

海底地铁隧道盾构机关键部位选型成败因素研究^{*}

吴玉礼

(中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 211899, 南京//高级工程师)

摘要 为提高盾构施工效率,应合理进行盾构机关键部位的选型。以厦门首条穿海地铁隧道顺利贯通的实例,对盾构机穿越软土、上软下硬、孤石及断裂带等复杂地层的选型进行了全面解析,并结合实际应用效果进行了试验和改进。结果表明:盾构机在海底复杂地层掘进时可通过配置刀盘伸缩摆动功能,采用新型中心双刃滚刀、双独立人闸设计,优化刮刀保护块为类方锥形,增加搅拌棒数量,选用加厚和经过耐磨处理的泥浆管,优化出浆管液压球阀前手动闸板阀为液压驱动,专门设置一台泥水舱底部冲刷泥浆泵,提高碎石机耐磨性等一系列措施,来适应海底复杂地层的掘进。

关键词 地铁;海底隧道;泥水平衡盾构机;关键部位选型
中图分类号 U455.43;U459.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.034

Shield Machine Key Parts Selection Factors for the Success Failure of Undersea Metro Tunnel Construction

WU Yuli

Abstract To improve shield construction efficiency, shield machine key parts should be reasonably selected. Taking the practical case of the successful construction of the first undersea metro tunnel in Xiamen, comprehensive analysis is carried out on the selection of shield machine while passing through soft soil, upper soft and lower hard, boulder, fracture zone and other complex strata. Tests and improvement are conducted considering the actual application outcomes. Results show that: shield machine should be equipped with cutterhead telescoping and swing function for seabed complex strata excavation. New center hob design and double independent man gate design should be adopted, scraper protection block should be optimized in square-cone-like shape. The number of stir sticks should be increased, the thickened mud pipe with wear-resistant treatment be adopted. The manual gate valve before the hydraulic ball valve of the slurry pipe should be optimized to hydraulically driven. A mud tank bottom scour mud pump should be specially set up, and the wear resistance of the gravel crush-

er should be improved. Thus the machine can be adaptive to seabed complex strata excavation.

Key words metro; undersea tunnel; slurry balance shield machine; key parts selection

Author's address China Railway 14th Bureau Group Shield Engineering Co., Ltd., 211899, Nanjing, China

海底地铁隧道作为世界范围内较少建造的隧道类型,其盾构施工的难度极大^[1]。在采用盾构法的隧道施工中,认清不同类型盾构机在不同地区的规律性和差异性极为重要^[2-3]。此外,盾构机在软土地层和岩石地层的刀具切削原理和配置形式不同^[4]。已有的研究主要侧重于分析盾构对地层的适应性^[5],但对盾构设备的全面性考虑较为欠缺^[6]。在实际施工过程中,盾构设备与项目的匹配性直接决定了工程实施难易程度^[7]。工程地质与盾构机相匹配的适应性极为重要,而盾构机选型是复杂地层条件下地铁隧道施工的一项重要风险因素^[8-12]。本文以厦门地铁2号线穿海段(厦门首条海底地铁隧道)为例,分析了盾构机关键部位与地层的适应性关系,并阐述了盾构机关键部位的改进方向,为厦门地区后续类似工程提供参考。

1 厦门地铁2号线穿海段工程概况

1.1 区间线路概况

厦门地铁2号线穿海段区间自海沧大道站起,沿海沧大道向北,下穿海沧湾公园入海,穿越大兔屿,经厦门西港,到国际码头泊位上岸,然后下穿邮轮城,到达东渡路站。

该区间分为盾构法施工段和矿山法施工段。盾构法施工段采用2台 $\phi 7.043\text{ m}$ (开挖直径)的泥水平衡盾构机开挖,矿山法施工段盾构机空拼管片通过。左线盾构区间长为2 499.500 m,矿山段长度为268.724 m;右线盾构区间长度为2 480.216 m,

^{*} 中国铁建股份有限公司资助项目(15-C13)

