

DOI: 10.7672/sgjs2024150042

大直径泥水平衡盾构水下穿越破碎带地层关键施工技术*

张迎旭¹, 许斌斌²

(1. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511466; 2. 中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450000)

[摘要] 珠江口隧道施工时大直径泥水平衡盾构水下穿越破碎带地层, 施工风险较高、难度较大。针对泥水平衡盾构掘进过程中滞排、刀盘结泥饼、刀具磨损严重等问题, 分析原因并给出预控措施, 研究关键施工技术。盾构在水下断层破碎带地层掘进时须严格控制掘进参数, 特别是泥水仓压力, 并控制刀盘转速与贯入度。结合开挖面稳定情况、仓内排渣情况、流体输送状态, 及时调整泥浆参数。通过采用破碎、冲刷等装置, 避免仓内滞排风险。通过配置刀具状态智能化实时监测系统, 及时更换出现异常的刀具。须设置合理的盾尾密封装置, 保证盾构密封性能满足要求。

[关键词] 隧道; 盾构; 掘进; 破碎带; 刀盘; 施工技术

[中图分类号] U45

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)15-0042-05

Key Construction Technology of Large-diameter Slurry Balance Shield Underwater Crossing Fractured Zone Stratum

ZHANG Yingxu¹, XU Binbin²

(1. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511466, China;

2. China Railway Tunnel Stock Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: During the construction of the Pearl River Estuary Tunnel, the large-diameter slurry balance shield crosses through the fractured zone under water, and the construction risk is high and difficult. In view of the problems of stagnation, mud cake and serious tool wear in the process of slurry balance shield tunnelling, this paper analyzes the causes and gives the pre-control measures to study the key construction technology. When the shield tunnelling in the stratum of underwater fault fracture zone, it is necessary to strictly control the tunnelling parameters, especially the pressure of mud sump, and control the rotation speed and penetration of cutterhead. Combined with the stability of the excavation surface, the slag discharge in the warehouse and the fluid transport state, the mud parameters are adjusted in time. By using crushing, scouring and other devices, the risk of stagnation in the warehouse is avoided. By configuring the intelligent real-time monitoring system of tool condition, the abnormal tool can be replaced in time. A reasonable shield tail sealing device should be set to ensure that the shield sealing performance meets the requirements.

Keywords: tunnels; shields; tunnelling; fracture zone; cutterhead; construction

0 引言

随着我国交通基础设施建设的快速发展, 常穿江越洋修建水下隧道, 盾构法因具有对周边环境影

穿江越洋隧道工程的增多, 施工环境越来越复杂, 应对的水压越来越大, 不可避免地遇到穿越断层破碎带、高水压等情况, 易产生掌子面坍塌、突涌水等事故。因此, 有必要对大直径泥水平衡盾构安全穿越长距离破碎带段进行研究。

1 工程概况

深江铁路是“八纵八横”高铁主通道沿海通道的重要组成部分, 也是支撑粤港澳大湾区建设的重大交通基础设施, 正线全长 116.12km, 途经深圳、广

* 国家自然科学基金(52078430)

[作者简介] 张迎旭, 高级工程师, E-mail: 42157380@qq.com

[收稿日期] 2024-04-12

州、东莞、中山、江门。

珠江口隧道下穿广州与东莞之间的珠江入海口,为深江铁路控制性工程,隧道全长 13.69km,为单洞双线隧道,两端采用盾构法施工,中间采用矿山法施工,其中南砂侧盾构隧道长 2 930m,采用 1 台开挖直径 13.32m 具备常压换刀功能的盾构施工,盾构总长 135m,总重约 3 150t,总功率约 7 400kW,最大掘进速度 50mm/min。

盾构段隧道主要掘进地层为淤泥层、砂层、全风化片岩层及强、弱、微风化花岗岩层,最大埋深 88.5m,隧道洞身范围岩石强度 50~70MPa,局部达到 157~202MPa。

