

复合地层盾构掘进滚刀荷载与磨损预测方法研究

康健 黄虹 曲迪 蔡洪飞
北方重工富勒(沈阳)矿业有限公司

摘要: 复合地层盾构掘进工作具有复杂性与变异性特点,增加了盾构机选择与设计的难度,滚刀为复合地层盾构掘进工作主要工具,其荷载情况决定最终选型结果。同时由于复合地层掘进工作面临复杂地层时,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。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,供相关人员参考使用。

关键词: 复合地层; 盾构滚刀; 荷载; 磨损

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.07.045

引言

城市地铁具备安全、高效、快捷等优点,是解决大城市交通拥堵问题的首要方式。与其他施工方法相比,盾构法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,使其被广泛应用。使用盾构法施工时,盾构主机中如果使用对地层适应性较差的刀盘刀具,则将导致其磨损速度较快,会对其掘进效率造成影响。如何保证刀盘的合适性,成了盾构施工的主要难题。

一、复合地层定义及类型

复合地层是指地球地壳中的一种地质结构,由多层岩石或地层组合而成。它通常由两种及以上岩土层按照特定的方式复合而成,每层都具有不同的岩土类型、厚度和性质。目前常见复合地层主要存在以下几类:

- (1) 横向复合地层: 隧道掌子面垂直方向地层性质变化较快。经典横向复合地层特点为“上软下硬”。
- (2) 纵向复合地层: 隧道掌子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。
- (3) 多向复合地层: 隧道掌子面轴线与垂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; 第三种为存在大量淤泥、砂砾、卵石的古河道^[1]。

二、复合盾构施工特点

针对复合地层开展掘进工作进行分析可知,所使用盾构刀盘主要有滚刀与刮刀两大部分,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备以下特点:

- (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,因此工作人员在实际施工阶段,需根据土层情况调整刀盘刀具配置。比如在硬岩段掘进时,需使用全断面滚刀完成岩石破碎,刀口开盘率较小,但是在软岩段掘进时,需要将滚刀全部或部分替换为软土切

刀,并且要调大刀口开盘率^[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。

三、复合地层盾构滚刀荷载计算模型

(一) 土地层滚刀荷载计算模型

从强度方面分析,复合地层中土体或软岩材料强度远低于滚刀材料强度,普遍不需要考虑在施工过程中滚刀的破坏。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扭矩,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。即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]。

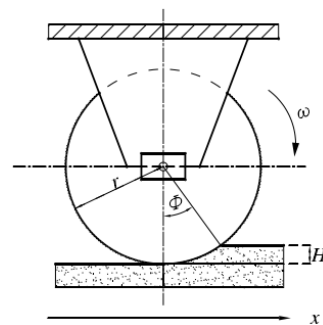


图1 盾构滚刀切削土体示意图

如图1所示,当滚刀在x轴正方向以v速度做运动时,滚刀刀圈刃面与土体接触情况如图2(a)所示,并且接触面可做出如下划分:

- 静止区(CC'E'E至x——+∞): 该区域土体未遭受破坏,土粒静止不动,速度为0;
- 匀速运动区(AA'B'B至FF'D'D): 该区域土体为一个整体,速度v_r相对于刀圈刃面OO'C'C作匀速滑动。

