

复合地层盾构掘进滚刀荷载与磨损预测方法研究

康健 路社斌 蔡洪飞 张荣波

(北方重工富勒(沈阳)矿业有限公司 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 复合地层盾构掘进工作具有复杂性与变异性特点,增加了工作人员完成盾构机选择与设计难度。滚刀为复合地层盾构掘进工作主要工具,其荷载情况将决定最终选型结构。同时,由于复合地层掘进工作将面临复杂地层,滚刀出现断裂、刀轴损坏、荷载增加等情况的可能性大大提高。为了提高盾构机刀盘、地层性质与掘进参数之间的匹配度,本文针对复合地层盾构掘进滚刀荷载与磨损进行了详细论述,供相关人员参考。

关键词: 复合地层; 盾构滚刀; 荷载; 磨损

0 引言

受经济发展速度与城镇化建设速度影响,我国城市交通压力日益增加,交通堵塞问题日益严重,成为了各大城市亟待解决的重大问题之一。城市地铁具备安全、高效、快捷等优点,是各大城市解决交通堵塞问题的第一选择。与其他施工方法相比,盾构法施工不会受到地形地貌等因素限制,并且施工安全性较高、掘进速度快,使其在当今社会被广泛应用。但是对其应用情况进行调查发现,使用盾构法施工时,其主要设备盾构机由盾构主机与配套设备组成,盾构主机中的刀盘负责掘进工作,如果刀具地层适应性较差,则将导致其磨损速度较快,会对其掘进效率造成影响。基于此,如何保证刀盘的合适性,成为了盾构施工的主要难题。通过分析各大典型案例发现,在面对复合地层工况时,地层断面分布较为复杂,岩层变化较多,增加了掘进施工难度。也就是说在选择盾构刀盘与刀盘配置过程中,首先要了解隧道工程地质特征,以保证刀盘质量,并以此为基础完成刀具配置。

1 复合地层定义及类型

通常情况下,工作人员所说的复合地层,是指在诸如隧道等地下工程的挖掘面或者掘进方向,在强度和地质特性等方面都有很大差别的两种或者更多的岩石类型。收集现有资料可知,目前常见复合地层主要有以下几类。

