

# Research on Optimal Layout Design and Tool Life Improvement of Cutter Plate for Shield Tunneling Machine

Lei Hu

China Railway 19th Bureau Group Beijing Rail Transit Engineering Construction Co., Ltd., Beijing  
Email: 717056647@qq.com

Received: Aug. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 19<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 26<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Cutter head is the main working part of shield machine. Different cutter head structure and cutter arrangement should be adopted in different geological strata. Shield cutter is used as cutting tool in tunneling process. The quality of cutter head and tool is related to the success or failure of shield construction and affects the speed and benefit of shield tunneling. In this paper, the cutterhead is arranged according to the principle of Archimedes spiral line, and the service life of cutterhead is taken into account. It includes the calculation of the digging Coefficient and the wear Coefficient of the cutter head, and the determination of the number of the cutter head by applying the equal life principle.

## Keywords

Shield Machine, Cutter Head and Tool, Layout, Archimedes Spiral

---

# 盾构机刀盘刀具的优化布局设计与刀具使用寿命提升研究

胡 雷

中铁十九局集团北京轨道交通工程建设有限公司, 北京  
Email: 717056647@qq.com

收稿日期: 2020年8月6日; 录用日期: 2020年8月19日; 发布日期: 2020年8月26日

## 摘要

刀盘是盾构机的主要工作部件，不同地质地层应采用不同的刀盘结构形式和刀具布置，盾构刀具作为掘进过程中的切削工具，选型与布置影响着盾构的使用性能，刀盘及刀具的好坏关系到盾构施工的成败，影响着盾构掘进的速度和效益，本文结合阿基米德螺旋线原理布置刀盘刀具，并考虑到刀盘刀具的使用寿命，其中包括刀盘的挖掘系数和磨损系数的计算，应用等寿命原则确定刀具数量，通过这种布置方案刀盘的寿命将提高大约15%。

## 关键词

盾构机，刀盘刀具，布置，阿基米德螺旋线

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

现代社会功能集中，人口众多，因此，城市交通功能的完善是非常重要的。由于城市空间的高密度利用，为了保护城市景观和环境，需要在地下建设地铁、公路、供水系统、污水系统、电力线路、电信网络等组成的基础设施[1]。目前，我国许多城市都在运行大量的地铁和轻轨，还有更多的地铁和轻轨正在建设中[2]。盾构机因具有环保、快速及对周围环境影响较小等优点，被广泛应用于市政、矿山、交通、水工等隧道工程施工中[3]。刀盘是盾构掘进机的关键部件，盾构机的大部分部件可以重复使用，而刀盘则不是这种情况，刀盘结构和刀具材料是由地质状态决定的。在不同的地质和水文情况下选择不同的刀盘结构形式和刀具布置，刀盘和刀具的性能直接影响到盾构掘进的效率和速度[4]。

目前，国外如德国、日本已经对盾构刀盘进行了深入的研究；国内，对其理论研究还处在起步阶段，由于盾构刀盘技术受到国外的封锁，至今成果显著的论述还不多。现在国内制造的盾构刀盘很多都是仿制，设计理论依据不足，工作性能不佳。我国的盾构机发展和应用还有很多亟待解决的问题，如技术还不够成熟，形式不够多样，面临着国产化的挑战等[5]。所以，对盾构机刀盘设计的研究是一个迫切的问题。以某城市地铁施工盾构机为研究对象，对土压平衡盾构机刀盘布置方案中刀具的组合、采用的布置方法、刀具数目对盾构机刀具的磨损和使用寿命产生的直接影响进行研究，设计出符合施工要求的刀盘刀具布置方案。

