

# 基于人工智能的煤矿掘进工作面安全监测预警技术研究

刘宇浩

国家能源集团神东煤炭集团 内蒙古鄂尔多斯 017000

DOI:10.12238/ems.v7i9.15246

**[摘要]** 煤矿掘进工作面安全监测是针对煤矿巷道掘进过程中的安全风险建立的系统性监控技术体系，其核心定义可概括为：通过传感设备网络实时采集掘进区域的环境参数、设备状态及人员行为数据，结合智能分析模型进行风险识别与预警，最终联动控制设备实现主动防护的综合安全保障系统。通过激光甲烷传感器（精度 $\pm 0.5\%CH_4$ ）、微震监测阵列（可捕捉0.01级地震波）、UWB定位终端（精度0.3米）、温震传感器等设备，实时采集瓦斯浓度、地压应力、人员位置、设备状态等数据。结合红外热成像与高清摄像设备，实现井下环境全景感知。

**[关键词]** 人工智能；煤矿掘进工作面；安全监测预警技术；

基于人工智能的煤矿掘进工作面安全监测预警技术已形成覆盖环境感知、风险识别、智能决策和应急联动的技术体系。

## 一、煤矿掘进工作面安全监测定义

1. 核心定义解析。监测对象，环境安全：实时监测瓦斯浓度（T0/T1/T2 甲烷传感器）、一氧化碳、粉尘浓度、风速、地压应力、顶板离层等参数，预防瓦斯爆炸、煤尘自燃、冒顶等事故。设备运行：跟踪掘进机、输送机、局部通风机等设备的工作状态（如振动、温度），提前预警机械故障。人员行为：通过定位系统（UWB）和視頻智能分析，监管人员违规操作（如未戴安全帽、闯入危险区）及离岗行为。技术构成，感知层：激光甲烷传感器（精度 $\pm 0.5\%$ ）、微震监测阵列、红外热像仪、顶板离层仪等设备构成数据采集基础。传输层：工业以太网与无线通信技术实现监测数据实时回传至地面调度中心。决策层：基于灾害演化模型（如冲击地压预警模型）和AI算法（YOLOv5、LSTM），实现风险智能识别与超前预警。安全功能，实时报警：瓦斯浓度超限或设备异常时触发声光报警，并在0.3秒内联动断电、抑爆装置。灾害预测：通过微震数据分析预测冲击地压，提前2-6小时预警；通过顶板离层监测预判冒顶风险。

2. 行业规范依据。人员配置：单班掘进面限员规定，灾害严重矿井严格控员。设备标准：甲烷传感器需搭配高清摄像机双监控，视频存储 $\geq 3$ 个月。数据管理：建立“一矿一策、一面一策”瓦斯治理方案，动态调整监测参数。

## 二、传统煤矿掘进工作面监测方法局限性

1. 技术手段局限性。探测精度与范围不足，超前探测：传统钻探法需向掘进面前方钻孔取芯，探测距离短（单次有效距离通常 $< 50$ 米）、速度慢，且易诱发事故（如钻透灾害性水体）。物探法（如地震反射波法）虽经济高效，但受巷道狭小空间限制，三维数据处理困难，断层定位误差 $> 10$ 米。环境监测：依赖单一甲烷传感器（精度 $\pm 1.0\%CH_4$ ），对瓦斯局部积聚（如上隅角）敏感性低；粉尘浓度多靠人工采样分析，无法实时预警煤尘爆燃风险。主观依赖性强，顶板离层量、地压应力等参数需人工使用离层仪、测力计定期测量，数据采集频率低（日均1~2次），且受人员经验影响，顶板冒落预警滞后性显著。视频监控依赖人工盯屏，夜间疲劳状态下违规行为（如未戴安全帽）漏检率高达15%。

2. 系统协同性与响应缺陷。数据孤岛严重，瓦斯传感器、微震仪等设备独立运行，数据格式不统一（如模拟信号与数字信号混杂），无法整合分析灾害演化关联性。历史数据存储分散，故障案例复用率 $< 10\%$ ，难以建立预测性维护模型。应急联动滞后，甲烷超限报警后需人工确认再断电，响应时间 $> 30$ 秒，远超智能系统0.3秒联动抑爆的速度。缺乏多设备协同机制（如通风机与除尘装置），瓦斯积聚时无法自动调整风量。

