

文章编号:1671-6833(2009)03-0070-05

## 某型土压平衡盾构刀盘有限元分析

夏毅敏<sup>1,2</sup>,周喜温<sup>2</sup>,刘玉江<sup>3</sup>,吴 遁<sup>3</sup>

(1.中南大学 材料科学与工程学院,湖南 长沙 410083; 2.中南大学 现代复杂装备设计与极端制造重点实验室,湖南 长沙 410083; 3. 中铁十四局集团有限公司隧道分公司,山东 济南 250002)

**摘 要:** 根据某土压平衡盾构刀盘结构特点,在 Solidworks 中建立其三维实体模型,并应用 ANSYS 软件建立了刀盘相应的有限元计算模型,对刀盘在正常工况和脱困工况下的受力特性进行分析,得到了刀盘在各工况下的应力应变分布规律。分析结果表明,危险截面位于 180°~210°辅梁与辅条间,在牛腿与法兰盘、辅梁连接处也有较大应力,最大应力为 204 MPa,最大变形为 1.568 mm,研究结果为刀盘的结构设计和工程施工维护提供了基础数据。

**关键词:** 盾构;刀盘;有限元分析;结构分析

**中图分类号:** TP 391.9;U 455.44

**文献标识码:** A

### 0 引言

盾构刀盘是盾构掘进的主要部件,它在施工中主要用来破碎剥离岩土和支护界面。盾构刀盘在掘进过程中会遇到各种不同的地层,从淤泥、软土、黏土、软岩到风化层硬岩,不同地质物理参数变化很大,工作条件极其恶劣,刀盘承受的随机突变载荷高达数十倍甚至上百倍,这些都对盾构刀盘的结构提出了严格要求。盾构刀盘合理的结构不仅是保证盾构高效率掘进的关键,同时也是提高刀盘寿命、节约刀具使用费用的重要因素。盾构刀盘的结构设计已成为盾构的关键技术之一,对盾构的地质适应性施工有着重要的意义<sup>[1-3]</sup>。

### 1 盾构刀盘有限元计算模型的建立

#### 1.1 刀盘结构分析

该盾构刀盘由 6 根辐条和 6 块面板组成,6 根辐条互成 60°分布,辐条间采用辅梁连接,辅梁同时起到连接面板的作用,辐条两边装有刮刀,辐条上可安装齿刀或者盘形滚刀,以满足不同地层的需要,刀盘整体开口率为 28%,中心有较大的开口率,可有效地避免“泥饼”的产生。该刀盘具体技术参数为:刀盘切削直径为 6 280 mm,刀盘厚度为 450 mm,刀盘的整体高度为 1 415 mm。

#### 1.2 刀盘有限元模型的建立

按照盾构刀盘的实际尺寸,采用国际标准单位制,在 Solidworks 中建立盾构刀盘的三维模型,然后导入 ANSYS 中建立其物理模型。为了避免只求效率而使分析精度降低或者只求精度而不顾计算效率的情况出现,同时为了避免在转化过程中由于模型细节太多造成模型转换失败,对建立的刀盘三维模型进行适当简化,如:删除了刀盘中对有限元分析影响不大的几何特征(圆角、倒角);简化了所有滚刀、刮刀的具体形状和安装方式等。这样做不仅降低了有限元模型划分网格的难度和复杂程度,而且加快了分析的速度,既兼顾了求解的效率,同时也保证了有限元分析的计算精度<sup>[4-5]</sup>。图 1、图 2 分别为刀盘的三维模型和有限元模型。



图 1 刀盘的三维模型

Fig.1 Three-dimensional  
Model of cutter head

收稿日期:2009-01-10;修订日期:2009-04-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划,2007CB714002),中南大学博士后基金项目(743410151)

作者简介:夏毅敏(1967-),男,江西永新人,中南大学教授,主要从事液压传动与控制,机械设计理论和方法。



图2 刀盘有限元模型

Fig. 2 Finite element model  
of cutter - head

### 1.3 有限元网格的划分

所分析的盾构刀盘材料为45Mn钢,密度为7 800 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为209 GPa,泊松比为0.3.根据盾构刀盘的特点,确定采用三维实体网格,选用ANSYS提供的SOLID92单元对实体进行自由网格划分,图3为盾构刀盘的有限元网格模型,该有限元模型共有248 769个单元,432 467个节点.