## 2. 盾构机常用刀具分类

不同的土层土体信息对刀具类型有不同的要求，刀具的分类及应用场景情况如表1所示[6][7][8][9]。

## 3. 盾构机刀盘刀具的布置方案设计

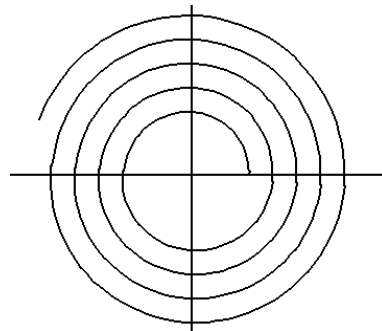
### 3.1. 刀盘刀具的布置曲线

目前最常用的刀盘刀具布置方法是阿基米德螺旋线布置法，合理布置刀盘刀具对于保证刀具的使用寿命是十分关键的[10]。阿基米德螺旋线布置方法介绍如下。

**Table 1.** Cutter application scenarios  
**表 1.** 刀具的应用场景

刀具名称	地层适应性
切刀	用于软土地层，同时刻用于硬岩掘进中的刮渣
单刃滚刀	用于硬岩掘进
双刃滚刀	用作软硬岩土层的掘进，一般安装在刀盘中心部位
仿形刀	用于局部扩大隧道断面，一般用在硬岩掘进中
中心齿刀	用于软土掘进，可增大刀盘中心部分的开口率
正齿刀	用于软土掘进，可以换装滚刀
刮刀	用于软土地层，安装在刀盘弧形周边，在硬岩下可用于刮渣

刀盘刀具布置的阿基米德螺旋线如图 1 所示。



**Figure 1.** Archimedes spiral of cutter arrangement  
**图 1.** 刀具布置的阿基米德螺旋线

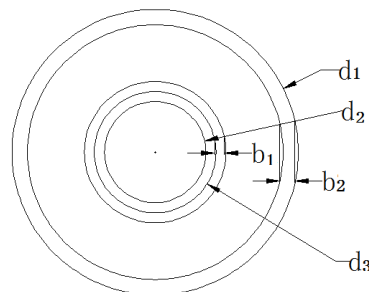
阿基米德螺旋线的极坐标表达式为[11]:

$$\rho = \rho_0 + \alpha\theta \quad (1)$$

式中， $\rho$ ——极轴； $\rho_0$ ——极轴初始值； $\alpha$ ——常系数； $\theta$ ——极角。其中，螺距  $\alpha = \Delta\rho/2\pi$  ( $\Delta\rho$  为螺距)。

### 3.2. 盾构刀具在刀盘上布置位置的确定

从刀盘刀具布局、结构和负载的合理性，将刀具布置于数根(通常为偶数)辐条上，刀具的布置基本情况如图 2 所示。



**Figure 2.** Schematic diagram of cutter layout  
**图 2.** 刀具的布置示意图

盾构机刀盘主刀具数量的(盾构机单方向回转所需的刀具数量)确定计算方法[12]:

$$N = \frac{\frac{d_1}{2} - \frac{d_3}{2} - b_2}{b_1} \quad (2)$$

式中,  $d_1$ ——盾构机刀盘外径;  $d_2$ ——刀盘切削外径;  $d_3$ ——中心刀长度;  $b_1$ ——主切削刀头宽度;  $b_2$ ——外周切削刀头(刮刀)宽度。

对于阿基米德螺旋线常数计算公式为:

$$\alpha = \frac{b_1}{\Delta\theta} \quad (3)$$

式中,  $\Delta\theta$ ——相邻辐条间的夹角;  $\alpha$ ——计算出的数值要进行取整。

主切削刀与中心刀的间隙量表达式为:

$$c = b_1 \times (N - N^*) \quad (4)$$

式中,  $N^*$ ——刀盘刀具布置中刀具数量(数值为整数)。

所以由  $c$ 、 $b_1$  和  $d_2$  可以得出阿基米德螺旋线极径初值为:

$$\rho_0 = \frac{d_3}{2} + \frac{b_1}{2} \pm c \quad (5)$$

式中,  $c$  作为取值时取负, 作为舍去时取正。

因此刀盘刀具布置的阿基米德螺旋线方程为:

$$\rho = \rho_0 + \alpha\theta = \left( \frac{d_3}{2} + \frac{b_1}{2} \pm c \right) + \frac{b_1}{\Delta\theta} \times \theta \quad (6)$$

