

文章编号:1005-0523(2020)02-0116-06

双支撑工作模式下 TBM 撑靴与围岩接触仿真

徐尤南,余昌鑫,陈洁,刘志强,万永晟

(华东交通大学机械与车辆工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:撑靴为 TBM 的前进及稳定性提供保障,与围岩的接触是否均匀直接影响工作的稳定性,针对撑靴与围岩接触会因为应力分布不均匀而导致支撑不稳或围岩坍塌等问题,以新型 TBM 的撑靴为研究对象,根据试验台的三维模型创建撑靴和其他机构之间的力传递特性,建立双支撑工作模式下撑靴与围岩的接触模型,采用有限元方法研究撑靴与围岩接触面应力、位移分布。结果表明:撑靴与围岩的综合应力分布较为均匀,在周向尺寸上分布在 $-18^{\circ}\sim 18^{\circ}$ 范围内,撑靴接触表面最大应力为 13.3 MPa,围岩接触表面最大应力为 4.03 MPa。撑靴接触表面综合位移中间小、两端大,而在围岩接触表面综合位移中间大,向四周位移逐渐减小。并且运用赫兹公式对有限元分析的结果进行验证,误差为 0.5 MPa,表明分析结果可靠,为提高整机稳定性提供了参考。

关键词:TBM;撑靴与围岩接触;仿真分析

中图分类号:TH114 **文献标志码:**A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.02.016

全断面岩石掘进机(tunnel boring machine, TBM)是集机械、液压、电气、激光技术于一体的大型高技术复杂隧道施工装备^[1]。TBM 在隧道掘进过程中具有自动化程度高、操作灵活以及能够调整掘进方向等优点,因而被广泛应用在城市隧道和铁路中,提高施工效率和安全指数^[2]。

TBM 实现连续掘进作业依靠支撑推进机构的协调性工作,在支撑推进机构中撑靴是重要的构件,在施工过程中,装备前进的动力、刀盘扭矩以及支撑 TBM 自身重力都是通过撑靴和围岩的接触进行传递^[3]。若撑靴结构设计不合理,使撑靴受力集中或位移过大,都有可能发生撑靴断裂、撑着面撑不住以及接地比压不均匀等现象,因此,课题组开发了一种新型混联式 TBM 试验台。

TBM 在掘进过程中有两种工作模式,一种是单一支撑工作模式,另外一种为双支撑工作模式^[4],以新型混联式 TBM 试验台的撑靴构件为研究对象,研究双支撑工作模式下撑靴与围岩接触面应力以及位移分布,得到撑靴和围岩的综合应力云图、综合位移云图以及综合位移分布图,总结接触面应力和位移变化的规律,为以后撑靴结构的优化以及提高应力分布均匀性提供参考。

1 撑靴与围岩仿真模型建立

1.1 TBM 试验台撑靴受力分析

针对 TBM 对复杂地质岩层适应性差等问题,课题组搭建了一种新型混联式 TBM 试验台,能够更好的适应在不同岩层的掘进任务。利用三维制图软件 Solidworks 对新型 TBM 试验台建模,主支撑机构为“Y”型支撑机构。试验台主要由刀盘、主推进器、辅推进器、主撑靴以及辅撑靴组成,其中主推进器和辅推进器均由

收稿日期:2019-07-24

基金项目:国家自然科学基金(51675180)

作者简介:徐尤南(1965—),男,教授,博士,研究方向为机械设计及理论。

6 个液压缸组成,通过液压缸产生的推力传递到刀盘上,就可以使刀盘向前掘进^[5]。单个主撑靴连接 2 个主推进缸,2 个辅推进缸以及 3 个支撑液压缸,单个辅撑靴连接 2 个推进缸以及 3 个支撑液压缸。试验台不仅能够满足工作过程中的支撑-推进-换步动作,还可以实验掘进过程中的全方位纠偏功能^[6]。

