

矩形盾构刀盘系统结构设计

王旭东, 郭京波

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:在地下管廊建设中,矩形盾构空间利用率高、覆土浅和施工成本低等优点逐渐被人们重视。在对比常见矩形盾构刀盘形式的基础上,提出矩形刀盘设计方案、偏心距计算方法和矩形刀盘阻力矩计算方法,应用此计算参数完成矩形盾构刀盘及主驱动设计。分析刀具寿命,采用有限元法,进行刀盘的流固耦合分析,并对主轴的强度进行校核,验证了设计方案的可行性,以期对矩形盾构刀盘研制工作提供参考。

关键词:矩形盾构;刀盘;主驱动系统;流固耦合

中图分类号:TH12;U455.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)04-0052

-06

0 引言

随着我国城镇化程度的不断推进,有限的地面道路资源越来越难以满足人们的需要,市政基础设施建设逐渐由地上转移到地下。地铁在城市交通中占有举足轻重的地位。从目前国内和国外盾构技术的施工状况来看,传统圆形盾构已广泛应用于各城市的地下建设。随着汽车保有量的增加,地下公路隧道、人行道、大断面双列地铁隧道等矩形断面的地下隧道需求量逐渐增加。矩形断面较圆形断面具有空间利用率高、覆土浅和施工成本相对低廉等优点,其有效使用面积可增大20%以上。因此,对矩形盾构的研究有重要的意义^[1-5]。

对已有矩形盾构刀盘形式进行对比,并结合当今城市管廊建设中常用断面尺寸3 m×2.5 m进行矩形盾构刀盘及驱动系统设计,提出偏心距计算方法、矩形刀盘阻力矩计算方法,完成矩形刀盘设计方案,最后采用有限元方法,进行刀盘的流固耦合分析,并对主轴的强度进行校核。

1 矩形刀盘设计方案选择

1.1 刀盘形式的选择

圆形盾构的刀盘开挖是以单轴旋转刀盘对地层进行切削,而异型断面其切削原理远比圆形复杂,目前矩形刀盘的主要形式为以下3种形式^[6]。

(1)组合刀盘式。这种方式结构简单,由若干小刀盘组成,每个刀盘能够单独进行正反转控制,这样有利于防止主机在施工过程中发生自转,同时消除切削带来的偏心力矩(如图1)。刀盘开挖直径与管片的圆角外径相同,施工断面切削率为80%,这样的切削率偏小,存在开挖盲区。

(2)中心大刀盘。这种方式只在正方形断面盾构中适用,刀盘配置有多把仿形刀,受力比较均匀,利于施工时机头的顶进(如图2)。传动系统较为复杂,切削完整断面时,需分配仿形刀伸出长度与时间,长时间的掘进可靠性会大大降低。

收稿日期:2016-08-24 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.04.10

基金项目:国家自然科学基金(51275321);河北省研究生创新基金(YC2016021)

作者简介:王旭东(1992-),男,硕士研究生,主要从事盾构施工技术的研究。E-mail: wanghappydong521@163.com

王旭东,郭京波.矩形盾构刀盘系统结构设计[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(4):52-57.



图1 组合式刀盘



图2 中心大刀盘

(3) 偏心多轴式。偏心盾构的工作原理与蒸汽机车上动轮的曲柄连杆结构相仿,对于蒸汽机车,连杆的安装方向是两根旋转轴的偏心方向,连杆的运动轨迹是半径为偏心量的圆周运动。偏心主轴由动力机构驱动旋转,而连杆上的任意一点都做半径为 r 的圆周运动,从而整个机构做平移转动,如图3所示。

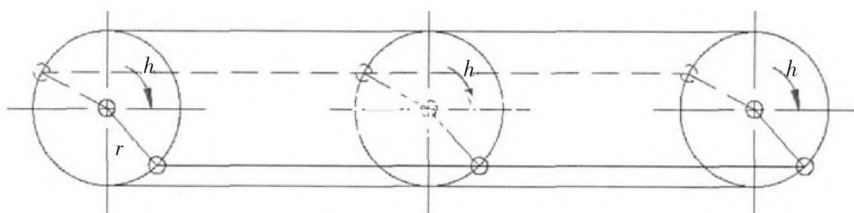


图3 蒸汽机车工作原理

将此双曲柄机构运动原理应用于矩形盾构,刀盘上各点的轨迹均以偏心距为半径的圆周转动,切削转矩较小。各刀具转动半径小,磨损量较均匀,可大幅度提高刀具的使用寿命和盾构掘进距离。因此,采用偏心多轴式。

