

煤矿掘进巷道围岩变形机理与动态支护设计方法研究

甄创家

宁夏王洼煤业有限公司 宁夏 固原 756000

摘 要：软岩巷道在岩体自身条件和采动扰动共同作用下易出现大变形破坏，属于煤矿开采突出技术问题。本文选取宁夏王洼二矿软岩掘进巷道开展研究，该矿围岩泥质软岩占比大，岩体强度偏低，遇水膨胀崩解，同时承受多工作面回采采动叠加扰动，分析围岩变形机理，处理巷道顶板下沉、底鼓、两帮收敛及常规支护适配不足、支护失效、返修率高等问题，依据巷道变形规律确定动态支护设计原则，采用分阶段分工况动态支护手段，实现软岩巷道持续变形失稳的有效控制。

关键词：煤矿掘进；巷道围岩；变形机理；动态支护；设计方法

引言

王洼二矿煤层顶底板为泥岩、砂质泥岩软弱岩层，岩体强度低，遇水泥化膨胀，矿区地应力较高，断层及破碎带发育。多工作面同步回采形成叠加采动扰动，损伤软岩巷道围岩，出现巷道收缩、底鼓、开裂失稳。原有固定支护难以适应软岩流变与动态采动应力，支护滞后、底板支护缺失、参数固化，支护失效，巷道返修率偏高。本文结合矿井工况分析围岩变形机理，研究动态支护设计，保障巷道施工运维安全。

1 煤矿掘进巷道围岩变形机理分析

1.1 地质条件对围岩变形的影响

王洼二矿巷道围岩多为泥质软岩，岩体强度不高，黏土矿物含量大，岩性稳定条件差。矿区断层与破碎带较为发育，岩体完整程度低，岩体结构松散，原有地层结构遭到破坏。巷道掘进作业改变地层原有应力状态，泥质软岩力学条件差，会发生塑性变形，出现岩体开裂。井下巷道出现渗水和积水，水分进入泥质软岩后产生水岩作用，软岩发生泥化、膨胀，岩体强度下降，造成巷道两帮收缩、底板鼓起，该因素是矿区围岩变形失稳的主要原因。坚硬岩层力学指标相对稳定，刚度与承载能力更高，掘进应力扰动带来的影响有限，围岩变形数值偏小。构造破碎带位置会产生应力集中，围岩变形进一步加大，巷道围岩失稳坍塌概率上升，直接影响巷道掘进以及后续永久支护工作开展。

1.2 开采强度对围岩变形的影响

王洼二矿井下采用多工作面同步回采的生产模式，巷道围岩会持续受到多次采动叠加扰动作用，区别于单一采掘作业的应力影响。矿井原始岩体应力平衡状态会

在反复采动作用下持续被破坏，软岩巷道围岩的原生岩体结构不断被扰动损伤，导致围岩黏聚力、抗压强度等核心力学参数出现持续性衰减。围岩自身承载性能随采动次数增加不断降低，岩体抵抗应力变形的能力逐步弱化。前期采掘作业产生的围岩应力未完全释放稳定，后续工作面回采产生的新应力再次叠加作用于巷道围岩，持续增大围岩受力荷载^[1]。长期的采动叠加损伤累积，使得矿井多数巷道在成型稳定后，仍会出现后期二次大变形问题，造成巷道围岩整体稳定性大幅下降，易出现失稳破坏，直接制约矿井巷道正常使用及井下采掘作业安全。

1.3 围岩变形的力学过程

巷道掘进作业会扰动原始岩体应力场，打破地层原有应力平衡，促使围岩应力重新分布调整。巷道开挖后，周边岩体的三向受力状态转变为二向受力状态，岩体切向应力增大，径向应力逐步降低。当巷道周边切向应力超出岩体单轴抗压强度，围岩结构便会失稳破坏，形成围岩破碎区，该区域岩体结构松散，整体强度和承载性能显著降低。王洼二矿巷道围岩为软岩特性，岩体自身稳定性差，开挖后形成的破碎区会持续向围岩深部扩张，塑性变形区拓展范围远大于普通岩体。软岩流变效应突出，岩体塑性滑移和流变变形不会在开挖后短时间内终止，变形具备持续性特征。这也是矿井巷道开挖数月后，断面仍持续收缩变形的核心原因。深部围岩仅产生弹性变形，应力消散后可自行复原，结构整体稳定，不会出现持续性破坏变形。

