

基于PFC3D花岗岩地层破岩效率影响规律研究

唐宇飞*, 吴宗汉, 潘云贵

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年12月8日; 录用日期: 2025年1月1日; 发布日期: 2025年1月13日

摘要

本文通过PFC3D离散元软件建立了三维双滚刀破岩模型, 根据室内试验结果验证模型的准确性, 并对不同围压、刀间距、贯入度和温度条件下花岗岩地层破岩效率开展了研究。结果表明, 相同温度条件下, 围压和刀间距对破岩效率有着抑制作用; 随着贯入深度增加, 刀具与岩石接触更加充分, 同时岩层温度上升, 破岩效率会逐渐提升。

关键词

全断面岩石掘进机, 滚刀破岩, PFC3D, 高温

Study on the Influencing Law of Rock-Breaking Efficiency in Granite Formations Based on PFC3D

Yufei Tang*, Zonghan Wu, Yungui Pan

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 8th, 2024; accepted: Jan. 1st, 2025; published: Jan. 13th, 2025

Abstract

This study established a three-dimensional dual-disc cutter rock-breaking model using PFC3D discrete element software, validated the model's accuracy based on laboratory test results, and investigated the rock-breaking efficiency of granite formations under different confining pressures, cutter spacing, penetration depths, and temperature conditions. The results indicate that under the same temperature conditions, confining pressure and cutter spacing have a suppressive effect on rock-breaking efficiency; as penetration depth increases, the contact between the cutter and the

*第一作者。

文章引用: 唐宇飞, 吴宗汉, 潘云贵. 基于 PFC3D 花岗岩地层破岩效率影响规律研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 167-176. DOI: 10.12677/mos.2025.141017

rock becomes more sufficient, and with the rise in rock layer temperature, the rock-breaking efficiency gradually increases.

Keywords

Tunnel Boring Machine, Disc Cutter Rock Breaking, PFC3D, High Temperature

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全断面岩石掘进机(TBM)是一种用于隧道施工的重型设备,具备掘进速度快、安全性高等优势,现已在铁路、公路等大型工程中得到广泛应用。在 TBM 掘进过程中,刀盘上的滚刀直接接触围岩,其布置方式对岩石破碎效率有重要影响。根据所处的不同环境条件合理布置滚刀,不仅能有效降低施工成本,还能加快施工进度。因此,研究滚刀破岩效率对实际工程具有重要意义。

近年来,许多学者通过室内滚刀贯入试验对其破岩效率进行研究并取得了显著成果。陈贝贝等[1]研究了贯入度和刀间距对 TBM 滚刀破岩推力的影响,探讨了其对破岩推力、岩渣分布和比能的作用。刘颖超等[2]研究了 TBM 滚刀的磨损问题,探讨了不同刃形对破岩效率及磨损情况的影响,并设计了新型齿刃楔形刀具。冀国栋等[3]通过缩尺试验平台研究了滚刀贯入度对破岩效能的影响,为合理设置 TBM 贯入度参数提供了科学依据。Zhang 等[4]研究了不同硬度的 TBM 刀具环对三种典型岩石的磨损特性,研究发现,刀具环的磨损机制随着岩石类型和硬度而变化。Ning 等[5]通过对比分析不同滚刀宽度下刀具在硬岩和极硬岩中的破岩效果,研究揭示了刀宽对破岩效率和能耗的影响规律。

但是室内试验花费的成本较高,可重复性较差。随着计算机技术的进步,部分学者开始采用有限元和离散元数值模拟法来研究破岩效率。在有限元研究方面,Cho 等[6]利用 AUTODYN-3D 软件分析了滚刀速度和模型尺寸对比能的影响,并将其与线形切割机(LCM)测试结果进行了比较,以确定最优的盘形滚刀间距。张照煌等[7]通过建立盘形滚刀环形切割的有限元模型,探讨了安装半径、贯入度与刀间距之间的关系,并提出了降低 TBM 刀盘推力和扭矩的三维刀间距理论。Cheng 等[8]通过有限元软件研究了在大块孤石地层中盾构刀具的岩石破碎效率,分析了刀具质量、冲击速度和间距对特定能量消耗的影响。王华伟等[9]从岩石破碎学和材料学角度构建了盘形滚刀有限元线性切割模型,并通过引入网格密度因子 λ 提高了模型的计算精度和效率。在离散元研究方面,孙超等[10]通过 EDEM 软件分析了贯入度、倾角和倾角差等参数对破岩载荷的影响。乔世范等[11]利用 PFC2D 提出了 VE-GBM 模型,用于模拟 TBM 滚刀破岩过程。温森等[12]采用 PFC3D 对不同种类岩石在测压系数、刀间距和贯入度条件下进行破岩计算,根据裂纹扩展图分析得出不同强度岩石最优刀间距与贯入度之比(s/p)。Duan 等[13]利用颗粒流离散元素模型探讨了 TBM 刀具轮廓对岩石切割性能的影响。他们比较了平刃和圆刃刀具的性能,并发现圆刃刀具需要的正向力较小,导致特定能耗较低,且产生的岩粉较少。

