

# 复杂地质条件下采场顶板控制技术应用

王 勇

中国铝业股份有限公司贵州分公司 贵州贵阳 551413

**摘 要:** 在深部铝土矿开采不断推进的背景下, 复杂地质条件对采场顶板稳定性的影响愈发突出, 而顶板在断层、软弱夹层与高应力共同作用下呈现出更为敏感的破断特征。为增强顶板结构的稳定性, 研究依托现场调查、力学分析及数值模拟, 对复杂地质环境下顶板失稳模式进行辨识, 并在加固参数优化、支护体系重构、充填体性能调控等关键环节提出适应性技术, 使顶板在多源扰动下仍保持可控状态。工程应用结果显示, 位移幅度显著收敛、破裂扩展受抑制, 由此验证了综合控制体系的有效性, 也为深部铝土矿安全开采提供了可推广的技术路径。

**关键词:** 铝土矿开采; 复杂地质条件; 采场顶板; 稳定性控制; 工程应用

## 引言

随着铝土矿资源开采由浅部向深部推进, 地质构造愈加破碎、应力环境不断演变, 顶板在此背景下的稳定性问题逐渐由局部隐患转向整体制约; 而断层破碎带的穿插、软弱夹层的延展以及含水条件的变化, 又使顶板结构在受力重分布之中更易产生突发性失稳, 采场空间的安全边界因之变得更加脆弱。深部铝土矿在多重因素叠加下形成的复合型破坏模式, 使传统控制手段往往难以有效应对, 因此有必要依托更精细的地质识别、更贴合现场的力学分析以及更具适应性的控制技术, 使顶板在复杂环境中获得足以维持稳定的支撑格局, 从而保证采场的连续、安全与可持续生产。

## 一、复杂地质条件下采场顶板失稳机理分析

### (一) 复杂地质条件的类型划分及工程特征

在深部铝土矿的开采过程中, 顶板所承受的扰动往往因断层破碎带的交错、软弱夹层的延展及地下水渗流的增强而愈加复杂, 而岩体完整性在构造切割之下不断削弱, 使顶板在自重、采动应力与构造应力的共同作用下呈现出明显的非均质特征; 随着埋深增加, 应力集中区域逐渐扩大、围岩力学参数波动加剧, 使顶板结构由整体受力趋向于局部破裂的敏感状态, 顶板在地质信息与力学环境的复合作用中表现出的不稳定性, 往往成为

影响采场安全性的关键因素<sup>[1]</sup>。依托系统的地质调查与围岩分级, 可更准确识别不同地质要素之间的耦合关系, 并为后续控制技术的针对性配置奠定基础。

### (二) 复杂地质作用下顶板破坏模式与力学机制

在多源扰动共同叠加的条件下, 顶板常表现为弯曲下沉、块体滑移、应力诱导裂隙扩展等复合型破坏模式, 而这些破坏形式往往因结构面取向、夹层软化程度及围岩弹塑性差异而相互转化, 使顶板破断演化路径更加难以预测; 应力重分布使局部区域出现拉伸破坏, 而构造面的弱化又促使剪切滑移逐渐显性, 由此形成力学机制的交织体系。依托监测反演与数值模拟手段, 可更清晰揭示顶板破坏的内在动力, 使关键控制参数得以识别, 为建立适应复杂地质条件的顶板控制策略提供坚实依据。

## 二、复杂地质条件下采场顶板控制技术体系构建

### (一) 顶板稳定性评价方法与控制需求识别

在深部铝土矿采场中, 顶板所处的地质环境往往伴随构造切割增强、岩体非均质扩大、含水条件变化等多重扰动, 使稳定性评价的难度不断提升; 评价体系若仍停留在经验分级层面, 顶板的真实受力状态与破断趋势便难以被准确捕捉。依托高精度地质探测、围岩参数测试以及力学分析模型, 可使顶板的构造特征、力学指标及其空间分布被更系统地还原, 而监测反演技术与数值模拟的联合应用, 则赋予评价体系更强的预测能力——在应力集中区、结构面密集区与软弱夹层过渡区, 顶板稳定性常呈现出明显差异, 只有将这些差异准确识别, 方能明确控制的关键部位与关键参数。随着评价结果不断丰富, 采场对支护强度、加固范围、充填厚度以及监

