

文章编号: 1007-2993(2026)04-0520-06

地铁结构渗漏治理不当引发的次生病害 机理与控制研究

刘晓军¹ 张 雷¹ 孙宪春¹ 张琴枝² 王云隆¹

(1. 北京城建轨道交通建设工程有限公司, 北京 101125; 2. 武汉鹏宇建设工程有限公司, 湖北武汉 430070)

【摘要】 地铁渗漏是威胁运营安全的常见病害, 尤其在地下水位显著上升区域。渗漏治理若未充分考虑渗流路径、地下水位及水压变化, 易引发次生病害。以北京地铁运营线路渗漏治理工程为案例, 分析治理不当(仅封堵下游点位未阻断水源、治理后未监测外围水位变化、忽视既有薄弱点承压能力)引发的三类次生病害: 渗流路径改变导致新渗漏点出现、地下水位上升引发屏蔽门进水、地下水压增大击穿预埋注浆管涌水。研究表明, 次生病害源于治理行为对地下水运移系统(路径-水位-水压)的扰动失衡。据此提出渗漏治理应遵循“源头控制为主、路径管理为辅、水位水压监测疏导并重”的综合防控策略。研究成果可为类似复杂水文地质条件下地铁渗漏治理提供技术指导。

【关键词】 地铁渗漏; 次生病害; 渗流路径; 地下水位; 地下水压力; 治理不当

【中图分类号】 U457

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0243

Mechanism and control of secondary diseases caused by improper seepage control in subway structures

LIU Xiaojun¹ ZHANG Lei¹ SUN Xianchun¹ ZHANG Qinzhi² WANG Yunlong¹

(1. Beijing Urban Construction Urban Rail Transit Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 101125, China; 2. Wuhan Pengyu Construction Engineering Co., Ltd., Wuhan 430070, Hubei, China)

【Abstract】 Subway leaks are a common disease that threatens operational safety, especially in areas where groundwater levels rise significantly. If leakage control does not fully consider changes in seepage paths, groundwater levels and water pressure, secondary diseases may easily occur. This paper takes the leakage control project of Beijing subway operating lines as a case to analyze three types of secondary diseases caused by improper management (only blocking downstream points without blocking water sources, not monitoring peripheral water level changes after treatment, and ignoring the pressure bearing capacity of existing weak points): changes in seepage paths lead to the emergence of new leakage points, rising groundwater level causes water inflow into shield doors, and increasing groundwater pressure breaks through pre-buried grouting pipes. Studies have shown that secondary diseases are rooted in the disturbance and imbalance of groundwater movement systems (path-water level-water pressure) caused by management behaviors. It is proposed that leakage control should follow a comprehensive prevention and control strategy of “source control first, path management supplemented, and water level and water pressure monitoring and dredging equally” to provide technical guidance for subway leakage control under similar complex hydrogeological conditions.

【Key words】 subway leakage; secondary diseases; seepage path; groundwater level; groundwater pressure; improper management

0 引言

地铁作为城市交通命脉, 其结构长期服役于复杂水土环境中, 渗漏病害频发, 不仅侵蚀混凝土结构、锈蚀钢筋, 还威胁机电设备安全, 导致运营中断, 造成重

大经济损失^[1-3]。尤其在地下水位剧烈波动区域(如北京平原地区因生态补水导致地下水位显著上升^[4]), 渗漏问题更为突出, 且治理难度更大。

当前, 针对地铁渗漏治理的研究主要集中在新

基金项目: 北京城建集团有限责任公司创新基金项目“地铁隧道结构病害诊治成套技术与示范”

作者简介: 刘晓军, 男, 1990 年生, 大学本科, 工程师, 主要从事地铁渗漏水治理和运营改造。E-mail: 18612331552@wo.cn

通信作者: 张 雷, 男, 1983 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事地下结构的研究。E-mail: 158161157@qq.com

