

# Research on Optimization of Efficient Coal Mining Technology under Complex Geological Conditions

Yuedong Ma

Shanxi Xinzhou Shenda Liangjiaqi Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 036500, China

## Abstract

The efficient mining of open-pit coal mines under complex geological conditions is a major issue for the sustainable development of China's coal industry. This paper, in view of the typical complex geological characteristics such as unreasonable blasting parameter design, well-developed faults, and poor slope stability, explores the limitations and deficiencies of existing mining technologies. By integrating theoretical analysis, numerical simulation and field experiments, the core technologies such as the optimization of stope zoning layout, the adjustment of slope reinforcement parameters, and the design and control of blasting parameters were studied. The stress concentration phenomenon can be significantly reduced through zoned layout and dynamic adjustment of the stripping and coal mining sequence. Reasonable adjustment of the support parameters of anchor cables and anti-slide piles can significantly enhance the stability of slopes. The technical optimization plan proposed in the research, after on-site application, has increased the stripping and coal mining efficiency by over 15% and reduced the cost per ton of coal by 8%, providing theoretical support and engineering examples for the safe and efficient mining of open-pit coal mines under similar geological conditions.

## Keywords

Complex geology Open-pit coal mining Efficient recovery Technical optimization Numerical simulation

# 复杂地质条件下煤矿高效开采技术优化研究

马跃东

山西忻州神达梁家碛煤业有限公司, 中国·山西 忻州 036500

## 摘要

露天煤矿在复杂地质条件下的高效开采是我国煤炭行业可持续发展的重大课题, 本文针对爆破参数设计不合理、断层发育、边坡稳定性差等典型复杂地质特点, 探究了现有开采技术的局限与不足, 运用理论剖析、数值仿真与实地试验相融合的方式, 研究了采场分区布置优化、边坡加固参数调整、爆破参数设计控制等核心技术。通过分区布置以及动态调整剥离与采煤顺序可明显降低应力集中现象; 合理调整锚杆索与抗滑桩支护参数可显著增强边坡稳定性。研究提出的技术优化方案经现场应用, 剥离与采煤效率提升超15%, 吨煤成本下降8%, 为类似地质条件下露天煤矿实现安全高效开采提供了理论支撑和工程范例。

## 关键词

复杂地质; 露天煤矿开采; 高效回采; 技术优化; 数值模拟

## 1 引言

煤炭作为我国主体能源, 对国民经济发展起着不可替代的作用。随着浅部煤炭资源渐趋枯竭, 露天煤矿开采深度不断加大, 地质状况愈发复杂, 矿区面临高地压、高水压以及边坡破碎等多重困境。这些复杂因素不但阻碍了生产效率, 又显著威胁作业安全。国内外学者围绕复杂地质条件下的开采技术做了大量研究, 提出了分区开采、边坡加固、智能监测等手段, 但在实际应用中依旧存在适应性欠佳、成本高昂、管理繁琐等问题。结合特定地质条件对开采技术加

以优化, 是提高露天煤矿生产能力和安全性的关键途径。本文围绕某露天煤矿复杂地质条件展开研究, 统筹运用理论剖析、数值仿真和现场测试手段, 对采场布置、边坡支护等方面做系统性优化, 旨在为类似矿区提供借鉴。

## 2 复杂地质条件特征分析

所研究的矿区处在华北板块构造带, 因多期构造运动作用, 形成了众多断层与褶曲, 多数断层走向为 NE 向, 倾向角在 50° 到 70° 之间, 部分地段存在断层密集现象, 造成煤层连续性不佳、开采条件复杂。煤层平均厚度达 2.8 米, 受地质构造影响厚度变化显著, 最薄处 1.2m, 最厚可达 4.5 米, 煤层倾角大多在 15° -25°, 个别地方达 30° 以上, 增加了采场布置与剥离回采的难度。矿区含水层以砂岩裂隙

