

# 上海轨道交通提升盾构隧道结构本质安全的创新实践

毕湘利

(上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海)

**摘要** [目的] 盾构隧道是柔性结构,具有多缝特征。受施工初始质量缺陷、周围载荷变异、外部环境恶化以及管养不到位等因素影响,易出现结构变形超限、渗漏超标以及耐久性劣化等问题,仅依靠运营期加固和整治无法彻底解决。且随着线网规模的扩大,维修成本和夜间天窗时间资源的代价也会急剧增加,最终影响城市轨道交通全网的运维效率和质量。因此需研究提升盾构隧道结构本质安全的技术措施。[方法] 分析了上海轨道交通盾构隧道的主要病害及影响盾构隧道结构安全的主要因素;介绍了上海轨道交通提升盾构隧道结构本质安全的技术措施以及确保盾构隧道结构本质安全的创新实践。[结果及结论] 上海轨道交通采取的提升盾构隧道结构本质安全的技术措施包括优化扩大盾构隧道内径、采用错缝拼装方式、提升接缝密封防水设计,确保盾构隧道结构本质安全的创新实践包括采用预埋承插式管片新型盾构隧道结构、采用推拼同步智能盾构装备及隧道智能建造技术。从源头把握盾构隧道结构本质安全,通过优化隧道结构设计、创新拼装技术以及采用智能化装备,在建设阶段提升盾构隧道的成型质量、减少结构初始缺陷,能够降低运营期盾构隧道结构发生病害的可能性,可为隧道的长期运营安全奠定坚实基础。

**关键词** 上海轨道交通; 盾构隧道; 错缝拼装; 智能装备

**中图分类号** U458.1:U455.43

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.01.001

## Innovative Practices in Enhancing the Inherent Safety of Shield Tunnel Structures in Shanghai Rail Transit

BI Xiangli

(Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Shield tunnels are inherently flexible structures characterized by multiple joints. Due to factors such as initial structural defects, varying surrounding loads, environmental deterioration and inadequate maintenance, shield tunnels are susceptible to deformation exceeding allowable limits, excessive leakage and durability degradation. Solely relying on reinforcement and rectification during operational phase cannot comprehensively address these issues. Moreover, with the expansion of rail network, maintenance costs and the ex-

pense of night operation window time resources are also increasing drastically, ultimately affecting the operation-maintenance efficiency and quality of the entire urban rail transit network. Therefore, it is necessary to research technical measures for enhancing the inherent safety of shield tunnel structures (hereinafter abbreviated as 'shield inherent safety'). [Method] The primary defects in Shanghai rail transit shield tunnels and the main factors affecting the shield tunnel structure safety are analyzed. The technical measures for enhancement and the innovative practices for guarantee of shield inherent safety adopted by Shanghai rail transit are introduced. [Result & Conclusion] The technical measures implemented by Shanghai rail transit to enhance shield inherent safety include optimizing and expanding the internal diameter of shield tunnels, adopting a staggered joint assembly method, and improving joint sealing and waterproof design. The innovative practices ensuring the shield inherent safety involve the use of a novel shield tunnel structure with pre-embedded socketed segments, the utilization of push-and-assemble synchronized intelligent shield tunneling equipment, and tunnel smart construction technology. By addressing the shield inherent safety at the source and optimizing tunnel structure design, innovating assembly techniques, and employing intelligent equipment, Shanghai rail transit aims to improve the forming quality of shield tunnels during the construction phase and reduce initial structural defects. This approach can lower the likelihood of structural damages during the operational phase, laying a solid foundation for the long-term safe operation of tunnels.

**Key words** Shanghai Rail Transit; shield tunnel; staggered joint assembly; intelligent equipment

## 0 引言

盾构法对环境影响较小、成本低、适用范围广,是修建城市轨道交通地下区间隧道的主流工法<sup>[1-3]</sup>。从结构角度看,盾构隧道通过环、纵向螺栓连接预制管片拼装成型,其最显著的特点是接缝众多。每公里单圆盾构隧道包含5 000~6 000块管

片,接缝总长度可达隧道自身长度的 20 倍以上。然而,接缝是隧道力学性能的薄弱环节,也是引发隧道变形、渗漏和耐久性等问题的最直接因素。此外,盾构隧道的多缝特征使得成型隧道表现为具有一定刚度的“柔性结构”。这种“柔性结构”在地下的长期服役过程中,由于施工初始质量缺陷、周围载荷变异、外部环境恶化以及管养不到位等因素的综合影响,健康状况难以避免地出现退化,进而引发的隧道结构安全问题也日益凸显<sup>[4]</sup>。

