

公路桥梁隧道现场施工中注浆技术工艺的实践应用

文 / 陈永宝 扬州华建交通工程咨询监理有限公司

摘要: 在公路桥梁隧道的现场施工中, 注浆技术作为一种关键的加固与修复手段, 得到了广泛应用。然而, 由于施工环境复杂多变, 传统的注浆工艺在实际应用中面临诸多挑战, 影响了工程质量的稳定性与可靠性。为此, 本文针对当前施工中存在的问题, 提出了优化注浆工艺的策略, 旨在提高施工效率与质量控制水平, 确保公路桥梁隧道的安全性与耐久性。

关键词: 公路桥梁; 隧道; 现场施工; 注浆技术工艺

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.03.055

引言

注浆技术是一种通过将液态材料注入土层或结构物内部, 以填充空隙、加固基础或修复裂缝的工程技术。常用于公路、桥梁和隧道等基础设施的施工中, 以增强结构的稳定性、防止渗漏及提升整体承载能力, 该工艺包括材料选择、设备使用、施工工艺及后期维护等多个环节, 针对不同的工程需求, 注浆技术的应用灵活多样, 在复杂的施工环境下尤为重要。

一、注浆材料与设备在现场施工中的应用

(一) 常用注浆材料性能及选择

常用注浆材料的性能及选择在注浆施工中十分重要, 能够直接影响工程的质量和效果。水泥基浆液是最常用的注浆材料之一, 因其凝固后具备高强度和耐久性, 适用于大多数地质条件下的加固和修复工程。水泥基浆液的水灰比通常控制在0.4-0.6之间, 以保证其良好的流动性和可操作性。在硬化过程中, 水泥基浆液能够与土体或岩层形成紧密的结合, 填充空隙并增加地层的密实度。此外, 水泥基浆液的凝结时间较长, 通常为6-12小时, 有助于在复杂地层中实现均匀扩散。化学浆液是一种高效的注浆材料, 通常用于处理较细微裂隙或渗漏问题。常见的化学浆液包括聚氨酯、环氧树脂和硅酸钠等, 其流动性和渗透性极佳, 能够快速渗透到细小裂隙中^[1]。聚氨酯浆液在接触水后会迅速膨胀, 形成具有弹性和防水性能的固结体, 适用于水流较大的环境。环氧树脂浆液则因其固结后具备高强度和耐腐蚀性, 适用于结构修复和加固。化学浆液的固化时间通常为几分钟到几十分钟不等, 需根据具体工程需求进行选择。材料的选择应综合考虑工程的地质条件、裂隙特征和施工环境, 以确保注浆效果达到设计要求并满足工程的耐久性和安全性标准。

(二) 注浆管路系统布设方法

注浆管路系统的布设是确保注浆施工顺利进行的关键环节, 直接影响浆液的传输效率和注浆效果。在实际施工中, 注浆管路的布设应根据现场条件和工程要求进行科学规划。首先, 管路的主干线和支线需合理布局, 通常主干线管径为50-100mm, 支线管径为25-50mm, 以

确保浆液的流动性和稳定性。管路布设时应尽量减少弯头和接头的数量, 避免因压力损失或堵塞导致浆液流动不畅。管路的连接应采用高压软管或钢管, 接头部位需使用高压连接件, 以保证连接的密封性和耐压性。注浆管路的布设高度和倾斜度对浆液的流动有直接影响。通常情况下, 管路应保持一定的坡度, 倾斜度一般为1-3%, 以利用重力作用辅助浆液的流动。布设过程中还需设置排气阀和压力监测点, 排气阀通常设置在管路的高点, 以及时排除系统内的空气, 防止气阻影响注浆效果。压力监测点应分布在主干线和支线的关键节点, 以实时监控注浆压力, 通常每隔50-100m布置一个监测点。管路布设完成后, 应进行压力测试和密封性检查, 确保系统能够承受施工中的工作压力, 通常压力测试应达到施工压力的1.5倍, 持续时间不少于30分钟。

