

灌浆施工技术在水利水电工程施工中的应用

张晓薇

浙江鸿翔水利建设有限公司 浙江 嘉兴 314400

【摘要】：灌浆施工技术是水利水电工程防渗加固、稳定补强的核心，应用于地基处理、水工建筑物防护等关键环节。结合水利水电工程复杂地质水文特点，分析灌浆施工技术在防渗加固、抗倾覆稳定、抗滑移与抗裂的应用场景，阐述大直径钻灌、分段钻进、帷幕灌浆及特殊溶洞处理等常用工艺，梳理施工设备选型、现场布置、材料制备及应急预案等施工组织准备要点，明确钻孔质量、灌浆参数、特殊工况及封孔保护等质量控制核心。科学选用灌浆工艺、严格把控施工各环节，可提升水利水电工程地基承载力与结构稳定性，消除渗漏、滑移等安全隐患，为工程长期安全运行提供保障。

【关键词】：水利水电工程；灌浆施工技术；防渗加固；施工工艺；质量控制

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.092

引言

水利水电工程是保障水资源合理调配、防洪减灾及能源供应的重要基础设施，施工质量直接关系到国民经济发展与人民生命财产安全。多数水利水电工程地处地质复杂、地下水位高、水流冲刷频繁区域，地基岩体裂隙、溶洞等不良地质条件易引发渗漏、结构失稳，影响工程使用寿命与安全运行。灌浆施工技术依托浆液渗透、胶结特性，可填充地质缺陷、强化结构强度，是解决水利水电工程地基处理与结构补强的关键技术。结合工程实际，探讨灌浆施工技术的应用场景、工艺类型、施工组织及质量控制，为同类工程施工提供理论参考与实践借鉴。

1 灌浆施工技术在水利水电工程中的应用场景

1.1 防渗加固应用

水利水电工程多处于水流冲刷频繁、地下水位高且地质条件复杂区域，防渗是工程建设核心要务，关系工程主体长期稳定与安全运行。工程地基范围广、地质条件多样，采用防水抗渗性能较强的混凝土进行主体施工，也难以全面覆盖地基。地基内部天然缝隙、岩体裂隙及岩溶通道，易形成地下水渗流通道，引发渗漏隐患^[1]。灌浆施工技术依托浆液良好渗透与胶结作用，可填充地基孔隙与岩体裂隙，阻断地下水渗流路径，形成连续致密的防渗体系。工程区域常见溶洞、地下暗河等不良地质条件，适配灌浆工艺针对性处理，能从头源消除渗流隐患，提升工程整体防渗性能，避免渗漏引发的结构侵蚀、地基软化及失稳问题，为水利水电工程安全运行筑牢防渗防线。

1.2 抗倾覆稳定应用

大坝、闸墩、挡墙等水工建筑物长期承受高强度水压力，且多处于复杂地质环境，对结构抗倾覆能力

要求严苛，抗倾覆性能不达标易引发重大安全事故。灌浆施工是重要补强加固手段，向地基软弱夹层、破碎带及结构缝隙注入浆液，可将松散岩体、土体胶结为完整整体，提升地基整体性与承载能力，避免荷载分布不均导致的不均匀沉降，从基底层面增强结构稳定性。灌浆施工能强化主体结构各交接界面力学强度，消除界面力学薄弱点，优化结构荷载传递路径，减少渗流引发的扬压力对结构的不利影响，全方位提升水工建筑物抗倾覆能力，确保长期水压力作用下保持稳定。

1.3 抗滑移与抗裂应用

水利水电工程受复杂地质水文条件与持续水压力共同作用，结构易产生应力集中，引发滑移、断裂等安全风险，影响工程使用寿命与安全。灌浆施工采用网格化注浆，对地基薄弱区域针对性补强，胶结松散岩土体、提升地基整体性，同时构建连续防渗帷幕，降低渗透压力对结构的侵蚀，防止渗透破坏形成结构薄弱环节^[2]。工程主体已出现的裂缝和损伤部位，灌注高渗透浆液可修复结构完整性，抑制裂缝扩展，减少地基沉降对主体结构的牵拉影响，抵御结构滑移与断裂风险，保障水利水电工程主体结构的完整性与安全性。