型灌浆材料研发^[5-6]、快速堵漏技术^[7]及智能化检测方法^[8]等方面,并取得显著进展,但对于渗漏治理过程本身可能引发的次生岩土工程问题的关注相对不足。实践中,因治理方案设计或施工不当,例如仅关注下游显性渗漏点封堵而忽视水源阻断、未充分考虑治理行为对周边地下水渗流场(路径、水位、水压)的扰动、对既有结构薄弱点在水压升高下的承载能力评估不足等,常导致出现新的渗漏,甚至引发更严重的结构病害^[9-10]。这类因治理不当引发的次生病害机制复杂,隐蔽性强,防控难度大,已成为地铁运维安全的新挑战。

本文依托北京地铁既有线渗漏治理工程,针对治理过程中因方法不当所引发的次生病害典型案例,深入分析其形成机理。重点探讨:①渗漏点局部封堵如何改变渗流路径并诱发新渗漏点;②有效止水后外围地下水位抬升如何引发邻近区域进水;③地下水压力增大如何击穿既有结构薄弱点导致涌水。旨在揭示“治理行为-水力系统响应-次生病害”的内在联系,从而提出更系统、科学的渗漏防控策略,为类似水文地质条件下地铁工程的渗漏治理提供理论参考和实践指导。

1 工程概况与渗漏治理方案

本文涉及的北京地铁既有线渗漏治理工程所涵盖的线路,是北京市轨道交通网络的重要组成部分,线路穿越复杂水文地质区域,部分车站位于地下水位波动显著区域。2021年9月北京启动生态补水工程后,全市平原区地下水位平均上升5.64 m^[4],2023年2月监测数据显示地下水平均埋深已升至15.45 m,导致地铁车站及区间出现不同程度的渗漏病害^[11]。

1.1 结构防水设计特点

渗漏治理地铁线路的车站与区间采用复合式防水体系:盾构管片与暗挖区间外包防水采用2.0 mm厚ECB防水板全包防水,防水板与基层间设置400 g/m²无纺布缓冲层,仰拱位置增设400 g/m²无纺布保护层及5 cm厚C20细石混凝土保护层。区间结构混凝土抗渗等级为P10,变形缝采取中埋式止水带与外贴式止水带双重防水措施。

1.2 主要渗漏类型分布

根据现场勘查数据,对渗漏治理地铁线路的主要渗漏类型、占比及典型部位进行统计,结果如表1所示。

1.3 渗漏治理方案

针对上述渗漏问题,项目采用以化学灌浆为主的综合治理方案^[12-13]:

表1 本文涉及渗漏治理地铁线路的主要渗漏类型统计
Tab. 1 Statistics of main leakage types in subway lines involved in leakage treatment

渗漏类型	车站占比/%	区间占比/%	典型部位
变形缝渗漏	42.3	28.7	顶板-侧墙交接处
施工缝渗漏	31.5	35.2	侧墙竖向施工缝
裂缝渗漏	18.6	22.4	侧墙及底板
管片接缝渗漏		13.7	管片环纵缝

(1)环氧树脂灌浆料:应用于结构性裂缝(宽度>0.3 mm),利用其高黏结强度(>5 MPa)和低黏度(<15 cP)特性,修复结构承载能力;

(2)丙烯酸盐灌浆料:用于变形缝渗漏治理,发挥其优异的亲水性(接触角<10°)和水中膨胀率(>150%)特性;

(3)聚氨酯灌浆料:应用于涌水点快速封堵,利用其发泡膨胀特性(膨胀倍数8~15倍)和快速固化特点(凝胶时间30~120 s)。

施工工艺主要采用分段后退式注浆法,注浆压力控制在0.3~0.5 MPa,避免对结构造成二次损伤。

2 治理不当引发的次生病害机理分析

2.1 渗流路径改变诱发新渗漏点

(1)案例概况

北京地铁某车站机电层注浆后站台层出现新渗漏点事件。2023年5月,维修单位对该站机电层5处渗漏点进行丙烯酸盐注浆封堵后,次日站台层直梯处出现新渗漏点,涌水量达2.5 L/min,导致直梯停运48 h(见图1(a))。

(2)原始渗流路径分析

染色示踪试验表明地下水主要经由站厅层北侧墙裂缝(宽0.8 mm)进入结构内部,沿中板变形缝(渗透系数 1.2×10^{-3} cm/s)流至机电层,形成多处渗漏点(见图1(b))。原始状态下渗流量可按达西定律(式(1))计算:

$$Q=kA\Delta h/L$$
 (1)

