

文章编号:1006-2467(2019)08-0965-06

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.08.011

基于刀盘扭转能量的土压平衡盾构刀具磨损分析

荣雪宁¹, 卢浩², 王明洋^{1,2}, 文祝¹, 戎晓力¹, 王振¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094;

2. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 南京 210007)

摘要: 在卵石和中风化泥岩中掘进时,土压平衡盾构面临严重的刀具磨损.为合理组织换刀工作,需预计刀具的磨损情况.通过分析成都地铁20个盾构区间的部分掘进数据,以刀盘扭转能量作为刀具磨损模型的输入参数,对换刀数目与刀盘扭转能量的关系进行了拟合.在此基础上,增加泡沫添加剂体积,建立双参数预测模型,进一步优化刀具磨损的预测精度.结果表明:换刀数目与刀盘扭转能量正相关,与泡沫添加剂体积负相关;换刀数目与双参数间的回归关系具有统计显著性;卵石和中风化泥岩地层中的换刀数目都较好地符合双参数预测模型但不同地层中的拟合参数有所差异.双参数刀具磨损模型的预测精度显著优于基于掘进距离的单参数模型和JTS模型.

关键词: 土压平衡盾构; 刀具; 磨损; 施工参数; 预测模型

中图分类号: U 455.43

文献标志码: A

Analysis of Tools Wear for Earth Pressure Balance Shield Based on Torque Energy of Cutterhead

RONG Xuening¹, LU Hao², WANG Mingyang^{1,2}, WEN Zhu¹, RONG Xiaoli¹, Wang Zhen¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, The Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Excessive wear of cutting tools has been reported in some earth pressure balance tunneling project in gravel and the intermediately weathered mudstone. In order to reasonably organize the changing work, the wear of the cutting tools should be predicted. Based on the operational data collected from 20 units of Chengdu Metro, the torque energy of cutterhead was chosen as the input parameter of cutter wear model. A relationship between the number of cutter changes and the torque energy was fitted. The volume of foaming liquid was then added to develop a multiple regression model, which can further improve the prediction precision of tools wear. The result shows that the number of cutter replaced increases with the increase of torque energy or the decrease of volume of foaming liquid. The relationship between the number of cutter replaced and the two input parameters is statistically significant. The number of cutter replaced for the gravel and the intermediately weathered mudstone both agree with the multiple regression model. For different soil types, different fitting parameters are observed. The multiple regression model gives more reasonable predictions than the model based on excavated length and the JTS model.

收稿日期:2018-01-25

基金项目:国家自然科学基金(51608529),中国博士后科学基金(2018M640488)

作者简介:荣雪宁(1988-),男,博士,主要研究方向为地下空间开发.

通信作者:戎晓力,男,教授,博士生导师,电话(Tel.): 13382056286;E-mail: rongxiaoli@189.cn.

Key words: earth pressure balance shield; cutting tools; wear; operational factors; prognosis model

刀具磨损是土压平衡盾构施工的重要风险因素^[1]. 在磨损性地层中掘进时, 刀具损耗较快, 因此需及时换刀. 开舱换刀不仅影响工程进度, 增加工程造价, 而且具有一定的危险性^[2]. 为合理组织换刀工作, 预估刀具的磨损情况是一项重要的任务. 理论上, 盾构机的实时掘进参数能反映刀具的磨损状态, 有研究者通过考察转矩、推力以及掘进速度等参数预测了刀具的磨损状态或磨损速率^[3-5]. 由于转矩等施工参数的波动性较大且影响因素较多, 该方法尚不能用于实际施工中刀具磨损的估计. 另外, 有研究采用超声波对刀具进行直接检测发现, 超声检测系统能较准确地反映单把刀具的磨损情况^[6]. 然而, 盾构刀盘上有上百把刀具, 只有少数刀具能安装超声检测系统, 因此, 该方法的应用受到限制. 目前, 为判断刀具磨损的总体情况, 仍需开舱检查.

