

环境,减少突发地质灾害对施工进度和安全的影响。

### 4.3 智能化监控与自动化控制

随着技术的进步,智能化监控与自动化控制系统已广泛应用于高铁隧道施工中,为施工过程中的围岩变形控制提供了新的解决方案。通过部署智能化监测系统,可以实时采集围岩的变形数据,如位移、应力等参数,自动反馈围岩的状态,帮助施工团队在第一时间发现潜在风险。这些数据经过分析处理后,可以为施工方案调整提供依据,例如改变支护方案或调整开挖顺序,从而有效降低围岩变形的风险。同时,自动化控制系统能够根据实时监测数据,自动调整施工设备的运行参数,如加速或减缓开挖进度,自动控制支护结构的施加力度,确保支护结构始终处于最佳状态。这种系统不仅提高了施工效率,还显著提升了施工过程中的安全性,能够减少人为操作错误和环境变化带来的不确定性。智能化监控与自动化控制的结合,为高铁隧道施工提供了更加精准和高效的管理手段。

## 5 案例分析与实践经验

### 5.1 案例背景与工程概况

某高铁隧道项目位于地质条件复杂的软弱围岩区,该地区的围岩以粘土岩、粉土及碎石土为主,地下水丰富,岩体的稳定性差,给隧道施工带来了较大挑战。在初期的地质勘察阶段,工程团队已发现该区域存在较强的地质裂隙、松散层及高水位,这些因素严重影响了围岩的稳定性,并导致了施工过程中围岩变形的问题。为了应对这一难题,项目团队综合考虑了围岩的力学性质、隧道的断面尺寸以及施工环境,最终决定采用锚喷支护技术作为主要支护方案。锚喷支护技术以其良好的适应性、施工效率和较低的成本优势,成为解决软弱围岩地区隧道施工问题的有效手段。此外,为确保施工过程中围岩变形的可控性,工程团队还部署了多项实时监测手段,包括光纤传感技术、全站仪、地下水水位监测仪等设备,以实现围岩变形、支护结构受力情况的动态监控。

### 5.2 支护结构的选择与设计

针对该项目的软弱围岩特性,工程团队首先对围岩进行详细的力学分析和稳定性评估。通过对围岩的抗剪强度、弹性模量等物理力学性质的测试,确定了该地区围岩的变形特性。在此基础上,结合隧道的施工要求,最终选择了锚喷支护结构。这种支护结构通过钢筋锚杆与喷射混凝土的结合,形成了一个综合的加固体系,既能够有效承受围岩的变形压力,又具备良好的抗渗能力,适合该地区复杂的地质环境。为了进一步提高支护结构的稳定性与经济性,工程团队采用了现代数值模拟技术进行支护设计优化。通过对隧道围

岩变形过程的三维数值模拟,优化了锚杆的布置方式及喷射混凝土的厚度,确保了支护结构在施工过程中能够承受围岩的最大变形,而不会发生失稳现象。此外,选择了高强度的钢筋网与聚合物纤维增强混凝土,减少了支护结构的重量和施工难度,提高了施工效率,降低了成本。

### 5.3 施工过程中的变形控制

在隧道施工过程中,围岩的变形往往是影响工程进度和安全的关键因素。为此,工程团队在施工过程中对围岩变形进行实时监控,并根据监测数据及时调整施工方案。首先,团队通过安装多种监测仪器,如地表变形监测仪、围岩压力传感器等,定期记录围岩的变形情况,确保能够及时发现潜在的风险。通过对监测数据的实时分析,施工人员能够精准了解围岩的变形趋势,并根据实际情况进行调整。针对软弱围岩的变形特点,工程团队在开挖过程中采用了小断面分段开挖法。该方法通过减小每次开挖的断面积,降低了围岩的扰动,从而有效地控制了围岩的变形幅度。在小断面开挖的基础上,支护结构在开挖完成后迅速进行施工,避免了围岩长时间暴露在外界环境中,从而进一步减少了围岩的变形。此外,施工团队还采用了逐步加固法,即在每一阶段的施工后对支护结构进行加固处理,以应对围岩逐渐发生的变形,确保隧道的稳定性与施工安全。通过这些有效的变形控制措施,施工过程中的围岩变形得到了较好的控制,为高铁隧道的顺利完成提供了保障。

