

公路桥梁和隧道施工中注浆技术的应用分析

赵玉敏¹, 俞培德², 郭付军², 顾永升²

1. 河北铸诚工矿机械有限公司, 河北 邢台 055450

2. 中铁工程装备集团有限公司, 河南 郑州 450000

DOI: 10.61369/SSSD.2025070038

摘 要 : 在社会经济发展中, 公路桥梁和隧道建设是交通运输系统运行的基本保障。但是, 受地理环境、地质条件因素的影响, 桥梁隧道施工过程中往往面临裂缝、沉降不均等挑战, 给桥梁隧道正式投入使用带来安全隐患。对此, 如何充分发挥注浆加固与修复技术的优势, 科学高效地解决施工过程中出现的空洞、裂缝问题, 提高工程段结构的稳定性、安全性和耐久性, 成为提高桥梁隧道工程质量的重要问题。本文阐述注浆技术的基本原理, 分析不同类型注浆材料的特性, 结合不同项目施工环境需求, 探究注浆技术在公路桥梁和隧道施工中的具体应用, 并提出技术应用效果的控制方法, 为桥隧修复与加固工程提供参考。

关 键 词 : 公路桥梁; 隧道施工; 注浆技术; 应用

Analysis on the Application of Grouting Technology in Highway Bridge and Tunnel Construction

Zhao Yumin¹, Yu Peide², Guo Fujun², Gu Yongsheng²

1.Hebei Zhucheng Industrial and Mining Machinery Co., Ltd., Xingtai, Hebei 055450

2.China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000

Abstract : In the development of social economy, the construction of highway bridges and tunnels is the basic guarantee for the operation of the transportation system. However, affected by geographical environment and geological conditions, bridge and tunnel construction often faces challenges such as cracks and uneven settlement, which bring potential safety hazards to the official operation of bridges and tunnels. In this regard, how to give full play to the advantages of grouting reinforcement and repair technology, scientifically and efficiently solve the problems of voids and cracks in the construction process, and improve the stability, safety and durability of the project segment structure has become an important issue to improve the quality of bridge and tunnel projects. This paper expounds the basic principles of grouting technology, analyzes the characteristics of different types of grouting materials, explores the specific application of grouting technology in highway bridge and tunnel construction in combination with the construction environment requirements of different projects, and puts forward control methods for the technical application effect, so as to provide reference for bridge and tunnel repair and reinforcement projects.

Keywords : highway bridges; tunnel construction; grouting technology; application

引言

伴随乡村振兴进程的逐步加快, 我国在交通设施领域的投入不断加大, 公路隧道网络逐步向偏远和复杂地区延伸。在交通建设项目中, 公路桥梁与隧道工程是连接交通线路的重要节点, 受岩溶空洞、富水地层、软弱夹层等复杂地质环境影响, 施工过程中面临结构失稳、空洞渗漏、沉降不均等问题, 给项目后续安全运营埋下安全隐患, 甚至威胁人民群众的生命健康^[1]。在桥隧工程病害防治工作中, 注浆技术发挥着重要作用, 其主要是利用压力, 将某种浆液注入岩土空洞或结构缝隙中, 起到提高物理结构稳定性的作用^[2]。伴随科学技术手段的创新与发展, 再加上大量工程实践经验的积累, 早期的单一水泥注浆法, 已经发展和形成了复合浆液体系, 从人工控制注浆参数, 逐步向智能化监测过渡, 注浆技术在桥隧修复和加固中的应用已实现质的飞跃, 展现出较强的适应性与灵活性特点^[3]。据统计, 在山区高速公路建设中, 约78%的桥梁工程和92%的隧道工程需采用注浆技术进行预处理或病害整治。由此, 从技术原理出发, 系统剖析注浆材料的特性, 结合桥梁与隧道施工的典型场景, 把握其合理化的应用方式, 并深入探讨影响技术效果的关键因素及未来发展方向, 推动公路桥梁与隧道工程施工高质量发展势在必行。

一、注浆技术的基本原理与材料特性

（一）技术原理

注浆技术的本质是通过外部压力驱动浆液克服地层阻力，进入目标介质的空隙空间（包括孔隙、裂隙、空洞等），经历物理化学变化后形成具有胶结能力的结石体，从而实现三大核心功能：

