

DOI: 10.11779/CJGE20230723

基于 EDEM 的砂卵石地层盾构刀具磨损特征研究

张晋勋¹, 李 博^{*1}, 江玉生², 江 华², 殷明伦¹, 孙正阳¹

(1. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100088; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为揭示砂卵石地层土压平衡盾构典型刀具的磨损特征, 指导该地层中盾构刀具的设计、布置等关键问题。采用室内三轴试验及数值离散元软件(EDEM)仿真分析, 标定了颗粒-刀具磨损接触参数。依托北京新机场“磁各庄-1号风井”砂卵石盾构工程, 构建了砂卵石地层 EDEM 数值盾构模型, 可视化了砂卵石地层土压平衡盾构中典型刀具(楔犁刀、刮刀)的磨损特征, 通过实际工程对模型进行了验证。研究表明: ①以犁松原状砂卵石土为目的的楔犁刀是掘进主切削刀具, 表现为刀头合金表面以及刀角处连续的摩擦磨损形式, 磨损量较大; ②以剥落输排为目的刮刀主要表现为刀身迎土面以及刀头合金表面随机的点蚀磨损, 磨损量较小; ③刀盘径向刀具的磨损量随轨迹半径及刀体高度的增加而增大, 同轨迹上高刀的磨损系数高于低刀, 高刀对低刀的磨损有保护作用; 刀盘径向刀具和环向刀具的“梯次化”布置可延长盾构单次连续掘进距离。

关键词: 砂卵石地层; 盾构刀具; 磨损特征; EDEM 数值仿真; 设计与布置

中图分类号: TU94.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)10-2212-09

作者简介: 张晋勋(1967—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事土木工程施工技术研究与应用等方面的研究工作。

E-mail: 99983618@qq.com。

Wear characteristics of shield cutters in sand-pebble strata based on EDEM

ZHANG Jinxun¹, LI Bo¹, JIANG Yusheng², JIANG Hua², YIN Minglun¹, SUN Zhengyang¹

(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China

University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reveal the wear characteristics of typical EPB shield cutters in sand-pebble strata and guide the design and layout of shield cutters in the strata, the particle-cutter wear contact parameters are calibrated through the indoor triaxial tests and discrete element software simulation analysis of EDEM. An EDEM numerical shield model for the sand-pebble strata is established based on the Beijing New Airport Line section from Cigezhuang station to No.1 air shaft in the sand-pebble strata. The wear characteristics of typical rippers and scrapers during soil pressure balance shield tunneling in the sand-pebble strata are visualized, and the model is verified through an actual project. The research results show that: (1) The rippers for plowing loosely the undisturbed soils are the essential cutting tools with an excessive wear, and the manifestation is continuous friction and wear on the alloy surface of the cutting head and at the blade edge. (2) The scraper for the purpose of stripping and discharging is mainly characterized by random pitting wear on the soil surface of the blade body and the alloy surface of the blade head, and the wear amount is small. (3) The wear amount of the radial cutter of the cutterhead increases with the increase of the radius of the trajectory and the height of the cutter body. The wear coefficient of the high cutter is higher than that of the low cutter on the same trajectory, and the high cutter has a protective effect on the wear of the low cutter. The gradient arrangement of cutters can extend the single continuous excavation distance and improve the efficiency of shield tunneling in the sand-pebble strata.

Key words: sand-pebble stratum; shield cutter; wear characteristic; EDEM numerical simulation; design and layout

0 引 言

城市地铁隧道建设中, 盾构因其掘进速度快、安全性高、环境影响小等优势得到普遍应用。由于地质条件的复杂性, 盾构刀具的配置通常不同。例如, 岩

层中需配置以滚刀为主的破岩刀具, 而在泥土层中,

基金项目: 北京市博士后科研活动经费资助项目(2022-ZZ-097)

收稿日期: 2023-07-31

*通信作者(E-mail: 357428609@qq.com)

多配置以切刀和刮刀为主的切削工具。砂卵石地层是中国的一种典型地质环境, 广泛分布于北京、沈阳、成都等地区, 该地层粒径不均, 卵石强度高、磨蚀性强, 咬合力强, 不易普通切削。因此针对砂卵石地层中的盾构掘进, 多采用大开口率辐条式刀盘, 配置楔犁刀以及刮刀, 以楔犁刀具犁松原状地层为主, 刮刀剥落搅拌为辅, 遵循“楔犁-松动-剥落”的开挖机理^[1]。在楔犁原状地层过程中, 刀具会出现严重的磨损, 磨损超限时, 往往会引起刀盘扭矩上升, 掘进困难, 频繁开仓换刀等问题^[2], 导致掘进效率大幅降低。因此, 国内学者对砂卵石地层刀具磨损机制和控制措施进行了诸多研究。

孙振中^[3]依托成都都江堰站—蒲阳站区间砂卵石隧道工程, 对滚刀消耗及失效形式进行统计分析, 指出滚刀的磨损形式为划痕和块状凹坑。周建军等^[4]依托成都地铁 1, 7 号线, 得到了砂卵石地层盾构掘进过程中滚刀的磨蚀规律。秦银平等^[5]总结了盾构盘形滚刀和切刀的磨损失效形式, 分析了刀具磨损失效的原因。张厚美^[6]统计了秦岭隧道 TB880E 掘进机完整的滚刀磨损数据, 分析了滚刀磨损规律和磨损机制。张晋勋等^[7]揭示了重型刀具与大粒径卵漂石的相互作用机理, 基于能量原理提出重型刀具的劈裂破岩机理。王振飞等^[8]基于现场实测数据, 分析了富水砂卵石地层大直径盾构刀具的磨损规律。近年来, 学者们利用计算机仿真技术对卵砾石等硬岩地层盾构展开研究。乔金丽等^[9]利用 ABAQUS 有限元软件分析了全断面隧道掘进机滚刀破岩历程。江华等^[10]利用 PFC^{3D} 数值模拟与现场测试相结合, 研究了刀盘开口率、刀具组合高差、刀间距等参数对掘进效率的影响。蒋明镜等^[11]应用离散元软件 PFC^{2D}, 对全断面岩石掘进机(TBM)盘形滚刀作用下的破岩机理进行数值模拟研究。谭青等^[12]用颗粒离散元 PFC^{2D} 建立了岩石与切刀的二维数值模型, 研究了切刀切削岩石过程中, 刀具表面的破坏作用。国外学者重点关注 TBM 工程中刀具的磨损情况, 鲜有对砂卵石地层盾构刀具磨损特征的研究。

