

采矿工程中超前支护技术的应用

闫 均

宁夏王洼煤业有限公司 宁夏 固原 756500

摘要: 随着采矿工程向深部拓展,地质条件愈发复杂,安全风险显著增加。本文聚焦采矿工程中的超前支护技术。首先概述超前支护技术的定义、目的、原理及发展历程,接着详细阐述管棚注浆法、小导管注浆法、水平旋喷桩技术、超前液压支架技术等关键技术。随后探讨该技术在巷道掘进、回采工作面及特殊地质条件下的应用要点。最后分析其发展趋势,包括智能化、绿色化方向,新型支护材料的研发应用以及与其他技术的融合发展,旨在为采矿工程中超前支护技术的合理应用与创新提供发展提供参考。

关键词: 采矿工程;超前支护技术;关键技术;应用要点;发展趋势

引言:采矿工程作为资源开采的重要领域,其作业环境复杂多变,面临着诸多安全挑战。在采矿过程中,巷道掘进与回采工作面等区域易出现围岩变形、失稳等问题,严重影响采矿作业的安全与效率。超前支护技术作为保障采矿工程安全施工的关键手段,通过提前对围岩进行加固,增强其稳定性,有效预防冒顶、片帮等事故的发生。随着采矿技术的不断进步,超前支护技术也在持续发展创新,研究其在采矿工程中的应用具有重要的现实意义,对推动采矿行业安全高效发展作用显著。

1 采矿工程中超前支护技术概述

1.1 定义与目的

超前支护技术是采矿工程中针对松软、破碎或受采动影响的岩体,在掘进或回采工作面前方预先实施的支护措施。其核心目的是通过提前加固围岩,控制变形与失稳,防止掌子面塌方、冒顶等事故,保障作业安全与效率。该技术广泛应用于巷道掘进、回采工作面推进及特殊地质条件(如断层、软弱夹层)区域,通过抑制围岩应力释放与塑性区扩展,为后续施工提供稳定环境,同时减少后期维护成本。

1.2 技术原理

超前支护基于“主动支护”理念,通过在围岩变形前施加预应力或刚性约束,改变其应力分布状态。其原理可分为两类:一是物理加固,如管棚、小导管注浆通过注入水泥浆或化学浆液,填充裂隙并胶结岩体,形成承载拱结构;二是机械支撑,如超前液压支架利用高强度金属结构直接承受顶板压力,配合四连杆机构实现稳定移架。技术实施需结合围岩力学特性,通过普氏免压拱理论计算支护强度,确保支架或注浆体与围岩协同变形,避免应力集中导致破坏。

1.3 发展历程

超前支护技术起源于20世纪中叶的隧道工程,初期以木支护、钢拱架等被动支护为主,存在强度低、适应性差等问题。20世纪80年代,随着新奥法(NATM)推广,管棚注浆、小导管注浆等主动支护技术逐步成熟,通过注浆加固与钢管承载结合,显著提升软弱围岩稳定性。21世纪以来,液压支架技术突破推动超前支护机械化,四连杆型超前液压支架实现大采高工作面自动化支护,支护距离从20米扩展至100米以上。同时,水平旋喷桩、冻结法等特殊技术应用于富水地层,形成多元化技术体系^[1]。

2 采矿工程中超前支护的关键技术

2.1 管棚注浆法

管棚注浆法通过沿开挖轮廓外钻设的孔洞打入钢管,与钢拱架形成棚架预支护体系。钢管采用梅花形布置的注浆孔,加压注入水泥浆或化学浆液,加固软弱破碎地层,提升其自稳能力。该技术适用于掌子面自稳性差、含水地层及浅埋大偏压等复杂地质条件,具有超前距离长、刚度大、控制地表沉降效果显著的特点。施工参数需根据地层特性动态调整,如钢管直径(常用 $\phi 108\text{mm}$)、环向间距(3-5倍管径)、仰角($1^\circ-3^\circ$)等,确保支护体系与围岩协同受力。

2.2 小导管注浆法

小导管注浆法采用前端锥形、管壁梅花形布孔的小直径钢管,沿开挖轮廓线以 $10^\circ-15^\circ$ 外插角打入地层,注入水泥浆或化学浆液。该技术兼具加固围岩与堵水功能,适用于砂卵石地层、断层破碎带及浅埋段等自稳时间短的地质条件。施工需配合钢拱架使用,通过注浆压力(0.5-1.0MPa)和扩散半径(0.5-1.0m)控制加固范围,形成“小导管+固结体”联合支护体系,有效抑制围岩松弛变形,提升施工安全性。

2.3 水平旋喷桩技术

水平旋喷桩技术利用高压泵（> 30MPa）将水泥浆液通过水平钻机喷嘴注入地层，通过高压切割土体并强制搅拌混合，形成水平圆柱状固结体。多根旋喷桩相互咬合后，在隧道拱顶及周边形成封闭帷幕体，具备防流砂、抗滑移及防渗透功能。该技术适用于淤泥层、砂类土、破碎带等软弱富水地层，施工参数（如钻杆回撤速度、旋喷压力、浆液配合比）需根据地层特性优化，确保成桩质量与成拱效果。

