

# 盘形滚刀对 TBM 破岩效率的影响参数分析及优化设计

周亚来<sup>1</sup>, 詹金武<sup>1</sup>, 邵顺安<sup>2</sup>, 郑晋溪<sup>2</sup>, 刘国<sup>1</sup>, 武玉娇<sup>1</sup>

(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:** 为探究盘形滚刀形式对 TBM 破岩效率的影响, 依托福州滨海快线工程项目, 利用 ABAQUS 创建盘形滚刀破岩模型, 通过优化单刃滚刀结构参数, 分析多滚刀破岩方式对掘进效率的影响。结果表明: 刃宽和贯入度对滚刀破岩的影响最大, 随着刃宽和贯入度增加, 滚刀受到的滚动力、垂直力和破岩体积逐渐增大, 并在刃宽 20 mm、贯入度 10 mm 时, 达到最佳破岩效果; 双滚刀下采用同步破岩的效率要明显高于顺次破岩, 其最优刀间距为 60 mm; 随着四滚刀回转半径增加, 滚刀受到的切向力、垂直力和合力均增大, 侧向力呈现先增大后减小的趋势, 在回转半径 350 mm 处达到最大。研究成果可为福州滨海快线项目 TBM 滚刀选型及施工方案优化设计提供依据。

**关键词:** ABAQUS 数值模拟; 滚刀结构参数; 刀间距; 回转破岩

中图分类号: U455.3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)01-0008-08

## Influence parameter analysis and optimization design of disk-shaped roller cutter on TBM rock breaking efficiency

ZHOU Yalai<sup>1</sup>, ZHAN Jinwu<sup>1</sup>, SHAO Shun'an<sup>2</sup>, ZHENG Jinxi<sup>2</sup>, LIU Guo<sup>1</sup>, WU Yujiao<sup>1</sup>

(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:** To investigate the impact of disc cutter geometry on TBM rock-breaking efficiency, based on the geological parameters of the Fuzhou Coastal Express Line project, a disc cutter rock-breaking model was created using ABAQUS. By optimizing the structural parameters of a single cutter, the effects of multiple-cutter rock-breaking methods on tunneling efficiency were analyzed. Results show that cutting width and penetration depth have the greatest impact on rock-breaking; with the increase in cutting width and penetration depth, the rolling force, vertical force and rock volume gradually increase, reaching the best rock-breaking effect when the cutting width is 20mm and penetration depth is 10mm. The efficiency of synchronous rock breaking with double disc cutters is significantly higher than that of sequential rock breaking, and the optimal cutter spacing is 60 mm. With the increase of the rotation radius of the four-disc cutter, the tangential force, vertical force and combined force acting on the hob increase. The lateral force presents an increasing trend before decreasing and reaches its maximum value at the circumference of 350mm. The research results can provide a basis for the selection of TBM cutters and the optimization design of construction schemes for the Fuzhou Coastal Express Line project.

**Keywords:** ABAQUS numerical simulation; disc cutter structure parameters; disc cutter spacing; rotary rock breaking

收稿日期: 2023-11-18

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: 周亚来(1996—), 男, 河南商丘人, 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: 岩土与地下工程领域的教研。

滚刀作为隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)破岩的核心工具,直接与岩体接触,起到破碎岩体的作用,是 TBM 损耗最为严重的部件。滚刀的破岩性能直接关系到 TBM 的掘进效率,合适的滚刀结构参数对提高 TBM 掘进效率、降低施工成本至关重要。

盘型滚刀是 TBM 应用最多的滚刀结构形式,一直是学者优化设计的重点。Teale<sup>[1]</sup> 研究发现刀刃越尖,提供的侧向抗力越小,导致滚刀更易磨损;莫振泽等<sup>[2]</sup> 发现随压头刃角增大,岩体破碎范围越大,破岩效果更好,但能耗比更高;王超等<sup>[3]</sup> 研究发现法向推力主要受刃角和岩石内摩擦角影响;谭青等<sup>[4]</sup> 借助离散单元法发现随刃宽增加,对岩体的破坏区域及侧向裂纹扩展均有提高;刘亚迪<sup>[5]</sup> 等发现随着刀间距的增大,滚刀破岩总载荷也在增大,相邻滚刀沿刀盘径向的协同破岩效果有所减弱;孙金山<sup>[6]</sup> 等研究发现双刃滚刀间的表面岩石受到强烈挤压而产生较大的拉应力使岩石更易破碎,但其破岩能耗较高;江华等<sup>[7]</sup> 通过模拟 TBM 在沙卵石地层掘进时的影响因素,发现在砂卵石地层中选用大贯入度可显著提