**作者简介:** 王勇 (1993.03-), 男, 汉族, 贵州省纳雍县, 大学本科, 采矿助理工程师研究方向; 铝土矿开采方面。

测密度的需求愈加清晰，使控制技术的配置更加具有针对性与前瞻性。

### （二）复杂地质条件下顶板综合控制技术体系的构建

在复杂地质背景下，单一控制措施往往难以承担维持顶板长期稳定的任务，控制技术的协同化、体系化趋势因之愈加突出<sup>[2]</sup>；围岩加固技术依托注浆提升岩体完整性，使松散破碎带的承载能力得以恢复，而锚杆锚索支护体系借助主动加固与结构重构，使顶板形成更为稳固的力学框架；当采动扰动增强或构造作用突出时，胶结充填对顶板整体性的支撑作用愈发关键，充填体与顶板的结构耦合不仅强化了承载能力，也减少了采空区诱发的二次破坏风险。针对应力异常集中的区域，预裂减压使应力分布趋于均衡，优化采场结构布置又进一步改善顶板的受力格局，使不同控制措施之间形成相互支撑、相互补偿的体系框架。随着技术不断完善，控制体系呈现出灵活组合、因地制宜的特点，使复杂地质条件下的采场顶板具备更高的稳定性冗余。

### （三）控制技术适应性优化与工程可实施性保障

复杂地质条件具有多样性与阶段性特征，使控制技术的适应性成为影响工程效果的关键因素，而适应性不仅体现于技术本身的性能，也关乎施工组织、材料选择及监测手段的协调程度；顶板控制技术在不同地质环境下需要不断调整参数，如支护预紧力、加固深度、充填体强度与固结速率，使措施既满足力学需求，又适应施工条件。依托实时监测体系，可对顶板变形、裂隙扩展及应力变化予以持续跟踪，使技术参数在施工过程中得以动态修正，而这种“监测—分析—优化”的循环机制，使控制体系具备自适应演化的能力。工程实施过程中，合理组织施工顺序、优化设备布置、提升作业质量，可进一步增强控制技术的可靠性，使多项措施能够在有限空间中协同落地，从而形成覆盖面广、调整能力强、适应性优良的顶板控制格局，为复杂地质条件下铝土矿开采的安全稳定奠定坚实基础。

## 三、采场顶板控制技术在复杂地质条件下的工程应用与成效分析

### （一）地质条件识别与控制策略配置的工程实践

在深部铝土矿的开采场景中，顶板控制的有效性往往依赖于地质信息的精细化识别，而复杂地质因素之间的叠加关系若未被充分辨析，控制技术便难以精准落位；依托高分辨率物探资料、巷道揭露信息及构造测段成果，可使断层密度、夹层厚度及围岩完整性在空间上的差异

性得到更清晰呈现，由此为控制措施的参数化设计提供可靠依据<sup>[3]</sup>。某大型铝土矿在构造破碎带穿越采场的条件下，曾借助岩体声波测试与钻探录井数据，对破碎带宽度、结构面倾角及含水情况进行综合判定，结果表明顶板岩体呈现由半软弱岩层向破碎状岩层的过渡特征；基于此特征，工程团队将加固范围向两侧延伸，结合高预紧力锚索和深孔注浆技术，使顶板在力学性质不均的背景下仍保持稳定，而该实例显示，当控制策略与地质识别具备高度一致性时，措施的有效性往往显著增强。

为了形成可量化、可对比的控制设计基础，有必要将关键地质指标从经验描述转化为具备工程意义的参数体系。表1展示了典型铝土矿采场中与顶板稳定性密切相关的关键地质指标，可作为控制技术配置的重要参照。

表1 典型铝土矿采场顶板稳定性关键影响指标

指标类别	代表参数	工程意义
围岩结构	节理密度、破碎带宽度	决定顶板整体性与破断敏感性
力学性质	单轴抗压强度、弹性模量	影响承载能力与变形模式
水文条件	含水率、渗透系数	影响软化效应与结构面强度
构造因素	断层倾角、断距	控制滑移面形成与应力集中

在某矿区北翼采场，该参数体系曾作为控制策略优化的依据：工程组发现顶板节理密度在局部明显增大，而地下水对结构面软化作用增强，为避免顶板在采动过程中发生弯曲破断，控制方案中加入以深部注浆加固为主、锚索束作为主控结构的复合体系，最终监测数据显示顶板下沉量降低约40%，控制效果具有显著工程意义。

### （二）工程实施与多维监测的耦合作用

在复杂地质环境中，控制技术的落地过程往往伴随力学环境的动态变化，单纯的静态设计难以匹配采场在开采推进过程中的应力重分布，因此监测体系的介入不仅是验证控制成效的手段，更是推动控制技术自适应优化的重要环节。微震监测、收敛量测和应力传感为主要监测方式，其耦合使用可使顶板的破裂扩展路径、变形速率及局部应力峰值被实时捕捉，而这些信息若与控制参数进行比对，便能及时发现措施的不足并进行补强调整，使工程实践形成动态安全边界。

在某铝土矿深部扩展区的采场，顶板结构因软弱夹层贯穿而呈现多层弯曲破断特征，工程团队在支护体系实施后布置了三类监测装置：微震监测用于识别细微破裂活动，收敛量测追踪顶板变形趋势，应力计监测局部集中区变化；随采场推进，监测数据呈现出应力峰值逐