为确定开舱检查的时机, 工程中常采用日本隧道协会提出的 JTS 公式 $\delta = k\pi DnL/v$ (k 为土层条件决定的磨损系数; D 盾构机外径; n 为刀盘转速; L 为盾构机掘进距离; v 为盾构掘进速度) 预测刀具的磨损量^[7]. JTS 公式应用广泛, 却也有其局限性^[8]. 首先, 该公式要求 k , n 和 v 均为常数, 而实际施工过程中只有 n 比较稳定, k 和 v 的变化性较大. 考虑到式中参数的波动性, Li 等^[8] 采用了区间变量分析方法确定 δ 的取值范围. 然而, 在卵石层等不均匀地层中掘进时, 经常需要破碎硬质岩石. 此情况下, 实际掘进速度的下限趋近于 0, 而通过区间运算得出的磨损量上限趋近于无穷大, 所以该公式很难为实际工程中刀具磨损的估计提供参考价值. 此外, JTS 公式预测的磨损量实际为土层参数与刀具沿环向切割距离的乘积. 刀盘每旋转 1 周, 其沿隧道轴向的位移仅为 0~70 mm^[9], 刀具的环向切割距离约为刀具在土层中的滑动位移. 由磨损理论可知, 材料的磨损量不仅与材料的特性和滑动位移有关, 还与接触面的载荷或摩擦力有关^[10]. 在同样的土层条件和滑动位移下, 刀具与土层间的受力情况不同会导致刀具磨损量的差异. 而 JTS 公式并未考虑刀具与土层间的实际受力情况, 因此缺少一个衡量刀具磨损量的重要参数.

目前, 一些盾构设备安装了施工参数自动采集系统, 以对刀盘转矩、刀盘转速和盾构机的掘进速度等参数进行实时监控和记录^[11]. 其中刀盘转矩是反映刀盘与土体摩擦力大小的重要参数, 可用于刀具

磨损的计算. 本文分析了成都地铁盾构 20 个区间、总掘进距离约 14 km 的施工数据, 建立了一种基于刀盘扭转能量的刀具磨损预测模型. 该模型可用于估计刀具的磨损情况, 为换刀时机的选择和换刀数目的预测提供参考. 盾构区间穿越地层可分为两类: 24 个换刀点的穿越地层为卵石, 6 个换刀点的穿越地层为中风化泥岩.

1 刀盘扭转能量与刀具磨损

根据能量磨损理论, 刀具磨损体积 (V_w) 正比于刀具与土体间的摩擦功 (W_f)^[10]:

$$V_w = \frac{W_f}{E_R} \quad (1)$$

式中: E_R 为磨损的能量密度, 即单位体积磨损所消耗的能量, 其数值与刀具材料有关. W_f 由刀具对土体的切削转矩 (T_c) 沿刀盘旋转角度进行积分而得. 记刀盘旋转的总时间为 t_r , 则有

$$W_f = \int_0^{t_r} 2\pi n T_c dt \quad (2)$$

盾构机记录的是刀盘总转矩^[9]:

$$T = T_b + T_c + T_m + T_0 \quad (3)$$

式中: T_b 为刀盘面板与土体之间的摩擦转矩; T_m 为土体搅拌转矩; T_0 为刀盘空转阻力转矩, T_0 与其他各项无关, 可视作为常量且对总转矩的贡献很小^[12]. T_b , T_c 和 T_m 具有正相关性, 三者都与土体受到的挤压程度有关, 故可认为 $T_c \propto T$. 令 W_T 为掘进期间的刀盘扭转能量,

$$W_T = \int_0^{t_r} 2\pi n T dt = 2\pi \sum_{i=1}^K T_i n_i \Delta t_i \quad (4)$$

式中: T_i , n_i 分别为第 i 个采样点的实测转矩和刀盘转速; Δt_i 为该采样点处的时间间隔, 一般为 10~50 s; K 为采样点总数. 由于 $W_f \propto W_T$, 根据式(1) 可知 V_w 和 W_T 呈线性关系.

成都地铁的典型土压平衡盾构刀盘布置如图 1 所示. 其中, 滚刀的直径为 432 mm; 滚刀超出刀盘面板的高度为 175 mm; 刮刀和撕裂刀超出刀盘面板的高度为 120~125 mm. 在盾构掘进中, 滚刀对其他两种刀具产生保护作用, 因此承担了大部分刀具磨损. 换刀记录表明, 滚刀的更换数目占全部换刀数目的 90% 以上, 故本文用刀具更换数目 (N_c) 作为刀具磨损体积的指标.

