

DOI: 10.11779/CJGE201812020

土压平衡盾构刀盘环向开口率研究

杨志勇¹, 江玉生¹, 张晋勋²

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

摘要: 盾构刀盘开口率是指刀盘开口部分的面积与刀盘总面积的比值, 是盾构选型时需要考虑的重要指标, 但这一指标无法反映刀盘开口位置是否合理。为了更好地反映刀盘开口状况, 提出了刀盘环向开口率的概念。运用环向开口率特征曲线对北京地铁9号线军事博物馆站—东钓鱼台站区间土压平衡盾构刀盘环向磨损事件进行了分析, 阐明了刀盘发生环向磨损的主要原因是刀盘上某一区域环向开口率过小, 部分渣土淤积在此区域, 另外渣土从开口率小的区域向开口率大的区域流动也造成了刀盘的环向磨损。刀盘环向开口率特征曲线是判断刀盘开口位置合理性的重要依据, 开口位置合理的刀盘, 除刀盘中心区域外其环向开口率特征曲线应该是平缓的, 以保证刀盘上每一个区域都有合理的开口区域, 确保渣土顺畅进入土舱, 土压平衡盾构刀盘设计时应充分考虑环向开口率这一指标。

关键词: 土压平衡盾构; 刀盘; 环向开口率; 刀盘磨损

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)12-2312-06

作者简介: 杨志勇(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事盾构/TBM隧道技术研究工作。E-mail: yangzy1010@126.com。

Radial opening ratio of EPB TBM cutterheads

YANG Zhi-yong¹, JIANG Yu-sheng¹, ZHANG Jin-xun²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing

MTR Construction Administration Corporation, Beijing 100088, China)

Abstract: The opening ratio of cutterheads, the area ratio of the cutterhead openings to the entire cutterhead, is an important index for selection of earth pressure balanced (EPB) TBM. However, the opening ratio of cutterheads alone cannot fully reflect whether the positions of the cutterhead openings are reasonable or not. To solve this problem, the concept of radial opening ratio of cutterheads is proposed. Based on the characteristic curve of the radial opening ratio, the radial abrasion events of TBM cutterheads during construction of Military Museum Station to East Diaoyutai Station of Beijing Metro Line 9 are analyzed. The main reason of radial abrasion is that the radial opening ratio is too small in a certain area on the cutterhead, and part of the soil deposits in this area. Besides, it also causes the cutterhead to abrade when soil flows from the small opening ratio area to the large one. The characteristic curve of the radial opening ratio can be used to evaluate the rationality of opening position on the cutterhead. For the TBM cutterhead with reasonable opening positions, the characteristic curve of the radial opening ratio should be gentle without large fluctuations except for the central area of the cutterhead so as to ensure the reasonable opening positions in each part of the cutterhead and smooth soil moving into the chamber. The radial opening ratio should be fully considered when designing TBM cutterheads.

Key words: EPB TBM; cutterhead; radial opening ratio; cutterhead abrasion

0 引言

盾构刀盘开口率是指刀盘开口部分的面积与刀盘总面积的比值, 刀具切屑下来的渣土通过开口部分进入土舱, 刀盘开口率越大, 渣土进入土舱越容易, 但越不利于开挖面的稳定; 刀盘开口率越小, 渣土进入土舱越困难, 越有利于开挖面的稳定。刀盘的开口率是土压平衡盾构选型时需要考虑的重要指标之一。

国内外部分学者对刀盘开口率与盾构穿越地层的适应性进行了大量的研究工作。Burger^[1]分析了泥水

平衡盾构和土压平衡盾构刀盘设计应考虑的主要问题, 提出了软土地层刀盘的设计原则。李向红等^[2]采用直径1.8 m的模型盾构在软土、砂土、砂砾土层中进行掘进试验, 研究了不同刀盘开口率对盾构总推力、刀盘扭矩及出土率的影响规律, 得出了刀盘开口率较大的盾构对土层适应性更好的结论。王洪新^[3]在分析

基金项目: 国家自然科学基金煤炭联合基金重点项目(U1261212)

