

近海复杂地层下城市轨道交通 TBM 选型优化与掘进参数控制^{*}

时 健¹ 刘卫景² 张仕林^{1,2} 李锁在³ 孔德森¹

(1. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 266590, 青岛; 2. 青岛地铁集团有限公司, 266045, 青岛;
3. 中铁三局集团第四工程有限公司, 102300, 北京)

摘 要 [目的] 为提高 TBM(隧道掘进机)的地层适应性, 解决青岛地铁 2 号线(以下简称“2 号线”)西延段近海复杂地层下 TBM 选型的难题, 需对 TBM 选型进行优化, 并对其掘进参数进行控制。[方法] 通过地质条件适应性、施工灵活度及掘进效率等方面, 对适宜硬岩掘进的 TBM 类型进行了综合比选。针对 2 号线 TBM 掘进区间存在的穿越断裂破碎带、始发空间不足、小曲率半径施工及不具备吊出条件等工程难点, 对 TBM 进行了优化设计。确定了不同等级围岩下双护盾 TBM 的推力、扭矩、刀盘转速及净掘进速率等参数的取值范围。[结果及结论] 经综合比选, 2 号线西延段近海复杂地层选用 DSUC 型双护盾 TBM 施工。该型 TBM 具有良好的地层适应性, 支护方式灵活多样, 通过优化刀盘、盾体及后配套台车设计, 改进始发、拆解、小曲率半径施工方案, 完善超前加固及导向系统, 使 TBM 应用更加经济合理。双护盾 TBM 在中硬岩层中掘进时, 可适当增加推力和扭矩, 以提高净掘进速率; 而通过断层破碎带时应严格控制掘进参数, 以减少对掌子面的扰动。

关键词 城市轨道交通; TBM(隧道掘进机)选型; 掘进参数; 近海复杂地层

中图分类号 U455.44:U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.008

TBM Selection Optimization and Tunneling Parameter Control in Complex Offshore Strata for Urban Rail Transit

SHI Jian¹, LIU Weijing², ZHANG Shilin^{1,2}, LI Suozai³, KONG Desen¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture of Shandong University of Science and Technology, 266590, Qingdao, China; 2. Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266045, Qingdao, China; 3. The Fourth Engineering Co., Ltd., China Railway No. 3 Engineering Group Co., Ltd., 102300, Beijing, China)

Abstract [Objective] In order to improve the formation a-

daptability of the tunnel boring machine (shorten as TBM) and solve the problem of TBM selection for the west extension section of Qingdao Metro Line 2 (hereinafter referred to as Line 2) in the complex formation offshore, it is necessary to optimize TBM selection and control tunneling parameters. [Method] From the aspects of geological condition adaptability, construction flexibility and excavation efficiency, the TBM types are comprehensively compared and the one suitable for hard rock excavation is selected. In view of the engineering difficulties in the TBM tunneling section of Line 2, such as crossing fracture zone, insufficient starting space, small curvature radius construction and lack of lifting conditions, the TBM is optimized. The range of parameter values including thrust, torque, cutter speed and net tunneling rate of double-shield TBM under different grades of wall rock are determined. [Result & Conclusion] After comprehensive comparison, DSUC type double shield TBM is selected for the construction of Line 2 west extension section in complex offshore strata. This type of TBM has good formation adaptability and flexible support methods. By optimizing cutter head, shield body and back-up train design, improving the starting, disassembling and small curvature radius construction scheme, and improving the advance reinforcement and guidance system, TBM application becomes more economical and reasonable. When the TBM advances in the medium hard rock formation, the thrust and torque can be properly improved to increase the net tunneling rate. The tunneling parameters should be strictly controlled to reduce the disturbance to the palm surface when the TBM passes through fault fracture zone.

