

地铁隧道渗漏水成因分析及治理

杨 健¹ 张 磊²

1. 中铁投资集团交通运营有限公司 天津 300000

2. 天津轨道交通线网管理有限公司 天津 300000

摘要：本文聚焦地铁隧道渗漏水典型病害，系统阐述其对结构安全、设备设施、行车安全及周边环境的不良影响，深入分析地质条件、设计、施工、材料及运营维护管理等因素对隧道渗漏水的影响，并系统介绍地铁隧道堵水、排水、防水层修复和结构加固等治理技术。研究表明，渗漏水治理需要采取“防、排、堵、截”相结合的综合治理方案，同时加强日常监测和维护。本文旨在为地铁隧道渗漏水问题的防治提供系统参考，提升地铁隧道工程的安全性与耐久性。

关键词：地铁隧道；渗漏水；成因分析；治理措施

引言

地铁作为城市公共交通的重要组成部分，其运营安全至关重要。截至2024年底，中国内地已有超过60个城市开通城市轨道交通，运营里程突破12000公里，其中地铁占比超过78%。然而，地铁隧道渗漏水问题频发，已成为影响地铁系统安全与稳定的重要隐患。渗漏水不仅影响隧道结构安全，影响设备正常运行，还威胁行车安全，并对周边环境产生不良影响。地铁隧道渗漏水成因复杂，涉及地质、设计、施工、材料及运营管理等多个环节。为解决这一问题，有必要对地铁隧道渗漏水的成因进行深入分析，并探索有效的治理技术，以期为实际工程提供参考。

1 地铁隧道渗漏水的危害

1.1 对结构安全的影响

地铁隧道长期渗漏水会侵蚀混凝土结构，溶出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 导致混凝土碱度降低，破坏钢筋钝化膜，加速钢筋锈蚀，降低结构强度，影响结构耐久性。钢筋锈蚀后体积膨胀约2-6倍，会使混凝土保护层开裂、剥落，形成恶性循环。在冻融循环地区，水结冰导致体积膨胀（水结冰时体积增大约9%）可产生高达200MPa的应力，致使混凝土开裂和剥落，进一步破坏结构完整性。监测数据显示，冻融循环可使混凝土强度降低40%以上，弹性模量下降60%以上^[1]。

1.2 对设备设施的损害

地铁隧道内分布着众多电气和通信信号设备。渗漏水会使设备受潮、加速设备金属部件腐蚀、绝缘性能下降，增加短路风险，降低设备的使用寿命和性能。当绝缘电阻低于 $0.5\text{M}\Omega$ 时，设备故障率显著增加增加。以牵引供电系统为例，水分侵入会导致接触网绝缘子闪络，

造成供电中断。通信信号设备受潮后，传输误码率增加，严重影响列车运行控制的准确性^[2]。

1.3 对行车安全的影响

隧道渗漏水会在轨面形成水膜，降低轮轨间的摩擦力，使列车制动距离延长，增加列车冲标风险。相关研究成果标明，轨面水膜深度达2mm时，轮轨粘着系数下降30%-50%，列车紧急制动距离相应增加20%-40%。在冬季，积水结冰进一步加剧轨道打滑，进一步危及行车安全。此外，渗漏水滴落在接触网上，可能引发接触网短路，导致供电中断^[3]。

1.4 对环境的影响

地铁隧道渗漏水会携带隧道内的污染物（油脂、重金属等）进入周边土壤和地下水体，造成土壤污染和水体污染。大量涌水还可能造成地表沉降甚至内涝。

2 地铁隧道渗漏水成因分析

2.1 地质条件因素

2.1.1 地下水丰富

部分地铁隧道所处区域地下水水位较高且储量丰富，部分地下水具有较大水压。在隧道施工过程中及运营阶段，地下水通过混凝土结构中的微小孔隙、裂缝等薄弱部位渗入隧道内部。渗流量与水力梯度成正比，水压每增加0.1MPa，渗漏量增加30%-50%。地下水的动态变化，如季节性水位涨落造成水压变化，在地下水上升时可使隧道承受的水压增加2-3倍，进一步增加渗漏水发生的几率和严重程度^[4]。

2.1.2 地质构造复杂

地铁隧道穿越断层、破碎带等不良地质构造区域时，岩体破碎、节理发育，为地下水渗流提供了通道。地下水在复杂地质构造中流动速度快、压力大，当隧道

掘进至这些区域时,地下水会沿着破碎带和裂隙大量涌入隧道,导致隧道出现严重的渗漏水现象,且治理难度较大,给施工和运营带来极大挑战^[5]。

2.2 设计因素

2.2.1 防水设计不合理

在地铁隧道设计中,若对防水等级设定过低、防水层选型不当、防水细节设计疏忽等防水设计不合理,易造成防水隐患。如未充分考虑当地的气候、地质及水文条件,难以抵御实际可能遭遇的强降水或高水压;未根据隧道不同部位的环境特点选择适配的防水材料,会导致防水效果大打折扣;对变形缝、施工缝等特殊部位的防水构造设计不完善,易出现缝隙处渗漏水。