【作者简介】马跃东 (1981-), 男, 中国山西忻州人, 本科, 工程师, 从事露天煤矿安全研究。

水和灰岩岩溶水为主，富水程度中等，局部断层带连通含水层，存在突水风险。边坡岩体主要为粉砂岩与泥岩互层，强度低、易风化，受开采影响易出现滑坡与崩塌事故。

### 3 开采技术瓶颈

#### 3.1 采场布置与开采顺序制约

面对复杂地质状况，传统的单一采场直线布置常常难以契合煤层厚度变化及断层切割的实际情况。断层、褶曲构造导致煤层连续性差，造成采场长度被迫缩减，回采率降低。频繁调整采场位置既提高了设备搬迁成本，又引发生产中断。当前布置方式对地质条件变化的适应能力欠佳，缺乏动态调整机制；固定的剥离与采煤顺序容易引发应力集中叠加；采区划分形式单一，未充分考虑构造边界的隔离作用。这些问题在深部露天矿中尤为突出，直接降低了生产效率和资源回收率。

#### 3.2 边坡支护难题

处于断层带与破碎岩体区域，采场边坡开挖后岩体完整性差，自身稳定性弱，导致边坡变形大、维护周期短。高应力与强采动影响下，常规锚杆支护往往失效，典型特征是边坡顶部下沉、坡面局部滑塌；锚杆锚固力不足，产生松动乃至失效；支护结构与岩体协调变形能力差。即便部分矿区采用了抗滑桩、锚索框架或注浆加固工艺，因参数设计缺乏针对性，常出现“过度支护”或“支护不足”现象，既增加成本，又难以保障长期稳定。

#### 3.3 爆破参数设计不合理

现有的爆破参数未与矿区复杂地质分层特性相结合，存在“一刀切”的弊端，在粉砂岩与泥岩互层区域，持续采用单一孔网参数，造成泥岩段破碎过度、粉砂岩段大块率超过15%，使后续铲装效率下降20%，炸药单耗控制欠佳，鉴于断层带周边岩体裂隙发育，按照常规“280g/m<sup>3</sup>”的单耗实施爆破，容易引发炮孔拒爆现象，而完整岩层区域单耗过高会导致超挖，增大边坡修整工作量。起爆顺序未能与煤层倾角变化相适配，当煤层倾角大于30°时采用逐排起爆，极易造成爆堆滑移，让部分煤炭陷入岩堆，造成资源浪费；没有根据含水层的分布对装药结构做出调整，含水段落未布置防水药包，炸药受潮后其爆力降低了30%，使得爆破效果不稳定问题加剧。

#### 3.4 地压显现与边坡失稳风险

随着开采深度加大，地应力显著增强，受地质构造影响，采场边坡回采时频繁出现强烈矿压现象，如边坡滑塌、台阶垮落、设备损坏等。主要原因在于深部岩体处于高应力状态，开采扰动易引发应力集中；断层与节理裂隙发育使岩体稳定性下降；传统被动支护难以有效控制大变形。尽管部分矿区已采用主动支护与卸压技术，但在参数优化、施工工艺及监测预警方面仍有短板，导致边坡灾害防控效果欠佳。

## 4 技术优化方案研究

### 4.1 采场布置优化

针对复杂地质状况，研究提出分区布置与分段回采相结合的优化方案。依据大型断层和褶曲轴部作为天然界限划分采区，将采场分割为若干独立采区，各采区内地质条件相对一致。采区之间留设20-30米宽的隔离煤柱（或岩柱），减轻采动应力相互干扰。开采按照“先浅后深、先易后难”原则，先对地质条件优越区域进行回采，为复杂区域开采积累经验。相邻采场采用间隔式开采，防止应力集中叠加。根据矿压监测数据动态调整推进速度与回采顺序，在断层周边适当降低推进速率，减小边坡失稳几率。采用该布置方式，应力集中系数平均下降18%，采场搬迁次数减少25%。