刀盘扭转能量与换刀数目的关系如图 2 所示.

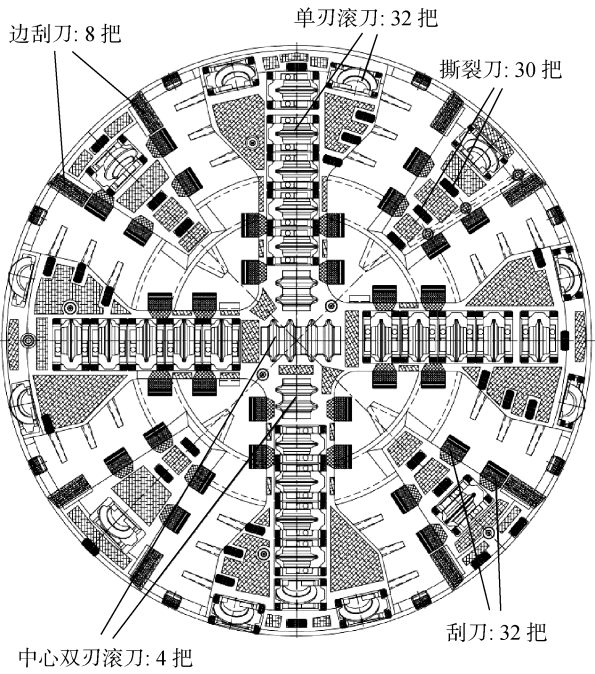


图 1 成都地铁土压平衡盾构典型刀盘布置
Fig. 1 Typical tools arrangement on the cutterhead of earth pressure balance shield machine for Chengdu Metro

其中:图 2(a)为全部换刀点 N_c 与 W_T 的关系;图 2 (b)中按照地层类型对数据点进行了区分; R^2 为线性拟合的决定系数. 由图 2(a)可知,换刀数目与刀盘扭转能量基本呈线性关系. 由图 2(b)可知,两种不同类型地层的数据点比较接近,说明该能量-磨损关系对于成都地铁穿越的卵石和中风化泥岩地层都具有一定的适用性.

现有研究一般认为刀具的磨损程度与其切割线的距离有关^[5]. 刀具的实际切割线为螺旋线,由于施工贯入度一般小于隧道直径的 1%,所以该螺旋线的长度约为刀具环向运动的距离,该距离与刀盘旋转的角位移(θ)对应. 本文研究的盾构区间刀盘角位移与换刀数目的关系如图 3 所示. 可以看出,换刀数目与刀盘角位移基本呈线性关系. 这表明,基于刀具切割线距离预测刀具的磨损程度是可行的.

工程中常根据地层类型和掘进距离预测刀具的磨损情况^[13-14]. 图 4 给出了 30 个换刀点 N_c 与 L 的关系. 其中图 4(a)为全部换刀点 N_c 与 L 的关系. 图 4(b)中按照地层类型对数据点进行了区分,并对两种地层中的数据分别进行了线性拟合. 由图 4(a)可见,换刀数目与掘进距离的关系比较离散, R^2 较小,为 0. 303. 由图 4(b)可见,在类似的地层下掘进相同距离,刀具磨损情况存在较大的差异. 两种地层拟合函数的决定系数都较小(卵石 $R^2=0. 440$,中风化泥

