复杂地质条件下地下铁矿高效采矿工艺优化研究

张景凯
徐州铁矿集团，江苏 徐州 221138
DOI:10.61369/ETQM.2026090032

摘　　要： 针对复杂地质条件下地下铁矿损失贫化大、效率低的问题，剖析了构造应力－结构面耦合诱发的采场失稳、矿体形态多变导致的损失贫化及裂隙水与爆破动载下的出矿效率衰减规律。通过采场参数与回采顺序动态匹配、低扰动精细化爆破及落矿－运搬－空区处理工序衔接优化，实现工艺协同。工业试验表明产能提升、采切比与成本下降；进而构建融合微震、变形及品位的动态反馈机制，提炼技术标准并形成持续优化闭环，有效提高开采效率。

关 键 词： 复杂地质；损失贫化；工艺参数；动态反馈

Optimization Research on Efficient Mining Process of Underground Iron Ore under Complex Geological Conditions

Zhang Jingkai
Xuzhou Iron Mine Group, Xuzhou , Jiangsu 221138

Abstract: In response to the problems of large loss and degradation in underground iron ore mining under complex geological conditions, this paper analyzes the instability of the mining area caused by the coupling of tectonic stress and structural planes, the loss and degradation due to the variable shape of the ore body, and the attenuation of ore extraction efficiency under the influence of fracture water and blasting dynamic loads. Through dynamic matching of mining area parameters and mining sequence, low-disturbance fine blasting, and optimization of the connection between the process of ore discharge, transportation, and empty area treatment, the process is coordinated. Industrial tests show that the production capacity has increased, the cutting ratio has decreased, and the cost has dropped. Furthermore, a dynamic feedback mechanism integrating microseismicity, deformation, and grade is constructed, technical standards are refined, and a continuous optimization loop is formed, effectively improving the mining efficiency.

Keywords: complex geology; loss and degradation; process parameters; dynamic feedback

引言

本文针对复杂地质条件下地下铁矿损失贫化大、效率低的问题，分析构造应力、产状多变及裂隙水引起的采场失稳与工序衰减机理，研究采场结构动态匹配、低扰动爆破及工序连续化协同优化，经工业试验与多源信息反馈形成改进闭环。虽然我国铁矿石资源总量相对丰富，但可供开发利用的高品位资源短缺，因此需要针对不同的铁矿赋存条件，采用更合理、更科学的开采技术以提高资源利用率。我国的铁矿资源主要分布在东北、西北和西南地区，这些地区的铁矿资源储量丰富。在进行铁矿开采时，应结合当地的实际情况选择最适合的采矿方法。

一、复杂地质特征对采矿效率的制约因素与内在机理分析

（一）构造应力场与矿岩结构面耦合作用下的采场失稳模式及作业中断机制

在构造应力场和矿岩结构面产生耦合作用的情况下，采场失稳并非由单一因素导致，而是二者相互交互影响的结果。在高应力的环境当中，岩体内所存在着的节理、层理以及断裂等这些结构面，通常会成为应力释放的具有优势的通道。当采掘活动造成应力重新进行分布的时候，沿着这些弱的面容易形成剪切滑移或者张拉分离的情况。特别是在最大主应力的方向和结构面的走向呈现小角度相交的时候，顶板以及边帮容易产生大范围的结构控制类型的垮落；相反的情况，当高应力集中起来作用在完整的岩体之上的时候，就有可能引发应变类型的岩爆。上述失稳模式直接造成回采作业中断，迫使矿山投入大量时间进行支护修复和危石清理。这打乱了采场作业循环，制约了设备调配，使工序连续

作者简介：张景凯（1992.06-），男，汉族，山东临沂人，本科，中级工程师，研究方向：地下铁矿。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

性难以维持，最终形成了制约开采效率的根本性力学机制 [1]。

（二）矿体形态产状剧烈变化导致的采矿方法适应性不足与损失贫化异常

采矿方法的确定通常以矿体赋存条件相对稳定为基本预设，然而在复杂地质条件下，矿体的厚度、倾角及走向常沿其走向和倾向发生无规律的急剧变化，导致预定的采场结构参数和回采工艺难以持续适配。当矿体在短距离内由厚大变薄、由缓倾斜过渡为急倾斜时，原本合理的凿岩巷道布置、爆破自由面选择及出矿方式随之失效，采切工程难以准确控制矿岩边界。这种不适应的情况直接造成两方面的后果：一是为了尽量回收矿石而被迫超挖围岩，大量的废石混入进来致使矿石的贫化率明显地升高；二是在矿体急剧变薄或者尖灭的地方，受到采场最小作业宽度的限制，部分工业矿体被迫放弃，造成矿石的损失 [2]。损失和贫化异常地增高，不仅削弱了资源回收的水平，还让后续的提升、运输以及选矿环节承担没有效果的负荷，干扰了采场正常的回采节奏和整体的生产效率。

