

沿空留巷围岩变形规律及加固支护工艺应用研究

陈建伟

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘 要：沿空留巷是煤矿无煤柱开采的关键技术，可提高煤炭资源回收率，优化采掘生产流程。现代高强度综采与重复采动作业条件下，巷道围岩易出现变形失稳问题，传统支护技术适配性较差。依托煤矿智能化、精准化围岩控制发展趋势，梳理沿空留巷围岩变形特点，分析各类扰动因素的作用机制，补齐传统支护技术短板，优化升级卸压、分区、协同等新型支护工艺，可为复杂开采条件下巷道围岩稳定管控提供技术支撑，保障煤矿安全高效绿色生产。

关键词：沿空留巷；围岩变形规律；加固支护；工艺应用

引言

现代煤炭开采朝着深部、高强度、集约化方向推进，传统留煤柱开采模式存在资源浪费、应力集中、巷道返修率高等诸多问题。沿空留巷取消区段煤柱、实现巷道复用，是煤矿降本增效、提升资源利用率的核心技术。深部开采带来的复杂应力环境，加剧了巷道顶板下沉、巷帮收缩、底板鼓起等病害，老旧支护工艺难以适配复杂采动工况。立足煤矿技术升级需求，探究围岩变形规律并优化新型加固支护工艺，可有效适配现代化矿井的开采生产要求。

1 沿空留巷技术整体概况

沿空留巷技术核心是在工作面回采完成后，保留紧邻采空区的巷道，供下一工作面采掘作业循环使用，彻底摒弃传统区段煤柱预留模式。现阶段煤矿开采已经全面告别粗放式生产，朝着无煤柱、智能化、低损耗方向发展，沿空留巷技术的普及应用，是煤炭行业转型升级的重要体现。相比于传统开采模式，该技术能够最大限度回收煤炭资源，减少煤柱遗留造成的资源损耗，同时可以缩短巷道掘进周期，缓解采掘接替紧张的行业痛点，降低巷道掘进的人力、设备、物料成本^[1]。目前国内煤矿应用的沿空留巷技术主要分为三类，分别是巷旁充填留巷、切顶卸压留巷和柔模墙体留巷，各类技术适配不同的地质条件与开采强度。巷旁充填留巷应用时间久、技术体系成熟，主要通过充填材料构筑巷旁支护体，阻隔采空区围岩扰动，但传统充填工艺固化性强、适配性差，难以适应深部软岩、强采动巷道。切顶卸压留巷是近年推广的新型技术，通过定向切顶切断顶板应力传递路径，从源头降低围岩变形压力，适配高强度综采工作面。柔模墙体留巷依托柔性支护结构，适配顶板

动态沉降变形，支护容错率更高。当下沿空留巷技术应用不再局限于单一工艺，逐步形成“卸压+支护+补强”的一体化控制模式，贴合现代化煤矿精准围岩控制理念。但在实际生产中，多数矿井仍沿用传统支护思路，未结合当下采动强度、围岩应力变化升级工艺，导致留巷后期变形量大、支护失效、巷道返修频繁。

2 沿空留巷围岩变形核心特征与影响因素

2.1 围岩阶段性变形规律

沿空留巷围岩变形并非恒定状态，会随着工作面推进呈现明显的阶段性变化，整体分为三个阶段。第一阶段为超前采动变形阶段，工作面未推进至巷道对应区域时，超前支撑应力开始作用于巷道围岩，岩层内部应力重新分布，围岩出现轻微变形，变形速度相对平缓，是巷道支护的关键预防阶段。第二阶段为采动剧烈变形阶段，工作面推过巷道区域后，采空区顶板岩层开始垮落、沉降，围岩应力快速释放、重新平衡，巷道顶板、两帮、底板变形速度大幅加快，变形量占整体变形量的七成以上，是围岩失稳的高发阶段。第三阶段为采后稳定变形阶段，工作面持续推进，采空区岩层垮落趋于压实，应力场逐步稳定，围岩变形速度持续降低，后期仅出现微量残余变形，最终保持稳定状态。不同开采条件下，三个阶段的持续时长、变形量存在明显差异，高强度综采工作面的剧烈变形阶段持续更长，残余变形量更大。掌握阶段性变形规律，能够精准定位支护关键节点，改变传统全程统一支护的粗放模式，实现分阶段、差异化围岩控制，提升支护工艺的针对性和有效性。