城市轨道交通结构安全直接影响其运营质量,结构病害严重时甚至危及运行安全,造成极大负面影响。例如,伦敦地铁 Jubilee 线曾发生隧道结构严重变形和病害,200 m 长的隧道区间不得不重新修建<sup>[5]</sup>。前苏联圣彼德堡地铁 1 号线隧道也曾因事故导致结构被严重破坏,使列车终止运行<sup>[6]</sup>。当前,城市轨道交通盾构隧道的维修、整治策略以点对点式(“补丁式”)为主,这可改善其局部性能与状态,但可能引发病害转移,难以满足长期高质量运营需求<sup>[7-8]</sup>。

城市轨道交通盾构隧道是百年结构,仅依靠后期维修难以保证其长期运行安全。同时,城市轨道交通承载了城市绝大多数公共交通出行客流,“百年运营、百年维修”的状态会大大降低公共交通服务质量,不利于城市高质量发展。为确保城市轨道交通盾构隧道的全生命周期安全,切实提升运营服务质量,需从源头上把握盾构隧道结构本质安全,处理好建设与运维的关系。本文结合上海轨道交通盾构隧道的建设运维实践,探讨确保盾构隧道结构本质安全的具体策略和方法,相关经验供同行借鉴参考。

## 1 盾构隧道结构安全问题分析

截至 2022 年底,上海轨道交通已经开通运营 20 条线路,运营里程超过 800 km。上海轨道交通各线路的地下区间几乎全部采用盾构法修建完成,服役管片总量超 70 万环,服役时间跨度 1 年至 30 年不等。上海轨道交通盾构隧道在运营过程中产生的病害有渗漏水、裂缝、纵向沉降和收敛变形等,几种病害一般同时存在,相互影响,且以收敛变形最为严重。据统计,大部分隧道在运营 3~9 年之间开始出现病害。每年隧道结构病害整治投入巨大,占用夜间天窗时间最多。

考虑盾构隧道本身的多缝特征,管片接缝无论

是在强度还是刚度方面都是隧道力学性能的薄弱环节,使隧道沿环向和纵向的刚度呈不均匀变化,这是引发隧道结构病害的本质原因。此外,盾构隧道施工控制基本依靠人工完成,这极易导致管片成型质量参差不齐、结构存在初始缺陷,从而引发服役期管片错台、破损等。

对于由结构多缝特征和初始缺陷引发的盾构隧道病害,仅依靠运营期的加固和整治是无法彻底解决的,而且随着线网规模的扩大,维修成本和夜间天窗时间资源的代价也会急剧增加,最终会影响城市轨道交通全网的运维效率和质量。因此,为了提高盾构隧道的全寿命周期安全性,应通过转变结构设计理念、优化设计方案、创新施工技术等,在建设阶段提升盾构隧道的整体刚度、减少初始缺陷,以高质量建设夯实安全运营的基础,确保结构本质安全。

## 2 上海轨道交通提升盾构隧道结构本质安全的技术措施

在提升盾构隧道结构本质安全方面,在 30 多年的实践和探索中,上海轨道交通采取的技术措施包括优化扩大盾构隧道内径以预留加固空间、针对不同的环境敏感地段采用错缝拼装方式以及提升接缝密封防水设计等。

### 2.1 优化扩大盾构隧道内径

盾构隧道内径主要由限界决定,同时也需考虑施工误差、测量误差、设计拟合误差以及不均匀沉降等因素。在上海轨道交通建设初期,盾构隧道内径设计为 5.5 m,并一直沿用 20 多年。从长期运营来看,5.5 m 的内径设计存在空间布置过于紧凑、小半径曲线段较难设置疏散平台以及结构变形等病害整治空间受限等问题,特别是变形等病害整治空间紧张给服役期的隧道维护带来了巨大压力。为此,上海轨道交通从高质量建设保障高质量运营的角度出发,率先研究盾构隧道内径优化方案,将内径由 5.5 m 扩大至 5.9 m。这为运营期隧道沉降变形及病害综合治理预留了空间。从盾构隧道结构全寿命周期以及盾构隧道结构的本质安全的角度来衡量,这样做是值得的。

