

# 地下矿山开采顺序优化与产能提升研究

崔国顺

河南焦煤能源有限公司中马村矿 河南 焦作 454100

**摘要:** 本文旨在系统性地探讨地下矿山开采顺序优化与产能提升的内在机理与协同路径。文章首先剖析了影响开采顺序决策的关键因素,包括地质条件、经济指标、工程约束及安全稳定性;进而,构建了以净现值最大化为核心的多目标优化模型,并阐述了求解该模型所依赖的智能算法体系;在此基础上,深入分析了制约矿山产能释放的系统性瓶颈,并从技术装备、生产组织、全生命周期管理三个维度提出了产能提升的综合性策略。研究表明,开采顺序的科学优化是产能提升的前提和基础,而产能的系统性提升又能为更优的开采顺序提供实施保障,二者构成一个相互促进、动态演进的有机整体。本研究紧密结合河南焦煤能源有限公司中马村矿当前由39采区向深部延伸、多工作面并行回撤与掘进的生产实际,为地下矿山实现精细化、智能化、高效益开采提供了理论支撑与方法论指导。

**关键词:** 地下矿山; 开采顺序; 产能提升; 优化模型; 智能算法; 系统工程

## 引言

随着浅部矿产资源枯竭,全球矿业加速向深部、复杂难采区域转移,地下矿山开采面临挑战:深部“三高”问题凸显,地质灾害风险增加,对开采安全性要求更高;矿体赋存状态复杂,品位不均,构造发育,开采不确定性增大。在此背景下,科学确定开采顺序成为矿山项目成败关键。最优开采顺序既能最大限度回收矿产资源、规避安全风险,又能通过合理现金流安排实现项目净现值最大化。不过,开采顺序优化并非孤立,它与矿山整体产能紧密耦合。产能是衡量矿山生产效率的核心指标,低效产能配置会使高价值矿块无法及时回采,造成资金占用和机会成本损失;不合理的开采顺序则可能因局部应力集中或通风不畅等问题形成产能瓶颈,限制整体生产潜力。因此,将开采顺序优化与产能提升置于同一研究框架,探究二者内在关联与协同机制,有助于解决开采难题,提升生产效率,对推动地下矿山高质量发展具有重要理论价值与现实意义。

## 1 影响地下矿山开采顺序决策的关键因素

### 1.1 地质与矿床赋存条件

这是决定开采顺序最根本的自然属性。矿体的形态、产状(走向、倾向、倾角)、厚度、连续性以及内部结构(如夹石、断层、褶皱)直接决定了可采用的采矿方法和开采单元的划分方式。例如,对于急倾斜厚大矿体,通常采用分段或阶段矿房法,其开采顺序需考虑矿柱的合理布置与回采时机;而对于缓倾斜薄矿体,则可能采用长壁式或房柱式开采,顺序上更强调工作面的推进方向与接续<sup>[1]</sup>。此外,围岩的稳固性是安全开采的基石,不稳固的顶底板或矿柱会迫使开采顺序做出调整,优先处理高风险

险区域或采取特殊的支护措施。以中马村矿为例,其39采区部分巷道存在瓦斯含量高、顶板跨度大等复杂地质条件,这直接决定了在工作面回撤和新巷道掘进时,必须将瓦斯治理和顶板支护作为开采顺序决策的前置条件。

### 1.2 经济技术指标

经济指标是驱动开采顺序决策的核心动力。(1) 矿石品位与价值:高品位、高价值的矿块通常被赋予更高的开采优先级,以尽早产生现金流,提升项目的净现值。这引出了“贫富兼采”原则,即在保证整体经济效益的前提下,有计划地搭配开采贫矿与富矿,以维持选厂入选品位的稳定。(2) 开采成本:不同区域的开采成本(包括掘进、回采、支护、运输等)存在差异。靠近已有开拓系统的矿块,其辅助工程量小,成本较低,往往会被优先考虑。(3) 净现值(NPV):作为评价项目长期盈利能力的核心指标,NPV最大化已成为开采顺序优化模型中最常用的目标函数。它充分考虑了资金的时间价值,鼓励将高收益的开采活动尽可能提前。

### 1.3 工程与生产约束

开采活动必须在一系列硬性约束条件下进行,这些约束构成了优化模型的边界。(1) 生产能力约束:矿山的年/月设计生产能力(包括矿岩总量、出矿量、掘进量等)是不可逾越的上限。任何开采顺序都必须确保各时期的作业量不超过设备与人员的承载能力。中马村矿目前正处于采掘接替的关键阶段,拥有多个掘进工作面(如3908回风巷、3908运输巷等)和一个回撤工作面(3901上),这种多头并进的生产格局对全矿的综合生产能力(掘进进尺、支架回撤速度、运输提升能力)提出了严峻考验,是制定开采顺序时必须严格遵守的硬约束。(2)

