

灌浆完成后应进行防渗验收试验,包括帷幕内渗透系数测定(目标值 typically $\leq 1 \times 10^{-6} \text{m/s}$)、水头试验及平面测厚检查,验收前宜实施试压至设计承压水平,确认无漏浆、无回流现象及透水率达标后方可验收。

4.4 控制性灌浆技术

控制性灌浆技术在水利工程防渗处理中以参数精控与反馈闭环为核心。在前期配比试验阶段,应依据坝基或隧洞地质结构、裂隙发育情况及设计渗水量指标,在实验室开展水泥浆配合比优化,包括水胶比、掺量(如矿物掺合料、活化剂)与流变特性测试,同时在现场进行试配验证渗透半径、抗渗系数与固结密实度,以形成与现场地层匹配的灌浆配方,并在施工方案中明确浆液初期流动性、凝结时间、膨胀率等参数;在钻孔及布孔控制阶段,应依照设计布孔间距、孔深、孔倾角进行分序钻孔,通常先布一序孔、待其灌注完成并监测压力反应后,再开展二序孔,孔孔应配套钻进清洗、吹孔及压水试验,钻孔孔壁应保持整洁、无坍塌、无淤积,清洗采用反复冲洗与压缩空气吹除以确保孔内粉尘及杂物清除,以保证灌浆浆液能够进入裂隙或孔隙系统;在注浆施工控制阶段,应设置多级压力-流量-时间控制流程,执行“由低到高、分段提升”注浆压力策略:初始阶段以较低压力注入浆液,观察返浆量、压力反弹情况、管口响应状况,当监测表明孔内通道基本填充、压力反弹明显、返浆量下降至设计返浆率以下时,再提升至次级压力直至设计压力上限。同期记录各阶段注浆量、返浆量、压力-时间曲线、流量-时间曲线、浆液渗入距离及孔口响应,施工监测系统应实时采集上述数据,并将其与设计曲线进行比对,若某孔位监测指标未达到设计标准(如返浆率偏高、压力反弹迟缓、渗入距离不足)则启动补注或调整措施;在补救与质量闭环阶段,若监测数据显示某灌孔效果不达标,则在施工图设计

允许范围内增设旁孔或加密孔位,或调整浆液配方(例如降低水胶比、改变活化剂掺量以改善流变性能)、或缩小孔间距以增强扩散覆盖范围^[5]。灌浆结束后,应开展防渗效果评定:采用漏水观测、压水抽样、渗漏通道探测等方式,选取典型断面进行渗透系数检测、水头降落速率测定、返水率分析,依据检测结果决定是否补灌或封孔;封孔之前务必确认所有孔位达标,并按照规定采用高浓浆或干硬性水泥浆封堵孔口,封孔操作应控制水胶比、加入适当膨胀剂或止水剂以提高密实性。

5 结语

综上所述,在水利工程建设过程中,水泥灌浆防渗处理技术被广泛应用于工程渗漏的处理。本文从水利工程实际出发,对水泥灌浆防渗处理施工技术进行了系统阐述,分别在技术内涵、应用必要性及关键的4项施工技术路径方面作出细致分析。以上四项施工技术均为水利工程中常见且具备实施经验的防渗措施,希望通过本文探究能够为相关工程技术人员提供系统化的参考。

参考文献

- [1] 杨俊峰.水泥灌浆防渗处理施工技术在水利工程中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023.
- [2] 王继福.灌浆技术在水利水电工程施工中的应用[J].水利科学与寒区工程,2023,6(2):92-94.
- [3] 吴周.水利水电工程中的帷幕灌浆施工技术[J].科学技术创新,2025(17).
- [4] 王震金.灌浆技术在水利工程基础处理中的应用研究[J].水利电力技术与应用,2025(14).
- [5] 王明玉.水利水电工程施工灌浆施工技术的应用研究[J].房地产导刊,2024(4).

Application of adaptive intelligent grouting system in seepage control engineering of hydropower station

Qiang Deng

China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

In the context of the intelligent and smart transformation in the engineering construction field, hydropower station seepage control projects have raised higher demands for precise perception and intelligent regulation during construction processes. However, current traditional grouting technologies, constrained by their reliance on manual experience and low automation levels, urgently require improvements in efficiency and control accuracy. The emergence of adaptive intelligent grouting systems provides a new technical approach for hydropower station seepage control in complex rock mass environments, featuring perceptible, adjustable, and feedback mechanisms. Based on this perspective, this paper analyzes the technical framework and functional architecture of adaptive intelligent grouting systems using Yangfangou Hydropower Station as a case study. It then examines the specific implementation pathways of these systems in seepage control projects, including key modules such as real-time drilling perception, production-transmission-distribution-grouting integration, and evaluates their application effectiveness. This research aims to provide valuable references for the promotion and application of such systems.