2 大直径钻灌施工工艺

大直径钻灌工艺适用于水利水电工程溶洞、宽大裂缝等不良地质段的灌浆处理，核心优势是依托浆液自重与灌浆压力，实现深层渗透与充分填充，扩大灌浆影响范围，确保不良地质段加固到位。实际工程应用中，采用 170mm 造孔孔径，以振动回转钻进方式一次性成孔，提升钻孔效率。钻进遇到溶蚀风化带时，为避免孔径过大扰动岩体，将孔径调整为 150mm，改

用牙轮钻头施工，配合膨润土泥浆护壁，防止孔壁坍塌、缩径等问题。灌浆时选用 1:1 水灰比的水泥浆作为冲洗循环液，压力控制在 150MPa 以上，终孔需满足循环泥浆消耗量降至 1~3L/min，持续灌浆 30min，孔口封闭后继续灌浆 10~30min，确保浆液充分初凝、填充密实，保障施工质量（见图 1）。

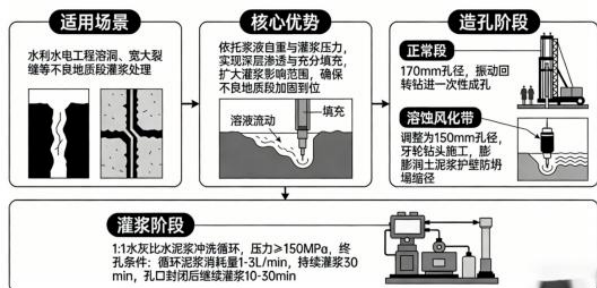


图 1 大直径钻灌施工工艺

2.1 分段钻进灌浆工艺

分段钻进灌浆工艺以严控钻孔偏斜（孔斜小于 1%）为核心前提，确保钻孔精度符合设计要求，成孔后及时埋设孔口管，再开展分段灌浆作业，提升灌浆针对性与均匀性。灌浆施工前，用 0.8MPa 压力进行 20min 简易前压水预处理，排查钻孔渗漏隐患，预处理结束后，以 1MPa 压力低压灌浆，待孔口管与孔壁间隙被浆液填充并初凝，更换新孔口管，采用孔口封闭器隔离防护，防止浆液串孔。该工艺采用孔序为 2 的单排帷幕布局，下段施工以钻杆作为注浆管，经 30min 压水检测确认钻孔通畅后开展灌浆作业，各段灌浆衔接紧密，可灵活适配地质条件变化，保证地基与帷幕灌浆的连续性、均匀性，提升整体灌浆效果。

2.2 帷幕灌浆施工工艺

帷幕灌浆是水利水电工程常用防渗灌浆工艺，采用自下而上施工方式，选用三级级配水泥膏浆，遵循由稀到浓原则逐级调整浆液浓度，确保与岩体、孔隙充分结合^[3]。灌浆时，若灌浆压力稳定但注入率降低，或压力提升但注入率不变，不调整水泥膏浆级配；第一级较稀水泥膏浆持续灌注 300L 以上，调整至第二级配灌注，灌注量达 1000L 后，再调整至第三级配最高浓度，保证持续灌注效果。灌浆压力同步逐级提升，初始用 0.25MPa 压力灌注，随后升至 0.50MPa，最终达到 1.0MPa，确保压力和灌注率符合设计要求。孔内充满浆液后，提管同步注入水泥浆，观察浆液无下沉后采用全面封孔法，经高压风机清理孔口浮浆和污水，用水泥砂浆填塞压实，杜绝孔口缝隙、漏水等问题。

2.3 特殊溶洞处理灌浆工艺

岩溶地质溶洞尺度差异显著，分级处理灌浆工艺保障填充致密，消解岩溶致险因子。直径不足 2 米的溶洞，黏土水泥膏浆灌注，浓度循序递增，利于渗透充盈，注量达标后核查填充状况。浆液未充满洞腔，掺入水玻璃等外加剂加速凝固，严控扩散边界，缩减耗材并确保实效。直径超 2 米的溶洞，选用水泥砂浆或混凝土灌注；单一工艺难稳质量，实施水泥砂浆与水泥膏浆间歇灌注；洞水流动时，速凝剂或纤维膏浆同步增设，避免浆液被径流冲失，促成溶洞完整填充，稳固地基承载。

