

井工煤矿采空区自燃火灾早期监测与预警技术

毛 飞

国能榆林能源郭家湾煤矿分公司 陕西 榆林 719300

【摘要】：井工煤矿采空区自燃火灾是威胁煤矿安全生产的重大灾害之一，其发生过程隐蔽、发展迅速且治理困难，极易引发瓦斯爆炸等次生灾害。传统监测方法依赖人工巡检与点式传感器，存在监测盲区大、预警滞后等局限性。因此，发展能够实现大范围、连续、精准的早期监测与预警技术，对超前识别火源隐患、保障矿工生命安全及矿山资源可持续开发具有极端重要性。

【关键词】：井工煤矿采空区；自燃火灾；早期监测；预警技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.066

引言

采空区遗煤自燃是一个复杂的物理化学过程，其早期征兆微弱且易被环境干扰所掩盖。有效预警的关键在于对自燃孕育阶段产生的微量气体、温度场异常等前兆信息进行高灵敏度捕捉与智能识别。系统研究集成多参数感知、信息融合与智能识别的早期监测预警技术体系，是突破当前技术瓶颈、实现火灾防控从被动应对转向主动预防的核心科技支撑。

1 采空区自燃火灾的形成机理

采空区自燃火灾的形成机理源于残留煤体在适宜条件下与氧气发生缓慢氧化反应并逐步升级为燃烧的过程。采空区因回采作业遗留大量松散煤体，孔隙结构发达，与空气接触面积大，为氧化提供充足氧气。当环境温度、煤质特性与蓄热条件达到临界值时，煤的低温氧化速率加快，生成CO、C₂H₄等标志性气体并释放热量。若热量积聚大于散发，局部温度升高进入加速氧化阶段，最终引发明火。煤的挥发分含量、硫分、粒度及含氧量、漏风强度均显著影响自燃倾向。采空区封闭或半封闭状态造成风流不畅，热量与有害气体易滞留，加剧蓄热与反应进程。理解这一机理有助于确定关键监测参数与预警时机，为早期防控提供理论依据。

2 井工煤矿采空区自燃火灾特征

井工煤矿采空区自燃火灾具有隐蔽性强、发生过程缓慢、火源位置难确定等显著特征。由于采空区多由矸石、遗煤与塌落岩层填充，空间结构复杂且人员难以直接进入，早期火源往往埋藏于内部，不易通过目视或常规手段发现。自燃过程伴随煤的低温氧化，升温缓慢且持续时间长，初期无明显火焰，仅能通过气体组分变化与微温异常间接识别。标志性气体如一氧化碳、乙烯、乙炔等在火灾孕育期逐渐累积，其浓度变化可反映氧化程度与危险等级。采空区漏风状态不稳定，风流路径曲折，易造成热量与有害气体聚集与扩散交替，使火灾范围与蔓延速度难以预测。此外，火源可能沿煤体裂隙呈多点分布，增加了探测与隔离难度。这些特征决定了必须依靠连续、多参数的监测系统，并在预警模型中充分考虑时空演化规律，才能实现早期识别与有效控制。

3 现有技术存在的不足

3.1 监测参数单一与覆盖不足

现有采空区自燃火灾监测多依赖单一或少数参数，如仅监测CO浓度或温度，难以全面反映煤氧化的多因素耦合过程。不同矿井的地质与通风条件差异大，单参数监测易产生误报或漏报，无法捕捉气体成分、温湿度、风速等多维信息的协同变化。传感器布设往往集中在采空区入口或固定点位，对深部或隐蔽区域的感知能力不足，盲区较大。参数单一还限制了早期微弱异常的识别，导致预警滞后，错过最佳处置时机，影响火灾防控的整体可靠性。

3.2 数据传输与实时性差

不少监测系统仍采用有线或间歇性采样的传输方式，数据更新周期长，难以及时反映采空区状态的快速变化。井下环境复杂，通信设施易受潮湿、粉尘与机械损伤影响，造成信号中断或失真。现有系统在数据预处理与边缘计算方面能力弱，大量原始数据需传至地面才能分析，增加延迟。实时性差使预警响应滞后，尤其在自燃加速阶段，火势可能在监测数据尚未反馈前迅速扩大，给应急处置带来极大风险。

3.3 预警模型适应性差与智能化水平低

现有预警模型多基于经验阈值或简单统计分析，未充分考虑采空区空间异质性、漏风动态与煤质差异等因素，导致模型在不同工况下适应性不足。模型参数固定，难以随环境变化自动校正，易出现误警或漏警。智能化技术应用有限，缺乏机器学习等算法对历史与实时数据进行深度挖掘，无法实现火源位置预测与趋势研判。人工研判仍占主导，工作量大且主观性强，制约了预警的准确性与可靠性，限制了其在复杂矿井环境中的推广应用。