图3 刀盘有限元网格模型

Fig. 3 Finite element model of cutter head

## 2 盾构刀盘的结构应力分析

### 2.1 有限元应力计算理论<sup>[6-7]</sup>

有限单元法的思想是假想把连续体分割成数目有限的小块体积,彼此间只在数目有限的指定点处相互连结,组成一个集合体代替原来的连续体;又在结点上引进等效力代替实际作用于单元的外力.其次对于每个单元根据分块近似的思想,选择一个简单的函数来近似地表示其位移分量的分布规律,并按照弹塑性理论的变分原理建立单元节点力和位移之间的关系.最后,把所有单元的这种特性关系集合起来,就得到一组以结点位移为未知量的代数方程组,从而可以解出物体上有限个离散结点的位移分量.分析流程如图4所示.

盾构刀盘采用SOLID92四面体单元,也就是说盾构刀盘是由一系列不相互重叠的四面体组成的,取其中任意一个来做分析,四面体单元如图5所示.

设单元结点编号为*i, j, m, p*,每个结点的位移具有3个分量*u, v, w*,则整个单元的节点位移用列阵表示为

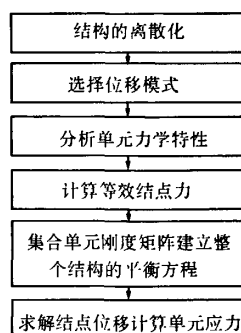


图4 有限元分析流程图

Fig. 4 Flowchart of finite element analysis

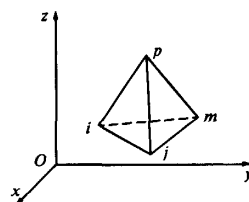


图5 典型四面体单元

Fig. 5 Typical tetrahedral element

$$\{\delta\}^e = \begin{Bmatrix} u_i & u_j & u_m & u_p \\ v_i & v_j & v_m & v_p \\ w_i & w_j & w_m & w_p \end{Bmatrix} \quad (1)$$

假设单元足够小,单元内各节点位移可以近似地表示如下:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \quad (2)$$

$$v = \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 z \quad (3)$$

$$w = \alpha_9 + \alpha_{10} x + \alpha_{11} y + \alpha_{12} z \quad (4)$$

假设其结点坐标分别为(*x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>*)、(*x<sub>j</sub>, y<sub>j</sub>, z<sub>j</sub>*)、(*x<sub>m</sub>, y<sub>m</sub>, z<sub>m</sub>*)、(*x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>*),得出各结点在*x*方向的位移是:

$$\begin{cases} u_i = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i + \alpha_4 z_i \\ u_j = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j + \alpha_4 z_j \\ u_m = \alpha_1 + \alpha_2 x_m + \alpha_3 y_m + \alpha_4 z_m \\ u_p = \alpha_1 + \alpha_2 x_p + \alpha_3 y_p + \alpha_4 z_p \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{从而解得: } u = N_i u_i + N_j u_j + N_m u_m + N_p u_p \quad (6)$$

$$\text{其中: } \begin{cases} N_i = (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) / 6 \\ N_j = -(a_j + b_j x + c_j y + d_j z) / 6V \\ N_m = (a_m + b_m x + c_m y + d_m z) / 6V \\ N_p = -(a_p + b_p x + c_p y + d_p z) / 6V \end{cases} \quad (7)$$

它们的系数是:

$$\mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_m & y_m & z_m \\ x_p & y_p & z_p \end{bmatrix}, \mathbf{b}_i = - \begin{bmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_m & z_m \\ 1 & y_p & z_p \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{c}_i = \begin{bmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_m & z_m \\ 1 & x_p & z_p \end{bmatrix}, \mathbf{d}_i = - \begin{bmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \\ 1 & x_p & y_p \end{bmatrix}$$

$$6\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_p & y_p & z_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