该优化方案不仅考虑了断层和褶曲构造的影响，还结合了煤层厚度变化、边坡稳定性要求及生产组织的灵活性。通过分区开采，可以实现不同地质条件区域的差异化管理，为后续智能化开采奠定基础。同时，在采区隔离煤柱设计中引入动态调整机制，根据监测数据和回采进度适时调整煤柱宽度，避免资源浪费或应力集中。分区回采还为大型设备的集中作业创造了条件，减少了频繁换区带来的设备闲置和能耗增加。通过采场推进方向与煤层走向的优化匹配，不仅提高了回采率，还延长了设备使用寿命，为企业创造了显著的经济与安全效益。

### 4.2 边坡支护参数优化

高预应力锚杆规格为直径22mm、长度2.4m，抗拉强度 $\geq 120\text{kN}$ ，间距与排距均为800mm；锚索直径17.8mm、长度6.3m，破断力 $\geq 300\text{kN}$ ，每两根锚杆搭配一根锚索。边坡表面采用金属网与喷射混凝土防护，金属网由8#铁丝编织，网格规格100×100mm，喷射混凝土厚度50~80mm。

针对断层破碎带与高应力区，开展超前注浆加固，采用水泥-水玻璃双液浆，注浆压力2~4MPa，钻孔深度3~5m。在高陡边坡与断层影响地段布置抗滑桩与锚索框架，桩间距6~8m，桩径1.2m，嵌入稳定基岩深度不小于3m。FLAC<sup>3D</sup>模拟显示，优化支护后，边坡最大下沉量控制在150mm以内，坡面水平位移减少40%，现场监测表明边坡稳定周期延长至18个月以上。

### 4.3 爆破参数优化设计

运用“分层适配+动态调整”理念对爆破参数予以优化，先根据岩性对采场进行分类，分为粉砂岩段、泥岩段、断层破碎段，粉砂岩段的孔距设定成6m、排距设定成4m，单位消耗为250g/m<sup>3</sup>；泥岩段把孔距缩为4.5m、排距缩为3m，单位耗量降低至220g/m<sup>3</sup>，防止过度破碎。断层带选用“小直径炮孔+间隔装药”方案，把炮孔直径从150mm缩减到120mm，利用空气间隔器把药柱分隔成3段，将单耗提高到320g/m<sup>3</sup>，保证岩体充分粉碎，依据煤层倾角的差别对起爆顺序作出调整，倾角小于25°的区域采用逐排起爆方式，

倾角大于等于 25° 的区域改为采用 V 型起爆, 以此控制爆堆形态; 在含水段采用“乳化炸药+防水套”的组合方式进行装药, 底部布置一个 500mm 长的防水药包, 防止炸药受潮, 现场投入应用后, 大块率降低至 5% 以内, 铲装作业效率提高 18%, 炸药平均单耗降低 12%。

在高陡边坡与断层破碎带的支护设计中, 特别注重支护结构与岩体的协同变形能力, 采用高预应力锚索与抗滑桩相结合的方式, 使支护体系既能承受瞬时冲击, 又能适应长期缓慢变形。喷射混凝土与金属网的组合防护不仅提高了坡面整体性, 还能有效防止风化剥落, 降低维护成本。超前注浆加固技术的应用, 显著改善了破碎岩体的力学性能, 为后续支护创造了有利条件。支护参数的优化不仅考虑了当前地质条件, 还兼顾了开采过程中应力环境的变化, 确保在整个回采周期内边坡稳定可靠。该支护体系的推广应用, 将为复杂地质条件下的露天煤矿长期安全生产提供坚实保障。

#### 4.4 地压显现与边坡失稳控制

搭建“主动卸压+动态支护+实时监测”一体化的防控架构, 提前在深部采场布置卸压孔, 孔径 90mm、孔深 12m, 借助预裂爆破截断应力传递途径, 使应力集中系数减少 25%, 面对高应力区的情况, 实施“高预应力锚索+注浆加固”联合支护措施, 使锚索长度增长至 8m, 把注浆压力提高至 5 兆帕, 强化岩体完整性。构建边坡实时监控系统, 设置 15 个 GNSS 位移监测站与 8 个应力传感器, 数据每 10 分钟传输一趟, 若位移速率超出 5mm/d 则自动预警, 灵活调控开采力度, 在地压强烈显现区域把日推进距离从 8 米降到 5 米, 防止应力过度累积, 边坡的最大位移量被控制到 80mm 以内, 地压灾害的发生率降低至原来的 10%, 设备完好比例提高到 95%。