1.4 影响围岩变形的其他因素

除去地质条件与开采强度，现场多项条件均可对巷道围岩变形产生作用。巷道断面的形状和尺寸会改变围岩应

力分布,圆形巷道应力集中程度低,围岩受力均匀,整体结构较为稳定,矩形巷道边角位置容易形成应力集中,该部位易产生围岩变形破坏。巷道掘进工艺与支护施工质量能够改变围岩变形相关指标,不同掘进方式对围岩的扰动程度存在差异,掘进作业管控不到位会破坏原有应力平衡,围岩变形量随之增大^[2]。支护时机与施工质量直接决定围岩控制效果,支护滞后会让围岩自由发展变形,变形量持续累积,王洼二矿软岩巷道存在支护滞后、底板无支护的实际问题,造成巷道底鼓严重,支护施工不达标时支护结构无法有效抵抗围岩压力,不能约束围岩变形,进而引发巷道变形破坏与失稳。

2 动态支护设计基本原则

2.1 及时性原则

巷道掘进作业完成后,原有岩体应力平衡状态遭到破坏,围岩应力重新分布并产生变形。王洼二矿巷道围岩以软岩为主,软岩暴露巷道空气和积水环境后,会快速出现风化、泥化现象,直接弱化岩体自身结构强度和承载能力。现场支护作业必须紧跟掘进工序同步推进,掘进作业完成后立即开展围岩封闭支护工作,快速对暴露软岩进行全覆盖封闭。及时封闭围岩可以有效隔绝空气和井下积水与软岩岩体的接触,从源头抑制软岩风化、泥化进程,保留围岩完整结构和固有承载能力。通过严控支护封闭时效,可有效规避软岩岩体松散、破损、失稳问题,保障巷道整体结构稳定,减少巷道后期变形、坍塌等病害隐患,提升巷道支护整体成效。

2.2 适应性原则

王洼二矿井下巷道围岩多为软岩,具备流变属性,采掘推进过程中采动应力处于动态变化状态,围岩力学参数、变形情况及受力条件会随之不断改变,巷道支护设计不能直接照搬硬岩矿井支护参数与固定支护方案,要结合本矿地质与开采条件开展设计及施工,作业期间根据掘进、回采不同阶段围岩实际情况选用对应支护形式,确定支护结构布置方案,利用矿井现有监测装置获取围岩变形实测数据,依据监测结果调整支护各项参数,适应软岩流变及采动应力引发的围岩受力变化,依靠全流程参数动态调整,使支护结构匹配巷道现场工况,保障支护体系稳定,满足矿井各个生产阶段的支护安全要求。

2.3 整体性原则

巷道支护为系统施工工程,支护结构无法独立承受荷载,需要和巷道围岩形成整体共同抵抗上部岩层压力。王洼二矿进行巷道支护设计与现场施工,需遵循整

体性原则,顶板、两帮、底板支护同步开展,不得只施工顶板及两帮而忽略底板。支护设计结合矿井地质条件确定支护形式与参数,按标准施工,保证支护结构贴合围岩,提高围岩整体承载能力,保障巷道整体稳定^[3]。施工中统一各部位支护质量,控制整体支护强度,整改局部支护强度不足问题,避免局部支护过度增加材料损耗,缺失底板支护会破坏支护体系受力平衡,引发巷道变形失稳,采用全方位协同支护可均衡巷道受力,达到支护施工质量标准。

2.4 经济性原则

巷道支护作业需以安全稳定为核心基础,结合王洼二矿巷道后期返修工程量大、返修成本偏高的现场实际情况把控工程经济性。巷道支护设计需贴合巷道服务周期、现场使用功能等实际条件,合理确定支护材料与支护结构,优化施工各项参数,规避支护材料浪费、施工过度等问题。采用动态支护方式,通过前期一次性科学合理的支护投入,能够有效提升巷道围岩整体稳定性,从根源上减少巷道变形破损问题,大幅降低后续巷道返修频次与返修工程量。全程统筹前期设计、现场施工及后期运维各个环节,减少巷道后期维护、返修的资金与资源投入,在保障巷道支护整体安全可靠的前提下,有效控制工程整体成本。

3 基于围岩变形机理的动态支护设计方法

3.1 支护参数确定方法

一是理论计算法,不套用通用支护参数标准,依托矿井现场实测的软岩力学指标、地应力数据和巷道断面尺寸,结合弹性力学与塑性力学计算公式,核算巷道施工支护阻力,确定锚杆、锚索的有效长度和布设间距等核心参数,为支护设计提供理论依据。二是经验类比法,以王洼矿区同煤层、同岩性、同施工条件的现有巷道为参照,梳理矿区过往巷道支护工程案例,统计各类支护参数的应用效果,结合本项目围岩条件、施工环境和建设标准,调整优化参考参数,确定适配的支护方案,多用于矿区常规地质条件下的巷道支护设计。三是数值模拟优化法,采用现场实测软岩力学参数搭建围岩支护数值模型,模拟多组不同支护参数的施工工况,监测巷道底鼓、两帮收敛等变形数据,以管控软岩流变变形为核心目标,结合行业变形规范及施工成本,反复迭代调整参数,筛选出安全合规、经济合理的最优支护参数组合。

