

青岛地铁 1 号线双护盾隧道掘进机应用中的 新问题及对策

程 龙¹ 刘 鹏¹ 苗崇通¹ 刘世波¹ 冯路航¹ 王万仁²

(1. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 300308, 天津; 2. 中铁二十二局集团有限公司, 100043, 北京//第一作者, 工程师)

摘 要 以青岛地铁 1 号线工程为背景, 针对双护盾隧道掘进机 (TBM) 应用过程中出现的复杂条件下 TBM 快速出渣、TBM 连续掘进与车站相互干扰、特殊线路条件下 TBM 掘进、复杂条件下 TBM 始发等新问题进行了系统的分析和研究。提出了具有创新性的洞内翻渣方案、极限小净距掘进处理措施、平移始发技术等对策, 取得了良好的应用效果。研究成果进一步拓展了 TBM 在城市轨道交通特殊线路条件下技术的应用。

关键词 城市轨道交通; 双护盾 TBM; 洞内翻渣; 小净距隧道

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.023

New Problems and Countermeasures of Double Shield Tunnel Boring Machine in the Application of Qingdao Metro Line 1

CHENG Long, LIU Peng, MIAO Chongtong, LIU Shibo, FENG Luhang, WANG Wanren

Abstract Taking Qingdao Metro Line 1 project as research background, the new problems that occurred in the application process of double shield tunnel boring machine (TBM) were systematically analyzed and studied, which includes the TBM rapid slag removal under complex conditions, the mutual interference between TBM continuous excavation and station, TBM excavation under special line conditions, and the start of TBM under complex conditions. Countermeasures were proposed, such as innovative slag removal scheme in the tunnel, the treatment measures for the minimum clear distance excavation and the technology of construction and translation, from which well-performing application results were obtained. The research results have further expanded the application of TBM technology in urban rail transit lines under special conditions.

Key words urban rail transit; double-shield TBM; slag in hole; small clear distance tunnel

First-Author's address China Railway Liu Yuan Group Co., Ltd., 300308, Tianjin, China

随着城市化进程的推进, 城市轨道交通建设规模不断扩张, 建设条件日益复杂、多样。以上海、南京为代表的软土地区, 地铁区间隧道主要采用盾构法施工; 以青岛、重庆为代表的硬岩地区, 区间隧道主要采用钻爆法和隧道掘进机 (TBM) 施工。关于 TBM 的技术总结和研究分析主要有: 文献[1]结合重庆地铁 6 号线及青岛地铁 2 号线的设计及施工情况, 对采用 TBM 施工的隧道平纵断面设计、TBM 选型等进行了研究分析; 文献[2]以重庆地铁 6 号线一期工程为例, 对 TBM 的适应性评价体系进行了研究; 文献[3]对双护盾 TBM 设计特点进行分析, 提出了双护盾 TBM 应用于城市轨道交通工程时需要考虑和解决的关键问题; 文献[4]结合双护盾 TBM 应用中的实际问题, 提出了解决处理方案; 文献[5]对皮带机用于地铁施工的可行性进行了研究; 文献[6-8]对双护盾 TBM 在青岛地铁 2 号线的应用情况进行了分析和讨论。

上述研究成果主要集中在 TBM 的适用性分析及 TBM 常规应用的技术总结方面。随着 TBM 的不断推广应用, 以及工程建设条件的多样性、复杂性日益突出, TBM 施工过程中的新问题、新挑战不断涌现。本文以青岛地铁 1 号线工程为例, 针对特殊条件下双护盾 TBM 技术的应用提出了新的思路和解决方案。

1 TBM 在青岛地铁 1 号线应用现状

1.1 青岛地铁 1 号线地质概况

青岛市属于典型的上软下硬土岩复合地层, 一般上部为第四系软弱地层, 下部为坚硬的岩石地层。勘察资料显示, 中风化岩石单轴抗压强度基本在 25 ~ 90 MPa, 微风化岩石单轴抗压强度基本在 40 ~ 130 MPa, 岩石中石英含量为 5% ~ 30%。