高掘进效率;ZHANG 等<sup>[8]</sup> 通过建立三维颗粒流多滚刀回转破岩模型,发现在复合地层条件下刀间距应先满足硬岩段掘进要求,以提高破岩效果。

上述研究通过简化切削过程,分析刀刃角、刃宽等滚刀结构参数对破岩效果的影响,但缺乏滚刀布置形式、掘进方式在相同破岩条件下的对比研究。对此,本文以福州滨海快线工程项目为例,通过对单滚刀结构参数优化,分析双滚刀破岩方式与四滚刀回转破岩方式对破岩效果的影响,为福州滨海快线隧道项目 TBM 滚刀选型及施工方案优化设计提供依据。

## 1 滨海快线项目概况

选取福州滨海快线项目祥谦站至首占站隧道区间,隧道共计穿越 4 处节理密集带与 3 处断层,岩体破碎,裂隙极发育,岩体多为中风化~微风化凝灰岩,围岩等级多为 III 类,围岩力学参数为密度 2 600 kg/m<sup>3</sup>、弹性模量 45.44 GPa、抗压强度 71.96~189.29 MPa、抗拉强度 8.85 MPa、凝聚力 5.65 MPa、泊松比 0.2。

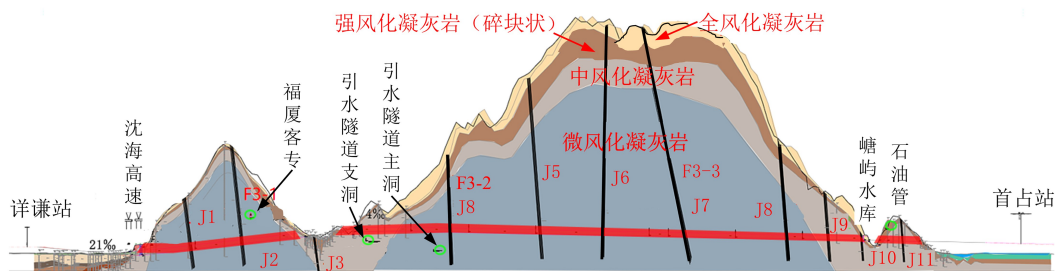


图 1 祥谦站至首占站地质概况

Fig.1 Geological overview of Xiangqian Station to Shouzhan Station

## 2 滚刀破岩数值模型建立

### 2.1 岩体模型

TBM 掘进过程中,盘型滚刀在侵入岩石时引起岩体与刀刃接触区域发生剪切破坏,随后在刀盘推进力作用下,岩体受挤压沿滚刀侧面产生裂纹,当作用力超过岩石的抗拉、抗剪强度之后裂纹扩展、贯通,随滚刀旋转挤压、切削发生脱落,如图 2(a) 所示。

滚刀破岩属于非线性动力学问题,岩石根据不同弹性模量、泊松比、屈服强度等,表现出不同的破坏特征,根据 ABAQUS/Explicit 求解模型,选用扩展的 Drucker-Prager 线性岩石本构模型(以

下简称 D-P 模型)。相比于经典的 D-P 模型,扩展的 D-P 模型包括完全弹塑性行为假定和线性屈服面,考虑到了不同岩石材料的不同特性,可以更准确地描述岩石的非线性变形行为。

在 TBM 掘进过程中,滚刀在任意时刻受到岩石切向、垂直方向与侧向的合力,即滚动力、垂直力和侧向力,一般认为滚动力和垂直力是影响破岩效果的主要因素。由于滚刀破岩的数值模拟过程是局部范围内的研究,为了简化模型,对岩石只截取一部分,并对滚刀与岩石接触部分进行局部细化。岩石模型的长宽高尺寸为:400 mm×300 mm×150 mm 的长方体块,力学响应选取 III 类围岩参数。

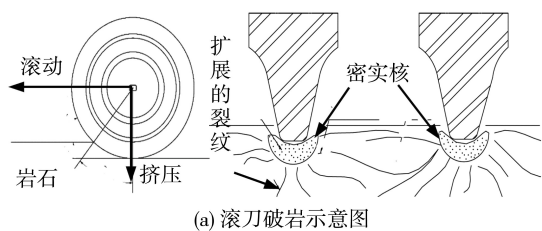


图 2 滚刀破岩示意图及岩体模型

Fig.2 Rolling cutter rock-breaking schematic diagram and rock model

## 2.2 滚刀模型

为探究滚刀不同结构参数(刃宽、过渡圆弧半径、刀刃角)、掘进参数(贯入度、切削速度)、破岩方式(同步破岩、顺次破岩、回转破岩)对破岩效果的影响,对直径 483 mm,贯入度 6 mm 的滚刀进行简化处理,保留滚刀主要参数,具体如图 3 所示。