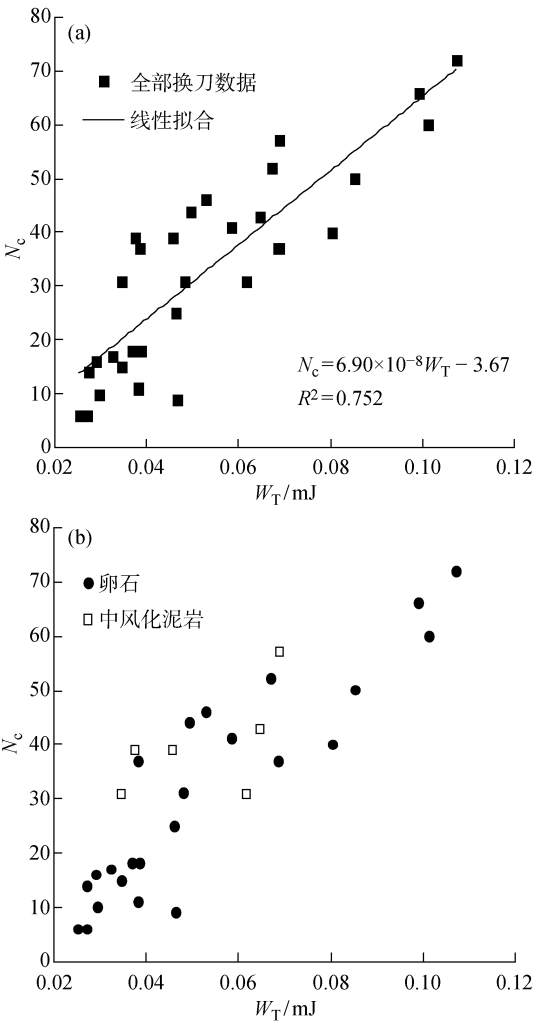


图 2 换刀数目与刀盘扭转能量的关系
Fig. 2 Relationship between number of cutter replaced and torque energy

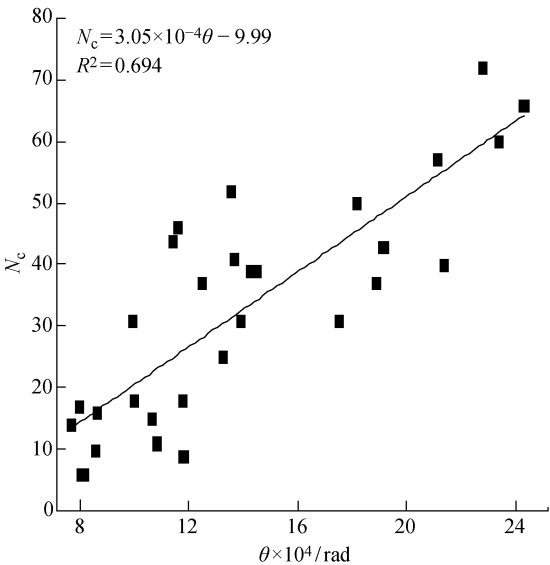


图 3 换刀数目与刀盘角位移的关系
Fig. 3 Relationship between number of cutter replaced and angular displacement of cutterhead

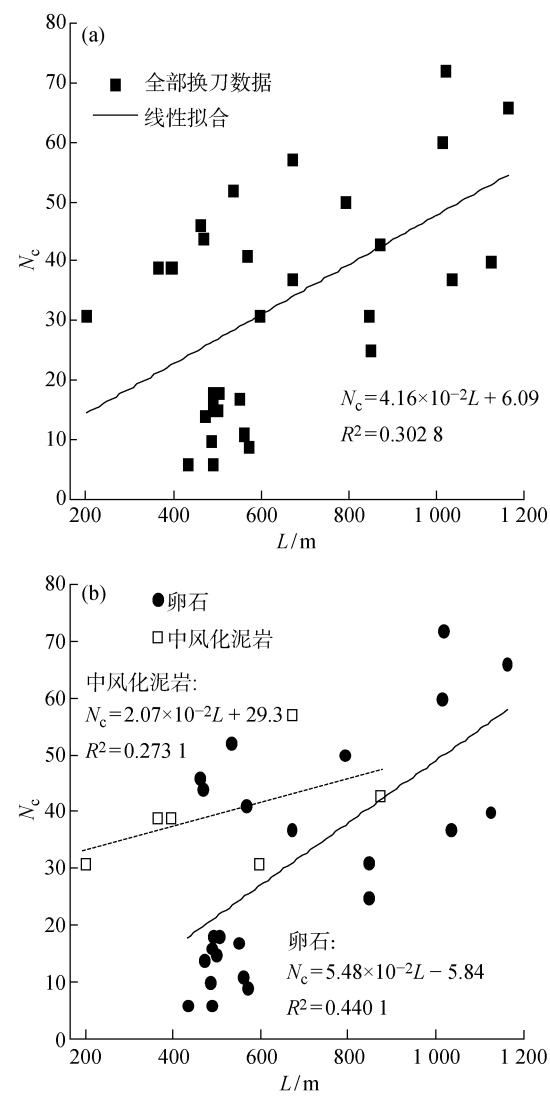


图 4 换刀数目与掘进距离的关系
Fig. 4 Relationship between number of cutter replaced and excavated length