空间逻辑约束：开采活动具有严格的先后逻辑。例如，在空场嗣后充填法中，必须先完成矿房回采，才能进行嗣后充填；相邻采场之间需要保持足够的保安矿柱或时间间隔，以防止相互干扰。(3) 设备与设施约束：铲运机、矿车、提升机等关键设备的数量与调度能力，以及溜井、破碎站等基础设施的容量，都会对开采顺序产生直接影响。

#### 1.4 安全与稳定性考量

安全是矿山生产的红线。开采扰动会改变原岩应力场，引发围岩变形甚至失稳。开采顺序的不当安排可能导致应力过度集中于某一区域，诱发岩爆或大规模冒落<sup>[2]</sup>。因此，优化模型必须将岩体稳定性作为关键约束或目标之一。通常的做法是利用数值模拟（如有限元、离散元）预先评估不同开采序列下的应力-位移场演化规律，选择能有效控制地压、维持采场整体稳定的方案。对于中马村矿而言，重大安全风险管控是重中之重，如主通风机故障导致的停风风险、副井提升系统的运行风险、以及39采区高瓦斯掘进工作面的瓦斯突出风险等。开采顺序的优化必须将这些具体风险点纳入考量，确保生产活动始终在可控的安全边界内进行。

### 2 开采顺序优化的建模与求解方法

#### 2.1 优化模型的构建

开采顺序优化问题通常被抽象为一个混合整数规划（MIP）或多目标规划（MOP）模型。

##### 2.1.1 决策变量

通常定义为二元变量 $x_{it}$ ，表示开采单元 $i$ 是否在时段 $t$ 被开采。

##### 2.1.2 目标函数

最核心的目标是最大化项目净现值（NPV），其表达式为：

$$\max \sum_i \sum_t \frac{(R_i - C_i) x_{it}}{(1+r)^t}$$

其中， $R_i$ 为开采单元 $i$ 的收益， $C_i$ 为其成本， $r$ 为贴现率。此外，常引入最小化总开采时间、最小化品位波动、最大化资源回收率等作为辅助目标，构成多目标优化问题。

##### 2.1.3 约束条件

生产能力约束： $\sum_i Q_i x_{it} \leq Q_{\max,t}, \forall t$ ，其中 $Q_i$ 为单元 $i$ 的矿量， $Q_{\max,t}$ 为时段 $t$ 的最大产能。

空间逻辑约束：若单元 $j$ 是单元 $i$ 的前置条件，则 $x_{it} \leq \sum_{\tau=1}^{t-1} x_{j\tau}, \forall t$ 。

单次开采约束： $\sum_t x_{it} \leq 1, \forall i$ ，确保每个单元只被开采一次。

坡度/几何约束：对于特定采矿方法，还需满足最小工作面宽度、最大暴露面积等几何要求。

#### 2.2 智能优化算法的应用

由于开采顺序优化模型规模庞大、非线性强，精确算法（如分支定界法）往往难以在合理时间内求得全局最优解。因此，以遗传算法（GA）、粒子群优化（PSO）、模拟退火（SA）为代表的启发式与元启发式算法得到了广泛应用。(1) 遗传算法（GA）：通过模拟生物进化中的选择、交叉、变异操作，在解空间中进行全局搜索。其编码方式灵活，能有效处理复杂的约束条件，适用于大规模开采顺序优化问题。(2) 粒子群优化（PSO）：源于对鸟群觅食行为的模拟，通过个体与群体的历史最优信息来引导搜索方向。其收敛速度快，参数少，易于实现。(3) 模拟退火（SA）：借鉴固体退火原理，允许在搜索过程中以一定概率接受劣解，从而有效跳出局部最优陷阱，具有较强的全局寻优能力。实践中，常将多种算法进行融合，形成混合智能算法（如GA-PSO, SA-GA），以结合各自优势，提升求解效率与精度。

### 3 地下矿山产能提升的系统性路径

#### 3.1 技术装备的智能化与无人化升级

先进的技术装备是提升产能的物质基础和根本保障。(1) 无人化与自动化：推广遥控铲运机、无人驾驶电机车、自动化钻机、智能放矿机等智能装备，可以实现“机械化换人、自动化减人”，不仅大幅提高作业效率（减少交接班、等待时间），还能将人员从高危区域撤离，从根本上保障安全，为高强度连续生产创造条件。(2) 高效采矿工艺：研发和应用大结构参数、高效率的采矿方法，如大孔径深孔阶段崩落法、高阶阶段分段崩落法、机械化上向分层充填法等，可以显著提高单个采场的日/月生产能力，减少采切比<sup>[3]</sup>。(3) 智能辅助系统：构建基于物联网的智能通风系统，能根据实时监测的风量、瓦斯浓度、粉尘浓度等数据动态调节风机运行，确保各作业面风量充足且能耗最低；智能排水系统能根据水位自动启停水泵，保障生产安全。