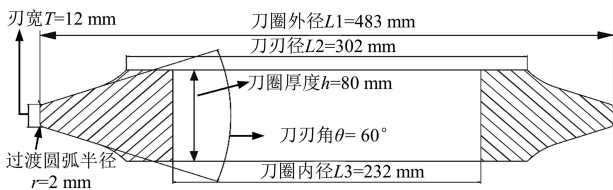


图 3 刀圈结构参数

Fig.3 Structural parameters of cutter ring

考虑到计算精度及计算时间,对滚刀模型网格划分时,将过渡圆弧段细化,每个过渡圆弧上的种子数设为 5,其余除保证滚刀基本特征外进行简化处理。如图 4 所示,同步破岩的双滚刀形式采用并排排列,掘进时双滚刀同时挤压、切削岩石;顺次破岩的双滚刀形式为前后错开布置,在破岩时,前面滚刀先切削岩石,后面滚刀在此基础上继续挤压岩体,形成前后滚刀依次破岩。

为了与现实滚刀破岩情况接近,除了与滚刀接触的那一面岩石不设置约束外,其余 5 个面均设置为完全固定,位移和转角均为 0,并给滚刀施加恒定速度。滚刀材料选用硬质合金钢,其弹性模量为 230 GPa,泊松比为 0.31,密度为 7 651 kg/m<sup>3</sup>。

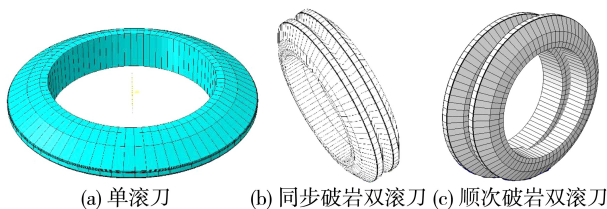


图 4 滚刀模型

Fig.4 Rolling cutter model

## 3 单刃盘滚刀模型研究

### 3.1 单刃盘形滚刀结构参数变化对破岩效果的影响

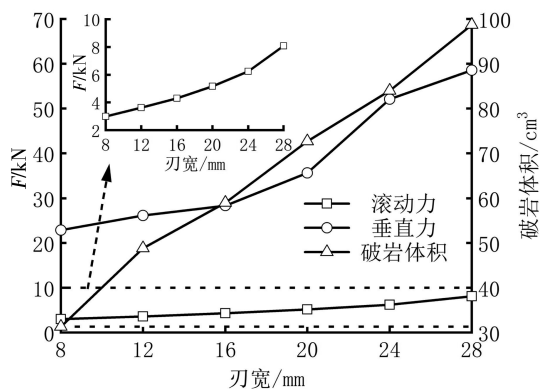
1965 年,Teale<sup>[9]</sup>提出了比能(specific energy, SE)的概念,用来表示盘形滚刀破碎单位体积岩石所需的能量,常用来衡量滚刀的破岩效率,如式(1)所示

$$SE = \frac{F_r \cdot L}{V} \quad (1)$$

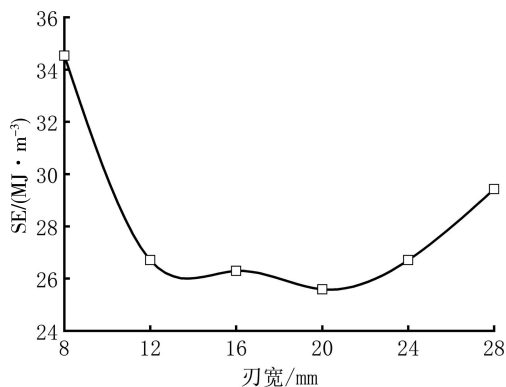
式中,SE 为滚刀破岩的比能, MJ · m<sup>-3</sup>; F<sub>r</sub> 为滚动力的平均值, kN; L 为滚刀切削岩石的距离, mm; V 为滚刀破碎岩石的体积, cm<sup>3</sup>。

图 5 (a) 为刃宽在 8~28 mm 范围内滚动力、垂直力及破岩体积的变化趋势,从图中可以看出,滚动力和垂直力随刃宽的增加而增大,且增长速率越来越快。这是由于随着刃宽增加,盘形滚刀与岩石的接触面积不断提高,致使滚刀下方形成的密实核体积不断扩大,滚刀受到的岩石摩擦力与岩石变形力相应增大;过渡圆弧半径在刃宽中所占的比例逐渐减小,进而导致滚动力和垂直力的增长速度加快;滚刀在岩石上的投影面积基本呈线性增大,相应地,破岩体积也呈线性增长趋势。从图 5(b) 可看出,刃宽在 8~28 mm 范围内变化时,比能呈现先下降后上升的变化趋势,通过对比能曲线拟合可得,刃宽在 20 mm 时,破岩比能最小为 25.582 MJ/m<sup>3</sup>。

