

采矿工程中超前支护技术的应用

李玉超

山西反坡煤业有限责任公司 山西 长治 046600

摘要：采矿工程是基础工程，也是高风险工程。在采矿过程中，支护是非常重要的环节，直接关系到采矿工程的安全。超前支护技术是一种新型支护技术，能够有效提高采矿工程的安全性和稳定性。超前支护技术的应用已经成为采矿工程一个重要研究方向。

关键词：超前支护技术；采矿工程

矿山地质条件的复杂性与多变性给采矿作业带来了诸多不可预测的风险与挑战，如掘进过程中的坍塌、回采期间的安全隐患等，不仅严重威胁着作业人员的生命安全，也极大地影响了采矿效率与经济效益。超前支护是保障作业安全的重要技术措施，在采矿工程中做好超前支护，能够有效防止上述问题，降低安全生产事故发生的可能性，确保采矿工程顺利进行。

1 超前支护定义

1.1 关键定义要点。超前性：在开挖前施作，主动介入围岩的力学平衡状态，而非被动等待围岩变形后再加固。技术手段：通过注浆、锚杆、管棚、钢拱架等材料或结构，增强围岩的自承能力或形成人工承载拱（如“超前管棚支护”）。适用场景：主要针对软弱破碎围岩、富水地层、断层破碎带等高风险地质条件，或需要严格控制地表沉降的工程区域（如城市地铁隧道）。与传统支护的区别：传统支护（如喷射混凝土、钢拱架）通常在开挖后施作，属于被动补强；超前支护则是主动预加固，优化围岩应力分布，减少开挖扰动。常用超前支护形式：超前锚杆/管棚：在开挖轮廓线外插入钢管或锚杆，形成超前支撑梁。超前注浆：向围岩注入水泥浆或化学浆液，胶结破碎岩体并堵水。水平旋喷桩：通过高压旋喷形成连续的圆柱状水泥土加固柱。预衬砌（管幕法）：在开挖前铺设钢管或混凝土管形成连续支护结构（如地铁施工）。

1.2 超前支护技术核心原理。结构预支撑机制：管棚刚性承载，在开挖轮廓线外插入钢管（直径70-180mm），形成拱形覆盖层，利用钢管抗弯刚度承载围岩压力，并通过注浆与钢架焊接形成一体化承载结构。钢管施工外插角需精准控制，以确保支撑结构与开挖面的有效衔接。超前锚杆加固，通过锚杆锚固开挖面前方破碎岩体，形成连续拱形加固区，分散荷载至更稳定岩层。注浆加固作用：裂隙胶结强化，小导管注浆使水泥

浆渗入岩体裂隙，硬化后形成高强度加固体（如砂岩强度提升50%-70%），降低支护荷载至原值的1/3-1/5。地下水控制，帷幕注浆形成连续防水屏障，阻断地下水渗透路径，抑制富水地层软化导致的围岩失稳。

应力优化与变形调控：预应力主动平衡，通过高强锚索对围岩施加预应力，调整岩层内部应力分布，抑制后续开挖释放的变形能量。协同沉降控制，超前支护可抑制30%-40%的地表沉降和40%-50%的隧道拱顶沉降，显著优于传统支护的滞后效应。动态设计与参数适配：精准工艺控制，根据地质条件动态调整注浆压力、钢管布置间距等参数，例如富水地层采用加密管棚+高压注浆组合。监测反馈优化，利用三维扫描技术实时监测支护结构变形，动态修正填充材料用量（如负泊松比结构板填充量），提升结构适应性。

2 超前支护的作用

2.1 稳定围岩结构。抑制围岩变形，通过注浆加固、管棚支护等技术，显著降低围岩塑性区扩展，提升整体稳定性。例如，注浆后的砂岩强度可增强50%-70%，粉砂岩强度提升2-4倍。防止塌方与冒顶，在开挖前形成人工承载拱（如管棚拱形结构），有效约束围岩滑动位移，减少塌方风险。控制应力释放，超前锚杆、旋喷桩等主动介入方式，优化围岩应力分布，降低开挖后的应力突变对结构的冲击。

2.2 保障施工安全。降低突发事故概率，通过超前加固岩体，消除跑车、掉道、顶板垮落等安全隐患，尤其在矿山运输系统中可减少60%以上事故风险。改善作业环境，减少空顶作业概率至 $\leq 10\%$ （传统支护为35%-45%），为人员与设备提供稳定操作空间。

2.3 控制地表与洞室沉降。抑制地层位移，超前支护体系可减少地表总沉降量的30%-40%，隧道拱顶沉降量的40%，显著保护地表建筑物。阻断地下水侵蚀，注浆技术与旋喷桩在富水地层中封闭裂隙，降低突水风险与水