盾构从万顷沙镇始发,隧道约 300m 位于陆地,其余全部位于珠江水域,盾构下穿太平水道、川鼻水道及龙穴南水道,海底高程-23.500~-0.500m,地形起伏较大。盾构隧道开挖范围内分布有北西向狮子洋断裂束及白坭—砂湾断裂,受其影响,隧址区基岩揭示有 1 组断裂破碎带及 2 条次生断裂带,岩体破碎,岩质软硬不均现象异常显著。沿基岩软弱带通常风化加剧,形成风化凹槽,导致基岩差异风化显著,弱微风化岩面起伏较大,给隧道设计及施工造成影响。盾构穿越地下水丰富,与珠江江面联通。

2 破碎带地层掘进风险

破碎带围岩力学性质差,地下水丰富,使隧道施工难度大、风险高。泥水平衡盾构在该类地层中掘进易出现刀盘结泥饼、刀盘开口堵塞、刀具异常磨损、仓内积渣、滞排、泥浆黏度指标上升快等现象,其中,刀盘结泥饼、刀具异常磨损、滞排现象尤为突出,常需带压进仓清理或更换刀具,严重制约盾构掘进效率。盾构下穿破碎带风险分析如表 1 所示。

3 破碎带掘进关键技术

3.1 掘进参数设置

1) 泥水仓压力

泥水仓顶部压力设置对破碎带地层盾构安全掘进尤为关键,是确保掌子面稳定的重要措施,合适的泥水仓压力能够支撑掌子面确保碎块不掉落或少掉落。尽可能杜绝破碎带地层盾构掘进泥水仓压力低于同液位自然水压,避免掌子面失稳,进而避免引发掉块导致滞排等一系列仓内问题。

可通过理论计算对泥水仓压力进行控制,分地层进行水土分算和水土合算,得到刀盘顶部主动土压力、被动土压力、静止土压力。泥水仓压力上限值按照静止土压力进行计算,下限值按照主动土压力进行计算,计算深度选取盾构刀盘顶位置埋深。设定泥水仓压力一般大于计算压力 0.01~0.02MPa。以本工程盾构穿越破碎带的 835、885 环为例,隧顶分别位于全风化片岩层、强风化花岗岩层,地层参数分别如表 2、3 所示。

盾构掘进 835 环时,水土分算得到刀盘顶部主动土压力为 462.50kPa,刀盘顶部被动土压力为 570.24kPa,泥水仓压力为 516.37kPa。水土合算得到刀盘顶部主动土压力为 275.1kPa,刀盘顶部静止土压力为 273.9kPa,泥水仓压力为 274.5kPa。

盾构掘进 885 环时,水土分算得到刀盘顶部主动土压力为 390.27kPa,刀盘顶部被动土压力为 629.42kPa,泥水仓压力为 509.845kPa。水土合算得到刀盘顶部主动土压力为 301.1kPa,刀盘顶部静止土压力为 371.7kPa,泥水仓压力为 336.4kPa。

利用现场监测数据验证理论计算参数设置的合理性,针对泥水平衡盾构,可通过拼装模式下 SAMSON 系统自动调节进出气量,观察气垫仓液位变化情况,出现气垫仓液位增高时,说明泥水仓压

