

水利水电建筑工程中防渗墙施工技术的优化策略

罗会芳 朱勇峰

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

摘要：防渗墙是水利水电建筑工程中控制渗流、保障结构安全的关键措施，其施工质量直接关系到工程长期运行的稳定性与耐久性。本文立足于水利水电工程复杂的施工条件，系统梳理了混凝土防渗墙、高压喷射灌浆防渗墙及水泥土搅拌桩防渗墙等主流技术的适用特点与技术要点，深入分析施工中面临的复杂地层适应性、接头连接可靠性、槽壁稳定性及水下混凝土浇筑质量等核心难点。在此基础上，从施工工艺参数优化、材料配合比改良、接头处理技术改进、施工过程智能监控及绿色施工等方面提出系统化的技术优化策略，并探讨不同工程条件下的技术选择原则。研究认为，防渗墙施工技术的优化应遵循“地质匹配、工艺可靠、质量可控”的基本原则，通过技术间的协同互补实现防渗体系的整体效能提升。

关键词：水利水电工程；防渗墙；施工技术；技术优化

引言

水利水电工程长期受水压及渗透力作用，渗流控制关乎安全。防渗墙作为垂直防渗核心手段，广泛应用于坝基、围堰及堤防等领域。其技术历经开挖回填、泥浆护壁至高压喷射灌浆等演进。然而，防渗墙属隐蔽工程，质量形成于深层土体，缺陷难发现且修补困难。实际工程中，因墙体开叉、夹泥、断桩及接头渗漏等质量问题引发的事故时有发生，轻损效益，重危安全。问题成因主要在于复杂地质条件对施工技术的适应性挑战，以及施工工艺控制精细化程度不足。因此，提升防渗墙施工质量与工艺控制水平，对于保障水利工程长效安全运行至关重要，需针对地质难点强化全过程精细化管理。

1 防渗墙施工技术的主要类型与技术要点

1.1 混凝土防渗墙施工技术

混凝土防渗墙（也称地下连续墙）是水利水电工程中应用最广泛的垂直防渗技术，适用于深度较大（可达数十米至百米以上）、防渗要求较高的工程。其基本施工流程包括：导向槽开挖与铺设、槽段划分与成槽施工、泥浆护壁、钢筋笼（或型钢）吊装、水下混凝土浇筑及墙段接头处理。在施工技术层面，成槽是最关键的工序，常用的成槽方法包括冲击钻成槽、抓斗成槽和铣槽机成槽。冲击钻适用于卵石层和基岩地层，施工速度慢但适应性强；抓斗成槽速度快，适用于土层和砂层；铣槽机效率高、精度好，适用于较均匀的地层，但设备昂贵。泥浆护壁的质量直接影响槽壁稳定性，泥浆的密度、粘度、失水量和含砂量需根据地层特性动态调整。水下混凝土浇筑采用导管法，要求导管理深保持在1~3

米，连续浇筑、一气呵成，任何中断都可能形成冷缝或夹泥层。

1.2 高压喷射灌浆防渗墙技术

高压喷射灌浆防渗墙是利用高压射流对地层进行切割扰动，同时注入水泥浆液，使浆液与被切割的土颗粒混合凝固，形成具有一定厚度和强度的固结体。根据喷射介质的不同，分为单管法（高压浆液）、二管法（高压浆液+压缩空气）和三管法（高压水+压缩空气+浆液），三管法形成的桩径最大、质量最好。高喷防渗墙的施工参数主要包括：喷射压力（一般20~40MPa）、旋转速度（一般10~20r/min）、提升速度（一般5~20cm/min）和浆液水灰比（一般0.8~1.5）。在施工中，需根据地层条件实时调整参数组合——砂层中应适当降低旋转速度以保证桩径，卵石层中需加大喷射压力并采用复喷工艺。高喷防渗墙的厚度一般较薄（15~40cm），对浆液与地层颗粒的混合均匀性和凝结质量要求较高，孔位偏差和钻孔垂直度偏差的累积可能使墙体出现“开叉”和“缩颈”现象。