综上所述,目前学者研究的影响因素大多集中在刀间距和贯入度等条件,而实际工程中,滚刀在开挖时会产生大量热,研究不同温度条件下刀间距、贯入度等因素对破岩效率的影响是十分必要的。基于此,本文将采用 PFC3D 软件验证并研究花岗岩地层下围压、温度、刀间距和贯入度四种条件对破岩效率的影响。

2. 数值模型的建立及参数的标定

2.1. 滚刀模型

滚刀采用 17 英寸的罗宾斯滚刀，三维模型如图 1 所示。滚刀外圈高度为 432 mm，滚刀总宽度为 80 mm，为保持与试验结果相似性，刀尖厚度取试验尺寸 14 mm，滚刀采用的是 PFC3D 中的几何体(geometry)命令根据几何尺寸生成。

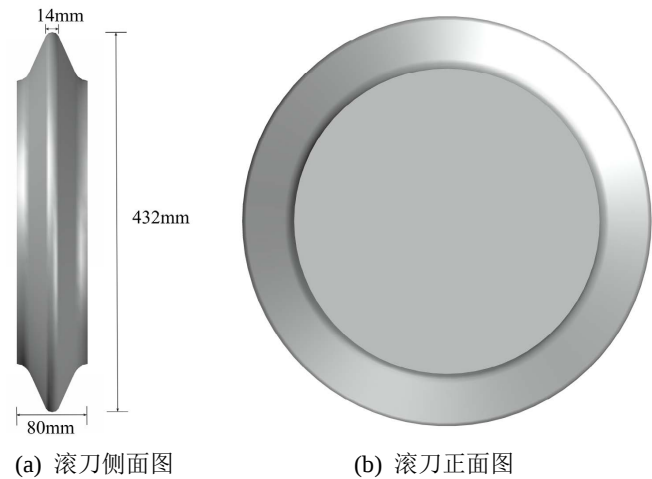


Figure 1. Disc cutter model
图 1. 滚刀模型

2.2. 岩样模型

在 PFC3D 程序中，模型由一系列球体颗粒构成，通过为颗粒及其间接触赋值相应参数来模拟岩石的宏观特性。平行黏结模型在程序中能够传递法向力、切向力和弯矩，因此被广泛应用于岩土工程数值分析，故本模拟选用了该接触模型。

参考 Bahaaddini 等[14]的研究方法，模拟过程中做如下假定：① 颗粒半径比 R_{max}/R_{min} 取为 1.66，在该半径比下模拟效果较好；② 颗粒密度 ρ 取 2600 kg/m^3 ；③ 最小颗粒半径 0.8 mm。满足建模要求尺寸效应的要求，在该尺寸和粒径的选择下，数值模拟计算出来的误差比较小。岩样长度、宽度分别为 0.8 m，厚度为 0.3 m，该尺寸岩样三滚刀破岩过程如图 2 所示。边界条件设置为刚性墙体，通过四周墙体施加围压。