### 2.2 采用错缝拼装方式

盾构隧道的拼装有通缝拼装和错缝拼装两种形式。通缝拼装的管片结构符合“柔性衬砌”的设计理念,能够在一定范围内通过变形协调周围环境

的变化(荷载增大)。然而,通缝管片由于拼装允许误差大,成型隧道的真圆度较低,施工初始缺陷较大,在运营期容易出现较大的结构变形和接缝渗漏水。而错缝拼装的管片结构具有纵向加强效应,其整体刚度更强,可以更好地抵抗外部荷载和环境变化,且错缝拼装施工精度要求高,成型隧道真圆度更好,施工初始缺陷较小。

至“十三五”建设期末,上海轨道交通盾构隧道以通缝管片拼装形式为主,在局部环境敏感区段采用了错缝拼装。进入“十四五”后,上海轨道交通考虑到新建盾构隧道埋深逐步加大且盾构隧道受力环境日益复杂,再加之管片制作精度和拼装技术的提升可为采用新的管片拼装方式提供技术保障,因此决定全面采用错缝拼装的管片结构形式。

2.3 提升接缝密封防水设计

盾构隧道内渗漏水是地铁安全运营的最大威胁。盾构隧道渗漏水主要表现在环缝、纵缝、注浆孔、变形缝和螺栓孔等部位,其本质是隧道接缝防水失效。针对管片接缝防水和渗漏治理,上海轨道交通重点研究了橡胶材料力学性能,提出了长期防水性能优越的接缝密封垫材料及断面设计方案,创立了标准化的管片接缝渗漏治理措施。

在防水材料选择方面,上海轨道交通完成了由氯丁橡胶与遇水膨胀橡胶复合型密封垫(1、2 号线),到三元乙丙橡胶与遇水膨胀橡胶复合型密封垫(4、8、9、13 号线),再到三元乙丙橡胶单一型密封垫(12、13、14、15、18 号线等)的转变。三元乙丙橡胶单一型密封垫应力松弛小,受温度变化影响小,通过接触面压应力以弹性压密止水,具有良好的耐久性和止水性。在构造设计方面,上海轨道交通对橡胶密封垫断面进行全面优化设计,全面采用“多孔性”橡胶密封垫,该形式可应对长期受压后的应

力松弛等问题,水密性良好,已在全国范围内推广应用。

3 上海轨道交通提升盾构隧道结构本质安全的创新实践

为进一步提升盾构隧道建设质量,从本质上保障盾构隧道结构安全,上海轨道交通将数字化、智能化新技术应用于盾构隧道建设,提出设计新型管片结构、提高施工装备自动化水平等举措。

3.1 采用预埋承插式管片新型盾构隧道结构

目前国内盾构隧道基本采用螺栓作为连接件,其安装直观可靠,且能满足紧固力要求。但螺栓手孔的设置削弱了混凝土管片的局部承载力,使得手孔附近易出现管片开裂或破损,进而引发渗漏水和钢筋锈蚀等耐久性问题;螺栓孔与螺栓之间的安装间隙约为 3 ~ 6 mm,螺栓紧固作业依靠人工操作,施工工效较低且难以保证管片拼装精度,易影响管片成型质量,易造成结构初始缺陷。

在广泛调研国内外盾构隧道接头形式发展进程、新型连接件形式及新型连接件管片工程应用的基础上,上海轨道交通研究开发了基于新型接头的预埋承插式管片盾构隧道技术体系。该新型接头管片摒弃了传统的螺栓连接方式,采用管片浇筑前预埋连接件、施工拼装时相邻管片机械式连接的拼装方法。预埋承插式管片接头如图 1 所示。表 1 为预埋承插式管片设计方案与传统螺栓连接管片设计方案的主要参数对比表。由于取消了手孔、螺栓孔等构造措施,新型接头管片避免了传统管片连接方式所产生的局部削弱和耐久性问题。机械化连接方式也为盾构隧道施工自动化、智能化发展创造了条件,减小了施工中人为因素对管片拼装质量的影响。