## 6 结语

高铁隧道的围岩变形控制与支护结构优化设计是保障隧道施工安全与稳定的关键因素。通过合理选择支护结构与优化设计,结合现代化的施工技术与监测手段,可以有效控制围岩变形,确保高铁隧道的顺利建成。未来,随着新材料、新技术的发展,支护结构的设计与优化将更加精细化、智能化,进一步提升高铁隧道的施工效率与安全性。

### 参考文献

- [1] 张猛.超深埋高铁隧道变形机理及控制对策研究[D].安徽建筑大学,2025.
- [2] 何成臣.超大断面地铁车站围岩与支护结构力学行为分析及变形控制研究[D].重庆交通大学,2025.
- [3] 李浩.软岩大断面高铁隧道施工变形控制及稳定性研究[D].南京林业大学,2021.
- [4] 李海洋.高速公路软弱围岩隧道大变形数值模拟与应用研究[D].中国地质大学,2007.
- [5] 杨路明.高铁隧道缓倾层状围岩变形特征及防治技术研究[D].石家庄铁道大学,2024.

# Research on the Technology and Practice of Durability Improvement of High-speed Railway Tunnel Lining Structure

Ningning He

China Railway 12th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710024, China

## Abstract

With the rapid expansion of China's high-speed rail network, high-speed rail tunnels as critical transportation infrastructure require durable lining structures to ensure long-term operational safety. These structures face erosion from various external environments including water, chloride salts, and acid-alkali conditions, which may cause cracks and leakage issues compromising tunnel stability. This study analyzes key factors affecting the durability of high-speed rail tunnel linings and explores technical approaches to enhance their durability, with a focus on material selection, structural design optimization, and innovative construction techniques. By integrating domestic and international research findings with engineering practices, the paper proposes effective measures to improve tunnel lining durability. The research demonstrates that adopting new materials, optimizing structural designs, and upgrading construction techniques can significantly enhance lining durability, extend tunnel service life, and ensure long-term safe operation of high-speed rail lines.

## Keywords

high-speed railway tunnel; lining structure; durability; technology improvement; material selection

## 高铁隧道衬砌结构耐久性提升技术与实践研究

何宁宁

中铁十二局集团第四工程有限公司, 中国·陕西 西安 710024

## 摘要

随着中国高铁网络的迅速扩展, 高铁隧道作为重要的交通基础设施, 其衬砌结构的耐久性对隧道的长期安全运行至关重要。衬砌结构面临水、氯盐、酸碱等多种外部环境的侵蚀, 容易发生裂缝、渗漏等问题, 影响隧道的稳定性。本文通过分析影响高铁隧道衬砌结构耐久性的关键因素, 探讨了提高其耐久性的技术与方法, 重点分析了材料选择、结构设计优化、施工工艺创新等方面。结合国内外的研究成果与工程实践, 提出了提升高铁隧道衬砌结构耐久性的有效措施。研究结果表明, 采用新型材料、优化结构设计、提升施工工艺可显著提高隧道衬砌的耐久性, 延长隧道的使用寿命, 保障高铁线路的长期安全运行。

## 关键词

高铁隧道; 衬砌结构; 耐久性; 技术提升; 材料选择

## 1 引言

随着中国高速铁路的快速发展, 隧道衬砌结构的耐久性问题逐渐成为影响隧道长期安全和稳定的关键因素。衬砌结构在施工和使用过程中面临水、氯盐、酸碱气体等外部环境的侵蚀, 导致老化、裂缝、渗漏等问题, 影响隧道功能。为提升衬砌结构的耐久性, 优化材料选择、加强结构设计和创新施工技术成为有效的解决途径。近年来, 材料科技、结构设计和施工技术的进步, 为提高衬砌结构的耐久性提供了新的解决方案。本文将深入探讨影响衬砌耐久性的因素, 并提出具体的技术措施和案例分析, 以验证其在高铁隧道中的