式中:Q为渗漏流量,cm³/s;k为变形缝渗透系数,cm/s;A为变形缝的渗水面积,cm²;Δh为水头损失,m;L为渗漏路径长度,m。

将相关数值代入式(1),计算得:

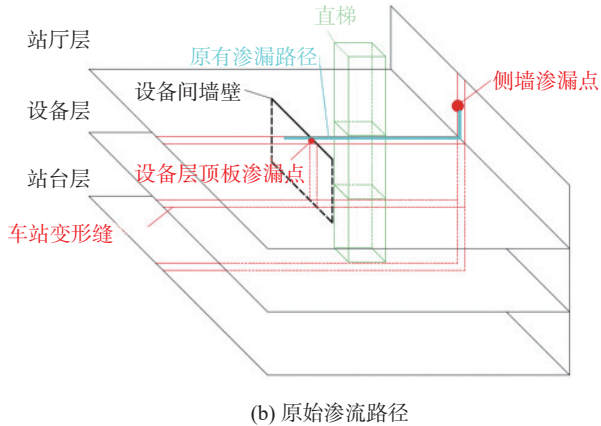
$$Q=(1.2\times10^{-3})\times(\pi\times0.1^2)\times(15.6/3.2)=1.84\times10^{-4}\text{ cm}^3/\text{s}$$

(3)治理不当行为

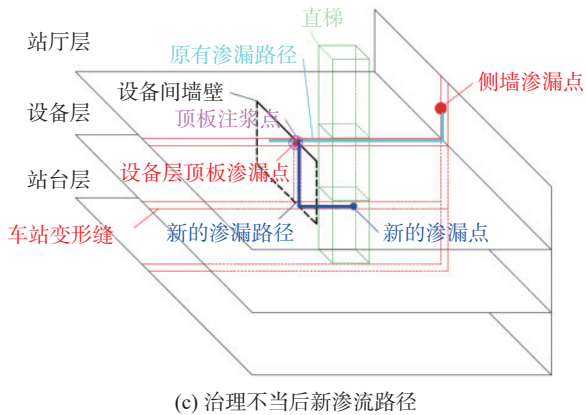
仅对机电层下游出水点进行封堵,未处理站厅



(a) 车站机电层渗漏照片



(b) 原始渗流路径



(c) 治理不当后新渗流路径

图1 车站渗流路径变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of seepage path change in station layer water source inlet, according to the law of mass conservation, continuous infiltration of groundwater (source strength $1.84 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$) in the downstream path closed, the water pressure from 0.15 MPa rises to 0.28 MPa, exceeding the structural weak point anti-seepage strength (0.25 MPa), forming a new seepage path, as shown in Fig. 1(c).

(4) 水力响应

渗流水在升压后沿两条新路径迁移: ①部分通过中板微裂缝(宽 0.05 mm)渗入站台层(路径长度增加 2.8 m); ②主要沿施工缝薄弱带向直梯井方向迁移(路径长度 5.7 m), 在直梯基坑处形成新渗漏点。

(5) 核心岩土问题

忽视渗流系统连通性, 未阻断水源导致水力重分布。根据伯努利能量方程, 新路径水头损失 Δh 满足:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \Delta h \quad (2)$$

式中: Δh 为水头损失, m; P_1, P_2 分别为渗漏路径前后两处的水压力, Pa; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$; v_1, v_2 分别为渗漏路径前后两处的渗流速度, m/s; z_1, z_2 分别为渗漏路径前后两处的位置高程, m。

(6) 治理措施

经前述分析后采取如下治理措施: ①站厅层侧墙裂缝源头注浆(环氧树脂); ②直梯井处设置临时导水管(DN50); ③对新渗漏点采用丙烯酸盐注浆封堵。实施后渗流量降至 0.05 L/min。

2.2 地下水位上升引发邻近区域进水

(1) 案例概况

北京地铁某车站侧墙止水后出现屏蔽门进水事件。2023 年 8 月对站台层轨行区侧墙渗漏点(3 处, 总渗流量 4.2 L/min)进行注浆封堵, 注浆完成 72 h 后站台层屏蔽门底部出现进水, 导致 5 扇屏蔽门控制系统短路。

