

Failure mechanism and prevention of sealing holes in low-permeability coal seam gas extraction boreholes

Lei Guo

Shanxi Shiquan Coal Industry Co., Ltd., Changzhi, Shanxi, 046200, China

Abstract

Low permeability coal seam gas extraction is an important technology for preventing and controlling coal mine gas disasters and ensuring safe production in mines. The quality of drilling and sealing directly affects the extraction efficiency and operational safety. The failure of sealing holes causing gas leakage and sudden decrease in extraction concentration has become the main obstacle to the treatment of low permeability coal seam gas. This article systematically analyzes the current application status of sealing technology based on the geology and extraction conditions of low-permeability coal seams. Starting from several aspects such as geological conditions disturbance, deterioration of sealing materials, construction process defects, and imbalance of extraction parameters, the failure mechanism of sealing technology is explored. Based on mechanism analysis, prevention and control measures are proposed from four aspects: material optimization, process improvement, monitoring and early warning, and management strengthening, hoping to have important practical significance for improving the quality and efficiency of coal mine gas control.

Keywords

low breathability; Coalbed methane; Failure of sealing of extraction drilling holes; mechanism; prevention and control

低透气性煤层瓦斯抽采钻孔封孔失效机理与防控

郭磊

山西石泉煤业有限责任公司, 中国 · 山西 长治 046200

摘要

低透气性煤层瓦斯抽采是防治煤矿瓦斯灾害、保证矿井安全生产的重要技术, 钻孔封孔质量好坏直接影响抽采效率和作业安全。封孔失效造成瓦斯泄漏、抽采浓度突然降低等问题, 已经成了低透气性煤层瓦斯治理的主要障碍。本文以低透气性煤层地质及抽采工况为背景, 对封孔技术的应用现状进行系统分析, 从地质条件扰动、封孔材料劣化、施工工艺缺陷、抽采参数失衡等几个方面入手, 探究封孔技术失效机理。根据机理分析, 从材料优化、工艺改进、监测预警、管理强化四个方面提出防控措施, 希望对煤矿瓦斯治理提质增效有重要的现实意义。

关键词

低透气性; 煤层瓦斯; 抽采钻孔封孔失效; 机理; 防控

1 引言

我国煤层赋存条件复杂, 低透气性煤层占到 60% 以上, 低透气性煤层瓦斯吸附性强, 运移困难, 瓦斯突出、爆炸风险高。瓦斯抽采是源头治理手段, 其效果好坏直接影响矿井的安全。钻孔封孔是瓦斯抽采系统的重要一环, 用封堵钻孔周围裂隙的方式来阻止空气进入、防止瓦斯泄漏, 保证抽采浓度和效率。但是低透气性煤层地质应力大、裂隙发育不均, 抽采过程中应力动态变化, 封孔失效现象时有发生, 据不完全统计, 我国矿井抽采钻孔平均失效周期不到 3 个月, 近 40% 的钻孔因为封孔失效不能达到设计抽采效果。封孔失效不但会增大治理成本, 而且还会增加安全隐患, 因此深

入研究封孔失效的机理并制定防控措施, 对解决低透气性煤层瓦斯治理难题有迫切的现实需求。

2 低透气性煤层瓦斯抽采钻孔封孔技术与应用现状

2.1 封孔材料类型及应用局限

目前低透气性煤层瓦斯抽采钻孔封孔材料主要有两类, 传统材料和新型复合材料。传统材料以水泥基材料为主, 包括普通硅酸盐水泥、膨胀水泥等, 成本低、来源广, 在中小矿井中应用较多。但是水泥基材料凝结时间长、早期强度低、抗渗性差, 在高应力、高含水率的低透气性煤层中, 容易因为裂隙发育而造成瓦斯窜漏。新型复合材料如聚氨酯泡沫、环氧树脂基材料等, 固化速度快、粘结强度高、膨胀性好, 可以很好地填充微小裂隙, 近几年来在高风险矿井中得到推广应用。但是新型材料成本较高, 部分聚氨酯材料耐老化性

