

DOI: 10.7672/sjgs2025070001

盾构掘进刀具磨损测量模拟试验研究*

张初可

(中铁十八局集团第三工程有限公司, 河北 涿州 072750)

[摘要] 盾构掘进过程中刀具磨损是影响工程成本和工期的关键问题之一,而盾构机的运行参数及土体性质是影响刀具磨损的重要因素。针对这一问题,设计并构建了一种盾构掘进过程试验模拟装置,在试验室条件下模拟隧道掘进过程并研究刀具磨损机制,该装置具有水平操作、低转速运行、刀具与土壤持续接触、实时测量扭矩等功能。试验采用南昌市地铁4号线的土样,通过设置不同的掘进参数,如刀盘转速和贯入率,系统研究了刀具磨损行为。研究结果表明,将刀盘转速从35r/min降低至10r/min,刀具平均磨损减少了63%;掘进时间从80min缩短至10min,刀具磨损减少了58%。此外,随着土样含水量从0%增加到10%,刀具磨损显著增加,而当含水量继续增加至25%时,刀具磨损呈下降趋势。

[关键词] 隧道;盾构;掘进;刀具磨损;运行参数;试验

[中图分类号] U445.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0001-06

Simulation Test Study on Tool Wear Measurement of Shield Tunneling

ZHANG Chuoke

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: Tool wear is one of the key problems affecting engineering cost and construction period during shield tunneling, and the operating parameters of the shield machine and soil properties are important factors affecting tool wear. Aiming at this problem, a test simulation device for the shield tunneling process is designed and constructed to simulate the tunneling process and study the tool wear mechanism under laboratory conditions. The device has the functions of horizontal operation, low-speed operation, continuous contact between tool and soil, real-time measurement of torque, etc. In the experiment, the soil samples of Nanchang Metro Line 4 were used to systematically study the tool wear behavior by setting different tunneling parameters, such as cutter head speed and penetration rate. The results indicate that the average wear of the tool is reduced by 63% when reducing the cutter speed from 35r/min to 10r/min. The excavation duration is shortened from 80minutes to 10minutes, and the tool wear is reduced by 58%. In addition, with the increase of soil moisture content from 0% to 10%, the tool wear increases significantly. However, when the moisture content continues to increase to 25%, the tool wear shows a downward trend.

Keywords: tunnels; shields; excavation; tool wear; operating parameters; tests

0 引言

盾构掘进技术因其具有高效、安全和环保的优势,已经成为现代隧道施工的主流技术,并广泛应用于城市地铁、公路、铁路和水利工程等领域。然而,随着工程规模的扩大和地质条件的复杂化,盾构刀具的磨损问题逐渐引起广泛关注。刀具磨损

不仅直接影响施工效率和成本,还可能对施工安全造成潜在威胁^[1-3]。针对这一问题,国内外学者在刀具磨损机理及其影响因素方面开展了深入研究,试图揭示运行参数、地层特性和环境条件对刀具磨损行为的影响规律,为施工优化提供理论支持。

在盾构掘进过程中,刀具磨损受到多重因素的综合作用。其中,盾构机运行参数如推进速度、刀盘转速和推力对刀具与地层间的摩擦力和剪切力有直接影响^[4]。例如,已有研究表明,适当降低刀

* 中国铁建股份有限公司 2024 年度科技研究开发计划(2024-C1)

[作者简介] 张初可,工程师,E-mail: dengdeng_email@ qq. com

[收稿日期] 2024-12-20

盘转速和控制推进速度可以在一定程度上减少刀具的单位时间磨损,但这可能导致掘进效率下降^[5]。此外,过高或过低的刀盘推力都可能引发异常磨损^[6],如何在施工中实现参数的精准调控是一个重要的技术难题。

地层条件同样是影响刀具磨损的重要因素。土体的颗粒组成、含水量、硬度和矿物成分等特性决定了刀具在掘进过程中的受力状况^[7]。例如,高磨蚀性矿物含量的土体会显著加剧刀具的磨损,而高含水量的土体则可能通过降低摩擦力减轻磨损^[8]。此外,在复合地层中,土体的不均匀性进一步增加了刀具磨损预测的复杂性^[9]。针对这些影响因素,已有研究通过试验和数值模拟的方法尝试揭示其作用规律,但仍存在试验条件与实际工况匹配性不足、模拟模型参数化不够精准等问题。

