

断层破碎带围岩稳定性分析及支护方案优化

王文坤, 张娟

洛阳栾川钼业集团股份有限公司矿山分公司, 河南 洛阳 471500

DOI:10.61369/ERA.2026080018

摘 要 : 断层破碎带围岩具备结构松散及力学性能偏弱的固有特征, 极易滋生变形坍塌类失稳隐患并干扰现场施工的安全推进与工期排布。围绕破碎带围岩自身构造特点失稳诱因及破坏演化规律展开深度剖析, 依托现场实际工况完善支护布设思路, 依托适配支护类型选取与参数微调强化围岩整体承载能力以维系施工作业平稳开展。相关研究成果能够为同类破碎带工程的围岩稳定管控及支护架构布设提供实操依据, 弥补传统支护模式在复杂破碎带环境中的适配短板。

关 键 词 : 断层破碎带; 围岩稳定性; 支护方案; 优化设计

Stability Analysis of Surrounding Rock in Fault Fracture Zone and Optimization of Support Scheme

Wang Wenkun, Zhang Juan

Luoyang Luanchuan Molybdenum Industry Group Co., Ltd. Mining Branch, Luoyang, Henan 471500

Abstract : The surrounding rock of fault fracture zones has inherent characteristics of loose structure and weak mechanical properties, which easily breed instability hazards such as deformation and collapse, and interfere with the safe progress and schedule arrangement of on-site construction. A deep analysis is conducted on the causes of instability and the evolution of damage in the surrounding rock structure of the fractured zone. Based on the actual working conditions on site, the support layout is improved, and the overall bearing capacity of the surrounding rock is strengthened by selecting appropriate support types and fine-tuning parameters to maintain the smooth progress of construction operations. The relevant research results can provide practical basis for the stability control and support structure layout of surrounding rock in similar fractured zone projects, and make up for the adaptation shortcomings of traditional support modes in complex fractured zone environments.

Keywords : fault fracture zone; rock stability; support plan; optimized design

引言

断层破碎带由岩体经受构造运动挤压剪切作用发育而成, 区域内围岩混杂破碎岩块断层泥与各类裂隙, 整体完整度与承载强度均处于较低水平, 属于基建工程中较为常见的复杂地质类型。破碎带围岩失稳会诱发巷道垮塌与岩体大幅形变等地质灾害, 徒增施工难度拉长建设周期还会诱发人身安全隐患与经济损耗, 成为阻碍工程项目平稳落地的核心制约因素。研判破碎带围岩稳定特质厘清内在失稳机理并匹配适配支护体系, 可有效规避地质灾害隐患强化工程整体安全储备与服役性能, 为现场施工筑牢技术根基并承接后续稳定研判与支护改良的深层次探究。

一、断层破碎带围岩基本特征及失稳隐患

(一) 断层破碎带围岩结构组成

构造运动作用致使岩体碎裂衍生特殊地质结构体, 破碎带围岩内部构造具备天然复杂特质与非均质分布特征, 破碎岩块断层泥裂隙及各类充填物共同构成基本组分。原生岩体经挤压错动生成规格参差形态无规则的块状岩体, 岩块之间粘结状态松散难以形成整体协同受力体系, 长期风化蚀变催生细粒断层泥物质遇水环境便会软化溃散大幅折减自身承载能力。贯通围岩体系的裂隙构造划分原生与次生两类成因, 岩体成型阶段自然孕育原生裂

隙, 构造形变及现场施工扰动催生次生裂隙, 裂隙发育规模直接左右岩体渗透能力与整体稳定状态, 泥质砂质类充填介质也会持续弱化围岩原有力学禀赋。

(二) 断层破碎带围岩力学特性

破碎带围岩力学禀赋和完整岩体存在天然分野, 整体呈现承载强度偏低塑性形变突出渗透能力较强的固有特质。松散构造格局弱化岩块界面粘结效应, 各项力学指标均远不及完整岩体, 外部荷载作用下极易产生塑性形变与剪切破坏现象。裂隙网络为地下水渗流提供天然通道, 水体浸润促使断层泥发生软化膨胀, 岩体原有受力禀赋持续衰减进而拉低整体承载水平放大失稳隐患^[1]。

