地铁暗挖隧道防水施工技术浅析

郭文洋

中咨工程管理咨询有限公司　北京　100048

摘　要：城市敏感地段地铁暗挖隧道围岩破碎、地下水富集，且周边管线密集，防水施工直接决定结构安全与运营年限。本文以复合式衬砌隧道为研究对象，遵循“防、排、截、堵、刚柔相济”防水原则，归纳富水地层渗漏诱因。聚焦超前围岩注浆、基面精细化处理、高分子卷材热熔焊接三项核心工艺，明确材料选型与节点施工管控要点，优化施工缝、穿墙管件等薄弱部位防水措施。依托全过程闭环管控、智能化注浆两类创新技术完善验收体系，保障防水体系稳定可靠，为同类复杂城区暗挖防水工程提供施工参考。

关键词：地铁暗挖隧道；防水施工；复合式衬砌；超前注浆；热熔焊接；闭环管控

引言：城市地下空间开发提速，暗挖隧道凭借扰动小、适应性强的优势，广泛应用于城区建筑密集区段。市中心隧道普遍存在围岩破碎、水位偏高、管线繁杂等难题，渗漏水为常见核心病害。复合式衬砌应用广泛，但富水围岩工况下，注浆、基面、防水工艺管控缺陷易引发渗水、结构腐蚀、地层沉降等隐患。为此，本文结合城区复杂施工条件，探究超前注浆、热熔焊接等关键防水技术，融入智能注浆与闭环管控创新模式，优化施工工艺流程，为城市暗挖隧道长效防水、安全运营提供技术支撑。

1 地铁暗挖隧道防水概述

1.1 暗挖隧道结构形式与防水等级

地铁暗挖隧道普遍采用复合式衬砌结构，主要包含初期支护、防水层、二次衬砌，是现阶段城市地下隧道主流施工结构。其中初期支护由喷射混凝土、锚杆、钢拱架构成，用于临时稳固围岩；二次衬砌为现浇钢筋混凝土永久结构，保障隧道长期承载稳定。按照轨道交通设计规范，隧道主体结构防水等级为一级，要求结构无湿渍、无渗漏；联络通道等附属结构为二级防水，允许少量无害湿渍。针对围岩破碎、地下水富集、管线密集的城区复杂地段，需进一步提高设防标准，加强前期注浆堵水加固能力。工程需结合不同区域水文地质条件匹配防水等级，优化结构设计，为复杂城市工况下隧道防渗筑牢基础防线[1]。

1.2 防水层的作用与设计原则

防水层设置于初支与二衬之间，是复合衬砌防水体系的核心屏障，可阻隔地下水、毛细水渗透入侵隧道内部。防水设计严格遵循“防、排、截、堵相结合，刚柔相济”原则，针对城区高水位、破碎富水围岩，秉持以堵为先的理念，配合超前注浆封堵外部水体。工程采用柔性防水材料搭配刚性自防水混凝土，组合形成复合防水体系，适配隧道结构微小形变，弥补单一防水工艺的缺陷。同时结合隧道埋深、地层土质、地下水位、周边管线分布等参数定制防水方案，优化整体构造，有效提升防水系统稳定性与耐久性，满足城市敏感地段严苛的地下施工防水要求。

1.3 暗挖隧道渗漏水的危害与成因

城区密集管线地段暗挖隧道渗漏水危害突出，轻微渗漏会造成隧道内壁潮湿霉变，腐蚀机电设备；长期渗水会锈蚀钢筋、降低混凝土强度，诱发衬砌开裂，严重时引发地层不均匀沉降，危及周边建构筑物与管线安全，同时增加运维成本、影响地铁通行效率。渗漏诱因分为自然与施工两类，自然方面为城区地下水位高、围岩裂隙发育、土体透水性强，地下水持续施压渗透；施工方面包含超前注浆不密实、基面处理粗糙、卷材焊接破损、接缝密封缺陷、混凝土振捣不实等工艺问题。多重不利因素叠加，极易造成防水体系失效，诱发隧道渗漏病害。

2 防水材料选用与技术特性

2.1 防水卷材

防水卷材是暗挖隧道柔性防水核心主材，针对富水软弱围岩、管线密集的城区工程，工程优选高分子防水卷材实施热熔焊接施工。合格卷材需具备高抗渗、高抗拉、耐老化、抗撕裂等性能，可适应围岩微小形变，不易开裂损坏。高分子卷材柔韧性好、耐腐蚀、贴合度高，适配隧道曲面复杂断面。工程采用热熔焊接工艺，

高温熔接卷材搭接边，形成整体密闭防水膜，相较于传统粘接工艺，焊缝强度、抗渗性能更优，适配高水压地层。施工中搭配自粘式卷材做局部修补，改性沥青卷材增强抗穿刺能力。所有卷材进场必须抽样复检，严控材料质量，保障复杂工况下防水层长期稳定可靠。

