

渐变断面工况下TBM撑靴辅助工装与围岩耦合特性分析

马修泉 苗 莞 谢 苗 王浩男

(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 阜新 123000)

摘要:【目的】针对渐变断面新工况下辅助支撑装备的研究较少,现有隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)支撑推进机构均无法满足新工况下的工作要求等问题,对撑靴辅助装备与围岩间的接触力学行为进行分析,得到接触区域的综合应力与综合位移等力学参数,以便于对工装稳定性与TBM整机掘进效率进行评估,为工程装备设计提供依据。【方法】首先,基于浙江缙云抽水蓄电站排水廊道渐变断面施工工况,建立撑靴辅助工装在不同支撑状态下与围岩的耦合接触模型。然后,探究工装伸长量、工装靴体与围岩间的贴合角度、工装靴体与围岩表面的接触面积、不同岩石类型对耦合力学特性的影响。最后,绘制辅助工装靴体与围岩接触面的综合应力、法向接触应力和综合位移分布图,对不同支撑状态和工况下撑靴辅助工装靴体与围岩的接触耦合力学特性进行对比分析。【结果】结果表明,撑靴辅助工装靴体与围岩完全接触时,综合应力和法向接触应力分布不均,且有较大突变;随贴合角的增大,两表面间的最大综合位移增大;靴体与围岩仅中间区域接触时,综合应力、法向接触应力和围岩的最大综合位移均大于完全接触时的相应值;当耦合接触参数相同时,Ⅰ类围岩所受的综合应力的最大值大于Ⅱ、Ⅲ类围岩,综合位移的最大值小于Ⅱ、Ⅲ类围岩,Ⅱ、Ⅲ类围岩所受综合应力和综合位移的主要集中区域大于Ⅰ类围岩,表明软质岩更易发生屈服破坏和滑移变形。

关键词: 渐变断面工况; 撑靴辅助工装; 刚-柔耦合; 接触特性; 围岩变形

中图分类号: TU455; TV672.1 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.016

0 引言

全断面硬岩隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)在轨道交通建设中广泛应用于硬岩全断面隧道切削^[1],在抽水蓄能工程中利用TBM开挖地下洞室群时,会面临各种各样的复杂工况,传统敞开式TBM不能满足无导洞始发、超小半径转弯等复杂洞室群非连续隧洞施工需求,因此,对TBM设备性能的要求不断提高。受自然条件、地表沉降、围岩岩性等因素的影响,且为了满足隧道建设领域个性化和多样化的需求,不仅要求TBM具备快速掘进的能力,还需要考虑其在转弯半径、偏载掘进和快速始发等方面的性能。TBM在不同工况下的适用性已成为评估其作业性能的主要指标之一。因此,研究TBM在渐变断面工况下撑靴支撑系统的受力情况,对提升抽水蓄电站TBM的施工效率与安全水平具有重要意义。

撑靴支撑系统是TBM的核心系统之一,撑靴系统可根据TBM所处的地质条件和掘进状态,对撑靴进行调节,以适应不同工况与地质条件,提高TBM面对不同工况的适用性。目前,学者已对撑靴系统进行了很

多研究。陈玉羲等^[2-3]建立了高负载下TBM撑靴控制系统模型,对不同工况下TBM设备的支撑力和推进力间的电液耦合系统进行了研究,得到各油缸最大超调量。饶云意等^[4-5]对TBM支撑与推进系统的协同控制进行了研究,得出支撑推进压力与位移量间的匹配控制机制,降低了掘进过程中各参数的误差。郑冰冰^[6]基于比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制技术,搭建了TBM撑靴系统电液试验平台,得出不同控制参数下的最小系统误差。王宏等^[7-8]对TBM撑靴与围岩接触可靠性进行了分析,发现接触面积和围岩岩性是影响支撑稳定性的主要因素。李威等^[9]通过建立撑靴与围岩间的耦合接触模型,对围岩表面的应力分布规律进行了研究,得出法向应力随载荷增加而增加的结论。

接触力学的研究对象是两物体接触区域内的力学行为特征,它主要对两表面间的力学相互作用进行研究,探究两物体表面在接触状态下的综合变形、应力分布和摩擦磨损等现象。计算机仿真技术的应用使得Hasanpour等^[10-11]对微观力学、非线性力学等领域

收稿日期: 2024-11-05 修回日期: 2024-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51874158); 辽宁省教育厅重点攻关项目(LJ2019ZL003)

作者简介: 马修泉,男,1972年生,黑龙江鹤岗人,博士,教授; 主要研究方向为成型技术与控制、煤矿机械材料耐磨性; E-mail: maxiuquan@vip.sina.com。

苗莞(通信作者),男,1999年生,辽宁大连人,硕士研究生; 主要研究方向为工矿装备自动化与智能化、隧道与地下工程; E-mail: 1484224355@qq.com。

引用格式: 马修泉,苗莞,谢苗,等. 渐变断面工况下TBM撑靴辅助工装与围岩耦合特性分析[J]. 机械强度, 2026, 48(7): 137-147.

Ma Xiuquan, Miao Chong, Xie Miao, et al. Analysis of coupling characteristics between the supporting boot auxiliary tooling and surrounding rock of TBM under gradual section condition[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 137-147.



免费获取

的研究逐渐深入,接触力学理论也在不断地完善,并且拓展至TBM领域。Tiwari等^[12-14]对TBM滚刀破岩和撑靴与围岩接触等领域进行了深入研究,推动了TBM设备的创新。张登等^[15]对不同岩石类型进行了岩体间切向和法向接触力学试验,结果表明,其实际接触区域的法向接触压力变化有较大差异。夏冰新等^[16]对粗糙表面进行了微观接触力学分析,得到不同分形维数和粗糙度与制动效果之间的关系。钱进等^[17]对两管件接触表面进行了力学特性分析,得到接触表面间所受接触力、接触面积、综合位移与法向压力之间的关系。

综上所述,关于TBM支撑推进机构和撑靴系统的分析以直线掘进工况下各机构力学特性、结构优化和控制机制等方面的研究为主,针对渐变断面新工况下,辅助支撑装备的研究还较少。由于在渐变断面工况下对辅助工装的承载需求与工作空间有一定要求,现有TBM支撑推进机构均无法满足新工况下的工作要求。此外,许多学者在不同领域对各表面间的接触区域均进行了分析,结果表明,对接触区域进行相互作用分析,对整体性能研究具有很大影响。因此,对撑靴辅助装备与围岩间的接触力学行为进行分析,得到接触区域的综合应力与位移等力学参数,有助于评估工装稳定性与TBM整机掘进效率,为工程装备设计提供依据。

1 工程概况

本文的研究基于浙江某抽水蓄能电站利用TBM开挖排水廊道这一工程。蓄能电站排水廊道采用左侧凹字型和右侧螺旋型布置,开挖直径为3.53 m,洞室布置如图1(a)所示。排水廊道总长4 066 m,具有22处弯道,转弯半径为30 m,其中有5处排水廊道线路相交,需采用半段面偏载掘进。渐变断面掘进施工现场如图1(b)所示。

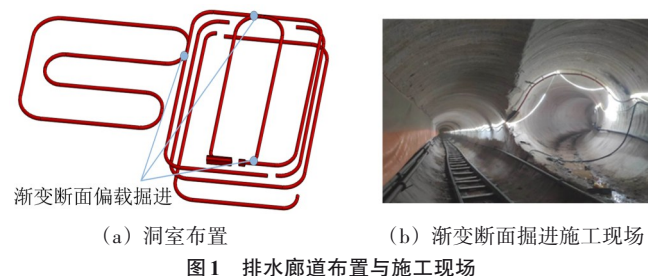


Fig. 1 Layout and construction site of the drainage corridors

本工程采用开挖直径为3.53 m的开敞式TBM,主机全长为7 m,刚性结构总长度为5 m,掘进最大步长为1.5 m,其主要技术参数如表1所示。

TBM弯道掘进过程中,通过调整V形推进系统中各推进油缸的伸长量,以确保刀盘中心始终位于隧洞设计轴线上;并及时调整外侧护盾位置,避免TBM转

弯轨迹与隧道内壁发生干涉。针对本工程现场的工况,建立转弯位置关系,如图2所示。图2中, D 为刀盘直径; R 为TBM最小转弯半径; β 为外侧盾体调整量; L 为TBM刚性结构总长度。