Keywords

adaptive intelligent grouting system; Yangfangou hydropower station; seepage control engineering; application; discussion

自适应智能灌浆系统在水电站渗控工程中的应用探讨

邓强

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 611130

摘要

在工程建设领域向智能化、智慧化转型的背景下,水电站渗控工程对施工过程的精确感知与智能调控提出了更高需求。然而,现行传统灌浆技术因其依赖人工经验、自动化程度低等固有局限,其效能与控制精度亟待提升。而自适应智能灌浆系统的诞生则给水电站渗控工程建设在面对复杂岩体渗控提供了可感知、可调节、可反馈的全新技术路径。有鉴于此,下文基于技术视角并以杨房沟水电站为例,首先就自适应智能灌浆系统的构成与功能框架展开论述,随后具体剖析其在杨房沟水电站渗控工程中的具体实施路径,包括随钻感知、制-输-配-灌关键技术模块,并探讨其应用成效,以期通过本文研究为该系统的推广应用提供一定参考。

关键词

自适应智能灌浆系统; 杨房沟水电站; 渗控工程; 应用; 探讨

1 引言

杨房沟水电站作为国内首个百万千瓦级 EPC 水电项目,率先开始了大型水电工程 EPC 建设管理的探索与实践,为新常态下水电市场转型升级提供新的发展思路。该项目从 2017 年开始,渗控工程自适应智能灌浆系统在杨房沟水电站坝基固结灌浆、大坝帷幕灌浆、大坝接缝灌浆进行了试验研究及优化升级,于 2018 年底开始全面推广应用,并持续提升取得了良好的效果。对此,文章将基于杨房沟水电站为例探讨自适应智能灌浆系统在其渗控工程中的应用,以供

参考。

2 自适应智能灌浆系统概述

自适应智能灌浆系统是指以自动化装备、数字化监测及模型预测控制为核心,通过实时数据采集、智能调控及闭环反馈机制,动态调节灌浆作业参数,以实现结构渗控性能优化的综合系统^[1]。该系统在水电站工程实践中通常包括随钻感知模块、制-输-配-灌一体化设备及灌浆控制平台,形成“感知—决策—执行—反馈”的技术链条。以杨房沟水电站工程为例,该系统经由版本迭代自 V1.0 至 V5.0,在精确配浆、移动便利化、一键启动、模块化维护等方面逐步完善,当前可实现一体化制浆、二阶段鲁棒优化调度、自动提示流程切换等功能。系统中,卧式散装水泥罐制浆与多

【作者简介】邓强(1984-),男,中国四川渠县人,高级工程师,从事水利水电基础处理工程施工及管理工作。

联输浆+冲洗装置协调运行,确保一次制浆量、浆液浓度、注入流量满足严格控制。配浆阶段可将浆液密度偏差控制在 0.01 g/cm^3 范围内,并在异常时自动提示并启动备用系统。灌浆控制模块采用数值模拟与深度学习预测技术,结合P-t、Q-t、 ρ -t多曲线可视化与专家决策支持,实现灌注压力、流量、密度的联动控制。智能检测环节实现灌后检查孔靶向推荐、压水与岩芯图像识别“三率”评价、自动生成电子档案。整个系统在水电站渗控工程中与现场工况、地质、施工参数高度耦合,形成工程化运行机制。

3 自适应智能灌浆系统在水电站渗控工程中的应用

3.1 随钻感知技术应用

在杨房沟水电站渗控工程的智能化建设中,随钻感知技术通过构建全过程、多参数的地质信息实时采集与反馈机制,显著提升了渗控工程的精细化施工水平。随钻感知系统依托多源传感器融合技术,实现了钻孔过程中岩体力学响应的实时捕获与解析。系统通过布设于钻具组群的传感网络,对钻进速度、轴压、扭矩、振动频率等关键参数进行采样,并建立参数序列与岩体特性的映射关系。当钻遇断层破碎带或裂隙发育区时,系统通过模式识别算法自动捕捉钻速突增、扭矩波动等异常信号,实现不良地质体的原位识别。这一突破性技术将传统的事后岩芯编录转变为过程化、实时化的地质信息获取,为后续灌浆决策提供了动态数据支撑。基于随钻感知的地质自适应调控是系统的另一大技术特色。通过开发钻进参数-地质属性的智能反演模型,系统能够根据实时感知数据动态重构孔周地质剖面。当识别到软弱夹层或岩体破碎区时,系统自动调整钻进参数并触发灌浆策略优化模块,实现“地质感知-参数优化-精准灌浆”的闭环控制。该机制有效解决了传统灌浆工艺中因地质条件不明导致的浆液浪费、灌浆不足等问题。在质量管控方面,随钻感知数据为工程质量追溯提供了完整的数据链条^[2]。

