

Pre-grouting and water plugging construction technology of small-section soft rock geological water-rich tunnels

Jian Liang Junwei Wang

China Water Conservancy and Hydropower Ninth Engineering Bureau Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550081, China

Abstract

The grouting construction technology for water-rich tunnels with small cross-section soft rock geological conditions serves as a crucial solution for water hazard prevention in complex geological environments. The water-rich challenges encountered during tunnel construction are closely related to the stability of soft rock surrounding strata. Effectively implementing grouting to control water flow while ensuring construction safety remains a key technical challenge. Through precise geological exploration and advanced forecasting technologies, combined with rational grouting and support plans, the probability of water-related hazards during construction can be significantly reduced. The selection of grout mixtures and regulation of grouting pressure form the foundation for enhancing grouting effectiveness and ensuring project quality. Additionally, emergency response strategies and safety measures are indispensable when dealing with sudden water surges.

Keywords

small cross-section soft rock tunnels; grouting; water-rich issues; water hazard prevention; construction technology

小断面软岩地质富水隧洞预灌浆堵水施工技术

梁剑 王军伟

中国水利水电第九工程局有限公司, 中国·贵州 贵阳 550081

摘要

小断面软岩地质富水隧洞的预灌浆堵水施工技术是应对复杂地质条件下水害防治的重要手段。隧洞施工面临的富水问题与软岩围岩的稳定性密切相关, 如何有效实现预灌浆, 控制水流并确保施工安全, 是施工技术中的关键挑战。通过精确的地质勘探与超前预报技术, 结合合理的注浆与支护方案, 可以显著降低施工中水害的发生几率。浆液的选择与注浆压力的调控, 是提高灌浆效果和确保工程质量的基础。同时, 面对突发的涌水问题, 紧急应对策略和安全保障措施也是不可或缺的环节。

关键词

小断面软岩隧洞; 预灌浆; 富水问题; 水害防治; 施工技术

1 引言

软岩地质条件下的隧洞建设, 往往伴随着强烈的水害风险。在这种极端复杂的施工环境中, 如何有效堵水并确保隧道的稳定性, 成为了工程领域迫切需要解决的技术难题。预灌浆堵水施工技术的应用, 使得施工队伍能够以更高的效率、更安全的方式应对地下水的挑战。对水文地质特征的精准把握和超前技术的应用, 进一步提高了预灌浆施工的科学性和可控性。尽管面临一系列技术与安全难题, 这项技术为我们提供了一个深刻的启示: 无论挑战多么复杂, 技术创新与不断摸索的决心, 始终是战胜困难的根本力量。

【作者简介】梁剑(1986-), 男, 中国陕西延安人, 本科, 高级工程师, 从事水利水电工程项目施工技术与管理研究。

2 小断面软岩地质富水隧洞预灌浆堵水施工技术概述

2.1 小断面软岩隧洞的特点

软岩地质小断面隧洞开挖掌子面面积相对较小, 洞室断面开口尺寸较小, 岩体非常破碎, 松散, 软弱; 这种隧洞施工容易发生强烈的围岩变形和强水压渗漏问题, 不同于一般隧道, 软岩地质围岩不稳, 容易变形, 同时存在涌水情况, 隧洞断面狭小, 施工空间小, 增加了支护灌浆的施工难度, 继而影响到施工安全及进度问题。施工中, 隧洞遭遇大涌水破坏力大, 导致围岩软化及崩塌风险极高。

2.2 富水隧洞的水文地质特征与预灌浆的必要性

含水层、断层、岩溶体是富水隧洞常见的水文地质条件, 富水性较强、水压较大。这些因素不仅增加了隧洞施工期间的水害隐患, 而且影响洞身围岩稳定。采取有效的灌浆措施预灌浆是最有效的处理涌水的关键手段之一。利用水泥浆和