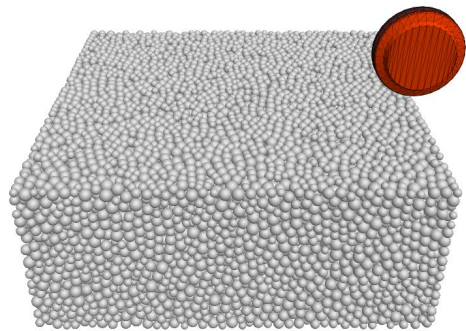


Figure 2. 3D model of rock breaking by disc cutter
图 2. 滚刀破岩三维模型

2.3. 参数标定

PFC3D 中对颗粒赋予的细观参数不能用岩石的实际宏观力学参数代入计算,为了使颗粒模拟的细观参数与宏观参数相匹配,目前通用的做法是采用“试错法”反复调整细观参数直至与岩石材料力学特性匹配。本文采用的方法是先利用宏细观参数之间正交试验获得线性拟合方程,代入岩石的宏观力学参数反解,从而获得 PFC 中细观参数,并根据结果反解细观参数,重新代入计算,最终使标定结果满足误差(<5%)的要求,这种方法相比传统“试错法”显著提高了标定效率。微观参数取值如下表 1 所示,力学标定结果如下表 2 所示。

Table 1. Micro-parameter calibration results

表 1. 微观参数标定结果表

微观参数	E_p (GPa)	k_p	μ_p	σ_p (MPa)	C_p/σ_p	φ (°)	λ
取值	39.91	2.27	0.40	70.91	2.70	10	1

Table 2. Calibration results for macroscopic mechanical parameters

表 2. 宏观力学参数标定结果表

岩性	结果类型	单轴抗压强度 σ_c (MPa)	抗拉强度 σ_t (MPa)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν
花岗岩	试验结果	183	9.8	42.3	0.180
	PFC 模拟结果	179.7	9.7	43.9	0.182

由表 2 可知,花岗岩岩石试验单轴抗压强度、抗拉强度、泊松比和弹性模量与数值模拟结果相比,最大相差依次为 1.80%, 1.02%, 2.13%, 1.11%和 3.78%。结果表明,试验结果和数值模拟结果误差均在 5%以下,故标定结果合理。

3. 程序和模型验证

目前通常用比能[15]来衡量破岩效率。比能指的是破碎单位体积岩石所需的能量,是反映 TBM 掘进效率的重要指标。比能越小,表示破碎单位体积岩石的能量消耗越少,破岩效率越高。其计算公式为:

$$E = \frac{W}{V} = \frac{F_v p + F_R l}{V} \quad (1)$$

式中: E 表示破岩比能; W 表示滚刀所做的功; V 为破岩过程中产生的碎块体积。通过 PFC3D 软件的内置 Fish 语言编程来检测颗粒间的接触情况,当颗粒接触完全断裂时,判定岩石颗粒发生剥落,剥落颗粒的总体积即为破岩体积; F_v 表示滚刀所受的平均法向力; p 为贯入度; F_R 代表的是滚刀所受平均滚动力; l 为滚刀切削轨迹的长度。

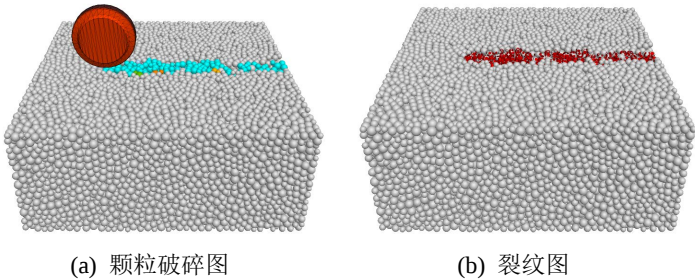


Figure 3. Particle fracture and crack patterns in rock breaking by disc cutter
图 3. 滚刀破岩颗粒破碎与裂纹图

Table 3. Comparison of PFC3D simulation results with results by Cho *et al.***表 3.** PFC3D 模拟结果与 Cho 等结果对比

贯入度 (p)/mm	刀间距 (s)/mm	s:p	平均滚动力/kN			比能/(MJ·m ⁻³)		
			LCM	AUTODYN-3D	PFC3D	LCM	AUTODYN-3D	PFC3D
4	28	7	5.8	7.3	6.0	56.6	56.2	57.5
4	40	10	7.5	8.8	7.3	51.5	46.9	49.1
4	48	12	9.6	10.7	8.5	54.7	46.2	55.2

为了验证本文建立的三维滚刀破岩计算程序的合理性, 将计算结果与 Cho 等[6] Hwangdeung granite 岩石线性切割试验结果进行对比, 结果见图 3 与表 3 所示, 其中 LCM 与 AUTODYN-3D 分别为 Cho 所做的试验与模拟结果。

