

青岛地铁1号线过海隧道工程双护盾 隧道掘进机应用关键技术

赵光泉¹ 刘鹏² 周强¹ 程龙² 张岩¹ 王万仁³

(1. 青岛市地铁一号线有限公司, 266101, 青岛; 2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 300308, 天津;
3. 中铁二十二局集团有限公司, 100043, 北京//第一作者, 正高级工程师)

摘要 青岛地铁在国内首次采用双护盾 TBM(隧道掘进机)技术,实现了硬岩地层地铁区间隧道快速、安全、高效建设。结合青岛地铁1号线过海隧道 TBM 隧道段的施工实际,采用豆砾石、水泥浆、水泥-水玻璃双液浆复合灌浆材料及环箍分段注浆工艺成套技术,有效地解决了管片成型质量问题。根据近海区域穿越断层破碎带的施工风险,提出了地面精细化控制注浆、超前地质预报等综合技术,保障了施工安全。针对超深竖井垂直提升出渣效率低下的问题,创新性地研发了 TBM 洞内翻渣技术,其工效较常规方案提高1倍,为复杂条件下 TBM 高效施工提供了新的方案和思路,具有良好的推广价值。

关键词 隧道施工; 双护盾隧道掘进机; 断层破碎带; 洞内翻渣技术

中图分类号 U231.3;U455.31

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.037

Key Technologies of Double-Shield TBM Applied to Qingdao Metro Line 1 Undersea Tunnel

ZHAO Guangquan, LIU Peng, ZHOU Qiang, CHENG Long, ZHANG Yan, WANG Wanren

Abstract Qingdao Metro adopts double shield TBM (tunnel boring machine) technology for the first time domestically, to realize the rapid, safe and efficient construction of metro tunnels in hard rock stratum. Taking the construction practice of TBM tunnel section of undersea tunnel of Qingdao Metro Line 1 as background, a complete set of grouting technology is put forward, which adopts bean gravel, cement slurry, cement water glass double liquid slurry composite grouting material and ring hoop sectional grouting technology, effectively solving the quality problem of segment forming. In response to the construction risk of crossing fault fracture zone in offshore area, the comprehensive technologies such as ground fine control

grouting and advanced geological prediction are proposed to ensure the safety of TBM crossing construction. Aiming at the problem of low slag removal efficiency in vertical lifting of ultra-deep shaft, the technology of turning slag in TBM tunnel is innovatively developed, which doubles working efficiency of conventional scheme, providing a new strategy and idea for efficient construction of TBM under complex conditions and has good promotion value.

Key words metro tunnel; double-shield TBM; fault fracture zone; slag turning technology

First-author's address Qingdao Metro Line 1 Co., Ltd., 266101, Qingdao, China

青岛市属于土岩二元复合地层,该类地层整体呈“上软下硬”的特点,第四系覆盖层较薄,其下为中-微风化岩层。在青岛地铁初期建设时,区间隧道多采用钻爆法施工,爆破扰民、工效低等问题突出。为解决上述问题,从地铁2号线开始,引入了 TBM(隧道掘进机)施工技术。TBM 通常用于山岭隧道、引水隧洞的施工^[1-3],在城市轨道交通领域的应用较少。文献[4-6]结合 TBM 在青岛地铁2号线的应用情况,研究分析了青岛地铁区间隧道双护盾 TBM 的地质适应性;文献[7]结合双护盾 TBM 在地铁工程中的应用,对 TBM 过站、下穿建筑物等技术进行了探讨;文献[8]对重庆地区复合式 TBM 的应用情况进行了总结,为后续工程建设提供了借鉴和参考。文献[9]针对岩石地层地铁隧道的特殊性,对 TBM 的改造设计进行了研究。TBM 在城市轨道交通领域的应用起步较晚,相关理论研究及技术经验不足。尽管上述研究成果对地铁工程中 TBM 的技术应用进行了一定的研究和总结,但对于近海区域 TBM 穿越断层破碎带、TBM 洞内翻渣技术等鲜有涉及,相关的施工经验及理论成果较少。