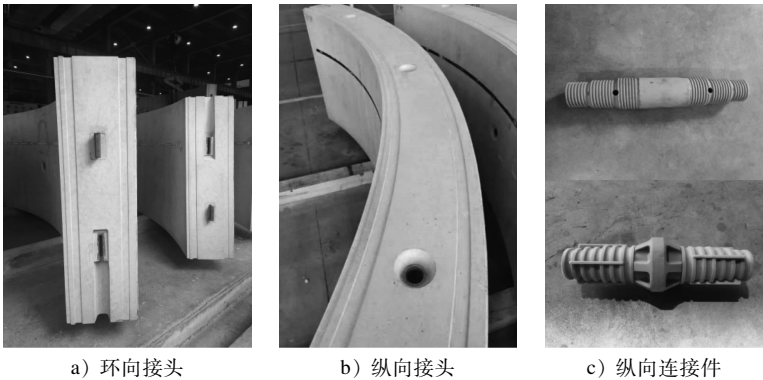


图 1 预埋承插式管片接头

Fig. 1 Pre-embedded socketed segment joint

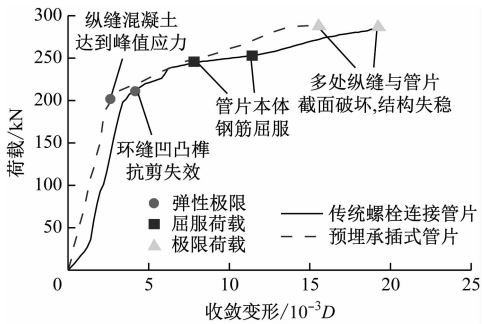


表 1 预埋承插式管片与传统螺栓连接管片设计方案主要参数对比表

Tab. 1 Comparison main parameter between design schemes of pre-embedded socketed and conventional bolted segments

设计方案	隧道直径	隧道环宽	衬砌厚度	衬砌材料	环向螺栓/(只/环)	纵向螺栓/(只/环)
传统螺栓连接管片	外径 6.6 m, 内径 5.9 m	1.2 m	350 mm	C55 混凝土	12 (直螺栓)	17 (直螺栓)
预埋承插式管片	无变化	无变化	无变化	无变化	12 (锥型连接件)	16 (螺纹 + 倒刺型连接件)

在力学性能方面,接头及整环试验结果表明,预埋承插式管片结构的初始刚度较传统螺栓连接管片结构的更高,且极限承载能力也更高(见图 2)。



注:  $D$  为隧道直径。

图 2 预埋承插式管片与传统螺栓式管片成型隧道荷载位移曲线对比图

Fig. 2 Comparison of load-displacement curves between pre-embedded plug-in and conventional bolted segmented tunnels

此外,与传统的凹凸榫构造环缝接头相比,预埋承插式环缝接头的抗剪刚度和强度略小,环缝接头表现出较强的延性,接头失效时允许的环间错台量较大。表明预埋承插式环缝接头形式有更强的纵向变形适应能力。预埋承插式管片结构“环刚纵柔”的特性,在提升横断面承载性能抵御外界环境变化的同时,能够很好地适应软土地层隧道的纵向长期沉降变形,具有很好的推广应用潜力。

“十三五”期间,预埋承插式管片在上海轨道交通 18 号线工程中进行了示范应用,隧道成型效果如图 3 所示。与传统螺栓连接管片成型隧道相比,采用预埋承插式接头的管片拼装质量及隧道成型质量得到了显著提升(见表 2)。此外,预埋承插式管片隧道在运营期内的服役状态良好,基本无病害。该技术有效提升了隧道成型质量,减少了结构初始缺陷,增强了隧道的整体稳定性和耐久性,为隧道的长期运营安全提供了坚实基础。

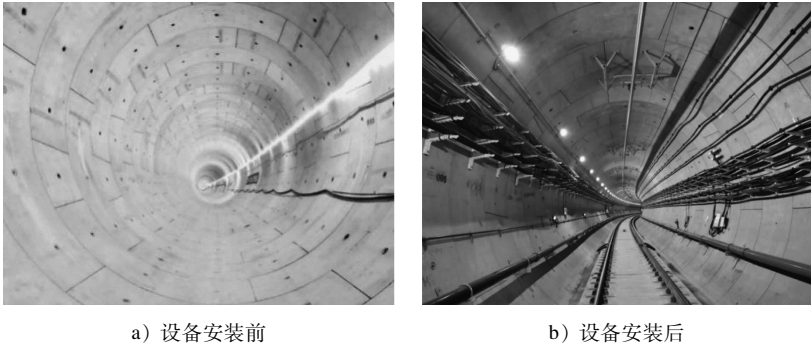


图 3 上海轨道交通 18 号线预埋承插式管片成型隧道

Fig. 3 Pre-embedded socketed type segmented tunnel of Shanghai Rail Transit Line 18

表 2 预埋承插式管片与传统螺栓连接管片成型隧道质量指标对比表

Tab. 2 Comparison of tunnel quality indicators between pre-embedded socketed and conventional bolted segments

