

DOI: 10.11779/CJGE20240165

# 砂卵石地层盾构均匀磨损刀盘刀具设计方法研究

张晋勋<sup>1</sup>, 李博<sup>\*1</sup>, 江玉生<sup>2</sup>, 周刘刚<sup>1</sup>, 殷明伦<sup>1</sup>, 孙正阳<sup>1</sup>, 江华<sup>2</sup>

(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:** 为解决砂卵石地层土压平衡盾构掘进中整盘刀具非均匀磨损问题, 基于摩擦磨损原理, 建立刀具磨损量计算方法, 提出盾构整盘刀具均匀磨损理论及刀盘刀具设计方法。采用 EDEM 颗粒流数值软件, 构建 6.6 m 砂卵石地层均匀磨损盾构掘进模型, 验证了整盘刀具的均匀磨损性能。研究表明: ①通过设计不同的刀盘线形, 并在各轨迹半径上布置特定的刀具数量能够实现整盘刀具的均匀磨损; ②刀盘线形及刀具数量与“环向布刀指数  $\beta$ ”、“地层岩性指数  $n$ ”有关。地层条件一定时,  $\beta$  值是影响均匀磨损盾构刀盘刀具设计的关键因素, 对于常规直径盾构 ( $2.5 \text{ m} \leq R < 6 \text{ m}$ ), 合理的  $\beta$  值范围为  $1.83 \sim 2$ 。对于大型盾 ( $R \geq 6 \text{ m}$ ),  $\beta = 2$ , 应设计平面刀盘, 并在各轨迹上按照径向尺度的平方布设刀具数量; ③均匀磨损方案下, 整盘刀具磨损程度差异较小, 外圈刀具磨损系数降低, 最大不换刀连续掘进距离大幅增加。

**关键词:** 砂卵石地层; 盾构; 均匀磨损; EDEM; 刀盘刀具

中图分类号: TU43; TU941 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)07-1474-10

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。

## Design method for uniform wear of shield cutterhead and cutters in sand-pebble strata

ZHANG Jinxun<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, JIANG Yusheng<sup>2</sup>, ZHOU Liugang<sup>1</sup>, YIN Minglun<sup>1</sup>, SUN Zhengyang<sup>1</sup>, JIANG Hua<sup>2</sup>

(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, Beijing, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China  
University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To solve the problem of uneven wear of the whole shield cutters in the EPB shield tunneling process in sand-pebble strata, a method is established for calculating wear of cutters based on the principle of friction and wear, and the theories of uniform wear of shield cutters and the design method of cutterhead and cutters are proposed. The EDEM particle flow numerical software is used to establish a uniform wear shield tunneling model for the sand-pebble stratum 6.6 m in depth, and the uniform wear performance of the whole cutters is verified. The results show that: (1) The uniform wear of the whole cutters can be achieved by designing different cutterhead alignments and arranging a specific number of cutters on each trajectory radius. (2) The cutterhead alignment and the number of cutters are related to the “circumferential knife index  $\beta$ ” and “formation lithology index  $n$ ”. In a specific stratum, the value of  $\beta$  is the key factor affecting the design of the shield cutterhead and cutters with uniform wear, and the reasonable range of value of  $\beta$  is  $1.83 \sim 2$  for the conventional shield ( $2.5 \text{ m} \leq R < 6 \text{ m}$ ). For large shield ( $R \geq 6 \text{ m}$ ), a flat cutterhead should be designed, and  $r^2$  cutters should be arranged on each trajectory. (3) Under the uniform wear scheme, the difference in the wear degree of the whole cutters is small, the tool wear coefficient of the outer ring of the cutterhead is greatly reduced, and the maximum continuous excavation distance without changing the cutters significantly increases.

**Key words:** sand-pebble stratum; shield tunneling; uniform wear; EDEM; cutterhead and cutter

## 0 引言

城市地铁建设过程中, 盾构因其开挖速度快, 安

全性高、周边环境影响小等优势而普遍应用。砂卵石地层在多个地区广泛分布, 随着刀盘直径的逐渐增大,

基金项目: 北京市博士后科研活动经费资助项目(2022-ZZ-097) This work was supported by the Beijing Postdoctoral Research Activity Funding Project (Grant No.2022-ZZ-097).

收稿日期(Received): 2024-02-21 修回日期(Revised): 2024-10-11 接受日期(Accepted): 2024-10-23 网络出版日期(Online): 2024-10-24

\*通信作者 (E-mail: 357428609@qq.com)

刀盘内外圈刀具切削轨迹长度差异较大, 盾构在砂卵石地层掘进过程中整盘刀具的非均匀磨损问题严重, 刀盘部分区域刀具的过度磨损导致频繁的停机换刀, 引发盾构卡困, 沉降超限制等次生灾害, 严重影响施工安全和进度, 制约盾构长距离连续掘进<sup>[1-3]</sup>。例如, 北京地铁砂卵石地层 6 m 盾构掘进 400~600 m 需换刀一次, 成都地铁 2 号线砂卵石地层盾构区间, 掘进 50~100 m 就需进行换刀。

国内外学者结合实际盾构工程, 对砂卵石地层刀具磨损进行了诸多研究。Nilsen 等<sup>[4]</sup>、Barzegari 等<sup>[5]</sup>通过现场刀具磨损过程与形态, 对刀具的磨损形式进行了定义。黄清飞<sup>[6]</sup>提出了砂卵石地层刀具切削的“犁松原理”, 同时提出刮刀可以采用抗冲击性能更好的“钝刀”形式以提高刀具寿命。王振飞等<sup>[7]</sup>分析了富水砂卵石地层大直径盾构刀具的磨损原因, 指出地层中存在强度很高的胶结构是刀具产生严重磨损的主要原因。江华等<sup>[8]</sup>依托北京地铁 9 号线盾构施工工程, 提出粒径砂卵石地层辐条式比面板式刀盘适应性更好。董洪星<sup>[9]</sup>通过数据统计分析北京地铁 14 号线砂卵石地层刀具磨损情况, 提出应增加大半径轨迹上的先行刀数量。孙振中<sup>[10]</sup>依托成都都四项目都江堰站-永丰站-蒲阳站区间隧道工程, 根据情况动态调整掘进参数等一系列对策。赵康<sup>[11]</sup>在青岛汽车北站一流亭机场盾构区间下穿砂卵石地层工程中提出优化布刀位置, 适当加强刀具强度等措施能够减轻刀具磨损。刘奇等<sup>[12]</sup>以兰州盾构工程为例, 综合管控渣土改良, 掘进参数、盾构姿态及欠压掘进等措施能够减缓刀具磨损。