(三) 注浆压力和流量控制实践

注浆压力和流量的控制是注浆施工中的关键环节, 直接关系到浆液在地层中的渗透效果和最终的加固质量。注浆压力的控制应根据地质条件、注浆材料以及施工目标进行精确调整。一般情况下, 软弱地层或存在大空隙的区域, 适宜采用较低的注浆压力, 通常为0.3-0.7MPa, 以避免浆液过快渗透或造成地层破裂。相反, 在密实度较高的岩层或需要深度加固的区域, 注浆压力可适当提高, 通常控制在1.0-2.0MPa之间, 以确保浆液能够充分渗透并填充所有空隙。此外, 在注浆过程中, 压力的变化需进行实时监测, 避免出现突然的压力下降或上升, 这可能表明浆液外泄或地层开裂, 需及时调整注浆参数进行处理^[2]。流量控制同样是注浆施工中的重要因素之一, 其直接影响浆液的分布和注浆效率。一般而言, 注浆流量应根据注浆压力和地层渗透性进行调整。在初始注浆阶段, 流量通常较小, 保持在2-5L/min之间, 以便浆液逐渐渗透至地层内部, 防止快速流动导致的浆液外溢或局部积聚。随着注浆的进行, 流量可逐步增加, 但通常不超过10L/min, 以确保浆液能够在地层中均匀扩散。对于特殊地层或复杂结构, 流量的控制需更加精细, 可能需要采用分段注浆或间歇注浆

的方式，以保证每一段地层都能达到理想的加固效果。此外，流量计和压力表的结合使用，可以实现对浆液流动情况的全面监控，通过调节泵速和阀门开度，确保压力和流量始终处于设计范围内，从而实现最佳的注浆效果。

二、公路桥梁注浆技术工艺实践

（一）桥梁基础注浆施工工艺

桥梁基础注浆施工工艺是保障桥梁基础结构稳定性的重要手段，通常用于处理桥梁基础下部的松散土层或不均匀沉降问题。在实际施工过程中，需先进行地质勘察，明确基础土层的组成和力学性质，以便选择合适的注浆材料和施工参数。常用的注浆材料包括水泥浆液、化学浆液和黏土浆液，其中水泥浆液由于其硬化后具备较高的强度和耐久性，应用最为广泛。针对不同的地质条件，注浆压力一般控制在0.5-2.0MPa之间，注浆速度控制在1-5L/min之间，以保证浆液能够充分渗透到松散土层的各个空隙中，形成均匀的加固体。在施工过程中，注浆孔的布置密度直接影响加固效果。通常情况下，注浆孔径为50-80mm，孔距一般控制在1.0-2.5m之间，以保证浆液在土体内的均匀扩散。施工时需严格控制注浆量，每个注浆孔的注浆量应根据土体条件和加固要求进行调整，通常为50-200L/m。注浆完成后，应对注浆效果进行检测，包括土体的密实度、强度及沉降变形情况等，通过多点监测确保加固效果达到设计要求。

（二）桥梁墩柱裂缝注浆修复技术

桥梁墩柱裂缝注浆修复技术是针对桥梁墩柱结构受力后产生裂缝的修复措施，目的是恢复墩柱的整体性和承载力，防止裂缝扩展导致结构失效。在实际操作中，裂缝的宽度和深度是决定注浆工艺参数的关键因素^[3]。通常，当裂缝宽度在0.2-1.0mm之间时，适宜采用低黏度的环氧树脂作为注浆材料，其流动性好，能够有效填充细微裂缝。施工过程中，注浆压力应控制在0.3-0.7MPa之间，确保浆液能够在裂缝中均匀扩散，避免过高压力导致裂缝进一步扩展。注浆孔的布置应遵循裂缝分布情况，孔距通常控制在150-300mm之间，以保证浆液能够完全覆盖裂缝区域。在进行裂缝注浆前，需对裂缝表面进行清理，去除松散材料和杂物，确保浆液与基材的良好结合。注浆时，可采用逐孔注浆的方式，即从裂缝的一端开始逐步向另一端注浆，以避免空气或水分在裂缝内滞留，影响修复效果。每个注浆孔的注浆量应根据裂缝深度和长度进行控制，一般为20-100mL/孔。注浆完成后，应通过超声波检测或钻芯取样等方法对修复效果进行验证，确保裂缝完全充填并达到设计要求。

