

# 回风隅角低氧在线监测及智能预警系统研究

杨喜君

国能亿利能源有限责任公司黄玉川煤矿 内蒙古 鄂尔多斯 010300

**摘要:** 矿井回风隅角易受通风流场、采空区气体溢出影响,频发低氧、有害气体积聚灾害,严重威胁井下人员安全。传统人工巡检存在监测滞后、覆盖不全、预警迟缓等问题。为此本文研发回风隅角低氧在线监测与智能预警系统,结合气体运移特征剖析致灾机理,完成硬件架构、传感器布设、数据传输及防爆供电设计,搭建多源数据融合预警模型与可视化软件平台。系统可实现气体参数全天候采集、智能研判、分级预警与联动处置。实践证明该系统监测精准、响应迅速,可提前识别低氧风险,为煤矿通风安全与灾害超前防控提供有效技术保障。

**关键词:** 回风隅角;低氧监测;智能预警;多源融合;矿井安全

**引言:** 回风隅角属于综采工作面通风薄弱区域,采空区漏风及有害气体持续溢出,极易引发低氧窒息事故,是煤矿安全管控的重点部位。当前国内矿井多采用人工定时检测模式,监测周期长、点位有限,无法实现风险超前预判。在煤矿智能化发展背景下,运用传感、物联网与数据融合技术搭建自动化监测预警系统已成必然。本文立足低氧灾害防控实际,完成系统硬件、智能模型、软件平台一体化设计,构建集监测、分析、预警、联动于一体的成套方案,对提升矿井通风安全智能化水平、防范低氧事故具有重要工程价值。

## 1 回风隅角低氧致灾机理与监测需求分析

### 1.1 回风隅角瓦斯与氧气运移规律

综采工作面回风隅角属于风流涡流区,风速小、气流紊乱,空气交换条件极差。受矿山压力与通风压差影响,采空区内瓦斯、二氧化碳等重质气体不断向隅角溢出,逐步挤占空间空气。同时区域内氧气随风流持续外流,新鲜空气难以补给,形成氧含量递减、有害气体集聚的动态变化。开采深度、工作面推进速度、采空区规模及漏风通道,都会改变气体运移速率。一旦采空区涌气量增大或工作面风量出现波动,隅角氧气浓度会快速下降,这也是回风隅角低氧灾害具备突发性的核心原因。

### 1.2 低氧致灾的触发条件与演化过程

回风隅角低氧灾害是气体缓慢积聚、浓度逐步变化的过程,主要由通风异常、采空区涌气、工作面工况变动三类因素触发。风筒破损、风门启闭不当等通风问题,会直接削弱空气交换能力;顶板垮落、围岩裂隙发育则会加剧有害气体涌出。灾害分为萌芽、发

展、爆发三个阶段:初期氧浓度小幅波动,无明显风险;中期氧气持续降低,作业环境逐步恶化;后期氧含量跌破安全标准,易引发人员窒息。该过程隐蔽性强,传统人工巡检难以发现早期隐患,必须依靠连续在线监测全程跟踪<sup>[1]</sup>。

### 1.3 监测需求分析

结合井下工况与低氧灾害特点,监测系统需满足多项核心要求。系统应实现24小时不间断数据采集,全程跟踪气体参数变化;传感器需适应粉尘、潮湿的井下环境,监测精度符合煤矿安全规范。面对复杂电磁环境,数据传输链路要稳定抗干扰,防止信号中断、数据丢失。系统除基础超限报警外,还需依托多源数据实现趋势研判与智能预警。同时所有设备必须达到矿用本安、防爆标准,适配回风隅角狭小空间,做到安装简便、结构紧凑,并配套历史查询、远程监控、联动管控功能,全方位支撑现场安全管理。

## 2 在线监测系统硬件设计

### 2.1 系统总体架构

本次设计的回风隅角低氧在线监测系统采用感知层—传输层—现场分站—地面平台四层硬件总体架构,层级分明、功能独立且互联互通。感知层为前端传感设备,负责实时采集隅角氧气、瓦斯、二氧化碳、环境风速等气体与环境参数;传输层依托井下工业以太网与本安无线通信模块,完成数据就近汇总与远距离传输;现场数据分站布置在工作面安全区域,承担数据接收、本地存储、就地报警、指令转发功能,可脱离地面平台独立运行;地面综合平台由服务器、监控主机、大屏显示设备组成,实现数据集中处理、远程管控。整体架构兼

