

# 公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用研究

王浩

准格尔旗水利事业发展中心，内蒙古鄂尔多斯市，017100；

**摘要：**在山区、岩溶地带、软弱地层及高压水环境下的工程建设中，地层渗漏、围岩失稳、基础沉降等问题日益突出，严重制约工程质量和施工安全。注浆技术因其适应性广、加固效果显著等特点，该技术通过将特定浆液注入岩土体孔隙或裂隙，实现堵水、加固和变形控制等多重目标，在港珠澳大桥、秦岭终南山隧道等重大工程中发挥了不可替代的作用。然而，面对不同工程场景的差异化需求，如何科学选择注浆材料、优化工艺参数并保证施工质量，仍是当前工程实践中的技术难点。基于此，文章就公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用，展开了相关研究，以供参考。

**关键词：**公路桥梁；隧道施工；注浆技术；应用

**DOI：**10.69979/3029-2727.25.08.004

## 引言

注浆技术的创新与应用研究，不仅关乎工程安全与耐久性，更是推动基建行业绿色化、智能化发展的重要突破口。从工程经济性角度而言，优化注浆工艺可降低材料损耗，缩短工期，为大型项目节约成本。在“双碳”目标下，发展低碳注浆技术和工业固废资源化利用，对促进基建行业可持续发展具有重要意义。因此，系统研究注浆技术的理论方法、工程应用及未来趋势，有助于解决实际工程问题，也能为相关技术标准的完善提供重要参考。

## 1 注浆技术概述

### 1.1 注浆技术的分类

#### 1.1.1 按注浆材料分类

注浆材料的选择直接影响工程加固效果，目前主流材料可分为无机类、有机类和复合类三大体系：（1）无机类以水泥基浆液为代表，包括普通硅酸盐水泥浆、超细水泥浆及水泥-水玻璃双液浆，其优势在于成本低、强度高，适用于岩土体裂隙填充和地基加固，但存在颗粒粗、渗透性差的局限，难以处理微米级裂隙。（2）有机类浆液以丙烯酸盐、环氧树脂和聚氨酯为主，具有黏度低、可注性强的特点，尤其适合渗透注浆堵水，如隧道渗漏治理中常采用聚氨酯浆液实现快速止水，但其耐久性和环保性仍需优化。（3）复合类浆液通过材料改性提升性能，如纳米二氧化硅改性水泥浆可增强抗渗性，而工业废渣基浆液则兼具经济性与环保价值，成为近年研究热点。

材料选择需综合考虑地质条件、工程需求及成本约束。例如，岩溶地层宜采用速凝型水泥-水玻璃浆液；

而松散砂层则适用低黏度化学浆液。

#### 1.1.2 按施工工艺分类

注浆工艺的差异决定了技术适用场景，主要分为渗透注浆、压密注浆、劈裂注浆和喷射注浆四类：（1）渗透注浆依赖浆液自重或低压注入岩土体孔隙，适用于砂层或裂隙发育岩体，其核心在于控制浆液黏度与凝胶时间以确保充分扩散，典型案例如地铁盾构穿越砂层时的超前注浆加固。（2）压密注浆通过高压将稠浆挤入土体形成浆泡，迫使周围土体密实，常用于软土地基处理，其工艺关键在于注浆压力与流量匹配，避免引发地面隆起。（3）劈裂注浆利用高压浆液劈裂黏性土层形成脉状网络，从而改善土体整体性，在桥台背填加固中效果显著，但需精确控制劈裂方向以防止结构扰动。（4）喷射注浆通过高速射流切割土体并混合浆液形成固结体，适用于桩基加固或止水帷幕施工，其成桩质量受旋转速度与提升速率影响显著。