（三）桥面板注浆加固施工技术

桥面板注浆加固施工技术是针对桥面板出现空鼓、裂缝或承载力不足等问题的一种有效修复方法，旨在增强桥面板的整体刚度和耐久性。该施工流程一般包括钻

孔布置、注浆材料准备、注浆施工和质量检测四个主要步骤。在具体操作中，钻孔布置应根据桥面板的损伤情况进行合理规划。通常，钻孔直径为30-50mm，孔距控制在500-1000mm之间，以确保浆液能够均匀分布并充分填充桥面板下的空隙。在钻孔时，应避免破坏桥面板的钢筋结构，钻孔深度一般控制在桥面板厚度的2/3左右。在注浆施工阶段，常用的注浆材料为水泥基浆液或环氧树脂浆液，具体选择应根据桥面板的实际受力情况和修复要求确定。注浆压力应控制在0.5-1.5MPa之间，注浆速度则应保持在3-8L/min，以确保浆液能够均匀扩散，并形成连续的加固体。施工过程中，需持续监测浆液的流动性和扩散情况，通过调整注浆压力和速度，确保每个钻孔都能够达到预定的注浆量，通常每孔注浆量为5-20L。在注浆完成后，应对桥面板进行全面的质量检测，包括空鼓检测、裂缝封闭效果检查等，确保注浆加固达到设计要求。

（四）预应力管道压浆施工技术

桥梁预应力管道压浆施工是预应力混凝土结构施工中的关键环节，直接影响结构的耐久性和整体性能。施工前应对预应力管道进行全面检查，确保其内部无杂物和积水，以防止浆液堵塞或不均匀分布。压浆材料通常采用水泥基浆液，水灰比一般控制在0.35-0.45之间，浆液的稠度应通过流动度试验进行控制，流动度通常为14-18秒，以保证浆液具有良好的可操作性和充盈性。在浆液的制备过程中，应严格控制材料的配比和搅拌时间，搅拌时间一般为3-5分钟，以确保浆液均匀且无气泡。在压浆施工过程中，浆液的注入压力是关键参数之一，通常控制在0.5-1.0MPa之间，注入速度则应保持在5-10L/min，以确保浆液在管道内均匀扩散，并完全充填整个管道。在施工时，应采取连续压浆的方法，即在浆液从管道的另一端流出后继续压浆，直至流出的浆液无气泡且浓度一致，方可停止注浆^[4]。每个管道的压浆量应根据实际需要进行控制，一般为40-60L/m。压浆完成后，应对管道进行密实度和饱满度检查，确保管道内无残余空气和未填满的空隙。

三、隧道工程注浆技术工艺应用

（一）超前预注浆施工工艺

超前预注浆施工工艺在隧道工程中尤为关键，主要用于加固隧道开挖前的围岩和地层，以防止突水、坍塌等灾害性事故的发生。该工艺通常在隧道开挖前进行，通过在隧道前方设置注浆孔，将浆液注入地层中，以形成密实的防渗和加固帷幕。在具体施工中，注浆孔的布置方式直接影响施工效果。通常情况下，注浆孔径为42-76mm，孔深控制在隧道开挖面前方10-30m，孔距一般为0.5-2.0m，视地质条件而定。钻孔时应严格控制孔斜，确保孔位准确，避免错孔或重叠影响注浆效果。在注浆过程中，选用的注浆材料应具备良好的流动性和凝

结性。常用的注浆材料包括水泥浆液、化学浆液和复合浆液，其中水泥浆液应用最广泛，水灰比一般控制在0.4-0.6之间。注浆压力是控制浆液扩散范围和渗透效果的关键，通常注浆压力应控制在1.0-3.0MPa之间，以确保浆液能够充分渗透到围岩裂隙中，形成连续的加固体。注浆速度则应保持在2-5L/min之间，避免过快导致浆液流失或过慢影响施工进度。注浆完成后，应对注浆效果进行检测，采用地质雷达或钻探取样等手段，检查加固体的连续性和密实度，确保施工质量达到设计要求。

（二）隧道衬砌背后注浆技术

隧道衬砌背后注浆技术主要针对隧道衬砌背后的空隙或松散地层进行加固，防止地下水渗入和衬砌结构失稳。在实际操作中，注浆孔的布置是关键步骤之一，通常在隧道衬砌的拱顶和拱腰部位设置注浆孔^[5]。注浆孔的直径一般为42-50mm，孔深应穿透衬砌并进入围岩，通常控制在2-3m之间。孔距的选择根据衬砌背后的空隙分布情况，一般为1.0-1.5m，确保浆液能够均匀填充空隙，形成连续的加固体。注浆材料的选择和注浆工艺参数直接影响施工效果。常用的注浆材料包括水泥浆液、超细水泥浆液和化学浆液，其中水泥浆液应用较为广泛。水泥浆液的水灰比通常控制在0.4-0.5之间，以确保浆液具有良好的流动性和黏结力。注浆压力是关键控制参数，通常在0.5-1.5MPa之间，视具体地层条件而定，过高的压力可能导致衬砌破裂或浆液渗漏，而过低的压力则可能无法有效填充空隙。注浆速度一般控制在2-4L/min之间，确保浆液均匀扩散并逐步填满空隙。注浆完成后，需进行密实度和渗透性检测，通常采用钻探取样或超声波检测方法，以验证注浆效果，确保隧道衬砌背后注浆技术达到预期的加固效果。