2.2 内部岩层结构对变形的影响

巷道围岩自身岩层结构是决定变形程度的基础因素，直接影响留巷整体稳定性。岩层厚度、岩性组合、

破碎程度、层理发育情况,都会改变围岩的受力和变形特性。顶板岩层以坚硬厚岩层为主时,岩层整体性强、承载能力高,整体变形量偏小,但坚硬岩层断裂时会产生集中应力,易出现突发性顶板下沉、岩块滑落问题。顶板以软弱泥岩、砂质岩为主时,岩层自身强度低、抗扰动能力差,受采动影响后易出现分层离层、破碎坍塌,巷道整体变形持续时间更长。围岩层理、节理发育的巷道,岩层整体性被破坏,内部存在大量裂隙,采动应力作用下裂隙会持续扩张、贯通,导致围岩整体松散,两帮收缩、底板鼓起问题突出。底板岩层松软、厚度较大的工况下,底板无有效支护约束,高应力作用下会出现持续底鼓,挤压巷道整体空间,破坏支护结构稳定性^[2]。除此之外,岩层组合杂乱、软硬岩层交替分布的巷道,受力不均匀,变形无固定规律,常规支护工艺难以适配,是目前沿空留巷围岩控制的主要难点,也是新型支护工艺重点适配的工况。

2.3 外部开采扰动对变形的影响

外部开采扰动是诱发沿空留巷围岩剧烈变形的核心诱因,主要包括工作面开采强度、推进速度、重复采动三类影响条件。开采强度直接决定采动应力的大小,综采工作面采高越大、开采范围越广,顶板岩层垮落范围越大,应力释放和传递范围更广,巷道围岩受到的扰动作用更强,变形问题更突出。工作面推进速度会改变围岩应力平衡节奏,推进速度过快时,岩层应力无法有序释放,应力持续累积,会加剧围岩瞬时变形,推进速度过慢则会延长扰动时长,导致围岩持续流变变形。重复采动是当下深部矿井留巷变形失控的主要原因,相邻工作面多次开采扰动,会持续破坏围岩岩层结构,原有裂隙不断扩张、新生裂隙持续发育,围岩承载能力逐步衰减。单次采动后趋于稳定的围岩,受到二次、三次采动扰动后会再次出现变形,且变形量、变形速度远超初次采动。

3 现代化沿空留巷加固支护工艺应用研究

3.1 超前预支护加固工艺

超前预支护是沿空留巷前期围岩控制的核心工艺,核心作用是提前强化巷道围岩承载能力,抵消工作面超前采动应力的破坏作用,从源头降低后期围岩变形量,适配现阶段高强度综采生产需求。该工艺应用于工作面超前扰动区域,针对巷道顶板、两帮薄弱区域进行提前加固,改变传统被动支护的模式,实现主动控顶控帮。现阶段主流超前预支护工艺摒弃了单一单体支护模式,采用“预应力锚索+金属网+ π 型梁”的组合支护结构,适配复杂地质与强采动工况。工艺实施过程中,优先对

工作面超前 30 米范围内的巷道进行整体加固,该区域是超前应力集中的核心区域,也是围岩初始变形的主要区域。通过布设大孔径预应力锚索,将巷道浅层软弱围岩悬吊至深层坚硬岩层,提升围岩整体整体性,限制裂隙扩张。搭配金属网封闭巷壁,防止浅层破碎岩块脱落,配合 π 型梁均匀分散支护应力,避免局部应力集中造成的支护失效^[3]。相比于传统单一锚杆支护,该工艺支护刚度、预紧力更高,能够有效应对超前采动带来的围岩应力波动。目前行业内对超前预支护工艺进行了智能化优化,不再采用统一的支护参数,而是根据巷道围岩监测数据,动态调整锚索间距、支护深度和预紧力,实现差异化精准支护。针对软岩、破碎围岩巷道,额外增加超前注浆加固工序,通过注浆填充围岩裂隙,胶结破碎岩层,提升围岩自身强度。

3.2 采中动态卸压支护工艺

采中阶段是围岩变形最剧烈、支护难度最大的阶段,传统刚性支护工艺容易因应力集中出现支护体断裂、失效问题,无法适配动态采动扰动。现阶段行业重点推广采中动态卸压支护工艺,核心思路是先卸压、后支护,通过人为干预打破围岩高应力集中状态,再通过柔性支护结构适配岩层动态变形,实现应力可控、变形可控,是现代化沿空留巷核心升级工艺。该工艺主要包含顶板定向切顶卸压和巷旁柔性支护两大核心环节。顶板定向切顶通过精准切割顶板岩层,切断采空区与巷道顶板的岩层连接路径,阻断采空区垮落产生的应力传递,大幅降低巷道围岩承受的集中应力,从源头弱化采动扰动影响。切顶施工严格匹配工作面推进节奏,随采随切,保证卸压时效性,避免应力累积。卸压完成后,采用柔模墙体替代传统刚性充填体,构筑巷旁支护结构,柔性墙体可以适配顶板岩层的正常沉降变形,不会因岩层微量移动出现开裂、破损,保持支护结构完整性。巷内同步配套恒阻大变形锚索支护,区别于普通锚索,恒阻锚索具备自适应变形能力,围岩出现动态变形时,锚索可适度伸缩吸收变形能量,同时保持恒定支护阻力,避免支护过载失效。该工艺摒弃了传统一味强化支护强度的思路,通过卸压降低支护压力,通过柔性支护适配动态变形,解决了高强度采动下支护失效、巷道剧烈变形的行业难题。目前该工艺已广泛应用于深部综采、重复采动矿井,能够有效控制采中阶段巷道顶板下沉、两帮移近,大幅降低围岩变形速率。