由表 3 可知, PFC3D 计算的比能与相关学者[6]的实验比能平均差值为 2.39%, 平均滚动力差值为 3.56%, 两种方法获得的结果变化趋势是一致的, 误差均满足小于 5%的要求, 表明本文设计的 PFC3D 计算程序是合理的。

4. 计算结果分析

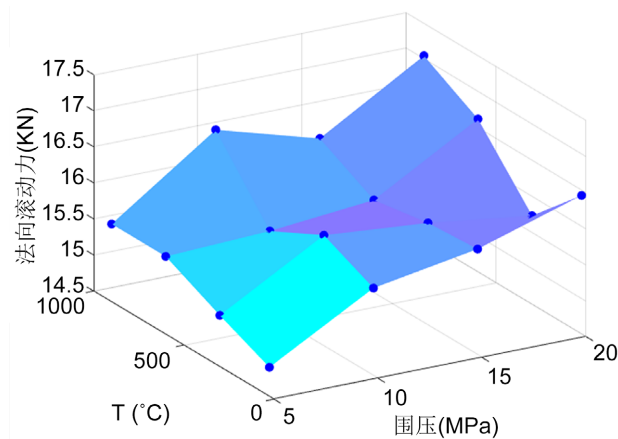
为了研究围压、刀间距、贯入度和温度对滚刀破岩效率的影响, 将各因素进行不同的组合进行模拟计算。算例共设置 5、10、15 和 20 MPa 四种围压, 10、20、30、40 mm 四种刀间距, 4、5、6、7 mm 四种不同贯入度, 25℃、300℃、600℃和 900℃四种温度条件。

4.1. 围压对破岩效率的影响

采用算例进一步验证围压(σ)对破岩比能影响的大小, 刀间距(s)和贯入度(p)分别设定为 28 mm 和 4 mm, 计算结果见图 4。

围压为 5、10、15、20 MPa 时, 平均滚动力分别为 15.45、16.00、15.96、16.45 kN, 平均扭矩分别为 1.84、1.85、1.90、1.91 N·m。随着围压从 5 MPa 增加到 20 MPa, 滚动力和扭矩整体呈上升趋势, 围压的增加使岩石更加致密, 导致滚刀与岩石间的接触阻力增加, 因而需要更大的滚动力来克服阻力。在高围压下, 岩石的变形特性发生变化, 切割过程中摩擦力和塑性变形增大, 进一步增加了所需的扭矩。

平均比能分别为 331.50、363.23、402.35、418.55 MJ/m³, 围压从 5 MPa 增大至 20 MPa, 比能增大了 26.26%, 表明围压在滚刀开挖过程中有着抑制作用。