收稿日期: 2017-12-18

刀盘开口率对出土率影响的基础上, 提出了定量分析刀盘开口率对地层适应性的计算方法, 并采用该计算方法, 对上海典型土层中土压平衡盾构刀盘开口率提出了建议值。Zhao 等^[4]对土压平衡盾构在土岩复合地层中掘进遇到的问题及解决措施进行了研究, 发现增大刀盘开口率能够提高土压平衡盾构在复合地层中的利用率。

部分学者结合实际工程, 对土压平衡盾构的设计进行了研究: Maidl^[5]针对 Botlek Rail Tunnel 的高水压的复杂地层条件, 对该隧道的土压平衡盾构的设计和渣土改良技术进行了研究; Ates 等^[6]在统计和分析 262 台盾构使用情况的基础上, 分析了盾构刀盘扭矩、推力等参数的影响因素, 建立了不同地层盾构设计的数据库, 提出了土耳其不同地层盾构主要参数的设计范围。Carrieri 等^[7]、江华等^[8]学者对卵石地层中盾构选型、刀盘设计、渣土改良技术进行了研究, 研究结论表明: 卵石地层中土压平衡盾构应采用开口率较大的刀盘, 以减小刀盘扭矩, 降低刀具的磨损。

部分学者对刀盘开口率与刀盘扭矩及土舱压力变化关系进行了相关的研究工作。Xu 等^[9]采用直径 0.4 m 的微型盾构在上海软土地层中进行了一系列试验研究, 研究结果表明刀盘开口率越大, 土舱压力与刀盘扭矩的线性关系越强。刘建琴等^[10]采用流体力学方法模拟了土体-盾构刀盘系统流场静压力和流场速度分布, 并研究了不同开口率对刀盘前后压差变化的影响, 研究表明刀盘前后压力差随着开口率增大而逐渐减小。王洪新^[11-12]推导了土舱压力与开挖面处压力差的计算方法, 定量的分析了开口率对土舱压力差的影响。

刀盘开口率仅仅是一个平均化指标, 难以反映刀盘开口位置是否合理。同样开口率的刀盘, 刀盘开口位置不合理, 会造成刀盘上某一区域开口部分过小, 导致这一区域渣土不能进入土舱内, 黏附或板结在刀盘上, 堵塞刀盘开口区域, 影响盾构推进速度, 增大刀盘扭矩, 严重时会引起刀盘和刀具的异常磨损, 因此刀盘开口位置比开口率更重要。

本文讨论了刀盘环向开口率问题, 并提出通过刀盘环向开口率特征曲线来判断刀盘开口位置是否合理, 对北京地铁 9 号线 06 标段军事博物馆站—东钓鱼台站区间土压平衡盾构刀盘环向磨损事件进行了分析, 解释了刀盘发生环向磨损的原因。研究结果对土压平衡盾构刀盘设计具有参考价值。

1 环向开口率及其特征曲线

盾构刀盘切削土体, 刀具的旋转带着渣土在一定的环状区域上流动, 这一环状区域的开口大小决定了

渣土能否顺利进入土舱。刀盘环向开口率是刀盘上某一环状区域上开口部分的面积与这个环状区域面积的比值。

如图 1 所示, 图中环状区域面积 $S_i = \pi(R_i^2 - r_i^2)$, 环向开口面积为 ΔS_i , 环向开口率 $K_i = \Delta S_i / S_i$ 。环向开口率特征曲线是以刀盘中心为圆心, 将刀盘划分为若干个环距 ($\Delta R_i = R_i - r_i$) 相等的环状区域, 测量并计算每个环状区域的环向开口率 K_i , 然后以刀盘半径 R_i 为横轴, 以环向开口率 K_i 为纵轴, 做出其环向开口率特征曲线, 图 2 是图 1 所示刀盘在环距 $\Delta R_i = 100$ mm 下的环向开口率特征曲线。环向开口率特征曲线就是环向开口率沿刀盘径向的分布情况, 可以良好的反映刀盘各个区域开口的分布状况。