## 三、传感器技术在煤矿掘进工作面监测中的应用

1. 环境安全监测。瓦斯浓度监测，激光甲烷传感器：精度达 $\pm 0.5\%CH_4$ ，实时检测掘进头瓦斯积聚（尤其上隅角），

超限时 0.3 秒内联动断电及抑爆装置。红外光谱分析: 结合多维气体传感器 (如 CO、O<sub>2</sub>), 预防煤尘爆燃与窒息风险。地压与顶板稳定, 微震监测阵列: 捕捉 0.01 级震动波, 预判冲击地压风险, 定位断层误差 < 5 米。顶板离层仪: 监测离层量, 深基点锚入稳定岩层 (≥ 1.5 倍巷道宽), 冒顶预警提前率提升 40%。粉尘与通风, 激光粉尘传感器: 量程 0-1000mg/m<sup>3</sup>, 超标自动启动喷雾降尘系统, 除尘率 > 95%。风速/风压传感器: 安装于回风口 10-15 米处, 硬连接正对风流, 保障通风效率。

2. 设备与人员监测。设备健康诊断, 振动频谱分析: 检测掘进机轴承裂纹, 故障预警提前 3 个月, 减少非计划停机。红外热成像: 实时监控皮带滚筒温度 (> 80°C 自动停机), 抑制摩擦起火风险。人员行为监管, UWB 定位+电子围栏: 精度 0.3 米, 危险区域滞留超 5 分钟触发声光报警。视频动作识别: 基于 YOLOv5 算法识别未戴安全帽、违规抽烟等行为, 漏检率 < 5%。

3. 多传感器融合与智能联动。数据融合算法, 自适应加权算法整合瓦斯、微震、温度数据, 灰色关联度分析提升安全评估可靠性, 误报率降低 30%。CAN 总线技术统一传输协议, 破解模拟/数字信号混杂难题。应急协同控制, 瓦斯超限→断电→抑爆装置启动全程 ≤ 0.3 秒;

#### 四、煤矿掘进工作面安全监测技术实现

1. 地质透明化技术实现。随掘智能探测, 长距离超前探测: 采用煤矿井下定向钻探技术, 施工近千米水平长钻孔, 对半径 30m、深度 1000m 范围的断层/陷落柱进行超前探测, 生成高精度地质预报剖面图。动态地质建模: 利用采掘机震源激发地震波, 实时监测前方 200 米范围内顶板破碎带、应力集中区动态变化, 地质异常定位误差 < 5 米。

2. 环境参数精准监测。瓦斯粉尘防控, 激光甲烷传感器: 掘进头 5 米内顶板 300mm 处安装, 精度 ± 0.5%CH<sub>4</sub>, 超限 0.3 秒内断电并启动抑爆装置; 粉尘联动治理: 激光粉尘传感器 (量程 0-1000mg/m<sup>3</sup>) 超标时, 自动激活喷雾降尘系统, 除尘率 > 95%。通风与地压监测, 回风口 10-15 米处安装风速传感器, 风量 < 0.25m/s 或 > 4m/s 时报警; 顶板离层仪深基点锚入稳定岩层 (≥ 1.5 倍巷道宽), 离层量超限触发支护强化指令。

3. 设备与人员智能监管。设备健康诊断, 振动频谱分析掘进机轴承裂纹, 预警提前 3 个月; 红外热像仪监控皮带滚筒温度 > 80°C 时自动停机, 抑制摩擦起火。人员行为管控, UWB 定位 (精度 0.3 米)+电子围栏, 危险区域滞留超 5 分钟声光报警; AI 视频分析实时识别未戴安全帽、违规抽烟, 漏检率 < 5%。

4. 系统实施规范, 合规性配置, 甲烷传感器必须搭配高清摄像机双监控, 视频存储 ≥ 3 个月; 双巷掘进需增设中部甲烷传感器 (T1.5), 断电阈值 ≥ 1.5%CH<sub>4</sub>。应用案例, 煤矿: 随掘智测技术精准预报 12 处地质异常, 揭露准确率 97%; 煤矿: 液压支架与刮板输送机协同推进, 开采效率提升 25%。

