

引用本文:龚泽佳,鱼志鸿,章定文,等.复合地层中盾构滚刀磨损实用预测方法及应用[J].建筑科学与工程学报,2023,40(1):133-141.  
GONG Zejia, YU Zhihong, ZHANG Dingwen, et al. Practical prediction method and application of shield disc cutter wear in complex formation  
[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 133-141.

DOI:10.19815/j.jace.2021.09009

# 复合地层中盾构滚刀磨损实用预测方法及应用

龚泽佳<sup>1</sup>, 鱼志鸿<sup>2</sup>, 章定文<sup>1,3</sup>, 冯 硕<sup>2</sup>, 李兆国<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 中建八局轨道交通建设有限公司, 江苏 南京 210046;  
3. 东南大学 道路交通工程国家级实验教学示范中心, 江苏 南京 211189)

**摘要:**盾构机在复合地层掘进过程中常因刀具磨损量过大而产生掘进工效降低和刀具失效等问题。依托深圳地铁 13 号线白应区间复合地层段滚刀磨损数据,根据 Rabinowicz 磨粒磨损计算模型提出了一种滚刀磨损量实用预测方法。该方法结合滑移率计算公式和刀盘扭矩、刀盘推力得到滚刀滑动距离,通过科罗拉多矿业学院模型(CSM 模型)、岩石强度参数和滚刀贯入深度确定接触面法向荷载,根据滚刀设计参数确定其材料强度。通过确定影响滚刀磨损量的三个主要因素(滑动距离、接触面法向荷载和材料强度),推导出了考虑盾构滚刀磨损体积计算公式,并采用深圳地铁 13 号线白应区间复合地层段滚刀实测磨损量与磨损量预测值进行对比验证。结果表明:实测磨损量与预测较为吻合,验证了所提出的滚刀磨损量预测方法的合理性,研究成果可为复合地层中盾构滚刀磨损量预测和换刀时机的确定提供理论依据。

**关键词:**复合地层;盾构滚刀;磨粒磨损;磨损量计算

**中图分类号:** TU973.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-2049(2023)01-0133-09

## Practical prediction method and application of shield disc cutter wear in complex formation

GONG Zejia<sup>1</sup>, YU Zhihong<sup>2</sup>, ZHANG Dingwen<sup>1,3</sup>, FENG Shuo<sup>2</sup>, LI Zhaoguo<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 2. China Construction Eighth Engineering Division Rail Transit Construction Co., Ltd., Nanjing 210046, Jiangsu, China;  
3. National Demonstration Center for Experimental Road and Traffic Engineering Education, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

**Abstract:** In the process of shield tunneling in complex formation, shield machine often has problems such as reduced tunneling efficiency and tool failure due to excessive tool wear. Based on the disc cutter wear data of Baiying section of Shenzhen Metro Line 13, a practical prediction method of disc cutter wear was proposed according to Rabinowicz abrasive wear calculation model. The method combined the slip rate calculation formula, the cutter head torque and cutter head thrust to obtain the sliding distance of the disc cutter. The normal load of contact surface was determined by combining the Colorado School of Mining Model (CSM Model), rock strength parameters and the penetration depth of the disc cutter, and the material strength was determined

收稿日期:2021-09-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52078129)

作者简介:龚泽佳(1996-),男,工学硕士研究生,E-mail:gongzejia@163.com。

通信作者:章定文(1978-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:zhang@seu.edu.cn。

according to the design parameters of the disc cutter. By determining three main factors (sliding distance, normal load of contact surface and material strength) affecting disc cutter wear, the calculation formula of disc cutter wear volume considering shield machine was derived, and the measured wear volume of disc cutter and the predicted wear volume of disc cutter in composite stratum section of Baiying section of Shenzhen Metro Line 13 were compared and verified. The results show that the measured wear volume is in good agreement with the prediction values, which verifies the rationality of the proposed prediction method of cutter wear volume. The research results can provide a theoretical basis for the prediction of cutter wear volume and the determination of cutter change time in composite strata.

**Key words:** complex formation; shield disc cutter; abrasive wear; wear volume calculation

## 0 引言

盾构法因具有不影响地面正常活动、对土体扰动小等优点,近年来在地铁隧道施工中被广泛采用。刀具磨损常导致掘进工效降低甚至刀具失效,是盾构施工中面临的主要挑战。目前掘进中的刀具磨损状况主要依靠经验判断,也可采用停机后人工进仓检查的方法,但是危险性很高且代价较大。实际施工过程中一般只有在无法掘进时才进行开仓检查,这时盾构刀具通常已发生了严重的磨损或者变形,无论是换刀难度还是工程进度都会受到严重影响。因此准确预测刀具磨损状况具有重要意义。

国内外学者在滚刀磨损机理、滚刀破岩力学模型和滚刀磨损预测模型等方面进行了大量研究。吴俊等<sup>[1-2]</sup>基于金属摩擦学理论指出,盾构刀具磨损主要包括磨粒磨损、黏着磨损和疲劳磨损,其中磨粒磨损和黏着磨损是刀具磨损的主因。罗华<sup>[3]</sup>将磨粒磨损分为两类,其中二体磨粒磨损是磨料沿一个固体表面相对运动产生的高应力碾碎式磨损,三体磨粒磨损是坚硬的矿物颗粒或脱落的金属颗粒夹在刀具和岩石表面之间摩擦时,产生的高接触应力导致的磨损。赵海鸣等<sup>[4]</sup>指出以磨粒磨损为主要形式的滚刀磨损中,引起刀圈表面材料损耗的机制主要是基于塑性固体的显微切削与犁沟去除,以及基于韧性固体的微观断裂剥离。Su 等<sup>[5]</sup>依托深圳地铁 6 号线盾构工程分析了刀盘不同位置滚刀的磨损类型,统计结果显示磨粒磨损为滚刀磨损的主要原因,并与相对滑动距离和贯入度直接相关。