当刀盘刀具具有重叠时, 刀盘上主切削刀的布置方程为:

$$N = \frac{\frac{d_1}{2} - \frac{d_3}{2} - b_2}{b_1 - \Delta b} \quad (7)$$

式中,  $\Delta b$ ——刀具之间的重叠值。

### 3.3. 基于阿基米德螺旋线刀具布置实例方案设计

通过上述理论基础对某地铁盾构机刀盘进行理论布置。盾构机刀盘的主要机构参数如表 2 所示。

**Table 2.** Mechanism parameters of cutter head of shield machine

**表 2.** 盾构机刀盘的机构参数

名称	单位	数值
EPB 盾构机外径	mm	6400
中心刀长度	mm	1500
主切削刀头宽度	mm	100
外周切削刀头(刮刀)宽度	mm	150
辐条	条	4

根据公式(2)得主切削刀的布置数目为:

$$N = \frac{\frac{d_1}{2} - \frac{d_3}{2} - b_2}{b_1} = \frac{\frac{6400}{2} - \frac{1500}{2} - 150}{100} = 23$$

根据公式(4)得主切削刀与中心刀具的重叠量为:

$$c = 100 \times (23 - 23) = 0 \text{ mm}$$

根据公式(5)得阿基米德螺旋线初始值为:

$$\rho_0 = \frac{d_3}{2} + \frac{b_1}{2} \pm c = \frac{1500}{2} + \frac{100}{2} - 0 = 800 \text{ mm}$$

本文土压平衡盾构机刀盘刀具布置的阿基米德螺旋线表达式为:

$$\rho = \rho_0 + \alpha\theta = 800 + \frac{200}{\pi} \times \theta$$

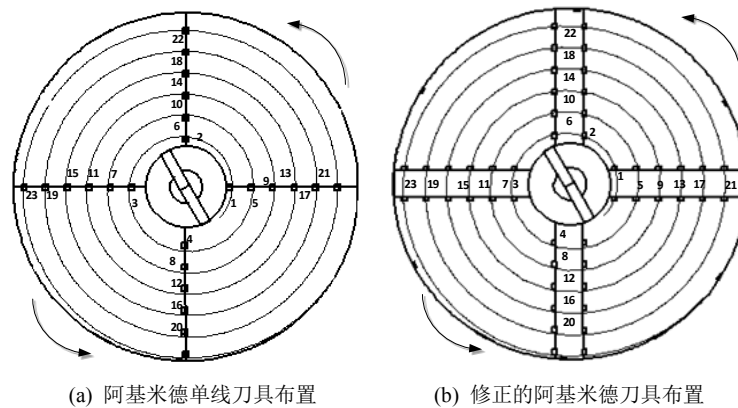
根据刀盘刀具布置的阿基米德螺旋线表达式, 计算得刀盘刀具布置的极坐标值如表 3 所示。

**Table 3.** Polar coordinates of cutter placement

**表 3.** 刀具布置的极坐标值

序号	极值 $\rho$	极角 $\theta$	序号	极值 $\rho$	极角 $\theta$	序号	极值 $\rho$	极角 $\theta$
1	800	0	9	1600	$4\pi$	17	2400	$8\pi$
2	900	$0.5\pi$	10	1700	$4.5\pi$	18	2500	$8.5\pi$
3	1000	$1\pi$	11	1800	$5\pi$	19	2600	$9\pi$
4	1100	$1.5\pi$	12	1900	$5.5\pi$	20	2700	$9.5\pi$
5	1200	$2\pi$	13	2000	$6\pi$	21	2800	$10\pi$
6	1300	$2.5\pi$	14	2100	$6.5\pi$	22	2900	$10.5\pi$
7	1400	$3\pi$	15	2200	$7\pi$	23	3000	$11\pi$
8	1500	$3.5\pi$	16	2300	$7.5\pi$			

根据土压平衡盾构机刀盘刀具布置的阿基米德螺旋线表达式画出阿基米德螺旋线刀具的布置位置如图 3(a)所示, 在盾构机施工过程中, 考虑到刀盘刀具的对称分布和受力平衡情况, 将图 3(a)中的刀具布置修正为图 3(b)所示布置方案:



**Figure 3.** Cutter arrangement of Archimedes' line

**图 3.** 阿基米德螺旋线刀具的布置位置

### 3.4. 刀盘刀具数量的确定

刀盘刀具的磨损量计算公式为[13]:

$$\delta = \frac{KDLn_r\pi}{10\nu} \tag{8}$$

式中,  $K$ ——磨损系数(mm/km);  $D$ ——刀盘直径(m);  $\delta$ ——磨损量(mm);  $L$ ——盾构机的掘进距离(m);  $n_r$ ——刀盘旋转速度(r/min);  $\nu$ ——刀盘掘进速度(cm/min)。

刀具的实际磨损系数可参考工程实际推算[14]:

$$K_n = K/n^{0.333} \tag{9}$$

式中,  $K$ ——一条轨迹上一把刀具磨损系数;  $K_n$ ——一条轨迹上  $n$  把刀具磨损系数。

因为  $D = 2R$ , 所以式(8)可转换为:

$$\delta = \frac{KRLn_r\pi}{5\nu} \tag{10}$$

将式(9)带入式(10)得:

$$\delta = \frac{KRLn_r\pi}{5\nu n^{0.333}} = \frac{KLn_r\pi}{5\nu} \frac{R}{n^{0.333}} \tag{11}$$

令  $\delta = \alpha \cdot \chi$ 。

其中,  $\alpha = \frac{R}{n^{0.333}}$ ,  $\chi = \frac{KLn_r\pi}{5\nu}$ 。

式中, 定义  $\alpha$  为不同刀盘半径上刀具的耐磨系数,  $K$  为在实际工况中为定值,  $\nu$  为刀盘的挖掘速度,  $n_r$  为旋转速度,  $L$  为给定的盾构机掘进距离,  $\chi$  为常数。

以刀盘半径  $R$  为横坐标, 以  $\alpha$  纵坐标, 得刀盘的耐磨系数图, 如图 4 所示。

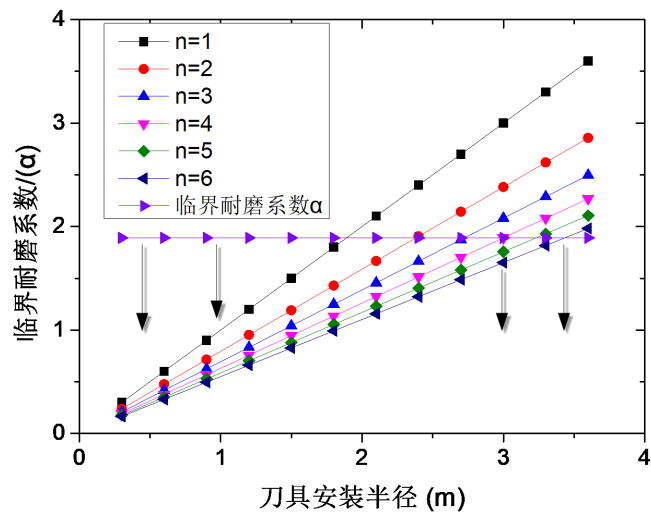


Figure 4. Wear resistance coefficient of cutter  
图 4. 刀具的耐磨系数

由图 4 可知: 当刀具的布置半径一定时, 处于临界磨损系数以下是比较合理的刀具布置数。

将式(10)转换为:

$$L = \frac{5v\delta}{KRn_r\pi} \tag{12}$$

将式(9)带入式(12)得:

$$L = \frac{5v\delta n^{0.333}}{KRn_r\pi} = \frac{5v\delta}{Kn_r\pi} \frac{n^{0.333}}{R} \tag{13}$$

令  $L = \beta \cdot \gamma$ 。

其中,  $\beta = \frac{n^{0.333}}{R}$  ( $\beta$  为不同刀盘半径上刀具的挖掘系数),  $\gamma = \frac{5v\delta}{Kn_r\pi}$ 。