1.3 水泥土搅拌桩防渗墙技术

水泥土搅拌桩防渗墙（深层搅拌法）利用特制的搅拌机械，在土层中边钻进边注入水泥浆，通过搅拌翼的强制搅拌使水泥浆与土体充分混合，形成连续的水泥土墙体。该技术适用于软土层（粘性土、粉土、砂土），成墙深度一般不超过20米，墙厚15~30厘米^[1]。水泥土搅拌桩防渗墙的关键技术参数包括：搅拌头的旋转速度、提升速度、水泥掺入比（一般12%~20%）及水灰比（一般0.5~1.0）。为保证墙体的连续性和均匀性，相

邻桩体之间必须有可靠的搭接（搭接宽度一般不小于20厘米），并采取套打或接打工艺。该技术的经济性好、施工速度快，防渗系数一般可达 10^{-6} ~ 10^{-7} cm/s量级，但其对地层的适应性较窄，在硬土层、砾石层中施工困难，强度增长相对较慢。

2 防渗墙施工中的关键技术难点分析

2.1 复杂地层的适应性难题

水利水电工程的防渗墙施工地质条件往往十分复杂，覆盖层中可能交替分布着粘性土、砂层、砂卵石层、漂石甚至孤石。在砂卵石层中成槽，槽壁极易坍塌，泥浆漏失量大；在漂石层和基岩中，冲击钻成槽进尺缓慢，钻头磨损严重，槽孔垂直度难以控制；在软硬互层中，钻头偏斜问题突出，造成槽壁不平整甚至局部“开叉”。高喷灌浆在砂层中成桩效果良好，但在卵石层中射流能量衰减快，切割范围有限，浆液与粗颗粒的混合均匀性差。搅拌桩在软土中适用，但遇到硬夹层时搅拌头无法穿越。地层条件的多样性使任何一种技术都难以“通吃”，施工方案的选择需要建立在充分的地质勘察和现场工艺试验基础上。

2.2 墙段接头处理的可靠性问题

混凝土防渗墙的分段施工决定了墙段之间必然存在施工接头。接头是防渗墙体系中抗渗性能最薄弱的环节，也是渗漏事故的高发区。常见的接头形式包括钻凿法（一序槽浇筑后钻凿接头孔）、接头管法和接头箱法等。钻凿法的接头面往往不平整，存在泥皮和软弱夹层；接头管法的关键是在接头管起拔后形成半圆形的接头槽，但起拔时机把控困难——过早则混凝土未初凝导致坍塌，过晚则接头管被凝固的混凝土抱死^[2]。高压喷射灌浆的桩与桩之间采用搭接形成连续墙，若孔位偏差控制不当或喷射参数不稳定，搭接宽度不足甚至出现“开窗”，即形成集中渗漏通道。接头处理的可靠性是防渗墙施工质量控制的核心命题。

2.3 槽壁稳定性控制与坍塌预防

在松散地层和地下水位高的条件下施工，槽壁稳定性是成槽施工的最大风险。槽壁坍塌不仅造成混凝土超灌、墙体夹泥，严重时可能引发邻近建筑物沉降甚至人身安全事故。泥浆护壁是维持槽壁稳定的主要手段，但其效果取决于泥浆性能与地层条件的匹配程度——泥浆密度不足时护壁力不够，密度过大则增加成本且影响混凝土置换效果。地下水的渗流方向和水位变化对槽壁稳定性也有显著影响，承压水层中成槽时，地下水向槽内渗流可能引发槽底涌水。此外，槽段长度过大、成槽时间过长、地面荷载过重、施工机械振动等因素都会增加