1.2 刀盘支承形式选择

传统圆形刀盘的刀具在圆周上成同心圆处布置,随着刀盘直径逐渐增大,轴承受力将剧增,驱动能量需求较大,刀具磨损不均,监测困难。对于传统刀盘形式的不足,偏心盾构刀盘的形式,是一种改进^[7-8]。本次设计研究中采用矩形刀盘的形式,对于刀盘的支撑形式,切削刀盘的支撑在偏心轴上,而偏心轴的支撑在盾构的隔板上,它与外壳是相对固定的,偏心主轴与支承的数量是一致的。因此刀盘的支撑形式采用4个支撑点形成矩形框架,并且框架中的任何一点都形成相同的圆,这就达到了偏心盾构连杆机构的基本条件,具体形式如图4所示。

1.3 刀盘的驱动形式

对于刀盘的驱动形式,其动力装置有液压泵-马达和电动机两种,考虑到本文中偏心盾构的断面为 $3\text{ m} \times 2.5\text{ m}$,如果采用电动机,其个体尺寸太大,不易于在盾构机内部布置,因此采用液压马达动力装置。

刀盘的驱动方式为四根驱动轴全轴驱动。整个驱动系统的传动方式(如图5)为:电动机→液压泵→液压马达→减速器→偏心主轴→刀盘。

这种盾构的刀盘形式与驱动机构具有以下

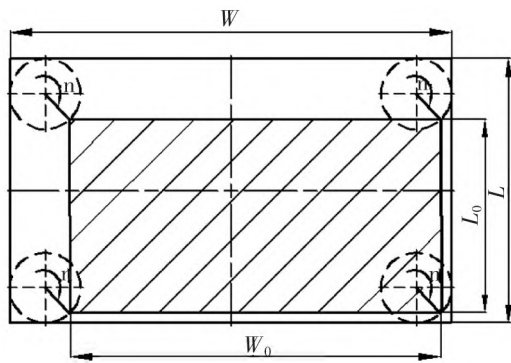


图4 偏心盾构连杆机构

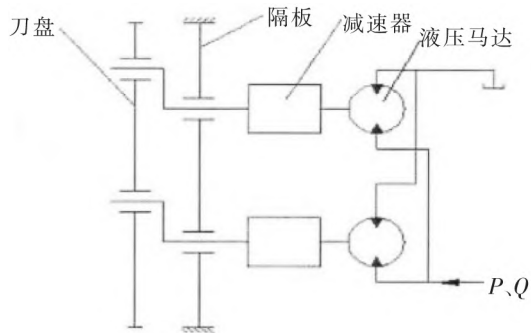


图5 刀盘传动原理图

优点:

(1) 因为切削刀盘的旋转半径小,且每把切削刀半径均相同,故刀具的磨损相同,且磨损较少,延长了刀具的使用寿命,使盾构机可以长距离掘进^[9];

(2) 用多轴承代替单个轴承,可以减少轴承的受力与尺寸,并方便选择与布置;

(3) 驱动结构输出流量稳定,偏心轴转速稳定,布置容易,平面结构尺寸较小。

1.4 偏心距的计算

刀盘的偏心距 r 是偏心盾构的一个重要参数,由土质、切削能力、刀头的配置,刀盘尺寸及盾构外径综合确定。

$$W = W_0 + 2r, L = L_0 + 2r \quad (1)$$

式中, W, L 为矩形盾构盾壳的长度、宽度; W_0, L_0 为矩形刀盘长度、宽度。

当切削断面为矩形时,根据经验公式

$$0.15D + 0.35 = 3.5r \quad (2)$$

经变换为

$$r = \frac{0.35}{3.5} + \frac{0.15}{3.5}D \quad (3)$$

式中, D 为当量直径, $D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$, A 为开挖截面面积。

2 刀盘切削阻力矩

对于矩形盾构,阻力矩与偏心半径有一定关系,采用综合分析法计算刀盘总扭矩。计算公式如下

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \quad (4)$$

式中, T 为刀盘切削总扭矩; T_1 为刀盘正面与土体的摩擦力矩; T_2 为刀盘侧面与土体的摩擦阻力矩; T_3 为刀盘切削土体时产生的抗剪力矩; T_4 为刀盘搅拌棒搅拌土体时产生的扭矩; T_5 为土仓内土体与刀盘的摩擦阻力矩。

