

Simulation Analysis of Shield Machine Hob Based on Numerical Simulation

Xuefeng Zhao¹, Yuanshuai Ma¹, Hui Cheng¹, Qilong He²

¹No. 4 Branch Company of China Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd., Langfang Hebei

²Project Management Center of China Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd., Langfang Hebei

Email: 9613887@qq.com

Received: Dec. 21st, 2017; accepted: Mar. 27th, 2018; published: Jun. 15th, 2018

Abstract

In shield tunnel crossing engineering, shield machine tool was the key to ensure the normal control part of shield tunneling, the understanding of the design theory of cutting pan and cutting tools of the shield machine, improving the adaptation to the different geological conditions, which were the problems needed to be solved urgently. In Jinling Petrochemical Material Engineering of Nanjing river crossing shield project, the highest pressure was up to 6.5 bar, the high pressure was rarely seen domestically, and the silty sand and moderately weathered gravel formations were mainly crossed in the tunneling, in which tool wearing was easily induced. According to the previous tool wear data and finite element numerical modeling analysis, a new idea of tool configuration is put forward, and the self-optimization design and adaptive modification of shield machine cutting tools are carried out and applied to engineering practice. Good results are obtained and the tunnel construction tasks are successfully completed.

Keywords

Shield Machine, Hobbing Cutter, Numerical Simulation, Optimized Configuration

基于数值模拟的盾构机滚刀仿真分析研究

赵雪峰¹, 马元帅¹, 程 慧¹, 何奇隆²

¹中国石油管道局工程有限公司第四分公司, 河北 廊坊

²中国石油管道局工程有限公司项目管理中心, 河北 廊坊

作者简介: 赵雪峰(1982-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事盾构施工技术工作。

Email: 9613887@qq.com

收稿日期: 2017年12月21日; 录用日期: 2018年3月27日; 发布日期: 2018年6月15日

摘 要

在盾构法隧道穿越工程中, 盾构机刀具是保证盾构正常掘进的关键性控制部位, 掌握盾构机刀盘、刀具设计理论, 针对不同地质条件进行适应性改造, 是亟待研究和解决的问题。金陵石化物料穿江工程南京盾构工程, 最高水压达6.5 bar, 水压之高国内罕见, 隧道穿越地层主要为粉细砂层和中风化砂砾岩, 极易造成刀具磨损。根据以往的刀具磨损数据和有限元数值建模分析, 提出刀具配置的新思路, 对盾构机刀具进行自主优化设计及适应性改造, 并应用到工程实际, 取得了良好的效果, 顺利完成了隧道施工任务。

关键词

盾构机, 滚刀, 数值模拟, 优化配置

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 工程概况

中国石油管道局工程有限公司(以下简称“管道局”)EPC (engineering, procurement, construction)总承包的金陵石化物料穿江工程南京盾构隧道工程位于江苏省南京市境内, 隶属于金陵石化物料管道穿江项目。隧道全长 2000 m, 内径 3.08 m, 隧道在南京市六合区玉带镇玉带村与栖霞区甘家巷金陵石化厂区内之间穿越长江。隧道穿越地层主要为粉细砂层和中风化砂砾岩, 其中在粉细砂层中最高水压达 6.5 bar (1 bar = 0.1 MPa), 水压之高国内罕见, 中风化砂砾岩岩石单轴抗压强度为 40~70 MPa, 围岩基本质量等级为 III 级。根据以往盾构施工掘进经验, 在中风化砂砾岩中极易造成刀具磨损, 尤其是与开挖掌子面直接接触的滚刀, 但在该水压条件下, 通过以往带压进仓更换刀具经验, 很难完成刀具更换, 即使能够通过采取相关措施完成刀具更换, 也需付出巨大的工期代价和经济代价。针对上述问题, 项目组成员联合高校, 进行刀具选配分析, 并期望通过试验得到理想的刀具选配方案, 但受限于盾构刀具模拟实际工况的费用巨大, 可操作性差, 后提出了根据以往的刀具磨损数据和有限元数值建模分析, 对盾构机 M971 刀具进行自主优化设计及适应性改造, 并应用到现场。

