

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0008

基于力链的岩石单齿截割特性研究及截割力预测

董磊^{1,2}, 张华¹, 吕继双^{2,3}, 石瑞敏^{1,2}

(1. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051; 2. 煤矿采掘机械装备国家工程实验室, 山西 太原 030032;
3. 中国煤炭科工集团太原研究院, 山西 太原 030006)

摘 要: 截齿是煤矿采掘机械上截割工作的主要承载对象, 其与工作面的截割力预测对减小截齿磨损十分重要。利用颗粒流仿真软件 PFC^{2D} 将被截割岩石作为颗粒物质进行单齿截割模拟仿真, 通过研究截割时颗粒间力链的特性探讨了单齿截割岩石时接触状态对截割力的影响。利用单齿截割岩石试验台进行了截割力试验, 获得了截割法向力和切向力随截割参数的变化规律及掉落碎片的特征。研究结果表明, 单齿截割岩石颗粒物质的力链数目与力链长度的关系符合单轴压缩试验结果, 能够采用离散元的方法对截齿截割状态进行模拟。力链网络沿着点接触方向扩散并延长, 力链方向与截割角度有关, 平均法向力方向呈“花生”状, 切向力方向呈“花瓣”状。力链数目随截割角度的减小和截割深度的增加而减少, 力链长度随截割距离的增加而增加, 最大平均长度为 8 个颗粒尺寸。当截割角度较大时, 较为容易形成力链。单齿截割天然砂岩法向力和切向力随截割角度的增加和截割深度的减小而减小。截割碎片尺寸与截割切向力线性拟合度为 0.87。基于力链长度的截割力预测模型相比 Evans 预测模型法向力精度提高了 17.6%, 切向力精度提高了 16.9%。研究结果能够为截齿和采掘机械截割系统的设计以及截割工艺的优化奠定一定的研究基础。

关 键 词: 颗粒物质; 单齿截割; 力链; 力预测

中图分类号: TU 312

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 11-3036-11

Rock cutting characteristics with single pick and prediction of cutting force based on force chain

DONG Lei^{1,2}, ZHANG Hua¹, LÜ Ji-shuang^{2,3}, SHI Rui-min^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;
2. National Engineering Laboratory of Coal Mining Machinery Equipment, Taiyuan, Shanxi 030032, China;
3. Taiyuan Institution, China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: The pick is the main load-bearing object of the mining machinery for cutting coal, and the prediction of the cutting force from the working face is very important to reduce the wear of the pick. The rock was considered as a particle matter for single pick cutting simulation by using the particle flow code (PFC^{2D}). The influence of the contact state on the cutting force of the single pick was discussed by studying the characteristics of the interparticle force chain during cutting. The cutting force test was carried out on a single pick cutting rock test equipment, and the changing law of normal and tangential force with cutting parameters and the characteristics of falling fragments were obtained. The research results show that the relationship between the number of force chains and the length of the force chains for rock particles cut by a single pick is consistent with the uniaxial compression test results, and the cutting state of the single pick can be simulated by using discrete element method. The force chain network spreads and extends along the point contact direction, which is related to the cutting angle. The average normal force direction is "peanut"-like whereas the tangential force direction is "petal"-like. In addition, the number of force chains decreases with the decrease of cutting angle and the increase of cutting depth. The length of force chains increases with the increase of cutting distance. The maximum average length is about 8 particle sizes. The force chains tend to form at larger cutting angles. Furthermore, the normal force and tangential force of single pick cutting of natural sandstone decrease with the increase of cutting angle and the decrease of cutting depth. The linear correlation between the size of the cutting fragments and the cutting tangential force is 0.87. Compared with the Evans prediction model, the accuracy of normal force and tangential force based on force chain length is improved by 17.6% and 16.9% respectively.

收稿日期: 2022-01-05

修回日期: 2022-07-13

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51875152); 山西省基础研究计划项目 (No. 20210302123065); 天地科技股份有限公司重点项目 (No. KY202054)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51875152), the Natural Science Foundation of Shanxi Province (20210302123065) and the Key Projects of Tiandi Science and Technology Co., Ltd. (KY202054).

第一作者简介: 董磊, 男, 1982 年生, 博士, 副教授, 主要从事煤矿机械设计及岩石破坏机制方面的研究工作。E-mail: donglei@nuc.edu.cn

通讯作者: 石瑞敏, 女, 1983 年生, 博士, 讲师, 主要从事煤矿机械动力学与载荷识别的研究工作。E-mail: shiruimin@nuc.edu.cn

The research results lay a certain research foundation for the design of cutting pick, mining machinery cutting system and the optimization of cutting technology.

Keywords: granular material; single pick cutting; force chain; force prediction

1 引 言

截齿是地下巷道掘进机械及采煤机械截割系统中不可或缺的零件之一，直接承受着岩或煤的破坏载荷。破碎岩石的过程中，截齿在强大推力的作用下截割、压碎煤岩，与煤岩相互作用产生剧烈摩擦和挤压。截齿在工作过程中的截割力是截割系统设计的主要因素之一^[1]。因此，截齿截割力的精确预测与评估对截齿及截割系统的设计和制造是十分必要的。

自 1984 年 Evans^[2]首先建立了基于最大张力准则的镐型截齿截割力预测理论模型以来，许多学者都尝试在此基础上提出自己的截割力预测理论模型^[3-5]或试验模型^[6-9]，这些模型一般是根据弹塑性理论或者断裂力学理论来计算截齿截割力的峰值。Li X 等^[10]在 2018 年对国内外重要的理论计算模型进行了系统而详细地阐述。由于煤岩材料的物理属性为非线性以及截割过程的力学非连续性，这些理论计算模型差别很大，目前尚未达成统一认识。因此，在模型的计算精确度和实用性上还需要进一步的研究。

虽然以往的截割破岩理论已经相对成熟，但由于这些理论一般把岩石或煤炭等截割对象作为连续体处理，这与岩石或煤炭的本征属性有所差别。随着颗粒物质物理与力学的发展，作为截齿的截割对象，岩石物质的研究应该从连续系统转变为更精确的颗粒系统，它将是一个相对复杂的能量耗散体系，颗粒间接触力一般沿着链状路径（即力链）传递，形成颗粒→力链→体系的多尺度结构^[11-12]。通过分析力链结构的失稳和重构特性，可深入理解岩石颗粒物质的整体力学行为^[13]，这对研究截齿截割煤岩物质的动力学行为有重要作用。此外，基于断裂力学的研究结果也表明^[14]，截割力与裂纹的产生和发展有关。因此，建立基于颗粒物质物理与力学的破岩模型对分析煤岩以力链为特征尺度的细观（也称介观）力学性质十分必要，同时也与实际更为贴近。

