

地铁隧道衬砌管片收敛变形小钢环 加固工艺分析



巢伟荣

(上海地铁维护保障有限公司, 200030, 上海)

摘 要 [目的] 为了快速遏制上海地铁已受损隧道衬砌管片的收敛变形, 消除结构安全隐患, 保障上海地铁隧道结构稳定、运营安全, 针对动车资源紧张、单线路需加固衬砌管片数量较多的现实情况, 采用大钢环加固工艺已无法完全满足整治速度要求, 由必要对新型的小钢环加固工艺进行研究。[方法] 分析了上海地铁现有衬砌管片收敛变形情况、历史衬砌管片加固工艺、整治速率、整治难点, 通过实验室足尺寸试验研究了小钢环加固的可行性, 介绍了小钢环加固施工设计方案, 总结了可节约动车资源、可开启多工作面、工艺灵活性强等小钢环加固工艺特点, 实例验证了小钢环加固的应用效果。[结果及结论] 采用小钢环加固工艺, 可使隧道结构极限竖向土压承载力由 570 kN 提升至 690 kN, 隧道刚度有所提升; 可释 90% 放动车资源, 提升施工效率; 可多工作面同步开展施工作业, 有助于快速完成衬砌管片收敛变形整治; 工艺灵活, 可根据衬砌管片收敛变形的不同程度采用不同的施工方案。小钢环加固工艺为地铁隧道衬砌收敛变形整治的快速、无感实施提供了一种新的解决方案。

关键词 地铁隧道; 衬砌管片; 收敛变形; 小钢环加固

中图分类号 U457^{+.3}

DOI: 10.16037/j.1007-869x.20260402

Analysis of Reinforcement Process Using Small Steel Rings for Convergence Deformation of Metro Tunnel Lining Segments

CHAO Weirong

(Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200030, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In order to rapidly curb the convergence deformation of damaged tunnel lining segments in Shanghai Metro, eliminate potential structural safety hazards, and ensure the structural stability and operational safety of Shanghai Metro tunnels, and in view of the practical situation

of tight availability of rolling stock resources and the large number of lining segments requiring reinforcement on a single line, the large steel ring reinforcement process can no longer fully meet the required remediation speed. Therefore, it is necessary to study a new type of small steel ring reinforcement process. [Method] The convergence deformation status of existing Shanghai Metro tunnel lining segments, historical reinforcement processes for lining segments, remediation rates, and key difficulties are analyzed. The feasibility of small steel ring reinforcement is studied through full-scale laboratory experiments. A construction design scheme for the small steel ring reinforcement is introduced. The characteristics of this process are summarized, including its ability to save rolling stock resources, enable multiple working faces, and provide high process flexibility. Case studies are used to verify the effectiveness of the small steel ring reinforcement method. [Result & Conclusion] The small steel ring reinforcement process can increase the ultimate vertical earth pressure bearing capacity of the tunnel structure from 570 kN to 690 kN, thereby improving tunnel stiffness. It can reduce the use of rolling stock resources by 90%, significantly improving construction efficiency. It allows simultaneous multi-face construction operations, which helps to rapidly complete the remediation of convergence deformation in lining segments. The process is flexible, allowing different construction schemes to be adopted depending on the severity of the convergence deformation of the lining segments. The small steel ring reinforcement process provides a new solution for the rapid and minimally disruptive implementation of convergence deformation remediation in metro tunnel linings.

Key words metro tunnel; lining segment; convergent deformation; small steel ring reinforcement

引用格式: 巢伟荣. 地铁隧道衬砌管片收敛变形小钢环加固工艺分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2026, 29(增刊 1): 141-145.

CHAO Weirong. Analysis of reinforcement process using small steel rings for convergence deformation of metro tunnel lining segments[J]. Urban Mass Transit, 2026, 29(S1): 141-145.

当前上海地铁全网络有超 73.3 万环隧道衬砌管片。根据隧道收敛数据,全网络共有超 3.5 万环衬砌管片的收敛变形超过 6 cm。随着时间的推移、运营负荷的增加,有变形进一步增大的风险,需要采取有效的应对措施消除风险隐患。

现上海地铁针对衬砌管片收敛变形的传统整治工艺为大钢环加固。随着上海地铁全网络隧道衬砌收敛变形整治需求加大,施工面临多重挑战,包括有限的夜间动车资源、有限的路网轨道车司机、内燃机头资源、车场天窗施工时长、夜间动车施工时长缩短、单线作业面无法充分打开、车场距离作业面较远等,以上诸多原因制约了整治衬砌收敛变形的加固进度。为了在有限的施工资源条件下,快速遏制已受损隧道衬砌的收敛变形,针对动车资源紧张、单线路需加固衬砌数量较多的隧道区段实施小钢环加固。^[1-2]

