

# 探索高效安全的无底柱分段崩落采矿及阶段空场嗣后充填新技术

唐帅锋

和静县备战矿业有限责任公司 新疆 巴州 841300

**【摘要】**：无底柱分段崩落采矿及阶段空场嗣后充填是现代采矿技术的重要组成部分。随着矿产资源开采的不断深入，如何实现复杂地质条件下的高效安全开采，并对采空区进行有效处置，已成为矿业界迫切需要解决的问题。无底柱分段冒落采矿法具有采准量小、强度高等优点，在采空区得到广泛应用，分级空场后充填技术可以保证采空区的稳定性。在新疆及其他矿产资源丰富地区，该技术的应用对保障矿山安全生产和提高资源回收率有重要意义。

**【关键词】**：高效安全；无底柱分段崩落采矿；阶段空场嗣后充填；新技术

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.066

无底柱崩落法和分级空场后充填工艺的研究和开发，是采矿科学技术进步的需要。该工艺通过对采场布局及爆破工艺的优化，可降低矿石的贫化与损失，同时采用充填工艺对矿压进行控制，保证采场的稳定。目前，新疆部分矿山企业已对此项技术进行探索与实践。如富蕴蒙库铁矿有限责任公司采用无底柱崩落法进行深部采矿，并对其进行技术改造，提高生产率。该技术的推广与应用，不仅有利于提高矿山经济效益，而且对于保证矿山生产安全，促进矿业可持续发展具有重要意义。

## 1 采矿技术原理与地质适应性分析

### 1.1 无底柱分段崩落采矿技术特征

无底柱崩落法是一种具有代表性的高效开采方法，其核心思想是对采场进行科学分区，实现连续作业。该方法是将矿体纵向分为若干区段，每区段内布置若干平行回采进路，通过中、深孔爆破放矿，并利用冒落围岩对采空区进行自然充填，形成矿压动态平衡机制<sup>[1]</sup>。这种不设人工矿柱的特点，既可节约大量支护材料和施工费用，又可实现不间断开采，大大提高开采效率。在地质适应性方面，该工艺对矿体的赋存状态提出明确的要求：矿体的倾角要大于 $55^{\circ}$ ，保证矿体在重力作用下自然溜放，厚度一般控制在5-30m之间，以兼顾回采效率和贫化率，同时矿体和围岩要具有中等的硬度（单轴抗压强度15-60MPa），避免因岩石过软造成回采面坍塌或过硬增加爆破难度。工程实践中，爆破段高度（8~15m）、崩矿步距（2~4m）和爆破参数（孔网密度、药量等）的设计要与地质条件精确匹配。如在节理裂隙发育区，可将崩矿步距缩短到1.5~2m，采用微差爆破技术减小对围岩的干扰。而对于整体性较好的矿体，可以适当增加工艺参数，增加一次崩矿数量，达到最大产量，同时保证安全性。

### 1.2 阶段空场嗣后充填技术要点

分级空场事后充填开采技术是解决复杂地质条件下资源安全开采的关键技术，按照“采场-充填-回采”循环模式，通过分步回采与适时充填协同作业，实现对围岩的有效控制。该技术是将采场开采到一定高度后，利用尾砂、废石、水泥浆等胶结或非胶结材料充填采空区，在达到设计强度后再回采，形成循环。其技术核心是在充填体特性和开采节奏之间寻求平衡，即在72小时内，胶结充填体必须达到1.5MPa以上的早期强度，才能支撑后续开采；对于非胶结物料，要求有较好的流动性，以保证采空区充填率在95%以上。该技术对复杂地质环境具有较强的适应能力，特别适合于破碎围岩（岩体完整性系数 $<0.6$ ）、水下（水压 $>0.5\text{MPa}$ ）和近地表（50m以下）矿体，资源回收率普遍超过90%。然而，充填体养护周期与开采周期之间的矛盾一直是制约其发展的瓶颈，而传统的养护周期长达28天，导致设备闲置率高达30%。拟通过研发早强充填材料（如添加纳米碳酸钙等）、优化充填技术（如分段分层充填），并利用数值仿真技术精确预测充填体强度生长曲线，实现“养护-开采”无缝衔接。

### 1.3 复杂地质条件的约束机制

复杂地质环境是矿山开采技术应用中面临的多维约束问题，其核心机理是地质参数和工艺参数不匹配可能带来的安全风险和效率损失。断层破碎带是一种典型的不良地质体，其影响尤为突出：断裂带内岩石单轴抗压强度一般在5MPa以下，节理密度大于10根/m，将严重破坏围岩的完整性，造成无底柱分段崩落开采时顶板冒落的概率提高40%以上，同时崩矿块度不均匀系数增大到1.8，增加出矿难度。高地应力环境（地应力大于20MPa）对阶段空场充填提出了严峻挑战，在应力集中区，充填体要承受几倍于设计荷载的作用，当强度不足时