由图 6 可知,过渡圆弧半径从 0 增加到 10 mm 时,滚刀受到的滚动力逐渐减小,衰减速率也在逐渐减缓。这是由于随过渡圆弧半径增大,滚刀与岩石的接触面积减小,滚刀受前进方向的摩擦力与岩石的挤压力减小,进而导致滚动力减小。垂直力随过渡圆弧半径呈现先减小后增大的变化趋势,主要是因为掘进过程中岩石对滚刀的挤压作用减小,使其所受垂直反力也在减小。



(a) 受力及破岩体积变化



(b) 比能变化

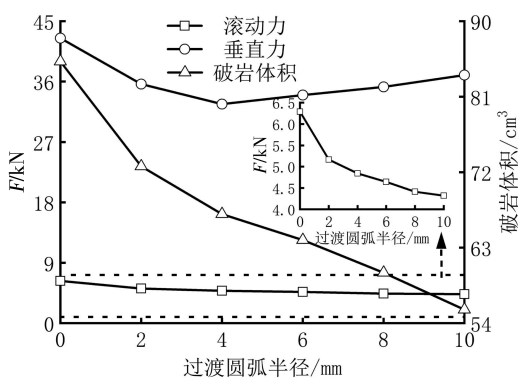
图 5 刀宽对破岩进程的影响规律

Fig.5 Impacts of cutter width on rock-breaking process

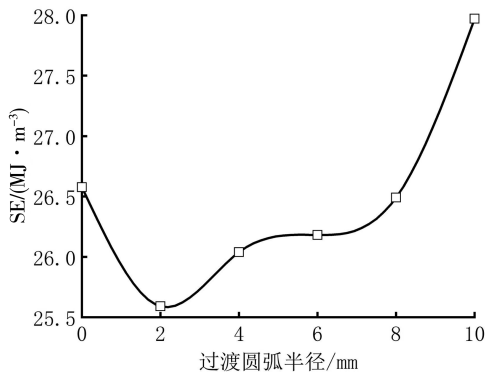
当过渡圆弧半径进一步减小时,滚刀对岩石的挤压作用逐渐向滚刀中心聚集,下方岩体形成密实核所需的能量持续增加,滚刀受到的垂直反力开始增大。破岩体积则随着过渡圆弧半径增大而减少。由比能演化曲线可知,过渡圆弧半径在 0~8 mm 范围变化时,比能值变化幅度较小,在 8~10 mm 范围变化时,比能值上升速率明显加快,在过渡圆弧半径  $r = 2.18$  mm 时,比能值最小为  $25.583 \text{ MJ/m}^3$ 。

图 7 为滚刀刀刃角在  $0 \sim 100^\circ$  范围内变化时,滚刀受到的滚动力、垂直力、破岩体积的变化情况。从图中可知,随刀刃角增大,滚刀所受到的荷载力及破岩体积逐渐增大,这是由于当刀刃角增大时,滚刀对两侧岩石施加的挤压力和摩擦力增强,加剧了岩体裂纹扩展、贯通,从而使破岩体积提高。然而,过大的刀刃角会加剧滚刀磨损,提高刀具的更换频率,降低施工效率和提高施工成本。根据各角度的比能值可得,在刀角为  $66^\circ$  时,破岩比能最小为  $25.490 \text{ MJ/m}^3$ 。

综合对比,对于滚动力和垂直力的影响范围



(a) 受力及破岩体积变化



(b) 比能变化

图 6 过渡圆弧半径对破岩进程的影响规律

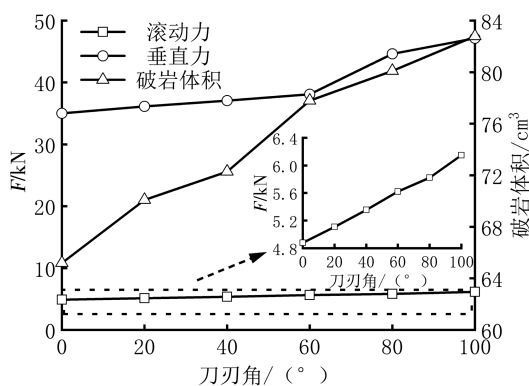
Fig.6 Impacts of transition arc radius on rock-breaking process

