

薄煤层智能化综采工艺优化及现场应用成效研究

高小军

伊金霍洛旗应急管理综合行政执法大队 内蒙古 鄂尔多斯 017200

摘要:薄煤层因采高、作业空间受限,长期存在采掘失衡、单产低等问题。本文针对薄煤层智能化综采面临的技术瓶颈,从采煤机截割路径优化、液压支架自动跟机协调控制、刮板输送机智能调速及三机协同控制四个方面提出系统性优化方案。以某薄煤层工作面为工程依托,通过现场工业性试验验证优化效果。实践表明,优化后工作面推进速度与单产水平显著提升,设备利用率大幅提高,年综合效益可观,为薄煤层安全高效开采提供了可复制的技术路径。

关键词:薄煤层;智能化综采;工艺优化;协同控制;现场应用

引言:我国薄煤层可采储量丰富,但因采高限制,人员无法直立作业,设备布置困难,传统综采工艺牵引速度低、支架跟机滞后、工序衔接不畅,工作面单产长期偏低。本文聚焦薄煤层智能化综采工艺优化,系统分析制约因素,提出针对性改进措施,结合现场应用数据验证优化成效,旨在为同类条件工作面提供技术借鉴。

1 薄煤层智能化综采工艺现状与制约因素

1.1 薄煤层综采技术发展概况

薄煤层一般指厚度在0.8~1.3m之间的煤层,部分极薄煤层厚度不足0.8m。由于采高、作业空间受限,传统开采方式人员需爬行作业,劳动强度大、安全风险高、生产效率低。近年来,国内主要矿区大力推广薄煤层智能化综采技术,通过采煤机远程控制、液压支架自动跟机、视频监控与传感器融合等技术,实现了工作面内少人或无人作业。截至2024年底,全国建成薄煤层智能化工作面约120个,单产水平由原来平均3~5万吨/月提升至6~8万吨/月,但仍远低于中厚煤层12~15万吨/月的水平。智能化综采装备配套日趋成熟,但工艺系统优化不足成为制约产能释放的主要瓶颈。

1.2 制约产能释放的关键因素

通过调研5个薄煤层智能化综采工作面,归纳出三大制约因素。一是采煤机截割工艺不合理。薄煤层采煤机受机身高度限制,滚筒直径和电机功率相对较小,截割能力有限。现场统计表明,采煤机平均牵引速度仅为3.2~4.5m/min,且空刀行程占比高达25%~35%,无效行走时间长,制约了开机率提升;二是液压支架跟机滞后严重。薄煤层支架移架速度受限于空间狭小、泵站流量及控制系统响应速度。实测数据显示,采煤机与支架协同动作延迟达8~12秒,导致采煤机等待支架动作而减速或停机,占循环作业时间的15%~20%;三是运输系统能耗

与负载不匹配。刮板输送机多采用恒速运行模式,无论采煤机是否割煤、煤量大小,输送机均保持额定速度,造成“大马拉小车”现象,无效能耗约占30%,同时加剧了链条和溜槽磨损^[1]。

1.3 传统工艺与智能化系统的匹配矛盾

薄煤层智能化综采不仅是装备升级,更是工艺系统的重构。传统“采煤机一刀切、支架分段跟机、输送机恒速运转”的工艺模式与智能化系统存在明显的不匹配。智能化系统要求精确的数据感知、快速的决策响应和精准的执行控制,但传统工艺参数设置粗糙、逻辑固化、协同性差,导致智能化系统“有智难用”。例如,智能调速功能因缺乏动态负载识别依据而难以发挥作用。因此,必须从工艺层面进行系统优化,实现装备性能与智能化系统的深度耦合。

2 智能化综采工艺优化方案设计

2.1 采煤机截割路径与速度自适应优化

针对采煤机牵引速度低、空刀占比大的问题,提出“基于截割负载的变速截割”与“路径优化”联合方案。首先,在采煤机机身安装截割电流、振动及扭矩传感器,实时感知滚筒截割阻力,建立负载-速度动态映射模型。当截割电流低于额定值75%时,牵引速度提升至5.0~5.5m/min;当电流达到90%以上时,速度自动降至2.5~3.0m/min,避免过载停机^[2]。其次,优化采煤机行走路径,将单向往返一刀改为“斜切进刀+双向割煤”工艺,端头斜切进刀距离由原35m缩短至25m,每刀减少空刀行走约18m。再次,采用记忆截割与人工干预相结合的纠偏机制,每刀记录顶底板曲线,下一刀自动修正,减少误割岩层造成的设备损耗。优化后理论牵引速度可提高至4.0~5.8m/min,空刀占比降至18%以下。