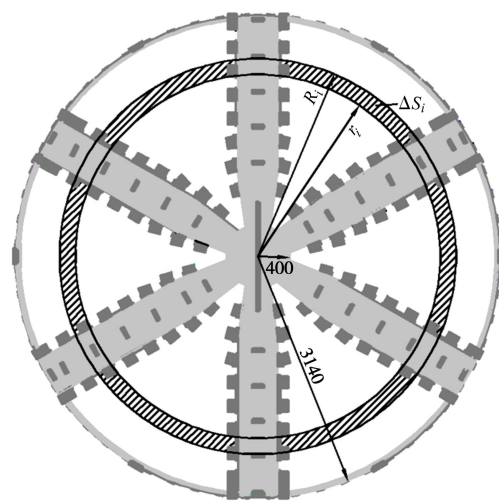


图 1 刀盘环向开口率示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radial opening ratio of cutterhead

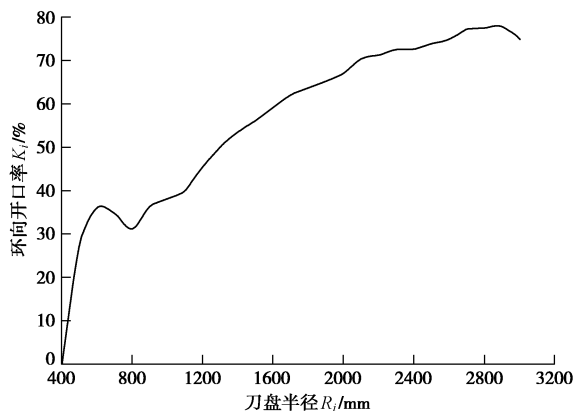


图 2 环向开口率特征曲线

Fig. 2 Characteristic curve of radial opening ratio

2 刀盘环向磨损实例分析

2.1 工程概况

北京地铁 9 号线 06 标军事博物馆站—东钓鱼台站区间 (简称军—东区间), 盾构从军事博物馆北侧的盾

构井始发,下穿玉渊潭后继续向北至东钓鱼台站接收,隧道埋深 11.3~25.8 m,全长 1206.8 m,区间穿越地层主要为砾岩和卵石地层,局部夹杂泥岩,详见图 4 所示,隧道穿越地层详细情况如表 1 所示。

表 1 盾构穿越地层详细情况

Table 1 Detailed conditions of tunneling strata	
地层	详细情况
砾岩	强风化,松散胶结,砾石成分主要为花岗岩、安山岩、石英岩等,亚圆形,粒径40~80 mm,充填物为黏土,水理性质很差,强度低,浸水后易崩解破碎。
泥岩	强风化,部分风化为黏土,结构大部分破坏,强度极低,具有膨胀性,易崩解破碎。
卵石	密实,饱和,最大粒径不小于300 mm,一般粒径30~80 mm,粒径大于20 mm颗粒含量约为总质量的60%~70%,亚圆形,中粗砂充填。

区间采用一台面板式土压平衡盾构施工,刀盘开口率 33%,刀盘结构详见图 3。

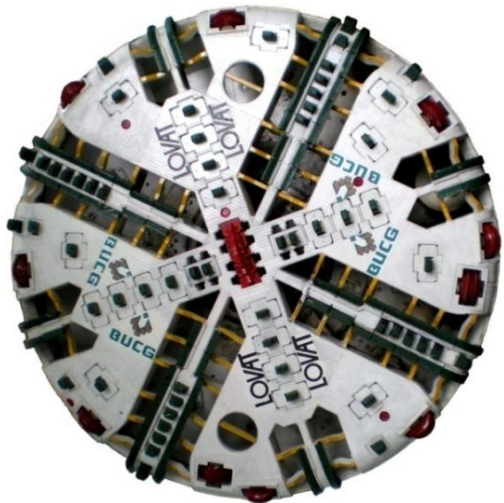


图 3 盾构刀盘结构

Fig. 3 Cutterhead structure of shield machine

盾构刀盘开挖直径 6.26 m,额定扭矩 5660 kN·m,脱困扭矩 7070 kN·m,最大推力 37800 kN。隧道采用

钢筋混凝土管片,管片外径 6 m,内径 5.4 m,环宽 1.2 m。

2.2 刀盘环向异常磨损情况

盾构在#2 检修井换完刀具后,从 315 环开始掘进至 412 环时(共掘进 98 环,117.6 m),刀盘磨损检测装置报警,盾构停止掘进,从地面开挖#3 检修井至盾构刀盘,发现刀盘环向磨损严重。#2 检修井—#3 检修井隧道埋深 16.8~17.4 m,穿越的地层为全断面卵石层,局部含漂石,如图 4 所示。