可见, 工程参建人员通过增强材料耐磨性、调整盾构参数、优化刀盘刀具结构等方式在一定程度上降低刀具磨损, 但均不能从根本上解决整盘刀具的非均匀磨损问题。鉴于此, 本文提出砂卵石地层盾构刀盘刀具均匀化磨损技术, 旨在解决砂卵石地层普遍存在的刀具非均匀磨损、开仓换刀频繁问题, 延长盾构单次不换刀掘进距离。同时, 拓展刀盘刀具设计方法, 为盾构选型设计提供理论基础。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 均匀磨损设计方法

### 1.1 砂卵石地层刀具磨损特征

砂卵石地层宜采用辐条式刀盘, 刀具配置方案优先采用“楔犁刀+刮刀+中心刀”模式<sup>[13-14]</sup>, 如图 1 所示。其中, 楔犁刀是砂卵石地层的主切削刀具, 对开挖面进行楔犁作用, 预先疏松土体, 在环向与轴向压应力作用下, 产生磨损。楔犁刀损伤形态可分为冲击

损伤和摩擦磨损。统计砂卵石地层隧道完成后刀具损伤形态可知, 刀具发生冲击损伤的概率较低, 以北京新机场线为例, 刀具合金块约为 630 个, 其中盾构接收后存在明显崩落痕迹的为 16 块, 占比约为 2.5%, 远低于由于刀具材料微观去除而产生的摩擦磨损, 因此, 楔犁刀前端面的摩擦磨损是刀具的主要磨损形式, 主要发生在楔犁刀犁松原状土的过程中。

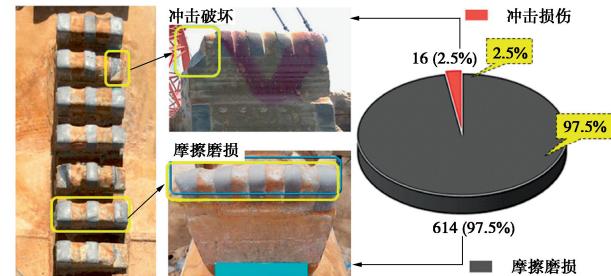


图 1 北京新机场线刀具损伤形态统计

Fig. 1 Statistics of damage patterns of cutters of Beijing New Airport Line

### 1.2 楔犁刀前端面磨损量计算方法

Kishida<sup>[15]</sup>分析了刀具摩擦磨损的物理实质后, 定义了金属的磨损就是当能量消耗等于摩擦力所作的功时, 微粒从金属表面分离, 从而使金属质量或体积减少的一种现象, 指出磨损消耗量与所消耗的摩擦功成正比。根据这一基本原理, 对砂卵石地层楔犁刀磨损特征展开研究。

选取刀盘轨迹半径  $r$  处的原状土环向磨损带为研究区域, 如图 2 所示。

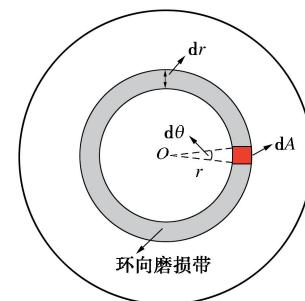


图 2 环向磨损带示意

Fig. 2 Diagram of ring wear

刀盘旋转一周, 环向磨损带上微面积  $dA$  在摩擦路程  $S$  上消耗的摩擦功  $W_f$  为

$$W_f = \mu F_n \cdot S \cdot dA = 2\pi r \cdot \mu F_n \cdot dA \quad (1)$$

式中:  $F_n$  为楔犁刀前端面与原状土单位接触面积上的正压力; 徐小荷等<sup>[16]</sup>给出了接触面正压力计算公式:

$$F_n = k_0 \cdot d^n \quad (2)$$

式中:  $d$  为沿正压力方向的侵入深度 (m);  $n$  为压力与侵深的试验指数, 与地层岩性有关, 定义为岩性指

数;  $k_0$  为单位面积侵入系数 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )。

则犁松环向磨损带上原状土所需摩擦功为

$$W_f = \mu F_n \cdot 2\pi r \cdot \int_0^{2\pi} r dr d\theta = 4\pi^2 \mu k_0 d^n r^2 dr。 \quad (3)$$

楔犁刀犁松原状土过程中, 该区域内全部楔犁刀前端面总磨耗量与犁松环向磨损带上原状土所消耗的摩擦功成正比。则环向磨损带刀具前端面总磨损量  $V_m$  为

$$V_m = \omega W_f = 4\pi^2 \mu \omega k_0 d^n r^2 dr = 4\pi^2 A_f k_0 d^n r^2, \quad (4)$$

式中:  $\omega$  和  $\mu$  均是反映地层研磨特性的物理量, 合成一个特征量  $A_f$ , 定义为地层磨蚀性系数, 表示单位正压力作用下, 单位面积经过单位摩擦路程时, 楔犁刀前端面的体积磨损量 ( $\text{mm}^3/(\text{kN}\cdot\text{m}^3)$ ); 其中  $dr$  取单位长度。

假设轨迹半径  $r$  处的楔犁刀数量  $N_r$  满足

$$N_r = r^\beta. \quad (5)$$

则环向磨损带上单把楔犁刀前端面磨损量  $V_{ms}$ :

$$V_{ms} = \frac{V_m}{r^\beta} = 4\pi^2 A_f k_0 d^n r^{2-\beta}. \quad (6)$$

对于确定地层, 式 (10) 中地层磨蚀系数  $A_f$ 、单位面积侵入系数  $k_0$  均为定值, 则单把楔犁刀磨损量只与环向布刀指数  $\beta$ 、地层岩性指数  $n$  有关。由图 3, 4 计算结果可以看出, 单把刀具磨损量随着  $\beta$  值的增大快速减小, 随  $n$  值的增大而增大, 即随刀具数量的增大而减小, 随地层岩性的增大而增大, 另外, 相对于环向刀具数量, 地层岩性对刀具磨损的影响程度有限。

