

高水压条件下水利隧洞注浆堵水施工工艺优化

张博 刘夕奇

珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东 广州 510611

摘要: 高水压条件下水利隧洞注浆堵水施工面临诸多挑战,如涌水量大、水压高导致浆液扩散控制难等。本文通过分析高水压对注浆堵水施工的影响,结合实际工程案例,从注浆材料选择、注浆设备选型、注浆参数控制、注浆施工工艺流程优化等方面提出施工工艺优化策略,旨在提高高水压条件下水利隧洞注浆堵水施工的质量和效率,保障隧洞施工安全。

关键词: 高水压;水利隧洞;注浆堵水;施工工艺优化

引言

水利隧洞在水利工程中承担着输水和泄洪等重要功能,其施工质量和安全性至关重要。在高水压条件下,水利隧洞施工易遭遇涌水问题,不仅影响施工进度,还可能引发安全事故。注浆堵水作为一种有效的治理手段,能够截堵地下水流入作业面,加固地层,提高围岩强度。然而,高水压环境给注浆堵水施工带来了诸多难题,如浆液扩散难以控制、注浆压力选择不当易导致围岩变形等。因此,优化高水压条件下水利隧洞注浆堵水施工工艺具有重要的现实意义。

1 高水压对水利隧洞注浆堵水施工的影响

高水压给水利隧洞注浆堵水施工带来不利影响:一是涌水量大,高水压使地下水补给范围扩大、流速加快,富水断层破碎带涌水量大,冲刷注浆材料,增加排水难度与成本,延长工期;二是浆液扩散难控,高水压使浆液扩散方向和范围难测,易注浆不均,降低质量;三是影响围岩稳定,水压力或致围岩变形破裂,引发安全事故;四是设备要求高,普通设备可能无法正常工作,且对密封和耐压能力要求更高^[1]。

2 高水压条件下水利隧洞注浆堵水施工工艺优化策略

2.1 注浆材料选择优化

2.1.1 根据地质条件和水压情况选择合适材料

在高水压条件下,选择合适的注浆材料是确保注浆堵水效果的关键。应优先选用凝胶时间短、强度高、抗渗性能好的注浆材料。对于硬岩、含水量大的地层,水泥—水玻璃双液浆是一种理想的选择。水泥—水玻璃双液浆具有诸多优点,其凝胶时间可根据实际需要进行灵活调整,能够快速凝固,形成结石体。结石体强度高,能够有效承受高水压的作用,同时抗渗性能良好,能够有效截堵地下水,形成有效的堵水帷幕。例如,在某水利隧洞施工中,采用水泥—水玻璃双液浆进行注浆堵水。其

中,水泥选用425普通硅酸盐水泥,水泥浆与水玻璃体积比为1:0.5。注浆后,通过监测发现总出水量明显减少,堵水效果十分显著,有效保障了隧洞施工的顺利进行。

2.1.2 考虑材料的环保性和耐久性

在选择注浆材料时,除了关注其堵水性能外,还应充分考虑材料的环保性和耐久性。应优先选择对环境无污染、对人体无害的材料,以减少对周边生态环境的影响,符合可持续发展的要求。同时,材料应具备良好的耐久性,能够在长期的地下水侵蚀和压力作用下保持稳定的性能,确保注浆堵水效果的长期有效性^[2]。避免因材料性能劣化导致注浆帷幕失效,从而引发新的涌水问题,增加后续维护成本和安全风险。

2.2 注浆设备选型优化

2.2.1 选择能承受高压力的设备

针对高水压条件的特殊要求,应选择能够承受高压力的注浆泵、注浆管等关键设备。例如,可采用大功率窄体履带式液压钻机并配置无级变速超高压低流量双液泵。这种设备组合具有显著的优势,大功率窄体履带式液压钻机能够适应狭小空间的作业环境,满足钻机反复拆、吊快速安全施工的要求;无级变速超高压低流量双液泵则能够提供稳定的高压浆液输出,确保在高水压环境下浆液能够顺利注入围岩裂隙中,为注浆施工的顺利进行提供有力保障。

2.2.2 确保设备的密封性能和耐压能力

注浆设备的密封性能和耐压能力是保证注浆质量的关键因素。在设备选型过程中,应严格筛选密封性能好、耐压能力强的产品。良好的密封性能可以有效防止浆液在高水压作用下发生泄漏,避免浆液浪费和环境污染,同时确保注浆压力的稳定传递,提高注浆效果。耐压能力强的设备则能够承受高水压的冲击,保证设备在长时间高压工作状态下的正常运行,减少设备故障的