槽壁失稳的风险。

2.4 水下混凝土浇筑的质量缺陷

水下混凝土浇筑是防渗墙施工的最后一道关键工序，也是质量问题隐蔽性最强的环节。导管堵塞是最常见的故障——初灌时隔水塞卡管、混凝土离析造成骨料堆积、导管埋深过大导致混凝土流动阻力增加等。混凝土灌注过程中，若导管提升速度过快，导管底端脱离混凝土面，泥浆涌入导管内形成“断桩”；若导管埋深过浅，混凝土在导管外壁与槽壁间被泥浆稀释，形成“夹泥层”。更为隐蔽的是，混凝土浇筑到墙顶时，浮浆层和沉淀层的混入会降低顶部混凝土的强度和抗渗性能。这些缺陷在成墙后的常规检测中往往难以被发现，却可能在工程运行后逐渐显现为渗漏点。

3 防渗墙施工技术的优化策略

3.1 施工工艺参数的精细化优化

针对不同地质条件和工程要求，施工工艺参数不应采用“通用值”，而应通过现场工艺试验确定最优参数组合。在混凝土防渗墙成槽中，应根据地层变化动态调整钻进速度、泥浆密度和粘度——在砂层中适度提高泥浆密度以增强护壁能力，在岩层中控制钻进速度以保证孔斜度。在高喷灌浆中，通过现场喷射试验确定不同地层的合理喷射压力、旋转速度和提升速度组合，并在地层变化处分段调整，而非全孔采用统一参数。在搅拌桩施工中，根据土层的天然含水率和有机质含量调整水泥掺入比和水灰比，确保墙体强度的均匀性。参数优化的核心是“因层施策、动态调整”——将整墙施工分解为若干地质单元，对每个单元分别制定针对性的参数方案，并在施工过程中根据返浆情况和钻进阻力实时微调。

3.2 墙体材料的配合比改良

配合比改良是提升防渗墙抗渗性能和耐久性的重要途径。在混凝土防渗墙中，可掺入膨润土或粉煤灰改善混凝土的和易性和抗渗性，同时降低水化热、减少收缩裂缝。对于地下水位较高且具有侵蚀性水质的工程，应使用抗硫酸盐水泥或在混凝土中添加阻锈剂和抗渗剂^[3]。在高喷灌浆中，可在纯水泥浆中加入适量膨润土改善浆液的悬浮稳定性和可灌性；在动水条件下，可掺入速凝剂缩短浆液的初凝时间，减少浆液被水流稀释和冲蚀的程度。配合比优化的目标是在满足设计强度和抗渗指标的前提下，最大限度地提升施工可操作性和长期耐久性，避免片面追求强度而牺牲流动性和抗裂性。

3.3 接头处理技术的改进

接头处理是防渗墙技术优化的重点方向。在混凝土防渗墙中，应优先采用接头管法取代传统的钻凿法，以

形成光滑、规则的接头面，提高接缝的抗渗性能。接头管起拔须建立“初凝时间判定+起拔阻力监测”的双控机制——在混凝土初凝后进行试拔，起拔阻力控制在安全范围内方可正式起拔，避免过早或过晚。对于深墙和重要工程，可在接头处设置两道止水铜片或橡胶止水带，形成多道防线的冗余防渗体系。在高喷防渗墙中，通过采用“双排孔”或“交错布孔”的方式，以“品”字形布孔增加相邻桩体的搭接宽度，并对接头部位进行“二次复喷”——在相邻桩体施工完成后，在接头位置进行补喷加固，确保搭接带的质量可靠性。

