

复杂地质条件下金属矿山开采围岩稳定性控制技术研究

作者：蒋志刚

身份证号：530181199407273317

摘要：深部金属矿山普遍存在地质构造复杂、岩体破碎、高地应力、地下水富集等多重不良工况，井下开采扰动极易诱发围岩变形、片帮、冒顶、垮塌等地压灾害，严重制约矿山安全生产。围岩稳定性控制是地下采矿工程防灾减灾的核心内容，直接关系采场、巷道及硐室的整体安全。本文结合复杂地质金属矿山开采特征，系统分析围岩失稳的诱因与破坏规律，梳理当前围岩控制技术应用短板，探究精细化、一体化的围岩稳定控制技术路径，为深部复杂地质矿山安全高效开采提供实践参考。

关键词：复杂地质；金属矿山；井下开采；围岩稳定性；控制技术

一、引言

国内金属矿山开采深度逐年递增，深部岩体赋存环境日趋复杂，断裂构造、软弱夹层、高构造应力、裂隙地下水等因素相互耦合，导致围岩力学特性劣化显著。地下矿体开挖会打破岩体原始应力平衡状态，引发应力重分布与塑性区扩张，大幅提升围岩失稳概率。科学运用监测预警、支护加固、工艺优化、采空区治理等技术手段，精准管控围岩稳定性，是实现深部矿山安全、连续、高效开采的必要保障。

二、复杂地质条件下矿山围岩失稳主要特征及诱因

（一）复杂地质诱发原生岩体缺陷

复杂地质区域金属矿山岩体完整性系数偏低，节理、裂隙、断层构造密集发育，岩体内部存在大量不连续结构面，整体承载能力与自稳性能较差。矿区岩体质量存在显著的空间差异性与垂向分异性，不同开采中段岩体稳定系数差距较大，浅部围岩风化严重、破碎度高，深部围岩高地应力特征突出，失稳形式呈现多样化特点。同时，地下水沿岩体裂隙持续渗流，水岩耦合作用长期弱化结构面力学

参数，降低岩体抗剪强度与粘结力，在开挖扰动下极易出现裂隙贯通、岩体剥离、整体垮落等失稳现象。

（二）开采扰动引发应力失衡破坏

地下矿山开挖卸荷会彻底改变原始地应力场分布，造成采场周边围岩出现局部应力集中与应力转移现象。深部高地应力与开采扰动应力叠加耦合，会促使围岩塑性区持续扩展，引发顶板下沉、巷帮鼓出、片帮剥落等典型破坏形态。矿山爆破落矿产生的动力扰动会持续损伤围岩内部结构，反复的动载冲击会加速原生裂隙发育、新生裂隙扩展，逐步形成贯通性破坏结构，大幅降低围岩整体稳定性，极易诱发突发性冒顶、巷道垮塌等动力灾害。

（三）工程布局加剧围岩失稳风险

深部矿山井下采场、运输巷道、通风硐室、机电硐室密集布置，空间交叉重叠、开挖扰动相互叠加，形成复杂的工程围岩体系。不合理的采场跨度设计、无序的分段开挖工序、支护作业滞后等工程问题，会持续累积岩体损伤。相邻采场开采扰动会产生叠加效应，使围岩经历多次应力重分布，岩体变形持续累积，最终出现支护结构开裂失效、围岩持续大变形等问题，极大增加井下开采安全管控难度。

三、当前围岩稳定性控制技术应用现存问题

（一）围岩监测精细化程度不足

多数矿山仍依赖传统人工巡检、单点位移监测的粗放模式，监测数据离散性大、时效性差，无法实现围岩应力演化、裂隙扩展、塑性区变化的全过程动态捕捉。复杂地质条件下围岩失稳具有隐蔽性、突发性和滞后性特征，常规监测手段难以识别多因素耦合引发的隐性风险，无法精准预判灾害发展趋势，难以给支护方案优化、灾害防控提供可靠的数据支撑。

（二）支护方案适配性较差

部分矿山采用统一固化的标准化支护方案，未结合不同中段、不同区域的岩体质量等级、地应力大小、地质缺陷进行差异化参数设计。对于破碎软弱围岩，

存在锚固深度不足、支护密度偏低、表层封闭不严等问题；对于深部高地应力围岩，刚性支护无法适配岩体塑性大变形特征，容易出现支护体压裂、脱落、整体失效等问题，支护加固效果难以满足现场安全要求。