表 1 盾构下穿破碎带风险分析

Table 1 Risk analysis of shield tunnelling through fracture zone

风险点	风险分析	预控措施
掌子面失稳	破碎带地质差,围岩破碎,易掉块或坍塌,造成掌子面失稳,进而引起仓内滞排,无法掘进	设置合适的泥浆参数和掘进参数,匹配泥水仓压力
刀具异常磨损	破碎带地层掌子面不平整,围岩强度较高,刀盘旋转过程刀具冲击受力不均匀,易造成异常损坏	研发配置耐磨耐冲击刀具,设置刀具实时监测系统,实时掌握刀具运行情况,及时更换刀具
突泥涌水	盾构纠偏猛调猛纠,造成盾尾密封失效,盾尾位置突泥涌水;围岩强度高,刀具不均匀受力后未及时更换,刀桶密封失效,刀盘中心锥位置突泥涌水	配置 5 道盾尾密封刷,加强盾尾密封效果。制定盾构调向标准,严格控制过程,禁止猛调猛纠。设置刀桶防退装置,每环掘进检查刀桶密封情况
滞排	滞排导致刀盘刀具磨损,滞排也会造成盾构掘进困难、超挖严重、沉降难以控制,甚至造成塌陷等	增加破碎机工作时间,确保大块渣土被夹碎后及时排出。适当增加泥浆黏度,提高浆液携渣能力。加强刀盘面板及卸渣槽冲刷管理,降低糊刀盘面板风险

表 2 835 环所在地层参数

Table 2 Formation parameters of ring 835

项目	地层						
	② ₁ 淤泥	② _{2,4} 细砂	② ₂ 淤泥质土	③ ₂ 粉质黏土	③ ₁ 粉质黏土	③ ₄ 细砂	⑦ 全风化片岩
层厚/m	9.68	2.67	5.36	6.02	6.89	7.27	7.68
土体天然重度/(kN·m ⁻³)	15.90	20.00	17.70	19.90	18.70	20.00	19.80
土体浮重度/(kN·m ⁻³)	6.10	10.20	7.90	10.10	8.90	10.20	10.00
土体内摩擦角/(°)	4.30	30.00	5.60	9.80	7.00	10.00	20.69
土体主动土压力系数	0.86	0.33	0.82	0.71	0.78	0.70	0.48
土体被动土压力系数	1.16	3.00	1.22	1.41	1.28	1.42	2.09
土体静止土压力系数	0.72	0.43	0.72	0.40	0.72	0.40	0.35
土体黏聚力/kPa	7.90	0	13.90	38.32	18.90	0	51.70
水重度/(kN·m ⁻³)				9.8			
地下水位距刀盘顶部的距离/m				47.855			
刀盘顶部埋深/m				44.605			

表 3 885 环所在地层参数

Table 3 Formation parameters of ring 885

项目	地层						
	② ₁ 淤泥	② _{2,3} 粉砂	② ₂ 淤泥质土	③ ₁ 粉质黏土	③ ₆ 粗砂	③ ₄ 细砂	⑥ 全风化花岗岩 ⑥ ₁ 砂砾状强风化花岗岩
层厚/m	9.47	4.16	16.34	1.71	5.85	4.19	2.25
土体天然重度/(kN·m ⁻³)	15.90	20.00	17.70	18.70	20.00	20.00	19.30
土体浮重度/(kN·m ⁻³)	6.10	10.20	7.90	8.90	10.20	10.20	9.50
土体内摩擦角/(°)	4.30	30.00	5.60	6.00	7.00	10.00	25.67
土体主动土压力系数	0.86	0.33	0.82	0.81	0.78	0.70	0.39
土体被动土压力系数	1.16	3.00	1.22	1.41	1.28	1.42	2.52
土体静止土压力系数	0.72	0.43	0.72	0.72	0.72	0.40	0.35
土体黏聚力/kPa	7.90	0	13.90	38.32	18.90	0	0
水重度(kN·m ⁻³)					9.8		22.60
地下水位距刀盘顶部的距离/m					49.810		
刀盘顶部埋深/m					46.780		

力设置偏低,地下水在高压环境下回流至泥水仓;出现气垫仓液位降低时,说明泥水仓压力设置偏高,仓内泥浆在高压环境下流入破碎带裂隙。本工程 843 环管片拼装时间为 2023 年 3 月 18 日 17:40—18:44,拼装过程中泥水仓、气垫仓压力及液位变化如表 4 所示。由表 4 可知,气垫仓液位未发生较大变化,参数设置较合理。

