



岩土力学  
*Rock and Soil Mechanics*  
ISSN 1000-7598, CN 42-1199/O3

## 《岩土力学》网络首发论文

题目：贯入角度对截齿破岩性能与几何排布的影响研究  
作者：肖建成，卢景景，周辉，徐福通，冯春  
DOI：10.16285/j.rsm.2022.0067  
收稿日期：2022-01-14  
网络首发日期：2022-10-11  
引用格式：肖建成，卢景景，周辉，徐福通，冯春. 贯入角度对截齿破岩性能与几何排布的影响研究[J/OL]. 岩土力学. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2022.0067>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 贯入角度对截齿破岩性能与几何排布的影响研究

肖建成<sup>1,2</sup>, 卢景景<sup>1,2</sup>, 周 辉<sup>1,2</sup>, 徐福通<sup>1,2</sup>, 冯 春<sup>3</sup>

(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:** 截齿贯入角度是双轮铣槽机布齿系统设计中的关键因素之一。基于连续-非连续单元法 (CDEM), 建立截齿不同角度冲击贯入破岩的数值模型, 通过断裂能本构模型实现岩体弹性-损伤-断裂的破裂过程, 开展截齿有效角度 50° 至 90° 区间内的 9 组冲击贯入破岩模拟, 研究贯入角度对截齿破岩性能的影响规律, 讨论贯入角度对截齿几何排布的影响, 总结布齿系统的截齿几何排布规律。结果表明, 当贯入角度从 90° 降低到 50° 时, 岩体由张拉-拉剪破裂向剪切-拉剪破裂转变, 截齿平均贯入力与破碎程度提高, 截齿的跃进式侵入特性的显著性减低; 贯入角度为 75° 至 90° 的第 I 类截齿与小于 55° 的第 III 类截齿在破岩中起辅助作用, 贯入角度为 55° 至 75° 的第 II 类截齿可在岩体内部产生范围较大的水平非贯通裂隙, 在布齿系统破碎岩体过程中发挥主要作用; 2 个第 II 类截齿先后贯入岩体可较好的破碎截线间的岩体, 可构成一类基本破岩单元, 多个基本破岩单元按照正弦线形式排布, 由此形成了一种布齿系统设计方法。研究成果为完善双轮铣槽机布齿系统设计方法, 打破国外在双轮铣槽机布齿系统设计方法上的技术壁垒提供了理论基础。

**关 键 词:** 双轮铣槽机; 冲击破岩机理; 布齿系统; 贯入角度; CDEM

中图分类号: TU94, TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 12-0000-13

## Research on the influence of penetration angle on rock breaking performance and geometrical arrangement of picks

XIAO Jian-cheng<sup>1,2</sup>, LU Jing-jing<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui<sup>1,2</sup>, XU Fu-tong<sup>1,2</sup>, FENG Chun<sup>3</sup>

(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:** The penetration angle of pick is one of the key factors in the design of tooth arrangement system of double-wheel trench cutter. Based on the continuum-discontinuum element method (CDEM), established a numerical model for picks to penetrate the rock at different angles, and the elastic-damage-fracture fracture process of rock mass is realized by the fracture energy constitutive model. Nine groups of impact penetration rock breaking simulations are carried out within the pick's effective angle range of 50° to 90°. The influence of penetration angle on the rock breaking performance of pick is studied, and the influence of penetration angle on the geometric arrangement of pick is discussed. And the geometric arrangement principle of the pick of the tooth arrangement system is summarized. The results show that when the penetration angle decreases from 90° to 50°, the rock mass changes from tension and tension-shear fracture to shear and tension-shear fracture, the average penetration force and crushing degree of pick increase, and the leaping invasion characteristic of pick decreases significantly. Type I picks with penetration angles of 75°-90° and type III picks with penetration angles of less than 55° play an auxiliary role in rock breaking, while type II picks with penetration angles of 55° to 75° can produce a wide range of horizontal non-penetrating cracks in the rock mass and play a major role in the process of breaking rock mass in the tooth arrangement system. Two type II picks have successively penetrated into the rock mass between the better broken sections of the rock mass, two type II picks forming the mechanical model of the basic rock breaking unit, and several basic rock breaking units are arranged according to the sinusoidal form, thus forming a design method of tooth arrangement system. The research results provide a theoretical basis for perfecting the design method of the tooth arrangement system of the double-wheel

收稿日期: 2022-01-14

修回日期: 2022-03-12

基金项目: 国家自然科学基金专项项目资助 (No.41941018); 中国科学院基础前沿科学研究计划 (No.ZDBS-LY-DQC022); 武汉市知识创新专项-基础研究项目 (No.2022010801010160)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC)(41941018), Key Research Program of Frontier Sciences (ZDBS-LY-DQC022) and the Knowledge Innovation Program of Wuhan - Basic Research (2022010801010160).

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的研究工作。E-mail: xiaojiancheng19@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 卢景景, 女, 1985 年生, 助理研究员, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: jilu@whrsm.ac.cn

trench cutter and breaking the technical barriers in the design method of the tooth arrangement system of the double-wheel trench cutter abroad.

**Keywords:** Double-wheel trench cutter; impact rock breaking mechanism; tooth arrangement system; penetration angle; CDEM

## 1 引言

随着我国水利工程、地下轨道交通以及高速公路与铁路建设规模的不断扩大,对地连墙以及方桩的施工需求不断增长,双轮铣槽机(简称“双轮铣”)作为地下连续墙与方桩施工中的专业装备之一,具有成槽深度大、垂直度高与噪音小等优点<sup>[1]</sup>,其主要结构与组成如图1所示(以宝峨BC40双轮铣槽机为例)。目前的地连墙施工深度大多在30-40m左右,部分超深地连墙施工深度可达200m<sup>[2]</sup>,在施工时不可避免的开掘至岩层,双轮铣因其在破岩方面具有的高效优势,受到广泛应用。

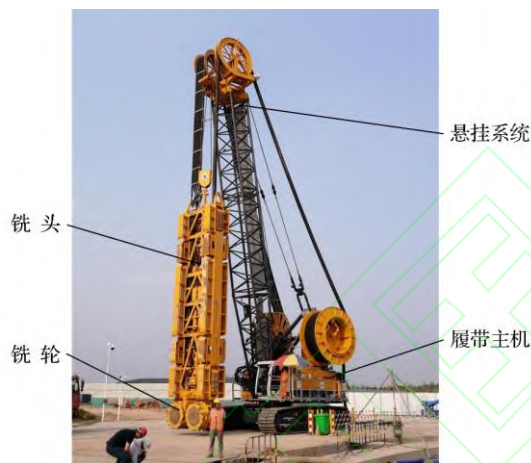


图1 双轮铣槽机主要结构组成

Fig.1 The main structure of the double-wheel trench cutter

双轮铣铣轮上的截齿及其几何排布,称为布齿系统,是影响双轮铣槽机破岩效率与效果的关键结构之一。铣轮的切削齿型主要有标准齿、截齿与滚齿,如图2所示。标准齿主要适用于土层以及砂层;截齿主要适用于风化岩层与硬岩<sup>[3]</sup>,不适用于土层的铣削,而滚齿则适用于破碎极硬岩层。目前,国内对布齿系统设计原理的研究少见相关报道,国产双轮铣铣轮的截齿排布主要靠逆向仿制国外产品或