在双支撑稳固工作模式(前、后支撑-主推进工作模式)下撑靴与围岩接触的受力是比较复杂,主撑靴受到刀盘掘进的反作用力 F_{T01} , 辅推进液压缸同时也会给撑靴提供推进力以及支撑机构对撑靴的支撑力 F_{T21} , 其主撑靴受力如图 1 所示。在双支撑工作模式下,前、后支撑机构通过支撑液压缸使撑靴与围岩接触,在液压缸支撑力作用下将整机托起,使试验台固定在成型隧洞轴心位置,通过主推进器的 3 个液压缸共同作用使刀盘向前完成掘进作业,而辅推进机构同样会对主撑靴产生向前的推力。两主推进液压缸之间的角度为 2β , 两辅推进液压缸之间的角度为 2α , 在掘进过程中 2β 会逐渐变小^[7]。

1.2 仿真模型参数设置

Abaqus 可以对各种材料进行复杂的固体力学仿真分析、结构力学仿真分析、静力学仿真分析等,并且可以对非线性问题能够运用有限元方法进行求解^[8]。所以在工程上以及一些学术研究中 Abaqus 被广泛的使用。在使用 Abaqus 对撑靴与围岩接触问题进行仿真分析,根据实际情况需要对一些模块参数进行设置,然后按照模块进行分析。软件内部会自行对设置的参数进行调整,自行选择收敛准则保证运算的准确性^[9]。

首先需要使用 Solidworks 三维软件绘制已知参数的新型 TBM 撑靴以及围岩撑靴半径为 4 400 mm,围岩内半径与撑靴内半径一致外半径为 10 000 mm,将绘制好的撑靴以及围岩保存成 x_t,此模型即为仿真三维模型导入到 Abaqus 中进行装配。其次选择围岩的材料属性以及撑靴的材料属性,新型 TBM 属于硬岩掘进机,所以在掘进时主要针对比较硬的岩体,不同材料属性的围岩进行仿真会呈现出不同的接触应力以及接触位移,试验台的材料是采用硬质铝合金材料,所以进行撑靴与围岩材料属性的选择上按照硬质铝合金的技术参数进行设置,弹性模量 $E=71\ 000\ \text{MPa}$,泊松比 $\mu=0.3$ 。

撑靴与围岩的接触形式属于面接触,如图 2 所示,为了适应计算数据的分布特点,较好的反应数据变化的规律,撑靴与围岩的网格划分的疏密程度也不同,在与撑靴接触部分围岩的网格划分的密集些以保证分析结果的精确度。在对围岩进行网格划分时整个围岩为六面体网格,在对撑靴进行网格划分时撑靴接触的底面使用 6 面体网格划分以保证后续提取的数据精度高,因为四面体单元比三角形单元的精度高,故其余不规则部分使用四面体网格划分^[10]。围岩的 6 个面的边界条件设置为:沿掘直线掘进方向两端的围岩为完全固定 ($U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$),上下两面对称约束位移为 0,围岩背部面的为完全固定,围岩的内面为接触面不需要设置约束。主支撑液压缸的支撑载荷为 16 MPa,主推进和辅推进液压缸的载荷为 10 MPa。

围岩在掘进过程形成的空间在三维空间中属于圆柱体,为了方便于数据结果的提取,可以把直角坐标系转换成柱坐标系,因为在空间内任意一点都有 6 个应力分量,其中正应力有 3 个分量为 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$, 切应力也有 3 个分量为 $\sigma_{rz}, \sigma_{\theta z}, \sigma_{r\theta}$ 。