表1 TBM的技术参数

Tab. 1 Technical parameters of the TBM

技术参数	值
开挖直径/mm	3 530
刀盘转速/(r/min)	0~15.8
额定驱动转矩/(kN·m)	835
最大脱困转矩/(kN·m)	1 180
最大推进速度/(mm/min)	100
最大推力对应的质量/t	3 850
整机总长/m	35
整机总重/t	120
装机功率/kW	1 052
刚性结构总长度/m	5
掘进最大步长(1个作业周期步进距离)/m	1.5
水平油缸最大伸缩量/m	0.7

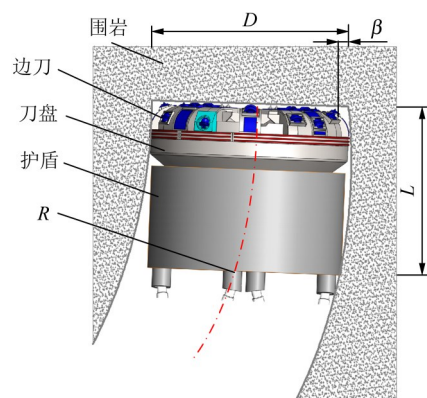


图2 TBM弯道掘进外侧护盾空间位置关系

Fig. 2 Spatial positional relationship of the outer shield during TBM curve tunneling

由几何关系可得

$$\left(R + \frac{D}{2} - \beta\right)^2 + L^2 = \left(R + \frac{D}{2}\right)^2 \quad (1)$$

化简可得

$$R = \frac{\beta^2 + L^2}{2\beta} - \frac{D}{2} \quad (2)$$

设一个支撑-推进-换步作业周期步进距离为 Δl ($\Delta l < R$),主机偏移角度为 $\Delta\delta$,则

$$R = \frac{\Delta l}{2\sin(\Delta\delta/2)} \quad (3)$$

对TBM采用正切法水平调向时,刀盘中点始终位于隧道中心线上,只需要对推进油缸和水平支撑油缸的伸缩量进行适当调整,保证刀盘回转轴线始终与隧道中心线相切,此时掘进轨迹为圆,并满足以下约束条件:

$$(\Delta x - L \sin \Delta\delta - R)^2 + (-L \cos \Delta\delta - l_0)^2 = R^2 \quad (4)$$

$$\frac{-L \cos \Delta\delta - l_0}{\Delta x - L \sin \Delta\delta - R} \cdot \frac{-L \cos \Delta\delta}{-L \sin \Delta\delta} = -1 \quad (5)$$

$$(\Delta x)^2 - 2R\Delta x + l_0^2 - L^2 = 0 \quad (6)$$

式中, Δx 为水平支撑油缸最大伸缩量; l_0 为 TBM 刚性结构与步长之和, $l_0 = \Delta l + L$ 。因此, 支撑油缸移动量与转弯半径之间关系可表示为

$$R = \frac{(\Delta x)^2 + (\Delta l)^2 + 2L\Delta l}{2\Delta x} \quad (7)$$

结合表 1 中的参数值, 由式(2)可求得由护盾外侧调整量限制的新型敞开式 TBM 的最小转弯半径, 其值为 30 m; 最小转弯半径随护盾外侧调整量的增大呈对数函数降低, 如图 3 所示。将最小转弯半径为 30 m 这一数值代入式(3)、式(7)中, 可得到步长随盾体偏移角度的增大呈直线上升趋势, 如图 4(a)所示; 支撑油缸移动量随换步步长的增大近似呈直线上升趋势, 如图 4(b)所示。

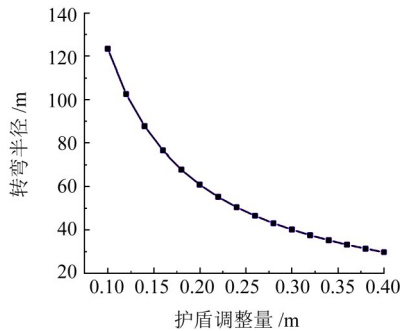
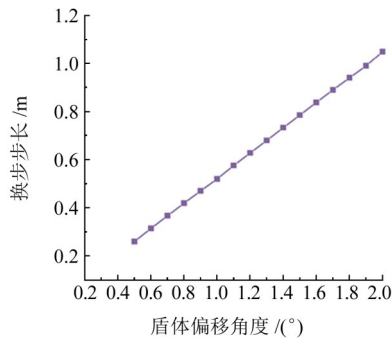
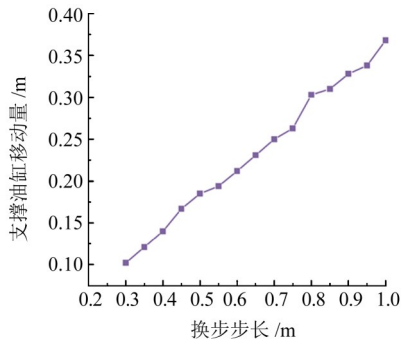


图 3 最小转弯半径随护盾调整量的变化

Fig. 3 Variation of the minimum turning radius with the shield adjustment



(a) 换步步长与盾体偏移角度的关系



(b) 支撑油缸移动量与换步步长的关系

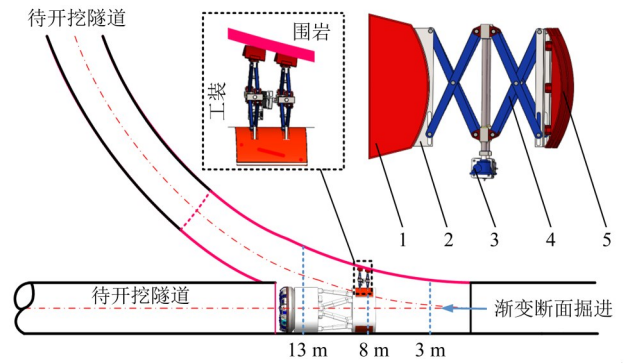
图 4 最小转弯半径为 30 m 时, 相关参数之间的关系

Fig. 4 Relation between relevant parameters at a minimum turning radius of 30 m

在半断面偏载挖掘工况下, 2 个交汇隧道间为相

切关系, 且最小转弯半径为 30 m。因此, 可得出渐变断面偏载掘进长度 15 m, 该段撑靴与围岩最大脱空距离为 4 m。由于水平油缸最大伸缩量为 0.7 m, 且 TBM 撑靴具有长为 1 m 的可拆卸加长块, 因此撑靴辅助工装需要完成 0.7~2.3 m 间的伸缩, 且刚性长度小于 0.7 m。TBM 在半断面偏载工况下掘进 15 m 的过程中, 撑靴辅助工装和围岩接触与 TBM 掘进方向的贴合角从 0° 增至 28°, 因此, 工装辅助靴体应具备左右调节功能, 以适应围岩的曲率变化。在渐变断面工况下, TBM 在掘进过程中, 需要不断调整撑靴油缸的伸长量与撑靴辅助工装的伸展量, 以满足脱空侧与围岩充分接触, 为 TBM 掘进提供足够的支撑反力。

根据上文对渐变断面工况下 TBM 工作情况的分析, 通过合理的空间布局和构件优化, 设计了可满足升降需求和承载需求的撑靴辅助工装, 如图 5 所示。



1. TBM 撑靴; 2. 底板; 3. 电动机丝杠升降机构; 4. 剪刀升降机构; 5. 辅助靴体。

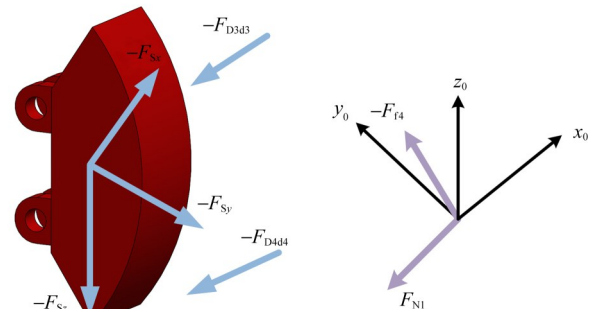
图 5 撑靴辅助工装基本结构

Fig. 5 Basic structure of supporting boot auxiliary tooling

2 力学模型建立

2.1 撑靴靴体受力模型

将脱空侧右撑靴靴体作为受力分析对象, 其受推进反力 $-F_{D3d3}$ 、 $-F_{D4d4}$, 铰接处作用力分量 F_{Sx} 、 F_{Sy} 和 F_{Sz} , 围岩等效支撑力 F_{N1} , 围岩摩擦力 F_{f4} , 如图 6 所示。假设围岩与撑靴靴体表面间的等效静摩擦因数为 μ 。



