

文章编号: 1007-2993(2026)03-0403-08

# 基于 TBM 滚刀磨损监测数据的滚刀磨损状态分析

陈俊达 殷丽君 龚秋明 谢兴飞

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

**【摘要】** TBM 在长距离硬岩中掘进时, 不可避免地会遇到滚刀磨损的问题。及时判断滚刀的磨损状态是降低刀具损耗、提高 TBM 施工效率的关键问题。本文依托于内蒙古引绰济辽输水工程, 在 TBM 上搭载刀盘状态监测系统, 实时获取滚刀的磨损量。通过分析正常磨损机制下单把滚刀的全寿命服役过程和滚刀破岩体积磨损速率的演变规律, 得出滚刀全寿命服役过程中存在 4 个磨损阶段: 加速磨损阶段、减速磨损阶段、稳定磨损阶段和二次减速磨损阶段。通过分析正常磨损机制与异常磨损机制下滚刀监测数据的特征, 提出了基于滚刀磨损量波动范围和相邻滚刀温差的异常磨损判定方法。研究可为硬岩地层 TBM 滚刀磨损状态评价及施工换刀策略提供参考。

**【关键词】** 滚刀磨损; 刀盘温度; 监测系统; 状态判定

**【中图分类号】** U455

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0123

## Analysis of the wear state of the disc cutter based on the TBM cutter wear monitoring data

CHEN Junda YIN Lijun GONG Qiuming XIE Xingfei

(School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**【Abstract】** During long-distance hard rock tunneling with TBM (Tunnel Boring Machine), cutter wear is inevitable. Timely assessment of cutter wear status is critical for reducing tool consumption and improving TBM construction efficiency. Based on the field application of a cutting tool condition monitoring system installed on a TBM in the Inner Mongolia Chaoer River to Xiliao River water conveyance project, this study achieved real-time acquisition of cutter wear data. By analyzing the full-life service process of individual cutters under normal wear mechanisms and the evolution pattern of rock-breaking volume wear rates, four distinct wear stages were identified: accelerated wear stage, decelerated wear stage, stable wear stage, and secondary decelerated wear stage. Through comparative analysis of monitoring data characteristics under normal and abnormal wear conditions, an abnormal wear judgment method was proposed based on fluctuations in cumulative wear volume and temperature differences between adjacent cutters. The research provides practical references for evaluating cutter wear status in hard rock formations and optimizing cutter replacement strategies in TBM projects.

**【Key words】** cutter wear; cutting tool temperature; monitoring system; condition assessment

### 0 引言

隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, 简称 TBM)是一种靠刀盘旋转破岩推进, 隧道支护与出渣同时进行, 并使隧道全断面一次成形的大型机械<sup>[1]</sup>。在 TBM 隧道施工过程中, 刀盘上的滚刀直接与岩体接触发生相互作用, 是 TBM 实现破岩功能的核心部件<sup>[2]</sup>。但由于 TBM 滚刀破岩时易损坏, 且滚刀检修、更换时间长, 滚刀的检修和更换会影响整个 TBM 工程的时间成本和经济成本。据统计, 刀具检查及更换等作业时间约占施工总时间的 10% 以上<sup>[3]</sup>, 滚刀更换及消

耗的费用约占 TBM 工程总成本的 20% ~ 30%<sup>[4]</sup>。因此, 正确研判 TBM 掘进过程中滚刀的磨损状态对降低施工成本和提高施工效率具有重要意义。

针对滚刀的磨损机理, 国内外众多学者开展了大量的研究, 胡 怡等<sup>[5]</sup>通过宏观分析、SEM 分析及表层金相分析, 得出刀圈磨损失效的主要形式为微观变形疲劳磨损。谭 青等<sup>[6]</sup>利用 ANSYS 对滚刀破岩过程进行了三维仿真模拟, 得出滚刀破岩时不平衡侧向力导致滚刀偏磨; 刀圈内侧应力集中现象使刀圈根部产生微裂纹, 最终引起刀圈断裂。王 涵<sup>[7]</sup>基

作者简介: 陈俊达, 男, 2000 年生, 在读硕士研究生, 主要从事掘进机隧道施工研究。E-mail: 13152802379@163.com

通信作者: 殷丽君, 女, 1977 年生, 副研究员。研究方向: 隧道工程。E-mail: lijun.yin@bjut.edu.cn

于CSM受力预测模型与材料力学,推导出滚刀偏磨和轴承过载的临界贯入度公式,研究了滚刀偏磨、轴承过载的形成机理,并指出正滚刀更容易发生偏磨,边刀更容易发生轴承过载。

在TBM掘进过程中,当滚刀磨损达到极限值或滚刀发生异常磨损时,需要及时停机换刀。实际工程中使用最多的方法是人工检测法,这种方法虽然得出的磨损量准确,但是效率低、成本高、危险性大。因此,不少学者对滚刀磨损的实时监测进行了研究。王振等<sup>[8]</sup>设计出一种基于电涡流测量法的无线监测设备。张孟喜等<sup>[9]</sup>结合电涡流传感器和霍尔式磁开关传感器设计出滚刀磨损三维可视化监测系统。贾连辉等<sup>[10]</sup>对比超声波传感器和电涡流传感器的优劣,采用数据更加准确的电涡流传感器直接测量滚刀刀刀,解决了复杂工况下滚刀磨损状态检测难题。费俊杰<sup>[11]</sup>对比外置式和内置式电信号滚刀磨损监测的优劣,提出一种基于非接触式电感式接近开关传感器的新型内置式滚刀监测装置。Gong等<sup>[12]</sup>基于磁阻传感技术研制出可监测滚刀磨损和转速的刀盘状态监测系统,结合地质条件和掘进参数对滚刀寿命进行实时预测。但是,现有的研究大多定性分析TBM滚刀正常磨损机制下的磨损规律,缺乏正常磨损机制下滚刀磨损速率的定量分析和异常磨损机制下滚刀磨损规律的研究。