应用效果。

## 2 高铁隧道衬砌结构耐久性影响因素分析

### 2.1 外部环境的影响

高铁隧道衬砌结构的耐久性在长期使用中受到地下水、土壤中的化学物质及外部气候等多重环境因素的影响。地下水渗透是最常见的腐蚀源之一, 水分的吸收会导致混凝土膨胀, 进而产生裂缝并加速钢筋锈蚀, 影响衬砌的稳定性。在沿海地区, 海水中的氯离子与钢筋发生反应, 导致钢筋腐蚀并降低其强度。此外, 工业区域的酸性气体(如二氧化硫、氮氧化物)会导致混凝土的腐蚀, 进一步减少衬砌的耐久性。为应对这些环境挑战, 设计和施工中需要采用防水防腐涂层、钢筋防腐处理及优化混凝土材料等技术, 确保衬砌结构的长期稳定性。

【作者简介】何宁宁(1995-), 男, 中国河南信阳人, 本科, 助理工程师, 从事土木工程研究。

## 2.2 衬砌材料的选择

衬砌材料是决定隧道衬砌结构耐久性的关键因素。传统混凝土由于其较高的孔隙率，易受水分和化学物质侵蚀，导致裂缝和腐蚀。高性能混凝土（HPC）通过改善密实性、抗渗性、抗裂性和抗腐蚀性，有效提高了衬砌的耐久性。聚合物改性混凝土增强了其抗水性和耐腐蚀性，特别适用于地下水丰富和腐蚀严重的环境。超高性能混凝土（UHPC）具有更强的抗压、抗渗透和抗腐蚀能力，能够抵御盐分、酸性气体等的侵蚀，极大增强了耐久性。同时，使用耐腐蚀钢筋和高强度钢筋进一步提升了结构的耐久性，确保衬砌结构在复杂环境中的稳定性。

## 2.3 施工质量与工艺

施工质量直接决定衬砌结构的耐久性。在施工过程中，混凝土浇筑、振捣、养护和钢筋防腐等环节需要严格把控。若混凝土浇筑不均匀或配比不当，易产生空隙或裂缝，这些缺陷加速水分和腐蚀性物质的渗透。为确保混凝土的均匀性和密实性，应采用精确的施工工艺，合理控制水灰比，采用精密振捣技术，减少孔隙率。同时，混凝土浇筑后需进行充分养护，避免因干缩导致的裂缝。钢筋的防腐处理同样关键，涂覆防腐涂层或使用耐腐蚀钢筋能够有效防止腐蚀，进一步提高衬砌的耐久性。通过严格控制施工质量，可大大增强隧道衬砌结构的长期稳定性和抗损坏能力。

## 3 提升高铁隧道衬砌结构耐久性的技术与方法

### 3.1 优化衬砌材料的选择

提升衬砌结构耐久性的首要措施是优化材料选择。传统混凝土由于其较高的孔隙率和较差的抗渗性能，容易受到水分和有害物质的侵蚀，导致钢筋锈蚀和混凝土老化，进而影响隧道的耐久性。高性能混凝土（HPC）通过改善混凝土的密实性、抗渗性、抗裂性以及抗腐蚀性，显著提高了结构的耐久性，能够有效防止水分、气体及其他有害物质的渗透，延长使用寿命。聚合物改性混凝土，尤其适用于长期受水侵蚀的隧道衬砌，能够增强混凝土的抗水性和抗腐蚀性，减少水分渗透。超高性能混凝土（UHPC）以其极高的抗压强度和抗渗透性，在恶劣环境下展现出优异的耐久性。此外，使用高强度钢筋和耐腐蚀钢筋能够有效提升衬砌结构的抗拉强度，减少钢筋锈蚀的风险，从而增强其整体耐久性。通过选择这些高性能材料，能够显著提升衬砌结构的耐久性，并减少长期维护和修复的需求。