Science 于 2005 年把颗粒物质与湍流并列为 125 个科学难题之一^[15]，至今仍有许多学者在此领域作出贡献。Ebrahimabadi 等^[16]观察到了点接触下岩石的破裂演变，从而证实了岩土中力链的存在。Saadat 等^[17]尝试把岩石作为颗粒物质，研究了锚杆在其中的力学效应。Huang 等^[18-19]把煤岩作为颗粒物质，模拟了机械化回填的综采过程，研究了不同

充填率，不同坡度条件下顶板的力链变化、塌陷以及回填中的应力分布。肖建成等^[20]基于连续-非连续单元法（continuum-discontinuum element method，简称 CDEM）建立了铣轮铣削岩土体过程的三维仿真模拟方法。一些学者由于试验条件的限制，采用颗粒流模拟的方法得到影响力链的变量以及描述力链大小和方向的参数^[21]，这些研究都为应用颗粒流方法模拟截齿截割岩石或煤炭物质奠定了研究基础。

综上所述，为建立更为精确的截齿截割力预测模型，本文采用颗粒流法建立截齿截割岩石颗粒物质的仿真模型，获得单齿截割天然砂岩截割力峰值的计算方法。通过研究单齿截割时岩石颗粒系统力链的数目、长度及方向特性，获得点接触下力链特征随截割参数的变化规律。单齿截割天然砂岩试验结果验证了提出的基于力链特征的截割力预测模型，计算精度较传统基于断裂力学的计算模型有了一定的提高。

2 单齿截割力预测模型与模拟方法

2.1 单齿截割力数学模型

Evans^[2]所建立的单齿截割数学模型是其他理论模型的计算基础，如下式所示：

$$PCF_{Ev} = \frac{16\pi\sigma_t^2 d^2}{\sigma_c \cos^2 \alpha} \quad (1)$$

式中： σ_t 和 σ_c 分别为岩石的巴西抗拉强度和单轴抗压强度； d 为截割深度； α 为齿尖半角，与截齿形状和截割角度有关； PCF_{Ev} 为 Evans 计算的单齿截割力的峰值（peak cutting force，简称 PCF）。

虽然 Evans 模型在工程上被广泛应用，但其模型使用有一定的局限性。例如，截齿与岩石必须呈直角以及截割力与单轴抗压强度呈反比等，而这些条件在实际应用中略显苛刻。为了解决模型中的问题，Goktan 等^[22-23]先后提出了自己的改进模型，但这些模型更侧重于截齿压向岩石的过程，而非截齿截割岩石的状态。此外，建立截割力计算模型还需要考虑格里菲斯断裂理论。Li X 等^[10]基于以上分析，建立了较为成熟可靠的单齿截割力峰值计算方法：

$$PCF_{Li} = \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sigma \cos \theta \cdot r d\theta dl = \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin \alpha}{\cos \beta} - 1 \right) \theta + 1 \right] \cdot \frac{(d-l)K_{IC}}{d\sqrt{\pi\delta}} \cos \theta \cdot \lambda l d\theta dl = \frac{\lambda K_{IC} d^2}{3\sqrt{\pi\delta}} \quad (2)$$

式中: l 为截齿母线上任一点与齿尖的竖直距离; σ 为齿尖剖面位置角 θ 处的应力; r 为齿尖剖面半径; β 为齿尖前角; K_{IC} 为岩石 I 型断裂韧度; δ 为裂纹长度; $PCF_{Li X}$ 为 Li X 等^[10]计算的单齿截割力的峰值, 计算模型如图 1 所示, σ_s 为裂纹萌生时的临界应力, λ 为与截齿形状和截割角度有关的参数, 其值为

$$\lambda = \frac{\tan(2\alpha - |\beta|) + \tan|\beta|}{4} + \frac{\frac{1}{2} \tan \alpha \left[\frac{\tan(2\alpha - |\beta|) - 2 \tan(\alpha - |\beta|) - \tan|\beta|}{2} \right]}{\sin(\alpha - |\beta|) + \frac{1}{\cos(\alpha - |\beta|)}} \quad (3)$$

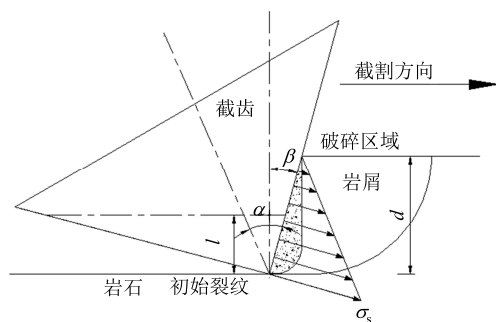


图 1 镐型截齿截割力计算示意图^[10]

Fig.1 Schematic diagram of calculation of pick cutting force^[10]

由式 (2) 可知, 单齿截割力峰值与裂纹长度负相关。因此, 当裂纹开始产生时, 截割力最大, 随着裂纹的扩展截割力减小, 岩石由裂纹演化成碎片后, 截割力减小到 0, 然后又产生新的裂纹。这也是掘进或采煤机械截割力剧烈波动的根本原因。

岩石裂纹尺寸 δ 决定了单齿截割力的大小, 而裂纹在岩石破碎之前又难以测量, 以往的经验是利用能量守恒来计算, 本文采用颗粒流方法获得力链特征参数来代替裂纹尺寸以尝试解决这一问题。

2.2 单齿截割颗粒流模型

为探究镐型截齿截割岩石时截割参数对岩石破坏的影响以及对截割力预测, 采用 PFC^{2D} 仿真软件建立点接触颗粒流模型, 如图 2 所示。选取某种天然砂岩作为试验对象, 该岩石的力学试验见文献[24],

其宏观特性如表 1 所示。为后续仿真结果与试验结果进行对比, 颗粒流模型也采用该岩石相关特性参数。颗粒材料的细观属性与岩石宏观性能并没有明确的对应关系, 为了尽可能地模拟真实的岩石混合物特性, 应首先建立岩石单轴压缩和拉伸试验, 获得材料的应力-应变特征, 据此标定颗粒物质的细观参数, 标定方法见文献[25-26]。校准时, 对颗粒之间接触的杨氏模量和法向刚度与切向刚度之比进行调整, 与试验值吻合后说明该模拟模型与试验材料基本相符。标定后的岩石颗粒细观参数见表 2, 颗粒模型采用平节理接触模型, 该模型具有大的拉压比, 能够改善颗粒间摩擦角较小的问题, 降低颗粒自身旋转频率, 广泛适用于岩石颗粒的模拟。单轴拉伸和压缩试验结果如图 3 所示。岩石颗粒模型尺寸为 150 mm×150 mm, 颗粒为 31 002 个球形颗粒。