综上所述, 国内外学者对盾构刀具磨损特征的研究主要集中在滚刀磨损上, 对目前砂卵石地层广泛配置的楔犁刀和刮刀磨损特征的研究不够充分, 个别案例中对楔犁刀、刮刀磨损的观测存在一定的技术难度及观测误差, 无法建立规律性的砂卵石地层盾构刀具磨损特征。计算机技术的发展给盾构的研究带来了便捷, 但目前多采用有限元软件将砂卵石地层等效成连续介质, 无法研究离散体颗粒对刀具的磨损效果, 而利用离散元软件 PFC 的分析中, 由于缺少接触磨损的本构模型, 无法直接研究刀具的磨损特征。基于此,

本文为可视化刀具磨损特征并获得稳定的磨损数据, 综合采用室内试验、EDEM 离散元数值方法, 建立精细化刀盘刀具配置模型, 进行砂卵石地层盾构掘进的仿真计算, 并基于 EDEM 软件内置的 Archard Wear 磨损模型, 获得砂卵石地层盾构刀具磨损特征及磨损规律, 旨在为砂卵石地层盾构掘进刀具磨损控制及刀具设计和布置提供理论依据。值得注意的是, 对于富含巨粒的卵漂石地层, 一般配置具有冲击破碎作用的重型刀具, 本文不作研究。

1 砂卵石土微观参数标定

1.1 室内三轴试验

土样由北京新机场线原状砂卵石土制备而成。从现场取出土体后进行烘干, 之后对干燥的土样进行筛分, 得到不同颗粒直径土体颗粒, 粒径范围分别为: <0.25, 0.25~0.5, 0.5~2, 2~4, 4~5, 5~6.5, 6.5~8, 8~10, 10~20, 20~40, 40~60, >120 mm, 筛分结果显示, 原状土最大粒径小于 120 mm, 筛分出的各粒径区间的土体进行分别称重, 得到原状土体的颗粒级配曲线, 如图 1 所示, 各典型粒径区间的土体占比, 如表 1 所示。

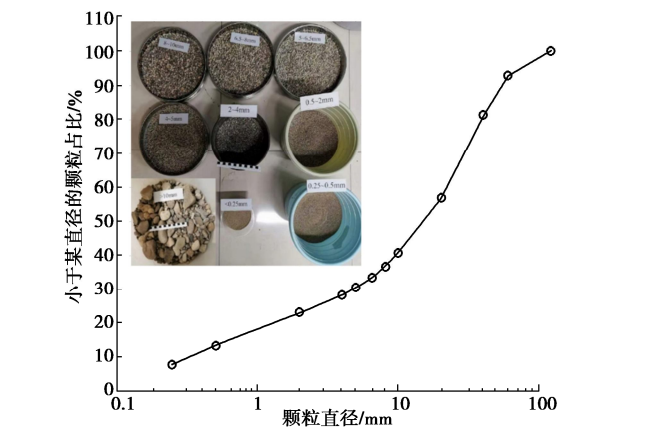


图 1 砂卵石颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of sand and gravel particles

表 1 各粒径颗粒占比

Table 1 Proportion of soil with different particle sizes				
粒径/mm	60~120	40~60	20~40	<20
质量百分比/%	6.9	11.6	24.4	57.1

进行室内大直径三轴压缩试验, 在试验台上安装好橡皮膜并在底部放置透水膜, 试样的尺寸为 300 mm×600 mm, 分别进行围压为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 MPa 下的常规三轴排水固结试验, 当位移达到试件高度的 15%时认为试样破坏, 并记录试验曲线和数据。由图 2 可以看出, 在轴向压力及围压的作用下, 试样呈现中部鼓出的破坏特征。



图 2 试样破坏特征

Fig. 2 Failure characteristics of specimen

1.2 参数标定仿真试验

基于上述三轴试验结果，采用数值三轴试验对 EDEM 离散元模型中所需计算参数进行标定。EDEM 软件内置了不考虑黏结力的 Hertz-Mindlin(no-slip)接触模型，是研究砂卵石地层盾构掘进较为适合的数值模型^[13]。数值三轴试验严格按照室内试验程序进行，考虑到颗粒大小对刀具的磨损特征影响不敏感，因此为使数值计算的颗粒级配接近实际地层，并提高计算效率，计算时以表 1 的颗粒级配为基础，对实际地层中粒径在 60~120 mm 的卵石颗粒，采用 120 mm 粒径的颗粒进行替代，占比为 10%；粒径在 40~60 mm 之间的卵石颗粒，采用 60 mm 粒径的颗粒进行替代，占比为 15%；粒径在 20~40 mm 的卵石颗粒，采用 40 mm 粒径的卵石进行替代，占比为 30%；粒径小于 20 mm 的卵石颗粒，采用 20 mm 粒径的卵石作为代表，占比为 45%。本次数值模拟需要标定的颗粒微观参数主要有：颗粒与颗粒（卵石与卵石）以及颗粒与盾构机之间的静摩擦系数（ μ_s ）、滚动摩擦系数（ μ_r ）和恢复系数（ e ）。卵石颗粒的剪切模量、泊松比、密度通过查询地勘资料获得。

数值计算模型包括上下两个加载压盘和一个柔性“圆筒”，该圆筒是通过在内部颗粒外围增设一层“压力颗粒”来实现的，模拟与室内试验中起约束效果的“橡皮模”。EDEM 提供了基于 C / C++ 的 API 二次开发接口，计算时利用颗粒体积力插件设置外层压力颗粒。数值模拟过程试样变形情况如图 3 所示，试样的最终破坏特征与图 2 较为一致。

