

城市区间地铁隧道盾构管片破损成因及修复技术

林 刚

中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 610000

摘 要: 盾构管片作为地铁隧道核心承重结构,服役期间易受多重因素耦合作用产生各类破损病害。结合地质、施工、设计、材料及运营多方面条件,梳理管片破损诱因,依据形态、力学机理、损伤程度及发展阶段完成破损分类,剖析各类破损破坏规律。汇总局部修补、结构加固、防水处置等常规修复工艺,介绍新型复合修复材料,并制定多维度修复评估体系,为地铁隧道管片病害治理、结构养护及安全运维提供技术参考。

关键词: 盾构管片; 破损成因; 修复技术; 结构加固; 地铁隧道

引言

轨道交通凭借便捷高效的优点,成为城市交通体系的核心组成部分。盾构施工模式广泛应用于地铁区间隧道建设,复杂服役环境下的管片易产生开裂、剥落、渗漏等病害,损害隧道结构完整性与耐久性。各类破损问题不仅降低通行舒适度,还留存长期安全隐患。为把病害发展规律,保障隧道服役寿命,有必要系统梳理管片破损成因与破损类型,归纳适配不同损伤等级的修复工艺,为工程运维管控提供理论支撑。

1 城市区间地铁隧道盾构管片破损的主要成因分析

盾构管片破损是地质条件、施工过程、结构设计、材料性能及运营环境多因素耦合引发的结构损伤,本质为管片承受的外部荷载与内部应力超出材料承载及变形极限所致。地质条件是重要外部诱因,富水砂层、软土地层易造成盾构机姿态偏移,使管片受不均匀挤压,硬岩地层易出现局部应力集中,同时地层不均匀沉降产生的附加弯矩,极易造成管片接缝开裂。施工参数偏差是破损直接原因,推进速度、扭矩控制不当会产生冲击荷载,注浆不饱满易引发管片变形,且拼装错台、螺栓紧固不到位等精度问题,会造成局部应力集中,诱发裂缝、掉块病害。结构设计存在的缺陷同样加剧破损问题,环刚度、配筋设计无法适配复杂临时荷载,接缝密封设计不合理易出现渗漏,进一步造成钢筋锈蚀,降低结构耐久性。材料性能劣化为内在隐患,混凝土质量不达标、骨料配比不合理易产生收缩裂缝,保护层厚度不足会加速钢筋锈蚀、混凝土剥落。此外,后期运营环境持续加速管片损坏,列车振动荷载易造成结构疲劳、螺栓松动,地下水侵蚀离子引发建材化学损伤,周边工程施工扰动地层,产生附加应力并诱发管片新生破损^[1]。

2 盾构管片破损的机理与分类

2.1 按破损形态分类

管片破损按形态可分为裂缝、掉块、破损穿孔及接缝破损四类。裂缝是最常见的破损形式,按走向可分为环向裂缝、纵向裂缝及斜向裂缝:环向裂缝多由管片环向拉力或弯矩过大引起,常见于管片中部或接缝附近;纵向裂缝主要因纵向不均匀沉降产生的附加弯矩所致,多分布在管片内侧;斜向裂缝则通常是复杂应力状态下的复合型破坏结果。掉块表现为管片混凝土表面局部剥落,多因局部冲击荷载或钢筋锈蚀膨胀导致;破损穿孔是管片贯穿性损伤,主要由硬岩地层施工时的岩块撞击或长期荷载作用下的结构失稳引起;接缝破损包括密封垫失效、螺栓松动或断裂、管片错台等,直接影响隧道的防水性能与结构整体性。

2.2 按力学机理分类

从力学机理角度,管片破损可分为弯曲破坏、剪切破坏、挤压破坏及疲劳破坏。弯曲破坏是管片在弯矩作用下,受拉区混凝土开裂,当拉应力超过材料抗拉强度时,裂缝扩展并贯通;剪切破坏多发生在管片接缝处,因剪切力过大导致接缝张开或错动,表现为斜向裂缝;挤压破坏常见于软土地层,管片在不均匀土压力作用下发生局部受压,混凝土被压碎或出现塑性变形;疲劳破坏则是长期动荷载(如列车振动)作用下,管片材料累积损伤,导致裂缝缓慢扩展,最终丧失承载能力。

2.3 按损伤程度分类

根据破损对结构性能的影响程度,可分为轻微破损、中度破损与严重破损。轻微破损指裂缝宽度小于0.2mm、掉块面积小于0.01m²,且未伤及钢筋,对结构承

载能力影响较小；中度破损表现为裂缝宽度 0.2-0.5mm、掉块面积 0.01-0.1m²，或局部钢筋暴露但未锈蚀，结构刚度略有降低；严重破损则指裂缝宽度大于 0.5mm、掉块面积超过 0.1m²，或钢筋严重锈蚀、结构出现明显变形，直接威胁隧道运营安全^[2]。

