

光纤监测技术在煤矿安全监测中的应用

刘 杰

合肥智兵科技有限公司 安徽合肥 230000

摘 要: 煤矿安全生产构成煤炭行业高质量发展的核心前提条件,传统监测工艺于井下复杂环境当中存有监测范畴具有有限性、抗干扰能力呈现薄弱性、稳定性处于不足状态等状况,难以契合现代化煤矿安全防控的精准化特征、实时化需求。光纤监测工艺依靠其抗电磁干扰性能、耐腐蚀属性、传输距离具备遥远性、可实施分布式监测等独特优势之处,逐渐演变成为煤矿安全监测领域的核心工艺类型之一。本文首先梳理光纤监测工艺的核心类别及工作原理内容,其次重点剖析其在煤矿瓦斯情况、顶板矿压数值、温度火灾隐患及水文条件等关键安全指标监测方面的具体应用情形,深入解析工艺应用过程中的核心难点问题,最终提出针对性优化路径方案,为光纤监测工艺在煤矿安全监测工作的规模化推进、规范化应用提供参考依据,助力实现煤矿安全防控水准的提升目标。

关键词: AI技术; 电厂安全生产; 隐患闭环管理; 智能管控

引言

煤炭作为我国能源结构体系中的重要构成元素,在国民经济发展进程中占据重要地位情况。然而煤矿开采作业环境呈现复杂特殊状态,井下空间表现出狭窄特征、地质条件具有多变属性,伴随瓦斯突出隐患、顶板坍塌风险、火灾隐患、水害威胁等多种安全隐患问题,严重危及作业人员生命安全状况及煤矿生产秩序情况。本文基于光纤监测工艺的核心特性表现,系统探讨其在煤矿安全监测领域的应用场景状况、现存问题表现及优化方向内容,目的在于推动工艺与煤矿安全需求的深度融合进程,提升煤矿安全监测工作的智能化程度和水平^[1]。

一、光纤监测技术的核心类型及工作原理

(一) 分布式光纤监测技术

分布式光纤监测工艺把光纤作为传感介质载体和传输载体形式,通过解析光在光纤内部传输阶段的散射信号情况,达成对光纤沿线各个点位环境参数的连续监测效果,能够构建全链路结构、无死角状态的监测网络体系,无需在监测路径之上设置多个传感器装置,适宜大范围区域的监测工作。其核心工作原理建立在光的散射效应基础之上,当激光脉冲处于光纤内部传输状态时,会与光纤介质分子产生相互作用现象,生成瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射三种散射信号类型。不同散射信号对环境参数的敏感度存在差异,能够实现不同指标的监测任务。瑞利散射信号的强度受到光纤软线温度数值、应变参数等因素的影响作用,通过对瑞利散射信号的相

位状态、强度变化进行解析处理,能够反演获取光纤沿线的温度分布状况和应变情况^[2]。拉曼散射信号划分成斯托克斯散射和反斯托克斯散射类型,两者的强度比例随着温度变化呈现规律性变化特征,基于这一特性能够实现温度参数的精准监测操作,并且不受应变因素的干扰影响。布里渊散射信号的频率偏移量与光纤的温度数值和应变参数均存在线性关系表现,通过解调布里渊散射信号的频率偏移情况,能够同时获取温度数据和时变数据信息。分布式光纤监测工艺能够实现千米级别的长距离连续监测作业,监测分辨率处于较高水平,能够快速定位异常区域的具体位置情况,为煤矿大范围区域的安全监测工作提供技术支持保障^[3]。

(二) 光纤光栅监测技术

光纤光栅监测技术归属于点式或准分布式监测技术范畴,其核心构成元件为光纤光栅,借助于在光纤纤芯层面构造周期性折射率调制构造这一方式,促使特定波长的光线被反射操作,而其余波长的光线则透过光栅持续进行传输活动。该技术的工作机理以光纤光栅的波长调制特性作为基础支撑,当光纤光栅所处环境的温度参数、应变参数、压力参数等发生改变情况时,便会造成光栅的周期构造或者纤芯折射率产生变化现象,进而使得反射光线的中心波长出现偏移状况。通过对反射光线中心波长的偏移量实施检测行为,并将其与预先完成标定的波长偏移和参数变化的对应关联进行结合运用,能够精确地计算出监测点位的环境参数数值。光纤光栅传感器可以依照监测需求设计成为不同类别的形式,像温

度光栅传感器类型、应变光栅传感器类型、压力光栅传感器类型等，能够有针对性地对煤矿井下特定点位的关键安全参数实施监测工作。此项技术具备监测精度处于较高水平、响应速度呈现快速状态、稳定性表现强劲等优势特征，并且多个光纤光栅传感器能够以串联方式设置在一根光纤之上，从而达成准分布式监测效果，降低井下布线工作的复杂程度^[4]。