以刀盘半径  $R$  为横坐标,  $\beta$  纵坐标, 得刀盘的挖掘系数图, 如图 5 所示。

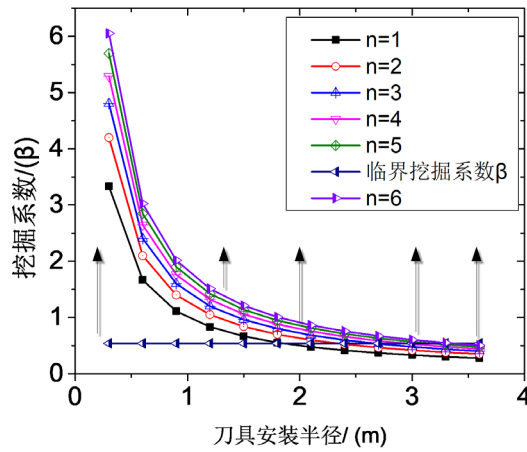


Figure 5. Excavation coefficient of cutter  
图 5. 刀具的挖掘系数

由图 5 可知: 当刀盘刀具安装半径一定时, 处于临界挖掘系数以上的刀具布置数是比较安全的。采用图 5 所示方法, EPB 盾构机的磨耗系数如表 4 所示。

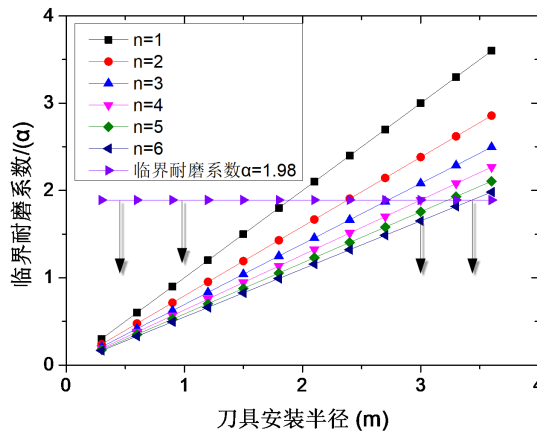
Table 4. Wear coefficient of EPB shield machine  
表 4. EPB 盾构机的磨耗系数

序号	刀具材质	砂土磨耗系数 $K_1$ /( $\mu\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$ )	砂砾磨耗系数 $K_2$ /( $\mu\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$ )	黏土磨耗系数 $K_3$ /( $\mu\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$ )
1	E-2	5.17~8.6	8.6~15.5	1.37~5.17
2	E-3	7.5~12.5	12.5~22.5	2~2.75
3	E-5	15~25	25~45	4~15

由表 4 可知, 在砂土中 E-3 刀头材料的最大磨耗系数为 12.5, 盾构机的转速 3 r/min, 挖掘速度 55 mm/min, 刀盘磨损量  $\delta$  取 16 (刀盘磨损量  $\delta$  一般取 10~20)。

$$\alpha = \frac{\delta}{\chi} = \frac{16}{\frac{\pi \times 0.125 \times 2000 \times 3}{5 \times 55}} = 1.89$$