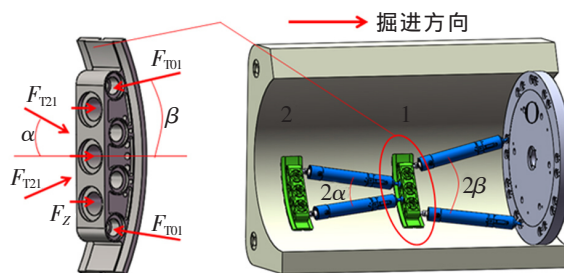


图 1 主撑靴受力示意图

Fig.1 Schematic diagram of the main support shoe

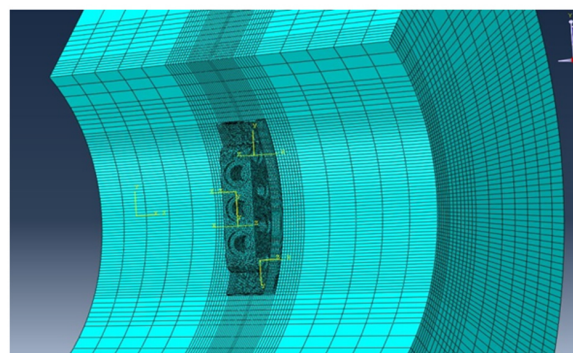


图 2 撑靴与围岩网格划分

Fig.2 Boots and surrounding rock meshing

σ_{yz} ,当直角坐标系转动时每个应力都会随着改变不利于提取以及计算^[11]。所以需要将直角坐标系中的6个应力进行变化转化成柱坐标,转换矩阵如下

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} \sigma_R & \sigma_{R\theta} & \sigma_{RZ} \\ \sigma_{\theta R} & \sigma_\theta & \sigma_{\theta Z} \\ \sigma_{ZR} & \sigma_{Z\theta} & \sigma_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

利用坐标转换矩阵 T 进行坐标转换,坐标 T 为

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

直角坐标与柱坐标系转换公式为

$$Q = T' \times P \times T \quad (3)$$

坐标系转换好后,将相应的撑靴以及围岩的节点、应力、位移等数据从 Abaqus 中提取出来存成文本格式导入到 Matlab 程序中进行分析处理,可以得到撑靴与围岩的相应应力图以及位移图作为后续对比分析做准备。

2 撑靴与围岩接触分析

2.1 撑靴接触表面分析

由图 3(a)综合应力云图可知,撑靴接触面在前、后双支撑 F_{T21} 与 F_{T01} 共同作用时,应力集中分布在3个支撑液压缸与撑靴接触面处,应力最大值为 13.3 MPa。撑靴接触面两端的应力较低,是因为支撑液压缸的载荷作用使撑靴受到的应力在中间集中分布。由图 3(b)综合应力分布图可知,撑靴接触面出现3个峰值,峰值均分布在掘进方向尺寸为 0° 的位置,以峰值为中心向四周综合应力呈现逐渐缩小趋势。由等势线图可知,综合应力分布在周向尺寸为 $-18^\circ \sim 18^\circ$ 之间,随着周向尺寸的增大,综合应力呈现先减小再增大最后减小的趋势。

