

金属矿高效充填采矿法优化研究

何卓锋

浙江建辉矿建集团有限公司, 浙江 温州 325800

DOI:10.61369/ETQM.2026030001

摘 要： 金属矿充填采矿法优化研究旨在提高采矿效率与安全性。当前主要采用空场嗣后充填法和分段充填法，但面临充填成本高、作业周期长及系统匹配不足等制约因素，充填体稳定性控制也存在技术难点。研究通过构建经济、安全、效率三位一体的优化模型，提出材料配比优化、采场结构参数协同优化及流程再造等实施路径，并基于数值模拟验证方案效果。优化旨在提升采场能力、缩短循环周期并降低充填成本，为矿山高效开采提供系统方案。

关 键 词： 金属矿；采矿优化；高效充填；充填采矿

Research on Optimization of High-Efficiency Backfilling Mining Method for Metal Ores

He Zhuofeng

Zhejiang Jianhui Mining Construction Group Co., LTD., Wenzhou, Zhejiang 325800

Abstract： The research on the optimization of metal ore filling mining method aims to improve mining efficiency and safety. At present, the main methods adopted are the empty field subsequent filling method and the segmented filling method. However, they are constrained by factors such as high filling costs, long operation cycles, and insufficient system matching. There are also technical difficulties in controlling the stability of the filling body. The research, by constructing an optimization model integrating economy, safety and efficiency, proposes implementation paths such as material ratio optimization, collaborative optimization of stope structure parameters and process reengineering, and verifies the effect of the scheme based on numerical simulation. Optimization aims to enhance stope capacity, shorten the cycle period and reduce filling costs, providing a systematic solution for efficient mining in mines.

Keywords： metal mine; mining optimization; efficient filling; filling mining

引言

金属矿充填采矿法在实现安全开采与资源高效回收方面具有显著优势，但其广泛应用仍面临充填成本高昂、采充循环周期长及系统协同性不足等制约。为系统提升采矿效率与经济效益，本研究围绕充填材料性能、采场结构参数与回采工艺协同、以及采充作业流程优化等关键环节展开深入研究，旨在构建一套科学可行的高效充填采矿优化体系，为金属矿山的绿色、安全、高效开采提供技术支撑。金属矿山固废充填开采技术是实现矿业低碳绿色开发的重要途径，矿山充填不仅可以实现最大限度的回采矿产资源，而且可以实现矿业固废的环保处置。

一、金属矿充填采矿法现状与关键问题分析

（一）典型充填采矿法工艺特征

金属矿充填采矿法是以充填体控制地压、保障安全开采的核心技术，其中空场嗣后充填法与分段充填法为两种典型工艺。空场嗣后充填法分两步进行：先集中回采矿房形成较大空区，嗣后一次性充填，利用充填体支撑围岩并为后续回采创造条件，具有生产能力大、作业集中特点，适用于矿岩稳固的中厚以上矿体。分段充填法则按分段划分采场，各分段内进路实行“随采随充”，

通过将大空区转化为小空区作业，显著提升对软弱围岩的适应性，但其工艺环节交替频繁，组织复杂度较高。两种方法虽工艺路径不同，均以充填体作为维持采场稳定的关键介质，其工艺特征直接决定了采矿效率与安全控制水平^[1]。

（二）制约生产效率的关键因素分析

当前，金属矿充填采矿法在追求高效化的进程中，面临若干关键因素的制约。首要制约在于充填成本，其构成包括胶凝材料、骨料及制备输送能耗，其中高昂的胶凝材料费用占据极大比重，直接影响采矿方法的经济可行性，制约了高强度充填技术的

应用。其次，作业循环周期是制约生产效率的核心环节。一个完整的采充循环包括落矿、出矿、充填准备、充填作业及充填体养护待凝等多个工序，其中充填体达到设计强度所需的养护时间尤为关键。过长的待凝时间严重制约采场工作面的接替，降低了采矿综合效率，形成产能瓶颈。再者，充填系统与回采作业的产能匹配问题突出^[2]。充填系统的制备与输送能力若无法与采矿强度相匹配，会导致充填作业滞后，采空区无法及时处理，进而引发采场接续紧张、地压活动加剧等一系列连锁问题，最终制约矿山整体生产能力的释放。上述成本、周期与系统匹配度等因素相互交织，共同构成了实现高效充填采矿的主要障碍。

（三）充填体稳定性与采场安全控制难点

充填体的长期稳定性是保障采场安全的核心，其控制面临多重技术挑战。充填体作为人工构筑的结构体，其力学性能受到材料配比、制备浓度与养护条件的显著影响，性能不均匀性可能导致局部弱点，在采动应力下成为失稳突破口。充填体与采场围岩的接触界面是力学作用的薄弱环节，其粘结强度直接影响整体支撑效果；若接顶不充分或存在空隙，将导致应力集中，削弱对围岩变形的约束能力。在多步骤回采过程中，后续矿块的回采作业会对相邻充填体产生二次扰动，使其承受动态载荷，对其长期强度与蠕变特性提出更高要求。此外，井下复杂的水文地质环境，如渗流、侵蚀作用，可能劣化充填体性能，影响其耐久性。这些因素相互耦合，使得精确预测与控制充填体在工作载荷下的力学行为变得极为复杂，构成了采场安全与连续高效回采的主要技术瓶颈^[3]。