本文依托内蒙古引绰济辽输水工程(从绰尔河水到西辽河),通过搭载TBM刀盘状态监测系统,获取滚刀实时磨损量及滚刀温度等监测数据。通过分析正常磨损机制下单滚刀的全寿命服役过程和滚刀破岩体积磨损速率的演变规律,划分滚刀磨损区间。依据正常磨损机制与异常磨损机制下滚刀监测数据

的特征差异,实现滚刀异常磨损状态的评价。

## 1 依托工程概况

引绰济辽输水工程位于内蒙古自治区东部,工程全长390.26 km,全线共划分10个标段。其中,二标隧洞为本研究施工段,该施工段是引绰济辽输水工程隧洞段中线路最长、地质条件最复杂的施工段。引绰济辽输水工程二标隧洞直径为5.2 m,主洞长度为58.51 km,桩号范围为K10+840—K66+137,采用钻爆法和两台TBM联合施工。整个隧洞段地面高程370~596 m,地形起伏较大,隧洞埋深70~120 m,隧洞多位于弱风化和微风化岩石地层中,TBM施工段穿越地层主要为花岗岩、砂岩、熔岩、凝灰角砾岩和凝灰岩,各类岩性占比如图1所示。按《水工隧道岩体分类方法》进行围岩分级,围岩等级以Ⅲ级围岩为主,约占70%,抗压强度为51~93 MPa<sup>[13-15]</sup>。TBM刀盘状态监测系统监测获取数据的分析区间段为K60+607—K58+108和K20+500—K18+000,分析区间段地层岩性以花岗岩为主,对滚刀磨蚀性较强,地层及地质构造如图2所示。

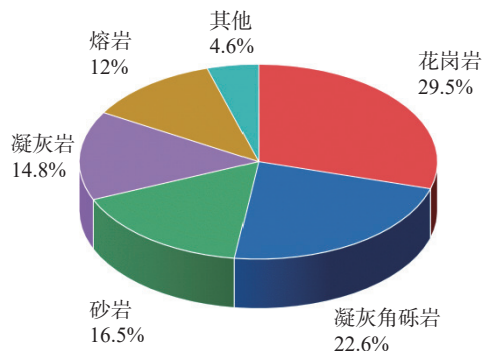


图1 施工段各类岩性占比  
Fig. 1 Proportion of various lithologies in the construction section

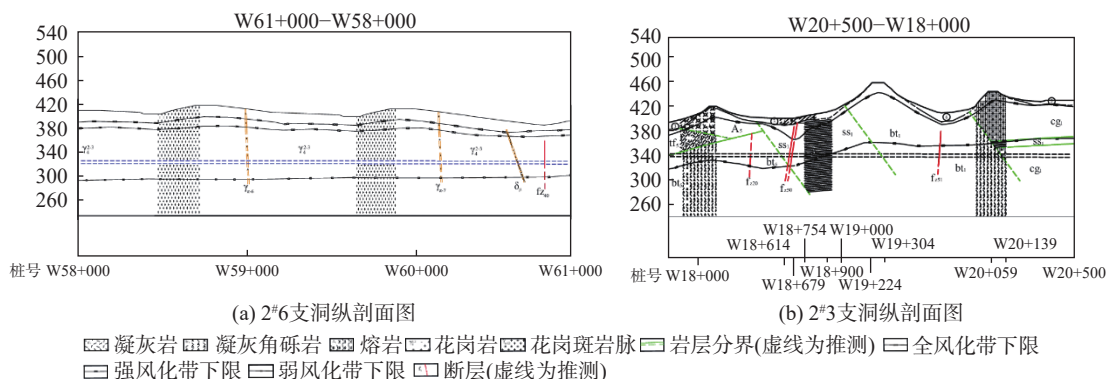


图2 工程地质纵断面图  
Fig. 2 Engineering geological profile

TBM施工段采用敞开式TBM进行施工,TBM刀盘直径为5.2 m,整机长度为303 m,额定总推力

为11340 kN,额定刀盘扭矩为3340 kN·m,最大刀盘转速为11.45 r/min,刀盘共安装34把滚刀,采用螺旋

线布置, 刀盘结构及刀具布置如图 3、图 4 所示。其中, 编号为 1#—8#的中心刀为 17 in 的双刃滚刀, 编号 9#—25#的面板刀为 19 in 的单刃滚刀, 编号 26#—34#的边刀为 19 in 的单刃滚刀。