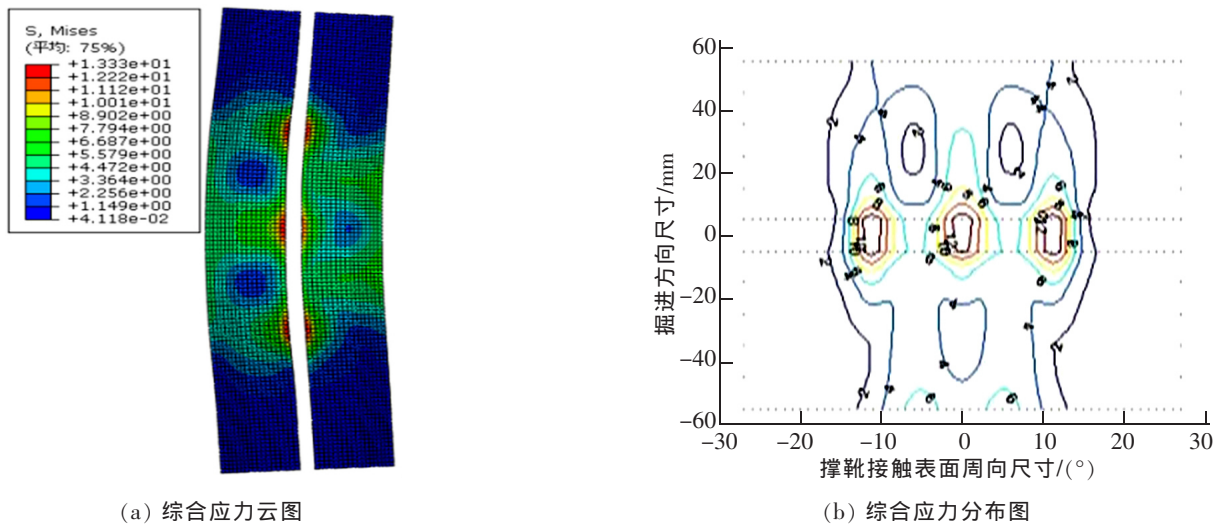


图3 撑靴接触面综合应力分布图

Fig.3 Overall stress distribution of the contact surface of the boot

撑靴接触面综合位移云图如图 4 所示,从周向尺寸来看,撑靴接触面中部位移较小、两端位移较大,最小位移为 0.001 66 mm,最大位移是 0.023 6 mm。这种现象是因为支撑液压缸的推力使撑靴紧贴围岩,不能产生位移,撑靴是弹性构件,应力集中分布在中部会使两端翘起从而产生位移。从掘进方向尺寸来看,主推进一侧位移比辅推进一侧的位移更大,这是因为主推进力 F_{121} 和辅推进力 F_{101} 共同作用所致。撑靴接触面上最小位移出现在撑靴周向尺寸中部位置,综合位移有向两端逐渐增大的趋势,在两端达到最大位移。

2.2 围岩接触表面分析

由图 5(a)围岩接触面综合应力云图可知,支撑液压缸和主推进液压缸以及辅推进液压缸的共同作用导致在撑靴与围岩接触部位出现 6 个应力集中峰值,围岩接触面综合应力最大值为 4.03 MPa。由图 5(b)综合应力分布图可知,围岩表面应力主要分布在周向尺寸 $-18^{\circ}\sim 18^{\circ}$ 区域范围内,6 个峰值出现在支撑液压缸对应围岩接触面处并以凹槽为界两侧对应分布。综合应力分布基本关于周向尺寸 0° 对称,随着周向尺寸增大,接触面应力均是先减小后增大最后减小分布。

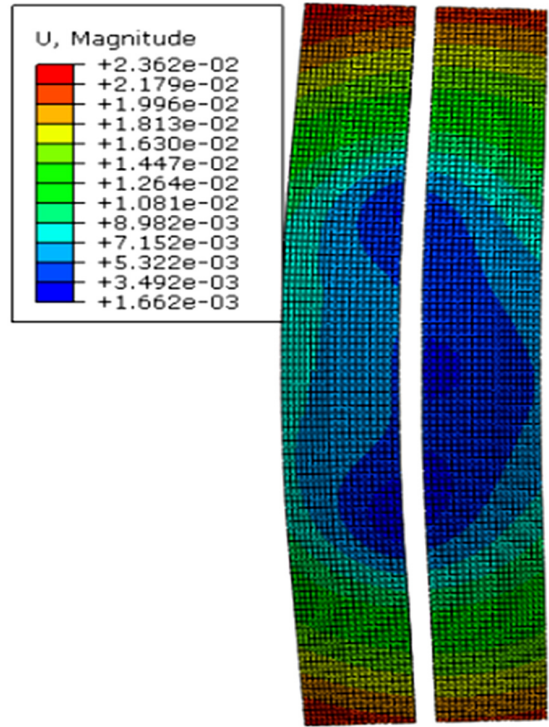
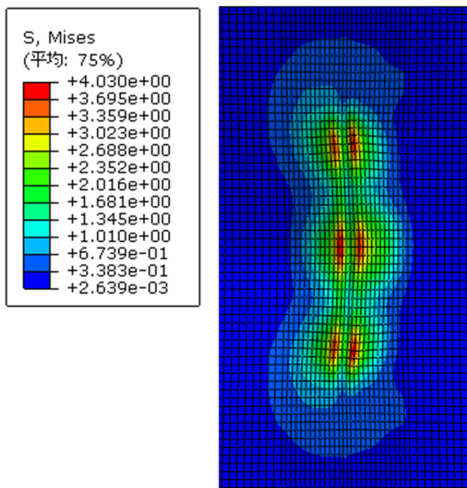
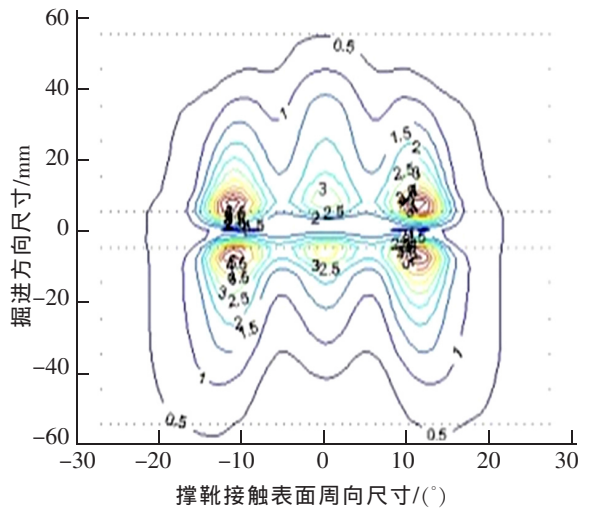


