

# 水库大坝基础灌浆施工工序衔接对防渗效果的影响探讨

刘 宜

杭州华能工程安全科技股份有限公司 浙江 杭州 310000

**【摘要】**：水库大坝作为水利工程的核心枢纽，基础防渗性能直接决定工程运行安全性与耐久性。基础灌浆是提升大坝基础防渗能力的关键技术，其施工工序涵盖钻孔、制浆、灌浆、封孔等核心环节，各工序间的衔接质量对灌浆密实度、结石体连续性及防渗帷幕完整性具有决定性影响。本文基于灌浆施工技术原理，系统分析钻孔与制浆、制浆与灌浆、灌浆与封孔等关键衔接环节的技术要点，探究衔接不当引发的防渗缺陷类型及成因，结合工程实践提出工序衔接优化策略，为提升水库大坝基础灌浆防渗效果提供技术参考。

**【关键词】**：水库大坝；基础灌浆；工序衔接；防渗效果；质量控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.010

## 1 引言

我国水资源时空分布不均，水库大坝在水资源调控、防洪减灾、灌溉发电等领域发挥着不可替代的作用。大坝基础所处地质条件复杂，常存在裂隙、孔隙等不良地质构造，易引发渗漏问题，严重时会导致基础失稳、大坝结构破坏，威胁工程安全。基础灌浆通过向基础岩层或土体裂隙中注入浆液，经胶结硬化形成连续完整的防渗帷幕，阻断渗流通道，是解决大坝基础渗漏的核心技术手段。灌浆施工是一项系统性强、工序关联性高的复杂工程，各施工环节环环相扣。实际施工中，若钻孔与制浆衔接延迟、制浆与灌浆参数不匹配、灌浆与封孔衔接脱节等，会直接影响浆液扩散范围、结石体强度及防渗帷幕连续性，降低防渗效果。近年来，国内外多地水库大坝因灌浆工序衔接不当出现渗漏隐患，需投入大量资金进行加固处理。因此，深入研究灌浆施工工序衔接对防渗效果的影响，优化衔接工艺，对保障水库大坝工程质量具有重要现实意义。

## 2 水库大坝基础灌浆施工核心工序及衔接逻辑

### 2.1 核心工序功能定位

钻孔是灌浆施工的前置基础，目的是在大坝基础岩层中形成符合设计要求的灌浆孔道，为浆液注入提供通道，其施工质量直接决定浆液扩散路径与范围；制浆是保障灌浆材料性能的关键，需根据地质条件和设计要求配置具备合理流动性、稳定性及胶结强度的浆液；灌浆是核心实施环节，通过加压将浆液注入岩层裂隙，填充空隙并胶结硬化形成结石体；封孔是灌浆施工的收尾工序，目的是封闭灌浆孔口，防止后期孔口渗漏，保障防渗帷幕的完整性。

### 2.2 工序衔接核心逻辑

各工序衔接需遵循“质量验收前置、参数动态匹配、时间连续可控”的原则。钻孔施工完成后，需经孔位、孔深、孔径及孔内清洁度验收合格后，方可移交制浆环节准备浆液；制浆环节需根据钻孔揭示的地质条件，实时调整浆液配比，确保浆液性能与岩层裂隙特征匹配，同时保障浆液供应与灌浆施工节

奏同步；灌浆施工过程中需实时监测灌浆压力、浆液注入量等参数，根据吸浆情况调整施工策略，灌浆完成后需及时开展封孔施工，避免灌浆孔内浆液凝固收缩后出现渗漏通道。

## 3 关键工序衔接对防渗效果的影响分析

结合灌浆施工实践，钻孔与制浆、制浆与灌浆、灌浆与封孔是影响防渗效果的三个关键衔接环节。各环节衔接质量直接决定防渗帷幕的连续性、密实度及耐久性，衔接不当会引发各类防渗缺陷。