二、高效充填采矿法优化模型构建

（一）优化目标体系确立

构建高效充填采矿法优化模型，首要任务是建立一个兼顾多方面诉求的优化目标体系。该体系应以提升综合效益为核心，系统整合经济、安全与效率三大目标。经济目标是项目可持续发展的基础，其核心在于通过优化充填材料配比、降低胶凝材料用量、优化工艺环节来显著控制充填成本，同时通过提高回采率与缩短作业周期来实现经济效益最大化。安全目标是矿山生产的首要前提，要求优化后的方案必须确保采场与充填体的长期稳定性，有效控制地压显现，为井下作业提供本质安全环境。效率目标则直接关乎生产能力的释放，旨在通过优化采场结构参数、简化工艺衔接、强化采充产能匹配，最大限度缩短单个采场的采充循环周期，提升矿山整体生产效率。这三个目标相互关联、相互制约，构成一个有机整体。优化模型需寻求三者之间的最佳平衡点，而非单一目标的极端化，从而指引后续各项优化措施朝着系统最优的方向推进^[4]。

（二）充填材料配比与力学性能优化

充填材料配比与其力学性能的优化，是实现高效充填采矿的核心技术环节。该优化旨在以最低的经济成本，获得能够满足采场稳定性要求的充填体力学性能。优化的重点在于科学确定胶凝材料、骨料及水的配合比例。其中，降低水泥等高价胶凝材料的用量

是控制成本的关键，但需以保证充填体达到必要的强度指标为前提，这构成了优化的基本矛盾。力学性能优化的目标体系主要包括早期强度、后期强度、变形特性及工作特性。早期强度直接影响采场循环周期，决定了相邻采场可安全回采的最短时间；后期强度则关乎采场整体稳定性和长期安全。需通过系统的配比试验，建立材料配比与不同龄期强度、弹性模量等关键参数之间的定量关系。同时，充填料浆的浓度、坍落度等工作特性亦需优化，以确保其具有良好的可泵送性和采空区内的自流平特性，实现充分接顶。优化过程是一个多目标决策问题，需在成本约束下，寻求满足特定采矿地质条件与回采工艺要求的最佳配比方案^[5]。

（三）采场结构参数与回采工艺协同优化

采场结构参数与回采工艺的协同优化是构建高效充填采矿法的核心环节，其目的在于实现采场几何布局与开采作业程序之间的最佳匹配。该优化强调将采场尺寸、矿柱布置、分段高度等结构参数，与回采顺序、爆破设计、出矿方式等工艺参数视为一个有机整体进行系统优化。合理的结构参数为回采工艺的实施提供了基础条件，而先进的回采工艺又能有效弥补结构设计的局限性。例如，通过优化回采顺序可以改善采场应力分布，从而为增大采场结构参数创造安全前提；反之，适宜的结构参数能够为高效率、大规模的机械化回采作业提供空间保障^[6]。协同优化的本质是在满足采场稳定性和安全要求的约束下，寻求采矿强度、资源回收率与生产成本之间的最优平衡，最终实现采矿效率与经济效益的同步提升。

（四）充填系统与回采作业流程再造

充填系统与回采作业流程再造旨在从根本上解决二者协同不畅的瓶颈，通过系统性重构实现生产效率最大化。其核心是将原先可能存在串行、割裂的工序整合为高度并行、紧密衔接的有机整体。流程再造首先需对充填系统的制备与输送能力进行精准评估和升级，确保其能够满足高强度、快节奏的回采作业对充填料浆的持续、稳定供应需求，避免因充填能力不足导致回采中断。其次，需优化作业时序安排，利用现代生产调度理论，将充填准备、管道铺设等辅助作业尽可能与回采、出矿等主要生产环节并行开展，显著压缩采场采充循环的总时间。此外，需建立基于实时数据反馈的动态调度机制，根据采场实际进度灵活调整充填计划，确保采空区得以及时处理^[7]。流程再造的最终目标是打破系统间的壁垒，使充填系统不再是回采作业的制约因素，而是成为支撑高效采矿的助推器，实现从“采等充”到“采充协同”的根本性转变，从而全面提升资源利用率和矿山整体运营效率。

三、优化方案实施与效果模拟分析

（一）基于具体矿体条件的优化方案设计

基于具体矿体条件的优化方案设计，是连接理论模型与工程实践的关键环节。该设计工作必须紧密结合矿山实际的地质与工程背景，包括矿体形态、倾角、厚度、围岩稳固性以及地质构造分布等关键参数。方案设计并非对通用模型的简单套用，而是以其为框架进行的针对性深化与具体化。例如，对于厚大矿体，可

