

Study on Longwall Mining Technology of Coal Mine under Complex Geological Conditions

Luo Dongdong Feng Qiang

Shaanxi Xihan Xinglong Coal Mine Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 715400, China

Abstract

China's coal mining has entered a phase of deepening and complexity, where intricate geological conditions demand higher safety and efficiency standards for longwall mining. Traditional techniques face limitations in roof control and surrounding rock stability due to faults, stress concentrations, and roof-and-floor structures. This study focuses on coal seam group mining under complex geological conditions, integrating theoretical analysis, numerical simulation, and engineering validation to establish a technical framework centered on "geological modeling—dynamic monitoring—coordinated control." By optimizing support parameters, improving roadway layouts, and implementing intelligent roof management, the system achieves precise control in fault zones and high-stress areas. Results demonstrate that this framework significantly reduces mining-induced risks, enhances roof stability and resource recovery rates, and provides scientific support for safe and efficient mining in complex geological environments.

Keywords

complex geological conditions; longwall mining; roof control; ground stress distribution; roadway layout

复杂地质条件下煤矿走向长壁开采技术研究

罗冬冬 冯强

陕西西韩兴隆煤矿有限公司, 中国·陕西 渭南 715400

摘要

我国煤炭开采进入深部化、复杂化阶段, 复杂地质条件对走向长壁开采的安全与效率提出更高要求。受断层、应力集中及顶底板结构影响, 传统工艺在顶板控制和围岩稳定方面存在不足。本文以复杂地质条件下的煤层群开采为研究对象, 综合理论分析、数值模拟与工程验证, 构建以“地质建模—动态监测—协同控制”为核心的技术体系。通过支护参数优化、巷道布置改进与智能化顶板管理, 实现对断层区、高应力区的精准控制。研究结果表明, 该体系能显著降低采动风险, 提升顶板稳定性与资源回收率, 为复杂地质条件下安全高效开采提供科学支撑。

关键词

复杂地质条件; 走向长壁开采; 顶板控制; 地应力分布; 巷道布置

1 引言

随着煤矿开采深度的持续增加, 煤层赋存条件由简单转向复杂, 地质构造的不确定性、岩层力学性质的变化及地应力的不均匀分布对采掘安全与生产效率构成严峻挑战。在复杂地质条件下, 煤层厚度变化、断层交错及水文地质异常现象频发, 传统走向长壁开采工艺在顶板控制、巷道稳定及支架布置方面的适应性明显不足。研究复杂地质条件下的走向长壁开采技术, 旨在突破传统经验式设计局限, 实现“精准探测—科学设计—动态控制”的系统化开采模式。

近年来, 国内外学者对复杂地质环境中的长壁开采进行了广泛研究, 提出了地质构造数值模拟、应力场优化与围岩加固等多项技术。然而, 受制于现场条件复杂性及岩体非

线性特征, 现有研究仍存在理论与实践脱节的问题。民用高精度监测设备与智能控制系统的引入, 为长壁采煤提供了新的技术路径。本文在分析复杂地质条件特征及其对采场稳定性影响的基础上, 构建适应复杂地质环境的走向长壁开采技术体系, 探讨围岩稳定控制、顶板管理与支护系统优化的综合机制, 为煤矿深部安全开采提供可行性方案。

2 复杂地质条件下走向长壁开采的地质特征与工程影响

2.1 复杂地质构造的典型类型与分布规律

复杂地质构造主要表现为断层发育密集、褶皱变形强烈、岩性变化频繁及含水层分布不均等特征。这些构造使煤层厚度、倾角与连续性发生突变, 破坏了原有应力场的稳定性。断层不仅改变应力传递路径, 还形成应力集中区与低应力释放区交替分布的复杂结构。褶皱构造导致煤层走向曲折不规则, 局部区域出现煤层分岔与夹矸现象, 给采场布置与

【作者简介】罗冬冬(1983-), 男, 中国陕西咸阳人, 助理工程师, 从事煤矿开采技术研究。

通风系统带来显著困难。不同岩层组合使顶底板力学性质差异增大，在采动过程中易产生层间滑移与离层破坏。对深部矿井而言，高地应力环境与软弱围岩的耦合作用使片帮、底鼓及顶板冒落等动力灾害风险明显提升，成为制约长壁开采稳定性的关键因素。

2.2 地应力与围岩力学特性的不均衡性

复杂地质条件下的地应力分布具有高度的不均匀性与时变特征。断层、陷落柱及褶皱区域的应力集中系数普遍高于1.8倍，且主应力方向受构造控制与采动扰动的共同影响，易与巷道布置方向产生偏差，导致应力叠加效应显著。煤岩体的非均质性与各向异性使得应力传递呈现非线性规律，局部岩层在拉剪耦合作用下裂隙扩展路径复杂，顶板易形成不规则破坏区。围岩强度差异导致变形不协调，支护体系若未与地应力场匹配，极易产生局部失稳和支架倾覆。特别是在深部高应力环境中，应力释放速率快、扰动能量集中，若未采用分区支护与柔性控制措施，顶板塌落及巷道破坏将显著增加，影响采场整体稳定。

