

采煤工作面围岩失稳机理及安全防控技术研究

张健

兖矿能源集团股份有限公司济宁二号煤矿综采一区, 山东 济宁 272072

摘要: 我国煤炭资源开采逐步转向深部、高强度开采模式, 复杂地质条件下采煤工作面围岩受高地应力、采动扰动耦合作用, 极易出现顶板垮落、煤壁片帮、底板底鼓等失稳灾害, 严重威胁煤矿井下安全生产。为有效解决工作面围岩失稳频发难题, 本文系统划分围岩失稳类型, 深入剖析顶板、煤壁、底板三类围岩的失稳演化机理, 总结地质条件、采动扰动、支护缺陷三大核心致灾因素。结合现场工程实际, 构建多维度围岩安全防控体系, 优化锚网索协同支护、应力卸压调控、智能动态监测三大核心技术体系, 形成适配复杂开采工况的围岩防控技术方案。研究结果可为深部矿井采煤工作面围岩稳定控制、灾害预防及安全生产提质增效提供理论依据与工程参考。

关键词: 采煤工作面; 围岩失稳; 失稳机理; 防控技术; 应力调控

1 研究背景与意义

煤炭是我国能源体系的核心支柱, 在工业生产、民生保障等领域发挥着不可替代的作用。随着煤炭开采深度持续增加、开采强度不断提升, 地质条件日趋复杂, 高地应力、破碎围岩、构造发育等问题频发, 导致采煤工作面围岩失稳事故高发多发。围岩失稳主要表现为顶板垮落、煤壁片帮、底板鼓起等形式, 不仅会造成设备损毁、工作面停产, 严重时还会引发人员伤亡、冲击地压等重大安全事故, 极大制约了煤矿安全生产效率与开采安全性。因此, 系统探究采煤工作面围岩失稳的内在机理, 针对性研发适配性强、安全性高的防控技术, 对夯实煤矿安全生产基础、提升井下围岩管控水平具有重要工程意义与现实价值。

2 采煤工作面围岩稳定基本特征

采煤工作面围岩是包含顶板、底板及两侧煤体的复合岩体结构, 在原始地应力平衡状态下保持稳定。井下回采作业会打破原有应力平衡, 引发围岩应力重新分布, 产生应力集中、岩体变形、裂隙发育等一系列动态演化行为, 当岩体承载能力无法抵御应力荷载时, 便会发生失稳破坏。不同于常规巷道围岩, 工作面围岩受采动扰动持续性更强、应力变化更剧烈, 且受开采工艺、推进速度、地质构造等多重因素耦合影响, 失稳形式呈现多元化、突发性特征, 管控难度极大。

3 工作面围岩失稳类型及机理分析

3.1 顶板失稳机理

结合现场工程实践, 顶板失稳是工作面最常见的失稳形式, 可分为局部冒落与整体垮落两种形态。浅部顶板岩体受采动影响后, 原生裂隙持续扩展、新生裂隙不断生成, 岩体完整性被破坏, 松散破碎的围岩在自重应力作用下发生局部掉落、冒落; 当工作面存在厚硬顶板、断层、陷落柱等特殊地质条件时, 顶板铰接岩梁结构会发生破断失稳, 应力瞬间释放, 引发大面积顶板垮落, 极易诱发冲击灾害。深部开采条件下, 高地应力与采动应力叠加, 顶板岩体呈现脆性破坏特征, 失稳突发性更强、破坏范围更广。

3.2 煤壁失稳机理

煤壁失稳多表现为片帮、溃煤, 是大采高、松软煤层工作面的主要安全隐患。松软煤层煤体孔隙率高、胶结性差、整体强度低, 工作面回采后, 煤壁失去侧向约束, 水平应力快速释放, 浅部煤体发生剪切破坏, 出现松散脱落、片帮现象。当工作面推进速度过快、支护滞后, 或存在构造破碎带时, 煤体裂隙会快速贯通, 形成贯通性破坏面, 引发大范围煤壁溃决式失稳。同时, 顶板压力持续传递至煤壁, 会进一步加剧煤体应力集中, 扩大煤壁破坏范围, 不仅压缩作业空间, 还可能掩埋设备、威胁作业人员安全。

3.3 底板失稳机理

底板失稳以底鼓变形为主要表现形式, 多发生在软岩底板、深部开采工作面。底板岩体多为泥岩、砂质泥岩等软岩, 遇水易软化、强度大幅衰减, 在垂直应力与水平挤压应力共同作用下, 底板岩体产生塑性变形, 出现隆起、开裂、错动等现象。随着回采持续推进, 底板裂隙不断发育贯通, 塑性变形持续累积, 底鼓量逐步增大, 会造成工作面底板变形、设备倾斜、巷道断面缩小, 严重影响正常开采作业。相较于顶板与煤壁失稳, 底板失稳具有隐蔽性、持续性特征, 变形周期长、治理难度大, 易被现场安全管控忽视。