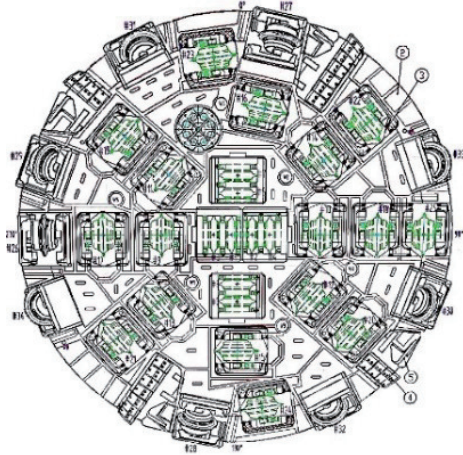
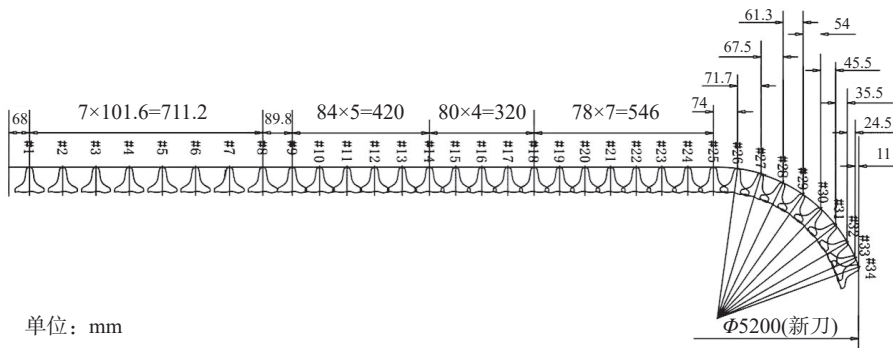


图 3 刀盘结构图

Fig. 3 Structure of the cutterhead

在该 TBM 上搭载刀盘状态监测系统, 用于实时获取滚刀磨损量和滚刀温度。该系统由传感器子系统、控制数据传输子系统、算法及显示子系统 3 部分组成, 具备监测数据的实时采集、数据的实时传输以及监测数据的实时处理及可视化等功能。传感器子系统位于刀箱内部, 可实时监测滚刀磨损量和刀盘温度等数据。在刀盘状态监测系统中, 刀盘每转动 9 圈传感器就会采集一次数据(采集时间约 1~2 s), 滚刀磨损量监测采用磁传感器技术, 传感器通过监测磁通密度的变化来反映滚刀磨损量。传感器的最大量程为 80 mm, 精度为 0.1 mm。温度传感器分辨率为 1 ℃。根据 TBM 刀盘结构, 选取位于刀盘面板区域不同位置的滚刀安装监测传感器, 具体的安装信息见表 1。每当刀盘转动 9 圈时, 传感器将采集一次数据(采集时间约为 1~2 s), 实时监测 TBM 面板刀的滚刀状况。



单位: mm

图 4 滚刀布置图

Fig. 4 Disc cutter layout of TBM

表 1 监测传感器安装信息

Tab. 1 Installation information of sensor

滚刀编号	滚刀安装半径/mm	刀间距/mm
10#	953	84
13#	1205	84
15#	1369	80
16#	1449	80
21#	1843	78
22#	1921	78

## 2 滚刀正常磨损规律分析

### 2.1 滚刀全寿命服役过程磨损速率分析

利用现场搭载的 TBM 刀盘监测系统, 可以得到 TBM 刀盘滚刀的实时磨损量和 TBM 掘进距离。利用 BiDoseResp 曲线对滚刀磨损量与掘进距离进行拟合, 得出滚刀磨损量与掘进距离之间的函数关系,

函数关系式为:

$$y = k_1 + (k_2 - k_1) \left( \frac{k_3}{1 + 10^{(k_4 - x)k_6}} + \frac{1 - k_3}{1 + 10^{(k_5 - x)k_7}} \right) \quad (1)$$

式中:  $x$  为 TBM 掘进距离, m;  $y$  为滚刀磨损量, mm;  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  和  $k_7$  为函数拟合系数。

为了准确分析单位体积破岩量下滚刀磨损情况, 采用滚刀破岩体积磨损速率来衡量滚刀磨损速度, 可以消除刀盘参数中安装半径和刀间距对面板刀磨损速率的影响, 滚刀破岩体积磨损速率  $\omega$  的计算公式为

$$\omega = \frac{y}{\pi x \left[ \left( R_i + \frac{s_{i+1}}{2} \right)^2 - \left( R_i - \frac{s_i}{2} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为滚刀破岩体积磨损速率, mm/m<sup>3</sup>;  $y$  为滚刀累计磨损量, mm;  $x$  为 TBM 掘进距离, m;  $R_i$  为滚刀安装半径, m;  $s_i$  为第  $i$  把滚刀和相邻内侧滚刀的刀间距, m。

通过链式法则对其进行求导,得到:

$$y' = \frac{dy}{dx} = (k_2 - k_1) \left( \frac{k_6 k_3 \ln(10) \cdot 10^{k_6(k_4 - x)}}{(10^{k_6(k_4 - x)} + 1)^2} - \frac{k_7 k_3 \ln(10) \cdot 10^{k_7(k_5 - x)}}{(10^{k_7(k_5 - x)} + 1)^2} \right) \quad (3)$$

