

DOI: 10.11779/CJGE202101005

复合地层双模盾构适应性及掘进参数研究

何 川^{1, 2}, 陈 凡^{1, 2}, 黄钟晖³, 孟庆军³, 刘川昆^{1, 2}, 王士民^{1, 2}

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031;

3. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 广西 南宁 530029)

摘 要: 依托南宁市轨道交通5号线五一立交站—新秀公园站区间隧道工程, 论述了土压-泥水双模盾构的选型依据, 基于区间右线双模盾构及左线泥水盾构的现场掘进试验数据, 详细对比分析不同地质段和不同模式段的掘进参数变化及能源消耗情况, 得出相比于单模式盾构, 双模盾构在复合地层条件下的适应性。研究结果表明: 始发段由粉土、粉细砂与圆砾组成的复合地层中采用的泥水平衡模式严格控制地面沉降, 在过江段所在的全断面粉砂质泥岩和泥质粉砂岩复合地层中, 土压模式有效规避了泥水盾构易固结泥饼的风险; 掘进速率方面, 右线双模盾构相对于左线掘进速率增幅达181.44%; 能源消耗方面, 右线双模盾构的盾尾油脂消耗、水消耗及电消耗较左线分别减少了7.87%, 30.32%, 30.64%。

关键词: 隧道; 双模盾构; 掘进试验; 复合地层; 掘进参数; 盾构耗能

中图分类号: U455.43; TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)01-0043-10

作者简介: 何 川(1964—), 男, 工学博士, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: chuanhe21@163.com。

Tunneling parameters and comparison of adaptability for compound strata of dual-mode shield machine

HE Chuan^{1, 2}, CHEN Fan^{1, 2}, HUANG Zhong-hui³, MENG Qing-jun³, LIU Chuan-kun^{1, 2}, WANG Shi-min^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: Based on the tunnel project between Wuyi Interchange Station and Xinxu Park Station of Nanning rail transit line 5, firstly the selection basis of the earth pressure-slurry dual-mode shield is discussed, and then, according to the field excavation test data of the right line and left line slurry shield, changes of excavation parameters and energy consumptions of different geological sections and different mode sections are analyzed. Compared with that of single-mode shield, the adaptability of dual-mode shield in composite strata is analyzed. The results show that the slurry-balanced mode used in the composite stratum consisting of silt, silty fine sand and round gravel in the initial section strictly controls the land subsidence, and the earth pressure-balanced mode effectively avoids the risk of clay formation in the composite stratum consisting of full fault silty mudstone and argillaceous siltstone in the river-crossing section. In terms of the excavation rate, the rate of dual-mode shield is 181.44% higher than that of the slurry shield of the left line. In terms of energy consumption, the oil consumption of the shield tail, water consumption and electricity consumption of the dual-mode shield of the right line are 7.87%, 30.32% and 30.64% lower than those of the left line, respectively. The research results may provide a reference for the study on driving parameters and selection adaptability of double-mode shield in composite strata.

Key words: tunnel; dual-mode shield machine; tunneling test; compound stratum; tunneling parameter; shield energy consumption

0 引 言

近年来, 随着中国城市地下轨道的高速建设, 盾构法施工在中国地铁隧道工程建设中得到越来越广泛的应用。盾构法适用于均一的软土、软岩地层或砂层,

掘进模式相对单一, 掘进参数相对稳定, 施工技术已

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802201); 国家自然科学基金面上项目(51578461)

收稿日期: 2020-03-31

***通信作者** (E-mail: wangshimin@swjtu.edu.cn)

比较成熟。然而随着地铁发展的逐步深入,盾构施工过程中复合地层情况日益增多,即在开挖延伸方向上有2种及以上不同地层,且地层的水文和力学特征相差悬殊。在复合地层中掘进时经常需要不断变换盾构施工方法,调整施工参数,且容易出现掘进效率低下,刀具磨损严重,盾构机抬头,地层沉降等问题^[1-2]。因此,复合地层中盾构掘进参数的设计和分析是现阶段的重要课题,中国学者对此展开了大量研究。

袁敏正等^[3]通过对广州地铁一、二号线施工相关的盾构刀盘扭矩等主要掘进参数和刀具布置型式的分析和研究,对其盾构机适应性进行了评价;张厚美等^[4]依托广州市轨道交通三号线工程,采用正交试验的方法对主要掘进参数对推进速度和刀盘扭矩的影响进行现场试验研究并建立了软土中的推进速度和刀盘扭矩数学模型;韦良文等^[5]结合越江隧道盾构施工采集的大量监测数据,对盾构施工参数与开挖面的稳定与平衡做了相应研究。谭忠盛等^[6]针对广州地铁二号线软硬不均地层的盾构施工,提出了复合盾构的设计思想,系统研究复合盾构掘进模式的原理、掘进参数及模式之间的转换技术;王为乐^[7]针对长沙地区特殊的复合地层的现场监测数据,结合数值计算,对盾构掘进控制参数的规律进行分析和探讨;孟德鑫等^[8]深圳隧道掘进中遇到的砾质黏性土、全风化花岗石两种地层,对比分析国内首创大直径土压盾构在相同地层下,不同掘进参数的实际应用效果;李正^[9]依托深圳地铁11号线施工段,在收集和整理这两个区间工程地质资料和盾构掘进参数的基础上,对土压平衡盾构掘进参数与地层参数的相关性进行了研究。梁桥欣等^[10]以南宁市轨道交通3号线为工程背景,总结了全断面灰岩地层、上软下硬地层、全断面黏土地层及复合地层条件下小半径曲线段盾构掘进施工关键技术;占传忠^[11]以广州地铁六号线二期工程盾构施工数据为例,通过曲线拟合及统计回归方法,得出盾构施工时各掘进参数的相互关系,为盾构的选型及各掘进参数的相互匹配提供参考依据;门燕青等^[12]依托济南轨道交通一号线复合地层土压盾构施工,提出一种在盾构机额定配置条件下的分项功耗和施工参数离散性指标双结合的掘进效能评价方法;杨旻等^[13]对富水圆砾地层段和圆砾泥岩复合地层段土压平衡盾构掘进参数进行对比分析,并对圆砾地层土仓压力取值范围的计算方法进行讨论。

针对复合地层中施工环境存在的巨大差异,单一模式盾构施工愈发凸显出其局限性,因此兼具不同模式的双模盾构施工法成为应对复合地层的创新技术。凌波等^[14-15]研发出并联式土压-泥水双模式盾构,实现在土压和泥水模式进行快捷变换的盾构施工技术;

