

公路隧道施工中高压喷射灌浆技术应用研究

刘 威 陈 硕

中国水利水电第四工程局有限公司 青海 西宁 810000

【摘要】：高压喷射灌浆技术在公路隧道施工中具有提升工程质量与保障施工安全的关键作用，其应用可有效解决隧道施工中的防渗、加固等难题。本文探讨该技术在公路隧道施工中的具体应用方式，分析技术应用过程中的核心要点与潜在问题，提出针对性的优化策略，旨在为公路隧道施工中该技术的合理运用提供参考，推动公路隧道工程施工技术水平的提升，确保工程整体稳定性与耐久性。

【关键词】：公路隧道施工；高压喷射灌浆技术；防渗加固；技术优化；工程稳定性

DOI:10.12417/2705-0998.25.19.007

引言

公路隧道工程建设对区域交通发展意义重大，然而在施工过程中，常面临复杂地质条件带来的防渗、围岩加固等挑战，这些问题若不能妥善解决，将直接影响工程进度与质量。高压喷射灌浆技术凭借其独特的施工原理与优势，在处理此类工程难题方面展现出良好潜力。深入研究该技术在公路隧道施工中的应用，能够明确其适用场景与操作规范，克服技术应用中的不足，为隧道工程施工提供可靠的技术支持，助力实现工程建设的高效与高质量目标。

1 公路隧道施工中高压喷射灌浆技术应用面临的主要问题

1.1 复杂地质条件对技术应用效果的制约

在公路隧道施工区域，地质条件往往呈现出多样性与复杂性，如存在松散砂层、破碎岩层、溶洞等情况。高压喷射灌浆技术在不同地质条件下的作用机理存在差异，当遇到松散砂层时，浆液扩散范围难以有效控制，可能导致加固范围不足或出现浆液流失现象；在破碎岩层中，岩石的裂隙发育状况会影响浆液的渗透与凝结，若裂隙过大，浆液易沿裂隙流失，无法形成完整的防渗加固帷幕，进而影响技术应用的整体效果，给隧道工程的防渗与加固带来隐患。

1.2 技术操作规范性不足引发的施工质量问题

高压喷射灌浆技术的施工过程涉及诸多操作环节，包括钻孔定位、浆液配置、喷射参数设定等。部分施工团队在操作过程中，缺乏严格的规范性，如钻孔定位精度偏差较大，会导致灌浆孔位与设计要求不符，影响加固点的准确性；浆液配置时，未按照设计配比精确控制原材料用量，可能导致浆液性能指标不达标，降低凝结后的强度与防渗性能；喷射参数设定不合理，如喷射压力、提升速度等参数与实际地质条件不匹配，会造成喷射效果不佳，出现加固体强度不均、防渗性能下降等质量问题。

1.3 技术应用过程中的安全风险隐患

高压喷射灌浆技术施工涉及高压设备的使用，若设备维护

不当或操作人员未严格遵守安全操作规程，易引发安全事故。高压注浆泵若长期使用后未及时检修，可能出现压力不稳定、部件损坏等情况，在施工过程中可能导致设备故障，甚至引发浆液泄漏、高压喷射伤人等安全风险；在隧道有限的施工空间内，浆液运输、设备摆放等环节若规划不合理，可能造成施工通道堵塞，影响应急疏散，增加施工安全风险。

2 高压喷射灌浆技术在公路隧道施工中的应用原理与优势

2.1 技术应用的核心原理

高压喷射灌浆技术通过特制的注浆管，将具有一定压力的浆液以高速喷射的方式注入地层。在高压喷射作用下，浆液会对周围土体或岩层产生切割、搅拌作用，使浆液与被加固介质充分混合。随着浆液的凝结硬化，形成具有一定强度和防渗性能的固结体，从而实现对隧道围岩的加固或形成防渗帷幕。不同的喷射方式，如旋喷、定喷、摆喷，其原理略有差异，旋喷通过注浆管旋转喷射形成柱状固结体，定喷则是固定方向喷射形成板状固结体，摆喷通过注浆管摆动喷射形成扇状或墙状固结体，可根据隧道施工的具体需求选择合适的喷射方式。

2.2 相较于传统技术的突出优势

与传统的隧道防渗加固技术相比，高压喷射灌浆技术具有明显优势。传统技术如灌浆法，往往存在浆液扩散范围有限、加固效果不均匀等问题，且施工周期较长。而高压喷射灌浆技术能够实现较大范围的加固与防渗，固结体的强度和防渗性能更易控制，施工效率更高。该技术对施工场地要求相对较低，在隧道狭窄的施工空间内也能较好地开展作业，减少对周边环境的干扰，同时施工过程中产生的废弃物较少，符合绿色施工的要求，能够有效降低工程施工对生态环境的影响。