式中:  $y'$  为单位掘进距离滚刀磨损速率。

将式(3)代入式(1),可以得到单滚刀破岩体积磨损速率  $\omega$ :

$$\omega = \frac{y'}{\pi \left[ \left( R_i + \frac{S_{i+1}}{2} \right)^2 - \left( R_i - \frac{S_i}{2} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

滚刀的刀圈正常磨损是 TBM 刀具消耗的主要形式<sup>[16]</sup>。为了研究正常磨损机制下滚刀的磨损变化规律和磨损速率演变特征,选取从初始磨损量为 0 直至正常磨损至失效的 3 把面板刀(10<sup>#</sup>, 21<sup>#</sup>, 22<sup>#</sup>)进行磨损规律分析。采用公式(4)计算三把滚刀的破岩体积磨损速率。滚刀的磨损量和破岩体积磨损速率与掘进距离的关系如图 5 所示。

由图 5 可知,随着 TBM 掘进,单滚刀磨损量随掘进距离增加而增大,三把滚刀的磨损量变化趋势一致,三把滚刀的破岩体积磨损速率的变化趋势大致相同。TBM 滚刀的刀圈几何尺寸和滚刀破岩时所需的比能会随着滚刀不同磨损状态下刃宽的变化而变化<sup>[17]</sup>,如图 6 所示,全寿命滚刀磨损过程中,不同的刃宽对应着不同的磨损阶段。依据滚刀破岩体积磨损速率变化趋势,可将正常磨损机制下滚刀的全寿命服役过程分为 4 个阶段:加速磨损阶段,减速磨损阶段,稳定磨损阶段,二次减速磨损阶段。加速磨损阶段:滚刀刃宽较小,导致滚刀与岩体的接触面积较小,单位面积上的压力较大,因此滚刀破岩体积磨损速率不断增大。减速磨损阶段:随着滚刀刃宽逐渐增大,滚刀与岩体的接触面积增加,单位面积上的压力减小,磨损速率随之减缓。稳定磨损阶段:滚刀刃宽趋于稳定,滚刀破岩体积磨损速率也变得稳定。二次减速磨损阶段:滚刀的刃宽再次显著增加,导致滚刀与岩体的接触面积进一步增大,单位面积上的压力显著降低,磨损速率进一步减缓。因此刃宽的变化对滚刀磨损的影响不可忽视。

如图 5 所示,由于三把滚刀的服役起点里程不同,导致开挖岩体条件存在差异,同时不同滚刀与相邻滚刀的高差也不同,因此图 5 中 10<sup>#</sup>、21<sup>#</sup>和 22<sup>#</sup>三把滚刀的 4 个磨损阶段分界值存在差异。以图 5(c)中 22<sup>#</sup>滚刀为例,滚刀初始磨损量为 0 mm,加速磨损阶段滚刀磨损量达到 4 mm 时,滚刀的破岩体积磨损速率达到第一个峰值 0.041 mm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。减速磨