2. 研究方案

针对南京盾构隧道工程的地质及水文情况,分析各种刀具磨损的原因,重点分析高水压下砂层、中风化砂砾岩等多重复杂地质条件对滚刀耐磨性的影响,根据海瑞克 AVND3080AH 泥水平衡式盾构机对滚刀建模,根据地层参数进行刀盘、刀具工况数值模拟,优化各部分结构参数,摸索地层与刀具的本质关系,达到与实际工程所需设备各项数据指标基本一致的目的,保证数值模拟的盾构各结构参数合理准确;同时进行数值模拟分析刀具的受力性能,利用有限元软件模拟各类型刀具在刀盘中的组合方式,优化刀具配备种类及组成形式,基于计算机仿真技术进行刀盘适应性改造,结合具体工况对刀盘、刀具进行数值模拟,在保证预期工作周期(寿命)的前提下,给出刀盘配制刀具方案。

3. 滚刀结构分析和工作行为分析

3.1. 滚刀工作原理

滚刀主要是通过挤压地层来进行破碎[1]。刀盘旋转并压入地层的同时,滚刀旋转滚切地层,首先使地层产生弹塑性变形,在滚刀的继续作用下,与滚刀接触部分的地层被挤压成碎块,然后碎块被压紧,成为传力介质,向周边地层传递压力使周围土体形成裂纹,裂纹向两侧延伸,与相邻裂纹相交或者延伸至自由面,从而形成碎片,完成地层破碎(图 1)。

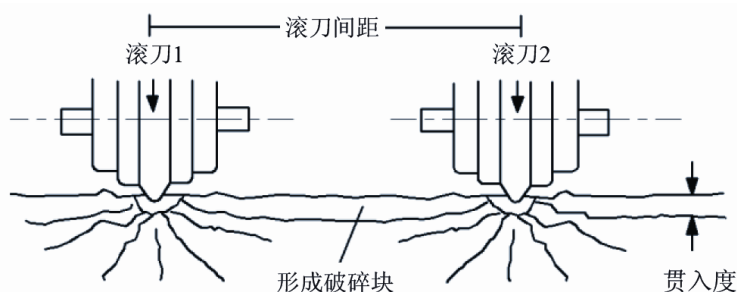


Figure 1. The working principle of hob
图 1. 滚刀工作原理

在松散地层掘进时,采用滚刀布置,主要利用滚刀在地层中贯入度大、有层次切削的特点。在硬岩掘进时,采用滚刀破岩,滚刀破岩的特点是依靠刀具滚动产生冲击压碎和剪切碾碎的作用以达到岩石破碎的目的。滚刀的类型、数量、布置方式、位置、超前量根据岩石的强度和整体性、掘进距离、含沙量等性质确定。滚刀通常分为 2 种形式:单刃滚刀和双刃滚刀。单刃滚刀破岩能力较强,主要用于硬岩掘进,可用于岩石地层或软硬不均地层的岩石破碎,如砾岩、大理石、砂岩、灰岩、花岗岩、玄武岩等地层;双刃滚刀软硬岩掘进均可,但其破岩能力不如单刃滚刀,多用于较软岩层,如断裂砾岩、砂岩、凝灰岩等地层。针对南京盾构隧道工程粉细砂层水压大、中风化砂砾岩强度高、交界地层软硬不均等特点,主要选用双刃滚刀放置在刀盘正刀区。

3.2. 滚刀的寿命计算

滚刀直接作用到地层上,其寿命与磨损量成反比。刀具的磨损量受诸多因素影响,如施工工法、地层类型、掘进长度、刀具形状、刀具材质、推进速度、刀盘转速等[2][3][4][5][6]。结合以往施工经验,通常盾构机刀盘外圈刀具磨损量的计算公式为:

$$\delta = 0.1\pi K \times D \times N \times (L/v) \quad (1)$$

式中： δ 为磨损量，mm； K 为磨损系数，mm/km； D 为盾构机的刀盘外径，m； N 为刀盘的转动速度，r/min； L 为盾构掘进距离，m； v 为盾构掘进速度，cm/min。

当滚刀磨损达到了限定的磨损量时，即可得到滚刀的寿命。南京盾构隧道工程中，地层为粉细砂层和中风化砂砾岩，滚刀磨损量限定为 10 mm，掘进速度设定为 $v = 5.0$ cm/min，刀盘的转动速度 $N = 2.1$ r/min，滚刀的切入深度(即滚刀每转的切入深度) $P_c = 2.3$ cm/r。将滚刀的磨损量计算公式经过变形后可得到滚刀的掘进距离计算公式：

$$L = 10 / (2\pi R) \times \lambda \times P_c = (5\lambda \times P_c) / (\pi R) \quad (2)$$