（三）裂隙水渗透与爆破动载叠加条件下凿岩出矿效率的衰减规律

裂隙水渗透与爆破动载的叠加作用，使凿岩出矿效率的衰减呈现出明显的复合效应。裂隙水沿着岩体结构面渗透进去之后，炮孔孔壁的稳定性明显地降低了，成孔的过程当中容易发生塌孔、缩径的情况，导致装药作业受到阻碍，爆破能量因为耦合条件变差而衰减，大块率随之升高，二次破碎的工作量增加。同时，水的润滑和孔隙压力效应削弱了爆破应力波的传播效率，爆破漏斗的体积缩小，实际崩矿量常常低于设计的值。在出矿的环节，渗水让崩落矿石的含水率升高，粉矿粘结的情况加剧，溜井以及出矿巷道的放矿口频繁地出现结拱堵塞的情况，铲运设备在泥化的底板上行走的效率也大幅度地下降 [3]。爆破振动进一步引发裂隙扩展和渗透通道贯通，形成渗流加剧和岩体弱化的循环。上面所说的这些因素相互交织在一起，让采场的循环周期变长，连续作业的能力受到损害，最终导致综合出矿效率持续地降低。

二、以效率提升为目标的采矿工艺结构与参数协同优化

（一）适应产状多变的采场结构参数与回采顺序的动态匹配设计

针对矿体产状沿走向和倾向频繁变化的特点，采场结构参数及回采顺序不能继续沿用全矿统一的固定模式，而需建立分区分段的动态匹配机制。在矿体厚度及倾角急剧变化的区段，不宜强求规则的采场跨度和分段高度，应依据每两到三个采场范围内相对稳定的产状要素，灵活确定进路间距、矿柱尺寸及底部结构形式。回采顺序的选定同样必须要与应力转移路径以及结构面展布相适应，对于产状变化转折的部位，优先安排卸压回采或者充填跟进，避免形成应力集中三角区。相邻采场必须保持合理的空间错距，使采动应力在三维空间内有序释放，防止产状突变处的扰动诱发边帮滑移 [4]。整个参数以及顺序的调整过程，必须要以采场揭露的实时地质信息作为依据，在保证回采安全的前提之下，最大限度地降低边界矿石的损失以及废石的混入，维持采场生产能力的相对均衡。

（二）基于低扰动控制的节理化岩体凿岩爆破参数精细化调控

节理化岩体的爆破控制难点在于结构面会阻断爆炸应力波并导致能量逸散，因此参数调控需从单纯追求破碎块度转变为兼顾围岩保护。孔网参数应根据采场不同部位结构面发育程度分区确定：在节理密集区域适当缩小孔间距并降低单孔药量，采用不耦合装药结构延长应力作用时间，使爆炸能均匀作用于孔壁而非沿裂隙集中释放；邻近最终边帮处则需要采用光面爆破或者预裂爆破，通过减小周边孔距以及药径形成光滑的破裂面，最大限度地阻止爆破扰动向外传递。起爆时序方面，可以采用孔间微差或者排间斜线起爆，为后续孔创造充分的自由面，既改善破碎质量又减少对后侧岩体的扰动 [5]。此外，装药结构也应该由连续柱状向分段间隔装药转变，根据岩体节理分布特征在弱面处设置堵塞段，阻止爆生气体沿裂隙过早泄漏。上述精细化调控措施环环相扣，最终在保证落矿效果的同时有效降低爆破对采场稳定性的损害。

（三）落矿、运搬与空区处理等关联工序的衔接瓶颈消除与流程连续化

落矿、运搬及空区处理构成采场循环的连锁工序，任一环节的阻滞都会向后传导至后续环节，从而拉长整体回采周期。落矿之后崩落矿石如果不能及时运出，凿岩作业就无法进场，而运搬效率受到出矿口通过能力以及铲装设备运距的双重制约，需要使溜井与出矿横巷间距同爆破循环进度相匹配。空区处理的时机也必须要精确协同：滞后的话悬顶面积扩大，危及安全；超前的话充填体强度不足，难以承载。可行措施是在出矿末段并行安排废石回填或者隔离挡墙构筑，压缩充填所占用的独立时段，让三项工序紧凑衔接，缩短采场循环周期 [6]。

（四）工艺参数协同优化的系统整合

上述采场结构动态匹配、爆破参数精细化及工序衔接连续化三项措施并非孤立叠加，而是以围岩稳定与出矿效率为约束条件的系统整合。各参数间的耦合关系需在采场推进中反复校验，避免局部调整引发新的不平衡。

三、优化方案的现场实证与高效采矿长效保障机制

（一）典型采场工业试验中的产能、采切比与单位矿石生产成本对比评测

为检验方案优化后的实效，必须针对典型采场开展工业试验，评测的核心指标为采场产能、采切比及单位矿石生产成本。选取试验采场时，应覆盖矿体产状变化最剧烈及裂隙水最发育的区段，使其条件与前期问题识别的典型场景相对应。进行产能对比的时候，要以采场月均出矿量以及凿岩台车台班效率作为主要的依据，去观察工序衔接优化之后循环周期缩短的实际幅度情况。对采切比进行测算的时候，则要重点去计量因为结构参数进行动态调整从而减少的无效采准工程和增加的边界追索工程量之