损阶段对应的磨损量范围为 4~9 mm。第 3 阶段(稳定磨损阶段)对应的磨损量范围为 9~15 mm,该阶段内滚刀刃宽相对平稳,滚刀的破岩体积磨损速率

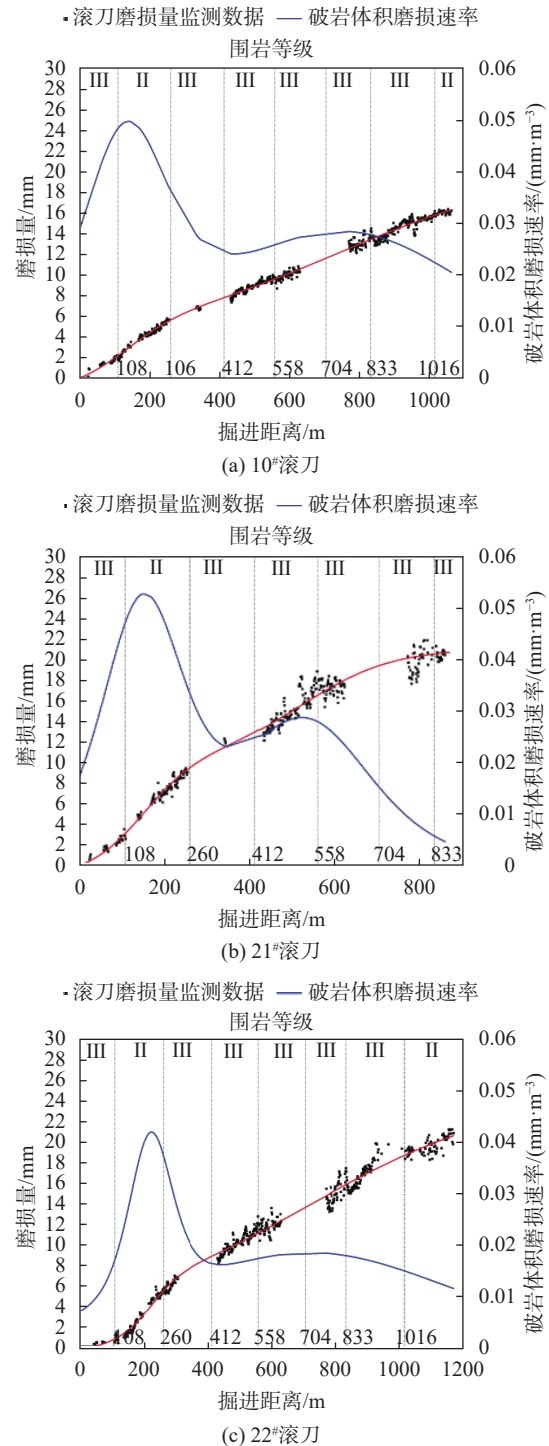


图 5 滚刀磨损量与破岩体积磨损速率图

Fig. 5 Disc cutter wear and cutter wear rate per rock breaking volume

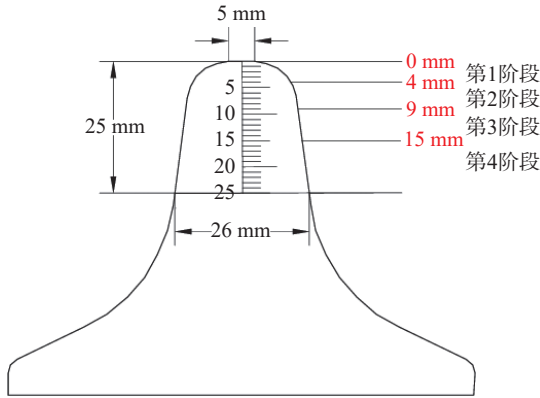


图 6 22#滚刀不同磨损阶段示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the different wear stages of the No. 22 rolling cutter

范围为  $0.016 \sim 0.018 \text{ mm}^3$ 。当滚刀磨损超过 15 mm 后, 滚刀进入磨损的第 4 阶段, 即二次减速磨损阶段, 滚刀的磨损速率逐渐减小, 直到磨损达到限值。

### 2.2 正常磨损机制下滚刀监测数据特征分析

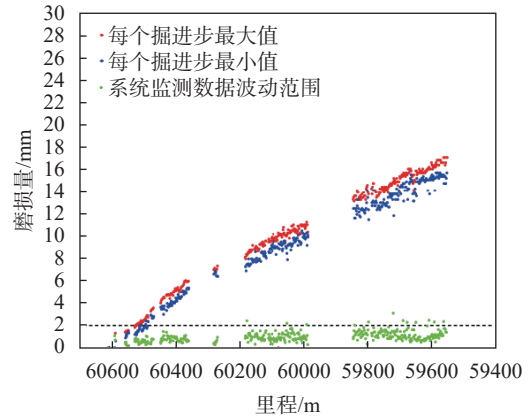
考虑到滚刀刀圈的磨损并不是完全均匀的, 滚刀的磨损监测数据会存在一定的波动情况, 为此对上述三把全寿命滚刀的磨损监测数据进行分析。通过筛选掘进过程中每个掘进步内(每个掘进步长度为 1.8 m)的监测数据的最大值与最小值, 用差值表述每个掘进步的系统监测数据的波动范围。三把全寿命滚刀磨损监测数据及其波动情况如图 7 所示, 从图中可以看出磨损量的波动范围在 2 mm 左右。随着磨损量的增大, 监测数据的波动范围也保持在 2 mm 左右。这也能侧面反映出刀盘状态监测系统的准确性。

TBM 掘进过程中, 滚刀破岩、刀盘与岩渣摩擦都会产生热量导致滚刀温度升高, 而在停机换刀、换步过程又会导致滚刀温度降低, 故滚刀温度会随着掘进过程存在明显的波动, 由于温度监测传感器的监测点在滚刀刀圈外侧, 故各个检测点的温度会随着滚刀温度的变化而变化。各个监测点的滚刀温度基本呈现相同的变化趋势, 所以采取相近滚刀的温度监测值的差值来判断温度的变化情况。图 8 为 21#、22#滚刀掘进过程中的温度监测值及温度差值, 图中温度差值为 22#与 21#滚刀每个掘进步的温度平均值的差值。从图中可以看出, 在均为正常磨损的情况下, 两把滚刀温度的差值在  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  以内。

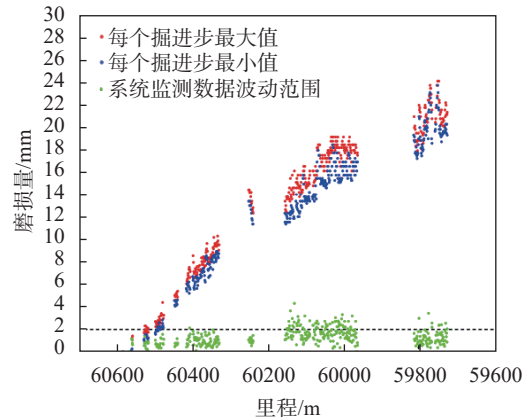
## 3 异常磨损滚刀的状态分析及判定

### 3.1 滚刀异常磨损监测数据波动分析

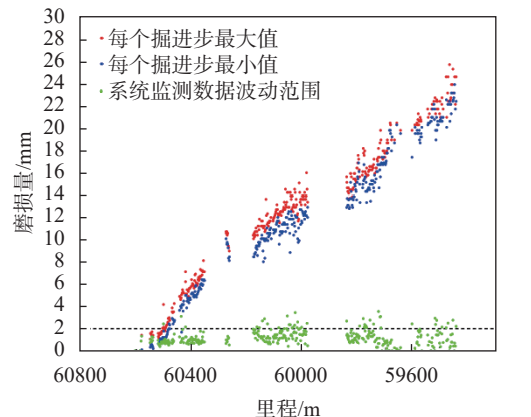
TBM 刀盘中滚刀的偏磨是滚刀异常磨损中占比最大的失效形式<sup>[16]</sup>。为分析滚刀偏磨状态下的滚刀数据特征, 基于刀盘系统监测数据和人工查刀数据,