近年来,实验室模拟装置的应用为研究刀具磨损提供了有力工具。通过模拟盾构机的掘进工况,可以系统研究运行参数与地层条件对刀具磨损的定量影响^[10-12]。然而,现有装置在动态工况模拟和实时监测方面仍有改进空间,同时缺乏对复合地层等复杂条件的综合研究。此外,数值模拟方法如有限元法(FEM)和离散元法(DEM)已被广泛用于刀具磨损的机理研究^[13-15],但其结果的精确性依赖于试验数据的校核。如何将试验研究与数值模拟相结合,构建更具普适性的刀具磨损预测模型仍是当前研究的一个热点方向。

基于以上研究进展和需求,本研究设计并构建了一种盾构掘进过程的实验室模拟装置,旨在系统分析盾构机运行参数与地层条件对刀具磨损的影响。该装置通过模拟盾构机的水平操作和动态掘进工况,能够实现刀具与土体持续接触、低转速运行,并实时测量扭矩和刀具磨损量。本研究以南昌地铁 4 号线的实际土样为研究对象,通过设置不同刀盘转速、贯入率和土体含水量等试验条件,系统探讨刀具磨损的非线性规律和演化机制,为盾构机运行参数的优化和施工效率提升提供理论依据。

1 工程概况

本研究依托工程为南昌市地铁 4 号线七里站—民园路西站区间土建工程,采用土压平衡盾构施工,施工区间左右两线长度均在 2 010m 左右,线间距 12~16m。

该施工区间使用 ZTE6250 复合式土压平衡盾构机,由国内公司自主设计研发,盾构为被动铰接,开挖直径为 6 280mm,刀盘转速为 0~2.4r/min,每分钟最大推进位移为 80mm,最大推力可达

42 570kN,最大扭矩为 6 300kN·m,水平转弯半径为 250m。

根据勘察揭露,南昌市轨道交通 4 号线七里站—民园路西站区间内地层自上而下分别为:①人工填土、③₁ 粉质黏土、③₂ 细砂、③₃ 中砂、③₄ 粗砂、③₅ 砾砂、③₆ 圆砾、⑤₁₋₂ 强风化泥质粉砂岩、⑤₁₋₃ 中风化泥质粉砂岩、⑤₄₋₂ 中风化钙质泥岩。其中,盾构隧道结构穿越地层复杂多变,主要位于③₅ 砾砂、⑤₁₋₃ 中风化泥质粉砂岩,局部位于⑤₁₋₂ 强风化泥质粉砂岩、⑤₄₋₂ 中风化钙质泥岩,各地层主要物理性能如表 1 所示。

表 1 各地层主要物理性能
Table 1 Main physical properties of layers

地层编号	岩层名称	地层描述
③ ₅	砾砂	灰黄色、灰白,石英质为主,含 5%~15% 圆砾及卵石,粒径 1~3cm,颗粒形状以亚圆形为主,级配良好,呈饱和、中密状态,顶面埋藏深度 6.0~31.3m
⑤ ₁₋₂	强风化泥质粉砂岩	成岩矿物显著风化,岩体破碎、岩体基本质量等级为 V 类,顶面埋藏深度 14.0~35.2m
⑤ ₁₋₃	中风化泥质粉砂岩	粉细粒结构,中厚层状构造,泥质胶结为主,局部钙质胶结,岩体基本质量等级为 V 类,岩石遇水易软化,暴晒易崩解,顶面埋藏深度 14.7~38.0m
⑤ ₄₋₂	中风化钙质泥岩	青灰色,泥质粉粒结构,薄~中层状构造,钙质胶结,岩屑成分主要为粉砂,岩石成分结构破坏,少部分矿物质风化变质

