

水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用

文 / 晋文湛 高唐县水利局

吴明哲 三亚有孚元吉工程咨询公司

摘要: 在水利水电工程施工中,对帷幕灌浆技术的应用进行了深入的研究,是保证工程安全、稳定、提高工程质量的关键。帷幕灌浆是向岩石的裂隙和孔洞中注入一种特殊的灌浆物质,从而在岩石中形成高强度的不透水隔壁。这种隔墙能有效地阻止地下水渗入,避免了由于渗水对房屋结构造成的破坏,保证了房屋的安全稳定。为进一步提高帷幕灌浆的质量,必须对灌浆的组分和施工工艺进行细致的优化,采用合理的配合比,采用先进的施工工艺,可使混凝土结构的渗透压力降低。

关键词: 水利水电;帷幕灌浆;施工技术

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.04.076

引言

帷幕灌浆是保证工程安全、提高工程综合效益的关键技术措施。随着国家对水电开发力度的加大,尤其是一些地质条件复杂、环境恶劣的大水电工程,采用帷幕灌浆技术显得尤为重要。该方法是在岩体的裂隙或孔洞内灌注一种特殊的浆液,从而形成一种高强度的防渗透隔水层。这种防渗透帷幕具有防渗、防冲等功能,同时也可以提高坝体的整体稳定性,保证整体及周围环境的安全。同时,采用帷幕灌浆技术,可以有效地提高电站的工作效率,延长电站的服役年限,具有较好的社会效益。随着水电工程的进一步发展,帷幕灌浆技术将会得到更多的推广,从而更好地保证工程的安全性和经济效益。

一、帷幕灌浆技术概述

(一) 帷幕灌浆的定义与原理

帷幕灌浆是一种广泛用于水利水电工程的防渗措施,其基本思想是将特殊灌浆物质灌注于岩土体中,构成一层连续不透水帷幕,可有效降低地下水渗透,增强地基稳定性,提高工程安全。在工程实践中,帷幕灌浆是指在地层中按预先确定的深度和空间,向地层中灌浆,并向地层内扩散固化,形成一种既有一定强度又不透水的固体^[1]。从理论上讲,灌浆工艺的实施取决于灌浆介质的物理、化学特性及地层地质情况,灌浆材料主要由水泥浆液、化学浆液等组成,经高压灌浆后,通过物理充填、化学胶结或二者联合作用,对地层起到加固或控制作用。如水泥浆在高压条件下渗入地层,发生水化反应,生成胶凝物质,充填地层孔隙,起到防渗作用。在理论研究上,利用有限元法等数值计算手段,对灌浆压力分布、灌浆扩散路径及固结体的形成规律进行研究,为工程设计提供理论基础。在工程实践中,由于灌浆材料的选用、施工工艺的控制和地质条件的评价,对其施工的效果产生了很大的影响。在渗透率高的砂砾

土中,为保证泥浆的渗透性和连续性,必须使用低黏度、高渗透性的化学剂。另外,在灌浆时,对灌浆压力、灌浆比例、灌浆速度等参数的准确掌握,对保证灌浆质量至关重要。

(二) 帷幕灌浆在水利水电工程中的作用

帷幕灌浆是在岩体裂隙中灌注一定数量的灌浆物质,在岩体内部构筑一层严密的防渗屏障,保证水工结构的安全稳定。该方法的实施,将可有效地将渗透压降到 10^{-7} cm/s以内,并保持世界领先水平。同时,帷幕灌浆也可以大幅提升围岩的整体稳定性,提升其承载力,特别是在复杂多变的地质环境下,更具重要意义。将有助于从源头上解决水库大坝可能出现的漏水隐患,为水库大坝的长期稳定运行与安全提供可靠保证。所以,帷幕灌浆既是一种新的技术革新,也是保证工程长期运行安全的重要手段。

