

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1025

双轮铣槽机铣削过程及截齿入岩顺序优化研究

肖建成^{1,2}, 周 辉^{1,2}, 卢景景^{1,2}, 冯 春³, 徐福通^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 双轮铣槽机(简称“双轮铣”)是地下连续墙的专业施工装备,布齿系统是其核心部件,其参数设计与破岩性能密切相关。基于连续-非连续单元法(CDEM),建立了铣轮铣削岩土体过程的三维仿真模拟方法。在此基础上,考虑自由面与铣削关联性等因素,对布齿系统截齿入岩顺序影响破岩性能机制进行了研究,建立了关联铣削条件下以预置相邻自由面数目为主要影响因素的入岩顺序数值概化模型。结果表明:(1)获得的铣轮铣削岩土体的铣削力与铣削深度曲线,验证了此数值模拟方法的正确性;(2)相比于完整岩体,具有单相邻预设自由面与双相邻预设自由面岩样的峰值荷载分别下降了 32.5%与 68.2%,破岩能耗分别下降了 19.8%与 56.6%;(3)布齿系统中双相邻预设自由面的截齿占总体截齿数目比值越大,布齿系统整体能耗越低,异构式布齿系统能耗低于顺序式。研究成果为完善双轮铣槽机破岩过程与布齿系统优化提供了基础。

关 键 词: 双轮铣槽机;布齿系统;优化应用;连续-非连续单元法(CDEM)

中图分类号: TU 94, TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022)04-0981-14

Study on milling process and optimization of pick entry sequence of double-wheel trench cutter

XIAO Jian-cheng^{1,2}, ZHOU Hui^{1,2}, LU Jing-jing^{1,2}, FENG Chun³, XU Fu-tong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Double-wheel trench cutter is a professional construction equipment of underground diaphragm wall, and its tooth arrangement system is its core component. The parameter design of tooth arrangement system is closely related to rock breaking performance. In this study, a three-dimensional simulation method for milling rock and soil with milling wheel is developed using the continuum-discontinuum element method (CDEM). On this basis, considering the correlation between free surface and milling, the mechanism of the influence of cutting sequence on rock breaking performance of tooth arrangement system is studied, and a numerical generalization model of rock entry sequence is established under the condition of associated milling, in which the number of adjacent free surfaces is preset as the main influencing factor. The results show that: (1) The curves of milling force and milling depth obtained by milling wheel milling rock and soil mass verify the correctness of the numerical simulation method. (2) Compared with the intact rock mass, the peak load of rock samples with single adjacent preset free surface and double adjacent preset free surface decreased by 32.5% and 68.2% respectively, and the energy consumption of rock breaking decreased by 19.8% and 56.6%, respectively. (3) In the tooth arrangement system, the larger the ratio of the double adjacent preset free surfaces to the total number of picks, the lower the overall energy consumption of the tooth arrangement system, and the energy consumption of the heterogeneous tooth arrangement system is lower than that of the sequential one. The research results provide a basis for improving the rock breaking process and tooth arrangement system optimization of double-wheel trench cutter.

Keywords: double-wheel trench cutter; tooth arrangement system; optimization and application; continuum-discontinuum element method (CDEM)

收稿日期: 2021-07-07

修回日期: 2021-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41941018); 中国科学院基础前沿科学研究计划(No. ZDBS-LY-DQC022); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(No. KFJ-STG-QYZD-174); 华能集团科技项目(No. HNKJ19-H14)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC)(41941018), the Key Research Program of Frontier Sciences of the Chinese Academy of Sciences (ZDBS-LY-DQC022), the Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-STG-QYZD-174) and the China Huaneng Group Technology Project (HNKJ19-H14).

第一作者简介: 肖建成, 男, 1996年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学与数值模拟方面的研究工作。E-mail: xiaojiancheng19@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 周辉, 男, 1972年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

1 引言

随着我国经济社会的快速发展与人口的日益增长,地下轨道交通已成为提高城市发展水平与提升生活质量的重要基础设施。基坑工程是地下轨道交通建设的重要部分^[1],而地下连续墙的成槽施工是基坑工程中十分重要的环节。

双轮铣槽机(简称“双轮铣”)是地下连续墙施工中一种较为先进的专业施工装备,通过铣轮的切削作用实现岩层的破碎,形成符合设计需求的地下槽。双轮铣具有成槽效率高、深度大、精度高以及噪音低等优点,其主要结构与组成^[2]如图1所示。

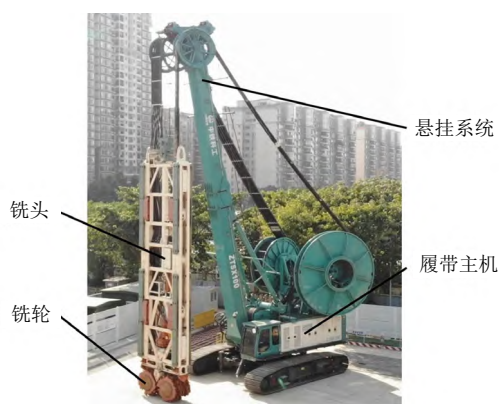


图1 双轮铣槽机主要结构与组成^[2]

Fig.1 Main structure and composition of double-wheel trench cutter^[2]

铣轮布齿系统作为双轮铣破岩的核心部件,决定了设备破岩效率和破岩效果的优劣。双轮铣与全断面隧道掘进机(tunnel boring machine,简称TBM)的破岩原理有较大的区别,TBM的破岩机制^[3]是滚刀挤压片起岩体而产生的剪切作用破碎岩体,而双轮铣通过设备自重对岩体挤压作用以及转动时截齿对岩体产生的冲击荷载破碎岩体。

国外经过几十年的研究与发展,双轮铣设备比较成熟和稳定,但由于国外的技术封锁,铣轮布齿系统设计原理及方法一直未见报道,国内铣轮的制造依靠逆向研究国外现有产品,自主生产的铣轮在破岩性能上与国外成熟产品存在着差距。截齿及其几何排布,即布齿系统,对双轮铣破岩效率、破岩效果以及能耗起到了关键的作用^[4-6],布齿系统即为铣轮设计的核心问题。国内近几年才开始系统地研究布齿系统的破岩理论,其中宋刚^[7]基于理论分析认为铣轮破岩为截齿的冲击破岩,具体为截齿在一定速率下以一定动能接触岩石,对岩石产生冲击应力横波与纵波,两者叠加产生剪切应力从而破碎岩

石;张倩倩等^[8]研究了截齿破岩机制以及不同截线间距对于破岩效果的影响,提出了基于岩石破碎过程的截线间距优化方法;李万莉等^[9]分析了国产液压双轮铣槽机设备的工作状态并评价铣槽机的铣削效果,总结了铣轮铣削岩土受力的周期性变化规律,并提出了一种研究多因素对破岩影响的新方法;康凯旋等^[10]设计研制了旋转铣削试验台,研究了截齿空间排布规律对破岩效率的影响;蔡灿^[11]和李万莉^[12]等则利用LS-DYNA软件进行了单齿冲击破岩的数值模拟,分别研究了岩石和截齿的力学响应特性。

可见,国内对于双轮铣布齿系统破岩理论的研究还处于起步阶段。此外,国内外对于截齿冲击破岩这一问题采用数值模拟研究取得了一定进展,这对于双轮铣布齿系统破岩过程的数值仿真具有借鉴意义,如Hu^[13]、Liu^[14]、Liu^[15]等采用有限元LS-DYNA的Holmquist-Johnson-Cook(HJC)本构模型对截齿破岩的过程进行了模拟,分别对截齿形状、截割倾角等因素影响截割效率的机制进行了研究;Rojek^[16]、Li^[17]、Liu^[18]、Van^[19]等分别采用PFC^{2D}与PFC^{3D}将截齿作为刚体建立了截齿截割岩体数值模型,选取了理想弹脆性接触本构模型等进行计算,并基于PFC微观参数结合岩体损伤研究了其对截割性能的影响。

因此,本文基于连续-非连续单元法(continuum-discontinuum element method, CDEM)建立三维铣轮铣削破岩过程数值模拟方法,开展铣轮铣削岩土体的数值模拟,分别研究铣轮铣削岩体与土体的力学特性并分析二者的异同,为研究铣轮布齿系统提供方法基础。同时考虑自由面与铣削关联性等因素,对布齿系统截齿入岩顺序影响破岩性能机制进行研究,将布齿系统入岩顺序简化为3种具备不同数目自由面截齿的不同组合,建立概化数值模型,获取破岩力随贯入度的变化曲线,研究单个截齿以及布齿系统的破岩能耗,为双轮铣布齿系统性能优化提供思路。