- 1. 加固功能：浆液在岩土体中形成网状骨架，提高介质的抗拉强度（可提升30%–300%）和变形模量；
- 2. 防渗功能：堵塞地下水渗流通道，将渗透系数降低1–3个数量级（如从 10^{-3} cm/s降至 10^{-6} cm/s以下）；
- 3. 填充功能：填补结构空隙或岩溶空洞，消除应力集中现象。

其作用机制可细分为渗透注浆（适用于孔隙率>20%的地层）、劈裂注浆（适用于致密黏土层）、压密注浆（适用于松散砂土）和电动化学注浆（适用于低渗透性地层）四类，实际工程中需根据地质勘察数据选择适配模式^[4]。

（二）材料特性及分类

注浆材料的性能直接决定技术效果，需满足流动性、凝结时间、强度、耐久性等多指标要求，目前主流材料可分为三大体系（如表1）。

表1 注浆材料的性能对比

性能指标	水泥基浆液	化学浆液	复合浆液
主要成分	硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、水玻璃、粉煤灰等无机材料	环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸酯等	水泥基材料与化学浆液复合（如水泥-聚氨酯）、水泥与工业废料复合（如水泥-矿渣）
流动性	普通水泥浆：50–100mPa·s；铝酸盐浆液：<100mPa·s	环氧树脂：<50mPa·s；聚氨酯：50–200mPa·s	可调节（如水泥-聚氨酯：50–100mPa·s，综合两类材料特性）
凝结时间	普通水泥：4–6小时；水玻璃-水泥速凝：1–40分钟	环氧树脂：1–10分钟；聚氨酯：30分钟–2小时	灵活控制（如水泥-聚氨酯速凝：30秒–2小时；水泥-聚氨酯缓凝：2–24小时）
抗渗系数	水泥-水玻璃浆： 10^{-10} – 10^{-12} cm/s	环氧树脂浆液：< 10^{-12} cm/s；聚氨酯浆液： 10^{-10} – 10^{-11} cm/s	10^{-10} – 10^{-11} cm/s（需与施工工艺匹配）
抗压强度	低（粉煤灰：1%–2%，水玻璃：10%–20%）	高（环氧树脂：5–100MPa；聚氨酯：10–50MPa）	中等至高强（水泥-聚氨酯：10–50MPa）
渗透能力	普通水泥可渗透>0.2mm裂隙；铝酸盐可渗透0.1mm以下裂隙	环氧树脂可渗透0.05mm以下裂隙；聚氨酯可渗透0.1–0.5mm裂隙	综合渗透能力佳，可适应0.05–0.5mm不同范围裂隙
28天抗压强度	普通水泥：15–30MPa；铝酸盐水泥：20–35MPa	环氧树脂：30–60MPa；聚氨酯：10–30MPa	10–40MPa（兼顾强度与适应性）

二、注浆技术在公路桥梁施工中的应用实践

（一）地基处理工程

1. 软土地基加固

在沿海地区或河谷平原的桥梁建设中，软土地基（天然含水量>35%，孔隙比>1.0）易导致基础不均匀沉降^[5]。采用袖阀管注浆工艺（孔距1.2–2.0m，排距1.0–1.5m），注入水泥–粉煤灰浆液（配合比1:0.5–1:1），注浆压力控制在0.5–1.2MPa。某跨江大桥桥台处理案例显示，经注浆后地基承载力特征值从80kPa提升至220kPa，工后沉降量控制在30mm以内，满足设计要求。

2. 岩溶地基处理

岩溶发育区需采用“填充–加固”复合方案：对直径<2m的小型溶洞，直接注入水泥–砂石混合浆（砂石粒径5–20mm）；对大型溶洞（直径>5m），先抛填块石形成骨架，再高压注浆（压力2.0–3.0MPa）填充空隙^[6]。贵州某高速公路桥梁桩基施工

中，通过该技术处理桩底3个串联溶洞（总容积约80m³），单桩竖向极限承载力提高45%，节省桩基长度约6m。

（二）基础结构补强

1. 灌注桩后注浆

针对钻孔灌注桩桩底沉渣和桩侧泥皮缺陷，采用桩底+桩侧联合注浆：桩底注浆管埋入沉渣面以下50cm，注入水泥浆（水灰比0.6–0.8），压力1.5–3.0MPa；桩侧在钢筋笼上预设注浆阀，于桩顶以下2–3m处注浆^[7]。某工程数据显示，该技术可使单桩承载力提升20%–40%，沉降量减少30%–50%。

