

镐型截齿不同截割速度对煤岩截割过程影响研究

刘晋霞^{1,2}, 咸方新², 张超²

(1. 山东科技大学 交通学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:采煤机工作过程中, 镐型截齿直接截割煤岩, 其截割速度影响其寿命, 同时也对采煤机工作效率具有重要影响。本研究在分析镐型截齿截割过程中截割速度变化的基础上, 利用颗粒流离散元软件(PFC)对不同截割速度对煤岩截割过程的影响开展研究。结果表明: 煤岩截割过程中, 镐型截齿截割速度总体呈非线性减小趋势, 且随牵引速度、滚筒角速度的增大分别呈现非线性减小趋势增强和明显增大的特点; 当滚筒角速度、牵引速度一定时, 截割过程中截割力均值、峰值、最大波动及产生的裂纹数量均随牵引速度、滚筒角速度的增大分别增大、减小; 牵引速度一定时, 提高滚筒角速度可改善截齿的受力情况; 滚筒角速度一定时, 提高牵引速度可在一定程度上降低截割比能耗。

关键词: 镐型截齿; 截割速度; 截割过程; 离散元; 颗粒流

中图分类号: TD42

文献标志码: A

Research on the influence of various cutting speeds of conical pick on coal cutting process

LIU Jinxia^{1,2}, XIAN Fangxin², ZHANG Chao²

(1. College of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

(2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Because the conical pick cuts coal directly in the working process of shearers, the cutting speed not only affects the life of conical pick but also has an important influence on the working efficiency of shearers. Based on the analysis of cutting speed changes in the cutting process, the influence of various cutting speeds of conical pick on the cutting process was studied by simulation in particle flow discrete element software (PFC). The results show that the cutting speeds of conical pick in the process of cutting coal presents a non-linear decrease trend, and that the non-linear decrease trend increases with the increase of traction speed while the cutting speed increases obviously with the increase of drum angular velocity. When the drum angular velocity and traction speed are constant, the mean, peak and maximum fluctuation of the cutting force as well as the number of generated cracks show the trend of increase with the increase of traction speed and the trend of decrease with the increase of drum angular velocity. When the traction speed is constant, the force of conical pick can be ameliorated by increasing the drum angular velocity. When the drum angular velocity is constant, the cutting specific energy consumption can be reduced by increasing the traction speed to a certain extent.

Key words: conical pick; cutting speed; cutting process; discrete element; particle flow

镐型截齿具有齿身线条流畅、耐磨损等优点, 被广泛应用于采煤机中。镐型截齿煤岩截割过程中, 其截割速度直接影响镐型截齿寿命、滚筒装煤效率以及采煤机工作效率等, 因此研究镐型截齿不同截割速度对煤岩截割过程的影响具有重要的实际意义。

收稿日期: 2021-03-02

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020ME085); 山东省矿山机械工程重点实验室开放基金项目(2019KLMM204)

作者简介: 刘晋霞(1976—), 女, 山西晋城人, 副教授, 博士, 主要从事机械系统动力学方面的研究工作。

E-mail: Xiar_liu@163.com

目前,由于受到实际工作条件的限制,关于镐型截齿截割速度对煤岩截割过程影响的研究,大多学者基于截割试验台试验及数值模拟的方法进行分析。Muro 等^[1]以及李国华等^[2]利用自制截割试验台模拟了镐型截齿不同等速截割煤岩的过程,分别得到不同截割速度对镐型截齿寿命、截割效率以及比能耗的影响规律。应用的数值模拟方法主要有有限元法与离散元法两种;姬国强等^[3]与杜鑫等^[4]基于有限元数值模拟法,在 ANSYS 中模拟镐型截齿不同等速截割煤岩时截齿的受力情况;贾嘉等^[5]与史小军^[6]基于离散元数值模拟法,用 PFC^{3D} 模拟镐型截齿不同等速截割煤岩过程,分别得到截割比能耗及截割阻力随截齿截割速度的变化规律。

以上镐型截齿截割速度对截割过程影响的研究,均基于等速截割状态进行。然而,在采煤机实际工作中,镐型截齿截割速度不仅随采煤机牵引速度、滚筒角速度变化^[7],且在截割过程中也一直处于变化的状态。由于离散元法在模拟煤岩破碎状态、裂纹的萌生、扩展等方面具有明显优势^[8],因此本研究基于离散元法,考虑采煤机牵引速度和滚筒角速度对截割速度的影响,建立不同截割速度的镐型截齿煤岩截割模型,分析不同截割速度下截齿截割力以及煤岩内部裂纹扩展的变化规律,从而得到截割速度对镐型截齿截割煤岩过程的影响。