二、帷幕灌浆材料与设备

(一) 灌浆材料的种类与特性

在水利工程建设过程中,采用帷幕灌浆是保证大坝安全稳定的一项重要措施。灌浆材料的选用及其性能对灌浆效果及工程质量有重要的影响。灌浆材料可分为三种类型:水泥灌浆、化学灌浆和搅拌灌浆。水泥基灌浆因其造价低,技术成熟,施工方便,在帷幕灌浆施工中得到了广泛的应用^[2]。普通硅酸盐水泥具有较好的流动性、固化性,在一般的地质情况下,被广泛应用于灌浆。而以环氧树脂、丙烯酰胺为代表的化学灌浆材料,由于其粘接强度高、耐久等特点,适合于裂隙发育、高水压、高渗透等特殊地质条件。复合灌浆是一种集水泥与化工原料优势于一身的新型灌浆材料,其防渗性能好、黏结强度高,造价低廉,适合各种地质条件。在工程实践中,灌浆材料的选用要从工程地质条件、环境条件和经济费用等方面进行综合分析。在大型水电站的帷幕灌浆中,应用水玻璃-水玻璃复合灌浆技术,不但能

提高灌浆效果，而且能有效地降低工程造价，保证工程的质量与安全。

（二）灌浆施工所需设备及其功能

在水利工程建设中，采用帷幕灌浆是保证工程安全、保证工程质量的重要措施。灌浆所需要的设备及性能，直接关系到灌浆的效率与效果。首先，灌浆泵是灌浆的关键装置，其主要作用是将灌浆物料按规定的压力送入孔内，并保证浆液在地层的裂隙、孔隙内均匀充填。一种新型高压灌浆泵，其工作压力最高可达30MPa，特别是在深部岩体灌浆施工中。其次，钻具的选用对灌浆效果有很大的影响，其孔的精度与深度将直接关系到灌浆料是否能够精确到位。在一座大型水电站工程中，利用先进的定向钻削工艺，使灌浆孔的位置准确，使灌浆的质量与效率得到明显提高。另外，搅拌机、运输泵等灌浆材料的配制设备也是影响灌浆均匀度与稳定性的重要因素。实践证明，利用自动拌和系统，能有效地消除配料误差，确保灌浆料的均匀性，总之合理地选用合适的灌浆机械，并充分发挥其作用，是水利水电工程能否顺利实施的关键。

三、帷幕灌浆施工设计

（一）施工前的地质勘察与评估

在水利工程建设中，采用帷幕灌浆是保证工程安全、保证工程质量的重要措施。该方法既要对施工场地的地质构造进行精细分析，又要对岩体类型、裂隙发育程度、地下水位和水流速度等进行细致研究，为帷幕灌浆全过程打下良好的基础。在工程实施之前，对工程进行地质调查和评价工作，是工程建设中不可忽视的重要环节。采用地质雷达探测、钻孔取样等方法，获得不同地质条件下地层理化性质参数，为灌浆选材、灌浆钻孔布设等提供科学依据。在一座大型水电工程项目中，项目组通过对坝基区的地质调查，发现该区有多条断裂发育，地下水储量较大^[3]。这一认识直接指导着对帷幕灌浆方案进行优化，从而保证了灌浆质量，保证了工程的长期稳定。在此提出了一种新的思路，即通过合理的设计方案，使其能更好的适应复杂的地质环境，提升项目的总体质量与安全水平。比如，在勘察成果的基础上，设计人员可以根据现场地质情况选用合适的灌浆材料，或调整灌浆孔布局，以保证灌浆材料能充分充填裂隙，实现预期的补强效果。同时，项目管理人员也要充分考虑项目建设过程中可能出现的各类风险，并采取相应的对策。如在地下水位很高的情况下，为避免在灌浆时发生地下水的渗漏，必须对灌浆施工进行适当的排水。在灌浆时，应严密监控灌浆压力、注水量，保证灌浆均匀、稳定。

