

隧道超前小导管注浆施工浆液扩散范围的控制方法实践

陈银普

中铁十局集团第四工程有限公司 江苏 南京 210046

【摘要】：隧道施工中，超前小导管注浆技术广泛应用于围岩加固、防水堵水等工程场景，浆液扩散范围的精准管控是保障工程结构安全与施工质量的核心环节。通过系统研究浆液体系特性、注浆参数调控及施工工艺优化等关键技术要点，构建了适配不同地质条件的浆液扩散范围控制技术体系。实践表明，通过对施工参数的精细化调节，可有效约束浆液扩散边界，规避对周边土体的过度扰动，降低浆液损耗率，显著提升隧道支护结构的承载稳定性。该控制方法的工程应用，不仅强化了隧道施工的安全冗余，还减少了环境扰动风险，提升了项目综合经济效益，为隧道注浆施工工艺的标准化应用提供了可靠的技术支撑与实践依据。

【关键词】：隧道施工；小导管注浆；浆液扩散；控制方法；工程质量

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.003

引言

隧道工程的施工安全与结构质量高度依赖超前支护技术，其中超前小导管注浆技术因适配性强，在各类地质条件下的隧道施工中应用广泛。随着隧道工程向深部、复杂地质区域拓展，浆液扩散范围的精准控制已成为制约注浆支护效果的核心技术瓶颈。浆液扩散效果直接决定隧道防水性能与围岩加固质量，同时关联周边土体稳定性及生态环境安全。如何在保障浆液有效扩散至设计加固范围的前提下，规避过度扩散引发的土体扰动、浆液浪费等问题，已成为隧道施工领域亟待解决的关键技术问题。实践表明，通过针对性的技术手段调控浆液扩散范围，可有效提升施工效率、降低工程成本。本文结合工程实践，探讨隧道超前小导管注浆施工中浆液扩散范围的控制方法，分析其在不同地质环境下的适配性，提出针对性优化方案。

1 超前小导管注浆技术的基本原理与应用

超前小导管注浆技术作为隧道超前支护的核心技术之一，在软弱围岩、破碎带及水文地质复杂区域的隧道开挖施工中发挥关键作用。该技术通过在隧道开挖掌子面前方预设注浆孔位，植入小导管并注入特定性能的浆液，使浆液在围岩裂隙及孔隙中扩散、胶结，形成整体性强、承载能力高的注浆加固壳体，实现超前支护与防水堵水的双重功能。其核心技术要点在于确保浆液均匀扩散并与围岩有效胶结，形成符合设计要求的加固体系。

在实际工程应用中，超前小导管注浆效果受多重因素耦合影响。浆液配比及流变特性是决定浆液渗透能力与扩散形态的核心要素，需根据地质条件进行针对性适配。对于砂土等多孔介质围岩，需优先选用扩散性优良的浆液体系；对于黏土等低渗透性围岩，则

需侧重提升浆液的黏结强度与胶结性能^[1]。注浆压力与注浆速率直接决定浆液扩散边界，过高的注浆压力易引发浆液超范围扩散，破坏围岩原始结构完整性，诱发坍塌风险；压力不足则导致浆液无法渗透至设计加固范围，难以形成有效支护。

通过对注浆过程中关键参数的精细化调控，可实现浆液扩散范围的精准控制，最大化发挥其支护效能，同时规避浆液浪费。该技术的合理应用可有效提升隧道围岩的抗渗性与抗裂性，降低施工过程中的环境扰动风险。在工程实践中，通过动态优化施工参数、完善技术工艺，超前小导管注浆技术在保障施工安全、提升支护质量方面的技术优势得到充分体现。

2 浆液扩散范围的影响因素分析

浆液扩散范围受地质条件、施工工艺、浆液特性及环境因素等多重维度影响，各因素相互作用、耦合关联。围岩物理力学特性是决定浆液扩散范围的核心基础条件，不同岩性围岩的孔隙结构、渗透系数存在显著差异，直接主导浆液扩散形态与范围。在砂土、砾石等高渗透性围岩中，浆液易沿孔隙快速渗透扩散；在黏土、页岩等低渗透性围岩中，浆液扩散范围受限，易形成局部积聚，需通过优化浆液性能突破渗透屏障。围岩颗粒级配、孔隙率及水文地质条件等均会对浆液扩散过程产生显著影响作用。

施工参数调控是浆液扩散范围控制的关键技术手段。注浆压力作为浆液扩散的动力源，其取值精度直接决定扩散效果：压力过高易引发围岩劈裂，导致浆液无序扩散；压力过低则无法克服围岩渗透阻力，难以达到设计加固范围。注浆速率同样影响浆液扩散形态，快速注浆可在短时间内填充围岩表层孔隙，形成临时封堵；慢速注浆则利于浆液深度渗透，实现均匀