### 3.1 钻孔与制浆衔接的影响

钻孔与制浆衔接的核心问题集中在“验收滞后”和“参数脱节”两方面，直接影响浆液与岩层的适配性。钻孔完成后若未及时开展质量验收，或验收不合格便进入制浆环节，会导致孔深不足或孔内残留岩粉等问题。孔位偏差会使灌浆孔偏离设计防渗帷幕范围，形成防渗薄弱带；孔深不足则无法穿透深层裂隙，导致防渗帷幕深度不够，无法阻断深层渗流；孔内残留岩粉会堵塞浆液扩散通道，降低浆液填充密实度，形成局部渗漏通道。制浆环节若未根据钻孔揭示的地质条件调整浆液配比，会导致浆液性能与裂隙特征不匹配。

### 3.2 制浆与灌浆衔接的影响

制浆与灌浆衔接是保障灌浆过程连续性的关键，衔接不当会引发“浆液供应中断”“参数不匹配”等问题，直接影响结石体连续性。浆液供应与灌浆施工节奏不同步，会导致灌浆过程中断。灌浆中断后，孔内已注入的浆液会逐渐凝固，再次灌浆时新老浆液无法有效结合，形成界面裂隙，成为渗流通道。此外，浆液制备后若存放时间过长，会出现离析、沉淀等问题，降低浆液流动性和胶结性能，注入岩层后无法充分填充裂隙，导致结石体密实度不足，防渗性能下降。

### 3.3 灌浆与封孔衔接的影响

灌浆与封孔衔接是保障防渗帷幕完整性的收尾关键，衔接不当易引发“孔口渗漏”问题，破坏防渗帷幕的连续性。灌浆完成后若未及时封孔，会导致孔内残留浆液水分蒸发，出现收

缩裂隙，同时外部水流易渗入孔内，沿裂隙形成渗流通道。封孔材料与灌浆浆液不匹配，会导致封孔体与结石体结合不紧密，形成界面缝隙；封孔施工工艺不规范，如分层回填不密实、振捣不到位等，会导致封孔体本身存在孔隙，无法有效封闭孔口，引发后期孔口渗漏。不同衔接环节的常见问题及对防渗效果的影响如下表所示。

表1 不同衔接环节的常见问题及对防渗效果的影响

关键衔接环节	常见衔接问题	对防渗效果的影响
钻孔-制浆	1. 钻孔验收滞后或不合格； 2. 浆液配比未根据地质条件调整	1. 形成防渗薄弱带；2. 深层渗流无法阻断；3. 局部渗漏通道；4. 浆液填充不充分
制浆-灌浆	1. 浆液供应与灌浆节奏不同步； 2. 浆液存放时间过长； 3. 灌浆压力与浆液黏度不匹配	1. 新老浆液结合不良形成界面裂隙； 2. 浆液胶结性能下降； 3. 结石体密实度不足； 4. 防渗盲区或岩层抬动破坏
灌浆-封孔	1. 灌浆后封孔不及时； 2. 封孔材料与浆液不匹配； 3. 封孔工艺不规范	1. 孔内收缩裂隙形成渗流通道； 2. 封孔体与结石体结合不紧密； 3. 孔口渗漏； 4. 破坏防渗帷幕完整性

## 4 提升灌浆施工工序衔接质量的优化策略

### 4.1 优化施工组织，保障衔接时效性

建立“工序衔接责任清单”，明确各工序施工班组的衔接职责，设置专职衔接质检员，负责前置工序验收与衔接协调工作。推行“钻孔验收合格即移交”制度，钻孔施工完成后，衔接质检员需在2小时内完成孔位、孔深、孔径及孔内清洁度检测，验收合格后出具移交单，制浆班组凭移交单开展浆液配置工作，避免验收滞后。合理规划施工场地与设备布局，将制浆站设置在灌浆作业区附近，缩短浆液运输距离；配备备用制浆设备与运输车辆，保障浆液连续供应。根据灌浆施工进度制定浆液制备计划，采用“少量多次”的制浆原则，避免浆液长时间存放，确保浆液性能稳定。