1 小钢环加固施工设计方案

小钢环加固工艺可以被视作大钢环加固工艺的一种变体或精细化应用。简单来讲,小钢环是将大钢环在宽度方向上分割为宽度更小的钢环,这种设计使得小钢环更灵活、更适应不同隧道结构的加固需求。与传统的大钢环加固相比,小钢环单块的质量更小,对动车资源的需求较小,因此可以在有限的动车资源条件下进行更高效的施工。

2023 年上半年,针对小钢环加固工艺进行了实验室足尺寸试验。试验结果为:极限竖向土压承载力由 570 kN 提升至 690 kN,相较于加固衬砌的竖向土压承载力有较大的提升;小钢环工艺和既有大钢环工艺在破坏模具上具有一致性,小钢环工艺刚度提升略低于大钢环工艺的,极限承载力提升与大钢环工艺的相当。因此小钢环加固可作为衬砌收敛变形的加固方式^[3]。

根据小钢环的施工灵活性的特点,根据不同工况设计了 2 个方案,分别为 2 肋小钢环加固工艺及 3 肋小钢环加固工艺。

1.1 2 肋小钢环加固施工设计方案

每环衬砌环向安装 2 道小钢环,每道小钢环宽约 300 mm,每环衬砌的钢环分为 2×1(2×1 表示 2 道各 1 块)块顶板、2×8(2×8 表示 2 道各 8 块)块侧板和 2 块 1 000 mm 宽牛腿。利用动车将工厂加工后的底部左右两侧 1 000 mm 宽牛腿投放到施工现场;利用人工点进行 2×1(2×1 表示 2 道各 1 块)块

顶板和 2×8(2×8 表示 2 道各 8 块)块侧板的现场安装。

小钢环采用 20 mm 厚 Q355B 钢板制作,小钢环分块间采用焊接连接。采用不锈钢锚栓连接钢环与衬砌,锚栓间距不大于 400 mm,每环衬砌的锚栓数量约 168 个。钢环环向边缘均采用弹性环氧胶泥封缝处理,钢环与混凝土管片之间充填灌注刚性环氧浆液。2 肋小钢环加固施工图如图 1 所示。

1.2 3 肋小钢环加固施工设计方案

每环衬砌安装 3 道小钢环,每道小钢环宽约 300 mm。每环衬砌的钢环分为 3×1(3×1 表示 3 道各 1 块)块顶板、3×8(3×8 表示 3 道各 8 块)块侧板和 2 块 900 mm 宽牛腿。利用动车将工厂加工后的底部左右两侧 900 mm 宽牛腿投放到施工现场;利用人工点进行 3×1(3×1 表示 3 道各 1 块)块顶板和 3×8(3×8 表示 3 道各 8 块)块侧板的现场安装。

小钢环采用 20 mm 厚 Q355B 钢板制作,小钢环分块间采用焊接连接,小钢环环向边缘两两之间均采用焊接处理。3 道小钢环最外侧环向边缘采用弹性环氧胶泥封缝处理。采用不锈钢锚栓连接钢环与衬砌,锚栓间距不大于 400 mm,每环衬砌的锚栓数量约 180 个;钢环与混凝土管片之间充填灌注刚性环氧浆液注浆。3 肋小钢环加固施工图如图 2 所示。

2 小钢环加固工艺特点

2.1 节约动车资源

小钢环加固工艺的钢构件中,仅牛腿需要使用动车由车场运输至工作面,每个动车点可投送 10 块至 12 块牛腿,每环使用 0.2 个动车点;传统大钢环全部构件均需动车点投送,每环需 2 个动车点。小钢环工艺可节省动车数量 90%,能有效释放动车资源,可同步节省路网内有限的内燃机车头及轨道车司机资源^[4]。

采用大钢环加固工艺,每日夜间施工需日间配套车场天窗点备料。采用小钢环加固工艺,仅牛腿需车场备料,其余构件能通过陆路运输至施工作业面现场,对日间天窗备料点需求明显降低。经测算,采用小钢环加固工艺,能节约 90% 的车场日间备料点。