### 3.2 优化衬砌结构设计

衬砌结构设计对其耐久性有着重要影响。设计时，除了满足结构的承载能力要求外，还需要综合考虑外部环境对衬砌的影响。增加衬砌层的厚度是提升抗渗透性和抗腐蚀性的重要手段。通过加厚衬砌层，可以有效减少水分和有害物质的渗透，延长结构的使用寿命。此外，合理的混凝土配比，尤其是优化水泥、骨料和外加剂的配比，可以提高混凝土的

密实性、抗水性、抗冻性及抗腐蚀性。进一步通过合理设计裂缝控制，可以有效减小裂缝宽度，减少水分和化学物质的渗透，提升结构的耐久性。现代数值模拟技术的使用，使得设计师能够模拟围岩与衬砌的相互作用，预测结构变形与裂缝位置，从而优化设计参数，确保衬砌结构长期运行中的稳定性和耐久性。

### 3.3 创新施工工艺与技术

创新施工工艺对于提升衬砌结构耐久性至关重要。在施工过程中，通过采用高效的浇筑、振捣和养护技术，能够确保混凝土的密实性和均匀性，减少空隙和裂缝的生成。连续浇筑技术能够消除施工接缝，从而防止水分和腐蚀物质渗透到混凝土内部，增强结构的连续性和整体性。精密振捣技术则可以有效排除混凝土中的气泡和空隙，进一步提高混凝土的密实性，增强其抗渗性和抗裂性。在养护过程中，通过控制适宜的湿度和温度，并延长养护周期，可以促进混凝土水化反应的充分进行，确保其达到预期的强度和耐久性。随着技术的发展，实时监控技术在施工现场的应用越来越广泛，通过实时监测施工过程中的各项参数，能够及时发现潜在问题并进行调整，确保每一环节的施工质量，从而大大提高衬砌结构的耐久性。

## 4 案例分析与实践经验

### 4.1 案例背景与工程概况

某高铁隧道项目位于地下水丰富且土壤腐蚀性较强的区域。该区域地下水位高，土壤的腐蚀性物质（如氯盐）对隧道结构带来了较大的挑战。在施工过程中，项目团队面临水位高、土壤强烈腐蚀等问题，导致衬砌结构的耐久性容易受到威胁。为了有效应对这些挑战，项目团队从材料选用和施工工艺两个方面入手，提出了一系列创新解决方案。首先，为了提高隧道衬砌的抗水性和抗腐蚀性，团队选用了高性能混凝土，这种混凝土不仅具有良好的强度，还具有更强的抗渗透性，能够有效避免水分对衬砌的侵蚀。此外，团队还在衬砌表面涂覆了防水防腐涂层，进一步增强了结构的防水和抗腐蚀性能。施工过程中，项目团队采用了高精度的连续浇筑工艺，通过连续浇筑能够保证混凝土的整体性和密实性，避免了因施工接缝产生裂缝，从而减少了水分和化学物质的渗透风险。这一系列措施有效保障了衬砌结构的长期稳定性。

### 4.2 衬砌材料的选择与应用

在该高铁隧道项目中，衬砌材料的选择至关重要。为了应对地下水和腐蚀性物质的侵蚀，团队选用了聚合物改性混凝土和超高性能混凝土（UHPC）作为衬砌材料。这些新型混凝土材料具有极强的抗渗透能力和抗腐蚀性，能够有效增强隧道衬砌的耐久性。聚合物改性混凝土通过添加聚合物和其他添加剂，提高了混凝土的抗水性和密实性，减少了水分的渗透，从而有效延长了衬砌结构的使用寿命。超高性能