

文章编号: 1005-0523(2023)02-0016-06



不同开口率下盾构机刀盘与开挖面相互作用试验研究

胡光静, 袁岳峰, 余 昆

(中铁广州工程局集团有限公司, 广东 广州 511457)

摘要: 开口率是盾构机刀盘的重要结构参数, 其大小直接关系到刀盘与开挖面的相互作用。通过设计 1:10 的模型试验, 实现了刀盘开口率可调及渣土实时称量, 从而间接地实现了对土仓饱满度的控制。试验研究分析表明: 在实际出土率与理论出土率相等的条件下, 增大刀盘开口率可减小刀盘面而与开挖面的接触面, 从而减小刀盘扭矩, 刀盘开口率增大了 10%, 刀盘扭矩减小约 5.8%; 在相同的出土率时, 刀盘的开口率对地表最大沉降影响不显著; 而在土仓近似满仓状态下, 刀盘空隙上的渣土对开挖面可起的支护作用。

关键词: 盾构隧道; 盾构施工; 刀盘扭矩; 刀盘开口率; 地表沉降

中图分类号: U452

文献标志码: A

本文引用格式: 胡光静, 袁岳峰, 余昆. 不同开口率下盾构机刀盘与开挖面相互作用试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(2): 16-21.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20230330.002

Experimental Study on the Interaction Between Excavation Face and Cutter Head of Shield Tunneling Machine with Different Opening Rate

Hu Guangjing, Yuan Yuefeng, Yu Kun

(China Railway Guangzhou Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 511457, China)

Abstract: The opening rate is an important structural parameter of the shield machine cutter, and its size is directly related to the interaction between the cutter and the excavation surface. By designing a 1:10 model test, it realizes adjustable opening rate of cutter and real time weighing of residue, thus indirectly realizing the control of soil chamber fullness. The study analysis showed that under the condition that the actual rate of excavation is equal to the theoretical rate of excavation, increasing the rate of cutter opening can reduce the contact surface between the cutter surface and the excavation surface, thus reducing the cutter torque, showing a 10% increase in cutter opening rate and an approximate 5.8% reduction in cutter torque. At the same emergence rate, the opening rate of the cutter has no significant effect on the maximum settlement of the ground surface. The slag soil on the cutter gap can have the support effect on the excavation surface when the soil compartment is nearly full.

Key words: shield tunnel; shield construction; cutter head torque; opening rate; ground surface settlement

Citation format: HU G J, YUAN Y F, YU K. Experimental study on the interaction between excavation face and cutter head of shield tunneling machine with different opening rate[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(2): 16-21.

收稿日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078213), 江西省杰出青年基金项目(20192AGBL21003)

盾构机刀盘是与开挖面直接相互作用的结构,而开口率是盾构机刀盘的重要结构参数,其大小直接关系到刀盘扭矩大小,以及刀盘对开挖面的支护作用,而现有的刀盘开口率主要根据地层的自稳能力确定,而对刀盘扭矩的影响考虑较少。土压平衡掘进施工过程中,刀盘扭矩的组成包括:①刀盘正面、侧面与土体之间的摩阻力扭矩;②刀盘切削土体时的地层抗力扭矩;③刀盘和搅拌叶片的搅拌扭矩;④刀具所受到的摩阻力扭矩;⑤密封引起的摩阻力扭矩;⑥轴承引起的摩阻力扭矩;⑦减速装置摩擦损失的扭矩^[1]。其中,①②③为刀盘扭矩的主要组成部分。刀盘正面与土体之间的摩阻力扭矩作为影响刀盘扭矩大小的主要成分,影响其因素可分为土体重力密度侧土压力系数等土层参数因素,与刀盘开口率、盾构掘进机外径等盾构机参数因素。其中,可通过人为控制盾构机参数因素,来影响刀盘扭矩大小,使其保持在合理的范围内。有必要对盾构机参数因素与刀盘扭矩间的影响关系进行研究,从而达到控制刀盘扭矩大小的效果。