（三）隧道裂缝渗漏注浆修复技术

隧道裂缝渗漏注浆修复技术是针对隧道结构中因裂缝导致的渗水问题进行修复的重要技术。该方法旨在通过注浆工艺，将修复材料注入裂缝和周围的松散地层中，形成密实的防水屏障，从而阻止水的渗入并恢复隧道的结构完整性。施工前首先需对裂缝进行全面的勘察，确定裂缝的宽度、深度和渗漏水量，以选择合适的注浆材料和工艺参数。裂缝宽度通常在0.2-5.0mm之间，较窄的裂缝适宜采用低黏度环氧树脂或聚氨酯浆液，具有良好的渗透性和黏结力，可有效填充细微裂缝。对于较宽裂缝，则可选择水泥基浆液，水灰比控制在0.5-0.6之间，以保证修复效果。注浆孔的布置和注浆参数是关键步骤。注浆孔一般设置在裂缝两侧，孔径为32-50mm，孔深应达到裂缝的根部并进入围岩，通常为0.5-1.0m。注浆压力需根据裂缝情况进行调整，通常控制在0.3-1.0MPa之间，以防止过高压力造成裂缝进

一步扩展或浆液外泄。注浆速度则应保持在1-3L/min之间，确保浆液均匀渗透至裂缝全长并充填完全。施工过程中需持续监测注浆效果，通过观测浆液流出情况和流量变化，及时调整注浆压力和速度。注浆完成后，需进行渗漏检测和效果评估，通常采用水压试验或超声波检测方法，确保裂缝修复达到设计标准，恢复隧道的防水性能和结构安全性。

（四）隧道底板注浆加固施工工艺

隧道底板注浆加固施工工艺是一种用于提高隧道底板稳定性和承载能力的重要技术，主要适用于隧道底板出现不均匀沉降、空洞或裂缝等问题。该工艺通过将浆液注入隧道底板下方的松散土层或空洞中，形成均匀的加固体，从而增强底板与地基的整体结合力。施工前需进行地质勘察和探测，明确底板下方的土层状况、孔洞大小和分布位置。注浆孔的布置需根据底板的具体情况设计，通常孔径为50-100mm，孔深一般控制在1.5-3.0m之间，以确保浆液能够有效渗透到软弱地层或空洞中。在注浆施工过程中，浆液的选择至关重要。常用的注浆材料包括水泥基浆液和化学浆液，其中水泥基浆液因其凝固后具有高强度和良好的稳定性而被广泛应用。浆液的水灰比一般控制在0.4-0.6之间，确保其具备良好的流动性和黏结性。注浆压力是影响加固效果的关键因素，通常控制在0.5-1.5MPa之间，注浆速度则应保持在3-6L/min，以保证浆液能够均匀扩散并完全填充底板下方的空隙。施工过程中应持续监控浆液的扩散范围和注浆量，每孔的注浆量一般为20-50L，视具体地层条件而定。注浆完成后，应进行密实度检测和承载力测试，确保隧道底板的加固效果达到设计要求，增强隧道结构的整体稳定性和安全性。

结束语

注浆技术的科学应用在公路桥梁隧道施工中发挥了重要作用，通过对注浆工艺的合理控制和优化，工程的安全性和耐久性得到了有效保障。随着技术的不断进步，注浆技术将在更广泛的工程领域中展现出更大的潜力和价值。

参考文献

- [1]徐壬. 注浆施工工艺在公路桥梁隧道项目中的实践[J]. 中国住宅设施, 2024, (02): 160-162.
- [2]姜光辉. 公路桥梁和隧道施工中注浆技术的应用研究[J]. 工程建设与设计, 2024, (04): 175-177.
- [3]达姜维. 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的具体应用探究[J]. 产业创新研究, 2024, (02): 106-108.
- [4]胡明. 浅析公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用[J]. 科学技术创新, 2023, (14): 129-132.
- [5]陈光敏. 讨论公路桥梁隧道施工技术的应用[J]. 中国住宅设施, 2020, (09): 116-117.