

多采空区连通区域联合惰化防火技术应用研究

张军喜

甘肃万胜矿业有限公司 甘肃 庆阳 745000

摘要:针对多采空区连通区域漏风复杂、自燃风险高、常规防火技术治理失效的难题,本文剖析了连通区域灾害机理与气体运移规律,明确常规惰化技术短板,构建多介质协同、分区联动的联合惰化防火技术体系。结合矿井工程实践优化技术参数,配套智能监测与动态调控工艺。工程应用表明,该技术可有效降低氧浓度与温度,大幅消除自燃隐患,防控效果优异,具备推广价值。

关键词:多采空区;连通区域;联合惰化防火技术;应用

引言:煤炭开采形成的多采空区连通空间,裂隙发育、漏风路径繁杂,遗煤叠加分布极易诱发自燃灾害,严重威胁矿井安全生产。传统单一注氮、注浆等惰化技术,难以适配复杂连通空间的防火需求,存在惰化不均、有效期短等问题。为攻克该技术难题,本文系统研究连通区域自燃灾害特性,创新构建联合惰化防火技术体系,通过现场工程应用验证技术可行性与实用性,为复杂采空区防火治理提供技术支撑。

1 多采空区连通区域自燃灾害机理及特性分析

1.1 多采空区连通形成机制及空间演化特征

(1)煤层开采覆岩破断、裂隙发育规律与采空区连通形成机理。多煤层或单一厚煤层开采中,采动应力使覆岩产生“三带”(垮落带、裂隙带、弯曲带),裂隙贯通相邻采空区边界煤柱或隔离岩层,形成漏风裂隙网络,为自燃提供氧运移通道。(2)多采空区连通空间结构形态、范围及动态演化特征。连通区域呈不规则“网状一层状”复合结构,范围受采高、层间距及停采线影响,边界动态扩展,随时间呈现“形成—扩展—压实衰减”的阶段演化规律^[1]。(3)连通区域与单一采空区的空间差异及灾害诱因区别。连通区域空间尺度更大、裂隙交叉程度高,且多源遗煤分布叠加,漏风驱动力增强,自燃潜在危险区面积和点火概率显著高于单一采空区。

1.2 连通区域漏风及气体运移规律

(1)多采空区连通工况下漏风通道分布及漏风机理。漏风通道集中于边界煤柱破碎带、裂隙带及未压实矸石区,漏风驱动力源于采动压差与自然风压耦合,呈现“多源汇、多路径”流动特征。(2)风压、通风参数对连通区域漏风强度的影响规律。漏风强度随工作面风压和通风阻力增大呈指数增长,风量分配不均时局部压差突增,成为漏风增强的主导因素。(3)氧气、一氧化碳等气体在连通区域的运移扩散特征。氧气沿主漏风通

道渗流并向遗煤区扩散,浓度呈梯度降低;CO随漏风流迁移,表现为滞后性和积聚效应,高浓度区可指示深部氧化隐患。

1.3 连通区域遗煤自燃特性及危险区域划分

(1)多采空区连通区域遗煤赋存特征及自燃基础特性。遗煤呈“多点堆积、薄厚不均”分布,粒度混杂,比表面积增大,自燃倾向性增强,低温氧化耗氧速率显著上升。(2)煤自燃氧化升温、气体析出动态变化规律。升温过程表现为“缓慢氧化—加速升温—快速自燃”三个阶段,气体析出具有明显温度阈值(CO、C₂H₄等),可用于早期预警。(3)基于“三带”理论的连通区域自燃危险区域精准划分。结合漏风强度、氧浓度与遗煤厚度,将连通区域划分为散热带、自燃带和窒息带,并利用数值模拟与现场测点融合,实现危险区域动态修正与精准圈定。

2 多采空区连通区域联合惰化防火技术体系构建

2.1 常规惰化防火技术适用性分析

(1)单一注氮、注浆、注惰性气体防火技术原理及优势。注氮通过稀释氧浓度抑制煤氧复合,来源广、成本低;注浆充填裂隙包裹遗煤,隔绝氧气并吸热降温,适于裂隙发育区;注惰气(如CO₂)利用高密度特性沉于低洼处,形成稳定惰化层。三项技术常规采空区防火成效显著。(2)常规技术在多采空区连通工况下的短板与局限性。连通区漏风通道纵横交错,单一注氮难以形成有效惰化带,气体沿裂隙快速逸散,有效期大幅缩短;注浆浆液流失严重,充填覆盖有限且易堵塞裂隙,反而加剧气流绕流;单一惰气受连通空间增大影响,稀释维持难度成倍增加,多点漏风致浓度场严重不均,难以全域控氧。常规“单点注入、整体依赖”模式失效风险显著升高^[2]。(3)复杂连通区域惰化防火核心技术需求。亟需打破单一介质、单一区域注入模式,核心需求:一

