

城市轨道交通单护盾 TBM 刀盘掘进数值模拟

武玉娇¹, 詹金武¹, 郑晋溪², 邵顺安², 刘国¹, 杨炽誉¹

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建省建筑工程质量检测中心有限公司, 福建 福州 350118)

摘要: 依据福州滨海快线实测数据, 利用有限元软件对刀盘掘进进行数值模拟, 分析了不同掘进速度、不同转矩下刀盘的受力。结果表明: 岩石越坚硬, 刀盘的掘进速度越低, 刀盘的转矩和旋转速度越高; 随着极径增大, 刀轴的应力平均值逐渐增大, 刀盘的应力平均值呈现先增大后减小的趋势, 极径大的刀轴处和刀盘中间位置易受到破坏; 刀盘始发阶段易受到冲击荷载, 其应力值较大, 之后应力逐渐递减, 最后趋于稳定。

关键词: TBM 隧道; 刀盘破岩; 掘进速度; 刀盘转矩; 有限元分析

中图分类号: U455.3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)03-0245-09

Numerical simulation of single shield TBM cutterhead excavation in urban rail transit

WU Yujiao¹, ZHAN Jinwu¹, ZHENG Jinxi², SHAO Shun'an², LIU Guo¹, YANG Chiyu¹

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Testing Center of Construction Engineering Quality Co., Ltd., Fuzhou 350118, China)

Abstract: Based on the measured data of Fuzhou Binhai Expressway, the finite element software was used to numerically simulate the cutterhead excavation. The force analysis of the cutterhead was carried out under different excavation speeds and torques. Analysis shows that the harder the rock, the lower the excavation speed of the cutterhead, and the higher the torque and rotation speed of the cutterhead; as the pole diameter increases, the average stress value of the cutter shaft gradually increases, and the average stress of the cutter head increases first and then decreases. The cutter shaft and the middle position of the cutter head with larger pole diameters are prone to damage; during the initial stage of the cutterhead, it is susceptible to impact loads, resulting in high stress values. Subsequently, the stress gradually decreases and eventually stabilizes.

Keywords: TBM tunnel; cutterhead breaking rock; excavation speed; cutterhead torque; finite element analysis

盾构掘进过程中通过刀轴将岩石的反作用力传递给刀盘, 使刀盘在掘进过程中承受多点强冲击破岩载荷, 且盾构在中、微风化凝灰岩、局部洞口风化层及洞身破碎带为强风化凝灰岩地带, 容易发生设备卡机栽头、管片错台等风险事件, 因此, 有必要对该类地质下刀盘受力进行数值模拟分析^[1], 为类似工程提供理论依据。

国内外专家针对刀盘破岩的受力及数值模拟进行了一系列研究, Cui 等^[2] 分析了两个不同地层隧道掘进关键参数的差异, 建立的三维有限差分模型在精度和效率方面具有较好的性能。Li 等^[3] 通过旋转岩石切削的数值计算, 发现随刀具安装半径的增加, 法向力和滚动力以及滚动力的切削系数都会增加, 侧向力减小。石晓阳等^[4] 建

收稿日期: 2024-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52008111); 福建省自然科学基金资助项目(2022J05185); 福建工程学院科研启动基金资助项目(GY-Z19096)

第一作者简介: 武玉娇(1998—), 女, 甘肃民乐人, 硕士研究生, 研究方向: 岩土工程。

通信作者: 詹金武(1989—), 男, 福建莆田人, 副教授, 博士, 研究方向: 岩土工程、地下工程。

立了刀盘数值模型,验证了随着刀盘掘进深度增加,应力最大值呈增加趋势。孙文喆等^[5]利用 BP 神经网络算法创建了一个收集数据的 TBM 刀盘比能预测模型,将不同围岩类型作为神经网络的输入参数。高峰等^[6]将刀盘推力、刀盘转矩等对应的围岩等级作为输入特征,对稳态段贯入度和刀盘转速进行优化决策,确定了 2 个源域子模型的最优超参数组合。张佳琦等^[7]建立了岩土有限元模型用于刀盘掘进的数值模拟,得到岩土掌子面形貌和刀盘刀具的法向力荷载时程曲线及分布规律。杨振兴等^[8]针对软硬不均地层的承载力容许值和面积比提出了受力计算方法,避免耦合作用下受力的复杂性。顾刚等^[9]基于连续-非连续单元法建立数值模拟。本文基于福州滨海快线的实测数据分析结果,通过有限元软件开展刀盘受力分析的数值模拟研究,分析刀盘在不同掘进速度下的 Mises 应力和不同转矩下刀盘的应力应变情况,研究成果可为类似工程提供参考。