如前所述, 截齿截割岩石界面的状态参数对截割力和破岩率等性能表现有很大影响, 因此, 设计如表 3 所示的颗粒流模拟试验和单齿截割岩石试验, 以期获得截割参数与岩石颗粒物质力链的关系, 其中截割角度选取 44°、48°、52°, 截割深度选取 2、3、4 mm, 截割线速度选取 2 m/s。

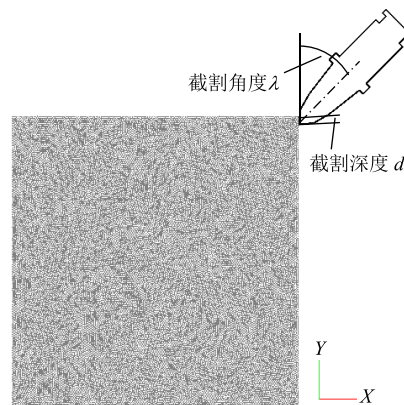


图 2 单齿截割岩石点接触颗粒流模型

Fig.2 Point contact particle flow model for single pick cutting rock

表 1 岩石的宏观参数^[24]

Table 1 Macro parameters of the rock^[24]

密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν
2 340	61.7	4	21	0.26

表 2 岩石的颗粒细观参数

Table 2 DEM parameters of rock particles

密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒半径 R /mm	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	黏结刚度比 k	弹性模量 E /GPa	孔隙率	摩擦系数 μ
1 660	0.5	33.2	5.23	1.5	20	0.12	0.3

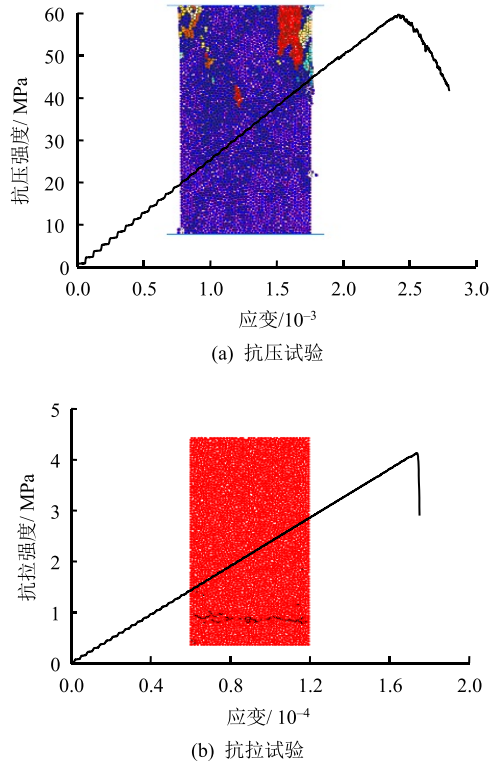


图 3 模型标定结果

Fig.3 Model calibration results

表 3 试验条件
Table 3 Test conditions

试验序号	截割深度 / mm	截割角度 / (°)	试验序号	截割深度 / mm	截割角度 / (°)
1	2	44	6	3	52
2	2	48	7	4	44
3	2	52	8	4	48
4	3	44	9	4	52
5	3	48			

2.3 力链判据与算法

对于力链的准确定义，目前仍处于尚未解决的研究阶段。Bi 等^[27]把颗粒网络中能量较大的有向线段定义为力链。清华大学王光谦团队也对力链进行了定义^[12, 28]。力链是细观尺度上外载荷在颗粒物质中的传递路径，是宏观上应力和微观上颗粒间作用力之间的桥梁，即力链的大小和方向由颗粒间作用力决定，又决定着系统的宏观力学特性。力链包含强力链和弱力链，强力链与弱力链相互交错，构成了复杂的力链网络。强力链主要起支撑载荷的作用，对颗粒系统的承载特性起决定作用，因此，研究颗粒物质力链的主要方法是对强力链的分布特性进行系统分析。以下未经说明时，力链均特指强力链。影响力链的因素很多，包括颗粒材料的物理属性、颗粒系统的边界条件以及载荷等。颗粒流模型中颗粒间接触力按照 Hertz-Mindlin 理论计算，法向力和

切向力分别为

$$\left. \begin{aligned} F_i^n &= K^n \Delta U_i^n - \eta_n \bar{v} \\ \Delta F_i^t &= -K^t \cdot \Delta U_i^t - \eta_t \Delta \bar{v}_s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中：\$F_i^n\$、\$\Delta F_i^t\$ 分别为点接触下第 \$i\$ 个颗粒所受的法向力和切向力；\$\Delta U_i^n\$、\$\Delta U_i^t\$ 分别为法向和切向位移增量；\$\eta_n\$、\$\eta_t\$ 分别为法向和切向阻尼系数；\$\bar{v}\$、\$\Delta \bar{v}_s\$ 分别为颗粒相对速度和接触点滑移速度；\$K^n\$、\$K^t\$ 分别为颗粒法向和切向接触刚度，由下式确定：

$$\left. \begin{aligned} K^n &= \left[\frac{2\tilde{G}\sqrt{2\tilde{R}}}{3(1-\tilde{\nu})} \right] \sqrt{U_i^n} \\ K^t &= \left[\frac{2(\tilde{G}^2 3(1-\tilde{\nu})\tilde{R})^{1/3}}{2-\tilde{\nu}} \right] |F_i^n|^{1/3} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中：\$\tilde{G}\$ 为等效剪切模量；\$\tilde{\nu}\$ 为等效泊松比；\$\tilde{R}\$ 为颗粒等效半径。

本文搜索力链的流程如图 4 所示，\$P\$ 代表任一高应力颗粒作为力链起点的颗粒数，初始值为 1，首先获得颗粒系统中所有颗粒的接触和应力信息，然后过滤掉那些小于或者等于平均应力的颗粒，如下式所示^[29]：

$$\sigma > \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\sigma_3^i| \quad (6)$$

式中：\$N\$ 为模型的颗粒总数；\$\sigma_3^i\$ 为第 \$i\$ 个颗粒的最小主应力。

点接触颗粒材料最大主应力和最小主应力为

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \right)^2 + (\tau_{12})^2} \quad (7)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \right)^2 + (\tau_{12})^2} \quad (8)$$

式中：\$\sigma_1\$ 为最大主应力；\$\sigma_3\$ 为最小主应力；\$\sigma_{11}\$ 和 \$\sigma_{22}\$ 分别为相互垂直两个方向的应力；\$\tau_{12}\$ 为这两个方向上的最大剪应力。其均为负值（压应力为负），选用最小主应力的绝对值作为计算平均应力的依据。力链的角度根据相互接触颗粒的中心连线与最小主应力方向之间的夹角 \$\theta\$ 是否小于 \$\theta_c\$ 来确定，如下式所示^[30]：

$$\cos \theta_c < \frac{|L\sigma^{\text{next}}|}{|L||\sigma^{\text{next}}|} = \cos \theta \quad (9)$$