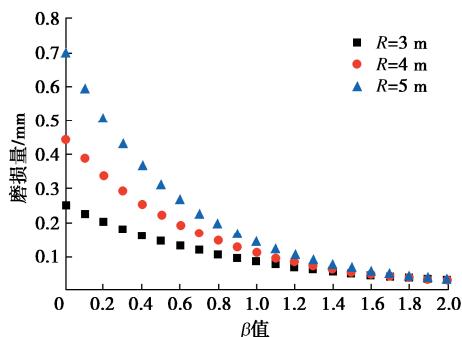


图 3  $\beta$  值与  $V_{ms}$  的关系

Fig. 3 Relationship between  $\beta$  and  $V_{ms}$

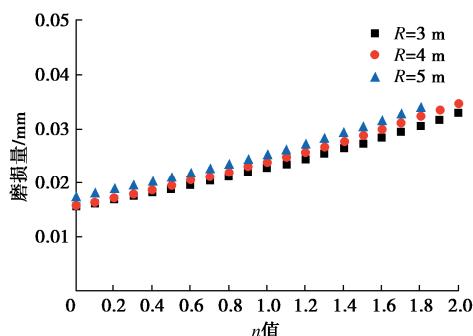


图 4  $n$  值与  $V_{ms}$  的关系

Fig. 4 Relationship between  $n$  and  $V_{ms}$

### 1.3 均匀磨损刀盘刀具设计

考虑到楔犁刀犁松原状地层过程中, 刀头前端面与掌子面始终保持接触状态, 处于稳定、持续的受力状态, 将离散的刀土接触面进行连续化等效, 如图 5 所示。

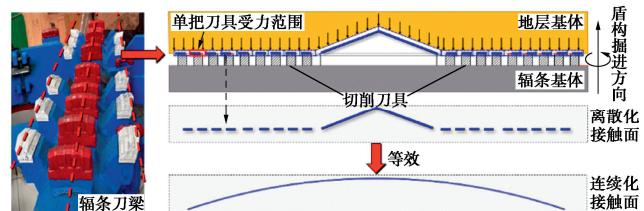


图 5 刀土接触面示意

Fig. 5 Cutter-soil contact surface

建立以刀盘中心为原点, 轨迹半径  $r$  为横轴, 辐条 (面板) 高度  $h$  为纵轴的坐标系, 如图 6 所示。定义刀盘每转贯入度为  $\delta$ , 位置  $r$  处楔犁刀前端面所受正压力为  $F_n$ , 沿正压力方向的侵深为  $d$ , 该处刀具的装配角, 即正压力与法线方向的夹角为  $\gamma$ 。

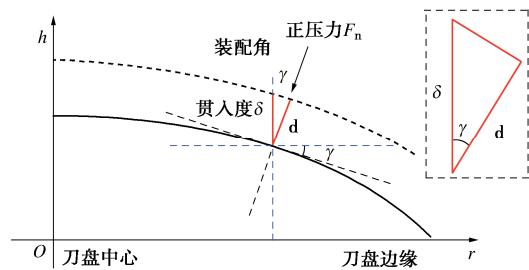


图 6 刀盘线形分析示意

Fig. 6 Curve analysis of cutterhead

根据几何关系, 正压力方向上的侵入深度  $d$  与刀盘每转贯入度  $\delta$  的关系符合:

$$d = \delta \cos \gamma. \quad (7)$$

若整盘刀具均匀磨损, 则刀盘各位置刀具磨损量与轨迹半径  $r$  无关, 其磨损量均为一个常数  $C$ , 即

$$V_{ms} = C, \quad (8)$$

$$V'_{ms} = \left[ 4\pi^2 A_f k_0 (\delta \cos \gamma)^n r^{2-\beta} \right]' = 0. \quad (9)$$

式中: 地层磨蚀系数  $A_f$ 、侵入系数  $k_0$ 、每转贯入度  $\delta$  均为定值; 变量为装配角  $\gamma$ 、轨迹半径  $r$ 。根据数理关系, 求解上式后即可得到均匀磨损条件下的刀盘线形方程:

$$\frac{h' h'' r}{1 + h'^2} = \frac{2 - \beta}{n}. \quad (10)$$

式 (10) 需通过 MATLAB 等数值软件进行二次积分, 即可绘制不同刀盘半径下, 满足整盘刀具均匀磨损的刀盘线形形式。积分初始条件包括

$$h(0) = h_0, \quad (11)$$

$$h(0)' = 0. \quad (12)$$

式中:  $h_0$  为刀盘线形的中心高度, 即刀盘中心拱高。从式(10)可以看出, 刀盘直径确定的情况下, 布刀指数  $\beta$ 、岩性指数  $n$  是影响刀盘线形的关键参数。

欧阳义平等<sup>[17]</sup>给出了切削指数  $n$  值的范围在 1.1~1.5, 并指出混合岩性  $n$  值一般为 1.2。考虑到北京砂卵石原状地层一般为花岗岩, 石灰岩, 砂岩的混合体,  $n$  值可取 1.2 进行计算。图 7 为  $R=3\text{ m}$ ,  $\beta=1.9$ ,  $n=1.1\sim1.5$  时, 均匀磨损刀盘线形计算结果, 结果显示: 岩性指数  $n$  对均匀磨损的刀盘线形形式有一定影响, 但影响程度有限。 $n$  值由 1.1 增大到 1.5 过程中, 刀盘拱高  $h_0$  逐渐降低, 各刀具装配角  $\gamma$  沿径向逐渐减小, 正压力逐渐增加, 可见, 硬质地层对刀具的磨损消耗更大。

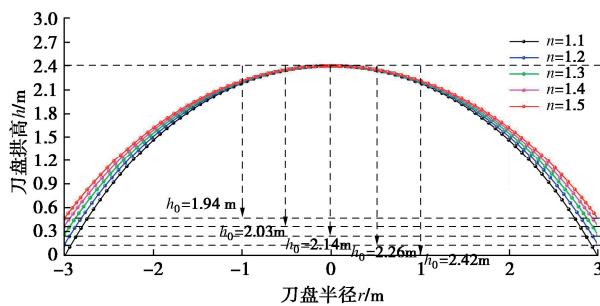


图 7 刀盘线形 ( $n=1.1\sim1.5$ )

Fig. 7 Curves of cutterhead for values of  $n$  from 1.1 to 1.5

图 8 为  $R=3$ ,  $n=1.2$ ,  $\beta=1.0\sim2.0$  时的均匀磨损刀盘线形计算结果。结果显示:  $\beta$  值增大的过程中, 线形逐渐变缓, 当  $\beta=1$ , 即各轨迹半径只布置一把楔型刀时, 刀盘中心拱高  $h_0$  需达 16 m, 当  $\beta=2$  时, 即各轨迹布置  $r^2$  把楔型刀时, 变为水平刀盘。相比于设计拱度较大的刀盘结构, 增加轨迹半径上的刀具数量更适于装备成型。因此, 若要满足合理的刀盘拱高, 并实现整盘刀具的均匀磨损, 需对不同直径的盾构机设计合理的  $\beta$  值范围。

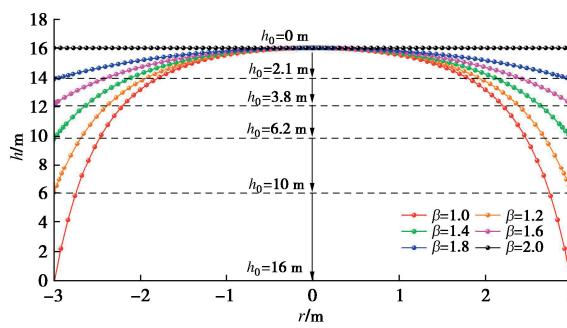


图 8 刀盘线形 ( $\beta=1.0\sim2.0$ )