3 水利水电工程灌浆施工组织与准备

3.1 施工设备选型与配置

施工设备选型与配置影响灌浆施工效率与质量，需结合水利水电工程岩溶发育、岩体软硬互层的复杂地质条件，选用适配设备。钻孔设备采用重探生产的 XY-2 型钻机，优化其结构使其更为紧凑，可灵活适配廊道等狭窄施工环境，满足工程多钻孔、浅孔径的施工需求^[4]。钻具选择上，工程区域岩体软硬互层普遍，传统合金钻头适配性差，且易在岩层软硬交界处损坏，故选用强度更高、耐磨性更优的金刚石钻头。根据施工中钻具损耗情况，动态配置钻杆、钻头耗材，既保障施工连续，又避免耗材浪费，提升施工效率与经济性（见图 2）。



图 2 施工设备选型与配置

3.2 施工现场平面布置

施工现场平面布置遵循“布局合理、流程顺畅、整洁有序”原则，结合灌浆施工流程，沿灌浆轴线规划排污沟与制浆站，保障施工环节高效衔接。排污沟连通制浆站排污池与施工场地，施工产生的废浆经排污沟汇入排污池，静置后上层清液排入围堰，下部沉淀物和废渣由专人清理运输，避免污染环境，维持场地整洁。制浆站设于已硬化区域，占地面积约 150m²，根据施工需求布置卧式水泥膏浆制浆系统，配备专用制浆机生产水泥膏浆，保障浆液质量稳定。砂浆和混凝土用量较小，采用小型搅拌设备现场拌制，实现即

时供应,满足施工需求,整体达成制浆、灌浆、排污流程一体化,提升施工效率。

3.3 灌浆材料制备与质量控制

灌浆材料质效锚定灌浆成效,原材料甄选、制备规制与质量核查须从严执行,浆液性能方达设计标准。灌浆骨料采自天然,砂选细度模数 2.6 至 2.9 中砂,砾石择 5 至 10 毫米洁净干燥、硬度优良的连续级配型,骨料颗粒匀净,契合胶结强度需求。制浆站依施工进度与灌浆需求量,科学设定材料制备产能,同步余量规划,留存浆液储备,供应量贴合施工实际,规避浆液短缺阻滞施工进度。注浆水泥以普通硅酸盐水泥为主,掺合 1 级粉煤灰与粒径小于 1.5 毫米的天然砂调和,制备阶段严管配合比,动态监测浆液流动性、胶结强度,原材料环节筑牢灌浆质量根基。

3.4 施工应急预案制定

水利水电工程灌浆施工场地复杂,地质水文情况多变,易出现各类突发状况,需结合以往施工经验与现场实际,制定完善施工应急预案,应对施工异常,保障施工质量与效率^[5]。冒浆与浆液去向不明时,严格按对应规程及时封堵、引流,或增加浆液浓度、反复灌浆,提升灌注效果,避免浆液浪费与施工隐患。灌浆因故中断,原则上保持连续,能及时处理则尽快恢复作业,无法及时处理时,立即冲洗钻孔或扫孔,工况恢复正常后,重新按由稀到浓顺序使用对应级配水泥浆施工,依工况调整参数。灌浆注入量较大难以结束,采用限流、浓浆、间歇灌浆方式,必要时用速凝剂浆液或膏状浆液调整;射浆管卡钻时,转动、上下活动钻具调整,确保回浆量达标,钻具凝固卡死则关闭回浆阀门并强力冲洗钻孔取出。