2.3 复杂地质环境对采场稳定性的影响机理

在断层与褶皱共同作用区域，煤层走向与开采方向偏差使得采动应力重分布更加复杂，采场前方高应力集中区形成提前，顶板受弯曲与剪切耦合作用显著增强。地质扰动导致关键层的力学特性变化，当关键层厚度超过临界值时，易形成悬臂梁状结构，其突然破断将引发能量集中释放，造成冲击地压与大范围冒顶。含水层渗透削弱了顶板岩层粘聚力，使破裂带向上扩展，加剧了围岩失稳。数值模拟与现场监测表明，复杂地质条件下的采场稳定性受多因素耦合作用控制，应力分布呈周期性波动特征。只有通过动态监测系统实现应力场实时反演，并结合分区支护与自适应控制策略，才能有效减缓地质扰动对采场稳定性的破坏，实现走向长壁开采的安全高效运行。

3 复杂地质条件下走向长壁开采的关键技术难点

3.1 顶板控制的高风险与不确定性

复杂地质条件下的厚煤层顶板结构具有显著的不均质性和空间变异性。不同岩层的厚度与力学性质差异较大，层间结合面弱、裂隙发育，易在采动扰动后形成分层离层与块体滑落。顶板受力状态随工作面推进呈动态演化特征，既存在张拉破断型失稳，也存在剪切滑移型破坏。局部岩体受集中应力作用，易形成高能储集区，一旦应力释放，可能导致突发性冒顶事故。传统锚网支护方式因承载范围有限、约束力不足，在高应力区难以形成有效的承载拱结构。支架工作阻力波动剧烈，常出现局部超载或欠载现象，造成顶板离层量增加与稳定性削弱。研究表明，顶板结构破坏的不确定性主要源于岩层物性差异与应力分布非均匀性，这要求支护系统具备动态响应与能量缓释功能，以实现复杂顶板的精准

控制与稳定维护 [1]。

3.2 巷道围岩的变形与破坏控制

在复杂地质条件下，巷道围岩变形破坏机制具有明显的时效性与区域差异性。构造应力与采动应力的叠加作用使围岩应力集中系数显著提高，形成高应力变形带。软弱岩层的塑性流动与蠕变特征导致围岩变形呈持续发展态势，传统支护体系在长期服役过程中刚度衰减明显，难以保持承载能力。部分煤层顶底板由泥岩或粉砂岩组成，含水性强、抗剪强度低，遇水软化后支护效果急剧下降，巷道收敛率上升至2%~3%，严重影响通风与运输安全。研究表明，采用柔性可让支护与主动加固相结合的控制技术，能有效延缓围岩变形发展，提高围岩与支护系统的协同性，从而实现巷道的长周期稳定控制。

3.3 地质扰动对采煤工艺的制约

复杂地质构造对走向长壁开采技术的实施带来显著约束。断层、陷落柱与含水层的不确定分布增加了采掘作业的风险。断层活动会引起煤岩体位移与错动，影响采煤机运行轨迹和液压支架稳定，严重时会导致支架倾覆或采机卡阻事故。含水层渗透形成的突水隐患增加防治水工程复杂性，尤其在断层破碎带与褶皱发育区，水文地质条件的不确定性更大。褶皱结构导致煤层倾角频繁变化，使得采场推进方向难以保持稳定，通风系统与运输线路需随时调整，增加了生产调度的复杂性与能耗负担。地质扰动不仅改变了煤体的完整性，也导致顶板受力与破坏模式的动态变化，需在采掘工艺上引入自适应控制与实时监测机制，以实现“感知—响应—调控”一体化的智能开采体系 [2]。

4 走向长壁开采的优化设计与控制策略

4.1 地质信息建模与采场布局优化

在复杂地质条件下的煤矿开采中，精细化地质建模是实现科学决策的前提。通过综合应用地质雷达、三维地震勘探及钻孔测量数据，可建立多源融合的三维地质信息模型，实现地层分布、断层结构与构造应力场的可视化表达。结合FLAC3D与UDEC数值模拟技术，对不同采掘方向、推进速度与布置参数下的应力分布规律进行动态演化分析。研究表明，当工作面走向与主应力方向夹角控制在15°以内时，集中应力区范围可缩小约30%，顶板应力梯度显著降低。基于模拟结果对采区布局进行优化，使工作面避开断层与高应力集中带，从根本上减少地质构造对采动稳定性的影响。

4.2 分区支护与柔性控制技术

厚煤层采动过程中，围岩结构差异显著，单一支护形式难以兼顾各区段稳定性。为此，提出基于地质分区特征的差异化支护策略。在高应力集中区采用高强度锚索与让压支架联合支护，形成主动约束与被动承载的协同体系；在软弱围岩与断层带区，则引入可伸缩性高分子注浆材料与高预应