王洪新^[1-2]对现场调研与数值仿真模型试验数据进行分析,认为刀盘开口率影响土舱与刀盘开口处的压力差,得到了压力差随刀盘开口率减小而减小的结论。欧阳凯等^[3-5]基于泥水平衡盾构法实际工程背景,分析了刀盘开口率与刀盘转速、刀盘扭矩、掘进速度等多个盾构掘进参数的影响关系,并对影响因素敏感度进行了评价。江华等^[6-10]从地层参数的角度,基于施工现场试验数据,分别分析了顶推参数、刀盘参数以及螺旋输送机参数等,模拟不同开口率对掘进速度与地表沉降的影响,分析了刀盘参数对不同地层的适用性。王俊等^[11-13]通过理论分析、数值模拟等方法,推导出刀盘掘进对开挖面稳定的削弱程度与刀盘开口率有关。田怀文等^[14-16]从盾构参数控制的角度来考虑盾构掘进对地表沉降的影响,未考虑刀盘开口率这一参数对开挖面稳定性的影响。针对盾构掘进现场原位试验条件困难的问题,金大龙等^[17-19]阐述了盾构隧道研究在模型试验的现有优势,并通过模型试验的方法研究了刀盘开口率对刀盘挤土效应和刀盘扭矩的影响关系。牛西龙等^[20-21]提出了刀盘扭转率来反映刀盘开口率与刀盘扭矩间的相互作用,认为刀盘扭矩应大于刀盘开口率70%。

从现有研究分析可知,与盾构参数掘进参数相

关的现场原位试验研究众多,但由于现场原位试验条件复杂,地层相关影响因素繁多,无法进行影响参数定量化研究,盾构参数间影响关系的相关理论研究应用困难,导致刀盘开口率与刀盘扭矩在地表沉降的影响机制并不明晰。为进一步探明盾构机刀盘开口率对开挖面的影响,通过设计几何相似比为1:10的模型试验,开展刀盘开口率对刀盘扭矩及地表沉降的影响,并结合试验结果阐明影响机制。

1 试验简介

1.1 盾构施工模拟系统

为了分析刀盘开口率对开挖面的影响,通过开率室内模型试验,所用模型盾构机设计尺寸按照1:10的几何相似比计算所得,考虑国内单洞单线地铁盾构隧道直径一般不小于6 m,不超过6.8 m,而所采用的盾构机尺寸参数,也受限于实际盾构隧道直径要求,较所施工隧道直径普遍大0.2~0.3 m。按盾壳外径7 m的盾构机计算,本试验所使用的模型盾构机盾壳外径0.7 m,刀盘外径为0.71 m,长度1.2 m。本模型盾构机开口处采用可拆卸式转动闸板,用以不同开口率刀盘盾构施工模拟。与实际盾构施工系统相似,本试验施工模拟系统中,盾构机内部土仓连接有渣土输送带,仓内渣土通过螺旋输送机输出至传送带,最后送至存土箱中。

施工装置两侧对称安装有千斤顶,其中盾构机尾端与始发架相连接,始发架中心与千斤顶前端相连接,而千斤顶后端则安装有反力架。始发架与反力架均安装在纵梁上,二者可在纵梁上水平滑动,其中始发架与纵梁间设置有减磨滑轮,纵梁上装有防滑销钉。实际模拟施工时,销钉可在盾构机顶推为反力架提供阻力,从而实现盾构机掘进的效果。纵梁前端与土箱连接,盾构刀盘液压马达、螺旋输送机液压马达、顶推千斤顶的动力均由液压动力站提供。

1.2 试验步骤

为了方便切割圆孔,土箱的盾构始发侧采用3 cm厚复合木板,木板上部采用3 cm厚有机玻璃板;土箱其他三面均采用3 cm厚有机玻璃板。土箱内部长76 cm(盾构机前进方向),宽82.5 cm,高107.5 cm,试验时盾壳顶部的覆土厚度约为30 cm。

填土采用砂土,为了防止螺旋输送机的螺旋轴被卡,通过过滤筛剔除 10 mm 以上的大颗粒,试验用砂土的级配曲线如图 1 所示,试验时含水量约 6.5%,密度约为 $1\ 663\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。试验时在盾构机顶推方向中轴线位置布设 8 个沉降标,每推进一环(几何相似比为 1:10,实际中一环为 120 cm,所以试验时的一环为 12 cm)记录一次地表沉降,每次试验顶推 5 环(共 60 cm)。

