

盾构隧道管片结构病害治理措施

孙磊

(郑州城盾隧安地下工程有限公司, 河南 郑州 450007)

摘要: 近年来,我国城市轨道交通建设实现跨越式发展,目前已成为全球地铁运营里程最长的国家。然而,随着地铁运营时间的增加、周边地下空间的开发利用以及外部环境的不断变化,隧道管片结构往往会出现收敛变形、裂缝、渗漏水等病害。为保障地铁隧道结构的安全与稳定,针对上述常见病害,采取针对性治理措施并分析治理效果。依托某工程实例,采用堵漏、裂缝修补、微扰动注浆、钢环永久加固等综合整治措施,提出了“微扰动注浆+钢环加固”组合技术路径,详细介绍了各项施工工艺及治理细节。

关键词: 盾构隧道;管片结构;病害治理;微扰动注浆;钢环加固

中图分类号: U457+.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0252-05

Measures for Treatment of Defects in Segment Structure of Shield Tunnels

SUN Lei

(Zhengzhou Urban Shield Tunnel Installation Underground Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In recent years, the construction of urban rail transit in China has achieved leapfrog development, and China has now become the country with the longest subway mileage in the world. However, with the increase of subway operation time, the development and utilization of the surrounding underground space, and the continuous change of the external environment, the tunnel segment structure often suffers from convergence deformation, cracks, water leakage and other diseases. In order to ensure the safety and stability of the subway tunnel structure, the targeted treatment measures are taken for the above-mentioned common diseases and the treatment effects are analyzed. Relying on a project example, the comprehensive treatment measures such as leakage plugging, crack repair, micro-disturbance grouting, and permanent reinforcement of steel rings are adopted, and the combined technical path of “micro-disturbance grouting and steel ring reinforcement” is proposed. The construction technologies and treatment details are introduced in detail.

Keywords: shield tunnel; segment structure; disease treatment; micro-disturbance grouting; steel ring reinforcement

0 引言

随着我国城镇化水平的持续提升,城市轨道交通建设规模及运营线路长度均位居世界前列。盾构隧道衬砌结构病害问题逐渐显现,其中衬砌渗漏水、结构裂缝以及收敛变形等典型病害频发,给隧道结构安全带来显著隐患。

针对上述问题,国内外学者及工程技术人员开展了系列研究。在盾构隧道病害成因研究方面,闫静雅和王如路^[1]对上海软土地铁隧道的沉降及横向收敛变形原因进行了细致分析,揭示了软土地层特性对隧道变形的显著影响;王如路、袁强、梁发云等人^[2]

研究指出,道路填土等外部环境变化会引发软土地铁盾构隧道的变形。在加固治理技术领域,也涌现出了多种有效的方法和措施。林培钦^[3]研究了带牛腿钢板加固地铁盾构隧道的变形机理,为结构加固提供了新的思路;李永、贺起龙^[4]探讨了区间隧道微扰动注浆在郑州地铁中的应用,展示了注浆技术在隧道加固中的实际效果;董梁^[5]提出了大直径盾构隧道管片快速整治钢环加固技术创新,丰富了隧道加固的技术手段。同时,顾歆甜^[6]对软土地铁隧道沉降治理效果进行了评估,建立了相应的评估方法和指标体系。

尽管在盾构隧道病害治理方面已取得了一定的进展,但由于隧道工程所处地质条件和外部环境的复杂性和多样性,现有的治理技术和方法仍存在一定的局限性,难以完全满足实际工程的需求。特别是对于多种病害同时存在的复杂情况,如何采取有

收稿日期: 2025-03-28

作者简介: 孙磊(1992—),男,硕士,工程师,从事地铁运营隧道结构维保、综合整治大修钢环加固和微扰动注浆、地铁车站结构改造、地下空间应急抢险等施工管理工作。

效的综合整治措施,以及如何优化治理技术路径,仍然是亟待解决的问题。

本文基于某一实际工程案例,针对隧道结构管片的收敛变形、裂缝、渗漏水等常见病害,采取堵漏、裂缝修补、微扰动注浆、钢环永久加固等相结合的综合整治措施,并提出了“微扰动注浆+钢环加固”的组合技术路径。同时,详细介绍各项施工工艺及治理细节,旨在为类似工程的病害治理提供更为全面、有效的技术参考和实践经验,实现病害治理安全性、耐久性与经济性的协同提升。