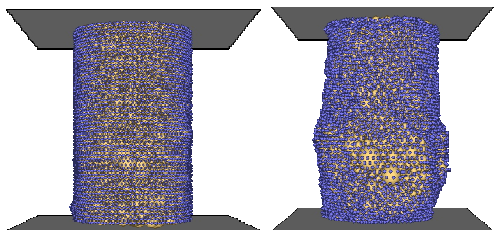


图 3 数值三轴试验

Fig. 3 Numerical triaxial shear tests

此时得到图 4 所示的应力-应变曲线，数值三轴试验结果与室内三轴试验结果较为吻合，最终确定的接触参数见表 2 所示，材料参数见表 3 所示。

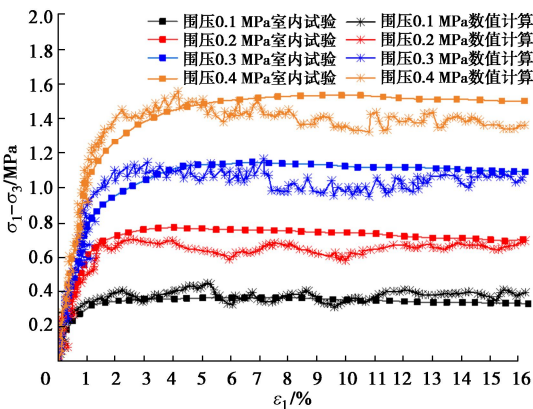


图 4 试样应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of specimen

表 2 接触参数

Table 2 Contact parameters

接触部位	参数		
	静摩擦系数	滚动摩擦系数	恢复系数
颗粒-加载盘	0.7	0.001	0.25
颗粒-边界墙	0.7	0.001	0.25
颗粒间	0.8	0.04	0.75

表3 材料参数

Table 3 Material parameters

接触部位	参数		
	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
盾构机	7.9×10 ¹⁰	7800	0.25
边界墙	7.9×10 ¹⁰	7800	0.25
卵石颗粒	1.12×10 ⁷	2200	0.27

1.3 Archard Wear 磨损接触本构

本次模拟使用的 Archard Wear 磨损接触本构^[14]是 EDEM 内置的一种接触模型，该模型广泛用于两个相对滑动的表面在摩擦力的作用下，因“金属转移”现象而产生的颗粒对几何体的磨损，该模型假设摩擦副的一方为较硬材料（盾构刀具），摩擦副另一方为较软材料（卵石颗粒），模型原理如图 5。模型能直观地通过法向累积接触力、法向累积接触能量标示出物料对几何体设备的磨损分布情况。磨损计算公式如下：

$$d = \frac{K_0}{H_v} F_n \Delta U \quad (1)$$

式中： d 为材料磨损量(mm)； F_n 为单元法向压力(Pa)； H_v 为材料硬度 (Pa)； ΔU 为滑动距离 (mm)； K_0 为与材料特性相关的磨损常量，仿真中只需提供磨损常量就可以计算磨损深度 d 。考虑到实际工程中，通常对待掘进地层进行改良，注入膨润土或泡沫等润滑剂，参考 Rabinowicz 给出了表面润滑材料的磨损常量

值^[15], K_0 取 1.7×10^{-6} 进行计算。

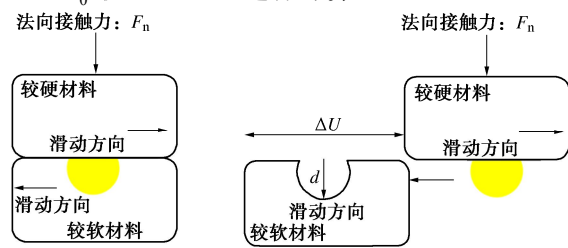


图 5 Archard 磨损模型原理
Fig. 5 Principle of Archard wear model

2 砂卵石盾构掘进 EDEM 模型

2.1 地层颗粒床模型

考虑到卵石颗粒形状不规则, 为使磨损特征贴近实际情况, 根据实物形状, 使用 Solidworks 建立颗粒模型, 划分网格, 并导出为 mesh 形式的 stl 文件, 最后利用 EDEM 中的非球形自动填充工具, 快速填充异形颗粒, 如图 6 所示。地层颗粒床通过 Particle factory 功能生成, 为消除边界效应, 根据等效后的粒径分布, 建立尺寸为 $18\text{ m} \times 12\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的卵石颗粒床 (图 7 (a))。计算模型上边界指定为自由曲面, 其余边界由颗粒位移约束。颗粒生成后, 在重力作用下稳定, 为更接近于实际情况, 使用加载面对颗粒床进行压实, 达到受力平衡。图 7 (b) 为平衡状态下颗粒压缩力分布图, 压缩力随地层深度逐渐增大。

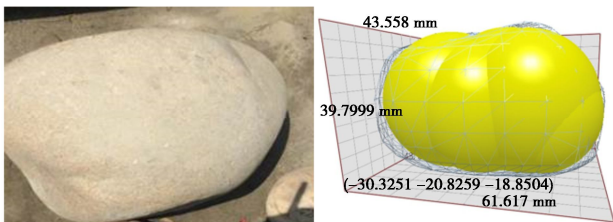


图 6 卵石颗粒模型
Fig. 6 Model for pebble particle

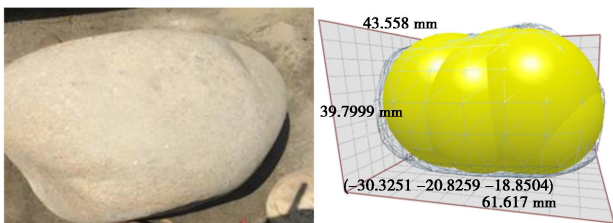


图 7 颗粒床及压缩力示意

Fig. 7 Schematic diagram of particle bed and compression force

2.2 盾构模型

北京地铁新机场线“磁各庄-1 号风井”盾构区间采用土压平衡盾构, 穿越密集卵砾石地层 2.3 km, 盾构开挖直径 9040 mm。根据区间砂卵石地层特征, 选用辐条式刀盘, 6 根长辐条和 6 根短辐条间隔排列, 辐条之间的径向间距为 30° , 刀盘开口率 60%, 采用