1 工程概况

选取福州滨海快线项目祥谦至首占站区间,隧道沿线大部分为中、微风化凝灰岩,局部洞口风化

层及洞身破碎带为强风化凝灰岩,线路穿越 4 处节理密集带与 3 处断层,岩体破碎,裂隙极发育,周边环境复杂,本工程 TBM 区间最小曲线半径为 2 100 m,围岩等级大多在Ⅲ~Ⅴ级,天然状态岩石单轴抗压强度 31.90~135.32 MPa,其中Ⅴ级围岩以强风化凝灰岩及中风化凝灰岩为主,少部分为断层破碎带和节理密集带,岩石单轴抗压强度 31.90~135.32 MPa,占比 23.5%;Ⅳ级主要为中风化~微风化凝灰岩,节理裂隙较发育,岩石较完整~较破碎,岩芯多呈短柱状及块状,在拱部无支护时可能产生较大坍塌,侧壁有时会失稳,占比 23.9%;Ⅲ级主要为微风化凝灰岩,岩石强度较高,为坚硬岩,岩体节理裂隙稍发育,岩芯多呈短柱状,围岩在拱部无支护时可能产生局部小坍塌,侧壁基本稳定,占比 19.1%,由于软弱围岩占比很大,并且撑靴无法撑住洞壁的隧道时,综合考虑采用单护盾 TBM 进行隧道掘进施工,主要由刀盘、主驱动(电动机、减速机、小齿轮、大齿圈、主轴承、机头架)、护盾、推进缸和主机皮带机构成,主机后面设置管片安装器。管片外径 8.3 m,内径 7.5 m,主机长度 12 m,最小转弯半径为 350 m,盾构机的最大推进速度为 100 mm/min,最大推力和转矩为 81 895 kN 和 20 394 kN·m。

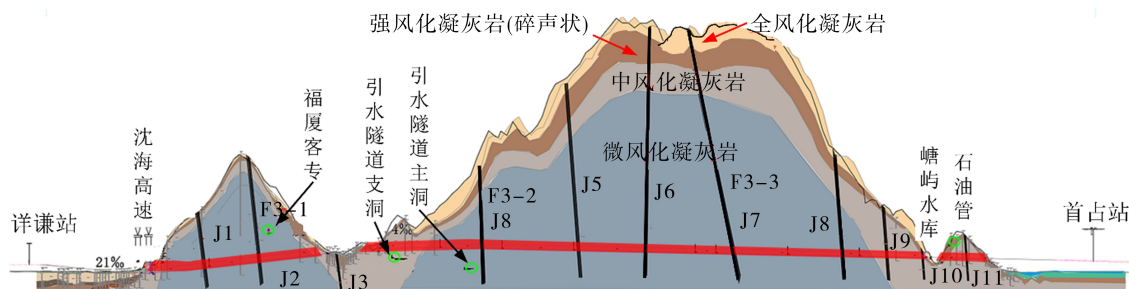


图 1 祥谦站~首占站区间各段落长度

Fig.1 Length of each section between Xiangqian Station and Shouzhanchan Station

隧道掘进过程中参数的选取和控制对隧道掘进效率、刀盘保护、刀具磨损控制以及地表沉降至关重要。本文基于滨海快线 2 标 2 工区实测数据,对刀盘转速和转矩进行统计分析,表 1 是本工程使用的盾构机刀盘参数表。

2 工程实测数据分析

2.1 不同围岩下的掘进速度分布

掘进速度直接反映盾构掘进时的效率,根据现场提供数据可知,在Ⅲ类围岩下,掘进速度主要分布在 15~35 mm/min 之间,其中最小值、最大值

和平均值分别为 5、55 和 24.9 mm/min。在Ⅳ类围岩下,掘进速度主要分布在 15~45 mm/min 之间,其中最小值、最大值和平均值分别为 12、74 和 28.7 mm/min。在Ⅴ类围岩下,掘进速度主要分布在 20~45 mm/min 之间,其中最小值、最大值和平均值分别为 12、52 和 29.3 mm/min。在坚硬的Ⅲ类围岩下,操作人员一般会选择相对较小的推进速度掘进,防止刀盘出现过度磨损或由于压力过大出现崩坏的现象。在较坚硬的Ⅳ类围岩下,操作人员选择较大的推进速度以获得最好的掘进效率,最大值达到了 74 mm/min,远大于Ⅲ类和Ⅴ类围岩。在岩

石硬度较低的地段掘进,保证围岩稳定的前提下,可适当提高掘进速度有利于缩短工期。

表 1 ZTT8600 单护盾 TBM 刀盘参数表
Tab.1 ZTT8600 single shield TBM cutterhead parameters

部件名称	参数	备注
刀盘型式、材质	4+1 分块,材质为 Q355D	
开挖直径	8 640 mm	
刀盘偏心量	15 mm	
滚刀总数	54 把	刀高 145 mm
中心滚刀数量	4 把	482.6 mm 双联
正滚刀数量	37 把	482.6 mm
边滚刀数量	13 把,最外侧 2 把同轨迹	482.6 mm
刀间距	78 mm	正面滚刀
换刀方式	背装式	
铲斗数量	8 个	出渣方向为双向
铲刀数量	202 把	
人孔数量	2 个	φ550 mm
喷水口数量	10 个	

2.2 不同围岩下的刀盘转矩分布
在盾构掘进过程中,转矩通常包括切割土壤

的阻力扭、刀盘的旋转阻力转矩、由刀盘推力产生的反转矩、由密封装置产生的摩擦转矩、刀头前后表面的摩擦转矩、刀盘开口的剪切力矩等。本文主要研究盾构掘进过程中,刀盘转矩在不同围岩下的分布,从现场提供数据可知,Ⅲ类围岩的转矩主要分布在 3 000~3 600 kN·m 之间,其中最小值、最大值和平均值分别为 2 000、4 100 和 3 341.7 kN·m,Ⅳ类围岩的转矩主要分布在 3 000~4 200 kN·m 之间,其中最小值、最大值和平均值分别为 1 800、5 400 和 3 407 kN·m,Ⅴ类围岩的转矩主要分布在 1 600~3 450 kN·m 之间,其中最小值、最大值和平均值分别为 1 390、3 450 和 2 686.8 kN·m,且各转矩出现次数相差不大。