(a) 10#滚刀



(b) 21#滚刀



(c) 22#滚刀

图 7 全寿命滚刀磨损监测数据波动情况

Fig. 7 Fluctuation of disc cutter wear monitoring data throughout the life cycle

分析滚刀偏磨情况下滚刀的监测数据的变化特征, 获得滚刀异常状态的判定方法。

在滚刀磨损监测段内, 引绰济辽输水工程的滚刀的监测磨损量及每个掘进步滚刀监测磨损量的波动范围见图 9。结合人工查刀记录可知, 16#滚刀于里程 K19+374 因偏磨原因进行了滚刀更换。更换滚刀后每个掘进步滚刀监测磨损量的波动范围在  $1 \sim 2 \text{ mm}$ , 因此可知, 在里程 K19+550 之前, 每个掘进步

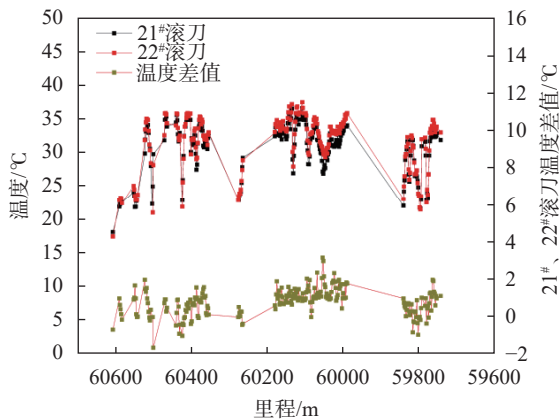


图8 全寿命滚刀温度监测数据差值  
Fig. 8 Difference of life-cycle cutter temperature monitoring data

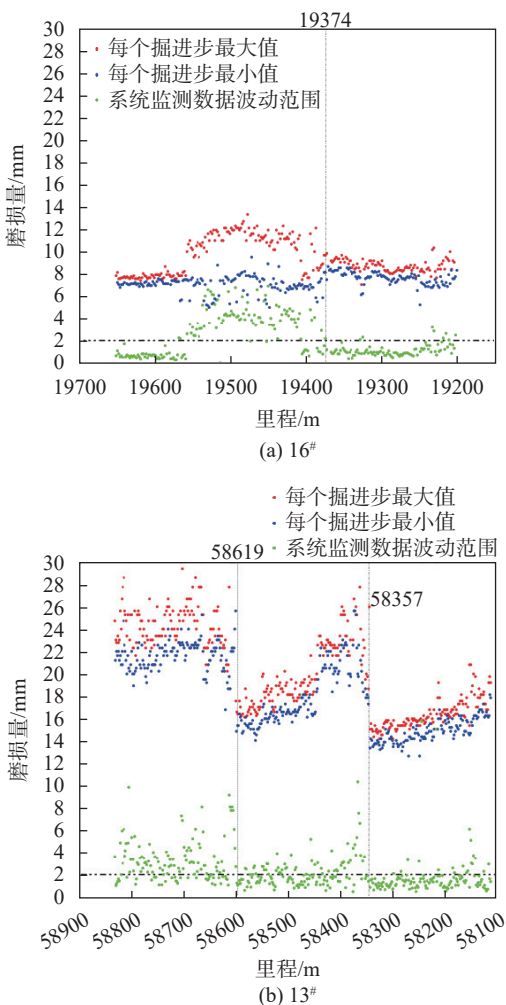


图9 滚刀磨损系统监测数据波动范围  
Fig. 9 Fluctuation range of the monitoring data of the disc cutter wear system

滚刀监测磨损量的波动范围维持在1~2 mm,均属于正常磨损的波动范围。而在里程K19+550之后,监测值波动范围突增至4 mm左右,其中K19+550—K19+374共99个掘进步,有49个掘进步的滚刀监

测值波动范围超过4 mm。结合后续换刀工作,可初步判定滚刀在此时已发生了偏磨。

图9(b)中13#滚刀分别在里程为K58+619和K58+357处,均因滚刀偏磨进行人工换刀。13#滚刀于里程K58+619处换刀前,每个掘进步滚刀监测磨损量的波动范围在1~8 mm,其中K58+704—K58+619共47个掘进步,有13个掘进步的滚刀监测值波动范围超过4 mm,更换滚刀后每个掘进步滚刀监测磨损量的波动范围在2 mm左右。于里程K58+357处换刀前,每个掘进步滚刀监测磨损量的波动范围最大达到10 mm,其中K58+415—K58+357共32个掘进步,有8个掘进步的滚刀监测值波动范围超过4 mm。换刀之后每个掘进步滚刀监测磨损量的波动范围在1~2 mm。