“中心鱼尾刀+楔犁刀+刮刀”的刀具组合形式。刀盘的正面包括两层楔犁刀和一层刮刀, 两层楔犁刀高度分别为 190, 155 mm, 刀盘最外周局部楔犁刀高 220 mm, 刮刀高度为 120 mm。盾构掘进速度为 35~80 mm/min, 刀盘转速为 1.5~2.8 r/min, 螺旋机转速 5.5 rpm, 图 8 (a) 为刀盘结构形式, 图 8 (b) 为楔犁刀及刮刀实物图。

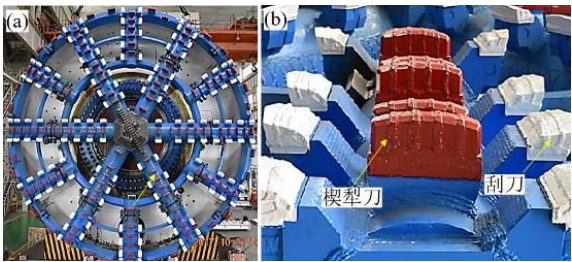


图 8 刀具配置模式示意

Fig. 8 Schematic diagram of tool configuration mode

基于 Solidworks 软件, 以新机场线盾构为原型, 建立典型辐条式土压平衡盾构刀盘三维机械模型, 如图 9 (a) 所示, 模型中设置了 190, 155 mm 的楔犁刀和 120 mm 的刮刀, 楔犁刀及刮刀详图如图 9 (b) 所示。

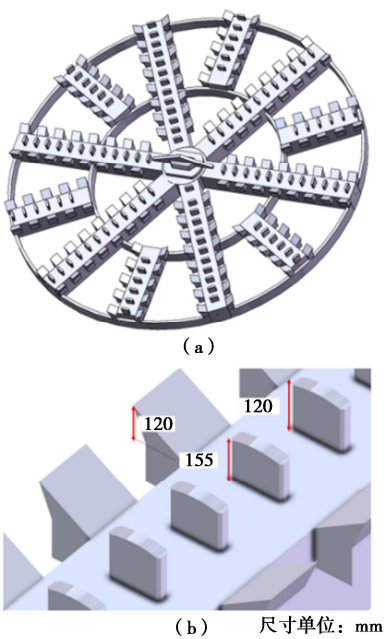


图9 辐条式刀盘模型

Fig. 9 Model for spoke type cutter head

2.3 EDEM 掘进模型

将盾构机械模型导入 EDEM 软件中, 如图 10 所示。在 EDEM 中设定运动形式, 实现刀盘、刀具、螺旋输送机前进及旋转姿态的控制。刀盘旋转与卵石颗粒发生接触, 卵石颗粒受力不平衡并在接触作用下产生运动与位移, 传给相邻颗粒, 此过程实现砂卵石颗粒对刀具的磨损。卵石颗粒通过刀盘的开孔进入土仓,

然后经土仓底部的螺旋输送机搬运出计算域，实现盾构机的掘进过程。

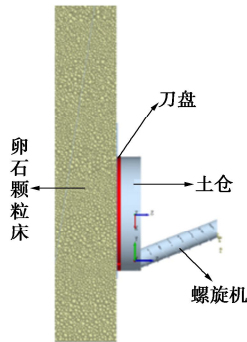


图 10 盾构 EDEM 数值计算模型

Fig. 10 Numerical model for EDEM shield tunnelling model

模拟计算中，设定恒定的掘进速度与刀盘转速，所有几何部件都设置沿刀盘中心轴的平动模式与绕刀盘中心轴的转动模式。为缩短模拟时间，掘进速度和刀盘转速均取最大值，盾构参数见表 4 所示。

表 4 盾构掘进参数

Table 4 Parameters of shield tunneling

刀盘直径/ m	掘进速度/ (m·s ⁻¹)	刀盘转速/ rpm	螺旋输送机转速/ rpm
9.0	1.33×10 ⁻³	2.8	5.5

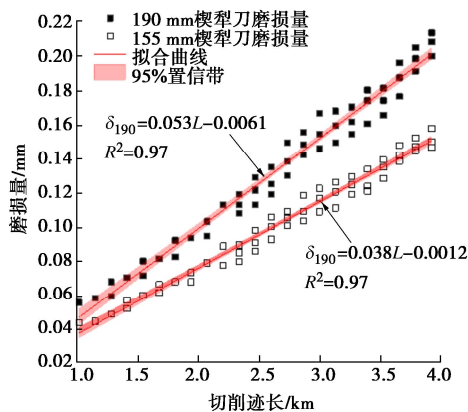
2.4 模型的验证

刀具的磨损程度与其切削轨迹长度直接相关，切削迹长 L 根据下式计算：

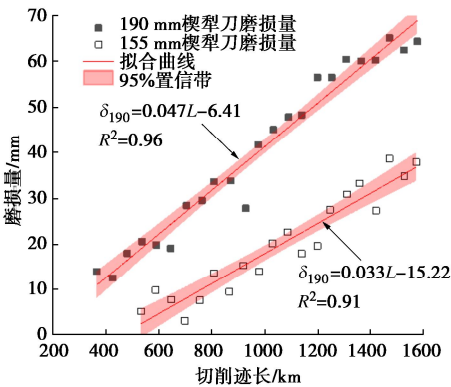
$$L=2\pi RN \quad , \quad (2)$$

$$N=\frac{(D/v)}{60}\times\omega \quad . \quad (3)$$

式中： R 为各刀具所在的轨迹半径（m）； N 为刀盘旋转总圈数； L 为盾构机掘进距离（m）； v 为掘进速度（m/s）； ω 为刀盘转速（r/min）；根据模型， $D=4\text{ m}$ ， $v=1.33\times10^{-3}\text{ m/s}$ ， $\omega=28\text{ r/min}$ 。可据此，建立刀具磨损量与切削迹长的关系。图 11（a）为计算完成时，190 mm 楔犁刀及 155 mm 楔犁刀磨损量 δ 随切削迹长 L 的变化情况，作为对比，统计新机场线左线楔犁刀磨损量变化情况，如图 11（b）所示。



