

煤矿采矿工作面智能化安全管理方法研究

苏欣 刘志强

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 煤矿采矿工作面地质条件复杂,传统安全管理痛点突出,智能化转型需求迫切。本文构建了“感知层-传输层-数据层-应用层-决策层”五层智能化安全管理方法体系,阐述多源异构数据融合、基于数字孪生的风险预测等关键技术,设计人机协同机制,并介绍隐患监测、识别、预警处置及人员与现场管控等智能化应用场景,为煤矿工作面安全管理提供新思路。

关键词: 煤矿智能化;工作面安全管理;数字孪生

引言: 煤矿采矿工作面作为核心作业场景,安全风险高,顶板、瓦斯、透水等事故频发,传统“人工巡检+经验判断”的管理模式存在监测手段单一、管理效率低等诸多痛点。随着开采深度增加,安全管控难度加大,加之行业人员老龄化、政策要求等因素,煤矿工作面安全管理向智能化转型迫在眉睫,本文将对此展开研究。

1 煤矿工作面安全风险因素

1.1 典型事故机理与诱因

煤矿工作面作为采矿作业的核心场景,地质条件复杂、作业环境恶劣,典型事故主要包括顶板事故、瓦斯爆炸、透水事故及机电伤害等,其发生具有明确的机理与多重诱因。顶板事故多因围岩稳定性差、支护强度不足或支护不及时,导致顶板垮落伤人,常见诱因包括地质构造突变、采掘扰动叠加及支护工艺不合理;瓦斯爆炸源于瓦斯积聚浓度达到爆炸极限,遇火源引发,主要诱因有通风系统失效、瓦斯监测不到位、违规动火作业等;透水事故多因水文地质探查不彻底,揭露承压水层或导水断层,诱因包括探放水措施落实不到位、防水设施损坏等;机电伤害则多由设备老化、违规操作、防护装置缺失导致^[1]。另外,作业人员安全意识薄弱、操作不规范,以及极端作业环境下的人为误判,也是各类事故发生的重要叠加诱因,多种因素相互作用,显著提升了事故发生概率与危害程度。

1.2 传统安全管理痛点

煤矿工作面传统安全管理以“人工巡检+经验判断”为主,存在诸多问题,难以适应复杂作业环境。监测手段单一,依赖人工现场检查,对瓦斯等关键风险参数监测精度低、响应慢,易漏检误检,无法早发现、早预警风险;管理效率低,安全数据分散,缺乏统一整合分析,数据共享不畅,管理层难全面掌握安全态势,决策滞后;风险管控被动,多为“事后整改”,预判潜在风

险能力不足;人员管控难,作业人员多且流动性强,人工考勤和监管难杜绝违规操作,安全培训效果不一,违规作业屡禁不止;应急处置不规范,缺乏科学支撑,事故后易处置不当、响应不及时,导致事故扩大。

1.3 智能化转型需求

煤矿开采深度增加,工作面地质条件更复杂,安全风险管控难度上升,传统模式难满足安全生产需求,智能化转型成必然。现有安全监测等手段滞后,隐患难及时排查治理,需智能化技术实现精准监测、提前预判与快速处置,降低事故概率;煤矿行业老龄化加剧,专业技术人员短缺,人工操作风险隐患大,需智能化设备替代繁重作业,减少误判与违规操作,提升管理稳定性;国家政策要求推进煤矿智能化建设,煤矿企业自身高质量发展需求,也推动工作面安全管理向智能化、精细化、高效化转型。

2 智能化安全管理方法体系构建

2.1 总体架构设计

煤矿工作面智能化安全管理方法体系总体架构遵循“数据驱动、智能赋能、人机协同、全程管控”的核心原则,构建“感知层-传输层-数据层-应用层-决策层”五层架构,各层级有机衔接、协同联动,实现安全管理全流程智能化。感知层作为体系基础,部署瓦斯传感器、顶板压力监测仪、水文监测设备、人员定位终端等多类型感知设备,全面采集工作面地质参数、设备运行状态、人员作业信息等各类安全相关数据,实现数据全方位、无死角采集;传输层采用5G、工业以太网、光纤通信等混合传输技术,构建高速、稳定、可靠的数据传输通道,确保各类感知数据实时、准确传输至数据层;数据层负责对多源异构数据进行整合、清洗、存储与标准化处理,建立统一的安全管理数据库,为上层应用提供数据支撑;应用层基于数据层支撑,开发隐患监测、识

别、预警、处置及人员管控等智能化应用模块，实现安全管理各项业务的智能化运行；决策层通过智能分析模型对应用层数据进行深度挖掘，结合专家经验，为安全决策、应急处置提供科学依据，形成“感知-传输-分析-决策-处置”的闭环管理体系。

