 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9295

Optimization Design and Construction Technology Improvement of Drainage and Waterproofing System in High-speed Railway Tunnel

Shengcai Zhu

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

Abstract

High-speed railway tunnel projects are characterized by deep burial depths, extensive track lengths, and complex geological conditions, with highly developed groundwater systems. The rationality of drainage and waterproofing systems directly impacts tunnel structural safety, operational durability, and train safety. In practice, inadequate geological surveys, insufficiently targeted drainage designs, and suboptimal construction techniques have led to persistent issues such as water leakage, lining deterioration, and drainage system failures in some high-speed rail tunnels. Drawing on practical engineering experiences in tunnel construction and operation, this study systematically analyzes the causes of tunnel water hazards and the operational characteristics of drainage systems. Through optimization of design concepts, structural improvements, and construction process enhancements, it conducts in-depth research on drainage and waterproofing systems for high-speed rail tunnels. By systematically reviewing and analyzing key technical measures, the study proposes engineering-applicable optimization strategies, providing references for scientific design and high-quality construction of drainage and waterproofing systems in high-speed rail tunnels.

Keywords

high-speed railway tunnel; drainage and waterproofing system; optimized design; construction technology; durability

高铁隧道防排水体系优化设计与施工工艺改进

朱生财

中铁十二局集团第四工程有限公司，中国·陕西 西安 710024

摘　要

高速铁路隧道工程普遍具有埋深大、线路长、地质条件复杂等特点，地下水发育程度高，防排水体系的合理性直接关系到隧道结构安全、运营耐久性及行车安全性。在实际工程中，由于地质勘察不充分、防排水设计针对性不足以及施工工艺控制不到位等原因，部分高铁隧道仍存在渗漏水、衬砌病害和排水系统失效等问题。本文结合高铁隧道工程建设与运营实践，在系统分析隧道水害成因及防排水体系运行特点的基础上，从设计理念优化、结构构造完善及施工工艺改进等方面，对高铁隧道防排水体系进行深入研究。通过对关键技术措施的梳理与分析，提出具有工程适用性的优化思路，为高铁隧道防排水体系的科学设计与高质量施工提供参考。

关键词

高速铁路隧道；防排水体系；优化设计；施工工艺；耐久性

1 引言

随着中国高速铁路网络的快速发展，隧道工程在铁路线路中所占比例不断提高。高铁隧道对结构安全性、平顺性和耐久性要求极高，而地下水问题始终是影响隧道工程质量的重要因素之一。隧道渗漏水不仅会削弱衬砌结构耐久性，还可能引发冻害、轨道病害等一系列连锁问题，严重时甚至威胁行车安全。实践表明，防排水体系设计不合理或施工质量控制不到位，是导致隧道水害问题的主要原因。因此，针对高铁隧道工程特点，对防排水体系进行系统优化，并在施工阶段同步改进工艺与管理方式，对于提升隧道工程整体品质具有重要现实意义。

2 高铁隧道防排水体系的工程特点与问题分析

2.1 高铁隧道防排水体系的基本构成

高铁隧道防排水体系是确保结构安全与运营环境稳定的重要保障，其整体由防水与排水两大部分构成，具体包括初期支护防水层、二次衬砌防水层、环向及纵向排水系统等。体系设计遵循“以防为主、防排结合、刚柔相济、综合治理”的原则，旨在形成结构自防水与系统排水相互配合的闭合体系。初期支护防水主要通过喷射混凝土、止水帷幕和防水卷

【作者简介】朱生财（1993–），男，中国甘肃白银人，本科，助理工程师，从事高铁隧道工程研究。

材等措施实现结构隔水，二次衬砌防水层则承担长期防渗功能，确保内部环境干燥稳定。纵向与横向排水系统的设置可有效引导渗入地下水流向中心排水沟或集水井，从而减轻结构水压。鉴于高铁隧道运行对湿度、温度和结构稳定性要求极高，防排水体系不仅需满足施工期防渗排水需求，还应具备长周期适应性与可维护性，确保隧道在高速度、高频次运行条件下的安全与耐久。

2.2 复杂地质条件对防排水体系的影响

高铁隧道多穿越山区、丘陵及复杂地质区域，常遇软弱围岩、断层破碎带、岩溶发育区及富水地层，这些不良地质条件对防排水体系构成显著挑战。在断层破碎带中，地下水通道发育、渗流方向不确定，极易引起局部水压集中，对衬砌结构造成附加应力；而在岩溶地段，溶洞及暗河的存在可能导致突水、涌泥等突发性灾害，考验防排水系统的响应与调节能力。若设计阶段未能充分掌握水文地质特征，防水层厚度、防排水能力及节点构造往往难以匹配实际需求，导致防渗性能不足或排水系统超负荷运行。针对复杂地质，需在前期勘察中强化水文地质分析，采用区域化、分段化的防排水设计思路，合理布局导排通道与缓释装置，实现“分区防、分级排”，以提升体系对多变水文环境的适应性与安全储备。