(3MPa 以下), 充填体将发生压缩变形, 最终导致 500mm/月以上的收敛<sup>[2]</sup>。软岩的水理特征是重要制约因素, 泥质软岩吸水膨胀可达 15%, 不仅对充填空间造成挤压, 而且可能引起充填体开裂, 对充填材料的抗渗性(抗渗系数 $<10^{-7}\text{cm/s}$ )和体积稳定性(28d 膨胀率 $<0.5\%$ )提出了更高的要求。为此, 本项目拟建立“地质-工艺”动态适配模型: 利用岩石力学试验数据(声波速度、点载荷强度等), 利用机器学习算法, 对断层影响区无底柱分段高度降低 20%, 高应力区域充填体强度等级提升 1 个等级, 实现地质条件与开采工艺的精确匹配。

## 2 技术优化设计

### 2.1 无底柱分段崩落参数优化

无底柱分段冒落参数设置需密切考虑不同地质条件, 通过分段调整实现安全和效率之间的动态平衡。在围岩稳定的区域, 岩体的整体性和抗变形性都比较好, 这就为采用更大的参数创造了条件。在这种情况下, 适当增大分段高度, 可减轻分段掘进工作量, 提高采掘效率; 适当地增大崩落步距, 可以减少爆破次数, 降低对周围环境的干扰<sup>[3]</sup>。合理选择乳化炸药和控制爆破不偶合系数, 可以在保证崩矿效果的前提下, 避免对矿体结构造成过大的破坏, 保持矿块度相对均匀, 减少后续破碎过程中的成本。

对于中等稳定围岩, 由于节理、裂隙发育, 岩体整体性降低, 若继续采用较大的参数, 易诱发围岩失稳。因此, 为减少采场的暴露面积及时间, 需适当减小分段高度与崩矿步距。同时, 引入预裂爆破技术, 在回采边界形成缓冲带, 可有效降低爆破冲击对围岩的影响, 保护围岩稳定, 降低维修费用。

不稳定围岩区地质条件更为复杂, 常伴有断层破碎带或软岩层, 围岩承载力差, 易出现冒顶和片帮等危险。因此, 必须严格控制采场高度、垮落步距, 尽量减小采场的暴露区。同时, 与超前锚杆支护系统配合, 使松散围岩形成整体承载结构, 形成有效承载拱, 提高围岩自稳能力, 抑制顶板下沉, 保障矿山安全。

### 2.2 阶段空场嗣后充填体系创新

阶段空场充填技术创新以材料配比优化、工艺升级为核心, 以提高效率和降低成本为目标。研究开发的“尾砂-废石-复合胶凝材料”三元体系, 突破了传统充填材料的局限<sup>[4]</sup>。尾砂是细骨料, 流动性好, 能填满废石间的空隙, 保证充填体的密实度。废石可作为粗骨料, 对充填体起到坚固的骨架支撑作用, 提高了充填体的整体强度, 复合胶凝材料作为起胶结作用, 使尾砂与废石紧密结合。

经反复试验优选出最佳配比, 使其强度能满足不同地压环

境要求, 确保充填体对采空区起到有效支撑作用, 且能适应不同地质条件下的应力状态。同时, 大量利用尾矿、废石等工业固体废弃物, 既可解决堆置带来的环境污染问题, 又可大幅度降低充填材料成本, 实现经济和环境双重效益的统一。

从工艺角度看, 采用高密度输送技术改变了传统低浓度输送的弊端: 高密度浆料降低了井下含水量, 减轻了井下排液工作量, 减少了管路磨损, 延长了管线寿命。井下自动拌和站实现了对砂、石、胶等物料的精确计量与自动配比, 提高了充填料的质量稳定性及充填效率。

改善固化工艺是提高整个充填系统效率的重要环节, 通过材料改性处理及有效控制养护环境, 使充填体的早期强度达标时间大为缩短。该技术的突破, 实现回采与充填循环, 缩短了等待养护所需的时间成本, 提高了矿井的总体生产率。实践证明, 该新型充填系统能显著提高矿井年生产能力, 为矿井可持续发展提供强有力的支撑。

### 2.3 联合支护与监测系统设计

为应对复杂地质条件, 需构建“主动加固+实时预警”双保障体系。联合支护结构设计充分考虑各部分受力特征, 实现差别支护。

顶板是采场的主要受力部位, 采用了高强度复合支护<sup>[5]</sup>。螺纹锚杆是一种嵌入岩体内部的锚杆, 锚固顶板岩层, 防止岩层脱离、脱落, 锚索可向深部岩体施加预应力, 进一步提高顶板稳定性, 并形成一套深层次锚固系统, 可有效抵抗顶板下沉力。两帮采用了等强度锚杆, 能有效地控制帮部岩体的鼓出变形, 防止帮部垮落。喷射混凝土既能封闭围岩表面, 又能防止岩体风化剥落, 能与锚杆和锚索形成整体承载层, 提高围岩整体稳定性。