13#滚刀的监测数据波动范围由正常磨损下的1~2 mm,在里程K19+550之后监测值波动范围突增至4 mm左右;16#滚刀的系统监测数据波动范围为1~6 mm,两把滚刀在发生偏磨时的系统监测数据波动形式并不相同,需结合两把滚刀的偏磨状态进行分析。图10为16#和13#滚刀更换刀具时的照片,从图片中可以明显看出,16#滚刀为单弦磨,刀圈仅形成一条磨损弦,13#滚刀为多弦磨,刀圈形成多条磨损弦交替分布。13#滚刀在偏磨之后的监测数据的波动范围更为平稳。

### 3.2 滚刀偏磨时温度数据分析

为了分析滚刀偏磨时,其周围的刀盘温度的变化情况,图11展示了15#滚刀和16#滚刀在里程区间段K19+700—K18+700的刀盘温度波动情况。

结合人工查刀数据可知,图11(a)桩号为K19+374处,16#滚刀因偏磨进行了滚刀更换。图11(b)中桩号K18+838处,15#滚刀因偏磨进行滚刀更换。通过计算掘进过程中滚刀与邻近滚刀的监测温度的差值,可以得出是否有异常情况发生。由于16#滚刀安装半径稍大于15#滚刀,故16#滚刀的温度应略微高于15#滚刀温度。通过对15#和16#滚刀温度进行差值计算,得出两把滚刀温度差值的变化情况,如图11所示。

由图11(a)可知,正常掘进状态下15#、16#两把滚刀温度差值在-2~2°C,但从里程号为K19+450处开始至里程桩号为K19+374处16#滚刀因偏磨原因进行更换,16#滚刀温度比15#滚刀温度高,且温度差值逐渐增加,最高达到5°C。

分析图11(b)中的刀盘温度曲线及滚刀温度差值(16#滚刀温度-15#滚刀温度)曲线可知,由于16#滚



(a) 16#



(b) 13#

图 10 滚刀偏磨状态图

Fig. 10 Uneven wear pattern of disc cutters

刀安装半径略大于 15# 滚刀, 故正常掘进过程中 16# 滚刀温度高于 15# 滚刀, 而在接近里程 K18+838 处, 温度差值为  $-4^{\circ}\text{C}$ , 此时 15# 滚刀温度反而高于 16# 滚刀温度, 且温度差值达到了  $4^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.3 滚刀偏磨的判定条件

基于上述分析, 提出以下两条针对面板刀滚刀偏磨的判定条件:

(1) 滚刀磨损监测数据波动范围超过  $4\text{ mm}$  时, 可判定被监测滚刀处于偏磨状态;

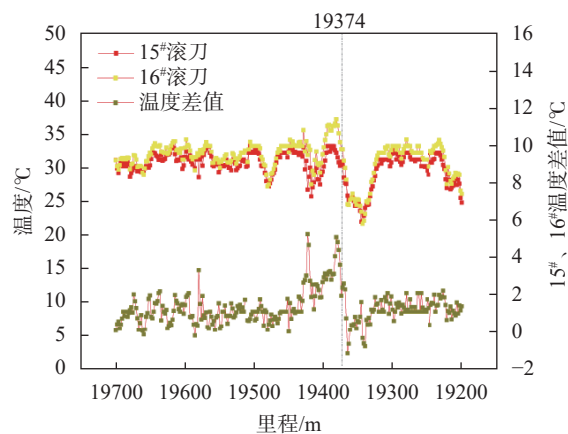
(2) 滚刀温度与相邻滚刀温度差值达到  $4^{\circ}\text{C}$  时, 可判定此时温度较高的滚刀处于偏磨状态。

通过对偏磨案例进行分析, 以上两条判定条件满足其一即可判定被监测滚刀处于偏磨状态。

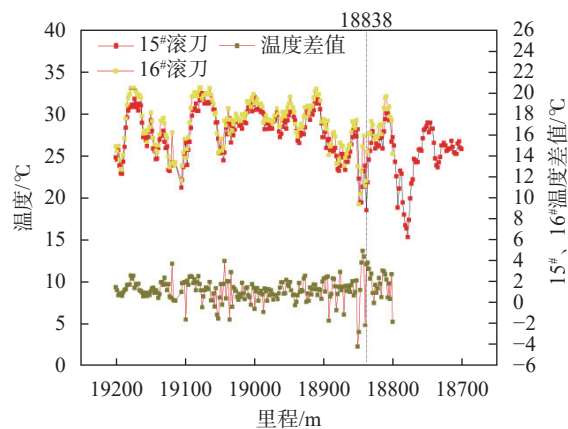
## 4 结论

本文依托引绰济辽输水工程 TBM 隧洞施工段, 通过搭载的 TBM 刀盘状态监测系统实时获取滚刀磨损量和滚刀温度。通过系统分析 TBM 滚刀服役过程磨损速率的演变规律及正常与异常滚刀的监测数据特征, 得到以下结论:

(1) 基于正常磨损机制下单把滚刀的全寿命服役过程和滚刀破岩体积磨损速率的演变规律分析, 将滚



(a)



(b)

图 11 滚刀偏磨时滚刀温度变化及相邻滚刀温差

Fig. 11 Temperature change of the disc cutter and the temperature difference of adjacent disc cutters when the disc cutter is eccentric grinding