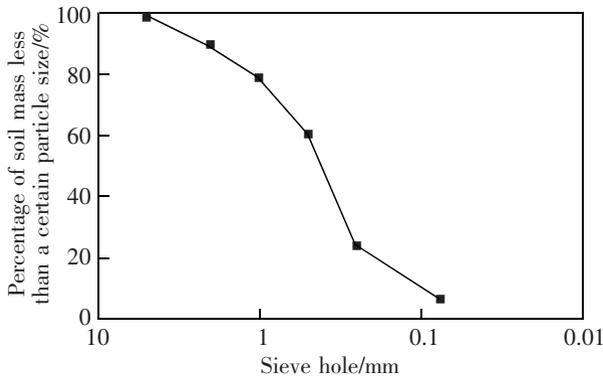


图 1 填土级配曲线

Fig.1 Fill grading curve

在往土箱内填土时,在吊车挂钩上放置挂称,对填土进行称量,从而控制填土密度。渣土通过输送带输出,并将尾端的接土箱放在称盘上,在盾构机始发架的纵梁上贴有标尺;在土箱顶部安装沉降标尺,试验过程中均通过摄像头对数据进行监测记录。盾构机的刀盘、螺旋输送机、顶推均通过触摸控制屏进行控制,同时对刀盘的转速与扭矩、螺旋输送机的转速与扭矩、顶推力进行数据采集与记录。

2 试验结果分析

2.1 刀盘开口率对刀盘扭矩的影响

以单位掘进距离的渣土实际输出质量与理论输出质量的比值作为出土率,即

$$\xi = \frac{Q_a}{Q_t}$$

式中: ξ 为出土率; Q_a 为渣土实际输出质量; Q_t 为渣土理论输出质量。

根据盾构机每掘进 1 cm 对应的切削土体体积计算,对应的理论单位掘进距离(1 cm)的渣土输出质量约为 6.4 kg,为此在试验时以控制每掘进 1 cm 渣土输出质量为 6.4 kg 进行试验,即出土率为 1。

试验基于不同刀盘开口率下,研究盾构施工阶段刀盘扭矩的变化规律。盾构掘进始发后,盾构机

控制端平均每 2 s 记录下一次刀盘扭矩参数值,试验结果如图 2 所示。两组对照试验所采用刀盘开口率分别为 25%、35%。每次顶推 0.5 cm,出土质量达到 3.2 kg 后再继续下一次顶推。因顶推千斤顶在伸出时速度较快,每次顶推 0.5 cm 的过程中,刀盘与开挖面接触应力迅速增大;而在顶推千斤顶停止伸出时,随着刀盘对开挖面的切削及渣土输出,刀盘与开挖面接触应力逐渐减小,图 2 中的刀盘扭矩呈现出较大的波动。

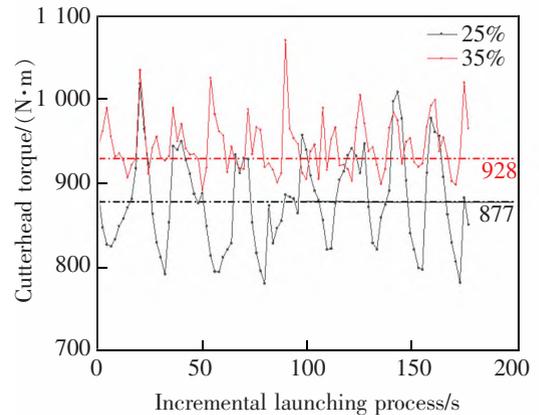


图 2 不同开口率刀盘掘进时扭矩变化

Fig.2 Variation of torque when cutting with different opening rates

当开口率达到 25%,顶推时的刀盘扭矩大小范围为 890~1 073 N·m,刀盘扭矩均值为 928 N·m,且绝大部分时刻的瞬时刀盘扭矩不低于 900 N·m;而当开口率达到 35%,盾构机掘进顶推阶段的刀盘扭矩为 780~1 007 N·m,刀盘扭矩均值为 877 N·m,且大部分时刻的瞬时刀盘扭矩小于 900 N·m。由此可见,在出土率相同的条件下,增大刀盘开口率时,刀盘扭矩整体呈现增大趋势。由标准差计算可知,当刀盘开口率 35%,刀盘扭矩数据更加离散;当开口率为 25%时,刀盘扭矩变化更加稳定。在本缩尺试验中,由两组刀盘扭矩均值计算可知,在实际出土率与理论出土率相等的条件下,增大刀盘开口率可减小刀盘面而与开挖面的接触面,从而减小刀盘扭矩,刀盘开口率增大了 10%,刀盘扭矩减小约 5.8%。

