

三软煤层钻孔变形对封孔效果的影响及控制

杨延龙

郑煤集团大平煤矿 河南 登封 452470

摘要: 三软煤层顶板、煤层、底板软弱, 赋存条件复杂, 钻孔变形问题突出, 严重影响封孔效果。本文概述其地质特征与钻孔变形类型, 分析地质、工程、时间等因素对变形的影响, 阐述变形对封孔段完整性、材料性能、瓦斯流动通道的破坏机制, 并通过数值模拟验证。提出优化施工参数、加强支护、改进封孔工艺与材料、实时监测等控制措施, 为保障三软煤层钻孔工程安全有效提供参考。

关键词: 三软煤层; 钻孔变形; 封孔效果; 影响因素; 控制措施

引言: 在煤矿开采领域, 三软煤层因顶板、煤层、底板均具软弱特性, 工程地质条件恶劣, 钻孔施工易出现变形问题。而封孔作为钻孔工程关键环节, 对隔绝瓦斯、防止地下水渗入意义重大。钻孔变形会破坏封孔效果, 威胁工程安全与有效性。因此, 深入研究三软煤层钻孔变形对封孔效果的影响及控制措施, 对提升煤矿开采安全性和效率具有重要的现实意义。

1 三软煤层地质特征与钻孔变形概述

1.1 三软煤层地质特征

三软煤层的核心地质特征体现在顶板、煤层、底板三者均具有软弱特性, 且赋存条件复杂。煤层本身普氏系数通常小于1, 抗压强度仅5~15MPa, 内摩擦系数0.2~0.5, 粘聚力0.1~0.5MPa, 煤体松软破碎、节理裂隙发育, 易发生塑性变形和垮落。顶板多为砂质泥岩、炭质泥岩等软岩, 致密性差、裂隙发育, 抗压强度低, 易冒落且厚度不均; 底板以粘土质泥岩为主, 遇水易膨胀软化, 易出现底鼓现象, 影响钻孔和巷道稳定性。此外, 三软煤层多处于复杂地质构造环境, 常伴随宽缓向斜等构造, 煤层倾角多在7~15°, 厚度波动较大, 部分区域无夹矸但结构松散, 这些特征共同导致其工程地质条件恶劣, 成为钻孔变形的内在诱因。

1.2 钻孔变形类型与特征

三软煤层钻孔变形主要分为塌孔、孔距收缩、卡钻埋钻衍生变形三种类型, 各类型具有显著特征且常相互伴随。塌孔是最常见且严重的类型, 多因钻孔破坏煤体应力平衡, 软煤及软顶底板无法承受重新分布的地应力, 导致孔壁破碎垮落, 表现为孔内煤岩碎屑堆积、钻孔直径不规则增大, 严重时无法继续使用^[1]。孔距收缩源于煤体流变特性, 成孔后地应力持续作用使煤体缓慢变形, 导致钻孔孔径逐渐减小, 尤其当钻孔方向与最大主应力夹角较小时, 收缩更为明显, 会降低瓦斯抽采有效面积。卡

钻埋钻衍生变形由排渣不畅或孔壁严重变形引发, 钻杆被塌落煤岩卡住或掩埋, 同时伴随钻孔局部挤压变形, 不仅影响施工进度, 还会损坏钻具、增加施工成本。

1.3 钻孔变形监测方法

针对三软煤层钻孔变形的复杂性, 目前主要采用现场实测与仪器监测相结合的方法, 确保监测数据精准、全面。现场直观监测主要通过钻孔窥视、超声波探测等手段, 揭露孔壁变形情况, 测定围岩松动圈塑性范围, 直观观察塌孔、收缩等变形现象及发展趋势。仪器监测常用设备包括测缝计、位移计、应力传感器等, 将仪器嵌入钻孔不同深度, 实时监测孔壁径向位移、环向应力及变形速率, 可精准捕捉变形动态变化。结合数值模拟软件辅助监测, 通过构建钻孔力学模型, 模拟不同条件下的变形规律, 与现场监测数据对比验证, 提高监测可靠性。监测过程中需定期采集数据、分析趋势, 及时发现异常变形, 为后续变形控制和工程调整提供科学依据, 保障钻孔结构稳定。

2 三软煤层钻孔变形影响因素分析

三软煤层钻孔变形的发生并非单一因素作用, 而是地质、工程、时间三大类因素共同影响、相互作用的结果。地质因素是内在基础, 决定了煤层及围岩的基本力学特性和赋存状态, 为变形发生提供了前提条件; 工程因素是外在诱因, 钻孔施工过程中的参数选择、操作规范等直接干扰煤体应力平衡, 加剧变形程度; 时间因素是变形发展的助推器, 煤体的流变特性使变形随时间不断累积, 导致变形程度逐渐加剧。

2.1 地质因素

地质因素是影响三软煤层钻孔变形的核心内在因素, 主要包括煤层及顶底板力学性质、地质构造、地应力状态三个方面。煤层软、强度低、节理裂隙发育, 是钻孔变形的根本原因, 软煤体难以承受钻孔施工带来的扰动