(2) 治理前状态

侧墙渗漏点实际起到“天然泄压点”作用, 使车站外围地下水位维持在轨面高程以下(埋深-2.3 m), 轨顶风道处于无水状态(见图 2)。

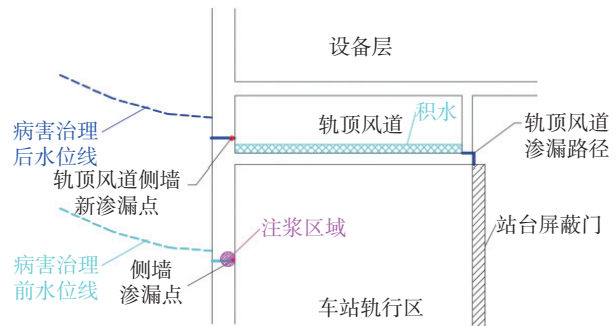


图2 车站水位上升引发进水机理

Fig. 2 Mechanism of water inflow caused by groundwater level rise in station

(3) 治理不当行为

封堵侧墙渗漏点后未评估外围地下水位壅高趋势及增设泄压措施。监测数据显示堵漏后 72 h 内车站外围地下水位从-2.3 m 升至-0.8 m(上升速率 0.5 m/d), 超过轨顶风道底部高程(-1.2 m)。

(4) 水力响应

水位上升后, 地下水通过轨顶风道侧墙微裂缝(宽 0.1 ~ 0.3 mm)渗入, 因风道无排水系统, 积水深度达 0.25 m。积水静水压力($P=\rho gh=1000 \times 9.8 \times 0.25=2.45 \text{ kPa}$)超过屏蔽门密封强度(1.8 kPa), 导致渗水

进入设备区。

(5) 核心岩土问题

忽视止水后的局部地下水位壅高效应。根据地下水动力学, 水位上升速率 $\partial h / \partial t$ 满足:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \frac{W}{\mu} \quad (3)$$

式中: k 为渗透系数, $k=3 \times 10^{-5}$ m/s; μ 为给水度, $\mu=0.12$; W 为补给强度, $W=1.2 \times 10^{-6}$ s $^{-1}$ 。

(6) 治理措施

经前述分析后采取如下治理措施: ①立即抽排轨顶风道积水(排水量 3.8 m 3); ②风道侧墙裂缝注浆(丙烯酸盐); ③距侧墙 0.5 m 处钻设排水孔(间距 2 m, 孔径 30 mm), 建立长期泄压通道。实施后未再发生进水事件。

2.3 地下水压力增大击穿薄弱结构

(1) 案例概况

北京地铁某车站治理 3 个月后发现预埋注浆管涌水事件。2023 年 11 月, 已完成侧墙及轨顶风道治

理的区域, 一处建设期预埋注浆管($\phi 25$ mm)突发涌水, 峰值流量 8.7 L/min, 水压 0.2 MPa(见图 3(a))。

(2) 治理前状态

地下水通过多个渗漏路径(总过流面积 48.2 mm 2)排泄, 单点承压较小(<0.1 MPa)。预埋注浆管封堵材料(水泥基)老化强度降至 1.8 MPa(见图 3(b))。

(3) 水力响应分析

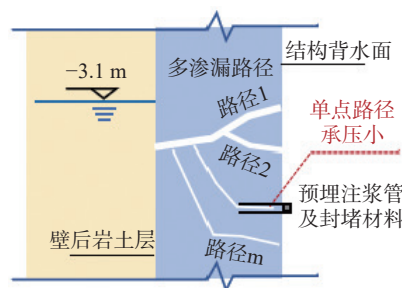
在渗漏治理过程中, 对主要渗漏路径的封堵改变了地下水系统的水力平衡, 导致水压重新分布并集中作用于历史薄弱点。根据达西定律和流体连续性原理, 封堵后剩余路径承受的水压增量 ΔP 为:

$$\Delta P = P_0 \times \frac{A_{\text{total}}}{A_{\text{remaining}}} \quad (4)$$