式中：\$\sigma^{\text{next}}\$ 为相邻颗粒的最小主应力；\$L\$ 为连接颗粒质心的向量；\$\theta_c\$ 为颗粒质心连线角度的变化阈值，与接触面的咬合、内嵌等几何结构有关。

\$\theta_c\$ 的取值与颗粒间的接触状态有关，又影响着

力链的长度和概率密度, 目前还没有统一的标准, 一般认为其由颗粒体系的平均配位数决定:

$$\theta_c = \frac{180^\circ}{z} = \frac{N \times 180^\circ}{2N_c} \quad (10)$$

式中: z 为颗粒之间的平均配位数; N_c 为颗粒之间的实际接触数目。

当两个高应力颗粒的接触力方向 θ 在 θ_c 以内, 则认为它们之间的接触力为一条力链, 力链的角度为颗粒间接触力的方向。

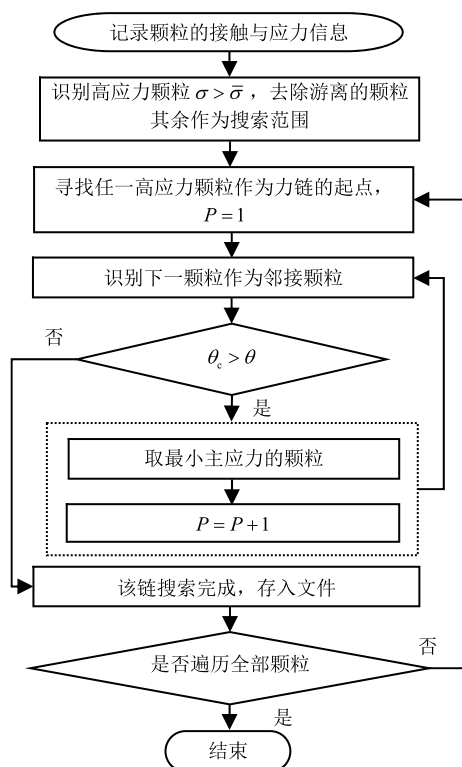


图4 力链搜索流程

Fig.4 Flow chart for searching force chains

新的截割力预测模型首先需要定义力链长度 $n^{[12]}$

$$n = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{d_i}{\langle d \rangle} \quad (11)$$

式中: d_i 为该力链上的颗粒粒径; $\langle d \rangle$ 指颗粒体系的平均粒径, 因此力链长度为该条力链上的颗粒个数。

本文提出基于力链特征的单齿截割力预测方法, 该方法把 Li X 模型^[10]中的裂纹尺寸 δ 为

$$\delta = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{NL} \quad (12)$$

式中: δ 为单位截割距离和力链数目下力链的平均长度; N 为强力链数目; L 为截割距离; n_i 为强力链长度。将力链长度参数作为裂纹尺寸 δ 代入式 (2),

最终的截割力预测模型为

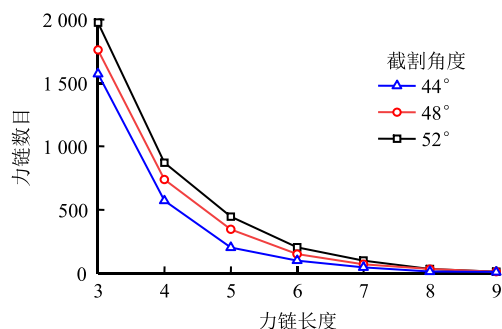
$$\text{PCF}_{\text{Lilian}} = \sum_i^N \frac{\lambda K_{\text{IC}} d^2}{\sqrt[3]{\frac{\pi n_i}{NL}}} \quad (13)$$

式中: $\text{PCF}_{\text{Lilian}}$ 即为本文提出的基于力链特征的单齿截割力峰值。

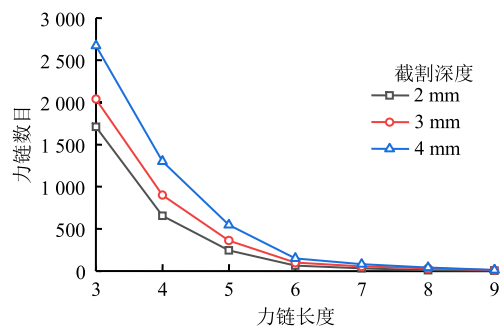
3 单齿截割颗粒岩石力链特性

3.1 模型验证

为了验证颗粒流模型的正确性, 每次截割 5 mm 时提取相应的力链长度和力链数目, 仿真模型中力链长度与数目的关系分布如图 5 所示, 图 5(a) 为截割深度为 3 mm 时不同截割角度的力链长度与数目的关系分布, 图 5(b) 为截割角度为 48° 时不同截割深度的力链长度与数目的关系分布。



(a) 不同截割角度



(b) 不同截割深度

图5 力链长度与数目的关系

Fig.5 Relationship between the length and the number of the force chains

从图 5 中可以看出, 即使试验条件不同, 力链长度与数目的关系均呈反比分布, 与文献[31]中的结论一致, 除了说明点接触下颗粒物质力链的长度与数目的关系分布与单轴压缩试验中的结论保持一致以外, 同时也验证了仿真模型的可行性。

3.2 单齿截割切削状态与力链的关系

图 6 所示为单齿截割岩石颗粒材料的随截割时间的力链演化图。从图 6 中力链的演变可以看出,

随着截割时间 t 的增加,力链的数目逐渐增加,力链长度也略微增加,力链网络沿着点接触方向扩散并延长。随着截割时间的进一步增加,力链网络不断断裂重组,最终达到一个相对稳定的状态。

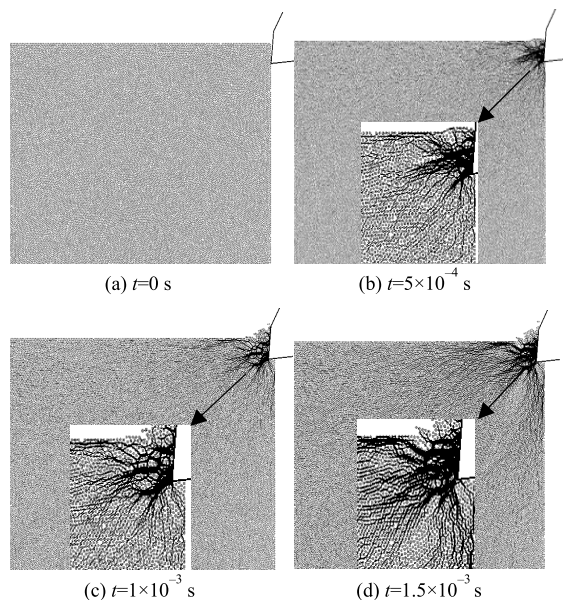


图 6 随截割时间变化的力链网络演化图
Fig.6 Evolution of force chain networks with cutting time

为了探求力链方向与截割角度的关系,研究了单齿截割颗粒岩石颗粒物质的力链接触角方向随截割角度的变化规律,如图 7 所示。

可以看出,颗粒力链平均法向接触力方向与截割角度息息相关,基本为沿截割角度方向呈“花生”状,与周世琛等^[32]结论相仿,但接触力方向略小于截割角度。这是颗粒间的内摩擦力与剪切力的共同作用造成的。因此,颗粒物质剪切带对点接触颗粒材料力链方向的影响不容忽视。力链切向力方向呈“花瓣”状,方向角分别为 85° 、 165° 、 265° 和 345° ,且随着截割角度的减小,平均接触法向力和切向力增加。本文与文献^[32-33]的截割方式并不相同,但依然得到近似的研究结果,说明点接触或类点接触下颗粒物质的力链方向角演变规律与接触界面刚体运动方式无关。