4 现有监测与预警技术综述

4.1 气体成分监测技术

气体成分监测是采空区自燃火灾早期识别的重要手段，主要通过检测煤体低温氧化过程中产生的特征气体浓度变化来判断风险。常用的监测对象包括一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)、

甲烷(CH_4)、乙烯(C_2H_4)、乙炔(C_2H_2)以及烷烃类气体。这些气体的出现与浓度升高往往先于温度升高,可作为早期预警信号。现场常采用便携式气体检测仪进行人工巡检,或在关键位置布置固定式气体传感器,实现连续监测。近年来,激光光谱、红外吸收等传感技术的发展提升了检测的灵敏度与选择性,可实现多种气体同步测量。然而,单一气体指标易受通风波动与其他气体源干扰,需结合气体比值法(如 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{CO}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$)提高判识可靠性。气体监测的优势在于能深入反映煤氧化的化学变化过程,但其局限在于传感器维护成本高、井下恶劣环境易导致漂移与失效,且对火源定位精度有限。

4.2 温度与红外监测技术

温度监测通过获取采空区温度变化趋势来捕捉煤体自热过程,是最直观的物理参量监测方法之一。常用设备包括热电偶、热敏电阻、光纤光栅温度传感器等,可埋设于采空区关键层位或布设在巷道壁面,实现定点或多点连续测温。当煤温升至 50°C 以上时,氧化速率明显加快,因此温度监测能在较早阶段发现异常。红外监测则利用红外热成像仪或红外测温探头,对采空区暴露面或密闭空间进行非接触扫描,快速获取温度场分布图像。该技术适用于人员难以接近的区域,可直观显示高温点的位置与范围。温度与红外监测的优点在于数据稳定、易于与报警系统联动,但缺点在于热传导滞后效应明显,采空区内部热源可能延迟反映到表面温度;此外,井下高湿、粉尘会降低红外成像清晰度,需配合图像处理算法提高可靠性。

4.3 微震与应力监测技术

微震与应力监测基于煤岩体在氧化升温、裂隙发育及潜在燃烧过程中的力学响应变化来实现间接预警。煤体自热会引起物理膨胀、微裂纹萌生与扩展,进而产生微弱地震波(微震事件),可被高灵敏度检波器捕获并定位。通过分析微震事件的频次、能量与空间分布,可推断采空区内煤体破坏程度与可能的自燃活跃区。应力监测则通过在围岩或遗煤处布设应变计、压力盒等传感器,监测因热膨胀与氧化产物积聚引起的应力异常。当应力集中超过阈值,往往预示煤体已进入加速氧化或局部燃烧阶段。这类技术的优势在于能够探测到尚未形成明显气体或温度异常的隐性危险源,具备一定的超前性。但其问题在于信号易受采掘爆破、机械振动等干扰,事件识别与成因判别难度大,需要复杂的信号处理与多源信息融合算法支撑,目前在煤矿现场的普及率和稳定性仍有待提升。

4.4 多参数融合预警方法

多参数融合预警方法旨在综合气体成分、温度、红外热场、微震、应力、风速等多源监测数据,通过数据融合与关联分析提升预警的准确性与可靠性。该方法通常采用分布式传感器网络获取异构数据,在边缘节点或地面中心进行时间同步与归一化处理,再运用统计判别、模式识别或机器学习模型提取特征

指标,如气体比值趋势、温升速率、微震事件密度等。融合模型可根据不同矿井的地质与通风条件自适应调整权重与阈值,从而减少单参数监测的误报漏报。例如,当 CO 浓度缓慢上升伴随局部温升与微震频次增加时,可判定为较高风险状态并触发分级预警。多参数融合的优势在于能较全面刻画采空区自燃孕育的全过程,提升时空分辨率与预警时效;挑战在于需要解决不同采样频率、精度与可靠性的数据对齐问题,且模型构建与维护的技术门槛较高,对运维人员的专业水平要求也更高。

5 监测与预警技术方案设计

5.1 监测指标体系构建

监测指标体系构建是方案设计的基石,需覆盖采空区自燃火灾孕育全过程的物理、化学与力学特征。气体指标应包括 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等标志性气体及其比值,以反映煤低温氧化程度;温度指标涵盖定点温度、温升速率及红外热场分布,用于捕捉热异常;辅以风速、风向、湿度等环境参数,揭示漏风强度与散热条件对氧化的影响;应力与微震指标可监测煤岩体因热膨胀与裂隙发育产生的力学响应。指标选取须结合矿井实际地质与开采工艺,确保其敏感性与代表性。各指标需定义明确的警戒阈值与分级标准,如 CO 初始异常值、温升速率临界值,形成多维度、量化的风险判据,为后续数据采集与预警模型提供可靠依据。