2.1 刀盘正面与土体的摩擦力矩

T_1 是刀盘旋转过程中,刀盘正面与土体摩擦产生的阻力矩,单一地质条件下

$$T_1 = \int_0^L \mu K \gamma (H + L - y) e W dy = \mu K \gamma e W (HL + \frac{1}{2}L^2) \quad (5)$$

式中, μ 为摩擦系数; γ 为土体容重; e 为刀盘偏心距; H 为地层表面到刀盘上表面间土层厚度。

2.2 刀盘侧面与土体的摩擦阻力矩

不考虑刀盘自重情况下,刀盘上下表面摩擦力矩 T_2 与所处位置土压力相关,侧向土压力相互对称,摩擦力矩随深度增加而增加。

$$T_2 = \mu K \gamma \delta e (2HW + WL + 2HL + L^2) \quad (6)$$

式中, δ 为刀盘厚度。

2.3 刀盘切削土体时产生的抗剪力矩

T_3 为刀盘刀具切入地层旋转时要克服土体的剪切力而产生的扭矩。与刀盘上刀具安装数量,贯入土体深度有关^[10]。

第 i 把刀具切削土体抗剪强度为

$$\tau_i = c + \sigma_i \tan \varphi \quad (7)$$

σ_i 为刀具切削土体正压力

$$\sigma_i = K \gamma (H + L - L_i) \quad (8)$$

在第 i 把刀具处土体受剪面积

$$A_i = w_i \frac{1}{2n} \frac{v}{\omega} \tan \alpha_i \quad (9)$$

第 i 把刀具切削土体时的地层抗力为

$$F_i = \tau_i A_i \quad (10)$$

综上,刀盘切削土体时的地层抗力扭矩

$$T_3 = \sum_{i=1}^n F_i e = e \cdot \sum_{i=1}^n [c + K\gamma(H + L - L_i) \tan \varphi] w_i \frac{1}{2n} \frac{v}{\omega} \tan \alpha_i \quad (11)$$

式中, c 为土体内聚力; φ 为土体内摩擦角; σ_i 为刀具切削土体正压力; A_i 为第 i 把刀具的剪切面积; L_i 为第 i 把刀具距刀盘底部高度; w_i 为第 i 把刀具的刀刃宽度; α_i 为第 i 把刀具的前角; n 为相同轨迹上的布刀数量; v 为掘进速度; ω 为刀盘转速。

2.4 刀盘搅拌棒搅拌土体时产生的扭矩

T_4 是刀盘在旋转过程中,安装在刀盘面板后面的搅拌棒对土仓内土体搅拌过程中产生的扭矩。

$$T_4 = n\gamma H_b D_b L_b e \quad (12)$$

式中, n 为搅拌棒数量; γ 为土体的容重; H_b 为搅拌叶片覆土深度; D_b 为搅拌叶片的直径; L_b 为搅拌叶片的长度。

2.5 土仓内土体与刀盘的摩擦阻力矩

刀盘正面的摩擦阻力矩 T_5 与刀盘背面的摩擦阻力矩的计算方式雷同。一般认为在盾构正常掘进时,土仓压力是刀盘前端压力的 80%。

$$T_5 = 0.8T_1 = 0.8\mu K\gamma eHWL \quad (13)$$

通过式(4)计算扭矩 $T=153 \text{ kN} \cdot \text{m}$,参考草牟田水道改良工程,其使用矩形盾构 $2.95 \text{ m} \times 2.35 \text{ m}$,平均扭矩 $123 \text{ kN} \cdot \text{m}$,最大扭矩 $183 \text{ kN} \cdot \text{m}$,计算值与实际使用相似尺寸扭矩参数相近。

3 关键部件有限元分析

盾构采用四点支承四轴驱动方式,各支承轴安装在盾构的隔板上,支承轴的前端通过轴承直接与刀盘相连接。刀盘上安装有正面切削刀和周边保径刀,刀具采用焊件方式焊件在刀座上,刀盘整体开口度 67.3%,总体设计如图 6 所示。

3.1 刀具寿命计算

偏心多轴式刀盘布置的刀具切削面随其运行轨迹而不断发生改变,偏心盾构刀盘上的刀头在切削时能够上下、左右进行移动,因此选择的主刀具采用特殊的十字型刀具(如图 7),这样的刀具可进行全方位任意方向切削,而且这种运行方式使得每把刀具的轨迹和速度是相同的,每把刀具具有基本相同的切削量和磨损量。