2.4 超前液压支架技术

超前液压支架技术采用四连杆型液压支架，通过高压乳化液驱动液压缸实现升降、伸缩及倾斜动作，适应煤巷地质条件变化。支架设计注重超前性，可预测地质压力并提前调整支护参数，配备过载保护、紧急停车等安全系统，保障作业安全。该技术适用于大采高综采工作面，通过延长支护距离（可达100米以上）减少巷道变形，降低维护成本，同时提升采煤效率，是煤矿深部开采及复杂地质条件下的关键支护装备^[2]。

3 超前支护技术在采矿工程中的应用要点

3.1 巷道掘进中的超前支护应用

(1)合理选择超前支护方式：需依据巷道地质条件、围岩稳定性及掘进工艺确定。软弱破碎围岩宜采用管棚注浆或小导管注浆，形成整体承载结构；中等稳定围岩可选用超前液压支架，兼顾支护强度与灵活性；富水地层需结合水平旋喷桩实现防渗加固。同时需考虑施工效率与成本，确保支护方式与掘进设备匹配，避免因支护滞后影响进度。(2)准确确定超前支护参数：参数设计需基于围岩力学特性与工程经验。管棚直径、间距及注浆压力需满足承载拱形成要求；小导管外插角、长度及注浆扩散半径需覆盖潜在松动区；液压支架支护强度应大于顶板压力，并预留安全系数；旋喷桩咬合宽度需确保帷幕连续性。参数需通过数值模拟或现场试验优化，避免过度支护或强度不足。(3)严格控制施工质量：施工过程需规范操作流程。管棚与小导管安装需保证孔位精度与角度偏差 $\leq 1^\circ$ ，注浆时采用分段升压、稳压工艺，确保浆液充填密实；液压支架架设需检查液压系统密封性，避免漏液导致支护失效；旋喷桩施工需控制钻杆提升速度与旋转速度，保证桩体直径均匀。施工后需进行质量检测，如注浆体强度试验、支架初撑力测试等。(4)加强监测与反馈：建立动态监测体系，通过位移计、应力计等设备实时监测围岩变形与支护受力状态。监测数据需及时分析，若变形速率超限或支护应力接近设计值，需立即调整支护参数或采取补强措施。同时建立反

馈机制，将监测结果反馈至设计环节，优化后续支护方案，形成“设计-施工-监测-调整”的闭环管理，提升支护效果与安全性。

3.2 回采工作面中的超前支护应用

(1)确定合理的超前支护距离：需综合考虑工作面推进速度、顶板岩性及矿压显现规律。超前距离过短易导致支护滞后，引发顶板离层或冒落；过长则增加支护成本与施工难度。通常依据顶板初次来压步距与周期来压步距确定，一般取来压步距的1.5-2倍，同时结合数值模拟与现场实测数据动态调整，确保支护范围覆盖顶板压力影响区，保障工作面安全推进。(2)选择合适的超前支护设备：根据矿压强度与巷道断面尺寸选型。中等压力条件下可采用单体液压支柱配合铰接顶梁，灵活适应巷道起伏；高压力或大断面工作面宜选用超前液压支架，其支护强度高、移架速度快，且配备自动补液与防倒装置，提升支护可靠性；特殊地质条件（如断层、破碎带）需结合注浆加固设备，形成“支架+注浆”联合支护体系，增强围岩自稳能力。(3)优化超前支护布置方式：布置需兼顾支护效果与施工效率。常规布置采用“三排支柱”或“双排支架”，沿巷道中心线对称分布，间距根据支护设备性能确定，一般单体支柱间距0.8-1.2m，液压支架间距1.5-2.0m；地质破碎区需加密布置或采用交错排列，扩大支护覆盖范围；同时需预留足够行人与运输空间，避免支护结构干扰回采作业，实现“安全支护”与“高效生产”平衡。(4)加强与回采工艺的配合：支护施工需与采煤机割煤、移架、推溜等工序协同。超前支护设备安装应在工作面推进前完成，避免与采煤机作业冲突；移架时需控制降柱高度与速度，防止顶板突然下沉；推溜时需确保支架与刮板输送机连接可靠，避免设备错位；同时建立信息沟通机制，实时反馈顶板压力与支护状态，指导回采工艺调整，形成“支护-回采”一体化作业模式，提升整体效率。

