

# 灌浆技术在水利工程基础处理中的应用研究

吴俊兴

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

**摘要:** 灌浆技术作为岩土工程和水工建筑物地基处理的核心手段,在保障水利工程安全、稳定与耐久性方面发挥着不可替代的作用。本文系统阐述了灌浆技术的基本原理、主要类型及其在水利工程基础处理中的具体应用场景。文章深入剖析了帷幕灌浆、固结灌浆、接触灌浆及回填灌浆等关键技术的工艺流程、设计要点与质量控制方法,并结合典型工程案例,论证了其在防渗、加固、堵漏等方面的实际成效。同时,针对当前灌浆技术面临的挑战,如复杂地质条件适应性、智能化水平不足及环保要求日益严格等问题,本文探讨了智能灌浆、绿色灌浆材料及精细化施工管理等前沿发展方向。研究表明,通过持续的技术创新与工程实践优化,灌浆技术将为现代水利工程建设提供更加高效、精准和可持续的基础处理解决方案。

**关键词:** 灌浆技术; 水利工程; 基础处理; 帷幕灌浆; 固结灌浆; 智能灌浆

## 引言

水利工程作为国家基础设施,兼具防洪、供水、发电、灌溉及生态保护等功能,其结构安全关乎国计民生与经济发展。但多数水工建筑(如大坝、水闸、隧洞)建于复杂地质环境,地基常含断层、裂隙、溶洞、软弱夹层等不良地质构造。这些缺陷会降低地基承载力与整体性,成为蓄水后渗流通道,引发渗透破坏,威胁工程安全。为解决这些问题,基础处理技术应运而生,其中灌浆技术最为关键且应用广泛。该技术将特定性能浆液(如水泥浆、化学浆液)在一定压力下注入地基孔隙、裂隙或空洞,凝结硬化后发挥胶结、填充、置换和挤压等作用,可提高地基强度、改善整体性、降低渗透性、封堵渗漏通道。随着我国水利事业发展,高坝大库、深埋长隧洞等重大工程对基础处理提出更高要求。传统灌浆技术虽成熟,但在超高压、超深部、高流速动水及极端破碎地层等复杂工况下存在局限。因此,系统梳理灌浆技术理论体系,深入研究其不同场景应用模式,前瞻探索未来发展趋势,对提升我国水利工程技术水平、保障国家水安全意义重大。

## 1 灌浆技术的基本原理与分类

### 1.1 基本原理

灌浆技术的本质是一种物理-化学加固过程。其核心在于利用外加压力将具有一定流动性的浆液驱入岩土体内部的空隙结构之中。在这一过程中,浆液首先克服地层阻力,向孔隙、节理、裂隙等空间渗透扩散;随后,通过物理沉淀或化学反应(如水泥水化)逐渐凝结硬化,形成结石体。该结石体与周围岩土颗粒紧密结合,构成一个力学性能显著改善的复合体。当灌浆压力足够大时,

甚至可能使岩体产生微劈裂,浆液随之进入新生成的裂缝并固化,从而进一步提升地基的密实度与整体强度。正是通过这种渗透、填充、胶结乃至压密的综合作用,灌浆技术实现了防渗、加固与堵漏三大核心功能,为水工建筑物提供了坚实可靠的基础支撑。

### 1.2 主要分类

在水利工程实践中,灌浆技术根据其用途和灌注对象的不同,形成了若干具有明确功能定位的类型。其中,帷幕灌浆主要用于构建一道连续的低渗透性屏障,以阻断或显著削弱水库蓄水后沿坝基及两岸山体的渗流路径,是高坝工程防渗体系的核心。固结灌浆则聚焦于坝基浅部岩体的整体性提升,通过加密灌浆孔网,增强表层基岩的弹性模量与承载能力,确保大坝在荷载作用下变形可控<sup>[1]</sup>。接触灌浆专门用于解决混凝土坝体与基岩之间因温度收缩或施工间隙可能形成的脱空问题,通过低压注入浆液实现二者紧密贴合,保证荷载的有效传递。回填灌浆则广泛应用于水工隧洞和地下厂房,旨在填充衬砌与围岩之间的空隙,促使两者协同受力,防止围岩松动和衬砌开裂。此外,针对特殊工况,如分块浇筑坝体的接缝处理、岸坡稳定加固,或在动水条件下快速封堵集中渗漏,还会采用接缝灌浆、岸坡灌浆乃至化学灌浆等专项技术,体现出灌浆体系的高度适应性与工程针对性。

## 2 灌浆技术在水利工程基础处理中的具体应用

### 2.1 帷幕灌浆的应用

帷幕灌浆作为大坝防渗的生命线,其设计与施工直接关乎工程安危。在设计阶段,工程师需综合考虑坝高、库水位、地质构造及防渗标准,科学确定帷幕的深度与厚度。通常,帷幕需深入相对隔水层5至10米,以确保其有