(a) 法向滚动力

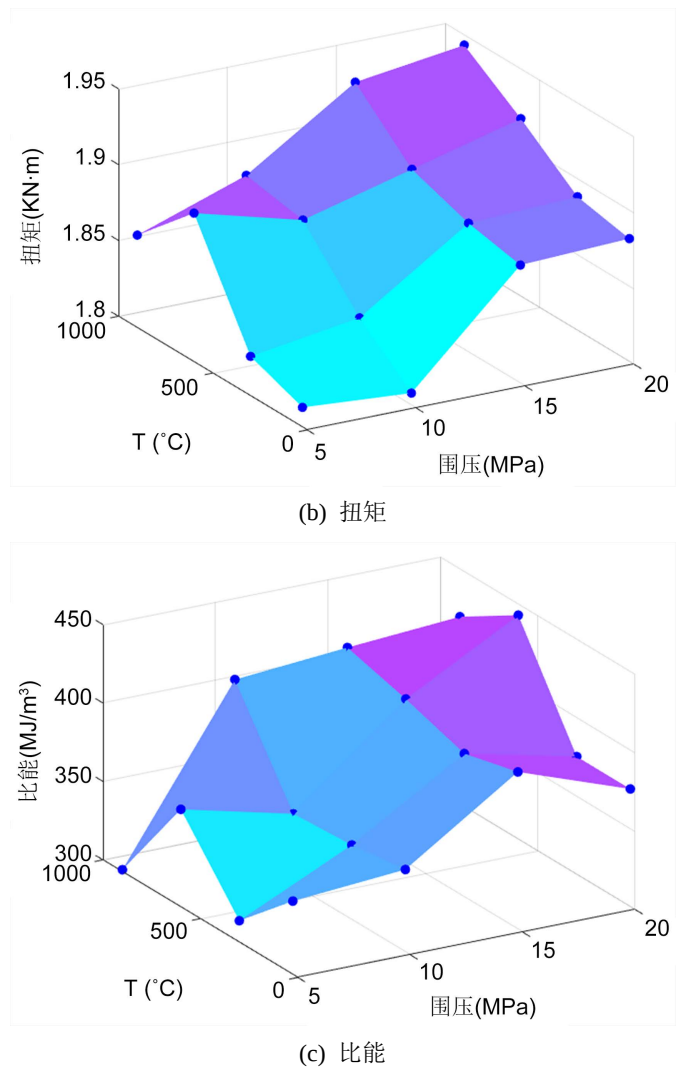
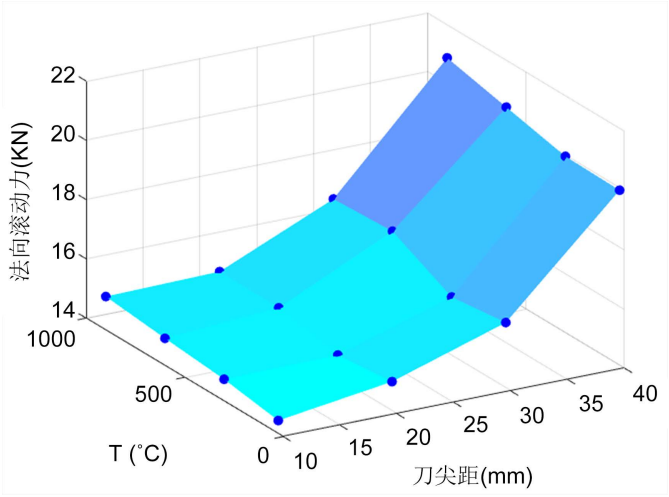


Figure 4. Results under different confining pressures and temperature conditions
图 4. 不同围压与温度条件下结果图

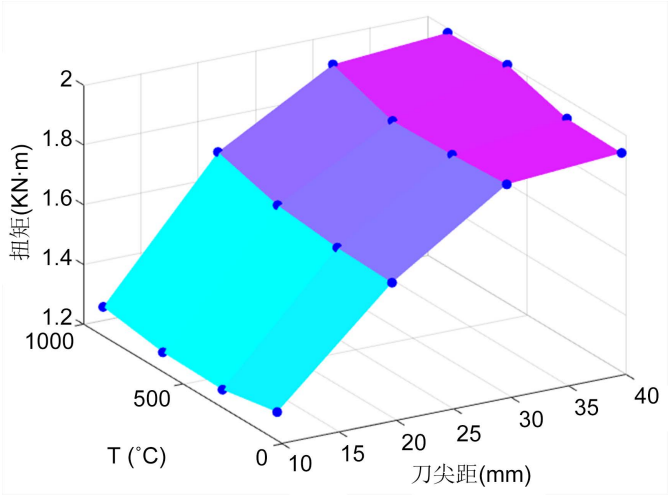
4.2. 刀间距对破岩效率的影响

在刀间距对破岩效率影响的研究中，设置围压为 5 MPa，贯入度为 4 mm，计算结果如图 5 所示。刀间距 10、20、30、40 mm 对应的平均滚动力分别为 14.81、15.04、16.51、20.28 kN，刀间距 10、20、30、40 mm 对应的平均扭矩分别为 1.85、1.86、1.89、1.91 N·m。滚动力和扭矩随刀间距增大而增加，刀尖距增加可能导致切割过程中刀具与岩石的切割面积增大，从而增加了切割的阻力和摩擦力，这使得滚刀需要更大的滚动力来维持切割操作，较大的刀尖距会导致切割时岩石的破碎模式改变，使得岩石的破裂更加困难，从而需要更多的滚动力和扭矩进行有效切割。