青岛市整体主要位于海阳-青岛断陷上, 断裂构

造比较发育,褶皱构造不发育。构造破碎带处岩体节理裂隙发育,岩体破碎,围岩自稳性差。地下水以基岩裂隙水为主,青岛地铁1号线沿线典型地质纵断面图如图1所示。

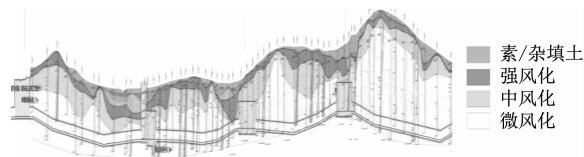


图1 青岛地铁1号线沿线典型地层分布

1.2 TBM 施工面临的问题

青岛地铁1号线采用DSUC型双护盾TBM,开挖直径6300 mm,管片外径6.0 m,管片厚度300 mm。TBM主机长约12.5 m,整机长约135 m,最小转弯半径300 m,出渣系统采用皮带机+矿车。

青岛地铁1号线于2015年开工建设,线路全长约60 km,全线近1/3的区间隧道采用TBM施工,掘进长度超过30 km(单延米)。由于青岛地铁1号线工程建设条件复杂,TBM应用过程中的新问题和挑战不断呈现,主要包括复杂条件下TBM快速出渣、TBM连续掘进与车站的相互干扰、特殊线路条件下TBM掘进、复杂条件下TBM始发等。

2 复杂条件下TBM快速出渣

2.1 应用常规出渣方案存在的问题

通常情况下,地铁线路正上方设置TBM工作井,渣车通过工作井垂直提升出渣。工作井兼顾管片、豆砾石、注浆材料投放等作业,各作业间存在一定的施工干扰。

青岛地铁1号线瓦屋庄站—贵州路站区间为TBM施工隧道,TBM始发端轨面埋深超过50 m。另外,隧道正线上方不具备设置工作井的条件。渣车需先经过一次洞内平移,然后垂直提升50 m完成出渣。作业工序繁多,垂直提升高度大,大大降低了出渣效率。由于出渣时间较长,TBM快速成洞能力不能充分发挥,出渣成为制约TBM掘进效率的关键因素。

2.2 洞内翻渣快速出渣技术

瓦屋庄站—贵州路站区间采用钻爆法+TBM组合工法施工,钻爆法隧道段设置了施工斜井作为辅助施工通道。为了提高TBM掘进施工效率,同时提高斜井利用率,研发并应用了洞内翻渣系统,实现TBM快速出渣,快速掘进。

1) 洞内翻渣系统。采用液压驱动,最大翻卸质量为60 t,出渣能力为120 m³/h,单套翻渣系统可完成左、右线隧道的出渣任务。翻渣系统安装在本区间单洞双线隧道内,隧道底板进行局部扩挖,用于设置翻渣机基础及渣仓。底板扩挖段宽度为9.9 m,长度为22 m,深度为4 m。洞内翻渣系统安装洞室结构设计如图2所示。

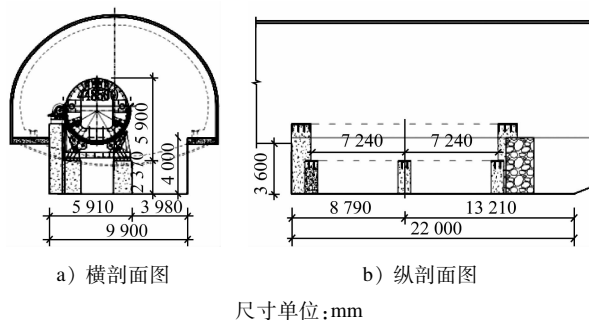


图2 洞内翻渣系统安装洞室结构断面图

2) 出渣作业流:① TBM掘进完成后,通过电瓶车将渣车牵引至液压翻渣机;② 液压翻渣机将渣车分别旋转至55°和155°,将渣车内渣土倾倒入渣仓;③ 渣仓内渣土通过1#、2#、3#皮带机倒运至自卸汽车,通过施工斜井运出洞外。