顾就地处置与远程监管,即使井下网络临时中断,现场分站仍可正常监测并触发本地预警,网络恢复后自动补传数据,保障系统在复杂井下工况下稳定可靠运行。

## 2.2 传感器选型与布点方案

结合回风隅角空间狭小、粉尘大、湿度高的工况,严格选用煤矿本安型、防爆型传感器。核心选型包括氧气浓度传感器、瓦斯传感器、二氧化碳传感器、风速传感器,所有设备均取得煤安认证,测量量程、精度符合《煤矿安全规程》要求。布点遵循“死角优先、梯度布设”原则,在回风隅最内侧涡流核心区布设主监测测点,作为核心监控点位;在隅角向外延伸 2m、5m 位置增设辅助测点,形成梯度监测阵列,掌握气体浓度扩散规律。传感器安装高度控制在巷道行人呼吸带范围,避开顶板淋水、设备遮挡与强气流直吹位置,采用专用固定支架牢固安装。梯度布点方式既能精准捕捉隅角最低氧区域,也可分析气体蔓延范围,为风险等级判定、区域管控提供完整数据支撑<sup>[2]</sup>。

## 2.3 数据采集与传输设计

数据采集单元按照统一采集周期执行参数读取,设定采样间隔为 1 秒,保证数据连续性,同时设置数据滤波算法,过滤井下粉尘、气流扰动造成的瞬时异常数据,提升采集有效性。前端传感器采用有线方式就近接入本安型采集分站,避免长距离有线线路易破损的问题。井下传输分为两级,短距离采用矿用屏蔽通信线缆,长距离主干传输依托矿井现有工业以太环网,实现全矿数据互联互通。针对部分布线困难的狭小区域,搭配矿用本安无线传输模块作为补充,形成“有线为主、无线为辅”的传输模式。数据传输过程采用加密协议,防范数据篡改、信号干扰。分站本地循环存储至少 7 天历史数据,网络中断时缓存数据,通信恢复后自动续传,从采集、传输、存储全流程保障数据完整可用。

## 2.4 供电与防爆设计

系统供电分为前端传感器、现场分站两大单元,全部采用矿用本安供电模式,杜绝电气火花风险。前端各类气体传感器选用低功耗本安设计,由就近一体化本安电源集中供电,电源具备过流、过压、短路多重保护;现场数据分站接入工作面专用本安供电回路,配备备用锂电池组,在井下主供电中断后,可连续续航不少于 4 小时,保障应急状态下监测不中断。防爆设计严格遵循煤矿防爆标准,所有井下硬件设备均为 ExiaI 本安型或 ExdI 隔爆型,外壳采用高强度阻燃防爆材质,接线腔体密封严实,隔爆面参数达标。线路接口、线缆护套全

部选用矿用阻燃配件,设备安装间隙、散热结构经过专项优化,适应井下高温、潮湿、粉尘环境,从供电、设备、线路三方面落实防爆安全要求,满足井下高危场所使用条件。

## 3 智能预警模型构建

### 3.1 预警指标体系建立

结合煤矿安全标准与低氧灾害演化特征,建立阈值预警+趋势预警双重指标体系。基础阈值指标参照规程设定:氧气浓度低于 18% 为一级预警,低于 16% 为二级预警,低于 12% 为紧急预警;瓦斯、二氧化碳等有害气体同步设置分级阈值。在此基础上增设趋势类预警指标,包括氧浓度小时下降速率、气体浓度变化斜率、多测点浓度差值、风速联动变化值。将静态阈值与动态趋势相结合,弥补单一超限报警的滞后性。指标划分为常规关注、一般风险、较大风险、重大风险四个等级,明确不同等级对应的预警对象、处置要求。整套指标兼顾瞬时超限与渐变隐患,既管控显性灾害,也捕捉早期演变趋势,为智能模型研判、分级预警提供量化依据。

### 3.2 多源数据融合算法

系统采用加权融合算法实现多源数据整合,融合对象包含氧气、瓦斯、CO<sub>2</sub>、风速、历史时序数据、不同测点梯度数据。首先对各传感器原始数据进行预处理,剔除异常值、补齐断档数据,完成量纲统一。根据不同参数对低氧灾害的影响权重设置加权系数,其中氧气浓度、氧浓度变化速率设为高权重,风速、有害气体浓度设为辅助权重。将单测点数据、梯度测点数据、时序历史数据进行融合计算,综合判定区域整体风险状态<sup>[3]</sup>。相较于单一参数判断,多源融合算法可有效降低单个传感器故障、环境干扰造成的误报、漏报问题,提升数据可信度。算法嵌入现场分站与地面平台,实现边缘端快速计算与后台深度分析双向结合。

### 3.3 智能预警模型

基于多源融合数据搭建回风隅角低氧智能预警模型,模型分为常态监测、趋势预判、超限报警三大模块。常态模块实时展示各项参数,判定区域处于安全状态;趋势模块依托时序数据拟合浓度变化曲线,预判未来 10 分钟、30 分钟氧浓度演变趋势,提前发出趋势预警;超限模块在参数触碰分级阈值时,触发对应等级报警。模型引入历史灾害样本持续优化,结合工作面推进、通风调整、采空区垮落等工况修正判定逻辑,区分正常浓度波动与灾害性演变。模型输出内容包含风险等级、异常位置、参数曲线、初步研判结论,实现从“事