1.1 横向复合地层

在掘进过程中,掘进面上的岩土特性随时间的推移发生了很大的改变。经典横向复合地层特点为“上软下硬”,如图1所示。

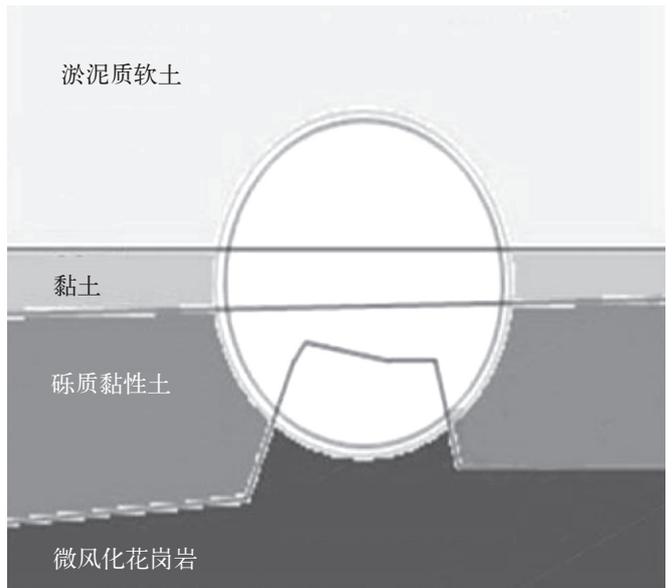


图1 复合地层垂直方向变化情况

1.2 纵向复合地层

隧道开挖面轴线方向地层性质变化较快。该地层出现主要原因为施工地段存在多个时代、多种岩性以及不同风化程度的地层,如图2所示。

1.3 多向复合地层

隧道开挖面轴线与竖直方面均存在明显变化。该类地层主要形成原因有三种。第一种为不同地层交界处;第二种为岩层中存在软弱夹层;第三种为存在

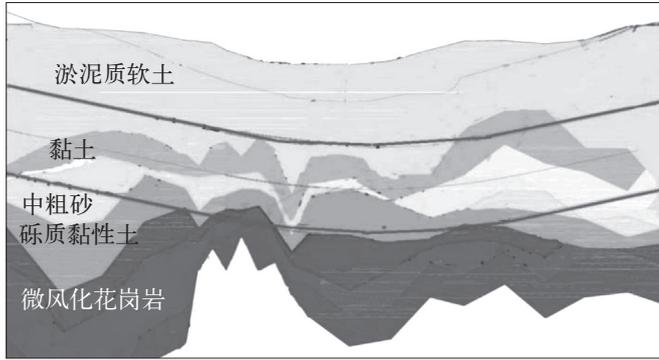


图2 复合地层轴线方向变化情况

大量淤泥、砂砾、卵石的古河道^[1]。

2 复合盾构施工特点

通过分析可以知道，以复杂地层为背景展开掘进工作时，所使用的盾构刀盘主要由两大部分组成，一是滚刀，二是刮刀。其中滚刀作用为破开岩石，刮刀主要作用为完成土体切削。而复合盾构施工主要具有以下特点：

(1) 盾构施工模式经常发生变化：施工土层不同，所选择施工模式也存在一定差异。比如在面对“上软下硬”土层时，优先选择“闭胸模式”；在面对稳定性较高的岩石土层时，优先选择“半开胸模式”。

(2) 结合土层情况调整盾构机配置：不同刀盘适合不同土层，因此在实际施工阶段，施工人员要依据地层条件来调节盾构机的布置。例如，在硬岩段的时候，要用全截面的滚刀来破岩，这样的话，刀口的开启度就会比较低，而在软岩段的时候，则要把滚刀的开启度完全或者一部分换成软黏土的切刀，同时要把刀口的开启度调整到最大^[2]。

(3) 需根据地层变化选择不同施工工艺，调整施工参数：施工地层情况不同，所使用添加剂种类、数量存在一定差异，所需要辅助设备、盾构机姿态控制也将发生变化。

(4) 需结合复合地层实际情况选择具体辅助施工方法：当盾构机无法独立完成施工时，工作人员需要选择辅助施工方法来配合完成具体施工，这是因为盾构机自身缺陷导致的，是当前技术无法解决的难题。

3 复合地层盾构滚刀荷载计算模型

3.1 土体地层滚刀荷载计算模型

从强度方面分析，滚刀材料强度远高于复合地

层土体或软岩材料，在施工过程中不需要担心滚刀遭受破坏。也正因如此，使得其相关研究资料较少，工作人员无法仅依靠相关资料确定滚刀启动转矩，导致在施工阶段出现滚刀初始偏磨情况，降低了刀具使用寿命。为保证所选择刀具的合理性，在具体选择前，需结合工况完成滚刀受力模型构建，模拟滚刀工作情况^[3]。