(a) 推进反力与铰接处作用力 (b) 围岩等效支撑力与围岩摩擦力

图 6 撑靴靴体受力示意图

Fig. 6 Schematic diagram of force on gripper shoe body

建立脱空侧撑靴靴体在 x, y, z 这 3 个方向的受力平衡方程, 即

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \text{ 即 } -\sum_{i=3}^4 F_{Didix} + F_{Sx} - F_{N1} = 0 \\ \sum F_y = 0, \text{ 即 } -\sum_{i=3}^4 F_{Didiy} - F_{Sy} + F_{f4y} = 0 \\ \sum F_z = 0, \text{ 即 } -F_{Sx} + F_{f4z} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

右侧撑靴正向支撑力 F_{N1} 与等效摩擦力 F_{f4} 间须满足

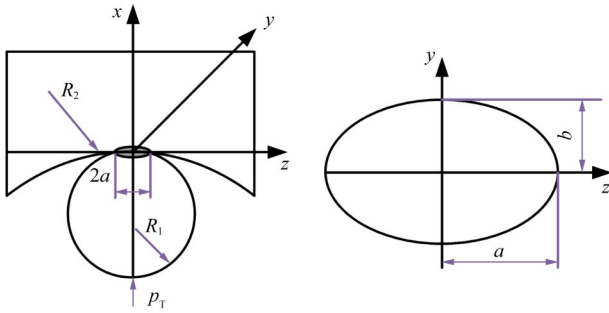
$$\mu F_{N1} \geq F_{f4} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)可得, 右侧撑靴最小撑紧力 F_{Sx} 与推进力 F_{Di} 间的关系为

$$F_{Sx} \geq \frac{1}{\mu} \sqrt{F_{Sx}^2 + \left(\sum_{i=3}^4 F_{Didiy} + F_{Sy} \right)^2 + \sum_{i=1}^2 F_{Didix}} \quad (10)$$

2.2 靴体与围岩微观接触力学模型

撑靴辅助工装靴体与围岩之间的接触可视为两球体的面接触, 基于此, 建立撑靴辅助工装靴体与围岩之间的接触, 如图 7 所示。



(a) 初次接触点区域示意图 (b) 椭圆长、短半轴示意图

图 7 撑靴与围岩微观接触示意图

Fig. 7 Micro-contact schematic diagram of boots and surrounding rock

在撑靴辅助工装靴体与围岩面的面接触中, 作用于撑靴辅助工装上的力包括由推进油缸产生的推进力、由支撑油缸产生的支撑力和由刀盘旋转产生的滚动力等, 这些力的合力 p_T 沿着 x 轴方向。初次接触^[18]时, 靴体面与围岩面均会发生位移变形, 形成一个较小的椭圆形区域, 即初次接触点区域, 如图 7(a) 所示。椭圆长半轴位于 z 轴上, 长半轴长为 a ; 短半轴位于 y 轴上, 短半轴长为 b , 如图 7(b) 所示。椭圆的长、短半轴长 a 、 b 的数值大小与撑靴辅助工装材料和围岩岩性有关。靴体与围岩面的面接触所产生的椭圆面变形量与接触点区域各点单位压力大小相关, 由受力分析可知, 沿 x 轴方向变形最大, 且接触变形对应的最大单位压力为 p_0 , 其计算式为

$$\frac{p^2}{p_0^2} + \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (11)$$

式中, (x, y) 为接触椭圆区域内任意点的平面坐标; p 为坐标 (x, y) 处的接触压强。

由第 2 节中对撑靴辅助工装承载需求的分析可

知, 撑靴辅助工装所受合力(总压力) p_T 由推进力、支撑力、滚动力等组成, 其计算式为

$$p_T = \int p dS = \frac{2\pi ab p_0}{3} \quad (12)$$

式中, S 为接触面面积。

靴体与围岩的最大接触应力 σ_T 就是最大单位压力 p_0 , 其计算式为

$$\sigma_T = p_0 = \frac{3p_T}{2\pi ab} \quad (13)$$

根据上述分析, 将靴体与围岩间的接触视为 2 个椭圆球体表面的接触, 它们的半径分别为 R_1 和 R_2 。在由推进力、支撑力、滚动力等组成的合力 p_T 的作用下, 椭圆球体通过面-面接触形成圆形, 其半径为 a' , 可由赫兹公式得到, 即

$$a' = \sqrt{\frac{3p}{4} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) / \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (14)$$

式中, E_1 为撑靴辅助工装靴体的弹性模量; E_2 为围岩的弹性模量; μ_1 为撑靴辅助工装靴体的泊松比; μ_2 为围岩的泊松比。

若由靴体与围岩这 2 个椭圆球体表面接触所形成的圆形的综合曲率半径为 R , 则其计算式为

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (15)$$

通过以上各式, 即可计算出撑靴辅助工装靴体与围岩间的接触应力。

3 不同贴合角下各力学性能变化规律

3.1 耦合接触模型仿真

在进行撑靴辅助工装与围岩的显式动力学仿真分析时, 将载荷均施加在撑靴辅助工装上, 因此需要对所加载荷进行分析。TBM 在半断面偏载工况下掘进 15 m 的过程中, 需要不断调整撑靴油缸的伸长量与撑靴辅助工装的伸展量, 以满足脱空侧与围岩充分接触, 为 TBM 掘进提供足够的支撑反力。撑靴辅助工装在调整过程中, 靴体和围岩的接触面与 TBM 掘进方向的贴合角从 0° 增至 28° , 如图 8 所示。

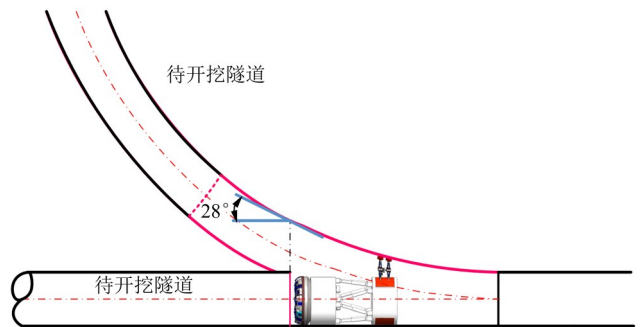


图 8 TBM 在半断面偏载工况下的掘进示意图

Fig. 8 Schematic diagram of TBM tunneling under half-section eccentric load condition

基于 Abaqus 软件的显式动力学模块,建立撑靴辅助工装靴体和 I 类围岩的耦合接触模型, I 类围岩具体参数为:密度为 2.9 g/cm^3 、弹性模量为 86.4 GPa 、泊松比为 0.15 。将工装材料设置为 Q345;根据第 2.1 节的分析结果可以得出:推进反力 $F_{sx} = 192.4 \text{ kN}$ 、支撑力 $F_{sy} = 154.6 \text{ kN}$ 、滚动力 $F_{sz} = 67.3 \text{ kN}$ 。将这些载荷