3.3 采后分区补强支护工艺

工作面推过采动剧烈区域后,围岩逐步进入稳定变形阶段,但仍存在残余变形、局部围岩破碎、支护结构

松动等问题,若不及时补强,后期会出现巷道持续变形、支护失效、断面收缩等问题。采后分区补强支护工艺是现阶段保障留巷长期稳定的关键工艺,核心是根据巷道不同位置的变形特征、破损程度,划分支护分区,实施针对性补强,杜绝统一支护造成的资源浪费和支护盲区。该工艺将留巷划分为顶板区、两帮区、底板区、巷旁充填区四个核心分区,各分区采用差异化补强方案^[4]。顶板区域重点排查锚索、锚杆松动、离层问题,对支护失效点位补打高强度锚索,强化顶板悬吊效果,封堵顶板裂隙,防止后期岩层离层下沉。两帮区域针对煤壁破碎、片帮问题,采用锚杆+钢带补强支护,封闭巷壁,提升煤壁整体性,限制两帮收缩变形。底板区域是传统支护的薄弱区域,针对底鼓问题,采用浅部注浆+底角锚索加固方式,填充底板裂隙,约束底板岩层隆起。巷旁支护区重点检查柔模墙体、充填体的完整性,对局部开裂、破损区域进行注浆补强,修复支护结构,保证巷旁支护的封闭性和承载稳定性。同时,现阶段补强支护不再依赖人工经验,结合围岩变形实时监测数据,精准定位变形异常区域,定向实施补强作业,提升支护精准度。该工艺可以有效处置采后围岩残余变形问题,修复采动造成的支护损伤和岩层破损,保障留巷长期使用过程中的断面稳定,减少巷道返修次数,适配矿井常态化安全生产需求。

3.4 围岩协同监测与支护优化工艺

现代化沿空留巷支护不再局限于单一支护施工,逐步形成“监测-分析-优化-支护”的闭环管控体系,围岩协同监测与支护优化工艺是智能化矿山建设背景下的新型配套工艺,能够实现围岩变形动态管控,解决传统支护滞后性、盲目性问题,大幅提升留巷支护的科学性和稳定性。该工艺核心是依托自动化监测设备,对留巷全过程围岩变形、支护受力、应力变化进行实时采集,监测范围覆盖超前扰动区、采动剧烈区、采后稳定区全流程,重点监测顶板下沉量、两帮移近量、底鼓量、锚索受力变化等关键参数。监测数据实时传输至矿井监控平台,系统自动分析围岩变形规律、支护结构受力状态,精准预判后期变形趋势和支护薄弱点,替代传统人工定时观测的粗放模式,数据时效性、精准度大幅提升。

基于监测分析结果,动态优化支护工艺和参数,实现支护方案实时适配围岩状态。围岩变形增速过快时,及时增补临时加强支护,抑制变形发展;支护受力过载时,调整支护间距、预紧力,优化受力分布;局部岩层破碎严重时,升级注浆补强工艺,强化围岩自身强度^[5]。同时,通过长期数据积累,可总结不同地质、开采工况下的最优支护参数,形成标准化支护体系,为后续工作面留巷施工提供参考。该工艺实现了围岩控制从被动治理向主动预判、精准管控的转变,贴合煤矿智能化、精细化发展趋势,能够持续提升沿空留巷围岩控制效果,降低安全隐患和生产成本。

结语

结合当下煤矿高强度、智能化开采发展趋势,可系统梳理出沿空留巷围岩阶段性变形特征,岩层结构与开采扰动是影响围岩稳定的两大核心因素,现阶段主流加固支护方式包含超前预支护、采中卸压支护、采后分区补强及智能监测优化四类工艺。当前沿空留巷围岩控制已摆脱传统刚性、统一化支护模式,形成卸压增效、柔性适配、分区管控、智能优化的全新控制体系。新型支护工艺可有效适配深部开采、强采动、重复采动等复杂工况,改善传统支护失效、巷道变形量大的问题。后续可持续推进支护工艺智能化升级,优化工艺适配性能,完善标准化施工体系,不断提升沿空留巷围岩控制效果,推动煤炭行业安全、高效、绿色化发展。

参考文献

- [1] 陈永珩,马占国,刘子璐.重复采动影响下柱式沿空留巷围岩稳定性研究[J].中国矿业,2026,35(3):68-77.
- [2] 张哲.切顶卸压沿空留巷围岩变形演化特征研究[J].能源与节能,2026,(4):149-151.
- [3] 常晋杰.采空区应力扰动下巷道围岩非对称变形特征与注浆加固控制研究[J].陕西煤炭,2026,45(6):31-38.
- [4] 张哲.沿空留巷复用巷道围岩稳定性及矿压规律研究[J].煤,2026,35(7):32-36.
- [5] 张金贵,李东浩,曹宇翔,等.巷旁充填沿空留巷超前支护围岩控制与设计方法研究[J].矿业科学学报,2026,11(1):148-158.