刀盘上出现了两个环状磨损区域,磨损位置及范围见图 5 所示,现场磨损照片见图 6 所示。刀盘的环向磨损可以分为#1 磨损区域和#2 磨损区域,刀盘环向磨损位置、磨损深度与刀盘半径的关系,详见表 2 所示。

表 2 刀盘磨损深度测量表

Table 2 Measurement of cutter abrasion depth		
磨损区域	磨损位置 (距刀盘中心距离/mm)	磨损深度 /mm
#1 磨损区域	1191	0
	1421	-40
	1685	-130
	1861	0
#2 磨损区域	2371	0
	2569	-38
	2701	0

各个磨损区域基本情况如下:

- (1) #1 磨损区域距离刀盘中心 1191~1861 mm,磨损宽度 670 mm,最大磨损深度 130 mm。
- (2) #2 磨损区域距离刀盘中心 2371~2701 mm,磨损宽度 330 mm,最大磨损深度 38 mm。

2.3 刀盘环向磨损分析

该刀盘上主要布置了先行刀和刮刀,先行刀与刀盘高差 150 mm,刮刀与刀盘高差 100 mm。刀盘旋转开挖土体时,先行刀预先疏松土体,刮刀将疏松后的

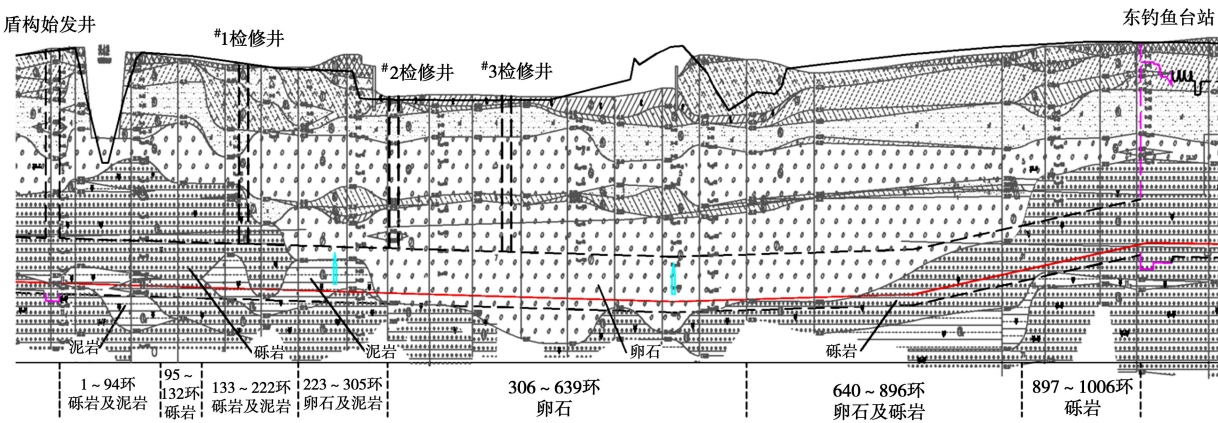


图 4 军一东区间地质剖面图

Fig. 4 Geological section of Military Museum Station-East Diaoyutai Station

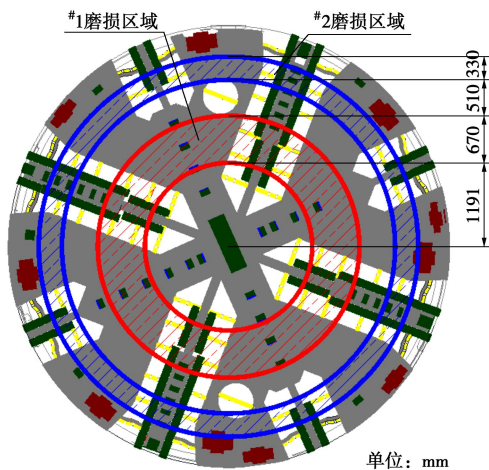


图 5 磨损区域位置图

Fig. 5 Locations of abrasion area

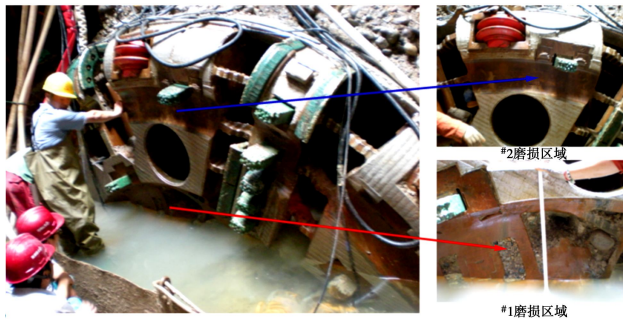


图 6 刀盘磨损照片

Fig. 6 Photos of cutter abrasion

土体刮入土舱。盾构正常掘进过程中, 切削后的渣土直接从紧邻刮刀的刀盘开口处进入土舱, 刀盘与渣土摩擦较少, 不会导致较大的磨损。即使由于推力过大, 导致刀盘与开挖面压紧, 由于地层磨蚀性较强, 会导致整个刀盘发生磨损, 不会出现某些环状区域发生磨损的情况。

为进一步分析刀盘发生环向磨损的原因, 该刀盘在环距 ΔR_i 为 50, 100, 200 mm 下的环向开口率特征曲线与磨损深度的对应关系如图 7 所示。各个磨损区域与刀盘环向开口率相关性如下:

(1) #1 磨损区域, 环向磨损发生在 $R_i=1191 \sim 1861$ mm 区域, 该区域刀盘环向开口率曲线起伏很大 ($K_i=16.5\% \sim 45.6\%$), 在 $R_i=1630 \sim 1880$ mm 区域, 环向开口率只有 $16.5\% \sim 23.4\%$, 这一区域也是刀盘发生较深磨损的区域, #1 磨损区域刀盘环向磨损最深处 $R_i=1685$ mm (磨损深度 130 mm), 与环向开口率最小处 $R_i=1680$ mm 基本吻合, 可以肯定在 $R_i=1630 \sim 1880$ mm 区域处, 刀盘淤积了部分渣土, 且环向开口率越小的区域, 渣土淤积越多, 对该处刀盘的环向磨损也越厉害, 磨损深度越大。在 $R_i=1191 \sim 1630$ mm 区域, 环向开口率在 $24.5\% \sim 45.6\%$, 刀盘环向开口率起伏较大, 且临近环向开口率较小的 $R_i=1630 \sim 1880$ mm 区

域, 这一区域渣土流动状态比较复杂, 在 $R_i=1630 \sim 1880$ mm 区域淤积的渣土, 会从环向开口率小的区域向环向开口率大的区域流动, 渣土的流动导致 $R_i=1191 \sim 1630$ mm 区域发生环向磨损。

(2) #2 磨损区域, 环向磨损发生在 $R_i=2371 \sim 2701$ mm 区域, 由图 7 可知刀盘上 $R_i=2530 \sim 2580$ mm 区域, 环向开口率只有 $10.5\% \sim 20.3\%$, 这一环状区域环向开口率太小, 渣土不能顺利进入土舱, 淤积在这一区域, 但由于临近区域开口率较大, 渣土向临近区域流动, 因此发生环向磨损区域 ($R_i=2371 \sim 2701$ mm) 大于环向开口率较小的区域 ($R_i=2530 \sim 2580$ mm)。#2 磨损区域刀盘环向磨损最深处 $R_i=2530$ mm (磨损深度 38 mm), 处于环向开口率最小区域 ($R_i=2530 \sim 2580$ mm)。

通过分析 #1 磨损区域和 #2 磨损区域与刀盘环向开口率特征曲线的相关性发现如下规律和结论:

