

# 灌浆施工技术在水利工程 防渗处理中的应用探讨

陈正友<sup>1</sup>, 李耀军<sup>2</sup>

(1. 南水北调中线水源有限责任公司, 湖北 十堰 442700;  
2. 汉江水利水电(集团)有限责任公司, 湖北 武汉 430040)

**摘要** 水利工程是国民经济和社会发展的基础设施,其安全稳定运行至关重要。然而,由于地质条件复杂、施工技术、材料老化等多种因素,渗漏问题一直是威胁水利工程安全的主要病害之一。本文阐述了水利工程中渗漏问题的成因及危害,系统分析了水泥基灌浆、化学灌浆等主要灌浆技术的原理、特点及适用范围。在此基础上,重点探讨了灌浆技术在坝基、坝体、输水隧洞及涵管等不同部位防渗处理中的具体应用工艺与关键技术要点。通过引入典型案例,分析了灌浆技术的实际应用效果,并总结了施工过程中的质量控制措施,以期为相关工程实践提供理论参考。

**关键词** 水利工程; 渗漏; 灌浆技术; 灌浆施工; 防渗处理

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.019

## 0 引言

水利工程的大坝、隧洞等承受高水头、渗流、冲刷和侵蚀等荷载和环境因素作用较为集中。渗漏是常见病害形式,同时也是最危险的。轻微渗漏可能造成水量的损失和水利工程经济效益的降低;严重渗漏会引发管涌、流土等影响坝体或地基结构,造成工程失稳、溃决,对下游人民的生命财产安全造成重大威胁。基于此,对水利工程开展有效的防渗措施,是保证工程长期安全运行的关键措施。

## 1 水利工程渗漏成因及主要类型

### 1.1 渗漏成因分析

在水利工程的渗漏成因中,常见的成因有:(1)地质缺陷问题。坝基或库区存在断层、裂缝、溶洞、软弱夹层等不良地质体,形成天然渗漏通道。(2)设计原因。防渗体设计存在问题,如防渗厚度不够、防渗帷幕埋深不足、反滤层设计不合理等。(3)施工原因。混凝土浇筑不密实、接缝处理不当、土石坝碾压不密实、灌浆时灌浆压力或浆液配比控制不当等,留下渗漏隐患。(4)材料的老化与侵蚀。在长期的运行条件下,防水材料的老化失效应导致发生渗漏,也可能由于混凝土在压力水以及有害离子的侵蚀下,而产生新的裂缝。(5)外力因素。例如:地震、滑坡等自然灾害导

致水利工程结构出现新的裂缝或出现新的错动情况,进而导致原有防水体的破坏<sup>[1]</sup>。

### 1.2 渗漏主要类型

根据渗漏部位的不同,可分为以下五种类型:(1)坝基渗漏。水流通过坝基岩体或砂卵石层的孔隙、裂隙渗漏。(2)坝肩绕渗。水流绕过两岸坝肩的防渗体,通过山体岩石裂隙渗漏。(3)坝体渗漏。对于土石坝,水流通过坝体填筑料内部;对于混凝土坝,水流通过混凝土本身的裂缝或伸缩缝渗漏。(4)结构物接触渗漏。发生在混凝土结构与基岩接触带、涵管与土体接触带等部位。(5)输水系统渗漏。隧洞衬砌、压力管道、涵管等部位的渗漏。

## 2 灌浆技术概述

灌浆是用压力将浆液灌入岩土体或结构中的裂隙的工程技术。灌浆技术现状:一是应用纳米改性浆体,降低渗透系数;二是通过智能化灌浆系统,以光纤传感实现对注浆压力动态调节,误差 $\leq 0.2$  MPa;三是采用绿色环保灌浆材料,重金属浸出 $\leq 10\%$ 。灌浆技术适用于水利防渗、轨道交通地铁隧道防水和建筑物加固等。根据灌浆材料、机理和目的的不同,该技术可分为水泥基灌浆、化学灌浆、高压喷射灌浆、帷幕灌浆以及接触灌浆<sup>[2]</sup>。

作者简介:陈正友(1991-),男,本科,工程师,研究方向:水利工程管理。

### 3 灌浆技术在水利工程防渗处理中的应用

#### 3.1 坝基防渗处理

坝基防渗的主要方式是采用帷幕灌浆,在坝基前沿线钻孔,通过分段压力灌浆,将水泥浆液注入岩体裂隙中,形成一道或多道纵向的、连续致密的阻水帷幕,从而大幅延长渗径,降低坝基扬压力和渗流量。坝基防渗要点:(1)钻孔。采用回转钻机按设计孔距、排距和深度钻孔;通常分三序施工,即先I序孔,再II序孔,最后III序孔;逐步加密,以提高帷幕的连续性和密实性。

