

地铁隧道近距离下穿河渠的盾尾渗漏风险防控

夏毓坤

重庆交通建设管理有限公司，重庆，400020；

摘要：地铁隧道近距离下穿河渠施工中，盾尾渗漏是诱发工程事故的核心风险源，其不仅可能导致盾构机卡盾、隧道结构受损，更易引发河渠水位下降、边坡失稳等连锁灾害。本文基于盾构法施工原理与地下水动力学理论，系统剖析盾尾渗漏的“密封失效-水压突破-渗漏扩散”三维演化机理，识别盾尾密封系统性能、同步注浆质量、水文地质条件等关键影响因素。结合下穿河渠施工的特殊性，构建“前期勘察预判-施工过程管控-后期监测验证”的全流程风险防控体系，提出盾尾密封优化、注浆参数动态调整、应急处置联动等针对性技术措施，为同类工程风险防控提供理论支撑与实践指导。

关键词：地铁隧道；下穿河渠；盾尾渗漏；风险防控；盾构施工

DOI：10.69979/3029-2727.25.12.022

1 引言

1.1 研究背景

我国城市化进程推动地铁网络向城郊延伸，线路不可避免需穿越河渠、湖泊等水体区域。据不完全统计，国内已建及在建地铁线路中，约25%的区间隧道涉及水体下穿工况，其中近距离下穿（隧道顶距河渠底小于3倍盾构直径）占比超40%。河渠区域水文地质条件复杂，地下水位高、土体渗透性强，盾构施工中盾尾渗漏风险显著高于普通地层——盾尾作为盾构机与管片之间的动态密封界面，一旦出现密封失效，河渠水体与泥沙将通过渗漏通道涌入隧道，引发掌子面失稳、管片上浮等重大风险。

1.2 研究现状与意义

国内外学者围绕盾尾渗漏防控开展了系列研究：国外研究聚焦密封材料研发与结构优化，开发出多道弹性密封刷与油脂协同密封系统；国内研究侧重施工参数控制，提出基于地层压力的同步注浆压力调整方法。但现有研究多针对普通地层，对下穿河渠的“高水压、强渗透、易扰动”特殊工况关注不足，尤其缺乏对河渠水位动态变化下的渗漏风险响应机制研究。开展本研究的意义在于：理论层面揭示河渠水环境与盾尾渗漏的耦合作用机理，完善盾构施工风险防控理论体系；实践层面提出适配特殊场景的防控技术方案，填补技术空白，为工程实践提供可操作的指导依据。

2 盾尾渗漏的演化机理与风险特征

2.1 盾尾密封系统的工作原理

盾尾密封系统是防控渗漏的核心屏障，主要由盾尾壳体、弹性密封刷、密封油脂及管片组成，其工作机制表现为“双重防护”：第一道防护由多道（通常2-3道）弹性密封刷构成，密封刷采用钢丝与耐磨橡胶复合结构，通过预压缩量紧贴管片外壁形成物理密封；第二道防护由密封油脂提供，通过注入系统将高粘度油脂压注于密封刷之间的腔室，填充间隙并阻隔水体与泥沙，同时起到润滑与防腐作用，双重防护协同作用可有效抵御地层水压力^[1]。

2.2 下穿河渠场景下的渗漏演化机理

河渠区域的高水位与强渗透特性，使盾尾渗漏演化呈现“三步递进”特征：密封失效诱发阶段中，下穿施工盾构机姿态调整频繁，管片与盾尾间隙波动幅度增大，超过密封刷自适应范围导致其永久变形或破损，同时河渠底砂卵石、粉细砂层颗粒随地下水进入密封腔，造成油脂流失与密封刷磨损，双重屏障局部失效；水压突破渗透阶段，密封失效后河渠水体在水位差作用下形成渗透压力，当压力超过剩余屏障抗渗能力时，水体突破密封腔形成初始渗漏通道，油脂补充不及时则通道迅速扩展，渗漏量随水压升高呈指数级增长；渗漏扩散加剧阶段，初始渗漏后水流携带地层颗粒涌入盾尾，扩大管片背后空隙，削弱密封系统支撑作用，且河渠水位动态变化加剧渗透压力波动，使渗漏通道反复冲刷扩大，可能发展为大规模涌水涌砂。

2.3 下穿河渠的渗漏风险特征

相较于普通地层，下穿河渠场景的盾尾渗漏具有三大显著特征：风险触发阈值低，河渠区域地下水位通常

高于隧道顶标高，静水压力显著大于陆地地层，密封系统微小破损即易引发渗漏，临界破损面积仅为陆地地层的1/3~1/2；扩散速度快且危害大，河渠底土体渗透性强，渗漏水体快速渗透并携带泥沙形成“管涌”，短时间内造成密封腔堵塞、盾尾卡滞，甚至引发河渠边坡塌陷；风险受水位动态影响显著，雨季水位上涨导致渗透压力骤增，可能使稳定密封系统突然失效，枯水期水位下降引发土体固结收缩，导致管片与盾尾间隙增大，增加密封难度。