通过对施工现场刀盘转矩的统计分析,分别绘制了 3 类围岩的刀盘转速统计图,如图 2 所示。

转矩与围岩坚硬程度应呈正相关,但操作人员在Ⅲ类围岩下设置了比Ⅳ类围岩小的推进速度,且Ⅲ类围岩和Ⅳ类围岩的刀盘转速相差不大,所以图 2 中Ⅲ类围岩转矩略小于Ⅳ类围岩转矩。围岩的坚硬程度降低,破岩需要的转矩变小,Ⅴ类围岩相较于Ⅲ类围岩和Ⅳ类围岩的转矩呈现大幅降低,其转矩的主要分布范围也相对较小刀盘转矩与掘进速度成正比关系,且随着岩石坚硬程度的增加,掘进速度的提升也随刀盘转矩增大而增大。

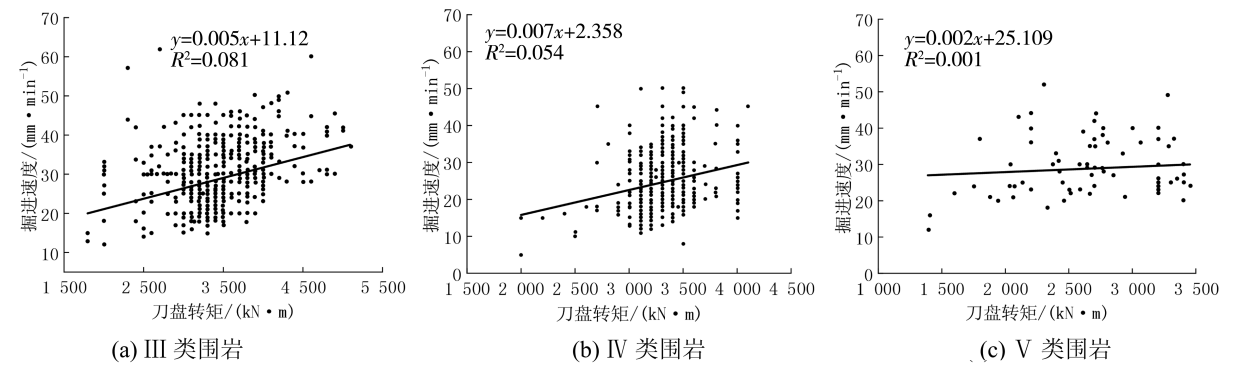


图 2 各类围岩下的刀盘转矩统计图
Fig.2 Statistical chart of cutterhead torque under various types of surrounding rocks

3 刀盘掘进数值模型创建

3.1 岩体模型

岩石根据弹性模量、密度、单轴抗压强度的不同,表现出不同的岩石力学性质,根据 ABAQUS 有限元软件的特点,岩石材料选用扩展的 drucker-prager 模型(简称 D-P 模型),为了简化模型,只

截取岩石的一部分,并对刀盘与岩石接触部分进行局部细化。岩石模型为 400 mm×300 mm×150 mm(长×宽×高)的长方体块、六面体网格,节点总数为 129 605 个,单元总数为 102 400 个。力学响应选取Ⅳ类围岩。工程沿线大部分在中、微风化凝灰岩中穿越,局部洞口风化层及洞身破碎带为强风化凝灰岩地带,鉴于其地质离散非连续的特

性,利用有限元软件模拟刀盘破岩过程,分析刀盘受力情况。

根据滨海快线所提供的岩石材料参数,设置 ABAQUS 软件所需参数,表 2 为 IV 类围岩力学参数。

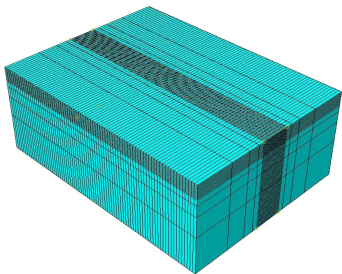


图 3 岩石网格模型划分

Fig.3 Rock mesh model partitioning

表 2 IV 类围岩力学参数值

Tab.2 Mechanical parameter values of Class IV surrounding rock

力学参数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	凝聚力/ MPa	泊松比
数值	2 500	39.65	70.1	7.66	5.65	0.23

3.2 刀盘模型

刀盘的剖分形式为中方五分式,滚刀布置形式为星形+随机型,极径为滚刀到刀盘圆心的距离,极角为各滚刀在刀盘上的方位,1~8 号滚刀均为双联中心滚刀,分别是 1&3、2&4、5&7 和 6&8 共 4 组,在刀盘圆心周围;其余为正滚刀,共 37 把,图 4 为刀盘结构形式及各滚刀的平面布置示意图。

