

# 复杂地质条件下水利工程地基处理灌浆技术

马伟明

(东莞市水务工程质量安全监督站, 广东 东莞 523000)

**摘要** 灌浆技术作为加固水利工程地基的关键技术之一, 其核心价值在于显著提升地基的稳定性、增强抗渗性能并加固整体结构强度。本文探讨了水利工程地基处理领域中的灌浆技术在复杂地质条件下的应用, 系统归纳了灌浆技术的运作机理、详尽的施工流程以及操作时的关键注意事项。通过详尽分析灌浆技术如何有效应对这些特殊地质挑战, 提出了一系列创新且高效的处理方案与施工策略, 旨在为水利工程领域内的从业人员提供有益的参考。

**关键词** 复杂地质; 水利工程; 地基处理; 灌浆技术

**中图分类号:** TV5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2097-3365(2024)11-0046-03

我国水利工程建设规模不断扩展, 地基处理在复杂地质环境中的挑战愈发显著。地基处理的质量堪称水利工程整体稳固与安全性的基石。其中, 灌浆技术作为地基加固领域的常用且高效手段, 其通过向地基中的裂隙、孔洞及软弱层精准灌注具备胶结特性的材料, 旨在实现地基的加固与防渗等多重工程目标。本文深入剖析复杂地质条件下水利工程地基处理中灌浆技术的具体应用与实践, 以期为该领域的技术进步与工程安全提供有力支持。

## 1 复杂地质条件下水利工程的特点

在复杂地质条件下, 水利工程建设展现出其独特而艰巨的特点。此类工程往往面临地层多变、构造复杂、岩溶发育、断层破碎带广布等多重挑战, 对设计、施工及后期运维提出了极高要求。设计阶段, 需深入勘探, 精确掌握地质构造, 采用先进的三维地质建模技术, 科学预测潜在风险, 确保方案合理可行。在施工过程中, 则需灵活运用多种开挖支护技术, 如预应力锚索、帷幕灌浆等, 以应对不良地质体, 保障施工安全。同时, 加强监测预警系统建设, 实时监控地质变化, 及时调整施工方案, 防范地质灾害。此外, 复杂地质还易导致渗流问题, 需构建高效防水体系, 确保工程稳定与运行安全。总之, 复杂地质条件下的水利工程建设, 是技术与智慧的双重考验, 需综合运用多学科知识, 不断创新技术方法, 以实现水利工程的安全、高效与可持续发展<sup>[1]</sup>。

## 2 灌浆技术的原理

灌浆技术作为土木工程领域的一项重要技术手段, 其基本原理在于利用气压、液压或电气化等原理, 将可固化的浆液注入天然或人为产生的裂缝之中, 通过

物理性质对裂缝进行修复与加固。这一技术广泛应用于公路、桥梁、隧道、水利电力工程等多个领域, 旨在解决结构裂缝、渗漏及稳定性问题。灌浆过程中, 首先需对裂缝进行精准定位与分析, 明确裂缝的性质、成因及影响范围。随后, 根据裂缝特性选择合适的灌浆材料, 如普通硅酸盐水泥、环氧树脂等, 通过科学的配比与搅拌, 确保浆液具备良好的流动性和黏结性。在注浆过程中, 浆液在压力作用下逐渐渗透至裂缝深处, 填充并固化, 形成新的结构体, 从而增强原结构的强度和稳定性。灌浆技术的成功应用, 不仅能够有效解决结构裂缝问题, 提升工程的整体质量与安全性能, 还能在一定程度上延长工程的使用寿命, 降低维护成本<sup>[2]</sup>。

## 3 复杂地质条件下水利工程地基处理灌浆技术分析

### 3.1 地基加固与稳定性控制

目前阶段, 灌浆技术在地基处理领域内无疑占据着举足轻重的地位, 这项技术通过向地基内部精准注入高强度材料, 不仅显著提升了地基的承载能力, 还极大地增强了其整体稳定性, 有效应对了复杂多变的地质环境所带来的种种挑战。针对地基常见的褶皱、断裂及承载力不足等顽疾, 往往会引发地基沉降、滑移乃至坍塌等严重后果。而灌浆技术则以其独特的优势, 通过精准填补地基内部各类空隙与缺陷, 构建出更加坚实、致密的注浆体结构, 从根本上加固了地基, 确保了其稳固性。软弱地层中广泛分布的软岩与高湿性土壤, 往往导致地基的抗剪性能低下, 极易在外力作用下发生形变与沉降。然而, 通过科学的灌浆策略, 包括精心选择适宜的灌浆材料以及优化施工工艺, 能