### 4.2 强化技术管控，提升衔接匹配性

建立地质条件-浆液参数动态匹配机制，钻孔施工过程中同步记录岩层裂隙发育情况、岩性特征等地质信息，及时反馈给制浆班组。制浆班组根据地质信息调整浆液配比，例如针对宽大裂隙采用高浓度、高黏度浆液，并添加适量外加剂提升浆液稳定性；针对细微裂隙采用低浓度、低黏度浆液，增强浆液扩散能力。

规范灌浆与封孔衔接工艺，明确灌浆完成后封孔的时间要求，普通灌浆孔需在灌浆结束后4小时内完成封孔，特殊地质条件下需缩短至2小时内。选择与灌浆浆液性能匹配的封孔材料，优先采用水泥浆-水泥砂浆分层封孔工艺，封孔过程中分层

振捣密实，确保封孔体与结石体紧密结合。

### 4.3 完善监测体系，实时把控衔接质量

在关键衔接环节设置实时监测点，钻孔验收环节采用孔内成像仪检测孔内清洁度与裂隙分布；制浆环节安装浆液黏度、密度监测仪，实时监控浆液性能参数；灌浆环节采用压力传感器、流量监测仪，动态记录灌浆压力与浆液注入量，及时调整灌浆参数；封孔完成后采用超声波检测仪检测封孔体密实度。建立监测数据共享平台，实现各施工班组数据实时互通，若监测数据出现异常，立即暂停衔接施工，排查问题并整改合格后再恢复施工。同时，定期开展衔接质量专项检查，重点核查衔接验收记录、参数调整记录等，确保衔接质量可控。

## 5 工程案例分析

### 5.1 工程概况

某中型水库大坝为混凝土重力坝，最大坝高45m，坝基主要为花岗岩，局部存在裂隙发育区，设计采用帷幕灌浆进行基础防渗处理，灌浆孔间距2.5m，孔深30m，采用水泥浆液进行灌浆施工。该工程初期施工中，因工序衔接不当出现局部渗漏问题，经检测发现防渗帷幕存在多处不连续缺陷。

### 5.2 衔接问题排查

#### 5.2.1 钻孔与制浆衔接存在验收滞后及参数脱节问题

通过核查施工日志发现，初期施工中35%的灌浆孔完成钻孔后未及时验收，平均滞后验收时间达4.5小时，部分钻孔未进行孔内清洁度检测直接进入制浆环节。采用孔内成像仪对12个问题钻孔检测显示，孔内残留岩粉厚度达5cm~12cm，堵塞裂隙通道；同时制浆班组未根据钻孔揭示的裂隙特征调整配比，对宽度大于2mm的宽大裂隙仍采用1:1常规水灰比浆液，导致浆液流失量过大。

#### 5.2.2 制浆与灌浆衔接存在供应中断及参数不匹配问题

统计灌浆施工记录可知，初期施工中共出现18次浆液供应中断，最长中断时间达1.5小时，中断原因主要为制浆设备故障及运输路径规划不合理。对中断灌浆孔的结石体取芯检测发现，新老浆液结合界面存在明显裂隙，裂隙宽度0.2mm~0.8mm；此外，灌浆压力与浆液黏度匹配性差，针对细微裂隙（宽度<1mm）施工时，采用黏度30s的高浓度浆液却仅施加0.3MPa的低压力，导致浆液无法渗透至裂隙深处。

#### 5.2.3 灌浆与封孔衔接存在时限超标及工艺不规范问题

施工记录显示，42%的灌浆孔在灌浆完成后8小时以上才进行封孔，最长延迟时间达12小时，孔内成像检测发现此类孔内存在明显收缩裂隙，裂隙长度2m~5m；封孔材料选用普通黏土砂浆，与水泥灌浆浆液相容性差，结合界面存在缝隙，且封孔时未采用分层振捣工艺，封孔体密实度检测合格率仅为68%。