#### 五、煤矿掘进工作面智能化应用

1. 地质透明化与随掘探测。千米级超前探测, 采用定向钻探技术施工近千米水平钻孔, 探测半径 30 米内断层/陷落柱, 生成高精度地质剖面图; 掘进机震源激发地震波实时监测 200 米内顶板破碎带, 定位误差 < 5 米。灾害智能联动, 微震数据与瓦斯浓度关联分析, 实现冲击地压超前 1 小时预警; 探地雷达 (GPR) 识别富水区后自动触发排水系统, 断层突水误判率降低至 10%。

2. 智能装备集群协同。掘锚一体机, 集成掘进、支护、钻探功能: 前部钻机施工顶帮锚杆锚索, 后部钻机同步处理顶部锚索, 支护效率提升 40%。人机协同系统, UWB 定位 (精度 0.3 米) 联动电子围栏, 危险区域滞留超 5 分钟触发声光报警; AI 视频识别未戴安全帽、违规抽烟等行为, 漏检率 < 5%。

3. 智能管控平台。数字孪生驱动, 构建“掘-支-运”全流程数字孪生场景, 实现设备状态监测、故障诊断、自主导航及一键启停控制, 非计划停机减少 60%。多系统融合联动, CAN 总线整合瓦斯/微震/设备数据, 误报率降低 30%; 隐患自动抓推→声光报警→整改复核闭环管理, 响应时间缩至 15 分钟。

#### 六、煤矿掘进工作面安全措施与隐患

1. 核心安全措施。顶板管理, 敲帮问顶: 作业前用 ≥ 2 米长柄工具清除浮煤浮矸, 两人协同排查顶板裂缝 (长度 > 0.5m 或厚度 > 0.3m 需重点处理), 严禁空顶作业。支护强

化: 锚杆锚索: 树脂药卷搅拌时间 $\geq 15$ 秒, 锚固力达标且间排距符合作业规程(偏差 $\leq 50\text{mm}$ ); 架棚支护: 柱窝挖至硬底, 棚梁中线偏差 $\leq 50\text{mm}$ , 背板接顶率 $>90\%$ 。临时支护: 破碎顶板需用前探梁, 空顶距离严禁超规(一般 $\leq 1.0$ 米)。瓦斯与通风管控, 瓦斯监测: 甲烷传感器(T1)安装在掘进头5米内顶板 $\leq 300\text{mm}$ 处, 超1.0%报警、 $\geq 1.5\%$ 断电110; 独头巷道超60米必须启用局部通风机。通风保障: 风筒平直无漏风, 回风口10-15米处设风速传感器, 风速 $0.25 < \text{m/s}$ 或 $>4\text{m/s}$ 时报警38; 爆破后通风 $\geq 30$ 分钟方可进入。瓦斯超限应急: 立即停电撤人 $\rightarrow$ 分析原因(地质/通风/监测) $\rightarrow$ 停产整改 $\rightarrow$ 责任追究。设备与操作规范, 掘进机操作: 持证上岗, 启动前检查液压压力、截齿完好率及喷雾系统; 截割禁带载启动, 坡度 $>5^\circ$ 时启用后支撑器, 旋转范围内严禁站人。爆破管理: 执行“三人连锁”制度, 残眼用专用掏勺清理, 禁风钻清孔。人员防护与应急, 个体防护: 安全帽、防尘口罩、防护手套必备, 特殊环境增配防毒面罩; 行为监管: UWB定位(精度0.3米)设电子围栏, 危险区滞留 $>5$ 分钟触发报警; 应急预案: 制定冒顶、突水专项预案, 明确撤离路线, 定期演练。

2. 管理升级与技术支持。责任体系: 健全以总工程师为首的顶板技术管理体系, 配强采掘/地测专业团队; 强化跟班干部反“三违”职责, 明确事故连带责任。智能防控: AI视频监控: 识别未戴安全帽、违规抽烟(漏检率 $<5\%$ ), 皮带跑偏/烟火.秒预警; 数据闭环: 瓦斯超限 $\rightarrow$ 断电 $\rightarrow$ 抑爆启动 $\leq$ .秒, 隐患响应缩至分钟内。