【作者简介】郭磊 (1988-), 男, 中国山西长治人, 本科, 中级注册安全工程师, 从事安全管理与瓦斯治理研究。

差、高温下易分解,在长期抽采工况下稳定性不够好,不能大范围使用^[1]。

2.2 主流封孔工艺实施现状

目前应用较为广泛的封孔工艺有套管注浆封孔、两堵一注封孔、全程注浆封孔、囊袋式封孔等。套管注浆封孔为早期常用工艺,套管插入后注入水泥浆封堵,工艺简单但封孔深度浅,对裂隙发育的低透气性煤层适应性差,现已被改良工艺所取代。两堵一注封孔凭借操作简单、封孔效果好等优势成为目前的主流工艺,它通过两端封堵中间注浆填充裂隙,但是当钻孔孔径不规则、孔壁不平整时容易出现封堵不严的问题^[2]。全程注浆封孔可以实现钻孔全深度封堵,适应复杂地质条件,但是工艺复杂、施工周期长、成本高,只在高突矿井关键区域使用。囊袋式封孔依靠膨胀囊袋来完成快速封堵,效率高,但是囊袋与孔壁的粘结性较差,长期抽采后容易产生界面泄漏。

2.3 封孔质量监测技术发展情况

封孔质量检测是发现封孔失效隐患的重要手段,目前有直接检测和间接检测两种方法。直接检测技术主要有钻孔成像监测、气密性检测等,钻孔成像监测通过高清摄像头直接观察孔壁裂隙和封孔材料填充情况,可以准确找到缺陷位置,但是受钻孔深度和孔径限制,监测范围小。气密性检测就是向封孔段通入气体,测量压力变化来判断密封性能,操作简单但不能定位到具体的失效点。间接检测技术主要采用抽采参数监测,即通过实时监测瓦斯浓度、流量、负压等参数的变化,来间接判断封孔质量的好坏,抽采浓度突然降低通常就表明封孔失效。目前监测技术自动化程度低、数据滞后,大多数矿井还沿用人工定期检测的方式,不能及时对失效隐患发出预警^[3]。

2.4 不同矿区应用效果差异分析

由于地质条件、技术水平、管理制度的不同,各矿区封孔效果差别很大。晋陕蒙等西部矿区低透气性煤层埋藏较浅、地质构造简单,用两堵一注工艺配合聚氨酯材料封孔,平均抽采浓度可达到30%以上,失效周期约为6至8个月。淮南、淮北东部煤田煤层埋藏深、地应力高、裂隙发育复杂,传统封孔方法效果不好,平均抽采浓度只有15%左右,失效周期短,只有2到3个月。一些高突矿区采用全程注浆封孔、自动化监测技术之后,封孔质量得到提高,抽采浓度一直保持在40%以上,失效周期延长至12个月以上。差异说明封孔效果要根据矿区地质条件有针对性地设计技术方案,不能套用已有的技术。

3 低透气性煤层瓦斯抽采钻孔封孔失效机理分析

3.1 地质条件动态变化诱发失效机理

低透气性煤层的地质条件比较复杂且动态变化,它属于造成封孔失效的主要自然因素。一方面由于煤层埋藏深,

地应力高,钻孔施工破坏了原有的应力平衡,孔周形成卸压区和应力集中区,应力重新分布时容易产生新的裂隙,这些裂隙穿过封孔段时,就形成了瓦斯泄漏通道。另一方面煤层含水率的变化会加剧失效,低透气性煤层一般都伴随高含水率,水渗流会软化封孔材料和煤体界面,降低粘结强度,水分蒸发造成煤体收缩,产生界面裂隙。另外地质构造中断层、节理发育的地方,钻孔容易出现塌孔、孔径不规则等问题,造成封孔材料填充不密实,先天就存在密封缺陷,在抽采过程中逐渐发展成失效通道^[4]。