加载于撑靴辅助工装底板,得出靴体与围岩接触表面的综合应力、法向接触压力和综合位移,提取云图数据并处理,得到力与位移的分布。

当贴合角为 20° 时,对撑靴辅助工装靴体与围岩的耦合接触模型进行求解,得到综合应力和法向接触应力的分布,分别如图 9、图 10 所示。

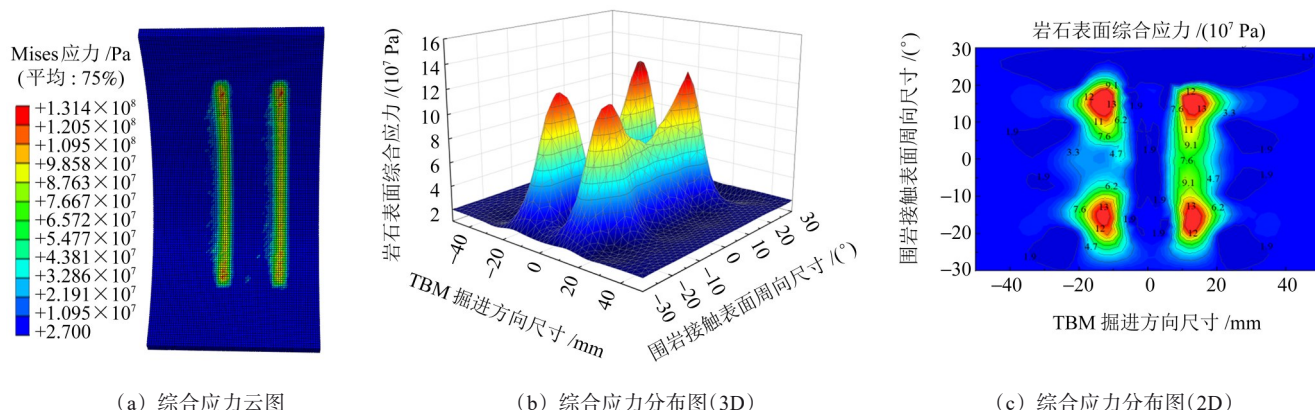
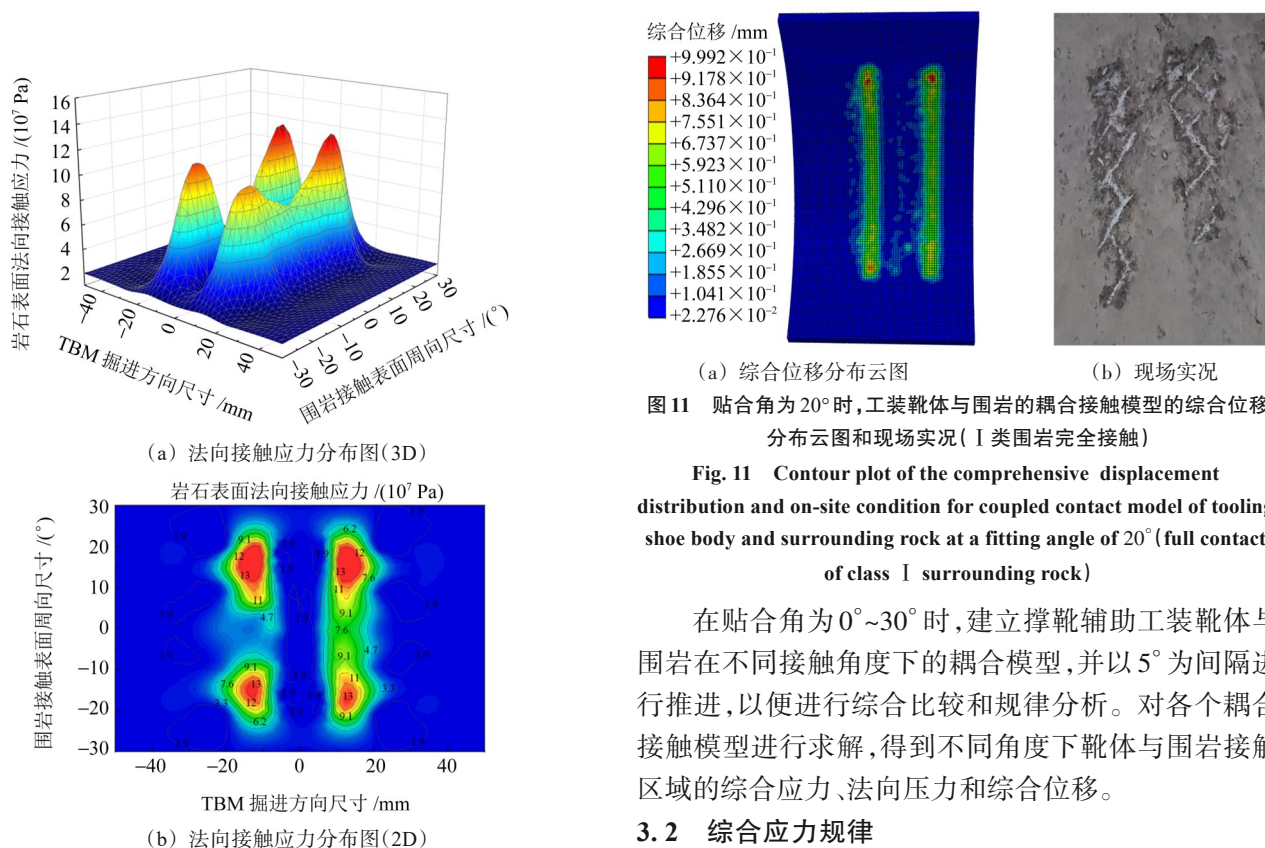


图 9 贴合角为 20° 时,工装靴体与围岩的耦合接触模型的综合应力(I类围岩完全接触)

Fig. 9 Comprehensive stress of the coupled contact model between the tooling shoe body and surrounding rock at a fitting angle of 20° (full contact of class I surrounding rock)



(a) 法向接触应力分布图(3D)

(b) 法向接触应力分布图(2D)

(c) 综合位移分布云图

(d) 现场实况

图 11 贴合角为 20° 时,工装靴体与围岩的耦合接触模型的综合位移分布云图和现场实况(I类围岩完全接触)

Fig. 11 Contour plot of the comprehensive displacement distribution and on-site condition for coupled contact model of tooling shoe body and surrounding rock at a fitting angle of 20° (full contact of class I surrounding rock)

在贴合角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,建立撑靴辅助工装靴体与围岩在不同接触角度下的耦合模型,并以 5° 为间隔进行推进,以便进行综合比较和规律分析。对各个耦合接触模型进行求解,得到不同角度下靴体与围岩接触区域的综合应力、法向压力和综合位移。

3.2 综合应力规律

对在不同贴合角下撑靴辅助工装靴体与围岩的耦合接触模型进行求解,其综合应力的仿真结果如表 2 所示,并由此绘制出综合应力随贴合角的变化曲线,如图 12 所示。由图 12 可知,撑靴辅助工装靴体与围岩耦合接触的综合应力的最大值随贴合角的增大而增大,当贴合角由 0° 增至 30° 时,综合应力的最大值增大了 9.4% ;综合应力的平均值也随贴合角的增大而增

图 10 贴合角为 20° 时,工装靴体与围岩耦合接触模型的法向接触应力(I类围岩完全接触)

Fig. 10 Normal contact stress of the coupled contact model between the tooling shoe body and surrounding rock at a fitting angle of 20° (full contact of class I surrounding rock)

当贴合角为 20° 时,撑靴辅助工装靴体与围岩的耦合接触模型的综合位移分布云图和现场实况如图 11 所示。

大,当贴合角由 0° 增至 30° 时,综合应力的平均值增大了11.1%。综合应力的最大值约为平均值的1.85倍,表明靴体与围岩耦合接触中的综合应力分布不均。

表2 不同贴合角下的综合应力

Tab. 2 Comprehensive stress under different fitting angles

贴合角/ $^{\circ}$	综合应力取值范围/Pa
0	$1.042 \times 10^7 \sim 1.241 \times 10^8$
5	$1.051 \times 10^7 \sim 1.253 \times 10^8$
10	$1.069 \times 10^7 \sim 1.272 \times 10^8$
15	$1.084 \times 10^7 \sim 1.296 \times 10^8$
20	$1.095 \times 10^7 \sim 1.314 \times 10^8$
25	$1.112 \times 10^7 \sim 1.336 \times 10^8$
30	$1.131 \times 10^7 \sim 1.358 \times 10^8$

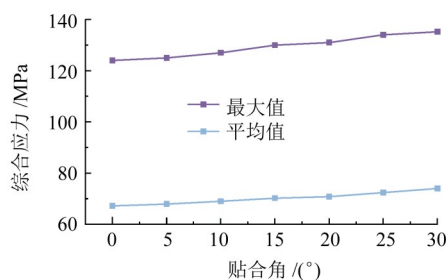


图12 靴体与围岩的综合应力随贴合角的变化

Fig. 12 Comprehensive stress between the shoe body and surrounding rock versus fitting angle

3.3 法向接触应力规律

对不同贴合角下撑靴辅助工装靴体与围岩的耦合接触模型进行求解,其法向接触应力仿真结果如表3所示,并由此绘制出法向接触应力随贴合角的变化曲线,如图13所示。由图13可知,撑靴辅助工装靴体与围岩的耦合接触的法向接触应力的最大值随贴合角的增大而增大,当贴合角由 0° 增至 30° 时,法向接触应力的最大值增大了9.2%;法向接触应力的平均值也随贴合角的增大而增大,当贴合角由 0° 增至 30° 时,法向接触应力的平均值增大了8.8%。法向接触应力的最大值约为平均值的1.79倍,表明靴体与围岩耦合接触中的法向应力分布不均,且两侧有较大突变。