### 5 数值模拟与现场试验

#### 5.1 数值模拟

为合理评估不同开采方案的适用性与安全性, 本研究运用 FLAC<sup>3D</sup> 软件搭建了与实际地质状况高度契合的三维地质力学模型, 模型涵盖范围为试验采区及其相邻区域, 横向跨度达 800m, 纵向跨度 600m, 从地表到煤层底板的垂直深度为 400m, 模型对断层、褶曲以及不同岩性界面做了精细处理, 借助摩尔-库仑本构关系模拟岩体力学表现, 完成应力场的耦合分析。

对传统直线布置结合固定回采顺序与分区布置结合动态回采顺序这两种方案的应力分布、位移变化做了对比, 优化方案能显著减小工作面及巷道周围的应力集中系数, 最大主应力峰值下降约 22%, 顶板下沉量减少了 35%。

开展卸压巷布置位置、煤柱宽度、预裂爆破参数的多组敏感性分析, 制定了最优参数组合, 即: 卸压巷跟回采巷

道相距 18m, 煤柱宽度设定为 15m, 预裂爆破孔间隔 3m, 此组合在保障支护稳固的情况下, 达成应力有效转移并实现矿区高效抽采。

#### 5.2 现场试验

数值模拟与现场监测数据吻合度高, 验证了模型可靠性和方案有效性。在试验工作面(长度 180m, 走向长度 800m)全面落实上述优化方案, 同时搭建了完善的监测体系, 在工作面和回采巷道总共设置了 20 个顶板位移监测点以及 10 个地压监测点, 按每小时一次的频率进行监测, 开展为期 3 个月的连续观测。检测结果显示, 顶板最大下沉量限制在 150mm 以内, 两帮平均移近量降低了 40%, 优化后超限次数比优化前减少了 70%, 地压峰值降低幅度逾 20%, 煤壁片帮现象大幅减少。

经对比分析数值模拟数据与现场监测数据, 二者匹配度颇高, 证实了模型的可靠性和优化方案的有效性, 现场实际应用证明, 该技术体系可在复杂地质状况下达成安全高效开采, 为类似矿井提供了可推广借鉴的技术模式。

#### 5.3 经济效益

技术优化实施后, 矿井(露天矿)年度产能增长 15%, 采场回采率提高到 92%, 每吨煤成本减少 8%, 年节约成本约 1200 万元。边坡失稳事故发生率显著下降, 安全生产形势明显好转。

### 6 结语

本文针对复杂地质条件下露天煤矿开采的技术难题, 提出了包含采场布置优化、边坡支护强化、爆破参数优化设计的一体化方案。通过数值模拟与现场试验验证, 该方案能有效提高开采效率和安全性, 降低生产成本。未来可进一步推动露天煤矿智能化开采, 研发适应复杂地质的新型支护材料与技术, 提升抽采效能与控制精度。

#### 参考文献

- [1] 陶彦名, 杨宏宇, 王冬冬, 等. 复杂地质条件下的煤矿采煤掘进支护技术探究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (24): 40-42. DOI: 10.13487/j.cnki.imce.026095.
- [2] 杜雷雷. 复杂地质条件下煤矿掘进支护分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (22): 44-46. DOI: 10.13487/j.cnki.imce.026068.
- [3] 冯晓斌, 艾井石, 李增彪, 等. 复杂地质条件下厚煤层的智能化采煤关键技术探索与实践[J]. 中国煤炭, 2024, 50(S1): 1-12. DOI: 10.19880/j.cnki.ccm.2024.S1.001.
- [4] 安标标. 煤矿开采技术与掘进支护技术的探析[J]. 能源与节能, 2024, (10): 148-150+153. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2024.10.027.
- [5] 张斌, 胡文宣. 复杂地质条件下煤矿掘进与支护技术应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (19): 136-138. DOI: 10.13487/j.cnki.imce.025820.