为了进一步探究单齿截割岩石颗粒物质截割状态与力链的关系,获得了不同截割角度和截割深度下力链数目随截割距离的变化规律,如图 8 所示。图 8(a)为截割深度为 3 mm 时不同截割角度下力链数目随截割距离的变化曲线,图 8(b)为截割角度为 48° 时不同截割深度下力链数目随截割距离的变化曲线。可以看出,随着截割距离的增加,力链数目基本呈对数分布增加,说明力链数目在一定程度

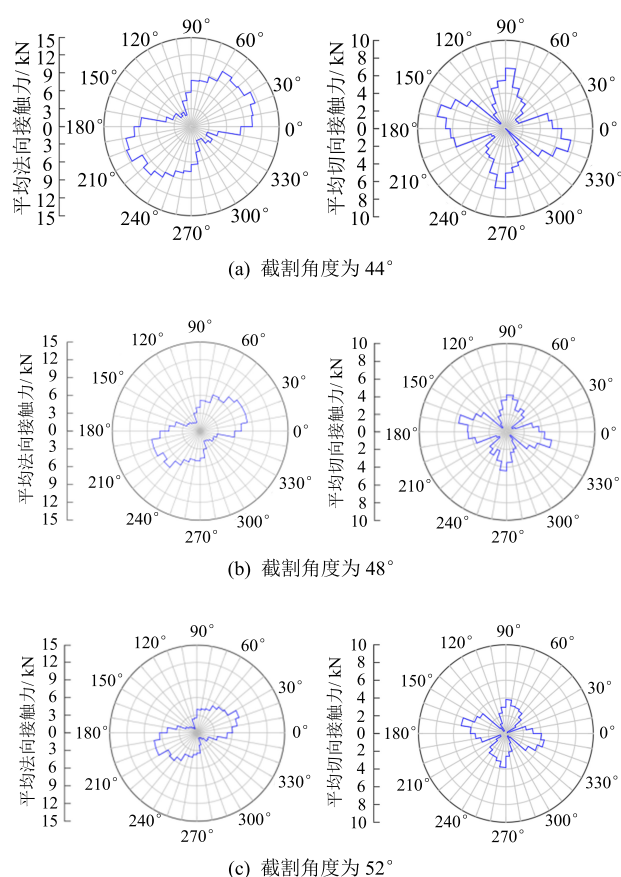
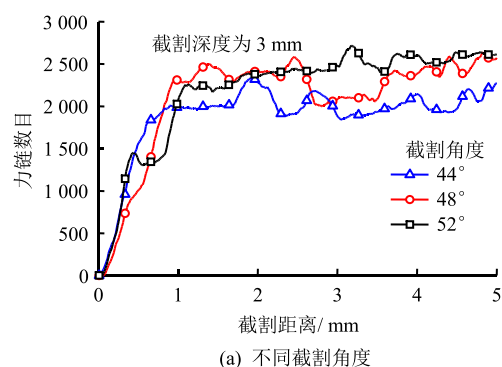
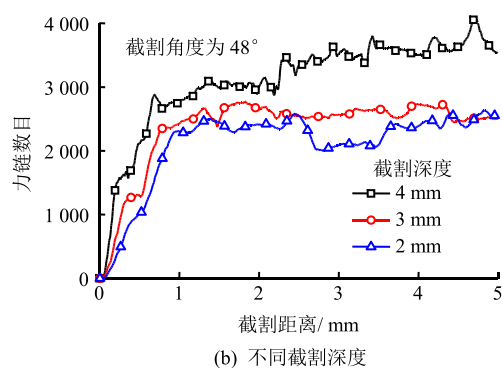


图 7 力链接触力方向与截割角度的关系
Fig.7 Relationship between the contact force directions of force chains and cutting angles



(a) 不同截割角度

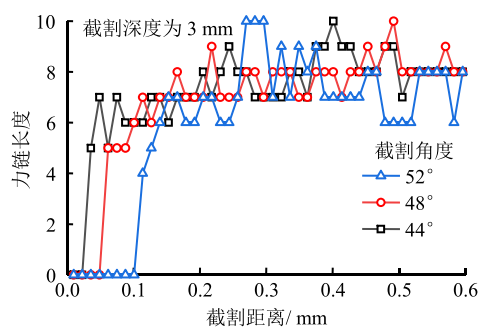


(b) 不同截割深度

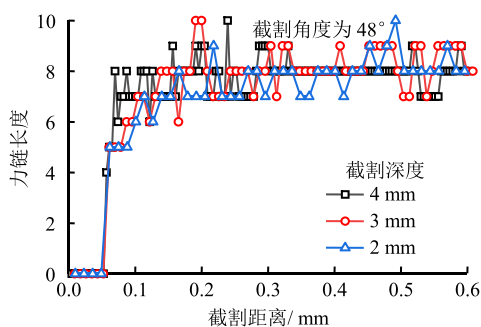
图 8 单齿截割状态与力链数目的关系
Fig.8 Relationship between the cutting state of single pick and the number of force chains

上可以表征截割状态。当截割角度较小、截割深度较大时,力链数目较少,表明在较小的截割角度和较大的截割深度下,力链还未形成时颗粒状态即遭破坏,破岩率提升。因此,在条件允许的情况下,减小截割角度和增大截割深度能够对截割效率产生正向影响,为进一步研究掘进机械或采煤机械截割过程和设计截割系统提供了一种新的思路。