2.3 技术在不同隧道施工场景的适配性

高压喷射灌浆技术在公路隧道施工的多种场景中具有良好适配性。在隧道洞口段施工中，由于洞口区域围岩通常较为破碎，易出现渗水、塌方等问题，采用该技术可对洞口周边地层进行加固，形成防渗帷幕，保障洞口施工安全；在隧道穿越

富水地层时，该技术能够有效阻断地下水的渗透通道，降低隧道内涌水风险，为隧道内部施工创造干燥环境；在隧道衬砌背后回填灌浆环节，通过高压喷射灌浆技术可填充衬砌与围岩之间的空隙，提高衬砌结构的稳定性，增强隧道整体的承载能力与防渗性能，满足不同施工场景下的工程需求。

3 解决公路隧道施工中高压喷射灌浆技术应用问题的具体措施

3.1 针对复杂地质条件的技术调整与优化

面对复杂地质条件，首先需开展详细的地质勘察工作，全面掌握施工区域的地质构造、地层分布、地下水情况等信息，为技术应用提供准确的地质依据。根据勘察结果，对高压喷射灌浆技术参数进行针对性调整，如在松散砂层中，适当提高浆液浓度，减小喷射压力，降低提升速度，以控制浆液扩散范围，避免浆液流失；在破碎岩层中，可采用分段喷射、间歇灌浆的方式，确保浆液充分填充裂隙，形成完整的固结体。可结合其他辅助技术，如超前地质预报技术，实时监测地质条件变化，及时调整施工方案，保障技术应用效果。

3.2 强化技术操作规范与施工质量管控

建立完善的技术操作规范体系，明确各施工环节的操作标准与要求，对施工人员进行系统培训，确保其熟练掌握技术操作要点与安全操作规程。在施工过程中，设立专门的质量管控小组，对施工质量进行全程监督检查，如对钻孔定位精度进行严格检测，采用专业测量设备确保孔位偏差符合设计要求；对浆液配置过程进行实时监控，定期检测浆液的性能指标，确保浆液质量达标；对喷射参数进行实时记录与分析，根据实际施工情况及时调整参数，确保喷射效果满足工程要求。建立质量追溯制度，对施工过程中的各项数据进行存档，便于后续质量问题的排查与处理。

3.3 构建完善的施工安全保障体系

加强施工设备的维护与管理，制定设备定期检修计划，安排专业技术人员对高压注浆泵、注浆管等设备进行日常检查与维护，及时发现并处理设备故障，确保设备处于良好运行状态。强化施工人员的安全意识，定期开展安全培训与教育活动，提高施工人员对安全风险的认知与防范能力，要求施工人员在作业过程中严格佩戴安全防护用品，遵守安全操作规程。合理规划隧道施工空间，明确浆液运输通道、设备摆放区域与人员行走通道，确保施工通道畅通无阻，同时配备充足的应急救援设备与物资，制定应急预案并定期组织演练，提高应对突发安全事故的能力，保障施工安全。

4 高压喷射灌浆技术在公路隧道施工中的应用效果验证与评估

4.1 基于实际工程案例的应用效果分析

选取不同地质条件、不同施工规模的公路隧道工程案例，对高压喷射灌浆技术的应用效果进行分析。在某穿越富水砂层的公路隧道工程中，采用该技术后，隧道内涌水现象得到有效控制，经检测，固结体的渗透系数远低于设计要求，防渗效果显著；在某隧道洞口段施工中，通过该技术对洞口周边地层进行加固后，围岩稳定性明显提高，施工过程中未出现塌方等安全事故，工程进度顺利推进。通过对这些实际案例的分析，验证高压喷射灌浆技术在公路隧道施工中的有效性与可靠性，总结技术应用的成功经验。

4.2 建立多维度的技术应用效果评估指标体系

从工程质量、施工效率、安全性能、经济效益等多个维度建立技术应用效果评估指标体系。工程质量方面，包括固结体强度、防渗性能、加固范围等指标，通过现场取样检测、无损检测等方式获取数据；施工效率方面，以施工进度、设备利用率、人工投入等作为评估指标，对比分析采用该技术与传统技术的施工周期差异；安全性能方面，通过统计施工过程中的安全事故发生率、隐患排查整改率等指标，评估技术应用的安全保障效果；经济效益方面，综合考虑施工成本、材料消耗、后期维护费用等因素，分析采用该技术带来的经济收益，全面、客观地评估技术应用效果。