赖理春^[16]在并联式双模式盾构的使用过程中总结了分析了并联式双模式盾构掘进模式选取的经验,归纳了在不同地质情况所选择对应的掘进模式;管会生等^[17]总结了双模式盾构在矿区斜井隧道的掘进参数,分析计算双模式盾构在2种掘进模式下的盾构掘进参数,并提出了在不同地质区间下双模式盾构掘进参数的配置建议。周玉标^[18]总结了双模式盾构在岩溶发育地层中下穿高速公路的相关措施;刘东^[19]运用数值模拟及现场试验分析等,对于复杂地质条件下采用双模式盾构施工进行了研究,形成了TBM&EPB双模式盾构机在复合地层中的成套施工技术并总结了刀具磨损规律。朱劲锋等^[20]通过广州地铁工程案例,总结出土压-泥水双模式盾构施工技术特点与创新冷冻刀盘技术。

鉴于中国采用双模式盾构掘进复合地层的施工技术仍处于探索阶段,鲜少在相同复合地层环境下对单模式和双模式盾构进行系统的对比研究。为此,本文依托南宁市轨道交通5号线五一立交站-新秀公园站(下文简称五一立交)隧道工程,基于盾构隧道全段掘进数据,将右线双模式和左线泥水单模式盾构在不同地层的掘进参数和能源消耗指标进行系统性比对,得出双模盾构针对复合地层环境的适应性优势,探究双模盾构施工中两种平衡模式施工盾构参数和地层适应性的关系,对指导今后双模盾构解决复杂地层问题的研究具有重要意义。

1 工程概况

本文依托于南宁市轨道交通5号线02标土建5工区(五一立交)盾构隧道工程,该隧道由邕江南始发,下穿南岸沿线建筑物、邕江江底至江北新秀公园站接收。其中五一立交隧道区间左线全长约2091.9 m(共1395环),区间右线全长约2098.1 m(共1399环)。右线采用中铁#685国内首台直控式土压-泥水双模盾构机施工,左线采用中铁#314直控式泥水盾构机施工,鉴于两线地质情况类似,本工程为检验双模盾构对于复合地层的显著适应性提供了现场对比试验。

五一立交区间段隧穿越地层主要为粉土层(③),粉细砂层(④₁₋₁)、圆砾层(⑤₁₋₁)及古近系的粉砂质泥岩(⑦₁₋₂)与泥质粉砂岩(⑦₂₋₃),各层相间分布,五一立交区间隧道地质剖面图见图1。其中江南段施工地层多为粉土-粉细砂、粉细砂-圆砾、粉土-圆砾、圆砾-泥岩等复合地层,邕江江底区间主要为全断面泥岩地层和泥质粉砂岩,江北段施工地层为全断面圆砾、圆砾-泥岩、粉土-圆砾复合地层。各复合地层及其占比统计情况见图2。

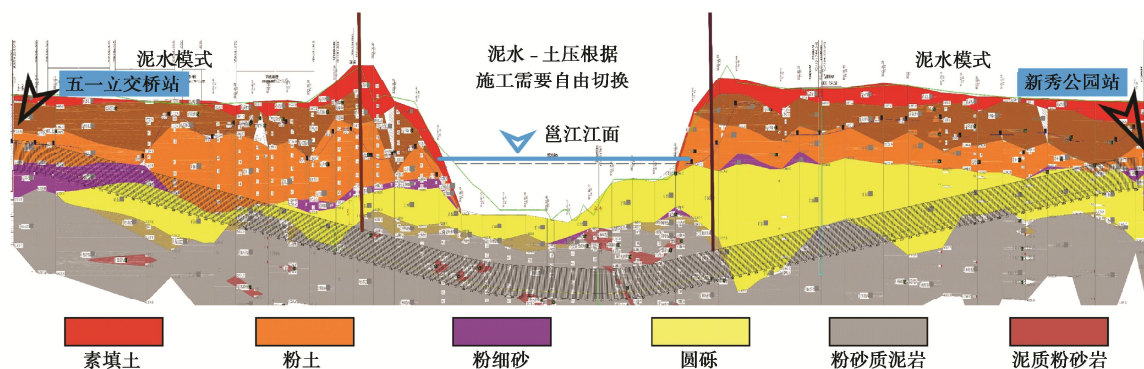


图 1 五一新区间隧道地质剖面图

Fig. 1 Geological section of Wuyi Interchange Station-Xinxu Park interval

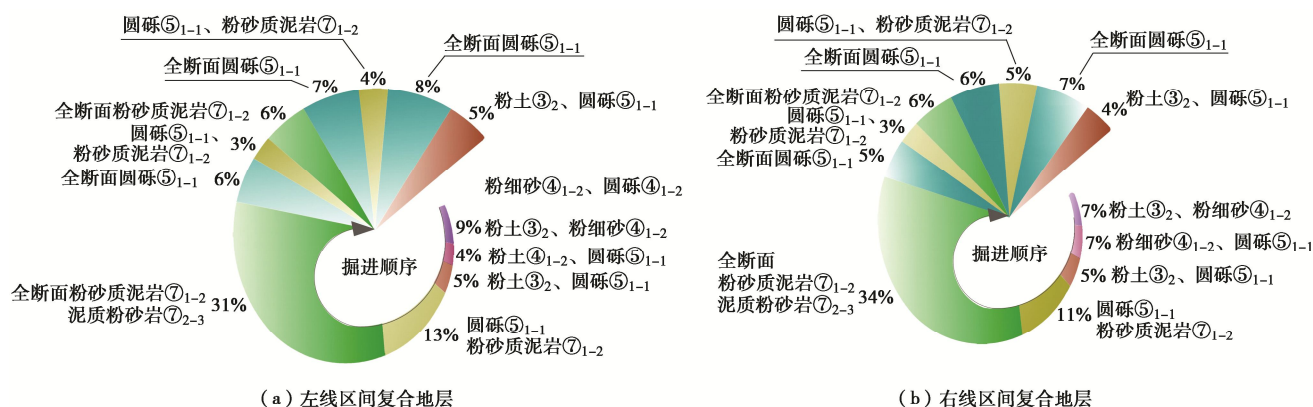


图 2 五一新区间隧道复合地层统计图

Fig. 2 Statistical diagrams of compound strata in Wuyi Interchange Station-Xinxiu Park interval

表 1 各地层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of each stratum

地层类型	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然单轴抗压强度 /MPa	渗透系数 /($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	剪切波速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
粉土③	1960	—	0.30	10.5	15.3	180
粉细砂④ _{1,2}	1970	—	3.00	—	25.0	—
圆砾⑤ _{1,1}	2030	—	70.00	—	35.0	320
粉砂质泥岩⑦ _{1,2}	2090	0.83	0.02	60.0	15.0	320
泥质粉砂岩⑦ _{2,3}	2130	2.15	0.80	45.0	30.0	550