针对矿山安全生产中存在的问题, 可采用基于“多参量、全覆盖性”的监测方法, 在矿山关键部位布设多种监测设备。应力传感器可以实时监测岩体内部应力的变化情况, 并能及时地找出应力异常区, 位移计可以准确地测量围岩位移, 掌握围岩的变形动态。微地震监测仪可以捕捉到岩体内部微小的振动信号, 对可能出现的岩体损伤进行预警<sup>[6]</sup>。

## 3 案例分析(新疆某铅锌矿应用)

### 3.1 工程概况

新疆天山成矿带内的一个铅锌矿床, 其矿体走向 1800m, 倾角  $1200^\circ$ , 平均厚度 22m, 倾向  $65-75^\circ$ 。矿区地质条件复杂, 发育 5 条宽 2-8m 的 F1-F5 断裂, 围岩主要为片岩和千枚岩, 单轴抗压强度为 12-28MPa, 节理裂隙密度 15-22 个/ $\text{m}^2$ , 局部存在高应力(22-28MPa)和弱涌水(涌水量 30-50 $\text{m}^3/\text{h}$ )。

原采用无底柱分段崩落采矿法，资源回收率为72%，年冒顶5-7次，已不能满足年产200万吨的生产需要。

### 3.2 地质条件详细分析

通过钻孔、地质雷达和岩石力学试验，查明了矿区西侧（500-800m）围岩发育良好，主要由片岩组成，单轴抗压强度20~28MPa，节理密度15~18mm/m<sup>2</sup>，地应力18~22MPa。东段（300-500m）受F3和F4断裂影响，围岩破碎，千枚岩占比60%，单轴抗压强度12-18MPa，节理密度18-22个/m<sup>2</sup>，地应力22-28MPa，遇水膨胀率为10%-15%。中部为过渡区，地质条件介于东西两侧。

### 3.3 技术方案设计

按地质分区实施差别技术方案：

西段：采用优化后的无底柱分段崩落法，分段高12米，崩矿步距2.5米，采用25mm乳化炸药（爆速3800米/s），炮孔间距0.8米。顶板布置直径22mm、长2.8m的锚杆，间距0.8米×0.8米、2.0米×2.0米，喷浆厚度为150mm厚C25混凝土。

东段为阶段空场后充填法，分段高60米，采场尺寸为10米×8米（宽×高），充填料配比为尾砂62%，废石28%，复合胶凝材料10%，28天抗压强度设计为6MPa。充填率为95%，采用自动控制系统，配有3套Φ150mm的充填主管，3天后回采矿柱。

过渡带：采用“无矿柱放顶+局部充填”的组合技术，回采后在断层影响区充填5米宽的缓冲带，充填强度为3~4MPa。

### 3.4 实施效果

该技术实施后，共布设28个监测点，经过一年多的跟踪监测，西部无底柱采场顶板沉降最大值为42mm，两帮为55mm，均小于允许值（100mm,150mm）；其中，东段的最大沉降量为35毫米，强度为6.5~7.8MPa，达到设计要求；年生产能力提高到264万吨，开采效率提高32%。资源回收率提高到89%，贫化率下降到14%；顶板事故发生率由每10万吨0.03起下降到0.008起，实现连续30个月零事故（技术应用前后指标对比如表1）。

表1 技术应用前后指标对比

| 指标          | 应用前    | 应用后   | 改善幅度      |
|-------------|--------|-------|-----------|
| 年产能（万吨）     | 200    | 264   | +32%      |
| 资源回收率（%）    | 72     | 89    | +17个百分点   |
| 顶板下沉量（mm）   | 85-120 | 30-42 | 降低51%-65% |
| 顶板事故率（次/万吨） | 0.03   | 0.008 | 降低73%     |

## 4 结语

综上，探索无底柱分段崩落采矿及阶段空场嗣后充填新技术，对提高采矿效率、保障矿山安全、促进矿业可持续发展意义重大。随着该技术的不断创新与完善，该技术有望在新疆等资源大省（尤其是资源丰富的地区）得到推广应用，为实现矿业绿色高效发展提供强有力的支撑，对新时期我国矿业高质量发展具有重要意义。

## 参考文献：

- [1] 严森芳.采矿技术在金矿采矿工程中的应用探究[J].冶金与材料,2025,45(08):82-84.
- [2] 苟天祥,张鹏,张继中.金矿采矿工程中采矿技术的应用分析[J].冶金与材料,2025,45(08):184-186.
- [3] 张腾,张少波,王超.采矿技术在铅锌矿采矿中的应用探析[J].冶金与材料,2025,45(07):82-84.
- [4] 孙祥瑞.现代化采矿技术在金属矿山开采中的应用研究[J].冶金与材料,2025,45(07):151-153.
- [5] 方元.上向分段胶结充填采矿技术在小坝磷矿山的应用[J].能源与节能,2025,(07):239-241.