2.3 现有防排水体系存在的主要问题

尽管近年来高铁隧道防排水设计技术取得显著进步，但在工程实践中仍存在多方面问题。部分项目在设计阶段对地质条件、渗水规律与防排水需求分析不足，导致体系整体性差、局部排水能力不足。防水材料的选型有时未充分考虑围岩性质及水化学环境，造成耐久性降低；施工环节中防水层焊缝虚焊、卷材搭接不严、防水板穿孔等问题频发，且修复不彻底，形成潜在渗漏隐患。此外，排水管道布置不合理、坡度控制不当，或在后续施工中被混凝土覆盖、设备挤压，也会导致排水系统功能下降。由于高铁隧道运营期长、检修条件受限，初期设计与施工中的细微缺陷往往会在多年后显现，表现为衬砌渗水、结露、碱华甚至结构劣化。为此，应强化设计施工协同机制、推行全过程质量控制与信息化监测手段，从源头提升防排水体系的科学性与耐久性。

3 高铁隧道防排水体系优化设计思路

3.1 基于水文地质条件的针对性设计

防排水体系的优化设计必须建立在充分、准确的水文地质勘察基础之上，这是确保系统安全性与可靠性的前提。通过对隧道所在区域的地下水类型、水位变化规律、水压分布特征及补给排泄条件进行系统分析，可准确评估隧道结构可能承受的渗流压力与渗透风险。设计阶段应根据不同地质条件划分防排水分区，制定分级设计标准，使体系具备相应的安全储备与适应性。在富水断层、岩溶或高水压地段，宜采取复合型防排结合措施，如设置双层防水结构、增设减压孔或环向导排通道，以缓解水压集中效应。同时，应充分考虑围岩渗透系数与地下水补给强度的差异性，合理确定排水能力及管道布置方案，避免因设计滞后或过度简化导致排水不畅、渗流反压等隐患，从而实现科学、针对性的系统优化设计。

3.2 防水结构构造的系统优化

防水结构的系统优化是防排水设计的核心，其关键在于整体性与连续性的协调。隧道初期支护与二次衬砌之间的防水层应形成封闭体系，确保各部分连接严密，不留薄弱环节。设计中应重视接缝、变形缝、施工缝等关键节点的处理，采用双焊缝热熔焊接或嵌入式止水带等构造方式增强密封性能。对于拱顶、拱脚及衬砌过渡区域，应通过加设附加防水层或柔性卷材过渡结构，降低结构变形对防水层造成的拉应力损伤风险。防水混凝土的选用亦需兼顾抗渗、抗裂性能，掺加减水剂与防水剂以提升密实度与抗渗能力。为避免施工阶段人为损伤，应在设计阶段预留保护层厚度，明确施工工艺与检查要求。通过系统性构造优化，能有效提升防水层整体密封性与耐久性，从源头强化隧道防渗防漏能力。

3.3 排水系统布置与功能完善

排水系统的科学布置直接影响隧道防排水体系的运行稳定性与维护效率。设计中应根据地层渗透特征与地下水流向，合理配置纵向排水管、横向排水管及中心排水沟，使其形成连续的水力通道，确保地下水能够迅速、有序排出，避免水压积聚对衬砌产生附加荷载。排水系统应设置必要的检查井和集水井，以便于运行期的定期清理与维护，防止淤泥堵塞造成排水失效。对于含砂层或泥质地层，设计中应增设防砂层、滤水管或可拆换式排水构件，以防止泥砂进入管道影响排水通畅。同时，应综合考虑运营期排水量变化及应急排放需求，预留可扩展的排水空间与检修通道。通过完善排水系统布局与功能设计，不仅能保障隧道结构长期干燥稳定，还可提高维护便利性与工程可持续性，形成结构—排水—运维一体化的防排水体系。

4 高铁隧道防排水施工工艺的改进方向

4.1 防水材料施工工艺控制

在隧道防排水体系建设中，防水材料的施工工艺控制是确保工程质量的核心环节。防水层作为阻断地下水渗透的第一道屏障，其铺设质量直接影响隧道长期运行的防渗效果。施工中应严格按照设计要求对防水板进行铺设，保持平整无褶皱，确保焊缝均匀饱满、无虚焊、漏焊现象。针对接缝、拱顶、变形缝、施工缝等关键节点，应采用双焊缝热熔焊接并进行渗漏检测，以保证防水层连续性与密封性。此外，施工环境温湿度的控制、基层清洁度及粘结剂质量均对防水效果有显著影响。为避免因施工误差引发后期渗漏，应建立严格的样板先行制度与工序验收标准，通过全过程质量抽检与红外探测手段确保防水层施工的可靠性，从根本上提高防

排水体系的耐久性与安全性。

4.2 排水设施安装与保护措施

排水系统的科学安装与后续保护是防排水体系发挥长效功能的重要保障。排水盲沟、纵向排水管、集水井等设施的布置应遵循设计坡度，保证水流顺畅无倒坡，以免形成积水区造成水压集中。施工中应选用具备良好抗压性能和防堵塞能力的排水材料，并在连接处采用可靠的密封结构防止渗漏。为避免后续工序对排水设施造成损坏，须在混凝土浇筑前设置临时防护措施，如采用防护罩、定位支架和防压支撑结构，防止施工机械碾压变形或杂物堵塞管道。工程实践表明，加强施工期及运营期的定期检测与维护，如定期冲洗、检查集水井淤积情况，可有效延长排水系统使用寿命，确保隧道内部干燥和结构稳定，为长期运营提供可靠保障。