圆砾层颗粒硬度较大,局部含有较大粒径卵石泥岩;泥质粉砂岩(⑦_{2,3})局部含泥质,天然状态下单轴抗压强度为0.92~3.56 MPa,标准值为1.54 MPa,烘干状态下最大单轴抗压强度达3.83 MPa。区间隧道所穿越各个地层的具体力学参数见表1。

其中,粉土、粉细砂和圆砾地层具有强透水性,地层自稳性较差,易造成周边地层松动从而引发地表沉降;邕江江底主要为全断面粉砂质泥岩与局部泥质粉砂岩构成的复合地层,半成岩的泥岩层地层透水性弱,具有膨胀性,失水易开裂、遇水易软化,且泥岩地层中的黏粒含量很高,越江段隧顶最高水位为 25.8 m。

2 土压-泥水双模选型适应性

根据地质报告及南宁市轨道交通一号线、二号线和三号线类似地层施工的经验积累,五一新区间隧道穿越粉砂层、圆砾,泥岩等复合地层在掘进中存在以下技术难点和安全隐患:

(1) 区间始发段地质主要穿越粉土、粉细砂和圆砾复合地层, 地层自身稳定性较差, 由于隧道埋深较浅, 下穿浅基础建筑物密集且年限久远, 故需要保证地面沉降在规范允许范围内, 同时圆砾地层具有强透水性, 与邕江存在水力联系。

(2) 过江段位于粉砂质泥岩和泥质粉砂岩复合地

表 2 盾构机力学参数

Table 2 Mechanical parameters of shield machines

盾构型号	开挖直径 /mm	刀盘开口 率/%	中心开口 率/%	最大推 力/T	额定扭矩 /(kN·m)	脱困扭矩 /(kN·m)	最大工作 压力/MPa	最大设计 压力/MPa
右线双模中铁#685	Φ6280	40	45	3991	5200	6300	0.3	0.6
左线泥水中铁#314	Φ6280	40	45	3991	6650	8100	0.3	0.6

层，属于弱透水性地层，同时部分区间黏粒含量较高对盾构法施工会造成影响，泥水盾构施工时极易出现渣土滞排和刀盘结饼等问题，影响盾构掘进。

为了克服上述施工重点问题，亟需采用双模盾构以适应在始发段的地表沉降安全要求，同时提高在泥岩复合地层中的掘进效率，规避泥水盾构在此地层易结泥饼、刀具磨损大等风险，从而提高项目掘进效率，保证施工工期。

在始发段掘进时，双模式盾构机采用泥水模式掘进以最大程度减少沉降量。根据现场施工监测数据显示。在区间左、右线完成始发段掘进后地表与建筑物累计沉降为-11 mm，平均沉降为-5 mm，实现了对于地面沉降的精准控制，符合施工预期。在过江段泥岩复合地层掘进时，遇到黏粒含量高段随时进行泥水-土压转换，根据地层需求两种模式交替使用，有效避免了泥水模式易固结泥饼的问题。

五一新区间右线中铁#685 双模盾构和左线#314 泥水盾构刀盘结构实物图和主要参数见图 3 和表 2。

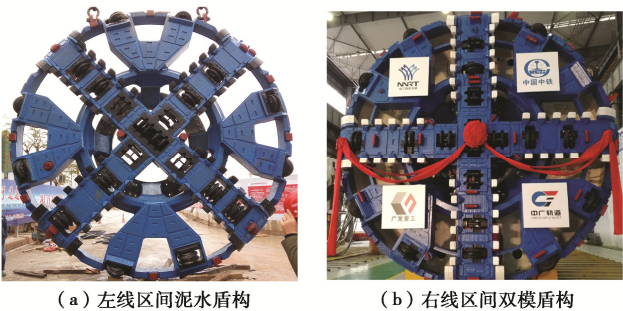


图 3 盾构刀盘实物图

Fig. 3 Photos of cutter head of shield machine

3 盾构掘进参数对比分析

选型设计方面，右线过江段整体采用土压模式掘进，但泥岩复合地层部分区间存在节理裂隙发育，导致地层渗透性增大，与邕江底可能存在水力联系，考虑到复合地层的复杂性，需要适时转换为泥水模式以适应地层对掘进模式的要求。过江段掘进过程中不同平衡模式转换及其对应区间环数详见表 3。右线双模盾构通过内部泥水环流系统和土压出渣系统的配置优化，实现模式转换效率的提升，根据过江段 14 次模式转换的耗时数据，转换时间均控制在 2 h

以内，降低模式转换时间对于施工的影响。

基于大量现场掘进数据，运用数理统计方法分析左、右线掘进速率、刀盘扭矩、刀盘转速、和总推力随地层的变化趋势，对比掘进参数随不同地层的规律；通过相同地层条件下左、右线施工参数的系统对比，探究双模盾构在南宁地区复合地层施工的适应性效果。

分析过江段（460~833 环）全断面粉砂质泥岩和分布泥质粉砂岩复合地层下双模式交替使用时的掘进参数数据，对比右线在不同平衡模式下的参数变化特点。

表 3 过江段右线不同模式区间环数

Table 3 Sections numbers for different modes of right line in crossing river section

平衡模式	区间环数	平衡模式	区间环数
土压	460~470	泥水	676~692
泥水	470~516	土压	692~745
土压	516~552	泥水	745~768
泥水	552~574	土压	768~796
土压	574~579	泥水	796~819
泥水	579~611	土压	819~833
土压	611~676		

3.1 掘进速率对比

左、右线的掘进速率对比见图 4。由图 4 可知，除过江段外，隧道左、右线掘进速率随地层的变化规律基本一致，粉土粉、细砂复合地层的掘进速率明显较高，基本在 30~55 mm/min，且数值离散性小，较稳定，在圆砾、泥岩复合地层的掘进速率显著减小，基本位于 3~30 mm/min，且波动剧烈。在软土复合地层如粉土-粉细砂、粉细砂-圆砾、粉土-圆砾层中，双模盾构的掘进速率略高于泥水盾构，但优势不显著；在过江段的全断面泥岩和分布泥质粉砂岩地层中，右线速率显著高于左线，泥水盾构平均掘进速率为 13.15 mm/min，双模盾构为 37.01 mm/min，速率较左线提高了 181.44%。