工艺选择需结合地层渗透系数、设计强度及环境限制，例如富水断层带宜采用渗透-劈裂复合注浆以兼顾堵水与加固。

## 1.2 注浆材料选用原则

注浆材料的选用需综合考量工程地质条件、施工要求、经济性和环境影响等多重因素，以确保技术可行性与工程效益的最优平衡。（1）地质条件是主要依据，对于松散砂层或裂隙岩体，应优先选择低黏度、高渗透性的化学浆液，以确保浆液充分扩散填充；而在软弱黏土层或破碎带中，则宜采用高强度的水泥基浆液或复合改性材料，以满足加固需求。（2）施工要求直接影响材料性能指标，例如隧道渗漏治理需选用速凝型浆液以实现快速止水，而大面积地基加固则可采用缓凝水泥浆

以保证施工连续性。(3)常规工程可选用成本较低的水泥-水玻璃双液浆,但对耐久性要求较高的重点工程,则需投入高性能环氧树脂或纳米改性浆料。

在实际工程中,需结合现场试验调整配比,如通过室内渗透试验确定浆液黏度,或通过凝胶时间测试优化施工工艺,最终实现技术、经济与环保的协同优化。

## 2 公路桥梁隧道施工中注浆工艺分析

### 2.1 注浆施工工艺流程

注浆施工工艺的规范性和系统性直接影响工程质量,其核心流程包括前期勘察、钻孔布设、浆液配制、注浆实施及效果检测五个关键环节。(1)前期勘察需通过地质雷达、钻孔取芯等手段准确掌握岩土层分布、裂隙发育及地下水状况,为后续注浆方案设计提供依据。

(2)钻孔布设遵循先外围后中心的原则,采用梅花形或矩形布置,孔距通常控制在0.8-1.5m范围内,钻孔角度根据地质构造调整,确保覆盖目标加固区。(3)浆液配制环节需严格控制水灰比、外加剂掺量和搅拌时间,水泥基浆液搅拌时间不少于3分钟,化学浆液则应现配现用以保证活性。(4)注浆实施采用分段后退式注浆工艺,注浆压力由低到高阶梯式提升,同时监测流量变化,当压力骤升或邻孔冒浆时应立即停注。(5)效果检测采用取芯试验、压水试验或声波检测等方法验证注浆体完整性和强度,对不达标区域需进行补注。

整个流程需形成闭环管理,每个环节的施工记录都要详细存档,确保质量可追溯。

### 2.2 注浆设备要求

现代注浆工程对设备性能提出严格要求,主要设备包括钻孔机械、注浆泵、搅拌系统和监控装置四大类。

(1)钻孔机械需根据地质条件选择,硬岩地层宜采用液压回转钻机,松散土层则可使用冲击钻或螺旋钻,钻机定位精度应控制在 $\pm 2^\circ$ 以内。(2)注浆泵作为核心设备,其额定压力需达到设计压力的1.5倍以上,流量调节范围要覆盖0-100L/min,柱塞式注浆泵因其压力稳定、脉动小的特点成为首选。(3)搅拌系统必须保证浆液均匀性,高速搅拌机转速不低于800r/min,并配备自动称量装置控制配比精度。(4)监控装置包括压力传感器、流量计和数据采集系统,实时监测数据精度要求压力误差 $\leq 1\%$ 、流量误差 $\leq 3\%$ 。

特殊环境配置:特殊环境需配备防爆型设备或远程控制系統,如隧道掌子面注浆可采用无线传输技术,实现洞外监控。

设备维护同样关键:每次作业后需彻底清洗管路,定期更换易损件,确保设备始终处于最佳状态。

### 2.3 注浆参数控制

注浆参数包括注浆压力、浆液配比、凝胶时间和扩散半径等。(1)注浆压力需根据地层特性和埋深确定,浅层土体一般控制在0.5-1.5MPa,深层岩体可达2-4MPa,压力施加应采用分级升压方式,每级增压不超过0.3MPa,稳压时间不少于10分钟。(2)浆液配比直接影响可注性和强度,水泥浆水灰比通常取0.8:1-1:1,化学浆液则需通过正交试验确定最佳配比,施工中需每2小时检测一次浆液比重。(3)凝胶时间要匹配地层渗透系数,砂层宜采用30-60分钟缓凝浆液,破碎带则需5-10分钟速凝材料,可通过缓凝剂或促凝剂精确调控。