磨损是两个固体接触表面之间相互作用的结果。关于滚刀与岩石的相互作用和运动模式,国内外学者基于不同的接触理论和摩擦理论对滚刀破岩的过程进行了定量描述,得出很多经典的滚刀力学模型。Evans 等<sup>[6]</sup>认为滚刀破岩所需的垂直力和

刀圈与岩石接触表面的投影面积成正比,其比值为岩石的单轴抗压强度。Tosaburo<sup>[7]</sup>采用了 Evans 垂直力计算公式,并分别基于挤压破碎理论和剪切破碎理论提出了两种侧向力计算公式。Roxborough 等<sup>[8]</sup>修正了 Evans 的理论,认为公式中的接触面投影面积应为矩形。Sanio<sup>[9]</sup>基于几何分析和室内滚刀切削试验,提出了一个较实用的滚刀受力计算模型——科罗拉多矿业学院模型(CSM 模型),该模型经过了大量室内试验和实际工程的验证<sup>[10-13]</sup>,相比于其他模型具有更高的准确性。

滚刀磨损预测模型的构建主要通过掘进参数的统计分析或滚刀破岩规律的理论推导来实现。挪威科技大学构建的 NTNU 模型<sup>[14]</sup>采用统计方法,基于大量工程的现场掘进数据和岩层地质参数得到经验公式以预测磨损;石超等<sup>[15]</sup>基于 BP 神经网络建立了滚刀磨损预测模型,并采用遗传算法和粒子群算法提升模型精度;祝和意等<sup>[16]</sup>建立了基于磨粒磨损的滚刀磨损速率预测模型,并结合实测数据对预测结果进行了误差分析;李彬嘉等<sup>[17]</sup>基于 CSM 力学模型模拟了滚刀动态受力特性,并通过与现场实测值对比验证其准确性。

本文依托深圳地铁 13 号线白应区间盾构隧道工程,研究基于磨粒磨损的盘形滚刀磨损预测模型,在 CSM 力学模型的基础上推导出更为实用的滚刀磨损量预测方法,并通过案例实测数据证明该方法预测滚刀磨损的可行性。

## 1 深圳 13 号线白应区间工程概况

### 1.1 工程地质条件

深圳地铁 13 号线白应区间盾构隧道全长 2.25 km,左右线间距为 11.8~25.0 m,隧道埋深 8.6~49.2 m。区间普遍分布有风化花岗岩夹层,地层软硬分布不均匀且变化频率高,部分区间存在基岩突

起现象并伴有孤石发育,工程地质条件较为复杂。图 1 为区间穿越岩层的分布比例。

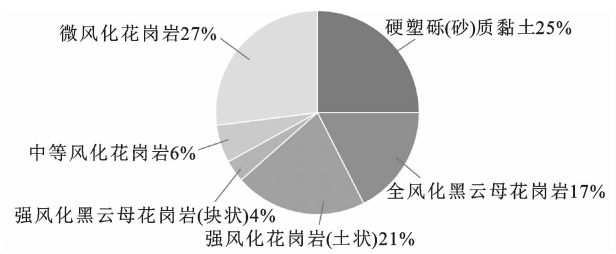


图 1 区间隧道地层分布比例

Fig. 1 Layer distribution proportion of section tunnel

1.2 刀盘刀具配置

白应区间采用 2 台 EPB/TBM 双模式盾构机,可在土压模式(半敞开 & 闭胸)和 TBM 模式下互相切换。为平衡盾构机在不同地质条件下的掘进工效与可靠度,刀盘采用辐板式复合结构设计,拥有较宽的辐条和小块的面板,并可根据掘进地层情况进行改造。

表 1 为刀盘配置情况。由于盾构区间穿越的地层数量较多、地质条件复杂且小部分区间为全断面硬岩地层,盾构刀盘选择了开口率较低、中心双联滚刀的配置,便于在适应多变地质环境的同时保持较高的破岩效率。

表 1 刀盘设计参数

Table 1 Cutter head design parameters

构造	设计参数	备注
刀盘结构	双模式	
开口率	约 32%	
中心刀具	6 把 17"双联滚刀	刀高 160 mm,刀间距 101.5 mm
正面滚刀	24 把 19"滚刀	刀高 160 mm,刀间距 75 mm
边缘滚刀	12 把 19"滚刀	
切刀	40 把	刀高 115 mm
边缘刮刀	12 对	
耐磨措施	面板焊接复合耐磨板,周边焊接镶嵌合金耐磨块,边缘及过渡区域堆焊耐磨网格	

1.3 滚刀磨损与换刀数据统计

依据刀具破岩机制和磨损机理,滚刀磨损失效方式主要包括均匀磨损和非均匀磨损。均匀磨损常见于岩层均一、强度较高的地层情况;非均匀磨损主要发生于松散地层或黏性土地层中,通常为刀盘结泥饼导致滚刀停转形成偏磨。本节统计了深圳地铁 13 号线白应区间滚刀磨损情况,从而得到该区间滚刀的主要失效方式。