Fig. 8 Curves of cutterhead for values of  $\beta$  from 1.0 to 2.0

为研究不同盾构合理  $\beta$  值范围, 定义参数拱径比  $\lambda$ , 即刀盘中心拱高  $h_0$  与刀盘半径  $R$  的比值:

$$\lambda = \frac{h_0}{R} \quad (13)$$

拱径比不宜过大, 拱径比过大时, 刀盘总面积增大, 制造难度和成本大幅提高。另外, 过大的拱径比

会使刀盘承受较大的竖向土压力, 影响掘进过程中的盾构姿态。规定拱径比  $\lambda \leq 0.5$  为合理比例区间。以图 8 为例, 当  $\beta$  取 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 时,  $\lambda$  分别为 5.3, 3.3, 2.1, 1.2, 0.7, 0。对于不同的刀盘直径,  $\beta$  值增到一定区间后才能满足合理的拱径比。图 9 分别给出了目前 5 种盾构 (微型盾构:  $R<0.5\text{ m}$ ; 小型盾构:  $0.5\text{ m} \leq R < 2.5\text{ m}$ ; 中型盾构:  $2.5\text{ m} \leq R < 4.0\text{ m}$ ; 大型盾构:  $4.0\text{ m} \leq R < 6.0\text{ m}$ ; 超大型盾构:  $R \geq 6\text{ m}$ ) 型号下的拱径比  $\lambda$  与布刀指数  $\beta$  的关系。

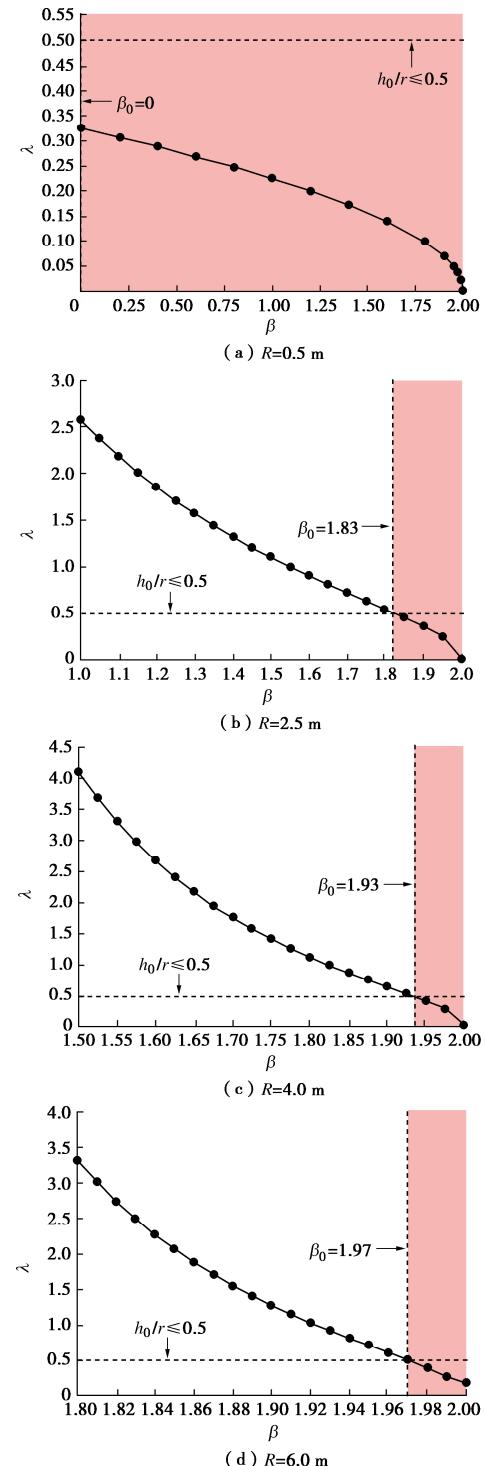


图 9  $\lambda$  与  $\beta$  的关系

Fig. 9 Relationship between  $\lambda$  and  $\beta$

结果显示: 拱径比  $\lambda$  随着环向布刀指数  $\beta$  的增大而减小, 当  $\beta=2$  时,  $\lambda$  减小到 0。以拱径比  $\lambda \leq 0.5$  确定出的各临界刀盘半径所需的小环向布刀指数  $\beta_0$  分别为 0, 1.83, 1.93, 1.97。图中阴影部分为满足拱径比  $\lambda \leq 0.5$  的合理  $\beta$  值范围。对于微型盾构, 刀具摩擦路程有限, 即使  $\beta=0$ , 拱径比  $\lambda$  仍小于 0.5。因此  $\beta$  值可取 0, 例如在石油钻井和地质勘探中使用的钻头, 各轨迹半径只布置一把刀(齿)就可以满足均匀磨损。对于小型盾构, 刀具数量不宜过多,  $\beta$  值可取 0~1.83。对于常规盾构 ( $2.5 \text{ m} \leq R < 6 \text{ m}$ ), 随着刀盘尺寸的增大, 刀具摩擦路径增大, 刀具数量对刀盘拱高的影响程度增加, 合理的  $\beta$  值范围为 1.83~2, 刀具数量太少会导致过大的刀盘拱高, 反之则不能保证刀盘的开口率和渣土的流动性。对于超大型盾构 ( $R \geq 6 \text{ m}$ ), 摩擦路程大幅增加, 环向布刀指数  $\beta$  应取 2, 即设计平面刀盘并在各轨迹半径  $r$  上布置  $r^2$  次把刀具。

## 2 均匀磨损刀盘刀具设计案例

北京地铁 19 号线 08 标新发地—草桥站  $\Phi 6.6 \text{ m}$  的辐条式土压平衡盾构工程。盾构隧道区段沿纵断面走向主要穿越地层先后为: 卵石⑤层、卵石⑦层、卵石⑨层、卵石⑦层、卵石⑤层、④3 粉细砂层、②3 砂性粉土, 合计该区段盾构隧道主要穿越的砂卵石地层占比高达 78.37%。刀盘采用 6 辐条平面式结构, 刀具以“楔犁刀+刮刀+中心刀”为主。刀具平面布置及刀盘剖面结构见图 10 (a), 11 (a) 所示。

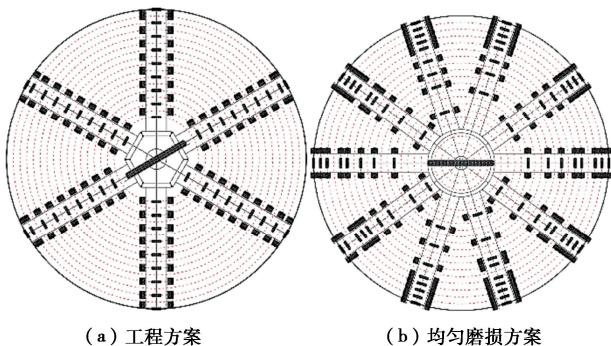
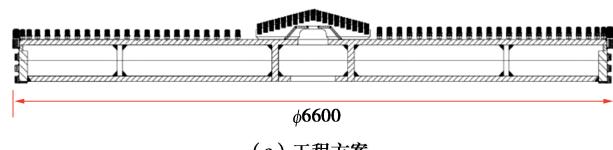