4.3 施工过程管理与质量监控

防排水体系施工过程复杂，涉及材料、设备及多工种协同作业，任何环节的疏忽都可能导致系统性缺陷。因此，建立科学的施工管理与质量监控体系尤为关键。项目管理团队应在施工前组织技术交底和样板验收，确保各工序衔接合理。施工中通过 BIM 模型或信息化监测平台实现工序可视化管理，实时记录施工参数与检测数据，对异常情况及时预警和纠偏。对焊缝检测、排水坡度测量、防水层完整性检查等关键工序应实行全过程质量控制制度，确保每道工序均满足标准要求。竣工前通过闭水试验和红外检测等方法对防排水系统进行综合评估，形成完整质量档案，为后期运营维护提供数据支持。通过全过程的精细化管理和动态质量监控，可显著降低渗漏风险，提升隧道防排水体系的整体可靠性与工程耐久性。

5 防排水体系优化与施工改进的综合效果分析

5.1 对隧道结构安全性的提升作用

在高铁隧道工程中，防排水体系的优化设计与施工工艺改进对隧道结构安全性具有直接而深远的影响。地下水渗流是导致衬砌结构开裂、剥蚀和脱空的主要因素，通过设置合理的环向与纵向排水通道、优化止水带结构以及采用高性能防水混凝土材料，可显著减小水压对结构的不利作用。施工阶段引入自动化监测系统和注浆加固技术，有助于及时掌握地下水压力变化与渗漏点分布，实现动态调整与风险预警，从源头降低衬砌破坏概率。防排水体系的完善还能减缓围岩变形和拱顶沉降，维持结构受力均衡，提高隧道整体的抗震与抗变形能力，进而全面提升隧道工程的安全性与稳定性。

5.2 对隧道耐久性与运营环境的改善

防排水体系不仅关系到隧道施工阶段的结构安全，更是影响其长期耐久性与使用环境的关键环节。通过合理布设盲沟、设置排水管及集水井，可有效降低隧道内部湿度，避免长期渗水造成的混凝土碳化与钢筋锈蚀问题。保持干燥的环境有助于抑制冻融循环引起的材料疲劳，延缓衬砌老化过程。在高寒地区或高地下水位地段，采用防冻型排水衬层与耐腐蚀涂层材料，可进一步增强抗冻与防渗性能，从而延长结构使用寿命。同时，稳定的排水状态使轨道床面保持平整干燥，避免因积水导致的基础软化与列车运行不稳，显著改善隧道内部通风与维护条件，营造安全舒适的运营环境。

5.3 工程实践中的适用性与推广价值

防排水体系的优化与施工工艺改进措施在中国多项高铁隧道建设中得到验证，表现出较强的适用性和推广潜力。例如，在富水软岩隧道中，通过设置复合防水层及多级导排系统，有效控制了渗水通道形成与衬砌反压现象，保障了长期结构安全。在施工中应用防水混凝土一次衬砌成型工艺、全断面防水卷材热熔粘结技术，不仅提高了施工效率，也降低了后期维修成本。通过对典型工程案例的归纳分析，可形成系统化设计准则与标准化施工流程，为后续类似隧道建设提供科学依据。随着防排水材料技术与信息化监测手段的持续发展，该体系在高铁、城市地铁及公路隧道中的推广应用前景广阔，对隧道工程高质量建设具有重要的示范价值。

6 结语

高铁隧道防排水体系是保障结构安全与运营可靠性的核心技术环节。面对复杂多变的地质与水文条件，传统的单一防水设计已无法满足高速铁路工程的高标准需求。通过强化前期水文地质勘察，科学分析地下水分布特征与渗流规律，可为体系设计提供精准依据。在结构层面，优化防水层构造与排水路径，提升系统的整体协调性与抗渗能力；在施工阶段，应用高性能防水材料与智能化监测手段，确保施工质量与运行安全。未来，防排水技术的发展将更多依托新型复合材料、模块化结构设计及数字化监控系统，实现从设计、施工到运维的全生命周期管理，为高铁隧道的长期安全运营提供持续技术支撑。

参考文献

[1] 许鹏,杨瑞松,胡清海,等.基于水体冻结机制的寒区隧道排水沟冻害预测[J].冰川冻土,2025,47(04):1004-1014.

[2] 马时坤.高铁隧道进口斜井反坡排水施工方案与管控[J].科技创新与应用,2024,14(10):161-164.

[3] 栾伟旭.高铁隧道排水系统疏通关键技术研究[D].长安大学,2023.

[4] 张洪志.高铁隧道新型全包防排水设计与施工技术[J].中国建筑防水,2021,(12):46-50.

[5] 杨磊.浅谈高速铁路隧道防排水施工技术[J].中国标准化,2017,(02):158+160.