(1) 发生环向磨损的区域刀盘环向开口率均较小, 且环向开口率小的区域越大, 发生环向磨损的区域也越大, 磨损深度也越深。

(2) 刀盘发生环向磨损的主要原因是刀盘上某一区域环向开口率过小, 部分渣土淤积在此区域, 造成刀盘的环向磨损。

(3) 刀盘环向磨损的区域大于环向开口率小的区域, 这是由于渣土从环向开口率小的区域向环向开口率大的区域流动造成的。

所取环距越小所得到的环向开口率特征曲线越能细致的反映刀盘开口状况。由图 7 可见, 环距 $\Delta R_i=50$ mm 和环距 $\Delta R_i=100$ mm 下的环向开口率特征曲线与刀盘磨损区域有较好的对应关系, 且 $\Delta R_i=50$ mm 下的环向开口率特征曲线与刀盘磨损区域的相关性要优于 $\Delta R_i=100$ mm 下的。环距 $\Delta R_i=200$ mm 下的环向开口率曲线与刀盘磨损区域相关性并不强, 这主要是因为环距太大所得到的环向开口率特征曲线不能细致反映刀盘环向开口状况所致。

造成刀盘环向开口率曲线起伏较大的主要原因是刀盘上设置了数量较多的格筛条。卵石地层中, 为防止大粒径漂石进入土舱, 堵塞螺旋输送机进口, 某些盾构在设计刀盘时在开口处设置了格筛条, 但是这种设计是值得商榷的, 主要是存在 2 个问题:

(1) 格筛条会导致刀盘上某部分环状区域开口过小, 造成渣土无法正常进入土舱; 或者刀盘上相邻环状区域开口差异较大, 影响渣土的运动路径。

(2) 格筛条限制大粒径漂石进入土舱, 漂石会随着刀盘的旋转在开挖面上滚动, 会对刀具造成冲击损伤。

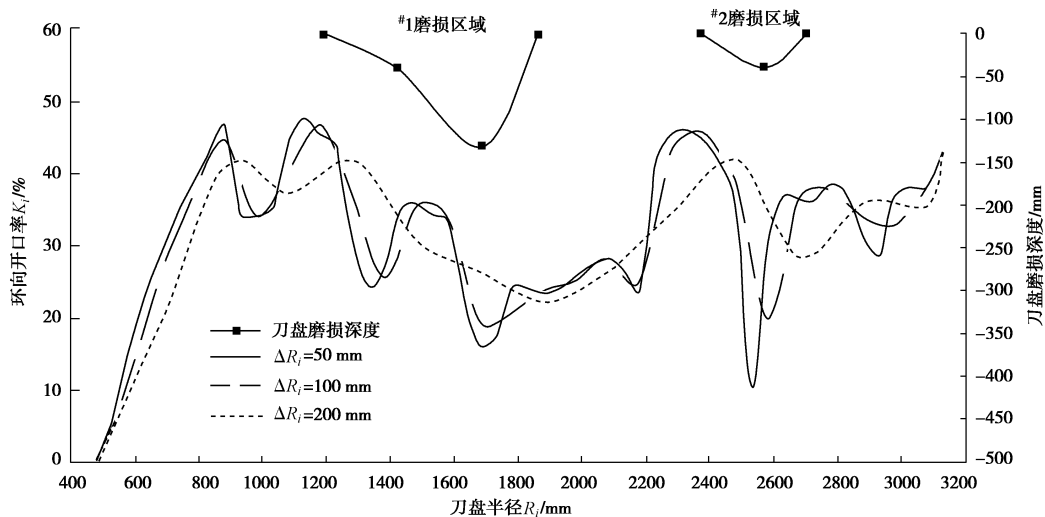


图 7 环向开口率特征曲线与环向磨损区域关系图

Fig. 7 Relationship between characteristic curve of radial opening ratio and radial abrasion area

2.4 磨损地层分析

如图 4 所示, 该标段盾构在#2 检修井以前在砾岩层、砾岩与泥岩的混合层中掘进, 切削下来的渣土对刀盘磨损性不强, 未发生刀盘环向磨损的现象。盾构从#2 检修井到#3 检修井进入全断面卵石层且为中粗砂充填, 地层和切削下来的渣土对刀盘磨损性较强, 造成了刀盘的环向磨损。