Key words urban rail transit; TBM selection; tunneling parameter; complex offshore strata

随着机械制造技术的进步和隧道行业的发展, TBM(隧道掘进机)被广泛应用于深埋长大隧道的

^{*} 中铁三局集团有限公司科研项目(K20-重大-01)

建设中^[1]。与传统的钻爆法相比,TBM 施工具有快速、高效、安全、环保、经济、信息化程度高等诸多优势,是国内外隧道工程施工的主要选择^[2]。

针对 TBM 选型,国内外学者展开了大量的研究讨论。文献[3]从地质影响因素等方面对大伙房输水工程隧洞施工装备进行了选型研究;文献[4]综合川藏铁路隧道地质条件,兼顾施工、安全、质量和工期的要求给出了 TBM 选型建议。但若 TBM 选型设计不能适应工程的地质特征,则往往会导致严重的施工风险和施工进度滞后,甚至造成重大经济损失。文献[5]认为复杂的地质构造、水文地质条件和 TBM 的选型是造成工期长时间延误的主要原因。文献[6]提出 TBM 所具有的在复杂地质条件适应性较差的缺点会抵消其施工速度快的优势,从而延误工期。以上研究主要是针对山岭隧道的 TBM 选型分析,对城市轨道交通隧道中近海复杂地层条件下的设备选型及优化的研究较少,且针对近海复杂地层中双护盾 TBM 掘进参数设置范围的研究也鲜有报道。

综上所述,TBM 选型与优化是 TBM 法隧道施工的关键环节,对不同围岩条件下掘进参数控制的研究对 TBM 掘进性能的提升具有重要意义。本文依托青岛地铁 2 号线(以下简称“2 号线”)西延段,从地层适应性、技术先进性及工期要求等方面对 TBM 展开综合比选,在此基础上开展 TBM 针对性优化设计和掘进参数控制研究,以期为硬岩地层下城市轨道交通隧道的建设提供参考。

1 工程概况

2 号线西延段 TBM 区间标段包括 TBM 始发井,以及轮渡站—小港站、小港站—国际邮轮港站、国际邮轮港站—泰山路站等区间。区间隧道下穿诸多的交通干道,且下穿既有铁路、桥梁、民房等诸多建(构)筑物,沿线分布有大量给水、雨水、污水、供暖、通信、燃气、供电等地下管线。

根据勘察资料显示,场区穿越地段地层较多,由上到下依次有人工填土层、粗砾砂、粉质黏土、强风化上亚带、强风化下亚带、中等风化带及微风化带,部分地段穿插有煌斑岩岩脉,是典型的“上软下硬”地层。轮渡站—小港站区间的地层变化见图1。隧道洞身除国际邮轮站—泰山路站区间主要穿越中-微风化岩层外,其他区间隧道洞身主要位于微风化岩层中,局部地段受构造作用影响,揭露有砂土状碎裂岩及块状碎裂岩等构造岩;根据钻探揭露,受岩脉侵入及次生构造影响,局部微风化带岩体破碎,节理很发育,节理面矿物蚀变较明显,形成节理发育带。地下水整体较发育,除局部地段围岩破碎,易发生涌水和渗水现象,其他地段围岩含水率低,地层具有较好的自稳能力。

根据隧道岩体各项地质参数指标及周边环境情况,结合青岛地铁1号线(以下简称“1号线”)、2号线、青岛地铁4号线(以下简称“4号线”)工程隧道施工的成功经验,2号线西延段所有区间隧道均采用TBM破岩施工。