矿山段长度为 255.870 m。

1.2 地质状况

海沧侧为花岗岩地层,大兔屿至主航道为变质砂岩、泥岩地层,1#泊位码头前沿为变质石英砂岩地

层,东渡路站为凝灰熔岩、花岗岩地层。该隧道区间分布有 F8、F10 断裂及其支断裂 f1、f2、f3。厦门地铁 2 号线穿海段地质纵断面图如图 1 所示。

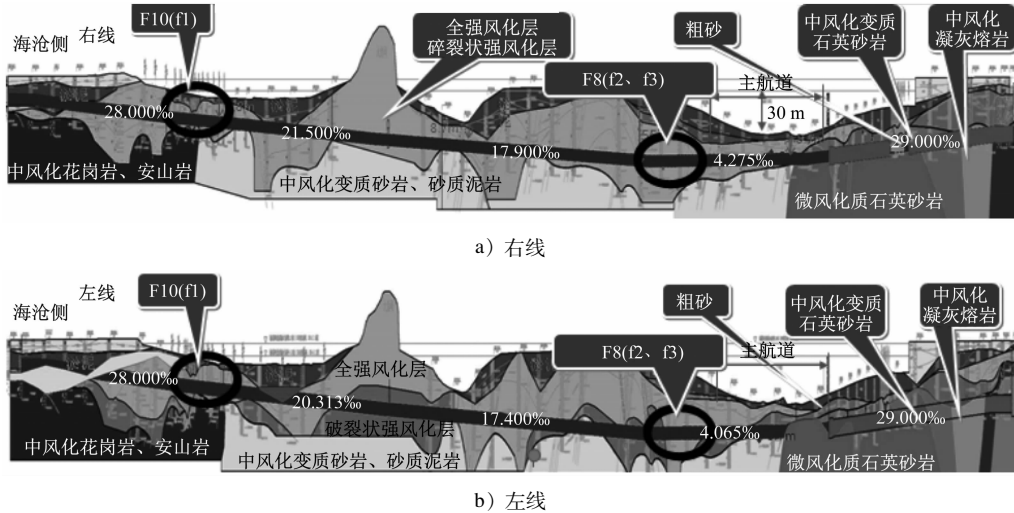


图 1 厦门地铁 2 号线穿海段地质纵断面示意图

Fig. 1 Geological profile diagram of Xiamen Metro Line 2 undersea section

2 盾构机关键部位选型成功之处

厦门地铁 2 号线海底隧采用泥水平衡盾构机。由于海底地质情况复杂多变,故对盾构机关键部位的选型至关重要。

2.1 配置刀盘伸缩摆动功能

2.1.1 刀盘伸缩摆动功能的优点

2.1.1.1 便于刀盘、刀具的更换和维护

换刀时,由于新刀与旧刀存在高差,以往经常出现新刀被开挖面顶住,无法安装到位的问题,需对刀刀位置开挖面进行凿除,才能装入。

刀盘伸缩功能可将刀盘伸出后再缩回,行程可达 40 cm,缩回后在刀盘前方与开挖面之间形成空档。该空档可有效抵消新旧刀具的高差,确保刀具能够安装到位;边缘刀具更换的难题由摆动功能解决,刀盘摆动后再固定点位实现超挖,超挖出的空间确保了边缘刀具的安装空间。从而避免了人工凿除的风险,大大提高了换刀效率。

2.1.1.2 可实现全断面硬岩超挖(此为 300 m 的小半径曲线超挖模式掘进)

该穿海区间隧道是半径为 300 m 的曲线段,其位于全断面硬岩段。在硬岩中盾构机姿态调整困难,且容易卡主盾壳。盾构机在刚进入小曲线半径时最大偏差一度达到了 300 mm 左右,之后通过采用刀盘摆动模式定向超挖,逐渐纠正至原曲线。