岩 $R^2=0.273$). 相较于掘进距离,采用刀盘扭转能量作为刀具磨损的预测参数更为可靠,也更符合摩擦学理论.

3 刀具磨损的双参数预测模型

刀盘前表面分布有泡沫喷头,增加泡沫添加剂的含量能显著减少刀具磨损^[15-16],故泡沫添加剂的流量可能影响对刀具磨损体积. 本文在刀盘扭转能量的基础上增加泡沫添加剂体积参数,以建立刀具磨损的双参数预测模型. 在施工中,盾构机实时记录 4 个泡沫管路的泡沫添加剂流量. 本文采用的泡沫添加剂体积(V_{add})是 4 个管路的流量总和:

$$V_{\text{add}} = \sum_i (q_1 + q_2 + q_3 + q_4) \Delta t_i \quad (5)$$

式中: q_1, q_2, q_3 以及 q_4 分别为 4 个泡沫管路中实时

记录的添加剂流量. 换刀数目与刀盘扭转能量以及泡沫添加剂体积的关系如图 5 所示.

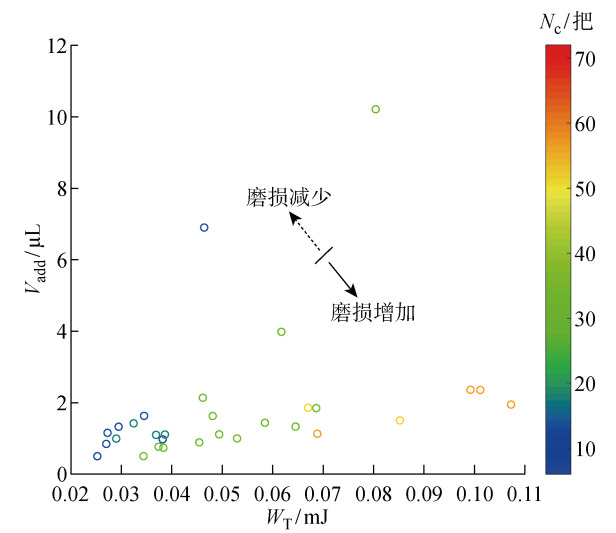


图 5 换刀数目与刀盘扭转能量和泡沫添加剂体积的关系
Fig. 5 Relationship between number of cutter replaced, torque energy and volume of foaming liquid

从图 5 可以看出,换刀数目与刀盘扭转能量正相关,与泡沫添加剂体积负相关,可用二元线性回归模型描述 N_c, W_T 以及 V_{add} 的关系:

$$N_c = aW_T + bV_{\text{add}} + c \quad (6)$$

式中: a, b 和 c 为回归系数. 采用 30 个换刀点的数据进行拟合得到的 a, b 和 c 的数值及其标准差、 t 检验值和 P 检验值见表 1. 可以看出, a, b 的 P 值都远小于 0.05, 表明换刀数目与刀盘扭转能量、泡沫添加剂体积的回归关系具有统计显著性. 双参数模型的 R^2 为 0.822, 大于单参数模型, 这说明, 增加泡沫添加剂体积改善了磨损模型的预测精度.

表 1 刀具磨损双参数预测模型的回归系数
Tab. 1 Fitting parameters of the prognosis model for cutter wear

类别	a	b	c	R^2
数值	7.68×10^{-8}	-2.60×10^{-6}	-2.78	0.822
标准差	6.89×10^{-9}	8.08×10^{-7}	—	
t 检验值	11.152	-3.262 2	—	
P 检验值	1.3×10^{-11}	2.99×10^{-3}	—	

图 6 中比较了本文双参数模型和日本 JTS 模型对换刀数目的预测结果, 图中 N_c^{rea} 为实际换刀数目, N_c^{pre} 为预测换刀数目. 模型预测越准确, 数据点越接近图 6 中的实线, 预测误差超过 30% 的数据点则会超出两侧虚线. 可以看出, JTS 模型有 12 个数据点的相对误差超过 30%, 占全部数据点的 40%.