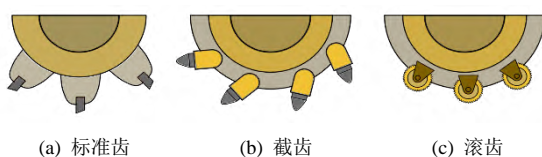


图2 双轮铣槽机主要齿型

Fig.2 Main milling tooth type of double-wheel trench cutter

直接购置国外铣轮,地层适应性不高且购价高昂。因此,需要对布齿系统设计原理进行系统性研究。

目前国内外对双轮铣截齿贯入角度影响破岩性能与几何排布规律的研究较少,多是对截齿破岩过程的研究与优化。如康凯旋等<sup>[4]</sup>、宋刚等<sup>[5]</sup>、李万莉等<sup>[6]</sup>采用试验或数值模拟方法对双轮铣破岩机制以及截齿破岩的截割顺序、截线间距等因素对破岩性能的影响规律进行了研究。Rojek等<sup>[7]</sup>、Su等<sup>[8]</sup>采用离散元方法实现了单截齿截割岩体的数值模拟过程,并研究了截割过程的力学特性。田听雨等<sup>[9]</sup>采用PFC<sup>3D</sup>模拟了两把截齿顺次截割岩石的过程,研究了截线间距与截割深度在不同比值组合下的破岩比能耗。张鑫等<sup>[10]</sup>研究了应力叠加作用下截齿截割荷载变化规律,并采用LS-DYNA软件的HJC本构模型研究截线间距与应力叠加程度之间的关系。根据对研究现状的调研可知,多个截齿的几何排布因素有:①贯入角度;②贯入间距;③入岩顺序。其中,截齿贯入角度对破岩性能的影响尤其重要,Nishimatsu<sup>[11]</sup>通过大量试验研究了单截齿截割破岩过程中的岩体力学响应特征,提出截割角度影响破岩过程中的三个特征:①贯入力;②裂隙发育方向;③裂隙发育长度。因此,贯入角度对双轮铣布齿系统的破岩性能有着较大影响,研究贯入角度对截齿破岩性能的影响机制对于揭示双轮铣布齿系统的几何排布规律与设计方法具有重要的意义。

基于此,采用连续-非连续单元法(CDEM)建立截齿在不同贯入角度下的冲击破岩数值方法,开展截齿有效角度 $50^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 区间内的9组冲击贯入破岩数值模拟,对不同贯入角度下的截齿破岩性能进行分析,研究贯入角度对截齿几何排布的影响规律,获得布齿系统中的截齿几何排布方法,对布齿系统的设计与优化方法提供一定的参考与思路。

## 2 截齿贯入角度计算模型

双轮铣的铣轮上布置有多个截齿(图3),不同位置上的截齿有不同的功能,各截齿相互作用共同破碎岩体。当铣轮转动带动截齿破岩时,截齿会以一定的角度贯入岩体,此时截齿与岩体表面所在平面的夹角被认为是截齿的贯入角度<sup>[4]</sup>。截齿贯入角度的不同,会造成截齿不同部位的磨损程度不同<sup>[12-13]</sup>。由此,截齿在不同贯入角度的磨损情况是



确定截齿贯入角度计算模型有效角度的重要参考。



(a) ZTSX100A 型双轮铣槽机 (b) 双轮铣槽机铣轮

图 3 ZTSX100A 型双轮铣槽机及其铣轮

Fig.3 ZTSX100A type double-wheel trench cutter and its milling wheels

对于双轮铣在工程中的截齿磨损问题，作者所在团队对中铁科工集团承建的广州地铁 13 号线车陂站地下连续墙项目进行了调研，测量了铣轮上截齿的安装角度并调查了双轮铣设备上的截齿以及替换下的截齿磨损情况，发现其中部分截齿的磨损程度远大于正常磨损水平，呈现过度磨损状态，如图 4 所示。调查中发现过度磨损现象往往出现在安装角度较大或较小的截齿的齿尖或刃面部位上。结合调研对该现象进行分析，当贯入角度较大时，齿尖直接冲击岩体虽能较好的贯入破碎岩体，但齿尖的尖端与岩体接触面积小，反复冲击易造成截齿尖端破碎，减少截齿使用寿命，如图 4(b)；当贯入角度较小时，截齿刃面先于齿尖截齿接触岩体，刃面冲击并挤压破坏岩体，致使截齿刃面磨损严重或偏磨，如图 4(c)中，而齿尖在破岩过程中未达到相应破碎效果，截齿在破岩过程中处于失效状态，如图 5 所示。



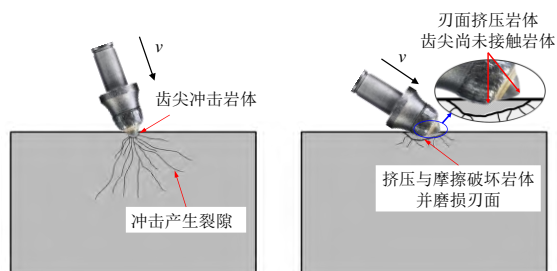
(a) (b) (c)

图 4 不同贯入角度的双轮铣槽机截齿磨损情况

Fig.4 Wear of the picks of the double-wheel trench cutter with different penetration angles

综上，考虑截齿的破岩机制与目前对截齿贯入

角度的研究，结合 ZTSX100A 型双轮铣选用的 PDC 截齿的几何参数，截齿贯入角度的计算模型选取有效角度 50° 至 90° 作为研究区间，间隔 5°，共 9 组。



(a) 截齿有效贯入角度 (b) 截齿失效贯入角度

图 5 截齿的有效贯入角度与失效贯入角度

Fig.5 Effective penetration angle and failure penetration angle of picks

基于以上，建立截齿贯入岩体的数值模型，如图 6 所示。截齿几何尺寸参照工程中常见的 PDC 截齿，贯入合速率为 0.25 m/s，是根据 ZTSX100A 型双轮铣槽机铣轮转动的线速度换算成而得；截齿最大贯入度为 5 mm，是根据双轮铣施工中铣头垂直切削速率的经验值 10 cm/min 和铣轮工作转速 21 rpm 计算而得。岩体模型尺寸应大于 10 倍贯入宽度与深度，避免边界对贯入过程产生影响，取为 0.3×0.2 m；模型网格采用三角形单元并局部加密<sup>[14]</sup>，截齿贯入面网格尺寸为非关键部位的 1/50，单元数共 10994 个。

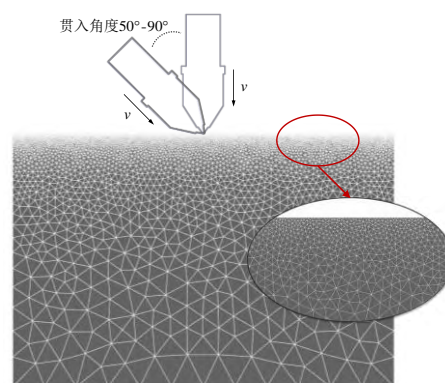


图 6 不同贯入角度的截齿冲击破岩数值模型

Fig.6 Numerical model of pick impact rock breaking with different penetration angles

岩体模型底面施加固定约束边界条件，侧面施加法向约束边界条件。底面与两个侧面施加无反射边界条件，以模拟半无限空间并避免应力波反射影响模拟结果。数值模拟重点关注岩体受截齿冲击贯

入后的力学响应,因此,截齿采用刚体模型,岩体单元采用线弹性本构模型,单元之间的接触面采用断裂能本构模型,以便模拟岩体从连续到损伤再到断裂的过程,并采用真实质量法进行计算,块体单元在完整与断裂后均遵循牛顿运动定律。模拟过程中可提取截齿贯入度、贯入力以及岩体的相关破坏与能量指标等。

### 3 数值方法与模型验证

#### 3.1 数值方法与本构模型

连续-非连续单元方法(continuum-discontinuum element method, CDEM)是一种有限元与离散元耦合计算的数值方法<sup>[15-17]</sup>,其理论基础是拉格朗日方程,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:  $Q_i$  为系统的非保守力;  $L$  为拉格朗日函数。

CDEM 方法为表征材料由完整状态到裂隙萌生发育再到破碎这一渐进过程,引入了虚拟裂缝的概念。当材料在完整状态时,单元之间的接触面的弹簧进行力学信息的传递。当弹簧达到设置的断裂准则时,接触面发生断裂后,虚拟界面转化为真实接触界面,并被赋予新的接触模型与参数。