5.2 传感器布设与数据采集方案

合理布设传感器是实现全面感知的前提,根据采空区空间结构与风流路径,应在遗煤富集区、封闭或半封闭区段、进回风通道交汇处等关键位置设置气体、温度、红外及应力微震传感器,形成交叉覆盖网络。气体传感器宜采用多通道阵列,结合抽气采样与就地扩散式安装,保证不同深度与高度的浓度捕获;温度传感器埋入遗煤内部与巷道壁面,红外热成像仪对准采空区暴露面;微震检波器沿采空区周边布设以捕捉裂隙扩展信号。数据采集采用定时与事件触发相结合模式,关键参数可高频采样,一般参数低频记录,兼顾实时性与能耗。所有节点需具备防尘、防潮、抗冲击性能,并设计自检与故障报警功能,确保数据连续性与有效性。

5.3 数据传输与存储系统设计

井下环境复杂,数据传输与存储系统须兼顾可靠性与实时性。主干传输可采用光纤与工业以太网结合,实现高速、抗干扰的数据回传;分支区域可部署低功耗无线传感网络(如LoRa、Wi-Fi6)或本安型4G/5G模块,灵活适配不同距离与遮挡条件。为应对信号遮挡与突发中断,系统应设计多路径冗余与自愈合路由机制,确保关键数据不丢失。数据存储采用边缘—云协同架构:边缘节点完成数据预处理、压缩与本地缓存,重要事件数据实时上传至地面云平台;云平台进行集中存储、备份与历史追溯,支持大数据量管理与多用户并发访问。系统还需具备

时间戳校准与加密传输功能，保障数据的安全性与时序一致性。

5.4 预警模型与阈值设定方法

预警模型需在多参数融合基础上实现风险分级与动态判定。可采用分层递进式架构：底层为单参数阈值判别，中层为参数间关联分析（如气体比值趋势、温升加速度），顶层为综合风险指数计算。模型宜引入机器学习方法，利用历史事故与正常工况数据训练分类或回归算法，实现对不同发展阶段（初期氧化、加速升温、临近燃烧）的精准识别。阈值设定应结合矿井实测数据与专家经验，分区域、分时段动态调整，并可嵌入自适应校正机制，根据环境变化自动优化。例如，当通风强度下降时适当降低温度阈值以提高灵敏度。模型输出应包括风险等级、可能火源位置及建议处置措施，为决策者提供可操作的预警信息。

5.5 系统集成与运行保障机制

系统集成需将监测硬件、数据传输、存储分析、预警决策及可视化平台无缝衔接，形成闭环管理。硬件层面统一接口协

议，确保不同类型传感器即插即用；软件层面构建模块化平台，涵盖实时监控、历史回溯、报表生成与远程控制功能。可视化界面以图形化方式呈现采空区三维温度场、气体浓度分布与风险热力图，便于管理人员直观掌握态势。运行保障机制包括定期设备校准与维护、数据质量抽检、系统冗余备份与灾备恢复预案，以及人员培训与技术支持体系。应建立多级响应流程：初级预警触发巡检与复测，中级预警启动局部封闭与注氮，高级预警联动撤人与灭火措施。通过完善的集成与保障机制，确保监测与预警系统长期稳定、可靠、高效地服务于采空区自燃火灾防控。

6 结语

总而言之，构建高效的采空区自燃火灾早期监测与预警系统，是煤矿安全技术发展的必然方向。其核心在于多源信息融合感知网络的构建、预警模型的精准化与智能化以及监测预警与应急响应的联动。未来应着力推进物联网、大数据与人工智能技术在该领域的深度融合应用，形成空地一体化、实时动态的预警能力，为煤矿安全生产构筑一道坚实可靠的技术防线。

参考文献：

- [1] 杨勇.金辛达煤矿防灭火技术现状研究[J].矿业装备,2024,(07):16-18.
- [2] 季凌云.煤矿采空区自燃火灾预警系统研发与应用[D].安徽理工大学,2024.
- [3] 马晓宇.基于 GA-BP 神经网络煤矿作业人员不安全行为预警研究[D].河南理工大学,2024.
- [4] 王超,李元军,岳鹏.煤矿 AI 智能预警平台研究应用[J].山东煤炭科技,2024,42(05):167-171.
- [5] 钮涛,李栋,王平,刘国峰,陈明刚.基于地质保障系统的煤矿灾害监测预警及综合防治平台研究[J].中国煤炭,2024,50(05):82-89.
- [6] 闫寿庆,董康宁,张连荣.复杂煤层工作面推进中火灾预警技术研究[J].工矿自动化,2024,50(S1):96-99.