双模盾构在过江段两种模式的掘进速率统计见图 5。有图 5 可知，土压模式下的掘进速率相比于泥水模式有大幅度提升，土压模式下的速率基本介于 37.1~48.7 mm/min，泥水模式平均速率介于 22.5~39.5 mm/min。经统计，泥水模式下的掘进速率平均值为 29.25 mm/min，土压模式下的掘进速率平均值为

42.56 mm/min, 相对泥水模式增长 79.69%, 可见选用土压模式在过江段泥岩中掘进具有更好的适应性。

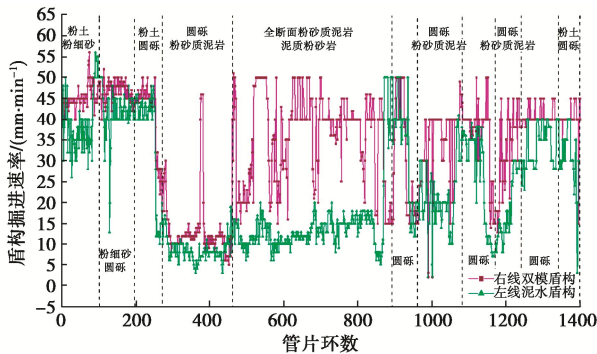


图4 双模/泥水各地层掘进速率对比

Fig. 4 Comparison of tunneling rate of dual-mode and slurry shield

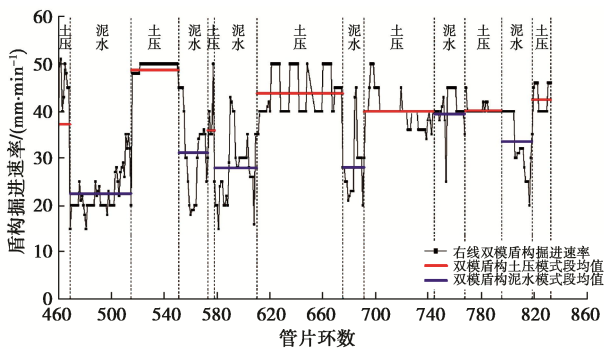


图5 过江段不同模式掘进速率对比

Fig. 5 Comparison of tunneling rate of different modes of dual-mode shield machine

3.2 刀盘扭矩对比

左、右线的刀盘扭矩对比见图6。除过江段外, 隧道左、右线刀盘扭矩随地层的变化规律基本一致; 在粉土、粉细砂和圆砾复合地层中刀盘扭矩最小, 基本位于 600~2300 kN·m, 刀盘扭矩变化不大, 掘进系统较为稳定; 进入粉砂质泥岩和圆砾地层后, 由于上软下硬地层且地层强度提高故需要适当提高刀盘扭矩, 且扭矩调整较为频繁, 变化幅度较大。

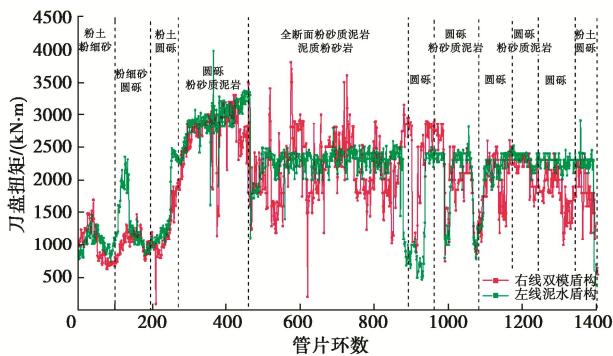


图6 双模/泥水各地层刀盘扭矩对比

Fig. 6 Comparison of torque of dual-mode and slurry shield

右线双模盾构在过江段区间的扭矩离散程度明

显高于左线泥水盾构, 区间扭矩最大和最小值分别为 3800, 210 kN·m。表明了为了提高贯入度, 随着地层变化必须不断调整刀盘扭矩, 同时模式转换同样会导致刀盘扭矩的相应变化。

右线在过江段交替使用两种模式的刀盘扭矩统计见图7, 由图7可知, 两种平衡模式的刀盘扭矩在数值上并没有很明显的规律, 都基本满足快速掘进过程中对于提高刀盘扭矩的要求。

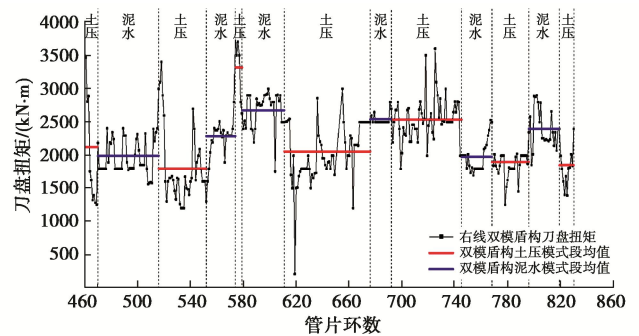


图7 过江段不同模式刀盘扭矩对比

Fig. 7 Comparison of torque of different modes of dual-mode shield machine

土压模式下的刀盘扭矩数据离散性明显高于泥水盾构, 主要原因是泥水模式采用泥浆输送方式排渣, 掘进过程中对刀盘扭矩影响不大; 而土压模式由于地层状况切屑的渣土块状大小不均匀或者渣土改良效果不一致, 使刀盘扭矩更容易产生不均匀变化。

3.3 总推力对比

左、右线的油缸总推力对比见图8。通过对比分析, 隧道左、右线刀盘扭矩随地层的变化规律相似; 在粉土、粉细砂和圆砾复合地层中总推力较小, 基本位于 5000~20000 kN 区间; 进入粉砂质泥岩和圆砾地层后, 左、右线推力都出现明显增长以适应上软下硬地层的掘进。在过江段区间内推力皆下降至 20000 kN 以下, 与在粉土层中的推力相近, 在后续掘进中, 会适当下调推力, 说明在强度高的地层中需要适当降低推力, 以避免刀盘过量磨损。