2.2 关键技术实现

2.2.1 多源异构数据融合

多源异构数据融合技术是智能化安全管理体系的核心支撑，主要解决煤矿工作面各类安全数据来源分散、格式不一、关联性差等问题，实现数据的高效整合与价值挖掘。工作面安全相关数据涵盖地质勘探数据、实时监测数据、设备运行数据、人员作业数据、历史事故数据等，数据类型包括结构化数据、半结构化数据与非结构化数据，存在格式差异大、数据质量参差不齐等特点。通过采用数据清洗、标准化处理技术，对各类原始数据进行去噪、补全、格式转换，消除数据冗余与误差；运用联邦学习、深度学习等融合算法，建立多源数据融合模型，挖掘不同类型数据之间的内在关联，实现地质参数、监测数据、人员信息等数据的深度融合^[2]。融合后的数据能够全面、准确反映工作面安全态势，打破数据孤岛，为后续风险预测、智能决策提供统一、高质量的数据支撑，提升安全管理的精准度与有效性。

2.2.2 基于数字孪生的风险预测

基于数字孪生的风险预测技术，通过构建煤矿工作面数字孪生体，实现物理工作面与虚拟工作面的实时映射，进而完成安全风险的精准预测与提前防控。首先，依托地质勘探数据、三维建模技术，构建包含工作面地质构造、支护结构、设备布局、作业环境等要素的虚拟数字孪生模型，确保虚拟模型与物理工作面的几何形状、物理属性、运行状态高度一致；其次，通过感知层实时采集物理工作面的各类数据，同步更新至数字孪生模型，实现虚拟模型与物理工作面的动态联动、实时同步；最后，基于数字孪生模型，结合深度学习、大数据分析等算法，模拟不同地质条件、作业场景下的安全风险演化过程，对顶板垮落、瓦斯积聚、透水等潜在风险进行精准预测，明确风险等级、影响范围及发生概率，并提前输出预警信息与防控建议，为风险防控提供科学依据，实现从“被动应对”向“主动防控”的转变。

2.2.3 智能决策与应急管控

智能决策与应急管控技术，是智能化安全管理体系的核心应用，旨在实现安全风险的精准决策与突发事件的快速处置。基于多源异构数据融合结果与数字孪生风险预测结论，构建智能决策模型，结合煤矿安全生产规

章制度、专家经验，针对不同类型、不同等级的安全风险，自动生成科学的防控方案、整改措施及作业指导建议，为管理层提供精准的决策支撑，避免人工决策的主观性与滞后性。针对突发安全事故，构建智能化应急管控体系，实现事故的快速识别、分级预警、应急调度与全程管控，自动启动对应等级的应急预案，调度应急物资、应急人员及救援设备，实时监测事故处置过程，动态调整处置方案，确保事故得到快速、有效控制，最大限度减少人员伤亡与财产损失，提升应急处置的效率与科学性。

2.3 人机协同机制设计

煤矿工作面智能化安全管理并非完全替代人工，而是构建“机器负责精准监测、智能处置，人类负责决策指挥、异常干预”的人机协同机制，实现人机优势互补，提升安全管理效能。机制设计重点明确人与智能化设备的职责分工、协同流程及交互方式，一方面，明确智能化设备的作业范围，依托感知设备、智能处置设备，承担工作面日常巡检、数据采集、常规隐患处置、风险监测预警等重复性、高强度、高风险作业，减少人工在危险环境中的作业频次，降低人员安全风险；另一方面，明确作业人员与管理人员的职责，作业人员负责智能化设备的日常维护、参数调试及异常情况上报，管理人员负责智能决策方案的审核、应急处置的指挥调度及复杂风险的人工干预，充分发挥人类的主观能动性与应急处置经验^[3]。同时，建立人机交互平台，实现人与智能化设备的实时信息互通，作业人员可通过平台查看设备运行状态、风险预警信息及作业指导，管理人员可通过平台调度设备、下达指令，确保人机协同高效、有序，形成“人机协同、优势互补、全程可控”的安全管理格局。

3 煤矿采矿工作面智能化技术在安全管理中的应用场景

3.1 隐患监测智能化场景

隐患监测智能化场景主要应用于煤矿工作面各类安全隐患的实时、精准监测，覆盖瓦斯、顶板、水文、机电、通风等关键风险领域，替代传统人工巡检，提升监测效率与精度。在瓦斯监测方面，部署高精度瓦斯传感器，实时采集工作面不同区域瓦斯浓度数据，通过智能化系统实现数据实时分析，当瓦斯浓度接近预警阈值时，自动发出预警信号，并同步调整通风设备运行参数，确保瓦斯浓度控制在安全范围；在顶板监测方面，安装顶板压力监测仪、位移传感器，实时监测顶板下流量、支护受力情况，精准识别顶板不稳定隐患，提前预