2 铣轮铣削过程与截齿入岩顺序

2.1 铣轮铣削岩土体过程

将刀具破碎岩土体的运动按照其轨迹形态分为了6类^[20],分别为:①平面轨迹;②圆柱面轨迹;③圆锥面轨迹;④双曲面轨迹;⑤球面轨迹;⑥环面轨迹,如图2所示。在实际的刀具破碎岩土体应用中,往往是由其中的一种或两到三种轨迹复合,由此可产生多种刀具破碎岩体的方式,如TBM的盘形滚刀破岩过程复合了两个平面轨迹、煤矿巷道

部分断面掘进机破岩过程复合了平面与圆锥面轨迹、滚筒采煤机破岩过程复合了平面与圆柱面轨迹。

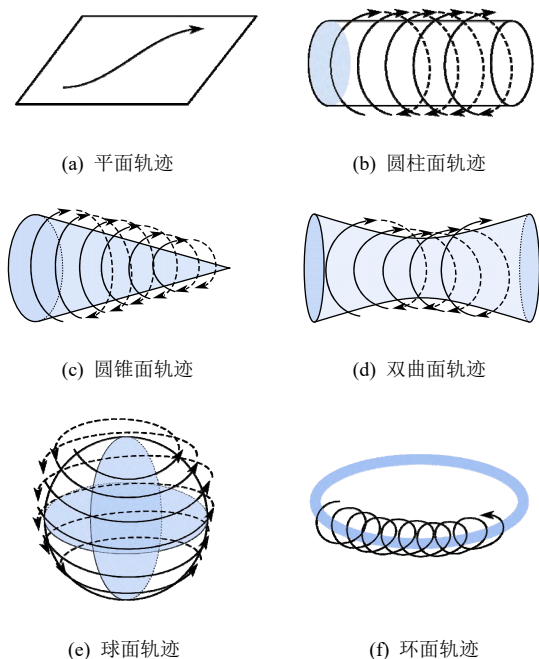


图2 机械破碎岩石的基本运动模式
Fig.2 The basic motion mode of mechanically crushed rock

双轮铣在进行铣削作业时，铣轮不断向深部运动同时旋转带动截齿破岩，因此双轮铣破岩过程复合了平面与圆柱面轨迹。需要说明的是，双轮铣铣削岩土体的过程与铣床铣削金属的过程存在区别，铣削金属时，刀具仅旋转，而被铣削的物体移动；而铣削岩土体时，岩土体保持静止，刀具做复合运动。

同时，岩土体又具有非均质性与各向异性的特征，这就使得刀具破岩的过程具有较大的随机性，因此在很长一段时间中刀具冲击破碎岩土体的机制都未明确，直到近现代国内外学者开始了相关研究，认为其主要机制为刀具冲击荷载下岩土体发生了张拉与剪切破坏，如 Verkaik^[21]、Evans^[22-23]、Roxborough^[24]与 Goktan^[25-26]等建立并完善的以拉伸破坏为主的冲击破岩模型，Nishimatsu^[27]建立的以剪切脆性破坏为主的冲击破岩模型。另外，张时忠^[28]以理论截割循环试验（如图3(a)所示）为基础，研究了3种岩石在截齿作用下的破碎力学特性，获得了截齿破岩过程力-时间曲线，如图3(b)所示，并提出破岩过程中大破碎块的剥离与刀具截割力峰值荷载不存在严格的对应关系，这为双轮铣破岩过程的数值仿真结果提供了借鉴。

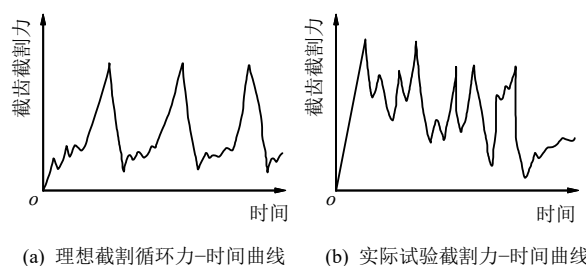


图3 截齿截割岩石理论与试验曲线^[28]
Fig.3 The theory and test curve of cutting rock by pick^[28]

综上所述，双轮铣铣削岩土体过程的三维数值仿真应重点考虑：①实现模拟过程中铣轮平面轨迹与圆柱面轨迹的复合；②能够表征岩土体在冲击荷载下破碎机制的数值方法。

2.2 截齿入岩顺序影响铣削性能的机制

铣轮在铣削过程中接触岩体，截齿在布齿系统几何排列下依次贯入岩体，贯入的顺序为入岩顺序。Bilgin 等^[29]通过大量试验提出了基于截割间距的关联截割与非关联截割的概念，这里的是否关联是指在一定截割间距下的一把截齿截割岩体产生的自由面与裂隙能否为相邻第二把截齿贯入提供辅助破岩作用，特别是可以降低相邻截齿贯入的峰值力。

对于自由面在完整岩体破碎中的辅助作用，已有许多学者研究并在工程中应用，如在爆破工程中，随着自由面数目的增加^[30]，达到相同爆破效果的装药量显著下降；Zhang^[31]、Zhang^[32]、Wang^[33]等进行的新颖破岩模式的试验与数值研究，也得出了相邻自由面在冲击破岩关联铣削中起到主要辅助作用。但是，只有在一定截割间距下两把截齿才可存在关联铣削关系，在此可假设布齿系统中的相邻截齿呈关联铣削关系，非相邻截齿呈非关联铣削关系，由此截齿贯入岩体时存在着3种初始状态：①无相邻自由面；②存在1个关联铣削截齿创造的自由面；③存在2个关联铣削截齿创造的自由面。

以5个截齿组成的一个布齿系统为例，5个截齿分别标为1~5号，5个截齿的不同入岩顺序形成了不同的布齿系统，根据截齿贯入岩体时不同初始状态可以将这些布齿系统分为3类：①5个截齿按序号顺序依次贯入，其中1个截齿无相邻自由面，4个截齿依次贯入各存在1个相邻自由面；②一侧2个不相邻截齿首先贯入，均无相邻自由面，其他截齿从本侧依次贯入，1个截齿存在两个相邻自由面，2个截齿各存在一个相邻自由面；③从一侧3个不相邻的截齿依次贯入，均无相邻自由面，剩余2个截齿依次贯入，各存在两个自由面。5个截齿以不

同排列方式即存在 3 种代表性的入岩顺序, 如图 4 和表 1 所示。

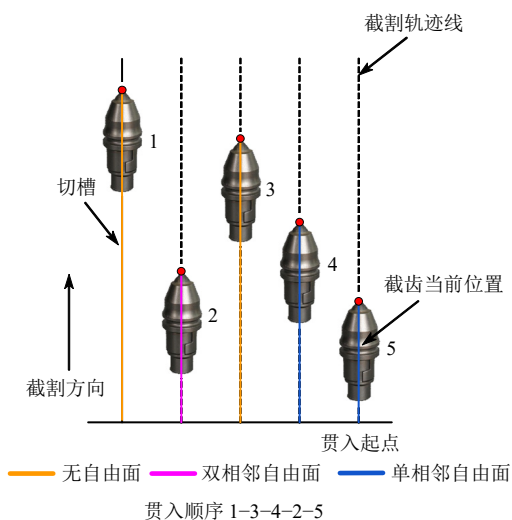


图 4 多截齿入岩顺序示意图

Fig.4 Schematic diagram of the sequence of multiple picks entering the rock

表 1 不同入岩顺序情况下各截齿相邻自由面数目

Table 1 The number of adjacent free surfaces of each pick under different rock entry sequence

入岩顺序	不同截齿相邻自由面数目				
	1	2	3	4	5
1-2-3-4-5	0	1	1	1	1
1-3-4-2-5	0	2	0	1	1
1-3-5-2-4	0	2	0	2	0

由于不同布齿系统下具有不同个数相邻自由面的截齿数目不同, 从而各布齿系统截齿破岩所需能量也存在不同。因此, 揭示布齿系统入岩顺序影响破岩性能与效率的机制, 对优化双轮铣削岩体的性能具有重要意义。

3 铣轮铣削过程的三维数值仿真与岩土体铣削力学特性分析

3.1 连续-非连续单元法

截齿冲击破岩的数值实现是一个复杂的问题, 岩土体受到截齿冲击荷载时, 发生了由完整到破坏再到破碎的渐进过程^[34], 在力学上的体现即为材料由弹性状态转变为塑性状态, 由完整状态产生微裂隙, 进而产生破碎。有限单元法能较好地模拟材料由弹性状态转变为塑性状态的过程, 而对材料破坏后转化为破碎过程中所显现出的非线性特征不能较好地描述, 目前有限元方法中引入的 HJC 本构模型可以来描述岩土体及混凝土材料的动态力学行为,