从图3可以看出，在x轴上，在以速度v进行向前移动的同时，滚刀刀圈承受表面与土壤的接触状态，见图4，并且接触面可作如下划分：

静止区 (CC' E' E 至 $x \rightarrow +\infty$)：该区域土体未遭受破坏，土颗粒静止不动，速度为零。

匀速运动区 (AA' B' B 至 FF' D' D)：这一地区土壤为一个整体，其流速为 v_r ，与刀环的刀刃表面 OO'C'C'C 成均匀的滑移。

过渡区 (FF' D' D 至 CC' E' E)：该区域土颗粒速度为匀速增加状态，由边界的0逐渐增加到 v_a 。

(OO' A' A 到 AA' B' B)：在此区域，土壤将受到均匀的压力和剪力的作用，土壤粒子将从刀片的边缘处被排出，并沿着切割线从刀片的边缘处排出。

相对于滚刀半径而言，滚刀渗入度略低，虽然刀圈与土体接触面为圆弧，但在xz平面内，仍然可以通过圆弧割线来判定滚刀刀圈与土体接触情况，见图5。

此时，绝对运动速度 v_a 可使用公式 (1) 计算：

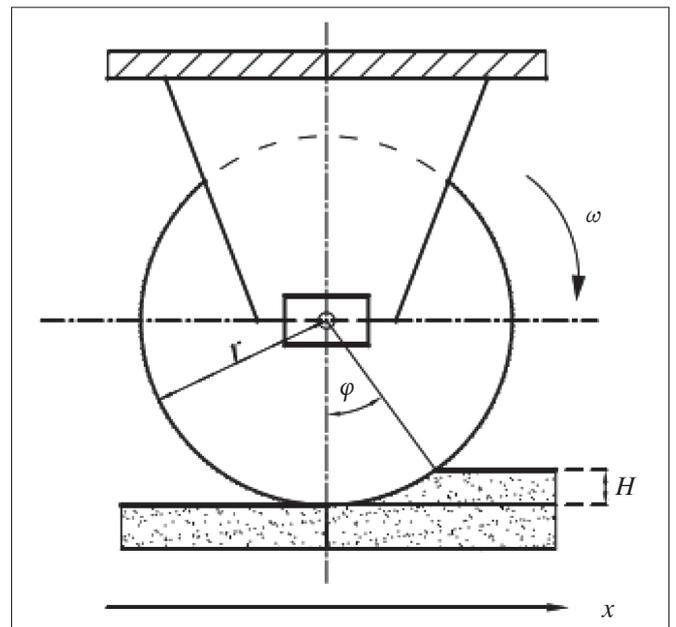


图3 盾构滚刀切削土体示意图

$$v_a = \frac{v \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

匀速运动区刀圈相对速度 v_r 可使用公式(2)计算:

$$v_r = \frac{v \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

在公式(1)与公式(2)中, α 代表接触弧线割线与土体下表面间的夹角; β 代表匀速运动区绝对速度与土体下表面间的夹角, 二者之间的关系如公式(3)所示:

$$\beta = 90^\circ \times \frac{\alpha + \varphi_a + \varphi}{2} \quad (3)$$

3.2 岩石地层滚刀荷载计算模型

在复杂地质条件下, 进行盾构法的盾构法施工时, 必须采用滚刀的碾压方法, 将顶板坚硬的岩层碾碎, 为以后的挖掘提供了有利条件。与固定刀具相比, 盘形滚刀能够实现绕轴运动, 因此, 在盾构滚刀的破岩机理和受力状态等方面, 其与岩石的接触方式主要是翻滚摩擦。CSM 是当前广泛使用的滚刀受力模式, 它的应力状态见图 6。

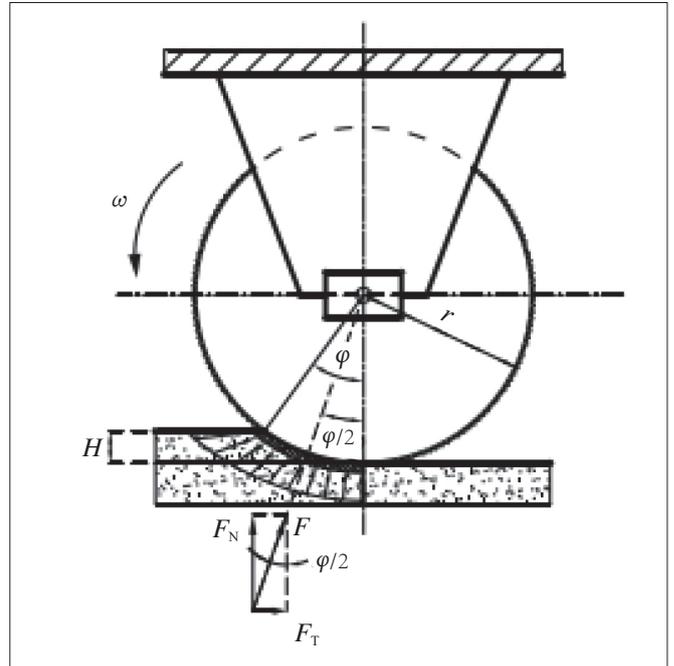


图6 盾构滚刀切削岩石示意图

CSM 模型是一种学者参照滚刀受力影响因素与岩石直线掘进试验中滚刀受力情况而建立的滚刀受力模型, 该模型一经提出就受到了业内人士的追捧, 可以使用公式(4)计算滚刀破岩阶段的法向荷载与切向荷载:

$$F_N = C \frac{\varphi_r T}{1 + \Psi} \left(\frac{S \sigma^2 \sigma_t}{\phi \sqrt{r T}} \right)^{1/3}$$

$$F_T = C \frac{\phi_r T}{1 + \Psi} \left(\frac{S \sigma^2 \sigma_t}{\phi \sqrt{r T}} \right)^{1/3} \tan \frac{\phi}{2} \quad (4)$$

在上述公式中, F_N 是滚刀破岩阶段接触表面的垂直方向荷载, 即法向荷载, F_T 是滚刀破岩阶段接触表面的平行方向荷载, 即切向荷载。

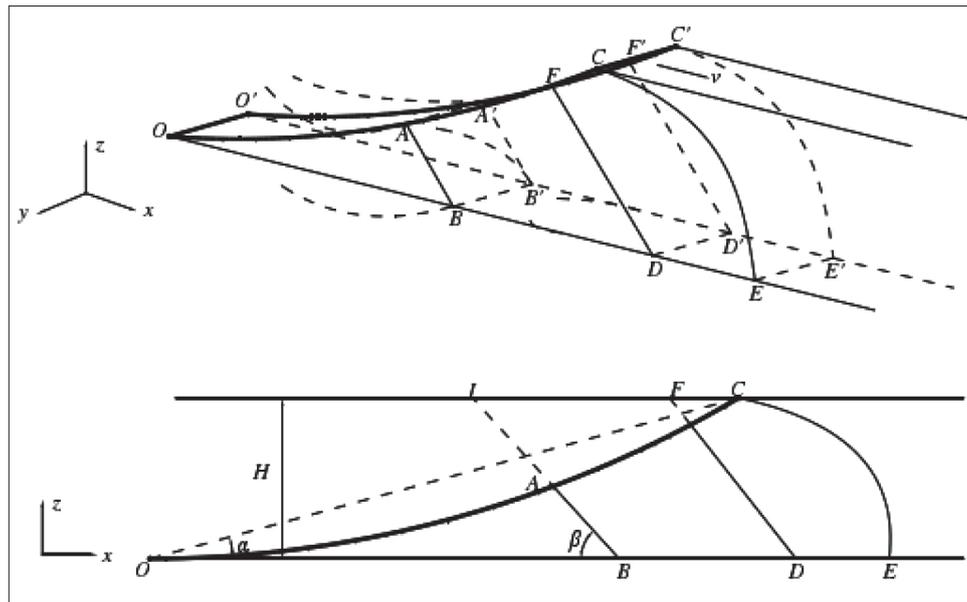


图4 滚刀刀圈刃面与土体接触示意图

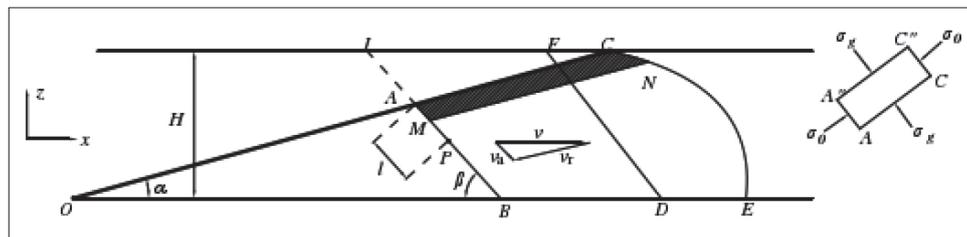


图5 盾构滚刀接触开挖面简化模型

4 复合地层盾构滚刀磨损预测

4.1 盾构刀具正常磨损机理

4.1.1 塑性去除机制

较软材料表面受到较硬颗粒切削时会产生塑性形变,

学者将材料损失部分定义为较软材料塑性去除机制。在进行盾构施工时，大多数的岩石和岩石的硬度比盾构工具的表面系数要小，仅有部分矿物颗粒硬度大于刀具，即在面对特殊矿物颗粒时，盾构刀具将出现塑性形变，将出现磨损。收集相关资料可知，塑性去除机制是导致盾构刀具出现正常磨损的主要原因，因此可以以此为切入点，建立正常磨损模型，如图7所示^[4]。