1 工程概况

1.1 隧道总体设计

青岛地铁 1 号线瓦屋庄站—贵州路区间隧道

全长约 8.08 km, 其中海域段长度约 3.43 km。本工程为国内首条跨海地铁区间隧道, 其中: 瓦屋庄站至 3 号风井区段采用矿山法施工, 3 号风井至贵州路车站区段采用 TBM 施工。隧道平面如图 1 所示。

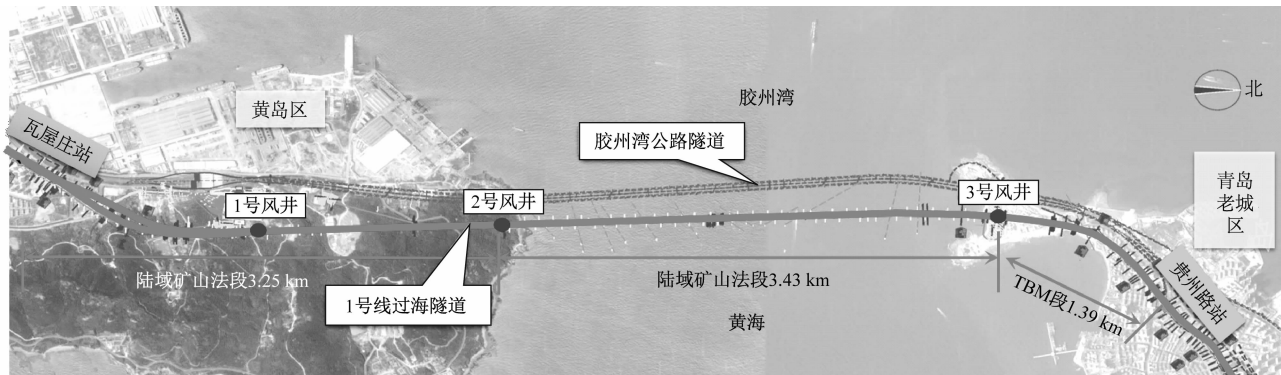


图 1 青岛地铁 1 号线过海隧道平面图

区间线路出瓦屋庄站后下穿窟窿山, 过 2 号区间风井后以直线形式过海。在团岛鼻嘴登陆后, 区间线路沿青岛老城区敷设。3 号风井至贵州路车站区段隧道沿线下穿红山峡路、观音峡路等市政道路及居民区、军事管理区, 沿线的地面构筑物主要为住宅楼及军用、民用设施, 建筑物多为毛石条形基础结构, 对爆破振动及地层变形敏感。

1.2 工程地质概况

3 号风井至贵州路车站区段隧址区为滨海堆积地貌, 经人工处理后地势平坦。该区段上部覆盖层主要为人工填土, 下伏基岩以花岗岩为主, 局部发育辉绿岩脉, 勘察期间揭露有 f_{1-3} 断层破碎带。

采用 TBM 技术施工的隧道段, 其地质纵断面如图 2 所示。隧道洞身主要穿越微风化凝灰岩、中-微风化花岗岩地层, 其中: 中风化岩单轴饱和抗压强度为 12.7~45.2 MPa; 微风化岩单轴饱和抗压强度为 56.5~152.0 MPa。