得到刀盘刀具的耐磨系数图, 如图 6 所示。



**Figure 6.** Relationship between wear resistance coefficient of cutter mounting radius  
**图 6.** 刀具的耐磨系数和刀具安装半径关系

利用公式  $\alpha = \frac{R}{n^{0.333}}$ ，计算得出图中交点位置  $R$  值分别为：

$$R_1 = 1.89 \times 1^{0.333} = 1.89 \text{ m}$$

$$R_2 = 1.89 \times 2^{0.333} = 2.38 \text{ m}$$

$$R_3 = 1.89 \times 3^{0.333} = 2.72 \text{ m}$$

$$R_4 = 1.89 \times 4^{0.333} = 3 \text{ m}$$

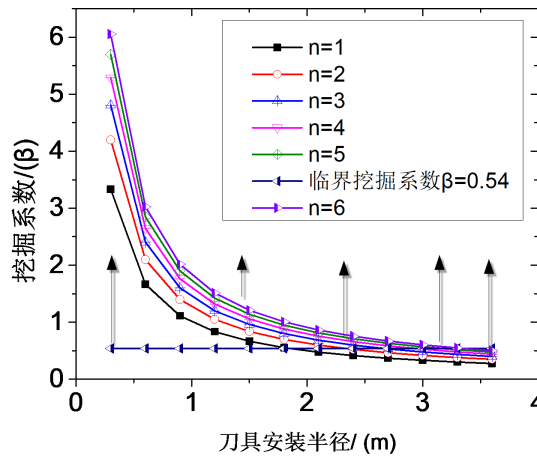
$$R_5 = 1.89 \times 5^{0.333} = 3.23 \text{ m}$$

$$R_6 = 1.89 \times 6^{0.333} = 3.43 \text{ m}$$

采用图 6 所示方法及公式(13)得：

$$\beta = \frac{L}{\gamma} = \frac{2000}{\frac{5 \times 16 \times 55}{0.125 \times 3 \times \pi}} = 0.54$$

得刀盘刀具的挖掘系数图，如图 7 所示。



**Figure 7.** Relation between the digging coefficient of the cutter mounting radius  
**图 7.** 刀具的挖掘系数和刀具安装半径关系



结合图6和图7得不同刀盘半径上需要安装的最少刀具，如表5所示。

**Table 5.** Numbers of minimum cutters to be installed

**表 5.** 需要安装的最少切刀

序号	需要刀具数/ $n$	安装半径/m	序号	需要刀具数/ $n$	安装半径/m
1	1	0.8~1.89	4	4	2.72~3
2	2	1.89~2.38	5	5	3~3.23
3	3	2.38~2.72	6	6	3.23~3.43

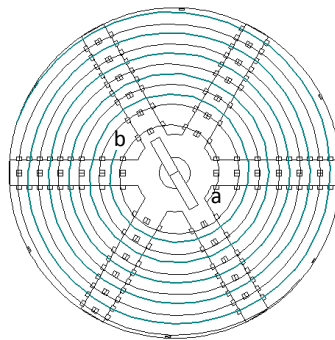
结合表5和阿基米德螺旋线初始值0.8 m得刀具在直径为6.4 m刀盘上的布置方案，如表6所示。

**Table 6.** Layout plan of the cutters

**表 6.** 刀具的布置方案

安装半径/m	一条轨迹上的刀具数/ $n$	安装半径/m	一条轨迹上的刀具数/ $n$
0.8	1	2.1	2
0.9	1	2.2	2
1	1	2.3	2
1.1	1	2.4	3
1.2	1	2.5	3
1.3	1	2.6	3
1.4	1	2.7	3
1.5	1	2.8	4
1.6	1	2.9	4
1.7	1	3	4
1.8	1	3.1	5
1.9	2	3.2	5
2	2		

由表5和表6可知，根据刀盘刀具磨损的等寿命原则，当刀具的安装半径大于1.98 m时，每个切削半径需要安装两把刀具或更多的刀具才能满足要求，所以当刀盘半径大于1.98 m时，刀盘刀具布置采用双螺旋线布置。这样既满足了刀盘刀具的切削要求，又提高了刀盘刀具整体的使用寿命。双螺旋布置曲线的设计参数完全相同，初始极坐标关于左右对称，考虑到某地铁实际施工的复杂情况及刀盘的受力平衡，本文设计的刀盘采用六辐条布置，先行刀的布置方案采用阿基米德单线的布置，在刀盘的外周布置六把刮刀，其布置方案如图8所示。



(其中，a线代表第一条阿基米德螺旋线，b代表第二条阿基米德螺旋线)