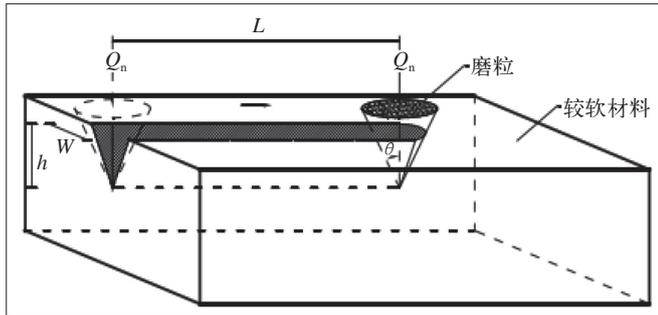


图7 塑性去除机制磨损

4.1.2 相对硬度指标

在一般的使用中，盾构切割刀的制造原料是高强度钢材和硬质合金，当前，用于测量金属材料硬度的最常见的标准有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和肖氏硬度。由于金属与非金属分子结构存在较大差异，导致硬度换算难度较大，即为了更好地分析岩石矿物对刀具的腐蚀，学者提出了代表盾构刀具与开挖面岩土材料之间的相对硬度概念——岩土体磨蚀性指标 CAI, 该指标需要借助 Cerchar 试验获取，试验装置如图8所示。

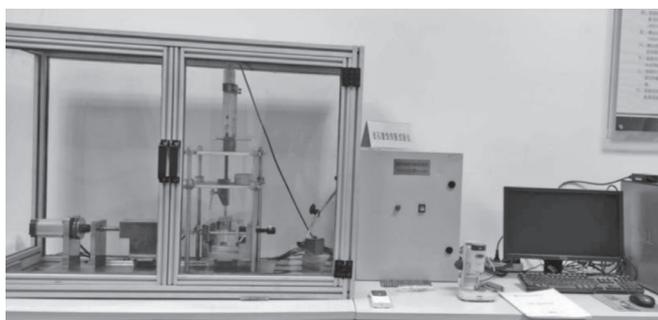


图8 Cerchar 试验装置

4.1.3 相对运动分析

结合盾构刀具模型塑性去除机制可知，造成刀具磨损的必要条件之一为刀具与开挖面材料形成相对运动^[5]。其中盾构切刀等软土刀具的滑动距离与切削轨迹长度相等，实际切削轨迹为圆柱螺旋。但是

对于盾构滚刀而言，在理想工况下，滚刀在跟随盾构刀盘旋转时，自身也会在地层切向摩擦力的影响下产生自传，即其相对滑动距离大于运动轨迹，此时可以使用公式(5)计算其运动轨迹长度。