式中： R 为滚刀中容易磨损的最外周滚道的安装半径，m； λ 为滚刀的转动距离寿命(即滚刀达到规定的磨损量时，掘进开挖面同时转动情况下的可能距离)，km。

将滚刀的工况数据代入公式(2)中，求得正滚刀和边滚刀的掘进距离分别为 3293 m 和 2025 m。通过分析正滚刀和边滚刀的掘进距离大小，认为上述 2 种滚刀的掘进距离寿命在合理的范围之类，满足掘进距离的要求。

滚刀的实际磨耗系数为：

$$K_n = K / n^{0.333} \quad (3)$$

式中： K_n 为滚刀的实际磨耗系数， 10^{-3} mm/km； n 为每圆周上滚刀的数量，个； K 为磨损系数(其值根据表 1 进行选择)， 10^{-3} mm/km。

Table 1. The cutter wear coefficient

表 1. 磨损系数

岩石类型	不同刀头材料(硬质合金)下的磨损系数/(10^{-3} mm·km $^{-1}$)		
	E-5	E-3	E-2
黏土层	4~15	2~2.75	1.37~5.17
砂层	15~25	7.5~12.5	5.17~8.6
砂砾层	25~45	12.5~22.5	8.6~15.5

滚刀寿命计算结果如表 2 所示。

Table 2. The hob life calculation data

表 2. 滚刀寿命计算数据

岩石类型	限定磨损量/mm	磨耗系数/(mm·km $^{-1}$)	安装半径/m	转动距离寿命/km	掘进距离寿命/m
黏土层	10	5.15×10^{-3}	1.54	2805	5798
砂层	10	8.6×10^{-3}	1.54	1686	3485
砂砾层	10	15.5×10^{-3}	1.54	935	1933

3.3. 滚刀的受力分析与建模

根据刀具数据创建的滚刀实体模型主要有正面双刃滚刀和边滚刀。对于正滚刀和边滚刀，主要通过有限元分析软件 ABAQUS 来进行刀圈在破岩过程中的受力及破坏情况模拟和分析。将滚刀输入相关参数进行建模，通过受力分析可以得到滚刀受力区的应力云图，可以清楚地看到刀圈的受力区中每个地方的应力状况。

3.3.1. 正面滚刀受力分析与建模

图 2 为正面滚刀刀圈受力区应力云图，可以清楚地看到刀圈的受力区应力最大的地方出现在受力区沿应力方向的最末端处，此处的应力大概为 180 MPa。由于刀圈的材料为硬质合金，抗压强度为 1450 MPa，能够承受该种情况下的岩石作用力，即该种情况下正面滚刀刀圈的强度满足要求。

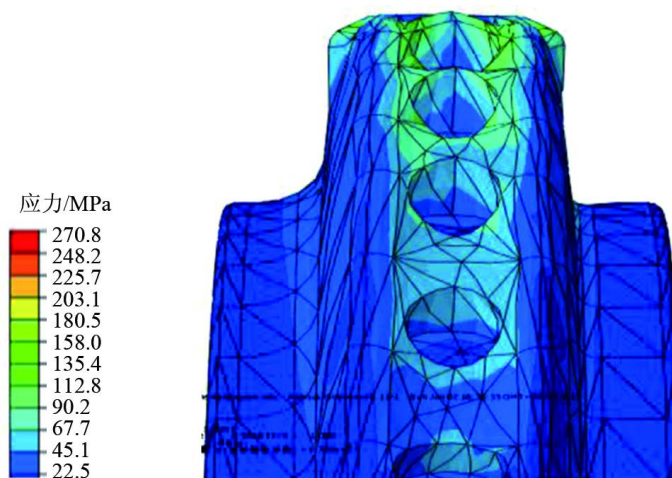


Figure 2. The stress cloud diagram of the force area of the hob ring
图 2. 正面滚刀刀圈受力区应力云图

3.3.2. 边滚刀受力分析与建模

边滚刀的有限元分析属于弹性力学范畴内，即刀圈与岩石的作用为弹性力学。通过刀圈变形前、后建模分析，可知刀圈在径向力和切向力(摩擦力)的双重作用下，在所取的受力体的地方，刀圈半径变小了，同时刀圈实体还有向切向力方向移动的迹象。

从边滚刀刀圈受力区应力云图(图 3)可以直观地分析出刀圈的应力状况，最大的应力在 490~550 MPa 之间。由此，根据刀圈的受力情况，选择抗拉压强度均很大的硬质合金 YG6 作为刀圈的材料，它的最大抗压强度为 1450 MPa，抗弯强度为 2300 MPa，完全可以满足边滚刀刀圈材料的强度要求。