单齿截割力一般随着截割距离的增加而增加,当截齿齿尖完全进入岩石颗粒物质后趋于相对稳定状态,围绕一个定值上下剧烈波动。图 9 所示为单齿截割时力链长度随截割距离的关系曲线。图 9(a)为截割深度为 3 mm 时不同截割角度力链长度随截割距离的变化趋势,图 9(b)为截割角度为 48° 时不同截割深度力链长度随截割距离的变化趋势。可以看出,随着截割距离的增加,力链长度非线性增加。当力链长度增加到 8 个颗粒时,力链趋于平稳,即使截割距离再增加,力链长度不再增加。力链长度在 8 个颗粒上下浮动,说明强力链随着截割距离的增加不断破坏与重构。该曲线呈现锯齿状,与图 8 力链数目的变化不同,原因是力链数目是瞬时的,随力链的破坏与重构不断变化,而力链长度是统计的,其变化对截割距离的微小增加不敏感。此外,无论是点接触形式还是单双轴压缩形式,力链长度一般不超过 9 个颗粒是具有普适规律的。



(a) 不同截割角度



(b) 不同截割深度

图 9 单齿截割状态与力链长度的关系

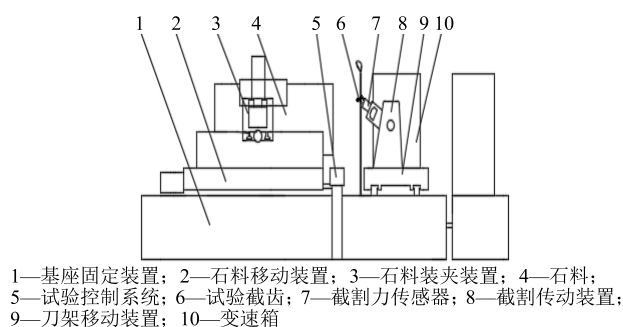
Fig.9 Relationship between the cutting state of single pick and the length of the force chains

由图 9(a)还可看出,当截割角度较大时,力链长度率先到达最大值,这说明较大的截割角度使力链较早达到稳定状态,不容易产生较大的截割力,因此对岩石的破坏较小。这也进一步证实了截割角度相比截割深度对力链的形成较为敏感。

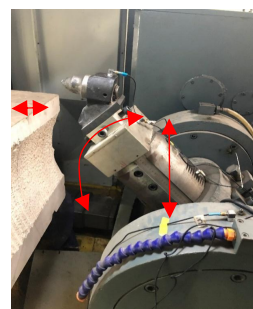
4 单齿截割岩石试验

4.1 试验装置

试验采用煤矿采掘机械装备国家工程实验室的单齿截齿截割试验台,如图 10(a)所示。该试验台能够模拟截齿破岩过程,进行单个截齿的截割力、磨损状态、粉尘量等试验,可以改变单个截齿相对截割对象的截割角度、截割速度、截割深度等,获得三向截割力等试验数据,为截齿以及截割系统的设计提供试验支撑。试验平台连接八角环测力仪及多通道数据采集系统,能够实时监测并采集截割过程中的三向力,采样频率最高为 20 kHz。截齿可以沿着箭头方向旋转和前后移动,岩石可以沿图示箭头方向左右移动,如图 10(b)所示。截齿旋转速度决定了截割线速度,截齿相对齿座的安装角度决定了截割角度,截齿前后移动位移决定了截线间距,岩石左右移动位移决定了截割深度,截齿和岩石的相对运动完成单齿截割的动作。



(a) 截割试验台示意图



(b) 截割试验台

图 10 单齿截割装置

Fig.10 Single pick cutting machine

4.2 试验对象

试验对象采用合金钢截齿,材料为 35CrMnSiA

高强度钢,其维氏硬度 HV 为 862,外伸长度为 80 mm,齿柄直径为 38 mm,齿尖直径为 25 mm,边缘直径为 60 mm,齿尖角为 80° 。截割试验选用 3 种不同角度截齿座,如图 11 所示,试验条件见表 3。每个试验重复 3 次,截割线速度为 2 m/s,截线间距为 20 mm。试验环境温度为 19°C ,测力仪的采样频率为 500 Hz。截割对象采用尺寸为 $1\,200\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 天然砂岩,该岩石的主要宏观特性如表 1 所示。

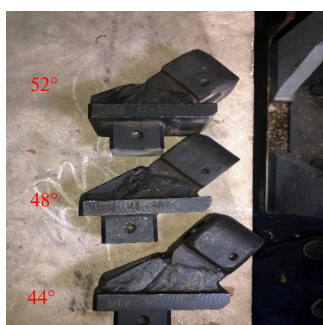


图 11 不同角度的截齿座
Fig.11 Pick holders with different angles

4.3 试验结果与讨论

不同截割深度时,截割力随截割角度的变化如图 12 所示,图 12(a)为法向力的变化,图 12(b)为切向力的变化。可以看出,随着截割深度的增加,截割法向力和切向力随之增加。当截割角度增大时,截割法向力和切向力随之减小,法向力减小的程度更为剧烈。这是由于随着截割角度的增加,截齿对岩石的法向冲击力减小,而剪切力增加,岩石的断裂方式由原来的拉伸破坏向剪切破坏转变。这一结论与文献[34]的结论相似。为了进一步说明剪切力对单齿截割的影响,采集截割后的岩石碎片进行尺寸分析,如图 13 所示。可以看出,随着截割角度的减小,碎片尺寸随之增加,说明当截割角度较大时,截齿对岩石的压应力起主要作用。当截割角度较小时,截齿对岩石造成剪切断裂,天然砂岩物理性质偏脆性材料,碎片几何尺寸变大变薄。图 14 所示为碎片尺寸与截割切向力的线性回归关系,可以看出,碎片尺寸与截割切向力具有一定的线性度,拟合优度为 0.87。因此,需要根据不同遴选岩石条件确定合适截割角度参数。

4.4 截割力预测模型及试验对比

为验证基于颗粒物质力链的单齿截割力峰值预测模型,分别计算 Evans 模型、Li X 模型^[10]和本文提出的力链模型,同时将计算结果与试验结果进行对比,获得截割力法向力峰值和切向力峰值随截

割参数的变化。截割深度为 3 mm 时的截割法向力和切向力对比如图 15 所示,其余试验条件计算结果与此类似。

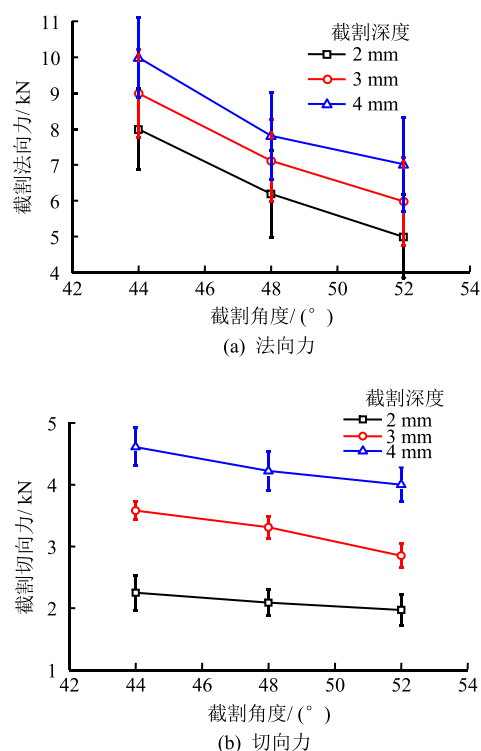


图 12 截割力与截割角度和截割深度的关系
Fig.12 Relationship between cutting force, cutting angle and cutting depth