3.2 制输浆精准控制技术应用

在杨房沟水电站渗控工程的智能化建设中,制输浆精准控制技术通过多层次自动化装备与智能算法实现浆液制备、输送及动态调度的全过程精控。传统灌浆施工中的制浆环节普遍采用袋装水泥与人工拌制模式。该模式高度依赖操作人员的经验:浆液的水灰比由人工估算投料量进行控制,拌制完成后需现场测量浆液密度,并通过反复添加水或水泥进行经验性调整,以达到设计浓度。此种方式存在显著弊端:人力资源投入大(每台制浆机需配置3-4人),劳动强度高(涉及水泥搬运、拆包、投料等重体力劳动),且生产效率低下(单次制浆量通常仅为150升,耗时约10分钟),浆液浓度稳定性也难以保证。在输浆环节,传统方法依赖于储浆桶与输浆泵的组合,由人工操作。接到供浆指令后,操作人员需手动连接管路、启动泵机,并通过观测储浆桶液面高度或估算输浆时间来判断输浆量,每班需配备2名输浆人员。该方法

不仅劳动强度大,更存在计量精度差、响应滞后等问题。制输浆精准控制技术由卧式智能制浆系统与智能输浆系统构成,其核心创新在于实现了从浆液配制到管道输送的全过程自动化与智能化控制。智能制浆系统的核心是集成了《一种卧式散装水泥罐集成一体式自动制浆装置》。该系统通过高精度传感器与自动控制系统,实现了散装水泥、外加剂与水的自动称量与精准投料,并由高速搅拌机确保浆液均匀性。在线密度计实时监测浆液状态,并通过反馈控制系统动态微调水灰比,确保浆液密度偏差稳定控制在 $\pm 0.01\text{ g/cm}^3$ 以内。该技术彻底改变了传统作业模式,将单次制浆能力提升至1000升,制浆周期缩短至3分钟,并将每班制浆人员配置减少至1人,在效率、精度与人力成本上实现了跨越式提升。智能输浆系统则基于灌浆过程的时序预测,构建了智能调度与分配机制。系统主界面实时显示各灌浆机组的名称、所需水灰比、需浆量及送浆状态。当某机组提出需浆请求时,系统并非被动响应,而是利用二阶段鲁棒优化算法,结合当前管网压力、流量及各机组任务优先级,对输浆路径进行动态规划与智能调度。其核心设备《一种多联输浆和冲洗装置》实现了多条管路的高效切换与按需精准供浆。这一智能化输浆模式,颠覆了传统依赖人工沟通与手动操作的低效流程,实现了浆液资源的合理化分配与高效输送,有效避免了管路沉积与浆液浪费,每班仅需1名操作人员即可完成全部输浆任务的监控与调度^[3]。

该技术的成功应用,实现了制浆速度快、配比精度高、浆液损耗低、输送效率佳的显著成效。该技术不仅是单一环节的自动化改造,更是通过系统性集成与智能算法,构建了一个响应迅速、控制精准、资源优化的浆液制备与供应体系,为自适应智能灌浆的最终实现提供了可靠的浆液保障,是推动灌浆工程迈向智能化的重要技术支撑。

3.3 配浆精准控制技术应用

在杨房沟水电站渗控工程的智能化建设中,配浆精准控制技术通过智能控制算法与多参数感知系统的深度融合,实现了浆液配制过程的自适应动态调控。传统灌浆施工的配浆作业主要依赖人工操作,配浆人员需根据灌浆所需水灰比估算浓浆需求量,通过人工操作完成从上桶添加浓浆至下桶,再在下桶添加水的配制过程。这种方式完全依靠操作人员的经验判断或使用比重秤进行浆液浓度检测,存在人员劳动强度高、计量不准确、浆液密度偏差大、配制量控制不当造成浪费等问题。每个灌浆站通常需要配置1名专职配浆人员,且配浆质量受人为因素影响较大。配浆精准控制技术由智能制浆装置和自动控制系统构成完整的技术体系。系统通过液位传感器实时监测灌浆桶液位状态,当检测到液位低于 $1/3$ 阈值时自动触发“配浆/配水”指令。创新研发的“浆液密度测量装置”实现了浆液密度的实时精准监测,结合智能反馈控制机制,确保每次配制的80L浆液密度偏差严格控制在 $\pm 0.01\text{ g/cm}^3$ 范围内。系统采用模块化设计,每次配浆完成后自动切换至清洗状态,确保了配浆过程的连续性与