够显著提升灌浆体的整体抗剪能力，使其能够轻松应对更重地基负荷。此外，基于抗剪强度理论，推导出灌浆后断层带抗剪强度的具体计算公式如下：

$$t_j = (1 + V/V_0) \times t \quad (1)$$

式(1)中：我们将灌浆料体设定  $V/V_0$  为浓度，灌浆体的抗剪强度为  $t$ ，灌浆后断层带的抗剪强度为  $t_j$ 。从该式可知，随着灌浆料体浓度的稳步递减，直至归零，标志着断层带被完全充盈，此时，断层带与灌浆体的抗剪强度实现了高度的趋同。褶皱，这一岩层在地质应力作用下自然形成的曲折形态，无疑增加了地基结构的复杂程度，故需深入剖析其特性，并据此制定精准的应对措施。在灌浆作业的每一个环节中，灌浆材料的选择与运用都是至关重要的。为了确保灌浆作业能够精准高效地加固地基，关键在于确保灌浆材料能够毫无阻碍地渗透至地下每一处细微的裂缝与孔隙之中，从而达到强化地基结构、提升其承载能力与稳定性的目的。

### 3.2 地下水位的控制以及排水处理

在水利工程的构建过程中，若面对复杂多变的地质环境，确保对地下水位的精确控制与合理排放，实为保障项目安全与稳定的核心环节。鉴于这些地区地下水文条件极其复杂，水位波动剧烈，此现象不仅严重威胁到工程地基的稳固性，更可能在极端情境下对整个结构造成毁灭性破坏，其后果难以估量。注浆技术不仅能够精准地调控地下水状况，还能显著提升排水效果。

1. 地下水位的控制。地质构造错综交接地域，地下水位常随地质环境的微妙变迁而经历显著的起伏，极端条件下，甚至可能引发工程主体结构的损坏。为了有效应对地下水位剧烈波动带来的地基沉降、变形等潜在风险，因此创新引入了注浆技术，在地下水位的关键区域精心策划并实施注浆作业，选用具备高流动性与卓越耐腐蚀性能的注浆材料，精心构筑起一道坚不可摧且致密无缝的注浆防线。这道防线不仅能够彻底阻断地下水与工程结构之间的直接接触通道，防止其侵扰地基，更能通过其独特的调控机制，显著平抑地下水位的波动范围，从而全方位守护水利工程的稳固与安全<sup>[3]</sup>。

2. 地下水的排水处理。在应对复杂地质区域的水利工程施工中，及时排水至关重要，它确保了地下水位稳定维持在适宜的安全范围内。在此过程中，通过运用灌浆技术，我们能够有效封堵地下渗漏源，预防地下水沿裂隙、孔洞等潜在通道渗透至工程的其他关键区域，进而保障了工程的整体安全与稳定。

### 3.3 开挖回填软土覆盖层

鉴于坝区独特的地质环境，尤其是区域内广泛分布的深厚软土层，首要举措为深度清除并精细开挖软土区域，随后进行高质量回填与密集碾压作业，以强化地基基础。在此基础上，引入灌浆固结技术，进一步巩固地基的整体承载性能。在实施过程中，应精心策划基坑开挖流程，确保所有杂质及潜在的不稳定地质体（如松散岩体）被彻底清除，维持基底洁净状态。针对难以彻底清理的区域，将采用高效的冲击碾压技术进行针对性强化处理，并依据工程进度、压实效果预期及地质特征，科学设定碾压遍数，如设定至 20 遍以充分保证处理效果。回填材料方面，将选用符合高标准要求的混凝土，其配制精确：采用 42.5 级中热硅酸盐水泥，严格控制人工砂细度模数在 2.6 至 2.7 范围内，精确调整石粉含量为 14.5% 至 14.6%，并适量掺入 50% 的粉煤灰以优化混凝土性能。

尽管工程区域已圆满完成了开挖与回填作业，但溶槽内角砾岩的显著问题依旧不容忽视，其承载能力的薄弱直接威胁到水利工程地基的稳固与安全。针对此难题，决定采取灌浆加固策略，旨在大幅度增强地基的抗渗性能，进而全面保障工程的安全运行。在灌浆实施过程中，精心调配了灌浆材料，以特定比例（水：水泥：粉煤灰 = 1:0.15:0.85）混合而成，并巧妙融入了外加剂以优化其综合性能。施工期间，我们密切监控各项关键参数，并绘制了详尽的单孔灌浆曲线图（见图 1），通过直观的图表形式，精准捕捉浆液流动性的微妙变化。图 1 清晰呈现，当水固比设定为 1:1 时，浆液展现出了最为理想的流动与扩散特性，完美契合了充填灌浆的严苛质量要求。随着灌浆作业的深入进行，我们观察到流量逐渐减缓，而压力则稳步上升，直至整个灌浆过程圆满结束。

为确保灌浆效果达到预期目标，创新性地采用了类似法兰盘的判定方法，精准把握灌浆阻塞的最佳时机。具体而言，当孔口压力稳定维持在 1 MPa 的高位，且流量持续低于 10 L/min，并在此状态下稳定超过 20 分钟时，即判定该孔注浆已达到既定标准，随即果断停止注浆作业<sup>[4]</sup>。

### 3.4 岩溶地段的灌浆处理

1. 首要方法是花管灌浆技术：在富含泥沙的岩溶区域，直接高压灌浆往往难以有效成孔。此时，通过插入带有孔眼的钢管至溶洞内部，构建人工孔壁，不仅能有效预防灌浆过程中的孔壁坍塌，还能避免砂土颗粒阻塞高压阀门或灌浆设备。随后，利用高压将浆液通过钢管的孔眼强力注入土层，借助高压的驱动力，