采用断裂能本构模型<sup>[18]</sup>计算时,根据当前时步的接触力,通过增量法计算下一时步的接触力,为

$$\left. \begin{aligned} F_n(t_1) &= F_n(t_0) - k_n \times A_c \times \Delta d u_n \\ F_s(t_1) &= F_s(t_0) - k_s \times A_c \times \Delta d u_s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $F_n$ 、 $F_s$  为某一时刻中单元接触面上法向与切向的接触力;  $k_n$ 、 $k_s$  为单元接触面上弹簧元的法向与切向刚度 (Pa/m);  $A_c$  为单元之间的虚拟界面面积;  $\Delta d u_n$ 、 $\Delta d u_s$  为某一时刻中接触面中两个界面的法向与切向位移增量。

当通过拉伸断裂能判别是否断裂时,若接触面的法向力满足  $-F_n(t_1) \geq \sigma_t(t_0) A_c$  时,则

$$\left. \begin{aligned} F_n(t_1) &= -\sigma_t(t_0) A_c \\ \sigma_t(t_1) &= -(\sigma_{t0})^2 \times \Delta u_n / (2G_{ft}) + \sigma_{t0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_{t0}$  为初始时刻接触面上的抗拉强度;  $\sigma_t(t_0)$  为当前时刻接触面上的抗拉强度;  $\sigma_t(t_1)$  为当前时刻的下一时刻接触面上的抗拉强度,  $\Delta u_n$  为当前时刻接触面中两个单元界面的法向相对位移,  $G_{ft}$  为用户设置的拉伸断裂能 (Pa·m)。

当通过剪切断裂能判别是否断裂时,若接触面

的切向力满足  $F_s(t_1) \geq F_n(t_1) \times \tan \phi + c(t_0) A_c$  时,则

$$\left. \begin{aligned} F_s(t_1) &= F_n(t_1) \times \tan \phi + c(t_0) A_c \\ c(t_1) &= -(c_0)^2 \times \Delta u_s / (2G_{fs}) + c_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $\phi$  为接触面的内摩擦角,  $c_0$  为初始时刻接触面上的粘聚力;  $c(t_0)$  为当前时刻接触面上的粘聚力;  $c(t_1)$  为当前时刻的下一时刻接触面上的粘聚力,  $\Delta u_s$  为当前时刻接触面中两个单元界面的切向相对位移,  $G_{fs}$  为用户设置的剪切断裂能 (Pa·m)。

当接触面采用断裂能模型判断是否发生断裂时, CDEM 中定义了三类损伤因子,分别为拉伸损伤因子  $\alpha$ , 剪切损伤因子  $\beta$  及联合损伤因子  $\chi$ , 为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1 - \sigma_t(t_0) / \sigma_{t0} \\ \beta &= 1 - c(t_0) / c_0 \\ \chi &= 1 - (1 - \alpha)(1 - \beta) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

当上述三个损伤因子中的任意一个减小为 0 时,虚拟界面即发生断裂。

#### 3.2 模型参数与验证

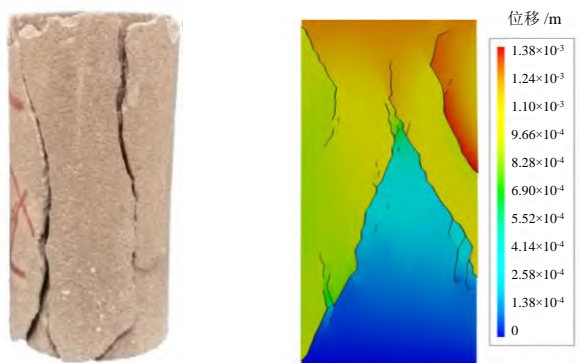
截齿贯入角度计算模型中的岩体采用红砂岩,其力学性质与文献[19]中一致,密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 8.76 GPa,泊松比为 0.25,抗拉强度为 3 MPa,粘聚力为 9 MPa,内摩擦角为 28.83°。接触面断裂能本构模型中拉伸断裂能与剪切断裂能根据相关文献<sup>[18]</sup>取经验值为 50 Pa·m 与 100 Pa·m,接触面断裂后摩擦角折减为岩石内摩擦角的 0.5 倍。根据对单轴压缩试验与巴西劈裂试验强度的校核,设置接触面强度系数为单元的 1.3 倍,刚度系数为单元的 10 倍。为更好地研究脆性岩体在冲击荷载下的破碎特征,数值模拟中的红砂岩力学性质相较于文献中,适度提高了脆性特征。

分别建立单轴压缩与巴西劈裂试验模型,对上述的参数进行验证计算,试验与计算结果如图 7 所示,试验中获得的红砂岩单轴抗压强度与抗拉强度分别为 44.15 MPa 与 3.2 MPa,验证性模拟中获得的单轴抗压强度与抗拉强度分别为 43.44 MPa 与 3.32 MPa,模拟结果与试验结果较为吻合,且表明对应的红砂岩具有较强的脆性特征。

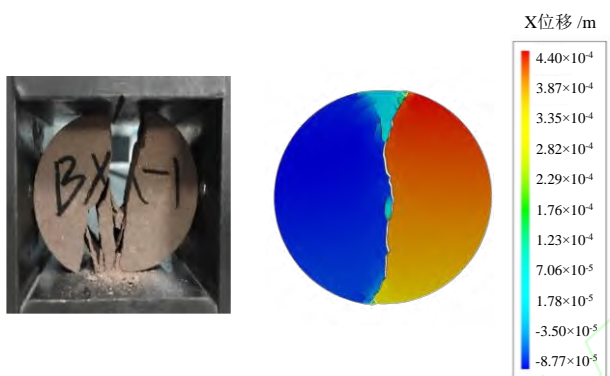
## 4 贯入角度对破岩性能的影响分析

#### 4.1 岩石破碎特性与破岩性能

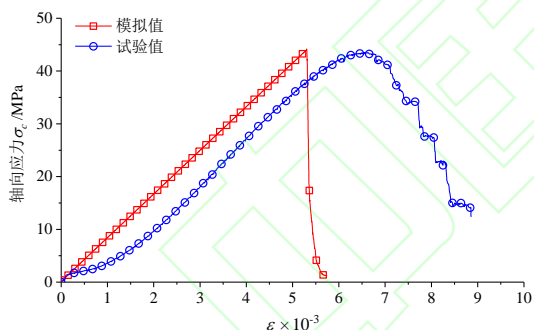
通过模拟获得了不同贯入角度下岩体破碎形态(图 8)、贯入法向力与切向力-贯入度曲线(图 9),由图 8 可以看出,岩体的冲击破碎具有较大的随机性,裂隙发育形态呈以贯入点为中心的放射状特征,



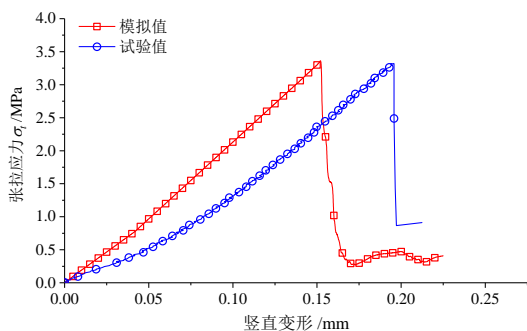
(a) 单轴压缩试验与模拟结果对照



(b) 巴西劈裂试验与模拟结果对照



(c) 单轴压缩模拟与试验曲线对照



(d) 巴西劈裂模拟与试验曲线对照

图 7 验证性模拟结果与试验对照

Fig.7 Confirmatory simulation results compared with experiment

当贯入角度较大时，裂隙区域呈现一定的对称性；随着贯入角度的减小，这种对称性特征逐渐消失。由图 9 可以看出，截齿的贯入法向力与切向力随着贯入度的增加而升高，贯入法向力幅值远大于切向力幅值；贯入角度较大时，贯入法向力随贯入度升高至一定幅值后发生突降，之后出现一段贯入法向力较小但贯入度持续增加的阶段，这一特性为跃进式侵入特性<sup>[20-22]</sup>。