表3 不同贴合角下的法向接触应力

Tab. 3 Normal contact stress under different fitting angles

贴合角/ $^{\circ}$	法向接触应力取值范围/Pa
0	$1.501 \times 10^7 \sim 1.256 \times 10^8$
5	$1.536 \times 10^7 \sim 1.267 \times 10^8$
10	$1.547 \times 10^7 \sim 1.284 \times 10^8$
15	$1.560 \times 10^7 \sim 1.302 \times 10^8$
20	$1.578 \times 10^7 \sim 1.323 \times 10^8$
25	$1.592 \times 10^7 \sim 1.348 \times 10^8$
30	$1.604 \times 10^7 \sim 1.371 \times 10^8$

3.4 综合位移规律

对不同贴合角下撑靴辅助工装靴体与围岩的耦合接触模型进行求解,其综合位移的仿真结果如表4所

示,并由此绘制出综合位移随贴合角的变化曲线,如图14所示。由图14可知,撑靴辅助工装靴体与围岩耦合的综合位移的最大值随贴合角的增大而增大,当贴合角由 0° 增至 30° 时,综合位移的最大值增大了3.66倍,表明在靴体与围岩的耦合接触中,随贴合角的增大,两表面间产生滑移的可能性增加。

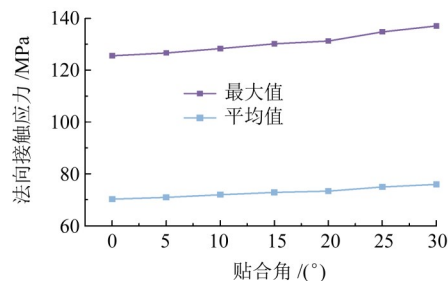


图13 靴体与围岩的法向接触应力随贴合角的变化

Fig. 13 Variation of normal contact stress between shoe body and surrounding rock with fitting angle

表4 不同贴合角下的综合位移

Tab. 4 Comprehensive displacement under different fitting angles

贴合角/ $^{\circ}$	综合位移取值范围/mm
0	$1.677 \times 10^{-2} \sim 2.944 \times 10^{-1}$
5	$1.796 \times 10^{-2} \sim 4.012 \times 10^{-1}$
10	$1.882 \times 10^{-2} \sim 5.903 \times 10^{-1}$
15	$2.014 \times 10^{-2} \sim 8.117 \times 10^{-1}$
20	$2.276 \times 10^{-2} \sim 9.992 \times 10^{-1}$
25	$2.405 \times 10^{-2} \sim 1.140 \times 10^0$
30	$2.719 \times 10^{-2} \sim 1.371 \times 10^0$

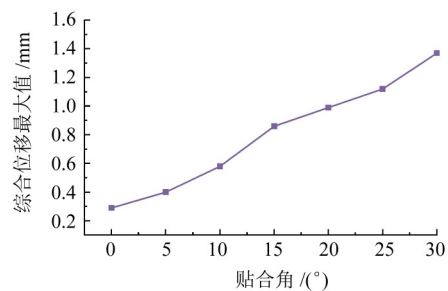


图14 靴体与围岩的综合位移最大值随贴合角的变化

Fig. 14 Variation of the maximum comprehensive displacement between the shoe body and surrounding rock with fitting angle

4 靴体与围岩不完全接触对比分析

撑靴辅助工装靴体与围岩接触易产生滑移、压溃及支撑不稳等问题,这些问题的产生不仅取决于3个方向上的载荷大小,还与围岩岩性^[19]相关。本文所依托工程沿线穿越的地层的岩性较为复杂,主要为侏罗系上统高坞组火山碎屑岩及燕山晚期侵入的岩脉等。排水廊道受近地表风化、节理切割的影响,局部存在中等透水岩体,总体地质条件较为复杂,以I类、II类围岩为主,完整性较好。现场岩石碎片采样及各类围岩所占比例如图15所示。

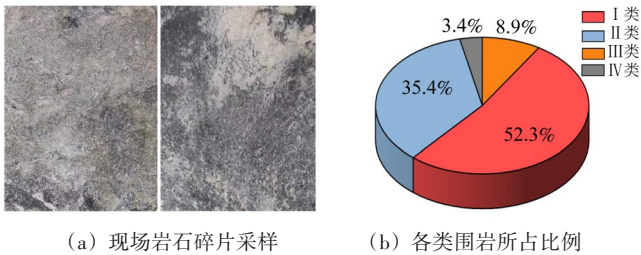


图 15 现场岩石碎片采样及各类围岩所占比例

Fig. 15 Sampling of on-site rock fragments and proportion of various surrounding rocks

4.1 不同接触面积数值仿真对比分析

建立仅中间区域接触的辅助工装靴体与围岩的耦合接触模型,将围岩设置为 I 类岩石、工装材料设置为 Q345,并施加约束与载荷。对辅助工装靴体与围岩仅中间区域接触耦合的模型进行求解,得到综合应力,如图 16 所示。由图 16(a)可知,两靴体与围岩接触

区域的云图近似对称分布,靴体与围岩接触面的综合应力最大值为 203 MPa,平均值为 108 MPa,分别比靴体与围岩完全接触时的综合应力最大值、平均值大 63.7%、60.4%。由图 16(b)、图 16(c)可知,辅助工装靴体与围岩中间接触区域的综合应力有 2 个峰值,右侧(TBM 掘进方向尺寸为正值的一侧)的峰值略大于左侧(TBM 掘进方向尺寸为负值的一侧)的峰值,右侧的应力峰值接近 200 MPa,左侧的应力峰值接近 193 MPa,左、右两侧的应力峰值均大于靴体与围岩完全接触时应力峰值。由图 16(c)可知,撑靴辅助工装靴体与围岩仅中间区域接触时,综合应力主要集中在周向尺寸 $-16^{\circ} \sim 18^{\circ}$,该范围窄于完全接触时综合应力的主要集中区域。总体来看,不完全接触时,综合应力约为完全接触时的 1.5~2 倍,说明部分接触时,围岩受力较大,易发生压溃等现象。

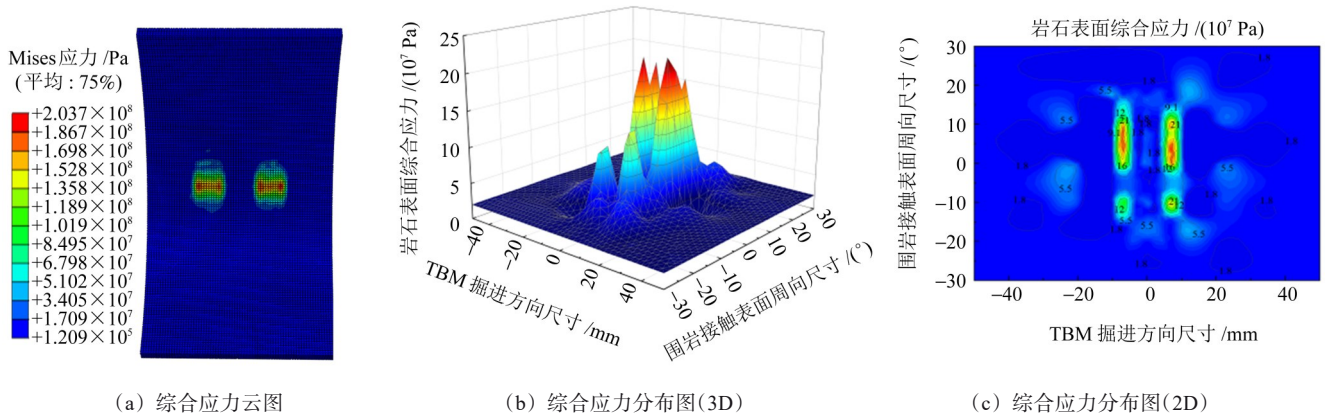


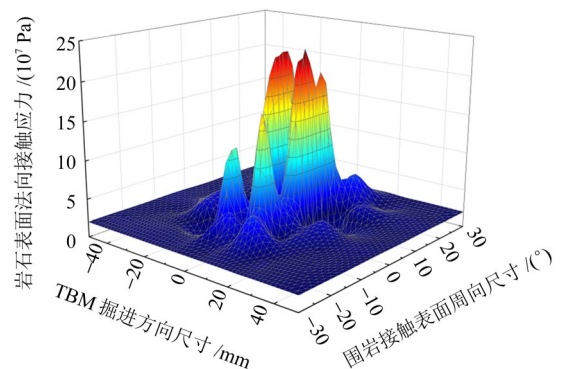
图 16 岩石为 I 类围岩时,靴体与围岩仅中间接触的综合应力

Fig. 16 Comprehensive stress of the shoe body and surrounding rock with contact only at the middle area for type I surrounding rock