(4)扩散半径设计需考虑注浆孔距,一般按经验公式 $R=0.6-0.8L$ 计算,通过现场试验修正。

参数优化需借助数值模拟软件,建立注浆压力-流量-扩散半径的关联模型,实现动态调整。特殊情况下如遇高压涌水,需临时调整配比加入速凝剂,并将注浆压力提高10%-15%以确保封堵效果。

### 2.4 施工现场管理

高效的现场管理是注浆工程顺利实施的保障,需要建立完善的质量、安全和进度控制体系。(1)质量管理实行“三检制”,即班组自检、技术复检和监理终检,重点监控钻孔深度、浆液比重和注浆压力等指标,所有检测数据实时上传至BIM管理平台。(2)安全管理要特别注意高压注浆风险,作业半径10m内设置警戒区,操作人员必须穿戴防护装备,电力设备符合防爆要求,隧道内还需配备气体检测仪。(3)进度管理采用网络计划技术,将注浆工序与主体工程紧密衔接,通常注浆作业需在开挖前24小时完成,衬砌后注浆则要在7天内实施。

此外,环保管理要求严格处理废浆,设置沉淀池回收利用,化学浆液残留物需专业处理,噪声控制遵守昼间 $\leq 75$ dB、夜间 $\leq 55$ dB的标准;人员管理实行持证上岗制度,注浆工需经过专业培训并取得操作证书,技术负责人应具备5年以上注浆施工经验。

## 3 公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用

### 3.1 地基加固

注浆技术在地基加固中主要解决承载力不足、土体松散或存在空洞等问题,通过浆液渗透、压密或劈裂作用改善土体力学性能。

(1)在桥梁桩基施工中,注浆可处理溶洞、软弱夹层等不良地质,采用水泥-水玻璃双液浆快速填充溶洞空隙,浆液凝固后形成高强度固结体,使桩端阻力提高30%-50%。(2)路基加固常采用压密注浆工艺,将水

泥浆液压入软土地基,浆泡扩张挤压周围土体,使压实度达到93%以上,有效减少工后沉降。(3)隧道仰拱部位注浆多使用超细水泥浆,其微米级颗粒可渗入细小孔隙,与围岩形成整体承载结构,某山区高速公路隧道通过仰拱注浆使地基承载力从150kPa提升至300kPa。(4)特殊地质如湿陷性黄土区,可采用劈裂-渗透复合注浆,先以高压劈裂形成浆脉骨架,再通过渗透注浆填充微观孔隙,形成三维加固网络。

### 3.2 防渗止水

注浆技术在防渗止水领域具有不可替代的作用,尤其适用于富水地层、断层破碎带等渗漏风险高的工程环境。

(1)隧道掌子面超前注浆常采用TGRM水泥基特种浆液,其抗渗系数可达 $10^{-8}$ cm/s级,配合帷幕注浆工艺形成环状止水带,成功应用于青岛海底隧道强透水层治理。(2)桥梁基础防渗多采用丙烯酸酯化学浆液,其遇水膨胀特性可自动封堵渗流通道,某长江大桥主墩施工中通过注浆使渗水量从 $200\text{m}^3/\text{d}$ 降至 $5\text{m}^3/\text{d}$ 以下。

(3)对于动态水环境,聚氨酯浆液凭借快速发泡(20-30秒凝胶)的优势成为首选,其膨胀率可达300%-500%,能有效封堵高压涌水。(4)防渗注浆需特别注意浆液扩散控制,通过添加速凝剂或采用间歇注浆法避免浆液流失,同时配合超声波检测验证止水帷幕连续性。