进一步对不同贯入角度区间下的岩石破碎形态与曲线特征进行分析。当贯入角度为 80°-90°时，如图 8(a)~图 8(c)所示，截齿冲击贯入岩体后，截齿刀尖两侧岩体发生大块片起破碎并与岩体脱离，下部产生以刀尖为中心的放射状裂隙区。随着入岩角度的减小，左侧的破碎区逐渐缩小，右侧的破碎区逐渐扩大。同时，如图 9(a)所示，该贯入角度区间的贯入法向力-贯入度曲线呈现出明显的跃进式侵入特性。

当贯入角度继续减小至 60°-75°时，岩体破坏形态发生变化，如图 8(d)~图 8(g)所示，此时截齿两侧不再出现大块岩体片起脱落，仅在截齿尖端两侧出现小面积破碎或片起，而在截齿尖端贯入深度附近产生一到两条较长的裂缝并向一侧或两侧的水平方向延伸，裂缝不与岩体边界贯通，因此不产生大块片起脱落。且如图 9(b)所示，贯入法向力与切向力平均水平较上一角度区间提升了较大幅度，跃进式侵入特性显著性降低。

当贯入角度减小至 55°以下时，如图 8(h)、图 8(i)所示，由于截齿刃面与岩体的接触面积提升对岩体产生较大的挤压作用，从而在岩体下方出现范围较大的岩体体积破碎。但在此贯入角度区间内，未出现明显的水平延伸裂缝。且如图 9(c)所示，截齿的贯入法向力相较于前两个区间，出现了较大幅度的提升，而贯入切向力呈现下降趋势。

另外，图 8 中位移较大的区域即为破碎程度较高。随着贯入角度的变化，破碎区域呈现出绕贯入点“旋转”的现象。当截齿贯入角度逐渐减小时，截齿左侧的破碎区从岩体表面向岩体内部转移，右侧表面破碎区范围逐渐减小。

在数值模拟中，选取块体破裂度、平均贯入法向力与切向力 3 个指标，对不同贯入角度的截齿破岩性能进行评价，如图 10 和图 11 所示，其中块体破裂度用于表征岩体的破碎程度。可以看出，岩石破碎程度和截齿平均贯入法向力均随贯入角度的减小而提高，平均贯入切向力在 60°-75°区间较高，而在 50°-60°与 75°-90°区间较小。这是由于贯入角



度逐

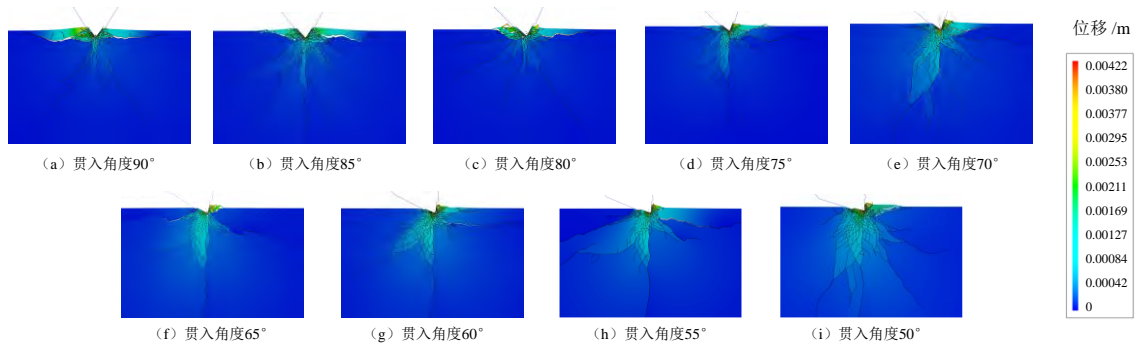


图8 不同贯入角度下载齿冲击岩体局部破碎形态与位移

Fig.8 Local fragmentation shape and displacement of the rock mass impacted by the pick under different penetration angles

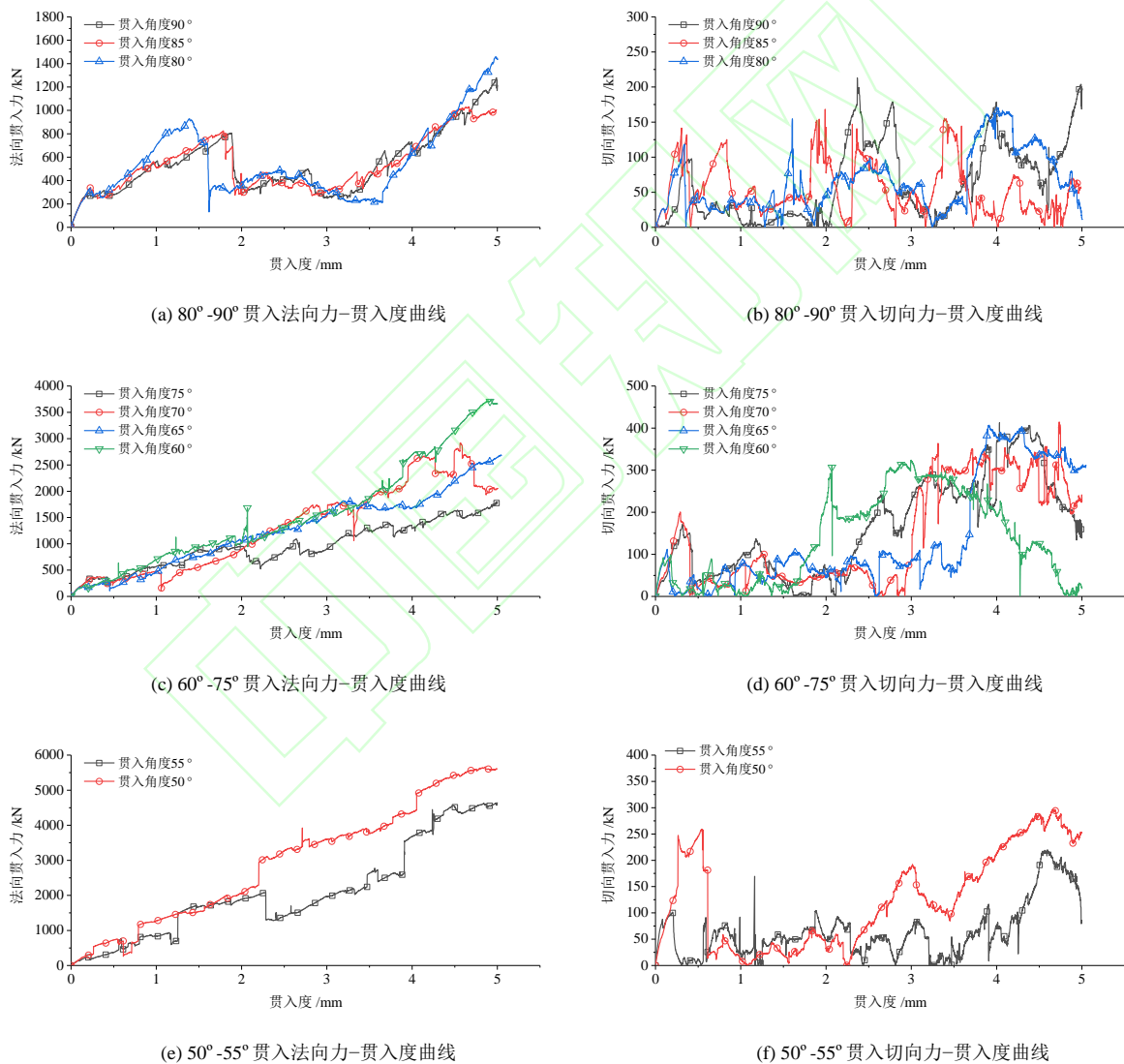


图9 不同贯入角度下载齿贯入力分量-贯入度曲线

Fig.9 Pick penetration force-penetration curve at different penetration angles

渐减小的过程中，岩体的破裂形式出现了转变，如图 12(a)中所示，在截齿贯入角度为 90°时，岩体片起破裂区域与破碎区域的破裂类型以拉伸破裂为主，截齿尖端附近以及密实核区域以剪切破裂与拉