对掘进参数进行精细化控制,掘进过程中严格控制液位波动,须保持仓内环流顺畅,气垫仓保持零液位,气垫仓液位波动值控制在±0.5m 以内,泥水仓顶部压力波动值控制在±10kPa 以内。在管片拼装过程中观察泥水仓压力及气垫仓液位变化情况,防止忽高忽低,确保盾构掘进开挖引起的地层变形在允许范围之内。

2) 刀盘转速与贯入度

断裂带区域岩石破碎,岩石 RQD 值低,碎石之间一般夹泥夹砂无胶结,掘进过程中应按照“中转速,中低贯入度”的原则选择刀盘参数,尽可能减小对地层的扰动。本工程盾构掘进破碎带过程中控制刀盘转速为 1.2~1.32rad/min,控制刀盘贯入度为 4.8~5.2mm/rad。

表 4 843 环管片拼装过程中泥水仓、气垫仓压力及液位变化

Table 4 The change of stress and liquid level of mud warehouse and air cushion warehouse during the assembly of ring 843 pipe piece

时间/(时:分)	泥水仓压力/kPa	气垫仓压力/kPa	气垫仓液位/m
17:40	513	602	0.14
17:42	516	605	0.13
17:44	518	602	0.13
17:48	516	605	0.13
17:50	518	605	0.13
17:52	513	603	0.12
17:54	516	604	0.12
17:56	513	602	0.12
17:58	513	604	0.12
18:00	515	604	0.13
18:04	513	604	0.12
18:06	517	602	0.12
18:10	513	603	0.11
18:14	516	602	0.11
18:16	515	601	0.10
18:18	517	602	0.11
18:24	518	601	0.12
18:26	518	603	0.12
18:28	513	601	0.11
18:32	518	604	0.10
18:36	517	601	0.10
18:38	515	602	0.10
18:42	515	605	0.10
18:44	517	602	0.10

3.2 泥浆参数设置

由于断层破碎带黏土矿物含量高,地层造浆能力强,刀盘结泥饼风险较高。盾构穿越破碎带掘进过程中采用动态泥浆管理模式,持续跟踪盾构掘进过程中泥浆性能参数,结合开挖面稳定情况、仓内排渣情况、流体输送状态,及时调整泥浆参数。根据泥浆性能判断是否弃浆或继续使用,对于高黏度、高相对密度的废弃泥浆,通过分离系统预处理后,利用压滤机进行二次处理,实现浆液“零排放”。

施工初期,每环掘进前对泥浆性能进行检测,及时调整,并做好记录。持续施工一段时间后,根据地层不同,分析泥浆参数变化趋势,提前研判并对泥浆参数进行进一步调整。每环掘进至少分析2次泥浆相对密度、黏度、温度等。

3.3 盾构装置配置

3.3.1 常压刀盘

海底破碎带地层换刀作业风险大,配置常压换刀刀盘,提高作业安全性及效率。本工程采用的盾构常压刀盘设计为6根中空主梁+6根辅梁的形式,主梁上部分刮刀和滚刀可在常压环境下更换。同时配置伸缩摆动主驱动,实现刀盘前后伸缩和摆动超挖功能,通过刀盘前后伸缩实现正面刀具的更换,通过刀盘摆动超挖实现边缘滚刀的更换,以更好地适应破碎带地层。常压换刀刀桶设置防退装置,每环掘进检查刀桶防退装置及密封外部情况。

3.3.2 刀具状态智能化实时监测系统

针对破碎带地层刀具异常损坏无法及时发现的情况,配置刀具状态智能化实时监测系统(见图1),该系统基于同类型地质、掘进工况等大数据结合理论分析,能够通过实时全面监测每把滚刀旋转速度、温度、磨损情况等,结合掘进过程中参数的变化,精准识别存在问题的刀具,做到及时更换,避免因单把刀具出现问题引发周边刀具损坏。