2.2 多工作面开启

采用大钢环加固工艺,侧板、顶板拼装需要使

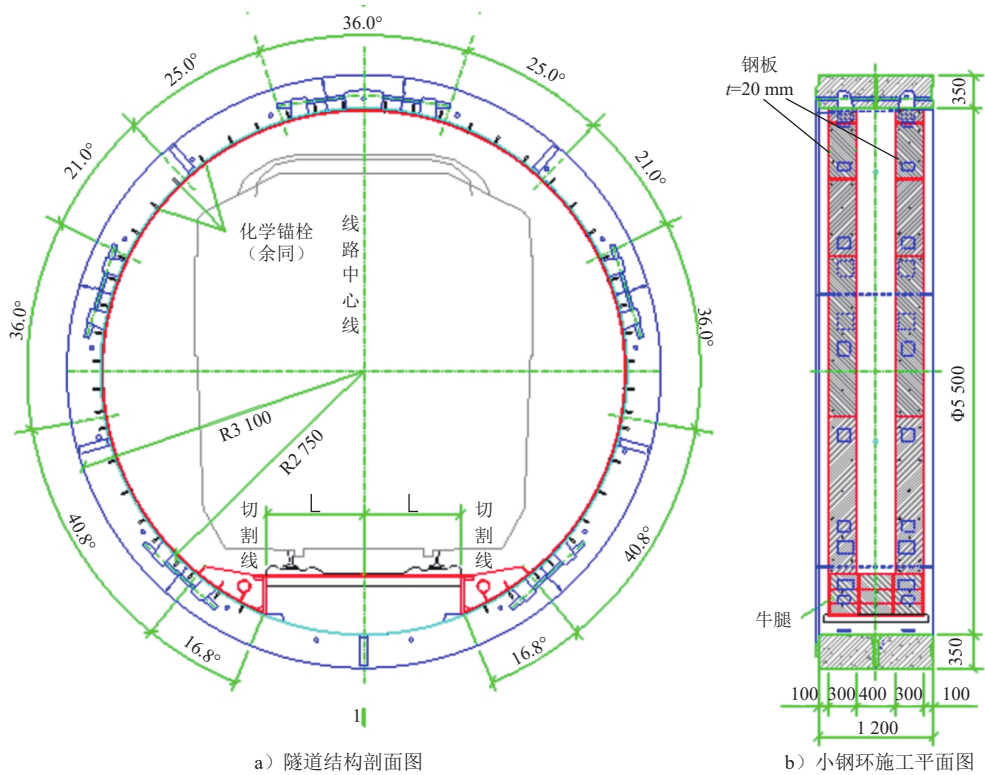


图 1 2 肋小钢环加固设计图
Fig. 1 Drawing of 2-rib small steel ring reinforcement

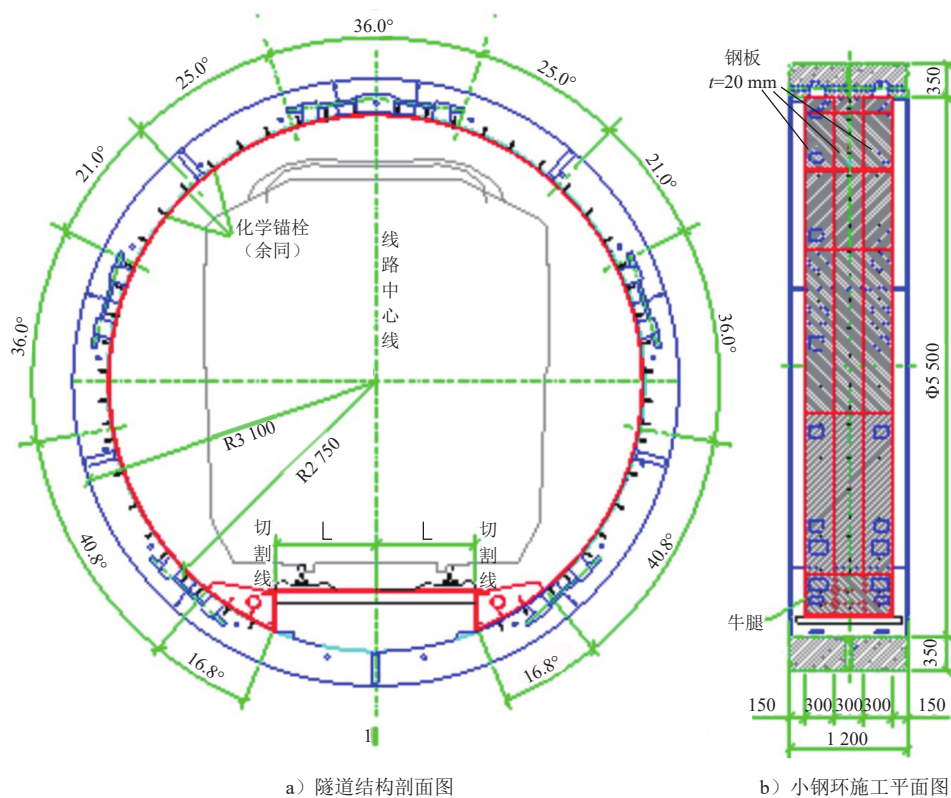


图 2 3 肋小钢环加固设计图
Fig. 2 Drawing of 3-rib small steel ring reinforcement

用动车搭载大型机械手配合人工进行,每条线路至多能配备 2 个车场,导致每条线路至多能开启 2 个工作面。采用小钢环加固工艺,侧板、顶板拼装可使用人工配合小型机械手进行,不依赖动车施工;在牛腿投送完成的情况下,原则上每个区间都可进行衬砌加固,可同时开启多个工作面,提升整治速率^[4]。

因部分变形衬砌管片距离车场较远,目前的动车施工有效时长无法满足顶板拼装需求,采用小钢环加固工艺则能有效解决这些实施难问题。

2.3 工艺灵活性强

采用小钢环加固工艺,施工灵活性强,可根据不同变形量的衬砌管片量身定制。

采用 2 肋小钢环工艺,能有效控制衬砌管片收敛变形,并为改为 3 肋小钢环加固预留了空间。若安装 2 肋小钢环后隧道外部土体结构发生了变化,衬砌管片继续发生收敛变形,可通过安装中间肋成为 3 肋小钢环补强加固结构,实施灵活性强。

3 肋小钢环加固具有遏制衬砌管片收敛变形的能力,加固后的管片同大钢环工艺已无差别,但整体性略差于大钢环加固,可用于收敛变形不大于 9 cm 的衬砌管片。3 肋小钢环加固还可根据管片收敛变形情况进行焊接调整,应用灵活性较强。