2.1.1.3 帮助刀盘脱困

本工程施工过程中,多次突遇孤石而使刀盘被卡,在无法正常转动的情况,通过多次刀盘伸缩功能,在多数情况下可恢复正常转动。

2.1.1.4 便于观测刀盘受力情况

盾构机在硬岩掘进时,每把滚刀能承受的最大推力是一定的,如 17 in(43.18 cm)滚刀能承受的最大推力为 $F_{\text{滚刀}} = 250 \text{ kN}$,19 in(48.26 cm)滚刀能承受的最大推力为 $F_{\text{滚刀}} = 350 \text{ kN}$,根据滚刀刀刃数 n 可计算出刀盘能够承受的最大推力 $F_{\text{刀盘}}$ 。

$$F_{\text{刀盘}} = nF_{\text{滚刀}} \quad (1)$$

盾构机在掘进时,通过刀盘伸缩摆动功能可直接读取刀盘受到的总挤压力 $F_{\text{总}}$,如图 2 所示。

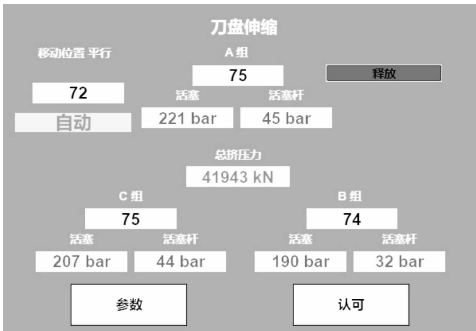


图 2 刀盘伸缩摆动功能界面截图

Fig. 2 Screenshot of cutterhead telescoping and swing functional interface

可通过公式(2)计算出在某一泥水压力 $F_{\text{泥水}}$ 下的 $F_{\text{总}}$ 的最大值,从而控制 $F_{\text{刀盘}}$ 不超限。在 $F_{\text{刀盘}}$ 不超限时,滚刀可正常工作,以便于保护刀盘、刀具因受力过大而造成异常和损坏。

$$F_{\text{总}} = F_{\text{刀盘}} + F_{\text{泥水}} \quad (2)$$

$$F_{\text{泥水}} = PS \quad (3)$$

式中:

P ——开挖舱中轴线压力;

S ——主驱动面积。

通过观察刀盘受的总挤压力,结合盾构机掘进速度、油缸推力、主驱动扭矩等其他掘进参数,还可判断地层变化、开挖面软硬、是否结泥饼、是否有刀具损坏等情况。

2.1.2 刀盘伸缩摆动的注意事项

1) 在掘进硬岩地层需使用伸缩摆动刀盘时,建议手动操作,不能采用自动伸缩模式。自动伸缩模式下,刀盘总挤压力难以控制,一旦过大易损坏刀具。手动模式可将刀盘挤压力控制在刀具受力范围内。

2) 正常掘进时,刀盘应伸出 5 ~ 10 cm。一旦意外情况出现时,刀盘有活动的空间,但也不宜伸出过长,伸出之后切口环空变大,对切口土体稳定不利,且有被卡风险。

3) 需要伸缩行程较长时,应安排专人到盾体内观察伸缩区域电缆及管路的情况,以防止扯坏其他设备管线。

2.1.3 存在的问题

1) 采用定点超挖模式掘进易出现卡盾壳的现象:定点摆动超挖模式把该位置超挖了,但是相反的那侧却欠挖了一些,如图 3 所示。掘进一段距离后,盾构机外壳易被周边岩石卡住。根据以上分析可采用将滚刀刀具垫高的形式,确保开挖面的尺寸足够不会卡住盾壳,以实现盾构机摆动模式下的掘进,并进行姿态调整。

2) 实际应用过程中,出现了盾构机掘进时 38# 边缘滚刀连续掉落的情况:由于从正常掘进切换至摆动超挖模式时刀盘与开挖面也形成了一定的夹角,刀盘刀具轨迹随之改变,而这时就会出现局部少数刀具甚至单刀受力的情况,刀盘边缘起弧段即 38# 滚刀位置先接触原开挖面,导致 38# 滚刀受力过