4.3 根据评估结果优化技术应用方案

依据多维度评估指标体系得出的结果，系统梳理高压喷射灌浆技术在公路隧道施工中的应用表现，精准识别技术优势与短板。对于评估中表现突出的方面，如在富水地层防渗效果显著、施工效率高于传统技术等，提炼关键经验，如特定地质下的参数设置、作业流程优化等，通过行业案例库、技术手册等形式推广，为同类工程提供参考。若发现部分指标未达标，如固结体强度不均，需追溯根源：若为喷射压力、提升速度等参数与地质不匹配，结合勘察数据调整参数范围；若因操作人员未按规范执行，强化岗前培训与现场监督，规范操作流程。结合评估结论，对技术应用方案动态优化，完善参数体系与操作标准，提升技术适配性与可靠性，为后续公路隧道工程提供更科学的技术方案。

5 推动高压喷射灌浆技术在公路隧道施工中长效应用的策略

5.1 加强技术研发与创新提升技术性能

加大对高压喷射灌浆技术研发的投入，鼓励科研机构、高校与施工企业合作，开展技术创新研究。针对当前技术在复杂地质条件下应用的局限性，研发新型浆液材料，提高浆液的适应性、强度与防渗性能，如研发具有速凝、高强度特性的特种

浆液，以满足特殊地质条件下的施工需求；改进喷射设备与工艺，提高设备的自动化程度与施工精度，如开发智能化的喷射控制系统，实现对喷射参数的实时精准调控，提升技术应用的稳定性与可靠性，推动技术不断升级优化。

5.2 完善技术应用标准与行业规范

为满足行业对高压喷射灌浆技术规范应用的需求，将联合地质勘察、隧道工程、材料科学等领域的行业专家，以及具备丰富实践经验的工程咨询机构、科研院所，共同开展技术应用标准与行业规范制定工作。制定过程中，全面梳理该技术在公路隧道施工不同场景的应用实践案例，提炼成功经验与常见问题解决方案，明确技术适用的地质条件范围、隧道施工阶段，细化从前期地质勘察、设备选型、浆液配置，到现场喷射作业、后期养护的全流程施工步骤。制定量化的质量检验标准，如固结体强度、防渗性能的检测方法与合格指标，以及设备操作、现场安全防护的具体要求，统一技术应用效果的评价维度与计算方法，消除因标准差异导致的应用效果不稳定问题。通过行业期刊专栏解读、线上培训课程、线下现场观摩会等多种形式，加强标准规范的宣传推广，帮助施工企业技术人员、监理单位验收人员准确把握规范要点，确保标准规范在实际工程中落地执行，为技术在公路隧道施工领域的规范化、规模化应用筑牢制度基础。

5.3 加强人才培养与技术交流推广

为推动高压喷射灌浆技术在公路隧道施工领域持续发展，

需从教育源头与行业实践双端发力构建人才培养体系。在高校层面，支持开设高压喷射灌浆技术原理、公路隧道施工工艺等核心课程，配套建设模拟实验室与校外实训基地，让学生通过理论学习与实操训练，掌握技术应用的基础理论与操作技能，培养兼具理论素养与实践能力的复合型人才。施工企业需结合项目需求，定期开展针对性岗位培训，围绕设备操作、参数调试、应急处理等关键环节设计课程；举办技能竞赛以赛促学，激发施工人员钻研热情；推行导师带徒制度，由经验丰富的技术骨干手把手传授实操技巧，提升团队整体技术水平。联合行业协会搭建技术交流平台，定期组织技术研讨会，邀请专家解读技术难点与行业趋势；开展现场观摩会，选取典型工程案例展示技术应用成果，促进企业、科研机构间的经验共享与技术协作，为技术长效应用储备专业人才力量。

6 结语

本文围绕公路隧道施工中高压喷射灌浆技术展开研究，明确该技术在防渗加固、保障工程稳定方面的核心价值，分析了复杂地质制约、操作不规范等应用问题，提出针对性解决措施，通过案例与多维度评估验证技术效果，并给出技术研发、标准完善、人才培养等长效应用策略。研究成果为该技术在公路隧道施工中的合理运用提供参考，助力提升工程质量与效率，对推动公路隧道建设技术进步、保障交通基础设施建设稳步发展具有积极意义。

参考文献：

- [1] 陈曦,林浩.公路隧道施工中高压喷射灌浆技术的应用研究[J].公路工程,2023,48(2):89-95.
- [2] 赵宇,吴桐.复杂地质条件下公路隧道高压喷射灌浆防渗技术应用[J].隧道建设（中英文）,2024,44(1):123-129.
- [3] 孙悦,周明.高压喷射灌浆技术在公路隧道围岩加固中的实践与优化[J].中国公路学报,2023,36(5):78-85.
- [4] 郑磊,方芳.公路隧道施工中高压喷射灌浆技术质量管控措施[J].施工技术,2024,53(3):98-103.
- [5] 黄伟,刘敏.高压喷射灌浆技术在公路隧道工程中的长效应用策略[J].中外公路,2023,43(4):109-115.