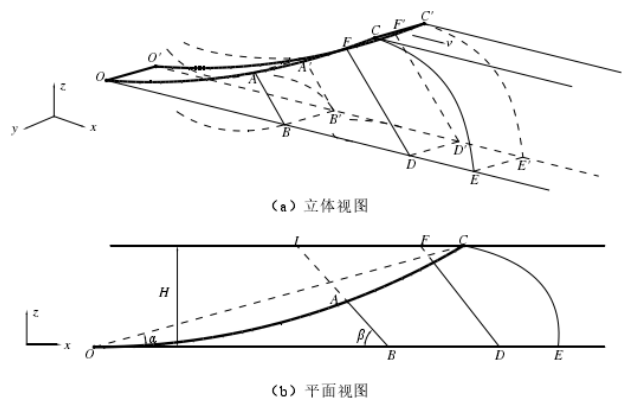


图2 土体与滚刀刀圈刃面接触示意图

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 。

剪切破坏区 (OO' A' A至AA' B' B)：该区域内土体会遭到匀速挤压并产生剪切破坏，土粒经滚刀刀圈两侧挤出，沿切削路径向两侧排出。

相比于刀圈半径，滚刀贯入度较小。虽然滚刀与土体接触面为圆弧，但为了降低计算难度，可以借助弧线来判断在xz平面中的滚刀与土体的相互接触，如图3所示。

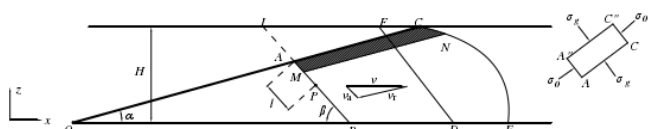


图3 盾构滚刀接触掌子面简化模型

此时，绝对运动速度 v_a 可使用公式(1)计算：

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

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 代表土体下表面与相互接触弧线间的夹角； β 代表土体下表面与匀速运动区绝对速度间的夹角，二者之间的关系如公式(3)所示。

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

(二) 岩石地层滚刀荷载计算模型

对于复合地层隧道盾构施工而言，掌子面上部硬质地层需要借助滚刀使用挤压方式进行破碎，为后续掘进创造机会。与固定刀具所不同的是，盘形滚刀可以完成绕轴运动，掌子面岩体与滚刀刀圈间相互接触的摩擦以滚动摩擦为主，此时滚刀的破岩原理、受力状态等内容均存在明显差异。目前，应用范围最广的滚刀受力模型为CSM模型，其受力情况如图4所示。

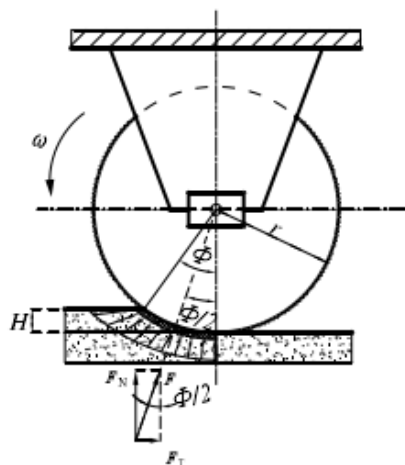


图4 盾构滚刀切削岩石示意图

CSM模型是科罗拉多矿业大学提出的滚刀破岩受力模型。该模型通过分析影响滚刀破岩受力因素，通过大量滚刀破岩实验得出，是应用最为广泛的滚刀受力预测

模型。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：

$$F_N = C \frac{\Phi_r T}{1 + \Psi} \left(\frac{S \sigma^2 \sigma_r}{\Phi \sqrt{r} T} \right)^{1/3} \quad (4)$$

$$F_T = C \frac{\Phi_r T}{1 + \Psi} \left(\frac{S \sigma^2 \sigma_r}{\Phi \sqrt{r} T} \right)^{1/3} \tan \frac{\phi}{2}$$

在上述公式中， F_N 代表岩体与滚刀接触的滚刀法向荷载， F_T 为岩体与滚刀接触的滚刀切向荷载。

四、复合地层盾构滚刀磨损预测

(一) 盾构刀具正常磨损机理

1. 塑性去除机制

对于盾构掘进工作而言，隧道掌子面绝大部分岩土材料硬度都小于盾构刀具表面因素，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，盾构刀具将出现磨损，是导致盾构刀具出现正常磨损的主要原因，可以以此为切入点，建立正常磨损模型^[4]。

2. 相对硬度指标

盾构刀具主要制作材料为高强度钢与硬质合金。为了便于分析岩石相对于刀具材料的磨蚀作用，学者多采用Cerchar磨蚀性指数CAI指数来评估岩体在岩石钻探或岩石切割过程中的磨蚀性能。该指标需要借助Cerchar试验获取。

3. 相对运动分析

刀具磨损的主要原因为刀具与掌子面材料的相对运动^[5]。其中盾构切刀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。对于盾构滚刀而言，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转，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。

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

在上式中， R_i 为刀盘中编号*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。

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

(二) 复合地层盾构刀具正常磨损量预测

1. Archard磨损定律

Archard磨损定律是指磨损移去材料体积与相互接触法向荷载、移动距离之间存在线性关系，具体表达式为公式(7)。

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

在上式中， ΔV 代表材料移去体积，对于盾构刀具而言， ΔV 代表刀刃或刀圈体积磨损量， F_N 代表接触法向荷载， H_m 代表材料的硬度值， K 代表磨料磨损系数，与被磨料大小、形状等因素有关^[6]。