而言,刀宽>刀刃角>过渡圆弧半径;对于破岩体积的影响范围而言,刀宽>过渡圆弧半径>刀刃角,且相较于刀宽与过渡圆弧半径,刀刃角对侧向力的影响程度最大。

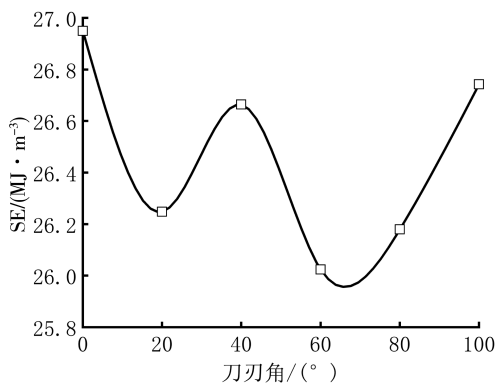
### 3.2 单刃盘形滚刀掘进参数变化对破岩效果的影响

为了进一步探究掘进参数对破岩效果的影响,依据福州滨海快线项目,选取不同贯入深度和切削速度进行掘进分析。

由图 8(a)可知,随着贯入度增大,滚刀受到的滚动力和垂直力逐渐增大,这是由于滚刀刀圈具有一定的刃角,随着贯入度增加,滚刀与岩石接触面积的增长速度大于贯入度增长速度,表现为滚动力增长速率随贯入度增加呈现快速上升的趋势。滚刀的滚动力、垂直力和破岩比能随切削速度的提高而增大,虽然较小的切削速度降低了破岩时的能耗,但切削速度过小会使隧道的掘进速度下降,影响工期。因此,应按工期要求和耗能共同决定滚刀的掘进速度。根据比能公式得到在不



(a) 受力及破岩体积变化



(b) 比能变化

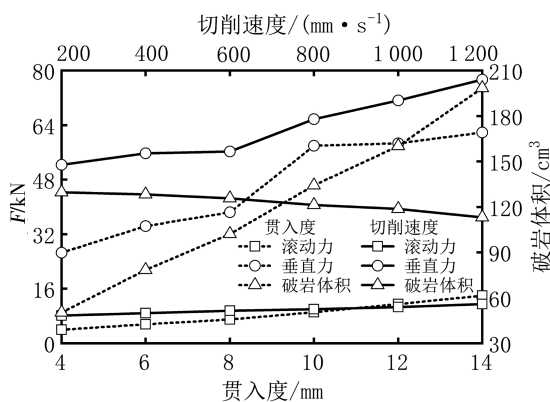
图 7 刀刃角对破岩进程的影响规律

**Fig.7 Impacts of cutter angle on rock breaking process**  
同贯入度下的比能图像,由图 8(b)可得,当贯入度从 4 增大到 10 mm 时,比能逐渐下降,在 10 mm 处取得最小值,通过对数据拟合,得出贯入度在 9.5 mm 时,破岩比能最小,为 25.165 MJ/m<sup>3</sup>。

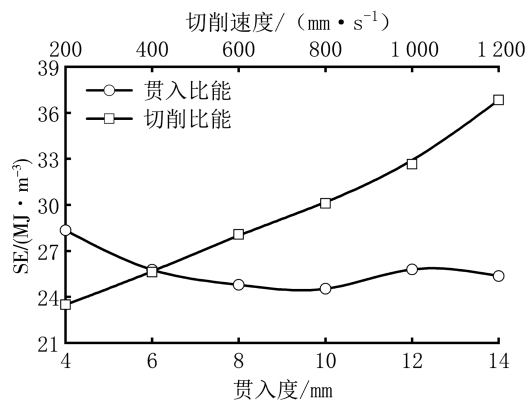
### 4 双滚刀的破岩效果分析

在滚刀破岩过程中,若相邻滚刀的刀间距太小或荷载过高时,盘形滚刀下方形成的长裂纹向岩体内部和两侧发展,在两滚刀间形成凹槽,使相邻滚刀间的岩石过度破碎,损失大量破岩能量;当两滚刀的刀间距太大或者滚刀法向载荷较小时,裂纹相较于刀间距过短,不能贯通,在两滚刀之间仍有未破碎的岩石,形成岩脊;当滚刀在最优刀间距和法向推力作用下,滚刀侧向裂纹朝着相邻滚刀方向大致以直线的路径扩展,长度约是滚刀间距的一半,在两滚刀之间形成平直的岩片,此时为最佳破岩效果。

基于上述分析选择最优的单滚刀结构参数和掘进参数,创建双滚刀破岩模型,双滚刀参数如表 1,刀间距分别设置在 52、56、60、64、68、72 mm。



(a) 受力及破岩体积变化



(b) 比能变化

图 8 掘进参数对破岩进程的影响规律

**Fig.8 Impacts of excavation parameters on rock-breaking process**

表 1 双滚刀模型基本参数值

**Tab.1 Basic parameter values of double disc cutter model**

滚刀直径/mm	刀角/(°)	过渡圆弧半径/mm	刀宽/mm	切割速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	切割深度/mm
483	66	2.18	20	400	9.5