$$l = \sqrt{(2\pi R_i)^2 + (v_0/\omega_0)^2} \quad (5)$$

式中： R_i —刀盘中编号*i*滚刀的安装半径。

当刀盘旋转*n*圈后，其运动轨迹总长度可使用公式(6)计算：

$$L = Nl = \frac{x}{H} \sqrt{(2\pi R_i)^2 + (v_0/\omega_0)^2} \quad (6)$$

4.2 复合地层盾构刀具正常磨损量预测

4.2.1 Archard 磨损定律

Archard 磨损定律是指材料磨损体积与接触荷载、相对滑动距离之间存在线性关系，与相对滑动速率无关，具体表达式为公式(7)。

$$\Delta V = K \frac{F_N L_S}{H_m} \quad (7)$$

式中： ΔV —材料磨损体积，对于盾构刀具而言， ΔV 表示刀刃或刀圈体积磨损量；

F_N —接触荷载；

H_m —较软材料硬度；

K —无量纲的材料磨损系数，与被磨损材料性质有关^[6]。

4.2.2 正常磨损量预测模型

按照 Archard 损耗规律，盾构工具的损耗量与工具材质的硬度相关，但由于盾构工具材质的改变，导致工具在掘进过程中，由于工具材质的改变，导致工具在掘进过程中所产生的损耗量也随之改变，这是 Archard 损耗规律无法体现的。因此，在 Cerchar 测试中，在合金针头的磨损量的计算中，将相对硬度指数 CAI 值导入到 Archard 磨损定律^[7]。

在塞查实验中，用阿查德损耗法则可以求出合金针头的损耗体积，其具体的运算表达式如下：

$$\Delta V_p = K_p \frac{F_{NP} L_{SP}}{H_m} \quad (8)$$

式中： K_p —Cerchar 试验中合金针所用材料所对应的磨损系数；

F_{NP} —该试验中合金针上部所加荷载；

L_{SP} —该试验中针尖在岩石断面上划过的距离。

其中, F_{NP} 与 L_{SP} 均为固定值。 $F_{NP}=68.6N$, $L_{SP}=1cm$ 。

其中合金针磨损体积可以使用公式 (9) 计算:

$$\Delta V_p = \frac{\pi}{24} (CAI)^3 \cos\theta_p \quad (9)$$

式中: θ_p - Cerchar 试验中合金针半角, $\theta_p=45^\circ$ 。

对公式 (8) 与公式 (9) 进行联立, 可以发现 Archard 磨损规律中较软材料硬度 H_m 与土体材料磨蚀性指标 CAI 二者之间的关系, 如公式 (10) 所示。

$$H_m = K' \frac{F_{NP}}{(CAI)^3} \quad (10)$$

其中, K' 可使用公式 (11) 计算:

$$K' = \frac{24}{\pi} K_P L_{SP} \tan\theta_p \quad (11)$$

借助公式 (7) 与公式 (10) 可以获得基于岩土材料磨蚀性指标的 Archard 磨损定律, 具体如公式 (12) 所示:

$$\Delta C = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{K}{K_P} \cdot \frac{F_N}{F_{NP}} \cdot \frac{L_S}{L_{SP}} \cdot (CAI)^3 \cot\theta_p \quad (12)$$

式 (12) 代表当开挖面岩土体材料性质发生变化时, 盾构刀具磨损体积的变化规律, 这对于预测开挖面性质复杂的复合地层盾构掘进中刀具的磨损量有重要意义。

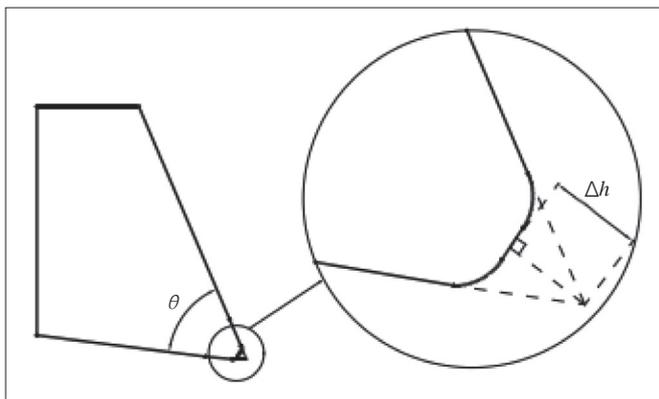


图9 盾构切刀磨损形式

4.2.3 固定刀具正常磨损量预测模型

在传统的盾构切刀的界面形状看起来就像是在图9所示的那样, 在磨损之后, 刀刃处是一个圆弧面, 因为这个弧面的横断面上的圆弧半径会随着磨损量而改变, 精准数值计算较为复杂。因此可以使用等效三棱柱代替刀刃磨损部位。

4.2.4 滚刀正常磨损量预测

盾构滚刀刀圈截面形状如图10所示, 当磨损深度为 Δh 时, 可使用公式 (13) 计算磨损体积 ΔV :

