

公路桥梁和隧道施工中注浆技术的应用研究

李俊波

重庆市南川区港航桥隧养护中心 重庆 408400

摘要：公路桥梁与隧道施工中，注浆技术通过渗透、压密、劈裂等作用机制，有效改善岩土体物理力学性能。该技术涵盖基础加固、结构修复、防排水处理及超前支护等场景，采用水泥基、化学及纳米改性浆液，结合预注浆、同步注浆等工艺，精准控制注浆压力、扩散半径及材料配比。智能化监测与BIM模拟技术的应用，进一步提升了施工效率与质量，成为保障工程安全稳定的关键技术手段。

关键词：公路桥梁施工；隧道施工；注浆技术；应用

引言：在公路桥梁与隧道工程建设中，复杂地质条件常引发地基沉降、围岩失稳及渗漏水等问题，严重影响工程安全与耐久性。注浆技术作为地层改良的核心手段，通过向岩土体注入浆液实现加固、止水与支护功能，具有适应性强、效果显著等优势。本文从注浆技术原理与分类出发，结合公路桥梁基础处理、隧道超前支护等典型工程，分析其工艺应用与创新实践，为提升工程建设质量提供技术支撑。

1 注浆技术理论基础与分类

1.1 技术原理

(1) 在浆液作用机制方面，渗透作用是浆液在压力驱动下，渗入岩土体孔隙与裂隙，填充空隙并胶结形成整体，提升岩土体密实度；压密作用通过高压注浆挤压周围岩土，减小孔隙体积，增强其承载能力；劈裂作用则是当注浆压力超过岩土体抗拉强度时，浆液劈裂岩土形成新通道，扩大扩散范围，适用于低渗透性地层。

(2) 注浆压力与地质条件紧密耦合，软土地层易压缩，需控制低压（0.2-0.5MPa）以防土体扰动；岩石地层致密，需高压（2-8MPa）突破裂隙；砂层需平衡压力，避免管涌或隆起，确保注浆效果与施工安全。

1.2 材料体系

(1) 化学浆液中，聚氨酯浆液具有快速固化、膨胀性好的特性，适用于涌水封堵；环氧树脂浆液粘结强度高、耐腐蚀性强，多用于结构补强。(2) 水泥基浆液中，普通水泥浆液适用于大孔隙地层，超细水泥（粒径 $\leq 10\mu\text{m}$ ）可渗入微小裂隙，配比需根据地层孔隙率调整，水灰比通常在0.8-1.5之间优化。(3) 新型纳米材料改性浆液，如纳米 SiO_2 改性水泥浆，可提升浆液流动性与强度，目前在微细裂隙加固领域研究取得突破，有望拓展应用场景。

1.3 工艺分类

(1) 按施工方式，预注浆用于施工前加固地层；后注浆在结构成型后补充加固；同步注浆伴随施工过程中实时注浆，如盾构施工中同步填充管片间隙。(2) 按注浆范围，全断面注浆覆盖整个施工断面，适用于复杂地层整体加固；局部补强注浆针对局部薄弱区域精准注浆，节省材料与成本。(3) 按设备类型，单液泵适用于单一浆液注浆；双液泵可实现两种浆液按比例混合注浆；智能注浆系统通过传感器与控制系统实时调节参数，提升注浆精度与效率^[1]。

2 公路桥梁施工中的注浆技术应用

2.1 基础加固工程

(1) 在软土地基处理中，高压旋喷桩注浆技术应用广泛。该技术通过高压泵将水泥基浆液（水灰比通常1.0-1.5）以20-40MPa压力喷射，同时钻杆高速旋转提升，浆液与软土强制搅拌混合，形成直径0.6-2.0m的旋喷桩体。桩体相互咬合形成复合地基，可将软土地基承载力提升3-5倍，沉降量控制在50mm以内，适用于桥头跳车防治、桥梁基础浅层软土加固等场景，如在沿海地区公路桥梁施工中，有效解决软土压缩性高、承载力低的问题。

(2) 溶洞地区桩基施工面临涌水、塌孔风险，袖阀管注浆止水技术是关键解决方案。施工时先在桩基周边按梅花形布置袖阀管，间距1.5-2.0m，通过注浆芯管将水泥-水玻璃双液浆（体积比1:0.5-1）以0.5-1.5MPa压力注入，浆液通过袖阀管上的单向阀渗透至溶洞裂隙，快速固化形成止水帷幕。该技术可精准控制注浆范围，止水率达95%以上，保障桩基成孔安全，如在喀斯特地貌区桥梁桩基施工中，成功应对溶洞发育导致的涌水问题。