（二）灌浆孔布置与施工参数设计

在水利工程建设中，采用帷幕灌浆是保证工程安全、保证工程质量的重要措施。注水井的布设及施工参数的确定，是整个灌浆工艺的关键环节，对灌浆的质量及工程的稳定起着至关重要的作用。注水井的布设要依据地质调查成果，并根据工程的具体要求，采用科学的计算与仿真方法，对孔位的间距、深度和角度进行合理的设计。在确定灌浆工艺参数时，应充分考虑灌浆材料的性质、灌浆压力、灌浆浓度及流量。要求灌浆压力为0.3~0.5MPa，以保证灌浆充分充填地层裂隙，且不会对地层产生不利影响。在工程实践中，为使灌浆的质量得到最好的控制，设计人员应根据现场测试结果，不断地调整各种工艺参数。通过对一座高坝的现场测试，得出了增大灌浆浓度、减小灌浆压力等措施，可有效地改善其防渗效果。另外，在设计注水井时，应兼顾经济、环保等因素。在满足工程质量要求的条件下，采用最优方案，可减少灌浆孔数目，降低灌浆次数，降低施工费用，降低环境影响。如某水电站导流洞采用先进灌浆工艺，既可提高灌浆效果，又可节约水泥、降低工程成本，又可减轻水泥浆对地下水的污染。

四、帷幕灌浆施工工艺流程

（一）施工准备与钻孔作业

在水利工程建设过程中，采用帷幕灌浆对保证工程安全、提高工程质量具有十分重要的意义。在帷幕灌浆施工过程中，首先要进行现场地质调查，其次要对施工人员进行培训，最后才能进行施工。以某水电站为例，在进行前期地质调查后，发现坝基区有多处断裂，因此，在灌浆设计中应充分考虑断裂对灌浆的作用。为此，在灌浆钻孔布设及施工工艺设计中，需要对工程地质资料进行细致的分析。在帷幕灌浆中，钻削操作是最重要的一道工序，其精度的高低关系到灌浆的效果及工程质量。在钻探过程中，必须依据地质调查结果，选择适当的钻法、钻孔机等，以保证孔的垂直度及深度^[4]。如在一座大型水电站工程中，为了保证钻探的精度与连贯性，将先进的地质雷达技术应用于工程建设中。另外，在钻井过程中还要注意钻进速度和压力等因素，尽量减少对周围岩石的干扰。

（二）灌浆材料的制备与输送

在水利工程建设中，采用帷幕灌浆是保证工程安全、保证工程质量的一个重要步骤。灌浆材料的配置和运输是灌浆施工的关键环节，其施工质量的好坏直接关系到灌浆效果。灌浆材料主要有水泥浆、化学浆、黏土浆等，其配制必须严格遵循设计及施工规程，以保证灌浆均匀、稳定。比如，在配制水泥浆液，要对水的水灰

比进行严格的控制,使其具有最好的流动性能和固化特性。为了保证灌浆的均匀性,采用了一套高精度灌浆材料配制系统。灌浆物料运输应兼顾其流动性,并对其压力控制,确保灌浆均匀、连续地灌浆。在灌浆作业中,需采用高压灌浆泵及配套的输油管,实时监测灌浆压力及流量,保证灌浆的稳定可控。在理论上,利用水动力学理论对灌浆过程进行数值模拟,并对灌浆压力、灌浆浓度等进行优化,从而达到提高灌浆效果与质量的目的。

(三) 灌浆过程控制与质量检测

在水利工程建设中,采用帷幕灌浆是保证工程质量与安全的重要一环。灌浆施工的关键在于灌浆工艺的控制及质量检验,其成败将直接影响到灌浆效果及工程的长期稳定。灌浆过程的控制需要施工班组严格按设计参数(灌浆压力、灌浆比例、灌浆速度等)来完成,从而确保灌浆质量。比如,灌浆压力要随地层情况及灌浆目的而适当调节,太大会造成地层失稳,太小又达不到预期的防渗效果。在灌浆的全过程中,对灌浆材料进行检测,对灌浆过程进行实时监控,对灌浆效果进行评价。如采用非破坏性测试方法如声波透射法、电阻率法等,对灌浆后的帷幕质量进行评价,保证其满足设计要求,将统计过程控制(SPC)模型应用于灌浆,实现灌浆关键参数的实时监测与调控,提升灌浆质量的稳定性与可靠性。

