

岩土工程施工中注浆技术的应用策略

黄卫林^{1,2}

1. 江苏省环境地质调查大队, 江苏 南京 210000

2. 江苏省地质工程勘察院有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2026010034

摘要: 本文系统探讨岩土工程施工中注浆技术的应用策略, 解析注浆技术原理与分类, 结合不同地质条件下的应用场景, 从施工工艺优化、材料选择、设备配置等维度提出针对性策略。通过典型工程案例分析注浆效果, 探讨质量控制要点与常见问题解决方法, 展望注浆技术智能化、绿色化发展趋势, 为岩土工程注浆施工提供理论与实践指导。

关键词: 岩土工程; 注浆技术; 应用策略; 地质条件; 质量控制

Application Strategies of Grouting Technology in Geotechnical Engineering Construction

Huang Weilin^{1,2}

1. Jiangsu Provincial Environmental Geological Survey Team, Nanjing, Jiangsu 210000

2. Jiangsu Provincial Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract: This paper systematically explores the application strategies of grouting technology in geotechnical engineering construction, analyzing the principles and classifications of grouting technology. Combining application scenarios under different geological conditions, targeted strategies are proposed from the dimensions of construction process optimization, material selection, and equipment configuration. Through the analysis of grouting effects in typical engineering cases, the paper discusses key points of quality control and solutions to common problems, and looks forward to the development trends of intelligent and green grouting technology, providing theoretical and practical guidance for grouting construction in geotechnical engineering.

Keywords: geotechnical engineering; grouting technology; application strategies; geological conditions; quality control

引言

在岩土工程领域, 注浆技术作为一种高效的岩土加固、防渗止水手段, 广泛应用于基坑支护、隧道施工、地基处理等工程场景。随着城市化进程加快和基础设施建设规模扩大, 复杂地质条件下的工程建设需求日益增长, 对注浆技术的适应性、可靠性和环保性提出了更高要求。本文结合注浆技术原理与工程实践, 深入探讨其在不同工况下的应用策略, 旨在提升岩土工程施工质量与安全性, 推动注浆技术的创新发展。

一、注浆技术原理与分类

(一) 技术原理

注浆技术通过压力将特定浆液注入岩土体孔隙、裂隙或空洞中, 填充、胶结岩土颗粒, 改善岩土体物理力学性能, 达到加固、防渗、堵漏等目的。浆液在岩土体中的扩散方式主要包括渗透注浆、劈裂注浆、压密注浆和喷射注浆, 其作用机制与岩土体结构、浆液特性及注浆压力密切相关。^[1,2]

(二) 技术分类

1. 按浆液材料分类

水泥注浆: 以水泥为主要原料, 辅以粉煤灰、矿渣等掺合料, 成本低、耐久性好, 适用于粗颗粒地层加固。

化学注浆: 采用环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸盐等化学浆液, 流动性高、凝结速度快, 适用于细颗粒地层防渗堵漏。

复合注浆: 结合水泥浆与化学浆液优势, 如水泥-水玻璃双液浆, 可调节凝结时间, 适用于复杂地质条件。

2. 按注浆工艺分类

静压注浆：通过注浆泵缓慢加压，浆液以渗透或劈裂方式扩散，适用于稳定地层加固。

高压喷射注浆：利用高压喷嘴将浆液高速喷射，切割岩土体并形成固结体，适用于软弱地层加固与止水帷幕构建。

真空注浆：在负压环境下注入浆液，提高浆液渗透效率，减少注浆压力对周边环境的影响。

二、不同地质条件下的注浆策略

（一）松散砂层

特点：松散砂层在岩土工程中属于典型的高渗透性地层，其孔隙率通常可达 30% - 45%，渗透系数往往超过 1×10^{-2} cm/s，远超一般黏性土与粉土地层。这种特殊的孔隙结构使得砂层在地下水作用下极易发生颗粒迁移，进而引发流砂现象；在基坑开挖或隧道施工等场景中，当水力梯度超过临界值时，还会导致管涌灾害，严重威胁工程结构安全与施工人员生命安全。^[3]

策略：

注浆方法与浆液选择：渗透注浆是针对松散砂层特性的首选工艺，其作用机制基于达西定律，利用压力差驱动浆液在孔隙中渗流扩散。水泥 - 水玻璃双液浆因具备瞬时凝结特性（初凝时间可控制在 10 - 60 秒），成为该地层注浆的理想材料。