2.2 结构修复工程

(1) 混凝土裂缝是桥梁结构常见病害，环氧树脂低压注入法修复效果显著。针对宽度0.1-0.5mm的非结构性裂缝，先清理裂缝表面并粘贴注浆嘴，采用低压注浆泵

(压力0.2-0.5MPa)将低粘度环氧树脂浆液注入裂缝,浆液渗透深度可达20-50mm,固化后粘结强度 $\geq 3\text{MPa}$,恢复混凝土结构整体性,适用于梁体、墩柱表面裂缝修复,如在运营多年的公路桥梁维护中,有效遏制裂缝扩展导致的钢筋锈蚀问题。(2)伸缩缝渗漏会加速桥梁下部结构腐蚀,聚氨酯发泡注浆工艺可高效治理。施工时将聚氨酯浆液通过注浆枪注入伸缩缝缝隙,浆液遇水膨胀(膨胀倍率3-5倍),快速填充缝隙并形成弹性密封体,耐老化性能优异,使用寿命达8-10年,且施工周期短(单条伸缩缝1-2天完工),适用于公路桥梁伸缩缝日常维护,解决雨水渗漏引发的支座锈蚀、墩台混凝土冻融破坏问题^[2]。

2.3 特殊工况应对

(1)采空区桥梁建设需控制地基沉降,分级注浆技术成效突出。先采用低压(0.3-0.8MPa)注入水泥浆液填充采空区浅层空隙,再以中压(1.0-2.0MPa)注入水泥-粉煤灰浆液加固中层土体,最后高压(2.0-3.0MPa)注入超细水泥浆液封堵深层裂隙,分级控制注浆压力与浆液配比,将地基工后沉降控制在30mm以内,如在煤矿采空区公路桥梁施工中,保障桥梁结构长期稳定性。(2)地震带桥梁需提升抗液化能力,碎石桩复合地基注浆技术是有效手段。先施工碎石桩(直径0.8-1.2m,间距2.0-2.5m)形成排水通道,再通过碎石桩向周边土层注入水泥浆液(水灰比0.8-1.2),浆液渗透形成水泥土包裹体,将砂土相对密实度提升至0.75以上,抗液化等级提高1-2级,适用于地震高发区公路桥梁地基处理,如在地震带山区公路桥梁施工中,增强地基抵御地震液化的能力。

3 公路隧道施工中的注浆技术应用

3.1 超前支护体系

(1)掌子面稳定性控制中,水平旋喷桩超前注浆技术是核心手段。施工时从隧道开挖轮廓线外1-2m处,以水平方向钻进并喷射水泥浆液(水灰比0.8-1.2),喷射压力达20-30MPa,钻杆边旋转边推进,形成直径0.8-1.5m的水平旋喷桩。多根桩体搭接形成连续支护帷幕,可承受掌子面前方土压力,有效防止坍塌,适用于富水砂层、软岩隧道开挖,如在城市地铁隧道施工中,能将掌子面变形量控制在50mm以内,保障开挖安全。(2)断层破碎带地质复杂,管棚+注浆联合支护技术可有效应对。先沿隧道开挖轮廓线施工长10-40m的管棚(钢管直径89-159mm),再通过管棚孔向破碎带注入水泥-水玻璃双液浆(体积比1:0.3-0.8),注浆压力1.5-3.0MPa,浆液填充破碎带裂隙并胶结松散岩体。该技术使破碎带围岩完整性系数提升至0.6以上,管棚与注浆体协同受力,如在山

岭隧道穿越断层时,成功解决围岩坍塌、涌水问题^[3]。

3.2 初期支护强化

(1)钢拱架背后空腔会削弱支护效果,空腔注浆技术可显著提高围岩-支护接触力。施工时在钢拱架上预留注浆孔,待喷射混凝土完成后,注入水泥浆液(水灰比1.0-1.5),注浆压力0.5-1.0MPa,浆液填充钢拱架与围岩间的空隙(通常厚度50-150mm),使接触压力提升30%-50%,避免钢拱架局部应力集中,适用于软岩、膨胀岩隧道初期支护,如在深埋隧道施工中,有效减少支护结构变形。(2)二次衬砌脱空易引发结构开裂,采用雷达检测+针对性注浆工艺治理。先通过地质雷达扫描确定脱空位置与体积,再在衬砌表面钻孔,针对小体积脱空($< 1\text{m}^3$)注入环氧树脂浆液,大体积脱空($\geq 1\text{m}^3$)注入水泥-粉煤灰浆液(灰砂比1:2-3),注浆压力0.3-0.8MPa。该工艺可精准填充脱空区域,填充率达98%以上,如在运营隧道维护中,成功修复衬砌脱空导致的结构隐患。