3 小钢环加固工艺实例验证

3.1 2 肋小钢环加固

上海地铁在 2023 年 5 月—7 月在 2 号线 T2 航站楼站—1 号风井上行区间第 675 环—第 686 环进行 2 肋小钢环加固施工,以验证小钢环加固对衬砌管片的抗变形能力及相较于大钢环加固的能效。施工后伴随监测至 2023 年底,加固区段内收敛变形增量超过 1 mm 的衬砌环数更少,整体收敛变形增量更小,表明 2 肋小钢环加固对控制隧道变形有一定效果。相较于大钢环加固施工,小钢环加固施工对动车点依赖程度低、可同时开启更多的作业面,可加快全网络的加固施工进度。

3.2 2 肋小钢环加固

上海地铁在 2024 年 10 月—2025 年 6 月在 9 号线徐家汇站—宜山路站上行区间第 222 环—第 245 环进行 3 肋小钢环加固施工,以验证 3 肋小钢环加固对衬砌管片的抗变形能力以及多种焊接工法的能效。根据测量数据,加固区段衬砌管片收敛变形没有恶化,表明 3 肋小钢环加固有遏制衬

砌管片收敛变形的能力。现场根据施工方案,采用了整环纵缝满焊、纵缝封顶块满焊及整环纵缝不焊接 3 种工法,发现不焊接工法施工周期最短,满焊工法整体性更强,部分焊接介于 2 者之间,表明可根据不同收敛变形、工况、施工资源调整焊接工法的灵活性,以达到所需的施工效果。

4 结语

当前,上海地铁隧道衬砌管片收敛变形的整治需求迫切,而传统的大钢环加固施工中面临着一些影响施工效率的现实问题。实践表明,小钢环加固对衬砌的极限承载力提升效果明显。采用小钢环加固工艺,对动车点依赖程度低,可同时开启更多的作业面,可以加快加固施工进度。小钢环加固工艺为上海地铁隧道衬砌管片收敛变形整治的快速、无感实施提供了一种新的解决方案。