3.4 施工过程智能化监控技术

借助现代传感和信息技术，将防渗墙施工从“经验判断”向“数据驱动”转变，是提升质量控制水平的有效手段。在成槽过程中，安装槽壁垂直度实时监测系统，利用测斜仪或激光测距仪持续监测槽孔的偏斜情况，当偏斜量接近允许偏差值时自动报警，引导操作人员及时纠偏。在混凝土浇筑中，采用导管内混凝土面高度监测仪，实时测量混凝土面的上升高度和导管埋深，避免因人工测绳测量不及时或读数误差造成的断桩和夹泥^[4]。在高压喷射灌浆中，安装喷浆参数自动记录仪，实时记录并保存每孔的喷射压力、流量、旋转速度和提升速度，形成完整的施工电子档案。这些数据的积累和回溯，既为质量验收提供依据，也为后续类似工程的参数优化提供参考。

3.5 绿色施工与质量验收体系的完善

防渗墙施工中的泥浆处理和粉尘控制是绿色施工的重点。应建立泥浆循环净化系统，对废弃泥浆进行脱水处理，实现泥浆的减量化和无害化处置。在搅拌桩和高喷灌浆施工现场，设置水泥浆防溅罩和回收槽，减少浆液对周边土壤和水体的污染。在质量验收方面，应完善“施工过程记录—墙体取芯检验—压水试验验证—长期监测反馈”的四级检验体系：施工过程记录确保每道工序均有据可查；取芯检验验证墙体的均匀性和强度；压水试验检验墙体的整体抗渗性能；长期渗流监测数据则持续验证防渗效果，为工程运行期的安全评估提供依据。

4 不同工况条件下的技术优化选择

防渗墙施工技术的优化核心在于依据地质匹配原

则，针对不同工况选择最适宜的技术方案或组合。在深厚覆盖层（深度>40m）中，宜采用抓斗与冲击钻配合的“两钻一抓”工艺，辅以预爆处理孤石，兼顾效率与硬地层穿透力。狭窄河谷及场地受限条件下，优先选用高喷灌浆或搅拌桩，因其设备占地小、移动灵活。工期紧迫时，高喷灌浆速度可达混凝土墙的2~3倍，但需评估抗渗稳定性。对于渗透系数要求极高（ $<10^{-7}\text{cm/s}$ ）且墙体较深的工程，混凝土防渗墙为首选，应嵌入相对不透水层形成底部封闭。复杂地层交替分布时，可采用“上搅下喷”或“上墙下喷”组合技术，发挥各工艺对不同地层的适应性优势。总之，必须充分掌握地质条件，进行技术经济综合比选，既不盲目追求高技术投入，也不片面强调经济性而牺牲防渗可靠性，以实现安全、经济与效率的最佳平衡。

结束语

防渗墙施工优化是水利水电渗流控制的关键课题。本文梳理了混凝土、高喷及水泥土搅拌桩三类主流技术，剖析了复杂地层适应、接头连接、槽壁稳定及水下浇筑等难点，并提出涵盖参数优化、材料改良、接头改进、智能监控及绿色施工的系统化策略。鉴于防渗墙属隐蔽工程，质量缺陷后果严重，优化核心必须紧扣“可靠性”，严禁以牺牲长效安全为代价换取速度或成本优势。在具体实践中，技术优化不应局限于施工阶段，而应贯穿地质勘察、方案论证、工艺试验、施工实施、质量检测至运行监测的全生命周期。通过全过程管控，确保防渗墙真正成为保障水利水电工程安全运行的坚实屏障，实现工程长期稳定与安全效益的最大化。

参考文献

- [1]高钟璞,王磊,李明.水利水电工程防渗墙施工技术现状与发展趋势[J].水利水电技术,2022,53(7):78-85.
- [2]张建伟,陈思,赵岩.复杂地层条件下混凝土防渗墙成槽质量控制关键技术[J].岩土工程学报,2023,45(增刊1):156-162.
- [3]刘浩,孙涛,周明.高压喷射灌浆防渗墙施工参数优化与质量检测研究[J].水利水运工程学报,2024(1):89-97.
- [4]王平,张华,杨帆.水泥土搅拌桩防渗墙在软基处理中的应用与质量控制[J].岩土力学,2023,44(增刊2):345-352.