五、帷幕灌浆施工中的常见问题及解决策略

(一) 施工中遇到的常见问题

在水利工程建设中,帷幕灌浆是一项十分重要的工作。如灌浆料的不均匀会使灌浆效果降低,从而影响整个工程的总体质量。在某工程实例中,因水泥浆配比不合理,造成灌浆后产生裂纹,对其防渗性能造成了很大的影响^[5]。针对该难题,项目组在前期研究基础上,提出了更加精准的原材料配比及质量控制方法,并引进了自动灌浆系统,保证了灌浆的均匀、稳定,进而提升了灌浆质量。另外,在灌浆过程中,钻孔位置的偏移也是一种普遍现象,会造成灌浆范围不够,从而影响到整个帷幕的防渗效果。利用高精度地质雷达、GPS定位等技术,减小了钻孔位置的误差,保证了钻孔的准确布设。实践证明,采用科学的施工设计、严格的材料控制以及先进的施工工艺,能够有效地解决施工中出现的一些共性问题,为帷幕灌浆的顺利实施提供了保证。

(二) 针对问题的预防措施与处理方法

在水利工程建设中,帷幕灌浆是一项十分重要的工作,它的施工质量对整个工程的安全稳定起着决定性的

作用。针对灌浆料不均匀、灌浆压力不合理、孔压过高等问题,提出了相应的防治措施。如使用高精度灌浆材料及先进的灌浆设备,可对灌浆均匀度及灌浆质量进行有效的控制。在灌浆施工之前,通过对工程地质调查和评价,对灌浆钻孔的布设及施工工艺进行合理的设计,可以有效地防止由于复杂的地质情况引起的灌浆质量问题。在此基础上,通过对灌浆压力、流量等关键参数的实时监测,并建立相应的数据分析模型,实现灌浆过程中出现的异常现象的检测和调控,保证灌浆的质量。

结束语

在水利工程建设中,对帷幕灌浆技术进行研究,已成为提高工程质量与安全水平的一项重要措施。该方法将特殊灌浆物质灌注于岩体内,在其内部构筑防渗帷幕,可有效阻止地下水流入,达到降低坝体渗漏的目的,保障大坝的安全稳定。该工程的实施,不但降低了库水的渗漏损失,而且提高了机组的发电效率,具有良好的经济效益。工程实例表明,帷幕灌浆在控制地下水,提高坝体稳定方面具有很大的应用前景。另外,随着灌浆工艺的不断提高,灌浆材料性能的提高以及施工工艺的优化,大大提高了灌浆的施工效率,提高了灌浆质量。为同类项目的建设提供可借鉴的经验,促进全产业链的科技进步,提高工程质量。

参考文献

- [1] 邓宁. 水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术应用研究[J]. 水上安全, 2024, (10): 157-159.
- [2] 徐玺坤. 水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (14): 185-187.
- [3] 王雄. 水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用[J]. 山西水利, 2023, (12): 48-49+53.
- [4] 黄灿彬. 水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用探讨[J]. 大众标准化, 2023, (16): 165-167.
- [5] 李波. 水利水电工程施工中灌浆技术的应用分析[J]. 四川水利, 2022, (S1): 43-46.

作者简介:

晋文湛(1974年1月28日),男,蒙古族,山东省高唐县人,本科,工程师,单位:高唐县水利局,研究方向:水利工程。

吴明哲(1985年04月17日),男,蒙古族,海南省三亚市人,大专,工程师、一级建造师、一级造价工程师,单位:三亚有孚元吉工程咨询公司,研究方向:水利工程。