深圳地铁 13 号线白应区间左线掘进 1~600 环共计开仓换刀 13 次,其中带压换刀 12 次,常压换刀

1 次;右线掘进 1~500 环共计开仓换刀 26 次,其中带压换刀 15 次,常压换刀 11 次。左线 90~140 环通过孤石分布区域,同一掘进面内软硬差距悬殊,增加了滚刀崩刀的风险。右线 160~260 环掘进通过全断面硬岩段,区间微风化黑云母花岗岩硬度可达 90 MPa,高硬度高磨蚀性岩体增加了开仓换刀的频率。左右线换刀统计见表 2。

由表 2 可知,均匀磨损是滚刀失效的主要形式。均匀磨损主要集中于正面滚刀和边缘滚刀,中心双联滚刀绝大多数由于结泥饼导致了偏磨。右线由于岩石整体硬度较大,滚刀崩刀、掉刀和偏磨等破坏情况的比例均高于左线。基于上述分析,可将均匀磨损的滚刀失效方式作为磨损预测的主要对象,且应排除中心滚刀磨损对预测模型的影响。

2 滚刀磨损实用预测方法

滚刀磨损机理主要包括磨粒磨损、黏着磨损和疲劳磨损,三者并非单独出现,而是互相耦合与影响。考虑到磨粒磨损机理对滚刀以均匀磨损为主的失效方式描述效果更好,本方法引入 Rabinowicz<sup>[18]</sup>磨粒磨损计算公式并构建了适用于深圳地区岩性的磨损实用预测方法。

2.1 Rabinowicz 滚刀磨粒磨损计算模型

滚刀均匀磨损失效的主要原因为磨粒磨损,即硬质颗粒在滚刀和岩石之前滑动造成的切削和犁沟效应。Rabinowicz 提出的磨粒磨损计算模型是以二体磨粒磨损的切削作用为主的定量计算公式,模型如图 2 所示<sup>[18-19]</sup>。

模型中有效半径为  $r$ 、中心角度为  $2\theta$  的微圆锥形磨粒受法向荷载  $F_p$  作用,在受压屈服强度为  $\sigma_s$  的被磨物体表面滑动,滑动距离为  $l$ ,切削深度为  $h$ 。假设共有  $n$  个锥形磨粒且磨粒与被磨物体的接触概率为  $P$ ,即可得  $n$  个锥形体滑动距离  $l$  产生的磨粒磨损体积  $V_n$  为

$$V_n = \frac{KF_p l}{\pi \sigma_s} \quad (1)$$

式中: $K = P \cot(\theta)$  为磨粒磨损系数,主要与磨粒材料、尺寸、形状等参数有关,依据参考值取  $K = 8 \times 10^{-3}$ ;滚刀受压屈服强度  $\sigma_s$  在掘进过程中基本保持不变,依据合金钢强度规范标准<sup>[20]</sup>取  $\sigma_s = 1\ 636$  MPa。

式(1)表明,在磨粒磨损系数和刀具屈服强度保持不变的条件下,磨损体积与接触面法向荷载和滑动距离成正比。依据滚刀 CSM 模型可得接触面法

表 2 左右线换刀统计

Table 2 Statistics of tool change of left and right lines

滚刀种类		中心滚刀 (S1~S12)		正面滚刀 (S13~S36)		边缘滚刀 (S37~S47A/B)		总计		左右线合计	
		数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%
左线	均匀磨损	1	2.94	52	72.22	53	82.81	106	62.35	215	58.27
	偏磨	32	94.12	16	22.22	7	10.94	55	32.35	115	31.16
	破坏	1	2.94	4	5.56	4	6.25	9	5.30	39	10.57
	总换刀数	34		72		64		170		369	
右线	均匀磨损	2	8.00	47	52.81	60	70.59	109	54.77		
	偏磨	20	80.00	23	25.84	17	20.00	60	30.15		
	破坏	3	12.00	19	21.35	8	9.41	30	15.08		
	总换刀数	25		89		85		199			

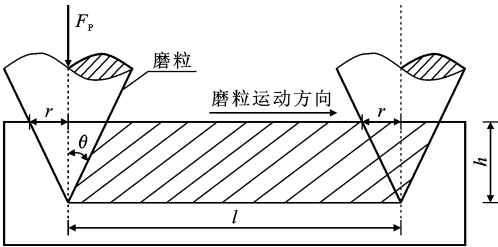


图 2 磨粒磨损计算模型

Fig. 2 Abrasive wear calculation model

向荷载  $F_p$ ，依据滑移率定义式可得滑动距离  $l$ ，将二者代入式(1)并结合岩石强度指标和盾构掘进参数即可求解滚刀磨粒磨损体积。

2.2 滚刀滑动距离确定

根据图 3<sup>[21-22]</sup>中的几何关系可得接岩角度  $\varphi = \arccos(R - p/R)$ ，在盘形滚刀制式确定的情况下[以正面滚刀使用标准 19 in(直径为 483 mm)制式为标准]，可进一步通过非线性拟合得到角度  $\varphi$  和滚刀贯入深度  $p$  的近似关系式，即