3.3 防排水系统构建

(1)径向注浆是形成止水帷幕的关键技术,能有效控制隧道渗流量。从隧道初期支护表面向围岩径向钻孔(深度3-5m,间距1.5-2.0m),注入水泥-水玻璃双液浆,注浆压力2.0-4.0MPa,浆液在围岩中形成厚度2-3m的止水帷幕,使隧道渗流量控制在 $\leq 0.5\text{m}^3/\text{d}$,适用于富水地层隧道,如在海底隧道施工中,解决了高水压下的渗漏水问题。(2)环向排水盲管与注浆堵水结合工艺可构建高效防排水系统。先在隧道初期支护表面铺设环向排水盲管(间距5-10m),收集局部渗漏水,再对盲管周边集中漏水点进行针对性注浆(采用聚氨酯浆液),注浆压力0.5-1.2MPa,浆液快速封堵漏水通道,同时盲管疏导残余渗水至纵向排水管。该工艺实现“堵疏结合”,如在山岭隧道施工中,将隧道内湿度控制在80%以下,保障施工环境与结构耐久性。

4 公路桥梁与隧道工程中注浆施工关键技术控制

4.1 参数优化设计

(1)浆液扩散半径计算需结合理论公式与数值模拟。理论上采用圆柱扩散公式(针对岩层裂隙)或球型扩散公式(针对土体孔隙),代入浆液黏度(通常 $10\text{-}50\text{MPa}\cdot\text{s}$)、注浆压力等参数初步计算;再通过FLAC3D等数值软件模拟不同地质条件下扩散范围,修正理论值,如软土地层扩散半径多控制在1.5-2.5m,岩层裂隙中可达3-5m,确保浆液覆盖目标加固区域。(2)注浆压力需与地质参数精准匹配。软土地层(承载力 $< 120\text{kPa}$)采用低压0.2-0.8MPa,避免土体隆起;岩层(单轴抗压强度 $> 30\text{MPa}$)用高压2-8MPa,突破致密裂隙;

破碎带（完整性系数 < 0.4 ）取中压1-3MPa，平衡裂隙填充与岩体稳定，同时结合地层渗透性动态调整，防止压力过高引发结构破坏。（3）止浆墙设置需符合严格标准。厚度根据注浆压力确定，低压注浆时不小于0.5m，高压时不小于1.0m；强度需达C20以上，采用喷射混凝土或模筑混凝土施工；施工时机选在注浆前3-7天，确保止浆墙充分固化，如隧道掌子面前方止浆墙，需与初期支护紧密衔接，防止浆液外漏。

4.2 质量控制要点

（1）浆液性能现场检测需实时开展。黏度用旋转黏度计检测，水泥浆液控制在20-40mPa·s，化学浆液在10-25mPa·s；凝结时间通过贯入阻力仪测定，双液浆通常控制在30min-2h；结石率采用量筒法计算，要求不低于85%，确保浆液满足加固与止水需求。（2）注浆结束标准需双重判定。压力方面，需在设计压力下保持15-30min稳定；吸浆量方面，单孔吸浆量降至初始值的1/5以下或每小时 $< 20L$ ，两者同时满足方可停止，避免过早结束导致加固不充分，或过度注浆造成材料浪费。（3）常见问题需及时处理。串浆时关闭相邻注浆孔，待当前孔浆液初凝后再施工；冒浆时降低注浆压力、调整浆液浓度，或采用间歇注浆；堵管时立即停止注浆，用清水或稀浆冲洗管路，必要时更换注浆芯管，保障施工连续进行^[4]。

4.3 智能化监测技术

（1）分布式光纤传感可实时监测注浆体变形。将光纤埋入注浆区域，通过光信号变化捕捉应变（精度达 $1\mu\epsilon$ ），监测注浆体开裂、沉降等情况，适用于隧道衬砌、桥梁桩基注浆，数据传输实时性强，便于及时发现

隐患。（2）无人机倾斜摄影能高效评估地表沉降。通过无人机获取施工区域三维模型，对比不同时期数据，计算沉降量（精度达5mm），尤其适用于公路桥梁周边、隧道浅埋段地表监测，覆盖范围广，避免人工监测盲区。（3）BIM技术可模拟注浆过程优化方案。在BIM模型中输入地质参数、注浆参数，模拟浆液扩散路径与加固效果，提前预判施工问题，如优化注浆孔布置、调整压力参数，减少现场试错成本，提升施工效率与质量。

结束语

公路桥梁与隧道施工中，注浆技术凭借其显著的地层加固、止水封堵及结构补强效能，已成为保障工程安全与耐久性的关键技术。通过合理选择浆液材料、优化注浆工艺参数，并结合智能化监测手段，可有效解决软土地基沉降、断层破碎带坍塌等复杂地质问题。未来，随着新材料研发与数字化施工技术的融合，注浆技术将朝着更精准、高效、绿色的方向发展，为公路桥梁与隧道工程建设提供更可靠的技术保障。

参考文献

- [1]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):129-130.
- [2]陈学林.公路桥梁和隧道施工中注浆技术的应用研究[J].散装水泥,2025,(10):100-102.
- [3]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.
- [4]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,(14):175-177.