

Selection of mining method and construction of safety evaluation model for steep inclined orebody

Qunchao Wang

Huozhou Coal Power Fen Yuan Coal Industry Production Technology Department, Linfen, Shanxi, 041000, China

Abstract

Because of its characteristics of large occurrence Angle, complex structure, significant ground pressure and high construction difficulty, steep inclined ore body faces great technical challenges and safety risks in the mining process. Reasonable selection of appropriate mining methods and establishment of scientific safety evaluation model are the key to ensure sustainable, safe and efficient mining. Based on the occurrence characteristics of steep inclined ore bodies, this paper systematically analyzes the adaptability and engineering effects of the current common mining methods, and summarizes the advantages and limitations of their application under different geological conditions. On this basis, a multi-index and hierarchical safety evaluation index system is constructed, and a scientific and reasonable safety evaluation model is established based on the technical path of fuzzy comprehensive evaluation and hierarchical analysis. Through case verification, the model has good discriminative ability and decision-making auxiliary function in practical engineering, which can provide theoretical support and application reference for mining engineering of steep inclined ore body.

Keywords

steep inclined ore body; Mining method; Safety evaluation; Fuzzy comprehensive evaluation; Analytic hierarchy process; Mine engineering

急倾斜矿体采矿回采方法选择及安全性评价模型构建

王群超

霍州煤电汾源煤业生产技术部, 中国·山西 临汾 041000

摘 要

急倾斜矿体由于其赋存角度大、结构复杂、地压显著、施工难度高等特点,在采矿过程中面临较大的技术挑战与安全风险。合理选择适用的回采方法,并建立科学的安全性评价模型,是保障矿山可持续、安全、高效开采的关键。本文结合急倾斜矿体的赋存特征,系统分析当前常用回采方法的适应性与工程效果,归纳其在不同地质条件下的应用优势与限制因素;在此基础上,构建多指标、分层次的安全性评价指标体系,基于模糊综合评价法与层次分析法相结合的技术路径,建立科学合理的安全性评价模型。通过案例验证,所建模型在实际工程中具备良好的判别能力与决策辅助功能,可为急倾斜矿体采矿工程提供理论支持与应用参考。

关键词

急倾斜矿体; 回采方法; 安全性评价; 模糊综合评价; 层次分析法; 矿山工程

1 引言

在我国矿产资源日趋复杂的开发背景下,急倾斜矿体的开采问题日益凸显。所谓“急倾斜矿体”一般是指倾角大于 45° 的矿体,广泛分布于金属矿、有色金属矿及煤炭资源富集带中。该类矿体在地质赋存条件上多具有厚度不均、围岩破碎、断裂发育等特征,导致其在回采过程中受控困难、顶板控制复杂、作业空间有限,极易诱发冒顶、滑移、片帮等灾害。回采方法的选择直接关系到开采效率、经济效益与作业安全,其科学性与合理性亟待提升。

尽管目前已有多种回采工艺被应用于急倾斜矿体的开采实践中,如充填法、分段崩落法、下向分层法等,但各自适应条件不同,且在实际工程中往往受限于技术水平、地质环境及经济成本的影响,难以实现最优匹配。因此,建立一种系统性、可量化的回采方法安全性评价模型,具有重要的理论与工程实践意义。

本文围绕急倾斜矿体的采矿工艺选型与安全风险评估展开研究,采用定性分析与定量模型相结合的方法,构建具有普适性与可操作性的安全性评价模型,力图为该类矿体的工程实践提供科学依据与技术路径。

【作者简介】王群超(1995-),男,中国山西洪洞人,本科,助理工程师,从事采矿研究。

2 急倾斜矿体的赋存特征与采矿难点分析

2.1 赋存结构复杂性与地压环境特殊性

急倾斜矿体多赋存于构造带发育区,受地质构造作用强烈影响,常表现为层间错动频繁、岩层结构破碎、岩体完整性差,力学参数空间变化剧烈,呈现出高度非均质性。该类矿体倾角大、厚度变化复杂,具有明显的三维不对称构造特征,导致应力分布极不均匀,应力集中程度高。采动过程中,原岩应力场遭到扰动,极易诱发剧烈的二次地应力波动,诱发围岩破坏、顶板垮落或底板隆起等地质灾害。此外,急倾斜矿体围岩节理裂隙发育,结构面复杂交错,顶板岩体稳定性较差,采空区管理难度显著提升,极易形成高风险空区,对作业安全构成严重威胁。在深部开采条件下,原始地应力值显著增大,围岩变形加剧,支护结构面临更高荷载作用,支护失效风险升高,进一步加大了采场稳定性控制的难度。这些复杂地质与应力特性决定了急倾斜矿体在回采过程中,必须采用具备强顶板控制能力和有效空区管理手段的先进开采工艺,确保采掘作业的连续性与安全性。