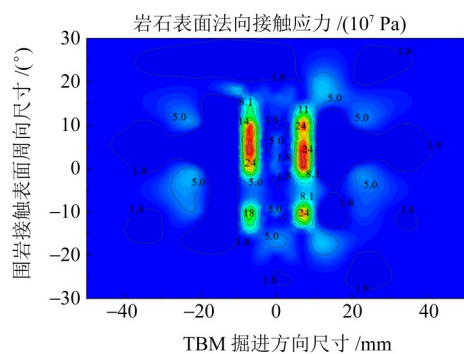
辅助工装靴体与围岩仅中间区域接触的法向接触应力分布如图 17 所示。由图 17(a)可知,靴体与围岩接触区域的法向接触应力呈现双峰值向四周衰减趋势,最大法向接触应力接近 225 MPa,平均法向接触应力为 134 MPa,分别比靴体与围岩完全接触时的最大、平均法向接触应力大 78.6%、90.6%。沿围岩接触表面周向方向,法向接触应力呈现“先增加、再减小、再增加、再减小”的趋势,以两靴体中间区域为分界线,其两侧法向接触应力近似对称。而由图 17(b)可知,辅助工装靴体与围岩中间区域接触面的法向接触应力主要集中在周向尺寸 $-18^{\circ} \sim 18^{\circ}$,左侧(TBM 掘进方向尺寸为负值的一侧)的法向接触应力峰值略大于右侧(TBM 掘进方向尺寸为正值的一侧)的法向接触应力峰值,峰值区域的应力值大致为中间区域的 2.9 倍,为左、右端区域的 6.2 倍,且最大法向接触应力集中在靴体与围岩接触的中间区域,范围窄于靴体与围岩完全接触下的法向接触应力分布区域。总体来看,不完全接触时,法向接触应力约为完全接触时的 2 倍,说明部分接触时,围岩受法

向压力较大,易导致岩石破碎。

撑靴辅助工装与围岩仅中间区域接触的综合位移分布和现场实况如图 18 所示。由图 18(a)可知,两靴体与围岩接触区域的综合位移云图呈絮状,最大位移为 3.75 mm,平均位移接近 1.8 mm,约为完全接触时综合位移的 6 倍。单个靴体接触面的位移云图表现为多点位移集中向四周扩散缩小,靴体接触区域外围岩的位移接近 0,与图 18(b)接近。



(a) 法向接触应力分布图(3D)



(b) 法向接触应力分布图(2D)

图 17 岩石为 I 类围岩时,靴体与围岩仅中间接触的法向接触应力
Fig. 17 Normal contact stress of the shoe body and surrounding rock with contact only at the middle region for type I surrounding rock

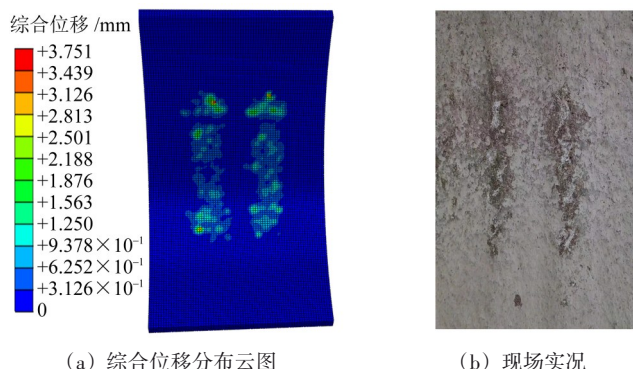


图 18 岩石为 I 类围岩时,靴体与围岩仅中间接触的综合位移分布云图和现场实况
Fig. 18 Comprehensive displacement distribution contour plot and on-site condition for middle-only contact between shoe body and surrounding rock for type I surrounding rock

4.2 不同围岩类型数值仿真对比分析

基于 Abaqus 软件的显式动力学模块,将围岩分别设置为 II 类和 III 类岩石,具体参数为:密度分别为 2.7 g/cm^3 和 2.42 g/cm^3 、弹性模量分别为 57.7 GPa 和 40.3 GPa 、泊松比分别为 0.26 和 0.33 。将工装材料设置为 Q345,并对 2 个模型施加相同约束与载荷。对完全接触和仅中间区域接触这 2 个模型进行求解,得出靴体与围岩接触表面综合应力与位移分布图。对 II 类围岩的撑靴辅助工装靴体与围岩完全接触和仅中间区域接触耦合模型分别进行求解,得到综合应力与综合位移分布。图 19 所示为岩石为 II 类围岩时,靴体与围岩完全接触时的综合应力与综合位移分布;图 20 所示为岩石为 II 类围岩时,靴体与围岩仅中间接触时的综合应力与综合位移分布。

由图 19(a)可知,完全接触时,II 类围岩表面出现了 4 个综合应力峰值,其中最大值接近 90 MPa ,比 I 类围岩的综合应力峰值的最大值小 31.3% ;分别以 4 个峰值为参考点,综合应力呈现向四周缩小的趋势,但缩小幅度小于 I 类围岩。由图 19(b)可知,在支撑、推进和滚动载荷共同作用下,两靴体与围岩完全接触区域的综合位移云图呈对称分布,且各有 2 个峰值,最

大综合位移为 1.9 mm ,是 I 类围岩的最大综合位移的 1.91 倍;撑靴辅助工装靴体与围岩接触面的综合位移主要集中在周向尺寸 $-30^\circ \sim 28^\circ$,该范围大于 I 类围岩。由图 20(a)可知,仅中间区域接触下,II 类围岩表面出现了 2 个综合应力峰值,其中的最大值接近 150 MPa ,比 I 类围岩的综合应力峰值的最大值小 26.1% ;分别以 2 个峰值为参考点,综合应力呈现向四周缩小的趋势,但缩小幅度小于 I 类围岩。由图 20(b)可知,综合位移云图呈对称分布,且有 2 个峰值,最大综合位移为 8 mm ,是 I 类围岩的最大综合位移的 2.1 倍;撑靴辅助工装靴体与围岩接触面综合位移主要集中在周向尺寸 $-30^\circ \sim 25^\circ$,该范围大于 I 类围岩。总体来看,II 类围岩所受的综合应力最大值小于 I 类围岩,综合位移的最大值大于 I 类围岩;II 类围岩所受的综合应力与位移的集中区域均大于 I 类围岩。

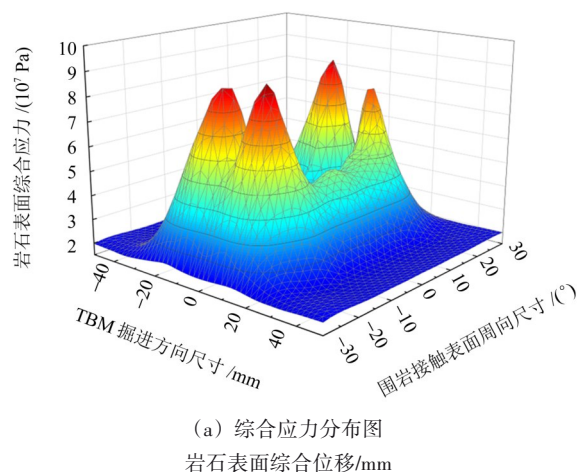
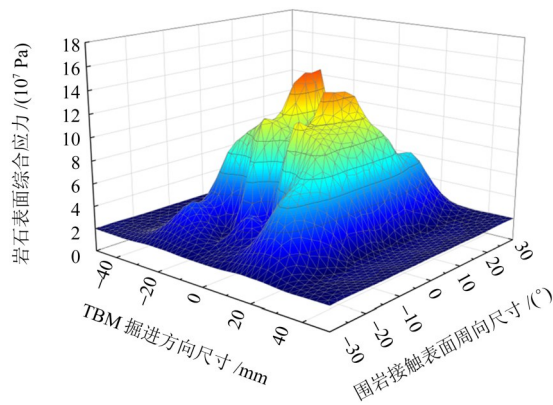