力锚杆,构建具备可控变形能力的柔性支护结构。支护体系中设置能量吸收与缓冲装置,使其在冲击荷载作用下可实现应变协调与能量耗散,避免刚性支护引发的局部断裂失稳。分区控制理念有效实现了“刚柔并济”的受力调节,使支护结构能够适应不同围岩的变形特征与应力状态,显著提升端头与采空区围岩的整体稳定性与寿命周期。

4.3 顶板管理的智能化与动态调控

针对厚煤层开采中顶板离层与动态载荷频发的问题,构建基于智能感知的顶板动态监测与调控系统。系统通过无线传感网络与分布式光纤传感器实时采集支架压力、顶板离层量与围岩微震信号等多维数据,利用机器学习与大数据分析技术建立顶板稳定性预测模型。模型可依据历史数据与当前应力状态,自动判断风险等级并生成最优支护策略,实现顶板支护参数的动态调整。通过智能控制平台对液压支架执行自适应调节,使工作阻力与顶板载荷保持实时平衡。工程应用结果显示,采用该系统后顶板下沉速率降低约35%,冒顶概率下降40%以上[3]。

5 典型工程应用与效果验证

5.1 工程背景与实施方案

研究选取西部某典型厚煤层矿区作为工程实例,该区域地质结构复杂,断层密集、煤层倾角变化显著,属典型的复杂构造型矿区。为提高资源回收率与顶板控制效果,采用基于三维地质建模的采场优化设计方法,对地质参数进行精细刻画与空间拟合。工作面布置为走向长壁布采,采宽250 m、推进长度1600 m,以保证回采稳定性与通风条件均衡。支护系统采用高阻力液压支架与高强度锚索联合支护方案,实现“刚柔并济”的力学协同。同时,在关键区域布设分布式光纤传感网络,实时监测围岩应力、顶板位移与支架载荷变化,形成集监测、反馈与控制于一体的动态管理体系。该方案充分考虑了地质非均质性与采动扰动规律,为复杂矿区长壁开采提供了系统化技术支撑[4]。

5.2 监测结果与技术验证

现场监测与数值模拟结果表明,优化采场设计后,工作面前方集中应力峰值较原方案降低约30%,顶板最大下沉量减少40%,围岩塑性区宽度由3.8 m减小至2.1 m。液压支架工作阻力分布更加均匀,压力波动幅度下降35%,系统自动调节响应时间缩短至0.8 s。断层带区域顶板稳定性明显提升,未出现大面积冒顶与片帮现象。通过分布式光

纤监测数据与三维数值模拟结果对比分析,误差控制在5%以内,验证了模型参数与现场实测的高度一致性。优化后的支护系统在多轮采动周期中保持稳定运行,表明该技术体系能够有效实现复杂地质条件下的顶板控制与动态支护匹配。

5.3 经济与安全效益分析

技术应用结果显示,工作面采煤回收率提升5.6%,有效减少资源浪费;巷道维护与支护更换成本降低约25%,设备运行周期延长至原来的1.5倍。由于支护稳定性增强,生产中断次数明显减少,单位工时产量提升约18%。安全方面,顶板事故率下降超过60%,作业区人员暴露时间缩短,安全系数显著提高。系统运行的经济与社会效益双重显现,不仅提升了矿区的智能化水平,也为后续矿山群的复制推广提供了实践样本[5]。研究表明,基于数字监测与智能控制的走向长壁开采技术在复杂地质条件下具备显著的适应性与推广价值,可为我国深部厚煤层安全高效开采提供参考范式。

6 结语

复杂地质条件下的煤矿开采已成为现代采矿工程的主要挑战之一。本文通过对地质特征、应力分布与围岩响应的系统分析,提出了以地质建模、分区支护与智能控制为核心的走向长壁开采综合技术体系。研究表明,该体系在顶板控制、巷道稳定与采场安全方面均取得显著效果,实现了从被动防护向主动控制的转变。未来应进一步融合人工智能、数字孪生与物联网技术,构建智能感知与动态决策一体化的矿山开采平台。通过多学科交叉研究与工程实践验证,可推动煤矿安全生产向高效、智能与绿色方向发展,为我国煤炭资源的可持续开采提供科学支撑与技术保障。

参考文献

- [1] 郭文兵,赵高博,白二虎.煤矿高强度长壁开采覆岩破坏充分采动及其判据[J].煤炭学报,2020,45(11):3657-3666.
- [2] 李凡.长壁开采上覆多年冻土层破断规律研究[D].西安科技大学,2020.
- [3] 高小明,急倾斜高瓦斯特厚煤层走向长壁综采放顶煤技术.甘肃省,甘肃靖远煤电股份有限公司宝积山煤矿,2012-09-08.
- [4] 石磊.急倾斜中厚煤层走向长壁仰斜开采方法在桃山煤矿的应用[J].煤,2010,19(05):34+36.
- [5] 武曰权.走向长壁钢丝绳锯采煤法在越南冒溪煤矿急倾斜薄煤层的应用[J].内蒙古煤炭经济,2016,(13):84-85.