盾构长距离掘进“上软下硬”地层,即上部砾砂层,下部强、中风化泥质粉砂岩层,易造成刀盘结泥饼和刀具偏磨,且盾构掘进摩擦角度大、颗粒硬度高,会加剧刀盘及螺旋输送机磨损。为了确保盾构顺利掘进,同时了解刀盘、刀具磨损情况,需在盾构始发掘进一定距离后,在隧道区间合理位置设置刀具检查更换区。在面对复杂地层的挑战时,合理的维护机制不仅可以降低盾构维护成本,也有助于减少工程停滞时间,加快工程的整体进度。

2 试验方案

设计开发了一种隧道掘进模拟试验装置,该装置主要由掘进室、刀头结构、扭矩计、气动千斤顶、空气压缩机等几部分组成,具体如图 1 所示。

该装置中掘进室直径 15cm,长 30cm;刀头结构采用 15 个挖掘齿,切削工具材质为钢材,以确保足够的耐磨性;旋转速度可调范围为 1~35r/min,掘进深度范围 0~300mm,支持 0.001~19.5mm 范围内不同粒径的土壤试验。此外,该装置具有水平操作、随时注入添加剂、持续与土样接触等特点,且具备调整刀头旋转速度及推进速度的能力,在很大程度上

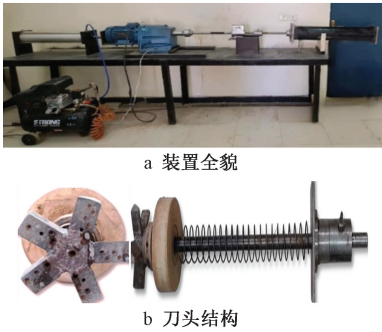


图1 盾构掘进模拟试验装置

Fig. 1 Shield simulation test device

上模拟了隧道掘进过程中的开挖条件,利用该装置可以对刀具的磨损情况进行测量分析。

研究土样取自南昌市地铁4号线七里站—民园路西站盾构区间,其粒度分布如图2所示。共进行了44组试验,分别研究土样含水量、刀盘转速、开挖时间和掘进速度等因素对刀具磨损的影响,具体试验方案如表2所示。

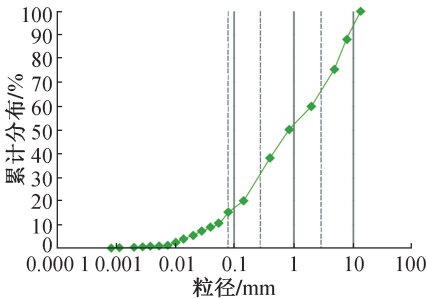


图2 粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve

表2 试验方案

Table 2 Test programs

组号	含水量/%	刀头转速/(r·min ⁻¹)	掘进时间/min	掘进速度/(mm·min ⁻¹)
1~36	10	10, 15, 20, 25, 30, 35	10, 20, 30, 40, 60, 80	2.5, 3.3, 5, 6.6, 10, 20
37~40	5, 10, 15, 20	35	40	5
41~44	5, 10, 15, 20	35	60	5

3 试验结果分析

利用隧道盾构掘进模拟装置,研究了不同运行参数对刀具磨损的影响,采用刀具磨损率来衡量刀具的损耗程度,具体计算公式如下:

$$\omega = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%$$

(1)

式中: ω 为刀具磨损率(%); m_0 为刀具初始质量(g); m_1 为刀具磨损后质量(g)。

3.1 刀头转速对刀具磨损的影响

近年来研究表明,刀盘转速是影响刀具磨损的

关键因素,其变化显著影响掘进效率和刀具使用寿命。因此,如何在提高设备性能与降低刀具磨损相关成本之间找到平衡,成为一个重要的研究方向。通过试验系统分析了刀盘转速对刀具磨损的影响,选取含水量为10%、密度为1.8g/cm³的土样,模拟盾构掘进过程中不同转速条件下的刀具磨损行为。试验设置了10,15,20,25,30,35r/min共6个刀盘转速,并在每个转速下分别进行10,20,30,40,60,80min掘进时间的测试,试验结果如图3所示。