3.2 支护结构选型方法

第一,按照围岩稳定性等级选取支护结构,围岩状

态是支护选型的基础依据,稳定围岩可单独使用锚杆支护,中等稳定围岩采用锚杆加金属网支护,稳定性差、易坍塌的围岩采用锚杆、锚索、金属网、钢架复合支护,王洼二矿软岩破碎围岩区域,禁止使用常规锚杆金属网简单支护,统一采用高预应力锚杆锚索搭配钢带、金属网和可缩性 U 型钢的联合支护方式。第二,根据巷道用途和断面尺寸确定支护方案,巷道功能和使用标准存在差异,服务周期长、使用频繁的核心巷道采用高强度支护结构,普通采区巷道结合现场条件选用简易支护,大断面巷道需要整体提高支护结构的强度和刚度^[4]。第三,结合现场地质构造调整支护措施,施工遇到断层、褶皱等特殊地质时,围岩松散破碎、稳定性不足,王洼二矿断层破碎带软岩区域,需落实超前支护作业,使用适配泥质软岩的注浆材料加固围岩,提升岩体自身强度,搭配基础支护结构控制围岩变形。

3.3 不同变形阶段动态支护策略

(1) 开挖初期。巷道开挖后围岩原有应力平衡被打破,会快速出现初期变形。结合王洼二矿软岩遇水易风化的特性,施工需及时喷射混凝土封闭围岩表面,隔绝地下水与岩体接触,避免泥岩遇水膨胀、风化破损,控制围岩早期变形和松动垮落问题,为永久支护施工保障安全条件。(2) 变形发展期。该阶段围岩变形持续变化,施工需重点监测巷底鼓量、两帮收敛数据,兼顾顶板下沉指标,依据实测数据动态调整支护参数。围岩变形速率快、持续不收敛时,加密锚杆锚索间距、加长支护构件,同步强化底板支护,提升整体支护强度,抑制围岩流变变形。变形平缓时持续监测,稳步推进永久支护作业。(3) 变形稳定期。永久支护完成后围岩变形逐步平稳,需长期跟踪监测巷道整体稳定性。王洼二矿软岩巷道即便变形稳定,后期仍受地质条件影响存在变形隐患,需针对局部变形超标、支护薄弱区域及时开展补强支护,消除巷道长期安全隐患。

3.4 特殊地质条件下动态支护设计要点

一是王洼二矿泥质软岩巷道支护设计。矿泥质软岩流变变形明显、变形持续时间长,采用单纯刚性支护易出现构件破损、整体支护失效问题。巷道支护采用让压 +

高强支护结合的方式,预留合理围岩变形空间释放流变应力,采用高强度、高预应力锚杆锚索搭配可缩性钢架构建联合支护体系,同步落实底板管控,通过布设底板锚杆、底板注浆加固,有效解决矿井巷底鼓问题,控制围岩持续变形。二是王洼二矿采动叠加高地应力巷道支护设计。针对采动叠加高地应力引发的围岩变形、岩爆问题,实行分区卸压,围岩完整、无破碎带巷道采用钻孔卸压,围岩破碎、稳定性差巷道不采用爆破卸压,同步提升支护强度与刚度,采用高强锚杆锚索、加厚钢带及混凝土组合支护,约束围岩位移^[5]。三是王洼二矿含水巷道支护设计。矿井渗水会造成泥质软岩膨胀泥化、强度降低,施工落实超前探放水、注浆堵水工艺,从源头阻断水体侵蚀围岩,完善巷道常态化排水系统,支护构件选用适配软岩遇水劣化工况的防水材质,保障巷道支护体系稳定。

结语

综上所述,结合王洼二矿泥质软岩巷道地质特性与采动扰动工况,明确了围岩变形的核心诱因及力学演化规律,确立了适配矿井工况的动态支护四大核心原则。通过精准确定支护参数、科学选型支护结构、分阶段实施动态支护及针对性处理特殊地质工况,形成了适配本矿软岩巷道的支护技术体系,可直接用于矿井软岩掘进巷道支护设计与现场施工,有效管控巷道变形、提升支护稳定性、降低巷道返修成本。

参考文献

- [1] 郭天翔,邸旭峰.软岩巷道群围岩破坏机理及分区支护技术研究[J].煤炭技术,2025,44(2):6-10.
- [2] 王志民.煤矿弱胶结软岩巷道支护与掘进施工技术研究[J].能源与节能,2025(5):240-243.
- [3] 郭洋.煤矿软岩巷道破坏机理分析及加固支护研究[J].陕西煤炭,2025,44(7):145-149+170.
- [4] 孙彩刚.煤矿掘进巷道应力区围岩安全支护技术[J].矿业装备,2025(4):48-50.
- [5] 王伟.煤矿采准巷道围岩稳定支护及掘进工艺优化[J].凿岩机械气动工具,2025,51(8):122-124.