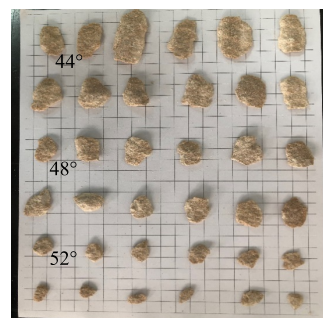


图 13 岩石碎片形态与尺寸
Fig.13 The shape and size of rock fragments

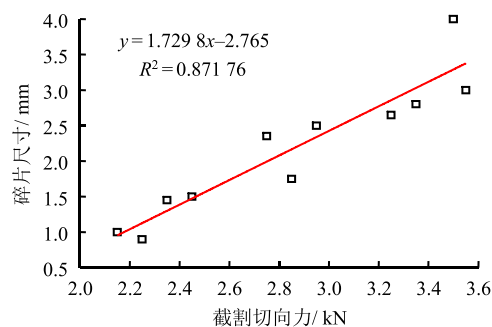


图 14 碎片尺寸与截割切向力回归分析
Fig.14 Regression analysis of fragment size and cutting tangential force

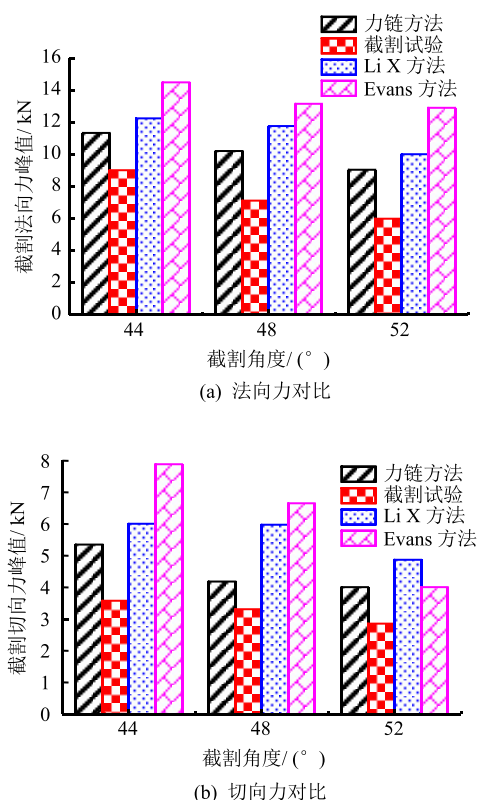


图 15 截割力预测模型计算结果与试验对比

Fig.15 Comparison between calculation results of cutting force prediction model and experiment

由图 15 可知, 试验得到的截割力普遍小于理论计算结果, 一方面是由于试验所用天然砂岩内部存在裂隙、节理等; 而在模拟时, 岩石内部无节理、断层等。另一方面是由于在计算时, 对岩石宏观参数的标定存在一定的误差, 颗粒半径、摩擦系数、弹性模量等参数的改变都会对截割力产生较大的影响。

由图 15 中 3 种计算模型对比结果可知, 无论是法向力还是切向力, Evans 模型与试验结果偏差最大, 法向力平均偏差为 45.8%, 切向力平均偏差为 44.6%。力链模型偏差最小, 法向力平均偏差为 28.2%, 切向力平均偏差为 27.6%, 比 Evans 模型法向力和切向力精度分别提高 17.6%和 16.9%, 相较 Li X 预测模型精确度也有所提升。将力链长度作为裂纹尺寸, 不仅可以在单齿截割岩石未断裂之前预测截割力峰值, 还能够从细观尺度预测裂纹扩展状态和碎片形状, 为截齿以及掘进机械或采煤机械截割系统的设计制造提供理论基础。

5 结 论

将颗粒物质力学中的力链引入单齿截割力预测模型中, 利用颗粒流仿真软件 PFC^{2D}进行了单截齿截割岩石颗粒物质模拟仿真研究, 获得了单齿截割

时力链网络随时间的演化和接触角方向变化。依据单齿截割天然砂岩试验对比了理论计算与试验截割力峰值, 主要结论有:

(1) 力链数目随力链长度的分布呈反比关系, 与单轴压缩颗粒物质形态一致。力链接触角方向与截割角度有关, 平均法向力方向呈“花生”状, 切向力方向呈“花瓣”状。

(2) 力链数目随截割距离的增加呈指数性增加, 当截割角度较小、截割深度较大时, 力链数目较少。力链长度随截割距离的增加而增加, 最终基本稳定在 8 个颗粒; 当截割角度增大时, 力链较早的形成。

(3) 随着截割角度的增加和截割深度的减小, 试验中截割法向力和切向力均呈下降趋势; 从截割碎片可以看出, 截割角度的减小会使岩石压应力为主的拉伸破坏向剪应力为主的剪切断裂转变。

(4) 提出的基于力链特征的截割力预测模型对单齿截割岩石截割力峰值的理论计算结果与截割力试验结果较为接近, 其计算精度相比 Evans 理论模型和 Li X 数学模型有一定提高。

参 考 文 献

- [1] COMAKLI R. Effects of the physico-mechanical properties of low-strength pyroclastic rocks on cutter wear of roadheaders[J]. *Wear*, 2019, 428: 205-216.
- [2] EVANS I. A theory of the picks cutting force for point-attack[J]. *International Journal of Mining Engineering*, 1984, 2(1): 63-71.
- [3] TIRYAKI B, BOLAND J N, LI X S. Empirical models to predict mean cutting forces on point-attack pick cutters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(5): 858-864.
- [4] BAO R H, ZHANG L C, YAO Q Y, et al. Estimating the peak indentation force of the edge chipping of rocks using single point attack pick[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(3): 339-347.
- [5] LIU C S, JIN L H. The cut mechanical model of pick shaped cutter under conditions of dissymmetrical slotting[J]. *Journal of the China Coal Society*, 2009, 34(7): 983-987.
- [6] KROLCZYK G, LEGUTKO S, RAOS P. Cutting wedge wear examination during turning of duplex stainless steel[J]. *Tehnicky Vjesnik-Technical Gazette*, 2013, 20(3): 413-418.