### 3.3 裂隙封闭

岩体裂隙注浆是提升围岩自稳能力的关键技术,根据裂隙宽度差异采取不同对策:(1)毫米级裂隙(0.1-1mm)采用超细水泥浆或硅酸盐浆液,其粒径中值 $D_{50} \leq 10\mu\text{m}$ 可确保有效渗透;(2)厘米级宽裂隙(1-10cm)使用普通水泥浆掺粉煤灰降低成本,并通过添加膨润土改善浆液稳定性。

隧道工程注浆要点:隧道拱顶裂隙注浆采用上行式分段注浆工艺;注浆压力控制在0.3-0.8MPa范围,避免压力过高导致围岩扰动。如某花岗岩地层隧道工程中,通过系统性裂隙注浆使岩体完整性系数从0.35提升至0.65,显著降低支护结构受力。

特殊工况应对:特殊工况(如高温环境),需选用耐热型环氧树脂浆液,其长期耐温性可达 $120^\circ\text{C}$ 以上,适用于地热异常区隧道工程。

### 3.4 支护增强

注浆技术与初期支护协同作用可大幅提升支护体系承载力,主要应用包括锚杆注浆、钢拱架背后充填及喷射混凝土层加固。(1)锚杆注浆采用微膨胀水泥浆,水灰比控制在0.4-0.45之间,浆体28天强度不低于3

0MPa,使锚杆抗拔力提高40%以上。(2)钢拱架背后空洞注浆使用自流平砂浆,添加硅灰改善流动性,充填密实度要求达到95%以上,某地铁隧道通过雷达检测指导注浆,使支护不均匀沉降减少70%。(3)喷射混凝土层加固采用渗透结晶型浆液,其活性物质可渗入混凝土微裂缝发生化学反应,形成枝蔓状结晶体实现自愈。

此外,组合式支护中,管棚注浆预支护采用前进式分段注浆工艺,单根管棚注浆量控制在 $0.5-0.8\text{m}^3$ ,形成厚度不小于1.5m的加固圈,为后续开挖提供安全屏障。

### 3.5 沉降控制

注浆技术对工程沉降的控制体现在施工期调控和运营期修复两个维度。(1)施工期沉降预防采用补偿注浆技术,在盾构掘进或基坑开挖前实施超前注浆,通过压力控制使地表预抬升2-5mm以抵消后续沉降,上海某深基坑工程应用此技术使周边建筑沉降控制在8mm以内。(2)运营期沉降修复采用高分子化学浆液,通过微型钻孔( $\Phi 10-20\text{mm}$ )注入聚氨酯材料,其膨胀压力可精准抬升沉降部位,某高速公路软基路段采用此法实现5cm差异沉降的矫正。

桥梁台背填土沉降控制:桥梁台背填土注浆采用袖阀管工艺,分段注浆压力0.2-0.5MPa,浆液固化后形成弹性缓冲层,有效缓解桥头跳车现象。

## 4 结语

随着我国基建向西部复杂山区、沿海软弱地层等环境延伸,传统注浆工艺存在渗透性不足、环境扰动大等瓶颈,催生了大量创新技术的探索;同时,双碳目标推动工业固废基注浆材料的研发,使技术经济性与生态效益得以兼顾。面向未来,如何在超深地下空间、跨海通道等重大工程实现注浆技术的精准化、低碳化应用,仍需产学研协同攻关,这也为行业技术升级提供了广阔的研究空间。

### 参考文献

- [1]陈焕美,苏文焯,叶沐浪.探析注浆法在公路桥梁隧道施工中的应用[J].土工基础,2025(1):35-38.
- [2]李超雨.公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用研究[J].工程建设(维泽科技),2024,7(4):147-149.
- [3]张旭.灌浆加固技术在公路桥梁隧道施工中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2022(12):108-111.
- [4]姜岩,周焱,吴雷,等.上下叠交盾构隧道注浆加固施工关键技术研究[J].价值工程,2025(8):138-140.