但由于其参数获取方法复杂且验证困难^[35], 在模拟岩石中的应用较少; 离散元颗粒流法能较好地描述岩土体由破坏到破碎的演化过程, 但由于其颗粒视为刚性体, 对于岩土体破碎时塑性区与破裂面的演化关系不能很好地描述。因此需要选取一种能够表征材料由弹性状态至破碎状态这一完整渐进变化过程的数值方法对该问题进行研究。

CDEM 可定义为一种拉格朗日系统下的基于可断裂单元的动态显式求解办法^[36]。通过拉格朗日能量系统建立严格的控制方程, 利用动态松弛法进行显示迭代求解, 实现连续与非连续的统一描述。

CDEM 方法主要包含块体方法 (BlockDyna) 与颗粒方法 (PDyna), 块体方法由一个或多个有限元单元组成, 表征材料的弹性、塑性以及损伤情况等连续特征, 块体之间的公共界面用于表征材料的断裂、滑移以及碰撞等非连续特征^[37-38]。颗粒离散元由颗粒与连接键组成, 通过颗粒间连接键的损伤与断裂模拟材料由连续到非连续的破坏过程。因此, 岩体与土体在铣轮铣削作用下由完整块体到破裂再到破碎, 可由 CDEM 方法完整地模拟仿真。

CDEM 块体离散元方法的单元通过 Lagrange 能量系统建立基本方程, 其表达式为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{u}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial u_i} = Q_i \quad (1)$$

式中: Q_i 为系统的保守力; L 为拉格朗日函数; t 为时步; \dot{u}_i 为当前时步的速度; u_i 为当前时步的位移。

该本构模型依据当前时步的速度梯度确定应变增量, 为

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \Delta t \quad (2)$$

式中: $\Delta \varepsilon_{ij}$ 为当前时步的位移增量; v 为当前时刻的节点速度; Δt 为计算时步。

弹性力学的本构方程:

$$\Delta \sigma_{ij} = C_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} \quad (3)$$

式中: $\Delta \sigma_{ij}$ 为当前时步的应力增量; C_{ijkl} 为材料常数; $\Delta \varepsilon_{kl}$ 为当前时步的应变增量。

累计形成当前时步的应力增量

$$\sigma_{ij} = \sum \Delta \sigma_{ij} \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 为当前时步的应力增量。

根据 Mohr-Coulomb 强度准则, 取应力张量判

断当前是否达到或超过破坏准则，为

$$\left. \begin{aligned} f^s &= \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \\ f^t &= \sigma_3 - T \\ h &= f^t + \alpha_p(\sigma_1 - \sigma_p) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \\ \alpha_p &= \sqrt{1 + N_\varphi^2} + N_\varphi \\ \sigma_p &= T(t)N_\varphi - 2c(t)\sqrt{N_\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： f^s 为单元间接触面的剪切应力； f^t 为单元间接触面的张拉应力； c 为黏聚力； φ 为内摩擦角； T 为抗拉强度； N_φ 、 α_p 、 σ_p 为常数； h 为常数，判断材料是否发生破坏。当 $f^s \geq 0$ 且 $h \leq 0$ 时，材料发生剪切破坏；如果 $f^t \geq 0$ 且 $h > 0$ ，则发生拉伸破坏。

当单元发生剪切与拉伸破坏时，分别进行主应力的修正，修正方法不再赘述。

接触面采用 Mohr-Coulomb 脆断本构模型，该本构模型在执行时，首先建立接触对，而后计算接触对法向弹簧与切向弹簧的接触力，其计算表达式为

$$\left. \begin{aligned} F_n(t + \Delta t) &= F_n(t) - K_n \Delta d_n \\ F_s(t + \Delta t) &= F_s(t) - K_s \Delta d_s \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： F_n 为法向接触力； F_s 为切向接触力； K_n 为接触面的法向刚度； K_s 为接触面的切向刚度； Δd_n 与 Δd_s 分别为当前时步接触面法向与切向的距离变化量。

为计算材料的渐进破坏过程，在获得当前时步的接触力后，采用 Mohr-Coulomb 准则与最大拉应力准则判断接触面是否发生破坏，其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \text{if } -F_n \geq TA \quad F_n &= F_s \\ \text{next step } c &= 0, T = 0 \\ \text{if } F_s \geq F_n \tan \varphi + cA \\ F_s \geq F_n \tan \varphi + cA \\ \text{next step } c &= 0, T = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

当接触面的接触力达到强度准则时，接触面的抗拉强度与黏聚力清零，接触面接触失效从而发生破坏。

CDEM 颗粒离散元方法同样采用 Lagrange 能量系统建立基本方程，颗粒之间连接键接触力的显式迭代计算公式为

$$\left. \begin{aligned} F_n(t_1) &= F_n(t_0) - K_n \Delta d_n \\ F_s(t_1) &= F_s(t_0) - K_s \Delta d_s \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

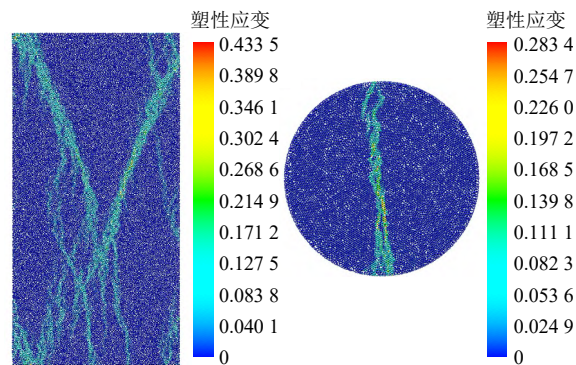
岩体的颗粒接触失效同样采用脆性 Mohr-Coulomb 的判断方法，与式 (6) 类似，此处不再赘述。

3.2 数值模型与验证

采用 CDEM 建立岩石单轴压缩试验与巴西劈裂试验、土直剪试验的颗粒流模型，其中不考虑土壤中水对剪切过程的影响，对后续计算中所使用的参数及该数值方法进行验证。红砂岩^[39]与粉土^[40]参数如表 2 所示，岩石的单轴压缩与巴西劈裂模拟结果如图 5 所示。

表 2 岩土体材料参数
Table 2 Rock and soil material parameters

材料种类	密度 ρ / (kg · m ⁻³)	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	抗拉强度 σ_t / MPa	黏聚力 c / MPa	内摩擦角 φ / (°)
红砂岩	2 500	2 000	0.20	3	9.000	28
粉土	2 000	12	0.25	0	0.018	22

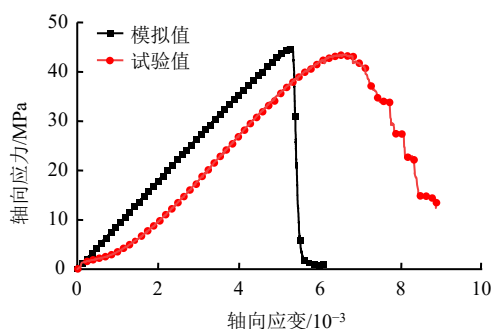


(a) 单轴压缩试验塑性应变云图 (b) 巴西劈裂试验塑性应变云图

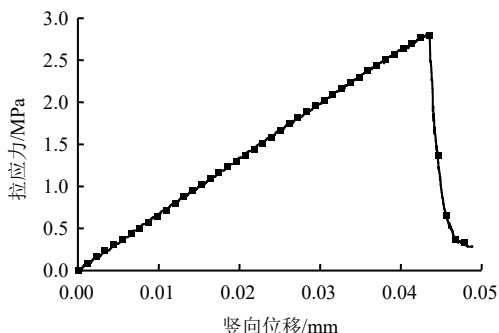
图 5 岩石单轴压缩与巴西劈裂模拟塑性应变云图
Fig.5 Plastic strain cloud diagram of rock uniaxial compression and Brazilian splitting simulation

将模拟结果与文献[39]中的试验结果进行对照，如图 6 所示。试验结果单轴抗压强度为 43.52 MPa、抗拉强度为 3.02 MPa；模拟结果单轴抗压强度为 44.99 MPa、抗拉强度为 2.81 MPa。模拟结果与试验结果较为吻合，表明该模型能够较好地反映岩石的脆性特征。

土的直剪试验模拟结果如图 7、8 所示，对法向应力与峰值剪切强度进行线性拟合，并将结果代入摩尔-库仑强度准则中，得到 c 为 0.021 MPa， φ 为 22.79°，模拟结果与土的材料力学性质较为吻合。