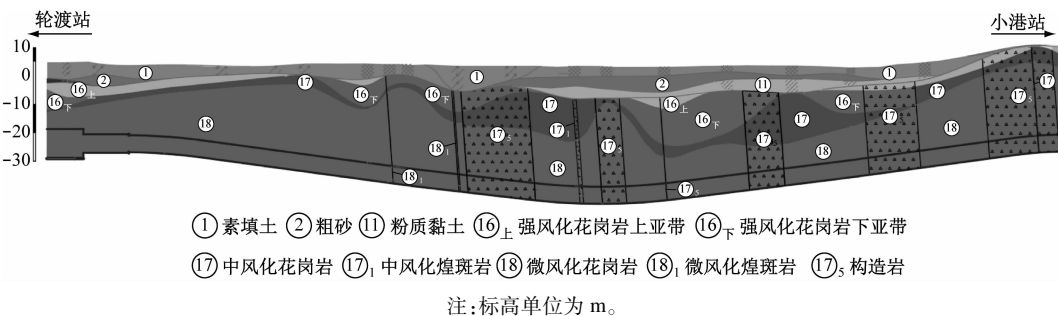


图 1 轮渡站—小港站区间地层变化图

Fig. 1 Stratigraphic variation of Ferry Station-Xiaogang Station section

2 近海复杂地层下 TBM 选型分析

2.1 TBM 地质适应性分析

地质适应性是 TBM 机型选择最重要的依据^[7]。表 1 从地质条件适应性、施工灵活度、掘进

效率等方面对适宜硬岩地层掘进的 3 种 TBM 进行综合比较。

2 号线西延段共有 9 条大小不等的断裂破碎带,节理裂隙发育密集,岩体呈碎块化碎裂状结构,强度低且自稳性差。根据敞开式 TBM 的工作原

表 1 TBM 类型比选

Tab.1 Comparison and selection of TBM types

类型	适应的围岩岩性	方向控制	埋深及地应力	地质描绘	施工风险	支护与衬砌	掘进速度
敞开式 TBM	自立性好的中硬岩	转向灵敏度高,方向易控制	埋深无要求,地应力大小无要求	能	不及时支护易塌方	临时支护为喷锚支护、超前钻及注浆,衬砌为钢筋混凝土衬砌	较快
单护盾 TBM	自立性好的软、硬岩	转向灵敏度低,方向难控制	地应力较小为好,过大盾体易被箍紧	不能	后盾较长,不及时支护易塌方,破碎带易卡机	掘进与管片拼装交替进行	较慢
双护盾 TBM	自立性好的软、硬岩	转向灵敏度低,方向难控制	地应力较小为好,过大盾体易被箍紧	不能	后盾较长,不及时支护易塌方,破碎带易卡机	掘进与管片拼装同步进行	快

理,当洞壁围岩强度低于 TBM 支撑靴作用在围岩上的应力时,围岩无法为 TBM 提供足够支撑,掘进无法正常进行;隧道下穿工厂、学校、高架桥梁、胶济铁路等诸多建筑物及交通干线,地面条件复杂,施工场地有限,而敞开式 TBM 机型长,在场地范围、施工组织方面均存在很大困难,故不适宜采用敞开式 TBM。

单护盾 TBM 掘进与管片拼装不能同时进行,施工速度较慢,不能满足 2 号线西延段对工期的要求;掘进区间主要为岩性较好的微风化花岗岩层,局部夹杂有单轴抗压强度极高的超硬岩层,鉴于单护盾 TBM 的工作原理,在超硬岩层中掘进,作用在管片上的支撑反力极大,对管片的强度要求极高,管片衬砌的成本将大幅提升,不利于其工业化生产,故不适宜采用单护盾 TBM。

在中硬岩为主且局部有断层破碎带的地层,双护盾 TBM 能充分发挥其优势。在某些特殊地段如断层破碎带,双护盾 TBM 能采用单护盾模式掘进,利用超前钻机和注浆设备加固地层;在稳定性较好的硬岩地层中,双护盾 TBM 强大的推力与扭矩储备配合管片储运拼装设备,可以实现掘进与管片拼装同步进行。双护盾 TBM 机头长约 12 m,方便在车站始发、过站、调头和吊出,对车站干扰较小,不影响工期。经综合比选,2 号线西延段采用适应性更强的双护盾 TBM 施工,隧道采取管片衬砌支护。

2.2 TBM 型号选择

根据青岛地铁现有成功经验,最终确定采用具有更强适应性的 DSUC 型双护盾 TBM^[8]。该机型开挖直径为 6 300 mm,变频驱动,最大扭矩为 2 940 kNm,脱困扭矩为 5 700 kNm,最大总推力为 24 150 kN,最大推进速度为 120 mm/min,配有超前钻机设备,对不良地质、施工场地、地面环境等方面适应性强,完全能够满足本工程的施工要求。DSUC 型双