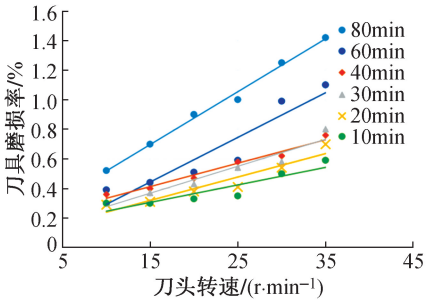


图3 刀头转速和开挖时间对刀具磨损的影响

Fig. 3 Effect of cutter head rotation speed and excavation time on cutting tool wear

由图3可知,随着刀盘转速的增加,刀具磨损呈显著增长趋势。这是因为更高的转速导致刀具与土壤颗粒的碰撞频率增加,从而加剧了刀具的物理磨损。此外,对于黏性土,由于土壤颗粒之间的黏结性较高,刀具在掘进过程中承受了更大的接触压力,进一步加速了磨损速率。另外随着刀头转速从10r/min增加到35r/min,刀具磨损在整个开挖时间内都有一个相对稳定的增加。通过将刀头转速从10r/min增加到35r/min,磨损增加了150%以上。这一发现为优化盾构机的运行参数提供了重要参考,同时也强调了在不同地层条件下合理选择刀盘转速的重要性。

3.2 掘进速度对刀具磨损的影响

在隧道施工中,盾构机的掘进速度是最重要的因素之一。增加掘进速度可以加快开挖,但也是影响施工效率和刀具磨损的重要因素,合理平衡掘进速度以兼顾高效率和低磨损成为隧道开挖中的一大挑战。

通过试验测试分析了不同掘进速度对刀具磨损的影响。在前述试验的基础上,采用含水量10%、密度为1.8g/cm³的试验土样,并结合隧道盾构掘进模拟试验装置,设置了2.5,3.3,5,6.6,10,20mm/min的掘进速度,以及10,15,20,25,30,35r/min的刀盘转速,并保证各组试验具备相同的开挖时间,系统研究了掘进速度对刀具磨损的作用规

律。不同转速和掘进速度下进行的测试结果如图 4 所示。

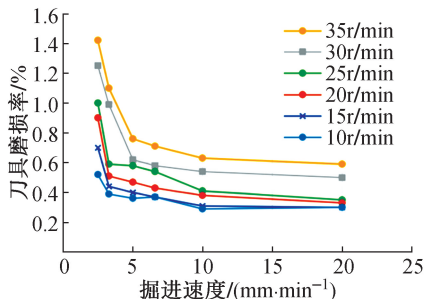


图 4 掘进速度和刀头转速对刀具磨损的影响

Fig. 4 Effect of penetration rate and rotation speed on cutting tool wear

由图 4 可得,掘进速度增加会导致刀具磨损下降,主要原因是低速掘进时,破碎的岩土可能滞留在刀盘周围,导致局部高磨损或增加二次磨损。高速掘进时,切削效率提高,刀具与岩土的接触更加连续和平稳,减少冲击性磨损,且排土更顺畅,减少磨粒在刀具附近的堆积,降低二次磨损。无论在何种刀头转速下,刀具磨损随着掘进速度从 2.5mm/min 增加到 20mm/min 均呈现出相对恒定的下降趋势,刀具的平均磨损率降低了 58%。

3.3 扭矩对刀具磨损的影响

盾构机扭矩在隧道开挖项目的成本控制中起着重要作用。盾构机扭矩受多种因素的影响,包括掘进速度、土体含水量、土壤物理性质、刀盘形状及刀盘转速等。当盾构机承受的压力增加时,扭矩随之上升,这不但会加重刀盘和刀具的磨损,还会显著提高设备的维护成本和相关费用。为了研究扭矩对刀具磨损的影响,设计一系列试验分析盾构机扭矩与刀具磨损间的关系,以开挖深度为控制值,分别设置掘进时间为 10, 20, 30, 40, 60, 80min, 测试结果如图 5 所示。