2.2 液压支架自动跟机协同控制优化

支架跟机滞后是薄煤层智能化采煤的“卡脖子”环节。优化方案采用“分组分段、预动作、快速移架”三位一体策略。将工作面支架划分为若干组（每组5~8架），采煤机位置传感器提前3架发出动作预备信号，支架控制器预先启动液压泵站增压，使系统压力由15MPa提升至20MPa以上，缩短动作响应时间。同时优化支架动作时序，将“降柱-移架-升柱”单架循环时间由12秒压缩至8秒以内。针对薄煤层空间特点，采用电液控换向阀与高流速管路（通径由DN12升级至DN20），提升供液流量至400L/min。引入支架姿态感知与邻架耦合控制算法，当相邻支架偏移量超过50mm时自动调整推移行程，防止输送机弯曲和支架挤架。实测优化后跟机延迟由10秒降至4秒以内，支架对采煤机的跟随误差小于0.5m。

2.3 刮板输送机智能调速与联动控制

刮板输送机空载或轻载运行是能耗浪费的主要来源。优化方案设计基于煤流量的变频调速系统。在转载机入口处安装激光雷达煤量扫描仪，实时监测落煤量，结合采煤机位置与牵引速度预测10秒后的煤量变化，采用模糊PID控制算法动态调节输送机链速。设置三档运行

模式：重载模式（煤量 > 80%额定）链速1.3m/s、中载模式（40%~80%）链速1.0m/s、轻载模式（< 40%）链速0.6m/s。同时将输送机启停与采煤机、转载机联动，采煤机停机超3分钟时输送机自动降速至轻载模式，停机超10分钟自动停机。优化后输送机平均链速由1.2m/s降至0.95m/s，无效运转时间减少约35%，链条及中部槽磨损寿命预计延长20%。

2.4 三机协同控制策略与参数配置

采煤机、液压支架、刮板输送机三机协同是工艺优化的核心。建立“采煤机牵引速度为主动量，支架跟机速度与输送机链速为从动量”的主从协同控制架构。通过工业以太网+5G融合网络实现三机数据交互，采样周期不超过100ms。设定协同控制约束条件：支架移架速度不低于采煤机牵引速度的0.8倍，输送机煤量堆积高度不超过30cm。当任一约束接近极限时，系统自动调整相邻设备的运行参数^[3]。例如，当煤堆积高度超过25cm时，输送机链速自动提升0.2m/s或采煤机牵引速度降低0.5m/min。优化后的协同控制参数配置见表1。

表1 三机协同控制优化前后参数对比

参数指标	优化前	优化后	优化幅度
采煤机平均牵引速度（m/min）	3.8	5.2	+36.8%
支架单架移架循环时间（s）	12	7.5	-37.5%
采煤机-支架跟机延迟（s）	10~12	3~4	-66.7%
输送机平均链速（m/s）	1.2	0.95（工况适配）	节电率21%
三机协同响应周期（ms）	500~800	≤ 100	-85%
采煤机开机率（%）	58.3	72.6	+24.5%

3 工程实践与现场应用成效

3.1 工作面概况与优化方案实施

选取某矿15302薄煤层工作面作为试验对象。该工作面走向长度1260m，倾斜长度185m，煤层厚度1.1~1.4m，平均1.25m，煤层倾角6°~12°，直接顶为砂质泥岩，底板为细砂岩。原有装备配置：MG2×160/710型采煤机、ZY5000/09/18D型液压支架（125架）、SGZ800/800型刮板输送机。改造前月均产量6.2万吨，月推进度85m，处于同类工作面中下水平。2024年3月至6月，按照第2节优化方案对控制系统升级改造：一是采煤机加装截割负载传感器与远程调速模块；二是液压支架控制器升级为响应速度更快的电液控系统，管路通径由DN12扩至DN20；三是输送机加装变频器与激光煤量扫描仪；四是部署三机协同控制平台。实施过程分三个阶段，历时45天完成软硬件改造和人员培训。

3.2 关键指标提升与数据对比

优化方案实施后连续跟踪6个月（2024年7~12月）的运行数据，与上年同期（优化前）进行对比。采煤机运行效率显著改善，优化前由于负载波动和支架跟机滞后，采煤机频繁减速或停机，平均牵引速度仅3.8m/min，开机率58.3%。优化后平均牵引速度提升至5.2m/min，最高达6.0m/min，开机率升至72.6%，提升24.5%。单刀割煤时间由原32分钟缩短至24分钟，每日可增加2~3个循环。