1 镐型截齿截割煤岩过程的截割速度

1.1 截割速度计算

采煤机采煤时,镐型截齿截割煤岩的过程如图 1 所示。镐型截齿以 γ 角安装于滚筒上,形成的截割半径为 R 。当采煤机牵引速度为 v_q 、滚筒角速度为 ω 时,形成镐型截齿沿截割轨迹切线方向的截割速度 v_a ,可由式(1)计算得到^[9]。坐标系 xOy 固定于滚筒轴心, x 轴指向采煤机牵引运动方向; $O、O_1$ 点分别为镐型截齿开始截割煤岩的瞬间以及旋转截割一周后滚筒轴心的位置。1、2 为镐型截齿截割一周前、后的截割轨迹,由式(2)、式(3)计算^[10]。

$$v_a = \sqrt{v_q^2 + (R\omega)^2 + 2v_qR\omega \cos\omega t}; \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = v_q t + R \sin\omega t \\ y = R \cos\omega t \end{cases}, t \in (kT \sim kT + T/2), k = (0, 1, \dots); \quad (2)$$

$$\begin{cases} x'' = H/m + v_q t + R \sin\omega t \\ y'' = R \cos\omega t \end{cases}, t \in (kT \sim kT + T/2), k = (0, 1, \dots). \quad (3)$$

式中: t 为截割时间; T 为截割周期, $T = 2\pi/\omega$; H 为进给量, $H = 2\pi v_q/\omega$; m 为滚筒上同一截线的截齿数,本研究基于单齿截割过程进行,因此假设 $m = 1$ 。

1.2 截割过程中截割速度的变化

由式(3)可知,截割速度 v_a 不仅与采煤机牵引速度 v_q 与滚筒角速度 ω 、截割半径 R 有关,而且还随截割过程 t 变化。在实际工作过程中,为满足采煤效率以及装煤能力,采煤机牵引速度 v_q 及镐型截齿截割速度 v_a 一般分别控制在 $1 \sim 6$ m/min 和 $2 \sim 4$ m/s^[11-12]。设镐型截齿的安装角为 45° ,取截割半径 R 为 0.5 m,将牵引速度、滚筒角速度所表征的截割速度在以上范围内按等差方式取值,以得到不同截割参数下截割过程中其截割速度变化规律。按表 1 所示采煤机牵引速度 v_q 与滚筒角速度 ω 分别计算牵引速度与滚筒角速度对镐型截齿截割过程中截割速度的影响情况,如图 2 所示。下文所述速度序号均与表 1 对应。

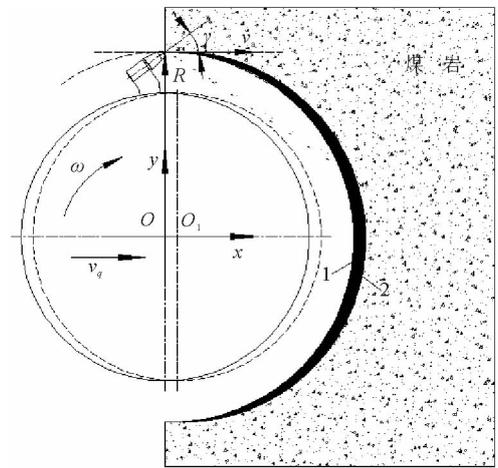


图 1 镐型截齿煤岩截割过程

Fig. 1 Cutting process of conical pick

表 1 镐型截齿截割速度选取

Tab. 1 Selection of cutting speed of conical pick

| 序号 | 牵引速度 v_q / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) | 滚筒角速度 ω / ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|----|--|--|
| 1 | 1.5 | 6 |
| 2 | 3.0 | 6 |
| 3 | 6.0 | 6 |
| 4 | 1.5 | 4 |
| 5 | 1.5 | 8 |

由图 2 可知,镐型截齿在截割过程中,截割速度总体呈非线性减小趋势,且在 $T/4$ 时刻减小速率最快;由表 1 中序号 1、2、3 不同参数下的变化曲线可知随牵引速度的增加,其非线性增强。当牵引速度为 6 m/min 时,截割速度在截割过程中的变化可达 0.2 m/s 以上;由表 1 中序号 4、1、5 的变化曲线可知随滚筒速度增加,截割速度明显增大。

2 镐型截齿煤岩截割模型

2.1 镐型截齿模型的选取及建立

选择 U94 型镐型截齿作为煤岩模型截割工具,其外形如图 3(a)所示,使用 CAD 软件画其外轮廓如图 3(b)所示。

2.2 煤岩样品的三轴压缩模拟试验

根据高为 100 mm、直径为 50 mm 的煤岩样品,在 10 和 20 MPa 围压下的三轴压缩试验应力-应变曲线^[13],利用 PFC 内嵌的 FISH 语言编写颗粒流程序模拟该压缩试验过程,设置煤岩颗粒力学性质参数见表 2^[14]。