3.2 封孔材料性能劣化失效机理

封孔材料性能劣化是封孔失效的主要内因因素,主要是物理力学性能衰减和化学稳定性降低。水泥基材料在长期使用中,由于碳化作用以及水化产物的分解,其强度会降低,低透气性煤层中高浓度瓦斯和地下水共同作用,使水泥石结构酥化,产生微裂隙。聚氨酯材料虽然初期粘结性好,但是瓦斯抽采过程中,煤体释放出的酸性气体和水分会引起化学腐蚀,使材料老化、变脆,失去弹性、密封性。另外材料热稳定性不好也容易造成失效,抽采时煤层温度变化、瓦斯解吸放热,使封孔材料不断发生热胀冷缩,产生热应力裂纹,裂纹扩展后形成泄漏通道,封孔系统整体失效^[5]。

3.3 施工工艺缺陷导致失效机理

施工工艺缺陷是造成封孔失效的主要人为因素,从钻孔施工到封孔完成整个过程都有体现。钻孔施工阶段钻孔偏斜、孔径波动过大或者孔壁不平整,会造成封孔材料与孔壁接触不紧密,形成间隙;钻渣清理不彻底,残留的煤渣会削弱封孔材料与煤体的粘结力,成为界面泄漏的薄弱环节。封孔阶段两堵一注工艺中注浆压力控制不当,压力过低造成裂隙填充不密实,压力过高容易压裂煤体产生新的裂隙;囊袋式封孔中囊袋膨胀不充分或者定位不准,不能有效封堵关键裂隙。封孔深度不够也是常见的缺陷,低透气性煤层瓦斯容易从深部裂隙窜漏出来,封孔深度不能覆盖主要裂隙带时,瓦斯绕流泄漏,直接导致抽采失效。

3.4 抽采参数不合理加剧失效机理

瓦斯抽采参数设置不合理,会增大封孔系统失效的程度,造成“失效、抽采效果下降、进一步失效”的恶性循环。抽采负压过大,是主要的原因。当负压过大的时候会引发孔周煤体产生剧烈的气体渗流现象,加速煤体水分蒸发,造成煤体干缩裂隙产生,同时负压差又会使封孔材料和煤体界面产生剥离现象,造成泄漏通道产生。抽采流量波动过大也会影响封孔稳定性,流量突然增大的时候会对封孔段产生冲击荷载,使封孔材料产生疲劳损伤;流量突然减小的时候,孔内压力变化容易造成裂隙开合,破坏密封结构。另外抽采时间过长没有及时调整参数,会造成孔周瓦斯浓度降低、煤体吸附性发生变化、煤体变形,从而加剧封孔段裂隙发育,造成失效。

4 低透气性煤层瓦斯抽采钻孔封孔失效防控措施

4.1 基于地质适配性的封孔材料优化

根据不同的地质条件选择封孔材料,是提高封孔稳定性的基础。对于高应力、裂隙发育的煤层,研发并应用高强度高弹复合材料,采用水泥基材料和弹性橡胶颗粒复合体系,利用水泥基材料提供强度支撑,弹性颗粒吸收应力变形,减少裂隙的产生;加入纳米硅灰等改性剂,提高材料抗渗性、耐腐蚀性。对于高含水率的煤层,开发疏水性封孔材料,在水泥浆中掺入有机硅烷防水剂,降低材料的亲水性,采用“疏水涂层加核心封孔材料”的双层结构来阻止水分进入界面。对地质构造复杂的地区,推广使用聚氨酯环氧树脂复合泡沫封孔材料,该种材料的膨胀率可达 10 ~ 20 倍,可自适应孔径变化及裂隙填充,密封严实^[6]。

4.2 封孔工艺精准化改进与实施

采用工艺改进达到精准封孔的目的,提高施工质量稳定性。优化钻孔施工工艺,用定向钻进技术把钻孔偏斜度控制在 1% 以内,用孔径自适应钻头保证孔径均匀,钻孔完成后用高压水射流清理孔壁,去除钻渣和浮煤,提高界面粘结力。改良两堵一注工艺,在不同的孔周裂隙分布区采用分段注浆法,用压力传感器检测注浆时的压力,保证裂隙能够充分填充;开发出囊袋、注浆一体化工艺,先利用膨胀囊袋封堵两端,然后用高压注浆填充中间部分,解决传统工艺中封堵不严密的问题。对深部高应力煤层推行全程注浆封孔工艺,借助钻孔成像技术确定裂隙发育区,依照裂隙发育区采取不同的注浆量、压力进行注浆,达到全深度密封。