（三）开采施工工艺管控不规范

井下开采存在爆破参数不合理、开挖工序混乱、采场围岩裸露时间过长等普遍问题。大药量强爆破模式会对周边围岩造成严重动力损伤，破坏岩体原有承载结构；无序开挖会加剧局部应力集中；采场长期裸露会使破碎围岩持续风化、浸水软化、变形松弛，进一步恶化围岩力学性能，导致各类支护控制技术难以发挥实效。

四、复杂地质矿山围岩稳定性核心控制技术

（一）动态围岩监测与风险预判技术

构建立体化、全覆盖、全天候的围岩动态监测体系，整合钻孔成像探测、围岩应力在线监测、表面位移实时观测、微震监测等多元技术手段，全方位捕捉围岩变形、应力变化、裂隙发育的动态规律。通过数值模拟与岩体质量分级评价，精准划分采场与巷道围岩稳定等级，定量研判塑性区扩展范围与灾害风险等级，实现围岩失稳隐患的提前预警、精准识别，为差异化支护设计提供科学依据。

（二）差异化耦合支护加固技术

严格遵循分区治理、分级管控、刚柔耦合的支护原则，根据围岩赋存条件匹配专属支护体系。浅部破碎围岩采用锚杆、锚索、金属网、喷射混凝土联合支护模式，快速封闭围岩裂隙，固结松散岩体，提升表层整体稳定性。深部高地应力大变形围岩采用高恒阻柔性支护材料，通过刚性支护承载静态压力、柔性支护吸收变形能量的耦合方式，有效抑制塑性区扩张，适配深部围岩大变形破坏特征，提升支护体系整体适应性。

（三）低扰动精细化开采工艺优化技术

优化井下工程布局与分段开挖顺序，采用小断面、分步开挖、弱扰动爆破的精细化施工工艺，最大限度降低开采活动对围岩的动力冲击。科学优化爆破孔网

参数与单次起爆药量，降低爆破震动速度，减少围岩结构损伤。严格落实随挖随支、及时封闭的施工要求，最大程度缩短围岩裸露时长，避免岩体风化松弛、裂隙扩张，从施工源头降低围岩失稳风险。

（四）采空区充填协同稳控技术

针对井下开采形成的大规模采空区，采用分层充填、嗣后充填等绿色采矿工艺，及时对采空区进行密实充填。结合矿体赋存深度、采场跨度、围岩应力水平差异化设计充填体强度参数，利用充填体承接围岩压力、转移集中应力、限制岩体位移，构建围岩与充填体协同承载的稳定结构，有效解决采空区诱发的顶板垮落、围岩滑移、地压涌动等灾害问题。同时可根据现场工况选用胶结充填、干式充填等适配工艺，提升充填密实度与整体性，进一步强化采场整体承载性能，长效保障围岩稳定状态。

五、结语

复杂地质条件下金属矿山围岩失稳是地质结构、地应力环境、地下水作用、开采扰动多因素耦合作用的结果，灾害隐蔽性强、防控难度大。传统单一被动支护模式无法适配深部复杂矿山的安全开采需求，必须建立监测预警、工艺优化、耦合支护、采空区治理一体化的综合防控体系。通过动态监测精准识别围岩风险，实施差异化刚柔耦合支护，优化低扰动开采工艺，落实采充协同稳控措施，可全方位提升围岩整体稳定性，有效防范地压灾害，保障复杂地质金属矿山长期安全、稳定、高效生产。

参考文献

- [1]杨小聪. 深部金属矿山动力灾害风险分级分区控制技术[J]. 中国矿业, 2024, 33(09): 112-117.
- [2]黄聪. 基于数值模拟的深部金属矿山采场围岩稳定性优化研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(07): 89-94.
- [3]尹升华. 深部矿山硐室群开挖顺序与围岩稳定性控制对策[J]. 工程科学学报, 2024, 46(06): 721-728.

[4]孙晓明. 深部高地应力巷道围岩恒阻支护稳定控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(03): 512-518.

[5]黄晓盼. 复杂构造金属矿山岩体结构面稳定性控制研究[J]. 地质力学学报, 2025, 31(04): 96-103.