

# 浅埋煤层综采工作面隅角防灭火技术体系构建与实践

张宇

乌海市路天矿业有限责任公司, 中国·内蒙古 乌海 016000

**摘要:** 浅埋煤层综采工作面隅角区域因通风死角与漏风通道并存而成为自然发火的高发部位, 传统单一防灭火手段难以应对其复杂的热动力学环境。以内蒙古某矿 041701 工作面为工程背景, 系统剖析隅角区域的漏风积热机制与煤氧复合反应动力学特征, 在此基础上构建涵盖注浆堵漏、注氮惰化、阻化剂喷洒、通风调控及智能监测的多维度防灭火技术体系。现场实践表明该技术体系能够将隅角煤体温度控制在临界自燃温度以下, CO 浓度峰值较实施前显著降低, 有效遏制了自然发火隐患的演化进程, 为类似地质条件下的浅埋煤层防灭火工程提供了可资借鉴的技术方案。

**关键词:** 浅埋煤层; 综采工作面; 隅角防灭火; 注氮惰化; 智能监测

## Construction and Practice of Corner Fire Prevention and Extinguishing Technology System for Fully Mechanized Mining Face in Shallow Buried Coal Seam

Zhang Yu

Wuhai Lutian Mining Co., Ltd., China Inner Mongolia Wuhai 016000

**Abstract:** The corner area of the fully mechanized mining face in shallow buried coal seam has become a high-incidence zone of spontaneous combustion due to the coexistence of ventilation dead zones and air leakage channels, and traditional single fire prevention and extinguishing methods are difficult to cope with its complex thermodynamic environment. Taking the 041701 working face of a coal mine in Inner Mongolia as the engineering background, this paper systematically analyzes the air leakage and heat accumulation mechanism as well as the kinetic characteristics of coal-oxygen composite reaction in the corner area. On this basis, a multi-dimensional fire prevention and extinguishing technology system including grouting for leakage blocking, nitrogen injection for inerting, inhibitor spraying, ventilation regulation and intelligent monitoring is established. Field practice shows that this technology system can control the temperature of the coal in the corner area below the critical spontaneous combustion temperature, and the peak CO concentration is significantly lower than that before implementation, which effectively curbs the evolution process of spontaneous combustion hazards. It provides a reference technical scheme for fire prevention and extinguishing projects of shallow buried coal seams under similar geological conditions.

**Keywords:** Shallow buried coal seam; Fully mechanized mining face; Corner fire prevention and extinguishing; Nitrogen injection inerting; Intelligent monitoring

## 0 引言

浅埋煤层的开采扰动在地表与采空区之间形成贯通裂隙, 大气经由这些裂隙向采空区持续供氧, 为遗煤自燃创造了充裕的氧化条件。综采工作面的两端隅角因几何构型与通风网络的双重约束而呈现出低风速、高漏风、易积热的特征, 该区域的火灾风险远高于工作面中部, 然而现有防灭火技术多针对采空区整体而缺乏对隅角这一特殊部位的精准干预。内蒙古部分矿区浅埋煤层埋深普遍不足百米, 覆岩结构松散且含水层薄弱, 采动裂隙发育迅速并与地表沟通, 漏风强度可达深埋煤层的数倍乃至十数倍, 隅角区域的氧浓度长期维持在煤自燃所需的临界区间, 自然发火

周期被大幅压缩。

## 1 浅埋煤层隅角火灾成因与特征分析

### 1.1 隅角区域通风与瓦斯积聚机制

隅角区域的通风状态受工作面推进速度、巷道断面与采空区垮落形态等因素共同制约, 其流场结构呈现显著的非稳态特征。进风隅角处主风流动压向静压转换不充分而形成局部涡流区, 回风隅角处采空区漏风与回风流交汇产生二次扰动, 风流滞留时间可达工作面中部的数倍<sup>[1]</sup>。漏风通道使采空区深部低氧气体与隅角区域发生置换, 氧浓度梯度驱动分子扩散与压差驱动的对流漏风叠加, 致使隅角煤体始终处于氧化升温的有利环境。低风速条件下瓦