2.4 按破损阶段分类

管片破损可发生在施工阶段与运营阶段。施工阶段破损主要由盾构推进参数不当、管片拼装误差、同步注浆不及时等因素引起，具有突发性和局部性特点；运营阶段破损则是长期荷载与环境作用的结果，表现为渐进性与累积性，如裂缝缓慢扩展、钢筋锈蚀加剧等，需通过长期监测评估其发展趋势。

3 城市区间地铁隧道盾构管片破损修复技术

3.1 局部修补技术

局部修补技术适用于轻微破损（如表面裂缝、小面积掉块），旨在恢复管片表面完整性，阻止破损进一步发展。常用方法包括表面封闭法、压力注浆法及混凝土修补法。表面封闭法通过在裂缝表面涂抹密封材料，隔绝水、气等侵蚀介质，适用于宽度小于 0.2mm 的非活动性裂缝。常用材料有环氧树脂胶、聚氨酯密封胶等，施工时需先对裂缝表面进行清理（打磨、除尘、干燥），再采用刮涂或注射方式将材料填入裂缝，确保密封效果。该技术操作简便，但仅能处理表面裂缝，无法恢复结构强度。压力注浆法适用于内部有贯通空腔的裂缝或孔洞，通过高压将浆液注入破损部位，填充裂隙并固化形成整体。浆液材料需具备良好的流动性、粘结性及耐久性，常用环氧树脂浆液、超细水泥浆等。施工时需设置注浆孔，采用分段注浆工艺，控制注浆压力（通常为 0.3-0.8MPa），避免压力过大导致管片二次损伤。注浆完成后需进行无损检测（如超声波检测），确保注浆饱满度。混凝土修补法用于修复掉块或局部混凝土破损，通过填充新的混凝土或修补材料，恢复管片表面形态。材料选择需与原管片混凝土匹配，如微膨胀混凝土、聚合物改性混凝土等，以减少收缩裂缝。施工步骤包括破损区域凿除（形成规则界面）、界面处理（涂刷界面剂）、修补材料浇筑与养护。对于深度超过 50mm 的破损，需设置构造钢筋或纤维网，增强修补体与原结构的协同受力能力^[3]。

3.2 结构加固技术

结构加固技术主要用于处置盾构管片中度至严重破损病害，通过扩大承载面积、优化受力形式，提升隧道结构整体刚度与强度，常用技术包含碳纤维布加

固、钢环加固、粘贴钢板加固及预应力加固四类。碳纤维布加固依托材料轻质高强、耐腐蚀的优势，将材料粘贴于管片薄弱受力区域，施工中需平整处理基面，控制搭接长度并选用专用粘结胶，适用于弯曲裂缝、刚度不足的管片，加固效果良好且几乎不占用隧道净空。钢环加固多采用碳素钢板制作钢环，贴合固定于管片内外侧，以此约束结构变形、分担外部荷载，适合处理环向裂缝及整体刚度不足问题，加固刚度提升效果显著，但施工难度偏高且会压缩隧道净空。粘贴钢板加固原理与碳纤维布加固相近，依靠钢板强化管片抗剪、抗扭能力，结构受力稳定、刚度优异，不过钢板自重较大且易锈蚀，需额外做好防腐处理，避免产生附加病害。预应力加固分为体外与体内预应力两种形式，通过人为施加预压应力抵消管片拉应力，抑制裂缝延展，适配重载引发的结构性裂缝，能够主动优化结构受力状态，但该工艺流程复杂，施工过程需严格管控预应力损耗，保障加固施工质量。

3.3 防水修复技术

盾构管片破损通常伴随渗漏水病害，防水修复需配合结构修复同步实施，保障隧道整体水密性，行业常用修复技术主要分为接缝密封、注浆止水与防水涂层三类。接缝密封多用于处理接缝渗漏问题，针对密封垫老化、螺栓孔渗水等病害，需剔除老化密封材料，更换高性能密封垫并严格把控压缩量；螺栓孔渗水可加装止水环或灌注聚氨酯浆液，封堵渗水通道，恢复接缝密封性能。注浆止水适合裂缝及破损引发的集中渗漏，需依据水量与水压合理选配注浆材料，大水量、低水压工况选用水泥基浆液，小水量、高水压则采用化学浆液；施工采用梅花形布置注浆孔，控制钻孔深度与注浆压力，促使浆液充分扩散并形成止水帷幕，阻断地下水渗流路径。防水涂层适用于大面积渗水及表面微裂缝治理，常用材料包含水泥基渗透结晶涂料与聚脲弹性涂料，前者可渗入混凝土内部生成结晶堵塞毛细孔，后者能够形成弹性防水薄膜，抗裂耐久性能优异；施工前需清洁管片表面杂质，严格控制涂层厚度，并开展附着检测，以此保障表层防水质量，全面提升隧道防水抗渗能力^[4]。