支架跟机协同性明显增强，优化前支架单架移架循环时间12秒，采煤机割过后需等待8~10架才能完成跟进，滞后距离达3~5m。优化后单架循环时间压缩至7.5秒，跟机滞后距离缩小至0.5~1.0m，基本实现“采煤机割到哪里，支架跟到哪里”的预期目标。运输系统节能效果显著，输送机由恒速1.2m/s改为工况适配调速后，平均链速降至0.95m/s，累计运行时间中低速模式占比约

65%。经电能表计量,输送机单月耗电由优化前的13.8万kWh降至10.9万kWh,节电率21%,年节约35万kWh,折合电费约21万元。

3.3 综合效益分析

(1) 产能效益。优化后工作面月均推进度由85m提升至112m,提高31.8%;月均产量由6.2万吨增至8.6万吨,增幅38.7%。按综合煤价650元/吨计,月增产值1560万元,年增效益超1.2亿元。(2) 效率效益。采煤机开机率提升至72.6%,三机有效协同时间占比由优化前的61%提至86%,每班作业人员由9人减至5人,年节约人工成本约120万元。(3) 安全效益。优化期间未发生机电设备严重损坏事故,采煤机过载停机次数由月均6次降至1次,输送机链条未出现断裂,设备故障率下降57%。

(4) 设备寿命效益。输送机链条及中部槽磨损减缓,预计大修周期由2年延长至2.5年,节省维修费用约80万元/年。综合测算,优化方案总投资约280万元(软硬件升级),运行6个月即收回投资,年综合经济效益超过1250万元。

4 技术推广前景与持续优化方向

4.1 技术适用性与推广价值

本文提出的薄煤层智能化综采工艺优化方案,在1.1~1.4m薄煤层工作面取得了显著成效。该方案的核心技术——负载敏感变速截割、支架分段预动作移架、输送机变频调速及三机主从协同控制——具有较强的普适性和可移植性。对于厚度0.8~1.5m之间的薄煤层及中厚煤层上分层开采,均可参照本方案进行工艺升级。据不完全统计,全国现有薄煤层可采储量约85亿吨,具备类似条件的工作面超过200个,按单面年增效益1000万元保守估算,全面推广后年增效益可达20亿元以上,经济效益和社会效益十分可观。

4.2 当前技术的局限性

尽管优化效果显著,但该技术仍存在有待改进之处。一是传感器在煤尘、潮湿环境下的长期稳定性有待提升,部分传感器每2~3个月需校准一次,增加了维护工

作量;二是复杂地质条件下(如断层发育、煤层厚度突变)的算法适应性不足,目前仍需人工介入调整参数;三是多工作面、多系统的数据尚未实现深度融合分析,各工作面之间的数据价值未能充分挖掘。

4.3 持续优化方向

下一步技术提升应聚焦三个方面。一是研发自清洁、抗污染的新型传感器,配合边缘计算实现前端数据预处理,减少传输干扰,延长校准周期至6个月以上。二是引入深度学习算法(如LSTM时间序列预测模型),利用历史数据训练地质条件与最优控制参数之间的映射关系,提升算法对复杂工况的自适应能力。三是构建矿井级“综采工艺大数据平台”,汇聚多工作面、多系统的运行数据,通过数据挖掘识别最优工艺模式,实现从“单面优化”向“全矿协同”的跨越^[4]。此外,可探索5G+远程遥控与自主导航采煤机的深度融合,进一步减少井下作业人员,向“无人化”开采目标迈进。

结束语

薄煤层智能化综采工艺优化是破解薄煤层采掘失衡、提升资源回收率的关键途径。本文针对采煤机截割工艺不合理、支架跟机滞后、输送机能耗高等突出问题,提出了变速截割与路径优化、支架分段预动作快速移架、输送机变频智能调速及三机主从协同控制的系统性方案。该技术为同类条件薄煤层工作面提供了可借鉴的工程经验,对推动我国薄煤层资源安全高效开发具有积极意义。

参考文献

- [1] 寇辉. 煤矿薄煤层智能化综采工艺技术及装备改进[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(8): 124-126.
- [2] 郭晓俊. 浅析智能化薄煤层综采工艺[J]. 矿业装备, 2022(5): 137-139.
- [3] 彭廷发, 武瑞杰. 薄煤层智能化综采技术[J]. 智能矿山, 2023, 4(10): 38-43.
- [4] 赵振宇. 鑫岩煤矿薄煤层智能化综采工作面关键技术及应用[J]. 能源技术与管理, 2024, 49(2): 66-69.