用同样的方法可得:

$$v = N_i v_i + N_j v_j + N_m v_m + N_p v_p \quad (10)$$

$$w = N_i w_i + N_j w_j + N_m w_m + N_p w_p \quad (11)$$

则单元内任一点的应变为:

$$\{\varepsilon\} = [\mathbf{B}] \{\delta\}^e = [\mathbf{B}_i \quad -\mathbf{B}_j \quad \mathbf{B}_m \quad -\mathbf{B}_p] \{\delta\}^e \quad (12)$$

$$\text{其中, } [\mathbf{B}_i] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & d_i \\ c_i & b_i & 0 \\ 0 & d_i & c_i \\ d_i & 0 & b_i \end{bmatrix} \quad (i, j, m, p) \quad (13)$$

则任一点的应力列阵为:

$$\{\sigma\} = [\mathbf{D}] \{\varepsilon\} = [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] \{\delta\}^e = [\mathbf{S}] \{\delta\}^e \\ = [\mathbf{S}_i \quad \mathbf{S}_j \quad \mathbf{S}_m \quad \mathbf{S}_p] \{\delta\}^e \quad (14)$$

其中:  $[\mathbf{S}_i] = [\mathbf{D}] [\mathbf{B}_i] =$

$$\frac{6A_3}{V} \begin{bmatrix} b_i & A_1 c_i & A_1 d_i \\ A_1 b_i & c_i & A_1 d_i \\ A_1 b_i & A_1 c_i & d_i \\ A_2 c_i & A_2 b_i & 0 \\ 0 & A_2 d_i & A_2 c_i \\ A_2 d_i & 0 & A_2 b_i \end{bmatrix} \quad (i, j, m, p) \quad (15)$$

$$\text{式中: } A_1 = \frac{\mu}{1-\mu}; A_2 = \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)};$$

$$A_3 = \frac{E(1-\mu)}{36(1+\mu)(1-2\mu)}$$

根据上述公式就可以从理论上求出以四面体为单元类型的盾构刀盘上的应力应变分布。

## 2.2 有限元分析边界条件的确定

按照盾构刀盘的安装方式和运动要求,对其施加约束条件。刀盘在盾构掘进过程中主要是自身的回转运动和轴向的推进运动,由于转动速度和推进速度都比较慢,可以近似采用静态分析来对盾构刀盘进行应力分析。约束和载荷的施加方

式为在盾构刀盘的法兰盘底面施加全约束,在刀盘上施加推力和扭矩。

### 2.2.1 正常工况下的边界条件

某施工段地质条件分布情况从地表往下大致如图6所示,刀盘中心轴线位于20 m处。

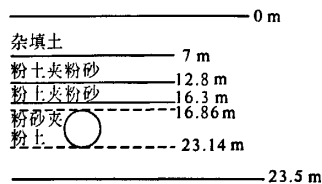


图6 某段地质状况图

Fig. 6 Geological condition in engineering

而该施工段地质最恶劣的某环内推力和扭矩测试数据如图7所示:

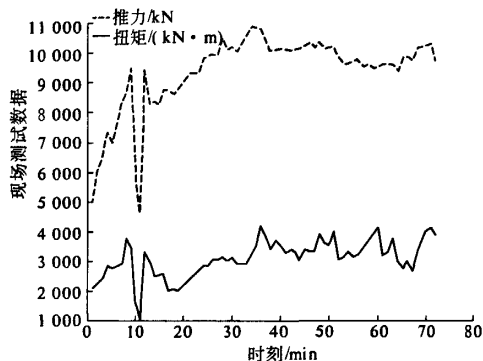


图7 某环内推力扭矩变化图

Fig. 7 Change plans of thrust and torque in a ring

由上图可以看出该环内最大推力为11 000 kN,此时对应的扭矩为4 300 kN·m。盾构机的推力主要由外壳与地层的摩擦阻力、推进时的正面阻力、变向阻力、后台车的牵引阻力组成,而对于刀盘来说,它所承受的阻力主要有刀盘所受的正面阻力和刀盘土仓平衡力之差、刀盘盘体本身与地层间的摩擦阻力,以及刀盘驱动旋转切削时刀具所受的前方土层的阻力。结合地层物理参数,按照传统的推力计算公式,可计算得到施加在刀盘上的推力为4 085.6 kN。盾构的扭矩主要取决于刀盘正面、侧面与土层的摩擦扭矩、刀盘切入地层的土层抗力扭矩以及刀盘和搅拌棒的搅拌扭矩,而密封产生的阻力扭矩、轴承摩擦阻力扭矩、减速装置摩擦损耗扭矩只占很小一部分,因此把全部扭矩都加到刀盘上去,扭矩为4 300 kN·m。