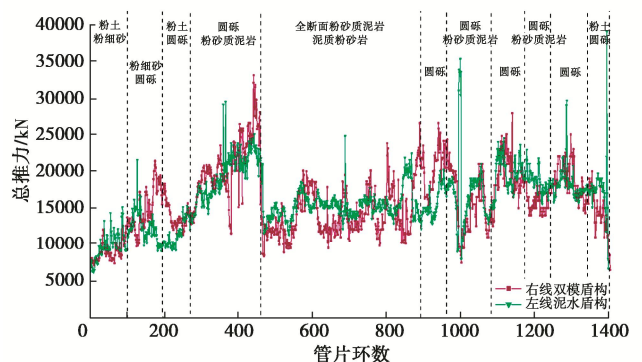


图8 双模/泥水各地层总推力对比

Fig. 8 Comparison of total thrust of dual-mode and slurry shield

右线过江段两种模式总推力数据见图 9。经统计分析, 泥水模式下, 总推力相较于土压模式偏高, 泥水模式的平均值为 15594 kN, 土压模式下为 12689 kN, 分析原因是泥水模式下需要泥水仓满仓以平衡掌支面, 而土压模式可以采用常压或者半仓土压力的方式掘进, 说明在土压模式下快速掘进同时所需的推力更小, 而相比泥水盾构加大了推力却没有提高掘进效果, 体现了土压模式掘进的适应性。

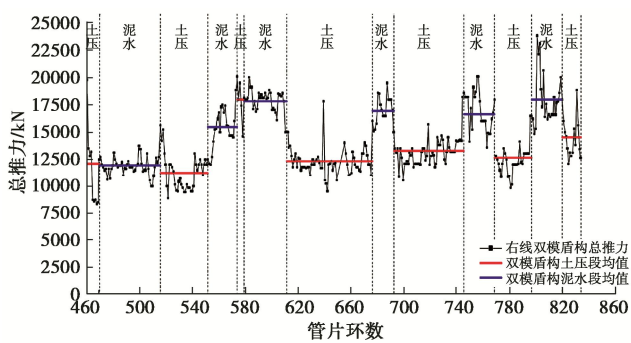


图 9 过江段不同模式总推力对比

Fig. 9 Comparison of total thrust of different modes of dual-mode shield machine

3.4 刀盘转速对比

左、右线刀盘转速对比见图 10。刀盘转速由施工人员设定, 基本恒定为某一数值或随地层作适当调试。左、右线起始转速维持在 1.2 r/min 左右, 在圆砾-粉砂岩复合地层上升至 1.5 r/min 附近, 在全断面粉砂质泥岩下降至 1.4 r/min。这一趋势基本与刀盘扭矩保持一致, 原因主要是在粉土-粉细砂地层中掘进效果良好, 贯入度高, 不需要再提高刀盘转速; 在圆砾-粉细砂地层掘进速率低, 为了提高掘进速率, 提高推力、扭矩和转速; 进入全断面泥岩后中避免刀具磨损, 需要适当减小刀盘转速和刀盘扭矩。

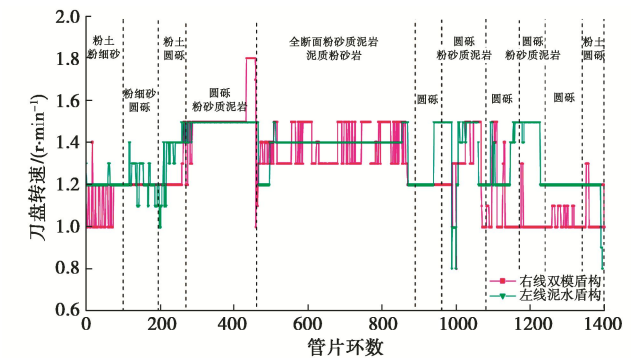


图 10 双模/泥水各地层刀盘转速对比

Fig. 10 Comparison of cutter speed of dual-mode and slurry shield machine

统计左、右线在穿越粉土、粉细砂与圆砾复合

地层的刀盘转速均值, 右线为 1.09 r/min, 左线为 1.23 r/min, 可见双模式盾构在此类地层中维持低刀盘转速的同时拥有较左线更好的掘进效果。同时在过江段右线的刀盘转速明显比左线变化更加频繁, 与平衡模式的转换关系密切。

右线过江段不同模式下的转速统计见图 11。

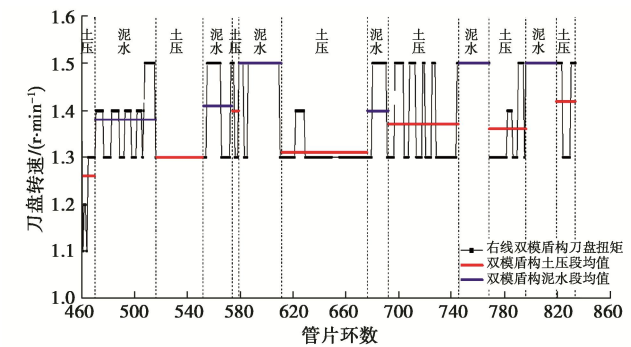


图 11 过江段不同模式刀盘转速对比

Fig. 11 Comparison of cutter speed of different modes of dual-mode shield machine

统计发现, 两种模式在刀盘扭矩在数值上差别明显, 土压模式均值为 1.34 r/min, 泥水模式均值为 1.44 r/min, 在土压模式下, 可以实现“低转速, 高贯入”的掘进效果, 而泥水模式需要提高转速, 同时推力和扭矩都需要不同程度的提高, 体现出泥水模式在该地层掘进的不足。

3.5 过江段不同模式掘进参数总结

统计对比双模式盾构在过江段不同平衡模式下的掘进参数, 具体统计数据如表 4 所示。

表 4 过江段右线不同模式掘进参数均值对比

Table 4 Comparison of mean value of tunneling parameters of different modes of right line

平衡模式	掘进效率 /(mm·min ⁻¹)	刀盘扭矩 /(kN·m)	总推 力/kN	刀盘转速 /(r·min ⁻¹)
土压模式	42.6	2237.2	12689	1.34
泥水模式	29.2	2251.9	15594	1.44

由表 4 可知, 双模盾构在过江段土压模式下掘进速率显著提高, 相比于泥水模式, 土压平衡模式在掘进过程中, 刀盘扭矩数值变化不大, 总推力明显降低, 刀盘转速下降, 由此可见, 相对于泥水模式, 土压模式在过江段泥岩地层具有更好的掘进适应性。

3.6 双模盾构各复合地层掘进参数建议范围

基于五一新区间右线所穿越的复合地层类型, 结合南宁地铁二号线、三号线下穿邕江在相同复合地层施工案例中的掘进情况, 提出在五一新区间右线所穿越的复合地层条件下, 双模式盾构刀盘扭矩、

表 5 双模式盾构各复合地层掘进参数取值参考范围

Table 5 Reference ranges of driving parameters for composite strata of dual-mode shield