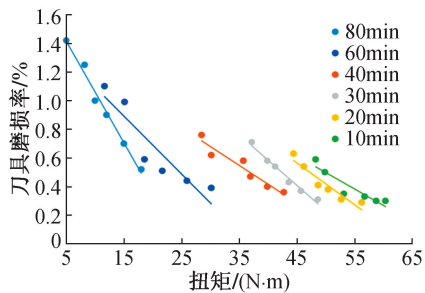


图 5 扭矩对刀具磨损的影响

Fig. 5 Effect of machine torque on cutting tool wear

试验结果表明,随着隧道盾构掘进模拟试验装置的扭矩增大,刀具的磨损程度降低了约 60%。且

若想达到相同的开挖深度,采用低扭矩的开挖时间会大大增加,这也导致了刀盘磨损率的提升。例如低扭矩范围(5~20N·m)80min 的施工效率与高扭矩范围(45~60N·m)10min 的施工效率相当,但前者的刀具磨损率最大达到了 1.4%,而后者仅为 0.6%。这一现象可能与高扭矩条件下刀具与土壤颗粒的相互作用模式变化有关。通过对扭矩与刀具磨损之间关系的进一步研究,可为优化盾构机运行参数提供理论支持,从而有效降低刀具磨损,延长设备使用寿命,并在整体上降低工程成本。

3.4 土样含水量对刀具磨损的影响

土体含水量是影响刀具磨损的又一重要参数。研究表明,刀具磨损随着土体含水量的增加先升后降。当土体含水量达到一定值后,刀具磨损开始减小。为探究土体含水量对刀具磨损的具体影响,在相同试验条件下进行了 4 组对照试验,试验参数包括刀盘转速为 35r/min、掘进时间为 60min、土体密度为 1.8g/cm³,土体含水量分别设定为 5%, 10%, 15%, 20%。为进一步细化研究,还在掘进时间为 40min 的条件下进行了另一组 4 次试验,采用相同的其他参数配置,试验结果如图 6 所示。

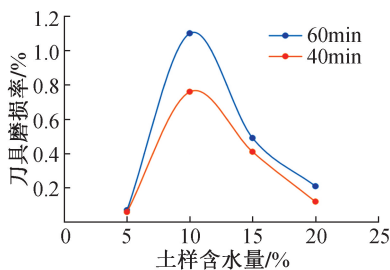


图 6 土样含水量对刀具磨损的影响

Fig. 6 Effect of soil moisture content on cutting tool wear

由图 6 可知,随着土体含水量增加至 10%,刀具磨损显著增加。这是由于土体的黏附性增强,导致刀具与土体颗粒的作用频率和强度增加。然而,当土体含水量超过 10% 后,刀具的平均磨损开始下降。这是因为土体颗粒随着含水量的增加变得更加松散且具有浮力,颗粒间的黏结力减弱,从而降低了刀具的磨损程度。当土体接近饱和状态时,颗粒被水膜包裹,土体结构被侵蚀并变得不再连续。此外,粗糙且具有磨蚀性的颗粒变得松散且更易移动,进一步减少了刀具的磨损。试验数据显示,土壤含水量从 10% 增加至 20% 时,刀具的平均磨损降低了 80%。这一研究结果为盾构施工过程中合理选择含水量控制措施提供了重要参考,有助于延长刀具使用寿命并提高施工效率。

3.5 土体含水量对盾构机扭矩及单位能耗的影响

为研究土体含水量对盾构机扭矩及单位能耗的影响,本研究在隧道盾构掘进模拟试验装置的主轴上安装了扭矩计,实时监测各试验条件下的扭矩变化,并绘制功率和扭矩相关曲线(见图 7,8)。