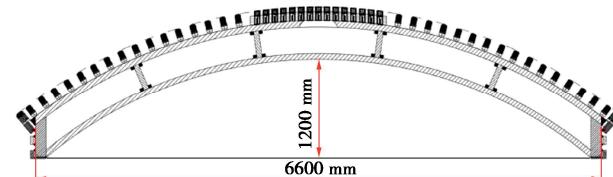
图 10 刀具布置对比

Fig. 10 Comparison of layout of cutters

针对原工程整盘刀具非均匀磨损情况, 采用均匀磨损设计方法对原盾构刀盘刀具进行设计, 设计参数见表 1。各轨迹半径布刀数量见表 2。刀具平面布置及刀盘剖面设计见图 10 (b), 11 (b) 所示。基于 Solidworks 建立盾构刀盘三维机械模型如图 12 所示。



(a) 工程方案



(b) 均匀磨损方案

图 11 刀盘结构对比

Fig. 11 Comparison of structure of cutterhead



(a) 工程方案

(b) 均匀磨损方案

图 12 刀盘三维模型

Fig. 12 Three-dimensional mechanical model for cutterhead

表 1 设计参数

Table 1 Design parameters

半径 R/mm	中心拱高 $h_0/\text{mm}$	环向布刀指 数 $\beta$	拱径比 $\lambda$	岩性指 数 $n$
3300	1200	1.93	0.36	1.2

表 2 各轨迹半径刀具布置数量

Table 2 Number of cutters for each trajectory radius

工程方案		均匀磨损方案		
轨迹编 号	轨迹半 径/mm	刀具 数量	轨迹 编号	轨迹半 径/mm
$R_1$	0~795	1	$r_1$	0~900
$R_2$	945	2	$r_2$	1050
$R_3$	1095	2	$r_3$	1200
$R_4$	1245	3	$r_4$	1350
$R_5$	1395	3	$r_5$	1500
$R_6$	1545	3	$r_6$	1650
$R_7$	1695	3	$r_7$	1800
$R_8$	1845	3	$r_8$	1950
$R_9$	1995	3	$r_9$	2100
$R_{10}$	2145	3	$r_{10}$	2250
$R_{11}$	2295	3	$r_{11}$	2400
$R_{12}$	2445	3	$r_{12}$	2550
$R_{13}$	2595	3	$r_{13}$	2700
$R_{14}$	2745	3	$r_{14}$	2850
$R_{15}$	2895	3	$r_{15}$	3000
$R_{16}$	3045	3	$r_{16}$	3150
$R_{17}$	3300	6	$r_{17}$	3300

均匀磨损方案在刀盘中心区域 ( $R_1 \sim R_4$ ) 的刀具数量少于工程方案; 轨迹半径  $R_5 \sim R_7$  处, 刀具数量与工程方案相同; 轨迹半径  $R_8 \sim R_{17}$  处, 刀

具数量明显多于工程方案。由此可见, 在刀盘中心附近, 虽然刀具所受正压力较大, 但摩擦路程有限, 因此可适当减少刀具数量, 有利于提高刀盘中心处渣土的流动性; 而刀盘外周区域, 摩擦路程大幅增加, 设计弧型刀盘减小刀具前端面摩擦力的同时增加外周刀具数量, 多把刀具共同承担摩擦消耗, 可保证每把刀具磨损量相同。

### 3 数值分析验证

#### 3.1 计算参数标定

基于室内三轴试验结果反演求得颗粒力学细观参数。土样由北京新机场线原状砂卵石土制备而成, 粒径范围为 $<0.25$ ,  $0.25\sim0.5$ ,  $0.5\sim2$ ,  $2\sim4$ ,  $4\sim5$ ,  $5\sim6.5$ ,  $6.5\sim8$ ,  $8\sim10$ ,  $10\sim20$ ,  $20\sim40$ ,  $40\sim60$ ,  $>120$  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 13 所示, 各典型粒径区间的土体占比, 如表 3 所示。

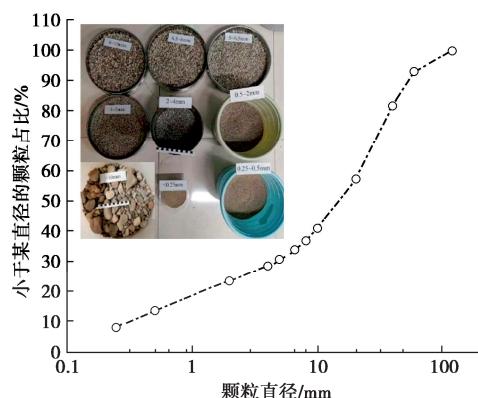


图 13 砂卵石颗粒级配曲线

Fig. 13 Grain-distribution curves of sand and gravel particles

表 3 各粒径颗粒占比

Table 3 Proportions 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

进行室内三轴压缩试验, 在试验台上安装橡皮膜并在底部放置透水膜, 试样的尺寸为  $300\text{ mm}\times600\text{ mm}$ , 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, 当压缩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 14 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。

EDEM 颗粒流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<sup>[18-19]</sup>。基于上述室内三轴试验, 建立 EDEM 数值三轴压缩试验模型。考虑到颗粒大小对刀具的磨损特征影响不敏感, 为提高计算效率, 计算时以表 1 的颗粒级配为基础, 对实际地层中

粒径在  $60\sim120$  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  $40\sim60$  mm 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  $20\sim40$  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%。



图 14 试样破坏特征

Fig. 14 Failure characteristics of specimen

数值三轴试验严格按照室内试验程序进行, 试样变形情况如图 15 所示, 试样最终破坏特征与图 14 较为一致。此时得到图 16 所示的应力-应变曲线, 数值试验结果与室内三轴试验结果较吻合, 最终确定的接触参数见表 4 所示, 材料参数见表 5 所示。