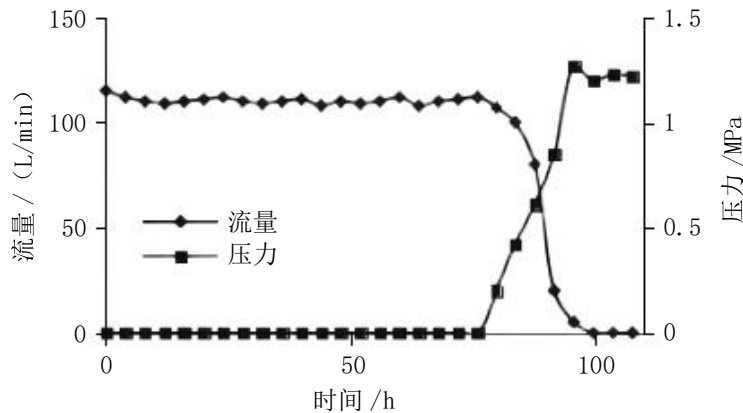


图1 单孔灌浆过程曲线

水泥浆能够深入砂土层，或是对充填物进行压密处理，排出其中水分，从而实现充填物的有效灌注与压实。其次，高压灌浆法亦是一种重要手段：此方法采用无冲洗的高压水泥灌浆技术直接作用于岩溶区域。通过施加较高的灌浆压力，不仅能使充填物受到挤压而变得更加密实，从而提升其抗渗稳定性，还能利用水泥浆的劈裂效应，使浆体以条带状形式在土体中穿插延展，形成纵横交错的网格状包裹体。然而，在面临大型溶洞区域时，由于钻孔难度增大，可能需要预先下入套管或采用旋喷技术加固溶洞充填物，以确保后续高压灌浆作业的顺利进行。

2. 针对大型空洞岩溶地貌，在无填充材料的情况下，推荐采用优质高流动性混凝土作为回填材料。该混凝土斗严格控制骨料粒径在 20 mm 以下，同时确保混凝土标号不低于 C15，以保障回填质量。若岩溶区域深度显著，为避免混凝土在输送途中发生离析，建议采用溜槽与导管辅助浇筑，确保混凝土均匀注入。灌注作业完成后，需静待 7 日，使混凝土充分凝结硬化。随后，进行孔洞清理，并追加水泥浆灌注，以进一步增强结构稳定性。对于空间更为开阔的岩溶空洞，除上述措施外，可考虑增大灌浆孔直径，并采用两步填充法。首先，向孔内逐层投入粒径不超过 40 mm 的清洁碎石，直至填满整个空间；随后，灌注水泥砂浆进行密实填充。此过程完成后，亦需静置 3 天，确保材料完全凝结<sup>[5]</sup>。

### 3.5 灌浆施工工艺的优化

为了提升灌浆施工的质量与效率，需深入考量工程所在的地质特性及具体施工需求，进而实施针对性的工艺优化。其中，定向灌浆技术作为一种高效策略，值得优先考虑。该技术巧妙利用多个预设的注入点，以多角度、多路径的方式注入灌浆材料，确保目标区域

得到全面且均匀的渗透与加固。定向灌浆的优势在于其能够精准调控灌浆材料的流向与分布，有效应对地质条件的多变性与复杂性，避免了传统灌浆方法中因地质不均导致的灌浆效果差异。此外，为了进一步提升地基处理的综合效能，建议将定向灌浆技术与加固桩、加压注浆等其他先进地基处理技术相结合，构建一套多技术协同、优势互补的综合处理方案。通过这种多技术融合的方式，不仅能够更加全面地解决复杂地质环境下地基处理的难题，还能显著提升处理效果。

## 4 结束语

在错综复杂且多变的地质环境下，水利工程的基石——地基处理，尤其依赖于灌浆技术的精湛应用，这已成为一项既具挑战性又至关重要的工程技术举措。本文详细分析了灌浆技术在复杂地质条件下的作用机制与技术要点，总结了灌浆技术在工程实践中的应用策略，通过细致入微的材料选择与严谨科学的实施流程，灌浆技术能够大幅增强地基的稳定性、防渗透效能以及整体结构的承载能力，从而为水利工程的长期稳定运行构建起坚不可摧的基石。

## 参考文献：

- [1] 王磊. 水利工程施工软土地基处理技术研究[J]. 内蒙古水利, 2023(04):18-19.
- [2] 刘金光. 灌浆施工技术在水利工程防渗处理中的应用研究[J]. 水利技术监督, 2023(04):233-235,260.
- [3] 高瑜. 灌浆施工技术在水利工程防渗处理中的运用[J]. 江苏建材, 2022(04):66-68.
- [4] 唐振东. 复杂地质区水利工程施工地基处理灌浆技术[J]. 水上安全, 2023(09):144-146.
- [5] 赵新昌, 王淑冰. 水利水电工程基础灌浆应用探析[J]. 大众标准化, 2022(10):139-141.