(a) 单轴压缩模拟与试验结果



(b) 巴西劈裂试验模拟结果

图 6 岩石单轴压缩与巴西劈裂模拟曲线

Fig.6 Simulation curve of rock uniaxial compression and Brazilian splitting

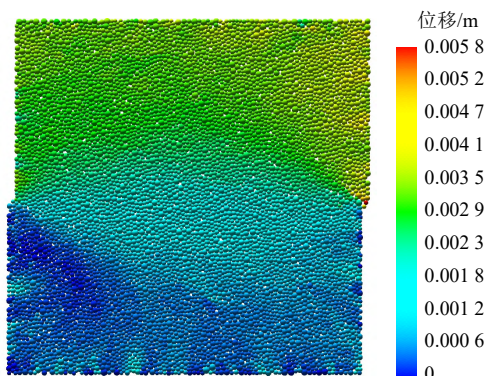


图 7 土的直剪试验模拟位移云图

Fig.7 Simulated displacement cloud diagram of soil in direct shear test

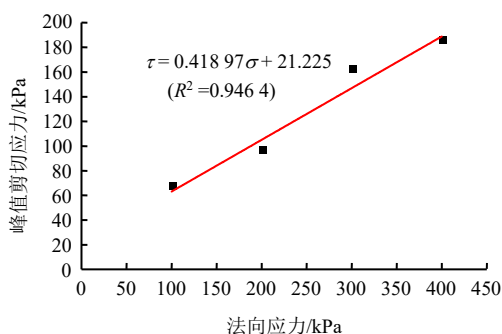


图 8 土的直剪试验模拟法向应力-峰值剪切应力线性拟合结果

Fig.8 Direct shear test simulation results of normal stress-peak shear stress linear fitting

根据验证性模拟的结果，所得到岩石与土的强度指标与材料自身性质较为吻合，所建立的数值模型与选用的本构关系可以较好地表征岩石与土的物理力学性质，说明了 CDEM 模拟该问题的合理性与可行性。

由此，可基于 CDEM 建立铣轮铣削岩土体过程的数值模型，如图 9 所示。为提高计算效率，岩土岩体尺寸为 2.0 m×4.0 m×1.5m，颗粒尺寸为随机生成，随机区间为 3~4 mm；铣轮模型为 ZTSX100 型双轮铣槽机铣轮的简化。

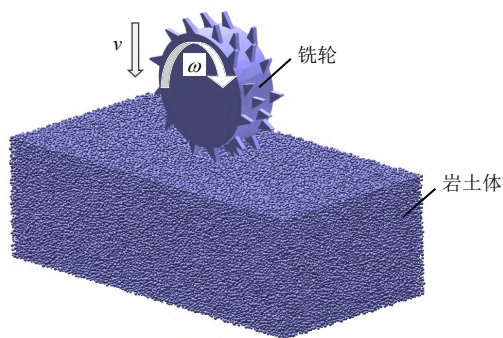


图 9 铣轮铣削岩土体数值模型

Fig.9 Numerical model of milling wheel milling rock and soil

岩土体底面设置为铰接约束，侧面设置法向位移约束。除铣削面之外施加无反射边界条件，防止冲击应力波在边界处反射造成难以预测的破坏。岩体与土颗粒本构模型采用 M-C 准则，岩体颗粒连接键采用脆性 M-C 准则，土体颗粒连接键与颗粒相同。

铣轮网格设置为刚性体，在铣削过程中铣轮网格无变形，并设置铣轮与岩土体之间为线性弹簧元接触模型。根据 ZTSX100 型双轮铣槽机的几何尺寸与运动方式，取铣轮半径为 750 mm，模拟中铣轮的运动方式为竖直方向直线与自身旋转复合运动，如图 9 所示，铣轮转速为 25 r/min，单次入岩深度 7 mm。在铣轮上设置监测点，对铣轮贯入深度、铣削力进行监测与记录。

3.3 铣轮铣削岩体过程分析

铣轮铣削岩体时，铣轮上铣齿接触岩体瞬间，在接触点处产生剪切应力链，并向外扩散。剪切应力链沿颗粒之间的连接键向外传递，呈放射状，如图 10、11 所示。

多截齿共同铣削岩体时，各截齿冲击岩体产生的剪切应力区存在相互重叠的现象。在截齿间距布置合理的情况下，相邻截齿之间的剪切应力在截齿之间的区域叠加，能够更好地破坏截齿之间的岩体。

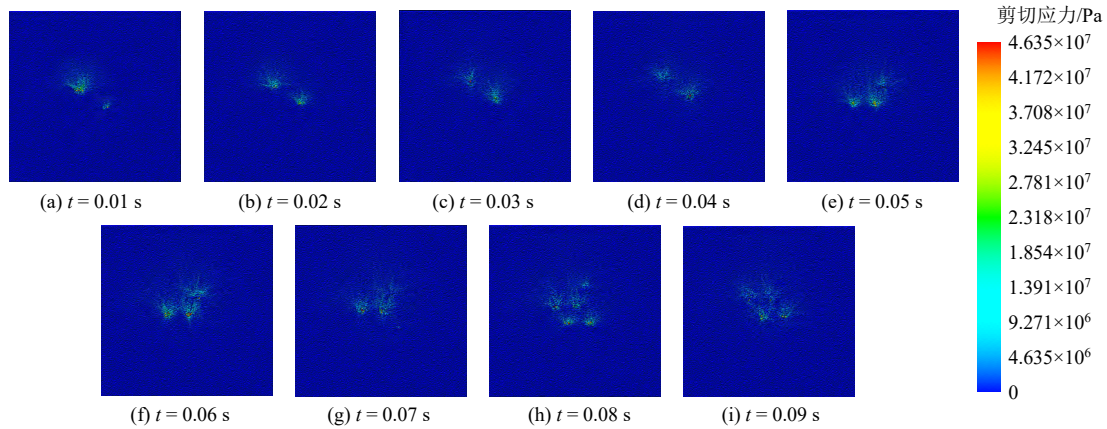


图 10 铣削岩体初时刻岩体表面受剪切应力情况

Fig.10 Shear stress on the surface of rock mass at the beginning of milling rock

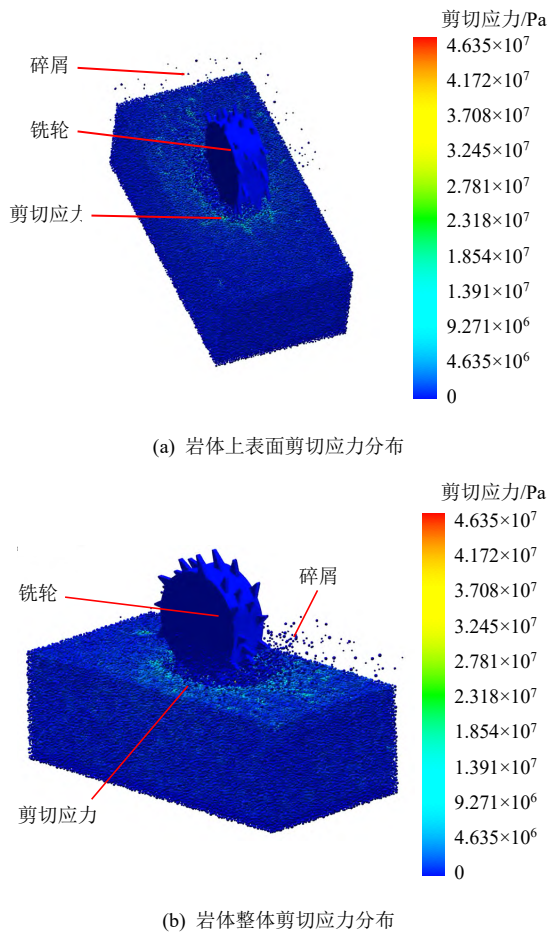


图 11 铣轮铣削岩体表面剪切应力分布

Fig.11 Distribution of shear stress on the surface of rock mass milled by milling wheel

当铣轮开始铣削完整岩体时，岩体受到截齿的冲击与铣轮的挤压，在弹性阶段的应力水平迅速提升直至达到岩体屈服极限应力水平，此时的铣削力幅值是整个铣削阶段的峰值，如图 12 所示。在此之后截齿尖端附近的岩体发生破坏，并在内部产生微裂隙，截齿破岩力因内部微裂隙与岩体破碎程度的