数值模拟重点为刀盘的中心滚刀和正滚刀在破岩过程的载荷情况,刀具不考虑边缘滚刀,刀盘简化为一个平面,其中中心滚刀 4 把(均为双联滚刀),正滚刀 37 把。利用 SolidWorks 软件对已简化的模型进行三维建模,再通过 .x_t 格式导入 ABAQUS 中。

刀盘的网格划分选取四面体单元,节点总数为 93 417 个,单元总数为 59 404 个。盘形滚刀均为 19in(直径 483 mm),网格划分选取四面体单元,节点总数为 1 931 个,单元总数为 1 055 个。单元类型:C3D8R。

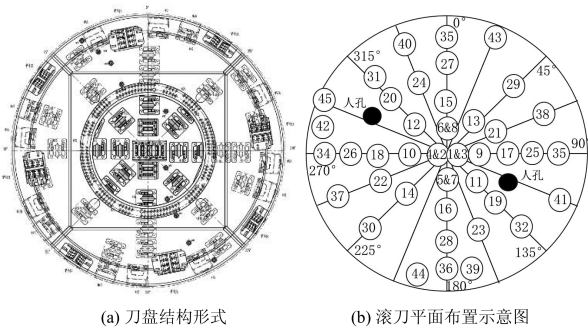


图 4 刀盘结构形式及滚刀平面布置示意图

Fig.4 Schematic diagram of cutterhead structure and rolling cutter plane layout

刀盘材质为 Q355D(低合金高强度结构钢),材料密度为 7.85 g/cm^3 ,刀盘的弹性模量 210 GPa,泊松比 0.3,岩石的围岩类别为Ⅲ类围岩。

3.3 分析步与边界条件设置

在初始分析步(Initial)后面创建显示动力学分析步 Step-1,在显示动力学分析步中打开几何非线性,时间和质量缩放系数均保持软件默认值。刀盘与岩石之间采用包括单元删除函数的剪切破坏准则来避免土壤单元网格畸变,复杂非线性问题的 ABAQUS/Explicit 显示算法用于模拟刀具在刀盘上的切削过程。(1)在初始状态下刀盘即将与岩体接触;(2)刀盘的转速为 3.82 r/min;(3)掘进速度为 22~27 mm/min。

本文主要研究掘进速度和转矩的变化对刀盘受力的影响,不考虑刀盘自身受力产生的微小形变和磨损,因此,将刀盘作为刚体研究,参考点 RP 为滚刀的几何中心点。力学约束公式选择罚接触方法,滑移公式选择有限滑移。接触属性中的切向行为选择摩擦公式为罚,摩擦系数为 0.3,法向行为选择硬接触,其余选择软件默认值。将刀盘框架固定住,约束 x 、 y 、 z 3 个方向的位移量和转动量,滚刀与刀盘采取通用接触,在刀盘未破坏的情况下,刀盘的位移量相当于变量。

4 刀盘数值模拟结果分析

4.1 不同掘进速度下刀盘受力分析

提取盾构机在 3 类围岩下掘进过程中记录的不同掘进速度用于数值模拟的参数设计,综合考虑模拟效果和时间因素,本次模拟时间为 1 s,模拟完成时,刀盘各位置的位移情况如图 5 所示。由图可见,随着滚刀离旋转中心的距离增加,在同

等角速度下,外围滚刀的转动速度和切削距离都更大。

选择 4 个时间节点的刀盘 Von Mises 应力云图,分析刀盘受力情况,掘进速度 24 mm/min 时的应力云图,如图 6 所示。

由图可知,应力在 $t=0.25\text{ s}$ 时最大,此时为刀盘掘进始发阶段,刀盘和岩石突然接触产生较大的冲击荷载,且掘进速度越大,应力也越大,之后应力逐渐减小,最后应力稳定在 45 MPa 左右。从图中可看出,刀盘外边缘处应力较大,因此,在刀盘制作过程中可加大对刀盘边缘的加固。

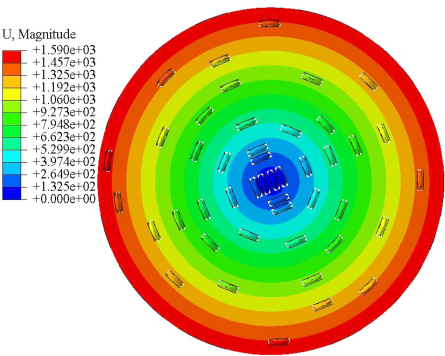


图 5 $t=1\text{ s}$ 时各位置的位移情况
Fig.5 Displacement of each position when $t=1\text{ s}$

