

引水隧洞衬砌裂缝成因与渗漏控制技术研究

冯雪连 张 璐

南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 济南 250000

【摘 要】：引水隧洞在长期使用过程中常出现衬砌裂缝及渗漏问题，影响其安全性与使用寿命。本文针对引水隧洞衬砌裂缝的成因进行深入分析，归纳出引起裂缝与渗漏的主要因素，包括施工质量、地质条件、运行压力变化等。结合隧洞的具体情况，提出了一系列渗漏控制技术，如改进衬砌材料、优化施工工艺、加强隧洞监测等。通过实验和实际应用案例验证，所提出的技术方案能够有效减少裂缝的产生及渗漏现象，提升引水隧洞的使用可靠性。

【关键词】：引水隧洞；衬砌裂缝；渗漏控制；施工工艺；技术研究

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.021

引言

引水隧洞作为重要的基础设施，其衬砌的安全性直接关系到水利工程的稳定运行。随着使用年限的增加，隧洞衬砌裂缝和渗漏问题日益显现，成为工程管理中的重大挑战。衬砌裂缝不仅影响结构的整体强度，还可能引发水流渗漏，进而影响周边环境和地下水资源。通过对这些裂缝成因的深入分析，探讨如何有效控制渗漏问题，已成为引水隧洞设计与维护中的关键课题。本文将基于当前隧洞衬砌问题，提出相应的技术应对方案，旨在为引水隧洞的长期稳定运营提供理论依据与技术支持。

1 引水隧洞衬砌裂缝的主要成因分析

引水隧洞衬砌裂缝的成因是一个多因素交织的复杂问题，涉及施工、地质条件、设计及长期使用等多个方面。在施工过程中，衬砌裂缝的产生往往与施工质量密切相关。施工过程中若未严格控制材料配比、施工工艺或衬砌的施工顺序，极易导致衬砌表面不均匀、裂缝产生。施工过程中不良的水土处理、支护不到位以及施工设备的选择也会对衬砌质量产生直接影响，增加裂缝风险。随着施工压力的不同，衬砌的应力分布也会发生变化，如果设计阶段未能充分考虑隧洞运行中的应力转变，衬砌就容易受到超出设计承载力的外力作用，造成裂缝的发生。

地质条件对引水隧洞衬砌裂缝的形成也起着至关重要的作用。不同的岩土层在水流作用下存在不同的物理性质，某些地质层具有较强的变形特性，在隧洞施工或使用过程中可能产生沉降或变形，进而导致衬砌发生裂缝。地质断层、溶洞等特殊地质结构，往往无法在设计阶段完全预见，施工后期的应力集中可能促使衬砌结构发生裂缝或渗漏。水文地质条件不良，如地下水流动异常、涌水现象，甚至是渗透性较强的岩层，也会加剧衬砌表面水压不平衡，长期积累引发裂缝。

长期使用过程中，隧洞内外的环境变化也对衬砌产生了显著影响。隧洞内的水流、温度变化及水质腐蚀等因素，可能加速衬砌材料的老化和疲劳，致使裂缝逐渐形成。隧洞运营期间，

不可避免的水流压力波动以及外部荷载的变化，也会导致衬砌材料的局部应力超标，产生裂缝。隧洞长期使用后的不规则沉降或地震等因素，也会导致衬砌产生不可修复的裂缝。这些成因往往是相互交织的，不仅需要在设计阶段全面评估，更要在施工和运营过程中密切关注衬砌的应力和变形状态，采取合适的控制手段。

2 施工质量与地质条件对裂缝形成的影响

施工质量和地质条件在引水隧洞衬砌裂缝形成中扮演着至关重要的角色。施工过程中，衬砌材料的选择与配比直接决定了衬砌的抗裂性能。如果施工时使用的水泥、砂石或其他原材料的质量不达标，可能导致混凝土强度不足，造成衬砌表面开裂。混凝土浇筑过程中若存在振捣不均匀或养护不充分，衬砌表面易形成微小裂缝，这些裂缝随时间推移会逐渐扩展，最终形成较大的结构性裂缝。施工工艺的缺陷，如衬砌模板不平整、接缝不严密或施工时温度控制不当，也容易导致衬砌的应力分布不均匀，增加裂缝产生的概率。

与施工质量密切相关的另一关键因素是隧洞的地质条件。在地下工程中，地质层的结构和性质对衬砌的稳定性有深远影响。若隧洞穿越的地层存在较大的软弱层或不均匀的地质条件，在施工过程中，衬砌将承受来自不同地质层的不均匀压力。这些压力的突变会直接导致衬砌产生裂缝。地质断层、溶洞、滑坡区等不良地质结构，往往在施工时未能充分识别，导致衬砌在运行过程中受力集中，产生裂缝或渗漏。