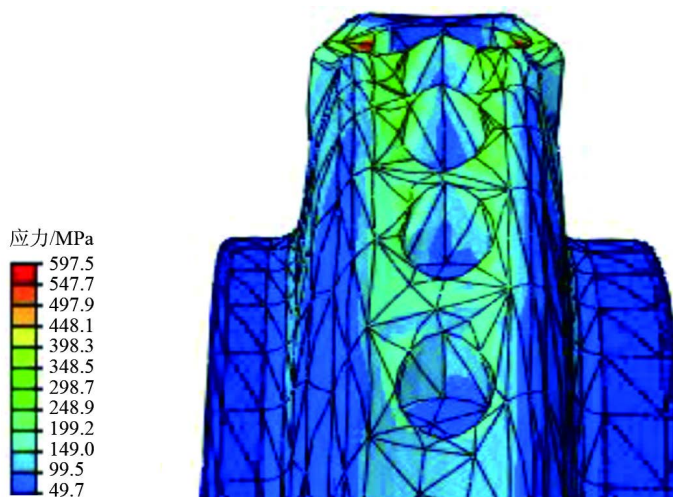


Figure 3. The stress cloud diagram of the force area of the side hob ring
图 3. 边滚刀刀圈受力区应力云图

3.4. 滚刀破岩仿真

由于刀具的切削过程是一个动态过程,所以切削仿真的分析类型选为 *Dynmic/Explicit*,在保证收敛的情况下尽量减少分析步的时间长度,以提高分析速度[7]。滚刀的整个仿真过程包括3部分:①分析滚刀在推力的作用下刀尖侵入地层当中;②分析刀圈绕着自身的中心轴自转做纯滚动向前滚压地层;③刀圈绕着刀盘做公转运动刮切土体。对于整个仿真过程将其设置为一个分析步,分析的总时长为0.08 s。

切削过程中滚刀对地层土体的切削力,在仿真中主要表现为滚刀在切削方向上受到的地层对它的反作用力。影响切削力的主要因素包括地层的特性(主要是地层的抗拉压作用力和摩擦角)、滚刀的切入深度、刀刃角的大小和滚刀刀圈的宽度等等。在地层和滚刀自身条件都确定的情况下,滚刀的切削力很大程度上受切削深度的影响。土体的切削过程分为3个阶段:①切削刃接触地层,并压进,产生局部压碎,形成小的切削,地层土体强度与切削刃的力平衡时,进尺瞬间停止,弹性能储存在刀刃中,负荷骤增;②当达到某一水平时又进尺,一部分储存的弹性能消耗于局部压碎,之后,负荷迅速增加但无进尺,土体被切削崩碎,储存能用于传播裂纹,该阶段主要表现在稳定切削过程中;③当切削刃与地层脱离接触时,切削力迅速下降。滚刀按照上述阶段周而复始地进行切削掘进工作。

4. 结语

刀具是盾构设备的开挖部件,在不同岩土体条件下,盾构刀具也有所不同。复合式盾构机刀具配置及布局规律的研究涉及到刀具类型选择、刀具数量的确定、刀具的整体布局规律等内容。不同类型的刀具适用于不同的地质要求,在软硬岩地层混合的地质中经常采用不同刀具的组合配置。在南京盾构隧道工程中,通过对刀盘运动行为进行分析,利用计算机仿真技术,通过有限元软件对刀盘、刀具的各项特性进行科学的计算及分析,使刀盘、刀具更具有针对性及适用性,开创了长距离不换刀一次性穿越长江的先例,降低了施工成本,保证了施工进度,为后续工程提供了很好的借鉴经验,并为刀盘、刀具的适应性改造提出了很好的研究方向。

参考文献

- [1] 宋克志,潘爱国. 盾构切削刀具的工作原理分析[J]. 建筑机械, 2007(3): 74-76.
- [2] 竺维彬,王晖,鞠世健. 复合地层中盾构滚刀磨损原因分析及对策[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(4): 72-76.
- [3] 刘晓毅. 复合地层中盾构机滚刀磨损原因分析及改进[J]. 隧道建设, 2006, 26(s2): 77-80.
- [4] 李笑,苏小江. 盾构滚刀磨损的多元非线性回归预测[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2009, 28(2): 281-283.
- [5] 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.
- [6] 管会生,高波. 盾构切削刀具寿命的计算[J]. 工程机械, 2006, 37(1): 25-28.
- [7] 滕韬. 盾构刀盘回转驱动液压系统建模与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2010.

[编辑] 龚丹

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2471-7185，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org