2.3 洞内翻渣系统应用效果

根据文献[5]对青岛地铁2号线TBM施工的出渣时间统计,单节渣车垂直提升,平均出渣时间为15 min;TBM掘进1循环,4节渣车垂直提升出渣时间约为60 min。

青岛地铁1号线瓦屋庄站—贵州路站区间正线上方不具备设置工作井条件,渣车需平移后再由竖井垂直提升,出渣耗时更长,单节渣车出渣时长约为20 min。通过应用洞内翻渣系统,单次可完成2节渣车的倾倒入渣,掘进1循环4节渣车翻渣总时长为35 min,出渣效率较垂直提升方案提高1倍。

3 TBM长距离连续掘进

3.1 TBM长距离连续掘进存在的主要问题

TBM最初应用于山岭隧道、引水隧洞等长大隧道的施工,不存在过站施工问题。在城市轨道交通工程中,单台TBM一般会连续掘进3~5个区间,TBM施工与车站施工相互干扰问题不可避免。

1) 车站阻断TBM掘进。车站未开挖工况下,阻断TBM连续掘进,TBM需先掘进通过车站,然后进行车站扩挖。TBM已在青岛、重庆地铁建设中成

功应用,但先隧后站工程案例鲜有报导。先隧后站理论上可行的,但实践经验不足,TBM 导洞与扩挖隧道合理位置关系、TBM 导洞临时支护处理等问题尚需深入研究。

2) TBM 过站后干扰车站施工。TBM 过站后仍需占用车站轨行区作为出渣通道使用。TBM 出渣、管片运输作业对车站施工造成干扰,同时交叉作业存在严重的安全隐患。

3.2 先隧后站方案

青岛地铁 1 号线西镇站站前设四线存车线,存车线隧道全长约 340 m。该区段隧道洞身主要位于微风化花岗岩层,围岩等级以 II 级为主,局部为 IV 级围岩,地质纵断面如图 3 所示。存车线下穿青岛老城区,地面环境复杂,沿线分布大量老旧房屋,对爆破振动敏感。TBM 掘进至存车线隧道处,隧道未开挖,阻断 TBM 连续掘进,需采用先隧后站设计方案。

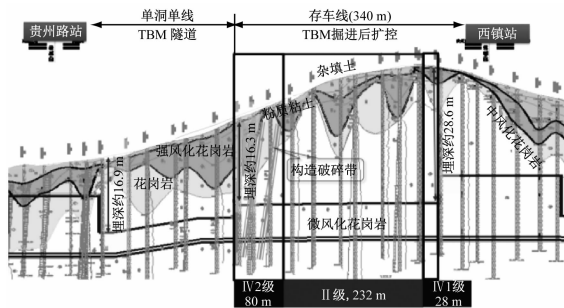
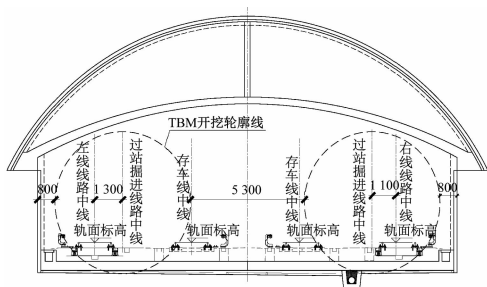