水玻璃的双液混合浆液,在灌浆过程中连续加压,填充裂隙体并形成致密的水封,达到开挖前预治水的目的,实现施工安全,又能减少以后工程中的水流渗透破坏。

3 小断面软岩隧洞预灌浆施工面临的主要问题

3.1 隧洞施工过程中遇到的富水问题

小断面隧洞软岩地质条件下,富水问题是一大难点。一旦隧洞开挖进入富水层时,洞身涌水量突然增加,不确定因素巨大,多数来源为周边的地下水或断层水、岩溶水等,且多数是软岩地质条件下水压较大,大量涌水会导致隧洞开挖面软化,裂隙面增大,开挖面脆硬,稳定性差。在此情况下隧洞施工不仅受水量影响,还需在涌水发生时立即进行灌浆堵水,若不能及时有效堵住,将大大影响施工进度,甚至会出现安全事故。因此,在小断面软岩隧洞施工中如何有效判断出涌水的来源和分布位置并加以预防,一直是施工过程中关注的核心。超前预报方法可以在一定程度上找出涌水位置,但在实际工程应用中,很难达到准确预报涌水量的实际值,需提高警惕、量力而为。

3.2 软岩围岩的稳定性问题

软岩围岩稳定性问题也是小断面软岩隧洞施工的主要障碍之一。软岩受其自身的特性,对外界的应力响应敏感,遇水容易发生软化变形,甚至引起坍塌。特别是在隧洞的灌浆施工中,软岩自身孔隙裂隙系统多,灌浆液容易产生流失,灌浆效果达不到设计的要求。为了克服这种障碍,必须采用多次超前预注浆,加固围岩,加强岩体的抗渗防渗稳定性^[1],由于软岩围岩含水量高,松散性也大,灌浆的渗透性和效率都达不到理想的效果,需采取模袋孔口管和加固封闭措施保证浆液效率的发挥,对软岩地层中的灌浆孔位置和施工过程的管理也要精细化确保水封层和水封层的强度。

3.3 预灌浆施工技术的局限

尽管预灌浆技术是解决富水隧道施工中的关键手段,但其实施过程中仍面临诸多局限。预灌浆技术受限于现场的实际地质条件。在一些软岩地质中,由于岩体的裂隙发育和不规则性,灌浆液的扩散与填充难度增大,导致灌浆效果大打折扣。软岩常常容易受高压灌浆影响产生孔壁剥离,导致浆液外溢而无法达到预期封堵效果。水压过大时,即便采用高压灌浆技术,浆液也难以顺利渗透至所有裂隙,水流依然可能从未封堵的区域渗透。灌浆作业的操作精度要求极高,若施工过程中操作不当,如灌浆压力控制不当、灌浆时间不准确等,都可能导致封堵效果不佳,影响隧道后期的稳定性。

4 小断面软岩地质富水隧洞预灌浆堵水施工技术策略

4.1 施工前的地质勘探与超前预报技术

复杂的软岩富水隧洞施工,如何准确预测、预防可能的涌水成为施工成败的重要部分。地质超前预报是精确而科学的方法,通过震波勘探与瞬变电磁相结合的调查方式,准

确、有效地掌握超前距离至少在 100m 以上范围内的隧洞内岩溶发育区、含水断层、含水裂隙等复杂的地质条件,确保隧洞的施工根据地质情况有序推进。特别是对富水区域利用瞬变电磁的方法,在了解水文地质的基础上预测涌水量与涌水压力大小。如据现场勘探资料分析,因地质情况不一而采用超前钻孔相结合的方法对地质数据进行综合准确的预判,进而确保数据准确性。潜孔钻机超前钻孔相关参数(如每个断面 6 个孔,孔深 20-30m)根据不同的地质情况预判和施工,使突变地质现象出现的概率减小,预判准确性提升的同时确保施工安全。当突发异常情况发生,根据异常水流等情况及时调整相应的应急措施(如根据异常流水及时更改钻孔方案,增加孔位)。超前地质预报的准确性在最终完成该复杂的地质预判,使施工具有相当的针对性与准确性。超前注浆与支护工艺相结合,能够防止掌子面的软化或跑浆,确保安全施工^[2]。

