

断层构造对煤矿巷道掘进稳定性的影响分析

宋 倩

徐州长城基础工程有限公司 江苏 徐州 221131

【摘要】：煤矿巷道的掘进稳定性受到多种因素的影响，其中断层构造的影响尤为突出。断层的存在改变了煤层的力学特性，可能导致巷道在掘进过程中的塌方、变形甚至灾难性事故。本文基于断层构造对煤矿巷道掘进的影响进行了系统分析，探讨了断层类型、位置及其运动特征对巷道稳定性的具体影响机制。研究表明，断层不仅改变了周围岩体的力学环境，还可能导致应力集中和不均匀变形，进而影响巷道的安全性。针对这些问题，提出了优化设计与施工方法，旨在提高煤矿巷道掘进的安全性和稳定性。研究成果为煤矿工程的风险评估和巷道设计提供了理论依据。

【关键词】：断层构造；煤矿巷道；掘进稳定性；应力集中；变形模式

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.062

引言

煤矿巷道的掘进稳定性直接关系到矿井的生产安全与效益。在实际矿山工程中，断层构造的复杂性使得巷道的稳定性面临诸多挑战。断层的类型、分布及其动态特征可能引起周围岩层的变形与破坏，导致巷道在掘进过程中的塌方和结构失稳，严重时甚至会造成灾难性的后果。因此，深入研究断层构造对巷道稳定性的影响，对于保障煤矿开采的安全性具有重要意义。本文将分析不同断层构造对煤矿巷道掘进过程中的应力变化与变形特征，探讨合理的工程对策和风险预防措施，以期煤矿工程的安全管理提供理论依据。

1 断层构造对巷道掘进稳定性造成的挑战

煤矿巷道掘进稳定性直接关联矿井生产安全与开采效率，而断层构造作为地壳运动形成的地质缺陷，会从岩体特性、应力分布、支护适配等多方面打破掘进平衡，尤其在断层密集、构造复杂的矿区，安全风险呈几何级攀升，给巷道掘进带来多重严峻挑战。

1.1 岩体力学特性劣化，诱发应力集中与变形破坏

断层的形成伴随强烈的剪切、挤压作用，直接破坏原岩完整性，导致岩体力学特性发生不可逆劣化，同时重塑应力分布状态。断层带内岩体多碎裂成块，部分区域填充泥质、砂质软弱夹层，黏聚力、内摩擦角及抗压强度大幅下降，远低于完整围岩承载能力^[1]。断层的存在还打破了原岩应力均匀性，使应力在断层端部、与巷道交汇处形成集中区，随着掘进作业推进，巷道周围岩体应力重新分配，集中应力持续叠加，引发围岩不同程度的塑性变形、裂隙扩展，严重时发生岩体崩解破坏。当断层与巷道交叉或近距离接触时，破碎带岩石易因失去应力约束而发生滑移、坠落，直接导致巷道坍塌、塌陷，对井下作业人员生命安全构成致命威胁。

1.2 断层特征差异显著，加剧失稳风险多样性

断层的性质、规模、运动特征存在显著差异，直接决定巷道受力分布模式与失稳风险类型，增加了掘进管控的复杂性。

从断层性质来看，逆断层受挤压应力主导，易导致岩层褶皱隆起，使巷道顶板承受过大垂直压力，大幅提升顶板垮落、离层风险；正断层受拉张应力作用，岩层呈分离状态，巷道区域易出现拉伸变形，裂隙快速扩展形成大范围松动圈；走滑断层以水平剪切位移为核心，导致巷道两侧岩体位移不均，引发侧壁滑移、扭曲失稳，破坏巷道整体结构完整性。从断层规模来看，断距越大、破碎带越宽，岩体破碎程度越高，应力集中范围越广，巷道开挖难度与失稳概率显著上升，尤其是断层带深度穿越巷道时，会形成全域性力学薄弱区，加剧破坏程度。

1.3 传统技术体系受限，支护与设计适配性不足

断层构造的复杂性与不确定性，使传统巷道支护方法、设计理念面临严峻挑战，难以适配复杂地质环境。传统支护多基于完整围岩力学参数设计，以刚性支护为主，缺乏对断层带大变形、应力突变的适应性，易出现锚杆拉断、支架压弯、支护结构与围岩脱空等失效问题。同时，传统设计往往难以精准预判断层分布、活动性等关键信息，导致支护强度、掘进路线规划与实际地质条件不匹配。为应对这一问题，设计人员需深入研判矿区地质结构，精准定位断层带分布与性质，针对性强化支护强度，引入先进支护材料与技术，通过科学设计分散应力集中风险。对于大型断层带，需提前开展全面探测评估，灵活调整掘进路线，规避断层核心破碎带，同时配套完善实时监测系统与应急预案，才能有效应对突发失稳事件，保障掘进作业有序推进。