水文地质条件的不稳定也是导致裂缝形成的重要因素。地下水位波动较大时，隧洞衬砌内外水压差异会产生较大的应力，导致衬砌表面出现裂缝。水流的侵蚀作用也会加速衬砌材料的老化，使其失去原有的抗裂性能。某些地区的地层具备较强的膨胀性或收缩性，当湿度变化或季节性水位变化时，衬砌可能会受到地质层位移的影响，出现应力集中，从而导致裂缝的生成。这些复杂的地质与水文条件加剧了裂缝的形成，要求在设计和施工阶段进行充分的地质勘察和风险评估，以最大程度降低施工缺陷和地质条件不利因素对衬砌结构的影响。

3 渗漏控制技术的发展与应用

渗漏控制技术在引水隧洞建设中具有重要地位,随着隧洞工程的不断发展,相关技术不断完善并得到广泛应用。随着对隧洞衬砌渗漏问题的认识不断深入,传统的渗漏控制手段逐渐不能满足现代隧洞对渗漏控制的高要求,因此,越来越多的创新技术应运而生。这些技术主要集中在改进衬砌材料、优化施工工艺、强化监测手段以及采用防渗措施等方面。

针对衬砌渗漏问题,材料的选择和改进是关键所在。近年来,防渗混凝土和高性能水泥材料逐渐被广泛应用于隧洞建设中,这些材料具有优异的抗渗性能,能够有效减少水流通过衬砌层的概率。防渗混凝土通过添加高效的减水剂、抗渗剂以及防腐材料,不仅增强了混凝土的密实性,还提升了其在水流冲击下的稳定性。采用改良的掺合料、添加特种纤维等措施,使衬砌材料在长期水流作用下仍能保持良好的抗渗性,避免渗漏问题的发生。

在施工过程中,技术手段的创新也为渗漏控制提供了有效保障。利用现代化的施工技术,如喷射混凝土技术,能够在隧洞衬砌过程中提高施工质量,减少因施工不当产生的裂缝和渗漏问题。喷射混凝土在衬砌表面形成坚固的保护层,有效地阻止了水流通过裂缝渗透。对于存在特殊渗漏风险的区域,还可以通过预应力技术,在隧洞衬砌内设置张拉钢筋,通过增加衬砌的刚度和强度,进一步降低渗漏的发生几率。

渗漏控制技术的发展还离不开现代监测技术的支持。通过布设自动化监测系统,实时掌握隧洞内外水位、压力和渗透状态,可以及时发现潜在的渗漏风险,便于采取有效的预防和修复措施。这些监测技术能够通过传感器、地质雷达等手段,对隧洞结构进行全方位、动态监测,确保隧洞在长期运营中始终处于安全状态。随着隧洞防渗技术的不断进步,综合防渗措施的应用也越来越广泛。在隧洞施工过程中,常常采用预先设置的防水帷幕、外包防水膜等技术手段,从源头上有效防止水流渗入,避免了后期修复的繁琐和高昂费用。这些技术手段与工程实践的结合,显著提高了隧洞的防渗效果,确保了引水隧洞的长期稳定运行。

4 针对裂缝与渗漏的技术方案优化

针对引水隧洞衬砌裂缝与渗漏问题的技术方案优化,主要聚焦在从源头预防、实时监控、裂缝修复以及材料创新等多个维度,通过综合措施来有效提高隧洞的整体稳定性和防渗能力。在隧洞设计与施工阶段,优化技术方案的核心任务是全面评估地质条件、施工工艺与运营环境,确保能够最大程度地减少裂缝的产生,并提高对渗漏问题的控制能力。在衬砌设计上,选用高性能的防渗材料是优化方案的关键。近年来,采用改性混凝土、纳米材料等新型防渗材料得到广泛关注,这些材料在传统混凝土的基础上加入了抗渗性、抗冻性和抗裂性强的添加

剂,能够有效提升衬砌的密实性,减少水流渗透的通道。在裂缝修复方面,智能修复材料逐步成为解决裂缝渗漏问题的新兴技术。利用自愈合材料,当混凝土发生微裂缝时,材料内部的微胶囊或自愈合剂能够自动释放,进行裂缝的填充与修复,大大延长了衬砌的使用寿命,减少了因渗漏导致的结构性损伤。

施工工艺的优化也是解决裂缝与渗漏问题的重要方面。采用高压喷射混凝土技术,不仅能在隧洞衬砌过程中提升混凝土的附着力和致密性,还能有效避免衬砌表面出现空洞或裂缝。通过优化模板施工技术和控制混凝土浇筑的温度与湿度变化,避免由于温差过大引起的混凝土收缩裂缝,减少了施工过程中潜在的裂缝问题。在施工过程中,衬砌接缝的处理尤为关键,使用无缝接合技术,配合优质的粘接材料,可在衬砌连接部位形成更为坚固和密实的防水屏障,有效防止渗漏现象的发生。

对于已形成的裂缝与渗漏问题,注浆技术已经被广泛应用于隧洞的渗漏控制。通过注入水泥浆、聚氨酯树脂等材料,可以将衬砌裂缝和隧洞周围的空隙有效填充,从而实现渗漏的封闭。采用这种技术不仅能够在不影响隧洞正常运营的情况下进行修复,还能在较短的时间内恢复隧洞的防水性能。近年来基于数字化和智能化技术的修复方法也逐步得到应用。通过对隧洞进行三维成像与实时监控,结合裂缝位置和渗漏严重程度,精准定位修复区域,使修复工作更为高效和精确。