图 3 青岛地铁 1 号线西镇站存车线隧道地质纵断面图

3.2.1 TBM 导洞掘进线路设计

为便于存车线隧道扩挖施工,TBM 掘进轮廓线至存车线隧道开挖边线预留 800 mm 光爆层。TBM 导洞掘进断面如图 4 所示。

TBM 掘进过站主要通过两侧撑靴支撑岩壁来提供掘进反力,为保证掘进施工安全,左右线导洞应保持约 1 倍洞径的净距,避免后行隧道撑靴击穿中间岩柱。

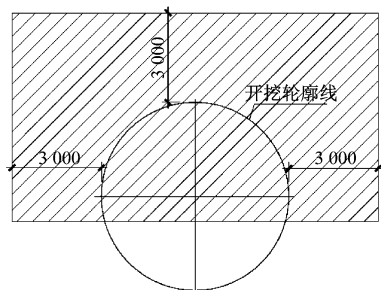


尺寸单位:mm

图 4 TBM 导洞掘进断面设计图

3.2.2 TBM 导洞支护动态设计

1) 预设计方案。II 级围岩在较长时间段可完全自稳,在预设计阶段对 II 级围岩未采取任何支护措施。IV 级围岩自稳时间较短,TBM 掘进过后无法及时进行支护处理,掉块风险较大,严重时会发生较大规模的垮塌。TBM 过站施工前对 IV 级围岩段进行注浆加固处理,改善围岩,加固设计方案如图 5 所示。地层加固处理后,TBM 裸洞过站。



尺寸单位:mm

图 5 IV 级围岩注浆加固设计图

2) TBM 导洞后处理方案。TBM 掘进揭示围岩显示,II 级围岩段整体较好,局部有节理裂隙发育,规模较小,围岩整体稳定,无需采取任何支护措施。TBM 掘进通过后,IV 级围岩段初期稳定性较好。随着时间推移,局部区段渗水量增大,发生小规模掉块,且有加剧的趋势。基于上述情况,在渗水较为严重的 IV 级围岩段增加了临时支护措施,采用格栅钢架(间距 1 m)+200 mm 厚 C25 湿喷混凝土进行补强加固处理,围岩稳定性得以控制。

3.2.3 先隧后站方案应用效果

采用先隧后站方案解决了存车线隧道对 TBM 连续掘进的阻断,并取得了以下成果:

1) 将 TBM 导洞作为爆破临空面,针对性进行爆破设计,地表爆破振速能够控制在 0.5 cm/s 以下,大大降低了爆破施工对周边环境的影响。

2) 存车线隧道断面面积约为 221 m²,施工体量大。施工场区位于青岛老城区,周边环境条件复杂,不具备设置施工斜井及竖井的条件,仅能利用车站施工竖井兼做存车线施工通道,工期压力大,施工组织难度大。TBM 掘进完成后,充分利用 TBM 导洞作为辅助施工通道开辟作业面,提高了施工组织的灵活性,减小了工期压力。

3) 利用 TBM 导洞对存车线隧道工程地质条件进行补充勘察,对不良地层提前进行加固处理,降低了超大断面隧道的施工风险。

加强 TBM 施工姿态控制、滚动角控制、纠偏控制,掘进过程中水平偏差应控制在 ± 30 mm,竖向偏差应控制在 $0 \sim 30$ mm。

4.3 应用效果

现场监测数据显示,管片结构变形及环、纵缝张开量等监测结果均满足规范要求。本工程左右线隧道最小净距 0.58 m,创造了国内 TBM 小净距隧道施工最小净距记录。

5 复杂条件下 TBM 始发

5.1 应用常规始发方案存在的问题

一般情况下,TBM 设备由明挖车站或者线路正上方设置工作井完成始发作业。根据全线工程筹划,3[#]、8[#]TBM 需由青岛地铁 1 号线瓦屋庄站—贵州路站区间 3 号风井处始发。该区段隧道轨面埋深约 50 m,且场区地表分布约 10 m 厚新近填渣区(主要为碎石土),以下为中—微风化花岗岩。填渣区地下水与海水直接连通,水位随潮汐变化。若正线上方设置明挖工作井兼区间风井,则基坑规模较大,围护结构、止水措施的实施比较困难,且施工风险极高。因此,本工程采用小规模通风竖井+地下暗挖风机房方案。