- [7] KROLczyk G, GAJEK M, LEGUTKO S. Effect of the cutting parameters impact on tool life in duplex stainless steel turning process[J]. **Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette**, 2013, 20(4): 587-592.
- [8] KANG H, CHO J W, PARK J Y, et al. A new linear cutting machine for assessing the rock-cutting performance of a pick cutter[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2016, 88: 129-136.
- [9] DEWANGAN S, CHATTOPADHYAYA S. Performance analysis of two different conical picks used in linear cutting operation of coal[J]. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2016, 41(1): 249-265.
- [10] LI X F, WANG S B, GE S R, et al. A theoretical model for estimating peak cutting force of conical picks[J]. **Experimental Mechanics**, 2018, 58(5): 709-720.
- [11] HUANG D, ZHU T T. Experimental and numerical study on the strength and hybrid fracture of sandstone under tension-shear stress[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2018, 200: 387-400.
- [12] 孙其诚, 金峰, 王光谦, 等. 二维颗粒体系单轴压缩形成的力链结构[J]. **物理学报**, 2010, 59(1): 30-37.
SUN Qi-cheng, JIN Feng, WANG Guang-qian, et al. Force chains in a uniaxially compressed static granular matter in 2D[J]. **Acta Physica Sinica**, 2010, 59(1): 30-37.
- [13] LIU W R, WANG X, LI C M. Numerical study of damage evolution law of coal mine roadway by particle flow code (PFC) model[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2019, 37(4): 2883-2891.
- [14] GAO K D, DU C L, JIANG H X, et al. A theoretical model for predicting the peak cutting force of conical picks[J]. **Frattura ed Integrità Strutturale**, 2014, 8(27): 43-52.
- [15] KENNEDY D, NORMAN C. What don't we know?[J]. **Science**, 2005, 309(5731): 75-75.
- [16] EBRAHIMABADI A, AZIMIPOUR M, BAHREINI A. Prediction of roadheaders' performance using artificial neural network approaches (MLP and KOSFM)[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2015, 7(5): 573-583.
- [17] SAADAT M, TAHERI A. Effect of contributing parameters on the behaviour of a bolted rock joint subjected to combined pull-and-shear loading: a DEM approach[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(1): 383-409.
- [18] HUANG Z M, MA Z G, GONG P, et al. Macro mesoscopic mechanical property of overlying strata and backfill material in backfill mining[J]. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 19: 4603-4618.
- [19] HUANG Z M, MA Z G, ZHANG L, et al. A numerical study of macro-mesoscopic mechanical properties of gangue backfill under biaxial compression[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2016, 26(2): 309-317.
- [20] 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.
- [21] DING X B, ZHANG L Y, ZHU H H, et al. Effect of model scale and particle size distribution on PFC3D simulation results[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(6): 2139-2156.
- [22] GOKTAN R M. A suggested improvement on Evans' cutting theory for conical bits[C]//Proceedings of Fourth Symposium on Mine Mechanization Automation. Brisbane: [s. n.], 1997.
- [23] 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 and Metallurgy**, 2005, 105(02): 257-263.
- [24] 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): 2172-2186.
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): 2172-2186.
- [25] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [26] 张倩倩, 韩振南, 张梦奇, 等. 冲击载荷作用下锥形截

- 齿磨损的试验和数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 58-65.
- ZHANG Qian-qian, HAN Zhen-nan, ZHANG Meng-qi, et al. Tests and simulation for wear of conical pick under impact load[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2016, 35(13): 58-65.
- [27] BI Z W, SUN Q C, JIN F, et al. Numerical study on energy transformation in granular matter under biaxial compression[J]. **Granular Matter**, 2011, 13(4): 503-510.
- [28] 孙其诚, 辛海丽, 刘建国, 等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 1): 83-87.
- SUN Qi-cheng, XIN Hai-li, LIU Jian-guo, et al. Skeleton and force chain network in static granular material[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Suppl.1): 83-87.
- [29] 付龙龙, 周顺华, 田志尧, 等. 双轴压缩条件下颗粒材料中力链的演化[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2427-2434.
- FU Long-long, ZHOU Shun-hua, TIAN Zhi-yao, et al. Force chain evolution in granular materials during biaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(6): 2427-2434.
- [30] PETERS J F, MUTHUSWAMY M, WIBOWO J, et al. Characterization of force chains in granular material[J]. **Physical Review E**, 2005, 72(4): 041307.
- [31] PÖSCHEL T, SCHWAGER T. Computational granular dynamics: models and algorithms[M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [32] 周世琛, 郇筱林, 陈宇琪, 等. 天然气水合物沉积物不排水剪切特性的离散元模拟[J]. 石油学报, 2021, 42(1): 73-83.
- ZHOU Shi-chen, HUAN Xiao-lin, CHEN Yu-qi, et al. DEM simulation on undrained shear characteristics of natural gas hydrate bearing sediments[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2021, 42(1): 73-83.
- [33] 刘晋霞, 马超, 曾庆良, 等. 镐型截齿截割煤岩过程的截割力研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1325-1330.
- LIU Jin-xia, MA Chao, ZENG Qing-liang, et al. Research on cutting force of conical pick in cutting coal process[J]. **Journal of China Coal Society**, 2017, 42(5): 1325-1330.
- [34] LI X F. A study on the influence of pick geometry on rock cutting based on full-scale cutting test and simulation[J]. **Advances in Mechanical Engineering**, 2020, 12(12): 1-13.
-
- 上接第 2992 页
- [21] SHEN Y J, WANG Y Z, YANG Y, et al. Influence of surface roughness and hydrophilicity on bonding strength of concrete-rock interface[J]. **Construction and Building Materials**, 2019, 213: 156-166.
- [22] ANDJELKOVIC V, PAVLOVIC N, LAZAREVIC Z, et al. Modelling of shear characteristics at the concrete-rock mass interface[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 76: 222-236.
- [23] MOUZANNAR H, BOST M, LEROUX M, et al. Experimental study of the shear strength of bonded concrete-rock interfaces: surface morphology and scale effect[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 50(10): 2601-2625.
- [24] CHEN D, YU X T, LIU R W, et al. Triaxial mechanical behavior of early age concrete: experimental and modelling research[J]. **Cement and Concrete Research**, 2019, 115: 433-444.
- [25] RESAT U, JOHN A H. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006[M]. [S. l.]: [s. n.], 2007.
- [26] 鲜学福, 谭学术. 层状岩体破坏机理[M]. 北京: 中国煤炭工业出版社, 1994.
- XIAN Xue-fu, TAN Xue-shu. Theory and application of compound rock mass mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994.
- [27] 彭俊, 荣冠, 蔡明, 等. 基于一种脆性指标确定岩石残余强度[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 403-408.
- PENG Jun, RONG Guan, CAI Ming, et al. Determination of residual strength of rocks by a brittle index[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 403-408.
- [28] TANG C A, LIU H, LEE P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part I: effect of heterogeneity[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(4): 555-569.