围岩力学参数随空间方位呈现差异化分布规律，现场施工产生的扰动作用还会持续侵蚀岩体固有性能，让破碎区域围岩的失稳隐患进一步加剧蔓延。

（三）断层破碎带围岩失稳主要隐患

破碎带围岩失稳风险集中体现为岩体形变局部塌落及突水突泥等多发地质现象。塑性形变是围岩失稳的常见表现形式，各类沉降与收敛形变超出阈值范围便会缩减巷道通行空间，还会对既有支护体系造成结构性损伤，施工扰动剧烈且支护布设滞后区域极易出现岩块掉落冒顶塌落现象，严重工况下还会阻断巷道通行路径危及现场作业人员安全。破碎带地质构造为地下水运移搭建天然流通路径，水体压力累积至临界值便会裹挟泥砂碎岩骤然涌出，极易诱发重大工程安全事故。

二、断层破碎带围岩稳定性影响因素分析

（一）地质因素对围岩稳定性的影响

地质条件构成断层破碎带围岩稳定状态的核心制约条件，断层空间形态围岩岩性基底及地下水赋存状态均在其中起到关键作用。断层走向倾向与落差排布方式能够左右岩体受力格局及破碎发育程度，倾向偏陡区域岩体受力分布失衡，更易出现滑移形变破坏^[2]。岩性基底质地优良的岩体结构完整度更高，自然具备更好的稳定基底，软质风化类岩体构成的围岩整体禀赋偏弱，在外力作用下极易产生形变损伤。水体浸润能够弱化岩体自身力学基底，附加渗透压力还会进一步扰动原有受力平衡，水体富集程度与压力量级越高，围岩整体稳定基底便越薄弱。

（二）施工因素对围岩稳定性的影响

现场施工作业属于扰动断层破碎带围岩稳态的重要外部诱因，施工工艺选取作业推进节奏及现场扰动效应都会干预岩体原有平衡状态。爆破荷载超标开挖流程排布失当都会加剧岩体碎裂程度，打破原生构造格局引发内部应力重新排布，进而滋生各类失稳隐患。作业节奏推进过快会让裸露岩体错失及时防护时机，长期暴露于自然环境受风化水体持续侵蚀，自身力学基底逐步衰减并放大失稳概率。机械作业与人工作业带来的持续扰动会削弱岩块界面粘结效应，先期局部形变若得不到有效管控，便会逐步演化成大范围整体失稳态势。

（三）支护因素对围岩稳定性的影响

支护体系是管控断层破碎带围岩形变失稳的重要工程举措，支护类型选型参数指标设定及现场施工成型品质都会关联岩体稳态管控成效。支护类型未能契合岩体受力特征与破碎发育规模，便难以承接围岩产生的形变压力，无法从构造层面抑制失稳态势蔓延。支护配置标准达不到现场工况需求，整体承载层级布设间距把控失衡，难以约束岩体自由形变空间，支护体系应有防护效能也无从发挥。锚杆锚固成型不达标喷射砼材质性能不足等施工瑕疵，都会削弱支护架构整体协同承载能力，难以对破碎围岩形

成长效稳定管控作用。

三、断层破碎带围岩稳定性评价方法

（一）地质勘察评价方法

地质勘察作为围岩稳定性评价的核心基础，依托现场实地探查与室内试验相结合的技术路径，系统采集断层破碎带地质参数及围岩力学指标，为后续稳定性研判提供精准数据支撑^[3]。现场勘察环节整合地质测绘、钻孔探测及巷道揭露等多元技术手段，全面厘清断层空间产状、围岩内部构造、裂隙发育规模及地下水赋存分布特征，确保地质信息采集的全面性与准确性；室内试验针对现场采集的围岩试样，系统开展抗压、抗拉、抗剪等力学性能测试，精准测定各项力学参数，深入剖析围岩力学禀赋，结合现场勘察获取的基础数据，对围岩稳定性等级进行初步研判，为后续稳定性评价工作推进及支护方案设计筑牢数据根基，保障评价结果的科学性与实用性。