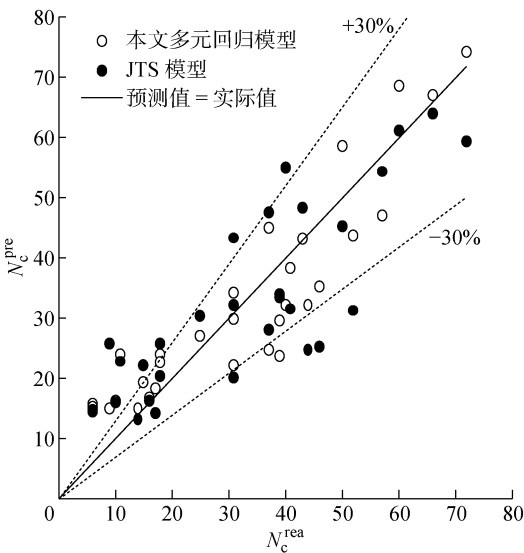


图 6 换刀数目预测值与实际值的对比

Fig. 6 Comparison of predicted and actual numbers of cutter replaced

而双参数模型只有 7 个数据点的相对误差超过 30%，占全部数据点的 23%。与 JTS 模型相比，双参数模型的预测值与实际值更为接近。

4 不同地层类型的刀具磨损预测模型

为考察地层类型对双参数模型的影响，分别将卵石和中风化泥岩地层中的数据进行拟合，预测模型仍采用式(6)。卵石和中风化泥岩地层中的数据拟合结果分别见表 2 和 3。不设定截距时，中风化泥岩地层中的数据将得出 1 个正常数项 c 。为避免模型预测始发端出现磨损，表 3 中将 c 值设定为 0。从表 2 和 3 可以看出，两种地层中的换刀数目都符合式(6)的二元线性关系，决定系数分别为 0.870 和 0.983， P 检验值均小于 0.05。两种地层的 a 差别不大，中风化泥岩地层中的 b 是卵石层中 b 的 3 倍左右。这表明中风化泥岩地层中的换刀数目相对于 V_{add} 更加敏感，由于该地层数据点较少，该理论的确认还需要进一步的研究。

表 2 卵石地层磨损预测模型回归系数

Tab. 2 Fitting parameters of the prognosis model for cutter wear in gravel

类别	a	b	c	R^2
数值	7.76×10^{-8}	-2.13×10^{-6}	-5.88	0.870
标准差	6.58×10^{-9}	7.79×10^{-7}	—	
t 检验值	11.79	-2.730	—	
P 检验值	1.01×10^{-10}	0.012 0	—	

表 3 中风化泥岩地层预测模型回归系数

Tab. 3 Fitting parameters of the prognosis model for cutter wear in intermediately weathered mudstone/sandstone

类别	a	b	c	R^2
数值	9.39×10^{-8}	-6.83×10^{-6}	0	0.983
标准差	8.85×10^{-9}	2.57×10^{-6}	—	
t 检验值	10.61	-2.660	—	
P 检验值	4.46×10^{-4}	5.64×10^{-2}	—	

5 结论

- (1) 土压平衡盾构的刀具磨损体积与刀盘扭转能量密切相关，采用刀盘扭转能量预测换刀数目比根据土层类型和掘进距离预测换刀数目更加准确。
- (2) 在刀盘扭转能量的基础上增加泡沫添加剂体积参数并建立二元线性模型能进一步优化刀具磨损的预测精度。根据全部 30 个换刀点建立的二元回归模型决定系数为 0.822，显著高于只采用能量、切割线距离或掘进距离的单参数模型决定系数。换刀数目与刀盘扭转能量正相关，与泡沫添加剂体积负相关。两个变量的回归系数 P 检验值均远小于 0.05。
- (3) 卵石层和中风化泥岩地层中的换刀数目都基本符合双参数预测模型。相对于卵石地层，在中风化泥岩地层中增加泡沫添加剂用量能更显著地减少刀具磨损。

参考文献：

[1] BARZEGARI G, UROMEIHY A, ZHAO J. Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 48(4): 43-57.

