

深部开采矿井火灾隐患特征及综合防治技术应用分析

管云丰

西乌珠穆沁旗东方矿业有限责任公司 内蒙古 锡林郭勒 026209

摘 要: 针对深部开采矿井高地温、高地应力的特殊作业环境,系统梳理该场景下火灾隐患的核心特征与演化规律,明确煤体自燃、机电设备高温起火、气体耦合燃烧三类主要隐患的形成原理。结合深部矿井火灾隐蔽性强、演化速度快、防控盲区多的技术难点,构建涵盖隐蔽火源精准监测预警、煤体自燃防控与漏风治理、设备管控与火情应急处置的全链条综合防治技术体系。研究成果可为深部开采矿井火灾防控体系搭建提供明确技术路径,对提升深部矿井火灾隐患识别精度、降低重大火灾灾害发生概率具备重要工程实践价值。

关键词: 深部开采; 矿井火灾; 隐患特征; 火灾防治; 防灭火技术; 应用

引言: 随着我国煤炭开采深度持续下探,深部开采矿井占比逐年提升,深部特殊地质与作业环境使得矿井火灾隐患的生成机制、演化规律与浅部矿井存在显著差异,传统浅部矿井通用防灭火技术已无法完全适配深部工况。当前多数深部开采矿井仍沿用浅部矿井的火灾防控逻辑,未针对高地温、高地应力、复杂通风网络等特殊条件制定专项防控方案,极易出现隐患识别滞后、处置效率不足的问题,易引发火灾及多灾种耦合重大事故。在此背景下,系统梳理深部开采矿井火灾隐患特征与综合防治技术体系,厘清各类技术的适用场景与应用逻辑,对保障深部开采矿井安全生产具备重要现实意义。

1 深部开采矿井特殊作业环境

深部开采矿井区别于浅部矿井,地质条件与作业环境具备显著的特殊性,是火灾隐患多发、难治的核心根源。随着开采深度逐步增加,地温梯度持续升高,井下围岩、煤层的初始温度大幅提升,整体作业环境温度长期处于高位区间,无需额外加热源即可为煤体氧化升温、自燃发火提供基础温度条件,大幅缩短煤体从低温氧化到自燃发火的诱导期。(1)深部开采过程中高地应力作用特征显著,岩体应力集中程度远高于浅部开采场景,开采扰动会直接造成围岩破碎、煤层裂隙发育,煤体原生完整性被完全破坏,内部孔隙与外生裂隙数量大幅提升,显著扩大煤体与氧气的有效接触面积,直接加速煤体低温氧化反应进程。(2)深部开采工作面推进速度快,采空区横向与纵向覆盖范围大,遗留煤体总量多,围岩垮落压实过程不均匀,在采空区内部形成大量隐蔽性漏风通道,为氧气持续输入、煤体持续氧化提供稳定的供氧条件。(3)深部矿井通风路径总长度大幅增加,管网整体风阻显著提升,通风系统运行稳定性差,井下局部区域空气流通不畅,热量、有害气体易出

现局部积聚,高温区域、缺氧区域、瓦斯富集区域交错分布,进一步加剧火灾隐患的复杂性。火灾发生后,受复杂通风网络与大量隐蔽巷道影响,烟气扩散路径不可控,现场风量调控难度极大,极易造成火情隐蔽蔓延,大幅提升火灾防控与应急处置的技术难度^[1]。

2 深部开采矿井火灾隐患核心特征

2.1 隐患隐蔽性强,识别难度大

深部矿井火灾隐患最突出的特征为隐蔽性极强,多数火情初期无明显表象,难以提前识别预警。深部采空区、围岩裂隙、煤柱内部、支架后方等区域空间密闭、视线遮挡严重,煤体氧化升温、初期自燃均发生在隐蔽空间内,无明火、无明显烟雾溢出,常规巡查方式无法及时发现隐患。同时,深部高地温环境导致井下整体温度偏高,煤体自燃初期的升温现象会被环境高温掩盖,温度监测数据难以区分环境温度与煤体异常升温,进一步增加隐患识别难度。此外,深部矿井气体运移规律复杂,氧化产生的微量有害气体易在局部空间积聚或滞留,难以快速扩散至监测点位,导致气体监测预警滞后,隐患长期处于潜伏状态,逐步发展为明火火灾。

2.2 隐患演化速度快,链式反应显著

深部高温环境为煤体氧化反应提供了充足的热条件,相较于浅部矿井,煤体低温氧化速率大幅提升,隐患从潜伏、升温、自燃到明火爆发的周期大幅缩短。浅部矿井煤体自燃升温过程缓慢,具备充足的处置窗口期,而深部矿井初始环境温度高,煤体氧化产生的热量无法及时散逸,热量持续积聚,形成升温叠加效应,快速突破自燃临界温度,引发自燃火灾。同时,深部矿井普遍存在瓦斯富集、煤尘浓度偏高的工况,火灾初期产生的高温热源,极易引燃周边瓦斯、煤尘,形成火灾、瓦斯、煤尘耦合链式灾害,单一火灾隐患可快速演变为