- 护盾 TBM 的主机结构见图 2,其主要特点如下:
- 1) 具备双护盾和单护盾两种掘进模式,能够适应坚硬地层和软弱地层的掘进要求;
 - 2) 刀盘正面采用整钢加工成型,可有效避免传统刀盘大量焊接造成的结构应力不均,具有结构强度高、耐久性良好的优点,提高了刀盘的整体稳定性;
 - 3) 阶梯式的护盾设计方案,能够有效应对围岩的收敛变形,减少卡机对隧道掘进的影响;
 - 4) 具备灵活的隧道支护方式,可以适应不同地层的支护要求。

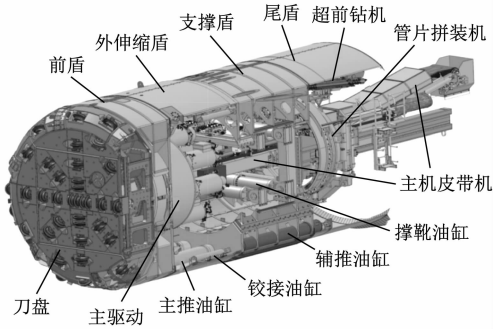


图 2 DSUC 型双护盾 TBM 主机结构

Fig.2 Host structure of DSUC double shield TBM

3 工程难点与 TBM 优化措施

3.1 工程难点分析

2 号线西延段位于市区内建筑密集区,地层条件多变,施工难度大,存在诸多技术难点。

3.1.1 穿越断裂破碎带

2 号线西延段区间穿越地段地层较多,局部地段岩体节理裂隙发育密集,呈砂土化散体状结构或碎块化碎裂状结构,黏结强度低,自稳性差,易发生坍塌和掉块。块状碎裂岩取样结果见图 3。构造破碎带及节理发育带往往是地下水富集的地带,洞身开挖过程中会有渗流乃至点、线状渗出的情况发生。



图3 块状碎裂岩取样结果

Fig.3 Samples of cataclastic rock

3.1.2 TBM 始发空间不足

TBM 始发井位于青岛市南区公交停车场以及临时道路范围内,围护结构上部钻孔灌注桩部分内净空长 31 m,宽 28 m;下部钢管桩部分内净空尺寸长 28 m,宽 25 m;基坑深度为 32.66 m,且深度方向采用 4 道混凝土支撑+混凝土腰梁。TBM 始发兼轨排井长 31 m,始发导洞小里程端长度为 28 m,大里程端长度为 77 m,拟采用的双护盾 TBM 设计长度为 165 m,始发空间无法满足 TBM 整体始发的要求。

3.1.3 小曲率半径施工

实际施工中,由于区间线路存在多处小半径区段等原因,TBM 推进方向可能会偏离设计轴线并超过管理警戒值。在稳定地层中掘进,地层提供的滚动阻力较小,可能会产生盾体滚动偏差;在线路变坡段掘进,也可能产生较大的偏差。TBM 掘进方向偏离设计轴线,对 TBM 姿态控制、管片拼装技术等均提出了更多挑战,一旦出现偏差,容易发生欠挖、超挖,以及管片开裂、偏移、错台等情况。

3.1.4 不具备吊出条件

根据工程周边环境及整体设计需求,小港站为暗挖车站,国际邮轮港站为放坡明挖车站,二者周边环境均不具备 TBM 吊出条件。区间终点泰山路站为既有车站,其站后折返线区间拱部距离 TBM 外轮廓 880 mm,周边环境无设置起吊机的空间条件,也不具备吊出条件。