表 1 主要病害类型

病害类型	典型诱因	发展机制	治理难点
渗漏水	密封垫缺陷或安装不当,防水注浆效果差,地下水位上升,邻近施工扰动	水在压力下通过缺陷部位渗透,渗漏通道扩大,有害物质对结构腐蚀	找渗漏源难,带水作业材料黏结难,高压水环境长期防水效果难保证,复杂条件施工难
裂缝	千斤顶推力不均,地层不均匀沉降,温度变化	微小裂缝在应力下扩展连通,介质侵入加速钢筋锈蚀	深层裂缝难修复,材料工艺选择难,易复发,修复易影响周边
收敛变形	周围土体损失大,地层力学性质差,隧道上部堆载,邻近工程扰动	土体变形致隧道位移,变形持续增大,不均匀时产生附加应力	预测控制难,治理技术要求高且影响运营,恢复原状难,易再变形

2 治理原则

(1)盾构隧道结构病害治理需统筹考虑结构安全性、适用性和耐久性,在准确分析病害成因的基础上,遵循“整体结构加固与局部病害处理协同”、“结构补强与防水堵漏一体化实施”的治理原则,综合评估病害治理的效果与经济性,实现标本兼治的治理目标。

(2)渗漏水治理体系以钢筋混凝土本体自防水体系和三元乙丙橡胶密封垫防水系统为基础,通过选用聚氨酯注浆材料与环氧树脂密封材料的组合,配合内置钢环加固系统的协同作用,实现盾构隧道的全断面防水密封,满足结构的防水性和耐久性^[7]。

(3)隧道结构收敛变形的治理采取钢环加固的施工工艺,但应在隧道外围土体稳定、管片变形稳定且无渗漏后实施,即在渗漏水、裂缝、微扰动注浆等治理后对管片承载力进行补强。

3 总体筹划

本次隧道治理加固范围为基坑影响区内的区间隧道,其中一侧区间从 350 环~1 环管片,另一侧区间从 1 471 环~1 300 环管片,覆盖范围约 900 m。

监测数据显示,该工程涉及的隧道区段已出现最大达 0.105 m 的水平收敛位移。鉴于后续邻近区域存在密集的深基坑开挖、地下管线改迁等施工活动,隧道外部应力场将持续处于动态调整状态,为确

1 病害类型

在隧道工程领域,区间隧道常见的病害为收敛变形、裂缝及渗漏水,这一问题的产生,通常由于设计阶段考虑不周、构造处理存在缺陷、材料选择不当、施工过程质量把控不严、地基不均匀下沉以及周边施工活动等因素,以下以表格的形式对盾构隧道常见病害(渗漏水、裂缝、收敛变形)进行归类,并分别阐述其典型诱因、发展机制及治理难点(见表 1)。

保隧道结构安全,特制定以下综合整治方案。

3.1 隧道病害治理

立即开展隧道管片渗漏水及裂缝的壁后注浆治理。

3.2 芳纶布临时应急加固措施

对收敛变形 0.07 ~0.09 m 的管片立即启动芳纶布粘贴加固工作。

3.3 地面微扰动注浆

对收敛变形 0.06~0.07 m 的管片进行隧道两侧地面微扰动注浆,确保管片收敛变形保持稳定或有所减小,该工程基坑或通道施工过程中进行实时监测,一旦管片收敛变形超过 0.06 m,立即启动微扰动注浆工作。

3.4 隧道内钢环加固

对收敛变形大于 0.07 m 的管片进行隧道内钢环加固,以确保后期隧道结构安全。对隧道内钢环加固分批次进行:首先对区间隧道管片变形超过 0.09 m 的管片立即启动加固工作;然后再处理收敛变形 0.07 ~0.09 m 的管片。当基坑或通道施工过程中管片收敛变形超过 0.09 m,立即启动钢环安装工作。