出土率为 1,土舱近似满舱状态进行掘进,刀盘开口率越大,刀盘面与开挖面的接触面积越小;土舱内的渣土与开挖面的接触面积越大,刀盘面与开挖面的摩擦力要大于舱内的渣土与开挖面的摩擦力。增大刀盘开口率可减小刀盘扭矩。

2.2 刀盘开口率对地表沉降的影响

图 3、图 4 分别为不同开口率刀盘掘进下地表沉降曲线,图示相邻环开挖面间距 12 cm,当沉降值为负值时,表示掘进对应地表持续沉降。如图 4 所示,刀盘开口率为 25% 时,掘进始发阶段,各环开挖面对应的地表沉降保持稳定状态,而在依次完成第 1 环至第 5 环的掘进开挖过程中,地表沉降最大值分别为 0.14、0.52、1.10、1.87、2.70 mm。前 2 环掘进完成时,地表最大沉降发生在距始发口约 16 cm 处;第 5 环掘进完成时,地表呈现明显的整体沉降趋势,最大沉降发生在距始发口约 30 cm 处。可见,随掘进深入,先后依次完成各环掘进时产生的最大地表累计沉降增大明显,最大累计沉降发生点距始发口距离略有增大。

图 4 所示为刀盘开口率为 35% 时的地表沉降

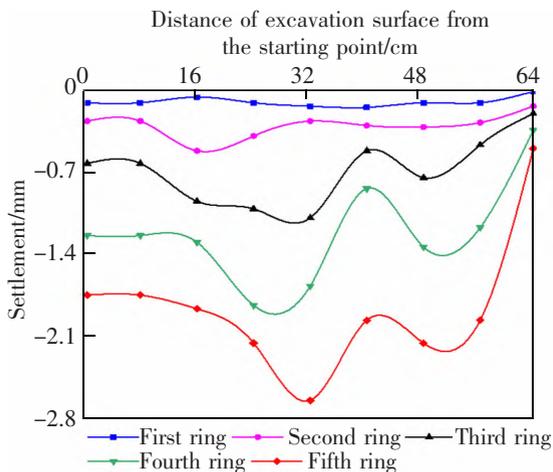


图 3 开口率 25% 下的地表沉降

Fig.3 Surface settlement at the opening rate of 25%

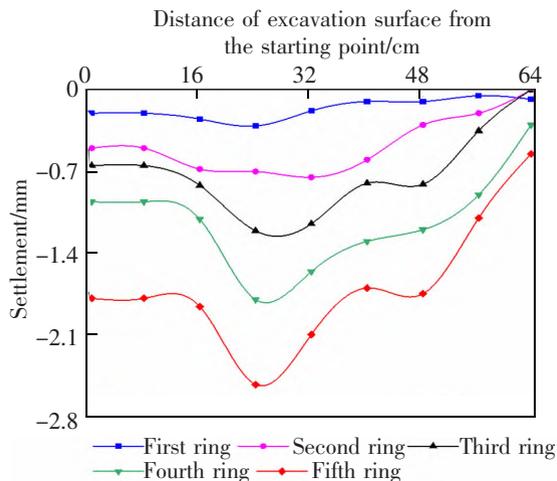


图 4 开口率 35% 下的地表沉降

Fig.4 Surface settlement at the opening rate of 35%

曲线。当盾构机依次完成对第 1 环至第 5 环的土体顶推掘进时,所对应地表累积最大沉降值分别为 0.31、0.75、1.21、1.80、2.53 mm。掘进初始阶段,各环开挖面对应的地表沉降保持稳定状态;在完成第一环掘进开挖后,地表开始出现隆起现象,且隆起值随进一步开挖而增大,过程约持续至第 3 环掘进完成。且在完成第 3 环的掘进后,地表出现 2 次隆起,隆起值小于第 1 次隆起最大值;在第 4 环完成掘进后,地表出现二次沉降。