4.2 超前注浆与支护技术的实施方案

对于软岩富水隧洞来说,超前注浆和支护技术是保障软岩隧洞施工的基础条件。其中掌子面的加固和封闭尤为重要,通过 $\Phi 8@15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 钢筋网和 C20 混凝土进行喷射加固,可以对隧洞的掌子面起到有效的加固作用。在处理 V 类围岩等掌子面存在问题的情况下具有十分重要的作用,避免软岩在遇水后的软化及坍塌等问题导致后面的施工无法进行。此外,对于传统的软岩地质来说,灌浆技术具有一定的局限性,注浆施工过程中,由于软岩及破碎岩体遇水易软化,容易被高压水体冲刷孔壁,导致传统的橡胶灌浆塞与钢管孔口管无法与隧洞孔壁之间不能完全结合在一起,注浆浆液直接从橡胶塞与孔壁之间缝隙渗出,无法达到堵水效果。在钻孔的过程中,采用安装模袋孔口管的方法,通过对孔内模袋充填水泥+水玻璃双液浆,在灌浆填充的过程中很快可以形成坚固的孔内封闭结构,使得灌浆过程中,孔壁及浆液之间的结合更加紧密,防止浆液的泄漏现象。在超前注浆施工当中,钻孔的位置和角度需要根据实际的地质问题进行合理的布设。钻孔孔径一般选择 $\Phi 76\text{mm}$,孔深 20 ~ 30m,并在掌子面的周围均匀布设孔数根据开挖断面确定,孔底间距不大于 3m,保证足够的灌浆量。该施工环节中,压力调节和浆液的选取,将决定灌浆的实施效果,根据不同地段所涌出的水量和水压,通过控制灌浆的压力和浆液的配比来填充裂隙以及溶洞,有效堵塞水源,从而实现注浆堵水。此外,还需要根据实际情况选择灌浆的方式^[3]。当在区段涌水量不大时,可以通过直接采用纯水泥浆进行灌浆,之后再采用水玻璃和水泥的双液浆灌注灌浆,以此来加速灌浆固化的速度;在涌水压力较大的区段,通过混合浆液提升灌浆的灌浆质量和速度。

4.3 灌浆施工中的压力调控与浆液选择

灌浆施工中的压力控制与浆液选用是灌浆效果的重要环节之一,灌浆压力的合理调节直接关系到灌浆浆液的扩散

及充填效果,影响到灌浆效果中的水封质量。通常来说,灌浆压力应该是静水压力加上 0.5 ~ 4.0MPa 进行控制,压力由小至大,使浆液得到均匀的扩散灌满岩体内的裂隙,且压力较大可能会导致浆液凝固较快,达不到裂隙岩体中微小裂隙充填的要求,压力较小则达不到浆液向裂隙充填的动力,灌浆效果不好。浆液配比是灌浆效果的主要影响因素,通常水泥、水玻璃的配比为 0.05: 1 ~ 0.1: 1,能够快速使浆液凝固,使浆液在较短的时间内凝结成强大的水封。在实际施工过程中,该配比需要根据实际的地层情况进行调整,使浆液能够对整个裂隙进行灌浆,在裂隙中进行裂隙内有可能渗入的每个裂缝。在高水压段采取水泥与水玻璃的双液浆进行灌浆,能够有效增加灌浆凝固的速度,使灌浆在较短时间内具备堵水效果,使灌浆施工能够得到连续性和安全性。在进行灌浆施工时,通过压力控制技术的采用能够有效防止涌水量过大引发的灌浆施工困难问题,例如导水孔进行排水泄压处理能够有效降低周围岩体水压,从而降低灌浆的施工困难性^[4]。此外,通过合理的灌浆循环(如每 20 ~ 30m 循环 1 次),也可逐步加密灌浆区段,确保每轮灌浆均可达到一定的封堵效果。