和地应力作用,易发生塑性变形和破碎。顶底板软岩的特性加剧了变形,顶板易冒落导致塌孔,底板膨胀易引发钻孔下部挤压变形。地质构造如断层、褶皱等,使煤体结构更加破碎,应力分布不均,钻孔穿越此类区域时,变形风险显著提升。地应力大小和方向直接影响变形程度,地应力越大,钻孔周围煤体应力集中越明显,变形越严重,且钻孔方向与最大主应力夹角越小,孔距收缩等变形越突出^[2]。

2.2 工程因素

工程因素是导致三软煤层钻孔变形的关键因素,主要与钻孔施工参数、施工工艺及施工操作相关。钻孔直径、深度和倾角选择不合理,会显著增加变形风险,直径过大易导致孔壁稳定性不足,深度增加会使地应力作用增强,倾角不合理则会加剧孔壁受力不均。施工工艺方面,钻进速度过快会对孔壁产生强烈扰动,破坏煤体结构完整性;排渣系统不完善,煤岩碎屑无法及时排出,会堆积孔内引发卡钻、埋钻,进而导致钻孔变形。施工过程中钻具碰撞孔壁、支护不及时或支护质量不佳,会进一步破坏孔壁稳定性,诱发或加剧塌孔、收缩等变形现象,影响钻孔后续使用效果。

2.3 时间因素

时间因素是三软煤层钻孔变形发展的重要助推因素,主要源于煤体的流变特性和应力重新分布的时间效应。三软煤层煤体具有明显的蠕变特性,在持续地应力作用下,变形会随时间不断累积,成孔初期变形速率较快,后期逐渐趋于平缓,但总体变形量持续增加。研究表明,钻孔施工完成120天后,孔壁煤体径向应变可从初期的8.59%增至35.17%,孔距收缩幅度可达68.2%。同时时间推移会导致孔壁周围应力重新分布逐渐趋于稳定,但在此过程中,煤体节理裂隙会不断发育、扩展,孔壁强度逐渐降低,进一步加剧变形。地下水长期浸泡会使顶底板软岩和煤层进一步软化,随时间延长,钻孔变形风险和变形程度也会持续增加。

3 三软煤层钻孔变形对封孔效果的影响机制

封孔是三软煤层钻孔工程的关键环节,主要用于隔绝瓦斯、防止地下水渗入,保障工程安全性和有效性,而钻孔变形会通过多种途径破坏封孔效果,影响工程质量。钻孔变形会直接破坏封孔段结构完整性,导致封孔材料与孔壁脱离,同时影响封孔材料力学性能,降低其密封和支撑作用,进而形成瓦斯流动通道,导致封孔失效。

3.1 钻孔变形对封孔段完整性的影响

钻孔变形会直接破坏封孔段的结构完整性,是导致封孔效果下降的首要因素。三软煤层钻孔发生塌孔、收

缩或挤压变形时,会使封孔段孔壁出现不规则变形、破碎甚至垮落,破坏封孔材料与孔壁的紧密贴合状态。塌孔会导致封孔段煤岩碎屑堆积,挤压封孔材料,使其发生断裂、脱落;孔距收缩会使封孔材料受到持续的径向挤压应力,超过材料承受极限时会出现开裂、破损;挤压变形则会导致封孔段出现局部凸起、凹陷,使封孔材料与孔壁之间产生间隙。这些现象都会破坏封孔段的连续性和密封性,导致封孔结构失效,无法实现隔绝瓦斯、防水等核心功能,为后续安全隐患埋下伏笔。

3.2 钻孔变形对封孔材料性能的影响

钻孔变形会通过力学作用显著影响封孔材料的性能,降低其密封效果和使用寿命。三软煤层钻孔变形产生的径向挤压、拉伸及剪切应力,会持续作用于封孔材料,导致材料出现塑性变形、开裂、老化等问题。常用的水泥、聚氨酯等封孔材料,抗压强度和抗变形能力有限,在持续挤压应力作用下,易发生收缩、开裂,丧失密封性能;部分柔性封孔材料虽具有一定的抗变形能力,但长期受剪切应力作用,会出现磨损、破损,降低支撑和密封效果^[3]。钻孔变形导致的孔壁破碎和地下水渗入,会侵蚀封孔材料,加速材料老化变质,进一步降低其力学性能和密封性能,缩短封孔有效期,导致封孔失效。

3.3 钻孔变形对瓦斯流动通道的影响

钻孔变形会间接形成或扩大瓦斯流动通道,导致封孔失效,增加瓦斯泄漏风险,威胁煤矿安全生产。钻孔变形破坏封孔段完整性、导致封孔材料破损后,会在封孔材料与孔壁之间形成间隙,这些间隙会成为瓦斯流动的主要通道。同时,钻孔变形引发的孔壁破碎、节理裂隙扩展,会使煤层中的瓦斯通过破碎裂隙渗透至封孔失效区域,再通过间隙泄漏至外界。此外,孔距收缩会减小钻孔有效直径,导致瓦斯抽采过程中压力分布不均,进一步加剧裂隙扩展,扩大瓦斯流动通道;塌孔形成的煤岩碎屑堆积,会堵塞钻孔。