$$\varphi \approx 0.009 p^{0.5} \tag{2}$$

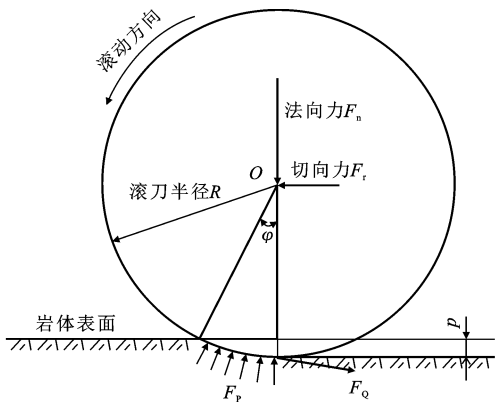


图 3 滚刀 CSM 力学模型

Fig. 3 CSM mechanical model of disc cutter

盾构机在岩石中掘进时，贯入深度一般不超过

20 mm。滚刀刀圈材料刚度大，可以看作是一个弹性圆柱；岩石也可以看作是弹性体。岩石平面可视为具有无限半径的圆柱体。因此根据赫兹弹性接触理论，圆盘刀具与岩石之间的接触区域为椭圆形。由于接触材料力学性能的差异和切向合力  $F_Q$  的影响，接触部分同时包含滚动区和滑移区。滚动和滑动两种运动的叠加导致滚刀外缘的实际运动距离小于滚刀破岩的推进总距离，两种距离之差就是滑动距离。由于滚刀外缘实际运动距离无法直接求出，滑动距离可单由滚刀推进总距离表示为

$$l = \xi L \tag{3}$$

式中： $\xi$  为滚刀滑移率； $L$  为滚刀推进总距离。

滚刀推进总距离  $L$  可通过将盾构掘进参数代入式(4)求得。

$$L = 2\pi R_i \frac{L_n}{v} r_n \tag{4}$$

式中： $R_i$  为第  $i$  个滚刀在刀盘中的安装半径； $L_n$  为掘进距离； $v$  为掘进速度； $r_n$  为刀盘转速。

滑移率  $\xi$  由 Popov<sup>[23]</sup> 从接触力学角度定义为

$$\xi = \frac{\mu \alpha}{R} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{F_Q}{\mu F_P}} \right) \tag{5}$$

式中： $\alpha = R\varphi/2$ ，物理意义为椭圆形接触面的长半轴； $\mu$  为硬岩摩擦因数。

定义接触面切向力与法向力之比  $F_Q/F_P$  为切削系数  $C$ ，将式(2)代入  $\alpha = R\varphi/2$ ，则式(5)可简化为

$$\xi = 0.045 p^{0.5} \mu \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{C}{\mu}} \right) \tag{6}$$

实际计算中，切削系数  $C$  通常由掘进参数计算得出，即

$$C = \frac{M_T N}{F_T \sum_{i=1}^N R_i} \tag{7}$$

式中:  $M_T$  为刀盘的总扭矩;  $F_T$  为刀盘的总推力;  $N$  为滚刀的数量。

从式(6)中可看出,在滚刀半径  $R$  确定的条件下,滚刀滑移率  $\xi$  与贯入深度  $p$ 、硬岩摩擦因数  $\mu$  和切削系数  $C$  有关。由统计数据可知,  $C$  大于 0.05, 且最大值约为  $3\mu/4$ 。而摩擦因数  $\mu$  通常在 0.25~0.75 之间变化,由此可得  $C$  的变化范围为 0.05~0.6。为减少未知变量,现分析贯入深度  $p$  和摩擦因数  $\mu$  对滑移率  $\xi$  的影响程度大小。当摩擦因数  $\mu=0.75$  时,不同贯入深度  $p$  下滑移率  $\xi$  与切削系数  $C$  之间的关系如图 4 所示。

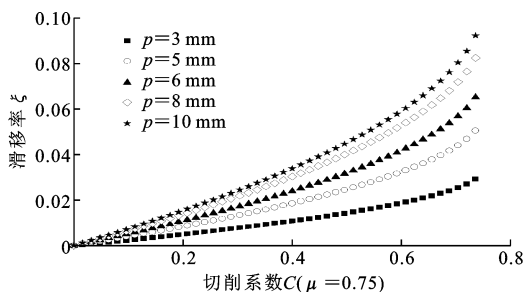


图 4 不同  $p$  值下  $\xi$  与  $C$  的关系 ( $\mu=0.75$ )

Fig. 4 Relationship of  $\xi$  and  $C$  under different  $p$  ( $\mu=0.75$ )

当贯入深度  $p=10$  mm 时,不同摩擦因数  $\mu$  下的滑移率  $\xi$  和切削系数  $C$  之间的关系如图 5 所示。

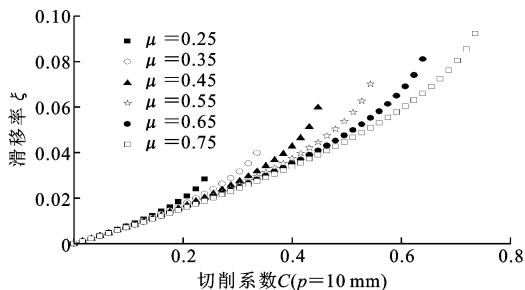


图 5 不同  $\mu$  值下  $\xi$  与  $C$  的关系 ( $p=10$  mm)

Fig. 5 Relationship of  $\xi$  and  $C$  under different  $\mu$  ( $p=10$  mm)

对比图 4、5 可知,  $\mu$  值变化对  $\xi$  与  $C$  关系的影响较小。根据盾构机设计资料,钢-土间摩擦因数宜取 0.25;钢-岩石间摩擦因数视情况而定。岩石干燥、水湿润、泥浆湿润 3 个状态下花岗岩的摩擦因数分别为 0.47~0.55、0.46~0.53、0.45~0.52,可取摩擦因数  $\mu=0.5$ 。将  $\mu=0.5$  代入式(6)后滑移率  $\xi$  的计算公式可简化为

$$\xi = 0.0225 p^{0.5} (1 - \sqrt{1-2C}) \quad (8)$$

将式(4)、(8)代入式(3)并结合滚刀贯入深度计算公式  $p=v/r_n$ ,可得滑动距离  $l$  的计算公式为

$$l = 0.045 \pi p^{-0.5} (1 - \sqrt{1-2C}) R L_n \quad (9)$$

### 2.3 接触面法向荷载确定

接触面法向荷载  $F_P$  可由接触面合力  $F$  间接求得,计算公式为

$$F_P = F \cos(\varphi/2) \quad (10)$$

基于 CSM 模型可推导出滚刀岩石接触面合力计算公式,即

$$F = C \frac{dR\varphi}{\Psi+1} \left( \frac{S\sigma_c\sigma_t}{\varphi\sqrt{dR}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