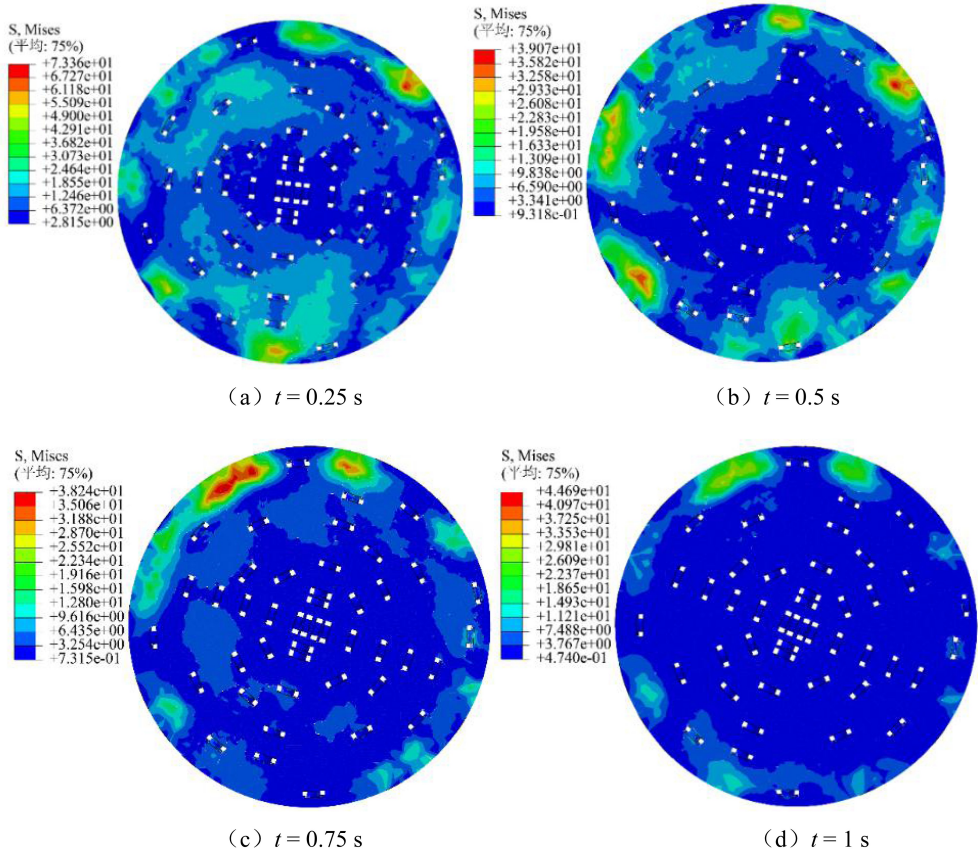


图 6 掘进速度 24 mm/min 的刀盘 Von Mises 应力云图
Fig.6 Von Mises stress cloud map of cutterhead with an excavation speed of 24mm/min

随着刀盘掘进岩石,下方岩石逐渐破碎,且随着掘进速度增加,应变区域也逐渐增大,如图 7 所示,由于模拟时间较短,各滚刀间的破碎区域还未贯通。

TBM 在掘进速度为 24 mm/min 时,岩石的等效塑性应变图如图 8 所示。刀盘转速 3.82 r/min,总时间 6 s,分别选取岩石 4 个时间点的等效塑性应变图,随着掘进的进行,岩石的破碎区域增

加,相邻滚刀间的破碎岩石逐渐贯通,岩石成片破碎。

在场输出里面,分别选取 11、12、19、20、31 和 32 号滚刀与刀盘相接触的单元,即各个滚刀刀轴处,6 个滚刀均在一条直线上,选取与 6 个滚刀相同极径的刀盘位置的单元,与各极径相同的滚刀代替其名称,输出各位置处的应力-时间历程曲线,如图 9 所示。