斯稀释能力下降,解吸瓦斯在隅角形成局部高浓度区,煤体升温又加快瓦斯解吸速率,构成瓦斯超限与自然发火的复合灾害风险。

### 1.2 煤层自燃倾向性与发火条件研究

煤的自燃倾向性是决定发火难易程度的内在因素,工作面煤层经程序升温试验测定为Ⅱ类自燃煤层,自燃倾向性等级属于中等偏高。煤氧复合反应的动力学参数揭示了自燃本质,活化能越低反应越易启动,该煤层低温氧化阶段的表现活化能处于易自燃煤种的典型区间。隅角区域漏风强度恰好落入自燃“窗口”范围,既非过强而将热量吹散,亦非过弱而使氧化反应受限,这种临界状态使隅角成为最敏感的发火部位。端头支架与煤壁之间的三角煤区域回收率偏低,遗煤堆积厚度往往超出设计值,为自燃提供了充足的可燃物基础。

### 1.3 隅角温度场与烟气扩散规律

隅角温度场的分布与演化特征对发火预警具有直接指导意义,红外热成像监测显示隅角区域存在明显高温核心区,其位置通常距工作面端头数米并深入采空区方向,煤体表面温度可较周边高出十余摄氏度<sup>[2]</sup>。温度场形成机制可从热量守恒角度解析,煤氧化放热、漏风对流散热与围岩传导散热构成热量收支三大分量,当放热速率持续超过散热速率时煤体温度呈指数型攀升。CO作为煤低温氧化标志性产物,其浓度变化先于温度异常出现,隅角产生的CO在漏风驱动下向回风巷扩散,监测点位置需充分考虑传输滞后效应,CO与CO<sub>2</sub>比值随氧化程度加深呈规律性变化可作为判断发火阶段的辅助指标。

## 2 隅角防灭火关键技术体系构建

### 2.1 注浆、注氮与阻化剂综合防灭火技术

注浆堵漏是切断漏风供氧通道的根本措施,041701工作面采用超前预注浆与滞后追注浆相结合的方案,预注浆在工作面推进前对隅角区域的顶板裂隙进行充填封堵,追注浆则针对回采扰动后新生裂隙实施二次封堵,注浆材料选用粉煤灰基复合浆液,其流动性与固结强度经配比优化后能够适应裂隙的复杂形态。注氮惰化的作用在于降低采空区与隅角区域的氧浓度,使其低于煤自燃所需的临界阈值,采空区埋管注氮与隅角定点注氮相互配合,埋管随工作面推进持续释放氮气形成惰性气体覆盖层,定点注氮则针对监测发现的高温异常区进行精准惰化。阻化剂喷洒旨在抑制煤表面的氧化活性,氯化镁基阻化剂通过在煤表面形成盐膜而阻断氧分子的化学吸附,该措施主要应用于隅角遗煤裸露区域与支架立柱后方的三角煤地带,喷洒周期

根据煤体温度监测结果动态调整。三种措施的协同效应优于任何单一手段,注浆降低漏风量从而减少氧气供给,注氮稀释残余氧气进一步压缩自燃条件,阻化剂则从反应动力学层面延缓氧化进程<sup>[3]</sup>。

### 2.2 隅角区域通风系统优化与调控方法

通风系统的优化需在保障工作面供风量与有效抑制隅角漏风之间寻求平衡。均压通风通过调节进回风巷道的风阻使工作面两端压差趋近于零,从而消除压差驱动漏风,041701工作面在回风巷设置可调风窗,根据隅角区域的压差监测数据实时调节风窗开度,将进回风隅角的压差控制在许可范围内。隅角局部增阻措施作为均压通风的补充,在支架尾梁后方设置挡风帘与喷涂封闭剂,阻断采空区与工作面之间的直接漏风通道。通风调控的难点在于动态响应,工作面推进过程中顶板垮落形态持续变化,漏风通道的位置与强度随之改变,静态的风阻设置难以适应这种变化,基于压差传感器反馈的自动调控系统能够实现风窗开度的实时优化。通风参数的调整还需兼顾瓦斯治理的要求,过度降低工作面风量虽可减少隅角漏风,却可能导致瓦斯积聚风险上升,两者的协调需要在数值模拟与现场试验的基础上确定最优工况。