提高而逐渐降低，并在铣轮的压力、回转摩擦力以及截齿的反复冲击作用下，岩体破碎区域由局部逐渐发展到整体，铣削力最终下降到一个较低的水平。

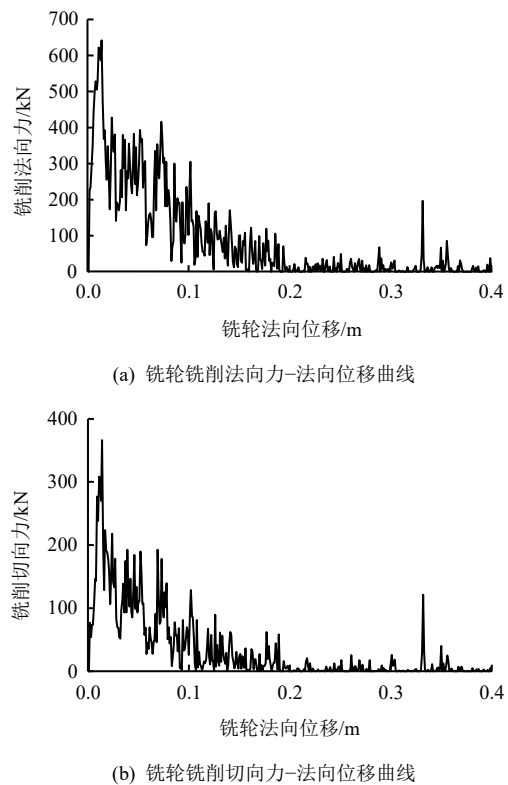


图 12 铣轮铣削岩体荷载曲线

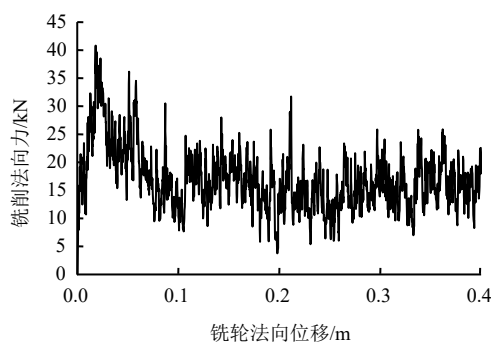
Fig.12 Load curve of milling wheel milling rock mass

在铣削过程中，岩体所受的切向力与法向力均对破岩产生了作用。在铣削岩体时，切向力水平与法向力水平较为接近。说明铣轮在破碎岩体时，岩体的破碎既有法向应力的挤压作用又有切向应力对破碎点处岩体的张拉与剪切作用，挤压作用使岩体发生破碎，张拉与剪切作用将岩块剥离出岩层，3

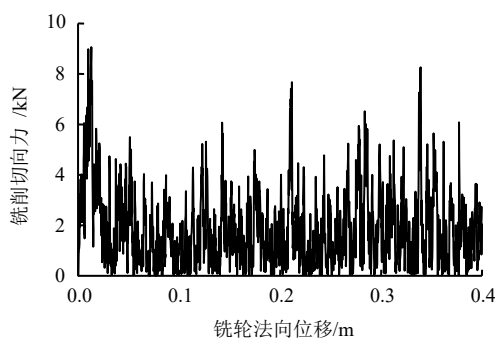
种力相互作用成为岩体破坏与破碎的主要原因。

3.4 铣轮铣削土体过程分析

当材料更换为土时,铣削荷载曲线如图 13 所示。由于土的力学特性与岩体有着显著的区别,土的孔隙度较大且强度较低^[41]。当铣轮铣削土体时,土体受铣轮的挤压被压密,因此在铣削前期的峰值力有显著的上升。土体被压密至一定程度后,铣削力达到整个铣削过程的峰值,随后土体内部发生破坏与破碎。由于土体与脆性岩体的性质差异,土体并不会发生岩体类似的脆性破碎现象,土体颗粒间仍保持一定的黏聚力,因此,铣削峰值力下降到一定程度后保持一个较为稳定的区间,直至完成铣削作业。铣削过程中,铣削法向力水平大于切向力水平,说明土在被铣削脱离土体时,以截齿的挤压为主,受剪切与张拉作用较小,这与土的力学特性一致。



(a) 铣轮铣削法向力-法向位移曲线



(b) 铣轮铣削切向力-法向位移曲线

图 13 铣轮铣削土体荷载曲线

Fig.13 Load curve of milling wheel milling soil

4 截齿入岩顺序影响破岩效率力学机制与优化研究

4.1 入岩顺序概化模型

考虑自由面与铣削关联性等因素,可将布齿系统入岩顺序研究概化为预设不同数目相邻自由面的截齿冲击破岩过程研究,建立不同数目预设相邻自

由面的截齿冲击破岩数值模型,如图 14 所示。得到不同数目预设自由面条件下的贯入峰值力曲线与能耗曲线,结合表 1 给出的不同布齿系统入岩顺序对应的自由面数目,对不同入岩顺序的布齿系统进行分析,以得到入岩顺序影响破岩效率的机制并提出优化方案。

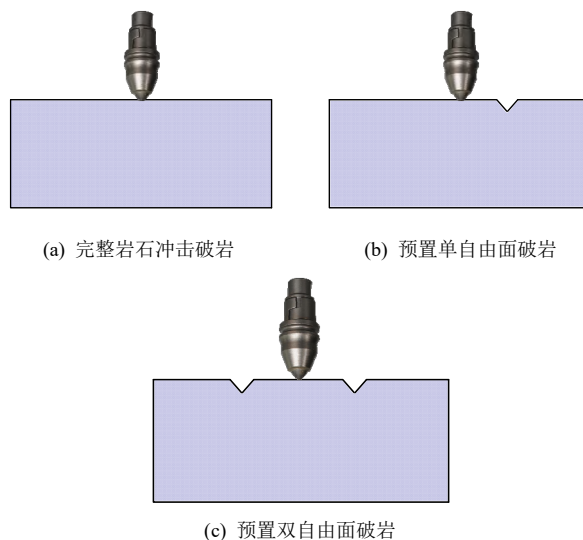


图 14 布齿系统入岩顺序概化模型

Fig.14 Generalized model of the rock-entry sequence of the tooth arrangement system

由此,分别建立完整岩体、单侧自由面和两侧自由面的二维模型,模型宽为 100 mm、高为 50 mm,以尽量减小边界效应对模拟结果的影响,如图 15 所示。根据相关文献,预设自由面深度为 7 mm,距破岩中心点距离 26 mm^[10]。在距离破岩位置较远处部分采用较大尺寸的网格,在破岩附近区域对网格进行局部加密^[42],以提高计算效率。

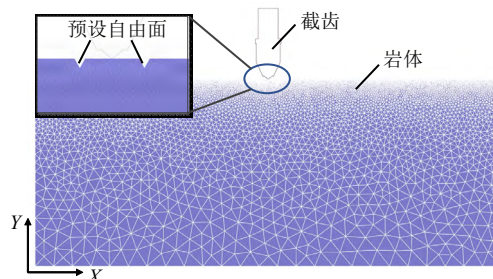


图 15 截齿破岩二维数值模型

Fig.15 Two-dimensional numerical model of picks breaking rock

截齿模型采用市面上常见的聚晶金刚石复合片(PDC)截齿模型,根据上文采用的 ZTSX100A 型双轮铣槽机参数,通过下面计算线速度的公式可计

算得到截齿的贯入速率为 0.25 m/s:

$$v_g = \omega r \tag{10}$$

式中： v_g 为截齿的贯入速率； ω 为铣轮的转速； r 为铣轮旋转中心到截齿尖端的距离。

计算采用 CDEM 块体方法，冲击破岩过程的岩体应变率较大，因此作为动态问题（真实质量）进行分析与计算。计算中截齿与岩体进行接触计算，截齿设置为刚体，贯入速度为 0.25 m/s，岩体单元本构模型设置为 M-C 准则，接触面本构设置为脆性 M-C 准则。计算中取灰砂岩试样的岩体力学参数^[43]，岩体密度为 2 340 kg/m³，弹性模量为 2.4 GPa，泊松比为 0.2，黏聚力为 16.34 MPa，抗拉强度为 0.8 MPa，内摩擦角为 40°。

岩体模型除破岩面之外，其余面采用无反射边界条件，以消除边界反射波造成试样内复杂应力波的存在而干扰模拟结果。侧边施加法向位移约束边界条件，底边施加全约束边界条件。

4.2 截齿贯入模拟结果与不同入岩顺序能耗分析

以相邻预设自由面数目作为自变量进行截齿冲击贯入模拟，自由面数目分别为 0、1、2 个，经 CDEM 计算可得破岩力-贯入度的曲线，如图 16 所示，在截齿开始贯入岩体时，破岩力呈线性趋势上升，随内部裂隙开始发育，破岩力出现波动，但仍保持稳定上升趋势不变。