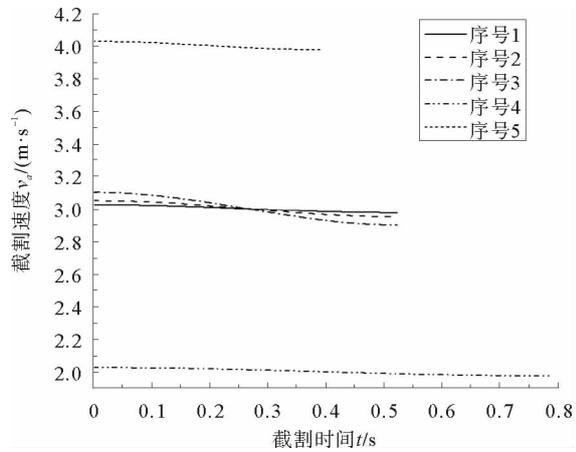
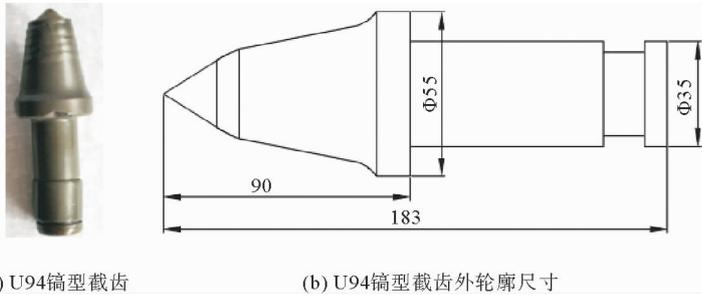


图 2 截割过程中截割速度随牵引速度、滚筒角速度的变化
Fig. 2 Changes of cutting speed with traction speed and drum angular velocity in the cutting process



(a) U94 镐型截齿 (b) U94 镐型截齿外轮廓尺寸

图 3 U94 镐型截齿及外轮廓尺寸

Fig. 3 Conical pick U94 and its external dimension

为更加接近煤岩的力学性质,选择平行黏结模型模拟煤岩模型中颗粒间的接触方式。在煤岩模型中,选取的颗粒半径越小,越能真实反映煤岩样品的宏观力学性质;但半径过小,会造成颗粒数量过多,影响仿真效率。根据模型最小几何尺寸方向的颗粒数不应小于 20 的要求^[15],颗粒半径范围确定为 1.6~2.6 mm。

对试验过程煤岩模型的各黏结参数进行反复调整,最终使模拟压缩试验与文献[13]试验的应力-应变曲线重合度达到 95% 以上。以围压为 10 MPa 为例的三轴压缩模拟试验,模型内部各阶段裂纹形成如图 4 所示。模拟试验应力-应变曲线与试验曲线对比如图 5 所示,此时煤岩模型的黏结参数见表 3。

表 2 煤岩颗粒力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of coal rock particles

| 微观力学参数 | 数值 |
|---|-------|
| 密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 1 800 |
| 杨氏模量 E / MPa | 3 |
| 接触法向与切向刚度比 k^* | 1.1 |
| 摩擦系数 μ | 0.6 |

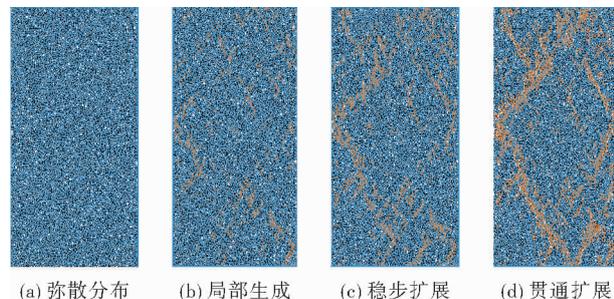


图 4 三轴压缩模拟试验过程各阶段裂纹形成

Fig. 4 The formation of cracks during the triaxial compression simulation test

(a) 弥散分布 (b) 局部生成 (c) 稳步扩展 (d) 贯通扩展

表3 煤岩颗粒微观黏结参数
Tab. 3 Micro bonding parameters of coal rock particles

| 微观黏结参数 | 数值 |
|--------------|-----|
| 平行黏结抗拉强度/MPa | 52 |
| 平行黏结内聚力/MPa | 28 |
| 平行黏结内摩擦角/(°) | 30 |
| 平行黏结刚度比 | 1.1 |

