

水利工程帷幕灌浆施工技术研究

李建宏

广西南宁西江工程建设监理有限责任公司 广西南宁 530007

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18442

[摘要] 帷幕灌浆是水利工程防渗体系施工的关键施工方法,其技术效果在很大程度上取决于施工工艺与参数控制的合理性。工程实践中,地质条件差异显著、灌浆过程复杂多变,若仅依赖经验性操作,往往难以形成连续、稳定的防渗帷幕。围绕帷幕灌浆施工全过程,从技术原理出发,对施工前条件控制、工艺流程组织以及关键技术参数的控制方法进行系统梳理,重点分析钻孔施工、分段灌浆、灌浆压力、浆液性能及注入控制等技术要点。通过对施工技术内在逻辑的归纳,明确帷幕灌浆施工中应重点把控的关键环节,为提升帷幕灌浆施工质量和防渗效果提供技术参考。

[关键词] 水利工程;帷幕灌浆;施工技术;工艺控制;参数控制

随着水利工程项目的规模的不断扩大以及建设条件的日益复杂,坝基及地基渗漏风险呈现出更加多样化的特点,单一结构防渗措施已难以满足工程安全要求。因此,帷幕灌浆凭借其适应性强、防渗效果稳定等技术优势,被广泛应用于各类水利工程基础处理中。工程实践中,帷幕灌浆并非单纯的材料注入过程,而是一个高度依赖施工技术控制的系统工程^[1]。地质条件的差异、裂隙发育程度的不均一性以及施工参数选择的合理与否,都会直接影响帷幕的连续性与完整性。有鉴于此,基于水利工程施工实际需求,本文以施工技术为核心,对帷幕灌浆的技术原理、工艺流程及关键参数控制进行深入分析,以期帷幕灌浆施工提供更具操作性的技术支撑。

1 帷幕灌浆施工技术原理

帷幕灌浆的原理是通过人工手段改变坝基及地基岩体的渗透结构,使原本连续或半连续的渗流通道被有效阻断^[2]。从施工角度理解,这一过程并非简单的浆液填充,而是依托压力作用,使浆液沿岩体裂隙和孔隙发生扩散、充填与固结,逐步形成具有一定厚度和连续性的低渗透防渗体。浆液在土层中的运移状态,受裂隙规模、连通性以及围岩约束条件的共同影响,施工过程中必须在“可渗”与“可控”之间取得平衡^[3]。压力过低,浆液难以进入有效裂隙,帷幕连续性难以保证;压力过高,又可能诱发新的裂隙或造成浆液失控外逸,反而削弱防渗效果。由此可见,帷幕灌浆的施工原理,实质上是一种以地层响应为约束条件的动态控制过程。通过分序、分段注入,使浆液由稀到稠逐步推进,既保证裂隙填充的充分性,又避免地层结构遭到破坏,最终在坝基范围内

形成整体性良好、渗透系数显著降低的防渗帷幕。

2 帷幕灌浆施工工艺流程与技术控制

2.1 施工技术准备

2.1.1 地质条件影响

在帷幕灌浆施工技术准备阶段,地质条件直接决定后续工艺控制的合理程度。岩体结构特征往往比设计参数更具约束性意义。裂隙的发育程度、走向组合及其连通状态,决定了浆液扩散的主要路径,也影响着灌浆压力和注入方式的选择。若将不同地质条件简单套用统一施工参数,容易出现局部不进浆或跑浆现象,防渗帷幕的连续性难以保障。岩体完整性较好的部位,浆液扩散受限,施工中更依赖压力控制与分段注入;而在破碎带或强风化区,浆液流动性占据主导,稍有不慎便可能造成失控扩散。施工中对地质条件的判断不应停留在勘察资料层面,而需结合钻孔取芯、返水情况及初灌反应进行综合分析。

2.1.2 灌浆孔布置

工程实践中,合理的孔布置并不追求形式上的整齐,而更强调对地质条件和防渗目标的适配性。孔距过大,帷幕之间易形成薄弱带,连续性难以保证;孔距过小,则增加施工工作量,且在破碎地层中容易引发串浆与跑浆问题。施工技术人员在布孔阶段,往往需要在防渗效果与施工可控性之间反复权衡,并结合帷幕轴线位置、设计防渗深度及岩体完整性作出判断。通常通过设置主排孔与检查孔相结合的方式,逐步验证帷幕形成效果,并为后续灌浆参数调整提供依据(如表1所示)。

表1 帷幕灌浆施工中灌浆孔布置技术要点

项目内容	技术要求	施工控制要点
孔位布置形式	沿帷幕轴线布置, 保持整体连续	避免偏离轴线造成帷幕错位
孔距控制	根据岩体完整性合理取值	破碎地层适当缩小孔距
孔深设置	满足设计防渗深度要求	防止欠深影响帷幕效果
排序方式	采用分序、分排布置	便于逐步完善帷幕连续性
检查孔设置	在关键部位设置检查孔	验证灌浆效果并修正参数