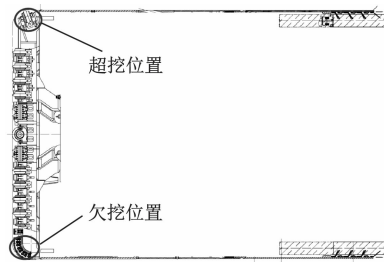


图3 刀盘摆动后超挖位置和欠挖位置

Fig. 3 Overcut position and undercut position after cutterhead swings

大而掉落。可通过先多伸出一段刀盘,再缩回 5 cm,使刀盘前面与开挖面有 5 cm 的空间后再进行摆动超挖操作。在摆动超挖操作时要从小到大逐级增大。

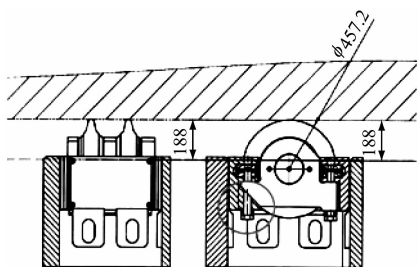
2.2 中心双刃滚刀的创新设计

针对以往使用的硬岩刀盘中心双刃滚刀螺栓固定形式,在受力后螺栓易变形且拆解困难的问题,在盾构机设计联络会上提出了改进中心双刃滚刀的安装与拆除形式,以便安全快捷地更换中心双刃滚刀。最终确定了如下设计:

1) 新型中心双刃滚刀刀座采用类似硬岩 TBM (隧道掘进机) 刀盘中心双刃滚刀刀箱的结构设计形式,刀箱材料相对普通中心双刃滚刀刀箱材料具有更高的屈服强度,达到在使用过程中具有更好的耐冲击性能,同时使用该刀箱时刀盘中心区域有较大的开口。在同样地质条件情况下盾构机掘进时,就更有利于渣土的流动从而降低刀盘中心区域结泥饼的风险。在本工程实际使用过程中穿越黏土、泥岩等地层时,基本未出现中心结泥饼现象。

2) 相对于普通中心双刃滚刀,该新型中心双刃滚刀安装锁具具有拆装方便的特点。普通中心双刃滚刀通过 6 颗螺栓将滚刀连接固定在刀箱钢结构内,刀盘推力通过 6 颗紧固螺栓传递至中心双刃滚刀,如图 4 所示。6 颗紧固螺栓在盾构机掘进全断面硬岩、孤石、断裂带等地层时,受冲击大,导致螺栓很难拆除。新型中心双刃滚刀刀体整体通过刀箱本身的钢结构进行支撑,压块通过螺栓紧固后从滚刀轴向固定整个滚刀,如图 5 所示。在盾构机掘进过程中,刀箱本身钢结构直接将推力作用于整个滚刀刀座,安装螺栓不受滚刀的直接拉力,避免了普通中心双刃滚刀安装螺栓拆解困难或被拉断的可能性。新型中心双刃滚刀拆解方便,通过如图 5

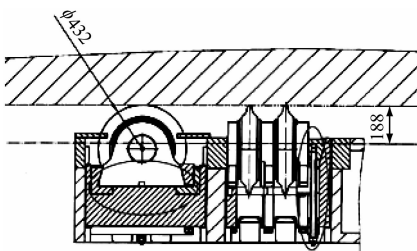
所示的压块将滚刀固定在刀箱内,在拆卸刀具时只需要将压块的螺栓松开并将压块取出,如图6所示。整个滚刀向压块一侧整体移动后便直接可以取出。采用新型中心双刃滚刀在整个盾构机掘进过程中,特别是在硬岩和孤石群掘进中,从未出现过难以拆除而需要动火割除的情况。盾构机在连续超过600 m的硬岩段掘进中,新型中心双刃滚刀仅出现过拉紧块松动的情况,只更换一次便通过了整个硬岩段。



尺寸单位:mm

图4 普通双刃滚刀螺栓紧固

Fig.4 Common double-edge hob bolted



尺寸单位:mm

图5 本项目新型中心双刃滚刀压块压紧形式图

Fig.5 Drawing of new center double-edge hob block pressing form adopted in this project

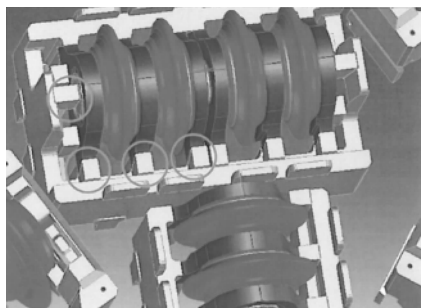


图6 新型中心双刃滚刀压块安装效果实景图

Fig.6 Actual scene of installation effect of new center double-edge hob block

2.3 双独立人闸设计

在盾构机关键部位选型时,考虑到要多次带压进舱,因此盾构机采用双独立人闸设计,如图7所示。

该设计当一个人闸进舱工作完成开始减压的操作后,另外一个人闸立刻可以进舱,使带压进舱效率提高一倍。根据进舱压力和加减压方案,在大于0.4 MPa的压力时,每天(24 h)可完成10~12舱进舱作业,大大缩短了进舱和开挖面暴露的时间,降低了风险,且加快了施工速度。