[2] GHARAHBAGH E A, MOONEY M, FRANK G, et al. Periodic inspection of gauge cutter wear on EPB TBMs using cone penetration testing[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38(9): 279-286.

[3] AMOUN S, SHARIFZADEH M, SHAHRIAR K, et al. Evaluation of tool wear in EPB tunneling of Tehran Metro, Line 7 Expansion[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 61(1): 233-246.

[4] 张厚美, 区希, 易觉. 运用盾构掘进参数跟踪判断滚刀损坏的研究[J]. *现代隧道技术*, 2014, 51(4): 121-126.

ZHANG Houmei, OU Xi, YI Jue. Tracking and determination of cutter damage based on the driving

- parameters of a shield[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2014, 51(4): 121-126.
- [5] 张明富, 袁大军, 黄清飞, 等. 砂卵石地层盾构刀具动态磨损分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(2): 2-7.
- ZHANG Mingfu, YUAN Dajun, HUANG Qingfei, *et al.* Analysis of dynamic abrasion of shield cutters in sandy cobble stratum[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 2-7.
- [6] 刘招伟, 王百泉, 尚伟. 基于超声波的盾构切刀磨损无线检测系统研究[J]. **隧道建设**, 2017, 37(11): 1469-1474.
- LIU Zhaowei, WANG Baiquan, SHANG Wei. Study of wireless detection system of shield cutter wear based on ultrasonic[J]. **Tunnel Construction**, 2017, 37(11): 1469-1474.
- [7] Japan Society of Civil Engineers. Standard specifications for tunneling—2006: Shield tunnel[M]. Tokyo: Maruzen, 2007.
- [8] LI X C, LI X G, YUAN D J. Application of an interval wear analysis method to cutting tools used in tunneling shields in soft ground[J]. **Wear**, 2017, 15(12): 21-28.
- [9] 卢浩, 王明洋, 夏沅谱, 等. 土压平衡盾构刀盘扭矩计算模型[J]. **浙江大学学报(工学版)**, 2014, 48(9): 1640-1645.
- LU Hao, WANG Mingyang, XIA Yuanpu, *et al.* Calculation model of cutterhead torque for each pressure balance shield [J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2014, 48(9): 1640-1645.
- [10] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- WEN Shizhu, HUANG Ping. Principles of Tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [11] 肖敏, 廖少明, 周松. 基于 Web 的隧道盾构法施工动态监控系统[J]. **上海交通大学学报**, 2012, 46(1): 105-108.
- XIAO Min, LIAO Shaoming, ZHOU Song. Web-based dynamic monitoring system of shield tunnel construction[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2012, 46(1): 105-108.
- [12] 李潮, 周宏伟, 左建平, 等. 土压平衡盾构刀盘扭矩计算方法与多因素量化分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(4): 760-766.
- LI Chao, ZHOU Hongwei, ZUO Jianping, *et al.* Torque calculation method of cutterhead in earth pressure balance shield and quantitative analysis of several influencing factors [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 760-766.
- [13] KÖPPL F, THURO K, THEWES M. Suggestion of an empirical prognosis model for cutting tool wear of hydroshield TBM [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, 49(6): 287-294.
- [14] HASSANPOUR J, ROSTAMI J, AZALI S T, *et al.* Introduction of an empirical TBM cutter wear prediction model for pyroclastic and mafic igneous rocks; A case history of Karaj water conveyance tunnel, Iran [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2014, 43(7): 222-231.
- [15] JAKOBSEN P D, LANGMAACK L, DAHL F, *et al.* Development of the soft ground abrasion tester (SGAT) to predict TBM tool wear, torque and thrust [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, 38(9): 398-408.
- [16] GHARAHBAGH E A, ROSTAMI J, TALEBI K. Experimental study of the effect of conditioning on abrasive wear and torque requirement of full face tunneling machines[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2014, 41(3): 127-136.

(本文编辑:陈晓燕)