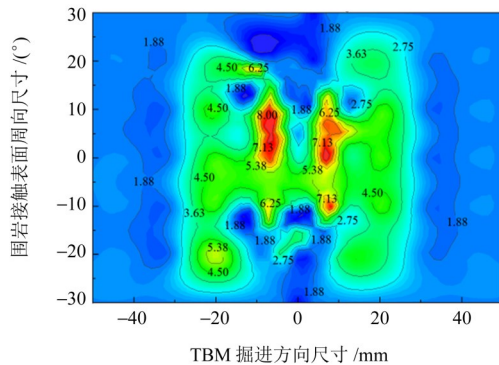
图 19 岩石为 II 类围岩时,靴体与围岩完全接触时的综合应力与综合位移分布
Fig. 19 Comprehensive contact stress and comprehensive displacement distribution under full contact between shoe body and surrounding rock for type II surrounding rock

对 III 类围岩的撑靴辅助工装靴体与围岩完全接触和仅中间区域接触耦合模型分别进行求解,得到综合应力与综合位移分布。图 21 所示为岩石为 III 类围岩时,靴体与围岩完全接触时的综合应力与综合位移分布;图 22 所示为岩石为 III 类围岩时,靴体与围岩仅中间接触时的综合应力与综合位移分布。



(a) 综合应力分布图

岩石表面综合位移/mm



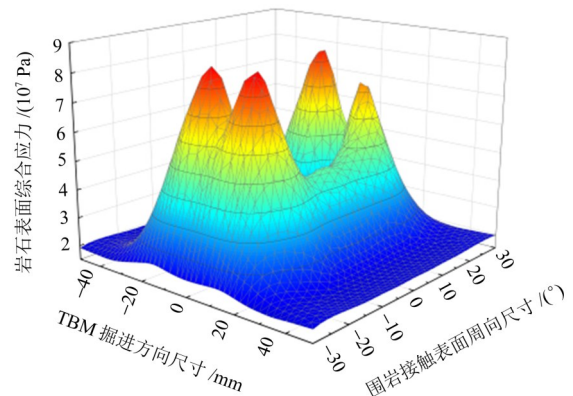
(b) 综合位移分布图

图 20 岩石为Ⅱ类围岩时,靴体与围岩仅中间接触时的综合应力与综合位移分布

Fig. 20 Comprehensive contact stress and comprehensive displacement distribution under middle-only contact between shoe body and surrounding rock for type II surrounding rock

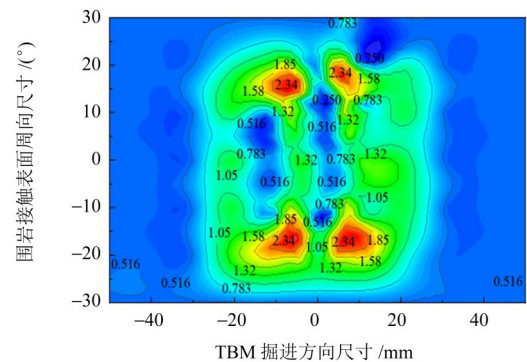
由图 21(a)可知,完全接触时,Ⅲ类围岩表面出现了 4 个综合应力峰值,其中的最大值接近 80 MPa,比Ⅰ类围岩的综合应力峰值的最大值小 38.9%,比Ⅱ类围岩小 11%;分别以 4 个峰值为参考点,综合应力呈现向四周缩小的趋势,但缩小幅度小于Ⅰ类和Ⅱ类围岩。由图 21(b)可知,在 3 个载荷的共同作用下,两靴体与围岩完全接触的综合位移云图呈对称分布,且各有 2 个峰值,最大综合位移为 2.34 mm,是Ⅰ类围岩的综合位移的 2.36 倍,是Ⅱ类围岩的 1.23 倍;撑靴辅助工装靴体与围岩接触面的综合位移主要集中在周向尺寸 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$,该范围大于Ⅰ类围岩,略大于Ⅱ类围岩。由图 22(a)可知,仅中间区域接触时,Ⅲ类围岩表面出现了 2 个综合应力峰值,其中的最大值接近 140 MPa,比Ⅰ类围岩的综合应力峰值的最大值小 31%,比Ⅱ类围岩小 7%;分别以 2 个峰值为参考点,综合应力呈现向四周缩小的趋势,但缩小幅度小于Ⅰ类和Ⅱ类围岩。由图 22(b)可知,综合位移云图呈对称分布,且有 2 个峰值,最大综合位移为 9.15 mm,是Ⅰ类围岩的最大综合位移的 2.44 倍,是Ⅱ类围岩的 1.14 倍;撑靴辅助工装靴体与围岩接触面综合位移主要集中在周向尺寸 $-30^{\circ} \sim 28^{\circ}$,该范围大于Ⅰ类和Ⅱ类围岩。总体来看,硬质岩(Ⅰ类围岩)所受的综合应力最大值大

于软质岩(Ⅱ类和Ⅲ类围岩),综合位移最大值小于软质岩;软质岩所受的综合应力和位移的集中区域大于硬质岩,说明软质岩更易发生屈服破坏和滑移变形。



(a) 综合应力分布图

岩石表面综合位移/mm

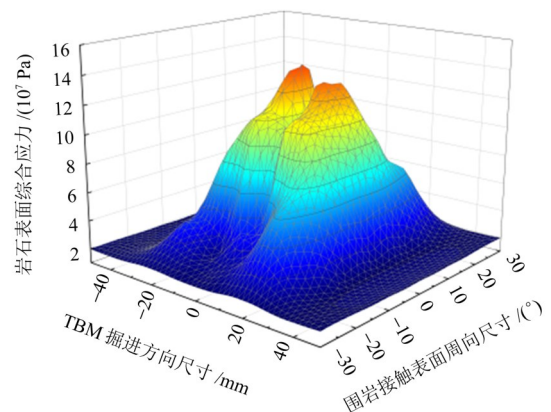


(b) 综合位移分布图

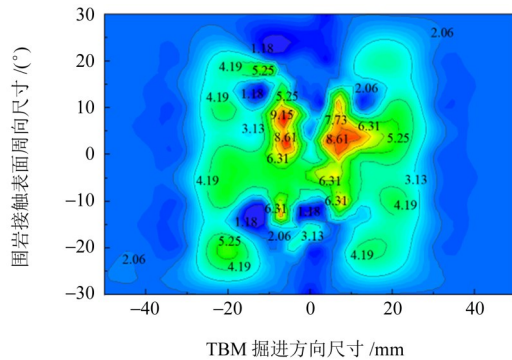
图 21 岩石为Ⅲ类围岩时,靴体与围岩完全接触时的综合应力与综合位移分布

Fig. 21 Comprehensive contact stress and comprehensive displacement distribution under full contact between shoe body and surrounding rock for type III surrounding rock

在渐变断面工况下、现场 TBM 的掘进过程中,当围岩岩性较差、撑靴辅助工装靴体与围岩间无法完全接触时,为防止作业中出现压溃围岩现象和由支撑不稳产生的相对滑移现象,可采用加垫耐磨网格的方式来增大靴体与围岩间的摩擦力和接触面积,如图 23 所示,以增大 TBM 的掘进速率,提高 TBM 的掘进稳定性。



(a) 综合应力分布图



(b) 综合位移分布图

图 22 岩石为Ⅲ类围岩时,靴体与围岩仅中间接触时的综合应力与综合位移分布

Fig. 22 Comprehensive contact stress and comprehensive displacement distribution under middle-only contact between shoe body and surrounding rock for type III surrounding rock



(a) 耐磨网格

(b) 加垫耐磨网格的围岩

图 23 耐磨网格与加垫耐磨网格的围岩

Fig. 23 Wear-resistant grids and surrounding rock with cushioned wear-resistant grids

5 结论

基于撑靴辅助工装靴体与围岩微观接触力学模型,建立撑靴辅助工装在不同工作状态下与围岩的耦合接触模型,探究靴体与围岩间的贴合角度、靴体与围岩表面接触面积、不同岩石类型对耦合力学特性的影响,得到以下主要结论:

1) 靴体与围岩耦合的综合应力、法向接触应力、综合位移均随贴合角的增大而增大,当贴合角由 0° 增至 30° 时,综合应力和法向接触应力分别增大了10.5%、9%,综合位移增大了4倍左右。以上结果表明,在靴体与围岩的耦合接触中,随贴合角的增大,两表面间产生滑移的可能增大。

2) 在Ⅰ类围岩中,与完全接触状态相比,当靴体与围岩仅中间区域接触时,接触面的综合应力最大值增大至完全接触时的1.55倍;法向接触应力最大值增大至完全接触时的1.73倍;围岩平均位移增大至完全接触时的3.79倍;表明接触面积减小会显著加剧围岩受力集中与变形,增加压溃和滑移风险。