复合型重大灾害,灾害升级速度快、破坏性强^[2]。

2.3 隐患分布范围广,防控盲区多

深部开采扰动范围广,采空区、破碎围岩、残留煤体、巷道围岩裂隙等多区域均可产生火灾隐患,隐患呈现多点、分散、全域分布的特点。开采过程中形成的遗留煤柱、顶底板破碎煤体、采空区松散煤体,均为自燃高发载体,且各类隐患区域空间分散、形态不规则,无固定分布规律。同时,深部矿井复杂的空间结构形成大量防控盲区,狭小裂隙空间、深部采空区深处、设备遮挡区域无法实现全面监测与有效处置,常规防火手段难以覆盖全域隐患。此外,深部通风不均、漏风通道杂乱,零散隐患可通过漏风持续供氧,在无人干预的情况下持续发育,形成多处隐蔽火源,大幅提升火灾防控的整体难度。

3 深部开采矿井火灾主要隐患类型及形成原理

3.1 煤体自燃火灾隐患

煤体自燃是深部矿井最核心、最高发的火灾隐患,由煤体自身氧化放热特性与深部特殊环境条件耦合形成。深部开采过程中强采动应力扰动直接导致煤体破碎、内部裂隙充分发育,煤体有效比表面积大幅提升,与空气中的氧气充分接触后,发生持续性低温氧化反应并稳定释放氧化热量。在深部高地温、局部通风不畅、热量难以向外散发的密闭受限空间内,氧化产生的热量持续积聚,煤体温度沿时间序列不断升高,煤体氧化反应速率随温度上升持续加快,形成自维持的正反馈升温循环。当煤体温度逐步攀升至自燃临界温度后,会快速发生明火自燃,引发采空区松散煤体自燃、遗留煤柱自燃、巷道围岩裂隙带自燃等不同场景的火灾。同时,深部煤层赋存深度大、变质程度存在特殊分布特征,部分区域煤体自身氧化活性显著偏高,进一步提升了煤层自燃倾向性,是深部矿井自燃火灾多发的内在核心因素^[3]。

3.2 机电设备高温火灾隐患

深部矿井作业环境复杂、设备运行负荷大,机电设备高温过热引发的火灾隐患较为突出。深部开采作业面距离地面供电端远,井下输电线路整体跨度大,作业空间内环境湿度高、煤尘浓度长期处于高位,线路长期处于潮湿多尘的服役环境中,易出现绝缘层老化、表面积尘覆盖、接头接触电阻超标等问题,设备运行过程中持续产生局部高温、放电电火花,可直接引燃周边堆积的煤尘、废弃可燃杂物、高分子可燃支护材料,引发设备类火灾。同时,深部矿井整体通风散热条件差,各类采掘机电设备、连续运输设备长期处于高负荷连续运行状态,设备散热通道受阻,机身运行温度持续超出额定阈

值,易出现轴承过热抱死、电机绕组绝缘击穿烧毁、设备过载起火等故障现象。此外,井下机电设备长期处于高地应力作用的振动环境中,内部零部件易出现异常磨损、结构变形、连接松动等问题,进一步加剧设备故障发热的发生概率,形成持续性机电设备火灾隐患。

3.3 气体耦合燃烧火灾隐患

深部矿井瓦斯赋存条件复杂,瓦斯涌出量大、运移无序,易在密闭空间、巷道顶部、采空区内部积聚,形成高浓度瓦斯区域。井下各类高温热源,包括煤体氧化高温、设备故障高温、摩擦火花、电气火花等,均可引燃积聚瓦斯,引发瓦斯燃烧火灾,严重时诱发瓦斯爆炸,扩大灾害范围。同时,火灾发生后快速消耗周边氧气,产生大量一氧化碳、可燃烟气,可燃气体与空气混合后形成复合型可燃气体环境,持续维持燃烧状态,造成火情难以熄灭、反复复燃。深部矿井通风紊乱、气体扩散困难的特点,使得可燃气体长期局部积聚,极大提升了气体耦合火灾的发生概率与持续时长^[4]。

4 深部开采矿井火灾综合防治技术及应用

4.1 隐蔽火源精准监测预警技术

针对深部开采矿井火灾隐患隐蔽性强、识别难度大的特点,采用多维度、全覆盖的精准监测预警技术,实现隐患早发现、早预警、早处置。(1)依托束管采样与在线气体分析联动的气体监测技术,在采空区回风侧、煤柱裂隙出口、巷道隅角等关键点位布设采样端,对井下一氧化碳、二氧化碳、甲烷、乙烯等煤自燃标志性气体进行连续在线监测,同步采集不同监测点位的气体浓度时序数据,通过气体浓度变化趋势、组分比值动态特征交叉判断煤体氧化阶段与隐蔽火源大致范围,精准识别尚处于潜伏状态的自燃隐患。(2)结合分布式光纤测温与接触式温度传感协同的温度监测技术,在采空区深部、遗留煤柱内部、巷道围岩裂隙带等高危区域预埋全链路测温传感设备,实时监测封闭区域温度连续变化,通过预设的环境温度基线算法剔除井下常规环境高温干扰,精准捕捉煤体异常升温点位。(3)搭配红外探测、瞬变电磁探测等非接触物探技术,按固定周期对井下密闭空间、通风盲区、未知采动裂隙区进行全域扫描探测,定位隐蔽火源与高温异常区域,弥补常规监测手段的覆盖盲区短板,构建气体、温度、物探一体化的多源数据融合监测预警体系,全面提升深部矿井隐蔽火灾隐患的识别精度与响应速度。