2.2 接缝密封材料

接缝密封材料用于施工缝、变形缝、穿墙管件等防水薄弱位置，是封堵渗水通道、保障防水体系完整的关键辅材。工程常用聚氨酯、聚硫密封胶、遇水膨胀止水条及止水带等材料，富水地段采用多重密封构造强化防渗能力。密封胶柔韧性与粘结性优异，可适应结构伸缩形变；遇水膨胀止水条适用于施工缝密封，遇水膨胀封堵缝隙；中埋式与外贴式止水带用于变形缝，抵御结构沉降形变。针对城区高水压地段，在接缝内部预留注浆补强管路，后期可通过补浆封堵细微渗水孔隙，多重防护提升接缝密封强度，有效降低隧道接缝位置渗漏风险[2]。

2.3 防水保护层与辅助材料

防水保护层及辅助材料用于防护防水层，避免施工过程造成卷材破损，完善整体防水体系。工程多采用水泥砂浆、细石混凝土作为保护层，铺设于卷材外侧，阻隔钢筋绑扎、混凝土浇筑产生的穿刺与摩擦损伤，防止卷材空鼓、移位。其中水泥砂浆平整度高，适用于隧道大面积防护。辅助材料包含基层处理剂、搭接胶带、固定压条、堵漏剂等，可优化基面质量、强化接缝密封、预处理基面渗水点。保护层与各类辅材协同配合，既能最大程度保留防水层完整性，适配复杂围岩施工环境，又能优化施工条件，为二次衬砌施工筑牢保障基础。

3 暗挖隧道防水施工关键技术

3.1 超前围岩注浆堵水技术

针对城区地下水丰富、围岩破碎、地表管控严格的暗挖隧道工程，超前围岩注浆堵水技术是前置防渗核心工艺。施工前结合地质勘察报告研判围岩裂隙发育情况，采用小管棚 + 超前小导管组合注浆方式，向掌子面前方围岩压注水泥-水玻璃双液浆，填充岩体裂隙，固结松散破碎围岩，在隧道轮廓外侧形成密闭隔水加固环，阻断地下水渗流通道。工程采用智能化注浆施工创新技术，搭载自动化注浆压力传感器与流量监测模块，实时调控注浆压力、注浆速率与浆液配比，避免人工注浆压力不均、浆液流失等问题。注浆过程实行分区、分段、分层注浆，严格控制扩散半径，减少浆液扰动周边土体，保护邻近地下管线与建筑物。注浆完成后进行钻孔检测，确保围岩固结密实、涌水量达标，为后续基面处理与防水层施工创造干燥稳定作业环境。

3.2 初期支护基面精细化处理技术

初支基面精细化处理是暗挖隧道防水施工的基础性关键工序，尤其适用于围岩凹凸不平、岩性复杂的破碎地层。施工前需全面清理初期支护基面，彻底清除表面浮浆、杂物、尖锐骨料、外露锚杆与钢筋头，对凸起部位采用机械打磨找平，凹凸坑槽采用高强度水泥砂浆分层修补回填，控制基面平整度误差，保证基面顺滑无尖锐棱角。针对基面局部渗流水点，采用导流槽引流 + 化学堵漏剂封堵组合工艺，做到明水清零、基面干燥。区别于常规简易处理，精细化处理严格把控边角圆弧处理、基面含水率、局部缺陷修补标准，消除尖锐凸起对高分子卷材的穿刺破坏，为热熔焊接施工提供平整、坚实、干燥的作业基面，从源头降低防水层空鼓、开裂、渗漏风险。

3.3 防水卷材热熔焊接施工

本工程采用高分子防水卷材热熔焊接技术，为富水城区暗挖隧道核心防水工艺。卷材铺设遵循“先底板、后边墙、后拱顶”顺序，提前裁切适配隧道曲面断面，预留规范搭接宽度。施工采用自动爬行式热焊机开展长边焊接，手持热风枪处理短边搭接，高温熔化卷材搭接层使两层卷材熔为一体，焊缝连续均匀、无气泡、无漏焊，焊缝抗拉强度不低于母材强度[3]。铺设过程中匀速舒展卷材，避免褶皱、拉伸、空鼓，拱顶部位加密固定压条，固定点位避开焊缝位置。相较于传统冷粘工艺，热熔焊接密封性更强、耐水压更高，适配高地下水位复杂工况。施工全程做好成品保护，杜绝机具穿刺、踩踏卷材，铺设完成后采用气压检漏仪检测焊缝气密性，保障防水层连续密闭无渗漏。

3.4 施工缝与变形缝防水

施工缝与变形缝是暗挖隧道防水的核心薄弱部位，富水地层需采用多重复合防水构造强化防渗效果。施工缝分为水平施工缝与竖向施工缝，施工前需清理缝面浮渣、杂物，保持缝面洁净干燥，预埋遇水膨胀止水条并涂刷密封胶，浇筑混凝土前充分润湿缝面，保障新旧混凝土结合密实。变形缝适配结构沉降、伸缩形变，采用外贴式止水带 + 中埋式止水带 + 密封胶三重防水工艺，止水带安装居中、固定牢固，无扭曲偏移。针对城区敏感地段，变形缝内侧增设注浆预留管路，后期可通过注浆补强封堵细微渗漏通道。缝内填充柔性密封材料，表层涂刷密封胶封闭，兼顾结构形变适配性与防水密封性。