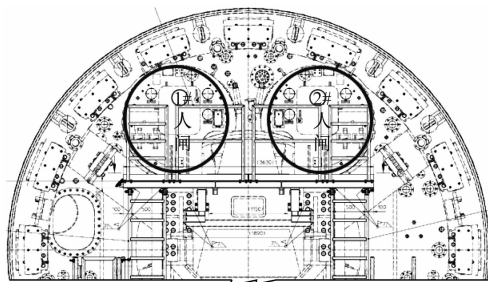


图7 盾构机双独立人闸示意图

Fig.7 Schematic diagram of shield machine double independent man gate

3 盾构机关键部位选型存在的问题及解决办法

3.1 刮刀掉落问题

本盾构机刀盘刮刀在选型时,考虑到可能被孤石撞击等情况,所以选用了6颗螺栓固定的250 mm大刮刀(一般是4颗螺栓160 mm刮刀),以加强抵抗岩石撞击的能力。但在硬岩、孤石群和断裂带等地层掘进时,本刀盘的刮刀和刮刀保护块大量掉落,且修复困难,给更换刮刀带来了极大的难度。

经分析该刮刀及刮刀保护块损坏掉落的原因是:刮刀保护块为长方体设计,保护块背部接触面积大,设计不合理,如图8所示。

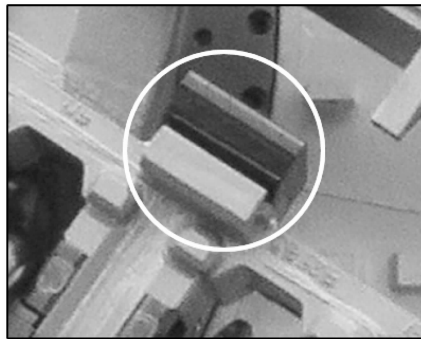


图8 刮刀保护块实景图

Fig.8 Actual scene of scraper protection block

根据厦门类似地层掘进经验,刮刀保护块采用

类方锥形设计为更优(如图 9 所示),掘进时很少会出现刮刀和刮刀保护块掉落的情况,刮刀刀座损坏的更少。该设计保护块的焊接面积大,类方锥形有很好的导渣作用,与长方体的保护块设计相比背部平面接触面积小,可有效降低大块石头对刀座的冲击力。

3.2 刀盘主动搅拌棒数量太少问题

本盾构机刀盘背部主动搅拌棒数量设计为 2 根。在过孤石群和硬岩段时,该搅拌棒均有不同程度损坏,严重的从根部撕裂变形或直接从中间断掉。导致盾构机在正常掘进时,搅拌棒搅不到开挖舱底部渣土,容易发生堆积,从而导致前闸门堵塞、循环不畅。

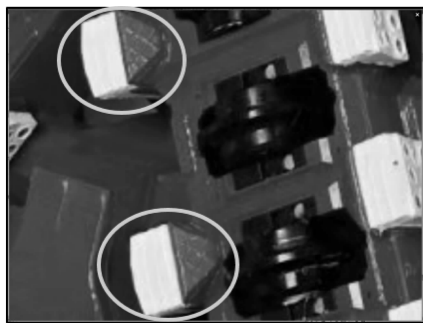


图 9 类方锥形刮刀保护块

Fig. 9 Square-cone-like scraper protection block

建议采取以下解决措施:

1) 搅拌棒增加 2 根,即设计 4 根搅拌棒,可使搅拌频率增加一倍,以减小渣土、石块等在开挖舱底部堆积的可能。即使在过孤石群等极端地质时损坏 1~2 根搅拌棒,其他搅拌棒还能满足主动搅拌的需求。