效性；对于高坝或地质条件复杂的工程，则常采用双排甚至三排帷幕以增强防渗效果。施工中普遍采用“孔口封闭、自上而下分段灌浆法”，该工艺能精确控制各段灌浆压力，有效防止因压力过大导致的岩体抬动，并能获取详实的透水率（Lu值）和单位注入量数据，为质量评估提供依据。整个灌浆过程遵循严格的加密顺序，即先施工下游排，再施工上游排；在同一排内，则按I序、II序、III序孔逐步加密，利用前序孔的灌浆成果为后续孔创造更有利的灌浆条件<sup>[2]</sup>。质量控制的核心在于检查孔的压水试验结果，其透水率必须满足设计规范要求，同时需结合P-Q-t曲线（压力-注入率-时间曲线）的形态分析，综合判断灌浆效果是否达到预期目标。

### 2.2 固结灌浆的应用

固结灌浆是确保大坝“坐稳”的关键环节，其目的在于提升坝基浅部岩体的整体性和力学性能。该技术广泛应用于所有建于岩石地基上的混凝土坝，尤其在存在断层、破碎带或风化严重的局部区域，往往需要进行加强固结灌浆。施工时机的选择至关重要，通常在坝基开挖验收后、混凝土浇筑形成一定高度的盖重后再行实施，利用混凝土自重提供反力，有效抑制灌浆过程中岩体的抬动风险。在某些特殊情况下，也可采用无盖重灌浆，但必须对灌浆压力进行极其严格的控制。固结灌浆的效果验证不仅依赖于常规的压水试验来检查透水率的降低程度，更关键的是通过声波测试手段，如跨孔CT或单孔声波测井，来量化灌浆前后岩体波速的变化。波速的显著提升是岩体完整性得到实质性改善的直接证据，也是评价固结灌浆成功与否的核心指标。

### 2.3 接触灌浆与回填灌浆的应用

接触灌浆与回填灌浆虽作用对象不同，但共同扮演着“结构粘合剂”的角色，确保不同结构单元间能有效协同工作。接触灌浆的成功与否直接影响混凝土坝体的整体受力状态。其施工必须在坝体经历充分冷却、温度收缩基本完成之后方可进行，以避免因过早灌浆而引入额外应力。由于灌浆对象仅为坝体与基岩间的微小缝隙，所施加的压力极小，通常仅为0.1至0.3MPa，以防对已建成的坝体造成扰动。施工过程中，需通过预埋的抬动监测装置实时反馈数据，确保整个过程安全可控。回填灌浆则主要服务于水工隧洞和地下洞室工程。在混凝土衬砌完成后，衬砌与围岩之间不可避免地会存在空隙，若不加以处理，将导致围岩应力松弛、衬砌受力不均甚至开裂。回填灌浆通过从低处向高处逐段注入浆液，有效填充这些空隙，使衬砌与围岩形成一个共同承载的整体。其灌浆结束标准通常设定为在达到设计压力后，注入率

持续低于某一阈值（如0.4L/min）并维持10分钟以上，以确保填充的密实性。

### 2.4 特殊地质条件下的灌浆技术

面对复杂多变的地质环境，灌浆技术展现出强大的适应性与灵活性。在处理规模较大的断层与破碎带时，由于其吸浆量巨大且难以形成连续帷幕，常规灌浆方法往往失效。此时，工程上常采用“浓浆、低压、限流、间歇”等特殊工艺，通过降低浆液流动性、减小灌浆压力、限制瞬时流量并辅以间歇停灌，让浆液有足够时间沉淀凝结，逐步封堵大通道<sup>[3]</sup>。在极端情况下，还会先行灌注速凝型双液浆（如水泥-水玻璃）进行快速封堵，为后续常规灌浆创造条件。喀斯特（岩溶）地层的处理则更为棘手，溶洞与溶蚀裂隙的随机分布使得灌浆路径难以预测。对此，工程界发展出多种综合方案，例如采用大口径钻孔向巨型溶洞内投掷碎石或混凝土形成“人工骨架”，再进行灌浆；或运用模袋灌浆技术，将浆液约束在特制的纤维袋内，使其在特定空间内膨胀固化，从而有效填充空腔。对于在水库运行期发现的突发性集中渗漏，抢险灌浆必须在动水条件下进行。此时，快凝、高膨胀性的化学浆液（如聚氨酯）因其能迅速与水反应生成不溶于水的弹性固结体，成为封堵涌水通道的首选材料，展现了化学灌浆在应急处置中的独特优势。