4.2 煤体自燃防控与漏风治理技术

聚焦深部煤体自燃核心诱因,通过封堵漏风、抑制氧化、隔绝氧气的技术思路,从源头防控自燃火灾。

(1) 采用注浆封堵技术,按适配深部高应力环境的配比制备稳定浆液,通过预埋管路向采空区深部、围岩卸压裂隙、遗留煤柱内部裂隙定向注入,浆液充分填充破碎煤体与岩体的连通空隙,固化后形成连续致密的封堵层,全面封堵各类隐蔽性漏风通道,切断氧气向松散煤体持续输送的路径,从供氧端阻止煤体低温氧化反应持续推进。(2) 运用凝胶防灭火技术,将适配井下高温环境的高分子凝胶材料精准注入已出现温度异常的高危区域,凝胶材料可在目标区域快速固化填充裂隙,完整包裹松散煤体表面,同时兼具隔氧、隔热、降温、堵漏多重作用,直接中断煤体氧化的链式反应,有效抑制煤体持续氧化升温,杜绝火情处置后复燃现象发生。(3) 采用惰性气体防灭火技术,通过地面制氮系统与井下输送管网,向采空区封闭区域连续注入氮气、二氧化碳等惰性气体,持续置换区域内的氧气,将目标区域氧浓度稳定降至煤体氧化反应临界值以下,营造缺氧抑制环境,从反应条件层面阻断煤体氧化进程,大幅降低深部采空区自燃风险。通过漏风封堵、隔氧降温、惰性抑燃的综合技术组合,全方位管控深部煤体自燃隐患。

4.3 设备管控与火情应急处置技术

针对深部矿井机电设备火灾与多灾种耦合火灾隐患,强化设备常态化防控与火情快速处置技术应用。

(1) 对井下各类机电设备、高压输电线路开展全周期常态化防护处理,定期清理设备表面积尘、易燃杂物,按周期完成设备绝缘性能检测,落实设备防潮、防尘、绝缘等级防护措施,优化高负荷机电设备的散热结构,改善设备长期运行的散热条件,从运行环境层面杜绝设备高温积热起火风险。(2) 严格规范机电设备运行工况,根据设备额定运行参数划定负荷阈值,设置过载预警与强制保护机制,避免设备长期过载、超负荷运行,从运行管控层面降低设备异常故障发热概率。(3) 在火情处置方面,针对深部矿井通风网络复杂、灭火作业难度大的特点,采用精准均压通风调控技术,动态调整井下

不同区域风压分布,均衡采场进回风侧风压,从源头上杜绝定向漏风助燃现象,同时精准控制有毒有害气体扩散范围,为现场灭火作业创造稳定安全的作业环境。搭配快速密闭、细水雾持续降温、高倍数泡沫覆盖等综合灭火技术,对初期火情进行精准靶向处置,快速实现降温、隔氧、熄灭火源,同时阻断可燃气体积聚耦合反应路径,避免火情升级扩散,实现深部矿井火灾的高效防控与快速处置^[5]。

结束语

深部开采矿井火灾防控是一项覆盖设计、运行、应急全流程的系统性工程,其核心难点在于适配深部高地温、高地应力的特殊工况,突破传统浅部防灭火技术的应用局限。本次研究明确了深部矿井火灾隐患的独有特征与生成逻辑,构建了从隐患监测、源头治理到应急处置的完整技术体系,可为现场工程应用提供清晰的技术指引。后续工程实践中,需进一步结合不同矿区的具体地质条件,对各项技术参数进行针对性优化,持续完善多源数据融合的智能防控机制,全面提升深部开采矿井火灾防控的精细化水平,为深部煤炭资源安全高效开采筑牢技术防线。

参考文献

- [1] 类兴财,赵荣学,申新新.深部矿井安全高效开采技术及应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2026,(7):121-123.
- [2] 刘晓东,叶云峡,王鹏.煤矿深部开采条件下冲击地压防控技术应用研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2026,(4):072-075.
- [3] 兰天龙.瞬变电磁法探测矿井采空积水区分布特征应用研究[J].能源与环保,2026,48(2):39-46.
- [4] 刘世杰.深部矿井高温热害治理与降温技术研究[J].新疆钢铁,2026,(2):51-53.
- [5] 郭宪琳.深部开采矿井通风系统阻力优化改造技术研究[J].中国建筑,2026,9(21):69-71.