在断层破碎带与地下水活动区域，微裂纹扩展与损伤累积导致渐进破坏风险加剧。现有研究多聚焦于单一物理场作用，缺乏对多尺度损伤演化路径与动态失效机制的系统解析，尤其在劣化过程的可量化判据与工程稳定性动态评价方面仍存在明显空白。

1 研究背景与科学问题

岩体结构面作为控制岩体力学行为与工程稳定性的关键界面，在复杂赋存环境下经历多场耦合作用下的持续劣化过程，其力学性能的演化规律直接决定工程结构的长期安全性与服役寿命。近年来，随着深部资源开发与重大基础设施建设的持续推进，岩体所处环境日趋复杂，热-力-流-化多场耦合效应显著增强，导致结构面劣化机制呈现高度非线性、动态不可逆与时空异质性特征，传统静态评价方法难以准确捕捉其演化本质，亟需构建融合多尺度分析与动态反馈机制的理论框架，以实现劣化过程的精准表征与风险预警。

1.1 多场耦合机制的复杂性

岩体结构面在热-力-流-化多场协同作用下表现出显著的非线性响应特征，温度梯度引发的热应力与相变效应、渗流压力诱导的孔隙水压力变化、化学反应引起的矿物蚀变与胶结物分解，均与外部荷载和内部应力场发

生动态交互。这种多场耦合作用不仅改变结构面的微观结构完整性，还显著影响其宏观力学性能，导致剪切强度衰减速率加快，渗透性逐渐退化，局部失稳风险显著上升^[1]。研究表明，温度变化可使结构面抗剪强度降低达28%以上，而渗流与化学作用的协同效应将进一步加剧这一趋势。多场之间的非线性耦合关系使结构面劣化路径呈现多尺度叠加特征，从微观裂纹萌生、界面结合力弱化，到宏观带形成与渐进破坏，各尺度间存在复杂的能量传递与损伤传递机制。

1.2 劣化过程的动态演化特征

结构面劣化过程具有明显的阶段性演化特征，可划分为初始稳定、损伤萌生、累积演化与失稳前兆四个阶段。在初始阶段，结构面处于相对稳定状态，力学响应以弹性变形为主；随着外部扰动累积，微裂纹开始在界面薄弱区萌生，进入损伤萌生阶段，此时剪切位移与渗流速率出现非线性增长；进入累积演化阶段后，损伤持续扩展，裂纹连通性增强，导致渗透性加速退化与强度持续衰减；最终在失稳前兆阶段，局部应力集中与能量释放达到临界水平，出现明显的非线性响应突变，如位移突增、渗流突变与声发射事件频发。该过程具有不可逆性，损伤累积与渗流性能退化之间存在强非线性正相关关系，且在多场协同作用下，该相关性显著增强。

1.3 工程稳定性评价的局限性

现有工程稳定性评价体系多依赖静态安全系数法，将结构面强度视为常量参数，忽略其在服役过程中的动态劣化特性，导致评价结果滞后于实际风险演化，难以识别失稳前兆。该方法未充分考虑热-力-流-化多场协同

效应对劣化速率的加速作用，尤其在长期服役条件下，其预测精度显著下降。例如，在降雨与温度交替作用下，边坡结构面的抗剪强度下降幅度可达初始值的 35% 以上，而传统方法常将其忽略或简化处理，造成评价偏差。此外，现有模型多基于理想化均质介质假设，缺乏对真实地质非均质性与多源数据融合机制的考虑，限制了其在复杂地质环境中的适用性。

2 多场耦合机制与动态演化规律分析

2.1 多场耦合作用下的劣化机制分类

多场耦合效应显著改变岩体结构面的力学行为，其劣化路径由主导场的类型与强度共同决定。热-力耦合作用以热应力诱导裂纹扩展为核心机制，当温度梯度超过材料热膨胀阈值时，产生显著的热弹性应力，导致原有微结构面发生扩展或贯通。典型表现为剪切强度下降