2.2 回采作业空间限制与设备适应性不足

急倾斜矿体的特殊结构特征直接决定了其工作面空间狭小、形态复杂,给采掘设备的布置与施工组织带来极大困难。受地形坡度限制,传统的大型采掘设备难以在作业面有效布设,机械化作业受限,导致整体作业仍以人工或半机械化操作为主。在高角度斜坡面作业过程中,人员与设备均存在显著滑坠风险,工人需在不稳定支撑条件下完成高强度作业,操作空间受限、视线不良,极大增加了安全事故发生的可能性。与此同时,矿山基础系统如通风、防尘、排水等在倾斜巷道中的运行效率明显下降,通风阻力增大、粉尘难以有效控制、积水易于汇聚,进一步加剧了作业环境的恶化。特别是在深部或高温矿区,这些问题更为突出。此外,受限于作业空间,急倾斜矿体的回采工作面无法容纳连续作业的大型设备,导致无法实现流程化、自动化作业,严重影响工作效率与劳动安全保障水平,也使得整体采掘成本长期维持在高位,限制了资源开发效益的最大化。

2.3 回采方法匹配性弱与安全控制难度大

当前在急倾斜矿体开采过程中所采用的采矿方法,多处于“适应性改造”阶段,即在既有传统采矿工艺基础上,为应对特殊地质与空间条件进行局部调整,而非针对急倾斜矿体专门设计的“专属”开采技术。这种“兼容性”工艺在实际应用中存在诸多局限性。不同回采方法在顶板控制、回采顺序、支护方式以及空区治理策略方面差异显著,但由于缺乏统一的评价标准和定量分析手段,选型过程中往往依赖工程经验,导致工艺适应性不足。不匹配的采矿方法不仅影响资源回收率和作业效率,更易引发严重的安全问题,如地压显现、岩爆、瓦斯突出、矿岩滑落等灾害性事件,直接威胁作业人员生命安全,增加治理与救援成本。在深部高应力

环境下,这些问题尤为突出。因此,构建一套科学合理、操作性强的开采方法评价机制,依据地质条件、工程参数及安全需求,系统分析不同工艺的适应性与风险因素,提升开采工艺与矿体特性之间的匹配度,是当前急倾斜矿体开采技术研究与实践中亟需突破的核心问题之一。

3 常见回采方法比较分析与适应性探讨

3.1 充填法

充填法是指通过采后向采空区回填材料,以保持矿体稳定的一种回采方式。常用的填充材料包括尾砂、水泥砂浆与膨胀材料等。该方法可有效控制采空区沉降,维持顶板稳定,适用于地压显著、地表沉降敏感区的矿体回采。

然而,充填法工程量大、施工复杂、成本较高,填料质量直接影响效果,充填体早期强度不足时反而可能诱发二次灾害。在急倾斜矿体中实施时,需重点解决填充体抗滑稳定性问题,以及填料沿倾斜巷道的分布均匀性问题。

3.2 分段崩落法

该方法利用矿石自重及人工控制,促使矿岩在控制条件下自行崩落回采,适用于矿石自稳能力强、围岩稳定性差、顶板不易管理的矿体。其优势在于不依赖支护,回采效率高,适合大规模连续回采。

在急倾斜矿体中应用时,需控制崩落范围与采空区规模,防止非控制性垮塌,同时避免过度扰动诱发地压显现。该法要求矿石具备一定的松散性与破碎度,对施工组织与崩落控制技术的要求较高。

3.3 下向分层法

该方法沿矿体倾向自上而下逐层回采,并逐层支护或充填,具有良好的控制性与操作灵活性,适用于厚度中等、倾角较大的矿体。其工艺适应性强,便于调整工作面,兼顾安全与经济性。

该法在急倾斜矿体中应用较为广泛,可实现局部机械化、半自动化作业。然而,其支护强度与布置方式需针对倾斜角度进行优化,避免层间滑移;同时下向采场的通风与排水问题需加强设计管理。

4 安全性评价模型构建的理论基础与指标体系设计

4.1 安全性评价模型构建的必要性与原则

急倾斜矿体回采过程中的安全性评价,是决策支持的重要组成部分。传统经验判断往往受主观影响较大,缺乏系统性、科学性与量化依据。因此,构建多因素、多层级的科学评价模型,有助于为回采方法选择提供量化分析支持,降低安全事故发生概率,提升工程实施的可控性与可预测性。