完工后专项验收排查，确保变形缝、施工缝防水达标，消除重点渗漏隐患。

3.5 钢筋穿墙管件与预埋件防水

钢筋穿墙、管线穿越及各类预埋件部位，因结构贯通易形成渗水通道，是暗挖隧道防水施工的重点管控部位。施工前需精准定位预埋件、穿墙管件位置，提前做好防水预处理，严禁后期随意打孔穿孔破坏防水层。穿墙管件安装固定后，在管件根部、钢筋穿墙缝隙处涂刷密封胶、粘贴止水卷材，采用环形密封工艺全方位封堵缝隙。预埋件周边防水层需完整包裹，边角部位细化裁切处理，确保密封严实。钢筋绑扎过程中规避钢筋挤压、穿刺周边防水层，对破损部位及时修补。所有穿墙构件做好防腐防水双重处理，构件与混凝土、防水层紧密结合。复杂管线密集区段增设附加防水加强层，强化节点防渗能力，杜绝细部渗漏问题。

3.6 二次衬砌混凝土施工对防水层的保护

二次衬砌混凝土浇筑施工极易对已完工防水层造成破损、移位、空鼓等损伤，富水围岩地段需落实精细化成品保护措施。钢筋绑扎阶段，严控钢筋吊装、摆放工艺，避免尖锐端头划伤、穿刺防水层，规范布设钢筋垫块，杜绝钢筋直接接触防水卷材。模板安装保证平整严密，防止模板边角挤压磨损防水层。混凝土采用分层、对称、匀速浇筑，分层振捣，杜绝暴力振捣、集中下料冲击防水层，防止卷材移位空鼓。振捣设备避开防水层表面作业，严控振捣力度。依托全过程闭环防水管控技术，安排专人全过程巡查监控，实时排查防水层破损、脱落问题，发现缺陷立即停工修补，验收合格后方可继续施工，最大程度保护防水层完整性。

4 防水施工质量控制

4.1 质量检验标准

地铁暗挖隧道防水施工质量检验严格遵循国家轨道交通工程施工质量验收规范，复杂城区富水地段执行一级防水管控标准。防水层主材需具备完整出厂合格证、检测报告，进场复检拉伸强度、不透水性、耐老化等指标达标。基面精细化处理需达到平整、洁净、无尖锐杂物、无积水渗水标准；超前注浆围岩固结密实，涌水量控制在规范限值以内。防水卷材热熔焊缝均匀牢固，无烧穿、漏焊，搭接宽度符合设计要求；接缝、穿墙节点、变形缝等薄弱部位防水构造完整。依托全过程闭环管控体系，将注浆、基面、铺设、浇筑、验收全流程纳入管控台账，隐蔽工程提前报验，留存影像及检测资料，层层压实质量责任，保障复杂工况下防水工程质量稳定达标[4]。

4.2 检测方法与验收标准

暗挖隧道防水施工检测分为材料检测、工序检测、成品检测三大环节。防水材料进场后随机抽样送检，检测卷材焊接性能、密封材料膨胀倍率、注浆浆液固结强度。施工阶段采用目视检查、焊缝气压检测、现场实测等方式，严控基面平整度、焊缝质量、止水带安装精度；注浆完成后采用钻孔注水试验检测围岩堵水效果。隐蔽工程完工后开展闭水、淋水试验，持续观测无渗漏、无湿渍为合格。工程完工后全面排查隧道内壁、接缝、节点，严格执行一级防水验收标准。结合智能化监测手段，对注浆压力、焊缝气密性、围岩含水率进行数字化采集，实现数据可追溯、质量可管控，确保隧道防水满足长期安全运营要求。

结束语

本文针对围岩破碎、地下水丰富、周边建构筑物密集的城市敏感区段，系统研究地铁暗挖隧道防水施工技术。文章阐述复合式衬砌防水体系，分析城区复杂工况渗漏水成因，重点介绍超前围岩注浆堵水、基面精细化处理、高分子卷材热熔焊接三大核心施工技术。依托全过程闭环防水管控、智能化注浆施工两大技术创新，完善施工流程与质量验收体系。未来应持续推广智能化注浆、高精度热熔焊接等新工艺，不断优化城市复杂地段暗挖防水技术，为轨道交通安全建设运营提供坚实保障。

参考文献

[1] 王海良. 地铁暗挖隧道防水施工工艺及质量控制要点 [J]. 建筑工程技术与设计,2026,14(4):8-10.

[2] 马世洲. 浅析地铁车站暗挖隧道防水设计及施工 [J]. 中国设备工程，2023(3)：244-246.

[3] 孙璐. 地铁站暗挖区间隧道防水施工技术应用研究 [J]. 新型工业化，2022 12(2):96-98.

[4] 高春华. 地铁暗挖隧道施工中防水抗渗技术研究 [J]. 中国建筑防水，2023(3)：57-60,64.