

煤矿综采工作面智能化开采

张 涛 张一亮

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司枣泉煤矿 宁夏 银川 750001

摘 要：结合煤矿行业转型升级，提升综采工作面开采效率与安全水平，本文对智能化开采技术展开研究。阐述智能化开采“感知-决策-执行”闭环系统的概念内涵与核心特征，分析其技术支撑基础。从自动化控制、智能分析决策、实时监控、高效协同四方面剖析技术优势，重点研究采煤机智能化、液压支架智能化、工作面智能协同及井下无人化辅助等关键技术，为煤矿综采工作面智能化升级提供技术参考与实践依据。

关键词：煤矿；综采工作面；智能化开采；技术优势；关键技术

引言：当前煤矿面临复杂开采条件与安全生产的双重挑战，传统综采工作面依赖人工操作，存在效率低、风险高、资源回收率不足等问题，难以满足现代开采需求。随着信息技术与采矿工程的深度融合，智能化开采成为行业转型升级的核心方向。其通过多源感知、精准定位、数据融合与自动控制等技术，构建全流程自动化作业模式，打破传统开采时空限制。本文针对煤矿综采工作面智能化开采技术，系统分析其概念特征、技术优势与关键技术体系，旨在为解决传统开采痛点、实现煤矿安全高效绿色开采提供可行路径与技术支撑。

1 煤矿综采工作面智能化开采技术基础

1.1 智能化开采的概念与内涵

煤矿综采工作面智能化开采是指通过融合现代信息技术与采矿工程技术，实现综采全流程的自动化、精准化与协同化作业模式。其核心是利用技术手段替代传统人工操作，构建“感知-决策-执行”闭环系统，在适应复杂开采条件的同时降低安全风险与资源消耗。该技术体系打破了传统开采的时空限制，通过数字化手段实现井下工况的远程掌控与动态优化，是煤矿行业转型升级的核心方向。

1.2 智能化开采的核心特征

智能化开采具备三大核心特征：一是高度自动化，通过记忆截割、自动移架等技术实现采煤机、液压支架等设备的自主协同作业，减少人工干预；二是精准化管控，依托多源传感器与定位技术，实现煤层厚度识别、工作面直线度控制等关键参数的毫米级调控；三是可视化协同，利用数字孪生与三维组态技术构建井下场景虚拟映射，支持设备状态实时监测与异常工况快速响应，形成全流程透明化管理体系。

1.3 技术支撑基础

智能化开采的实现依赖四大关键技术支撑：首先是

智能感知技术，部署振动、温度、瓦斯等多类型传感器阵列，以秒级频率采集设备与环境数据，构建感知网络；其次是精准定位技术，融合惯性导航与5G通信，实现采煤机三维坐标实时监测与工作面动态找直；再者是数据融合算法，通过神经网络与多源数据处理模型，完成开采参数优化与故障特征识别；最后是自动化控制技术，基于可编程逻辑控制器（PLC）、分布式控制系统（DCS）系统实现设备群控与冗余容错，保障恶劣工况下的连续稳定运行，四大技术协同构成智能化开采的技术底座^[1]。

2 煤矿综采工作面智能化开采的技术优势

2.1 自动化控制提升作业精度

智能化开采系统通过高精度感知与闭环控制技术，实现了综采设备操作精度的革命性提升。在采煤机作业环节，激光雷达与惯性测量单元（IMU）融合的煤岩界面识别技术，结合三维激光同步定位与地图构建（SLAM）系统动态扫描生成的点云数据，能够实时捕捉煤层厚度变化，将滚筒截割高度误差控制在 $\pm 3\text{cm}$ 范围内，有效避免了传统人工操作中因视觉判断偏差导致的顶煤残留或底板割岩问题，资源回收率较传统开采模式提升2%-3%。液压支架群组采用分布式协同控制架构，通过一致性协议与全位姿坐标变换模型，确保多台支架在跟机移架过程中保持毫秒级同步精度，支护力均衡性显著提升，支架间动作响应延迟控制在50ms以内，既避免了局部顶板支护不足的风险，又减少了支架间的碰撞损耗，设备故障率大幅降低。带式输送机智能调速系统则基于实时煤流量反馈，通过多目标优化算法动态调整输送带速度，在匹配开采节奏的同时，使空载能耗大幅降低，实现了精度与能效的双重优化。这种全流程自动化控制依托跨系统全时空感知体系，实时整合采煤机位置、支架压力、输送机负载等多源数据，不仅消除了人工操作