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

间的消长关系，以此来评判采切工程投入的集约程度。单位矿石生产成本的构成包含了爆破材料、支护消耗、动力能耗以及设备折旧，通过和试验之前相同条件之下的历史数据进行同期对比，把矿价波动等外部干扰因素剔除掉，明确成本变化的净额以及它的结构来源。对三项指标进行交叉分析，能够有效地判定优化方案在现场的适应性以及经济合理性，为后续进行规模推广提供可靠的数据方面的支撑[7]。

（二）基于微震、变形与品位等多源信息联动的工艺参数动态反馈调整

工艺优化无法通过一次性调整就一劳永逸，必须建立基于采场实时响应的动态反馈与调整机制。这个机制要以微震事件的空间聚集和能量释放速率、围岩收敛变形曲线的异常拐点以及出矿品位和设计品位的偏差这三类信息作为核心判据。当微震监测显示某一区段事件密度和能级持续上升，并且位移监测同步捕捉到变形加速的时候，就表明该部位应力集中程度加剧了，需要及时对回采顺序进行调整或者缩小爆破规模，让采动应力向外围转移。品位信息的反馈则直接指向边界矿石的损失以及废石混入的动态变化，当出矿品位连续多个循环低于边界品位时，必须追溯凿岩爆破参数与出矿方式的匹配偏差，相应地收紧孔网参数或者改为分装分运[8]。三条信息链相互印证，共同构成采场状态的判断依据，使工艺参数调整从经验判断转变为基于监测响应的精准控制，从而在保证安全的前提下持续维持较高的回采效率[9]。

（三）适用于复杂地质条件的采矿技术标准提炼与持续优化闭环构建

为长期巩固优化成果，需将经工业试验验证的有效做法提炼为适用于复杂地质条件的采矿技术标准。标准内容应该涵盖分区分级的采场结构参数选取准则、不同节理发育程度所对应的凿岩爆破参数建议区间，以及基于监测信息触发工艺调整的阈值和响应流程。在此基础之上，建立“执行—监测—评估—修订”的持续优化闭环：每次采场回采结束之后，把实际揭露的地质条件、监测数据和工艺参数进行对照复盘，识别标准条文的适用边界以及偏差原因，定期对技术标准进行修订[10]。由此，工艺优化不再是一次性的技术攻关，而是转化成为和矿床条件同步演进的动态修正过程，让采矿效率持续适应复杂地质变化。

结论：综上所述，针对复杂地质条件下地下铁矿损失贫化大、效率低的难题，揭示了构造应力场与结构面耦合作用下采场失稳中断、矿体产状多变导致的适应性不足以及裂隙水与爆破动载叠加效率衰减的制约机理。通过采场结构参数与回采顺序动态匹配、低扰动精细化爆破及消除落矿－运搬－空区处理衔接瓶颈，实现了工艺协同优化。工业试验证实，产能提高，采切比与单位矿石生产成本下降。在此基础上，建立融合微震、变形与品位信息的动态反馈调整机制，提炼技术标准并形成持续优化闭环，为复杂地质条件地下铁矿高效开采提供可靠保障。

参考文献

[1] 肖政 . 关于铁矿采矿工艺技术探索 [J]. 冶金管理 ,2023,40(2):4-33.

[2] 徐源 . 中关铁矿诱导冒落嗣后充填采矿方法及其应用研究 [J]. 采矿与安全工程学报 ,2022,39(3):456-462.

[3] 杨勇 , 肖小高 . 探究新形势下铁矿开采中的采矿技术 [J]. 冶金管理 ,2022,40(3):14-66.

[4] 李昊 . 疆锋铁矿 460m 采区急倾斜中厚矿体采矿方法优选研究 [J]. 矿业研究与开发 ,2023,43(5):78-83.

[5] 魏西刚 . 关于铁矿采矿工艺技术的探索 [J]. 居舍 ,2023,40(2):7-32.

[6] 李明杰 . 白云铁矿露天转地下开采研究 [J]. 金属矿山 ,2023,52(7):112-118.

[7] 滕永波 . 地下金属矿山绿色产业链模式构建与应用研究——以安徽徐楼铁矿为例 [J]. 中国矿业 ,2024,33(4):201-208.

[8] 陈尚波 . 复杂条件下空区诱发的岩移及顶板冒落效应研究 [J]. 岩土力学 ,2024,45(2):567-574.

[9] 朱靖 , 肖小高 . 利源公司德利铁矿无间柱连续采矿工艺的试验研究 [J]. 采矿技术 ,2024,40(6):22-95.

[10] 胡道喜 . 急倾斜下盘软破铁矿体采矿方法优化研究 [J]. 采矿与安全工程学报 ,2024,41(1):89-95.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.