#### 4.1 双滚刀同步破岩

如图 9 所示,在Ⅲ类围岩下,破岩体积随刀间距增加呈现先增大后减小的趋势。在 52 ~ 60 mm 区间,随着刀间距增加,破岩量也在增加,并且无岩脊出现,在这区间两滚刀产生的侧向裂纹能够贯通,使双滚刀间的岩石全部破碎,但存在过度破碎现象,不能充分利用侧向裂纹对岩石的破坏作用;在 64 ~ 72 mm 区间,由于刀间距过大,两滚刀产生的侧向裂纹不能贯穿,两滚刀间逐渐出现岩脊,且随着刀间距增加,岩脊宽

度呈现增大趋势,破岩量逐渐减小。在 60 mm 处达到最大破岩量 468.4 cm<sup>3</sup>,此时两滚刀间刚好无岩脊,为最优刀间距,破岩比能最小为 27.494 MJ/m<sup>3</sup>。破岩比能随刀间距增大呈现出先平缓减小后陡增的情况,与单滚刀破岩比能对比发现,双滚刀破岩比能整体小于单滚刀破岩比能,因此对于 TBM 掘进而言,采用双滚刀破岩,在同等能量损耗情况下,双滚刀破岩体积更大,更有利于隧道掘进。

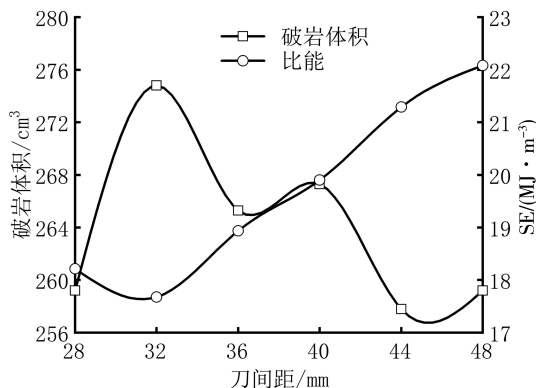


图 9 同步破岩体积与比能变化趋势

Fig.9 Synchronized breaking volume and specific energy trends

#### 4.2 双滚刀顺次破岩

双滚刀顺次破岩涉及到滚刀下压和向前滚动切削岩石两个过程,两个滚刀要在不同时间下切削岩石,且前一把滚刀受到的滚动力和垂直力要比后一把滚刀的大,这是由于前一把滚刀的切割滚压属于单刀作业,此时岩石已经接收了一定的负载压力,当后一把滚刀进一步跟进破岩作业时,转变为双滚刀协同滚压作业,由于作用力的叠加,岩石的内部间隙逐渐扩大,部分岩体裂纹形成,因而当岩体在双滚刀协同作用之时,两滚刀间的岩石会发生破碎,并且岩碴的大小与滚刀作用力的大小有关。

如图 10 所示,当刀间距由 52 增加到 60 mm 时,双滚刀顺次破岩的体积逐渐增大,在刀间距 60 mm 处达到最大破岩量 426.3 cm<sup>3</sup>,此时两滚刀间的岩石存在过度破碎的情况,使得掘进效率未达到最大;当刀间距在 60~72 mm 范围变化时,两滚刀间的岩石逐渐出现岩脊,生成的侧向裂纹未能使岩体贯通,此时刀间距过大,破岩效率较低。两滚刀的滚动力值均随着刀间距增加而增大,这是由于先切削岩石的滚刀使岩石产生了部分裂

纹,影响了周围岩石的强度,使后切削岩石的滚刀在切削岩石时受到的切向力减小。由比能公式计算得出在刀间距为 60 mm 时,比能值最低为 28.838 MJ/m<sup>3</sup>。

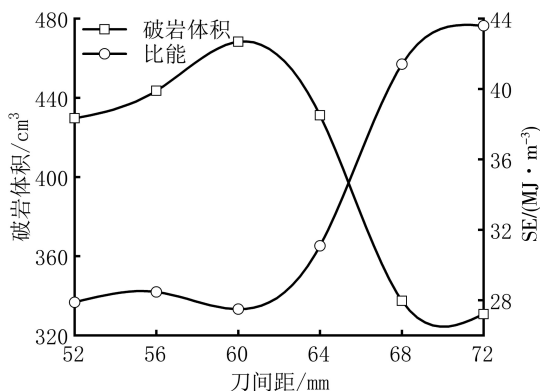


图 10 顺次破岩体积与比能变化趋势

Fig.10 Trends of sequential rock breaking volume and specific energy

### 5 四滚刀回转破岩分析

为尽量接近实际掘进工况,依据上述分析结果,创建刀宽为 20 mm,过渡圆弧半径 2.18 mm,刀刃角 66°,最优刀间距为 60 mm 的 4 滚刀回转破岩模型进行分析。岩石模型采用圆环,内径为 200 mm,外径为 460 mm。滚刀围绕旋转中心呈现上、下、左、右 4 个位置分布,相邻滚刀间的相位差为 90°,公转方向均为逆时针旋转,刀盘破岩的滚刀分布如图 11 所示。与实际 TBM 破岩类似,滚刀切割速度各不相同,选取Ⅲ类围岩下最常用的旋转速度 3.8~4.0 r/min,设置各滚刀回转速度为  $v_1 = 92$  mm/s;  $v_2 = 116$  mm/s;  $v_3 = 140$  mm/s;  $v_4 = 164$  mm/s。