### 2.2.2 脱困状况

当由于某种原因导致盾构机无法前进时,或者推力大大增加,而盾构机只以很小的推进速度

前进时,这时盾构机被困,刀盘被卡住.这时候一般采用的脱困方法是,将刀盘又退回一定的距离,以很低的转速驱动刀盘正反转,此时刀盘上施加的有效扭矩高达  $6\,305\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,而推力可以忽略不计.

### 3 分析结果与处理

#### 3.1 正常工作状况

该工况下刀盘最大等效应力为  $204\text{ MPa}$ ,出现在  $180^\circ\sim 210^\circ$  辅梁与主辐条的交界处,同时牛腿与法兰盘以及辅梁的连接处有较大的应力.正常工作状况应力云图如图8所示.

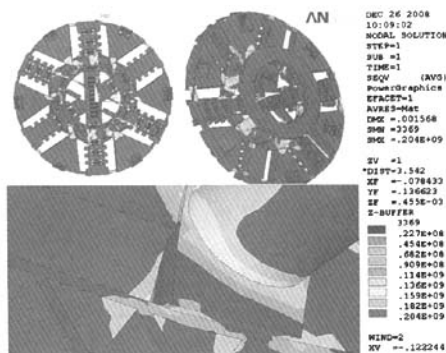


图8 盾构刀盘应力云图1

Fig.8 Stress distribution of cutter - head

#### 3.2 脱困状况

脱困状况的应力云图如图9所示.

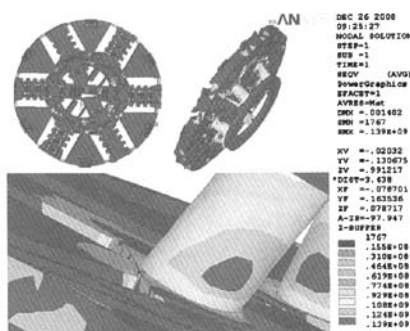


图9 盾构刀盘应力分布图2

Fig.9 Stress distribution of cutter - head

该工况下刀盘最大等效应力为  $139\text{ MPa}$ ,也出现在  $180^\circ\sim 210^\circ$  辅梁与幅板底部的交界处,同时牛腿与法兰盘以及与辅梁的连接处也有较大的应力.

综上所述,刀盘的材料为  $45\text{Mn}$ ,屈服极限为

$375\text{ MPa}$ ,最大应力远小于屈服极限,满足强度要求.刀盘在两种工况下的位移变形量分别为  $1.568\text{ mm}$ ,  $1.402\text{ mm}$ ,满足盾构刀盘的刚度要求.但是,为了有效地传递扭矩和推力,在提高刀盘的强度和刚度方面,适当地增加牛腿与法兰盘、辅梁以及辅梁与主辅条间的焊接强度,适当地增加刀盘边缘辐条和面板连接处的面板厚度,对刀盘本身都具有重要意义.

### 5 结论

采用 Solidworks 和 ANSYS,对刀盘在正常工作和脱困工况下的受力特性进行分析,得出了刀盘在两种工况下的应力应变分布规律:危险截面位于  $180^\circ\sim 210^\circ$  的辅梁与辅条间,在牛腿与法兰盘、辅梁连接处也有较大应力,最大应力为  $204\text{ MPa}$ ,最大变形为  $1.568\text{ mm}$ ,分析结果与工程测试结果基本相符.由于该刀盘采用较好的钢材,在实际掘进过程中具有较高的强度和刚度裕量,满足工程实际需要.研究结果可为同类刀盘的结构设计和工程施工维护提供基础数据.