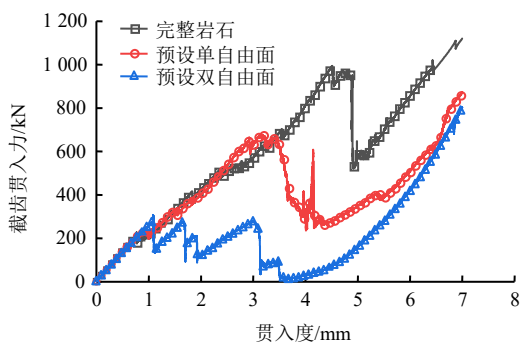


图 16 预设不同数目自由面条件下的截齿破岩力-贯入度曲线

Fig.16 Rock breaking force-penetration curves of picks under different number of preset free surfaces

当达到岩体屈服极限时，冲击点附近岩体发生破坏并出现脆性破碎，破岩力发生突降。由于冲击破岩的“跃进式侵入”特性^[34]，影响区域岩体发生破坏后，破岩峰值力继续提高，对下方岩体继续破坏，由于失去了相邻自由面的辅助作用，因此贯入力继续升高并超过初次峰值点，当贯入度达到预定贯入深度后，后续的贯入力值不再探讨。

随着预设自由面数目的提升，岩体初破坏峰值力显著下降，如图 17 所示，当试样为完整岩体、单预设自由面与双预设自由面时的岩体初次破坏峰值力分别为 994、671 kN 与 316 kN。单预设自由面与双预设自由面相对于完整岩体分别为 67.5 % 与 31.8 %，峰值力显著下降。

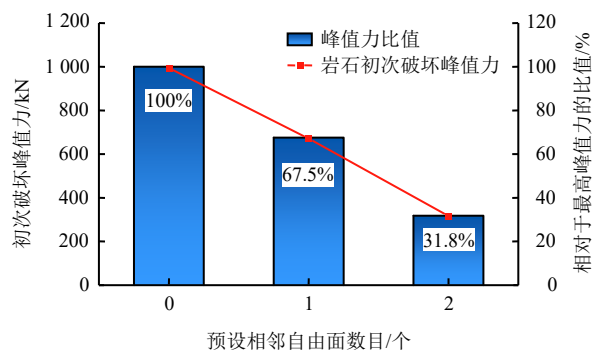


图 17 岩体初次破坏峰值力随预设自由面数目的变化关系
Fig.17 The relationship between the initial failure peak force of rock and the number of preset free surfaces

根据能耗的计算公式：

$$w_i = \int_0^l F dl \tag{11}$$

式中： w_i 为不同预设自由面数目的截齿对应的破岩能耗，其中 i 为预设自由面数目 ($i = 0, 1, 2$)； F 为破岩力； l 为贯入度。

计算不同预设自由面数目情况下截齿贯入耗能情况，如图 18 所示，随着预设自由面数目的增加，破岩所需能耗显著下降，单自由面与双自由面相比于完整岩体能耗分别下降 19.8% 与 56.6%。

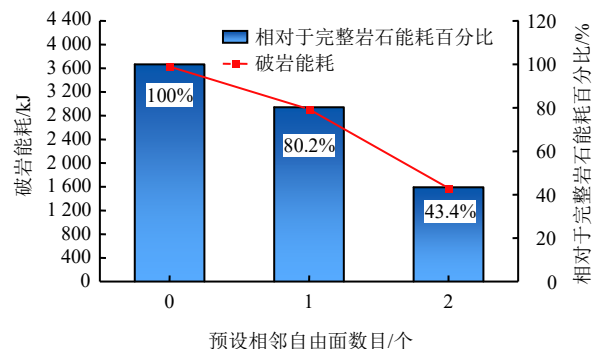


图 18 破岩能耗随预设自由面数目的变化关系
Fig.18 The relationship between the energy consumption of rock breaking and the number of preset free surfaces

在截齿冲击岩体的初始时刻，从图 19、20 中可以观察到岩体内部由于冲击载荷引起的位移以及剪切应力波的产生与传播，并存在明显的波面，其形状为以冲击载荷点为中心的圆弧，其边缘与岩体表

面的夹角约为 40°，从数值模拟的角度验证了目前截齿破岩的应力波理论。

从图 21 可以看出，当破岩力达到岩体的破坏极限后，岩体内部裂隙开始发育。随着截齿贯入，破裂区域增加，并出现由冲击点至预设自由面底部的贯通式主裂隙，其形态呈“八”字形状，并在周边伴生裂隙，在截齿两侧形成两个形态基本对称的三角区，该现象与徐福通等[44]进行的有无预切槽试样的常截面压头贯入试验结果类似。当三角区内裂隙充

分发育后，因其内部蕴含的应变能，使岩体发生瞬间崩解破碎。从图 21 中可以看出，截齿冲击破坏时岩体的主要破坏形式为张拉破坏与拉剪破坏，截齿附近以及三角区域内主要的破坏形式为拉剪破坏，而下方的岩体破坏形式主要为张拉破坏并伴有少量的纯剪切破坏。从数值模拟角度证明了 Evans^[21-22]与 Nishimatsu^[27]提出的冲击破岩的张拉失效与剪切失效理论，为双轮铣槽机破岩机制的研究与布齿系统的优化设计提供了理论支撑。

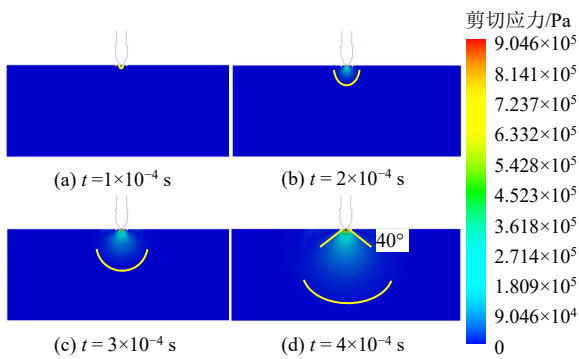


图 19 破岩初始时刻剪切应力在岩体中的传播

Fig.19 The propagation of shear stress in the rock mass at the initial moment of rock breaking

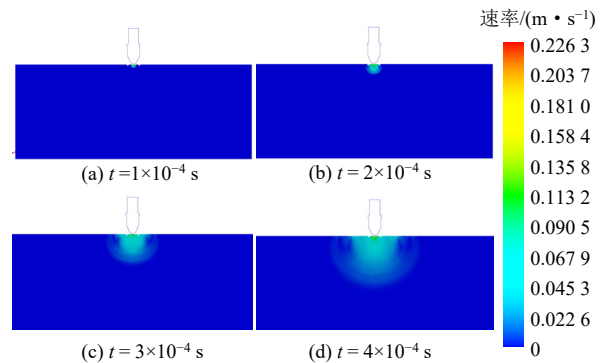


图 20 破岩初始时刻岩体内部节点速度分布

Fig.20 Velocity distribution of nodes inside the rock mass at the initial moment of rock breaking

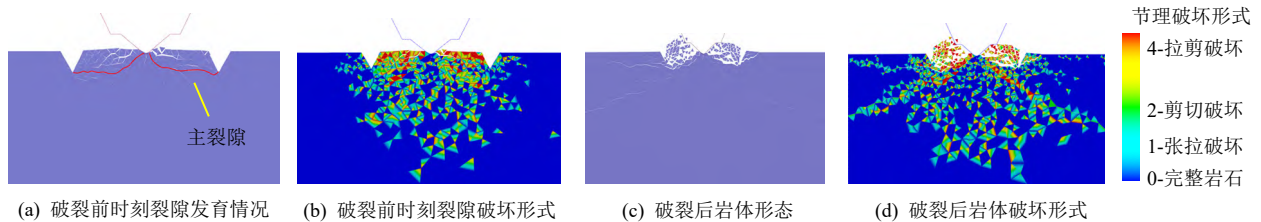


图 21 双预设自由面岩体破坏时刻形态以及破坏类型

Fig.21 Failure mode and failure type of double pre-cut rock mass

4.3 布齿系统入岩顺序对破岩效果的影响

根据上文对预设自由面数目影响破岩峰值力与能耗的分析，可以推导出布齿系统入岩顺序能耗的计算公式。设布齿系统中无预设自由面的截齿数为 m 个，单预设自由面的截齿数为 n 个，双预设自由面的截齿数为 p 个，结合式 (11) 获得的不同预设自由面数目的截齿贯入能耗，可得不同入岩顺序的布齿系统能耗公式为

$$W = \sum_{j=0}^m w_0 + \sum_{j=0}^n 0.802w_1 + \sum_{j=0}^p 0.434w_2 \quad (12)$$

式中： W 为该布齿系统工作一个周期的能耗； w_0 、 w_1 、 w_2 分别为预设自由面数目为 0、1、2 时截齿工作一个周期的能耗。

以 5 个截齿构成的布齿系统为例，可以估算其不同排布方式下工作一个周期的破岩能耗，结果如表 3 所示。

表 3 不同入岩顺序情况下各截齿相邻自由面数目
Table 3 The number of adjacent free surfaces of each pick under different entry sequences