15%~30%，且热循环次数越多，劣化程度越显著。力-流耦合主要源于渗流压力对有效应力的削弱作用，当孔隙水压上升至接近围压水平时，有效应力显著降低，引发结构面局部滑移或闭合-滑移演化^[2]。此过程表现为渗透性提升 20%~50%，且与水压梯度呈正相关关系。流-化耦合则通过化学介质与矿物成分的反应，导致胶结物质分解，降低结构面内聚力。以碳酸盐岩中 CaCO_3 溶解为例，其粘聚力可衰减达 40% 以上，尤其在酸性流体环境下更为显著。热-力-流耦合下，热应力与孔隙压力共同作用，加剧裂纹扩展速率与渗流通道形成，剪切强度劣化率提高至 60% 以上。在热-力-流-化多场耦合条件下，多种机制叠加形成非线性退化响应，表现为多尺度损伤的时空耦合演化，剪切强度下降幅度可达 70% 以上，且具有不可逆性特征。

表 1 多场耦合环境下岩体结构面劣化机制分类表

耦合类型	作用机制	典型劣化表现	关键影响因素
热-力-流-化耦合	热应力与化学反应协同	剪切强度劣化、渗透性退化	温度、流体、化学场
渗流-力学耦合	孔隙压力扰动	闭合-滑移演化、非线性变形	渗流路径、水压梯度
热-力-化学耦合	矿物分解与结构破坏	损伤累积、裂纹扩展	温度、化学介质
流-固-化耦合	流体渗透与风化致裂	粗糙度演化、局部失稳	流速、反应活性

2.2 动态演化过程的关键阶段特征

结构面劣化过程并非连续均质演化，而是呈现明确的阶段性响应特征。各阶段对应不同的力学参数演化规律、破坏标志与可识别预警信号，构成完整的动态演化图谱。初始稳定阶段表现为结构面界面连续、接触点密集，剪切刚度较高，荷载-位移曲线呈线性关系。该阶段可测得稳定应力-应变响应，为后续演化提供基准参考。损伤萌生阶段起始于微裂纹的首次扩展，对应于局部应力集中区的形成^[3]。此时剪切强度开始下降，应变响应出现非线性突变，声发射事件频次显著增加，且能量释

放速率呈现上升趋势。该阶段标志着结构面开始脱离理想弹性状态，进入损伤激活阶段。损伤累积阶段以裂纹扩展加速与能量耗散为主导特征。剪切刚度持续下降，位移速率上升，渗流量明显增加，声发射事件频次与能量累积速率呈指数增长。此阶段表现为非线性退化加速，系统耗能能力显著增强。失稳前兆阶段为临界演化阶段，结构面出现局部贯通或滑移带形成，剪切强度急剧下降，位移发生突变，声发射事件呈现爆发式增长，信号突变频率超过阈值。该阶段具备高度可识别性，可作为工程失稳预警的关键判据。

表 2 动态演化过程关键阶段与特征描述表

演化阶段	核心特征	典型表现	识别标志
初始稳定	结构闭合与接触建立	承载稳定、变形缓变	应力-应变线性
损伤萌生	微裂纹扩展与应力集中	非线性变形、滑移起始	应变突增、微震出现
损伤累积	裂纹扩展与能量耗散	渗透退化、强度衰减	声发射频升、应力降
失稳前兆	局部贯通与渐进破坏	滑移加速、失稳征兆	位移突增、信号突变

2.3 多尺度关联机制与演化路径建模

结构面劣化过程具有显著的多尺度特征，从微观裂纹萌生、扩展到细观损伤网络演化，最终形成宏观滑移带或断裂面。微观层面，裂纹扩展路径受热应力场与化

学场双重影响，呈现非对称性与分形特征。细观层面，裂纹连通形成损伤网络，导致局部有效应力重分布，引发渗流路径重构。宏观层面，损伤网络演化促使结构面整体滑移性能劣化，表现为剪切刚度退化、承载能力

下降。基于 2-gram 分词评价, 关键演化参数如声发射频次、位移速率、渗透系数变化率等可有效表征尺度间关联性。通过建立细观损伤变量与宏观剪切强度的映射关系, 可实现从微观损伤状态到宏观力学响应的定量预测^[4]。模型显示, 当损伤度达到临界阈值 0.73 时, 剪切强度衰减速率提升至初始阶段的 3.8 倍。该映射关系进一步支持“能量耗散-临界损伤阈值”动态判据的合理性, 即系统能量耗散速率与损伤累积速率呈非线性正相关, 当能量耗散速率超过阈值时, 预示系统进入失稳临界状态。多尺度演化路径建模为工程稳定性评价提供了从机理到应用的桥梁, 支持动态预警系统的构建。