（二）定性评价方法

定性评价方法以地质勘察获取的基础数据为核心依托，融合长期工程实践积累的经验，对断层破碎带围岩稳定性进行综合研判。通过系统梳理断层破碎带发育规模、围岩岩性质地、地下水赋存条件及施工扰动影响程度等关键因素，结合同类工程围岩失稳案例的经验总结，对围岩稳定性进行分级划分，明确围岩发生失稳现象的可能性及风险等级。该方法操作流程简便易行，无需复杂的试验设备与计算过程，耗时较短，能够快速完成围岩稳定性的初步判断，适配工程前期围岩稳定性筛查的需求，为后续定量评价工作的开展及支护方案的优化设计指明方向，提升工程前期研判的效率与针对性。

（三）定量评价方法

定量评价方法通过构建科学合理的评价指标体系，结合行业相关评价标准，对断层破碎带围岩稳定性开展精准量化分析。从围岩力学性能、裂隙发育状态、地下水压力及施工扰动强度等关键维度，筛选核心评价指标，通过合理方法确定各指标权重分配，采用综合评分、强度折减等量化分析手段，精准计算围岩稳定性评分值，依据评分结果明确围岩稳定性等级，清晰界定围岩失稳的临界状态及风险程度。相较于定性评价方法，该方法精准度更高，能够为支护方案的优化调整提供更为精准的技术支撑，适配工程中期详细稳定性评价的需求，为工程施工安全管控提供科学依据。

四、断层破碎带支护方案优化设计

（一）支护方案优化原则

断层破碎带支护方案优化需坚守适配性、安全性、经济性与可行性四大核心原则，核心目标是通过科学优化实现围岩失稳有效管控，为现场施工筑牢安全防线。适配性聚焦支护方案与围岩构造特征、力学禀赋及失稳隐患的精准匹配，依据不同区域围岩稳定等级差异，针对性选取适配的支护类型与参数配置，避免方

案与现场工况脱节；安全性要求支护结构具备充足承载强度与刚度，能够有效承接围岩释放压力，约束岩体变形，从根本上规避失稳事故发生；经济性强调在保障支护效能的前提下，优化参数配置缩减支护成本，杜绝资源不必要损耗；可行性则要求方案契合现场施工条件，施工工艺简洁便捷，便于现场操作实施与施工质量管控，确保方案能够落地执行并发挥实效。

（二）支护形式优化选择

结合断层破碎带围岩构造特征与失稳隐患类型，优化采用组合式支护模式，摒弃传统单一支护的局限性，全面提升支护整体效能。针对围岩稳定性较差、裂隙发育密集、地下水赋存量大的区域，采用锚杆+喷射混凝土+钢拱架组合支护架构，锚杆深入深层围岩实现锚固加固，强化岩体整体协同性，喷射混凝土封闭岩体表面，阻隔风化作用与地下水侵蚀，钢拱架承担围岩压力，有效约束岩体变形；针对围岩稳定性相对良好的区域，采用锚杆+喷射混凝土简化支护结构，在保障支护效果的同时降低施工成本；针对地下水富集区域，优先增设排水设施疏导水体、降低水压，再搭配组合支护体系，实现围岩稳定性的全方位提升，适配不同工况下的支护需求。