复合地层类型	掘进速率/(mm·min ⁻¹)	刀盘扭矩/(kN·m)	总推力/kN	刀盘转速/(r·min ⁻¹)
粉土、粉细砂	25~55	750~1470	6200~15100	1.2~1.3
粉细砂、圆砾	20~50	850~2350	9100~17000	1.0~1.4
圆砾、粉砂质泥岩	5~40	790~3300	8000~30000	0.8~1.5
粉砂质泥岩、泥质粉砂岩	5~50	690~3354	11200~21000	1.2~1.5
全断面圆砾	5~50	470~2500	12100~25000	1.2~1.5
粉土、圆砾	10~48	960~2480	6700~22000	1.0~1.5

总推力和刀盘转速的合理控制范围，为南宁地铁采用双模盾构穿越相关复合地层时的掘进参数选取提供参考建议，具体数值范围见表 5。

耗量。

4 能耗参数对比分析

4.1 盾尾油脂消耗分析

对比左线泥水盾构及右线双模盾构，根据盾尾油脂消耗随地层的变化可知，除过江段外，双模盾构在其他复合地层油脂消耗量较泥水盾构稍低，双模盾构在粉土、圆砾复合地层中盾尾油脂消耗减少最为明显，相较于左线泥水盾构 28.03 kg/环，右线双模盾构下降至 21.76 kg/环，相比减少了 22.37%。

由于右线过江段在粉砂质泥岩、泥质粉砂岩复合地层中进行了 14 次模式转换，在泥水模式切换至土压模式之前，需要用盾尾油脂将前隔板所有泥浆管路进行封堵，以避免启动土压模式后渣土将管口堵塞的风险，右线在此阶段的盾尾油脂消耗量为 30.42 kg/环，相较于左线油脂消耗量高出 15.3%。

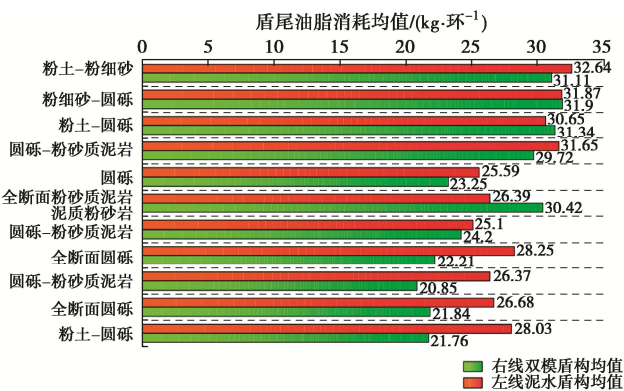


图 12 双模/泥水各地层盾尾油脂消耗对比

Fig. 12 Comparison of tail grease of dual-mode and slurry shield

不同平衡模式下的盾尾油脂消耗量见图 13。经过统计可得，土压模式下的盾尾油脂平均消耗量为 21.61 kg/环，泥水模式下为 23.76 kg/环，泥水模式消耗稍高，主要是原因转换时需要向进入泥水仓内的管路注入盾尾油脂，增加了泥水模式的盾尾油脂消

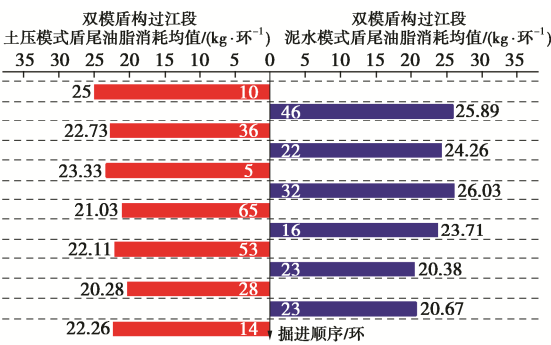


图 13 过江段不同模式盾尾油脂消耗对比

Fig. 13 Comparison of tail grease of different modes of dual-mode shield

4.2 盾构水消耗分析

左右线掘进不同地层的水消耗如图 14 所示。根据不同地层水消耗的情况，在软土中耗水量较低，主要和地层掘进效果良好有关。而在圆砾-粉细砂泥岩地层中，左线泥水盾构遇到掘进难度加大的情况，所以用水量突然增大。而双模盾构整体用水量变化更加平稳。

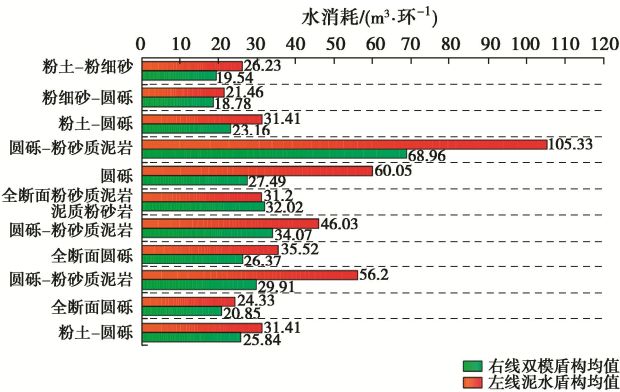


图 14 双模/泥水各地层水消耗对比

Fig. 14 Comparison of water consumption of dual-mode and slurry shield

过江段不同模式下的耗水量见图 15。统计分析右线不同模式下的水消耗量，泥水模式下水消耗量

均值为 35.73 m³/环，土压模式下水消耗量均值为 19.98 m³/环，相比泥水模式减少 78.83%。主要原因是泥水模式下通过泥浆循环排渣系统用水量较大，而土压模式直接使用螺旋排渣系统排渣土，水消耗较少。

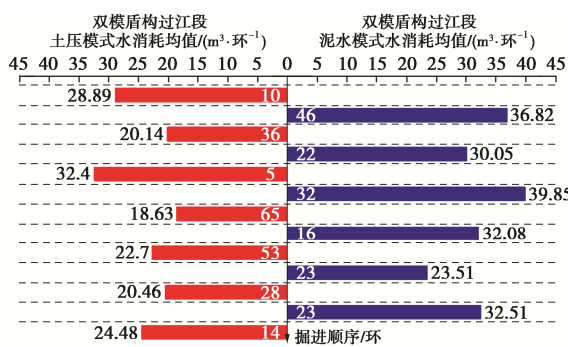


图 15 过江段不同模式水消耗对比

Fig. 15 Comparison of water consumption of different modes of dual-mode shield

4.3 盾构电能消耗分析

左右线掘进不同地层的电能消耗如图 16 所示。由图 16 可知，右线在复合地层掘进过程中的电能消耗普遍低于左线。电能消耗随地层变化规律相似，在粉土、粉细砂复合土层中盾构机保持较低转速和较低扭矩即可保持较大贯入度，掘进效果良好，所以耗电量明显较低。在圆砾-粉砂质泥岩复合地层中，由于地层强度增大，刀盘转速、扭矩和总推力都有大幅度提升，同时实际掘进速率依然偏低，导致盾构耗电量突增。