3 下穿河渠盾尾渗漏的关键影响因素

3.1 密封系统自身性能因素

密封系统的先天性能直接决定抗渗漏能力：密封刷材质与结构至关重要，不锈钢钢丝与氢化丁腈橡胶复合的密封刷，耐磨寿命与抗压缩变形能力比普通钢丝刷提升50%以上；密封油脂需适配河渠水环境，具备良好耐水性、粘附性与抗剪切性，耐水性不足则遇水乳化流失，丧失密封功能；密封系统设计道数影响防护效果，下穿河渠施工采用3道密封刷的抗渗能力比2道提升40%，可有效抵御高水压冲击^[2]。

3.2 施工操作与参数控制因素

施工过程的参数控制与操作规范性是渗漏防控的关键：盾构姿态偏差过大导致盾尾间隙不均匀，局部间隙超过20mm时，密封刷无法有效贴合管片，形成渗漏隐患；同步注浆质量直接影响管片背后空隙填充效果，注浆不饱满或浆液凝结时间过长，易引发管片后期沉降，导致间隙增大；密封油脂注入质量至关重要，注入压力不足则填充不密实，注入量过少无法形成有效防护，压力过高又可能造成密封刷变形损坏。

3.3 水文地质与河渠环境因素

水文地质条件是渗漏风险的基础诱因：河渠底地层渗透性直接影响渗漏速度，渗透系数大于 10^{-3} cm/s的砂卵石层，渗漏量是粘性土层的10倍以上；地下水位与河渠水位的差值决定渗透压力大小，水位差每增加1m，渗透压力增大0.01MPa，显著提升密封系统荷载；河渠边坡稳定性间接影响渗漏风险，施工扰动导致边坡失稳时，可能引发地层不均匀沉降，破坏盾尾密封系统整体性。

3.4 管片安装与背后填充因素

管片安装质量与背后填充效果影响密封系统的受力环境：管片拼装错台与破损会增大盾尾间隙，错台量超过5mm时，密封刷与管片贴合度显著下降；管片背后

空隙未及时填充，会导致管片在水压作用下产生径向位移，使间隙动态变化，加剧密封刷磨损；二次注浆时机与浆液性能至关重要，滞后于管片沉降则无法有效控制间隙变化^[3]。

4 全流程风险防控体系构建

4.1 前期勘察与预案制定阶段

精细化水文地质勘察采用“钻探+物探+水位监测”综合方法，明确河渠底地层分布、渗透系数、地下水位与河渠水位联动关系，重点探测砂卵石透镜体、裂隙发育带等强渗透区域，绘制详细水文地质剖面图，同时对河渠水位开展不少于1个月的连续监测，掌握水位变化规律，为风险评估提供基础数据。密封系统专项优化需根据勘察结果设计，高水压区域采用3道弹性密封刷，预压缩量设定为管片最大间隙的1.2~1.5倍，选用耐水型复合密封油脂，其耐水浸泡时间不低于72小时，且在0~40℃范围内保持稳定粘性，同时增设密封油脂压力监测点，实时监控各密封腔状态。风险评估与预案编制需建立“密封性能-水文条件-施工参数”三维体系，采用模糊综合评价法确定风险等级，针对高风险区域编制专项预案，明确不同渗漏等级的响应措施，包含油脂补充、注浆加固、应急排水等方案，且需涵盖河渠水位骤升骤降的应急处置内容，确保响应及时性。

4.2 施工过程中的动态防控措施

盾构姿态与间隙精准控制采用“小纠偏、多调整”策略，盾构轴线偏差控制在±50mm以内，管片与盾尾间隙保持在50~80mm合理范围，通过激光导向系统实时监测姿态变化，每环掘进后计算间隙值，根据分布调整下一环参数，避免局部间隙过大。密封油脂注入实行精细化管理，建立“压力-流量-间隙”联动机制，根据河渠水位计算注入压力（地下水压力+0.1~0.2MPa），每环注入量按密封腔体积的1.2~1.5倍控制，采用8~12个圆周注入点实现均匀填充，掘进中每30分钟检查一次油脂压力，发现骤降立即停机排查补充。同步注浆与二次注浆协同防控，同步注浆采用早强型浆液，初凝时间控制在4~6小时，24小时抗压强度不低于2MPa，强渗透地层采用“双液注浆”技术缩短凝结时间，提高抗渗性能，下穿河渠段每5环进行一次二次注浆，压力略高于同步注浆，填充空隙并控制管片沉降。立体化监测与预警响应构建“设备监测+人工巡查+环境监测”三重体系，设备监测通过油脂压力传感器、渗漏报警器实时采集数据，设定压力下降速率超0.05MPa/h或渗漏量超5L/h为预警值；人工巡查每环掘进后开展，重点检查盾