(a) EDEM 计算结果



(b) 新机场左线实测结果

图 11 楔犁刀磨损量随开挖轨长变化情况

Fig. 11 Relationship between wear value of ripper and length of cutting trace

分析可知，数值计算与实际测量的楔犁刀磨损量均与刀具的切削迹长保持高度的线性关系（ $R^2\geq0.9$ ），这也说明了楔犁刀的磨损量主要受到其开挖里程的影响。对散点图进行线性拟合，可得刀具磨损量与切削迹长的线性关系式，若定义刀具平均磨损系数 K_{δ} 为刀具在单位开挖迹长内的磨损量，则拟合曲线的斜率即为刀具的平均磨损系数，如下所示：

$$K_{\delta}=\frac{\delta}{L} \quad . \quad (4)$$

数值模型及实际工程中，190 mm 楔犁刀的磨损系数分别为 0.053，0.047 mm/km，155 mm 楔犁刀的磨损系数分别为 0.038，0.033 mm/km。考虑到数值计算过程中，忽略了细小颗粒，颗粒粒径进行了适当放大，大颗粒掉落过程中对刀具的二次磨损的概率高于实际工程，同时，为缩短计算时间，掘进速度及刀盘转速均取最大值，因而数值计算结果略大于实测结果，但高刀的磨损系数均高于低刀，且数值与实测结果中，低刀的磨损系数较高刀均降低 29% 左右，模型整体匹配度良好，因此该 EDEM 数值盾构模型在研究刀具磨损特征方面具有适用性。

3 刀具磨损特征分析

3.1 楔犁刀磨损特征

由于楔犁刀高于刮刀，作用对象为密实原状土，其磨损程度比刮刀严重。图 12 为计算完成时，楔犁刀磨损示意图。可以看出，在不断犁松原状颗粒床过程中，磨损主要分布在 4 个区域：区域①中，刀头表面受原状土正压力，其摩阻力分量会对刀头表面造成连续的摩擦磨损；区域②、③分别与原状土及梨松土发生挤压剥落作用，因此刀身正面（迎土面）会出现挤压式的摩擦磨损；区域④摩阻力会对刀身侧面造成摩

擦磨损。显然, 刀头正面摩阻力大于刀身侧面摩阻力, 并且原状土反力远大于梨松土, 造成①区磨损量最大, 计算完成时, 该区域磨损均值达 0.227 mm, ④区磨损量最小, 仅 0.085 mm。因此可认为楔犁刀的磨损主要表现为刀头合金表面及迎土面刃角处的摩擦磨损形式。另外, 由于仿真过程只进行单向逆时针掘进, 刀刃背土面磨损量较小, 而实际工程中, 刀盘进行双向掘进, 刀头表面合金和刃角两端均会有严重磨损。

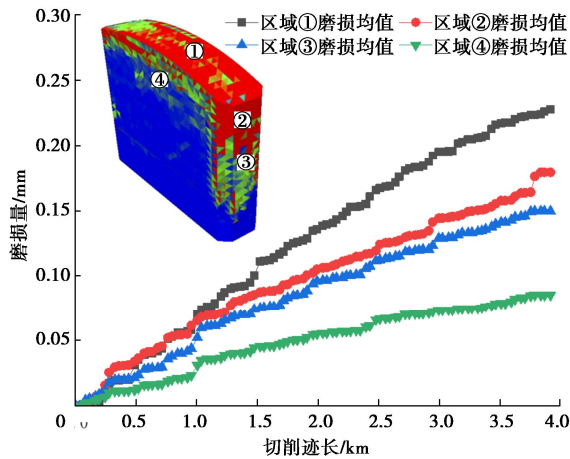


图 12 楔犁刀磨损特征

Fig. 12 Wear characteristics of ripper

综上所述, 楔犁刀在砂卵石地层盾构中磨损较为严重, 因此在尺寸规格、强度、硬度、楔犁作用上, 应满足楔犁过程中的超前楔入、耐磨、耐冲击、开槽松动范围大的需求。对于楔犁刀减磨设计方面, 应重点考虑刀头合金表面的磨损, 表面过度磨损后, 刀具高度降低, 会增加周边刀具的负荷, 因此合金块宜使用耐磨、抗冲击性能较好的硬质合金材料, 而刀具母体可采用韧性较好的钢材。另外, 楔犁刀两端的边缘合金齿受力复杂, 磨损严重, 设计时应加强结构形式, 例如将两端大合金体设计为圆弧状。

3.2 刮刀磨损特征

刮刀高度低于楔犁刀, 通过刮刀迎土面向上和向两侧的推挤作用, 将犁松后的颗粒剥落至土仓。图 13 为计算完成时, 刮刀磨损示意图。磨损云图形式显示, 刮刀磨损位置相对随机, 其磨损主要是由于刀身与颗粒间的挤压剥落过程中造成材料表面的“凹坑”, 大部分磨损均发生刀身迎土面(①区)以及刮刀刀刃附近(②区), 计算完成时, 区域①磨损均值约为 0.096 mm, 区域②磨损均值约为 0.058 mm, 该磨损量低于图 13 中同轨迹半径处楔犁刀的磨损量, 说明刮刀受同位置楔犁刀保护, 也证明了楔犁刀在砂卵石地层盾构中的主导作用。