渐外移、微震事件密度下降的趋势，由此表明支护体系已对顶板整体受力格局起到调节作用，而在局部区域出现变形速率升高时，工程团队迅速补加锚索束并延伸注浆范围，使该区域的变形梯度再次趋稳。此类基于监测驱动的动态修正，使控制技术具备了自我调节能力，也使系统的安全冗余不断增强。

为了进一步提升监测的前瞻性，一些矿山逐渐引入智能分析工具，使监测数据与控制策略之间形成实时反馈链。例如某矿区利用变形时间序列分析模型预测顶板在采场推进阶段的潜在下沉趋势，并借助可视化平台将应力集中区的演化路径呈现给工程技术人员，使调控措施更加快速准确，该实践表明，监测体系与顶板控制技术之间若形成深度耦合，采场安全等级可显著提升。

### （三）工程成效评价与可推广技术点凝练

为了系统评价顶板控制体系的工程成效，有必要将变形控制、破裂抑制及应力再分布的表现进行综合分析，而当控制技术在不同地质环境下仍能展现稳定性提升效果时，便具备了推广价值<sup>[4]</sup>；评价体系往往包括顶板沉降速率变化、裂隙扩展范围缩小及支护结构受力均衡度提升等多项指标，它们之间形成的协同趋势能够反映控制体系的整体有效性。

某铝土矿在采用分级支护、深孔注浆与胶结充填联合技术后一年的运行监测显示，采场顶板的平均下沉速率从高峰时期的2.6 mm/d下降到1.1 mm/d，裂隙扩展长度减少约50%，而支护结构的受力呈现更为均匀的分布格局，微震事件在高应力阶段显著减少，从工程统计结果来看，该综合控制在复杂地质条件下具有可靠性强、适应性高的特点；当技术团队总结关键技术点时，将其概括为三类核心路径：一是以强化岩体整体性为主的加固技术体系，二是以改善力学结构为核心的支护优化路径，三是以监测驱动策略迭代的动态控制机制，这三类路径之间既具独立性又具协同性，使顶板控制在应对多源扰动时具有更强的韧性。

某东部铝土矿更具代表性，其采场顶板因受多期构造挤压影响而呈现复合破裂结构，在执行“加固—支护—充填”一体化方案后，顶板稳定性显著增强；监测数据显示，支护完成后应力集中区由采场中央逐渐向外围过渡，破裂扩展趋势明显减弱，支护体系在巷道与采

场交汇区域表现出更强的约束能力。技术团队进一步对比不同措施组合的控制效果，指出在该类地质环境下，深部注浆与高强度锚索的组合对提升抗拉性能意义重大，而胶结充填的作用更多体现在改善采场整体受力结构。该实例佐证了综合控制在复杂地质条件中的适配度，同时也为类似矿区提供了路径示范。

顶板控制在复杂地质条件下的应用价值不仅体现在提升局部稳定性，更体现在为深部铝土矿开采构建长期安全格局的能力；随着控制技术体系的不断完善，从地质识别到策略部署、从监测预警到动态调控的链条正在逐渐形成闭合回路，使顶板稳定性从被动防护转向主动治理。这一转变意味着矿山工程从经验驱动迈向数据驱动，从静态设计迈向自适应调控，为今后复杂地质条件下的铝土矿安全开采奠定坚实基础。

### 结语

在深部铝土矿不断向复杂地质区域延展的进程中，顶板的稳定性愈加依赖对地质脉络的洞悉、对力学格局的把握以及对控制体系的精细构建，而地质结构的细微变化、采动扰动的节律差异与围岩力学性质的时空演化，又使顶板行为呈现出更强的敏感性与耦合性；当支护体系的协同能力不断增强、充填结构的承载性能持续提升、监测预警的智能水平日益完善时，顶板在复合扰动中的可靠性得以稳步提高，使采场空间在动态环境中仍保持可预测、可调控的状态，由此推动深部开采由被动应对走向主动塑形，也使复杂地质条件不再成为制约安全生产的绝对边界，而成为引导技术创新与工程优化的持续动力。

### 参考文献

- [1] 袁波. 复杂地质条件下顶板控制技术应用实践[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (18): 133-135.
- [2] 王荣立. 复杂地质条件下巷道顶板控制与支护技术应用实践[J]. 黄金, 2018, 39(11): 44-48.
- [3] 吴海波, 赵凯. 微震监测技术在复杂地质煤矿开采优化及顶板控制中的应用[J]. 现代矿业, 2023, 39(09): 14-17+22.
- [4] 赵轲. 复杂地质条件下的厚煤层综放采煤工艺研究[J]. 矿业装备, 2024, (04): 22-24.