剪复合破裂为主；贯入角度位于 60°-75° 区间时，仍以张拉破裂为主，如图 12(b)所示，且贯入切向力相对较高，截齿冲击时可在贯入位置产生张拉应力，由于岩体的抗拉强度远小于抗压强度，因此截齿更

容易破碎岩体。

当贯入角度减小至 50° 时，如图 12(c)所示，岩

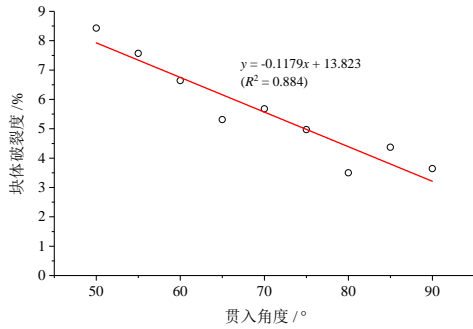


图 10 岩体破碎程度与贯入角度的变化曲线  
Fig.10 Variation curve of rock fracture degree and penetration angle

体的破裂形式由张拉与拉剪破裂转化为剪切与拉剪复合破裂为主，这一转化主要是由于截齿刃面与岩体的接触面积随着贯入角度的减小而不断提高，冲击产生的切向贯入力部分转变为了摩擦力，从而刃

面对岩体的挤压与摩擦力随贯入角度的减小不断增大。如图 11 所示，因此岩体的破碎程度与截齿的平均贯入法向力随贯入角度的减小不断提高，平均切向贯入力的幅值先增加后减小。

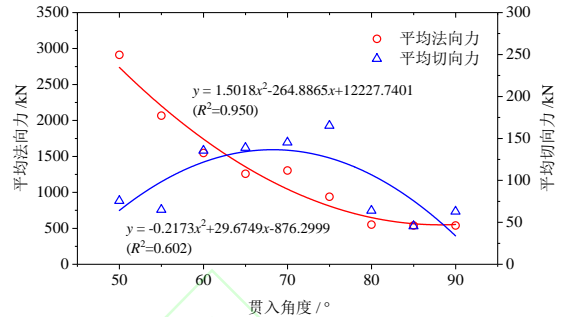


图 11 平均贯入力与贯入角度之间的关系  
Fig.11 The relationship between average penetration force and penetration angle

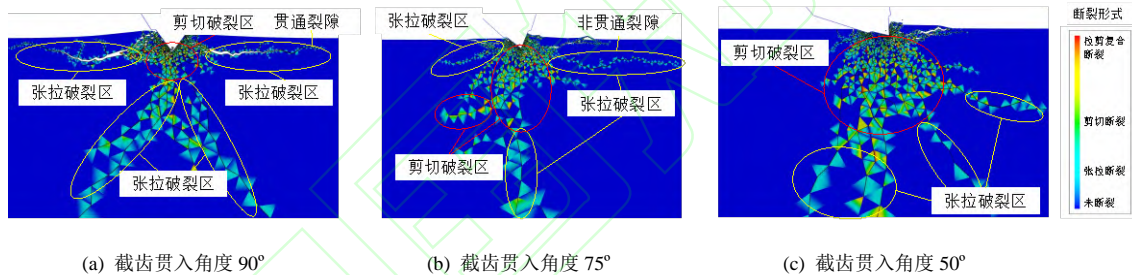


图 12 不同贯入角度下岩体局部的典型破碎形式  
Fig.12 Typical local fragmentation forms of rock mass under different penetration angles

### 4.2 跃进式侵入特性分析

余静<sup>[20]</sup>进行了球形压头贯入岩体试验，获得了球形压头贯入岩体的荷载-贯入度曲线，如图 13 所示，并提出了跃进式侵入现象。跃进式侵入是截齿破岩中的一个重要特性，对其在截齿贯入过程中的变化规律进行研究，可以更好的解释贯入角度影响破岩性能的机制。

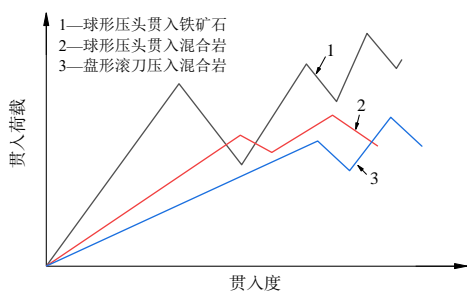


图 13 岩体破碎程度与贯入角度的变化曲线<sup>[20]</sup>  
Fig.13 Variation curve of rock fracture degree and penetration angle

以贯入角度 90° 的贯入合力-块体总动能-贯入度曲线（图 14(a)）为例，截齿开始贯入时岩体较为完整，如图 14(a)中 OA 段贯入合力与贯入度呈现明显的线性关系，但该阶段十分短暂；之后岩体逐渐发育裂隙，此时贯入合力-贯入度不再呈现线性关系，如 AB 段，该阶段截齿尖端附近岩体出现局部破坏，从而该段曲线出现多个小幅值下降，但仍保持上升趋势；当岩体内部裂隙自截齿尖端延深至岩体边界而产生贯通裂缝时，截齿两侧岩体破碎并脱离岩体，岩体暂时失去支撑能力，因此在 B 点贯入力下降；在 BC 段贯入合力较低而贯入度持续增加，截齿贯入较容易，为跃进式侵入段；C 点之后，贯入合力进一步上升并超过 B 点的峰值贯入合力，这说明数值模拟结果能够较好的反映冲击破岩中的跃



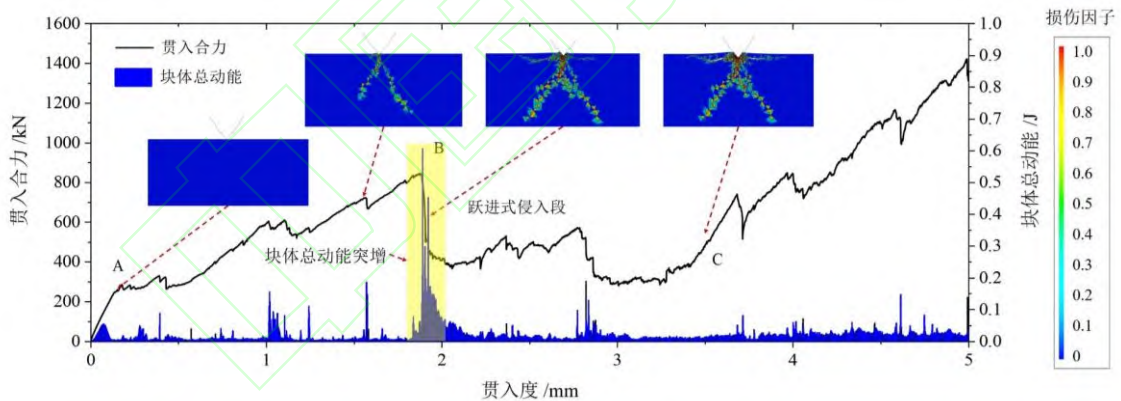
进式侵入特性，CDEM 方法可以较好的对截齿贯入问题进行模拟。在该贯入角度曲线，随着角度的减小，出现跃进式侵入的峰值略微升高，这是由于贯入角度减小后，刃面对岩体产生挤压，从而使局部的张拉破坏转化为了剪切破坏，因此略微提高了跃进式侵入出现时的贯入合力。