2 断层特征对煤矿巷道力学环境的影响分析

煤矿巷道力学环境的稳定性直接决定掘进安全，而断层构造通过改变岩体结构、重构应力场，对力学环境产生系统性扰动，其影响具有复杂性、差异性和动态性特征。深入剖析断层核心特征对力学环境的作用机制，是精准防控巷道失稳风险的重要前提。

2.1 断层弱带效应，弱化岩体力学性能

断层形成过程中，围岩受地壳运动产生的强烈剪切与挤压

应力作用, 内部结构发生不可逆破坏, 在巷道周边岩层中形成连续延伸的地质弱带, 直接改变岩体原有力学响应规律。断层带内岩石经反复应力叠加与错动摩擦, 原生结构彻底瓦解, 产生大量相互贯通的节理、裂隙, 部分区域岩体呈碎裂状、散体状分布, 甚至充填泥质、砂质软弱夹层, 进一步加剧岩体劣化^[2]。与完整围岩相比, 破碎带岩体力学参数大幅衰减, 承载能力与抗变形能力急剧弱化。这种弱化作用导致巷道开挖后力学响应异常, 围岩易失稳出现松动剥落、塑性变形, 同时断层弱带打破原岩力学平衡, 促使应力从完整岩体向弱带集中转移, 形成局部应力差, 叠加开挖扰动, 进一步加剧巷道壁面的不稳定性。

2.2 几何与运动特征, 重构应力分布格局

断层的几何形态(产状、宽度)与运动类型存在显著差异, 二者协同作用重构巷道周围应力场分布格局, 引发差异化力学环境变化, 直接影响巷道围岩稳定性。从几何形态来看, 断层产状(倾角、走向)决定应力传递路径与集中部位, 高倾角断层(倾角 $>60^\circ$)易使垂直应力向巷道顶板与底板集中, 诱发顶底板鼓胀、垮落; 低倾角断层(倾角 $<30^\circ$)则强化两帮剪切受力, 增加侧壁剪切破坏风险。断层破碎带宽度与应力分布范围正相关, 宽度越大, 岩体破碎越彻底, 应力分散与衰减范围越广, 巷道围岩塑性区扩展越明显, 力学平衡状态越难维持。从运动类型来看, 不同断层的力学作用机制差异显著, 对巷道应力环境的扰动各具特征: 逆断层受水平挤压应力主导, 岩层发生压缩褶皱, 使巷道顶板垂直应力急剧集中, 远超岩体承载极限, 易引发顶板离层、垮塌; 正断层受拉张应力作用, 岩层沿断面向下滑移分离, 巷道区域形成拉伸应力场, 加速围岩裂隙扩展与松动圈扩大; 走滑断层以水平剪切位移为核心, 断层两盘相对错动导致巷道两侧岩体位移不均, 形成侧向偏压, 引发侧壁非均匀滑移、扭曲失稳, 严重破坏巷道整体力学平衡, 增加支护难度。

2.3 活动性扰动, 加剧力学环境动态失衡

断层的活动性的强弱, 直接影响巷道力学环境的稳定性, 其动态扰动易引发突发性力学灾害。活动性断层在煤矿开采扰动下, 可能发生新的错动或蠕变, 打破原有应力平衡, 导致巷道内部应力快速重分布, 产生瞬时冲击荷载或持续变形压力。若断层滑动速率较高, 会引发突发性应力突变, 使巷道岩体因受力失衡而快速崩塌、裂解, 对支护结构形成强烈冲击; 若为缓慢蠕变断层, 虽无瞬时破坏, 但长期变形累积会使应力持续叠加, 导致巷道断面收缩、支护结构逐步失效。此外, 断层活动性还会激活周边裂隙, 加速地下水、瓦斯的运移, 使软弱夹层遇水软化, 进一步弱化岩体力学性能, 形成“应力扰动+介质弱化”的叠加效应, 加剧巷道力学环境的不稳定性。

3 优化设计与施工对策提升巷道稳定性

在煤矿巷道施工中, 断层带的存在大幅增加了掘进难度与失稳风险, 需通过系统性的优化设计与精细化施工对策, 构建全流程防控体系, 从源头规避风险、强化围岩稳定性, 保障掘进作业安全高效推进。

3.1 超前探测评估, 筑牢设计基础

断层带的精准识别与全面评估是巷道优化设计的核心前提, 直接决定后续施工方案的科学性、针对性及安全冗余。施工前期需构建“多技术融合、立体化覆盖”的地质探测体系, 突破单一技术局限, 确保断层核心信息无遗漏捕捉^[3]。通过高精度地震波勘探技术, 利用不同岩体波速差异, 精准定位断层空间位置、延伸范围及产状特征, 初步划分破碎带与完整岩体的边界线, 为后续探测提供靶向指引; 同步结合定向钻孔取样技术, 系统性采集断层带内岩体、充填物样本, 通过室内力学试验测定岩体抗压强度、黏聚力、内摩擦角等关键参数, 量化判断破碎带完整性等级与力学性能弱化程度, 明确支护设计核心指标。借助三维地质建模技术, 整合各类探测数据构建可视化数字模型, 动态呈现断层形态、活动性特征及与巷道的空间位置关系, 为设计方案调整提供直观数据支撑。基于探测成果优化巷道设计, 优先选择绕避断层核心破碎带的掘进路线, 从源头规避高风险区域; 若受地质条件限制无法绕避, 需根据断层宽度、破碎程度调整巷道断面尺寸, 预留充足变形量, 同时针对性强化支护强度, 采用高强度工字钢支架搭配防水防裂喷射混凝土, 形成“支护-围岩”协同承载体系。