2) 可在不同半径位置增加几个主动搅拌棒,这些不同轨迹的搅拌棒可有效降低黏土和泥岩等土层在舱内堆积、结泥饼的可能性。

3.3 滚刀的安装与拆卸问题

本盾构机单刃滚刀采用斜块拉紧的形式,斜块从开挖面侧卡入,在刀轴与刀箱之间拉紧。由于斜块在开挖面侧,在刀具磨损严重、偏磨等情况时斜块也同样受力过大或有轻微磨损时滚刀都很难拆除,大部分需要动火切割作业处理,故风险很大。此问题有待今后研究解决。

3.4 泥浆管路(包括隧道内管路选取)问题

1) 盾构机上泥浆管路:本项目 2 台盾构机上所

有出浆泥浆管路弯头部位多次发生磨穿漏浆。反复拆装包焊耽误了大量时间,而且在掘进时突然漏浆的风险很大。出浆管直管磨损严重,多处磨损后厚度仅剩余 3~5 mm,通过旋转管路才勉强完成本工程施工。建议采用如下措施:①有长距离穿越岩层的盾构机泥浆管出浆管路要全部做加厚和耐磨处理;②盾构上所有泥浆管弯头位置在工厂制造阶段进行包焊处理。

2) 隧道内泥浆管路:本工程隧道内泥浆管路采用 12 mm 厚螺纹焊管,在掘进 2 000 m 后(硬岩段 300 m 左右),隧道内从洞口位置开始泥浆管路出现大批量漏浆情况,更换和旋转泥浆管路浪费了大量时间。建议采用如下措施:①盾构机长距离穿越岩石地层时隧道内应选择更厚的泥浆管路或选择无缝钢管;②在测量泥浆管路底部磨损量仅剩余 5 mm 时应提前进行管路旋转处理;③对所有弯头位置提前做包焊处理。

3.5 泥水舱出渣口堵塞问题

本项目掘进过程中多次出现出渣口格栅位置堵塞的情况,造成盾构机上出浆泵 P2.1 吸口、泥水舱液位无法控制等情况。

建议采取如下措施:在盾构机上专门设置一台泥水舱底部冲刷泥浆泵 P0.2,对泥水舱底部进浆管进行加压,冲洗出渣口格栅。这样就能够明显减少泥水舱出渣口堵塞而无法正常环流的情况。

3.6 出浆管 V32 更换问题

本项目盾构机的泥浆管道及球阀磨损严重,多次更换出浆管上 V32 液压球阀,其位置如图 10 所示。

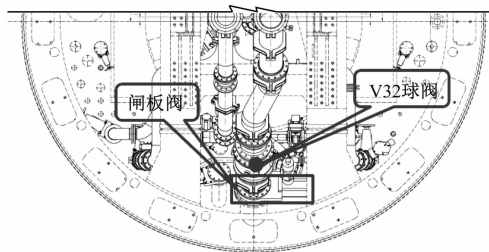


图 10 V32 球阀及闸板阀位置

Fig. 10 V32 ball valve and gate valve position

由于 V32 球阀直接与泥水舱相连,因此在更换时必须将 V32 前部的手动闸板阀关闭,但由于空间狭小且该位置容易有渣土堆积,人工关闭非常困难,往往多次关闭都无法到位。若闸板阀无法关闭

到位而在开挖面不稳定的情况下,只能通过带压进舱关闭前闸门后,才能更换 V32 液压球阀,其风险高、难度大。

建议采取如下措施:将 V32 球阀前的手动闸板阀改为液压闸板阀,通过液压动力代替人工则更容易实现关闭,大大降低了更换风险。

3.7 碎石机油缸漏油问题

本项目掘进至 2 100 m 左右时,碎石机油缸与颚齿焊缝位置出现漏油。

建议该位置出厂时应进行探伤试验,并在该位置外表面加一层耐磨焊。

4 结语

本文结合厦门首条穿海地铁隧道顺利贯通的实例,对盾构机穿越软土、上软下硬、孤石及断裂带等复杂地层的盾构机关键部位的选型进行了全面解析,列举了存在的问题并提出了可行的改进措施。