相较于图 3、图 4,各环地表最大沉降差值分别为 0.17、0.23、0.11、-0.07、-0.17 mm。可知,当刀盘开口率由 25% 增大至 35% 时,前 3 环掘进过程中引起的地表沉降随之增大,且在第 2 环掘进完成时表现最为明显,而在对第 4 环、第 5 环掘进时,地表沉降反之出现减小的现象。

基于本次试验时土舱饱满度高,尽管试验的地层土体为松散砂土,在土舱近似满舱状态下,刀盘空隙上的渣土对开挖面可起的支护作用。本次试验所使用的模型盾构机盾壳外径 0.7 m,刀盘外径为 0.71 m,即刀盘开挖直径稍大于盾壳外径 1 cm。尽管出土率为 1,但仍然发生了一定的地表沉降。

3 结论

1) 在几何相似比为 1:10 的模型试验中,通过模型盾构机的刀盘上设计闸板,实现了刀盘开口率可调;通过对渣土实时称量,从而间接地实现了对土舱饱满度的控制。

2) 本次试验研究表明,在实际出土率与理论出土率相等的条件下,增大刀盘开口率可减小刀盘与开挖面的接触面积,从而减小刀盘扭矩,刀盘开口率增大 10%,刀盘扭矩减小约 5.8%。

3) 在实际出土率与理论出土率相等的条件下,因盾构机土舱近似满舱状态,刀盘开口率对地表最大沉降影响不显著,即刀盘面板对开挖面的支护效果并不明显。

4) 刀盘开口率对开挖面影响分析表明,在土舱饱满度较低时,刀盘面板对松散地层的开挖面可起到良好的支护作用;而在土舱近似满舱状态下,刀盘空隙上的渣土对开挖面可起的支护作用。

参考文献:

- [1] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率对土舱压力的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 89-93.
WANG H X. Influence of aperture ratio of cutterhead of EPB shield on earth pressure in the chamber[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 89-93.
- [2] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率选型及其对地层适应性研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 88-92.
WANG H X. Type selection of the head aperture ratio of EPB shield cutterheads and adaptability to stratum characteristics[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 88-92.
- [3] 欧阳凯, 叶蕾, 姜礼杰, 等. 泥水盾构刀盘开口率设计影响分析与研究[J]. 建筑机械化, 2019, 40(8): 47-49.
OUYANG K, YE L, JIANG L J, et al. Analysis and research on design influence of opening rate of mud shield cutter head[J]. Construction Mechanization, 2019, 40(8): 47-49.
- [4] 陈强. 刀盘开口率影响的盾构开挖面稳定特性及影响因素敏感度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
CHEN Q. Research on the stability characteristics of shield excavation surface and the sensitivity of influencing factors affected by cutterhead opening rate[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [5] 姜来. 软土大直径泥水盾构常压与带压刀盘针对性设计及改进技术[J]. 中国水运, 2022, 22(7): 64-66.
JIANG L. Targeted design and improvement technology of atmospheric pressure and pressurized cutterhead of soft soil large-diameter slurry shield machine[J]. Water Transport in China, 2022, 22(7): 64-66.
- [6] 江华, 江玉生, 张晋勋, 等. 北京地铁砂卵石地层土压平衡盾构施工刀盘扭矩研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 59-65.
JIANG H, JIANG Y S, ZHANG J X, et al. Research on cutterhead torque during earth pressure balance shield tunneling in sand gravel strata of beijing metro[J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 59-65.
- [7] 白云飞, 刘昊运, 张志强, 等. 盾构刀盘开口率对富水粉细砂层地表沉降的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 108-114.
BAI Y F, LIU H Y, ZHANG Z Q, et al. Effect of metro shield cutter-head aperture rate on ground surface subsidence of water-rich silty fine sand layer[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 108-114.
- [8] 尹苏江, 严仕舜, 裴柏铮, 等. 岩质地层盾构掘进施工控制参数分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 218-223.
YIN S J, YAN S S, PEI B Z, et al. Analysis of construction control parameters in rock shield-driven tunnelling[J]. modern tunnelling technology, 2021, 58(4): 218-223.
- [9] 方超刚, 李亮, 王泽明. 复合地层大直径顶管施工技术及时地层变形控制研究[J]. 云南水力发电, 2021, 37(10): 45-49.
FANG C G, LI L, WANG Z M. Research on construction technology of large diameter pipe jacking in composite stratum and stratum deformation control[J]. Yunnan Water Power, 2021, 37(10): 45-49.
- [10] 傅鑫晖, 莫涛, 张晨, 等. 复合地层盾构机刀盘结泥饼成因及预防措施[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 864-869.
FU X H, MO T, ZHANG C, et al. Formation and precautions of mud cakes in mixed strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 864-869.
- [11] 王俊, 王闯, 何川, 等. 砂卵石地层土压盾构掘进掌子面稳定性室内试验与三维离散元仿真研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3038-3046.
WANG J, WANG C, HE C, et al. Heading stability analysis of EPB shield tunnel in sandy cobble ground using laboratory test and 3D DEM simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 3038-3046.
- [12] 王俊, 何川, 王闯, 等. 砂土地层土压盾构隧道施工掌子面稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 177-185.
WANG J, HE C, WANG C, et al. Face stability analysis of EPB shield tunnel in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 177-185.
- [13] 黄大维, 冯青松, 唐柏赞. 圆形盾构隧道水土压力表示与计算半径取值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 57-63.
HUANG D W, FENG Q S, TANG B Z. Analysis on expression method of surrounding pressure and value of calculation radius of circular shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 57-63.
- [14] 田怀文, 梁铃, 布申申. 盾构刀盘数字化集成设计研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(3): 127-134.
TIAN H W, LIANG L, BU S S. Study on digital integrated design of shield cutter head[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(3): 127-134.
- [15] 刘丹娜, 周勋, 王伟, 等. 砂卵石地层盾构区间地表沉降变化规律及参数控制研究[J]. 公路, 2022, 67(8): 410-416.
LIU D N, ZHOU X, WANG W, et al. Study on the variation law and parameter control of ground surface settlement in shield interval of sand and pebble strata[J]. Highway, 2022, 67(8): 410-416.