注浆压力控制：注浆压力需严格控制在 0.5 - 1.0MPa 区间，该压力范围既能保证浆液充分渗透扩散，又可避免因压力过高导致砂层结构破坏或地面隆起。跳孔注浆顺序的采用基于流体力学原理，通过间隔注浆形成压力隔离带，防止相邻孔位间的浆液窜流。

粒径与浆液配比关系：施工前的颗粒分析是精准注浆的关键环节，需采用筛分法与比重计法相结合的方式，精确测定砂层粒径分布曲线。当砂粒平均粒径大于 2mm 时，水泥浆凭借其良好的颗粒填充能力，可有效包裹砂粒形成骨架结构；而对于小于 2mm 的细砂或粉砂地层，化学浆液（如丙烯酸盐类）以其低黏度（通常低于 50mPa·s）特性，能够渗透至微小孔隙，形成高强度凝胶体。^[4]

（二）黏性土层

特点：黏性土层主要由黏土矿物颗粒组成，其颗粒粒径多小于 0.005mm，颗粒间存在大量的结合水，使得土体孔隙比极小，通常在 0.8 - 1.5 之间，渗透系数一般低于 1×10^{-6} cm/s，仅为松散砂层的万分之一甚至更低。这种致密的微观结构导致常规的渗透注浆难以实施，浆液在土体中扩散时面临极大阻力。在基坑支护、地基加固等工程中，若直接采用普通注浆方法，不仅无法达到预期的加固效果，还可能因局部压力集中引发土体隆起、地表开裂等问题。^[5,6]

策略：1. 注浆方法与加固原理：劈裂注浆是应对黏性土层特性的核心技术，其原理基于土体的抗剪强度理论。当注浆压力超过土体的劈裂强度时，浆液会沿着土体中最薄弱的部位产生劈裂面，形成脉状或网状的浆脉。这些浆脉与土体相互咬合，如同在

土体中植入“筋骨”，显著改善土体的力学性能。

2. 注浆压力与工艺控制：注浆压力需严格高于土体劈裂压力，通常控制在 1.5 - 3.0MPa 之间。由于黏性土层的压缩性较低，过高的注浆压力易导致土体过度扰动，甚至引发地面隆起等严重后果。因此，采用间歇注浆法，即注浆一段时间后暂停，待浆液在土体中初步凝固，形成一定强度的浆脉，再进行下一轮注浆。每次注浆时间间隔根据浆液凝结时间确定，一般为 1 - 2 小时。

3. 辅助措施增强效果：配合超前钻孔或振动沉管等辅助措施，能够有效增加浆液渗透通道。超前钻孔可预先在土体中形成孔洞，降低浆液注入阻力，使浆液更容易扩散；振动沉管则通过机械振动作用，在土体中形成微小裂隙，为浆液渗透创造条件。

（三）岩溶地层

特点：岩溶地层是一种受长期溶蚀作用形成的特殊地质结构，其内部发育着形态各异、规模不等的溶蚀孔洞、裂隙与管道系统。溶蚀孔洞直径小至几厘米，大可达数十米，且分布无规律，垂直深度变化大；裂隙宽度通常在毫米级到厘米级，相互交错连通，形成复杂的地下网络。这种特殊地质结构导致地基承载能力极不均匀，在建筑物荷载作用下，极易引发地基不均匀沉降，严重时可使建筑物倾斜、开裂甚至倒塌。

策略：注浆方法组合与实施要点：采用填充注浆与渗透注浆结合的方式，是应对岩溶地层复杂情况的有效策略。对于直径大于 2 米的大型溶蚀空洞，首先通过钻孔向洞内投放粗骨料，如粒径 20 - 40mm 的碎石、天然级配砂等，利用骨料的自重与堆积特性，初步填充空洞，形成骨架结构，减少后续浆液用量。待骨料填充至距洞顶 1 - 1.5 米时，再注入水泥浆或化学浆进行密封。水泥浆一般采用水灰比 0.8:1 - 1:1 的配比，通过压力作用填充骨料间隙，并与周边岩土体紧密结合；若对防渗要求较高，可选用聚氨酯、丙烯酸盐等化学浆液，利用其高渗透性与快速固化特性，封堵细微裂隙。在探测技术应用与方案制定：孔内电视成像技术是岩溶地层注浆施工的“眼睛”，通过将带有高清摄像头的探测设备下放至钻孔内，可实时获取孔壁及洞内的高清图像。该技术能够清晰辨别溶洞的形状、大小、填充物类型、裂隙走向等信息，为注浆方案制定提供直观依据。