是分区差异化惰化,依空间特征和危险等级分类防控;二是多介质协同,互补利用不同惰化介质特性;三是动态联动调控,据监测数据实时调整参数,实现“按需注惰、精准控氧”。

2.2 联合惰化防火技术机理研究

(1) 分区惰化、联动控氧的协同防火机理。将连通区域按危险程度划分为重点防控区、一般防控区和监测过渡区,分别配置注氮、注浆、注 CO_2 等差异化方案,通过区域间联动控制实现整体氧浓度梯次降低,利用压差调控引导惰气向高风险区定向运移,形成“分区施策、整体联动”的协同惰化效应。(2) 惰性气体在连通采空区的填充、扩散、封堵作用机制。惰气注入后首先填充注入点附近孔隙空间,随后在浓度梯度和压力驱动下沿漏风通道扩散迁移,高密度惰气(CO_2)在低位积聚封堵氧气入侵路径,低密度惰气(N_2)在高位形成气幕屏障,双重机制抑制氧气向遗煤堆体深部渗透。(3) 联合惰化抑制遗煤自燃、阻断灾害蔓延的作用路径。联合惰化通过氧浓度整体压低抑制煤初始氧化升温,通过惰气持续冲刷带走积聚热量,通过浆液固结封堵阻断漏风补给,三者共同作用切断“供氧—蓄热—自燃”链条,从而阻止局部火源向相邻区域灾害蔓延^[3]。

2.3 联合惰化技术方案与参数优化

(1) 多采空区分区惰化布局方案设计。依据连通关系和漏风通道探测结果,设计“高位裂隙带埋管连续注 N_2 +低位遗煤区埋管间歇注 CO_2 +边界破碎区注浆封堵”的组合布局方案。各采空区独立设置注惰分支管路,通过主干管网并联汇接实现集中供惰与分区调控,注惰孔间距根据有效扩散半径设定。(2) 惰化介质选型、注惰流量、压力及布设参数优化。建立连通区域三维数值模型,模拟不同介质组合及注入参数下的浓度场分布,确定最优介质配比(N_2 : CO_2 体积比)和临界注入流量阈值。优化注惰孔深度、倾角及孔距布设参数,确保惰化覆盖半径重叠系数不小于1.2,注惰压力以不破坏覆岩结构为上限约束条件。(3) 多区域联动惰化时序控制方案优化。制定“先高危后一般、先中心后边缘”的分时序注入策略,合理设置各区域注惰起始时间和持续时长,利用时序错峰规避惰气短路和资源竞争。建立阀门组远程集中控制系统,实现各区域注惰量按需动态分配,整体惰化效率达到最大化。

2.4 联合惰化配套辅助防控技术

(1) 连通区域漏风封堵配套技术。采用高分子快速膨胀堵漏材料对边界煤柱大裂隙进行喷涂封堵,配合超细水泥基浆液对深部漏风通道进行压力注浆充填,形成

“浅层密封+深层充填”的组合封堵工艺,有效降低无效漏风量,为联合惰化营造良好的空间密闭条件。(2) 采空区气体、温度智能监测预警技术。布置分布式光纤测温系统覆盖关键区域温度场,并设置多组束管监测点连续采集 O_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 等气体浓度数据,通过工业环网传输至地面监控中心。结合机器学习算法建立自燃早期预警模型,实现异常升温点的自动识别与定位^[4]。

(3) 惰化效果动态调控辅助工艺。构建基于监测数据的惰化效果综合评价指标体系(包括氧浓度达标率、 CO 抑制率、温度稳定度等),开发动态调控决策软件,根据评价结果通过远程执行机构实时调整各区域注惰流量和时序参数,形成“实时监测—效果评价—参数优化—指令执行”的闭环调控工艺,保障联合惰化体系持续处于最优运行状态。

3 工程应用与效果验证

3.1 工程概况

(1) 试验矿井工作面地质条件、开采工艺参数。试验矿井主采煤层为二叠系山西组2号煤层,平均厚度5.8m,倾角 $3^\circ\sim 8^\circ$,采用综采放顶煤采煤工艺,采高3.2m,放煤高度2.6m,日推进度约4.5m。煤层直接顶为泥岩,厚度6~8m,基本顶为细砂岩,厚度12~15m,具有典型的“软—硬”组合覆岩结构。工作面走向长度1520m,倾向长度220m,采用U型通风方式,配风量约 $1800\text{m}^3/\text{min}$,采空区自然发火倾向性等级为I类极易自燃。(2) 多采空区连通分布特征及自燃灾害现状。试验区域涉及相邻三个已采工作面和当前回采工作面,通过联络巷及边界煤柱破碎带形成空间连通,连通范围约 $2.8\times 10^5\text{m}^2$,遗煤分布总面积达 $4.6\times 10^4\text{m}^2$ 。历史监测数据显示,该区域 CO 浓度频繁超限,最高达186ppm,局部采空区温度较围岩温度高出 $15\sim 22^\circ\text{C}$,已出现三次高温异常点,自燃灾害处于加速发展阶段。(3) 现场防火治理难点及工程试验条件。主要治理难点为连通空间范围广、漏风路径复杂,常规单一注氮无法实现有效覆盖。现场具备地面集中制氮机组($1200\text{m}^3/\text{h}$)和井下移动注浆系统,已铺设 $\Phi 159\text{mm}$ 主管路网约3.2km,监测系统配置齐全,具备工程试验实施条件。