隧道结构形式	收敛变形/mm		环、纵缝张开量/mm		环间错台/mm		管片破碎率/%	隧道渗漏水现象
	均值	最大值	均值	最大值	均值	最大值		
预埋承插式管片	<12.0	12.9	<0.50	0.75	<1.0	2.0	<1.0	无
传统螺栓连接管片	>20.0	26.1		2.00		4.0	>1.0	有

3.2 采用推拼同步智能盾构装备及隧道智能建造技术

在传统盾构施工方法中,管片拼装、盾构机推

进、纠偏、同步注浆和物料运输等关键环节均依赖于人工。在当前基建高强度发展条件下,操作经验成熟的盾构施工人员相对数量缺乏。工人经验不

足会对盾构隧道工程质量和安全构成现实威胁,这是近年来安全事故频发的重要原因。因此,要提升隧道建设质量,就要把人工操作经验数字化、智能化,用系统设备自动控制替代人为操作。

预埋承插式管片新型盾构隧道结构的推广应用,为上海轨道交通进一步实现隧道智能施工、管片自动拼装提供了技术条件。为进一步提升建设品质,在“十四五”期间,上海轨道交通加大推进盾构隧道施工从理论、模式、技术到装备的系统性创新,着力研发推拼同步智能盾构装备及隧道智能建造技术,同步改造、升级既有盾构设备。

推拼同步智能盾构实现了开挖系统智能感知、推进系统自主控制、拼装和运输系统自动执行,实现了盾构施工从智能感知、智能决策到智能执行的闭环。由于施工过程基本无需人工介入,可极大降低人工操作引发的不确定性,大幅度提升盾构法施工质量。此外,通过“推拼交替”到“推拼同步”的技术跨越,既可提升工效,又能提升盾构成型质量。

上海轨道交通将在“十四五”期间完成推拼同步智能盾构工程的推广应用,这将全面提高管片预制品质量、盾构机施工控制自动化水平、自动测量技术和施工推进控制质量的标准。通过成套智能技术、装备和标准的推广应用,实现盾构隧道高质量、高安全、高效率建设,全面提升新建盾构隧道成型质量。

## 4 结语

确保盾构隧道结构的全寿命周期安全是城市轨道交通行业的共性挑战。上海轨道交通持续探索确保盾构隧道结构本质安全的创新方法和技术路线,通过优化隧道结构设计、创新拼装技术以及采用智能化装备,在建设阶段提升盾构隧道的成型质量、减少结构初始缺陷,进而降低运营期盾构隧道结构发生病害的可能性,为隧道的长期运营安全奠定坚实基础。在“十四五”建设期间,上海轨道交通将持续推进新技术的研究与应用,通过技术创新,不断提升建设品质,促进城市轨道交通行业的高质量发展。

## 参考文献

[1] 韩宝明, 习喆, 孙亚洁, 等. 2022 年世界城市轨道交通运营统

计与分析综述[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 1.  
HAN Baoming, XI Zhe, SUN Yajie, et al. Statistical analysis of urban rail transit operation in the world in 2022: a review[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 1.  
[2] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.  
LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Shield tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991.  
[3] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97.  
HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97.  
[4] 毕湘利. 创新应首先立足于项目全寿命周期的安全性和经济性[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 彩 12.  
BI Xiangli. Innovation should be based on safety and economy throughout project life cycle[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): C12.  
[5] BOWERS K, MOSS N. Investigation and reconstruction of a London Underground tunnel, UK[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 2018, 171(1): 43.  
[6] 胡向东, 白楠, 李鸿博. 圣彼得堡地铁 1 号线区间隧道事故分析[J]. 隧道建设, 2008, 28(4): 418.  
HU Xiangdong, BAI Nan, LI Hongbo. Analysis on tunnel accident on Line 1 of Saint Petersburg Metro[J]. Tunnel Construction, 2008, 28(4): 418.  
[7] 何川, 封坤, 孙齐, 等. 盾构隧道结构耐久性问题思考[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(11): 1351.  
HE Chuan, FENG Kun, SUN Qi, et al. Consideration on issues about structural durability of shield tunnels[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(11): 1351.  
[8] 李银桑, 魏纲. 既有盾构隧道修复加固技术研究综述[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(2): 103.  
LI Yinsang, WEI Gang. Review of reinforcement technology of shield tunnel[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(2): 103.

• 收稿日期:2023-08-20 修回日期:2023-11-20 出版日期:2024-01-10  
Received:2023-08-20 Revised:2023-11-20 Published:2024-01-10  
• 作者:毕湘利,正高级工程师,Bixiangli1@163.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license