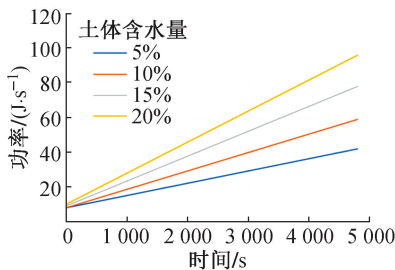


图 7 不同土体含水量下设备功率

Fig. 7 Power at different moisture contents

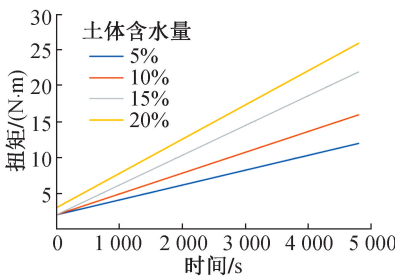


图 8 不同土体含水量下设备扭矩

Fig. 8 Torque at different moisture contents

试验结果显示,当土体含水量从 5% 增加至 20% 时,盾构机的扭矩增加了 116%。这种增长主要归因于土壤颗粒间黏聚力的增强以及刀具与土壤颗粒之间摩擦力的增大。随着扭矩的增加,设备功率也随之提高,进而导致每次试验的总能耗增加。此外,单位能耗(即每次试验消耗的能量与平均磨损量之比)在含水量从 5% 增加至 10% 时减少了 91%,但在含水量从 10% 进一步增加至 20% 时却急剧上升了 900%,如表 3 所示。

表 3 不同含水量下单位能耗的变化

Table 3 Changes in the specific energy at different moisture contents

含水量/ %	每次试验 能量消耗/J	刀具磨损 质量/g	单位能耗/ (J·g ⁻¹)
5	91 818	0.07	1 311.69×10 ³
10	118 908	1.10	108.10×10 ³
15	152 586	0.49	311.40×10 ³
20	191 574	0.21	912.26×10 ³

总体来看,土体含水量的增加会显著提升实验室模拟器的扭矩,同时引发功率和能耗的同步增长。然而,单位能耗的变化趋势呈现出先减少后急剧增加的非线性关系,表明含水量对开挖能耗的影

响复杂且显著。

4 结语

本研究设计并构建了一套盾构掘进模拟试验装置,基于南昌市地铁 4 号线盾构施工获取试验土样,并结合 44 次独立试验,探讨了土体含水量、刀盘扭矩、刀盘转速、开挖持续时间及掘进速率对刀具磨损的影响,研究结果如下。

1) 刀盘转速从 10r/min 增加至 35r/min 时,切削刀具的磨损率增加了 150%。这一现象的主要原因是随着刀盘转速的提高,刀具与土壤颗粒发生碰撞的频率增加。此外,在黏性土壤中,由于土壤颗粒间的黏聚性增强,刀具与土壤的接触压力增大,导致刀具磨损加剧。

2) 当掘进速率从 3.3mm/min 增加至 10mm/min 时,刀具磨损降低了 40%。这是因为掘进速率的提高缩短了开挖时间,从而减少了刀具与土壤颗粒的相互作用时间,降低了刀具的磨损。

3) 研究表明,土体含水量增加至 10% 时,由于土壤黏附性增强及刀具与土体颗粒间的接触增多,刀具磨损随之增加。然而,当土体含水量进一步增加至 20% 时,刀具磨损平均减少了 80%。这是因为随着土体含水量的增加,土体颗粒变得更加流动和浮力化,土壤结构接近饱和状态时,其连续性降低,粗糙磨蚀性颗粒变得松散,从而减轻了刀具的磨损。

4) 当土体含水量从 5% 增加至 20% 时,设备扭矩增长了 116%。这是由于土体颗粒间的黏聚性增强,以及刀具与土壤颗粒之间摩擦力的增加。设备扭矩的增加也导致功率提升,从而增加了测试过程中消耗的总能量。

通过这些试验结果,可以更深入地理解土体条件和盾构施工参数对刀具磨损的影响,为隧道盾构掘进项目的高效设计和优化提供理论支持和数据基础。

参考文献:

[1] 李雪,龚子邦,黄琦,等. 砂卵石地层盾构刀具磨损预测模型及刀具参数敏感性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 63-68.

LI X, GONG Z B, HUANG Q, et al. Prediction model for gravel stratum shield cutter wear and parameter sensitivity analysis of cutter parameters[J]. Urban mass transit, 2024, 27(2): 63-68.

[2] 孟庆军,陆公贤,周洋,等. 近距离斜穿车站富水圆砾地层盾构换刀技术及刀具磨损分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13965-13972.

MENG Q J, LU Y X, ZHOU Y, et al. Cutter change technology and cutter wear analysis of shield machine in water-rich pebble stratum at a short distance across the station [J]. Science technology and engineering, 2022, 22(31): 13965-13972.