刀磨损分为 4 个阶段: 加速磨损阶段、减速磨损阶段、稳定磨损阶段、二次减速磨损阶段。

(2) 对全寿命滚刀系统监测数据进行分析, 得出正常磨损的滚刀磨损监测数据的波动范围在  $2\text{ mm}$  以内, 正常磨损的滚刀与相邻滚刀的温差在  $2^{\circ}\text{C}$  以内。

(3) 通过对正常磨损和异常磨损监测数据的对比分析, 得出滚刀偏磨判定条件: 当滚刀磨损监测数据的波动范围超过  $4\text{ mm}$  或滚刀温度比相邻滚刀高  $4^{\circ}\text{C}$  时, 可以判定该滚刀处于偏磨状态。

## 参考文献

- [1] 龚秋明. 掘进机隧道掘进概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014. (GONG Q M. Introduction to TBM tunneling[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [2] KARAMI M, ZARE S, ROSTAMI J. Study of common wear prediction models for hard rock TBM disc cutters and comparison with field observation in Kerman water conveyance tunnel[J]. *Bulletin of Engineering Geology*

- and the Environment, 2021, 80(2): 1467-1476.
- [ 3 ] 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 (中英文), 2019, 39(11): 1914-1921. (QIN Y P, ZHANG Z Q, SUN Z C, et al. Analysis and prediction of TBM disc cutter wear based on field test[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1914-1921. (in Chinese))
- [ 4 ] NYQVIST L. Tunnelling options in long drives[D]. Luleå: Luleå University of Technology, 2005.
- [ 5 ] 胡 怡, 顾红星, 张国利. TBM 盘形滚刀的失效分析 [J]. 金属热处理, 2002, 27(1): 55-56. (HU Y, GU H X, ZHANG G L. Failure analysis of disc Hobbing for TBM[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(1): 55-56. (in Chinese))
- [ 6 ] 谭 青, 张 魁, 夏毅敏, 等. TBM 刀具三维破岩仿真 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2009, 39(6): 72-77. (TAN Q, ZHANG K, XIA Y M, et al. Three-dimensional simulation of rock breaking by TBM cutter[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39(6): 72-77. (in Chinese))
- [ 7 ] 王 涵. 盾构机盘形滚刀失效及原因分析 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022. (WANG H. Failure and cause analysis of disc cutter of shield machine[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022. (in Chinese))
- [ 8 ] 王 振, 张必波. 一种新型滚刀无线监测节点设计 [J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(4): 113-115. (WANG Z, ZHANG B B. Design of a new hob wireless monitoring node[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2023, 59(4): 113-115. (in Chinese))
- [ 9 ] 张孟喜, 曹梦佳, 魏 辉, 等. 盾构滚刀磨损三维可视化监测系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2021(9): 58-62. (ZHANG M X, CAO M J, WEI H, et al. Design of 3D visual monitoring system for shield disc cutter wear[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(9): 58-62. (in Chinese))
- [ 10 ] 贾连辉, 路亚缙, 唐亚军, 等. 适用于盾构机的滚刀磨损传感器研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64(5): 183-185. (JIA L H, LU Y T, TANG Y J, et al. Research on hob wear sensor for shield machine[J]. Automation Application, 2023, 64(5): 183-185. (in Chinese))
- [ 11 ] 费俊杰. 复合盾构新型滚刀磨损监测技术及应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024. (FEI J J. Research on wear detective technology and application of new type disc cutters in composite shield machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024. (in Chinese))
- [ 12 ] GONG Q M, WU F, WANG D J, et al. Development and application of cutterhead working status monitoring system for shield TBM tunnelling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(4): 1731-1753.
- [ 13 ] 谢兴飞. 引绰济辽输水工程二标隧洞段 TBM 滚刀磨损规律研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2022. (XIE X F. Study on the wear law of TBM disc cutter in the second standard tunnel section of the water conveyance project from Jiliao[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [ 14 ] 杜立杰, 齐志冲, 韩小亮, 等. 基于现场数据的 TBM 可掘性和掘进性能预测方法 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1284-1289. (DU L J, QI Z C, HAN X L, et al. Prediction method for the boreability and performance of hard rock TBM based on boring data on site[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1284-1289. (in Chinese))
- [ 15 ] 龚秋明, 谢兴飞, 黄 流, 等. 引绰济辽工程二标隧洞段 TBM 滚刀磨损规律 [J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(4): 1-10. (GONG Q M, XIE X F, HUANG L, et al. Wear law of TBM cutter in the tunnel section of the second bid of the Chaocer River to Xiliao river water conveyance project[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(4): 1-10. (in Chinese))
- [ 16 ] 兴 海, 谢兴飞, 龚秋明, 等. 基于 TBM 滚刀等效更换次数的滚刀寿命分析 [J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43(S1): 535-543. (XING H, XIE X F, GONG Q M, et al. Service life analysis of disc cutter based on equivalent replacement times of disc cutter of tunnel boring machine[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S1): 535-543. (in Chinese))
- [ 17 ] 周亚来, 詹金武, 邵顺安, 等. 盘形滚刀对 TBM 破岩效率的影响参数分析及优化设计 [J]. 福建理工大学学报, 2024, 22(1): 8-15. (ZHOU Y L, ZHAN J W, SHAO S A, et al. Influence parameter analysis and optimization design of disk-shaped roller cutter on TBM rock breaking efficiency[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2024, 22(1): 8-15. (in Chinese))

收稿日期: 2025-03-18