3.2 TBM 优化措施

针对 2 号线西延段特殊的地质条件和施工环境,对 TBM 进行优化。

3.2.1 穿越断裂破碎带的 TBM 优化措施

采用前盾、伸缩盾、支撑盾、尾盾等直径前大后小的阶梯圆柱形护盾设计(见图 4),可以有效减轻因围岩收敛变形引起的卡盾现象。大驱动功率、大扭矩、大推力、大扩挖,以及超前钻探注浆加固的设计,在降低刀盘被困风险的同时,亦增强了其脱困

能力。

通过断层破碎带时,TBM 刀盘容易被破碎岩块卡住。通过设备上配置的超前钻机,对不良地质进行超前加固处理。结合地面注浆加固以及掘进参数的控制,可以保证 TBM 的顺利通过,避免人工清理刀盘导致的长时间停机。



图4 阶梯圆柱形护盾

Fig.4 Stepped cylindrical shield

3.2.2 针对始发空间不足的 TBM 优化措施

针对始发空间不满足 TBM 整体始发要求,根据目前始发导洞长度,经与生产厂家多次沟通后决定临时改造 TBM,对后配套台车进行优化,将驾驶室、变压变频器、液压润滑系统等掘进所必需的動力、控制等系统布置在后配套系统前部,避免了分体始发带来的不必要的管线延伸。待 TBM 掘进长度满足整体始发要求后,将后配套系统拖出洞外改造,进行二次组装调试与始发。

3.2.3 针对小曲率半径施工的 TBM 优化措施

TBM 的姿态控制主要依赖导向系统。为满足 TBM 掘进区间多处小曲率半径施工的要求,对原导向系统做如下优化:① 导向系统采用在支撑盾加设激光发生器,在前盾加设激光靶,使前盾测量不需要通过视线通道,避免了曲线线路施工中 TBM 可能受到测量通道狭小的影响,大大降低了换站频率;② 导向系统采取了有效的减振措施,盾体姿态跳变误差应控制在 ± 10 mm 内,能够满足指导现场施工的要求;③ 导向系统采取了优化算法,加强了激光强度,因此导向系统能够有效提取因粉尘干扰遮挡的数据,增加了姿态显示响应频次,大大降低了粉尘对前盾姿态测量的干扰。双护盾 TBM 导向系统见图 5。

3.2.4 针对不具备吊出条件的 TBM 优化措施

TBM 掘进终点为泰山路折返线区间,为既有线路,周边建筑物密集,不具备设备拆解的空间和吊出的条件。为方便洞内拆解及运输,TBM 刀盘及盾体设计为分块结构,后配套台车为模块化设计,最大台车长度 ≤ 12.5 m。TBM 从轮渡站始发井始发,

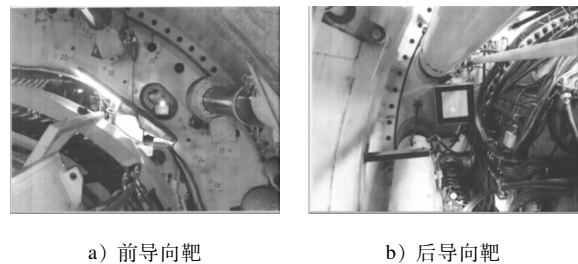


图5 双护盾TBM导向系统

掘进至区间终点时在洞内进行分解,分解后的组件由原线路返回至始发井吊出。

4 双护盾TBM掘进参数控制

统计轮渡站—小港站区间隧道区段的双护盾TBM现场掘进数据,绘制不同等级围岩下推力、扭矩、刀盘转速及净掘进速率的频次分布直方图,见图6。从图6可以看出:在中等强度岩层中掘进,岩体强度较高时,需保证一定的掘进速率,所需的推力和扭矩也更大。

双护盾TBM掘进参数随掘进距离变化见图7。由图7可见:掘进距离为0~170 m范围内,双护盾TBM在较低扭矩和推力下即可获得较高的净掘进速度,即岩体容易掘进,根据地勘报告,该段对应围岩以Ⅳ级为主;掘进距离为170~420 m范围内,双护盾TBM需较大的扭矩配合较高的推力才能保持