2.2 帷幕灌浆施工工艺流程

2.2.1 钻孔施工技术要点

在帷幕灌浆施工过程中, 钻孔质量直接决定后续灌浆工艺质量, 其重要性体现在细节控制上而非施工速度。施工中需要始终围绕孔位精度与孔壁稳定性展开操作, 孔斜一旦失控, 帷幕轴线便会发生偏移, 即便灌浆参数控制得当, 也难以形成连续有效的防渗体。不同岩性条件下, 钻进方式和参数选择应保持足够的灵活性, 硬岩段强调稳进与控斜, 破碎带则更关注孔壁保护, 避免塌孔和缩径影响成孔质量^[4]。实际操作中, 返水情况和钻进阻力变化往往比仪表数据更能反映地层真实状态, 这些现场信息为后续灌浆方式的调整提供了重要依据。钻孔完成后, 对孔深、孔径及垂直度进行复核, 并通过清孔保证孔内通畅, 是确保浆液顺利注入的前提条件。

2.2.2 分段灌浆与注浆顺序控制

地层条件具有明显的不均一性, 若整孔一次性灌注, 浆液往往沿阻力最小的通道扩散, 局部饱满而其他部位难以充填, 防渗效果难以稳定。通过分段实施, 可以将灌浆过程拆解为多个可控单元, 使浆液扩散始终处于可观察、可调整的状态。施工中, 注浆顺序通常遵循由下至上、由主孔到次孔逐步推进的原则, 这种安排有助于在下部形成相对稳定的阻隔层, 为上部灌浆提供约束条件。实际操作时, 需要结合吸浆量变化、压力反应及返浆情况, 对灌浆节奏进行动态调整, 而不是机械地按既定程序执行。一旦发现局部吸浆异常或压力突变, 应及时调整段长或暂停注浆, 以避免跑浆和串浆问题的扩大。

2.3 灌浆结束与封孔施工技术

在施工现场, 吸浆量趋于稳定、压力变化缓和以及返浆状态的同步出现, 往往比某一设定数值更具参考意义。若仅依据灌浆量或压力达到设计上限便仓促停浆, 容易留下局部未充填区, 影响帷幕连续性; 而盲目延长灌浆时间, 又可能导致浆液过度外溢, 对已形成的结构产生扰动。因此, 施工

人员需要在观察浆液反应的同时, 对地层承载状态保持敏感, 通过阶段性停顿和复灌验证灌浆效果, 使停浆决策建立在真实地层反馈之上。

封孔施工是帷幕灌浆工序的收尾环节, 其质量往往直接影响前期灌浆成果的稳定性。封孔材料的选择和注入方式, 应与孔内残余浆液状态相协调, 既要保证孔口密实, 又不能对已固结的灌浆体产生破坏。实际操作中, 封孔过程需要控制注入速度和压力, 避免形成空腔或弱结合面。待封孔完成并达到初凝条件后, 对孔口进行必要的养护和保护, 是防止后期渗水通道形成的重要措施。

3 帷幕灌浆施工关键技术参数控制

3.1 灌浆压力控制技术

3.1.1 压力分级与控制原则

施工中不同地层条件对应的浆液渗透能力差异显著, 高压可能迫使浆液进入非目标裂隙, 引发跑浆或裂隙扩展, 而低压则无法充分填充细小裂隙, 导致帷幕形成不连续。压力分级的实施, 要求根据岩体的完整性、裂隙发育程度以及孔深布置进行分层设定, 将孔段划分为若干可控单元, 使每个阶段的压力都在地层承受范围之内^[5]。动态监测吸浆量与压力响应, 为调整分级压力提供实时依据, 使浆液在最小干扰下沿预定路径扩散。分级原则不仅考虑地层承载, 还需兼顾施工工艺节奏, 通过逐段递增或递减压力的方式, 确保浆液充填充分同时保持地层结构稳定。

3.1.2 异常压力情况的技术调整

在帷幕灌浆施工中, 异常压力现象随时可能出现, 其产生原因多种多样, 包括局部裂隙阻塞、地层透水性突变或浆液流动受限等。施工人员需依赖实时压力曲线与吸浆量变化判断问题性质, 而非单纯依赖设计参数。遇到压力异常时, 应迅速分析是否存在堵塞、跑浆或地层破坏风险, 并根据地层条件调整注浆节奏。对于上升过快的压力, 可通过降低注入速率、分段停注或调整浆液稠度来缓解, 使浆液逐步进入