3.2 现场施工工艺与实施方案

(1) 联合惰化系统管路布设、设备安装施工工艺。主干管路利用现有 $\Phi 159\text{mm}$ 注氮主管,在各采空区接口处增设分支控制阀组,支管采用 $\Phi 89\text{mm}$ 无缝钢管沿回风巷和瓦斯尾巷敷设至预设注惰点。施工顺序为“主干贯通→支管连接→钻孔对接→阀组调试”,注浆管路与注气管路分离布置,施工工期约12d。(2) 分区、分段

联合惰化现场实施流程。按危险等级划分为3个A级高危区和2个B级一般区,实施“A级连续注N₂+间歇补CO₂、B级按需注惰”的分区方案。施工流程分为三个阶段:第一阶段(1~7d)对高危区集中强化注惰,第二阶段(8~21d)转入分区维持性注惰与注浆封堵配合,第三阶段(22~30d)进入动态调控运行阶段^[5]。(3)施工过程安全管控及质量控制措施。注惰区域内设置警戒标识,严禁人员长时间停留;施工人员佩戴氧气呼吸器并携带多参数气体检测仪,每2h轮换一次。质量控制采用“注入参数三检制”(班检、抽检、专检),确保注惰流量偏差不超过设定值的±5%。

3.3 应用效果监测与数据分析

(1)采空区氧气浓度、温度、标志性气体动态监测分析。实施联合惰化后30d内,采空区平均氧浓度由最初的18.6%稳步降至7.2%,A级高危区氧浓度控制在6.5%以下。区域平均温度由42.6℃降至31.8℃,降幅达10.8℃。CO浓度由186ppm降至18ppm,降幅达90.3%,标志性气体指标全面好转。(2)多区域惰化覆盖范围及均匀性效果分析。通过对13个监测点氧浓度数据的空间插值分析,惰化有效覆盖面积达 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^2$,整体覆盖率为89.3%,A级区覆盖率提升至95.6%。各监测点氧浓度变异系数由实施前的0.42降至0.18,惰化均匀性显著改善,未出现明显惰气短路现象。(3)煤自燃隐患消除及灾害防控效果验证。30d试验期间未出现CO超限报警和温度异常事件,高温隐患点全部消除。经程序升温对比实验验证,处理区域遗煤在45d内未见氧化升温趋势,联合惰化体系在持续运行状态下具备长期抑制自燃的能力,灾害防控目标全面达成。

3.4 技术应用效益分析

(1)安全效益:杜绝采空区自燃火灾,提升矿井防灾能力。联合惰化实施期间及后续跟踪期内,连通区域未发生任何自燃火灾事故,矿井采空区火灾风险等级由

极高风险降低至低风险。该技术体系在矿井应急预案中成功应用,为安全生产提供了坚实保障。(2)经济效益:降低防火治理成本,减少停产损失。与传统单一注氮方案相比,联合惰化通过精准按需注惰,氮气消耗量减少约32%,综合治理成本较常规方案降低约28%。因火灾隐患带来的停产风险由年均15d减少至近乎为零,有效保障了工作面持续回采的经济收益。(3)技术效益:完善复杂采空区防火防控技术体系。项目构建的“分区联动+多介质协同+动态调控”联合惰化技术体系,成功解决了多采空区连通工况下防火技术难题,为同类复杂采空区自燃防治提供了可复制、可推广的工程范例和技术标准。

结束语

本文完成了多采空区连通区域自燃机理分析、联合惰化技术构建与工程应用验证,形成了分区施策、多介质协同的精准防火技术体系。实践证实,该技术可高效治理采空区自燃隐患,降低防火治理成本,提升矿井防灾减灾能力。研究完善了复杂采空区防火技术体系,可为同类高自燃风险矿井灾害治理提供参考,后续可进一步优化智能调控算法,提升技术智能化防控水平。

参考文献

- [1]司俊鸿,王攀昊,梁红立.窄煤柱复合采空区压注CO₂惰化参数优化研究[J].矿业安全与环保,2024,51(02):68-73.
- [2]张铎,王帅豪,文虎.采空区遗煤自燃隐蔽火源探查及复合惰化防控技术[J].煤矿安全,2024,55(11):108-114.
- [3]李海涛,杨胜强,徐全.多采空区连通漏风通道演化及分区协同惰化防火技术[J].中国安全科学学报,2023,33(07):116-123.
- [4]王超,郭军,金永飞.复杂连通采空区氮气-二氧化碳耦合惰化防灭火技术[J].煤炭科学技术,2023,51(09):192-199.
- [5]谷廷华,贾凯玥,王雷.沿复杂连通采空区综采工作面综合防灭火技术应用[J].矿山工程,2024,12(01):19-28.