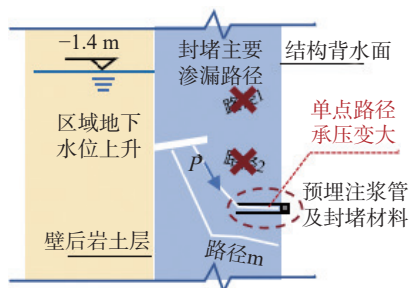
式中: P_0 为初始水压, $P_0=0.15$ MPa; A_{total} 为原始总过流面积, $A_{\text{total}}=48.2$ mm 2 ; $A_{\text{remaining}}$ 为剩余过流面积, $A_{\text{remaining}}=3.856$ mm 2 。计算得到水压增量 $\Delta P=1.875$ MPa, 封堵后剩余路径水压 $P_{\text{new}}=P_0+\Delta P=2.025$ MPa。水压传递路径变化如图 3(c)所示。



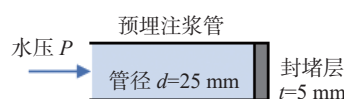
(a) 车站机电层渗漏照片



(b) 治理前多路径渗漏分散压力



(c) 主要路径封堵后压力集中



(d) 预埋注浆管封堵结构受力模型

图 3 车站水压增大击穿预埋管机理

Fig. 3 Mechanism of pre-buried pipe burst caused by increased water pressure in station

实际监测区域地下水位持续上升(水位从-3.1 m 升至-1.4 m), 外围水压从 0.15 MPa 增至 0.28 MPa。但根据水压传递模型计算, 薄弱点实际承受的水压高达 2.025 MPa, 远高于监测值, 导致这种结果的因素和机理如表 2 所示。

(4) 治理行为与不足

封堵主要渗漏路径(过流面积减少 92%)后, 预埋注浆管处渗漏路径渗透压力显著增大(见图 3(c))。外围水压从 0.15 MPa 增至 0.28 MPa, 但薄弱点实际承受压力高达 2.025 MPa。治理过程中存在以下不

表2 封堵后渗流路径水压增加的影响因素和机理分析
Tab. 2 Analysis of influencing factors and mechanisms of water pressure increase in seepage path after plugging

影响因素	机理分析	对水压的影响
路径封堵率	92%的渗漏路径被封堵, 过流面积急剧减小	水压集中系数达12.5倍
区域水位上升	地下水位从-3.1 m升至-1.4 m(上升1.7 m)	静水压增加16.7 kPa
动水压力	水流速增大导致的动水压效应	增加约0.1~0.2 MPa
材料老化	水泥基封堵材料孔隙率增至28%	抗压强度降低46%

足: 未评估封堵后水压重新分布对历史薄弱点的影响, 忽视区域地下水位持续上升(水位从-3.1 m 升至-1.4 m)带来的静水压增加; 未考虑动水压力对薄弱点的冲击效应, 以及未对服役超过 5 年的封堵材料进行强度检测。

(5)破坏机制

将封堵材料和注浆管简化为薄壁圆筒结构(见图 3(d)), 根据材料力学最大剪应力破坏理论, 封堵材料剪应力 τ 满足:

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{Pd}{4t} = (2.025 \times 25)/(4 \times 5) \\ &= 2.531 \text{ MPa} > 1.8 \text{ MPa} = \tau_{\max}\end{aligned}\tag{5}$$

式中: P 为水压, $P=2.025 \text{ MPa}$; d 为管径, $d=25$; t 为封堵层厚度, $t=5 \text{ mm}$ 。计算结果显示剪应力超过材料极限强度, 导致封堵失效。

(6)核心岩土问题及治理措施

忽视有效止水后区域水压累积效应及历史缺陷敏感度。经前述分析后采取如下治理措施: ①采用速凝型环氧树脂紧急封堵涌水管; ②全面排查同类预埋管 126 处, 对服役超 5 年的 34 处薄弱点进行预防性加固; ③增设水压监测点(间距 15 m), 实时监控水压变化; ④在结构外围设置减压井, 降低区域水压。

2.4 小结

通过对北京地铁既有线渗漏治理工程中 3 个典型案例的分析, 揭示了渗漏治理不当引发次生病害的 3 种典型模式及其内在机理。表 3 总结了治理不当行为、引发的次生病害类型、对应的水力响应及关键岩土参数变化, 可为工程防控提供理论依据。