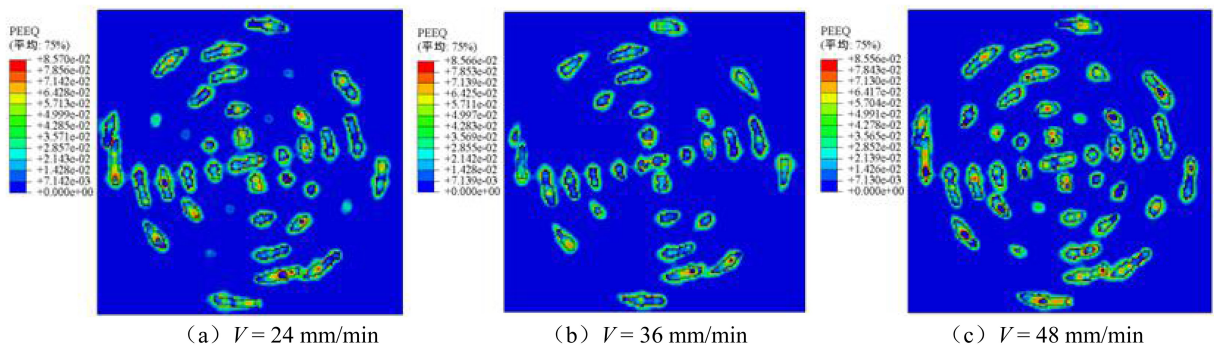


图 7 不同掘进速度下的岩石等效应变图

Fig.7 Rock equivalent strain diagram under different excavation speeds

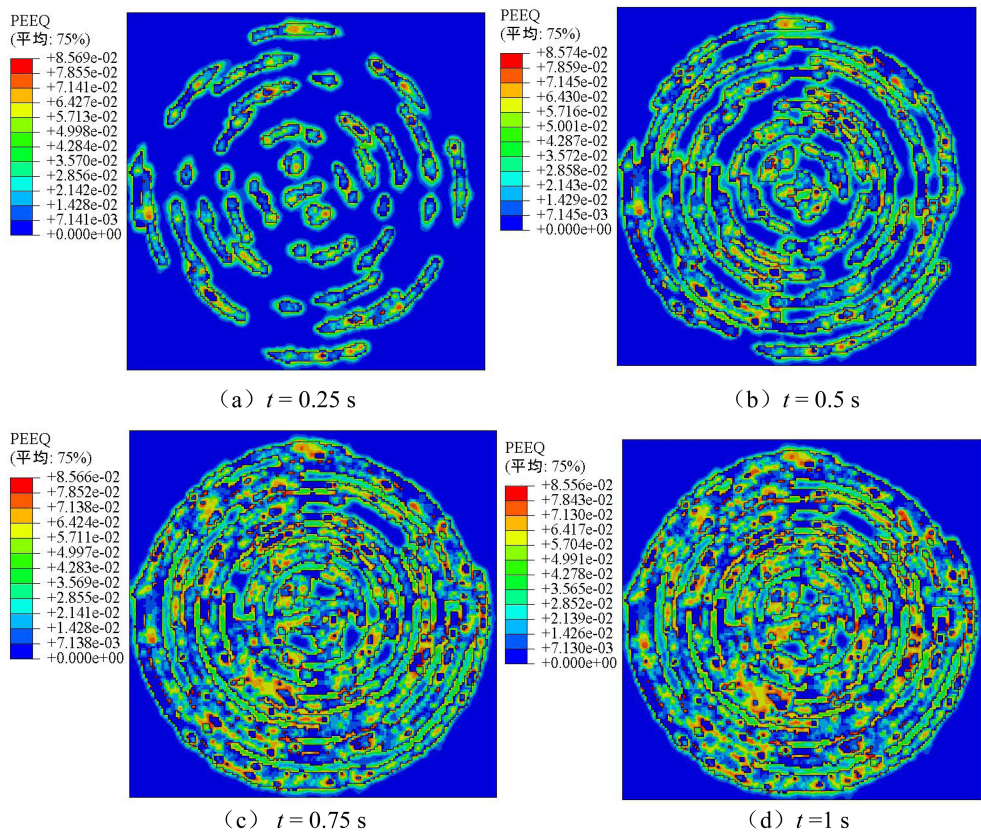


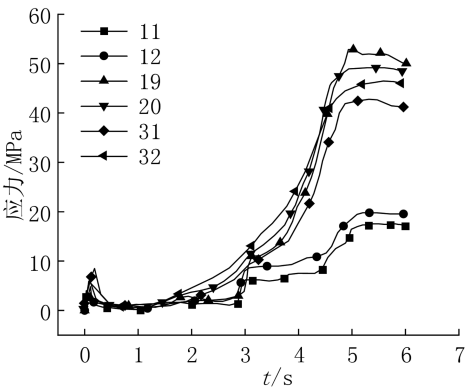
图 8 掘进速度 24 mm/min 的岩石等效塑性应变图

Fig.8 Equivalent plastic strain map of rock with excavation speed of 24mm/min

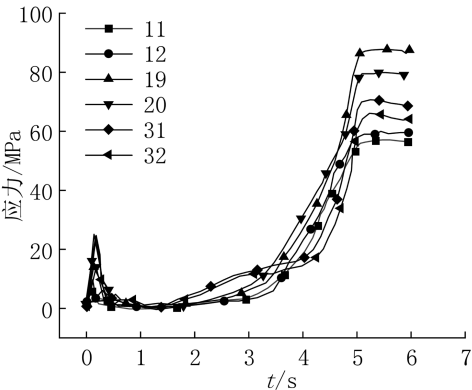
从图 9 可看出,11、12、19、20、31 和 32 号滚刀与刀盘接触单元处应力为 6、8、17、19、23、24 MPa,由于刀盘刚开始掘进,各个位置的应力较大,此时为刀盘与岩石刚接触时的冲击荷载。当掘进时间在 0~3 s 时,11、12 号滚刀处应力几乎为 0,19、20 号增长到 7~8 MPa,31、32 号处应力缓慢增长到 23~24 MPa,此时掘进距离较小,刀盘各位置的应力本身较小,岩石对刀盘的反作用

力较小。3~5 s 时,11、12 号滚刀处应力最大增长到 57、59 MPa,19、20 号增长到 88、82 MPa,31 号、32 号增长到 69、72 MPa,此时随着刀盘继续掘进,滚刀下方的岩石塑性变形加剧。5~6 s 时,刀盘和刀轴处的应力基本稳定,11、12、19、20、31 和 32 号滚刀处应力分别在 58、60、89、84、71、65 MPa 范围内上下波动,此时由于滚刀已经深入岩体,基本达到了岩石破坏的程度,随着掘进的进行,部分岩

石损伤破坏,导致对滚刀的应力呈现上下波动的情况。



(a) 刀轴应力



(b) 刀盘应力

图 9 刀盘刀轴应力-时间历程曲线

Fig.9 Stress-time history curve of cutterhead and cutter shaft

将不同极径下的刀盘、刀轴处的应力值汇总,得到各位置处的平均值与最大值,如表 3 所示。

由表 3 可知,随着滚刀极径的增大,滚刀受到岩石反作用力的平均值也在逐渐增大,传递给刀轴的应力增大,刀轴处应力的最大值也增大。在刀盘处的应力平均值和最大值基本呈抛物线型的变化趋势,在 19、20 号处刀盘应力最大,由于刀盘的应力均是滚刀经过刀轴传递给刀盘的,刀盘外缘滚刀数量较少,且刀盘圆心周围的刀轴处应力较小,因此,刀盘的应力呈现出中间大两边小的变化趋势。分别对比各极径位置处的刀轴与刀盘应力平均值及最大值可知,在极径小于 31 时滚刀较多,传递给刀盘的应力相互叠加,刀盘应力的平均值和最大值均大于刀轴处,在极径大于 31 时滚刀较少,传递给刀盘的应力相互叠加的影响较小,针对刀盘上滚刀设置较密实处出现的应力集中现象,