### 2.3 智能化监测与自动灭火系统集成

智能化监测系统构成防灭火技术体系的感知中枢,其核心功能在于实现发火征兆的早期识别与定位。041701工作面在隅角区域布置了分布式光纤测温系统与多点气体传感器阵列,光纤测温沿支架底座铺设,能够连续获取隅角煤体的温度分布曲线,温度分辨率达零点几摄氏度,气体传感器则实时监测CO、O<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>的浓度变化。监测数据经井下环网传输至地面监控平台,预警算法基于温度梯度与CO生成速率的联合判据进行分级报警,当温度或CO浓度超过设定阈值时,系统自动触发相应的防灭火响应程序。自动灭火系统与监测平台实现了信息层面的深度集成,注氮管路与喷淋管路的电磁阀接入控制系统,一旦确认隅角区域进入危险状态,无需人工干预即可启动注氮或喷淋作业,响应时间较人工操作缩短一个数量级,这对于控制火势在早期阶段至关重要<sup>[4]</sup>。

### 2.4 防灭火材料与装备选型与应用

材料与装备的选型直接关系到防灭火措施的实施效果与经济成本。注浆材料的选型需考量流动性、固结时间与封堵强度三项核心指标,041701工作面经过多轮配比试验最终确定了水泥与粉煤灰以特定比例混合并添加速凝剂的配方,该配方在满足泵送要求的前提下能够在数小时内达

到设计强度。注氮装备选用膜分离制氮机组,产氮纯度可达较高水平且运行成本低于深冷制氮与变压吸附制氮,单台机组的产氮能力能够满足隅角与采空区的同步注氮需求。阻化剂的有效成分与载体的选型同样需要针对具体煤种进行适配,氯化镁虽然阻化效果确切,但其吸湿性可能对设备产生腐蚀,需在溶液中添加缓蚀剂加以抑制。传感器的选型应重点关注量程范围、响应时间与抗干扰能力,井下高湿高尘环境对传感器的可靠性提出了苛刻要求,电化学CO传感器的交叉敏感问题需通过算法补偿或选用高选择性元器件加以解决。

### 3 防灭火技术体系的现场实践与效果评估

#### 3.1 技术体系在典型浅埋煤层工作面的应用

041701工作面走向长度约七百一十四米,倾向长度约二百九十九米,煤层平均厚度约1.21米。技术体系的实施分为超前准备与伴随回采两个阶段,超前准备阶段完成了隅角区域预注浆孔的施工与注浆材料的储备,注氮管路及监测系统同步铺设到位;伴随回采阶段则根据推进进度与监测数据动态调整各项措施的实施强度。进风隅角因其紧邻进风巷而氧气供应更为充裕,被列为重点防控对象,定点注氮管路直接引至该区域并保持连续注氮状态,阻化剂喷洒频次亦高于回风隅角。回采过程中曾出现两次CO浓度异常升高的情况,第一次发生在工作面推进至某处地质构造带附近,顶板破碎导致漏风加剧,监测系统及时发出预警,现场随即加大注氮流量并实施补充注浆,CO浓度在数小时内回落至正常水平;第二次发生在回采中后期工作面推进速度放缓阶段,遗煤在采空区停留时间延长,通过缩短阻化剂喷洒周期与提高注氮纯度成功予以控制。

#### 3.2 防灭火效果监测与数据分析

防灭火效果的评价需要依据多维度的监测数据进行综合判断。隅角区域煤体温度的变化趋势是最直观的效果指标,技术体系实施前的监测数据显示进风隅角煤体最高温度一度接近五十摄氏度,实施后稳定控制在三十余摄氏度,始终低于该煤种的临界自燃温度。CO浓度的变化同样反映了技术体系的有效性,回风流中CO浓度的峰值较实施前大幅降低,浓度波动的幅度亦显著收窄,表明煤体氧化反应强度得到有效抑制。氧浓度的监测数据则从另一侧面印证了注氮惰化与注浆堵漏措施的效果,隅角区域氧浓度由实施前的较高水平降至较低水平,已低于煤持续自燃所需的最低阈值<sup>[5]</sup>。数据分析还揭示了各项措施之间的协同关系,注浆实施后漏风量的下降为注氮创造了有利条件,使得相同注氮流量下能够获得更低的氧浓度,这种正反馈