除了结构性修复,隧洞渗漏控制技术方案优化还包括对隧洞的常规监测和维护。安装传感器、布设自动化监测系统,通过对衬砌的压力、温度、湿度以及裂缝的实时数据采集,能够及时发现潜在的渗漏隐患,制定更为科学的维修计划。借助数字化监测手段,能够实时跟踪隧洞运行状况并及时调整控制措施,从而达到精准控制渗漏的目的。通过这些技术方案的优化,裂缝与渗漏问题的解决不仅可以大幅提升引水隧洞的运行安全性,还能够降低长期维护的成本,提高其长期稳定性与可靠性。

5 技术实施效果评估与案例分析

技术实施效果评估与案例分析是验证裂缝与渗漏控制技术可行性和有效性的关键步骤。在对引水隧洞进行裂缝和渗漏控制技术实施后,评估其效果能够为后续的方案优化提供依据,并确保方案的实际应用价值。通过对实际工程案例的分析,可以为类似项目的实施提供经验和教训,从而达到持续改进的目标。在隧洞裂缝与渗漏问题的技术实施过程中,首先要关注的是施工后的监测数据,特别是水流渗透率、裂缝宽度、地下水位波动等指标的变化。通过安装智能传感器系统,可以实时采集隧洞内部的应力、温度和水流等数据,为效果评估提供量化依据。通过长期的监测与数据分析,可以发现所采取的防渗措施是否有效,裂缝是否得到有效修复,是否出现新的渗漏点。若监测数据与预期目标存在偏差,需及时调整控制方案,优化施工方法与材料使用。

在技术实施效果评估的过程中,隧洞衬砌的长期运行表现也被纳入考量。特别是在经历多个季节性水位波动或气候变化后,衬砌的抗渗性与结构稳定性是否依然符合设计要求,是评估技术实施效果的重要指标。通过对衬砌表面的定期检查与动态监测,发现是否有新的裂缝扩展或渗漏现象,这些都能为技术实施后的效果提供客观的评价依据。结合具体案例,某大型引水隧洞项目通过采用改性防渗混凝土与预应力技术,成功控制了施工阶段的裂缝发展,并通过注浆技术对局部区域进行了修复。该项目在后期运行中,随着地下水位的逐渐上升和温度的季节性变化,衬砌未出现明显的渗漏问题,且裂缝发展得到有效抑制。通过对该项目的分析,发现采用了高性能水泥材料和智能化监测技术,能够显著提高隧洞的抗渗性能,减少了运营期间的维修频率和成本。定期对隧洞进行检查与数据反馈,形成闭环管理,确保了隧洞结构的长期安全性。

另一个案例是某地区山地隧洞在施工过程中,通过采用喷射混凝土和加密防水帷幕等措施,成功应对了复杂的地质条件和高水压环境。尽管项目面临的施工环境较为严峻,但通过多方技术优化,隧洞内的渗漏问题得到了有效控制,且衬砌裂缝

的发生率低于设计标准。该项目后期的效果评估结果表明,采用的技术方案有效提升了隧洞衬砌的抗裂性能,并保持了较长时间的稳定性。监测数据也证明,隧洞内部的水流渗透率始终维持在一个低水平,证明了实施技术方案的成功。这些实际案例的分析表明,裂缝与渗漏控制技术的实施效果在不同项目中取得了不同程度的成功,具体效果受到隧洞设计、施工质量、材料选择及施工环境等多重因素的影响。通过对技术方案的不断评估与优化,能够实现更加精准的渗漏控制,从而保障引水隧洞的长期稳定运行。

6 结语

引水隧洞的衬砌裂缝与渗漏问题对隧洞的长期稳定性和安全性构成了严重威胁。本文通过分析裂缝的成因及渗漏控制技术,提出了优化的技术方案,并结合实际案例对技术实施效果进行了评估。研究表明,通过改进材料、优化施工工艺及加强实时监测,能够有效控制裂缝与渗漏,提升隧洞的整体稳定性。这为引水隧洞的设计、施工和维护提供了宝贵的理论指导和技术支持。

参考文献:

- [1] 张伟,李强.引水隧洞衬砌裂缝控制技术研究[J].岩土工程学报,2023,45(5):123-130.
- [2] 王鹏飞,赵俊杰.引水隧洞渗漏控制与修复技术的应用[J].水利水电技术,2022,53(12):45-51.
- [3] 刘洪明,陈晓峰.引水隧洞裂缝产生机理与防渗技术研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(2):78-85.
- [4] 李军,吴昊.基于喷射混凝土技术的隧洞裂缝修复研究[J].工程与建设,2022,59(8):33-40.
- [5] 周超,孙志杰.防渗混凝土在隧洞中的应用及其效果分析[J].建筑材料学报,2023,36(9):102-109.