3 结论与展望

本文通过对北京地铁渗漏治理工程的系统研究, 揭示了治理不当引发次生病害的 3 种典型机理: 渗流路径改变、地下水位上升和水压力集中效应。研究表明, 次生病害的本质是治理行为打破了原有水力

表3 治理不当行为与次生病害关联分析
Tab. 3 Correlation analysis between improper treatment behaviors and secondary diseases

治理不当行为	次生病害类型	水力响应	关键岩土参数变化	时间尺度
仅封堵下游出水点	渗流路径改变	水压重分布	渗透力增加至 3.5 kN/m ³	小时级
未控制水位壅高	邻近区域进水	地下水位上升	孔隙水压增加至 24.5 kPa	天级
未加固历史薄弱点	结构击穿破坏	水压集中累积	剪应力超限 2.531 MPa> 1.8 MPa	月—年级

平衡, 导致地下水系统在薄弱环节重新建立平衡点。基于案例分析, 提出了“源头控制-路径管理-压力疏导”的综合防控策略。

3.1 结论

(1)地铁渗漏治理不当会显著扰动局部地下水渗流场, 主要引发 3 类次生病害: 渗流路径改变诱发新渗漏点、地下水位上升引发邻近低洼区域进水、地下水压力增大击穿既有结构薄弱点。

(2)次生病害的本质是治理行为打破了原有(即使是病态的)水力平衡, 而新的平衡点在薄弱结构处形成破坏。关键在于对“渗流路径-地下水位-地下水压力”这一水力系统连锁反应的忽视或误判。

(3)科学有效的渗漏治理必须采取系统性思维, 以彻底阻断水源为核心目标, 治理过程中需动态分析并管理渗流路径变化(考虑封堵点上下游影响), 治理后需密切监测外围地下水位变化并评估其可能影响, 对结构存在的历史遗留薄弱点(如预埋管、旧缝)需评估其在水压升高下的风险并预先加固, 必要时需设置泄压或疏导措施(如排水孔)。

3.2 展望

(1)量化研究: 建立更精细的数值模型, 定量模拟不同治理工况下(封堵位置、范围、材料渗透性)对渗流场(路径、水位、水压)的扰动过程及次生病害发生阈值。

(2)智能监测预警: 开发集成渗流量、水压、结构应变等多参数实时监测系统, 结合大数据与人工智能, 实现对治理过程中水力系统变化及次生病害风险的早期预警。

(3)长效治理材料与工艺: 研发既能有效止水, 又具有一定透水性或可疏导性(避免压力过度累积)的智能材料及组合工艺, 提高治理的长期可靠性和环境适应性。

(4)标准规范完善: 推动将次生病害风险评估和防控措施(如水位监测、泄压要求、薄弱点普查加固)