2. 台背回填注浆

为解决桥台与路堤衔接处的“桥头跳车”问题，对台背回填土（压实度<93%区域）采用花管注浆：φ50mm注浆管呈梅花形布置（孔距1.0–1.5m），注入水泥–石灰浆液（体积比3:1），压力0.3–0.6MPa。某省道改造工程中，处理后台背填土压实度达96%以上，运营3年后差异沉降<5mm。

（三）上部结构修复

1. 混凝土裂缝处理

对桥梁墩柱、盖梁等构件的结构性裂缝（宽度0.1–1.5mm），采用低压慢注工艺：沿裂缝走向布置注浆嘴（间距20–50cm），注入环氧树脂浆液（粘度<50mPa·s），压力0.1–0.3MPa，保持恒压10–15分钟。某旧桥加固中，共处理裂缝238条，经超声检测，裂缝填充率达97%，结构整体性恢复至设计标准。

2. 支座垫石找平

当支座垫石与梁体间出现>2mm空隙时，采用微型注浆技术：钻孔直径8–10mm，注入无收缩水泥浆液（初凝时间2–4小时），压力0.2–0.4MPa，通过实时监测确保垫石顶面平整度≤0.5mm。某高速桥梁改造中，该技术使支座受力不均系数从1.8降至1.2，满足规范要求。

三、注浆技术在隧道施工中的关键应用

（一）超前地质加固

1. 富水地层堵水

在隧道穿越断层破碎带或强含水层时，采用管棚+小导管联合注浆：φ108mm管棚（长10–15m）作为主要支护，φ42mm小导管（长3–5m）环向布置（间距30–50cm），注入聚氨酯或水泥–水玻璃浆液。某特长隧道施工中，通过该方案将掌子面涌水量从280m³/h降至30m³/h以下，实现无水作业。

2. 软弱围岩预加固

对Ⅴ级及以上软弱围岩（如黄土、断层泥），采用深孔全断面注浆：钻孔深度8–12m，按同心圆布置3–5环注浆孔，注入水泥–超细水泥复合浆（重量比7:3），注浆压力2.0–4.0MPa。某黄土隧道应用后，围岩变形速率从15mm/d降至3mm/d，开挖面稳定性显著提升。

（二）开挖过程支护

1. 径向补注浆

隧道开挖后若出现围岩收敛超标（>5mm/d），立即实施径

向注浆：沿初支表面垂直钻孔（深度2–4m），注入水泥–水玻璃浆液（凝结时间30–60秒），压力1.0–2.0MPa。某隧道 K3+210 段处理中，注浆后3天围岩收敛速率降至1.2mm/d，确保了施工安全。

2. 掌子面稳定控制

针对掌子面突泥、坍塌风险，采用扇形注浆：从工作面向前方3–6m 范围按15°–30° 角布设注浆孔，注入速凝浆液（初凝时间<3分钟），形成“止浆墙”。某隧道突泥事故处理中，48小时内完成掌子面注浆加固，控制住险情扩散。

（三）二次衬砌补强

1. 空洞回填注浆

初支与二衬间的脱空（厚度>5cm）需采用压力注浆回填：通过预埋管注入水泥砂浆（强度等级 M20），压力0.5–1.0MPa，分序注浆直至浆液饱满^[8]。某隧道拱顶脱空处理中，单延米注浆量达0.8–1.5m³，经雷达检测回填密实度达100%。

2. 衬砌渗水处理

对二衬出现的渗漏点，采用定点注浆：沿渗漏路径钻 ϕ 14mm 孔，注入水溶性聚氨酯（膨胀倍率300%–500%），压力0.3–0.8MPa。某隧道侧墙渗水处理后，渗水量从0.2L/（m²·d）降至0.05L/（m²·d）以下，达到干燥标准。