2.2.2 结构设计缺陷

在设计过程中,若结构厚度或配筋设计不足以抵抗外部水压,混凝土抗渗等级偏低,或结构形式不能适应地层变形,均可能导致结构开裂与渗漏。研究表明,当混凝土抗渗等级低于P8时,在高水压地区使用,渗漏风险增加70%以上。配筋率不足0.3%的混凝土结构,开裂风险是配筋率0.6%以上的结构的2.5倍。

2.3 施工因素

2.3.1 混凝土施工质量问题

施工时混凝土配合比控制不严、振捣不密实、养护不到位等施工缺陷,会导致混凝土出现蜂窝、孔洞和裂缝,形成渗水通道,引发隧道渗漏水。

2.3.2 防水层施工质量差

防水层施工时,基层处理不达标,存在凹凸不平、浮尘等,影响防水材料与基层的粘结。防水材料铺设方向错误、搭接宽度不足或粘贴不牢固,易出现缝隙,导致防水层不连续。

2.3.3 接缝处理不当

地铁隧道施工中存在大量施工缝、变形缝等。施工缝处理时,未按规定进行凿毛、清理,新老混凝土结合不紧密,易发生渗漏水。变形缝的止水带安装位置偏差、固定不牢,在隧道结构变形时,止水带无法正常发挥作用,导致地下水从变形缝处渗漏。而且接缝处密封材料填充不密实、质量不合格,也会降低接缝的防水性能。

2.3.4 注浆不饱满

在隧道施工中,若注浆压力、浆液配比、注浆量控制不当,会导致地层或衬砌背后存在未填充区,未能形成有效防水屏障。若压力过低无法使浆液充分填充地层空隙和裂缝;压力过高则可能破坏地层结构。注浆量不足,不能完全封堵渗漏通道。注浆材料选择不合适,其凝固时间、流动性等性能不满足要求,也会导致浆液无法均匀扩散。

2.4 材料因素

2.4.1 混凝土材料性能不足

混凝土材料若存在性能缺陷,会严重影响地铁隧道防水效果。水泥品种选择不当,如未根据工程环境选用合适的水泥,可能导致混凝土抗渗性差。骨料含泥量过高、级配不合理,会降低混凝土的密实度。外加剂使用不合理,未起到改善混凝土性能的作用,反而造成负面效果。此外,混凝土配合比设计不合理,水灰比过大,使得混凝土内部孔隙增多,引发渗漏水问题。

2.4.2 防水材料质量不合格

防水材料质量不过关是地铁隧道渗漏水的常见诱因。防水卷材厚度不达标、拉伸强度低、耐老化性能差,在隧道复杂环境下易破损,失去防水功能。防水涂料粘结性不好、不透水性不足,无法形成连续有效的防水膜。密封材料弹性差、易干裂,不能很好地密封接缝,导致结构渗漏。

2.5 运营管理因素

2.5.1 日常维护不到位

日常维护中,巡检不及时、维修技术落后、排水系统堵塞等,会使小缺陷发展为严重渗漏,如对混凝土裂缝、防水层破损等初期问题因未及时察觉而逐渐恶化。维护人员专业素养参差不齐,对一些复杂病害缺乏准确判断和有效处理能力。维护设备老化、落后,影响检测效果和维修效率。

2.5.2 外部环境变化影响

周边建筑施工降水作业会改变地下水位,使隧道承受不均匀水压力,引发结构变形和裂缝,进而导致渗漏水。极端气候下,暴雨频发,大量地表水下渗,增加地下水压力,超出隧道原有防水设计承载能力。另外,地下水受到污染后,其化学成分发生变化,对隧道混凝土结构和防水材料产生侵蚀作用,降低结构的强度和防水性能,导致渗漏问题日益严重,影响隧道的安全运营。

3 地铁隧道渗漏水治理技术

3.1 堵水技术

3.1.1 注浆堵水

注浆堵水是治理地铁隧道渗漏水的关键技术之一,通过向渗漏区域注入水泥基或化学浆液,填充混凝土裂缝与围岩空隙,形成阻水体。需根据水压、流量选择合适浆液与控制参数。施工时,先精准定位渗漏点,通过专业钻孔设备在渗漏处周围钻孔,孔深和孔距依据实际情况确定。然后安装注浆针头,确保其与孔壁紧密连接。依据隧道地质条件、渗漏程度等,科学选配浆液,如水泥-水玻璃双液浆适用于地下水流量大的情况,化学浆则用于细小裂缝。

利用高压注浆机将浆液注入，使其在压力作用下充分填充裂缝和孔隙，凝固后形成坚固的防水体，有效截断水流通道。注浆过程中要严格控制压力和注浆量，避免浆液外溢或对隧道结构造成二次破坏。