编号	入岩顺序	各截齿的自由面数目					破岩能耗 /J
		1	2	3	4	5	
1	1-2-3-4-5	0	1	1	1	1	15 255.93
2	1-5-2-4-3	0	1	2	1	0	14 644.12
3	1-5-3-2-4	0	2	0	2	0	14 032.31

将按截齿编号从小到大或从大到小排列的入岩顺序叫做顺序式，将不按截齿编号的入岩顺序叫做

异构式，从图 22 和表 3 可以看出，编号 1 顺序式的布齿系统截齿按照编号顺序进行截割，破岩能耗最高。编号 2 与编号 3 所代表的异构式布齿系统破岩能耗显著降低，分别下降了 4.01% 与 8.02%。双轮铣槽机施工时铣轮连续工作。在理想情况下，以 ZTSX100A 双轮铣槽机为例，假设铣轮上布置有 4 个周期的截齿，铣轮转速为 25 r/min，单切槽长 1.5 m，数值模拟结果根据截齿尖端的接触尺寸等效厚度为 0.01 m，按照上述计算的结果可估算连续工作 1 h 所节约的能耗为

$$Q = \sum W_1 - \sum W_3 = \frac{2 \times \int_0^{1.5} (4R \cdot W_1 \cdot 60 - 4R \cdot W_3 \cdot 60) dl}{3.6 \times 10^6} = 61.181 \quad (13)$$

式中： Q 为铣轮工作 1 h 节约的能耗 (kW · h)； W_1 为编号 1 布齿系统铣轮的破岩能耗 (J)； W_3 为编号 3 布齿系统铣轮的破岩能耗 (J)； R 为铣轮转速； l 为模型的等效厚度。

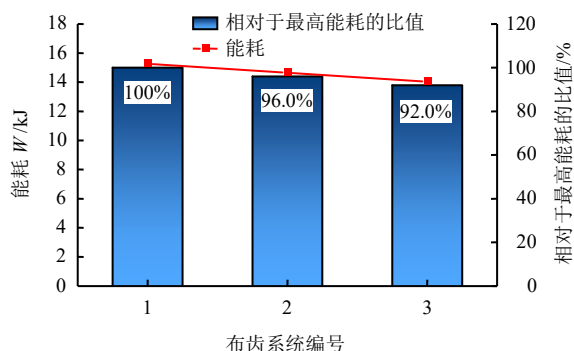


图 22 不同入岩顺序对应的能耗以及比值
Fig.22 Energy consumption and ratio corresponding to different rock entry sequences

由此可见，布齿系统调整对能耗的降低效果是明显的。

5 铣轮布齿系统优化设计方法讨论

国内双轮铣槽机的铣轮设计与制造还处于起步阶段，铣轮布齿系统破岩机制研究还未形成系统的理论体系。因此，国产双轮铣槽机实现全部自主研发与制造并赶超现有国际水平，首先需要剖析截齿的破岩机制，同时深入研究布齿系统参数影响截齿破岩性能指标的规律，最终形成具有一定系统性与适用性的规范化布齿系统设计方法。

对铣轮布齿系统进行优化设计的目的主要有两个，一是通过研究破岩机制与布齿系统参数影响破

岩效果与效率的原理形成国产化的双轮铣槽机设计与制造规范，使国产双轮铣槽机超过现有国际水平；二是针对我国施工环境与地质条件进行适应性设计。在布齿系统的多个设计参数中，截齿间距与入岩顺序对破岩性能具有较大的影响。

通过对入岩顺序的研究，发现布齿系统中存在相邻双自由面的截齿数目越多，整体布齿系统能耗越低，平均破岩峰值荷载越低。若将截齿入岩顺序进行简化，可以将其看作一个数学和几何问题，并将不同截齿数所对应最大双自由面进行总结归纳，如表 4 所示，在布齿系统设计时可将此参数作为参考。

表 4 不同截齿数量的布齿系统对应最大双自由面截齿数分布情况

Table 4 The distribution of the maximum number of double free surface picks corresponding to the tooth arrangement system with different numbers of picks

布齿系统截齿数量	无相邻自由面截齿数	单相邻自由面截齿数	双自由面截齿数
3	2	0	1
4	0	2	1
5	3	0	2
6	3	1	2
7	4	0	3
8	4	1	3
9	5	0	4
10	5	1	4

本文对于布齿系统入岩顺序的研究尚未考虑截齿间距产生的影响，因此需要设计更加详尽的试验与现场试验验证才可形成系统性的设计方案，数值模拟方法仅能在理想条件下对该问题作出理论上的解释。

从目前的研究来看，冲击破岩不论是从破岩效率与效果还是从能耗上均优于传统挤压破岩方法，因此其应用场景可拓展性较强，特别是异形断面的掘进有较好的拓展前景。因此对布齿系统的研究重点应为其适应性研究，通过调整布齿系统参数使其应用到更多场景。

6 结 论

通过开展文献调研、理论分析以及数值模拟，研究了双轮铣槽机铣轮铣削岩土体过程以及布齿系统入岩顺序对破岩峰值力与能耗的影响，得出的主要结论如下：

(1) 基于双轮铣铣削岩体运动过程与入岩顺序影响机制的分析，建立了双轮铣铣轮铣削岩体过程

的数值模拟方法,同时建立了铣轮布齿系统截齿入岩顺序概化模型,为双轮铣铣轮布齿系统的设计与优化方法提供了参考。

(2)基于 CDEM 颗粒方法模拟了铣轮竖直与回转运动下截割岩体与土体的过程,并根据获得的铣削力-深度曲线总结了双轮铣槽机铣削岩土体的规律,同时说明了 CDEM 方法模拟完整铣轮铣削岩土过程的可行性,为后续研究铣轮布齿系统优化方法提供了基础。

(3)基于 CDEM 块体方法模拟了不同相邻预设自由面情况下截齿的破岩过程。破岩的峰值力以及能耗随相邻预设自由面数目的增加而降低,双相邻预设自由面情况下的峰值力以及能耗相较于完整岩体,分别降低了 68.20%与 56.60%。

(4)说明了异构式布齿系统能耗显著低于顺序式布齿系统。布齿系统中具有双相邻自由面的截齿数目占比越大,整体系统的能耗越低。为铣轮布齿系统的设计提供了一定的依据。

值得注意的是,通过改变布齿系统参数以达到优化铣削效率、提升铣削性能并降低铣削能耗的方式在数值模拟与相似的试验结果上取得了较好的效果,能够为现有的双轮铣槽机布齿系统设计提供一定的依据,但是本文在研究入岩顺序因素时,并未考虑截线间距与预设自由面下方破裂岩体所带来的影响。因此复杂工程条件下仍需要进行大量的测试与试验研究,及设计能够实现相应破岩过程的试验仪器对布齿系统参数进行系统性的研究。

参 考 文 献

- [1] 董立波,胡兆东,孙前伟,等.超硬地层条件地铁车站地下连续墙成槽施工工艺比选研究[J].智能城市,2020,6(21):16-18.
DONG Li-bo, HU Zhao-dong, SUN Qian-wei, et al. Comparison and selection of construction techniques for troughing underground diaphragm walls of metro stations with super-hard stratum conditions[J]. *Intelligent City*, 2020, 6(21): 16-18.
- [2] 李晟.双轮铣槽机铣轮系统动力学特性研究[D].武汉:武汉大学,2014.
LI Sheng. Research on dynamic characteristics of cutting wheel system of trench cutter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [3] 刘泉声,潘玉丛,孔晓璇,等.TBM滚刀贯入过程中泥岩破坏特征试验研究[J].岩土力学,2016,37(增刊1):166-174.
LIU Quan-sheng, PAN Yu-cong, KONG Xiao-xuan, et al. Experimental investigation on mudstone fragmentation characteristics in indentation process by TBM disc cutter[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Suppl. 1): 166-174.
- [4] 张鑫,李旭,高魁东,等.截齿截割过程中应力叠加效果对截割载荷的影响[J].中国工程机械学报,2017,15(2):165-169.
ZHANG Xin, LI Xu, GAO Kui-dong, et al. Influence of stress superposition effect on cutting load in picks cutting process[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2017, 15(2): 165-169.
- [5] 纪玉杰,张建川,孙裕晶.截齿叶序排布方式对截割头横向载荷的影响[J].沈阳理工大学学报,2016,35(5):48-53.
JI Yu-jie, ZHANG Jian-chuan, ZHANG Yu-jing. The effect of pick distribute with phyllotaxis parameters on cutting heads' lateral load[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2016, 35(5): 48-53.
- [6] 张梦奇.截齿排布螺旋线对纵向截割头性能的影响[J].煤炭科学技术,2013,41(12):84-88.
ZHANG Meng-qi. Influence of pick arrangement for spiral line on longitudinal cutting head performance[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(12): 84-88.
- [7] 宋刚.连续墙铣槽机铣轮优化设计试验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
SONG Gang. Design optimization for diaphragm trench cutting wheel[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [8] 张倩倩,韩振南,张梦奇,等.截齿破岩机制及截线间距优化试验研究[J].岩土力学,2016,37(8):2172-2179,2186.
ZHANG Qian-qian, HAN Zhen-nan, ZHANG Meng-qi, et al. Experimental study of breakage mechanisms of rock induced by a pick and associated cutter spacing optimization[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(8): 2172-2179, 2186.
- [9] 李万莉,刘祥勇,姜燕,等.液压双轮铣槽机铣削岩土受力的试验探究[J].振动与冲击,2016,35(19):119-124,161.
LI Wan-li, LIU Xiang-yong, JIANG Yan, et al. Cutting load tests of a hydraulic double-wheel trench cutter[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(19): 119-124, 161.
- [10] 康凯旋,王树景,何冰,等.双轮铣槽机截齿空间排布