4 水利水电工程灌浆施工质量控制要点

4.1 钻孔施工质量控制

钻孔质量是灌浆效果的基础,需从孔径、孔深、孔斜、孔壁质量等多方面严格控制,确保符合设计要求。施工中严控钻孔孔径、孔深、孔斜精度,大直径钻孔依地质条件灵活调整孔径,遇到溶蚀风化带等复杂地质,及时调整钻头类型与钻孔参数。采用专用钻头与膨润土泥浆护壁工艺,防止孔壁坍塌、缩径、偏斜等问题,确保孔壁规整。钻进时实时监测循环液密度、孔口回浆状态,及时发现并处理钻孔异常,避免质量不达标影响后续灌浆。终孔前核查钻孔深度是否达标,确保钻孔通畅、孔壁规整,为灌浆浆液均匀扩散、充分胶结提供良好条件,从源头保障灌浆质量。

4.2 灌浆压力与浆液浓度控制

灌浆压力与浆液浓度是影响灌浆质量的核心参数,需实行动态协同管控,依施工工艺、地质条件分段设定,确保匹配合理。灌浆压力设定兼顾浆液渗透填充效果与岩体结构安全,保证浆液充分渗透至孔隙、裂隙,同时避免压力过大破坏岩体结构,引发新隐患。浆液浓度遵循由稀到浓调整原则,结合灌浆注入量、灌注压力实时变化优化调整,溶洞、裂隙发育密集区域,适当提高浓度,防止浆液流失,确保充分填充缝隙。实时监测浆液流动性、胶结强度,确保胶结后形成致密固体,满足水利水电工程防渗、补强的力学要求,保障灌浆加固效果。

4.3 特殊工况施工控制

水利水电工程灌浆施工中,岩溶、地下水流动、大注入量等特殊工况频发,需针对性调整施工参数与工艺,确保施工质量达标。岩溶工况按溶洞大小分级选用对应浆液与灌注方式,小型溶洞用黏土水泥膏浆灌注,大型溶洞采用水泥砂浆与水泥膏浆交替灌注,确保填充充实。地下水流动工况,在浆液中添加速凝剂等外加剂,加快凝固速度,防止被地下水冲刷流失。灌浆注入量过大难以结束,采用限流、浓浆、间歇灌浆方式,等待压力恢复正常,问题未解决则及时调整浆液类型。施工全程监测注浆量、压力、浆液扩散范围,及时处理冒浆、漏浆、卡钻等突发问题,保证特殊工况下灌浆施工连续、高效、达标。

4.4 封孔与成品保护控制

封孔与成品保护是灌浆施工的最后一道关键工序,直接影响灌浆段长期稳定性,需严格执行相关规范,杜绝质量隐患。灌浆结束后执行封孔工艺,用高压风机清理孔口浮浆和污水,确保孔口清洁,再用水泥砂浆填塞压实,实行全面封孔法,确保孔口无空隙、不渗漏。封孔完成后做好成品保护,避免外力扰动、水体侵蚀影响浆液固结,严禁在封孔部位进行重型作业、碰撞等操作。定期检查封孔部位完整性,及时处理封孔缺陷,保障灌浆段长期稳定发挥防渗、补强作用,提升水利水电工程整体耐久性与安全性。

5 结语

灌浆施工技术在水利水电工程中具有不可替代的作用,应用贯穿工程防渗、稳定、补强等多个关键环节,直接决定工程整体施工质量与长期运行安全性。合理选择应用场景、适配灌浆工艺,严格落实施工组织准备要求,强化钻孔、灌浆参数、特殊工况及封孔保护等各环节质量控制,可有效解决复杂地质条件下

的工程隐患,提升地基与结构的稳定性、防渗性。未来,结合水利水电工程向高难度、复杂地质区域发展的趋势,进一步优化灌浆工艺与施工技术,完善质量

控制体系,推动灌浆施工技术向高效化、精细化方向发展,为水利水电工程高质量建设提供更有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 许智浩.水利水电工程中的灌浆施工技术运用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(35):190-192.
- [2] 李黎临,唐新平.水利水电工程中灌浆施工技术的运用[J].价值工程,2025,44(36):14-16.
- [3] 肖飞.水利水电工程帷幕灌浆施工质量控制技术[J].全面腐蚀控制,2025,39(11):276-279.
- [4] 张玉建.基础灌浆施工技术在水利工程中的应用探究[J].科技资讯,2025,23(21):129-131.
- [5] 谭泽浩.灌浆施工技术在水利水电工程施工中的应用研究[J].水上安全,2025,(20):184-186.