

复杂地质条件下隧道施工技术的优化与创新

刘志勤

江西省路桥隧道工程有限公司, 江西上饶, 334300;

摘要: 复杂地质条件是隧道施工中常见的挑战, 影响施工安全、进度和质量。本文探讨了复杂地质条件下隧道施工技术的优化与创新, 分析了复杂地质条件对隧道施工的影响及其应对策略。从施工技术优化的角度, 提出了超前地质预报技术的应用、施工方法的合理选择和施工参数的动态调整; 从技术创新的角度, 探讨了新型支护技术、注浆加固技术和智能监测技术的应用; 从施工管理的角度, 阐述了施工组织设计的优化、应急预案的完善和信息化管理的实施; 并从理论与实践结合、多学科交叉研究、国际合作与经验交流三个方面展望了未来发展方向。研究表明, 通过技术优化与创新, 能够有效应对复杂地质条件下的隧道施工挑战, 保障施工安全和质量, 提高施工效率。

关键词: 复杂地质条件; 隧道施工; 技术优化; 技术创新; 施工管理

DOI: 10.64216/3104-9664.25.03.038

引言

隧道工程作为现代交通基础设施的重要组成部分, 在复杂地质条件下的施工面临着诸多技术难题。复杂地质条件包括软弱围岩、断层破碎带、岩溶、高地应力、地下水丰富等, 这些条件增加了施工风险, 可能导致塌方、突水突泥等灾害。传统的隧道施工技术在复杂地质条件下往往面临局限性, 需要通过优化与创新来提高施工的安全性、可靠性和效率。近年来, 随着科技的不断进步, 隧道施工技术在地质预报、施工方法、支护技术等方面取得了显著进展。本文旨在探讨复杂地质条件下隧道施工技术的优化与创新路径, 为隧道工程建设提供理论支持和实践指导。

1 复杂地质条件对隧道施工的影响

1.1 施工安全风险升高

复杂地质环境是威胁隧道施工安全的重要因素。软弱围岩与断层破碎带自承能力较弱, 易发生塌方与变形, 导致施工人员与设备面临较高风险。岩溶发育区域的空洞与地下暗河可能诱发突水、涌泥灾害, 瞬间淹没作业面, 对人员和设备造成严重损害。高地应力区域的岩爆现象可对施工人员和设备形成剧烈冲击, 损毁支护结构。同时, 地下水的渗透与侵蚀作用也会进一步削弱围岩稳定性, 从而加剧施工安全威胁。因此, 在复杂地质环境中, 保障施工安全是首要任务, 必须采取相应的技术手段与管理措施加以应对。

1.2 施工工期延误

复杂地质条件容易导致隧道施工进度受阻, 主要表现为施工过程中频繁的中断及施工方法的反复调整。在软弱围岩与断层破碎带区域, 开挖速度通常受到严格限制, 往往需要采取加强支护、缓慢掘进等方式以确保安全。岩溶地区处理空洞与应对突水涌泥后的清理工作需要耗费大量时间与资源, 严重影响工程推进。高地应力区域的岩爆防治措施也会增加施工的复杂程度与时间成本。此外, 地下水的控制与排放作业会进一步延长施工周期。因此, 如何在复杂地质条件下有效控制施工进度, 是隧道施工技术优化的重要方向。

1.3 施工质量控制的复杂性增加

复杂地质条件会明显增加隧道施工质量控制的难度, 主要体现在围岩变形与支护结构稳定性方面。软弱围岩与断层破碎带的持续变形易导致衬砌受力不均, 影响结构质量。岩溶区段如空洞处理不当, 可能造成衬砌局部应力集中, 甚至引发开裂。高地应力区域的岩爆现象会对衬砌结构造成冲击破坏, 损害其整体性与耐久性。同时, 地下水的侵蚀作用也会降低衬砌的抗渗能力和使用寿命。因此, 在复杂地质条件下, 施工质量控制成为关键环节, 需通过优化施工工艺与加强过程管理来保障工程质量。

2 复杂地质条件下隧道施工技术的优化

2.1 超前地质预报技术的使用

超前地质预报是复杂地质环境中隧道施工的重要技术支持。借助该技术可在掘进前获取前方地质信息, 为调整施工方案与安全措施提供参考。常用预报手段包

括地质雷达、地震波反射法及超前钻探等。地质雷达依靠电磁波在岩体中的传播规律，快速探明前方岩体结构及含水状态。地震波反射法通过分析岩体中地震波的反射特征，判断前方地质界面与岩体性质。超前钻探能直接获取前方岩芯，为地质判断提供可靠样本。综合利用多种预报技术，有助于提升地质预报的精准性与可信度，为隧道施工提供有效依据。