3.2 差异化支护设计, 强化围岩承载能力

合理的支护体系是控制断层带巷道变形、提升围岩承载能力的核心环节, 需严格结合断层类型、力学特性及破碎程度, 实施“一断层一方案”的差异化支护设计, 实现支护结构与围岩力学环境的精准适配, 从根本上遏制失稳风险。支护设计需兼顾承载强度与变形协调性, 避免刚性支护断裂或柔性支护失稳, 构建“支护-围岩”协同受力体系。针对活动性较强的断层区域, 优先采用可调节让压支护结构, 搭配液压支柱、可伸缩锚杆及让压垫片等核心组件, 既能提供初始支撑力抵御围岩变形, 又能通过让压装置灵活释放突发应力, 有效应对断层错动引发的位移突变与应力冲击, 避免支护结构因刚性受力集中而断裂失效。对于走滑断层区域, 重点强化支护系统的柔性与自适应能力, 选用高强度柔性锚索搭配双层金属网片, 锚索采用低松弛钢绞线材质, 兼顾承载强度与变形协调性, 可随断层水平滑动自适应调整受力状态, 有效约束巷道侧壁非均匀滑移, 防止出现侧壁扭曲、开裂失稳。针对逆断层区域, 因岩层挤压作用易形成顶板垂直应力集中, 需专项强化顶板支护强度, 采用“高预应力锚杆+长锚索+喷射混凝土”联合支护模式, 锚索布置间距加密至1.2-1.5米, 锚固深度延伸至断层上盘完整岩层, 形成稳固的顶板承载拱。同时优化支护材料配比, 喷射混

凝土采用早强、防水复合型材料，锚杆选用耐腐高强合金钢材质，提升支护结构的抗老化、抗地下水侵蚀及抗破坏能力，全面增强巷道整体抗变形性能与长期稳定性。

3.3 实时监测联动应急，强化过程管控

施工过程的动态管控是防范断层带巷道突发失稳的关键防线，需构建“实时监测-智能预警-快速处置”闭环联动机制，将被动应对转为主动防控，实现风险早发现、早研判、早干预，全方位保障掘进作业安全。该机制需兼顾技术监测的精准性与应急处置的高效性，形成管控合力。依托现代化智能监测技术，针对性布设多维度监测网络，重点覆盖断层带核心区、应力集中区及巷道关键断面。在围岩深部及支护结构上布设应力应变传感器，实时捕捉岩体受力与支护荷载变化；在顶板、两帮及底板布设位移监测仪，精准采集围岩沉降、收敛数据；同步布设地下水位探测器与瓦斯监测设备，动态监测水文渗透及瓦斯浓度变化，24小时不间断传输数据至智能分析平台。平台通过大数据算法研判变形趋势与风险等级，划分蓝、黄、橙、红四级预警，为处置决策提供数据支撑。坚持技术监测与人工巡检相结合，掘进过程中每2小时开展一次专项巡检，重点核查

监测设备运行状态与围岩表现变化，结合监测数据校准风险预判结果。一旦触发预警，立即启动对应应急流程：橙色及以上预警需停工撤人，快速采取加密锚杆锚索、补打注浆锚杆加固围岩、临时调整掘进路线等措施，遏制变形加剧。同时强化人员应急能力，制定坍塌、突水等专项预案，明确处置流程与责任分工，每月开展实战演练，配齐应急支护、排水、通风等物资，确保突发事件快速响应、高效处置，最大限度降低损失，筑牢过程管控防线。

4 结语

断层构造对煤矿巷道稳定性的影响不可忽视，其对力学环境和应力分布的改变使巷道开挖面临严峻挑战。针对这一问题，科学的设计与施工对策显得尤为重要。通过精确的地质勘探、合理的支护设计以及实时监测的结合，可以有效提升煤矿巷道在断层区域的稳定性。支护结构的优化、应急管理的完善以及施工技术的创新，为巷道的安全开挖提供了有力保障。未来的煤矿工程应继续加强对断层构造的研究与应用，进一步提升工程技术水平，确保矿井的安全性与生产效益。

参考文献：

- [1] 祝明宝.煤矿巷道掘进中断层的识别方法分析[J].内蒙古煤炭经济,2025,(17):46-48.
- [2] 刘敏.现代煤矿巷道掘进中断层的识别方法分析[J].内蒙古煤炭经济,2023,(09):63-65.
- [3] 王栋.煤矿巷道掘进超前钻探技术运用和发展研究[J].内蒙古煤炭经济,2022,(03):145-147.