5.2 平移始发方案设计

区间风井兼做 TBM 始发井,在 TBM 始发阶段,主机由通风竖井吊入,并进行主机一次组装,然后通过风道平移至区间正线,纵向移动至预定位置。TBM 平移始发方案设计如图 9 所示。

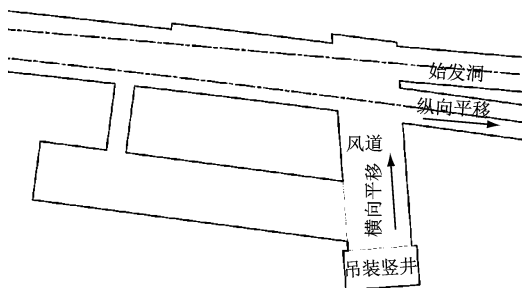


图9 TBM 平移始发方案设计示意图

区间风井结构进行永临结合设计。为满足 TBM 始发需求,通风竖井内净空设计为 $8\text{ m} \times 15\text{ m}$,风道结构内净空设计为 14 m 。平移始发作业要求及作业流程如下:

- 1) 井下设置平移托架,平移通道结构按照底板滑轨(4[#]钢轨)。
- 2) 主机设备调入并进行一次组装。

3) 主机一次组装完成后横向平移至线路中线。TBM 平移如图 10 所示。

4) 主机纵向移动至始发洞弧形导台,组装管片拼装机等,主机完全组装后纵移至预定位置。TBM 纵移如图 11 所示。

5) 后配套组装、管线连接,完成整机组装。

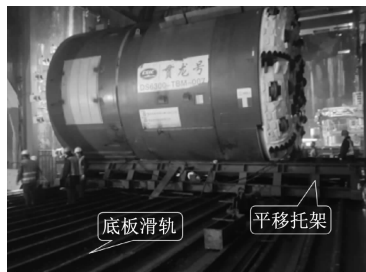


图10 TBM 一次组装后平移



图11 TBM 始发洞内纵向平移

5.3 应用效果

通过对区间风井进行永临结合设计,采用平移始发方案顺利实现了左右线 2 台 TBM 的组装及始发,大大降低了线路上方设置竖井的工程风险,节约了工程投资,为复杂条件下 TBM 始发提供了一种新思路。

6 结论

本文以青岛地铁 1 号线为背景,针对双护盾 TBM 应用中的新问题和挑战进行分析研究,提出了针对性解决方案,取得了良好的应用效果,主要结论如下:

1) TBM 隧道施工中,出渣效率是制约 TBM 隧道快速成洞的关键因素之一。通过应用洞内翻渣系统,TBM 出渣效率可提升 1 倍,能够解决复杂条件下 TBM 快速掘进问题。

2) 先隧后站方案可解决车站对 TBM 隧道施工的阻断,掘进过站方案设计应充分考虑后期隧道的扩挖、TBM 掘进导洞支护处理,保障施工安全;先站

(下转第 106 页)

2) 由于分隔墙的存在,使得基坑支撑腰梁闭合困难,需要在分隔墙钢筋中预留支撑腰梁的钢筋连接条件。对横隔墙钢筋笼吊装标高控制要求较高。在施工过程中发现,在腰梁与横隔墙连接处因混凝土分期浇筑易出现裂缝。

3) 根据地质勘察报告,基坑底部的砂质粉土层⑨_{1a}为承压水层,承压水头埋深为 6.80 m。实际施工过程中发现,该层承压水尽管距离基底很近,但由于地下连续墙阻断了其同外界承压水的联系,在坑内抽水后开挖基坑并不会产生风险。

4) 矿山法施工段采取冻结法施工。冻结法在软土富水地区已经具有成熟的经验,可以取得良好的效果^[6]。本工程先期设置地下连续墙目的是为了为了保护该段盾构管片的安全,但预留宽度稍小,造成后期冻结时对冻结质量要求较高。根据实际施工情况,若将该处地下连续墙取消,则能够方便冻结施工,增大冻结范围,对工程安全反而有利。