发生概率，提高施工的可靠性和安全性^[3]。此外，还应定期对设备进行检查和维护，建立完善的设备维护管理制度，确保设备始终处于良好的工作状态，延长设备使用寿命。

2.3 注浆参数控制优化

2.3.1 注浆压力控制

注浆压力是影响注浆效果的核心因素之一。在高压条件下，合理确定注浆压力至关重要。应根据围岩的强度、裂隙发育程度和水压大小等综合因素进行科学分析，确定适宜的注浆压力。一般来说，注浆压力应略高于水压，以确保浆液能够顺利克服水压力，注入围岩裂隙中，形成有效的堵水屏障。然而，注浆压力也不能过高，否则可能会引起围岩过度变形，破坏围岩的稳定性，甚至导致隧洞塌方等严重事故。例如，在某水利隧洞施工中，通过原位压水试验预测前方涌水量，并结合井内实际抽排能力，明确了“以堵为主，限量排放”的治水原则。利用钻孔压水试验计算渗透系数，并以此为依据制定超前注浆启动标准，精确确定合理的注浆压力。通过这一系列科学合理的措施，最终达到了较好的堵水效果，有效保障了隧洞施工的安全和质量。

2.3.2 浆液水灰比控制

浆液水灰比对浆液的流动性和结石体强度有着直接影响。在高压条件下，为了增强浆液的抗冲刷能力和堵水效果，应适当降低浆液水灰比，提高浆液的粘度。较高的粘度可以使浆液在高压环境下更不容易被水流冲走，从而更好地填充围岩裂隙。但水灰比也不能过低，否则会导致浆液流动性变差，难以注入细小裂隙中，影响注浆的均匀性和完整性。在实际施工中，应通过大量的试验来确定最佳的水灰比。一般来说，水灰比控制在0.5—0.8之间较为合适，但具体数值应根据工程实际情况进行调整和优化。

表1 不同水灰比浆液性能对比

水灰比	流动性	粘度	结石体强度	抗冲刷能力
0.5	较差	高	高	强
0.6	中等	中等	中等	中等
0.8	较好	低	较低	较弱

2.3.3 注浆量和注浆时间控制

注浆量和注浆时间的合理控制是确保注浆效果的重要环节。注浆量应根据围岩的体积、裂隙发育程度和浆液扩散范围等因素进行精确计算和合理控制。注浆量过少，无法形成足够厚度和强度的堵水帷幕，不能有效截堵地下水；注浆量过多，则会造成浆液浪费，增加工程成本，同时还可能对围岩产生过大的压力，引发围岩变形等问题。注浆时间应根据浆液的凝胶时间和注浆压力

等因素进行灵活调整。确保浆液在围岩中有足够的时间充分扩散和凝固，形成稳定的结石体^[4]。例如，在某水利隧洞施工中，根据围岩的实际情况和注浆效果，通过多次试验确定每次注浆的注浆量和注浆时间。经过精心控制和优化，最终取得了良好的堵水效果，有效保障了隧洞施工的顺利进行。

2.4 注浆施工工艺优化



图1：注浆施工工艺优化框架图

2.4.1 超前探水与止浆墙施工

在注浆施工前，进行超前探水是至关重要的环节。通过超前探水，可以深入了解前方地质情况和水文条件，准确掌握地下水的分布、流向、水压等信息，为注浆施工提供科学合理的依据。根据超前探水所获取的数据，确定第一环注浆止水盘的位置，确保注浆施工能够有针对性地进行。同时，在注浆地段的掌子面挂网喷射混凝土15—20cm作为止水、止浆墙。止浆墙能够起到双重作用，一方面可以防止未注浆的地下水涌出作业面，避免涌水对施工造成干扰；另一方面可以防止注浆时浆液跑浆，确保浆液能够按照设计要求注入围岩中，提高注浆效果。

2.4.2 钻孔与注浆管安装

钻孔作业是注浆施工的重要前期工作，钻孔质量直接影响到注浆效果。钻孔开始时，应先采用低速开孔，缓慢钻进，当孔深达到30cm后，再转入正常钻速。这样可以保证钻孔的垂直度和准确性，避免钻孔偏斜影响注浆管的安装和浆液的扩散。安装注浆管时，应事先在管上钻好直径为10—15mm、间距为15—20cm梅花形布置的出浆孔。出浆孔的合理布置能够使浆液均匀地从注浆管中流出，提高注浆的均匀性和有效性。注浆管的安装必须牢固可靠，采用合适的固定方式确保注浆管在注浆过程中不会发生位移或脱落，保证浆液能够顺利注入围岩中。

2.4.3 压水试验

压水试验是注浆施工前不可或缺的重要环节，其主要目的是检查机械运行情况、各管路密封情况和进浆管进浆情况。通过压水试验，可以及时发现设备存在的问题，如注浆泵是否正常工作、管路是否存在泄漏等，并进行及时处理，确保注浆施工的顺利进行。试验压力一般不低于1.2—1.5倍的注浆终压，也可以根据施工现场