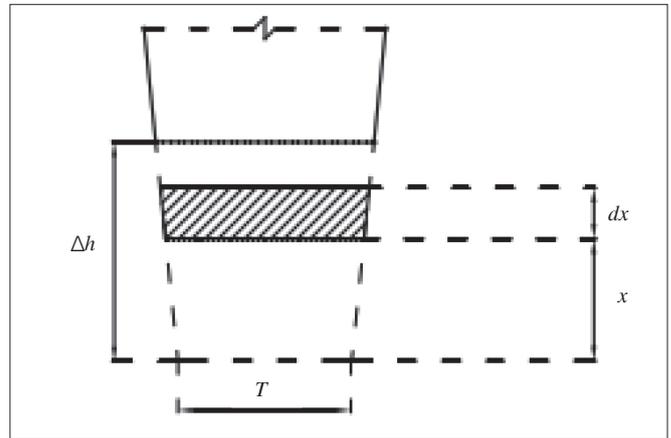


图10 盾构刀圈磨损形式

$$\Delta V = 2\pi \int_0^{\Delta h} \left[(T + 2x \tan\frac{\theta}{2}) (r - x) \right] dx = \pi \left[2rT\Delta h - \Delta h^2 (T - 2r \tan\frac{\theta}{2}) - \frac{4}{3} \Delta h^3 \tan\frac{\theta}{2} \right] \quad (13)$$

据此, 从理论上讲, 通过对盾构施工到隧道各个开挖面上的施工工艺和地质条件的记录, 可以得到滚刀的累积磨损量。当一个数据采集点越多时, 这个模式的预报精度就越高^[8]。但在实践中, 仅可逐环记录隧道施工工艺参数, 且难以逐环记录隧道施工工艺参数 (特别是岩体磨损指数)。为了能够在盾构尚未进行开挖之前, 对盾构工具的损耗进行预估, 并为施工过程中的换刀计划与施工组织方案的制定提供依据, 可以通过将已有的地层勘探数据与刀盘刀具配置数据, 提前估计出隧道开挖至不同部位时盾构工具的损耗状况^[9]。

5 结语

由于其受力机理复杂, 影响因素众多, 且缺乏相应的实验方法, 因此, 其载荷分析及磨损预报一直是我国盾构施工领域迫切需要解决的问题。本文针对复合地层盾构掘进滚刀荷载与磨损预测展开了详细论述, 结合前人研究成果制定了相关模型, 但受限于文章篇幅限制, 研究内容还存在较大提升空间, 所以相关结论仅供参考使用。

参考文献:

[1] 贾科, 宋天田, 孙前伟, 等. 复杂地层 EPB/TBM 双模式盾构掘进性能分析 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42(S2): 479-486.

[2] 张慧鹏, 张康健, 夏明, 等. 中强风化泥质粉砂岩复合地层盾构掘进参数控制 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(06): 2016-2026.

[3] 韩琳亮, 陈佳, 朱俊, 等. 基于安全高效掘进的复合地层盾构选型与刀具布置 [J]. 建设科技, 2022(19): 109-111.

[4] 潘秋景, 李晓宙, 黄杉, 等. 机器学习在盾构隧道智能施工中的应用——综述与展望 [J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(03): 10-30.

[5] 干聪豫, 苏伟林, 刘泓志, 等. 复合地层盾

构掘进滚刀荷载试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 133-139+155.

[6] 王国安, 王超峰, 陈桥, 等. 海底隧道极软极硬复合地层超大直径盾构掘进方法研究——以汕头海湾隧道工程为例 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42(05): 892-899.

[7] 宋冲, 杨明先. 大直径盾构复合地层常压刀盘刀具配置优化及管理技术探讨 [J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(03): 70-74.

[8] 韩旭, 王旭春, 曹云飞, 等. 青岛地铁盾构刀盘与地层适应性研究 [J]. 建筑施工, 2021, 43(12): 2547-2551.

[9] 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(01): 133-141.