### 参考文献:

- [1] MARTIN. Hard Rock TBMs technology [C]. Soft Ground and Hard Rock Mechanical Tunneling Technology Seminar, CSM campus, Colorado, USA, 2003.
- [2] ZHANG Z X, KOU S Q, LINDQVIST P A. Measurements of cutter forces and cutter temperature of boring machine in Äspö Hard Rock Laboratory [R]. Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2001.
- [3] 宋克志,李传明,袁大军,等.盾构隧道施工盘形滚刀推力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3875-3881.
- [4] 张洵安,王显彬.软岩隧道开挖与支护的三维有限元仿真分析[J].郑州大学学报:工学版, 2008, 29(2): 137-140, 144.
- [5] 丛明,房波,周亮亮.车-车拉数控机床托板有限元分析及优化设计[J].中国机械工程, 2008, 19(2): 208-213.
- [6] HOOMAN. A finite element approach to spur, straight-bevel and hypoid gear design [D]. University of Oslo, Oslo, Norway, 2005.
- [7] MAHENDRAN. Applications of finite element analysis in structural engineering [C]. Proceedings International Conference on Computer Aided Engineering, 38-46, Chennai, India.

## Finite Element Analysis of Earth – pressure Balance Shield Cutter – head

XIA Yi – min<sup>1,2</sup>, ZHOU Xi – wen<sup>2</sup>, LIU Yu – jiang<sup>3</sup>, WU Dun<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Complexity of Modern Equipment Design and Extreme Manufacture, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Branch of Tunnel of Chinas, Railway 14 Group Corporation, Jinan 250002, China)

**Abstract:** Based on the structural characteristics of some earth – pressure balance shield cutter – head, a 3D model was established in Solidworks. The finite element computation model was established with the software ANSYS, and also the structural stress analyses of cutter – head in normal and limit conditions were carried out. The stress and strain distributions of cutter – head in both conditions were obtained. The result of analysis indicated that the dangerous section appeared in the intersection of auxiliary beam and spoke strip between 180 to 210 degree as well as the joint between corbel and flange, with the maximum stress 204 Mpa and maximum deformation 1.568 mm. And also, it could provide basic data for structural design of cutter – head and maintenance of it in the project.

**Key words:** shield machine; cutter – head; finite element analysis; structure analysis

(上接第 67 页)

- 纵向磨削表面粗糙度的在线预测[J]. 中国机械工程, 2005, 16(3): 223 – 226.
- [3] 王 珉, 郭培琪, 张 磊. 人工神经网络技术在磨削加工中的应用[J]. 工具技术, 2004, (9): 60 – 63.
- [4] 徐秉铮, 张百灵, 韦 岗. 神经网络理论与应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1994. 12 – 16.
- [5] MASAHIKO A. Bounds on the number of hidden units

- in binary – valued three – layer neural networks[J]. Neural Networks, 1993: 6(2): 115 – 117.
- [6] 蔡光起, 巩亚东, 宋贵亮译. 磨削技术与理论[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002. 138 – 154.
- [7] 李伯民编. 现代磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 174 – 178.
- [8] 冯冬青, 张希平. 基于神经网络的自学习模糊控制[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2002, 24(4): 6 – 10.

## Surface Roughness Forecasting of Spiral Bevel Gear Based on Artificial Neural Network

GUO Ke – xi<sup>1</sup>, TAN Pei – lian<sup>1</sup>, TANG Jin – yuan<sup>2</sup>

(1. Auto and Mechanical Engineer College, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2. School of Mechanical & Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Because the value of Ra is affected by a lot of factors and some of them are undefined, the surface roughness forecasting of spiral bevel gears is a typical fuzzy, non – linear system. In this paper, based on the priority principle of BP artificial neural network, surface roughness forecasting is set up. This model BP can accurately describe the effect of wheel's feed velocity and deep tooth feed on surface roughness of spiral bevel gears. The experiment data proves that the model BP used in forecasting the surface roughness of spiral bevel gears can get a more precise result.

**Key words:** artificial neural network; model BP; spiral bevel gear; surface roughness