的实际情况酌情处理。压水试验应进行3次,每次持续5min,压水试验完成后,将水放掉。在压水试验过程中,仔细观察压力变化、水流情况等,记录相关数据,为后续注浆施工提供参考依据。

2.4.4 注浆施工

压水实验后不停泵即开始注浆。注浆遵循策略,先注稀浆,其流动性好,能进入围岩细小裂隙,起先导润滑作用;再逐步加大浆液浓度,使填充更紧密,提高结石体强度与抗渗性,利于扩散凝固形成堵水帷幕。注浆结束一般以压力控制,达设计或规范终压即停。注浆时专人观测记录压力、掌握注浆量,留意止浆盘变形和跑浆情况,若变形立即停注,分析原因并处理,保障施工安全和质量。

2.4.5 效果检查与补注浆

注浆完成后,必须对注浆效果进行全面、细致的检查。打开检查孔,观察孔内是否有水流出。若孔内有水,说明注浆效果不理想,需要继续向孔内注浆,直至达到满意的堵水效果。在隧洞开挖过程中,若发现压注浆效果不佳,应及时采取补救措施。可以采用小导管补充水泥—水玻璃浆液注浆的方式,进一步加固地层,提高堵水效果;或者根据浆液在围岩中扩散半径的实际情况和注浆效果,增加注浆孔的数量和加长每次注浆搭接长度,确保形成连续、完整的堵水帷幕,保障隧洞施工的安全和顺利进行。

3 工程案例分

3.1 工程概况

某水利隧洞全长5.6km,隧洞穿越的地层主要为砂岩、泥岩和石灰岩,地质条件复杂,存在多处断层破碎带和富水区。在隧洞施工过程中,遇到了高水压涌水问题,最大涌水量达到每小时80m³,水压高达5.6MPa,给施工安全和进度带来了严重影响。

3.2 施工工艺优化措施

3.2.1 注浆材料选择

根据地质条件和水压情况,选择水泥—水玻璃双液浆作为注浆材料。水泥采用425普通硅酸盐水泥,水玻璃模数为3.2—3.4,波美度为38—40。水泥浆与水玻璃体积比为1:0.5,以确保浆液具有较短的凝胶时间和较高的结石体强度。

3.2.2 注浆设备选型

选用大功率窄体履带式液压钻机和无级变速超高压低流量双液泵,满足高压条件下的注浆施工要求。同时,配备高质量的注浆管和密封件,确保设备的密封性能和耐压能力。

3.2.3 注浆参数控制

通过原位压水试验和理论计算,确定注浆压力为6.5MPa,浆液水灰比为0.6。根据围岩的体积和裂隙发育程度,计算每次注浆的注浆量,并通过试验确定合理的注浆时间。

3.2.4 注浆施工工艺流程优化

严格按照超前探水、止浆墙施工、钻孔、注浆管安装、压水试验、注浆施工、效果检查与补注浆的工艺流程进行施工。在注浆过程中,加强现场监测,及时调整注浆参数,确保注浆质量。

3.3 施工效果

通过采用上述施工工艺优化措施,该水利隧洞注浆堵水施工取得了良好的效果。注浆后,总出水量明显减少,由原来的每小时80m³降至每小时5m³以下,堵水率达到90%以上。隧洞施工安全得到保障,施工进度明显加快,工程质量符合设计要求。

4 结语

高水压条件下水利隧洞注浆堵水施工工艺优化对提高施工质量、效率及保障安全至关重要。合理选注浆材料、优化设备选型、严控注浆参数与施工流程等措施,可有效解决高水压下注浆堵水难题,提升堵水效果,工程案例也验证了优化工艺能减少涌水量、保障安全、加快进度。展望未来,水利工程发展使高水压注浆堵水施工面临更多挑战,需加强注浆材料研发、设备改进、工艺创新研究,同时强化施工监测检测技术,为工艺优化提供依据。

参考文献

- [1]唐洪应,吴桃,李明,等.针对引水隧洞突涌水采取的注浆堵水技术[J].四川水力发电,2025,44(01):70-74.
- [2]许建述.长距离引水隧洞地下渗涌水注浆堵水技术[J].中国水运,2024,(21):120-122.
- [3]陈小龙.输水隧洞TBM超前预注浆堵水施工技术研究[J].山西水利科技,2023,(03):24-26+29.
- [4]张奇智.输水隧洞IV级围岩涌水段注浆堵水治理方案研究[J].水利科学与寒区工程,2021,4(01):147-149.