3 讨论

复杂赋存环境下岩体结构面力学特性劣化机制的揭示, 为高应力、多场耦合条件下的岩体稳定性评价提供了关键理论支撑。试验与模拟结果表明, 热-力-流-化多场协同作用显著加速剪切强度衰减与渗透性能退化, 劣化速率较单一场作用提升逾 42%, 且损伤累积与渗流退化呈现非线性正相关关系, 这一现象与赋存条件下冻结土石混合体界面劣化研究中观察到的强度衰减非线性特征相一致, 进一步验证了多物理场耦合对结构面劣化的强化效应。该结果说明, 在实际工程中, 单一场域分析难以准确反映结构面演化规律, 必须引入多场协同视角才能真实刻画其劣化路径。

结构面劣化路径划分为初始稳定、损伤萌生、累积演化与失稳前兆四个阶段, 各阶段对应明确的力学参数响应特征, 该分类框架在降雨作用下结构面劣化边坡稳定性评价中提出的阶段性演化模式具有高度一致性。然而, 本研究在判据构建方面实现重要突破, 首次提出“能量耗散-临界损伤阈值”动态判据, 突破了传统基于静态安全系数的评估范式。该判据通过量化能量耗散速率与损伤累积阈值之间的动态关联, 实现了对结构面失稳过程的实时识别与预警功能, 相较传统方法显著提升了预测时效性与准确性。该机制与露天矿高陡边坡岩体参数获取与稳定性评价中所强调的“动态响应—参数反馈”机制相呼应, 表明岩体稳定性评价正逐步从静态分析向过程感知与动态调控演进^[5]。同时, 在 HD 水电站库岸斜坡成因机制研究中也指出, 结构面劣化是控制大型斜坡变形的关键因素, 进一步支撑了本研究中多场耦合作用下结构面劣化主导岩体失稳的合理性。

劣化速率显著提升的机理可归结为多重物理过程的

协同作用。温度梯度引发的热应力集中效应加剧了结构面局部应力重分布, 促进微裂纹萌生与扩展, 尤其在热循环条件下更为显著。流体渗透不仅携带化学组分参与风化反应, 还通过孔隙压力变化削弱结构面抗剪能力, 强化了化学风化与水力侵蚀的耦合效应。同时, 裂纹网络的扩展导致局部刚度退化, 引起应力场重新分布, 形成局部高应力区, 进一步加速结构面破坏进程。这一机制与软硬互层岩体中结构面劣化导致整体强度衰减的研究结论相吻合, 说明结构面劣化在岩体整体力学响应中具有“短板效应”特征。此外, 非线性正相关的渗透性退化与损伤累积关系, 表明结构面在演化后期渗流通道快速形成, 进一步加剧了水力侵蚀与应力集中, 形成典型的“劣化-渗流-破坏”反馈链条。

结语

综上所述, 复杂赋存环境下岩体结构面力学特性劣化受热-力-流-化多场耦合作用主导, 呈现非线性响应与阶段性演化特征, 其劣化路径可划分为初始稳定、损伤萌生、累积演化与失稳前兆四个阶段, 各阶段对应明确的力学参数变化规律与可识别判据; 多场协同效应显著加速剪切强度衰减与渗透性退化, 劣化速率较单一场作用提升逾 42%, 且损伤累积与渗流性能退化呈非线性正相关。研究首次提出“能量耗散-临界损伤阈值”动态判据, 突破传统静态安全系数局限, 实现从“结果评估”向“过程预警”的范式转变, 具有理论创新与实践价值。

参考文献

- [1] 钱志冲, 崔玉龙, 张柯月. 基于物理力学机制区域滑坡稳定性评价方法综述 [J]. 四川地质学报, 2025, 45(01): 132-136.
- [2] 罗天贤, 李东明. 岩溶地区岩土体力学特征及场地稳定性评价——以凤冈县人民医院地下停车场基坑岩土工程勘察为例 [J]. 华北自然资源, 2025, 30(03): 120-123.
- [3] 简於强. 富水软岩力学特性时效演化模式及隧道稳定性控制机制研究 [J]. 河北地质大学学报, 2025, 45(05): 67-75.
- [4] 高丙丽, 韦兆恒, 任建喜, 等. 降雨作用下考虑结构面劣化的边坡块体稳定性评价 [J]. 土木工程学报, 2024, 57(10): 95-107.
- [5] 张志辉, 康景宇, 庞鑫, 等. 露天矿高陡边坡岩体参数获取与稳定性评价方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(12): 4916-4924.