区域协同注浆处理：对于高风险区域，如溶洞密集区、与地下水连通的溶洞群等，采用地表注浆与洞内注浆联动的方式进行全封闭处理。地表注浆通过在地面布置注浆孔，对浅层溶洞及裂隙进行预加固，形成防渗帷幕，减少地下水对注浆效果的影响；洞内注浆则在隧道、地下硐室等施工空间内，对深层溶洞进行靶向注浆。两种注浆方式需协同作业，地表注浆为洞内注浆创造稳定的施工环境，洞内注浆进一步加固地基深部结构。^[7]

三、注浆施工关键技术策略

（一）浆液配比优化

强度控制：根据工程要求确定浆液抗压强度（如地基加固需 ≥ 15 MPa），通过调整水泥用量、水灰比及外加剂掺量实现。

凝结时间调控：单液水泥浆凝结时间较长（初凝 $\geq 45\text{min}$ ），双液浆可通过水玻璃掺量控制在几秒至几十分钟，满足不同施工需求。

流动性设计：注浆泵吸入性要求浆液坍落度 $\geq 180\text{mm}$ ，渗透注浆时需更低黏度（如化学浆液黏度 $\leq 200\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）。

（二）注浆参数设计

注浆压力：遵循“先低后高、分级升压”原则，初始压力0.3–0.5MPa，逐步增至设计压力，避免冒浆或地层抬升。

注浆量：按公式 $Q = \pi r^2 h n \alpha \beta$ 计算（ r 为扩散半径， h 为注浆段高度， n 为孔隙率， α 为浆液填充系数， β 为损耗系数），实际施工中需根据注浆压力变化动态调整。

注浆速度：静压注浆速度控制在5–30L/min，高压喷射注浆喷嘴流速 $\geq 200\text{m/s}$ ，确保浆液有效切割岩土体。

（三）设备选型与配置

注浆泵：水泥浆宜用柱塞泵（压力可达10MPa以上），化学浆用齿轮泵或螺杆泵（避免腐蚀）。

搅拌机：高速搅拌机（转速 $\geq 1200\text{r/min}$ ）确保浆液均匀，双液浆需配备独立搅拌系统。^[8]

监测仪器：安装压力传感器、流量计实时监测注浆参数，采用GPS或全站仪监测地表变形。

四、注浆工程质量控制与常见问题处理

（一）质量控制要点

1. 施工前控制：

复核地质勘察报告，开展现场注浆试验，确定最佳施工参数。

检查注浆设备运行状态，确保管路密封性和计量准确性。

2. 施工中控制：

严格按设计孔位、角度钻进，偏差 $\leq 5\%$ 。

记录注浆压力、流量、浆液用量等参数，出现异常及时停机分析。

3. 施工后控制：

采用静力触探、钻孔取芯、压水试验等方法检测注浆效果，合格标准为承载力提升 $\geq 30\%$ 、渗透系数 $\leq 10^{-6}\text{cm/s}$ 。^[9,10]

（二）常见问题与处理方法

问题类型	成因分析	处理策略
注浆压力骤升	管路堵塞或地层密实	停机清洗管路，改用稀浆冲通；调整注浆顺序，先注相邻孔释放压力。
地面冒浆	注浆压力过高或地层薄弱	降低注浆压力，采用间歇注浆；在冒浆点埋设导管引流，待浆液初凝后封堵。
浆液串孔	孔距过小或地层裂隙贯通	增大孔距，采用隔孔跳注；对串浆孔同时注浆或封闭串浆孔。
注浆量超限	地层空隙率大或浆液流失	填入粗骨料填充大空隙，改用浓浆或双液浆；核查地质资料，调整注浆设计。