2. 正常磨损量预测模型

根据Archard磨损定律，刀具材料硬度影响盾构刀具磨损体积，当刀具掘削时刀具材料是不变的，掌子面岩土体作为磨粒硬度产生变化，刀具本身的磨损也会产

生变化, 因为根据Cerchar实验中的结论, 刀具材料与磨粒之间的相对硬度影响了刀具磨损速率, 而Archard磨损定律缺少这方面的因素考虑。因此, 在Archard磨损定律中加入Cerchar试验中相对硬度指标CAI值, 引入相对硬度的概念 [7]。

通过Archard磨损定律可以求得在Cerchar试验中的金属针磨损体积 ΔV , 具体计算式如公式(8)所示:

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

在上述公式中, K_p 为Cerchar金属针使用材料相应的磨粒磨损系数; F_{NP} 为金属针所受法向载荷; L_{SP} 为金属针尖在与岩石相互接触面上刻划相对距离。其中, F_{NP} 与 L_{SP} 均为常数。 $F_{NP}=68.6\text{N}$, $L_{SP}1\text{cm}$ 。金属针磨损体积采用公式(9)计算。

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

在上述公式中, θ_p 代表Cerchar试验中金属针半角, $\theta_p=45^\circ$ 。联立公式(8)与公式(9), 可以发现Archard磨损定律中刀具材料硬度 H_m 与Cerchar磨蚀性指数CAI的联系, 如公式(10)所示。

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

其中, K' 看使用公式(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)可以获得引入CAI指数的Archard磨损定律, 具体公式如公式(12)所示:

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

上式表明掌子面地层性质发生变化时, 刀具引入CAI指数的Archard磨损公式。通过对上式计算, 可以预测在盾构机复合地层掘削中盾构刀具磨损量。

3. 滚刀正常磨损量预测

滚刀刀圈正常磨损横截面形状如图8所示, 使用公式(13)可求得磨损体积 ΔV :

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

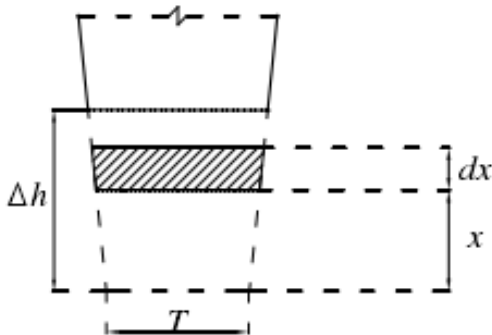


图8 盾构刀圈磨损形式

根据该模型, 如果记录了盾构掘进过程中的掘进参数和地质参数, 并将其与滚刀刀圈的累计磨损量进行关联, 那么在不同掌子面位置上进行更频繁的数据记录, 将能提高该模型对滚刀刀圈磨损量的预测精度 [8]。在实际工程中, 通常只能逐环记录盾构掘进参数, 而对地质参数(特别是岩石磨蚀性指标)进行逐环记录较为困难。为了在盾构开始掘进之前预测刀具的磨损情况, 并为施工过程中的刀具更换计划和施工组织方案提供依据, 可以利用已有的地层勘探数据和刀具布置数据, 将其输入到预测模型中, 以对盾构刀具在不同位置掘进时的磨损情况进行初步估计。通过利用现有数据, 可以提前预估盾构刀具在隧道掘进到不同位置时的磨损情况 [9]。

五、结束语

在盾构隧道工程中, 预测盾构滚刀的荷载和磨损是一个紧迫需要解决的问题。然而, 盾构滚刀的受力和磨损机理非常复杂, 同时受到多个影响因素的影响, 这使得研究方式相对匮乏。本文详细探讨了复合地层盾构掘进中滚刀的荷载和磨损预测问题, 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, 王平豪, 娄永录, 杨军伍. 复杂地层EPB/TBM双模式盾构机掘进性能分析[J/OL]. 隧道建设(中英文): 1-8 [2023-03-20].

[2] 张慧鹏, 张康健, 夏明, 张志强, 钟广. 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, 杨平. 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, 汪来, 王树英, 方国光. 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, 李兴高. 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, 张文新. 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, 吴文瑞, 滕宏伟. 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, 冯硕, 李兆国. 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.