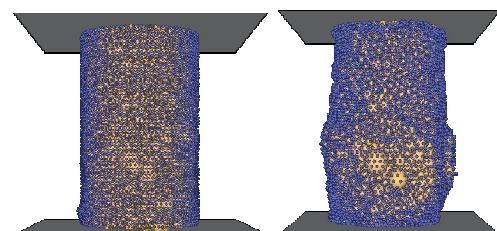


图 15 数值三轴试验

Fig. 15 Numerical triaxial shear tests

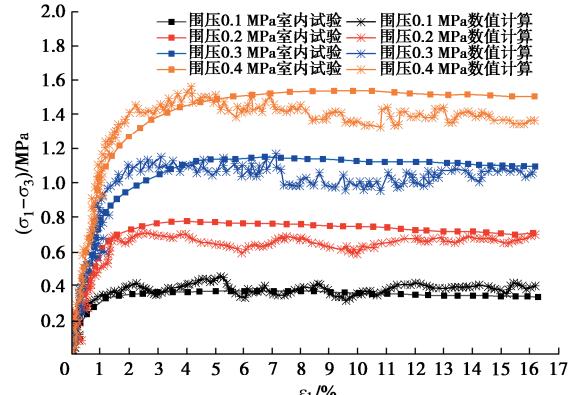


图 16 试样应力-应变曲线

Fig. 16 Stress-strain curves of specimens

表 4 接触参数

Table 4 Contact parameters

接触部位	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	0.040	0.75

表 5 材料参数

Table 5 Material parameters

类别	剪切模量/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比
盾构机	79000	7800	0.25
边界墙	79000	7800	0.25
卵石颗粒	11.2	2200	0.27

### 3.2 盾构掘进 EDEM 模型

根据卵石颗粒实物形状, 使用 Solidworks 拟合颗粒包络面, 利用 EDEM 中非球形自动填充工具, 快速填充异形颗粒, 如图 17 所示。为消除边界效应, 建立尺寸为 18 m×12 m×4 m 的卵石颗粒床, 如图 18 (a) 所示。计算模型上边界指定为自由面, 其余边界进行位移约束。颗粒床生成后, 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 18 (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。

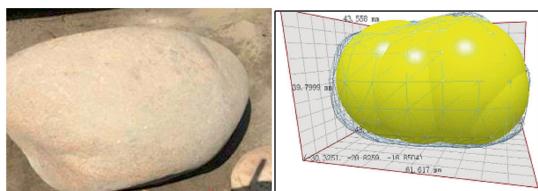


图 17 卵石颗粒模型

Fig. 17 Particle model for pebble

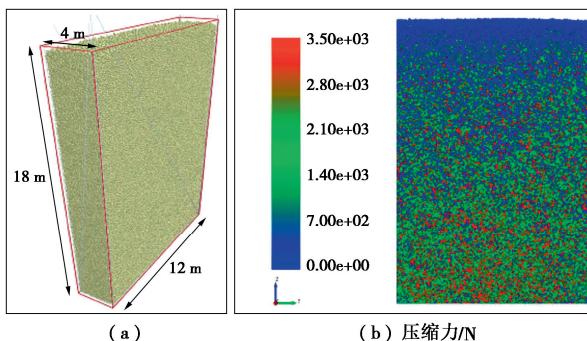


图 18 颗粒床及压缩力

Fig. 18 Particle bed and compression force

将两种方案下的盾构三维机械模型导入 EDEM 中, 如图 19 所示。设定恒定的掘进速度与刀盘转速, 所有部件均设置沿刀盘中心轴的平动与绕刀盘中心轴的转动模式。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。

### 3.3 压力平衡掘进设定

砂卵石地层具有一定的成拱效应。因此, 需采用塌落拱理论计算土压力, 拱顶竖直土压力为

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma - c/B)}{K \tan \varphi} (1 - e^{-K \tan \varphi \cdot z/B}) + P_0 e^{-K \tan \varphi \cdot z/B}, \quad (14)$$

$$B = R \cot \frac{\pi/4 + \varphi/2}{2}. \quad (15)$$

式中:  $Z$  为盾构埋深;  $R$  为盾体半径;  $\gamma$  为地层重度;  $\varphi$  为内摩擦角;  $c$  为黏聚力;  $K$  为侧压力系数, 取 1 计算;  $P_0$  为地表荷载, 按 0 kPa 计算。

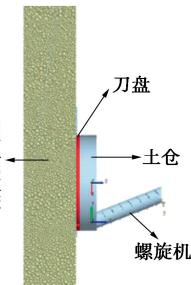


图 19 盾构 EDEM 数值计算模型

Fig. 19 Numerical model for EDEM shield tunnelling model

根据上式计算掘进面处主动土压力及被动土压力, 掘进界面的土压力计算值见表 6。

### 表 6 土仓内平均土压力

Table 6 Average earth pressures in soil warehouse

土压力	盾构埋深 Z/m	计算值/MPa
主动	9	0.032
被动	9	0.295

不同的开口率对土压力的传递系数不同, 压力传递系数与刀盘开口率有近似二次函数的关系<sup>[20]</sup>:

$$\alpha = 0.0184 \eta - 0.0001 \eta^2. \quad (16)$$

工程方案中刀盘开口率为 72%, 其传力系数为 0.8064; 均匀磨损方案中刀盘开口率为 64%, 其传力系数为 0.768。根据平衡掘进的压力区间 (表 6), 结合两种刀盘的传力系数, 得到两种刀盘形式下平衡掘进的土仓压力设定值见表 7。

### 表 7 土仓压力设定值

Table 7 Values of earth pressure inside soil warehouse

盾构掘进控制	工程方案土仓压 力/MPa	均匀磨损方案土仓 压 力/MPa
状态		
压力平衡掘进	0.106	0.101

在土仓中设置监测断面, 根据土压力变化调节螺旋输送机转速, 使两个模型中的土仓压力满足压力平衡掘进的设定值, 进而保证掘进面压力处于稳定状态。最终确定的掘进参数见表 8, 模型几何参数见表 9 所示。

表 8 盾构掘进参数

Table 8 Parameters of shield tunneling

刀盘直径/ m	掘进速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	刀盘转速/ rpm	土仓压力/ MPa
9.0	$1.33 \times 10^{-3}$	2.8	0.106/0.101

表 9 模型参数

Table 9 Model parameters

颗粒数量	埋深/m	最大粒径/mm	最小粒径/mm
550000	9	250	20

### 3.4 结果分析与验证

图 20, 21 分别为计算完成时, 工程方案、均匀磨损方案下的刀盘整体磨损云图, 以相同的磨损值来对比两种方案的磨损规律, 可以看出, 工程方案中, 刀盘刀具整体磨损呈现沿径向增大的规律, 刀盘中心区域整体磨损量较小, 边缘区域磨损量较大, 而在均匀磨损方案下, 刀盘刀具整体磨损量较为均匀。