67(8):410-416.

- [16] 杨旸,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(S1):94-98.
YANG Y,TAN Z S,PENG B,et al. Study on optimization boring parameters of earth pressure balance shield in water-soaked round gravel strata[J]. China Civil Engineering Journal,2017,50(S1):94-98.
- [17] 金大龙,袁大军,李兴高.盾构刀盘开口率对掘进参数影响的模型试验研究[J].现代隧道技术,2017,54(2):156-162.
WANG D L,YUAN D J,LI X G. Model test of influence of the shield cutterhead aperture ratio on driving parameters [J]. Modern Tunnelling Technology,2017,54(2):156-162.
- [18] 叶飞,何川,王士民.浅析盾构隧道模型试验的现状与发展[J].现代隧道技术,2011,48(1):66-74.
YE F,HE C,WANG S M. Discussion on present situation and development of model test of shield tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology,2011,48(1):66-74.
- [19] 李元海,杜建明,刘毅.隧道工程物理模拟试验技术现状与趋势分析[J].隧道建设,2018,38(1):10-21.
LI Y H,DU J M,LIU Y. State-of-art and development trend of physical simulation experiment technology for tunnel engineering[J]. Tunnel Construction,2018,38(1):10-21.
- [20] 牛西龙.土压平衡盾构地层适应性设计理论和实践研究[J].工程建设与设计,2019(7):230-233.
NIU X L. Study on the design theory and practice of the stratum adaptability of earth pressure balance shield [J]. Construction & Design for Engineering,2019(7):230-233.
- [21] 胡国良,胡爱闽,龚国芳,等.土压平衡盾构地层适应性设计

理论和方法研究[J].中国机械工程,2008(16):1916-1919.
HU G L,HU A M,GONG G F,et al. Study on design theory and method of geology adaptability for earth pressure balanced shield tunneling machine[J]. China Mechanical Engineering,2008(16):1916-1919.



第一作者:胡光静(1985—),男,研究方向为地铁盾构隧道施工技术。E-mail:250854333@qq.com。



通信作者:袁岳峰(1991—),男,研究方向为地铁盾构隧道设计。E-mail:934632518@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)