

# 水利工程防渗处理中帷幕灌浆施工策略与实践探讨

高鹏

贵州水利实业有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8863

**[摘要]** 水利枢纽工程长期处于复杂的水环境中,其坝基库岸渗透控制直接影响工程安全运营和效益。渗漏问题不仅会导致水量的流失,而且可能引发渗透变形和异常扬压力等工程安全隐患,给结构稳定带来隐患。帷幕注浆是一种重要的防渗措施,它能在地层内形成连续的阻水幕,有效截断渗流路径,减小渗透系数,在各种岩土介质中具有广泛的应用前景。因此,系统梳理帷幕注浆施工关键环节和技术关键点,探寻适应复杂地质条件的控制策略优化方向,对提高水利水电工程防渗可靠性和长期耐久性具有重要现实意义。

**[关键词]** 水利工程; 防渗处理; 帷幕灌浆施工

## Strategies and Practical Approaches for Curtain Grouting in Seepage Control of Water Conservancy Projects

Gao Peng

Guizhou Water Resources Industry Co., Ltd.

**[Abstract]** Water conservancy projects are consistently exposed to complex hydrological environments, where seepage control at dam foundations and reservoir shores directly impacts operational safety and project efficiency. Seepage issues not only lead to water loss but may also trigger structural hazards such as deformation and abnormal uplift pressures, posing risks to structural stability. Curtain grouting serves as a critical seepage prevention measure by forming continuous water barriers within geological formations, effectively intercepting seepage pathways and reducing permeability coefficients. This technique demonstrates broad applicability across diverse geotechnical media. Systematically analyzing key construction phases and technical parameters of curtain grouting, while exploring optimized control strategies for complex geological conditions, holds significant practical value for enhancing the reliability and long-term durability of hydraulic engineering structures.

**[Key words]** hydraulic engineering; seepage prevention treatment; curtain grouting construction

渗流控制是水利水电工程设计和管理的基礎问题,是水文地质、岩土力学和材料学科交叉的基础问题。大坝基岩体非均质性和各向异性特征决定其防渗处理必须兼顾技术和经济上的合理性,在方案比选和参数确定过程中谨慎决策。帷幕注浆技术具有地层适应能力强的优点,可以通过调整注浆比例、注浆压力和施工工艺,在具有不同渗透性的岩土体中形成有效的防渗体。因此,从系统视角审视帷幕注浆施工工艺要素,强化过程控制和效果评估科学性,推进施工策略由粗放式向精细化转变,是提高防渗工程可靠度的重要途径。

### 一、水利工程防渗处理中帷幕灌浆施工作用

#### (一) 构建防渗屏障阻隔渗水通道

水利水电工程建设过程中,坝体、坝基及周围岩体中普遍存在裂隙、孔隙等自然渗流通道,若不加以有效治理,将继续渗流,不仅影响工程结构的稳定,也造成水资源的浪费。帷幕

注浆是将注浆注入岩体的裂隙和孔隙中,经固化后形成致密的注浆帷幕,填满各种渗透通道,阻断渗透通道,达到有效截污地下水的目的<sup>[1]</sup>。该防渗隔墙可以有效地减少渗流量,减小渗流对建筑物的冲刷和冲刷,是水利工程安全稳定运行的第一道防线。同时,帷幕注浆形成整体性强、连续性好的防渗体系,能够覆盖工程关键部位,保证防渗效果的一致性和稳定性,消除因局部渗漏引起的工程安全隐患,保证水利工程的长期安全运行。

#### (二) 提升岩体强度增强结构稳定性

帷幕注浆不仅可以达到防渗作用,而且可以有效地提高坝体及其周围岩体的强度和完整性,提高水工建筑物的稳定性。水利水电工程坝基-周围岩体常受风化、裂隙发育等影响,岩体强度不足,在水压作用下易发生变形坍塌,严重威胁工程安全。帷幕注浆时,注浆渗入岩体的裂隙、孔隙,与岩体颗粒紧

密结合，固化后形成牢固的胶结体，使分散的岩石颗粒成为整体，有效填充岩体缺陷，提高岩体抗压、抗剪强度和整体性。此外，灌浆注浆固化后可与工程结构紧密结合，加强岩体与坝体的结合，减小结构间的间隙，进一步提高工程结构的承载力和抗变形能力，保证水利工程结构的长期稳定性。