进一步结合应变能的变化对冲击破岩的跃进式侵入特性进行分析，如图 15 所示，当截齿开始贯入时，岩体的应变能持续升高，但随着截齿的进一步贯入，应变能发生波动，动能出现小幅值峰值，说明内部发生局部破坏与闭合小裂隙。贯入度到达 B 点时，截齿两侧岩体破碎并脱离岩体，截齿尖端密实核中蕴含的应变能向片起岩体方位释放，进而产生瞬时的崩解破坏，应变能陡降而块体动能突现较高的峰值段，此处伴随岩体的突然崩坏。因此可以说明跃进式侵入现象出现的原因之一即为岩体应变能的突然释放。在跃进式侵入段之后，密实核的应变能进一步上升，以破坏下部岩体，因此 C 点之后应变能继续上升并超过 B 点。

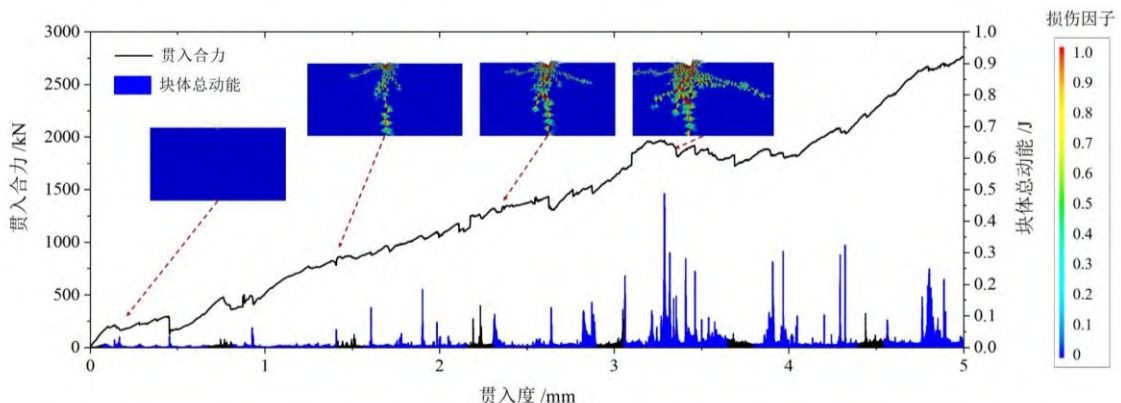
以贯入角度 65° 的贯入合力-块体总动能-贯入度曲线为例（图 14(b)）进行分析，当贯入角度继续减小至 60°-75° 时，岩体破坏形态发生变化，截齿

两侧不再出现大块岩体片起脱落，仅在截齿尖端两侧出现小范围破碎或片起，而在截齿尖端贯入深度附近产生裂缝向水平延伸且不与边界发生贯通。正因如此，截齿尖端密实核部分的应变能没有相应的自由面进行释放，如图 16 所示，应变能未出现如图 14 中 B 点的陡降过程，而是随着贯入度的提高而不断提高，因此图 14(b)中贯入合力也没有陡降的过程仍保持上升趋势，截齿冲击贯入的跃进式侵入特性逐渐减弱并消失。结合图 14(b)中动能的变化也可对该过程进行验证，在贯入过程中随着贯入深度的增加，动能峰值逐渐升高而无图 14(a)中 B 点的较高峰值段，说明此入岩角度曲线下的岩体的破碎是一个持续的过程，岩体破碎程度随岩体中储存应变能的增加而逐渐提高。

从图 15 中不同贯入角度的应变能变化结合图 8 中岩体的破坏特征不难看出，随着贯入角度的减小，岩体表面的破碎程度逐渐降低，而岩体内部的破碎程度逐渐提高，这是由于内部非贯通裂隙的发育使密实核储存的应变能无法释放，并随着截齿的不断贯入应变能持续提高，从而扩大了密实核下部岩体的破碎区域，同时提高了截齿的贯入力水平，如图



(a) 贯入角度为 90°



(b) 贯入角度为 65°

图 14 两种典型贯入角度下的贯入合力-块体总动能-贯入度曲线与破碎形态

Fig.14 Penetration force-total kinetic energy of the block-penetration degree curve and fracture shape under two typical penetration angles

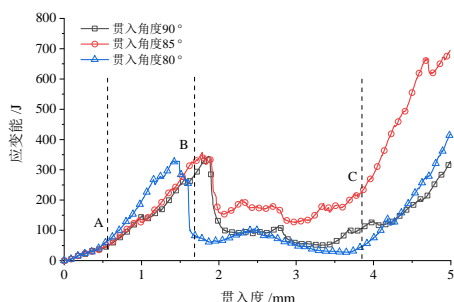


图 15 贯入角度 80-90° 的应变能-贯入度曲线

Fig.15 Strain energy-penetration curve with penetration angle of 80-90°

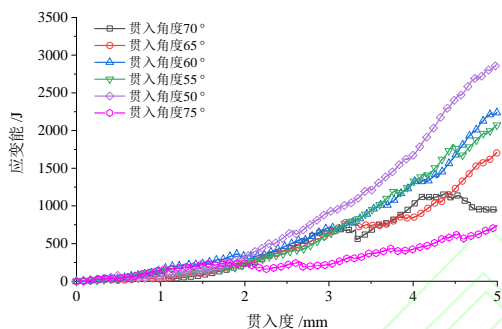


图 16 贯入角度 50°-75° 的应变能-贯入度曲线

Fig.16 Strain energy-penetration curve with penetration angle of 50°-75°

10 与图 11 所示。因此，截齿冲击破岩中的跃进式侵入特性在此入岩角度区间已不显著。值得注意的是，贯入角度在 75° 与 70° 时，仍保留着不明显的跃进式侵入特性。当贯入角度减小至 65° 时，跃进式侵入特性不再显著。

当入岩角度小于 55° 时，平均贯入力相较 55°-65° 区间又出现了大幅度提高（图 11），这是由于在此角度区间岩体破碎的主要原因由齿尖的冲击破碎转变为了截齿刃面的挤压破碎，对刃面造成的磨损程度更大，更大程度地减少了截齿的使用寿命。因此在设计布齿系统时，应减少布齿此入岩角度区间的截齿，以降低截齿磨损对施工效率造成的影响。

## 5 基本破岩单元与截齿几何排布

### 5.1 基本破岩单元

基于上述分析可知，截齿贯入角度对破岩性能的影响有以下体现：截齿的跃进式侵入特性存在差异；截齿平均贯入力随贯入角度减小而增大；岩体

受截齿冲击产生的破裂形式、破碎区域发生变化。综合考虑这些影响，将不同贯入角度的截齿以其破岩性能的差异为依据，分为具有不同功能的 3 类：

第 I 类为贯入角度为 75°-90° 的截齿，如图 17(a) 所示。这类截齿在贯入破岩时以冲击破碎为主，存在明显的跃进式侵入特性，因此破碎岩体所需要的贯入力较小，但在岩体表面形成破碎区域范围较小，若岩体已存在隐含的未贯通裂隙，该类截齿可以较小的贯入力将隐含裂隙贯通，从而破裂大块岩体。

第 II 类为贯入角度为 55°-75° 的截齿，如图 17(b) 所示，这类截齿在贯入破岩时以冲击破碎为主，伴随着部分刃面挤压与摩擦力，跃进式侵入特性不明显，平均贯入力大于第 I 类。其在岩体表面产生的破碎体积较小，而能在岩体内部产生范围大于第一类截齿的非贯通裂隙，当两个该类截齿在合适的入岩间距进行贯入时，所产生的裂隙贯通后可产生较大的破碎体积。