压对围岩的破坏。

2.4 提升施工效率。缩短工序衔接耗时，一体化支护方案（如破碎—运输—处理协同作业）可使推进效率提升8%-15%。减少返修与维护成本，巷道返修率从传统支护的25%-30%降至8%-12%，单循环进尺从1.2-1.5m提高至2.0-2.5m。

2.5 优化支护体系协同性。减轻后续支护压力，超前支护降低围岩扰动，使初期支护荷载减少2/3-4/5，并为永久衬砌提供更优的受力条件。适应复杂地质需求，针对断层带、软弱地层等特殊条件，通过模块化设计（如紧凑型支护系统）减少扩帮量，提升适应性。

3 超前支护技术种类及特点

3.1 超前锚杆支护。技术特点，柔性支护：整体刚度较小，适用于地下水较少的软弱围岩。施工便捷：采用外插角（10°-30°）安装，超前长度通常为循环进尺的3-5倍（3-5m）。局限性：支护长度短（3-5m），滑移面内支撑不足，自稳性差的地层易失稳。

3.2 管棚支护。超前大管棚，高强度支护：钢管直径70-180mm，超前长度10-45m，与钢拱架组合形成棚架体系，适用于洞口软弱围岩及高应力区。注浆协同：通过钢管注浆加固地层，提升围岩自稳能力，抑制地表沉降30%-35%。超前小导管注浆，快速加固：采用φ32-50mm钢管注浆，浆液渗透裂隙形成加固圈，适用于破碎含水地层。施工参数：长度3-6m，环向间距20-50cm，注浆压力3-5MPa。

3.3 注浆加固技术。超前帷幕注浆，连续屏障：多排小导管形成注浆帷幕，封闭地下水通道并加固围岩，适用于富水地层。渗透注浆，改性围岩：水泥浆液提高砂岩强度50%-70%，泥质岩强度提升2-4倍，减少支护荷载2/3-4/5。

3.4 特殊工艺。冻结法，地层硬化：通过冷冻管注入低温介质（如液氮），冻结松散含水地层，成本较高但封闭水效果显著。水平旋喷桩，连续加固体：高压旋喷形成水泥土柱体，适用于特殊地质条件下的超前预加固。自进式锚杆，一体化施工：集钻进、注浆、锚固功能于一体，适用于松散岩层，无需预钻孔即可安装。

3.5 技术对比与适用性。

技术类型	适用场景	核心优势	局限性
超前锚杆	软弱围岩、低地下水	柔性适应变形，施工快捷	支护长度短，滑移面支撑弱
超前大管棚	洞口破碎带、高应力区	刚度大，抑制沉降显著	工艺复杂，成本高
小导管注浆	含水破碎地层	快速封闭裂隙，堵水防渗	加固范围有限

续表：

技术类型	适用场景	核心优势	局限性
冻结法	松散富水地层	地层硬化彻底，防水效果好	能耗高，周期长
自进式锚杆	松散岩层、自稳能力差	无需预钻孔，安装效率高	材料成本较高

4 超前支护技术的关键优势

4.1 显著的地层加固与变形控制。提升围岩力学性能，通过注浆、管棚等技术，砂岩强度可增强50%-70%，粉砂岩和泥质岩强度提升2-4倍，有效降低支护荷载至原值的1/5-1/3。抑制沉降与变形，地表沉降减少30%-35%，隧道拱顶沉降降幅达40%。在复杂地层中（如断层破碎带），管棚支护形成的棚架体系可承载80%以上的围岩压力。

4.2 高效施工与成本优化。缩短工期，采用高强锚索替代传统支护，单体柱数量减少88%，支护效率提升1200%，循环进尺从1.2m增至2.5m。协同工艺集成，集成超前探测技术（如TSP+三维地质雷达），动态优化开挖方案，施工效率提升8%-15%。

4.3 安全性与适应性提升。降低施工风险，通过注浆堵水、冻结法等技术，富水地层突水风险降低60%以上；空顶作业率从35%降至≤10%。适应复杂地质，软弱围岩、断层带等场景中，管棚支护可覆盖超前长度45m，搭接长度≥1.5m，形成连续承载拱。

5 超前支护技术的主要挑战

5.1 技术实施复杂性。工艺精度要求高，钢管安装需控制外插角（10°-30°）、注浆压力（3-5MPa）等参数，偏差超过5%可能导致支护失效。设备与材料限制，冻结法能耗高，施工周期延长30%；自进式锚杆成本较传统锚杆高40%-50%。

5.2 地质条件制约。高风险地层处理难，富水破碎带注浆易漏浆，需多次补浆；松散砂土层中管棚安装易塌孔，成孔率不足60%。动态地质响应，超前探测盲区（如小断层）可能导致支护参数与实际围岩条件不匹配，需实时调整注浆量和锚杆密度。