### (三) 降低渗流压力保护工程结构

水利水电工程运行过程中，地下水对坝体和坝基等结构物产生一定的渗透压力，导致坝体和坝基等结构物产生裂缝和位移，严重时还会发生管涌、土涌等重大工程事故。帷幕注浆构筑的防渗隔墙能够有效地拦截、降低渗流量，减缓渗流速率，从而降低渗透压力，使渗透压力控制在设计允许的范围之内<sup>[2]</sup>。合理布置注浆帷幕，可以实现渗透压力均匀分布，避免因局部渗透压力过大而导致结构性破坏，保护坝体和坝基等核心结构物免受渗透侵蚀。同时，降低渗透压力也可降低工程结构物的冲刷，降低结构的磨损和老化，延长水利工程的使用寿命，保证其长期稳定的防洪、灌溉和供水功能。

### (四) 弥补工程缺陷完善防渗体系

在水利工程建设中，由于复杂的地质条件和不合理的施工技术，可能造成不完善的防渗结构和局部渗漏等问题，工程长期运行后，在水流冲刷和岩体变形的共同作用下，原有的防渗系统可能发生破坏或破坏。帷幕注浆是一种柔性、高效的防渗处理方法，可以根据工程中存在的缺陷，对缺陷部位进行填充，修复破损的防渗结构，恢复和提高工程防渗性能。此外，帷幕注浆还可以与其它防渗措施相结合，形成多层次、全方位的防渗体系，弥补单一防渗措施的缺陷，进一步提高水利工程的整体防渗效能，保证工程在复杂的地质条件及长期运营条件下，始终保持良好的防渗性能，避免因渗漏而引起的各种工程风险。

## 二、水利工程防渗处理中帷幕灌浆施工优化策略

### (一) 精准定位钻孔 严控孔斜孔深

在施工前，由专业的测量员根据设计图纸，用全站仪或GPS对注浆孔进行定位放样，用油漆或竹桩将孔位编号清楚地标注出来，测量每一个孔位的高程和坐标，并将其记录下来，保证开孔的位置和设计偏差在10cm以内，然后报监理复核无误后，才能进行钻进作业。钻孔设备以旋转式钻机为主，配以金刚钻或硬质合金钻，孔径按小口径原则，孔径不小于46mm，确保孔壁平整。钻孔时要严格执行孔斜测量要求，竖向偏差不得超过1.5%，不同孔深要严格控制允许偏差，每隔10米用测斜仪测量孔内的偏差，超差时立即重钻<sup>[3]</sup>。为防止冲浆破坏坝体，坝体及基岩表面0.5米处采用干式钻进法施工。在钻孔过程中，保存岩芯，做好基岩岩性描述，对回填土的厚度，基岩高程，强风化层的厚度，涌水，漏水，掉块等进行详细的记录。如遇溶洞需停钻0.5米后单独处理，遇塌孔或掉块先注浆再钻，发现集中漏水立即停机查明原因并进行处理。钻孔至设计深度后，用高压风或高压水冲孔，保证孔底沉渣厚度在20cm以内，

临时停止施工时，用塑料塞或棉布将孔口适当封住，以避免污水流入及异物落下。孔深控制采用钢尺分段测量钻进长度，每5米测一次，终孔时孔深偏差控制在±5cm以内，不允许出现超孔和浅孔现象，钻完后经过自检、互检和专检三道工序验收合格后，方能进行下一步施工。在整个过程中，必须有专业人员在旁站监督，保证每个步骤都能满足规范要求，从源头上避免因钻孔质量问题而引起的防渗失败。

### (二) 规范冲洗试验 摸清岩层透水

在注浆之前，先冲洗孔壁，再进行裂隙冲洗，在冲孔之前，把钻杆下到孔底，然后注入0.3-0.5 MPa的高压水，从下往上往复移动钻杆，冲洗孔壁上的泥浆，直到回水变得干净，并且保持5分钟，冲洗水量不低于5 L/min。采用高压水单孔冲洗法，冲洗压力控制在80%以上，不超过1 MPa，对裂隙发育的地层，采用脉冲式冲洗方法，利用压力交替升降来强化冲洗效果，直到回水浊度≤100 mg/L，且保持20分钟以上。冲洗完毕后，对冲洗效果进行检查，用烧杯接回水观察有无明显的岩屑和泥皮，测量孔内沉渣的厚度在20cm以内，并对冲洗时间、压力、回水状况等进行详细的记录<sup>[4]</sup>。压水试验分为灌浆孔筒单压水和检查孔五点法压水，灌浆孔采用单点法进行简易压水试验，检查孔采用三级压力五级五点法压水试验，试段划分遵循自上而下的原则，采用单栓塞分段隔离，常规试段长度为5米，断层裂隙密集区则缩短到2-3米，以保证相邻试段衔接不漏段。试验前应在孔口上安装压力表及流量计，压力表量程是试验最大压力的1.5-2倍，连接后应检查密封情况，防止泄漏影响试验结果。压力控制分为3级(0.3 MPa, 0.6 MPa, 1 MPa)，升压速率不超过0.1 MPa/min，在每级压力稳定后继续升压，每级压力下每1-2分钟观察流量。压入流量的稳定性标准为压力稳定后20分钟，每隔5分钟测量一次流量，连续4次测量最大值和最小值的差值在10%以内且小于1 L/min时，该阶段测试结束，以最后的结果为计算值。