3.1.2 嵌缝堵水

嵌缝堵水主要用于处理隧道表面裂缝导致的渗漏，针对明水裂缝，可开槽嵌填聚氨酯密封胶、环氧树脂等材料，恢复结构密封性。施工前，需彻底清理裂缝周边区域，去除浮尘、油污和松散混凝土，使裂缝表面干净、粗糙，增强嵌缝材料与基层的粘结力。根据裂缝宽度和渗漏情况，选择合适的嵌缝材料，如聚氨酯密封胶具有良好的弹性和耐水性，能适应结构变形。将选好的材料均匀嵌入裂缝中，用专用工具压实抹平，确保材料填充密实，无空隙。嵌缝完成后，要做好养护工作，避免材料早期受损。该方法操作简便、成本较低，能有效封闭表面裂缝，阻止水分渗入隧道内部。

3.2 引水技术

针对水量较大、多次治理仍无明显效果的渗漏水可敷设引水管并定期维护，保证排水畅通。依据隧道的地形、走向和排水量，合理规划排水管道的布局和管径。管道材质通常选用塑料管等，需具备耐腐蚀、强度高的特性。

3.3 防水层修复技术

3.3.1 局部修补

当地铁隧道防水层仅出现局部破损、老化或小面积渗漏时，通过对破损防水层进行表面处理并涂刷防水涂料或粘贴卷材补丁的方式进行局部修补，局部修补是较为经济有效的方法。首先，需精准定位破损部位，对破损区域周边进行清理，去除浮尘、油污和松动的防水材料，使基层平整、坚实。然后，根据破损情况选择合适的修补材料，如防水涂料、防水卷材补丁等。若采用防水涂料修补，需均匀涂刷多遍，确保涂层厚度达到防水要求；若使用防水卷材补丁，要保证补丁与原防水层粘贴牢固，无空鼓、翘边现象。局部修补能快速解决小范围防水问题，减少对隧道运营的影响，且成本较低。

3.3.2 整体更换

若防水层大面积老化、破损严重，或经过多次局部修补仍无法有效解决渗漏问题时，需进行整体更换。先拆除原有的防水层，在拆除过程中要注意保护隧道结构不受损伤。对基层进行全面检查和处理，修复裂缝、凹凸不平处，确保基层质量符合防水层施工要求。然后按照设计要求重新铺设新的防水层，选择质量可靠、性能适配的防水材料，如高分子防水卷材或聚氨酯防水涂料等。在铺设过程中要严格控制施工质量，保证防水层的连续性和完整性，从根本上解决防水问题，保障隧道长期防水效果。

3.4 结构加固技术

3.4.1 混凝土衬砌加固

地铁隧道运营中，若混凝土衬砌出现开裂、剥落等病害，影响结构安全与防水性能时，需进行混凝土衬砌加固。可采用粘贴钢板、碳纤维布等方式补强受损衬砌，恢复结构整体性与防水性。粘贴钢板加固时，通过化学锚栓和结构胶共同固定，通过钢板与衬砌共同受力，提高结构承载能力；采用碳纤维布加固时，将碳纤维布用专用胶粘剂粘贴在衬砌上，利用其高强度特性增强衬砌的抗拉性能。施工前要彻底清理衬砌表面，确保粘贴牢固。

3.4.2 止水带更换

止水带是隧道防水的重要部件，若其老化、破损或安装不当导致渗漏，需及时更换。清除失效止水带，重新安装并密封处理，恢复接缝防水功能。新止水带应选择耐久性好的材料，如钢边橡胶止水带或PVC止水带。安装时确保位置准确，固定牢固，接头采用热熔焊接。施工期间需采取临时排水措施，保证作业面干燥。更换止水带可有效阻断水流通道，恢复隧道的防水功能，防止渗漏水问题进一步恶化。

4 结束语

地铁隧道渗漏水是由多因素共同作用导致的复杂问题，需要从设计、施工、材料及运维全过程进行控制。基于研究分析，提出以下建议：

(1) 建设前加强地质勘察和结构设计，提高结构自防水能力；(2) 建设中严格控制施工质量，确保混凝土浇筑和防水层施工质量；(3) 设计及运维过程中选用高性能防水材料，关注新型材料的应用；(4) 建立完善的运维监测检查体系，定期开展巡检和维护；(5) 采用“防、排、堵、截”相结合的综合治理方案。

通过综合运用堵水、排水、防水层修复和结构加固等技术，可有效提升隧道防水性能，保障地铁运营安全。未来应进一步加强智能监测技术研发，推动新材料新工艺的应用，提高渗漏水治理的效率和效果。

参考文献

- [1] 王梦想, 张雪峰. 城市轨道交通隧道结构病害机理与防治技术研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(4):1-10.
- [2] 李术才, 刘人太. 隧道与地下工程渗漏水治理技术研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(2):221-235.
- [3] 张顶立, 侯艳娟. 地铁隧道结构健康监测与病害治理技术[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(3):1-12.
- [4] 朱合华, 闫治国. 隧道结构渗漏水对周边环境影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2):321-330.
- [5] 肖明清, 徐志胜. 盾构隧道渗漏水机理与防治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(3):1-10.