式中:量纲一的系数  $C$  通过试验确定取值为 2.12;  $d$  为滚刀刃宽;  $\Psi$  为压力分布系数,随刀尖宽度增加而减小,通常取  $\Psi=-0.2\sim0.2$ ,本文取 0.1;  $S$  为滚刀间距;  $\sigma_c$ 、 $\sigma_t$  分别为岩石的抗压强度、抗拉强度。

由于滚刀配置保持不变,可取 19 in 滚刀刃宽 ( $d=20$  mm) 及半径 ( $R=241.5$  mm)、正面滚刀间距  $S=75$  mm 作为定值。将式(2)和其他定值代入式(11),可得到仅关于贯入深度  $p$ 、岩石抗压强度  $\sigma_c$ 、抗拉强度  $\sigma_t$  的接触面合力公式,即

$$F = 1.9176 \times 10^3 p^{\frac{1}{3}} (\sigma_c^2 \sigma_t)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

将式(2)、(12)代入式(10),即可得接触面法向荷载  $F_P$  计算公式,即

$$F_P = 1.9176 \times 10^3 p^{\frac{1}{3}} (\sigma_c^2 \sigma_t)^{\frac{1}{3}} \cos(0.045 p^{0.5}) \quad (13)$$

### 2.4 滚刀磨损量实用计算公式

把式(9)、(13)代入式(1),可得基于磨粒磨损的滚刀磨损量计算公式为

$$V_n = \alpha \tau R L_n (\sigma_c^2 \sigma_t)^{\frac{1}{3}} (1 - \sqrt{1-2C}) \beta(p) \quad (14)$$

$$\beta(p) = p^{-\frac{1}{6}} \cos(0.045 p^{0.5}) \quad (15)$$

式中:常数项  $\alpha=4.2197 \times 10^{-4}$ ;  $\tau$  为修正系数,可由实测磨损体积与未修正磨损体积的倍数关系得到;  $\beta(p)$  为关于贯入深度  $p$  的函数。

综上所述,在滚刀制式和材料性能保持不变的条件下,已知滚刀安装半径  $R_i$ 、掘进距离  $L_n$ 、岩体力学参数  $\sigma_c$  和  $\sigma_t$  和盾构机主要掘进参数(掘进速度、刀盘转速、刀盘扭矩和刀盘推力),即可由式(14)求得单个滚刀在某段掘进过程中的磨损体积  $V_n$ 。

为更方便与实测数据比对,可通过几何关系得到滚刀磨损高度表达式,即

$$\delta_n = R - \sqrt{R^2 - V_n / (\pi d)} \quad (16)$$

式中:  $\delta_n$  为滚刀磨损高度。

## 3 工程案例应用与分析

选取深圳地铁 13 号线左线 561~595 环进行滚

刀磨损预测分析。该盾构段先后掘进通过了强风化黑云母花岗岩(土状)、强风化黑云母花岗岩(块状)和中风化黑云母花岗岩三地层的界面(565~580环),属典型软硬不均复合地层结构;直接掘进通过了大直径孤石段(568~575环);通过的中风化黑云母花岗岩层(581~589环)和微风化黑云母花岗岩层(590~595环)属高硬度高磨蚀性岩层界面,易发

生偏磨、崩刃等问题。

左线 561~595 环地层变化频繁,单环掘进周期长,期间有 2 次换刀记录(570 环,更换 S13~S36 正面滚刀和全部边缘刮刀;585 环,更换 S13~S36 正面滚刀),选择 2 次开仓均被更换过的滚刀即可精确测量更换期间的磨损量,适合作为分析案例。盾构段地层纵断面如图 6 所示。