(2)洗孔与压水试验。钻孔完成后需进行冲洗,并进行压水试验,以了解各孔段岩体的透水性(用吕荣值Lu表示),为确定浆液配比和灌浆压力提供依据。(3)制浆与灌浆。采用高速搅拌机配制水泥浆,水灰比遵循由稀到浓的原则逐级变换。采用纯压式或循环式灌浆泵进行灌注。施工过程严格控制灌浆压力、浆液水灰比、结束标准,这是保证灌浆质量的关键要素。在设计压力下,确保吸浆率小于0.4 L/min后持续30 min。

(4)封孔。灌浆结束后,采用机械压浆法或压力灌浆法对钻孔进行封堵。

#### 3.2 坝体防渗处理

对于土石坝的坝体渗漏,常采用劈裂灌浆或高压喷射灌浆技术。坝体防渗要点:(1)劈裂灌浆。利用浆液压力将坝体土料沿小主应力面劈开,形成连续的、竖直的浆液防渗帷幕,同时浆液在劈裂过程中与坝体相互渗透、挤压,使坝体得到充填、压实和加固。(2)高压喷射灌浆。适用于心墙坝等需要局部加强防渗的情况,可在地下形成板墙状的防渗体。对于混凝土坝的坝体裂缝,则根据裂缝宽度选择灌浆材料。宽度大于0.2 mm

的裂缝可采用水泥基灌浆;对于宽度小于0.2 mm细微裂缝,则需采用渗透性好的环氧树脂或聚氨酯化学灌浆。

#### 3.3 输水隧洞及涵管防渗处理

根据渗漏部位与特征,选择适宜的灌浆对策(如表1所示)。隧洞衬砌背后的空洞、衬砌本身的裂缝以及与围岩的接触带,是输水系统渗漏的高发区。常采用回填灌浆和接触灌浆。回填灌浆用于填充衬砌与围岩之间的空洞,保证衬砌均匀受力。接触灌浆适用于回填灌浆未能完全密实的顶部接触区域,进行补充灌浆,确保接触面密实。衬砌内表面化学灌浆适用于已通水运行隧洞的渗漏,常采用“后注浆”技术,即在洞内钻孔,埋设注浆嘴,使用聚氨酯等遇水膨胀的快速堵漏材料进行止水<sup>[3]</sup>。

### 4 灌浆施工质量控制与检查验收

#### 4.1 施工过程质量控制

加强材料质量控制,水泥、外加剂、化学浆材等必须有合格证明,并进行抽样检测。为有效控制孔位与孔深,严格按照设计图纸放样,确保孔位、孔深、斜度符合要求。严格控制浆液配比,采用经标定的计量器具,严格控制水灰比和外加剂掺量。浆液性能(密度、粘度、析水率)应定时检测。严格控制灌浆压力,压力是驱动浆液扩散的关键。压力过低,扩散范围不足;压力过高,可能导致岩体抬动或结构破坏。安装精密压力表,并实行分级升压。灌浆结束,严格执行设计规定的结束标准,并规范封底(如表2所示)。

#### 4.2 检查与验收

灌浆效果检查是验证工程质量的重要手段,主要方法有:(1)检查孔压水试验。在帷幕中心线或灌浆

表1 水利工程常见渗漏问题及灌浆对策应用

渗漏部位	渗漏特征	灌浆技术	主要灌浆材料	技术目的
坝基岩体	岩体裂隙渗漏,透水性强	帷幕灌浆	普通水泥浆、超细水泥浆	形成防渗帷幕,降低扬压力
土石坝坝体	坝体填筑料松散,存在渗流通道	劈裂灌浆、高压喷射灌浆	水泥粘土浆	形成坝内防渗体,压实坝体
混凝土坝体裂缝	宽裂缝 > 0.2 mm	水泥灌浆	改性水泥浆	填充裂缝,恢复整体性
	细微裂缝 < 0.2 mm	化学灌浆	环氧树脂、丙烯酸盐	渗透止水,高强粘结
隧洞衬砌背后	存在空洞、不密实	回填灌浆、接触灌浆	水泥砂浆、水泥浆	填充空洞,使衬砌与围岩结合紧密
伸缩缝、施工缝	接缝止水失效,有明水渗出	化学灌浆	水溶性聚氨酯、弹性环氧	快速止水,适应变形
集中射流漏点	水压高、流量大	化学灌浆(快速堵漏型)	油溶性聚氨酯、速凝膏浆	瞬间封堵,变水为浆