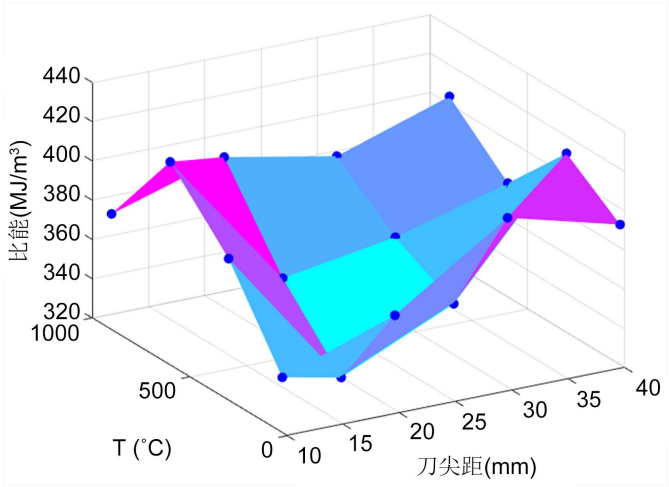
刀间距为 10mm 时比能为 385.73 MJ/m³，刀间距为 20、30、40 mm 时比能分别为 359.38、374.95、396.20 MJ/m³。当刀尖距为 10 mm 时，滚刀的切削轨迹之间的距离较近，刀具的切割区域之间产生干扰，导致岩石破碎不充分或排屑效率低，局部产生应力集中效应，切割过程中的能量消耗增加，从而比能较大。随着刀尖距增大，刀具之间的距离增加，产生的岩屑可以更顺利地排除，不会堆积在刀具之间，这有助于维持较高的切割效率。但当刀间距过大时，岩石破碎更多，能量消耗增加，比能也上升。



(a) 法向滚动力

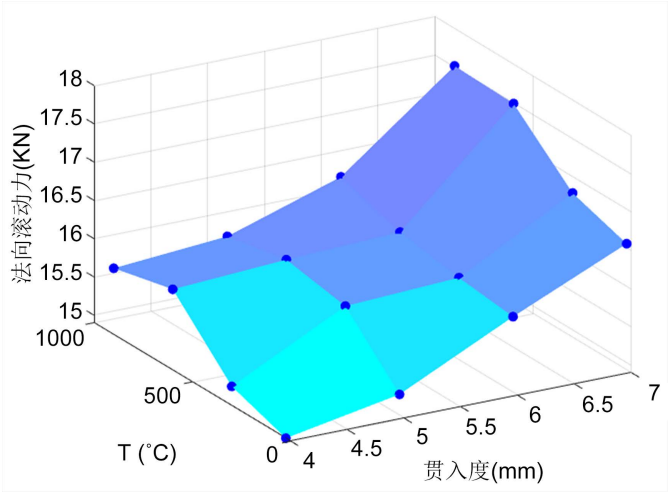


(b) 扭矩

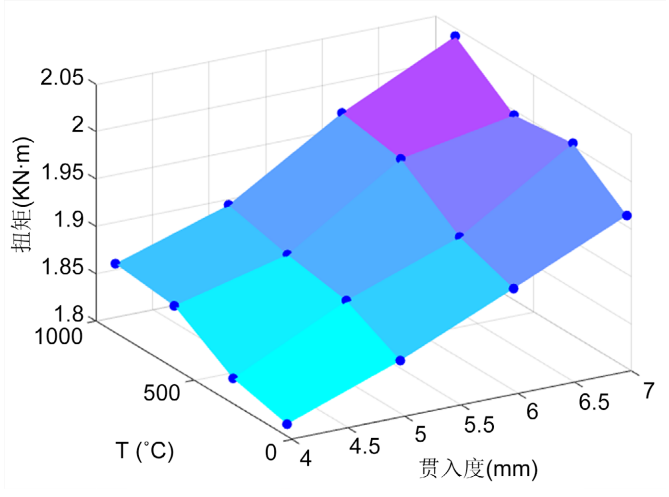


(c) 比能

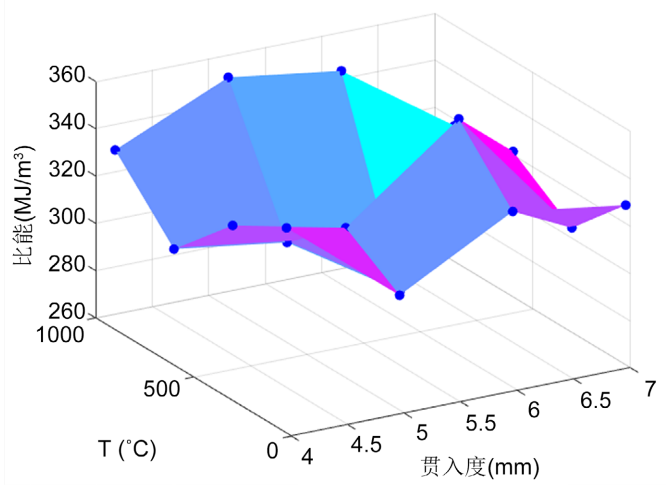
Figure 5. Results under different cutter spacing and temperature conditions
图 5. 不同刀间距与温度条件下结果图