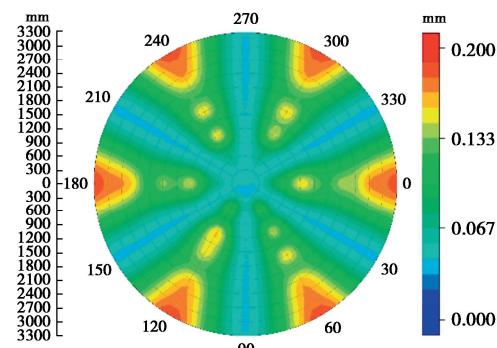
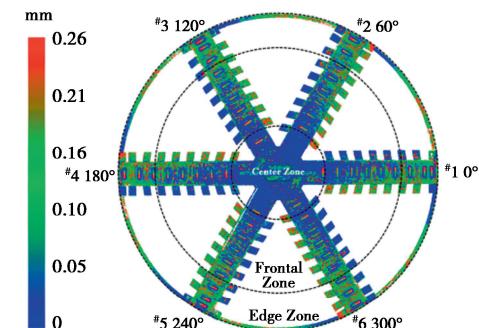


图 20 工程刀盘整体磨损量云图

Fig. 20 Wear diagram and degrees of all cutters under engineering scheme

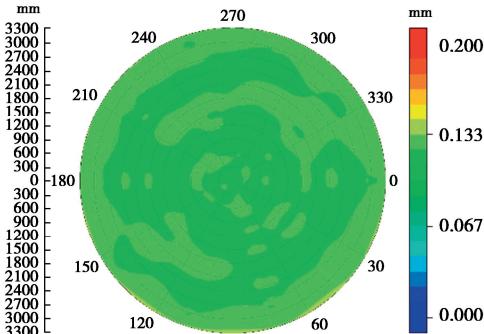
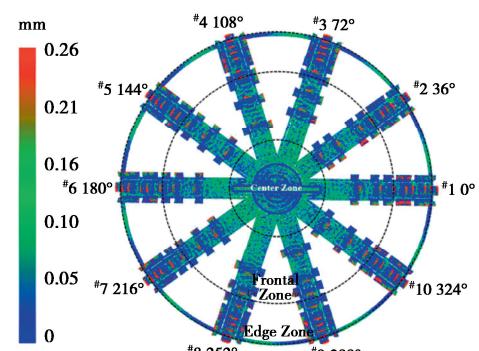


图 21 均匀磨损刀盘整体磨损量云图

Fig. 21 Wear diagram and degrees of all cutters under uniform wear scheme

将两种方案中各辐条从0°开始, 沿顺时针方向依次编号, 由于辐条的对称性, 选取工程方案中#2辐条、均匀磨损方案中#5辐条上的楔犁刀为研究对象, 进行对比分析。图22为工程方案#2辐条上各轨迹位置处楔犁刀磨损量时程曲线。由于工程方案中, 楔犁刀高度沿径向进行了梯次化设计(145, 165 mm), 部分高刀刃的磨损量较大, 但总体上呈现沿径向逐渐增大的规律, 径向楔犁刀的非均匀磨损现象明显。另外, 曲线斜率可以代表单位时间内刀具的磨损速率, 可以看出, 越靠近刀盘边缘, 曲线越陡, 刀具磨损速率越大。图23为均匀磨损方案下#5辐条上各轨迹位置处楔犁刀磨损量时程曲线, 磨损速率较一致, 计算完成时, 各轨迹半径处刀具最终磨损量在0.108~0.132 mm之间随机分布, 考虑到颗粒掉落过程中的随机接触磨损, 磨损量有一定波动范围, 但整体均匀度良好。

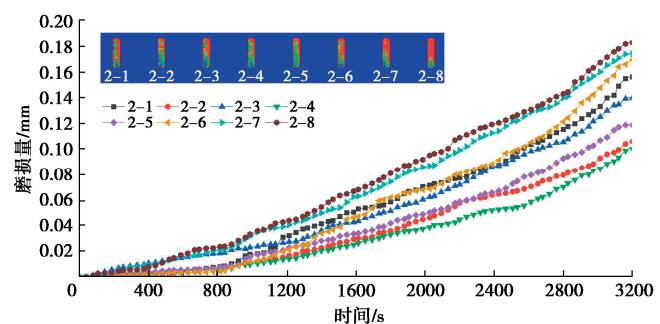


图 22 工程设计方案楔犁刀磨损量时程曲线

Fig. 22 Wear curves of cutters under engineering scheme

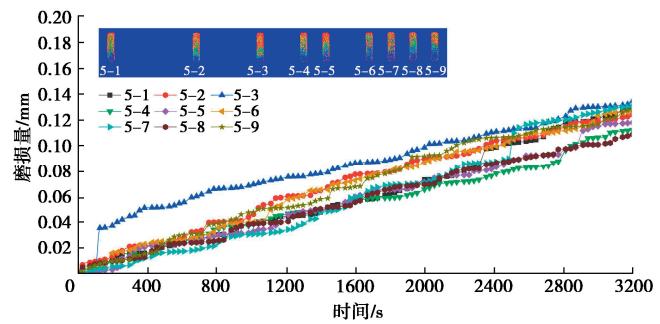


图 23 均匀磨损方案楔犁刀磨损时程曲线

Fig. 23 Wear curves of cutters under uniform wear scheme

绘制实际工程及数值计算中的刀盘最外侧刀具平均磨损量  $\delta_m$  与切削迹长  $L$  之间的关系, 如图 24 所示。由图 24 可知, 刀具磨损量与切削迹长具有良好的线形关系。两种方案下的磨损系数  $K'$  分别为 0.056, 0.038 mm/km, 可见均匀磨损方案下的最外圈刀具磨损系数低于工程方案。

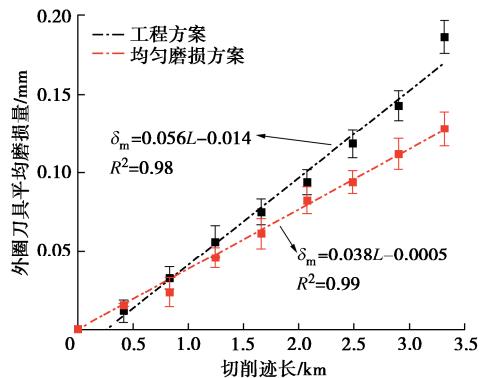


图 24  $\delta_m$  与  $L$  的关系

Fig. 24 Relationship between  $\delta_m$  and  $L$

根据磨损系数, 采用式 (17) (日本隧道学会 JTS 计算模型)计算两种方案下的最大盾构掘进距离  $L_{\max}$ :

$$L_{\max} = \frac{\delta V}{2\pi K' RN} \quad \text{s.} \quad (17)$$

式中:  $\delta$  为刀具最大允许磨损值, 根据刀体高度,  $\delta$  值取 45 mm;  $V$  为推进速度;  $N$  为刀盘转速。当最大安装半径处的楔犁刀磨损量达到 45 mm 时, 两种方案下的最大切削轨迹长度分别为 1552, 2285 m, 后者切削迹长提升约 47%。