- 的试验研究[J]. *工程机械*, 2020, 51(2): 24-30.
- KANG Kai-xuan, WANG Shu-jing, HE Bing, et al. Test and research of pick space arrangement for double-wheel trench cutter[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2020, 51(2): 24-30.
- [11] 蔡灿, 伍开松, 廉栋, 等. 单齿冲击作用下破岩机制分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1659-1666, 1675.
- CAI Can, WU Kai-song, LIAN Dong, et al. Study of rock-breaking mechanism under single-tooth impact[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1659-1666, 1675.
- [12] 李万莉, 刘佳宝, 游正民. 双轮铣槽机铣削岩土过程的数值模拟[J]. *中国工程机械学报*, 2014, 12(5): 391-396.
- LI Wan-li, LIU Jia-bao, YOU Zheng-min. Numerical simulation on rock-soil milling process for double ringing slotters[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2014, 12(5): 391-396.
- [13] HU X K, JIANG H X, DU C L. Finite element method for prediction of rock breaking performance of the tipped hob with different tooth profiles[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 50421-50430.
- [14] LIU S Y, JI H F, LIU X H. Effect of pick working angle on the cutting performance of a cutting head[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017, 39(3): 1-13.
- [15] LIU X H, TANG P, GENG Q, et al. Numerical research on wear mechanisms of conical cutters based on rock stress state[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 97: 274-287.
- [16] ROJEK J, ONATE E, LABRA C, et al. Discrete element simulation of rock cutting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(6): 996-1010.
- [17] LI X F, WANG S B, GE S R, et al. Numerical simulation of rock fragmentation during cutting by conical picks under confining pressure[J]. *Comptes Rendus Mecanique*, 2017, 345(12): 890-902.
- [18] LIU S F, LU S F, WAN Z J, et al. Investigation of the influence mechanism of rock damage on rock fragmentation and cutting performance by the discrete element method[J]. *Royal Society Open Science*, 2019, 6(5): 190116.
- [19] VAN WYK G, ELS D N J, AKDOGAN G, et al. Discrete element simulation of tribological interactions in rock cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 65: 8-19.
- [20] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- XU Xiao-he, YU Jing. Rock fragmentation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.
- [21] VERKAIK. MSc thesis-Snijden van gesteente met een baggerwiel[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 1982: 142.
- [22] EVANS I. A theory of the cutting force for point-attack picks[J]. *Geotechnical Geological Engineering*, 1984, 2(1): 63-71.
- [23] EVANS I. Basic mechanics of the point-attack pick[J]. *Colliery Guardian*, 1984, 232(5): 189-190, 193.
- [24] ROXBOROUGH F F, LIU Z. Theoretical considerations on pick shape in rock and coal cutting[C]//Proceedings of the Sixth Underground Operator's Conference. [S. l.]: [s. n.], 1995: 189-193.
- [25] GOKAN R M. A suggested improvement on Evans' cutting theory for conical bits[C]//Proceedings of the Fourth symposium on Mine Mechanization Automation. [S. l.]: [s. n.], 1997: 57-61.
- [26] GOKTAN R M, GUNES N. A semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks[J]. *Journal of the South African Institute of Mining Metallurgy*, 2005, 105(4): 257-263.
- [27] NISHIMATSU Y. The mechanics of rock cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1972, 9(2): 261-270.
- [28] 张时忠. 在截刀作用下岩石破碎机理的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1990, 9(3): 202-208.
- ZHANG Shi-zhong, Experimental study of the mechanism of rock breakage under the action of picks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1990, 9(3): 202-208.
- [29] BILGIN N, DEMIRCI N M A, COPUR H, et al. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(1): 139-56.
- [30] 李夕兵. 凿岩爆破工程[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011.
- LI Xi-bing. Rock drilling and blasting engineering[M]. Changsha: Central South University Press, 2011.
- [31] ZHANG X H, XIA Y M, ZENG G Y, et al. Numerical and

- experimental investigation of rock breaking method under free surface by TBM disc cutter[J]. **Journal of Central South University**, 2018, 25(9): 2107-2118.
- [32] ZHANG J L, LI Y C, ZHANG Y S, et al. Using a high-pressure water jet-assisted tunnel boring machine to break rock[J]. **Advances in Mechanical Engineering**, 2020, 12(10): 1-16.
- [33] WANG F C, ZHOU D P, ZHOU X, et al. Rock breaking performance of TBM disc cutter assisted by high-pressure water jet[J]. **Applied Sciences-Basel**, 2020, 10(18): 6294.
- [34] 余静. 岩石机械破碎规律和破岩机理模型[J]. **煤炭学报**, 1982(3): 10-18.
- YU Jing. Rules of rock fragmentation with mechanical methods and model of rock failure mechanism[J]. **Journal of China Coal Society**, 1982(3): 10-18.
- [35] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. **工程力学**, 2014, 31(3): 197-204.
- FANG Qin, KONG Xiang-zhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. **Engineering Mechanics**, 2014, 31(3): 197-204.
- [36] 王杰, 李世海, 周东, 等. 模拟岩石破裂过程的块体单元离散弹簧模型[J]. **岩土力学**, 2013, 34(8): 2355-2362.
- WANG Jie, LI Shi-hai, ZHOU Dong, et al. A block-discrete-spring model to simulate failure process of rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(8): 2355-2362.
- [37] 冯春, 李世海, 郝卫红, 等. 基于 CDEM 的钻地弹侵彻爆炸全过程数值模拟研究[J]. **振动与冲击**, 2017, 36(13): 11-18, 26.
- FENG Chun, LI Shi-hai, HAO Wei-hong, et al. Numerical simulation for penetrating and blasting process of EPW based on CDEM[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2017, 36(13): 11-18, 26.
- [38] 郭汝坤, 冯春, 李战军, 等. 牙轮钻工作参数与岩体强度对应关系的理论分析与实验研究[J]. **岩土工程学报**, 2016, 38(7): 1221-1229.
- GUO Ru-kun, FENG Chun, LI Zhan-jun, et al. Theoretical and experimental studies on relationship between working parameters of cone drill and rock strengths[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(7): 1221-1229.
- [39] 陈珺. 高应力硬岩脆性破裂机制与表征方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- CHEN Jun. Study on brittle fracture mechanism and characterization method of hard rock under high stress[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [40] 徐东升. 黄河三角洲粉土的力学特性及改性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2010.
- XU Dong-sheng. Research on mechanical characteristics and strengthen method of silt in yellow river delta[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Rock and Soil Mechanics), 2010.
- [41] 李广信, 等. 高等土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- LI Guang-xin, et al. **Advanced soil mechanics**[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [42] 郭汝坤, 冯春, 李战军, 等. 岩体强度对牙轮单齿作用下破碎坑的体积及形态影响研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(10): 2971-2978.
- GUO Ru-kun, FENG Chun, LI Zhan-jun, et al. Influence of rock mass strength on volume and shape of fragmental pit generated by a single tooth of roller bit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2971-2978.
- [43] 姜玥. 考虑应力主轴旋转的岩石力学特性试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- JIANG Yue. Experimental study on rock mechanical characteristics under rotation of principal stress axes[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [44] 徐福通, 卢景景, 周辉, 等. 预切槽和 TBM 机械滚刀的新型联合破岩模式研究[J]. **岩土力学**, 2021, 42(5): 1363-1372.
- XU Fu-tong, LU Jing-jing, ZHOU Hui, et al. Research on combined rock-breaking mode of pre-cutting groove and TBM mechanical cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(5): 1363-1372.