目标裂隙而非沿弱面逸出;若压力持续偏低,说明浆液扩散不足,需要局部提高压力或延长注浆时间,以确保帷幕连续性。关键点是技术调整必须与地层响应同步进行,操作中需要兼顾防渗效果和地层安全,不可机械执行既定压力曲线。

3.2 浆液配制与性能控制

3.2.1 浆液配比与流动性控制

帷幕灌浆施工中,浆液配比直接决定其流动性、渗透能

力和最终固结效果。施工现场常见的失效现象,多与浆液配制不当有关,例如浆液过稠导致细裂隙无法充填,过稀则易跑浆、降低防渗效果。技术上,需要根据地层孔隙结构、裂隙发育程度以及灌浆压力水平,合理确定水泥用量、水灰比以及添加剂比例,以保证浆液在不同孔段的渗透与充填效率。流动性控制不仅影响灌浆效率,也直接关系到帷幕连续性和厚度稳定性如表2所示。

表2 帷幕灌浆施工常用浆液配比与流动性参考值

浆液类型	水泥用量 (kg/m ³)	水灰比	添加剂类型	流动度 (cm)	适用地层类型
普通水泥浆	400	0.6	无	25-30	中等完整岩体
高流动水泥浆	350	0.7	减水剂	35-40	裂隙发育岩体
快凝水泥浆	420	0.55	早强剂	20-25	施工短周期段
低密度水泥浆	300	0.75	发泡剂	30-35	风化破碎带

3.2.2 凝结时间与施工适配性控制

浆液过快凝结,可能在注入过程中尚未完全充填裂隙就开始固化,形成空隙或断层,降低帷幕连续性;凝结过慢,则易导致浆液沿弱面外流,产生跑浆现象,同时延长施工周期,影响工序衔接。因此,施工技术人员需根据地层透

水性、施工段长度以及注浆压力,合理选择和调整浆液的凝结特性。通过控制水泥种类、添加剂类型和配比,可以实现对浆液初凝与终凝时间的精确调控,使其在施工操作范围内既能保持良好的流动性,又能按计划形成稳定的固结体(如表3)。

表1 帷幕灌浆施工浆液凝结时间与施工适配性参考值

浆液类型	初凝时间 (min)	终凝时间 (min)	施工段适配长度 (m)	适用温度 (°C)	主要适用地层类型
普通水泥浆	30-40	90-120	10-15	10-25	中等完整岩体
快凝水泥浆	15-25	60-80	5-10	10-25	短周期施工段
高流动水泥浆	35-50	120-150	12-18	10-30	裂隙发育岩体
低密度水泥浆	40-60	150-180	15-20	10-30	风化破碎带

3.3 灌浆量与注入速率控制

施工过程中,浆液过量注入容易引发地层膨胀或裂隙扩展,使局部防渗体产生应力集中甚至跑浆现象,而注入不足则可能造成裂隙未完全填充,帷幕形成不连续。注入速率的选择需结合地层渗透性与浆液流动性动态调整,高渗透区允许较快注入以提高施工效率,低渗透区则必须缓慢推进,以保证浆液充分扩散进入细小裂隙。施工技术人员通常通过实时监测吸浆量与压力变化判断灌浆效果,并在必要时分段调整注入节奏,使浆液沿设计路径均匀扩散。灌浆量与注入速率的控制并非孤立操作,而需与压力分级、浆液性能及段长布置协同考虑,形成系统化技术控制逻辑。

4 结语

综上所述,通过对施工原理、工艺流程以及关键参数控制的系统梳理,可以清晰认识施工过程中每一环节的技术逻辑及其相互关联。钻孔精度、分段注浆、压力分级、浆液配制与流动性控制、凝结时间及注入速率的科学管理,构成了

帷幕灌浆施工的完整技术体系。施工中对地质条件的敏感判断和实时调整能力,是确保防渗帷幕连续性和稳定性的关键。帷幕灌浆技术不仅是单一施工操作,更是一种基于地层响应和工艺参数协同调控的系统工程。

[参考文献]

- [1]姜功华. 黔中水利枢纽水利工程帷幕灌浆施工技术及其特殊情况处理[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(5): 124-125, 128.
- [2]杜忻辰,张镗,张文毅. 水利工程防渗处理中帷幕灌浆施工方法研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(19): 9-12.
- [3]严润思. 水利工程防渗处理中帷幕灌浆施工方法应用与实践[J]. 价值工程, 2025, 44(15): 113-115.
- [4]张利,王玉华,曹捷. 帷幕灌浆施工技术在水利工程中的应用探究[J]. 农业开发与装备, 2024(8): 127-129.
- [5]周立忠,李绍平,杨永存. 水利工程复杂地质条件下防渗帷幕灌浆施工技术[J]. 云南水力发电, 2025, 41(3): 128-132.