对该区域滚刀外刃材料加强处理,刀刃处圆滑处理,避免出现崩坏情况,减少换刀检修频次,在刀盘容易产生裂纹处加强对裂纹或焊接缺陷的检测,防止刀盘开裂和失效。此次模拟刀盘应力的平均值和最大值均小于刀轴处,刀盘和刀轴处的应力均小于刀盘的屈服强度 355 MPa,可安全掘进。

表 3 不同滚刀位置的载荷分布情况
Tab.3 Load distribution at different positions of rolling cutters

位置	平均值		最大值	
	刀轴应力	刀盘应力	刀轴应力	刀盘应力
11	6.52	16.89	22.16	61.29
12	7.25	22.05	20.23	77.47
19	11.80	26.94	52.73	92.35
20	16.07	24.57	49.74	95.03
31	16.36	22.58	54.00	81.86
32	24.89	13.84	74.29	71.41

刀盘上刀具的磨损情况也基本与对应应力分布规律相契合:岩石与刀具之间极易产生不稳定的冲击荷载,因此产生应力集中现象的地方对刀盘产生磨损更为明显,导致过度乃至非正常磨损,在复合地层应选择合适掘进速度,使刀盘能够充分破碎岩体,有效减少刀盘上磨损,对于外侧刀具,可通过增设先行刀来防止过度磨损。从数值模拟结果发现刀盘推进速度对动态开挖过程的影响,以较低的速度掘进,无法对盾构开挖造成的额外损失提供及时的支撑,导致附近地层的沉降增加。在较高的推进速度下,刀盘切割土壤的比例降低,盾构可能变得无效,在实际工程中需及时调整合适的掘进速度。

4.2 不同刀盘转矩下刀盘应力应变分析

岩石对刀盘的旋转阻力主要是通过滚刀传递的,可将转矩施加在各个滚刀上,进而传递到刀盘上,以此来分析刀盘在不同转矩下的应力应变情况。将所有刀具均耦合在各自的几何中心的参考点上,根据现场统计数据分析,分别将最大转矩 (5 400 kN · m) 和施工中最常用的转矩 (3 400 kN · m) 直接加载在各个滚刀的参考点上,根据刀盘的极径和滚动力值,对 1 号到 45 号施加由小到

大的转矩值,加载方式如图 10 所示,分析转矩对刀盘应力应变的影响。

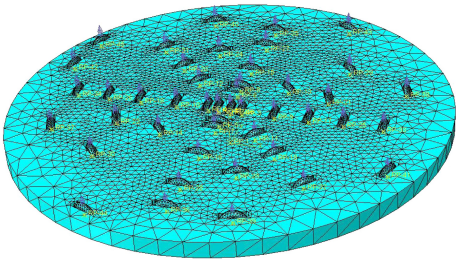


图 10 刀盘施加转矩的模型

Fig.10 Model of torque applied to cutterhead

图 11 为转矩 3 400 和 5 400 kN · m 时的刀盘应力应变图。

由图 11 可知,刀盘几乎未变形,可安全掘进。统计场输出数据,场输出和历程输出的分析步时长均为 0.01 s⁻¹,分析刀盘在施加转矩过程中每一分析步时间的最大位移和最大应力。表 4 为不同刀盘转矩下的位移与应力对比数据。