参考文献

- [1] 刘喆. 钢内衬加固治理盾构隧道管片病害研究[J]. 工程质量, 2025, 43(8): 92-97.
LIU Zhe. Study on the treatment of diseases in shield tunnel segments by steel lining reinforcement[J]. Construction Quality, 2025, 43(8): 92-97.
- [2] 余守龙. 地铁隧道内衬钢制环加固施工工法[J]. 智能城市应用, 2021(6): 56-61.
YU Shoulong. Reinforcement construction methods of steel ring lining in subway tunnel[J]. Smart City Application, 2021(6): 56-61.
- [3] 柳献, 张浩立, 唐敏, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究: 半环加固法[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 131-137.
LIU Xian, ZHANG Haoli, TANG Min, et al. Experimental study of the ultimate bearing capacity of a shield tunnel reinforced by a semi-ring steel plate[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 131-137.
- [4] 孙磊, 李永迪. 运营地铁受损隧道停运模式下钢环加固整治施工研究[J]. 建筑科技, 2021, 5(5): 67-69.
SUN Lei, LI Yongdi. Steel ring reinforcement for damaged running metro tunnel[J]. Building Technology, 2021, 5(5): 67-69.
- [5] 罗昭明, 董志超. 地铁盾构隧道管片破损修复技术研究[J]. 人民长江, 2015, 46(24): 59-62.
LUO Zhaoming, DONG Zhichao. Research on repairing technique of broken shield segment in metro tunnel excavation[J]. Yangtze River, 2015, 46(24): 59-62.
- [6] 汲亮. 对已运营隧道的收敛变形处置技术研究[J]. 建筑施工, 2017, 39(12): 1816-1817.
JI Liang. Research on convergent and deformational disposal technology for operational tunnel[J]. Building Construction, 2017,

- 39(12): 1816-1817.
- [7] 赵文亮. 运营盾构法隧道收敛变形整治技术的应用研究 [J]. [建筑施工](#), 2023, 45(4): 716-718.
- ZHAO Wenliang. Research on application of convergence deformation treatment technology for operating shield tunnel[J]. [Building Construction](#), 2023, 45(4): 716-718.
- [8] 程斌, 陈治. 地铁隧道管片钢环加固施工技术 [J]. [四川水泥](#), 2025(11): 226-229.
- CHENG Bin, CHEN Zhi. Construction technology of steel ring reinforcement for subway tunnel segment[J]. [Sichuan Cement](#), 2025(11): 226-229.
- [9] 何乐, 刘洋. 地铁区间隧道加固工程施工方法及总体施工管理 [J]. [城市](#), 2016(12): 74-76.
- HE Le, LIU Yang. Construction method and overall construction management of subway tunnel reinforcement project[J]. [City](#), 2016(12): 74-76.
- [10] 龙侨平. 软土地区盾构隧道加固措施研究 [J]. [工程建设与设计](#), 2022(11): 127-129.
- LONG Qiaoping. Research on reinforcement measures of shield tunnel in soft soil region[J]. [Construction & Design for Engineering](#), 2022(11): 127-129.
- [11] 余以明, 李煥龙. 盾构隧道管片病害钢环加固施工技术 [J]. [建筑机械](#), 2024(11): 113-117.
- YU Yiming, LI Huanlong. Reinforcement construction technology of steel ring for shield tunnel segment disease[J]. [Construction Machinery](#), 2024(11): 113-117.
- [12] 周崇铭. 钢环加固技术在城市轨道交通隧道结构变形整治中的应用研究 [J]. [建筑科技](#), 2025, 9(7): 55-58.
- ZHOU Chongming. Research on the application of steel ring reinforcement technology in the structural deformation treatment of urban rail transit tunnels[J]. [Building Technology](#), 2025, 9(7): 55-58.
- [13] 匡增华. 钢内衬环在盾构法隧道浮置板道床处的加固应用 [J]. [山西建筑](#), 2023, 49(12): 174-175.
- KUANG Zenghua. Application of reinforcement with steel lining ring on floating slab track-bed in shield tunnel[J]. [Shanxi Architecture](#), 2023, 49(12): 174-175.
- [14] 杨永刚. 钢板加固技术在运营隧道的应用及效果分析 [J]. [交通科技与管理](#), 2025, 6(8): 152-155.
- YANG Yonggang. Application and effect analysis of steel plate reinforcement technology in operating tunnel[J]. [Transportation technology and management](#), 2025, 6(8): 152-155.
- [15] 庄绪良. 地铁隧道变形分析及治理加固技术研究 [J]. [铁道建筑技术](#), 2022(6): 200-205.
- ZHUANG Xuliang. Study on the deformation analysis and reinforcement technology of subway tunnel[J]. [Railway Construction Technology](#), 2022(6): 200-205.
- 收稿日期: 2026-04-29 修回日期: 2026-05-20 出版日期: 2026-06-10
Received: 2026-04-29 Revised: 2026-05-20 Published: 2026-06-10
- 通信作者: 巢伟荣, 工程师, 304567889@qq.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