由图 11 可知,滚刀 1 的旋转半径最小,产生沟槽的曲率最大,旋转一周滚动的距离最小,随滚刀 1 到滚刀 4 旋转半径的增大,产生的沟槽曲率逐渐减小,滚动长度逐渐增大。当相邻滚刀的刀间距为 60 mm 时,各滚刀辊压产生的沟槽基本贯通。

图 12 为滚刀 1 到滚刀 4 回转破岩后的沟槽形状和  $t = 2$  s 时岩石的等效塑性应变图,图中左侧靠近回转中心,为滚刀内侧,右侧为滚刀外侧。由图可知,滚刀对内侧岩石的破坏更大,产生的塑性变形范围较广,且回转半径越小,左右两侧塑性变形差距越大。较大的塑性变形差距,会对滚刀

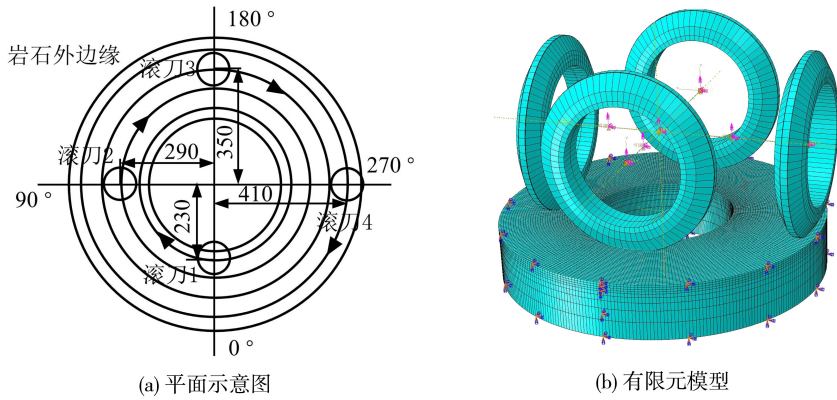


图 11 多滚刀回转破岩模型

Fig.11 Multi-disc cutter rotating rock-breaking model

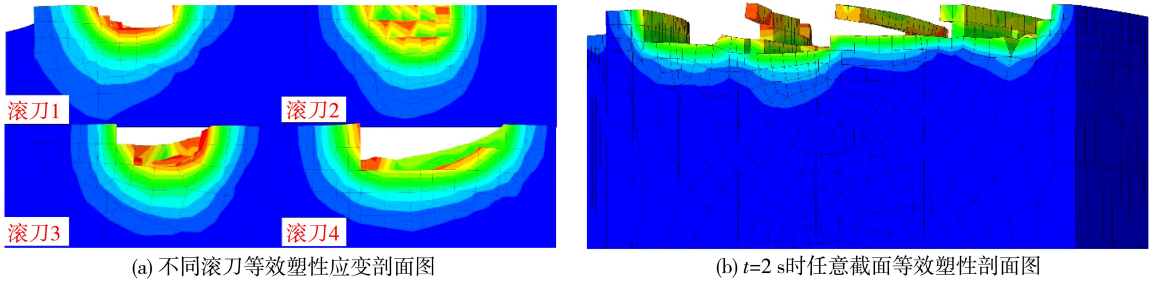


图 12 等效塑性应变剖面图

Fig.12 Equivalent plastic strain profile

产生不平衡侧向力,致使滚刀内侧刀圈磨损要明显高于外侧刀圈。因此,在滚刀设计时,应提高滚刀内侧刀圈强度,平衡滚刀两侧磨损速率,达到均匀磨损。四滚刀破岩类型为顺次破岩,由图 12(b)可得,每一个滚刀沿着预设好的轨迹掘进,当后一把滚刀滚动到前一把滚刀起始点时,产生的破岩沟槽和前一把滚刀产生的沟槽相邻,大部分沟槽能够相互贯通,此时达到最优破岩刀间距,两滚刀间没有岩脊,滚刀间岩石几乎完全破碎。

滚刀回转半径随曲率半径的增大而提高,在相同时间内,外侧滚刀切削岩石的距离会大于内侧滚刀切削岩石的距离,侧向力随这两者的变化而变化。根据模拟结果可知,侧向力表现为先增大后减小的趋势,在滚刀 3 处达到最大。滚刀的垂直力和切向力受曲率半径影响较小,主要与滚刀切削岩石的速度有关。随着回转半径增大,滚刀的切削速度、切削距离、垂直力、切向力均增大,导致滚刀最终受到的合力整体呈现出增大趋势,垂直力变化趋势与此类似。