## 4 结 论

(1) 以楔犁刀具的磨擦磨损为研究对象, 基于磨擦功原理, 建立楔犁刀表面磨损量计算方法。确定了环向布刀指数  $\beta$ 、地层岩性指数  $n$  为影响磨损量的关键参数, 当刀盘掘进参数一定时, 磨损量随环向布刀指数  $\beta$  值的增大而快速减小, 随地层岩性  $n$  值的增大而缓慢增大, 为刀具均匀磨损设计奠定理论基础。

(2) 建立了整盘刀具均匀磨损的刀盘线形方程。证明了在刀盘不同轨迹半径上安装特定数量的刀具, 并配合相应的弧面刀盘, 能够实现整盘刀具的均匀磨损; 对于不同的刀盘直径,  $\beta$  值增到一定区间后才能满足合理的拱径比。对于常规盾构 ( $2.5 \text{ m} \leq R \leq 6 \text{ m}$ ), 合理的  $\beta$  值范围为  $1.83 \sim 2$ 。对于超大型盾构 ( $R \geq 6 \text{ m}$ ), 需设计平面式刀盘, 并在各轨迹上按照径向尺度的平方布设刀具数量, 可以保证整盘刀具的均匀磨损。

(3) 进行了多围压条件下的室内三轴及 EDEM 数值三轴试验, 获得砂卵石土应力-应变关系, 标定了砂卵石地层的“颗粒-颗粒”“颗粒-刀具”磨损接触参

数, 构建了砂卵石颗粒地层盾构刀具磨损数值仿真系统, 可视化了整盘刀具的磨损特征。

(4) 设计了砂卵石地层直径 6.6 m 均匀磨损盾构, 建立了其掘进 EDEM 模型, 结果表明: 均匀磨损方案下, 整盘刀具磨损均匀, 最外环刀具平均磨损系数小于工程方案; 均匀磨损方案最大切削轨迹长度为 2285 m, 单次不换刀连续掘进距离大幅提升。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 张晋勋、王贵和对论文进行指导; 李博、殷明伦、孙正阳直接参与论文的撰写和数据的分析; 江玉生、江华为论文提供工程材料。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。Guidance for the paper was provided by ZHANG Jinxun and WANG Guihe. The writing of the manuscript and data analysis were directly conducted by LI Bo, YIM Minlun, and SUN Zhengyang. Engineering materials for the study were supplied by JIANG Yusheng and JIANG Hua. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

## 参 考 文 献:

- [1] ABU BAKAR M Z, MAJEED Y, ROSTAMI J. Influence of moisture content on the LCPC test results and its implications on tool wear in mechanized tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **81**: 165-175.
- [2] 葛双双, 高 珂, 汪义伟, 等. 我国交通盾构隧道病害、评价及治理研究综述[J]. 土木工程学报, 2023, **56**(1): 119-128. (GE Shuangshuang, GAO Wei, WANG Yiwei, et al. Review on evaluation and treatment of traffic shield tunnel defects in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, **56**(1): 119-128. (in Chinese))
- [3] 陈辉华, 李瑚均, 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))
- [4] NILSEN B, DAHL F, HOLZHAUSER J, et al. Abrasivity testing for rock and soil[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2006, **38**(4): 47-49.
- [5] BARZEGARI G, UROMEIHY A, ZHAO J. Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **48**: 43-57.
- [6] 黄清飞. 砂卵石地层盾构刀盘刀具与土相互作用及其选型

- 设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010. (HUANG Qingfei. Study on Interaction between Cutter and Soil of Shield Cutterhead in Sandy Pebble Stratum and Its Selection Design[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 江华, 江玉生, 张晋勋, 等. 大粒径卵砾石地层盾构刀盘选型及适应性评价[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(5): 119-124. (JIANG Hua, JIANG Yusheng, ZHANG Jinxun, et al. Cutting wheel structure selection of EPB TBM and its adaptability evaluation in large particle size gravel strata[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(5): 119-124. (in Chinese))
- [9] 董洪星. 盾构穿越全断面砂卵石地层刀具磨损情况分析[J]. 市政技术, 2017, 35(2): 170-173, 177. (DONG Hongxing. Cutter wear analysis through full-section sand cobble strata[J]. Municipal Engineering Technology, 2017, 35(2): 170-173, 177. (in Chinese))
- [10] 孙振中. 砂卵石地层对盾构滚刀耐磨损性影响试验研究[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))
- [11] 赵康. 复合盾构刀盘在富水砂卵石地层地铁隧道中的应用[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊 1): 1238-1243. (ZHAO Kang. Application of composite shield cutter head in subway tunnel in water-rich sandy pebble stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 1238-1243. (in Chinese))
- [12] 刘奇, 靳世鹤. 兰州地铁砂卵石地层土压平衡盾构刀具使用寿命延长技术[J]. 隧道建设, 2016, 36(8): 1011-1015. (LIU Qi, JIN Shihe. Increasing technologies for service life of EPB shield cutting tools boring in sandy cobble stratum in Lanzhou[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(8): 1011-1015. (in Chinese))
- [13] 张晋勋, 殷明伦, 江华, 等. 砂卵石地层盾构长距离掘进先行刀优化配置研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(4): 119-127. (ZHANG Jinxun, YIN Minglun, JIANG Hua, et al. Optimization of the configuration of cutters for long distance shield tunneling in gravel stratum[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(4): 119-127. (in Chinese))
- [14] 张明富, 袁大军, 黄清飞, 等. 砂卵石地层盾构刀具动态磨损分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 397-402. (ZHANG Mingfu, YUAN Dajun, HUANG Qingfei, et al. Analysis of dynamic abrasion of shield cutters in sandy cobble stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 397-402. (in Chinese))
- [15] KISHIDA H, UESUGI M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus[J]. Géotechnique, 1987, 37(1): 45-52.
- [16] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. (XU Xiaohe, YU Jing. Rock Fragmentation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [17] 欧阳义平, 杨启. 圆锥齿切削破岩的切削力估算[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(1): 35-40, 46. (OUYANG Yiping, YANG Qi. Estimation of cutting force of rock cutting with conical picks[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(1): 35-40, 46. (in Chinese))
- [18] FANG Y, WANG J, JIANG Y C, et al. Study on ground settlement induced by shield tunnel construction in sandy gravel stratum[C]// ICPTT 2012. Wuhan, China: American Society of Civil Engineers, 2012: 1567-1573.
- [19] WU L, GUAN T M, LEI L. Discrete element model for performance analysis of cutterhead excavation system of EPB machine[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37: 37-44.
- [20] 武力, 屈福政, 孙伟, 等. 基于离散元的土压平衡盾构密封舱压力分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 18-23. (WU Li, QU Fuzheng, SUN Wei, et al. Discrete numerical model for analysis of chamber pressure of earth pressure balance shield machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 18-23. (in Chinese))