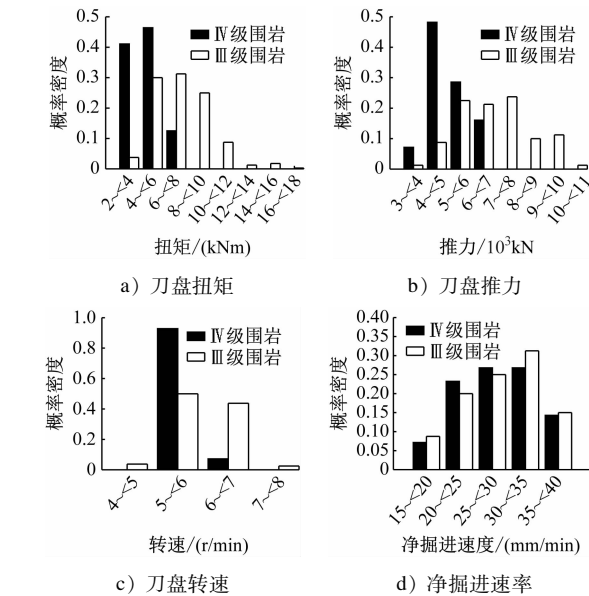


图6 轮渡站—小港站区间隧道区段双护盾TBM掘进参数频次分布直方图

Fig. 6 Histogram of tunneling parameters frequency distribution of double shield TBM in the tunnel section between Ferry Station-Xiaogang Station section

较高的净掘进速度,岩体强度较前段有所提升,该段对应围岩主要为Ⅲ级围岩;掘进距离为420~450 m范围是断层破碎带,双护盾TBM的扭矩、推力及刀盘转速均维持在较低水平,以降低对前方围岩的扰动,通过控制掘进参数维持掌子面稳定,可降低卡机的风险。

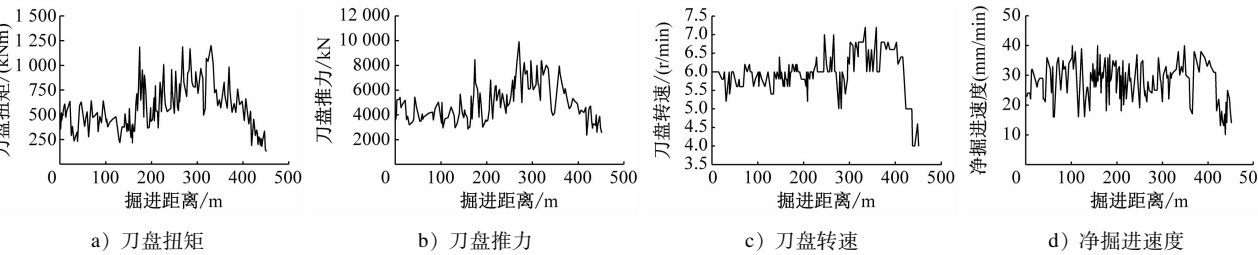


图7 双护盾TBM掘进参数随掘进距离变化图

Fig. 7 Graph of tunneling parameters variation with tunneling distance of double shield TBM

总体而言,双护盾TBM在中硬岩层中掘进时,可以通过提高刀盘推力和扭矩加快净掘进速度;而穿越断层破碎带时,应严格控制掘进参数,快速通过,尽量避免因停机造成机体被抱死的可能性。

经统计分析得到不同围岩等级下,双护盾TBM的扭矩、推力、掘进速度及刀盘转速等关键掘进参数的设置范围,见表2。

表2 双护盾TBM掘进参数设置范围

Tab. 2 Recommended range of tunneling parameters of double shield TBM

围岩级别	刀盘转速/(r/min)	推力/kN	扭矩/(kNm)	掘进速度/(mm/min)
Ⅲ	5~7	4 000~10 000	400~1 200	15~40
Ⅳ	5~7	3 000~7 000	200~800	15~40
破碎带	4~5	2 500~4 700	100~400	13~25