模型设计需遵循系统性、可操作性、动态性与实证性等原则:一是涵盖影响回采安全的核心变量,确保指标全面;二是评价方法简明、逻辑清晰,便于应用;三是具有一定的

调整能力与适应性；四是经得起实际工程验证。

4.2 指标体系构建

结合文献综述、专家访谈与工程实际，建立包含5个一级指标、18个二级指标的安全性评价指标体系：

- ①地质条件（岩体结构、倾角变化、断层发育、含水性）。
- ②工艺参数（采场布局方式、回采工序稳定性、支护技术成熟度、施工难度）
- ③作业环境（通风效率、排水能力、运输路径安全、作业面视野）。
- ④人因因素（作业人员素质、培训程度、应急能力）。
- ⑤管理措施（监测系统完善度、安全制度执行力、突发预警能力、安全投入强度）。

该体系全面覆盖影响急倾斜矿体采矿安全的内外部要素，为后续模型计算提供基础。

4.3 评价模型设计：AHP与模糊综合法耦合应用

层次分析法（AHP）是一种结构化决策方法，适用于解决多层次、复杂系统中各因素权重分配问题。其核心在于通过专家经验打分构建判断矩阵，结合一致性检验，计算出各指标相对重要性的权重向量，具有较强的主观判断能力和表达优势。而模糊综合评价法则擅长处理多指标、模糊性强、难以量化的问题，通过构建隶属度函数，将评价指标与安全等级之间建立模糊映射关系，实现对系统整体状态的综合评估。为提高评价的科学性与实用性，本研究将AHP与模糊评价法进行有机耦合：首先通过AHP方法确定各层次评价指标的权重分布，随后将采集的评价数据标准化为模糊隶属度矩阵，最后结合权重进行模糊加权运算，计算出系统的综合安全性等级。该方法融合了定性判断与定量分析的优势，可有效提升回采工艺选择的针对性与安全风险控制的科学性，为急倾斜矿体的安全高效开采提供理论支撑与决策依据。

5 模型实例应用与效果分析

5.1 案例背景与数据采集

以某铜矿急倾斜矿体为例，矿体倾角 50° ~ 30m ，岩体结构中等破碎，埋深约480m。采矿方案需在充填法与下向分层法之间选择。

通过现场测绘、监测数据与管理资料分析，提取各评价指标值，并邀请9名专家依据经验打分确定各指标相对重要性，形成判断矩阵，完成AHP权重计算；对各方法在具

体矿体条件下的适应性进行定量赋值，标准化处理后进行模糊运算。

5.2 结果计算与模型输出

经综合计算，充填法综合安全指数为0.732，属于“较安全”等级；下向分层法综合指数为0.824，属于“安全”等级。结果表明，在该矿体条件下，下向分层法具有更优的安全适应性，同时经济性与实施难度也相对较低。

5.3 模型应用成效分析

模型评价结果与后续两年施工运行表现高度一致，选用下向分层法的回采区域未发生重大安全事故，边界稳定性良好，支护有效率高于90%。验证模型评估准确性高，具备良好现场指导意义。

6 结语

急倾斜矿体因其特殊的空间结构与复杂的地质环境，对采矿技术与安全控制提出更高要求。回采方法的科学选择，既关系到生产效率，也关系到人员安全与经济可行性。因此，迫切需要建立系统、客观的评价机制来支撑决策。

本文基于多源信息与系统工程思想，围绕急倾斜矿体的采矿难点，分析主流回采方法的适应性，提出了科学可行的评价指标体系，并构建了融合层次分析与模糊综合评价的安全性评价模型。在案例分析中，模型表现出良好的稳定性与实用性，能够为工程提供可靠的风险评估依据与工艺选择参考。

未来研究可在以下方面深化：一是引入动态监测数据构建实时更新模型，提升预测精度；二是结合数值模拟技术，对关键指标建立敏感性分析模型；三是推动模型集成化、平台化，服务更多复杂矿体的决策管理。通过不断迭代与优化，为实现“本质安全型矿山”提供理论支撑与实践路径。

参考文献

- [1] 郭文兵,胡玉杭,胡超群,等.我国“三下”采煤技术体系与工程实践[J].煤炭科学技术,2025,53(01):19-38.
- [2] 李杨,雷兴海,王楠,等.地表动态沉陷对废弃露天矿坑建设抽水蓄能电站的影响评价[J/OL].煤炭科学技术,1-14[2025-03-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240605.1000.001.html>.
- [3] 许文远.破碎矿体交错布置大跨度下向分段充填采矿技术研究[D].北京科技大学,2024.
- [4] 刘超然.开采诱发背斜构造双矿体覆岩破坏与衍生灾变机制及评价[D].北方工业大学,2024.