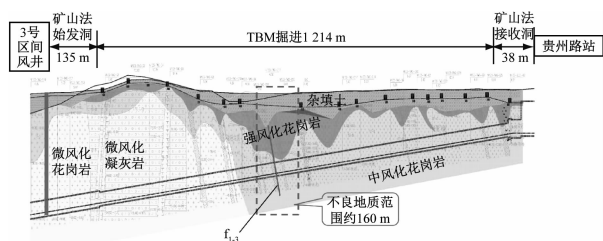


图 2 TBM 施工隧道段地质纵断面图

2 设备选型

TBM 分为单护盾、敞开式和双护盾。其中: 单

护盾 TBM 适用于软弱围岩施工; 敞开式 TBM 适用于自稳性较好岩层施工; 双护盾 TBM 对软弱围岩及自稳性较好围岩均有较好的适用性。

根据 3 号风井至贵州路车站区段的工程地质条件, 敞开式 TBM 及双护盾 TBM 均可适应本工程。敞开式 TBM 一般配套采用复合式衬砌结构, TBM 掘进完成后需要进行模筑衬砌施工, 隧道整体成洞的效率偏低。双护盾 TBM 既可以采用敞开模式掘进, 实现拼装管片与掘进的同步作业, 在遭遇不良地层时还可转换为单护盾模式掘进, 在护盾保护下进行掘进及管片拼装作业, 保障施工安全。另外, 该区段隧道沿青岛老城区掘进, 沿线下穿军事管理区及大量建筑物, 因此对地面沉降敏感。与敞开式 TBM 相比, 双护盾 TBM 施工完成后及时进行永久支护, 安全度高。综合以上因素, 双护盾 TBM 在本项目施工中具有较明显的技术优势。

3 双护盾 TBM 管片成型控制技术

管片拼装控制不当易造成管片局部挤压碎裂、防水失效等质量问题, 尤其是近海富水地层, 管片拼装质量差造成严重的结构渗漏水, 因而控制管片的拼装质量是 TBM 掘进施工的重难点。

3.1 管片拼装

本工程采用的双护盾 TBM 设备, 其盾尾内径为 6 090 mm, 管片外径为 6 000 mm, 管片与盾尾理论间隙为 45 mm。为保证盾尾处管片的拼装质量, 盾尾内部焊接 45 mm 方钢, 方钢沿盾尾下部 90° 范围内的环向间距为 1.0 m, 长度为 1.5 m。

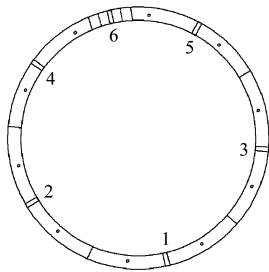
管片拼装过程中分 3 次进行管片紧固:每环管片初步拼装成环时进行第 1 次螺栓紧固;在管片脱出盾尾前进行第 2 次紧固;在脱出盾尾后、豆砾石灌浆施工前完成第 3 次紧固。通过 3 次紧固控制管片的变形,保障拼装质量。

3.2 管片壁后注浆

本工程双护盾 TBM 开挖直径为 6 300 mm,管片外径为 6 000 mm,管片与围岩建筑间隙为 150 mm。采用 TBM 施工的隧道洞身主要位于岩石地层,洞身围岩自稳性相对较好,地层难以形成对管片结构的环箍作用,不利于管片成型控制。

为保障拼装后管片稳固,施工时在管片脱出盾尾后及时进行吹填豆砾石,尽快为管片稳固提供支撑力,以限制管片结构的进一步变形。吹填豆砾石完成后进行管片背后注浆,进一步提高管片壁后的回填密实度和强度。

双护盾 TBM 无盾尾密封设计,且隧道开挖面为敞开状态,这为隧道壁后注浆施工带来困难。为提高管片壁后充填密实度,注浆施工按照分段注浆、多次注浆原则实施。将每 10 环管片划分为 1 个注浆段,每个注浆段设置止浆环箍,止浆环箍沿纵向长度覆盖 2~3 环管片。施工时,在地下水丰富、围岩破碎段应适当缩短注浆段长度,确保注浆质量。每个注浆段两端注浆环箍完成后进行中间段落定域注浆。每环管片的壁后注浆按照自下而上、左右对称进行,注浆顺序为 1→2→3→4→5→6,如图 3 所示。