### (三) 科学制备浆液 动态调整配比

在原材料选择方面，水泥应选用P. 042.5耐硫酸盐泥，其比表面积不小于350 m<sup>2</sup>/kg，28天抗压强度≥48 MPa。水泥储存在防雨防潮封闭库棚内，堆高不超过10袋且距地面不小于30cm，不同批次水泥分开堆放并标注，防止受潮变质。施工用水要符合水工混凝土用水的标准，水质要清澈不含杂质，掺入物要根据地质条件选择，膨润土、高效减水剂等要密封贮存，在使用前要进行各项指标的检查。浆液配制采取集中制浆，分区配浆，采用ZJ-400制浆机，在施工前对设备进行调试，保证搅拌叶片连接牢固，计量装置精度误差不超过1%，密封性能好。在配制过程中，严格按照质量称重的方法进行，水泥和掺合料的计量误差不超过±1%，水的计量误差不超过±2%，不允许使用体积估计的方法<sup>[5]</sup>。在配制过程中，先往制浆机中加入一定数量的水，然后开始搅拌，然后再加入水泥，搅拌30秒后，再加外加剂，一般的水泥浆液的搅拌时间至少要大于30

秒,加入外加剂的浆液搅拌时间要适当延长,以保证浆液均匀,不结块。浆液水灰比按 5:1、3:1、2:1、1:1、0.8:1、0.6:1、0.5:1 七个比级设置,开灌水灰比统一为 5:1,现场根据岩层渗透性及吸浆量动态调整配比,遵循先稀后浓的原则逐步改变。当每一级浓度浆液灌注量大于 300 升,或在 1 小时内注浆压力和注入量没有明显变化的情况下,改为浓一级水灰比。当注液量超过 30 L/min 时,可视具体情况进行越级增浓。在压力恒定的情况下,注入率继续降低,或者保持恒定的注入压力继续增加,则维持原水灰比不变。注灰体积大于 500 公斤/米时,掺加 10~15%膨润土及 0.3%减水剂,控制浆液析水率 $\leq 2\%$ ,施工温度控制在 5~30℃,高于 30℃时应采用冰水拌和法,避免浆液温度过高而影响其性能。浆液配制完成后,每隔 30 分钟用比重秤对浆液比重进行测定,不同水灰比浆液按规范范围进行校核,水灰比 1:1 的浆液比重控制在  $1.50\sim 1.55\text{ g/cm}^3$ ,0.5:1 水灰比浆液比重控制在  $1.80\sim 1.85\text{ g/cm}^3$ ,偏离标准时立即调整配比。