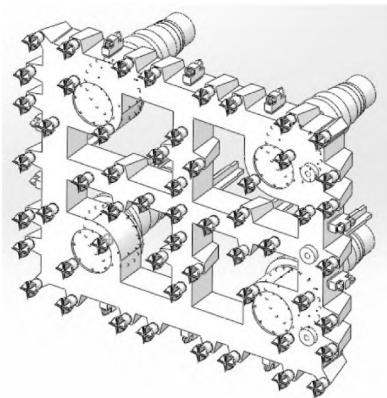


图6 矩形盾构刀盘及驱动装配体

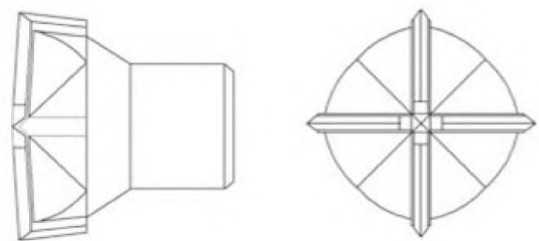


图7 十字型刀具

参考圆形盾构刀具磨损量^[4,11]

$$\delta = k\pi DNL/10V \quad (14)$$

式中, δ 为磨损量; k 为磨损系数,由实验测得; D 为刀盘当量外径; N 为刀盘的转动速度; L 为掘进距离; V

为掘进速度。

将公式变形得

$$L = \frac{10}{\pi D} \cdot \frac{\delta}{k} \cdot \frac{V}{N} \quad (15)$$

式中, L 为当刀具磨损到限定磨损量时, 盾构所能推进的距离, 即盾构刀具的切削距离寿命。刀具切入量 $P_e = \frac{V}{N}$ 为刀具每转的贯入土体深度; δ 为限定磨损量, 通常设计值为 10~20 mm。

通过计算 $L=8\,411\text{ m}$, 在此掘进距离内至少换刀一次, 以保证盾构的施工效率。

3.2 偏心主轴的有限元分析

主轴在动力传动中作为关键部件, 其强度直接影响盾构刀盘运行的稳定性。故通过对主轴受力分析, 施加相应的压力、剪切力和扭矩, 进行有限元分析, 校核其强度。主轴输入扭矩 155 kN·m, 各轴承环向支承力分别为 310 kN、480.5 kN, 轴承施加轴向力分别为 2 147.85 kN, -2 147.85 kN, 偏心轴推力 50 kN, 通过划分网格, 有限元分析, 结果如图 8 所示。

主轴受载后最大的应力为 184.79 MPa, 出现在与刀盘连接位置, 而轴的材料是 40Cr, 其屈服强度为 350 MPa, 故主轴安全可靠。

3.3 刀盘与土体流固耦合分析

分别创建刀盘与土体模型, 在它们之间通过流固耦合边界条件连接在一起。土体为高粘度流体, 土体与刀盘接触面无相对滑动。假设被切削下来的土体均匀流入土仓, 流入速度与盾构推进速度相同, 流出速度有螺旋输送机控制, 在数值模拟时, 设置出口压力边界条件控制土压平衡。设置土体密度 $\rho=1\,900\text{ kg/m}^3$, 动力粘度 $\mu=5\,000\text{ Pa/s}$, 流速 $v=80\text{ mm/min}$ 。对刀盘施加扭矩使其匀速转动, 刀盘转动角速度 $\omega=3.5\text{ r/min}$, 测得场流速呈周期性稳定变化时, 得到刀盘分析结果如图 9 所示。