4 工程概况

某区间隧道管片产生了渗漏水、裂缝、收敛变形等病害,经过隧道周边地面现场踏勘及专家咨询等,隧道病害产生的主要原因为隧道上部堆载及侧部基坑开挖等。

考虑到后期隧道周边施工活动频繁,隧道变形难以预测,为确保隧道结构安全,须对产生病害的区间隧道结构进行针对性的治理,并对收敛变形较大管片进行加固修复。

5 施工准备

5.1 施工组织机构

施工总包单位下设 8 个小组,业主方配合小组有 4 个(见图 1)。

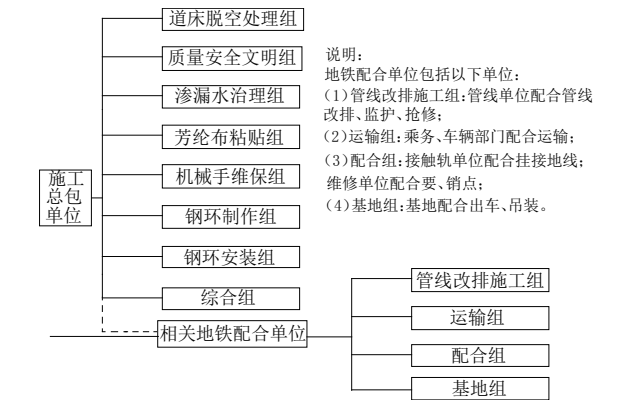


图 1 施工总包单位架构图

5.2 材料配置

施工材料主要为水泥浆、水玻璃、聚氨酯、环氧材料及钢板,具体如表 2 所列。

表 2 主要施工材料表

序号	材料名称	型号和规格	主要用途
1	钢板	0.02 m	管片加固
2	环氧树脂浆液	弹性	环纵缝处理
3	刚性环氧树脂	刚性	混凝土管片与钢环间隙填充
4	环氧胶泥	弹性	钢环封边、环纵缝处理
5	快干水泥	瞬凝	临时封堵
6	聚氨酯	水溶及油溶	渗漏水治理
7	芳纶布	AFS60	裂缝加固
8	浸渍树脂	比重 1.0~1.3	芳纶布粘贴
9	膨胀锚栓	M16	固定钢板
10	化学锚栓	M16	固定钢板
11	超早强水泥		封堵手孔、螺栓孔

6 隧道病害治理加固措施

6.1 隧道渗漏水治理

6.1.1 施工工艺流程

采用手动注浆泵或电动注浆泵实施作业,优先利用隧道管片既有吊装孔作为注浆通道,施工工艺流程如图 2 所示^[4]。

6.1.2 衬砌环注浆孔位置

在注浆作业过程中,需严格依据既定的注浆布孔方案进行精准布孔操作。若在注浆进程中,注浆

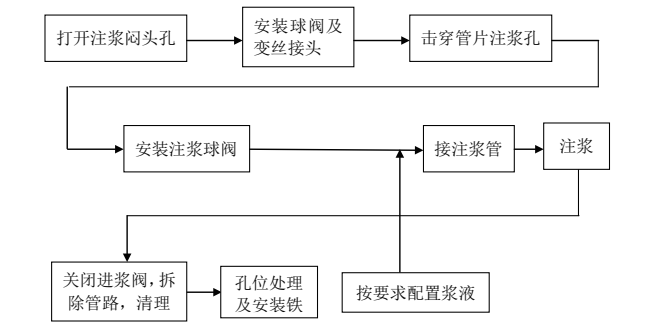


图 2 管片壁后注浆聚氨酯施工工艺流程图

孔内突发大量泥沙涌出的状况,应即刻施行拔出冲击钻并关闭球阀的应急处置措施,以此达成及时止损的目的,有效遏制泥沙持续大量涌出的态势。

注浆孔应设置在邻接块和标准块,聚氨酯主要从两侧吊装孔压注。针对注浆孔已被封堵或因各类因素致使结构完整性遭受破坏的管片,应当在相邻环的预留注浆孔处开展开孔注浆作业,借此规避对管片其他部位结构造成不必要的损害,从而确保管片整体结构的稳定性与安全性。