#### (四) 精细灌浆施工 严控压力灌注

注浆方法以循环注浆为主,注浆管距孔口底部不能超过 50cm,特殊地质条件下可采用加压注浆,注浆方式视试段长度而定,对于长度小于 6m 的,采用全孔一次性注浆,大于 6 米的采用自上而下分段灌浆。注浆施工严格按照逐级加密的原则进行,三排孔帷幕先灌注下游排孔,再灌注上游排孔,最后灌注中间排孔,每排孔分为二序;两排孔帷幕先灌下游排后灌上游排,每排分为二序或三序;单排孔帷幕分为三序灌浆,通过分序加密确保浆液扩散均匀,帷幕搭接紧密。注浆压力按设计要求进行,孔口暂定压力 0.25 MPa,地层表层注浆压力不低于水头 1~1.5 倍,底部注浆 2~3 倍,施工时应建立注浆速率与最大注浆压力之间的对应关系,避免因压力过大而导致基础举升破坏。注浆采用孔口闭合注浆的方法,并安装智能注浆记录仪,实时监控注浆压力、注入量、配比等参数,形成全过程的数字闭环,保证每个数据的可追溯性<sup>[6]</sup>。对于一些特殊类型的灌浆段,如断层、破碎带和强渗透层,如果灌浆量过大,可以通过定量注浆、间歇复灌或者加入速凝剂来控制注浆区域,定量标准为每 m 段长 1.0 吨水泥,对于接触带灌浆段和断层破碎带灌浆段,在灌浆结束后 48 小时后,才能开始下一段钻孔灌浆。注浆期间应安排专人对压力计及流量计数据进行实时监测,如遇压力突然升高或突然下降、注入速度发生异常变化,应立即停止注浆,查明原因,采取相应的处理措施。每一段试井结束后,要对注浆管线进行清理,防止注浆堵塞,并对注浆压力、注浆速率、注浆比例、注浆时间、注浆时间以及特殊情况的处理等进行了详细的记录,以保证施工记录的实时性、准确性和完整性。

#### (五) 标准化封孔作业 确保帷幕完整

封孔施工是在整个孔段完成并通过验收合格的情况下进行的,严格按照基岩段和坝体段两个阶段的顺序进行,先完成

基岩段的封孔,待水泥浆初凝后再封坝,禁止两段同时封孔或反转封孔顺序。基岩段封孔采用置换加压力注浆封孔法,采用 0.5:1 高浓度水泥浆封孔,封孔前清除孔内积水及杂质,把注浆管下到基岩段底部,用注浆泵压入孔中,利用注浆压力排出孔内原有液体,保证注浆充填基岩段所有空隙。在压力注浆时,控制注浆压力和这一段压力相同,不断地灌注直到孔内溢出浓浆而没有气泡出现,保证了基岩段的浆液充填紧密。在灌注结束后,将灌浆管缓缓提起,并继续补充浆液,以避免管内出现空洞。当灌浆管被提升到基岩段的顶端时,停止灌浆,并将孔口浆液进行封堵,让浆液自然初凝,初凝过程中安排专人巡查,防止孔口浆液流失。大坝段封孔采用泥球封填法,采用经烘干的粒径为 20~30 mm 的合格泥球,保证泥球质地均匀,不含杂质,含水率适中,封填时采取分层填筑、逐层夯实的方法,一次充填厚度控制在 0.3~0.5 米以内,投泥球的速度要放慢,以免投料过快造成中间空洞,影响封填质量。在封堵过程中,套管随孔中泥球上升而缓慢抬升,每投泥球前后都要用钢尺测量孔深,并检查封孔厚度,如有孔深异常或泥球下沉,应及时处理,以避免封堵不实。在充填完一层泥球之后,用重锤锤击几次,以保证泥球层的密实程度,同时保证夯打力均匀,防止因用力过大而导致孔壁塌陷,在封孔过程中,应增加夯打次数,以保证顶部的填密。

#### 结束语

综上所述,在水利水电工程中,帷幕注浆施工方案的优化是保证防渗处理质量的关键。应从地质适应性分析、注浆性能调控和施工管理三个核心问题展开研究,为复杂地质条件下帷幕注浆施工提供技术借鉴。可促进防渗施工由经验判断走向技术理性,提高帷幕的连续性和均一性,提高水利工程的渗流控制能力和长期运行安全性。展望未来,随着检测技术和智能化监测手段的不断进步,注浆施工将实现更精确的地层识别和过程反馈。

#### [参考文献]

- [1]陈济美.帷幕灌浆施工技术在水库大坝除险加固工程的应用研究[J].水上安全,2024,(24):157-159.
  - [2]黄伟声.上坪水库加固中大坝帷幕灌浆施工应用研究[J].水利科技与经济,2024,30(12):84-88+112.
  - [3]王占锋.土坝自坝顶进行帷幕灌浆施工技术研究[J].陕西水利,2024,(12):168-170.
  - [4]张绍莹.岩溶区拱坝坝基灌浆施工关键技术要点[J].中国水运,2023,23(24):116-117.
  - [5]洪海华.基于水下帷幕灌浆技术的水库除险加固方法[J].工程建设,2023,55(12):67-70.
  - [6]李国信.水库大坝防渗帷幕灌浆工程施工工艺研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(34):202-204.
- 作者简介:高鹏(1991—2026),男,贵州省贵阳市人,专科,助理工程师,主要从事水利工程行业。