警顶板垮落风险；在水文监测方面，部署水位、水压传感器，实时监测工作面周边含水层水位、水压变化，及时发现透水隐患；在机电与通风监测方面，监测设备运行电流、电压、温度及通风量、风速等参数，及时识别设备老化、通风不足等隐患。整个场景实现监测数据的实时采集、自动分析、精准预警，确保各类隐患早发现、早监测、早管控。

3.2 隐患识别智能化场景

隐患识别智能化场景基于多源异构数据融合与人工智能技术，实现对煤矿工作面各类安全隐患的自动识别、分类分级，解决传统人工识别漏检、误检、效率低等问题。该场景整合工作面感知数据、设备运行数据、历史隐患数据等，通过计算机视觉、深度学习等算法，构建隐患识别模型，能够自动识别各类显性与隐性隐患。在显性隐患识别方面，通过井下摄像头结合图像识别技术，自动识别作业人员未佩戴安全防护用品、违规动火、设备摆放不规范等行为隐患，以及巷道变形、支护损坏、管路泄漏等环境与设备隐患；在隐性隐患识别方面，通过分析瓦斯浓度变化趋势、顶板压力演化规律、水文数据异常波动等，自动识别瓦斯积聚、顶板失稳、潜在透水等隐性隐患。识别完成后，系统自动对隐患进行分类分级，标注隐患位置、严重程度及影响范围，同步推送至相关管理人员，为隐患整改提供精准指引，提升隐患识别的全面性与精准度。

3.3 预警与处置智能化场景

预警与处置智能化场景衔接隐患监测与识别结果，实现安全风险的分级预警、智能调度与快速处置，构建“预警-调度-处置-反馈”的闭环管控流程。基于隐患识别结果与风险预测结论，系统按照隐患严重程度，自动划分一般、较大、重大、特别重大四个预警等级，采用声光报警、短信推送、平台弹窗等多种方式，向作业人员、管理人员同步推送预警信息，明确预警内容、隐患位置及应急处置要求。针对一般隐患，系统自动下达处置指令，由现场作业人员按照指导完成整改，整改完成后上传相关证据，系统自动核验；针对较大及以上隐患，系统自动启动对应等级应急预案，调度应急救援设备、应急人员赶赴现场，实时监测处置过程，动态调整

处置方案，同时上报企业管理层及相关监管部门^[4]。处置完成后，系统自动记录处置过程、整改结果，形成隐患处置档案，为后续风险防控提供参考，提升预警与处置的效率、规范性。

3.4 人员与现场管控智能化场景

人员与现场管控智能化场景聚焦煤矿工作面作业人员管理与现场作业规范管控，通过智能化技术实现人员精准定位、作业行为规范、现场秩序管控，降低人为安全风险。在人员管控方面，为每一位作业人员配备定位终端，结合井下定位系统，实时精准定位作业人员位置、移动轨迹，明确人员在岗情况，当人员进入危险区域、擅自离岗或超时作业时，系统自动发出预警，提醒人员撤离并通知管理人员；通过智能化系统实现人员考勤、安全培训记录、作业资质审核等全流程管理，确保作业人员具备相应的作业资质与安全意识。在现场管控方面，通过井下摄像头、传感器等设备，实时监测工作面作业现场秩序，自动识别违规作业、违章指挥等行为，及时发出警示并纠正；同时实现对作业流程的智能化管控，按照安全作业规范，对采掘、支护、通风等作业环节进行全程监督，确保作业流程符合安全要求，全方位规范现场作业行为，提升现场安全管控水平。

结束语

煤矿采矿工作面智能化安全管理方法体系，借助先进技术与创新机制，实现了从隐患监测到人员管控的全面智能化。多源异构数据融合、数字孪生等技术提升了风险预测与决策科学性，人机协同机制保障了管理效能。该体系有助于降低事故发生率，提升煤矿安全保障能力，推动煤矿行业高质量发展，未来应用前景广阔。

参考文献

- [1]李正西,王磊.煤矿采矿工作面智能化安全管理方法研究[J].内蒙古煤炭经济,2025(12):79-81.
- [2]李大鹏.煤矿采矿工作面智能化安全管理方法研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(12):94-96.
- [3]李陈亮,王燕南.煤矿采矿工作面智能化安全管理方法研究[J].工程管理,2025,6(11):169-171.
- [4]樊丑丑,李晨龙,苏庆港.深部采矿智能化工作面的技术应用与挑战[J].中国金属通报,2025(21):105-107.