## 3 工程案例

我国锦屏一级水电站的建设为灌浆技术在极端复杂地质条件下的成功应用提供了典范。该电站拥有高达305米的世界级混凝土双曲拱坝，其坝址区地质构造极为复杂，发育有多条规模宏大的断层和蚀变岩带，给基础处理带来了前所未有的挑战。为构建可靠的防渗体系，工程采用了三排帷幕灌浆，最大深度超过150米。针对深部高压灌浆极易引发岩体抬动的难题，项目团队创新性地应用了“孔口封闭、自上而下、小段长、高精度自动记录”的先进灌浆工艺，并同步建立了覆盖全坝基的抬动监测预警系统，实现了对灌浆全过程的精细化管控。对于F<sub>2</sub>、F<sub>5</sub>等关键断层，单纯灌浆难以奏效，因此采取了“置换+灌浆”的综合处理策略：先用高强度混凝土置换部分松散的断层物质，形成稳定的传力结构，再在其上下游及内部进行系统性的固结和帷幕灌浆，最终构建了一个集防渗、传力、加固于一体的复合处理体系。工程蓄水后的长期监测数据表明，坝基渗流量远低于设计预期，扬压力分布均匀且数值正常，各项安全监测指标均处于优良状态，这不仅验证了设计方案的科学性，也彰显了现代灌浆技术在世界级超级工程中的强大生命力与可靠性。

## 4 灌浆技术面临的挑战与发展趋势

### 4.1 面临的挑战

尽管灌浆技术已取得长足进步，但在新时代背景下，其发展仍面临多重挑战。首先，随着优质坝址资源的日益枯竭，新建水利工程越来越多地被迫选址于高地应力、强震活跃区、深厚覆盖层或巨型岩溶发育区等极端复杂的地质环境中，这对灌浆材料的渗透性、凝结特性及施工工艺的鲁棒性提出了近乎苛刻的要求。其次，传统灌浆施工在很大程度上依赖操作人员的经验判断，数据记录易受主观因素影响，过程控制缺乏精细化与标准化，难以满足现代大型工程对质量一致性的严苛追求<sup>[4]</sup>。最后，在国家“双碳”战略和生态文明建设的大背景下，以水泥为主要成分的传统灌浆材料因其高能耗、高碳排放的生产过程，正面临越来越大的环保压力，同时废弃浆液的处置也构成了潜在的环境负担。

### 4.2 未来发展趋势

为应对上述挑战，灌浆技术正朝着智能化、绿色化和精细化的方向加速演进。智能灌浆技术被视为未来发展的核心引擎，其通过集成高精度传感器网络、物联网平台与人工智能算法，构建起一个能够实时感知、动态分析、自主决策并精准执行的闭环控制系统。该系统可对灌浆过程中的压力、流量、浆液密度等关键参数进行毫秒级监控，并基于大数据模型自动优化水灰比与灌浆压力，对串浆、冒浆或岩体抬动等异常工况进行即时预警与智能干预，从而将灌浆从一门“手艺”转变为一门高度可控的“科学”。在材料层面，研发绿色与高性能灌浆材料已成为共识。一方面，大力推广利用粉煤灰、矿渣微粉等工业固废作为水泥替代品的复合灌浆材料，既能有效降低工程成本，又能显著减少碳足迹；另一方面，积极开发具有超细颗粒、高渗透性、早强、微膨胀及优异耐腐蚀性能的新型浆材，以攻克细微裂隙灌浆和恶劣服役环境下的技术瓶颈。与此同时，借助BIM（建筑信息模

型）技术，将灌浆的设计意图、施工过程与监测数据深度融合于统一的数字孪生平台，实现全生命周期的可视化追溯与管理。通过对海量工程数据的挖掘与分析，不断提炼优化灌浆参数与工艺，形成可复用的知识库，进而指导未来工程的科学决策。此外，灌浆技术正日益与其他先进技术融合，如利用TSP、地质雷达等超前地质预报手段探明前方不良地质体，实现“靶向灌浆”；或通过数值模拟技术预测浆液扩散范围与加固效果，为灌浆孔网的优化布置提供理论支撑，最终形成一套集“探、算、灌、评”于一体的现代化基础处理技术体系。

## 5 结语

灌浆技术历经百年发展，已成为水利工程基础处理不可或缺的基石。从基本的防渗加固到应对世界级工程难题，其理论体系不断完善，工艺技术日臻成熟。帷幕灌浆、固结灌浆、接触灌浆等各类技术在实践中相互配合，共同构筑了水工建筑物安全稳定的根基。然而，面向未来更高、更大、更复杂的水利工程建设需求，以及国家对高质量发展和生态文明建设的战略要求，灌浆技术必须与时俱进。以智能灌浆为核心，以绿色高性能材料为支撑，以精细化、数字化管理为手段，是灌浆技术发展的必然路径。通过持续的科技创新与工程实践，灌浆技术必将焕发新的活力，为保障国家水安全、推动水利现代化贡献更大力量。

## 参考文献

- [1]慕娟.复杂地质条件下水利工程基础灌浆施工技术要点研究[J].水上安全,2025,(17):174-176.
- [2]张文涛.探析水利工程中基础灌浆施工技术应用[J].工程建设与设计,2025,(12):132-134.
- [3]朱红波.水利工程中基础灌浆施工技术应用研究[J].农业灾害研究,2025,15(02):227-229.
- [4]王翔.分析水利工程中基础灌浆施工技术应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(01):202-204.