3.3 特殊地质条件下的超前支护应用

(1)加强地质勘探和预测：特殊地质条件（如断层、破碎带、软弱夹层、高应力区及富水地层等）对支护影响显著，需通过地质钻探、物探（如地震波勘探、电阻率法）及三维地质建模等手段，精准掌握地质构造、岩性变化及水文条件。结合数值模拟分析应力分布与变形规律，预测潜在地质灾害风险区域，为支护设计提供可靠依据。(2)采用综合支护措施：单一支护方式难以适应复杂地质条件，需结合多种技术形成联合支护体系。例如，在断层破碎带采用“管棚注浆+超前液压支架”组合，管棚注浆加固围岩形成承载拱，支架提供动态支

撑；富水地层可结合“水平旋喷桩帷幕+小导管注浆”实现防渗与加固双重效果；高应力区采用“锚杆（索）网+注浆”增强围岩整体性，配合让压锚杆释放部分应力。综合支护需根据地质特征分层设计，确保各环节协同作用，提升支护适应性。(3)强化施工管理和监测：特殊地质条件下施工需严格规范操作流程，加强现场技术交底与质量检查。例如，注浆施工需控制浆液配比、注浆压力与扩散半径，避免浆液流失或加固不均；支架架设需检查初撑力与连接可靠性，防止偏载或漏液。同时建立多参数监测体系，通过位移计、应力计、孔隙水压力计等设备实时监测围岩变形、支护受力及地下水变化，数据异常时立即启动应急预案，调整支护参数或采取补强措施，确保施工安全与支护效果^[1]。

4 采矿工程中超前支护技术的发展趋势

4.1 智能化发展

超前支护技术将深度融合物联网、大数据与人工智能技术，实现实时监测与智能决策。通过传感器网络采集围岩变形、支护受力等数据，利用AI算法预测潜在风险并自动调整支护参数，如液压支架的智能调压与自适应支撑。同时，远程操控与自动化施工装备将减少井下作业人员，例如无人驾驶掘进机与智能支护机器人协同作业，提升施工效率与安全性。此外，数字孪生技术将构建虚拟支护模型，优化设计方案并模拟施工效果，推动超前支护向“感知-分析-决策-执行”闭环的智能化方向发展。

4.2 绿色化发展

超前支护技术将聚焦环保材料与低碳工艺，减少对生态环境的扰动。研发可降解注浆材料与再生金属支护构件，降低资源消耗与废弃物排放。推广低能耗支护设备，如太阳能供电的监测系统与节能型液压支架，减少能源消耗。同时，优化支护结构以减少材料用量，例如采用轻量化高强度合金或复合材料替代传统钢材。此外，施工过程将强化生态修复，如结合植被混凝土喷播技术，实现支护与生态重建同步进行，推动采矿工程向绿色可持续方向转型。

4.3 新型支护材料的研发与应用

新型支护材料将聚焦高性能、多功能与适应性提升。研发高强度、高韧性纤维增强注浆材料，提高破碎

围岩的加固效果；开发自修复材料，通过微胶囊技术或化学反应自动填补裂缝，延长支护寿命。同时，纳米材料与智能材料的引入将赋予支护结构感知与响应能力，如温度/应力敏感型涂层可实时反馈围岩状态。此外，轻质高强合金与复合材料将替代传统钢材，减轻支护结构自重并提升施工效率。

4.4 与其他技术的融合发展

超前支护技术将与地质勘探、掘进装备、信息化管理等技术深度融合，形成系统性解决方案。与地质勘探技术结合，通过三维地质建模与应力场分析，精准预测支护需求并优化布局；与智能化掘进装备协同，实现“掘-支-运”一体化作业，例如掘进机搭载自动支护装置，缩短支护周期；与信息化管理系统联动，通过BIM技术模拟支护施工过程，优化资源配置并实时监控进度。此外，与5G通信、云计算等技术融合，构建远程协作平台，支持专家实时指导与多设备协同控制，推动超前支护向集成化、协同化方向发展^[4]。

结束语

在采矿工程中，超前支护技术作为保障作业安全与效率的核心手段，其重要性随着开采深度与地质复杂度的提升日益凸显。从巷道掘进到回采工作面，再到特殊地质条件下的综合应用，超前支护通过精准的地质预测、智能化的设备协同、绿色化的材料创新以及多技术的融合发展，构建起覆盖全流程的安全防护体系。未来，随着智能化、绿色化与新材料技术的突破，超前支护将进一步向高效、精准、可持续方向演进，为深部开采、复杂地质条件下的资源开发提供坚实的技术支撑，推动采矿工程向安全、环保、智能的新阶段迈进。

参考文献

- [1]高占龙.超前支护技术在采矿工程中的应用研究[J].能源与节能, 2024(9): 293-295.
- [2]陈启洪.超前支护技术在采矿工程中的应用研究[J].内蒙古煤炭经济, 2023(18): 148-150.
- [3]韩永生.超前支护在采矿工程中的应用研究[J].世界有色金属, 2021(6): 35-36.
- [4]武哲曦.浅谈超前支护在采矿工程中的应用[J].矿业装备, 2021(4): 90-91.