6.1.3 注浆量要求及施工注意事项

(1) 注浆过程中应对隧道变形量实时监测,选取试验段,对注浆压力、注浆量等参数进行确认;

(2) 注浆孔增设与注浆作业期间,必须配备专用高压注浆防喷装置;

(3) 单孔注浆量为 50 kg,往往每环注两孔,每环注浆量 100 kg。对腰部左右两孔对称注浆,少数渗漏严重的管片对腰部以上孔位对称注浆。

(4) 注浆压力控制值为 5×10^5 Pa,注浆流量控制值为 $6 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ m³/s。

6.2 芳纶布临时加固

由于施工范围内地面施工周期较长,针对收敛值大于 0.07~0.09 m 的管片,需开展芳纶布临时加固粘贴作业。但在钢环加固区域内已粘贴的芳纶布,应在钢环安装前予以拆除^[8],具体施工要求如下:

(1) 芳纶布粘贴位置为管片顶部,弧长约 4.2 m;

(2) 混凝土表面需预先进行找平处理,在涂抹底胶前,应确保表面清扫洁净,无任何杂物、灰尘或松散颗粒残留;

(3) 严格按照规定比例配制浸渍树脂。首先,在管片表面均匀涂抹浸渍树脂,确保完全浸润混凝土表面;然后,在管片准确位置粘贴芳纶纤维布,确保平整无褶皱,紧密贴合混凝土表面;最后,涂抹外层浸渍树脂,使芳纶纤维布完全被浸渍树脂包裹,形成牢固的防护层;

(4)在芳纶布粘贴完成且浸渍树脂固化达标后,于其表面分纵横两个方向涂刷两道环氧保护膜,以增强防护效果,提升结构耐久性。

6.3 隧道外双液微扰动注浆

6.3.1 施工工艺流程

微扰动注浆的工艺流程图如图 3 所示。

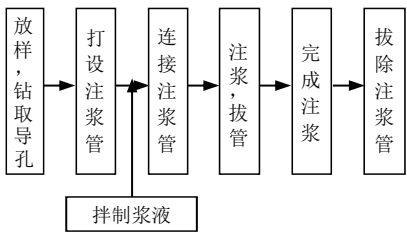


图 3 微扰动注浆工艺流程图

6.3.2 施工技术参数

(1)注浆范围:隧道基底以上 1~5 m,鉴于该区段存在最大 0.008 m 的结构抬升变形,隧道基底以上 1 m 范围不进行注浆^[7]。

(2)注浆孔布置:沿隧道两侧 3.6 m 和 3 m 处各布置 2 排注浆孔(梅花形间距 1.2 m)。通过自动化监测系统(精度 0.000 1 m)实时采集衬砌变形数据,当单日变形量超过 0.000 5 m 时启动加密注浆^[9]。

(3)注浆流量:水泥浆流量为 $1.4\times10^{-6}\sim1.6\times10^{-6}\text{ m}^3/\text{s}$;水玻璃流量为 $5\times10^{-5}\sim1\times10^{-6}\text{ m}^3/\text{s}$ 。

A 液:自来水与水泥(PO42.5 级)搅拌形成水泥浆,水灰比为 0.6~0.7:1;B 液:中性水玻璃(35°Be',模数 2.85);A 液与 B 液的比值为 2~3:1。

(4)注浆顺序:采用“动态分区+跳环施工”的注浆策略,先对变形大的区域注浆施工,遵循做 1 环跳 5 环的原则,相邻孔间隔超过 172 800 s;

(5)注浆拔管:按照 0.1 m/min 的均匀速度由下而上进行拔管^[9]。

(6)当单孔注浆量达到理论计算注入量时。终止注浆。单次注浆管片累计变形量达 0.003 mm 时触发橙色预警,实施注浆参数动态调整;变形量达到 0.005 m 时触发红色预警,系统自动停止注浆。