二、光纤监测技术在煤矿安全监测中的具体应用

(一) 瓦斯浓度监测

光纤监测技术在瓦斯浓度监测工作中的应用实践，主要借助两种途径予以实现：其一为基于瓦斯气体对特定波长光线的吸收特性，设计研发光纤瓦斯传感器；其二为将分布式光纤监测技术进行结合运用，通过对瓦斯泄漏所引发的温度变化、压力变化实施监测举措，间接反推出瓦斯浓度数值。

基于光吸收原理的光纤瓦斯传感器，运用瓦斯分子针对特定波段红外光线的选择性吸收特性，当光线穿过包含瓦斯的气体环境时，特定波长光线的强度会随着瓦斯浓度的增加而产生衰减现象，通过对光线强度的衰减程度开展检测工作，能够计算得出瓦斯浓度数值。该类型传感器具备抗干扰能力较强的特点，监测精度处于较高水平，能够实现对特定点位瓦斯浓度的实时监测功能。同时，与光纤光栅技术进行结合应用，能够把多个瓦斯传感器以串联方式布置在一根光纤之上，实现多点位准分布式瓦斯监测效果，覆盖采煤工作面区域、掘进巷道区域、瓦斯抽采管路区域等关键区域范围。

(二) 顶板及矿压监测

煤矿井下顶板坍塌事故、支架失稳事故等大多是由顶板压力变化情况、围岩变形情况所引发，针对顶板及矿压实施的实时监测工作是保障煤矿开采安全的关键所在。传统的顶板及矿压监测工作大多采用机械式传感器或者电信号传感器，监测范围存在局限性，并且传感器容易受到井下潮湿环境、振动环境的影响作用，稳定性表现不足。光纤监测技术凭借其应变感知能力较强、稳定性水平较高的优势特点，在顶板及矿压监测工作领域获得了广泛的应用实践。光纤光栅传感器能够直接安置于顶板锚杆、锚索或者支架构造之内，借助对锚杆、锚索的应变改变实施监测，进而推导顶板围岩的受力状况以及变形走向。当顶板压力加大造成围岩变形之际，锚杆、锚索便会产生相应的应变，促使光纤光栅反射光中心波长出现偏移，通过对波长偏移量进行解调，能够精确地获取应变数据，及时察觉顶板受力异常情形。

(三) 井下温度及火灾监测

煤矿井下火灾大多由电气故障、摩擦生热、自燃起火等因素所引发，火灾初期的温度变化较为隐蔽，传统的温度监测技术难以迅速发现异常状况，容易致使火灾蔓延扩大。光纤监测技术具备精确的温度感知能力，可以实现对井下温度的持续监测以及火灾预警，为火灾防控争取时间。分布式光纤温度监测技术以拉曼散射原理为依据，能够对井下巷道、采空区、电缆沟等区域的温度实施持续监测，具有监测范围广泛、响应速度快捷的特点，能够精确捕捉局部温度异常升高的现象。当井下出现自燃起火、电气设备过热等状况时，光纤软线相应区域的温度会显著上升，系统能够迅速确定异常区域的位置，并且发出火灾预警信号。

(四) 井下水文监测

井下水害属于煤矿安全生产的重大隐患之一，主要来源于地下水渗漏、老空水突水等情况，对水文参数进行实时监测是防范水害事故的关键所在。传统的水文监测大多采用压力传感器、水位传感器等设备，容易受到井下水质腐蚀、电磁干扰的影响，监测数据的可靠性欠佳，而且难以实现对水体渗透路径的监测。光纤监测技术能够实现对水位、水压、水体渗透等水文参数的精确监测，为水害防控提供技术方面的支持。光纤光栅压力传感器可以安装在井下巷道低洼之处、水仓、钻孔等位置，通过对水压变化进行监测来推导水位变化情况，具备监测精度高、稳定性强的优势，能够实时掌握井下水位的动态状况。分布式光纤监测技术可以沿着巷道侧壁、钻孔铺设光纤，利用光纤的应变感知特性，监测水体渗透所导致的围岩变形，精确确定渗透点的位置以及渗透范围。

三、光纤监测技术在煤矿应用中的难点

(一) 井下环境适配性不足

煤矿井下环境极为复杂，存在高湿度、高粉尘、强振动、高低温交替等问题，这对光纤监测设备的环境适配性提出了极高的要求。当前，多数光纤监测设备为通用型设备，没有针对煤矿井下环境进行专项优化，容易出现故障。一方面，井下的高湿度、腐蚀性气体容易导致光纤接头、传感器封装件老化、损坏，影响光信号的传输质量，降低监测数据的可靠性；另一方面，井下采掘作业产生的强振动容易导致光纤断裂、传感器位移，破坏监测链路的连续性，甚至造成监测系统瘫痪。