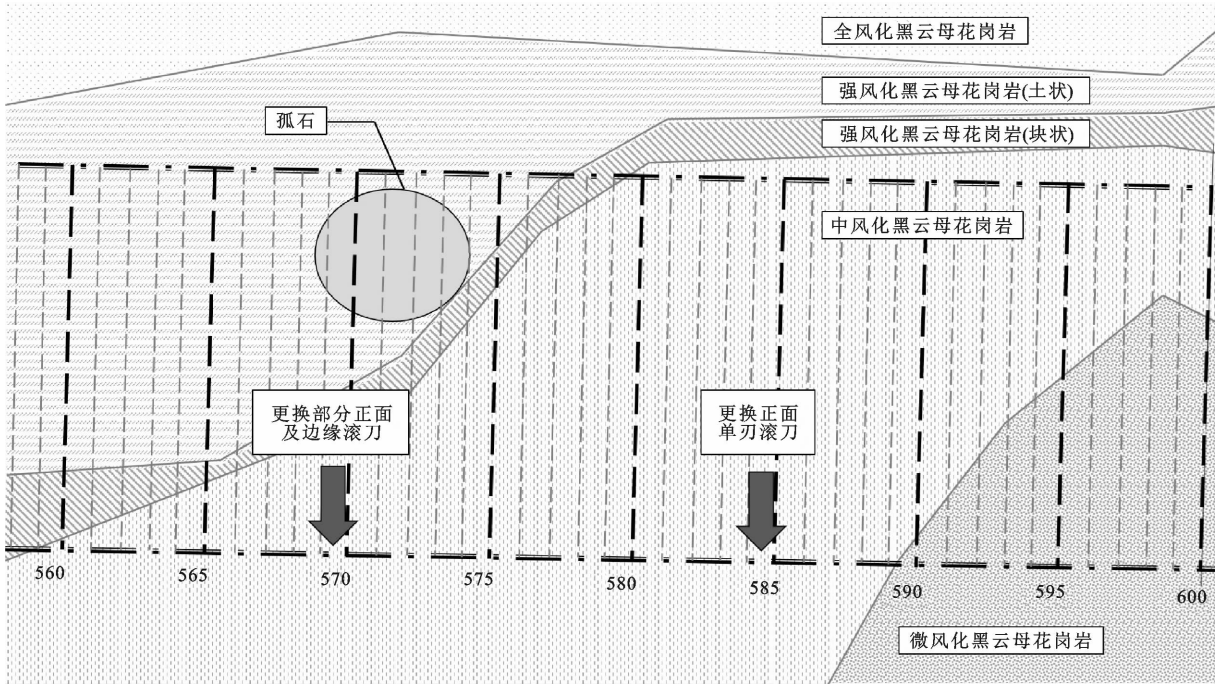


图 6 左线 560~595 环地层纵断面

Fig. 6 Vertical section of ring 560-595 formation on left line

3.1 单个正面滚刀磨损预测与分析

现选择 S29 号和 S35 号正面滚刀作为磨损预测对象,这两把刀具均于 570 环处更换为全新国产光面滚刀,又均于 585 环处达到均匀磨损失效标准被换下。571~585 环区间为非均质地层,571~575 环区间存在孤石和上软下硬不良地质条件。参考详勘报告,同一掘进面内含不同地层的情况取单轴抗压强度的平均值,花岗岩抗拉强度一般为抗压强度的 1/10 左右<sup>[24]</sup>,由此得到岩石抗压强度  $\sigma_c$ 、抗拉强度  $\sigma_t$  如表 3 所示。

表 3 571~585 环岩石强度参数

Table 3 Rock strength parameters of ring 571-585

环号	地层组成	单轴抗压强度 $\sigma_c$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa
571~575	中风化孤石+强风化花岗岩+中风化花岗岩	22.4	2.24
576~580	强风化花岗岩+中风化花岗岩	35.6	3.56
581~585	中风化花岗岩	47.2	4.72

两把滚刀的安装半径分别为  $R_{S29}=2\,519\text{ mm}$ 、 $R_{S35}=2\,969\text{ mm}$ ;单环掘进距离  $L_n=1\,500\text{ mm}$ ,共掘进 15 环。将盾构机掘进参数和地层力学参数代入滚刀磨损体积预测模型,可得到 15 环内滚刀 S29 和 S35 的平均未修正磨损体积  $V_{ni}=22\,986\text{ mm}^3$ 。两把滚刀的实测磨损高度均为 14 mm,据此可由式(16)反算得滚刀实际磨损体积  $V_n=412\,554\text{ mm}^3$ 。为便于预测值和实测值的定量比较,取修正系数  $\tau=V_n/V_{ni}\approx 18$ ,代入式(14)、(16)后可绘出修正后的滚刀磨损高度累计值预测曲线,如图 7 所示。

3.2 局部掘进区间整体磨损量预测与分析

盾构机实时掘进数据通常以 1 min 为间隔进行不间断监测,因此原始数据中存在大量无效及冗余数据,但通过细致的参数变化可以更好地体现非理想状态下盾构机刀具破岩及磨损情况。本次模拟共处理了左线实时盾构掘进原始数据 27 000 余条,包含 571~595 环共计 35 环、20 个工作日的盾构机实时监测数据。经过筛选后,可用于模型构造和分析

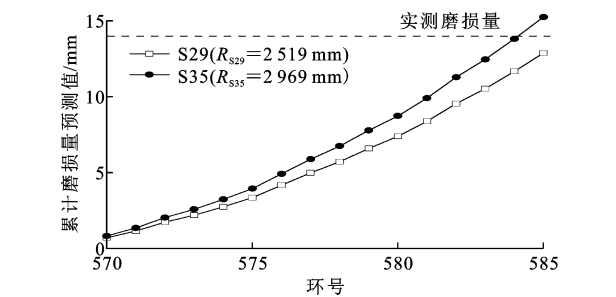


图 7 S29、S35 滚刀磨损高度累计值

Fig. 7 Cumulative wear height of S29 and S35 hobs

处理的数据共计 5 429 条。571~595 环岩石强度如表 4 所示。

表 4 571~595 环岩石强度参数

Table 4 Rock strength parameters of ring 571-595

环号	地层组成	单轴抗压强度 $\sigma_c/\text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_t/\text{MPa}$
571~580	中风化孤石+强风化花岗岩+中风化花岗岩	22.4	2.24
581~586	中风化花岗岩	47.2	4.72
587~591	中风化花岗岩+微风化花岗岩(过渡段)	61.7	6.17
592~595	中风化花岗岩+微风化花岗岩	76.2	7.62

设  $V_T$  为所有正面滚刀的整体磨损量,结合式(14)可得整体磨损量计算公式为

$$V_T = \sum_{i=1}^N R_{i\alpha} \tau L_n (\sigma_c^2 \sigma_t)^{\frac{1}{3}} (1 - \sqrt{1 - 2C}) \beta(p) \quad (17)$$