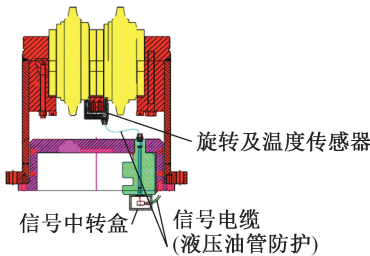


图1 刀具状态智能化实时监测系统设置

Fig. 1 Setting of the intelligent real-time monitoring system of tool condition

3.3.3 破碎及冲刷装置

破碎带地层可能存在掉落的大颗粒岩石,在出

渣口设置破碎装置(见图2),以满足区间破碎最大岩石强度为200MPa的要求,同时在不需破碎的地层通过破碎机摆动搅拌功能对底部渣土进行搅拌,降低因渣土沉积导致的仓内滞排问题。

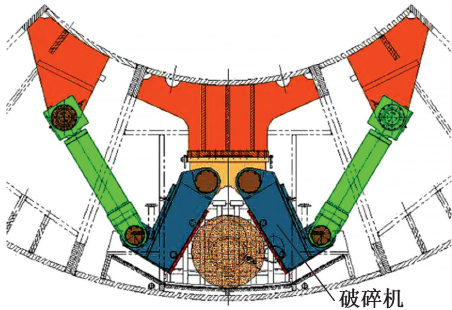


图2 破碎装置

Fig. 2 Crushing device

泥水仓和气垫仓底部由前至后布置泥浆门、破碎机、格栅冲刷装置(见图3),最大冲刷流量达1 200m³/h。在破碎机后部设有格栅及冲刷装置,通过破碎机、格栅及冲刷装置的综合应用,避免大块岩石堵塞泵体,同时降低格栅堵塞概率。

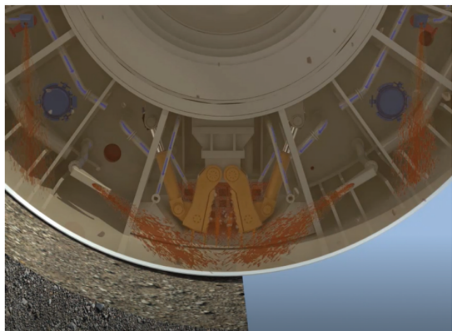


图3 冲刷装置

Fig. 3 Flushing device

3.3.4 密封装置

针对海底高水压破碎带地层,盾尾密封设有5道高性能钢丝刷,前2道尾刷采用可更换设计,最后1道尾刷背部采用弧形钢板。尾刷腔内布置盾尾油脂注入通道,注入油脂后可形成可靠的密封油环,保证盾尾密封性能,尾刷最大抵抗1 200kPa的水压。同时,在盾尾末端外侧布置1道止浆板,隔离泥水仓与盾尾,保证同步注浆效果。可更换处尾刷采用螺栓连接,洞内可实现2道尾刷的更换。油脂腔注入点位多且分布均匀,提高了盾尾承压能力,如图4所示。

4 结语

本文依托深江铁路珠江口大直径隧道工程,分析大直径泥水平衡盾构高水压条件下穿越断层破碎带施工风险,并提出预控措施。对掘进参数、泥浆参数设置要素进行分析,对本工程盾构采用的常