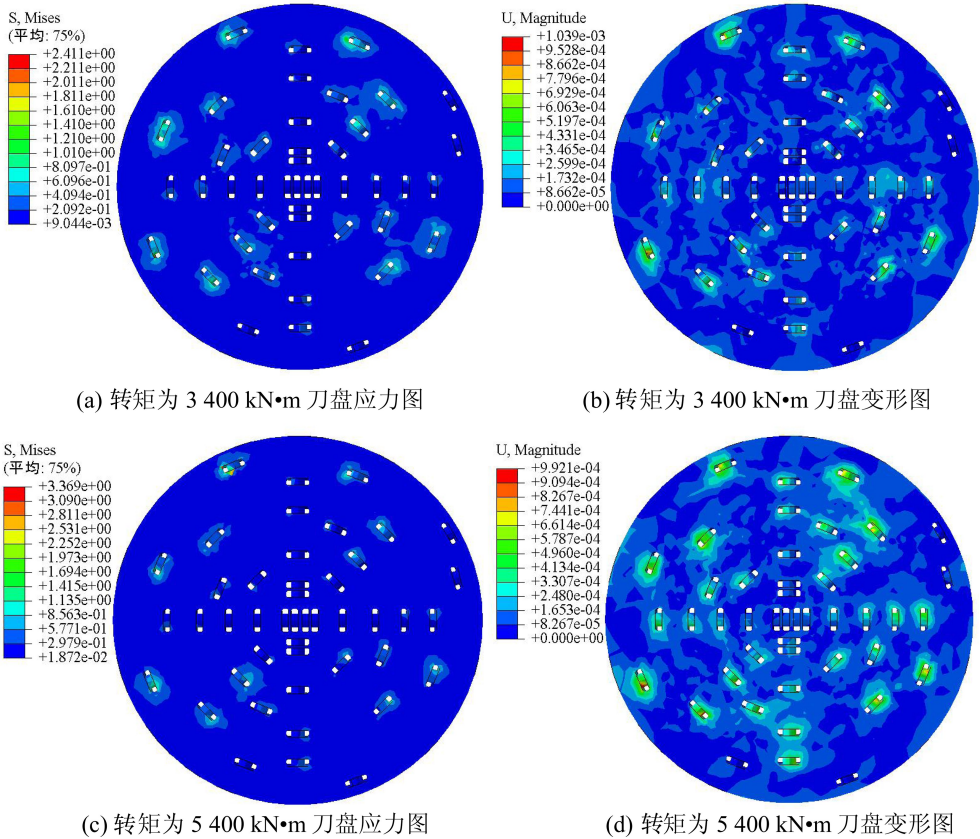


图 11 转矩为 3 400 kN · m 和 5 400 kN · m 时的刀盘应力应变图

Fig.11 Stress-strain diagrams of cutterhead at torques of 3 400 kN · m and 5 400 kN · m

表 4 不同刀盘转矩下的位移与应力对比数据

Tab.4 Comparison data of displacement and stress under different cutterhead torques

刀盘转矩/ (kN · m)	位移/ μm			应力/MPa		
	最大 值	最小 值	平均 值	最大 值	最小 值	平均 值
3 400	2.181	0.828	1.236	5.453	2.287	3.687
5 400	2.695	0.979	1.412	6.366	2.801	3.914

由表 4 可知,刀盘转矩增大,刀盘的应力与位移在最大值、最小值以及平均值上均更大,刀盘承受更大的压力,但刀盘中最大的应变量和应力值均在正常掘进可接受的范围,几乎对刀盘不会造成损伤。

在现场统计的掘进速度和刀盘转矩分析结果基础上,数值模拟得到的结果与现场实际情况基

本一致,整个推进过程盾构机推力和转矩均未出现异常波动,并都小于盾构机的额定推力和转矩。

5 结论

1) 刀盘转矩与掘进速度成正比关系,且随着岩石坚硬程度的增加,在刀盘转矩增大时,掘进速度的提升速度越来越快在保证围岩稳定的前提下,适当提高掘进速度有利于缩短工期,操作人员通过不断控制掘进速度的大小,来避免刀盘出现卡机或者滚刀过度磨损的情况。

2) 刀盘掘进破岩过程中,随着极径增大,刀轴的应力平均值和最大值逐渐增大,刀盘的应力

平均值和最大值呈现先增大后减小的趋势,掘进过程中最容易受到破坏的地方是极径大的刀轴处和刀盘中间位置,应及时对该区域滚刀外刃适当进行材料加强处理,在刀盘容易产生裂纹的危险位置加强对裂纹或焊接缺陷的检测,以有效防止刀盘开裂和失效。

3) 在刀盘始发阶段,盘形滚刀整体易受到冲击荷载,其应力值较大,随后刀盘继续掘进,滚刀下方的岩石塑性变形加剧,最后随着滚刀深入岩体,刀盘应力趋于稳定,最后稳定在 45 MPa 左右,远小于刀盘 335 MPa 的许用应力,结果符合强度要求。

参考文献:

- [1] HASANPOUR R, SCHMITT J, OZCELIK Y, et al. Examining the effect of adverse geological conditions on jamming of a single shielded TBM in Uluabat tunnel using numerical modeling[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(6): 1112–1122.
- [2] CUI J, XU W H, FANG Y, et al. Performance of slurry shield tunnelling in mixed strata based on field measurement and numerical simulation[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 6785260.
- [3] LI T, ZHANG Z Y, JIA C T, et al. Investigating the cutting force of disc cutter in multi-cutter rotary cutting of sandstone: simulations and experiments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 152: 105069.
- [4] 石晓阳, 郭子琦, 夏明, 等. 复合地层土压平衡盾构刀盘掘进参数[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3956–3965.
- [5] 孙文喆, 霍艳芳, 刘建琴, 等. 基于大数据的TBM刀盘切削比能预测研究[J]. 机械设计, 2022, 39(6): 58–65.
- [6] 高峰, 黄兴, 刘泉声, 等. 基于人工神经网络多模型迁移学习的隧(巷)道机械化掘进装备控制参数自主决策方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1405–1420.
- [7] 张佳琦, 苏翠侠, 刘浩飞, 等. 一种高效的刀盘掘进过程数值模拟算法[J]. 应用力学学报, 2024(6): 1–10.
- [8] 杨振兴, 曾垂刚, 张凯, 等. 软硬不均地层对盾构刀盘受力计算方法与分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 11163–11169.
- [9] 顾刚, 颜永国, 冯春, 等. 复合地层盾构刀盘掘进速率及受力特性分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(11): 1895–1902.

(责任编辑: 陈雯)