注:数字表示注浆点位
图 3 管片壁后注浆顺序

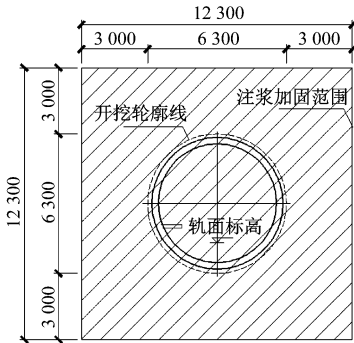
止浆环为水泥-水玻璃双液浆。该双液浆采用 P. O 42.5 等级的水泥以及波美度为 29 ~ 37 °Be、密度为 1.25 ~ 1.35 g/cm³ 的水玻璃,注浆压力为 0.2 ~ 0.3 MPa。止浆环间采用水灰比为 0.75 的普通水泥浆填充注浆,水泥浆和水玻璃的体积比为 1:1,注浆压力为 0.2 ~ 0.3 MPa。

4 双护盾 TBM 穿越不良地层施工的关键技术

根据地质勘察资料, $f_{1,3}$ 断裂破碎带从本段区间穿过,影响区范围约 160 m。受断层破碎带影响,隧址区地下水发育、围岩破碎,双护盾 TBM 穿越施工时易发生坍塌、涌水及卡机等事故。

4.1 地面注浆加固

本工程双护盾 TBM 设备预留了超前钻注设备接口,但由于设备空间有限,施工时需对设备改装后方可投入使用,工序繁琐。此外,受设备预留接口间距、倾角限制,难以对掌子面前方不良地质体进行系统加固。本工程距离海岸线较近,地下水较丰富,易发生涌水事故,故施工风险极大。为此,选用地面注浆方案,对不良地质段进行系统加固处理,加固范围为隧道开挖线外 3 m,如图 4 所示。



尺寸单位:mm
图 4 地面注浆加固设计

地面加固段隧道拱顶埋深约为 30 m,若采用常规的注浆方案,浆液扩散随机性强,加固效果不佳,TBM 施工仍存在安全隐患。基于上述因素,本区段地面加固采用了膜袋注浆工艺自上而下前进式注浆,通过采用定域注浆管实现注浆过程的精细化控制。

4.2 超前地质预报

TBM 掘进施工前,采用激发极化法和三维地震法进行超前地质探测,结合探测结果判断 TBM 掘进可行性,制定应急处理措施。

4.2.1 激发极化超前地质探测

激发极化法是根据施加电场作用下围岩传导电流的分布规律,推断探测区域电阻率的分布情况和地质情况。通过在掌子面布置一定数量的电极,按照一定的序列,自动供入直流电、测量电极,测量

2 个电极间的电势差,从而计算出视电阻率剖面。通过反演计算,可得到探测区域围岩的电阻率剖面,含水构造表现为低电阻率,完整围岩表现为高电阻率。

采用激发极化法对隧道掌子面前方 30 m 范围地质情况进行超前探测,其典型探测结果如图 5 所

示,其中:坐标原点为掌子面中心位置; x 方向表示垂直方向; y 方向表示掌子面宽度方向; z 方向表示开挖方向。反演区域为 $y(-10\text{ m},10\text{ m})$ 、 $x(-10\text{ m},10\text{ m})$,掌子面区域坐标为 $y(-3\text{ m},3\text{ m})$ 、 $x(-3\text{ m},3\text{ m})$ 。通过激发极化的成像结果判别围岩质量、含水情况等,为双护盾 TBM 的掘进施工提供参考。