效应使技术体系的整体效能超出了各单项措施效果的简单叠加。

#### 3.3 技术经济性分析与优化建议

技术经济性是决定防灭火技术体系能否推广的关键考量之一。041701工作面防灭火措施的直接成本包括材料费用、设备折旧与人工投入三部分,其中注浆材料与氮气的消耗量占据主导地位。成本效益分析需将防灭火投入与潜在火灾损失进行对比,浅埋煤层工作面一旦发生自然发火,不仅面临封闭工作面的直接经济损失,还可能因火区蔓延而影响相邻工作面的正常生产,间接损失往往数倍于直接损失。技术体系的优化应着眼于降低材料消耗与提升实施精准度两个方向,注浆材料的优化配比可在保证封堵效果的前提下减少水泥用量,注氮的间歇控制策略可根据氧浓度反馈动态调节注氮流量,避免过度注氮造成的资源浪费。监测系统的智能化升级能够缩短预警响应时间,使防灭火措施更加精准地作用于隐患萌芽阶段,从而减少后续高强度处置的需求。

#### 3.4 体系推广适用性与可持续改进路径

技术体系向其他浅埋煤层工作面推广时需充分考虑地质条件与开采工艺的差异性。埋深、覆岩结构、煤层自燃倾向性等级、工作面几何尺寸与推进速度均会影响隅角火灾风险的大小与防灭火措施的选型,照搬041701工作面的方案未必能取得同等效果。推广应用前应开展隅角区域漏风与温度场的专项测试,在此基础上对技术方案进行适应性调整,注浆孔位与间距需根据裂隙发育特征重新设计,注氮流量需根据漏风强度重新核算。可持续改进的路径应聚焦于监测预警算法的迭代升级与新型防灭火材料的研发应用,基于机器学习的预警模型能够从历史数据中提取更丰富的发火特征,提升预警的准确率与提前量;新型凝胶泡沫材料兼具堵漏与降温的双重功能,有望在未来的防灭火工程中发挥更大作用。技术体系的完善是一个动态迭代的过程,来自现场实践的反馈信息应持续纳入技术方案的优化闭环之中。

### 4 结语

浅埋煤层综采工作面隅角区域的防灭火难题根源于其特殊的通风与漏风条件,单一技术手段难以实现有效控制,必须构建多措并举的综合技术体系。041701工作面的实践表明,注浆堵漏、注氮惰化、阻化剂喷洒、通风调控与智能监测的有机组合能够将隅角区域的自然发火风险控制于可接受范围内,关键在于各项措施的协同配合与动态优化。技术体系的推广应用需因地制宜地进行适应性调整,持续

的技术改进与管理完善是确保防灭火效果长期稳定的根本保障。

**参考文献:**

[1] 潘荣锟, 刘伟, 李怀珍等. 浅埋近距离煤层群工作面上隅角贫氧致因及综防技术[J]. 煤炭科学技术, 2021,49(2):102-108.

[2] 迟国铭, 张立辉, 李斌. 浅埋深近距离煤层群大采高综采工作面隅角低氧防治技术[J]. 煤矿安全, 2018,49

(A01):22-26.

[3] 张磊. 浅埋近距离煤层群开采工作面火灾综合防治技术[J]. 能源与节能, 2025(8):191-193.

[4] 姚海飞, 赵允信, 李佳慧等. 浅埋煤层智能均压防灭火系统设计[J]. 工矿自动化, 2025,51(9):10-17+24.

[5] 杨夺. 浅埋厚煤层综采工作面采空区自燃“三带”划分[J]. 陕西煤炭, 2024,43(8):46-51.