扩散加固。

浆液物理化学特性直接决定其流动扩散能力与胶结效果。不同类型浆液的黏度、流变参数及胶结强度存在本质差异，需根据工程需求精准选型^[2]。高黏度浆液适用于低渗透性围岩，可有效控制扩散范围，提升胶结强度；低黏度浆液则适配高渗透性围岩，可提升扩散效率，实现大范围加固。浆液固化时间需与施工进度精准匹配，固化过快易导致渗透不充分，固化过慢则可能引发浆液流失，均会影响支护效果。

隧道施工环境条件对浆液扩散范围具有显著干扰作用。地下水位高度直接影响浆液渗透路径，地下水流动易导致浆液稀释、流失，破坏预设扩散形态。隧道开挖深度、施工环境温度等参数也会间接影响浆液性能与扩散效果。在复杂地质环境下，浆液扩散规律具有显著非线性特征，需结合现场试验与工程经验制定针对性施工方案。综上，浆液扩散范围受围岩特性、施工工艺、浆液性能及环境条件的综合调控，通过对各影响因素的系统分析与精准把控，可实现浆液扩散范围的有效控制，保障注浆施工质量^[2]。

3 优化浆液扩散控制方法的技术手段

优化浆液扩散控制方法的核心目标是通过多维度技术协同，实现浆液扩散范围的精准调控，保障隧道支护结构稳定性，同时降低浆液损耗与环境扰动风险。该技术体系涵盖浆液配方优化、施工参数调控、设备升级及环境监测等多个关键环节，需结合工程实际进行系统性适配。浆液配方优化是提升扩散控制精度的基础，通过调整浆液组分比例，精准调控其黏度、流变特性及固化时间，实现与地质条件的精准匹配。针对低渗透性围岩，采用高黏度改性浆液可有效约束扩散范围，保障局部加固效果；针对高渗透性围岩，选用低黏度、高扩散性浆液可提升渗透效率，实现大范围加固。通过添加专用改性剂提升浆液流变性能，可增强其在围岩中的稳定性，减少无序流动导致的浆液浪费。

注浆压力精准调控是浆液扩散范围控制的核心技术环节。采用智能化注浆控制系统，结合围岩实时反馈数据动态调整注浆压力，可实现扩散范围的精准约束。在复杂地质区域施工时，通过布置围岩应力传感器、孔隙水压力传感器等监测设备，实时采集围岩响应数据，为注浆压力调控提供数据支撑，实现注浆过程的动态闭环控制。注浆设备的精度升级是保障参数调控效果的硬件基础，高精度注浆泵、智能流量控制系统可实现浆液注入量与注入速率的精准控制，相较

于传统手动注浆设备，可显著提升浆液分布均匀性^[3]。在复杂地质环境下，智能化设备的应用可大幅提升注浆施工的精准度，确保浆液扩散范围符合设计要求。

施工工艺优化是提升浆液扩散控制效果的关键路径，其核心在于通过工艺适配性调整实现浆液扩散形态的精准调控。实践中，分段注浆、多点协同注浆及间隔注浆等优化工艺的组合应用成效显著。在软弱围岩区域，采用分段注浆工艺，完成一段注浆并待浆液初凝后再进行下一段施工，可有效避免浆液因连续注入引发的过度扩散，防止围岩扰动导致的支护失稳。通过科学布设注浆孔位，实施多点协同注浆，能使浆液从不同点位同步扩散、相互衔接，实现加固区域的均匀覆盖，大幅提升围岩加固整体性。采用间隔注浆技术，按预设时间间隔交替进行相邻孔位注浆，可减少浆液在未固化前的串流现象，保障各分区注浆效果达标，为后续隧道开挖提供可靠支护基础。

外部环境监测与动态调控是保障扩散控制效果的重要支撑。通过地质雷达、孔隙压力计等先进监测设备，实时采集地下水位、围岩变形等环境参数，为注浆策略调整提供依据。在地下水丰富区域，需先采取降水措施稳定水文环境，再实施注浆作业，规避水流对浆液扩散的干扰；根据隧道开挖深度、环境温度等参数，动态调整浆液配方及施工参数，确保扩散效果。综上，浆液扩散范围控制需通过浆液配方优化、施工参数精准调控、设备智能化升级、工艺优化及环境动态监测的多维度协同，实现复杂地质条件下的精准控制，保障施工安全与工程质量，降低成本与环境影响。

4 实际施工案例与控制效果分析

在复杂地质条件下的隧道施工中，超前小导管注浆技术的应用效果高度依赖浆液扩散范围的精准控制。通过典型工程案例分析，可清晰验证优化控制方法的实际应用价值，为同类工程提供技术参考。某隧道项目穿越软弱黏土地层，土体天然含水率达35%~40%，且地下水位埋深仅2.5m，注浆施工面临浆液易流失、扩散范围难控制等技术难题。针对该地质条件，项目团队采用黏度为80~100mPa·s的高黏度改性水泥浆体系，搭配智能化注浆控制系统，将注浆压力精准控制在0.8~1.2MPa，注浆流量稳定在30~50L/min，同时采用分段注浆工艺，布设多组监测点追踪浆液扩散形态。通过该技术方案实施，有效约束了浆液扩散边界，避免了过度扩散引发的土体扰动，确保浆液在设计范围内充分胶结，形成稳定的超前支护壳体。