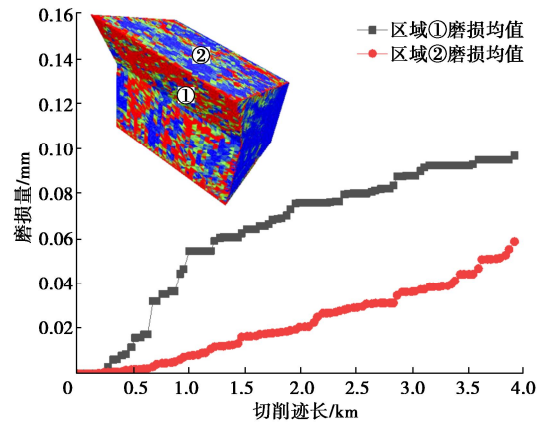


图 13 刮刀磨损特征

Fig. 13 Wear characteristics of scraper

砂卵石地层刮刀设计时, 应在前排刀刃部位进行圆角合金贴焊, 以此减小刀具与剥落后土体的撞击, 延长刀具寿命。同时应在刀头表面增加条状硬质合金, 增强对刀具母材的保护。另外, 应增加刮刀刀身正面合金的镶嵌深度, 增大合金面覆盖面积, 并选用优质的抗冲击强的硬质合金材料, 防止因大颗粒卵石的碰撞导致合金破碎的现象。

3.3 组合刀具磨损特征

(1) 径向刀具磨损特征

图 14 为计算完成时, 短辐条上 B15~B25 号楔犁刀磨损详图。沿刀盘径向, 刀具高度整体上逐渐增大, 刀具所在轨迹半径逐渐增加, 刀头表面磨损量也随之增大, 外圈 B25 磨损均值达 0.223 mm, 内圈 B15 磨损均值为 0.157 mm, 径向刀具不均匀现象明显。另外, 从 190 mm 楔犁刀 B15 以及 155 mm 楔犁刀 B17 的磨损量变化规律可以看出, 在磨损初期, 高刀 B15 的磨损量增长较快, 但随着切削迹长的不断增大, 轨迹半径较大的低刀 B17 的磨损量快速增加, 可见, 刀具的磨损量主要与切削距离和刀体高度有关, 但切削距离是主要影响因素, 实际工程的长距离掘进过程中, 应增加外圈楔犁刀合金耐磨性或增大合金高度, 防止刀盘外围刀具的失效破坏。

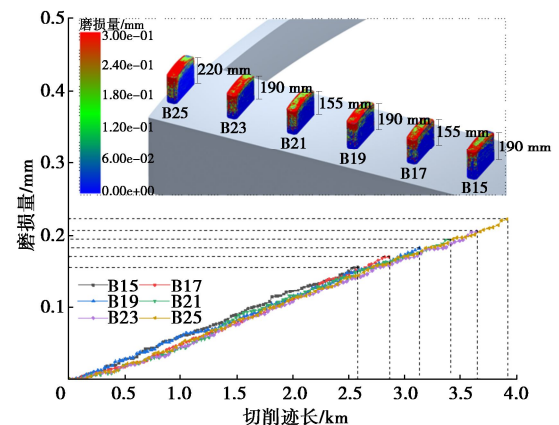


图 14 径向楔犁刀磨损特征

Fig. 14 Wear characteristics of radial rippers

(2) 环向刀具磨损特征

图 15 显示了模型中一环向轨迹半径上, 3 把 190 mm 楔犁刀 (90°, 210°, 330°) 和 3 把 155 mm 楔犁刀 (0°, 120°, 240°) 的磨损量随切削迹长的变化规律。计算结果显示, 该轨迹半径上的 190 mm 楔犁刀磨损量在 0.157~0.168 mm, 而 155 mm 楔犁刀磨损量在 0.112~0.115 mm。另外, 拟合该轨迹上 190 mm 楔犁刀平均磨损速率约为 0.041 mm/km, 155 mm 楔犁刀平均磨损速率约为 0.027 mm/km, 体现了高刀对低刀的保护作用。

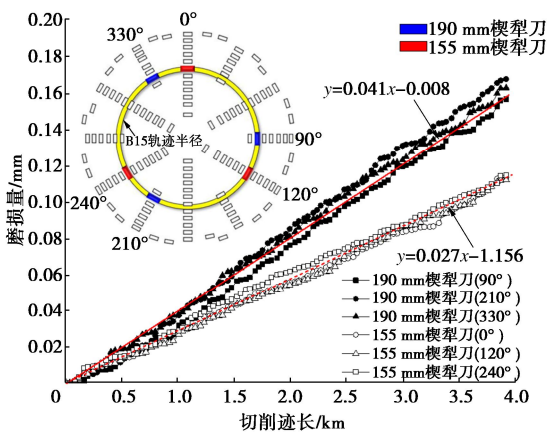


图 15 环向楔犁刀磨损特征

Fig. 15 Wear characteristics of circumferential rippers

因此, 在砂卵石等岩性地层中为避免部分刀具的过度磨损, 实现长距离不换刀掘进的目的, 应将楔犁刀沿刀盘径向、环向进行大梯次空间交错布置, 通过设置不同梯次间的高差, 达到不同高度合金块之间的搭接, 实现合金块磨损“接力”, 延长单次连续掘进距离, 提高掘进效率。

4 工程实例分析

图 16 (a) ~ (d) 分别为新机场线砂卵石工程掘进完成时, 楔犁刀及刮刀的磨损实例详图, 可以看出, 在不发刀具冲击破坏的实例中, 楔犁刀刀头合金表面及刃角附近的合金基体存在明显磨损, 刀身的磨损相对有限, 与仿真计算结果相似。刮刀的磨损主要发生在刀刃附近及刀身迎土面, 产生随机的、明显的划痕和点蚀磨损, 与仿真计算结果相似。针对该磨损特征, 新机场线工程中为降低刀具磨损, 对初始方案进行了优化 (图 17), 楔犁刀刀头表面镶嵌 3 条竖向合金, 两侧合金厚度由初方案的 37 mm 增加刀 45 mm, 并采用 R15 大圆角过渡, 增加楔犁刀合金的耐磨及耐撞击性能。刮刀刀头内嵌条状硬质合金由 2 条增加为 3 条, 增强对刀具母材的保护。刀具圆角由原设计方案的 R5 增加至 R6~R8, 增强刀具的耐撞击能力, 刀身正面