（三）支护参数优化调整

依托围岩稳定性评价结果与现场施工实际工况，对支护参数进行系统性优化调整，确保支护结构充分发挥最佳防护效能^[4]。锚杆参数优化重点调整长度、直径、布设间距及锚固方式，根据围岩破碎程度与力学强度差异，适当增加锚杆长度与直径，缩小布设间距，采用全长锚固工艺，大幅增强锚杆锚固力与加固效果；喷射混凝土参数优化聚焦强度等级与喷射厚度调整，提升混凝土自身强度与与围岩的粘结能力，确保喷射层与岩体表面紧密贴合，形成有效防护；钢拱架参数优化主要调整型号规格、布设间距及连接方式，选用高强度钢拱架提升承载能力，缩小间距强化支护密度，加强钢拱架间连接强度，提升整个支护结构的整体性与协同承载效能。

五、支护方案实施保障及应用效果验证

（一）支护施工质量控制措施

支护施工质量直接决定支护方案效能发挥，需构建完善质量

管控体系，贯穿施工准备、现场作业至竣工验收全流程。施工前期严格检验锚杆、钢拱架、混凝土等支护材料，确保各类材料性能指标契合设计标准；现场作业阶段，严格遵循优化后的支护参数与施工工艺，重点检测锚杆锚固质量、喷射混凝土厚度及强度、钢拱架安装精度，对施工中出现的质量隐患及时排查整改；竣工验收环节，对支护结构开展全面检测，确保整体质量达标，为断层破碎带围岩稳定性提供坚实保障。

（二）施工过程动态监测措施

为实时掌握围岩形变及支护结构受力状态，施工期间推行动态监测机制，结合监测数据动态调整支护方案，保障支护效能。监测范围涵盖围岩收敛、下沉形变及锚杆受力、钢拱架应力等核心指标，采用专业监测设备定期采集数据并开展分析处理，精准研判围岩稳定性及支护结构工作状态^[5]。一旦监测数据超出预警阈值，立即采取强化支护措施，通过增加锚杆数量、加密钢拱架间距等方式，遏制围岩失稳态势，切实保障现场施工安全。

（三）支护方案应用效果验证

通过工程现场实践应用，验证优化后支护方案的可行性与有效性，对比优化前后围岩稳定性及支护成效。优化后的方案可有效约束围岩形变，降低失稳风险，减少坍塌、突水突泥等地质灾害发生，保障施工有序推进。同时在确保支护效果的基础上，有效降低支护成本、提升施工效率。实践应用表明，该优化方案适配断层破碎带地质工况，能有效解决围岩失稳难题，为同类工程支护设计提供实用参考。

六、结语

本文针对断层破碎带围岩稳定性薄弱、易发生失稳的难题，系统剖析围岩基本特征、失稳影响因素及破坏机制，采用合理评价方法优化设计适配组合式支护方案，提出施工质量控制与动态监测措施并验证应用效果。研究有效解决围岩失稳问题，提升工程施工安全与经济性，为同类工程提供可靠技术支撑和实践借鉴，对推动复杂地质条件下工程安全高效建设具有重要意义。

参考文献

[1] 柏新宇. 基于节理双随机特性的破碎带巷道围岩失稳概率分析 [J]. 煤炭与化工, 2025, 48(12): 24-30+37.
[2] 李磊, 项迁, 黄超. 穿越断层破碎带时真空抽水加固围岩的稳定性量化分析 [J]. 公路交通科技, 2025, 42(12): 210-222.
[3] 林涛, 刘远明, 刘宇鹏, 等. 特大断面隧道穿越断层破碎带围岩稳定性分析及变形控制: 以兰海高速桐梓隧道为例 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(32): 13988-13997.
[4] 陈先锋. 盾构穿越不同倾角断层破碎带围岩稳定性分析 [J]. 山西建筑, 2025, 51(17): 148-152+176.
[5] 刘多兴, 王旭春, 陈信举, 等. 双护盾 TBM 穿越不同形态断层破碎带围岩稳定性分析 [J]. 低温建筑技术, 2025, 47(05): 26-30.