5) 明挖段隧道结构采用拱形顶板能有效减小顶板厚度。中板的设置能有效增强侧墙抵抗两侧土压力的能力,但需在设计时详细考虑后期预留检修通道及排水措施。

6) 矿山法施工段与盾构管片采用后张钢环连接具有一定的优势^[7],可以供类似工程借鉴。

7) 在矿山法施工段两侧设置地下连续墙,目的是减小矿山法施工过程中对左线隧道的影

响,但地下连续墙预留冷冻空间不足,造成了后期冷冻施工时隧道中部的冷冻壁厚度不足,施工危险程度增高。建议类似工程在施工过程中加大矿山法施工段两侧地下连续墙间距离,为后期的施工留出余量。

8) 在矿山法施工段与盾构管片连接处尽管采用了多重防水措施,但由于该连接部位空间狭小,防水质量难以保证,造成后期该处出现少量渗水。对于类似工程,可在盾构管片中设置注浆孔,通过后期注浆来达到防水效果。

本文介绍的盾构隧道修复方案总体可行,在保证安全的前提下可以缩短总体工期。同时,该方案中的一些做法存在进一步改进的可能。后续若遇到类似工程案例,可参照该方案并进行改进后实施。

参考文献

- [1] 崔玖江. 盾构隧道施工风险与规避对策[J]. 隧道建设, 2009, 29(4): 377.
- [2] 陆明, 秦灏, 朱祖熹. 上海轨道交通 9 号线盾构区间隧道抢险修复工程介绍[J]. 中国建筑防水, 2007(1): 27.
- [3] 沈国红. 上海轨道交通 11 号线盾构隧道损坏调查及修复[J]. 中国市政工程, 2010(5): 29.
- [4] 刘玉琦, 李养平, 王宝来, 等. 天津地铁 1 号线隧道渗漏治理[J]. 中国建筑防水, 2004(9): 23.
- [5] 李凯, 程桦. 天津地铁隧道修复工程冻土力学性能试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2013, 33(2): 67.
- [6] 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.

(收稿日期: 2018-11-08)

(上接第 102 页)

后隧方案通过采用门式钢架封闭隔离设计,可解决车站、区间施工的相互干扰问题。

3) 通过采取管片背后注浆、洞内同步支撑台车、合理控制掘进参数等综合手段,可保障小净距 TBM 隧道的施工安全。采用上述措施,西镇站—青岛站区间 TBM 隧道最小净距达到 0.58 m,创造了国内 TBM 施工最小净距记录。

4) 区间正线上方不具备设置工作井的条件下,可采取平移始发技术,完成 TBM 始发作业。但该方案的 TBM 出渣效率相对较低,应对出渣方案进行针对性设计。

参考文献

- [1] 刘小刚. TBM 在岩石城市轨道交通建设中的应用研究[J]. 现

代隧道技术, 2012, 49(5): 15.

- [2] 吕瑞虎. 城市地铁 TBM 施工适应性评价研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(1): 31.
- [3] 王杜娟, 宁向可. 城市地铁双护盾 TBM 设计及应用[J]. 隧道建设, 2018, 38(6): 1052.
- [4] 罗勇, 吴圣智, 王明年, 等. 城市轨道交通隧道双护盾 TBM 施工适应性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 525.
- [5] 齐梦学. 垂直皮带机用于地铁 TBM 施工的可行性探讨[J]. 隧道建设, 2016, 36(8): 1004.
- [6] 司玉迪. 双护盾 TBM 在青岛地铁的适应性研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(增 1): 212.
- [7] 黄舰. 青岛地铁区间隧道双护盾 TBM 地质适应性分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 42.
- [8] 林刚, 史宣陶, 陈军. 双护盾 TBM 在青岛城市轨道交通工程中的应用与实践[J]. 隧道建设, 2019, 39(12): 2020.

(收稿日期: 2020-02-20)