重点优化采场结构参数与回采顺序，以实现安全高效的大规模回采；对于复杂形态或破碎围岩条件下的矿体，则需优先考虑充填体力学性能的强化与回采工艺的精细化控制，以确保采场稳定^[8]。设计内容需全面涵盖此前优化的各个方面：确定适用于本地原材料的经济合理的充填材料配比；明确既能保证安全又可提高回收率的采场尺寸、矿柱参数及分段高度；制定与矿体产状相匹配的回采顺序与爆破方案；规划与采矿能力精准对接的充填作业流程。此阶段形成的方案是一个集成了技术、经济与安全目标的综合性解决方案，为后续的模拟验证与工业试验提供精确的蓝图和依据^[9]。

（二）数值模拟分析

在优化方案确定后，需采用数值模拟方法对其安全性与有效性进行定量评估。该分析主要聚焦于采场应力分布规律与充填体稳定性两大核心问题。通过构建能够真实反映矿岩体力学特性、地质构造以及回采充填顺序的三维数值模型，模拟采矿全过程。分析旨在揭示在优化参数下，采场围岩的二次应力场特征、塑性区发育范围及程度，评估是否有效控制了有害的应力集中现象。同时，重点考察充填体在承受围岩载荷及动态回采扰动过程中的力学响应，包括其内部应力状态、位移变化以及潜在的屈服破坏风险。数值模拟能够预测不同回采阶段充填体的安全系数，验证其作为支撑结构的可靠性。该过程为优化方案提供了关键的理论数据支撑，预先识别可能存在的安全隐患，从而指导方案的进一步修正与完善，确保其在实际应用前具备充分的理论安全裕度。

（三）优化前后技术经济指标对比预测

优化前后技术经济指标的对比预测，是评估充填采矿法优化

方案综合效益的关键环节。该预测基于前述数值模拟与方案设计的具体参数，通过建立量化的评价模型，对实施优化措施前后的关键绩效指标进行系统性测算与比对。技术指标对比主要包括：采场综合生产能力、矿石回收率、贫化率、采充循环周期以及充填体强度达标率等。经济指标对比则重点分析：吨矿充填成本、采切比变化带来的掘进成本变动、因回收率提升产生的增量收益，以及由于循环周期缩短所降低的巷道维护与通风等间接费用。通过综合测算，可得出优化方案实施后的预期经济效益，如投资回收期、内部收益率等^[10]。这一对比预测不仅能够清晰量化优化方案在提升效率与降低成本方面的潜在效果，更能从技术与经济耦合的角度，全面论证方案的可行性与先进性，为管理层的投资决策提供客观、可靠的依据，最终明确优化研究工作的实际应用价值。

四、结论

综上所述，本研究通过对金属矿充填采矿法的系统分析，构建了以经济、安全、效率为核心目标的优化模型。研究围绕充填材料性能、采场结构参数与回采工艺的协同、以及采充作业流程再造等关键环节展开，形成了基于具体矿体条件的综合性优化方案。数值模拟与技术经济预测表明，该优化体系能有效提升采场生产能力、缩短循环周期、控制成本，并保障采场稳定，为金属矿安全高效开采提供了明确的理论依据与可行的技术路径。

参考文献

- [1] 郭超. 深部金属矿地质资源勘探的关键技术突破与实践 [J]. 冶金与材料, 2022, 5(6): 43-63.
- [2] 李要东, 段伟. 金属矿地下开采采矿方法优选 [J]. 采矿技术, 2023, 3(45): 63-62.
- [3] 梁彦波, 钟永生, 周吉谦, 符洲云, 李善宏. 呷村银多金属矿“高效采矿”方法及采场结构参数优化研究 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 56(3): 37-842.
- [4] 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 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 2(5): 36-257.
- [5] 颜家成, 张杰, 雷战. 我国有色金属矿地下开采方法概述及发展趋势 [J]. 世界有色金属, 2023, 22(1): 25-67.
- [6] 王亚军, 李向东, 李强, 盛佳. 高海拔大型铜多金属矿“采矿方法优化及生产设备配套选择” [J]. 矿业研究与开发, 2024, 26(2): 67-267.
- [7] 郭利杰, 刘光生, 马青海, 陈鑫政. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展 [J]. 煤炭学报, 2022, 27(2): 77-256.
- [8] 刘哲明. 金属矿深井充填管道系统失效模式及维护策略研究 [J]. 西安建筑科技大学, 2023, 3(3): 77-672.
- [9] 周鑫. 金属矿深部采场结构参数设计及其稳定性分析 [J]. 东北大学, 2024, 2(3): 2-65.
- [10] 查道欢. 某复杂锌多金属矿集约化开采及采场结构参数优化研究 [J]. 江西理工大学, 2022, 52(5): 6-265.