土压平衡盾构在磨蚀性较强的地层(如砂层、圆砾层、卵石层)中掘进, 由于刀盘上某一区域开口较小或开口位置不合理, 渣土淤积在刀盘某一区域不能顺利进入土舱, 会增大刀盘扭矩, 加速刀具的磨损, 严重时易导致刀盘环向磨损的发生。对于磨蚀性较弱的黏性土层(如黏土、粉质黏土、粉土), 刀盘上某一区域开口较小或开后位置不合理会导致渣土黏附在刀盘上, 导致进土不畅, 影响掘进速度, 但由于渣土磨蚀性不强, 一般不会造成刀盘的磨损。

通过刀盘环向开口率曲线来判断土压平衡盾构刀盘开口位置是否合理, 对于所有地层的盾构选型均具有参考意义。

2.5 处理措施

鉴于刀盘上设置的格栅条造成渣土不能顺利进入土舱, 影响渣土的运动路线, 导致刀盘的环向磨损。因此盾构在#3 换刀井进行了刀盘的改造, 割除了全部的格栅条, 改造后的刀盘开口率到达 36%, 改造后盾构刀盘如图 8 所示, 改造后刀盘的环向开口率特征曲线如图 9 所示。

由图 9 可知改造后刀盘提高了#1 环向磨损区域和#2 磨损区域的开口率, 渣土进入土舱更加顺畅。而且改造后刀盘的环向开口率特征曲线变得更加平滑, 没有大的波浪起伏, 防止刀盘上某一区域渣土的淤积。改造后的刀盘随后在全断面卵石地层中掘进 364.8 m

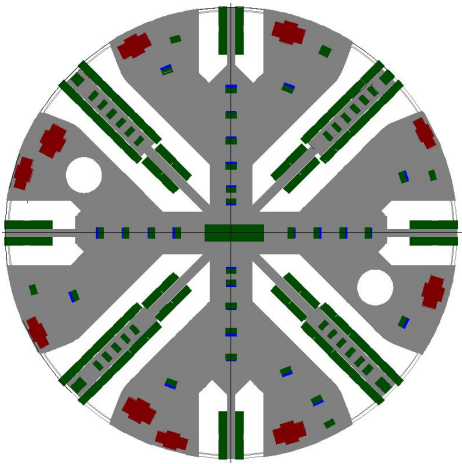


图 8 改造后刀盘结构

Fig. 8 Cutterhead structure after modification

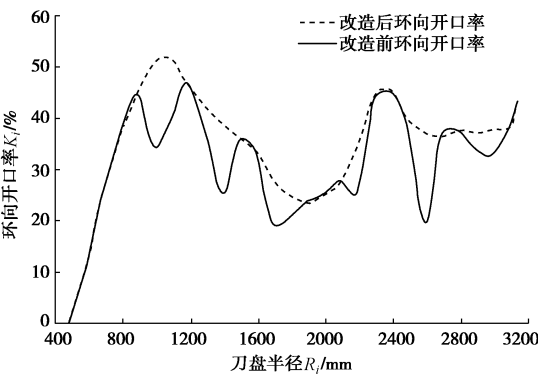


图 9 改造后刀盘环向开口率特征曲线

Fig. 9 Characteristic curve of radial opening ratio of cutterhead after modification

(304 环) 在卵石与砾岩的混合地层中掘进 308.4 m (257 环)。掘进过程中, 刀具磨损比较严重, 每隔 200~250 m 需施做 1 个检修井(检修井间距与地面环境位置相关), 对磨损的刀具进行更换。每次检修刀具时, 均对刀盘的磨损程度进行了检查, 发现刀盘的磨损量非常的小, 测量刀盘的厚度几乎没有变化。在隧

道贯通后,对刀盘的厚度又进行了测量,发现刀盘厚度最大仅减小 1.5 mm。改造后的刀盘没有发生环向磨损现象,且正常掘进过程中刀盘磨损量小,表明改造措施合理。

3 结 论

本文提出了刀盘环向开口率的概念,运用环向开口率特征曲线对土压平衡盾构刀盘环向磨损事件进行了分析,主要得出了以下结论:

(1)造成刀盘发生环向异常磨损的主要原因是刀盘上某一区域环向开口率过小,部分渣土淤积在此区域,另外渣土在刀盘上从开口率小的区域向开口率大的区域流动也会造成刀盘的环向磨损。

(2)刀盘环向开口率特征曲线能够判断刀盘开口位置是否合理,土压平衡盾构刀盘设计时应充分考虑环向开口率这一指标,尤其是在磨蚀性较大的卵石、圆砾等地层。

(3)刀盘开口型式合理的盾构,除刀盘中心区域外其环向开口率特征曲线应该是平缓的,没有大的起伏,这样才能保证刀盘上每一个区域都有合理的开口区域,确保渣土顺畅进入土舱。

(4)环距 ΔR_i 越小,所得到的环向开口率特征曲线越能细致的反映刀盘环向开口情况,根据本工程实例,环距 ΔR_i 应小于等于 100 mm。

卵石地层中,土压平衡盾构刀盘的开口位置、环向开口率计算所取宽度(即环距 ΔR_i)与卵石级配相关,如果能确定卵石的特征粒径,通过特征粒径合理表征卵石地层的特性,将对卵石地层盾构选型带来极大的便利,这是一个值得深入研究的问题。

参考文献:

- [1] BURGER W. design principles for soft ground cutterheads[C]// Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference. 2007: 784 - 792.
- [2] 李向红,傅德明. 土压平衡模型盾构掘进试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1101 - 1105. (LI Xiang-hong, FU Deming. Experimental study on excavation behaviour using model epb shield with a diameter of 1.8 m[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1101 - 1105. (in Chinese))
- [3] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率选型及其对地层适应性研究[J]. 土木工程学报, 2010(3): 88 - 92. (WANG Hong-xin. Type selection of the head aperture ratio of EPB shield cutterheads and adaptability to stratum characteristics[J]. China Civil Engineering Journal, 2010(3): 88 - 92. (in Chinese))
- [4] ZHAO J, GONG Q M, EISENSTEN Z. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: a case history in Singapore[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(4): 388 - 400.
- [5] MAID U. Design features of the botlek rail tunnel in the betuweroute[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(2): 135 - 140.
- [6] ATES U, BILGIN N, COPUR H. Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40(Supplement C): 46 - 63.
- [7] CARRIERI G, FORNARI E, GUGLIELMETTI V, et al. Torino metro line 1: use of three tbm-epbs in very coarse grained soil conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3): 274 - 275.
- [8] 江 华, 张晋勋, 苏 艺, 等. 砂卵石地层土压平衡盾构隧道施工土体改良试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 40 - 45. (JIANG Hua, ZHANG Jin-xun, SU Yi, et al. Study on soil conditioning experiments during earth pressure balance shield tunneling in sand gravel strata[J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 40 - 45. (in Chinese))
- [9] XU Q, ZHU H, DING W. Laboratory model tests and field investigations of epb shield machine tunnelling in soft ground in Shanghai[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1): 1 - 14.
- [10] 刘建琴, 郭 伟, 黄丙庆, 等. 土压平衡盾构刀盘开口率与刀盘前后压差的关系[J]. 天津大学学报, 2011, 44(8): 659 - 664. (LIU Jian-qin, GUO Wei, HUANG Bing-qing, et al. Relationship between aperture ratio and fore-and-back pressure of EPB shield cutter head[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 659 - 664. (in Chinese))
- [11] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率对土舱压力的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 89 - 93, 104. (WANG Hong-xin. Influence of aperture ratio of cutterhead of EPB shield on earth pressure in the chamber[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 89 - 93, 104. (in Chinese))
- [12] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘挤土效应及刀盘开口率对盾构正面接触压力影响[J]. 土木工程学报, 2009(7): 113 - 118. (WANG Hong-xin. Effect of cutterhead compressing the front soil and influence of head aperture ratio on contact pressure of EPB shield to the front soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2009(7): 113 - 118. (in Chinese))