3. 关键规范与案例警示。合规底线: 双巷掘进增设中部甲烷传感器(T1.5), 视频监控存储 $\geq 3$ 个月; 血泪教训: 杨某违章放顶(先落槽边筑后回老号柱)致顶板垮落埋压死亡; 成功实践: 陕煤柠条塔矿液压支架与刮板机协同推进, 效率提升25%。顶板冒落与瓦斯积聚是掘进面致死主因, 需严格执行“预测预报 $\rightarrow$ 强化支护 $\rightarrow$ 实时监测 $\rightarrow$ 应急联动”全流程闭环。

## 七、煤矿掘进工作面事故预防措施

1. 顶板事故预防。地质风险超前管控, 掘进前采用定向钻探探测千米内断层/陷落柱, 微震监测实时预警200米内顶板破碎带, 地质异常定位误差 $<5$ 米。遇断层构造带时缩小

支护间距, 锚索补强至设计量的150%。支护标准化作业, 锚杆锚索施工: 树脂药卷搅拌 $\geq 15$ 秒, 锚固力达标且间排距偏差 $\leq 50\text{mm}$ ; 顶板破碎时增设W钢带。临时支护: 空顶距 $\leq 1.0$ 米, 前探梁必须覆盖掘进迎头, 背板接顶率 $>90\%$ 。架棚质量: 棚腿挖至硬底, 中线偏差 $\leq 50\text{mm}$ , 棚间用拉杆连锁加固。动态监测与行为规范, 顶板离层仪深基点锚入稳定岩层( $\geq 1.5$ 倍巷宽), 离层量超限立即补强支护。严格执行“敲帮问顶”: 两人协同用 $\geq 2$ 米长柄工具清除浮矸, 发现裂缝(长度 $>0.5\text{m}$ 或深度 $>0.3\text{m}$ )及时处理。

2. 瓦斯与通风事故防控。瓦斯精准监控, 甲烷传感器(T1)安装在掘进头5米内顶板 $\leq 300\text{mm}$ 处, 超1.0%声光报警、 $\geq 1.5\%$ 断电闭锁。双巷掘进时增设中部传感器(T1.5), 断电阈值 $\geq 1.5\% \text{CH}_4$ 。通风系统保障, 局部通风机双电源配置, 风筒吊挂平直无破口, 回风口10-15米处风速传感器监测( $< 0.25\text{m/s}$ 或 $>4\text{m/s}$ 时报警)。严禁无计划停风, 停风区必须立即撤人并设置栅栏。突出灾害防治, 高瓦斯区域执行“四位一体”防突措施: 区域预测 $\rightarrow$ 抽采达标 $\rightarrow$ 效果检验 $\rightarrow$ 安全防护。爆破后通风 $\geq 30$ 分钟, 经瓦斯检测合格方可进入。

3. 机械伤害与操作风险管控。设备安全防护, 掘进机旋转半径设红外感应装置, 人员进入盲区0.3秒内自动停机。皮带滚筒安装温度传感器,  $>80^\circ\text{C}$ 时触发自动停机。人员行为监管, UWB定位(精度0.3米)联动电子围栏, 危险区域滞留 $>5$ 分钟声光报警。AI视频实时识别未戴安全帽、违规吸烟等行为, 漏检率 $<5\%$ 。关键操作规范, 掘进机持证操作, 启动前检查截齿完好率及喷雾系统, 截割时旋转区严禁站人。爆破作业执行“三人连锁制”: 班组长、瓦检员、爆破员共同签字确认。

总之, 煤矿掘进工作面的安全措施与隐患管理是保障矿工生命安全和生产连续性的核心环节, 需结合技术防控、行为规范及系统管理综合施策。

## [参考文献]

[1] 魏华. 关于人工智能的煤矿掘进工作面安全监测预警技术. 2023.

[2] 于宏宇. 人工智能的煤矿掘进工作面安全监测预警技术探讨. 2022.