图 8 主驱动轴应力分析图

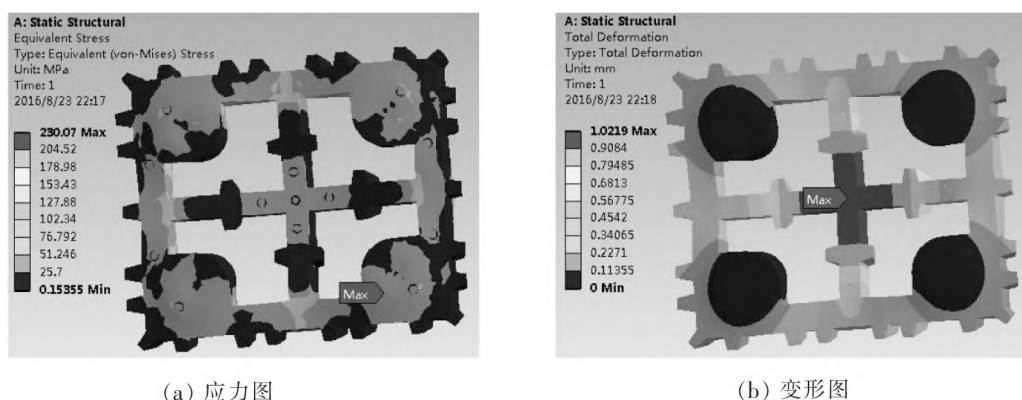


图 9 刀盘流固耦合分析图

刀盘切削土体时, 整体受力均匀, 刀盘与主轴连接处, 此处传递扭矩和推力, 出现应力集中, 最大值为 230 MPa, 刀盘材料为 Q345 钢, 屈服极限 345 MPa, 刀盘强度满足设计要求。由于土体土压与其动力粘度特性, 土体既流过刀盘中心的十字支承处, 又有部分随其旋转, 同时由于中心强度相对较低, 刀盘在此处变形最大, 数值为 1.02 mm, 刀盘刚度满足设计要求。通过刀盘的流固耦合分析, 模拟刀盘实体在地下掘进的过程, 其强度与刚度满足设计要求, 从而验证了此设计方案的可行性。

4 结论

(1)通过对比矩形盾构不同刀盘结构形式,提出采用矩形刀盘四周驱动形式。这种刀盘结构的旋转半径小,且每把刀切削半径均相同,刀具的磨损相同,延长了刀具的使用寿命。用多轴承代替中心大轴承,可以减少轴承的受力与缩小驱动尺。

(2)综合分析矩形盾构受力,提出矩形刀盘摩擦阻力矩计算方法,与尺寸相近矩形盾构对比,其结果相近且合理。

(3)分析刀具寿命 $L=8\,411\text{ m}$,校核主驱动轴强度,最大的应力为 184.79 MPa ,分析刀盘-土体的流固耦合,刀盘最大的应力为 230 MPa ,最大变形为 1.02 mm ,其结果均满足设计要求,验证了此设计方案是可行的,以期为矩形盾构刀盘设计提供参考。

参 考 文 献

- [1]川合一成,南敬. 矩形シールドの開発[J]. コマツテクニカルレポート, 2002, 47(3):46-54. (川合一成,南敬. 矩形盾构的开发[J]. 技术报告, 2002, 47(3):46-54.)
- [2]王小涛,贾连辉,贺开伟. 矩形顶管机刀盘的设计探讨[J]. 城市建设理论研究, 2013(3):183-185.
- [3]贾连辉. 超大断面矩形盾构顶管设计关键技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(11):1099-1100.
- [4]牛江川,陈琳,刘进志,等. 基于正交试验的盾构刀具磨损分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2015, 28(2):73-76, 81.
- [5]吕建中,石元奇,楼如岳. 大断面矩形隧道偏心多轴顶管机的设计和应用[J]. 上海建设科技, 2004(2):16-18.
- [6]褚健,沈惠平,邓嘉鸣,等. 矩形工作面盾构刀盘设计[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(2):160-161.
- [7]钱华. 双连杆偏心盾构刀盘系统总体参数优化研究[D]. 上海:同济大学, 2007.
- [8]吕强,傅德明,王鹤林. 偏心多轴异形断面隧道掘进机的研究与应用[J]. 机械施工, 2005(8):33-36.
- [9]宋杰,侯艳春. 矩形顶管法在城市轨道交通中的应用与设计方法[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 10(3):67-70.
- [10]宋云. 盾构机刀盘选型与设计理论研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- [11]管会生,高波. 盾构切削刀具寿命的计算[J]. 工程机械, 2006(01):25-28.

Design on Structure of Rectangular Shield Cutter-head System

Wang Xudong, Guo Jingbo

(Department of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In the construction of the underground pipe gallery, rectangular shield gradually draws attention for its advantage of high space utilization, shallow cover earth and low construction cost. On the basis of making contrasts between common rectangular shield cutter-head forms, rectangular cutter-head design scheme, eccentricity calculation method, and torque calculation method are proposed and rectangular shield cutter and cutter driving device are designed by application of the calculation parameters. The life of tools is analyzed, the fluid-solid structure interaction of cutter-head and the strength of main shaft is analyzed by finite element method to verify the feasibility of design scheme, which provides a reference for the development of the rectangular shield cutter-head.

Key words: rectangular shield; cutter-head; main drive system; fluid-solid structure interaction