尾内侧湿润痕迹与管片接缝渗水；环境监测每小时记录河渠水位与边坡位移，预警触发后立即启动对应等级响应，采取停机补脂、注浆加固等措施控制风险扩散^[4]。

4.3 渗漏发生后的应急处置技术

轻微渗漏（渗漏量<10L/h）处置需立即停止掘进，加大密封油脂注入量，采用高压设备补充耐水型油脂，调整注入压力至原设定值的1.2倍，确保填充密实，若油脂压力仍无法回升，在盾尾外侧管片接缝粘贴遇水膨胀止水条增强密封，处置完成观察1-2小时确认渗漏停止后恢复掘进。中度渗漏（10L/h≤渗漏量<50L/h）处置要启动应急排水系统，通过集水井与排水泵排出水体，采用“油脂+浆液”联合封堵技术，先注入高粘度油脂初步控制，再通过管片注浆孔注入超细水泥浆液形成加固圈，同步监测盾构姿态与管片沉降，避免处置引发结构变形。重度渗漏（渗漏量≥50L/h）需立即启动一级应急响应，撤离人员并关闭盾构机电源，采用“双液注浆快速封堵+河渠临时截流”联合措施，通过地面或管片注入水泥-水玻璃双液浆形成止水帷幕，若伴随大量泥沙涌入，在河渠上游临时筑坝截流降低水位，渗漏完全控制后更换受损密封刷，检修系统验收合格方可恢复施工。

5 防控体系的关键技术保障

5.1 材料保障：适配水环境的密封材料选型

下穿河渠施工中，密封材料需满足“耐水、耐磨、抗老化”要求：密封刷选用直径0.3-0.5mm的不锈钢钢丝，外层包裹氯化丁腈橡胶，钢丝密度不低于80根/cm²，确保高水压下的弹性恢复能力；密封油脂采用矿物油基复合类型，添加聚异丁烯与纳米碳酸钙改性剂，水中浸泡72小时后锥入度变化率不超过15%，粘附强度不低于0.2MPa；同步注浆浆液选用P.042.5级早强水泥，掺加20%-30%粉煤灰与5%-8%膨润土，优化流动性与抗渗性能。

5.2 技术保障：专业化施工与监测团队建设

组建专项技术团队负责下穿河渠段施工，成员需具备水体下穿经验与盾尾密封系统操作资质，施工前开展专项培训，内容涵盖密封系统原理、风险识别、应急流程等，考核通过率需达100%。邀请盾构施工与水文地质领域专家成立技术顾问组，每3天开展一次现场指导，解决施工技术难题；监测团队实行24小时值班制度，

确保监测数据实时传输与预警信息快速响应^[5]。

6 结论与展望

6.1 研究结论

地铁隧道近距离下穿河渠时，盾尾渗漏的演化过程遵循“密封失效-水压突破-渗漏扩散”的作用机理，具备风险触发阈值不高、扩散速度迅猛、明显受水位动态状况影响的特性，主要原因是密封系统性能不佳和施工参数控制失误，密封系统性能、施工操作规范度、水文地质状况、管片安装质量是渗漏风险的关键影响因素，而河渠水位与密封油脂耐水性是下穿场景独有的控制变量。创建“前期勘察预判-施工过程管控-后期监测验证”全流程防控体系，利用密封系统优化、姿态精准掌控、注浆协同防控、立体化监测等办法，能显著降低渗漏风险，针对不同渗漏程度采用有针对性的应急处置技术，可迅速遏制风险扩散。

6.2 未来展望

材料技术领域要开展适用于超高压水环境的新型密封材料研发工作，探寻石墨烯改性密封刷和纳米复合密封油脂的应用，进而提高密封系统的耐水耐磨性能和使用寿命，智能防控方面需顺应盾构施工智能化走向，研发“密封状态-水位变化-施工参数”联动的智能调控体系，利用大数据分析实现对渗漏风险的预先判断和参数的自动变更，理论研究上要深入探究河渠水位动态变化和盾尾渗漏的耦合作用机理，构建考虑水位波动的渗漏量预测模型，给风险评估提供更精准的理论参考。

参考文献

- [1]傅德明.盾构隧道盾尾密封失效机理与防控技术[J].岩石力学与工程学报,2022,41(7):1489-1498.
- [2]王树英.地铁盾构下穿水体的盾尾渗漏风险控制研究[J].中国铁道科学,2021,42(3):45-52.
- [3]李兴高.盾构盾尾密封系统设计与施工控制技术[M].北京:人民交通出版社,2020.
- [4]李书成,陈道政,李鹏,候建林.盾构隧道近距离平行下穿暗挖隧道影响性分析[J].天津理工大学学报,2020,36(04):50-54.
- [5]兰庆男,张瑞顺,杨淦.城市地铁近距离下穿盾构隧道施工方法优选[J].广东交通职业技术学院学报,2019,18(01):32-35.