3) 当耦合接触参数相同时,Ⅰ类围岩所受的综合应力的最大值大于Ⅱ、Ⅲ类围岩,综合位移的最大值小于Ⅱ、Ⅲ类围岩;Ⅱ、Ⅲ类围岩所受综合应力和综合位移的主要集中区域大于Ⅰ类围岩,说明软质岩更易发生屈服破坏和滑移变形。

参考文献(References)

- [1] 徐尤南,陈洁,刘志强. TBM推进机构静刚度建模与灵敏性分析[J]. 机械强度,2022,44(4):901-910.
Xu Younan, Chen Jie, Liu Zhiqiang. Static stiffness modeling and sensitivity analysis of TBM propulsion mechanism[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 901-910. (In Chinese)
- [2] 陈玉羲,龚国芳,石卓,等. 基于施工数据的TBM支撑推进协调控制系统[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(2):250-257.
Chen Yuxi, Gong Guofang, Shi Zhuo, et al. Coordinated control of gripper and thrust system for TBM based on construction data[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(2): 250-257. (In Chinese)
- [3] Zhang Q, Qu C Y, Kang Y L, et al. Identification and optimization of energy consumption by shield tunnel machines using a combined mechanical and regression analysis [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2012, 28: 350-354.
- [4] 饶云意,龚国芳,杨华勇. 单对水平支撑TBM支撑推进协调控制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(3):666-674.
Rao Yunyi, Gong Guofang, Yang Huayong. Coordinated control of gripper and thrust system for single gripping TBM[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(3): 666-674. (In Chinese)
- [5] Zhang K Z, Yu H D, Liu Z P, et al. Dynamic characteristic analysis of TBM tunnelling in mixed-face conditions[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(7): 1019-1031.
- [6] 郑冰冰. 先导式双护盾TBM推进系统开发与性能仿真分析[D]. 西安:西安理工大学,2018:57-60.
Zheng Bingbing. Development and performance simulation analysis of pilot dual shield TBM propulsion system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018: 57-60. (In Chinese)
- [7] 王宏,崔杰. NGVM模型及其在城市群道路网交通事故预测中的应用[J]. 价值工程,2016,35(2):200-202.
Wang Hong, Cui Jie. Novel grey verhulst prediction model and its applications in predicting traffic accidents of urban road network [J]. Value Engineering, 2016, 35(2): 200-202. (In Chinese)
- [8] 游金虎,谢韬,刘永胜,等. TBM隧道撑靴侧壁围岩承载分析与不良地质处理[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(增刊1):473-479.
You Jinhu, Xie Tao, Liu Yongsheng, et al. Bearing analysis of tunnel surrounding rocks for tunnel boring machine gripper and treatments of unfavorable geology[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S1): 473-479. (In Chinese)
- [9] 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,2017,46(1):90-92.
Li Wei, Zhu Yuzhen, Guo Weipeng. Contact simulation analysis of two ends of TBM boots and surrounding rocks [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017, 46(1): 90-92. (In Chinese)
- [10] Hasanpour R. Advance numerical simulation of tunneling by using a double shield TBM[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 57: 37-52.
- [11] Zhao K, Janutolo M, Barla G, et al. 3D simulation of TBM excavation in brittle rock associated with fault zones: the Brenner exploratory tunnel case [J]. Engineering Geology, 2014, 181: 93-111.
- [12] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Dynamic analysis of tunnel in weathered rock subjected to internal blast loading [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(11): 4441-4458.

- [13] Liao J F, Zhu X C, Yao B. Dynamic modeling of gripper type hard rock tunnel boring machine [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 166-179.
- [14] Wang K, Yang Y H, Shen Z G, et al. Research on the experimental test system of TBM gripping-thrusting-regripping mechanism [C]// *Proceedings of the 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*. Piscataway: IEEE, 2016: 1-5.
- [15] 张登, 王子寒, 肖成志. 岩土球形颗粒体粒间接触力学特性及接触模型验证[J]. *河北工业大学学报*, 2024, 53(1): 89-96.
- Zhang Deng, Wang Zihan, Xiao Chengzhi. The inter-particle contact mechanical characteristic and contact model verification of geotechnical spherical particles [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2024, 53(1): 89-96. (In Chinese)
- [16] 夏冰新, 李继平, 于联周, 等. 粗糙微观表面引起的模态耦合系统响应分析[J]. *机械强度*, 2023, 45(6): 1301-1308.
- Xia Bingxin, Li Jiping, Yu Lianzhou, et al. Response analysis of modal coupling system caused by rough micro surface [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2023, 45(6): 1301-1308. (In Chinese)
- [17] 钱进, 陈果, 赵正大, 等. 管路连接件粗糙表面接触力学与密封性能分析[J]. *润滑与密封*, 2024, 49(5): 112-119.
- Qian Jin, Chen Guo, Zhao Zhengda, et al. Analysis of contact mechanics and sealing performance of rough surface of pipeline joints [J]. *Lubrication Engineering*, 2024, 49(5): 112-119. (In Chinese)
- [18] 王尧, 管恩广, 张青雷. 弹塑性接触冲击永久变形与滑移长度的解析求解[J]. *中国机械工程*, 2024, 35(8): 1381-1389.
- Wang Yao, Guan Enguang, Zhang Qinglei. Analytical solution of permanent deformations and sliding lengths during the elasto-plastic oblique contact-impacts [J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(8): 1381-1389. (In Chinese)
- [19] 邓铭江, 谭忠盛. TBM 隧洞围岩分级方法及支护体系研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2024, 44(2): 205-224.
- Deng Mingjiang, Tan Zhongsheng. Study on surrounding rock classification and supporting systems of TBM tunnels [J]. *Tunnel Construction*, 2024, 44(2): 205-224. (In Chinese)

Analysis of coupling characteristics between the supporting boot auxiliary tooling and surrounding rock of TBM under gradual section condition

MA Xiuquan MIAO Chong XIE Miao WANG Haonan

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problems including insufficient research on auxiliary supporting equipment under the new working condition of variable cross-section, and the failure of existing tunnel boring machine (TBM) supporting and propelling mechanisms to meet the operational requirements of such new conditions, the contact mechanical behavior between shoe auxiliary equipment and surrounding rock was analyzed, and the mechanical parameters such as comprehensive stress and comprehensive displacement of the contact zone were obtained to evaluate the stability of tooling and the overall tunneling efficiency of TBM, providing a reference for the design of engineering equipment. [Methods] Firstly, coupled contact models between shoe auxiliary tooling and surrounding rock under various supporting states were established based on the construction condition of the drainage gallery with variable cross-section at the Jinyun pumped storage power station in Zhejiang province. Secondly, the influences of tooling elongation, fitting angle between tooling shoe body and surrounding rock, contact area between tooling shoe body and surrounding rock surface, and different rock types on coupled mechanical characteristics were investigated. Finally, distribution diagrams of comprehensive stress, normal contact stress and comprehensive displacement on the contact surface between auxiliary tooling shoe body and surrounding rock were plotted, and a comparative analysis of contact-coupled mechanical characteristics between shoe auxiliary tooling shoe body and surrounding rock under different supporting states and working conditions was carried out. [Results] The results show that the distributions of comprehensive stress and normal contact stress are uneven with obvious abrupt changes when the tooling shoe body is in full contact with surrounding rock. The maximum comprehensive displacement between the two surfaces rises with the increase of the fitting angle. When the shoe body only contacts surrounding rock at the middle region, the corresponding values of comprehensive stress, normal contact stress and maximum comprehensive displacement of surrounding rock are all larger than those under full contact. With identical coupled contact parameters, the maximum comprehensive stress borne by type I surrounding rock is higher than that of type II and type III surrounding rock, while its maximum comprehensive displacement is lower. The main concentration zones of comprehensive stress and comprehensive displacement of type II and type III surrounding rock are wider than those of type I surrounding rock, which indicates that soft rock is more prone to yield failure and sliding deformation.

Key words: Gradient section condition; Auxiliary tooling for supporting boots; Rigid-flexible coupling; Contact characteristic; Surrounding rock deformation

Corresponding author: MIAO Chong, E-mail: 1484224355@qq.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (51874158); Key Tackling Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJ2019ZL003)

Received: 2024-11-05 Revised: 2024-11-22

(编辑:刘星泽)