通过式(17)可求得单位时间间隔(1 min)内正面滚刀平均磨损量,以环号为单位均布后可绘制出如图 8 的折线图。

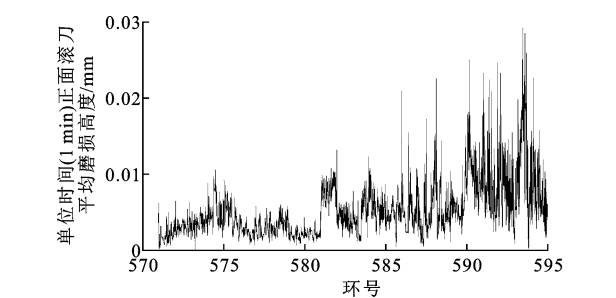


图 8 单位时间间隔(1 min)内正面滚刀平均磨损量

Fig. 8 Average wear in unit time interval (1 min)

基于图 8 数据,将单位时间磨损量按时刻所属环号归类并相加,可得到单环滚刀平均磨损高度(图 9),计算相邻两环间磨损高度差值,可得滚刀平均磨损高度变化量(图 10)。图 10 中纵轴数值为正即表示磨损量较上一环有所增加;数值为负则相反。磨损高度差值绝对值的大小则代表了磨损量增加或降

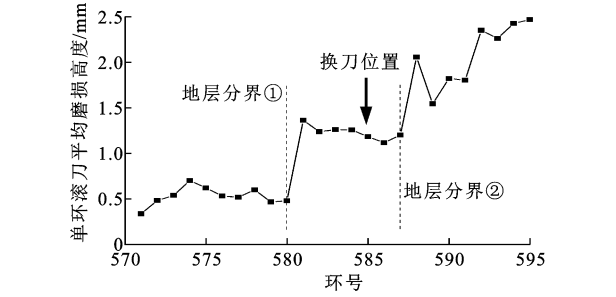


图 9 单环滚刀平均磨损高度

Fig. 9 Average cutter wear height of single ring

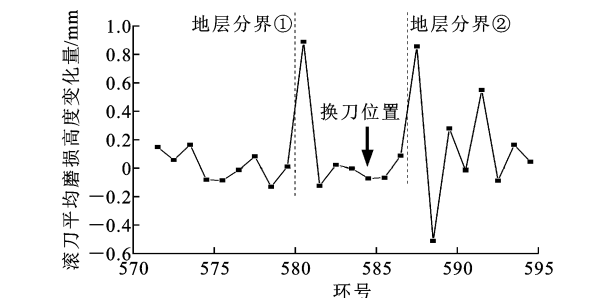


图 10 滚刀平均磨损高度变化量

Fig. 10 Variation of average wear height of disc cutter

低的速率。

滚刀的磨粒磨损和其他磨损形式是互相增益和促进的,随着磨损量的增加,滚刀的磨损速率也会加快,而全新滚刀的磨损量和磨损速率则较低。因此可通过滚刀平均单环磨损量和平均磨耗速率大小预测滚刀的磨损状态并确定换刀时机。

根据图 9、10 与实际刀盘扭矩和推力变化曲线及换刀数据的对比,可对预测的准确性和模型对实际工况的表征效果进行评估和分析。滚刀磨损量变化的外部原因可大致归类为人为因素和地质条件因素,下面将基于这两个因素定性评价模型的表征效果。

结合图 9 和图 11 的单环扭矩平均值变化曲线,可以观察到在 585 环换刀之后单环刀具磨损量和扭矩有明显下降,这说明本模型有一定预测滚刀磨损程度的能力,并对换刀导致的滚刀磨损量降低表征效果良好,在结合扭矩等其他掘进参数进行分析时可取得更好效果。

结合图 9、10 和图 6 的地质纵断面图可以看出,在 580 环和 590 环的地层分界面,滚刀磨损量和磨损速率均明显增加,这说明本预测模型能较好地表征地质条件对滚刀磨损的影响,但从图 10 可以看出,地层分界处的预测结果变化过于突兀,进一步细化岩体力学参数的分组可使数据过渡更为平滑,但需要更精确的勘察结果支持。

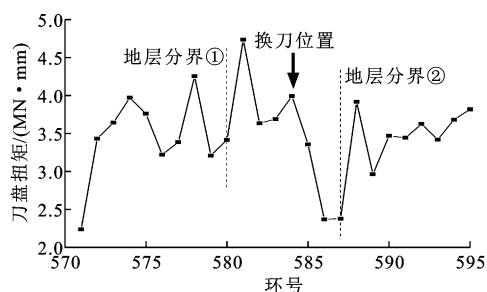


图 11 单环刀盘扭矩平均值

Fig. 11 Average cutter head torque of single ring

## 4 结 语

(1) 本文通过对深圳地铁 13 号线白应区间盾构滚刀磨损数据的总结和研究,确定了以磨粒磨损为主要失效形式的滚刀磨损规律。

(2) 依据 Rabinowicz 滚刀磨粒磨损计算模型提出了一种滚刀磨损预测方法。该方法优化了滑动距离计算流程并应用 CSM 模型计算了接触面法向荷载,最终得出关于滑动距离、接触面法向荷载、刀具材料强度的滚刀磨损体积计算公式。

(3) 应用滚刀磨损预测方法得到了深圳地铁 13 号线白应区间复合地层段单个正面滚刀的磨损高度累计值变化曲线,结果显示磨损速率随磨损累计值的增加呈上升趋势,预测磨损量经修正后与实测值偏差小于 5%,符合均匀磨损条件下滚刀的磨损规律。