2.2 施工方法的科学选取

在复杂地质条件下，科学选用施工方法是保障工程顺利推进的关键手段。针对软弱围岩与断层破碎带，新奥法（NATM）和浅埋暗挖法较为常用。新奥法注重围岩自承能力与及时支护，通过控制开挖进尺与及时实施初期支护，可有效抑制围岩变形。浅埋暗挖法适用于埋深较浅的隧道，借助分步开挖与支护，有助于控制地表沉降。在岩溶发育地区，钻爆法与盾构法应用较广。钻爆法通过优化爆破参数，可处理溶洞与暗河等地质问题；盾构法则依靠掘进与注浆加固，应对岩溶区的复杂地质情况。在高地应力地段，全断面隧道掘进机（TBM）是较为先进的施工方式，其强大的推进与支护能力有助于降低岩爆风险。合理选择施工方法，能够有效应对各类复杂地质条件带来的施工难题。

2.3 施工参数的动态调控

在复杂地质条件下，动态调控施工参数是保障隧道施工安全与质量的重要环节。施工过程中，可依据超前地质预报与现场监测数据，及时调整相关施工参数，以控制施工风险。例如，在软弱围岩和断层破碎带区域，根据围岩变形监测结果，适时调整开挖步距与支护参数，有助于控制围岩稳定。在岩溶区段，结合超前预报信息优化钻爆参数与注浆加固方案，可有效应对溶洞与暗河问题。在高地应力区域，根据岩爆监测数据调整TBM推进速度与支护措施，可降低岩爆带来的安全隐患。通过对施工参数的动态调整，可提高施工过程的安全性、可靠性，保障工程进度与质量。

3 复杂地质条件下隧道施工技术的创新

3.1 新型支护结构的使用

在复杂地质条件下，新型支护技术是一种重要的技术创新。针对软弱围岩和断层破碎带，常采用复合式支护结构。该结构结合锚杆、喷射混凝土和钢拱架等多种支护方式，能够有效增强围岩的整体稳定性。在岩溶发育地区，注浆锚杆支护是一种创新性手段。它通过在锚杆孔内注入浆液，实现对围岩的有效加固，从而提升锚

杆的抗拉拔能力。对于高地应力地段，自适应支护技术具有明显优势。该技术通过设置可调节支撑装置，可依据围岩变形情况自动调整支护压力，有效缓解高地应力引起的岩爆风险。新型支护技术的应用有助于提升隧道施工的安全性和工程可靠性。

3.2 注浆加固技术的改进

注浆加固是在复杂地质条件下进行隧道施工的关键技术之一。在岩溶发育区域，高压注浆技术是一种创新应用。该技术利用高压注入浆液，能够有效填充溶洞和裂隙，增强岩体的整体稳定。在软弱围岩和断层破碎带中，双液注浆技术具有重要作用。该技术通过同时注入两种性能不同的浆液，能够迅速形成高强度固结体，有效抑制围岩变形。在高地应力区域，智能注浆技术展现出其应用价值。该技术结合传感器与自动控制系统，可根据围岩变形和注浆压力自动调节注浆参数，优化注浆效果。通过注浆加固技术的创新应用，能够更有效应对复杂地质环境下的施工挑战。

3.3 智能监测技术的使用

智能监测技术是在复杂地质条件下开展隧道施工的重要创新手段。通过布设传感器与自动化监测系统，能够实时获取隧道施工过程中围岩变形、支护结构受力、地下水位变化等关键信息。例如，光纤传感器可用于实时监测围岩变形与应力变化，为施工参数调整提供依据。自动化监测系统通过数据采集与分析，能够实时预警潜在安全风险，有助于保障施工安全。在岩溶发育区，智能监测系统可用于实时追踪溶洞变形与地下水位动态，为注浆加固和施工方案优化提供参考。在高地应力区域，智能监测系统能够实时评估岩爆发生概率与强度，为人员安全撤离和支护结构优化提供支持。智能监测技术的应用，有助于提高隧道施工的安全性与可控性，从而保障工程进度与施工质量。

4 复杂地质条件下隧道施工管理的优化

4.1 施工组织设计的优化

施工组织设计是隧道施工管理的重要环节。在复杂地质条件下，施工组织设计需要充分考虑地质条件的复杂性和施工风险。通过优化施工组织设计，可以合理安排施工进度和资源分配，减少施工风险。例如，在软弱围岩和断层破碎带中，施工组织设计需要合理安排开挖步距和支护时间，确保施工安全。在岩溶地区，施工组织设计需要合理安排注浆加固和溶洞处理的时间，确保施工进度。在高地应力区域，施工组织设计需要合理安