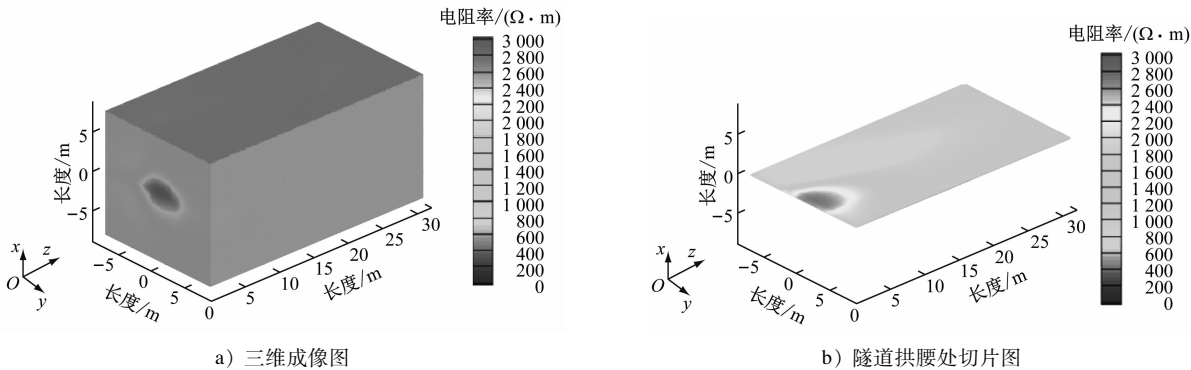


图 5 激发极化超前探测结果截图

4.2.2 三维地震超前地质探测

三维地震法的基本原理在于当地震波遇到声学阻抗差异界面时,一部分信号被反射回来,一部分信号透射进入前方介质。当地震波从软岩传播到硬质围岩时,回波的偏转极性和波源是一致的;当岩体内部有破碎带时,回波的极性会反转。反射体的尺寸越大,声学阻抗差别越大,回波就越明显。通过地震波反射分析,可判别隧道工作面前方地质体的性质(如软弱带、破碎带、断层、含水等)、位置

及规模。

采用三维地震法对隧道掌子面前方 100 m 范围地质情况进行超前探测,其典型探测结果如图 6 所示。通过对地层地震波反射成像结果的分析,判别围岩破碎情况,以及节理发育带的分布位置,为 TBM 施工提供指导。

目前,在激发极化法和三维地震法探测结果的指导下,双护盾 TBM 已完成了该区段断层破碎带的穿越施工,未发生卡机、坍塌等事故。

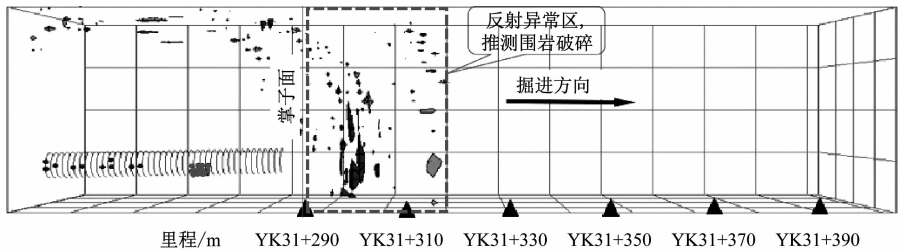


图 6 三维地震超前探测结果截图

5 双护盾 TBM 快速出渣技术

5.1 方案提出的工程背景

本工程区间正线上方不具备设置 TBM 工作井的条件,需利用 3 号区间风井作为 TBM 的吊装井。如图 7 所示,TBM 由 3 号风井吊装,利用暗挖风道平移至正线,然后向贵州路站方向掘进。

常规盾构、TBM 大多在正线上方设置工作井,由龙门吊提升出渣。本工程若利用区间竖井出渣,

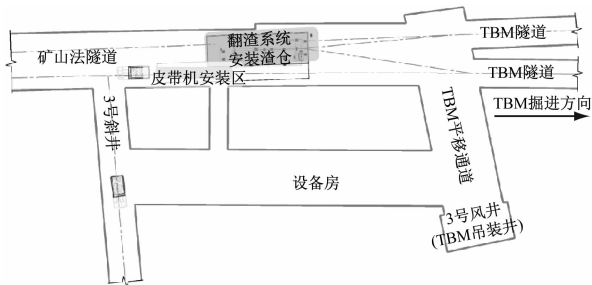
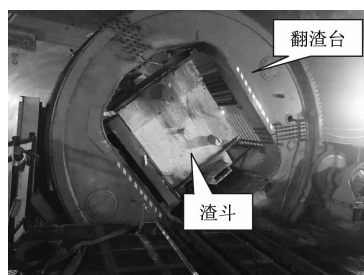