## 6 结论

结合 TBM 隧道施工需求,对Ⅲ类围岩条件下滚刀最佳破岩参数进行分析,并以福州滨海快线祥谦站至首占站区间隧道项目为依托,对滚刀的结构参数、掘进参数、破岩方式进行探究,得出以下结论:

1) 单刀滚刀破岩效果主要受刃宽和贯入度影响,随着刃宽增加,滚刀破岩时受到的三向力和产生的破岩体积也相应增大,增加刃宽能够提高破岩效率,但同时也需要更大的掘进推进力,该项目下最佳刃宽和贯入度分别为 20 mm、10 mm。

2) 在相同结构参数下,破岩比能随切削速度的增加而提高,较高的切削速度会使滚刀受到的滚动力、垂直力增加,但对破岩体积没有显著影响。

3) 在Ⅲ类围岩条件下,顺次破岩和同步破岩的最优刀间距基本相同,均为 60 mm,在不考虑能耗差距的情况下,采取同步破岩方式的效率更高。

4) 四滚刀回转破岩对靠近回转中心的内侧 差距越大,产生的侧向合力整体指向滚刀外侧,致  
岩石破坏更大,回转半径越小,左右两侧塑性变形 使滚刀内侧刀圈磨损要高于外侧刀圈磨损。

### 参考文献:

- [1] TEALE R. The mechanical excavation of rock—experiments with roller cutters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1964,1(1):63-78.
- [2] 莫振泽,李海波,周青春,等. 楔刀作用下岩石微观劣化的试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(5):1333-1340.
- [3] 王超,乔世范,刘红中. TBM 破岩过程的滚刀受力计算模型研究[J]. 工程力学,2021,38(10):54-63.
- [4] 谭青,李建芳,夏毅敏,等. 盘形滚刀破岩过程的数值研究[J]. 岩土力学,2013,34(9):2707-2714.
- [5] 刘亚迪,齐文聪,刘浩飞,等. 多滚刀协同破岩过程数值模拟与滚刀布置规律研究[J]. 煤炭科学技术,2023,51(5):232-244.
- [6] 孙金山,陈明,陈保国,等. TBM 滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学,2011,32(6):1891-1897.
- [7] 江华,张晋勋,唐飞鹏,等. 北京砂卵石地层盾构先行撕裂刀切削过程数值模拟分析[J]. 煤炭学报,2021,46(S1):539-548.
- [8] ZHANG Z Q,ZHANG K J,DONG W J,et al. Study of rock-cutting process by disc cutters in mixed ground based on three-dimensional particle flow model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2020,53(8):3485-3506.
- [9] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1965,2(1):57-73.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 7 页)

### 参考文献:

- [1] 李志南,潘珂,王位赢. 并行顶管近距离上穿既有盾构隧道的安全分析[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(S2):939-944,975.
- [2] 吴垠龙,刘维,贾鹏蛟,等. 矩形顶管近距离上穿既有隧道施工扰动分析[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(6):1968-1978.
- [3] JIAO N,SUN S,LIU J Y,et al. Analysis of existing railway deformation caused by double shield tunnel construction in soil-rock composite stratum[J]. Energy Reports,2023,9:159-165.
- [4] ZHANG C P,ZHANG X,FANG Q. Behaviors of existing twin subway tunnels due to new subway station excavation below in close vicinity[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2018,81:121-128.
- [5] 杨三资,张顶立,苏洁. 基于数值模拟的北京地区地下道路立交隧道围岩变形分析[J]. 土木工程学报,2016,49(S2):103-106.
- [6] 刘传涛. 新建公路隧道上穿既有铁路隧道施工方案比选[J]. 人民长江,2019,50(11):167-173.
- [7] 陈华东,申文明,张文杰. 上穿隧道引起既有隧道变形的黏弹性分析[J]. 力学季刊,2022,43(4):958-969.
- [8] 张晓清,张孟喜,吴应明,等. 多线叠交盾构隧道近接施工模型试验[J]. 上海交通大学学报,2015,49(7):1040-1045.
- [9] 刘新荣,王吉明,郭子红,等. 新建立交隧道施工对既有隧道影响的模型试验[J]. 重庆大学学报,2012,35(12):84-93.
- [10] 翁效林,陈禹勋,贾金昌,等. 大跨度双连拱隧道下穿既有地铁近接施工围岩力学特征模型试验研究[J]. 建筑科学与工程学报.2023,40(6):137-147.
- [11] 刘喆,倪光斌,林传年,等. TB 10314—2021《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》内容解析[J]. 铁道标准设计,2022,66(6):184-189.

(责任编辑:陈雯)