四、技术应用效果的影响因素及控制

在不同地层条件下，注浆技术应遵循因地制宜原则，针对性地调整注浆材料与方案，提高技术应用效果^[9]，主要影响因素与控制策略如表2。

表2 技术应用效果的影响因素及控制

影响因素	具体内容	关键特性/参数	控制与优化方案
地质条件的影响	砂卵石地层	渗透系数 10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹² cm/s，孔隙发育且连续性好	优先采用水泥浆，扩散半径 1.5~3.0m，需严格控制注浆压力以避免浆液流失
	黏土层	渗透系数 <10 ⁻¹⁰ cm/s，胶结且渗透性差	采用劈裂注浆方式，选择水泥水玻璃浆，注浆速率 5~10L/min，确保形成规则劈裂面
	密实地层	存在不规则空洞、裂隙发育不均	前期通过物探明确空洞分布，注浆采用“先堵后补”模式（先灌砂石形成骨架，再注水泥浆填充空隙）
关键参数优化	注浆压力	与地层强度正相关，为静水压力的 1.5~2.0 倍	软土地层（0.5~1.5MPa）； 碎石地层（2.0~5.0MPa）； 其他依现场试验动态调整
	注浆量	按公式 $Q=Q_0 \times V \times n$ 计算（ $Q_0=1.1\sim1.3$ ，V 为注浆体积，n 为孔隙率）	理论计算结合现场试验校正，避免注浆不足或过量浪费
	浆液配比	影响凝结时间、强度及稳定性	水泥水玻璃浆：体积比 1.0:0.8~1.2（兼顾强度与凝结时间）
施工工艺控制	布孔方式	与工程目标（加固/防渗）及浆液扩散特性相关	加固区：梅花形布孔（孔距 1.2~1.5 × 扩散半径）； 防渗区：环状布孔（孔距 < 扩散半径，确保形成连续防渗帷幕）
	注浆顺序	影响浆液扩散均匀性及施工效率	遵循“跳孔注浆”“由外及内”原则，避免相邻孔串浆，确保注浆范围全覆盖
	结束标准	判定注浆效果是否达标	双指标控制：注浆压力达设计值，流量 <5L/min，且保持该状态 30 分钟以上

五、现存问题与发展趋势

（一）主要问题

- 材料环保性不足：部分化学浆液（如丙烯酰胺）存在毒性残留，在饮用水源保护区应用受限；
- 效果检测滞后：传统检测依赖钻孔取芯（破坏性）和压水试验（局部性），难以全面评估；
- 复杂地质适应性差：在高地应力、高地温地层，浆液性能易受影响，加固效果不稳定^[10]。

（二）发展方向

- 环保材料研发：重点开发生物降解浆液（如淀粉基、壳聚糖基）和工业废料改性浆液（如钢渣水泥浆）；
- 智能化施工：推广注浆机器人（自动布孔、参数调节），结合物联网技术实现压力、流量、密度的实时监测与反馈控制；
- 新型工艺创新：发展定向注浆技术（通过磁场引导注浆管走向）、脉冲注浆技术（提高浆液扩散均匀性）。

六、结论

综上所述，注浆技术作为公路桥梁与隧道施工中的关键技术，其应用效果直接关系到工程安全与耐久性。实践表明，通过合理选择注浆材料、优化工艺参数、创新施工方法，可有效解决复杂地质条件下的加固、防渗难题。据不完全统计，采用科学注浆方案的工程，其结构病害发生率可降低60%以上，使用寿命延长15–20年。未来，随着材料科学与智能技术的融合发展，注浆技术将向“环保化、精准化、智能化”方向迈进。工程实践中，应加强前期地质勘察，制定个性化注浆方案，并注重全过程质量管控，以充分发挥其技术经济效益，为我国交通基础设施高质量发展提供支撑。

参考文献

[1] 杨忠信. 公路桥梁隧道施工中注浆技术应用浅析 [J]. 建设科技, 2024, (S1): 155–157+161.
[2] 张丛. 注浆技术在高速公路桥梁施工中的应用 [J]. 交通世界, 2024, (27): 118–120.
[3] 方立夏. 高速公路桥梁施工中注浆技术的应用 [J]. 低碳世界, 2024, 14 (08): 145–147.
[4] 周艳阳. 全断面帷幕注浆技术在暗挖地铁隧道施工中运用分析 [J]. 居业, 2024, (07): 55–57.
[5] 罗太原. 注浆技术在公路桥梁路基施工中应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (18): 132–134.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 郭靖. 土岩组合地区富水砂层隧道施工注浆技术 [J]. 价值工程, 2022, 41 (05): 99–101.
[10] 李映, 卞晓卫, 周以林. 注浆技术对隧道施工地表沉降的影响研究 [J]. 居舍, 2021, (32): 66–68.