5 结语

1) 双护盾 TBM 具有地层适应性强、掘进与管片拼装同步等优点。针对本工程的地质条件特点,结合同类工程成功的施工经验,选择 DSUC 型双护盾 TBM。

2) DSUC 型双护盾 TBM 具有良好的地层适应性,支护方式灵活多样,通过优化刀盘、盾体及后配套台车设计,改进始发、拆解、小曲率半径施工方案,完善超前加固及导向系统,使双护盾 TBM 应用更加经济合理。

3) 双护盾 TBM 掘进过程中,应加强在不同围岩条件下对刀盘转速、推力、扭矩及净掘进速度等掘进参数的控制,有效提高双护盾 TBM 的利用率,发挥双护盾 TBM 高效、快速及经济的优势。

参考文献

- [1] 钱七虎,李朝甫,傅德明.隧道掘进机在中国地下工程中应用现状及前景展望[J].地下空间,2002(1):1.
QIAN Qihu, LI Chaofu, FU Deming. The present and prospect of application of tunneler in China's underground engineering[J]. Underground Space, 2002(1):1.
- [2] 王江卡,谭顺辉,陈馈.岩石掘进机(TBM)施工关键技术[M].北京:中国铁道出版社,2019:35-81.
WANG Jiangka, TAN Shunhui, CHEN Kui. Key technologies in tunnelling by hard-rock type tunnel boring machine[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019:35-81.
- [3] 张军伟,梅志荣,高菊茹,等.大伙房输水工程特长隧洞 TBM 选型及施工关键技术研究[J].现代隧道技术,2010,47(5):1.
ZHANG Junwei, MEI Zhirong, GAO Juru, et al. Study on TBM type-selection and key technologies in Dahuofang water diversion tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(5):1.
- [4] 周路军,汤印,卓彬,等.川藏铁路隧道 TBM 选型及改进研究[J].铁道标准设计,2021,65(4):117.
ZHOU Lujun, TANG Yin, ZHUO Bin, et al. Research on TBM type selection and improvement for Sichuan-Tibet railway tunnel

project[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(4):117.

- [5] APAYDIN A. Comparison of predicted and actual states in tunnels; lessons to be learned from the Gerede Water Transmission Tunnel, Turkey[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2021, 54(1):1.
- [6] 尚彦军,史永跃,孙元春,等.岩石隧道 TBM 选型失败实例与分析[C]//中国土木工程学会,中国岩石力学与工程学会,同济大学.第三届上海国际隧道工程研讨会文集.上海:同济大学出版社,2007:476.
SHANG Yanjun, SHI Yongyue, SUN Yuanchun, et al. Example and analysis of TBM selection failure in rock tunnel[C]//China Civil Engineering Society, Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering, Tongji University. Proceedings of the 3rd Shanghai International Tunnel Engineering Semina. Shanghai: Tongji University Press, 2007:476.
- [7] 刘泽,王勇,李小锋,等.海域复杂地质双模式 TBM 设备选型与应用关键技术[J].隧道建设(中英文),2020,40(6):868.
LIU Ze, WANG Yong, LI Xiaofeng, et al. Key technologies for type selection and application of double-mode TBM in complex geology of sea area[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(6):868.
- [8] 唐志强.青岛地铁采用 TBM 施工的可行性研究[C]//中国土木工程学会.2014 中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十八届年会论文集.杭州:中国土木工程学会,2014:406.
TANG Zhiqiang. Feasibility study on adopting TBM in Qingdao metro construction[C]//China Civil Engineering Society. 2014 China Tunnel and Underground Engineering Conference (CTUC) and China Civil Engineering Society Tunnel and Underground Engineering Branch, Proceedings of the 18th Annual Conference. Hangzhou: China Civil Engineering Society, 2014:406.

· 收稿日期:2021-09-07 修回日期:2021-12-20 出版日期:2024-03-10

Received:2021-09-07 Revised:2021-12-20 Published:2024-03-10

· 第一作者:时健,博士研究生,924532404@qq.com

通信作者:孔德森,教授,dkong828@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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821