(4) 拓展上述单个滚刀的磨损预测方法并计算所有正面滚刀的整体磨损量,结合该复合地层段岩层界面和换刀记录进行分析,结果显示整体磨损预测的结果与地层变化趋势较为吻合,在地层分界处磨损量均有 50% 以上的增加,说明预测方法较为合理,有一定的应用价值。

## 参考文献:

## References:

- [1] 吴俊,袁大军,李兴高,等.盾构刀具磨损机理及预测分析[J].中国公路学报,2017,30(8):109-116,142.  
WU Jun, YUAN Dajun, LI Xinggao, et al. Analysis on wear mechanism and prediction of shield cutter[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8):109-116,142.
- [2] 吴俊.盾构刀具与岩土体力学相互作用及磨损研究[D].北京:北京交通大学,2020.  
WU Jun. Study on the mechanical interaction and wear between shield cutting tools and rock or soil

- [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [3] 罗华.基于 TBM 施工的关角隧道岩石耐磨性研究[D].成都:西南交通大学,2007.  
LUO Hua. The Research of rock resistance to abrasion in guanjiiao tunnel based on the TBM construction[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [4] 赵海鸣,舒标,夏毅敏,等.基于磨料磨损的 TBM 滚刀磨损预测研究[J].铁道科学与工程学报,2014,11(4):152-158.  
ZHAO Haiming, SHU Biao, XIA Yimin, et al. Study of wear prediction for TBM cutter based on abrasive wear model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(4):152-158.
- [5] SU W L, LI X G, JIN D L, et al. Analysis and prediction of TBM disc cutter wear when tunneling in hard rock strata: a case study of a metro tunnel excavation in Shenzhen, China[J]. Wear, 2020, 446/447:203190.
- [6] EVANS I, POMEROY C D. The strength, fracture and workability of coal[M]. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [7] TOSABURO A. A theory of the rock-breaking function of the disc cutter[J]. Komatsu Technology, 1970, 16(3):56-61.
- [8] ROXBOROUGH F F, PHILLIPS H R. Rock excavation by disc cutter[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(12):361-366.
- [9] SANIO H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22(3):153-161.
- [10] AGRAWAL A K, CHATTOPADHYAYA S, MURTHY V M S R. Delineation of cutter force and cutter wear in different edge configurations of disc cutters — an analysis using discrete element method[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129:105727.
- [11] JIN D L, YUAN D J, LI X G, et al. Probabilistic analysis of the disc cutter failure during TBM tunneling in hard rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 109:103744.
- [12] 王超,乔世范,刘红中. TBM 破岩过程的滚刀受力计算模型研究[J].工程力学,2021,38(10):54-63.  
WANG Chao, QIAO Shifan, LIU Hongzhong. Research on force calculation model of hob in TBM rock breaking process[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(10):54-63.
- [13] 乔世范,王超,刘志新,等.基于磨粒磨损机理的全



- 断面隧道掘进机滚刀寿命预测[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(6):2068-2073.
- QIAO Shifan, WANG Chao, LIU Zhixin, et al. Life prediction of tunnel boring machine hob based on abrasive wear mechanism[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(6): 2068-2073.
- [14] 龚秋明,王继敏,余祺锐. 锦屏二级水电站 1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 引水隧洞 TBM 施工预测与施工效果对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1652-1662.
- GONG Qiuming, WANG Jimin, SHE Qirui. Comparison of TBM performance prediction with actual TBM operation results in headrace tunnels No. 1 and No. 3 of Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1652-1662.
- [15] 石超,薛皓文,丁小彬. 基于 BP 神经网络的硬岩地层盾构滚刀磨损预测[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增1): 217-225.
- SHI Chao, XUE Haowen, DING Xiaobin. Prediction of cutter wear of shield machine in hard rock stratum based on BP neural network[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 217-225.
- [16] 祝和意,杨延栋,陈 馈. 盾构滚刀破岩力及磨损速率预测模型推导[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(5): 131-136, 144.
- ZHU Heyi, YANG Yandong, CHEN Kui. Breaking force derivation and wear rate forecast of shield disc cutters[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(5): 131-136, 144.
- [17] 李彬嘉,晏启祥,黄 杰,等. 基于 CSM 模型的盾构机滚刀受力及磨损规律[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 91-99.
- LI Binjia, YAN Qixiang, HUANG Jie, et al. Mechanical characteristics and wear laws of disc cutters of shield machine based on CSM model[J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 91-99.
- [18] RABINOWICZ E. Friction and wear of materials[M]. 2nd ed. New York: Wiley-interscience, 2013.
- [19] 秦银平,张竹清,孙振川,等. 基于现场试验的 TBM 滚刀磨损分析及预测[J]. 隧道建设, 2019, 39(11): 1914-1921.
- QIN Yinping, ZHANG Zhuqing, SUN Zhenchuan, et al. Analysis and prediction of TBM disc cutter wear based on field test[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1914-1921.
- [20] 黑色金属硬度及强度换算值: GB/T 1172—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Conversion of hardness and strength for ferrous metal: GB/T 1172—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [21] WANG L H, LI H P, ZHAO X J, et al. Development of a prediction model for the wear evolution of disc cutters on rock TBM cutterhead[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67: 147-157.
- [22] WANG L H, KANG Y L, ZHAO X J, et al. Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutterhead based on energy analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 324-333.
- [23] POPOV V L. Contact mechanics and friction[M]. Berlin: Springer, 2017.
- [24] 刘东燕. 岩石力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2014.
- LIU Dongyan. Rock mechanics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2014.