(a) 法向滚动力



(b) 扭矩



(c) 比能

Figure 6. Results under different penetration depths and temperature conditions
图 6. 不同贯入度与温度条件下结果图

4.3. 贯入度对破岩效率的影响

在贯入度对破岩效率影响的研究中, 设置围压为 5 MPa, 刀间距为 28 mm, 计算结果如图 6 所示。贯入度 4、5、6、7 mm 对应的平均滚动力分别为 14.81、15.04、16.51、20.28 kN, 平均扭矩分别为 1.85、1.86、1.89、1.91 N·m。随着贯入度的增加, 刀具与岩石的接触面积增大, 接触压力上升导致滚刀切割滚动力和扭矩上升。

贯入度为 4、5、6、7 mm 时, 平均比能为 331.50、322.90、329.18、317.68 MJ/m³, 滚刀贯入度增大, 比能呈现出下降的趋势。贯入度 4 mm 和 5 mm 时, 切入深度不足, 切割效率较低, 因此消耗的能量较高。在贯入度 6 mm 时, 岩石内部未充分破碎, 部分能量被用于抵抗摩擦力, 因此相较于 5 mm 和 7 mm, 贯入度为 6 mm 时比能较高。

4.4. 温度对破岩效率的影响

温度 25℃、300℃、600℃、900℃对应的平均滚动力分别为 15.92、16.01、16.43、16.60 kN, 平均扭矩分别为 1.81、1.82、1.84、1.87 N·m, 随着温度升高, 滚刀滚动力和扭矩越高。虽然温度升高会导致岩石的物理性质发生变化, 强度降低, 同时切割过程中刀具的性能也会发生变化, 导致局部接触不均匀, 滚动力和扭矩因此上升。

温度 25℃、300℃、600℃、900℃对应的平均比能分别为 358.88、358.47、351.8、375.23 MJ/m³, 在 25℃、300℃和 600℃时, 比能逐渐下降, 表明在较低温度下, 岩石的物理性质相对坚硬, 切割效率低, 能量消耗更高。高温下, 岩石的破裂的过程中发生更多塑性变形, 进而使比能明显提升。

5. 结论

1) 通过 PFC3D 建立了双滚刀破岩模型, 将数值模拟结果与学者试验与有限元结果进行对比, 滚动力和比能数值误差均满足要求, 验证了建模的准确性。

2) 相同温度条件下, 随着围压的增加, 滚动力和扭矩整体呈上升趋势。这表明围压的增大使岩石更为致密, 需要更大的滚动力来克服滚刀与岩石之间的阻力。同时, 高围压下岩石的变形特性发生变化, 摩擦力和塑性变形增加, 进一步提高了所需的扭矩。此外, 比能的增加表明围压在滚刀开挖过程中具有抑制作用。

3) 随着刀间距的增大, 平均滚动力和扭矩呈上升趋势。刀间距较小时, 由于切削轨迹之间的干扰, 导致岩石破碎不充分, 能量消耗增加, 表现出较高的比能。随着刀间距的增加, 刀具之间的距离增大, 有助于岩屑的顺利排除, 提升切割效率。然而, 当刀间距过大时, 岩石破碎的程度增加, 能量消耗随之上升, 导致比能也上升。

4) 随着贯入度的增加, 平均滚动力和扭矩均呈上升趋势。这是由于增加的贯入度导致刀具与岩石的接触面积增大, 从而提升了接触压力, 进而增加了切割所需的滚动力和扭矩。随着贯入度的增加, 比能呈现出下降的趋势。当贯入度较小时, 切入深度不足, 切割效率低, 导致能量消耗较高。当贯入度达到特定值(如 6 mm)时, 岩石内部未能充分破碎, 部分能量被摩擦力消耗, 从而使得该贯入度的比能相对较高。