(二) 技术集成与数据应用薄弱

煤矿安全监测属于具备多参数、多系统协同运作特

征的体系，需对光纤监测技术与煤矿智能化开采系统、安全预警平台、应急指挥系统等开展深度集成操作。当前，光纤监测技术和煤矿既有监测系统的集成程度处于较低水平，存在数据壁垒状况，光纤监测数据难以跟传统监测数据、采掘作业数据、地质数据等达成融合分析结果。多数煤矿仅仅能够完成光纤监测数据的采集与显示环节，缺少对数据的深度挖掘及应用内容，无法借助多维度数据融合实现安全隐患的精准预测和预警功能。

（三）成本与维护难度较高

光纤监测技术的前期投入成本以及后期维护成本处于较高状态，对该技术在中小型煤矿的规模化应用形成制约局面。一方面，光纤监测设备、专用光纤、解调仪等核心设备具备较高价格，并且煤矿井下监测范围较为广泛，需要进行大量光纤的铺设以及多个传感器的安装工作，进而对前期投入成本起到进一步增加作用；另一方面，井下环境具有复杂特性，光纤及传感器容易受到损坏影响，需要定期开展检修、更换操作，而光纤监测设备的维护工作需要专业技术人员以及专用工具的支持，呈现出维护难度大、维护周期长的特点，对后期维护成本起到增加作用。

四、优化光纤监测技术在煤矿应用的路径

（一）提升设备环境适配能力

聚焦煤矿井下复杂环境所具备的特点内容，开展专项设备的研发与优化工作，对光纤监测设备的环境适配性进行提升操作。一方面，对设备封装技术进行优化处理，选用耐腐蚀、防水、防尘、抗振动的封装材料物质，对光纤接头、传感器、解调仪等核心部件实施强化封装举措，提升设备对高湿度、腐蚀性气体、强振动的抵抗能力程度；另一方面，针对井下高低温交替环境状况，研发宽温域光纤传感器以及解调设备装置，确保设备在极端温度条件之下实现稳定工作状态。

（二）强化技术集成与数据深度应用

开展光纤监测技术和煤矿现存监测体系、智能化体系的深层整合，破除数据障碍，达成多层面数据融合剖析。首先，设定统一的数据接口规范与通信协定，保证光纤监测装置和煤矿安全预警平台、智能化开采体系、地质监测体系等相互连通，实现光纤监测数据和其他类别的数据的实时分享。其次，强化数据分析算法研发，结合人工智能、大数据等技术，构建多参数融合剖析模

型，通过对光纤监测数据、地质数据、采掘作业数据等的综合剖析，达成安全隐患的精确预测和预警，提升监测数据的应用价值。

（三）降低成本与优化维护体系

通过技术革新、规模化运用、优化维护模式等途径，削减光纤监测技术的应用成本，提升维护效率。一方面，推动光纤监测设备的国产化、规模化生产，降低设备采购成本；优化监测方案，依据煤矿不同区域的安全风险等级，合理布置光纤及传感器，规避过度监测，减少设备及光纤的投入量。另一方面，构建标准化、高效化的维护架构，制定光纤监测系统维护规程，明确维护周期、维护内容及技术要求，提升维护工作的规范性。配备专用维护工具及应急备件，建立快速响应机制，当设备出现故障时，能够及时开展检修、更换工作，缩短故障停机时长。

结论

光纤监测技术凭借其独特的技术长处，在煤矿安全监测领域呈现出广阔的应用前景，能够有效弥补传统监测技术的欠缺，实现对瓦斯、顶板矿压、温度火灾、水文等关键安全指标的精确、实时、大范围监测，为煤矿安全生产提供重要技术支撑。但当前光纤监测技术在煤矿应用中仍面临环境适配性不足、技术整合与数据运用薄弱、成本与维护难度较高等难题，限制了其规模化应用。

参考文献

- [1] 胡江权, 邓成辉, 李晶晶, 左坤. 分布式光纤监测技术在海上CCUS井分层注入中的应用研究[J]. 石化技术, 2025, 32(11): 195-197.
- [2] 申艳平, 张世欧, 黄欣欣. 分布式光纤监测技术在覆岩上“两带”监测中的应用[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(07): 41-47.
- [3] 周明秀, 管英柱, 张国威, 董为民, 曹石年. 分布式光纤监测技术在水平井分段压裂中的应用[J]. 能源与环保, 2024, 46(02): 146-154+162.
- [4] 邓成辉, 曹波波, 党黎锋, 宣涛, 张奎亮. 永久式光纤监测技术在海上首口二氧化碳回注井的应用[J]. 石化技术, 2024, 31(01): 68-70+61.