排岩爆防治和人员撤离的时间,确保施工安全。通过施工组织设计的优化,可以提高隧道施工的效率 and 安全性。

4.2 应急预案的完善

应急预案是隧道施工安全管理的重要组成部分。在复杂地质条件下,应急预案需要充分考虑各种可能的灾害情况,如塌方、突水突泥、岩爆等。通过完善应急预案,可以确保在灾害发生时能够迅速采取有效的应对措施,减少人员伤亡和财产损失。例如,在岩溶地区,应急预案需要包括突水突泥的应急处理措施,如快速封堵、人员撤离和排水方案。在高地应力区域,应急预案需要包括岩爆的应急处理措施,如人员撤离、支护结构加固和设备保护。通过应急预案的完善,可以提高隧道施工的安全性和可靠性。

4.3 信息化管理的实施

信息化管理是现代隧道施工管理的重要发展方向。通过信息化管理,可以实现施工过程的实时监控和数据共享,提高施工管理的效率和科学性。在复杂地质条件下,信息化管理可以通过安装传感器和自动化监测系统,实时收集施工过程中的关键数据。通过数据共享和分析,可以为施工决策提供科学依据。例如,通过信息化管理,可以实时监测围岩变形和支护结构受力情况,为施工参数的调整提供依据。通过数据共享,可以实现施工团队之间的信息交流和协同工作,提高施工管理的效率。

5 复杂地质条件下隧道施工技术的未来发展方向

5.1 理论与实践结合

未来,复杂地质条件下隧道施工技术的发展需要加强理论与实践的结合。通过理论研究,可以为施工技术的创新提供科学依据。通过实践应用,可以验证理论的正确性和实用性。例如,通过开展复杂地质条件下的隧道施工理论研究,可以深入理解围岩变形机制和支护结构受力特性。通过在实际工程中的应用,可以验证新型施工技术和支护结构的有效性。通过理论与实践的结合,可以推动隧道施工技术的不断创新和发展。

5.2 多学科交叉研究

复杂地质条件下隧道施工技术的发展需要多个学科的交叉研究。隧道施工涉及地质学、岩土力学、结构力学、材料科学等多个学科领域。通过多学科交叉研究,可以综合应用各学科的理论和方法,为隧道施工技术的创新提供支持。例如,通过地质学和岩土力学的研究,

可以深入了解复杂地质条件下的围岩特性。通过结构力学和材料科学的研究,可以设计出更加合理的支护结构和施工材料。通过多学科交叉研究,可以推动隧道施工技术的全面创新和发展。

5.3 国际合作与经验交流

复杂地质条件下隧道施工技术的发展需要加强国际合作与经验交流。通过国际合作,可以共享先进的施工技术和管理经验,推动隧道施工技术的国际化发展。通过经验交流,可以学习其他国家在复杂地质条件下隧道施工的成功经验和失败教训,为我国隧道施工技术的发展提供参考。例如,通过与发达国家的合作,可以引进先进的施工设备和技术,提高我国隧道施工的技术水平。通过与周边国家的经验交流,可以学习他们在岩溶地区和高地应力区域的施工经验,为我国类似地区的隧道施工提供借鉴。

6 总结

本文对复杂地质条件下隧道施工技术的优化与创新进行了系统研究。通过分析复杂地质条件对隧道施工的影响,提出了施工技术的优化方法,包括超前地质预报技术的应用、施工方法的合理选择和施工参数的动态调整;探讨了技术创新的方向,涵盖新型支护技术、注浆加固技术和智能监测技术的应用;阐述了施工管理的优化措施,包括施工组织设计的优化、应急预案的完善和信息化管理的实施;并展望了未来发展方向,包括理论与实践结合、多学科交叉研究、国际合作与经验交流。研究表明,通过技术优化与创新,能够有效应对复杂地质条件下的隧道施工挑战,保障施工安全和质量,提高施工效率。

参考文献

- [1] 刘成. 复杂地质条件下隧道施工技术优化及成效验证[J]. 四川水泥, 2025, (12): 246-247+250.
- [2] 李玉亚. 复杂地质条件下隧道施工安全风险动态评估与管控[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(11): 150-152.
- [3] 张松. 复杂地质条件下的浅埋隧道施工技术[J]. 工程技术研究, 2025, 10(20): 74-76.
- [4] 方绍君. 复杂地质条件下公路隧道施工技术要点研究[J]. 运输经理世界, 2025, (16): 93-95.
- [5] 陈怡昕. 复杂地质条件下隧道施工关键技术研究与应用[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(24): 79-81.