图 4 撑靴接触面综合位移云图
Fig.4 Comprehensive displacement cloud map of supporting shoe contact surface



(a) 综合应力云图



(b) 综合应力分布图

图 5 围岩接触面综合应力分布图

Fig.5 Comprehensive stress distribution diagram of the surrounding rock contact surface

如图6围岩接触面综合位移云图可知,围岩接触面出现了6个位移峰值,最大位移为0.0058 mm,围岩接触面综合位移以峰值为中心向四周呈扩散缩小分布。围岩接触面综合位移基本关于周向尺寸对称,随着周向尺寸的增大,围岩表面综合位移均是先减小再增大最后减小。

3 赫兹理论计算

撑靴与围岩的接触模型应力计算方法采用赫兹公式^[12]

$$\sigma_{Hmax} = \sqrt{\frac{F_n}{\pi b} \left[\frac{\frac{1}{R_1} \mp \frac{1}{R_2}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}} \right]} \quad (4)$$

式中: F_n 为液压缸对撑靴的压力; R_1, R_2 分别为撑靴与围岩的曲率半径; E_1, E_2 分别为撑靴和围岩的弹性模量; μ_1, μ_2 为撑靴与围岩的泊松比。

撑靴与围岩的接触是2个圆柱内接触,曲率半径 $\frac{1}{R_1} \mp \frac{1}{R_2}$ 取负号,由于撑靴受到2个液压缸的支撑力,所以 $F_n=3\ 136\text{ N}$,弹性模量、泊松比以及曲率半径在前文已经给出,代入(4)式得

$$\sigma_{Hmax} = \sqrt{\frac{3\ 136}{3.14 \times 26} \left[\frac{\frac{1}{4\ 400} - \frac{1}{10\ 400}}{\frac{1-0.3^2}{71\ 000} + \frac{1-0.3^2}{71\ 000}} \right]} = 13.8 \quad (5)$$

有限元计算结果为13.3 MPa,而赫兹公式计算的最大接触应力为13.8 MPa,理论计算比有限元分析结果大,误差为0.5 MPa,在材料的安全系数之内。表明在工程中采用有限元分析是可靠的,为新型TBM的稳定性工作提供一定的依据。

4 结论

本文通过对撑靴和围岩的仿真模型进行参数设置,选取一类围岩建立撑靴与围岩之间的仿真模型,运用Abaque对撑靴与围岩的接触进行了数值模拟分析,运用Matlab分析了接触表面综合应力、位移分布特性及变化规律,得出如下结论:

1) 撑靴与围岩接触表明综合应力在周向尺寸均分布在 $-18^\circ \sim 18^\circ$ 范围内,最大值均出现在TBM掘进方向尺寸 0° 附近,并且出现3个峰值。其中撑靴接触表面最大应力为13 MPa,围岩接触表面最大应力为4.03 MPa。

2) 撑靴接触表面在周向尺寸为 0° 位置综合位移较小,最小值为0.001 66 mm,随周向尺寸的增大,综合位移逐渐增大,最大值为0.023 6 mm。

3) 围岩接触表面在TBM掘进方向为 0° 左右出现综合位移最大,最大值为0.005 84 mm,综合位移随TBM掘进方向尺寸的增大而逐渐减小。

参考文献:

- [1] 龚秋明. 掘进机隧道掘进概论[M]. 北京:科学出版社,2014:56-60.
- [2] 霍军周,李广庆,吴瀚洋,等. TBM刀盘缩尺试验台设计及其静动态特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2016,37(5):713-717.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

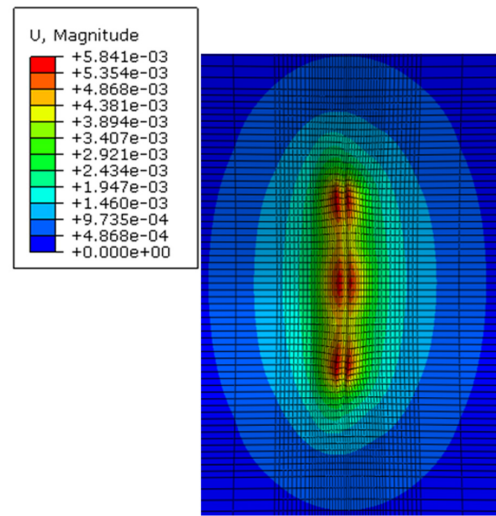


图6 围岩接触面综合位移云图
Fig.6 Distribution of integrated displacement of surrounding rock contact surface

- [3] AYDIN SHATERPOUR-MAMAGHANI, DENIZ TUMAC, EMRE AVUNDUK. Double shield TBM performance analysis in difficult ground conditions: a case study in the Gerede water tunnel, Turkey[C]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 75(1): 251–262.
- [4] 王双华, 徐尤南, 余伟, 等. 一种 TBM 推进机构的多柔体动力学建模及仿真[J]. *机床与液压*, 2015, 43(13): 108–112.
- [5] 李威. TBM 撑靴与围岩接触表面应力分布均匀性研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
- [6] 饶云意. $\Phi 2\text{m}$ 缩尺 TBM 试验台的推进系统设计与分析[J]. *工程机械*, 2015, 46(4): 32–38.
- [7] 王超飞. 不同工作模式下 TBM 试验台撑靴与围岩接触均匀性仿真分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- [8] 李威, 朱雨震, 郭巍鹏. TBM 撑靴两端先接触围岩仿真分析[J]. *机械工程与自动化*, 2017(1): 90–92.
- [9] 朱雨震. 新型 TBM 撑靴与围岩接触仿真及应力均匀性分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2017.
- [10] 涂文兵, 何海斌, 刘乐平, 等. 汽车前保险杠碰撞过程动力学仿真与分析[J]. *华东交通大学学报*, 2018, 35(1): 75–81.
- [11] 余旭林, 郭巍鹏, 王小良. 新型 TBM 推进机构试验台主推进器仿真分析[J]. *机械工程与自动化*, 2016(6): 78–79.
- [12] 张永栋, 谢小鹏, 廖钱生, 等. 基于有限元方法的齿轮接触仿真分析[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(1): 49–51.

Simulation of Contact Between TBM Boots and Surrounding Rock Under Double Support Working Mode

Xu Younan, Yu Changxin, Chen Jie, Liu Zhiqiang, Wan Yongsheng

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Taking the new TBM boots as the research object, the force transmission characteristics between the boots and other mechanisms are created according to the three-dimensional model of the test bench. The contact model between the boots and the surrounding rock in the double-support working mode is established, and the finite element method is used to study the support. The stress and displacement distribution of the contact surface between the boot and the surrounding rock shows that the comprehensive stress distribution of the support shoe and the surrounding rock is relatively uniform, and it is distributed within the range of in the circumferential dimension. The maximum stress on the contact surface is 13 MPa, and the maximum stress on the contact surface of the surrounding rock is 4.03 MPa. The comprehensive displacement of the contact surface of the support shoe is small in the middle and large at both ends, and the displacement at the contact surface of the surrounding rock is large, and the displacement to the periphery gradually decreases. The analysis results provide some reference for improving the stability of the whole machine.

Key words: TBM; support boots and surrounding rock contact; simulation analysis