五、典型工程案例

（一）案例一：某地铁隧道穿越砂层注浆加固

工程概况：隧道埋深15m，穿越厚度8m的松散砂层，地下水水位埋深5m，需控制地表沉降 $\leq 30\text{mm}$ 。

注浆方案：

采用袖阀管注浆工艺，孔距1.5m，排距1.2m，梅花形布置。

浆液为水泥–水玻璃双液浆（水灰比1:1，水玻璃浓度35Be’，体积比1:1），初凝时间15–20s。

注浆压力从0.5MPa逐步升至1.2MPa，注浆量约2.8m³/孔。

效果评估：地表最大沉降22mm，满足设计要求；砂层标贯击数从8击提高至18击，承载力提升120%。

（二）案例二：某高层建筑岩溶地基处理

工程概况：地基下伏岩溶区，溶洞高度0.5–5.0m，顶板厚度不足3m，需消除地基不均匀沉降风险。

注浆方案：

先对大溶洞（高度>2m）填充C20混凝土，再采用水泥浆压力注浆（水灰比0.8:1）。

注浆孔深至溶洞底板以下1m，间距3m，注浆压力2.0–3.5MPa。

施工中采用孔内CT扫描监测浆液扩散范围，调整注浆参数。

效果评估：复合地基承载力特征值达300kPa，满足设计要求；沉降观测显示最大差异沉降 $< 0.002\text{L}$ （L为相邻柱距）。

六、注浆技术发展趋势与挑战

（一）智能化注浆技术

智能监测与控制：集成物联网（IoT）、大数据分析技术，实时监测注浆参数并自动调整注浆工艺，如根据压力变化动态调节浆液配比。

机器人注浆：开发隧道、地下管线等复杂环境下的注浆机器人，实现自动化钻孔、注浆作业，提高施工效率与安全性。

（二）绿色环保注浆材料

低碳浆液开发：利用工业废渣（如矿渣微粉、粉煤灰）替代部分水泥，降低碳排放；研发可降解化学浆液，减少环境风险。

废水循环利用：建立注浆废水处理与回用系统，实现水资源循环利用，减少施工污染。

（三）复杂环境下的应用挑战

深海与冻土注浆：针对深海高压、冻土低温环境，研发耐压、抗冻胀的特殊浆液与施工设备。

既有建筑加固注浆：在不影响结构安全的前提下，实现微扰动注浆，如采用袖阀管微型注浆技术。

七、结束语

注浆技术在岩土工程中具有不可替代的作用，其应用策略需结合地质条件、工程需求及技术特点综合制定。通过优化浆液配比、精准设计注浆参数、加强施工过程控制，可显著提升注浆效

果。未来，智能化、绿色化将成为注浆技术的主要发展方向，需进一步加强跨学科技术融合与环保材料研发，推动注浆技术在复杂工程中的安全、高效应用。

参考文献

- [1] 秦鹏飞. 岩土工程渗透破坏与注浆防治研究[J]. 黄河科技学院学报, 2024, 26(02): 62-68. DOI: 10.19576/j.issn.2096-790X.2024.02.011.
- [2] 董晓斌, 李翔, 苏定立, 等. 岩土工程注浆材料与工艺研究现状及展望[J]. 广州建筑, 2023, 51(06): 149-152.
- [3] 魏正亮. 建筑岩土施工工程项目中的注浆技术探究[J]. 四川建材, 2022, 48(11): 98-100.
- [4] 王克. 关于岩土工程施工中注浆技术探究[J]. 砖瓦, 2022, (03): 153-155. DOI: 10.16001/j.cnki.1001-6945.2022.03.021.
- [5] 赵世斌. 岩土工程施工中注浆技术分析[J]. 江西建材, 2021, (10): 294-295.
- [6] 张磊. 岩土工程勘察与地基施工处理技术[J]. 石材, 2024, (06): 105-107. DOI: 10.14030/j.cnki.scaa.2024.0295.
- [7] 付宏渊, 姚杰, 邱祥. 铜尾矿改性水泥基聚合物注浆材料性能与机理分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(03): 1107-1119.
- [8] 于江浩, 李薇薇, 梁蕊宏, 等. 定向钻穿越土岩交替复杂地层注浆加固处理案例分析[J]. 电力勘测设计, 2023, (S2): 72-78. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.S2.013.
- [9] 秦鹏飞, 王莉, 晋芳, 等. 岩土工程不良地质注浆技术研究进展[J]. 安阳工学院学报, 2023, 22(04): 78-84. DOI: 10.19329/j.cnki.1673-2928.2023.04.015.
- [10] 秦鹏飞, 朱利颖, 王文菁. 岩土渗透破坏及其注浆防治研究综述[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(11): 43-49.