3.4 基于数值模拟的影响机制验证

采用数值模拟技术可精准验证三软煤层钻孔变形对封孔效果的影响机制,为工程实践提供科学依据。通过构建贴合三软煤层实际地质条件的钻孔封孔数值模型,能够模拟不同变形类型、变形程度下封孔段的应力分布、封孔材料受力状态及瓦斯渗流变化规律。通过设定不同地质参数、工程参数和时间参数,模拟塌孔、孔距收缩等变形过程,分析封孔段完整性、封孔材料性能及瓦斯流动通道的变化规律,量化变形与封孔失效的关联关系。模拟结果可与现场实测数据对比验证,明确不同因素对封孔效果的影响权重,优化封孔工艺和参数,同时为变

形控制措施的制定提供理论支撑,提升封孔质量和工程安全性。

4 三软煤层钻孔变形控制措施

4.1 优化钻孔施工参数

优化钻孔施工参数是从源头控制三软煤层钻孔变形的关键措施,需结合煤层地质条件合理确定钻孔直径、深度、倾角及钻进速度。钻孔直径应根据工程需求和煤体稳定性确定,一般控制在合理范围,避免直径过大降低孔壁稳定性;钻孔深度需结合地应力分布特点,避免深度过大导致地应力作用增强,必要时分段施工、分段支护。钻孔倾角应尽量与最大主应力方向保持合理夹角,减少孔距收缩变形;钻进速度需循序渐进,避免过快钻进对孔壁产生强烈扰动,同时优化排渣工艺,采用高效排渣设备,及时排出煤岩碎屑,防止堆积引发卡钻、埋钻和塌孔,从施工源头降低变形风险。

4.2 加强钻孔支护

加强钻孔支护可有效提升孔壁稳定性,抑制钻孔变形,常用支护方式以锚网索支护为主,结合三软煤层特点优化支护方案。针对围岩松动圈塑性范围(通常2.4-3.0m),合理设计支护间距和支护强度,顶板采用锚网索支护,两帮采用锚杆支护,增强孔壁整体稳定性。采用护壁管与钻杆同步推进的方式,利用高强度护壁管紧密贴合孔壁,防止孔壁坍塌,护壁管材质需具备良好的抗变形和耐腐蚀性能。此外,可采用钻孔卸压与支护结合的方式,通过合理布置卸压钻孔,使巷道周边应力峰值向深部转移,降低孔壁受力,减少变形,同时及时支护,避免孔壁暴露时间过长引发变形。

4.3 改进封孔工艺与材料

改进封孔工艺与材料,可增强封孔的抗变形能力和密封性,减少钻孔变形对封孔效果的影响。封孔工艺方面,采用分段封孔、压力注浆封孔等工艺,确保封孔材料与孔壁紧密贴合,填充孔壁裂隙和间隙,提升封孔完整性;优化封孔顺序,先对孔壁进行预处理,清除破碎煤岩和杂物,再进行封孔作业,避免杂质影响封孔效果^[4]。封孔材料方面,选用高强度、抗变形、耐腐蚀的复合型

封孔材料,替代传统的水泥、聚氨酯等材料,提升材料的抗压、抗拉伸和抗剪切性能,同时加入柔性成分,增强材料的抗变形能力,避免因钻孔变形导致封孔材料开裂、破损,确保封孔长期有效。

4.4 实时监测与动态调整

实时监测与动态调整是及时发现和控制钻孔变形的重要保障,需建立完善的监测体系,实现对钻孔变形的全程跟踪和动态管控。结合现场实测和仪器监测手段,在钻孔不同深度布置位移计、应力传感器等设备,实时监测孔壁变形量、变形速率及应力变化,定期采集和分析监测数据,建立变形预警机制,当变形量超过预警值时,及时发出预警信号。根据监测结果,动态调整施工参数、支护方案和封孔工艺,针对不同变形类型和程度,采取针对性的处理措施,如加固支护、补注浆等,及时抑制变形发展,避免变形加剧导致封孔失效和安全隐患,确保钻孔工程顺利推进。

结束语

三软煤层钻孔变形对封孔效果影响显著,通过对其地质特征、变形类型、影响因素及影响机制的深入分析,明确了钻孔变形破坏封孔的关键环节。提出的优化施工参数、加强支护、改进封孔工艺与材料、实时监测等控制措施,能有效降低钻孔变形风险,提升封孔质量。未来需持续研究,结合实际工程不断完善控制策略,保障三软煤层钻孔工程安全高效推进。

参考文献

- [1]王平."三软"煤层巷道围岩变形特征及支护参数优化[J].煤炭与化工,2021,44(7):6-9.
- [2]郭文兵,吴东涛,郭明杰,等."三软"厚煤层开采覆岩多层位离层注浆减沉技术及应用[J].煤炭科学技术,2025,53(5):1-12.
- [3]孟国胜."三软"巷道长短锚索联合支护控制变形研究[J].矿业安全与环保,2024,51(4):139-145.
- [4]刘少伟,米超,贺德印,等.三软厚煤层工作面回采巷道超前"卸-支"协同围岩控制技术及应用[J].河南理工大学学报(自然科学版),2026,45(2):76-85.