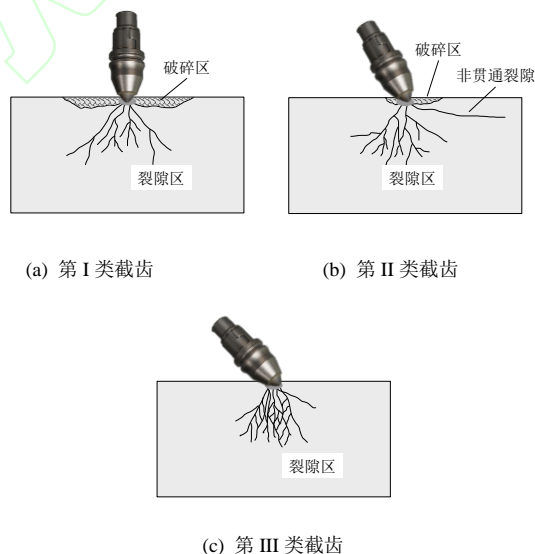


图 17 三类截齿的破裂形式及其功能

Fig.17 Fracture form and function of three types of picks

第 III 类为贯入角度小于 55° 的截齿，如图 17(c) 所示，这类截齿在贯入破岩时，由于截齿与岩体的接触面积较大，刃面对岩体的挤压与摩擦作用大于刀尖对岩体的冲击作用，平均贯入力大于第 II 类，因而在冲击位置下方产生大面积剪切破碎区。这类截齿能够产生一定深度的破碎区，从而为相邻截齿冲击破岩提供自由面，以降低相邻截齿的贯入力。

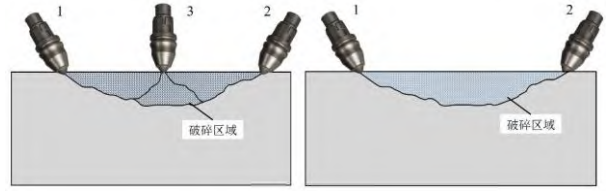
但此类截齿由于刃面与岩体持续挤压与摩擦，因此比较容易磨损，寿命较短，因此此类截齿应尽可能的减少布置，以提高铣轮布齿系统的使用寿命。

在三类截齿中，起主要作用的是第 II 类截齿，尤其是在  $55^{\circ}$ - $65^{\circ}$  区间内，该贯入角度区间内的单个截齿能够更好的在岩体内部形成大范围非贯通裂隙。在模拟结果中，第 II 类截齿冲击岩体产生的非贯通裂隙，总是位于截齿贯入方向的前方，因此当截齿改变在水平面上的贯入方位时，截齿贯入创造的裂隙延伸方向也可随之改变，从而使裂隙集中产生于截齿的一侧。因此，多个此类截齿按照合理的贯入间距和贯入方向进行排布时，可形成较大的岩石体积破碎且在该区间的截齿贯入力较为合适。谢继伟<sup>[23]</sup>基于工程实践与研究，提出截齿贯入角度为  $55^{\circ}$ - $60^{\circ}$  较为合理，这与本文研究的结果较为吻合。

一个铣轮布齿系统的截齿应以布置第 II 类截齿为主，2 个第 II 类截齿以一个合理的贯入角度与水平贯入方位侵入岩体时，可以较好的破碎两个截齿之间的岩体，这 2 个第 II 类截齿可构成一类基本破岩单元。除此之外，第 I 类截齿由于其特性，在布齿系统中可起到辅助破岩的作用，即布置于两个第 II 类截齿之间，对 2 个截齿贯通裂隙所形成的大块岩体进行破碎，或当两个截齿产生的裂隙未贯通时辅助裂隙贯通。因此这 3 个截齿可以形成一种组合破岩模式，2 个第 II 类截齿先依次贯入岩体后，第 3 个第 I 类截齿后进行贯入，如图 18 中 3 个截齿以 1-2-3 的顺序贯入也可以组成一类布齿系统中的基本破岩单元，所形成的破裂模式如图 19 所示。



图 18 布齿系统中的基本破岩单元  
Fig.18 The basic rock breaking unit in the tooth arrangement system



(a) 3 个截齿构成的基本破岩单元 (b) 2 个截齿构成的基本破岩单元

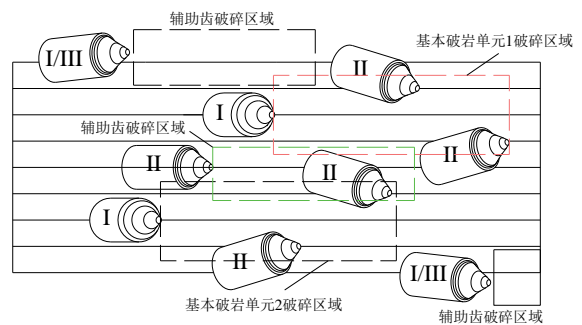
图 19 基本破岩单元破碎岩体的形式

Fig.19 Basic rock breaking unit broken rock mass form

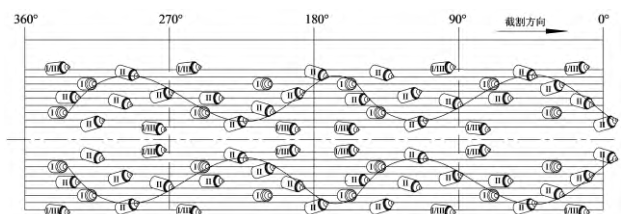
基本破岩单元可以看作是铣轮布齿系统上的截齿周期排布的循环基础，由此可以对布齿系统的截齿几何排布设计方法进行优化。

### 5.2 基于基本破岩单元的布齿系统设计方法

因此，对于布齿系统的一个铣削周期，可基于上述的基本破岩单元，形成一种布齿系统的设计方法，如图 20(a)所示。以 9 条截割线为例，在截割方向依次设置 2 个基本破岩单元，2 个破岩单元的相互交叉，以保证岩石具有足够的破碎体积并防止存在未破碎区域。同时，在两侧边缘布置第 I 类或第 III 类截齿，用于修整边缘并创造自由面，对基本破岩单元产生辅助作用。同时在 2 个基本破岩单元破碎区域之间布置一个第 II 类辅助齿，以破碎两个基本破岩单元破碎区域之间的交叉区域，以免产生未破碎岩脊阻碍铣削工作。以此形成一个由 2 个基本破岩单元，包含 2 个第 I 类截齿和 5 个第 II 类截齿，另加 2 个边缘第 I/III 类辅助齿组成的一个周期（对应铣轮上  $90^{\circ}$  范围）的铣轮布齿模式。将一个周期的布齿模式应用于整个铣轮  $360^{\circ}$  范围内，即形成一个完整的铣轮布齿系统，如图 20(b)所示。



(a) 基本破岩单元布置模式





(b) 布齿系统示意图

图 20 基于基本破岩单元组成的部分布齿系统  
Fig.20 Partial tooth arrangement system based on basic rock breaking unit

对由基本破岩单元组成的布齿系统进行分析, 不难发现, 截齿尖端的连线可形成类似正弦函数曲线形状的螺旋线排布形式, 这与国际上双轮铣槽机所采用的主流截齿布置形式基本吻合, 说明了本文提出的基本破岩单元与其组合而成的布齿系统设计方法, 与国外采用的设计方法存在共通之处, 但由于其技术保密与垄断, 因此只能从布齿系统形态上进行判断, 这对进一步揭示双轮铣槽机的布齿系统设计方法, 提供了一定的理论依据。

## 6 讨 论

目前国内的双轮铣布齿系统设计仍处于起步阶段, 对于国外双轮铣布齿系统中各个截齿在破岩中发挥的作用与设计机制尚未完全明确, 因此对布齿系统破岩机制与设计方法的研究具有一定的应用意义。

根据本文的研究, 贯入角度是布齿系统破岩中的关键因素, 决定着整个布齿系统的破岩性能与效率, 而贯入间距与入岩顺序两个因素与贯入角度存在着相互关系。不同贯入角度创造的非贯通裂隙的延伸范围决定着贯入间距的范围, 而在设计布齿系统时铣轮宽度和尺寸也决定着贯入间距的范围, 反而又影响贯入角度的设计范围; 而这两个因素又同时影响着基本布齿单元中的入岩顺序, 即创造非贯通裂隙与辅助齿贯入的先后顺序。因此, 三个影响因素在布齿系统设计中并非独立存在, 而是需要综合考虑。但在综合考虑之前, 尚需要搞清三个影响因素对于布齿系统破岩的影响机制, 因此对于双轮铣布齿系统设计方法的研究需要建立一个系统性的研究过程, 由点到面, 最终形成一个系统性的布齿系统设计方法。