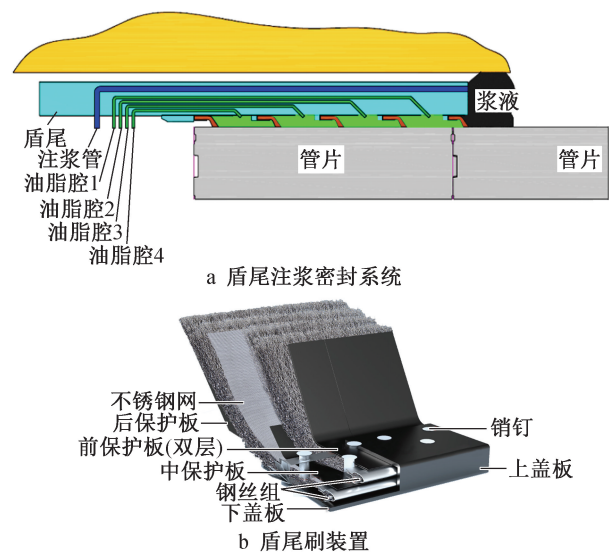


图 4 盾尾密封耐压装置

Fig. 4 Shield tail sealing pressure device

压刀盘形式、刀具状态智能化实时监测系统、破碎及冲刷装置、密封装置进行叙述。

1)盾构在断层破碎带地层掘进时须严格控制掘进参数,特别是泥水仓压力,严禁欠压掘进,避免因压力设定不足导致仓内掌子面失稳,按照“中低掘进速度,中刀盘转速,中低刀盘贯入度”的原则确定相关掘进参数。

2)断层破碎带地层掘进时选择合适的设备是关键,尽可能通过盾构配置解决可能出现的问题,通过采用破碎、冲刷等装置,避免仓内滞排风险。

3)配置刀具状态智能化实时监测系统,精准掌握每把刀具运行情况,避免因单把刀具出现异常问题未及时发现,从而引起周边刀具发生次生损坏的情况。

4)根据水文地质条件配置合理的盾尾密封装置,结合掘进过程中尾刷保护及油脂的注入,确保盾构密封性能满足要求。

5)针对大直径泥水平衡盾构水下穿越破碎带等特殊地段,严格执行掘进参数“一环一研判”,有效控制仓内滞排、刀盘结泥饼、密封损坏等,避免造成地面沉降、塌陷等。

参考文献:

[1] 李翔,孙文昊,孙州,等. 盾构法隧道穿越活动断裂带方案探讨[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(S1):369-375.
LI X, SUN W H, SUN Z, et al. Discussion on the scheme of shield tunnelling through active fault zone [J]. Tunnel construction,2022,42(S1):369-375.

[2] 杨钊,唐冬云,刘朋飞,等. 城市湖底超大直径盾构隧道施工重难点及关键技术探究——以武汉两湖隧道(南湖段)工程为例[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(2):296-304.
YANG Z, TANG D Y, LIU P F, et al. Key construction technologies and difficulties of super-large-diameter shield tunnel under urban lake: a case study of Nanhu Section of Lianghu Tunnel in Wuhan, China[J]. Tunnel construction,2023,43(2):296-304.

[3] 陈慧超. 大直径常压刀盘泥水平衡盾构掘进防滞排技术[J]. 施工技术(中英文),2023,52(3):132-139.
CHEN H C. Large diameter atmospheric pressure cutterhead mud water balance shield tunnelling anti stagnation and drainage technology [J]. Construction technology, 2023, 52 (3): 132-139.

[4] 刘智,钟长平. 超大直径泥水平衡盾构断层破碎带掘进关键技术研究[J]. 现代隧道技术,2023,60(1):225-232.
LIU Z,ZHONG C P. Research on key technology of excavation in fault fracture zone of super-large diameter mud-water balanced shield[J]. Modern tunnelling technology,2023,60(1):225-232.

[5] 刘德斌. 富水软土地区盾构施工对邻近建筑物的影响及控制措施[J]. 施工技术(中英文),2022,51(11):127-130.
LIU D B. Impact and control measures of shield tunnel construction on adjacent buildings in rich water soft soil areas [J]. Construction technology, 2022, 51 (11): 127-130.

[6] 丁泉诏. 泥水盾构穿越狮子洋断裂破碎带施工关键技术研究[J]. 工程技术研究,2023,8(13):50-53.
DING X Z. Research on key construction technology of slurry shield crossing Shiziyang fault fracture zone[J]. Engineering and technological research,2023,8(13):50-53.

[7] 曹校勇,刘永强,孙海东,等. 复杂地层中基于流固耦合的盾构隧道开挖面稳定性研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(21):30-34.
CAO X Y, LIU Y Q, SUN H D, et al. Study on the stability of shield tunnel excavation face based on fluid structure coupling in complex strata[J]. Construction technology, 2022, 51 (21): 30-34.