**Figure 8.** Layout scheme of cutter head

**图 8.** 刀盘刀具的布置方案

通过上述刀盘刀具的布置方法，利用 SolidWorks 软件建立刀盘的三维模型如图 9 所示。

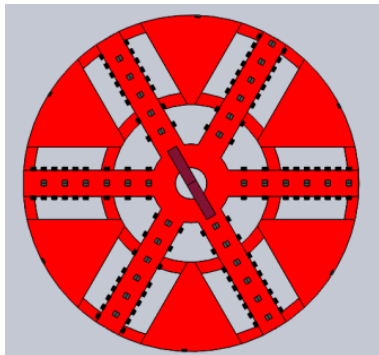


Figure 9. 3D model of the cutter head  
图 9. 刀盘的三维模型

由图 9 可知，盾构刀盘需要 106 把切刀，35 把先行刀，6 把周边刮刀，1 把鱼尾刀，一共需要 148 把刀具。在实际盾构施工中土压平衡盾构刀盘需要 84 切刀，42 先行刀，6 把周边刮刀，1 把鱼尾刀，一共需要 113 把刀具。与实际施工中的盾构刀盘刀具数目有一定的增加，主要是增加一定数目的切刀，以减少单个切刀的磨损量，增加整个刀盘刀具的使用寿命。由图 9 可知，这种布置方案和实际施工中的刀盘布置能够很好的吻合，说明这种布置方案满足实际施工要求。

#### 4. 结论

1) 针对某地铁工程施工段的地质地层报告、盾构机的主要施工参数以及施工中的掘进参数，依据刀具磨损的等寿命原则，获得刀具布置的主要参数。并考虑施工过程中刀具的磨损量和掘进距离，为保障施工的安全顺利进行提供参考。

2) 提出了刀盘刀具布置采用双螺旋线布置的方法，刀盘采用六辐条布置，先行刀的布置方案采用阿基米德单线的布置，在刀盘的外周布置六把刮刀。

3) 考虑实际施工需要，盾构刀具选择如下：盾构刀盘需要 106 把切刀，35 把先行刀，6 把周边刮刀，1 把鱼尾刀，一共需要 148 把刀具，增加一定数目的切刀，以减少单个切刀的磨损量，增加整个刀盘刀具的使用寿命。

4) 以上布置方案通过阿基米德螺旋线原理布置刀盘刀具，并考虑到刀盘刀具的使用寿命，其中包括刀盘的挖掘系数和磨损系数的计算，应用等寿命原则确定刀具数量，通过这种布置方案刀盘的寿命将提高大约 15%。

#### 参考文献

- [1] 邓文强. 盾构刀盘原理及刀具布置[J]. 建材与装饰, 2016(3): 200-201.
- [2] 黄旭. 盾构机刀盘选型及刀具强度分析[J]. 传动技术, 2018, 32(2): 28-33.
- [3] 郭永顺. 复合地层中盾构机刀盘与刀具布置选型探讨[J]. 广东土木与建筑, 2012, 19(2): 38-41.
- [4] 邵明月. 复合地层盾构机刀盘刀具优化设计及工程应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [5] 柏波. 复合地层土压平衡盾构机刀盘及刀具配置研究[J]. 中国高科技, 2019(24): 12-14.
- [6] 郑丽莹. 盾构机刀具布置规律研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
- [7] 刘建琴, 刘蒙蒙, 郭伟, 等. 隧道掘进机刀盘结构性能评价研究关键问题分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 5-10.

- 
- [8] 史雪珊. 小盾构机大开口率刀盘与刀具配置[J]. 建筑机械化, 2013(4): 62-64.
- [9] 吴艳华, 刘德全, 盛少琴. 盾构机刀具选型及布置[J]. 广东造船, 2013(1): 54-56.
- [10] 刘文波, 杨学锋, 万壮, 等. 盾构机刀具的分类与布置[J]. 重型机械, 2019(2): 6-11.
- [11] 陈国盛. 阿基米德螺线在盾构技术中的应用[J]. 重工与起重技术, 2006(2): 18-20.
- [12] 裴瑞英. 盾构机刀具磨损与布局问题分析研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2009.
- [13] 王瑶, 杨新安. 复合地层大直径盾构刀盘刀具磨损分析[J]. 交通科技与经济, 2009(6): 80-82.
- [14] 张斌. 全断面岩石掘进机刀具磨损研究及刀具布局优化[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.