合金深度达 58 mm, 有效提升了刀盘旋转时刮刀整体的耐磨性能。

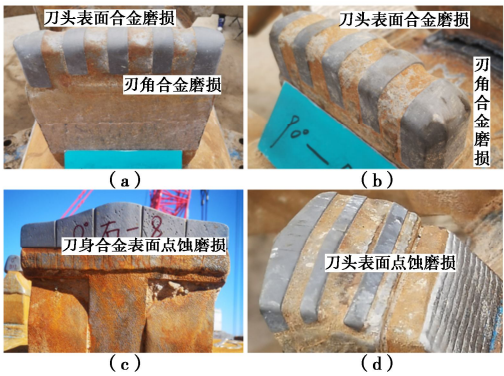


图 16 楔犁刀及刮刀磨损实例详图

Fig. 16 Example of actual wear of ripper and scraper

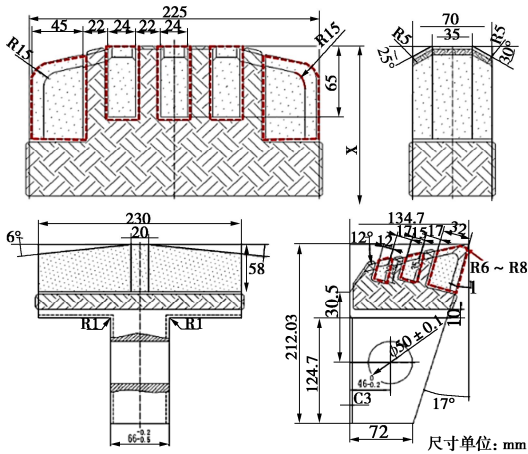


图 17 优化后的楔犁刀及刮刀设计图

Fig. 17 Design diagram of optimized ripper and scraper

新机场线工程进行了刀具的三维大梯次空间布置: 径向方向 (幅臂方向) 上采用 220, 190, 155 mm 楔犁刀三梯次布置; 环向 (刀具运动方向) 上采用 190 mm 楔犁刀、155 mm 楔犁刀、125 mm 刮刀三梯次布置, 最大程度提升单次不换刀掘进距离, 如图 18 中, 270° 辐条上某轨迹 190 mm 楔犁刀完全失效, 而其相邻的 300° 辐条上同轨迹的 155 mm 楔犁刀中间合金块磨损高度为 30 mm, 剩余 35 mm, 仍能继续工作。最终通过合理的刀具组合布置及施工控制, 实现了单次不换刀连续掘进 1.7 km。

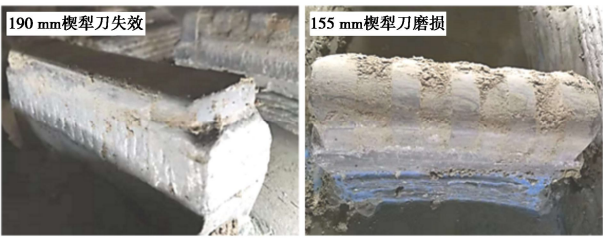


图 18 同轨迹高低楔犁刀磨损情况对比

Fig. 18 Comparison of wear conditions of high and low rippers on same trajectory

5 结 论

通过数值分析方法对砂卵石地层盾构典型刀具磨损特征进行了研究与验证, 主要得到以下 4 点结论。

(1) 进行了多围压条件下的室内三轴及数值三轴试验, 标定符合工程实际的砂卵石土细观参数, 并构建了砂卵石地层辐条式土压平衡盾构掘进 EDEM 离散元模型, 可视化了砂卵石地层中典型盾构刀具(楔犁刀、刮刀)的磨损特征。

(2) 楔犁刀是砂卵石地层盾构掘进的主切削刀具, 磨损量较大, 表现为刀头合金表面以及刀角处连续的摩擦磨损形式; 刮刀磨损量相对较小, 主要发生在刀身迎土面及刀头合金表面, 表现为随机的划痕和点蚀磨损, 分析结果与实际工程中刀具磨损特征相近。

(3) 径向刀具不均匀磨损现象明显, 刀具磨损量均值随轨迹半径的增大而增加; 同半径的环向轨迹上, 190 mm 楔犁刀平均磨损速率约为 0.0039 mm/m, 155 mm 楔犁刀平均磨损速率约为 0.003 mm/m, 体现了高刀对低刀的保护作用。在砂卵石等岩性地层中, 应将楔犁刀具沿刀盘径向、环向进行刀高梯次化交错布置, 延长换刀距离, 提高掘进效率。

(4) EDEM 离散元数值分析软件适用于砂卵石地层盾构掘进的建模和分析, 基于 Archard wear 的接触本构能够获得刀具的磨损特征及刀具不同区域的磨损数据。本文微观参数标定方法及建模手段可为砂卵石地层盾构研究提供参考。

参考文献:

- [1] 张晋勋, 殷明伦, 江玉生, 等. 土压平衡盾构楔犁刀松动砂卵石地层力学行为研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(9): 1501-1513. (ZHANG Jinxun, YIN Minglun, JIANG Yusheng, et al. Mechanical behavior of sandy gravel strata cut by wedge-shaped cutter on earth pressure balance shield[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(9): 1501-1513. (in Chinese))
- [2] 陈辉华, 李珊均, 户晓栋. 地铁盾构掘进安全影响因素及事故致因模型[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(5): 87-92. (CHEN Huihua, LI Hujun, HU Xiaodong. Safety influential factors and accident causation model of subway shield construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(5): 87-92. (in Chinese))
- [3] 孙振中. 砂卵石地层对盾构滚刀耐磨性影响试验研究[J]. 建筑机械化, 2022, 43(1): 47-50. (SUN Zhenzhong. Laboratory test on wear resistance of typical sand pebbles to hob in Chengdu[J]. Construction Mechanization, 2022, 43(1): 47-50. (in Chinese))
- [4] 周建军, 宋佳鹏, 谭忠盛. 砂卵石地层地铁盾构盘形滚刀磨蚀性研究[J]. 土木工程学报, 2017(增刊 1): 31-35. (ZHOU Jianjun, SONG Jiapeng, TAN Zhong sheng. Study on abrasive properties of shielded hob in subway shield of sandy gravel formation[J]. China Civil Engineering Journal, 2017(S1): 31-35. (in Chinese))
- [5] 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 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. (in Chinese))
- [6] 张厚美. TBM 盘形滚刀重复破碎与二次磨损规律研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(2): 131-136. (ZHANG Houmei. Study on relationship between repeated cutting and secondary wear of TBM disc cutter[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(2): 131-136. (in Chinese))
- [7] 张晋勋, 江 华, 孙正阳, 等. 大粒径卵石地层盾构破岩机理及工程应用[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 88-96. (ZHANG Jinxun, JIANG Hua, SUN Zhengyang, et al. Shield tunneling in large size cobble and boulder strata: rock-breaking mechanism and engineering application[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(2): 88-96. (in Chinese))
- [8] 王振飞, 张成平, 张顶立, 等. 富水砂卵石地层大直径盾构刀具的磨损与适应性[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(3): 62-67. (WANG Zhenfei, ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, et al. Wearing and adaptability of cutting tools for large diameter shield in water-rich sandy gravel stratum[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(3): 62-67. (in Chinese))
- [9] 乔金丽, 徐源浩, 陈小强, 等. 基于 ABAQUS 的单双滚刀破岩分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(6): 69-73. (QIAO Jinli, XU Yuanhao, CHEN Xiaoqiang, et al. Rock breaking analysis of single and double cutters based on ABAQUS[J]. Railway Engineering, 2021, 61(6): 69-73. (in Chinese))
- [10] 江 华, 张晋勋, 苏一冉, 等. 基于 PFC3D 的北京砂卵石地层盾构刀盘选型及刀具布置数值模拟研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21): 279-288. (JIANG Hua, ZHANG Jinxun, SU Yiran, et al. Numerical simulation of the type selection of cutterhead selection and tool arrangement in Beijing sandy pebble stratum based on PFC3D[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21): 279-288. (in Chinese))

[11] 蒋明镜, 傅程, 王华宁, 等. 简单复合岩体中 TBM 多滚刀破岩机理离散元分析[J]. 土木工程学报, 2019(A01): 7. (JIANG Mingjing, FU Cheng, WANG Huaning, et al. Distinct element analysis of mechanism of rock fragmentation induced by TBM cutting in simply composite rock mass with multiple cutters[J]. China Civil Engineering Journal, 2019(A01): 7. (in Chinese))

[12] 谭青, 李建芳, 夏毅敏, 等. 盘形滚刀破岩过程的数值研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2707-2714. (TAN Qing, LI Jianfang, XIA Yimin, et al. Numerical research on rock fragmentation process by disc cutter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2707-2714. (in Chinese))

[13] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真: 离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010. (HU Guoming. Analysis and Simulation of Granular System by Discrete Element Method Using EDEM[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010. (in Chinese))

[14] Strömberg, Niclas. Finite Element Treatment of Tribological Problems[C]// Impact and Friction of Solids, Structures and Intelligent Machines, 2000.

[15] RABINOWICZ E. Wear Coefficients-Metals[M]. Wear Control Handbook, ASME, 1980.

岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学)
2024 年度开放课题申请指南

重点实验室自 2007 年 2 月由教育部正式批准在同济大学立项建设以来, 按照教育部重点实验室的开放要求, 自 2008 年起面向国内外公开征集开放基金项目, 连续十余年批准了 90 余项国内外访问学者的申请, 取得了持续对外开放、合作与交流的良好效果。经研究, 本年度继续设立专项开放研究基金, 资助国内外学者和科技工作者来实验室开展科研工作。

1. 资助范围

开放课题应紧密围绕本重点实验室的主要研究方向, 资助意义重大、具有重要科学意义和应用前景的研究项目。本年度开放课题主要资助的研究方向如下: ①岩土工程理论与变形稳定控制; ②环境土工灾变理论与控制; ③岩土体多场耦合理论与灾害控制; ④岩土体地质灾害成因机理与韧性防灾; ⑤地下工程安全理论与智能防控; ⑥城市地下空间开发与利用。

2. 申请资格

同济大学校外从事与岩土与地下工程有关的国内外高级、中级科技人员、青年科技工作者均可申请本实验室的开放基金。

3. 资助金额

申请者必须本着实事求是的原则申请资助金额, 开放基金的资助金额一般每项不超过 3 万元, 总计拟资助 6 项。

4. 项目执行期限

每个项目实施期限为两年, 即 2024 年 11 月 1 日至 2026 年 10 月 30 日。

5. 考核标准

每个开放基金资助课题应在国际学术期刊发表 1 篇被 SCI 检索的论文(有正式的检索号), 且同济大学合作者需列为论文

的共同作者, 作者单位之一必须标注为本重点实验室, 并注明课题批准号。

6. 项目的实施与管理

批准的开放课题资助经费实行一次核定, 两批拨款。项目批准后, 即拨付课题资助经费的 50%至课题负责人所在单位; 其余 50%待课题结题验收后即拨付。项目负责人应当按照项目计划书组织开展研究工作, 做好资助项目实施情况的原始记录, 填写项目中期报告。自项目资助期满之日起 60 日内, 项目负责人应当撰写结题报告、编制项目资助经费决算; 取得研究成果的, 应当同时提交研究成果报告。如由于客观原因不能按期完成研究计划的, 项目负责人应当于项目资助期限届满 90 日前提出延期申请, 申请延长的期限不得超过 1 年。

7. 申报程序

(1) 开放基金申请人应认真阅读有关申请说明, 申报课题必须符合本实验室的研究方向, 属于 2024 年资助研究内容的范畴, 并具有本重点实验室固定研究人员合作。本重点实验室固定研究人员可查阅: <https://geokeylab.tongji.edu.cn/30234/list.psp>。(2) 本年度开放课题申请截止时间为 2024 年 9 月 30 日(以邮戳日期为准)。申请书须以纸质一式 2 份邮寄: 上海市杨浦区四平路 1239 号同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室(邮编 200092), 刘琦老师收(电话: 13917983456, E-mail: liuqi472@tongji.edu.cn)。除纸质申请材料, 申请人须提供申请书及附件的电子文件(PDF 格式), 并注意纸质申请书与电子版申请书的内容应严格一致。(3) 最终结果将于 2024 年 10 月公布。

岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学)