5.3 经济性与维护成本。初期投入大，管棚支护综合成本较传统喷锚高2-3倍；冻结法单延米造价达1.5-2万元。维护难度，注浆效果随时间衰减，需二次加固的概率达15%-20%；高强锚索长期蠕变需定期监测。

5.4 技术优化方向。

领域	策略	目标效果
工艺参数	智能化监测系统动态调整注浆压力与管棚搭接长度	降低偏差率至≤3%

续表:

领域	策略	目标效果
材料创新	研发低成本速凝注浆材料与轻量化高强锚索	成本降低30%-40%
地质适配	融合BIM+三维地质建模预演支护方案	复杂地层支护成功率提升至90%

6 超前支护技术应用形式

6.1 超前锚杆与管棚支护。超前锚杆：采用长度3 ~ 5m的锚杆对工作面前上方岩体进行锚固，适用于破碎带和松软岩体的加固。管棚组合：通过钢支架与长钢管、钢轨结合形成连续拱形支撑结构，显著提升围岩稳定性并抑制地表沉降，常用于隧道及采矿工程。注浆加固技术，小导管注浆：在掌子面附近钻孔插入小导管并注浆，浆液渗入岩体裂隙后硬化，形成高强度加固体。超前帷幕注浆：利用多排小导管形成连续注浆屏障，控制地下水渗透并防止塌方。注浆锚杆：直接通过锚杆向岩体注射水泥浆，胶结后硬化破碎岩体，加固效果显著。

6.2 预应力锚索技术。采用高强度钢绞线锚索对不稳定区域施加预应力，增强岩层承载能力，如采矿工程中“高强锚索代替单体柱”技术可减少支护密度并提升安全性。

6.3 立柱式超前支护。集中式支架：在采煤工作面正巷采用大直径钻孔或集中式支架支撑煤层。分散式支架：以分散排列的立柱支撑巷道顶板，适用于地压较低的矿山环境。

6.4 钢筋网喷射混凝土。在超前支护区域铺设钢筋网并喷射速凝混凝土，快速封闭围岩表面，减少风化剥落。

7 超前支护技术应用挑战

7.1 复杂地质条件适应性难题。围岩稳定控制不足，在高压、高瓦斯或软岩地层中，传统超前支护装置的防护范围有限，难以应对大变形围岩的持续挤压和渗水压力。破碎岩体加固失效风险，松散破碎带注浆时易出现浆液流失或扩散不均，导致胶结体强度不足，影响整体承载效果；特殊地层（如富水层）冻结法成本高昂且维护周期长。

7.2 施工工艺与设备限制。机械化程度不足，现有推移式支护装置依赖人工操作，移架精度低、效率差，难以

以满足快速掘进需求；重型设备在狭窄巷道中的灵活性和安全性面临考验。注浆参数控制困难，注浆压力、扩散半径等参数需精准匹配地层特性，施工中易因经验不足导致过度注浆（浪费材料）或欠注（加固失效）。

7.3 经济与安全风险。成本控制压力，超前管棚、高强锚索等高性能材料初期投入高，且复杂工艺导致施工周期延长，间接增加综合成本。安全隐患突出，若超前支护范围设计不足或施工质量不达标，可能引发局部塌方或地下水突涌，威胁作业安全。

7.4 技术与人员协同短板。动态地质响应滞后，现有技术对围岩实时变形监测能力有限，超前支护方案难以及时调整以适应突发性地质变化。人员技能匹配不足，机械化与自动化设备普及后，传统支护工人需掌握新型工艺（如锚索预应力调控、注浆参数优化），培训周期和难度显著增加。典型案例与改进方向，以推移式巷道超前支护装置为例，其优化需通过结构轻量化设计提升适应能力，同时引入智能传感技术实时监测围岩应力，逐步构建“预测-支护-反馈”闭环体系。

超前支护技术通过主动预加固、注浆改性等手段，在安全、效率、成本间取得平衡，但其复杂工艺与地质不确定性仍需通过智能化、材料革新进一步突破。水平旋喷桩等辅助措施也可用于特定地质条件下的超前支护。随着技术发展，自动化与机器人辅助的超前支护逐渐成为趋势，例如通过协同控制系统提升移架精度和作业效率。

参考文献

[1]李生.超前支护在采矿工程中的应用研究[J].世界有色金属,2021(06):35-36.

[2]韩林.采矿工程中超前支护的合理运用[J].当代化工研究,2020(20):99-100.

[3]何永.隧洞开挖超前支护施工技术在吉林汪清县西大坡水利枢纽工程中的应用[J].水利建设与管理,2022,35(10):4-7.

[4]李军.超前支护在采矿中的应用效果分析[J].山东煤炭科技,2022(09):45-46.

[5]杨茹.超前支护在采矿工程中的运用[J].能源与节能,2022(03):106-107+144.