3.4 围岩失稳综合致灾因素

从核心诱因来看,围岩失稳是地质条件、采动扰动、支护管控三类因素耦合作用的结果。地质条件是基础性因素,煤层埋深、围岩岩性、岩体结构、地质构造直接决定围岩稳定性,深埋高地应力、软岩破碎围岩、断层发育区域围岩失稳风险显著偏高。采动扰动是关键性诱因,工作面持续推进引发的应力动态转移、采空区顶板垮落产生的动压冲击,会持续扰动围岩稳定状态,加速岩体损伤破坏。支护管控是人为核心因素,支护参数不合理、支护施工滞后、支护设备老化、现场监测不到位等问题,会大幅降低围岩承载能力,无法有效抵御应力扰动,最终诱发失稳事故。

4 围岩安全防控关键技术

4.1 锚网索协同支护加固技术

基于上述失稳机理,结合煤矿现场开采工况,构建“事前预防、事中管控、事后加固”的全方位安全防控体系,集成优化围岩支护、应力调控、动态监测三类核心防控技术,有效遏制围岩失稳灾害。在支护加固技术方面,摒弃传统单一支护模式,推广锚网索协同支护技术,根据工作面围岩类型、破碎程度差异化设计支护参数。针对顶板破碎围岩,采用高强锚杆、锚索配合金属网、钢带联合支护,锚固深部稳定岩体,约束浅部围岩变形,重构顶板承载结构;针对松软煤壁,增设护帮锚索、补强锚杆,强化煤体整体性,限制煤壁裂隙扩展与片帮失稳;针对软岩底板,采用注浆加固配合底板锚杆支护,填充岩体裂隙、胶结破碎围岩,提升底板岩体强度与抗变形能力。同时,在大采高、构造复杂工作面,配套采用液压支架实时护顶护帮,保证支护及时性与稳定性,杜绝支护滞后问题。

4.2 围岩应力均衡调控技术

应力调控技术是防控深部围岩失稳的核心手段,核心原理为降低围岩应力集中程度、优化应力分布状态。现场主要采用切顶卸压与煤层预卸压技术,通过定向切顶切断顶板应力传递路径,消除厚硬顶板悬顶产生的集中应力,弱化采动动压对工作面围岩的扰动影响;对高地应力工作面,采用煤层钻孔卸压、爆破卸压等方式,提前释放煤体内部弹性应变能,降低煤壁与围岩应力峰值,避免应力超限引发的突发性失稳。此外,针对区段煤柱应力集中问题,采用注浆强化与锚索加固协同技术,稳定煤体结构、提升煤柱承载能力,实现应力均衡分配。

4.3 智能化动态监测预警技术

动态监测预警技术是实现精准防控的关键,依托智能化监测设备构建全天候围岩监测体系。采用微震监测系统实时捕捉围岩裂隙发育、岩体破裂的微震信号,精准判断围岩损伤范围与失稳风险;通过围岩位移监测仪、应力传感器,实时采集工作面围岩变形量、应力变化数据,实现数据实时传输、智能分析。系统可根据监测数据设置多级预警阈值,当围岩变形、应力数据异常波动时,自动发出声光预警,为现场支护调整、工作面避险、施工优化提供精准数据支撑,实现围岩失稳灾害早发现、早预警、早处置。

5 结论

本文通过分析采煤工作面围岩失稳特征与演化规律,系统厘清了顶板冒落、煤壁片帮、底板底鼓三类典型失稳灾害的形成机理,明确了地质条件、采动扰动、支护缺陷多因素耦合的致灾机制。针对复杂开采工况,整合锚网索协同支护、应力卸压调控、智能动态监测技术,形成一套完整的工作面围岩安全防控体系,可有效解决深部矿井、复杂构造区域围岩失稳管控难题,显著提升工作面开采安全性与稳定性。

现阶段围岩防控技术已实现常态化应用,但针对极复杂地质、超深部高强度开采条件下的围岩动态失稳防控仍存在短板。后续可结合大数据、人工智能技术,优化围岩风险智能预判模型,实现围岩失稳趋势精准预测,进一步提升煤矿围岩管控的智能化、精细化水平,为深部煤炭安全高效开采提供技术保障。

参考文献

- [1]李腾锐,杨登峰,付伟.浅埋隧道开挖围岩失稳机理数值模拟分析[J].广州建筑. 2026,54(05): 1-9.