- [3] 朱牧原,魏力峰,陈爽,等. 复合地层泥水平衡盾构刀具磨损情况分析[J]. 铁道标准设计,2022,65(10):117-123.
ZHU M Y, WEI L F, CHEN S, et al. Analysis on the cutter wearing of slurry shield in composite stratum [J]. Railway standard design, 2022,66(10):117-123.
- [4] 荣雪宁,卢浩,王明洋,等. 基于刀盘扭转能量的土压平衡盾构刀具磨损分析[J]. 上海交通大学学报,2019,53(8):965-970.
RONG X N, LU H, WANG M Y, et al. Analysis of tools wear for earth pressure balance shield based on torque energy of cutterhead[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2019,53(8):965-970.
- [5] WU J Q, CHEN X S, SHEN X, et al. Evaluation method and application for cutter wear of large-diameter shield in composite stratum; a case study[J]. Measurement,2025,242:115789.
- [6] WANG Z Y, LIU C L, JIANG Y S, et al. Study on wear prediction of shield disc cutter in hard rock and its application[J]. KSCE journal of civil engineering,2022,26(3):1439-1450.
- [7] 庄绪良. 粉细砂-砾岩复合地层条件下大直径越江盾构刀具磨损[J]. 科学技术与工程,2022,22(31):13980-13987.
ZHUANG X L. Cutter wear of large diameter cross-river shield tunneling in silty sand-conglomerate composite stratum[J]. Science technology and engineering, 2022,22(31):13980-13987.
- [8] 李清宪,邵小康,刘招伟,等. 漂石地层土压平衡盾构刀具磨损特性[J]. 科学技术与工程,2022,22(2):821-827.
LI Q X, SHAO X K, LIU Z W, et al. Characteristics of tool wear of earth pressure balance shield in boulders [J]. Science technology and engineering, 2022,22(2):821-827.
- [9] 李强,甘鹏路. 复合地层盾构刀具磨损控制技术研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(1):168-174.
LI Q, GAN P L. On cutter wearing control technology of the shield passing through mixed strata [J]. Modern tunnelling technology, 2020,57(1):168-174.
- [10] WEI Y J, ZHENG X, SU F, et al. Evaluation of cutting tool wear of earth pressure balance shield in granular soil based on laboratory test [J]. Journal of testing and evaluation, 2019, 47(2):927-941.
- [11] 黄莺,李玉盟,谢晓泳,等. 复合地层中盾构刀具磨损超前控制研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(1):222-228.
HUANG Y, LI Y M, XIE X Y, et al. Research on early warning control of shield tool wear in composite formation [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021,17(1):222-228.
- [12] 韩冰宇,袁大军,金大龙,等. 复合地层盾构刀具磨损分析与预测[J]. 土木工程学报,2020,53(S1):137-142,161.
HAN B Y, YUAN D J, JIN D L, et al. Analysis and predication of shield cutters wear in mixed ground [J]. China civil engineering journal, 2020,53(S1):137-142,161.
- [13] 张晋勋,李博,江玉生,等. 基于 EDEM 的砂卵石地层盾构刀具磨损特征研究 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (10) : 2212-2220.
ZHANG J X, LI B, JIANG Y S, et al. Wear characteristics of shield cutters in sand-pebble strata based on EDEM [J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2024,46(10):2212-2220.
- [14] 刘浩,许宇,李兴高,等. 盾构切削混凝土刮刀受力和磨损的离散元数值模拟研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023,50(1):208-218.
LIU H, XU Y, LI X G, et al. Numerical simulation study on forces and wear of shield scrapers used for concrete cutting by discrete element method [J]. Journal of Hunan University (natural sciences),2023,50(1):208-218.
- [15] 马腾. 基于离散元数值模拟的砂卵石地层盾构掘进刀盘磨损特性研究[J]. 铁道标准设计,2017,61(11):85-90.
MA T. Study on cutterhead wear characteristics in shield tunneling in sandy pebble stratum based on discrete element numerical simulation [J]. Railway standard design, 2017, 61(11):85-90.