5) 随着温度的升高, 平均滚动力和扭矩均呈上升趋势。这一现象是由于高温导致岩石物理性质变化, 尽管岩石强度降低, 但切割过程中刀具的性能变化使得局部接触不均匀, 从而增加了所需的滚动力和扭矩。在比能方面, 随着温度升高, 低温下的比能逐渐下降, 岩石在较低温度时相对坚硬, 能量消耗较高。而在高温条件下, 岩石经历更多的塑性变形, 从而使比能显著提升。

综上所述, 在相同温度条件下, 围压的增加导致滚动力和扭矩整体上升。同时, 刀间距增大也使平

均滚动力和扭矩增加。贯入度的增加同样使平均滚动力和扭矩上升，但比能则呈下降趋势。随着温度升高，平均滚动力和扭矩也随之增加，而低温下的比能逐渐降低，高温条件下则显著提升。本文通过模拟滚刀线形切割破岩，验证了模型的准确性，并分析了围压、刀间距、贯入度和温度对破岩效率的影响。然而，本文未考虑环形切割方式及刀具对破岩效率的影响，后续研究可以在此基础上进一步深入探讨。

参考文献

- [1] 陈贝贝, 钟发胜, 吕专真, 等. 贯入度与刀间距对 TBM 滚刀破岩推力的影响[J]. 建筑机械化, 2020, 41(3): 52-55.
- [2] 刘颖超, 刘波, 江玉生, 等. TBM 滚刀破岩效果及新型刀具的应用研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 357-369.
- [3] 冀国栋, 付柏毅, 章慧健, 等. TBM 滚刀贯入度对破岩效能的影响规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(12): 4755-4768.
- [4] Zhang, X., Lin, L., Xia, Y., Tan, Q., Zhu, Z., Mao, Q., et al. (2018) Experimental Study on Wear of TBM Disc Cutter Rings with Different Kinds of Hardness. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **82**, 346-357. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.050>
- [5] Ning, B., Xia, Y., Lin, L., Zhang, X., He, Y. and Liu, Y. (2020) Experimental Study on the Adaptability of Cutters with Different Blade Widths under Hard Rock and Extremely Hard Rock Conditions. *Acta Geotechnica*, **15**, 3283-3294. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00958-0>
- [6] Cho, J., Jeon, S., Yu, S. and Chang, S. (2010) Optimum Spacing of TBM Disc Cutters: A Numerical Simulation Using the Three-Dimensional Dynamic Fracturing Method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25**, 230-244. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2009.11.007>
- [7] 张照煌, 兰越, 韩佳霖, 等. 盘形滚刀三维刀间距数值模拟与分析[J]. 矿山机械, 2024, 52(6): 9-16.
- [8] Cheng, J., Jiang, H., Qu, X., Jiang, Y. and Li, C. (2021) Numerical Simulation Study on Rock Breaking Efficiency of Shield Cutters in Large-Size Boulder Strata. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **719**, Article 042067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/719/4/042067>
- [9] 王华伟, 康正阳, 王英才, 等. 极硬岩条件下盾构滚刀掘进过程数值模拟[J]. 油气储运, 2024, 43(7): 819-826+832.
- [10] 孙超, 凌静秀, 王乾廷, 等. 基于离散元法的 TBM 边滚刀破岩载荷特性研究[J]. 机电技术, 2024(1): 85-88+105.
- [11] 乔世范, 刘钰, 王刚, 等. 考虑岩石细观结构的 TBM 滚刀破岩过程数值研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(7): 106-112.
- [12] 温森, 吴斐, 李胜, 等. 不同侧压系数和岩石强度下 TBM 滚刀破岩效率的数值模拟[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(4): 9-19.
- [13] Duan, W., Zhang, L., Zhang, M., Su, Y., Mo, J. and Zhou, Z. (2021) Numerical and Experimental Studies on the Effects of the TBM Cutter Profile on Rock Cutting. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **26**, 416-432. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2111-5>
- [14] Bahaaddini, M., Sheikhpourkhani, A.M. and Mansouri, H. (2019) Flat-Joint Model to Reproduce the Mechanical Behaviour of Intact Rocks. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **25**, 1427-1448. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1579759>
- [15] Duan, W., Zhang, L., Zhang, M., Su, Y., Mo, J. and Zhou, Z. (2021) Numerical and Experimental Studies on the Effects of the TBM Cutter Profile on Rock Cutting. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **26**, 416-432. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2111-5>