4.3 封孔质量实时监测与预警体系构建

创建全周期监测预警体系,达到对失效隐患的早期发现和及时处理。创建“直接监测”加“间接监测”的监测体系,在封孔段布置光纤传感监测点,采用光纤光栅传感器对封孔材料的应力、应变变化实施实时监测,准确捕捉裂隙发展信号,另外在抽采管路装设智能监测终端,持续采集瓦斯浓度、流量、负压等参数,经由数据融合分析判定封孔质量。开发智能化预警平台,利用大数据创建封孔失效预测模型,设定参数阈值,当监测数据超出阈值时,就会发出预警信号,借助 GIS 技术找到失效钻孔的位置。建立定期巡检和专项排查制度,每月用钻孔成像仪对重要部位的钻孔做抽检,每季度做气密性全面检测,形成监测、预警、处置闭环。

4.4 抽采参数动态调控与管理强化

通过动态调控抽采参数和加强管理来减少人为因素造成的失效。建立抽采参数动态优化机制,以煤层透气性系数、瓦斯含量等地质参数为基础,结合监测数据,用数值模拟的方法找出最佳抽采负压和流量,对低透气性煤层来说,初始抽采负压控制在 15~20kPa,流量稳定在 0.5~1m³/min,随着抽采的进行不断调整;采用变频控制系统实现抽采参数的实时控制,避免流量和负压的剧烈波动。加强施工过程管理,制定封孔施工标准化流程,明确钻孔清理、材料配比、注浆压力等关键环节的技术要求,施工人员必须经过专项培训合格后才能上岗,实行“谁施工、谁负责”的责任制,建立施工质量档案,对封孔质量进行跟踪考核。加强后期维护管理,对预警失效隐患钻孔及时采取补封措施,用二次注浆技术填充裂隙,恢复密封性能。

5 结语

综上所述,低透气性煤层瓦斯抽采钻孔封孔失效是由地质条件、材料性能、施工工艺和抽采参数等多因素耦合造成的,其控制是一个系统工程。本文研究表明,地质条件动态变化引起的裂隙发育、材料性能劣化是失效的主要原因,施工缺陷、参数不合理会加快失效进程。地质适配性材料优化、精准化工艺改进、全周期监测预警、动态化参数调节等综合防控手段可以提高封孔质量与稳定性。未来的研究要集中于智能化方向上,开发自修复型封孔材料以及无人化施工技术,使用数字孪生技术构建封孔系统的虚拟仿真平台,达到封孔质量精确预估与智能控制的目的,使低透气性煤层瓦斯高效抽采和矿井安全拥有更加强大的技术保障。

参考文献

- [1] 姚学庆,薛文涛. 单一低透气性煤层穿层钻孔瓦斯有效抽采半径研究[J]. 陕西煤炭, 2025, 44(08): 84-89.
- [2] 米红伟. 水力压裂增透技术在低透气性煤层瓦斯治理中的应用[J]. 能源与节能, 2025, (02): 119-121.
- [3] 张晓峰. 气相压裂技术在低透气性煤层巷道瓦斯治理中的应用[J]. 能源与节能, 2025, (02): 132-134.
- [4] 陈国强. 高瓦斯低透气性煤层定向长钻孔瓦斯抽放技术[J]. 石化技术, 2024, 31(12): 185-186.
- [5] 张校勇,李志杰,杨占鑫,等. 水力压裂消突技术在低透气性煤层瓦斯治理中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (21): 130-132.
- [6] 张文柯. 高瓦斯低透气性煤层开采高效瓦斯治理技术研究应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (20): 118-120.