### 5.3 优化措施及实施效果

#### 5.3.1 优化钻孔-制浆衔接管控

增设2名专职衔接质检员,明确其负责钻孔验收、数据反馈及衔接协调的核心职责;推行“钻孔验收合格即移交”制度,钻孔完成后质检员需在2小时内完成孔位偏差(允许偏差 $\leq 5\text{cm}$ )、孔深(允许偏差 $\pm 50\text{cm}$ )、孔径(设计孔径 $91\text{mm}$ ,允许偏差 $\pm 2\text{mm}$ )及孔内清洁度(岩粉残留厚度 $\leq 1\text{cm}$ )四项指标检测,验收合格后出具带编号的移交单,制浆班组凭移交单及钻孔地质记录表开展浆液配置。建立“地质条件-浆液参数”动态匹配台账,针对宽大裂隙(宽度 $>2\text{mm}$ )采用 $0.5:1$ 高浓度水泥浆液,并添加3%膨润土外加剂提升稳定性;针对细微裂隙(宽度 $<1\text{mm}$ )采用 $2:1$ 低浓度水泥浆液,添加0.5%高效减水剂增强扩散能力。

#### 5.3.2 优化制浆-灌浆衔接保障

重新规划施工场地布局,将制浆站迁移至灌浆作业区50m范围内,缩短浆液运输距离;新增1台ZJ-400型制浆机作为备用设备,确保浆液供应能力满足灌浆需求;明确浆液制备后存放时间不得超过2小时,配备浆液黏度仪实时监测,超期浆液严禁使用。确保浆液有效渗透。

#### 5.3.3 优化灌浆-封孔衔接工艺

明确封孔时限要求,普通灌浆孔需在灌浆结束后4小时内完成封孔,裂隙发育区灌浆孔缩短至2小时内;选用与灌浆浆液同类型的水泥水泥砂浆作为封孔材料,保障相容性;采用“水泥浆-水泥砂浆分层封孔”工艺,第一层灌注水泥浆填充孔内空隙,第二层采用水泥砂浆分层回填,每层回填厚度 $30\text{cm}$ ,采用插入式振捣器振捣密实。整改完成后,项目组通过专项检测验证优化措施的实施效果,核心检测指标及防渗效果如下表所示。

表2 核心检测指标及防渗效果

检测项目	优化前状态	优化后状态	设计要求
钻孔验收及时率	65%	100%	$\geq 98\%$
孔内岩粉残留厚度	5cm~12cm	$\leq 1\text{cm}$	$\leq 1\text{cm}$
浆液供应连续率	82%	100%	$\geq 99\%$
封孔时限达标率	58%	100%	$\geq 98\%$
封孔体密实度合格率	68%	98%	$\geq 95\%$
防渗帷幕渗透系数	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$	$< 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$	$< 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$
坝基渗漏量	0.8L/s·m	0.12L/s·m	$\leq 0.1\text{L/s}\cdot\text{m}$

## 6 结论

水库大坝基础灌浆施工工序衔接质量直接决定防渗帷幕的完整性与密实度,进而影响大坝基础防渗效果。钻孔与制浆、制浆与灌浆、灌浆与封孔的衔接不当,易引发防渗薄弱带、界面裂隙、孔口渗漏等缺陷。通过优化施工组织保障衔接时效性、强化技术管控提升衔接匹配性、完善监测体系把控衔接质量,可有效提升工序衔接质量。工程案例表明,合理的衔接优化策略能显著提升防渗效果,保障水库大坝工程安全运行。后续研究可结合智能化施工技术,开发工序衔接智能监测与调控系统,实现衔接参数的自动匹配与实时调整,进一步提升灌浆施工质量与防渗效果。

### 参考文献:

- [1] 张勇.永丰水库大坝坝基帷幕灌浆技术研究[J].陕西水利,2025,(12):130-132.
- [2] 朱让,唐金鑫.帷幕灌浆施工技术在水利工程大坝基础防渗加固中的应用[J].工程技术研究,2025,10(18):65-67.
- [3] 罗石,许国徽.水库大坝除险加固工程中帷幕灌浆施工技术标准的实践应用[J].大众标准化,2025,(17):131-133.
- [4] 刘登锋.基于高压喷射灌浆技术的水库工程大坝防渗漏施工工艺处理方法研究[J].水利科技与经济,2025,31(07):154-158.
- [5] 卢鹏.帷幕灌浆施工技术在大坝工程中的应用[J].散装水泥,2025,(03):43-45.