的波动性,更使综采作业从“经验依赖”转向“数据驱动”,作业稳定性与资源回收率得到同步提升。

2.2 智能分析优化决策科学性

智能分析系统通过多源数据融合与深度学习算法,为综采工作面决策提供了科学依据。系统整合了地质探测数据、设备运行参数、环境监测信息等多维度数据流,运用卡尔曼滤波与神经网络算法消除噪声干扰,生成高置信度的工况特征向量。在开采参数优化方面,强化学习与模型预测控制(MPC)结合的自适应算法,能够动态调整采煤机牵引速度与滚筒转速,实现回采率与能耗的帕累托最优。设备故障预测模型基于长短期记忆神经(LSTM)网络,通过分析振动、温度等设备状态数据,可精确计算关键部件的剩余使用寿命(RUL),将故障排查从“事后维修”转变为“事前预警”。三维地质建模算法则通过点云数据处理与地质统计学反演,构建煤层夹矸分布的数字化孪生模型,为开采路径规划提供直观的可视化支撑。这种数据驱动的决策模式,使综采生产能够根据地质条件与设备状态实时调整策略,避免了传统固定参数开采导致的资源浪费或效率损失^[2]。

2.3 实时监控强化安全保障

实时监控体系通过多传感网络与快速响应机制,构建了综采工作面的立体化安全屏障。环境监测层面,分布式光纤传感网络与低功耗广域网络(LPWAN)部署的传感器节点,能够连续采集井下温度、瓦斯浓度、粉尘含量等参数,冗余设计确保了数据传输的可靠性,当检测到瓦斯超限等异常情况时,应急联动控制单元可在200ms内触发设备急停与通风系统联动。设备监控方面,集成振动、压力传感技术的状态监测系统,对采煤机、刮板输送机等关键设备进行全生命周期监测,提前捕捉轴承磨损、齿轮啮合异常等潜在故障,避免机械失效引发的安全事故。智能视频监控系统基于深度学习算法,对工作面场景进行实时分析,识别准确率超95%,可自动检测人员违规进入危险区域、设备异常工况等情况,并联动声光报警装置。这种“感知-分析-响应”的闭环监控模式,将安全管理从“被动应对”升级为“主动防控”,大幅降低了井下作业风险^[3]。

2.4 高效协同降本增效

智能化开采系统通过设备协同与流程优化,实现了综采工作面的降本增效与少人化作业。在设备协同层面,构建了“采煤机-支架-输送机”三机联动控制体系,通过工艺驱动引擎调度各设备自动化工序,支持连续割煤、自动加减刀等特殊工艺的多模式管理,避免了传统生产中设备启停不同步导致的生产中断。数字孪生技术

的应用则实现了虚实融合的生产管控,通过融合地质数据、设备运行数据与生产工艺数据,可在虚拟环境中进行开采仿真与工艺优化,减少实体试验带来的成本损耗。远程运维体系采用云-边-端三层架构,地面运维中心可实时监测井下设备状态,实现远程故障诊断与配件管理,将设备维护响应时间缩短。少人化作业模式通过顺槽监控中心或地面分控中心的远程操控,大幅减少井下作业人员数量,既降低了人工成本,又规避了井下复杂环境对人员健康的潜在影响。数据显示,智能化工作面单日产能较传统模式提升30%以上,综合运营成本降低显著,实现了生产效率与经济效益的协同增长。

3 煤矿综采工作面智能化开采关键技术

3.1 采煤机智能化技术

采煤机智能化技术是综采工作面自动化开采的核心,着重解决自主定位、工况自适应调整及割煤路径优化三大关键问题。在定位与导航方面,主流运用红外检测与多传感器融合技术。将红外发射器安装在采煤机机身,定时向液压支架立柱上的红外接收器发送信号,通过解析确定支架编号,实现动态位置跟踪。不过,井下剧烈振动易使单一红外检测出现定位漂移,因此需融合惯性测量单元(IMU)与激光雷达构建复合定位体系。IMU可实时捕捉采煤机姿态变化与运动轨迹,激光雷达能动态扫描环境特征,再结合透尘成像技术应对高粉尘干扰。经算法融合数据后,可补偿振动误差,提升定位稳定性,为设备协同提供精准位置基准。工况感知与自适应控制同样关键。在截割部、牵引部等关键部位布设多类型传感器阵列,构建工况感知体系。系统检测到截割阻力异常时,控制器会启动自适应调节,调整牵引速度与滚筒截割高度,避免设备过载损坏。针对煤层赋存条件变化,利用激光扫描提前探测煤岩界面轮廓,结合三维地质模型动态生成最优割煤路径,实现“记忆割煤+自动修正”精准开采。该模式能灵活应对复杂工况,减少顶煤残留与底板割岩,提升资源回收效率,降低人工干预频次,推动综采作业从经验依赖向数据驱动转变,保障工作面连续稳定高效生产^[4]。