6.3.3 施工注意事项

(1)通过合理调配浆液配比(水泥比重尽量大,但避免堵管),实现扰动小、注浆效果佳的目标,确保隧道结构的稳定性^[7];

(2)每个注浆流程、步骤均需符合工程设计标准,保障注浆作业的精准性与有效性;

(3)注浆作业期间,采用自动化监测系统实时对隧道轴线偏差和结构变形实施动态监测。当监测数

据达到预警值时,注浆施工工作相应调整;

(4)注浆参数需依据隧道管片实时变形情况动态调整,以适应不同施工阶段的需求,保障注浆施工与隧道结构稳定的适配性^[7];

(5)施工单位应与监测单位协同,保持信息互通。若发生突发事件,必须第一时间相互通知,以便迅速采取应对措施,降低潜在风险;

(6)严格遵守规章制度:整个施工过程需严格按照相关规定与规章制度执行,从人员操作规范到施工现场管理,均应符合行业标准与工程要求,确保施工有序进行;

(7)当注浆过程中出现区间隧道渗漏水,立即停止注浆作业,同时,开展隧道渗漏水治理工作^[10]。

6.4 隧道治理钢环加固

在既有衬砌结构内轮廓面安装钢板,通过不锈钢化学锚栓与衬砌混凝土形成机械锚固,并采用改性环氧树脂黏结剂填充钢板与衬砌间空隙,形成“锚栓—黏结剂—钢板”协同受力体系^[11]。

6.4.1 钢环安装前管片处理

对管片表面进行打磨,清除松动的混凝土、浮尘以及其他杂物,确保管片界面平整、干净。

6.4.2 管片裂缝修补

针对裂缝<0.000 2 m 的管片,在裂缝表面涂刷刚性环氧树脂;当裂缝>0.000 2 m 时,对裂缝进行注浆封闭,采用低压灌注环氧树脂的方式,对管片进行补强。

6.4.3 管片破损、掉块修补

对区间隧道内存在的管片破损、掉块,采用堆积环氧树脂的方法进行补强,若破损面积较大钢筋裸露,采用植筋的方式进行补强。

6.4.4 钢环安装

(1)安装顺序:首先,在道床两侧水沟凿除后的位置精准安放牛腿,然后,在衬砌结构两侧牛腿支撑点安装预制环形钢板,待两侧环板定位校准后,采用激光放样技术加工顶部钢环,确保环向闭合精度控制在±0.003 m 范围内,钢环拼装完成后,采用 CO₂ 气体保护焊进行环缝焊接(焊缝等级二级),最后,在隧道底部道床板上,两个牛腿支撑结构间安装钢拉板。

(2)锚固体系:钢环拼装过程中对关键受力位置使用 6 根 M16 不锈钢膨胀螺栓(有效锚固深度 0.1 m)与衬砌结构连接,其余孔位采用 M16 不锈钢化学锚栓进行锚固。

(3)机械设备:隧道加固机器人,采用全电液伺服控制系统,由工业 PC 机实现多自由度协同控制,

液压动力单元配置变量柱塞泵,通过负载敏感技术实现节能驱动。该设备专为地铁停运时段设计,可在不拆除原有管线设施的条件下,利用轨道式移动平台在隧道内开展作业。

6.4.5 环氧填充

钢环加固安装完毕后,需立即进行界面黏结增强处理,采用改性环氧树脂黏结剂填充钢环与衬砌间空隙,形成连续受力整体^[5]。

首先,采用高压空气吹扫清除钢环与衬砌接触面浮尘,确保界面清洁度达到Sa 2.5级标准。在钢环两侧使用环氧胶泥形成密封屏障,同步预留注浆孔(间距 1.2 m)。使用 ZBYS-50 型电动注浆泵由下而上压注环氧浆液,直至上部出气孔有浆液溢出,方视为填充完成。