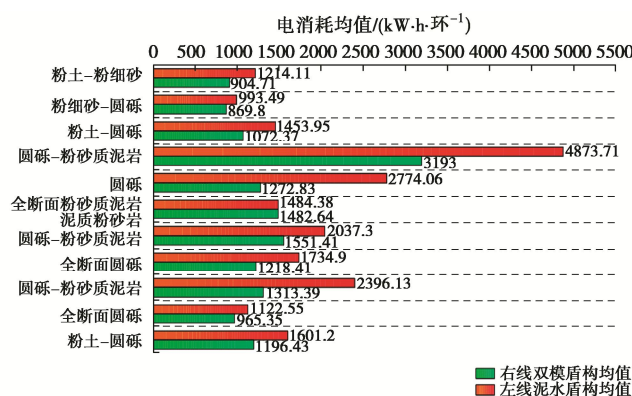


图 16 双模/泥水各地层电能消耗对比

Fig. 16 Comparison of electricity consumption of dual-mode / slurry shield

不同模式的电能消耗对比见图 17。经统计，泥水模式下盾构施工的电能消耗为 1559.81 kW·h/环，土压模式为 950.36 kW·h/环，相对于泥水盾构减少 39.07%，节能效果显著。

4.4 左、右线对比和过江段不同模式能耗总结

针对隧道所处的复合地层，统计分析左、右线掘进的能源消耗均值及相较于右线的节能效果见表 6，可知，相对于泥水盾构，双模盾构盾尾油脂消耗、水消耗、电消耗均有不同程度的降低，节能效果分别达到 7.87%，30.32%，30.67%。

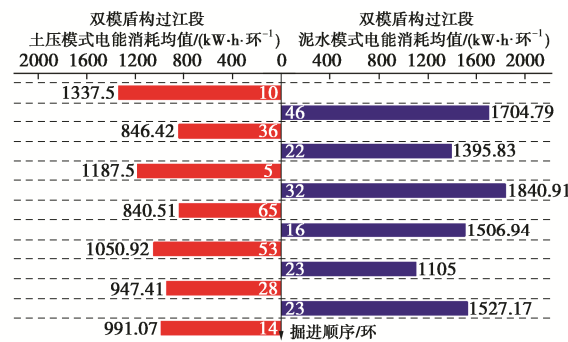


图 17 过江段不同模式电能消耗对比

Fig. 17 Comparison of electricity consumption of different modes of dual-mode shield

表 6 隧道全段左右线能耗均值对比

Table 6 Comparison of mean values of energy consumption between left and right lines

盾构类型	盾尾油脂消耗 /(kg·环 ⁻¹)	水消耗 /(m ³ ·环 ⁻¹)	电消耗 /(kW·h·环 ⁻¹)
泥水盾构	28.47	42.65	1971.43
双模盾构	26.23	29.72	1367.30
节能效果	7.87%	30.32%	30.64%

在过江段区间，总结右线在采用不同平衡模式下 3 个主要能源指标的损耗特点，分析发现在过江段使用土压模式掘进具有更好的节能效果，相比于泥水平衡模式，土压平衡模式在盾尾油脂消耗、水消耗、电消耗方面的节能效果分别达到 9.05%，44.08%，39.07%，统计结果见表 7。

表 7 过江段右线不同模式能耗均值对比

Table 7 Comparison of energy consumption mean values of different modes of right line

平衡模式	盾尾油脂消耗 /(kg·环 ⁻¹)	水消耗 /(m ³ ·环 ⁻¹)	电消耗 /(kW·h·环 ⁻¹)
泥水模式	23.76	35.73	1559.81
土压模式	21.61	19.98	950.36
节能效果	9.05%	44.08%	39.07%

5 结 论

依托南宁市轨道交通 5 号线五一新区间盾构隧道工程，论述了双模式盾构的选型依据，并基于复合地层条件下的盾构现场掘进试验，采集了现场大量掘进

参数和能源消耗数据。借助数理统计方法,分析了双模盾构在长段软硬交替复合地层环境下掘进参数的变化规律,并与左线泥水盾构的掘进效能、能源消耗进行对比,主要得出以下3点结论。

(1) 双模式盾构在复合地层体现了良好的适应性:始发段处于粉土、粉细砂、圆砾组成的复合地层中,隧道埋深较浅且下穿越浅基础老旧建筑物,故采用泥水平衡模式减少对地层的扰动,始发段完成掘进后建筑物沉降累计量 -11 mm ;在过江段所在的全断面粉砂质泥岩和泥质粉砂岩复合地层渗透低且黏粒含量高,双模盾构实现快速模式转换,土压模式的使用有效规避了泥水模式易结泥饼的风险。

(2) 针对过江段,两线采用工法不同,左、右线在过江段泥岩和分布粉砂岩地层中,右线掘进速率显著高于左线:左线泥水盾构平均掘进速率为 $13.15\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,右线双模盾构为 $37.01\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,较左线速率提高了 181.44% ,可见过江段土压模式的使用显著提高了掘进速率,表明双模式盾构在针对复合地层的掘进时具有显著优势。

(3) 右线双模盾构在整个区间范围内,平均每环隧道相比左线泥水盾构盾尾油脂消耗减少 7.87% 、水资源消耗减少 30.32% ,电能消耗减少 30.64% ,表明对于复合地层而言,双模盾构在能耗方面优于单模式盾构。

参考文献:

- [1] 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 - 1244, 1260. (LI Jun-wei, LI Li-qin, LÜ Pei-yin. Risk analysis on shield type selection at compound stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(S1): 1241 - 1244, 1260. (in Chinese))
- [2] 竺维彬,王 晖,鞠世健. 复合地层中盾构滚刀磨损原因分析及对策[J]. 现代隧道技术, 2006(4): 72 - 76, 82. (ZHU Wei-bin, WANG Hui, JU Shi-jian. Analysis and Countermeasure of the abrasion of shield hob in compound stratum[J]. Modern Tunneling Technology, 2006(4): 72 - 76, 82. (in Chinese))
- [3] 袁敏正,鞠世健,竺维彬. 广州地铁一号线和二号线盾构机适应性研究与探讨[J]. 现代隧道技术, 2004(3): 31 - 34, 39. (YUAN Min-zheng, JU Shi-jian, ZHU Wei-bin. Research and discussion on adaptability of shield machine for Guangzhou Metro Line 1 and Line 2[J]. Modern Tunneling Technology, 2004(3): 31 - 34, 39. (in Chinese))
- [4] 张厚美,吴秀国,曾伟华. 土压平衡式盾构掘进试验及掘进数学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5762 - 5766. (ZHANG Hou-mei, WU Xiu-guo, ZENG Wei-hua. Study on tunneling experiment and mathematical model of EPB shield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5762 - 5766. (in Chinese))
- [5] 韦良文,张庆贺,邓忠义. 大型泥水盾构隧道开挖面稳定机理与应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 87 - 91. (WEI Liang-wen, ZHANG Qing-he, DENG Zhong-yi. Study on the stability mechanism and application of the excavation face of large slurry shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 87 - 91. (in Chinese))
- [6] 谭忠盛,洪开荣,万姜林,等. 软硬不均地层复合盾构的研究及掘进技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3945 - 3952. (TAN Zhong-sheng, HONG Kai-rong, WAN Jiang-lin, et al. Study on composite shield and construction technique in complex uneven strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3945 - 3952. (in Chinese))
- [7] 王为乐. 长沙地铁复合地层盾构选型与掘进参数研究[D]. 长沙:中南大学, 2012. (WANG Wei-le. Study on Shield Type Selection and Driving Parameters of Changsha Metro Complex Stratum[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese))
- [8] 孟德鑫,谭忠盛,李 涛. 大直径土压平衡盾构掘进参数对比试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 45(增刊 1): 444 - 448. (MENG De-xin, TAN Zhong-sheng, LI Tao. Comparative test and research on excavation parameters of large diameter EPB shield[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 45(S1): 444 - 448. (in Chinese))
- [9] 李 正. 深圳复合地层 $\phi 7\text{m}$ 盾构掘进参数与地层相关性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016. (LI Zheng. Correlation Study between Tunneling Parameters of $\phi 7\text{m}$ EPB TBM and Geotechnical Properties of Shenzhen's Complex Stratum[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [10] 梁桥欣,魏 礼,何 省. 南宁地铁复合地层盾构施工关键技术[J]. 铁道建筑, 2017, 57(10): 67 - 70. (LIANG Qiao-xin, WEI Li, HE Xing. Key Technology of nanning subway shield construction in composite strata[J]. Railway Engineering, 2017, 57(10): 67 - 70. (in Chinese))
- [11] 占传忠. 复合地层盾构的适应性及掘进参数的关联性分析[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(增刊 1): 101 - 108. (ZHAN Chuan-zhong. Relevance analysis of composite strata shield tunneling adaptability and tunneling parameters[J]. Coal

- Geology of China, 2018, **30**(S1): 101 - 108. (in Chinese))
- [12] 门燕青, 王永军, 周建国, 等. 济南复合地层土压平衡盾构掘进效能实测分析[J]. 土木工程学报, 2019, **52**(8): 110 - 119. (MEN Yan-qing, WANG Yong-jun, ZHOU Jian-guo, et al. Measurement and analysis on EPB shield machine tunneling efficiency in jinan composite stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, **52**(8): 110 - 119. (in Chinese))
- [13] 杨 旻, 谭忠盛, 彭 斌, 等. 富水圆砾地层土压平衡盾构掘进参数优化研究[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(增刊 1): 94 - 98. (YANG Yang, TAN Zhong-sheng, PENG Bin, et al. Study on optimization boring parameters of earth pressure balance shield in soaked round gravel strata[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(S1): 94 - 98. (in Chinese))
- [14] 凌 波, 史雪珊. 国内首台泥水、土压双模式盾构机的设计[J]. 中国科技投资, 2014(6): 58. (LING Bo, SHI Xue-shan. Design of the first slurry and EPB dual-mode shield machine in China[J]. China Venture Capital, 2014(6): 58. (in Chinese))
- [15] 凌 波, 吴启光. 一种双模式盾构机实用新型专利:ZL201220602041. 4[P]. 2013-06-05[2019-05-13]. (LING Bo, WU Qi-guang. A Utility Model Patent of Dual-Mode Shield Machine: ZL201220602041. 4[P]. 2013-06-05[2019-05-13]. (in Chinese))
- [16] 赖理春. 浅谈双模式盾构施工模式的选取[J]. 建筑机械化, 2016, **37**(2): 48. (LAI Li-chun. Select of the double model shield construction[J]. Construction Mechanization, 2016, **37**(2): 48. (in Chinese))
- [17] 管会生, 张 珺, 杨延栋. 新街台格庙矿区斜井隧道双模式盾构关键掘进参数配置研究[J]. 隧道建设, 2015, **35**(4): 377. (GUAN Hui-sheng, ZHANG Yu, YANG Yan-dong. Study on key boring parameters of dual-mode shield used for inclined shaft of Xinjie Taigemiao Mines[J]. Tunnel Construction, 2015, **35**(4): 377. (in Chinese))
- [18] 周玉标. 双模式盾构下穿岩溶发育区高速公路施工技术[J]. 建筑机械化, 2016, **37**(5): 42. (ZHOU Yu-biao. Application of dual mode shield in highway construction in karst development area[J]. Construction Mechanization, 2016, **37**(5): 42. (in Chinese))
- [19] 刘 东. TBM&EPB 双模式盾构复合地层施工关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (LIU Dong. Study on the Key Technology of TBM & EPB Double Mode Shield Construction in Composite Stratum[D]. Chengdu: South West Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [20] 朱劲锋, 廖鸿雁, 袁守谦, 等. 并联式泥水/土压双模式盾构施工技术与冷冻刀盘开舱技术的创新与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2019, **39**(7): 1187 - 1200. (ZHU Jin-feng, LIAO Hong-yan, YUAN Shou-qian, et al. Innovation and practice of parallel dual-mode slurry/EPB shield construction technology and freezing cutterhead opening technology[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(7): 1187 - 1200. (in Chinese))

彩色插图索引

Doi: 10.11779/CJGE202101003 一文彩色插图	(后插 1)
Doi: 10.11779/CJGE202101005 一文彩色插图	(后插 1)
Doi: 10.11779/CJGE202101006 一文彩色插图	(后插 2)
Doi: 10.11779/CJGE202101010 一文彩色插图	(后插 2)
Doi: 10.11779/CJGE202101012 一文彩色插图	(后插 2)
Doi: 10.11779/CJGE202101015 一文彩色插图	(后插 4)
Doi: 10.11779/CJGE202101017 一文彩色插图	(后插 2)
Doi: 10.11779/CJGE202101019 一文彩色插图	(后插 3)
Doi: 10.11779/CJGE202101021 一文彩色插图	(后插 3)
Doi: 10.11779/CJGE202101023 一文彩色插图	(后插 3)