3.2 液压支架智能化技术

液压支架智能化技术以电液控制系统为核心,通过感知-决策-执行闭环控制,实现支架与采煤机的协同动作及顶板的主动支护。其技术体系主要包括自动跟机移架、压力自适应控制及工作面调直三大功能。自动跟机移架基于采煤机位置信息,预设移架距离(支架与采煤机最小间隔架数)与移架范围(可动作支架数量),当采煤机行进时,前方支架自动收护帮板,后方支架

按“降架-移架-升架-伸护帮板”流程动作,通常采煤机速度达10m/min时,前方收护帮板超前架数设定为20-25架,确保无干涉运行。压力监测与自适应支护依赖高精度压力传感器实现,传感器安装于支架立柱下腔(承载腔),采用高温烧结硅应变技术,测量量程0-60MPa或0-100MPa,精度达 $\pm 1\%$,能实时将乳化液压力转换为4-20mA标准电信号。控制器根据压力数据判断顶板载荷变化,当低于初撑力时自动补压,超载时发出预警,预防冒顶事故。此外,位移传感器(测量范围0-1200mm,精度3mm)与倾角传感器协同工作,通过LASC技术或激光传感器实现工作面自动调直,确保支架与刮板输送机排列整齐,避免因弯曲度超标导致设备损坏。

3.3 工作面智能协同技术

工作面智能协同技术通过构建统一控制平台,实现采煤机、液压支架、刮板输送机等设备的信息交互与动作联动,打破“单机自动化”瓶颈。其核心是多设备数据融合与协同决策系统:井下主控计算机作为枢纽,通过以太网接收各设备控制器上传的工况数据(如采煤机位置、支架压力、输送机转速),经分析后下发协同控制指令。当刮板输送机负载超限,系统自动降低采煤机牵引速度,同时调整支架推移千斤顶动作节奏,平衡整个工作面的生产流量。数字孪生技术为协同控制提供可视化支撑,通过三维激光SLAM系统构建工作面数字模型。采用半固态激光雷达(MEMS)与IMU紧耦合方案(FAST-LIO2算法),沿工作面动态扫描生成点云数据,每隔5-10m布设高对比度标靶球校准坐标,实现厘米级定位与环境建模。数字模型实时映射设备位置与状态,操作人员可远程监控并优化作业参数,当模拟预测到设备干涉风险时,提前调整动作时序,提升系统运行稳定性^[5]。

3.4 井下无人化辅助技术

井下无人化辅助技术聚焦于工作面周边环节的自动化,减少人员进入危险区域的频率,主要包括巡检机器人、无人运输及环境监测三大类。巡检机器人搭载激光雷达、摄像头与IMU,采用SLAM技术实现自主导航,沿

巷道完成设备状态检测(如螺栓松动、管路泄漏)与环境参数采集(温度、瓦斯浓度),其非重复扫描激光雷达可随积分时间提升点云密度,增强对细小故障的感知能力。无人运输系统通过磁导航或视觉导航技术,实现材料车与矸石车的自主行驶,车辆控制器与工作面协同平台通信,根据生产进度自动调度运输任务。环境监测网络由分布在巷道各处的传感器组成,实时传输瓦斯、粉尘、温湿度数据,当检测到异常时,联动通风系统调整风量,并触发机器人前往排查。此外,人员定位系统采用超宽带技术(UWB)或射频识别技术(RFID),对进入井下的少数人员进行实时追踪,确保其远离危险作业区域,形成“设备无人化+人员精简化”的安全作业模式。

结束语:煤矿综采工作面智能化开采技术是实现煤炭行业高质量发展的关键环节,本文通过对其技术体系的全面研究,展现了自动化、精准化、协同化作业的显著优势。从核心特征到关键技术的剖析,验证了该技术在提升开采精度、优化决策、强化安全及降本增效等方面的重要作用。未来,需进一步深化数据融合算法与数字孪生技术的应用,攻克复杂地质条件下的自适应开采难题。相信随着技术的持续创新与实践推广,智能化开采将全面取代传统模式,引领煤矿行业迈向更安全、高效、绿色的发展新阶段。

参考文献

- [1]许宝.对煤矿综采工作面智能化开采技术的应用分析[J].当代化工研究,2022(2): 108-110.
- [2]陈玉峰.煤矿综采工作面智能化开采技术发展应用及分析[J].内蒙古煤炭经济,2022(17):51-53.
- [3]赵佳磊,赵晓举,刘照辉.煤矿综采智能化工作面关键技术研究[J].科技与创新,2021(10):100-101.
- [4]韩锐.煤矿综采智能化工作面关键技术研究[J].矿业装备,2021(5):168-169.
- [5]詹召伟.煤矿综采工作面智能化开采关键技术和发展方向[J].能源与节能,2023(01):82-86.