6.4.6 防腐处理

钢板加工时,采用喷涂型聚脲弹性体完成防腐蚀处理。鉴于焊缝及施工过程中钢板表面可能出现破损,需再次运用该涂层对上述部位进行防腐作业。喷涂作业分两层实施,施工过程中应确保涂层厚度均匀分布,总厚度不得低于 0.0012 m。完成喷涂后,钢环外表面应达到干净、光滑的质量标准,以此保障钢环的防腐蚀性能及整体外观质量。

7 实施效果

针对隧道结构所出现的渗漏水、裂缝以及收敛变形病害问题,结合专业的检测评估报告内容,以表格的形式阐述在修复加固施工前后的具体对比情况(见表 3)。

表 3 主要病害评估分析		
病害类型	施工前	施工后
渗漏水	左线 2 处、右线 2 处,结构健康度为 2 级	无渗漏水观病害
裂缝	左线 7 处、右线 3 处,结构健康度为 3 级	无裂缝表观病害
收敛变形	左线收敛变形-1.9‰~16.1‰,右线收敛变形-2.0‰~14.9‰,结构健康度为 5 级	所安装钢环断面尺寸符合设计要求;钢板和既有管片间未见脱黏区域;焊缝探伤和锚栓拉拔检测结果满足规范规定

8 结 语

本文通过某一工程实例,对隧道结构病害采取

了针对性的治理措施,取得了良好的效果。总结归纳以下几点可供其他工程参考。

(1)隧道结构的渗漏水,采取壁后注聚氨酯,钢环与管片之间注环氧树脂的措施,并与管片自身的防水和管片弹性密封垫防水相结合,使隧道结构防水体系通过三重防水屏障的协同作用,能够达到长期防水的目的。

(2)针对隧道收敛变形病害,该工程采用“地面微扰动注浆预加固+衬砌钢环二次支护”的联合处置技术,能够对隧道病害起到良好的治理加固作用,确保隧道结构安全及其长期稳定性。

(3)在地铁保护区范围内进行施工活动(例如基坑开挖等)可能造成隧道结构的损伤,产生渗漏水、收敛变形等病害,本文验证了上述施工措施的有效性,特别是微扰动注浆和钢环加固,当地保区范围内存在施工活动时,可对已产生初期病害的隧道结构进行预加固处理。

参考文献:

[1] 闫静雅,王如路.上海软土地铁隧道沉降及横向收敛变形的原因分析及典型特征[J].自然灾害学报,2018,27(4):178-187.

[2] 王如路,袁强,梁发云,等.道路填土引发软土地铁盾构隧道变形案例及整治技术[J].岩土工程学报,2023,45(1):112-121.

[3] 林培钦.带牛腿钢板加固地铁盾构隧道变形机理研究[D].广州:华南理工大学,2018.

[4] 李永,贺起龙.区间隧道微扰动注浆在郑州地铁中的应用研究[J].郑州铁路职业技术学院学报,2020,32(2):8-10.

[5] 董梁.大直径盾构隧道管片快速整治钢环加固技术创新[J].铁道建筑技术,2020(增刊1):165-168.

[6] 顾歆甜.软土地铁隧道沉降治理效果评估[J].都市快轨交通,2018,31(6):129-134;144.

[7] 张少夏.安全保护区施工引起地铁隧道病害的应急措施[J].建筑施工,2020,42(11):2035-2037.

[8] 陈耀东,李建杰,朱利平,等.临有病害地铁双侧深基坑设计及施工研究[C]/2022年工业建筑学术交流会.郑州:中国建筑第七工程局有限公司,2022:203-208.

[9] 彭乐平.浅析微扰动(地面)注浆施工对地铁隧道收敛的影响[J].基层建设,2018,9(17):56-58.

[10] 葛朝林.软土地区无支撑基坑项目的险情分析及控制对策[J].建筑施工,2020,42(11):2029-2030;2037.

[11] 李芹峰,柳献,许熠.隧道结构受损补强加固措施的演变和发展浅析[J].隧道与轨道交通,2021(增刊2):114-117.

[12] 李小松.浅议几种隧道病害的治理[C]/2016智能城市与信息化建设国际学术交流研讨会论文集.沈阳:《智能城市》杂志社、美中期刊学术交流协会,2016.