值得注意的是, 在本研究中存在着两个概念, 即“冲击”与“切削”。冲击是一个瞬发的岩体破坏现象<sup>[24]</sup>, 而切削是在一个时间段内的破岩过程。在研究切削这一过程时, 取其中一个时间微元  $\Delta t$ , 在这个短暂的时间微元中, 发生的即为岩体的冲击破坏。因此在对岩体切削过程破岩机理的研究之前, 首先要对岩体的冲击破坏机理有一个明确的认识, 才能扩展到一个相对较大的时间尺度进行研究<sup>[25]</sup>, 进而揭示岩体的切削破坏机理, 在此基础上, 对双

轮铣布齿系统的设计与优化提供理论依据。

本文对于双轮铣布齿系统设计进行了初步研究, 并与现有的双轮铣布齿系统进行了对照, 说明了本文提出的布齿系统基本破岩单元与布齿系统设计方法具有一定的合理性与实用性, 作者所在研究团队<sup>[26-28]</sup>研发了线性破岩试验机, 下一步将通过试验手段结合数值模拟等手段对布齿系统几何排布的各因素进行进一步的验证与优化。

## 7 结 论

通过理论分析与数值模拟, 研究了截齿贯入角度对双轮铣布齿系统破岩的影响机制, 并基于此提出了基本破岩单元和布齿系统设计与优化思路, 得出的主要结论如下:

(1) 通过文献调研与理论分析, 得出截齿贯入角度是影响双轮铣布齿系统破岩的关键影响因素之一; 基于连续-非连续单元法 (CDEM), 建立了截齿  $50^\circ$ - $90^\circ$  角度的冲击贯入破岩的数值模型, 并通过断裂能本构模型实现岩体弹性-损伤-断裂的破裂过程。

(2) 随着贯入角度的减小, 贯入力-贯入度曲线的形态发生变化, 岩体由张拉-拉剪破裂向剪切-拉剪破裂转变, 平均贯入力与岩体破碎程度逐渐提高。岩体的破裂区域逐渐从岩体表面转移到岩体内部, 岩体的贯通裂隙逐渐转化为非贯通裂隙。

(3) 随着截齿贯入角度的减小, 截齿的跃进式侵入特性逐渐减弱, 并结合破坏形式可得截齿的跃进式侵入特性出现的主要原因是由于贯通边界的裂隙造成的岩体脱落使密实核中蕴含的应变能得以向自由面释放。

(4) 综合考虑截齿贯入角度对破岩性能的影响规律, 将不同贯入角度的截齿以其破岩性能的差异分为 3 类, 其中第 II 类截齿在布齿系统破岩中可以造成岩体内部的较大范围非贯通裂隙, 因此起主要作用。第 I、III 类截齿在破岩中起辅助作用。

(5) 根据截齿的分类与破碎区范围, 提出了布齿系统中的基本破岩单元, 其由 2 个第 II 类截齿或 2 个第 II 类截齿与 1 个第 I 类截齿, 以一定的偏角和入岩顺序。基于此, 进一步形成了一种基于基本破岩单元的布齿系统设计与优化思路, 初步解释了国外双轮铣布齿系统的设计思路。

## 参 考 文 献

- [1] 冯晓峰. 液压双轮铣槽机在地下连续墙施工中的应

- 用[J]. 公路交通技术, 2012(5): 49-53.  
FENG Xiao-feng. Application of Hydraulic Double-wheel Slot Milling Machine in Construction of Underground Continuous Walls[J]. **Technology of Highway and Transport**, 2012(5): 49-53.
- [2] 丛蔼森. 地下连续墙的设计施工与应用[M]. 中国水利水电出版社, 2000.  
CONG Ai-Sen. Design construction and application of underground continuous wall[M]. China Water and Power Press, 2000.
- [3] 陈志敏. 双轮铣槽机锥形铣齿在复杂硬岩地层施工中的改进[J]. 建筑机械化, 2016, 37(2): 63-65.  
CHEN Zhi-min. The improvement of trench cutters conical gear milling construction in complex hard rock ground[J]. **Construction Technique**, 2016, 37(2): 63-65.
- [4] 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): 7, 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): 7, 24-30.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Jerzy Rojek, Eugenio Oñate, Carlos Labra, et al., Discrete element simulation of rock cutting[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(6): 996-1010.
- [8] Su, O., N.A. Akcin, Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(3): 434-442.
- [9] 田听雨, 何冰, 王树景, 等. 截齿顺次破岩机制的细观数值模拟及截线间距优化研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(3): 30-34.  
TIAN Ting-yu, HE Bing, WANG Shujing, et al. Microscopic Numerical Study for Mechanism of Sequential Fragmentation by Conical Picks and Corresponding Cutter Spacing Optimization[J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 2018, 38(3): 30-34.
- [10] 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 Kuidong, 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.
- [11] Nishimatsu Y. The mechanics of rock cutting[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts**, 1972, 9(2): 261-270.
- [12] 贺龙, 李治毅. 采煤机截齿截割角度不同对煤岩破碎率的影响分析[J]. 机械管理开发, 2021, 36(6): 120-121.  
HE Long, LI Zhi-yi. Analysis of the influence of different cutting angle on breakage rate of shearer[J]. **Mechanical management and Development**, 2021, 36(6): 120-121.
- [13] 侯亮, 冯继玲, 王义亮, 等. 采煤机截齿安装角度对其受力的影响研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(4): 277-279.  
HOU Liang, FENG Ji-ling, WANG Yi-liang, et al. Study on influence of installation angle of shearer to force[J]. **Coal Technology**, 2017, 36(4): 277-279.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 冯春, 李世海, 郑炳旭, 等. 基于连续-非连续单元方法的露天矿三维台阶爆破全过程数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 110-120.
- FENG Chun, LI Shi-hai, ZHENG Bing-xu, et al. Numerical simulation on complete process of three-dimensional bench blasting in an open pit mine based on CDEM[J]. **Explosion and shock waves**, 2019, 39(2): 110-120.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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(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(3): 202-208.
- [22] 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 break mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.
- [23] 谢继伟. 双轮铣槽机布齿系统参数的优化改进[J]. 工程机械, 2021, 52(1): 10, 65-70.
- XIE Ji-wei. Optimization and improvement of pick arrangement system parameters of double-wheel trench cutter[J]. **Construction Machinery and Equipment**, 2021, 52(1): 10, 65-70.
- [24] GONG F Q, ZHANG P L, LUO S, et al. Theoretical damage characterisation and damage evolution process of intact rocks based on linear energy dissipation law under uniaxial compression[J]. **International journal of rock mechanics and mining sciences**, 2021, 146, 104858.
- [25] 李玲玉, 张传庆, 崔国建, 等. 大理岩三轴压缩试验过程中氦释放规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1888-1897.
- LI Ling-yu, ZHANG Chuan-qing, CUI Guo-jian, et al. Experimental study on the regularity of radon release from marble under triaxial compression. 2022, 41(9): 1888-1897.
- [26] 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.
- [27] 肖建成, 周辉, 卢景景, 等. 双轮铣槽机铣削过程及截齿入岩顺序优化研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 981-994.
- XIAO Jian-cheng, ZHOU Hui, LU Jing-jing, et al. Study on milling process and optimization of pick entry sequence of double-wheel trench cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(4): 981-994.
- [28] 周辉, 徐福通, 卢景景, 等. 切槽对 TBM 刀具破岩机制的影响研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 625-634.
- ZHOU Hui, XU Fu-tong, LU Jing-jing, et al. Influence of pre-cutting groove on rock breaking mechanism of tunnel boring machine disc cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(3): 625-634.