纳入地铁渗漏治理的相关设计、施工与验收规范。

参 考 文 献

- [1] 张成平, 王李斌, 唐海栋, 等. 北京地铁盾构隧道渗漏病害成因及对管片结构的影响研究 [J]. [隧道建设 \(中英文\)](#), 2024, 44(S1): 456-466. (ZHANG C P, WANG L B, TANG H D, et al. Study on causes of leakage in Beijing metro shield tunnel and its influence on segment structure[J]. [Tunnel Construction](#), 2024, 44(S1): 456-466. (in Chinese))
- [2] 邵 华, 王 蓉. 上海地铁盾构隧道病害影响因素及特征分析 [J]. [现代隧道技术](#), 2018, 55(S2): 922-929. (SHAO H, WANG R. Analysis of the influence factors and its characteristics of metro shield tunnel defects in Shanghai[J]. [Modern Tunnelling Technology](#), 2018, 55(S2): 922-929. (in Chinese))
- [3] 魏 纲, 黄时雨, 洪文强. 运营地铁盾构隧道结构安全评价现状与展望 [J]. [现代隧道技术](#), 2018, 55(S2): 996-1003. (WEI G, HUANG S Y, HONG W Q. Present status and prospects of safety evaluation for operational subway shield tunnel structures[J]. [Modern Tunnelling Technology](#), 2018, 55(S2): 996-1003. (in Chinese))
- [4] 赵 龙, 蒋小伟, 李玉梅, 等. 近 10 年北京平原区地下水水位变化及与地面沉降的关系研究 [J]. [地质学报](#), 2025, 99(5): 1792-1806. (ZHAO L, JIANG X W, LI Y M, et al. Groundwater level changes and their impact on land subsidence in the Beijing Plain during the past 10 years[J]. [Acta Geologica Sinica](#), 2025, 99(5): 1792-1806. (in Chinese))
- [5] 曾俊钢, 黄柱进, 张维欣. 高弹性堵漏用改性环氧灌浆材料的研发及应用 [C]//全国第二十三届防水技术交流会会刊论文集. 苏州: 中国硅酸盐学会防水材料专业委员会, 中国硅酸盐学会房屋建筑材料分会, 江苏省硅酸盐学会, 苏州中材非金属矿工业设计研究院有限公司, 中国建材苏州中材非矿院防水材料研究院, 2021: 140-147. (ZENG J G, HUANG Z J, ZHANG W X. Development and application of modified epoxy grouting material for high-elasticity leak sealing[C]//Proceedings of the 23rd National Waterproofing Technology Conference. Suzhou, 2021: 140-147. (in Chinese))
- [6] 富珠峰, 杨 霞, 王霖新. 弹性环氧灌浆材料在上海地铁 9 号线中的应用 [J]. [中国建筑防水](#), 2012(4): 21-23,26. (FU Z F, YANG X, WANG J X. Application of flexible epoxy resin grouting materials in metro line 9 tunnel[J]. [China Building Waterproofing](#), 2012(4): 21-23,26. (in Chinese))
- [7] 薛丽影, 朱浩博, 王 涛. 基于气囊法的地下水渗漏快速封堵技术 [J]. [建筑科学](#), 2025, 41(3): 149-154. (XUE L Y, ZHU H B, WANG T. Rapid sealing technology of groundwater leakage based on air bag method[J]. [Building Science](#), 2025, 41(3): 149-154. (in Chinese))
- [8] 田思萌, 王耀东, 刘胜智, 等. 地铁盾构隧道裂缝与渗漏水图像采集与智能识别算法研究 [J]. [中南大学学报 \(自然科学版\)](#), 2025, 56(1): 370-383. (TIAN S M, WANG Y D, LIU S Z, et al. Research on crack and leakage image acquisition and intelligent recognition algorithm of subway shield tunnel[J]. [Journal of Central South University \(Science and Technology\)](#), 2025, 56(1): 370-383. (in Chinese))
- [9] 于 霖, 潘秀明, 李宇杰, 等. 北京地铁既有地下结构渗漏原因与治理研究 [J]. [现代城市轨道交通](#), 2025(5): 81-89. (YU L, PAN X M, LI Y J, et al. Research of leakage causes and treatment of existing underground structure of Beijing subway[J]. [Modern Urban Transit](#), 2025(5): 81-89. (in Chinese))
- [10] 张 君, 贾苍琴, 贾梦茵. 北京地铁基坑地下水处理实效分析 [C]//2024 年全国土木工程施工技术交流会论文集 (下册). 北京: 《施工技术》杂志社, 2024: 619-621. (ZHANG J, JIA C Q, JIA M Y. Effectiveness analysis of groundwater treatment in Beijing metro foundation pits[C]//Proceedings of the 2024 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference (Volume II). Beijing, 2024: 619-621. (in Chinese))
- [11] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2022 年度统计和分析报告 [R]. 2023. (China Association of Metros. Annual Statistics and Analysis Report of Urban Rail Transit in 2022[R]. 2023. (in Chinese))
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地下工程渗漏治理技术规程: JGJ/T 212—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for remedial waterproofing of the underground works: JGJ/T 212—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [13] 北京市交通委员会. 城市轨道交通既有有线渗漏治理工程技术指南 [R]. 北京: 北京市交通委员会, 2023. (Beijing Municipal Commission of Transport. Technical guide for leakage treatment of existing lines in Beijing rail transit[R]. Beijing: Beijing Municipal Commission of Transport, 2023. (in Chinese))

收稿日期: 2025-06-04