图 7 双护盾 TBM 始发端平面布置图

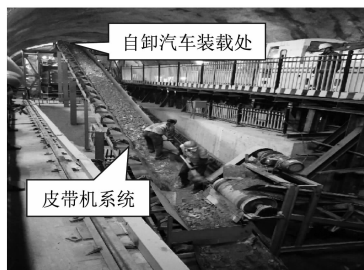
渣土斗需通过风道平移后再通过竖井垂直提升倒渣,工序繁琐、效率极低。另外,TBM 始发端的轨面埋深超过 50 m,垂直提升高度很大,因而需要采用其他方法出渣。

5.2 洞内翻渣技术

TBM 出渣效率是影响 TBM 掘进工效的主要因素之一。为提高本工程双护盾 TBM 的掘进速度,研发并应用了 TBM 的洞内翻渣系统,如图 8 所示。



a) 翻渣台旋转翻渣



b) 皮带机倒渣

图8 TBM 洞内翻渣系统工作实景

根据洞内翻渣系统的安装需求,首先要对隧道底板进行局部扩挖,扩挖区域结构的深度、宽度、长度分别为 3.7 m、9.9 m、22.0 m;然后在扩挖区域内安装翻渣台和皮带机系统。TBM 单循环掘进完成后,电瓶车将渣斗牵引至翻渣台,并通过翻渣台倾倒渣土至渣仓;皮带机将渣仓内渣土传输至自卸汽车,最后通过施工斜井将渣土运输至洞外。洞内翻渣期间,可利用 3 号风井同步进行管片、豆砾石、注浆材料的装载。

根据青岛地铁 2 号线的施工经验^[10],单节渣车垂直提升出渣的平均时间约为 15 min;每 4 节渣车为一个工作循环,则一个工作循环内垂直提升出渣时间约为 60 min。本工程渣车需先平移再由竖井垂直提升,出渣耗时更长,一个工作循环的出渣时长约为 80 min。而采用洞内翻渣系统后,完成一个工作循环的出渣时间约为 35 min,施工效率提升 1 倍。

6 结语

1) 双护盾 TBM 基本能够适应青岛地区土体的地质特征,与单护盾 TBM、敞开式 TBM 相比,双护盾 TBM 的技术优势较明显。

2) 双护盾 TBM 用于岩石地层隧道施工时,因管片与地层的间隙大,地层对管片的环箍作用差。通过采用豆砾石、水泥浆等复合材料,以及环箍分段注浆工艺成套技术,能够较好地控制管片成型质量。

3) 不良地质体长期以来限制了 TBM 的推广应用。特别对于滨海大埋深、富水地层等地质情况,注浆加固效果难以保障,隧道突发涌水、卡机等施工事故的概率与危害程度更大。本文提出采用地面精细化控制注浆和超前地质预报等辅助措施,有效地保障了滨海地区 TBM 穿越构造破碎带时的施工安全。

4) TBM 出渣效率严重制约其工效的发挥。本工程创新性地提出了 TBM 洞内翻渣技术,其工效较常规出渣方案提高 1 倍。这是洞内翻渣技术系统在城市轨道交通领域首次使用,为复杂地质条件下 TBM 的高效施工提供了新思路,具有良好的推广价值。

参考文献

- [1] 张伟峰. 调水总干渠引水隧洞复杂地质条件下 TBM 卡机分析及脱困技术研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018(6):160.
- [2] 徐虎城. 断层破碎带敞开式 TBM 卡机处理与脱困技术探析[J]. 隧道建设, 2018(增刊 1):156.
- [3] 苏珊. 新疆某隧洞开挖 TBM 卡机原因及脱困处理措施[J]. 水利水电技术, 2018(2):77.
- [4] 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(3):42.
- [5] 罗勇. 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(2):525.
- [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(增刊 1):212.
- [7] 唐志强. 双护盾 TBM 在城市轨道交通中应用的关键技术[J]. 铁道标准设计, 2016(11):81.
- [8] 王俊. 复合式 TBM 在重庆地铁实践中的关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2011(6):88.
- [9] 郭志. 青岛地铁隧道双护盾 TBM 适应性设计及应用[J]. 隧道建设, 2018(1):135.
- [10] 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(8):1004.

(收稿日期:2019-07-29)