通过本工程盾构机关键部位的选型及应用效果的实例分析得出,盾构机配置刀盘伸缩摆动功能,采用新型中心滚刀设计,并对人闸、刮刀、泥浆管、泥水舱底部冲刷、出浆管闸阀和碎石机等重要部件进行改进,可适应海底复杂地层的掘进需求。

参考文献

- [1] 刘继国,郭小红.超大直径海底隧道盾构选型研究[J].现代隧道技术,2009(1):51.
- LIU Jiguo, GUO Xiaohong. Study on the selection of super-large-diameter shield for an undersea tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2009(1):51.
- [2] HUANG Xinniao, ZHANG Junwei, LI Xue, et al. Shield type selection for urban metro and regionalization study of key arame-
ters[J]. Tunnel Construction, 2019,39(7):1209.
- [3] 贾瑞华,谷海华,叶亦盛,等.大东湖深隧长距离大埋深复杂地层盾构选型研究[J].施工技术,2020(19):67.
- JIA Ruihua, GU Haihua, YE Yisheng, et al. Study on shield selection of east lake deep tunnel in long distance, deep and complex stratum[J]. Construction Technology, 2020(19):67.
- [4] CHEN J. Study of cutterhead and cutting tool selection and cutting tool replacement of large-diameter shield under atmospheric condition[J]. Tunnel Construction, 2018,38(1):110.
- [5] 田四明,赵勇,王丽庆,等.大直径铁路盾构隧道设计及选型技术研究[J].现代隧道技术,2019(2):1.

TIAN Siming, ZHAO Yong, WANG Liqing, et al. Study on design and selection techniques for large-diameter shield railway tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019(2):1.

- [6] 王佳宁.盾构长距离穿越无水砂卵石地层对刀盘选型及改造的思考[C]//《智慧城市与轨道交通》2015 年中国城市科学研究会数字城市专业委员会轨道交通学组年会论文集.沈阳:中国城市科学研究会数字城市专业委员会轨道交通学组,2015:241.
- WANG Jianing. Thoughts on cutter head selection and reconstruction for shield tunneling through anhydrous pebble formation [C]// Smart City and Rail Transit, Proceedings of 2015 Annual Meeting of Rail Transit Group, Digital City Professional Committee, Chinese Society for Urban Sciences. Shenyang: Rail Transit Group, Digital City Professional Committee, Chinese Society for Urban Sciences, 2015:241.
- [7] 蒋超.佛莞城际铁路狮子洋隧道盾构选型研究[J].施工技术,2016(23):67.
- JIANG Chao. Shield selection of Foshan-Dongguan intercity railway Shiziyang Tunnel[J]. Construction Technology, 2016(23):67.
- [8] 李俊伟,李丽琴,吕培印.复合地层条件下盾构选型的风险分析[J].地下空间与工程学报,2007(增刊1):1241.
- LI Junwei, LI Liqin, LYU Peiyin. Risk analysis on shield type selection at compound stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(S1):1241.
- [9] 杨大伟.济南地铁盾构选型要点[J].建筑机械,2017(11):76.
- YANG Dawei. Key points of shield selection in Jinan Metro[J]. Construction Machinery, 2017(11):76.
- [10] 李世佳,赵国旭,刘典基.厦门复合地层条件下的盾构机选型研究[J].铁道建筑,2015(12):70.
- LI Shijia, ZHAO Guoxu, LIU Dianji. Study on shield machine selection in Xiamen composite stratum[J]. Railway Engineering, 2015(12):70.
- [11] 郭彩霞,王梦恕,孔恒,等.无水大粒径砾漂石地层盾构选型研究[J].现代隧道技术,2014(4):13.
- GUO Caixia, WANG Mengshu, KONG Heng, et al. Selection of a shield for tunnelling in waterless strata with large-particle cobbles and boulders [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014(4):13.
- [12] 张帅坤.超大直径泥水平衡盾构设备选型及应用[J].铁道建筑技术,2017(10):93.
- ZHANG Shuaikun. Selection of super-large diameter slurry pressure balance shield machine and its application [J]. Railway Construction Technology, 2017(10):93.

(收稿日期:2022-06-23)