后报警”向“事前预判”转变,大幅提升低氧风险防控的前瞻性与主动性。

### 3.4 预警联动机制设计

按照预警等级建立分层声光、语音、远程联动机制,实现就地警示与全域管控同步运行。一级一般预警:仅现场分站与本地声光报警器动作,提醒周边作业人员加强观察;二级较大预警:本地声光、语音同步播报,信息推送至工作面班组长、安检人员;三级紧急预警:全区域声光报警,系统自动联动工作面声光信号装置,同时将预警信息推送至矿井调度室、通风管理部门。所有预警信息附带测点位置、实时参数、风险等级,便于管理人员快速处置。预警解除设置人工确认机制,参数恢复安全区间并稳定一段时间后,方可手动复位,避免反复报警。联动机制打通监测、预警、现场处置全链条,形成“发现—预警—管控—复位”闭环,充分发挥系统安全防控作用。

## 4 系统软件平台开发

### 4.1 平台功能模块设计

地面软件平台采用模块化设计,划分数据监测、智能预警、历史查询、统计分析、设备管理、系统设置六大核心模块。实时监测模块集中展示全测点气体参数、设备运行状态;智能预警模块弹窗提示异常信息,存储所有预警记录;历史查询模块支持按时间、测点、参数调取历史数据与曲线,满足事故追溯、工况分析需求;统计分析模块自动生成日报、周报、月报,输出浓度变化规律、风险频次分析报表;设备管理模块在线监测传感器、分站运行状态,故障自动上报;系统设置模块负责参数阈值、预警等级、通信参数配置。各模块相互独立又数据互通,功能覆盖日常监测、风险预警、数据分析、设备运维全业务,适配通风管理、安全监察等多岗位使用需求<sup>[4]</sup>。

### 4.2 可视化界面设计

平台可视化界面遵循简洁直观、重点突出的设计原则,主界面分为矿区总图、测点分布、实时数据、趋势曲线、预警弹窗五大区域。采用矿井巷道二维平面图标注所有回风隅角监测点位,点击测点即可跳转至对应详细页面。实时数据区采用数字+颜色标识,绿色代表安全、黄色代表预警、红色代表危险,直观区分运行状

态。同步绘制单参数时序曲线、多参数对比曲线,动态展示浓度变化过程。预警信息采用置顶弹窗+声音提示,醒目显示风险位置、等级、触发原因。界面支持电脑端、大屏端自适应显示,大屏模式适用于调度指挥中心集中监控,电脑端用于办公人员精细化查询分析,操作逻辑简单,一线管理人员可快速上手使用。

### 4.3 系统集成与对接

本系统具备良好的开放性与兼容性,可与煤矿现有安全监控系统、人员定位系统、通风管理平台实现数据对接与系统集成。采用标准矿用通信协议,向外推送氧气、瓦斯、预警等核心数据,实现全矿井安全数据一体化汇总。支持数据接口二次开发,可根据矿井现有平台格式调整数据输出形式,降低对接难度。系统对接后,回风隅角低氧监测数据融入矿井整体安全管控体系,调度中心可统一查看、统一调度。同时设置数据隔离与权限管理,不同岗位分配不同操作权限,保障数据安全。软硬件集成完成后,无需重复建设大量终端设备,充分利用现有网络与硬件资源,节约改造投入,实现矿井安全监测系统一体化升级。

## 结束语

回风隅角低氧是煤矿典型隐蔽性安全灾害,传统人工监测方式存在明显短板。本文结合气体运移规律与致灾演化过程,完成低氧在线监测及智能预警系统的软硬件一体化设计,构建多源数据融合智能模型与分级联动预警机制,开发配套可视化软件平台现场应用可提前识别低氧隐患,防范窒息事故。未来可结合人工智能算法持续优化模型,进一步提升预测精度,为煤矿通风安全智能化防控提供更完善的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 李鹏. 回风隅角低氧对光干涉甲烷检测仪的影响及校正方法研究[J]. 能源与环保,2024,46(3):66-71.
- [2] 金永飞,张科峰,郭军,等. 浅埋近距离煤层群综放工作面回风隅角低氧治理技术[J]. 煤炭工程,2023,55(9):71-78.
- [3] 孙长斌. 浅埋深薄基岩下综采工作面回风隅角低氧治理[J]. 中国安全科学学报,2022,32(S2):136-141.
- [4] 邹青海. 浅埋多煤层工作面回风隅角低氧现象发生规律与原因分析[J]. 能源技术与管理,2026,51(1):89-92.