4.4 掌子面加固与灌浆孔布置策略

掌子面加固和灌浆孔的布置是软弱围岩地质富水隧洞防流堵水和施工的重要保证。掌子面加固目的主要是防止开挖过程中发生流水灌入洞内,并确保灌浆工作的进行。在不良地质地带或富水地带采用挂网喷射 C20 混凝土对掌子面进行加固。钢筋网格采用 $\Phi 8@15\text{cm} \times 15\text{cm}$, 混凝土厚度一般为 20-50cm, 提高掌子面整体稳定性。同时配合 $\Phi 20$ 固定锚杆进行支护, 间距 2m, 长度为 1m, 保证其本身结构稳定性, 预防因为水压和泥岩软化引起的掌子面塌陷。在掌子面周边布置钻孔, 采用潜孔钻机钻进 $\Phi 76\text{mm}$ 孔径, 孔深一般为 20 ~ 30m。根据富水的地质情况, 设计 I 序和 II 序钻孔, 保持合理孔距和孔倾 ($9 \sim 11^\circ$)。每个灌浆周期结束时通过检查孔和导水孔进行水流控制和压力观测, 确保堵水的效果。钻孔布置, 应根据掌子面围岩受力条件, 确定每个钻孔支护作用, 通过钻孔深度的组合, 形成连续水阻, 堵塞突涌水流。实际施工时应根据现场地质条件和水流方向合理布置孔位, 保证灌浆液体能够透入并充填所有可能产生裂隙, 灌浆时间和间隔应根据实际施工情况灵活调整, 确保每个区段灌浆能达到预期效果^[5]。灌浆期间也要定期监测混凝土的流动性, 以免出现堵塞、不均匀的现象。整个加固作业和灌浆都要精准的科学操作与精细的现场管理相结合, 方

能控制好水流的效果, 方能达到隧道施工的安全性。

4.5 突发涌水情况的应急处理与安全保障措施

处置方法和安全处理措施是隧洞施工过程中出现涌水的应急处理措施, 对突水涌水及时有效的处理可以避免施工的中断, 保证施工人员及设备的安全。每个钻孔口上设置闸阀以便对水流及时封堵, 当出现突水涌水情况, 及时关闭闸阀, 进行封堵灌浆。在隧洞施工过程中, 对可能存在突水部位的富水段提前进行排水减压处理, 通过使用导水孔进行涌水排放, 以保证减少施工压力, 防止施工涌水。使用超前管棚或超前小导管支护加固, 特别是在对富水区域进行施工时, 防止涌水对周围岩层造成影响。对出现的涌水通过增加灌浆压力, 调整浆液浓度等及时进行封堵, 采取多次灌浆的方式循环达到密实的效果。通过震波探测法、瞬变电磁法等提前探测涌水的区域, 施工前做好超前地质勘探工作。对发现的涌水情况及时对涌水进行封堵, 利用施工过程中已设置的模袋孔口管进行封堵, 对涌水进行再次补充灌浆封闭。施工过程中经常对施工现场水位变化进行监控, 保证在涌水情况发生之前有时间进行调整^[6]。同时保证施工现场的通风、用电等设施齐全, 保证施工人员的安全, 防止施工涌水的安全事故发生。施工现场应成立应急小组, 配备专业的应急救援装备, 例如潜水泵、排水管等, 以便第一时间对涌水事故处理完毕, 使得隧道内的人员能够快速撤离。隧道施工单位管理负责人要定期开展涌水应急演练, 加强应急能力熟练性和快速性的培养。定期对设备进行检查, 保证设备完好, 尤其需要对控水流相关的设备进行提前检查。

5 结语

随着小断面软岩隧洞施工技术的逐步深入, 预灌浆堵水施工技术也在不断演进与完善。从技术的应用到实施过程中的细节控制, 工程人员的经验与智慧成为了最重要的资源。水害问题的有效解决不仅保证了施工的顺利进行, 也为隧道建设的未来提供了宝贵的经验。面对日益复杂的地质与水文环境, 预灌浆技术的探索依旧在继续, 每一次突破背后, 都蕴藏着不言而喻的坚韧与决心。

参考文献

- [1] 吴跃帮, 杨再涛, 马红钧, 等. 大纵坡长斜井富水软岩地层地面高压预注浆施工方案[J]. 云南水力发电, 2024, 40(9): 117-121.
- [2] 杨勇, 李波. 软岩大变形地层隧洞开挖支护仿真分析[J]. 水利建设与管理, 2024, 44(11): 29-36.
- [3] 高威力. 深部开采软岩巷道围岩失稳控制技术研究[J]. 机械管理开发, 2023, 38(11): 261-263.