另一典型案例为岩溶发育区域隧道施工项目，该区域地下水渗透系数达 $10^{-2}\sim 10^{-1}\text{cm/s}$ ，浆液扩散易受水流干扰，注浆效果稳定性差。项目组通过优化浆液配方，添加3%的专用抗分散剂与2%的速凝剂，使浆液初凝时间缩短至15~20min，提升浆液抗水流稀释能力与早期强度，同时采用高精度注浆泵与压力反馈系统，将注浆压力波动控制在 $\pm 0.1\text{MPa}$ 内，实现注浆参数的实时调控^[4]。施工过程中，借助地质雷达实时监测浆液扩散情况，动态调整注浆策略，确保浆液精准填充岩溶裂隙，有效解决了水流干扰导致的浆液浪费问题，显著提升了注浆加固效果。

某城市地铁隧道项目穿越复合地层，存在6处破碎带与4层软弱夹层，浆液扩散控制难度极大。项目团队采用“分区域、分类型”的注浆控制策略：针对破碎带采用黏度20~30mPa·s的低黏度浆液，搭配1.5~2.0MPa的中高压注浆工艺，确保浆液充分渗透至破碎带深部；针对软弱夹层采用黏度70~90mPa·s的高黏度浆液，搭配0.5~0.8MPa的低压慢注工艺，注浆流量控制在20~30L/min，避免过度扩散。通过该差异化控制方案的实施，有效实现了不同地质区域的精准加固，显著提升了隧道结构稳定性，降低了施工风险。上述工程案例表明，通过针对性选择浆液体系、优化施工参数、采用智能化设备及差异化工艺，可实现不同地质条件下浆液扩散范围的精准控制，有效提升注浆支护效果，降低工程成本与施工风险，验证了优化控制方法的工程实用性与技术先进性。

5 控制方法的总结与技术展望

在隧道超前小导管注浆施工中，浆液扩散范围的精准控制是保障支护结构稳定性与工程质量的核心技术环节。通过工程实践总结可知，浆液体系选型、注浆参数调控、施工工艺优化及智能化监测设备应用，是实现浆液扩散范围精准控制的关键技术路径。针对

不同地质条件，需采用差异化的控制策略：高渗透性围岩需侧重提升浆液扩散性，搭配精准的压力调控；低渗透性围岩需强化浆液黏结性能，优化注浆工艺以突破渗透屏障。注浆压力与速率的精细化调控是核心控制参数，需结合现场监测数据动态调整，规避压力过高或过低引发的施工问题^[5]。智能化控制系统的应用可显著提升参数调控精度，为扩散范围控制提供可靠技术支撑。

近年来，隧道注浆施工技术的发展呈现智能化、精准化趋势，高精度注浆设备、实时监测系统的广泛应用，大幅提升了浆液扩散控制的精准度。地质雷达、孔隙压力传感器等监测设备的集成应用，实现了注浆过程的动态追踪与反馈，为参数实时调整提供数据支撑。环保型浆液体系的研发与应用，在提升加固效果的同时，有效降低了环境扰动风险。展望未来，隧道注浆扩散控制技术将向智能化、自动化方向深度发展。结合大数据分析、人工智能算法与实时监测技术，构建浆液扩散范围预测模型，实现施工参数的主动预判与动态优化，将成为核心技术发展方向。新型注浆材料的研发、智能化施工设备的升级及施工工艺的创新，将进一步提升浆液扩散控制的精准度与效率，为复杂地质条件下的隧道施工提供更可靠的技术保障。

6 结语

通过对隧道超前小导管注浆施工浆液扩散范围控制方法的系统研究与工程实践可知，浆液体系精准选型、注浆参数精细化调控及施工工艺优化是保障控制效果的核心要素。借助智能化监测设备与动态调控技术，可实现不同地质条件下浆液扩散范围的精准控制，显著提升隧道支护结构稳定性与施工安全冗余。未来，随着智能化技术、新型材料及创新工艺的不断发展，浆液扩散控制方法将进一步适配复杂地质环境，推动隧道施工技术向更高效、更精准、更环保的方向发展。

参考文献：

- [1] 戴文娟.公路隧道超前小导管注浆支护存在的问题与解决办法[J].内蒙古科技与经济,2025,(10):141-144.
- [2] 刘琪.市政公路隧道浅埋暗挖施工中软土预加固注浆工艺研究[J].山西建筑,2024,50(18):90-92.
- [3] 包其刚,闫云翔,姚崇凯,等.穿越断层破碎带隧道超前注浆加固效果分析[J].交通科学与工程,2024,40(03):91-99.
- [4] 王涛.隧道矿山法施工对地表建筑物影响分析及其控制措施[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2023,25(02):28-32.
- [5] 杨小文.隧道施工中超前支护控制技术探析[J].工程建设与设计,2022,(11):200-202.