#### 3.2 生产组织与调度的精细化与动态化

高效的生产组织是释放产能潜力的关键，核心在于实现全流程的无缝协同。(1) 全流程协同优化：打破掘进、回采、出矿、运输、提升等环节的壁垒，建立一体化的生产调度模型。通过优化各工序的时空衔接，消除等待和窝工现象，实现“流”的顺畅。例如，采用“掘采平行作业”模式，使新采区的准备与老采区的回采同步进行。(2) 基于数据的动态调度：利用矿山物联网和大数据平台，实时采集设备状态、人员位置、矿石品位、巷道环境等海量信息，构建高保真的数字孪生体。在此基础上，运用前述的智能优化算法，对短期（日/班）生

产计划进行滚动修正与动态调度，以应对现场的不确定性（如设备突发故障、地质异常）。（3）预防性维护体系：建立关键设备的健康状态监测（PHM）与预测性维护系统，通过对振动、温度、油液等信号的分析，提前预判设备故障，将被动维修转变为主动维护，将故障停机时间降至最低，保障设备的高可用率（Availability）和高利用率（Utilization）。

### 3.3 全生命周期的产能接续与柔性规划

产能的可持续性依赖于前瞻性的接续规划和系统柔性的设计。（1）三级矿量动态平衡：科学管理开拓矿量、采准矿量和备采矿量（三级矿量），确保三者之间保持合理的比例（如3:1.5:1）和动态平衡。这是维持矿山长期稳产、避免产量大起大落的根本保障。需建立三级矿量的动态监测与预警机制。（2）产能爬坡与衰减管理：在矿山建设初期，制定科学的产能爬坡曲线，避免因基础设施不配套导致的产能浪费；在进入中后期，提前5-10年规划深部或边远区域的接替资源，通过新水平、新中段的开拓，平滑过渡产能衰减期，延长矿山服务年限<sup>[4]</sup>。（3）柔性生产系统设计：在矿山设计阶段就应考虑未来产能调整的可能性，构建具有一定柔性的生产系统。例如，采用模块化设计的采场、预留备用运输线路、选用可扩展的提升系统等，使其能够根据市场变化或资源条件的变化，灵活调整生产规模。

### 4 开采顺序优化与产能提升的深度协同机制

开采顺序优化与产能提升并非割裂的两个议题，而是存在深刻的协同效应与反馈循环。（1）顺序优化为产能提升创造条件：一个经过应力场、通风网络、运输路径等多维度验证的优化开采顺序，能够有效规避安全隐患和工程瓶颈，为后续的高强度、连续化生产扫清障碍。例如，合理的开采顺序可以形成稳定的“压力拱”或“应力隔离带”，保护后续采区，从而允许采用更大的采场结构参数和更高的回采强度，直接提升单采场产能。（2）产能提升为顺序优化提供保障：强大的、富有弹性的产能

体系，使得优化模型中设定的开采计划能够被忠实、高效地执行。如果实际产能不足，再完美的开采顺序也只能是纸上谈兵。高效率的装备和精准的调度，确保了高价值矿块能够按计划及时回采，真正实现NPV最大化的目标。（3）动态反馈与迭代优化：在实际生产中，地质条件的不确定性、设备故障等扰动因素不可避免。因此，需要建立一个“监测-评估-优化-执行”的闭环反馈机制。通过实时数据不断修正地质模型和生产参数，并以此为基础对中长期开采顺序和短期生产计划进行滚动优化，实现二者在动态环境下的持续协同与共同演进。

### 5 结语

本文系统论述了地下矿山开采顺序优化与产能提升的理论、关键技术及协同路径。指出开采顺序决策是受地质、经济等多重因素制约的复杂系统工程，需摒弃经验主义，采用基于数据和模型的科学决策；以净现值最大化为核心构建优化模型，借助智能算法求解是科学化有效途径。产能提升需从智能化装备升级、精细化生产组织、全生命周期接续规划三层面协同发力。开采顺序与产能水平存在协同互馈关系，二者有机结合与动态优化是构建现代化高效益本质安全型地下矿山的核心。未来研究可深化开采顺序优化模型对地质不确定性的鲁棒性处理，探索人工智能、数字孪生等前沿技术在产能预测与动态调度中的深度融合，助力地下矿山智能化转型。

### 参考文献

- [1]陈璐,陈青,张梅,等.矿山深部开采顺序优化与岩爆灾害超前控制效果研究[J].中国矿业,2025,34(04):76-86.
- [2]刘志明.某矿山复杂环境下地压活动规律研究及开采顺序优化[D].武汉理工大学,2023.DOI:10.27381/d.cnki.gwlg.2023.001594.
- [3]王小霞.当议复杂水文地质条件对矿山开采顺序的影响[J].世界有色金属,2019,(23):142+144.
- [4]金凤英,崔松,周玉成.某矿山露天-地下联合开采产能衔接方案研究[J].中国矿业,2021,30(S2):246-250.