3.4 新型复合材料修复技术

随着材料科学的发展，新型复合材料在管片修复中逐渐应用，其轻质、高强、耐腐蚀的特性为修复工程提供了新方案，主要包括纤维增强复合材料（FRP）、超高性能混凝土（UHPC）及自修复材料。FRP 复合材料除碳纤维布外，还包括玻璃纤维增强塑料（GFRP）、玄武岩纤维增强塑料（BFRP）等，可制成板材、筋材或型材

用于管片加固。GFRP 成本较低,适用于腐蚀性环境;BFRP 兼具高强度与抗冲击性,可用于承受动荷载的管片。FRP 修复技术需解决界面粘结问题,可通过表面处理(如喷砂、涂刷偶联剂)提高复合材料与混凝土的粘结强度。UHPC 具有超高强度(抗压强度 $\geq 150\text{MPa}$)、高韧性及优异的耐久性,可用于管片掉块修复或薄层加固。其配合比设计需优化钢纤维掺量(通常为1%-3%),确保工作性与力学性能;施工时采用喷射或浇筑工艺,与原混凝土界面需设置剪力键或植筋,增强协同受力。UHPC 修补体厚度可控制在30-50mm,既能恢复结构强度,又可减少对隧道净空的影响。自修复材料通过内置修复剂(如微胶囊、形状记忆合金)实现破损后的自主修复,适用于难以定期维护的管片。微胶囊型自修复材料将环氧树脂修复剂包裹于微胶囊中,当裂缝扩展时,胶囊破裂释放修复剂,在催化剂作用下固化;形状记忆合金则通过温度激励恢复原状,闭合裂缝。目前自修复技术仍处于试验阶段,其长期耐久性与成本控制是推广应用的关键。

3.5 修复效果评估技术

修复效果评估是确保管片修复质量的重要环节,需从外观、力学性能、耐久性及长期稳定性四个维度进行综合评价。外观评估通过目测、尺量及无损检测(如超声波、雷达扫描),检查修复体表面平整度、裂缝封闭情况及与原结构的贴合度。对于注浆修复,需检测注浆饱满度,避免空洞或未填充区域;对于加固修复,需检查碳纤维布、钢板等材料的粘贴质量,确保无空鼓、翘边。力学性能评估通过荷载试验或数值模拟,验证修复后管片的承载能力与变形性能。现场荷载试验可采用千斤顶加载,测量管片的应力、应变及裂缝发展情况;数值模拟则利用有限元软件(如ANSYS、ABAQUS)建立修复后管片的力学模型,分析其在设计荷载作用下的

响应,确保满足规范要求。耐久性评估重点关注修复材料的抗渗性、抗腐蚀性及抗疲劳性能。通过渗透系数测试、盐雾试验、冻融循环试验等,验证修复体在长期服役环境下的性能稳定性;对于运营阶段的修复工程,需进行长期监测(如裂缝宽度、钢筋锈蚀电位),评估其劣化趋势。长期稳定性评估需结合隧道沉降监测数据,分析修复后管片是否仍存在附加变形或应力集中。通过布设沉降观测点、应力传感器等,实时监测管片的位移与受力状态,确保修复效果的持久性^[5]。

结束语

各类内外因素共同诱发地铁盾构管片破损,不同破损类型的破坏机理存在明显差异,需结合损伤程度选用适配修复手段。传统修复技术成熟且适用性广,新型复合材料可优化修复质量,配套评估体系能够保障修复施工成效。为维持隧道长期稳定服役,应从优化施工工艺、完善结构设计、加强后期监测多方面入手,把控病害源头。未来还需深耕新型修复材料研发,推动低成本、长效化修复技术规模化应用。

参考文献

- [1] 贺缠龙,王飞,史岩峰.城市区间地铁隧道盾构管片破损成因及修复技术[J].北方建筑,2025,10(5):91-97.
- [2] 卢杨.城市地铁区间隧道盾构管片破损修复及病害防治关键技术应用[J].四川建筑,2023,43(3):99-101.
- [3] 连逢逾,陈刚,廖林川.已运营地铁隧道盾构管片破损的竖井永久修复技术[J].城市轨道交通研究,2024,27(1):190-195.
- [4] 张志强.垂直冻结技术在南京地铁盾构隧道修复中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(8):078-085.
- [5] 李坤.地铁隧道盾构管片破损掉块现象的多因素成因及针对性治理[J].前卫,2023(19):0011-0013.