表 2 灌浆施工关键工序质量控制要点

关键工序	主要控制参数	控制方法	记录要求
钻孔	孔位、孔深、孔径、垂直度	全站仪放样、钻杆标尺、测斜仪	记录每个孔的实测孔深、孔斜数据
洗孔与压水试验	冲洗压力、压水压力、吕荣值	压力表控制、稳定流量法测算	记录每段压水试验的 P-Q 曲线和 Lu 值
浆液制备	水灰比、外加剂掺量、浆液密度	定量容器、电子秤、比重秤	记录每桶浆液的配比、配制时间、密度
灌浆过程	灌浆压力、注入率、浆液变换	精密压力表、流量计、分级调压	每 5 ~ 10 分钟记录一次压力、流量累计值
灌浆结束	结束压力、结束吸浆率	压力稳定控制、达到结束标准	记录结束时的压力和流量，以及持续时间
封孔	封孔浆液、压力	机械压浆、压力灌浆法	记录封孔方法和效果

区域布置检查孔，进行压水试验。若测得的吕荣值小于设计防渗标准，则判定合格。(2) 钻孔取芯与观察。从检查孔中取芯，观察岩芯上浆液充填的饱满程度、结石强度以及裂隙的胶结情况。(3) 物探检测。采用孔内电视、声波测井、地震波 CT 等方法，探测灌浆前后岩体波速或电阻率的变化，间接评价灌浆体的连续性和完整性。(4) 长期观测。通过埋设的测压管观测坝基扬压力的变化，或通过量水堰观测渗流量的减少情况，从宏观上评价防渗效果<sup>[4]</sup>。

### 5 工程案例

某水库均质土坝，最大坝高 30 m，已运行 30 年，其下游坝坡存在多处渗水点，渗流量随水位升高而增大，坝基可能存在渗漏通道。防渗处理：(1) 地质勘察。通过钻探和物探，确定坝基下部 10 ~ 15 m 深处存在一层强透水的砂卵石层，与库水连通，是主要渗漏通道。(2) 设计防渗方案。采用“混凝土防渗墙+帷幕灌浆”的组合方案。先沿坝轴线建造一道深度切入基岩的混凝土防渗墙，切断坝体渗流；再在防渗墙下游侧进行帷幕灌浆，对坝基深部的砂卵石层和基岩强风化层进行防渗处理。(3) 灌浆施工。帷幕灌浆采用三序孔施工，孔距 2 m，深入相对不透水层以下 5 m。项目采用普通硅酸盐水泥浆，并掺加膨润土改善稳定性，灌浆最大压力 0.8 MPa。(4) 防渗效果评价。灌浆结束布置了 5 个检查孔进行压水试验，试验结果如下：所有检查孔各段的透水率均小于 5 Lu 的设计要求，帷幕灌浆质量合格；水库蓄水后观测显示下游渗漏点完全消失，渗流量大幅减少，处理效果显著，成功消除了大坝安全隐患<sup>[5]</sup>。

### 6 结论

灌浆施工技术在水利工程防渗处理中的应用具有广阔的前景，不断强化这项技术，对提高我国水利工程建设与运行的水平具有重大意义。通过综合分析和案例工程实践表明：(1) 灌浆技术种类繁多，包括水泥灌浆、化学灌浆、高压喷射灌浆等，各有其适用性和优缺点，在实际工程中应根据渗漏原因、地质条件、工程要求和技术经济比较进行科学选择与组合应用。(2) 灌浆技术可广泛应用于坝基、坝体、隧洞等水利工程各个部位的防渗处理，其核心工艺是通过压力将浆液注入裂隙孔隙，形成密实的防渗体。(3) 灌浆工程是隐蔽工程，质量控制在“过程”，需对材料、钻孔、配比、压力、结束标准等关键环节进行严格把控，并通过检查孔压水试验、取芯等多种方法进行效果验证。

### 参考文献：

- [1] 马秦浩. 灌浆施工技术水利工程防渗处理工作中的应用[J]. 四川建材, 2022, 48(01): 119-137.
- [2] 丁振刚. 灌浆技术在农业水利工程堤坝防渗施工中的应用[J]. 南方农业, 2021, 15(15): 211-212.
- [3] 李树旺. 水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程中的应用[J]. 农业科技与信息, 2020(13): 126-128.
- [4] 宋成鑫. 灌浆技术在农业水利工程堤坝防渗施工中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2020(14): 151-152.
- [5] 沈福学. 帷幕灌浆施工技术在水利工程大坝基础防渗加固处理中的应用[J]. 科学技术创新, 2018(18): 118-119.