2.3 煤岩截割模型的建立

根据滚筒截割半径 R 确定煤岩的宏观尺寸,长、高分别为 800、1 300 mm,并由表 2~3 煤岩颗粒力学和黏结参数,建立煤岩宏观几何结构。根据式(2)及表 1 截割参数计算得到截齿截割表面。将镐型截齿外轮廓 CAD 图形导入 PFC 中,建立镐型截齿煤岩截割模型。为简化计算过程,模型建立过程中假设煤岩截割过程为单齿截割,且在截割过程中截齿无磨损;同时假设煤岩为均质煤岩,截割过程中煤岩受到镐型截齿截割作用发生脆性断裂,镐型截齿煤岩截割模型如图 6 所示,图中蓝色区域即为煤岩体。

3 镐型截齿煤岩截割过程仿真

表 1 中 5 种截割速度下,镐型截齿截割煤岩模拟过程大致相同。以表 1 序号 1 参数为例,其截割过程如图 7 所示。图 7(a)~7(i)分别表示镐型截齿在接触到煤岩的瞬间及截割至 7°、25°、50°、75°、90°、115°、140°、165°、180°时的煤岩破碎状态,绿色、红色分别为拉伸、剪切裂纹。由图 7 可知,在镐型截齿接触到煤岩瞬间,没有煤屑形成及脱落,而齿尖周围出现极少量拉伸、剪切裂纹;截割至 25°时,有少量煤屑及裂纹形成;截割至 50°~90°阶段时,大量的小块煤屑形成并崩落,出现大量拉伸、剪切裂纹;截割至 115°~180°阶段时,出现大量大块煤屑及拉伸、剪切裂纹。综上可知,镐型截齿截至 0°~90°阶段时,形成的煤屑以小块为主;当镐型截齿截过 90°后,形成的煤屑以大块为主。

由图 7 可知,在镐型截齿接触到煤岩瞬间,没有煤屑形成及脱落,而齿尖周围出现极少量拉伸、剪切裂纹;截割至 25°时,有少量煤屑及裂纹形成;截割至 50°~90°阶段时,大量的小块煤屑形成并崩落,出现大量拉伸、剪切裂纹;截割至 115°~180°阶段时,出现大量大块煤屑及拉伸、剪切裂纹。综上可知,镐型截齿截至 0°~90°阶段时,形成的煤屑以小块为主;当镐型截齿截过 90°后,形成的煤屑以大块为主。

4 不同截割速度的镐型截齿截割力

4.1 截割力在截割过程中的变化

表 1 中 5 种截割速度时镐型截齿截割力在截割过程中的变化如图 8 中黑色线所示。在接触煤岩瞬间产生一个超过 4 kN(图 8 中 4 kN 以上数据未显示)的大幅脉冲,在整个截割过程中呈无规则波动,与文献[16]单齿截割试验中截割力波动频率相似;对截割力曲线进行二阶拟合(红色曲线),拟合曲线在不同截割速度的变化趋势与文献[17]一致。进一步分析图 8 可发现,在截齿截割至约 90°之后,频繁出现局部截割力明显降低的特点,推测其原因可能是在 $T/4$ 时刻前后截割速度明显下降,造成煤屑在脱落前产生堆积,当大块煤屑脱落时,截割力出现明显的降低现象。

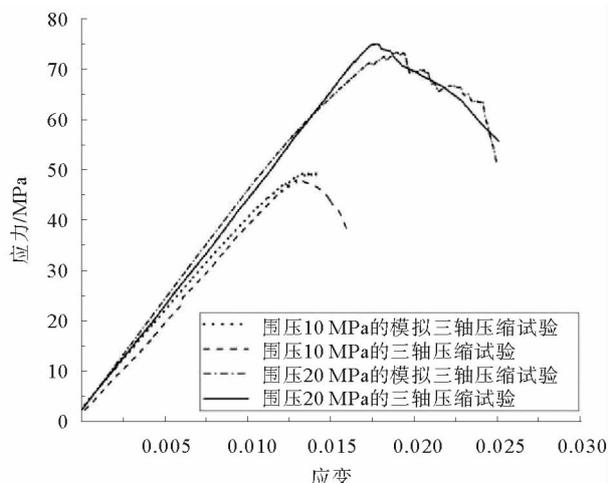


图5 三轴压缩及模拟试验应力-应变曲线对比

Fig. 5 Comparison of stress-strain curves between triaxial compression and simulation test

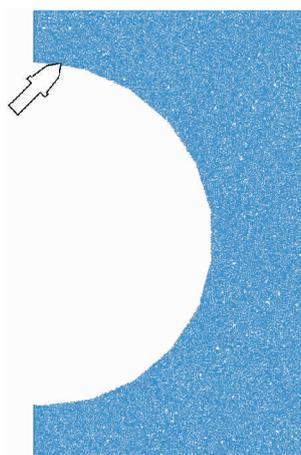


图6 镐型截齿煤岩截割模型

Fig. 6 Model of cutting coal rock of conical pick

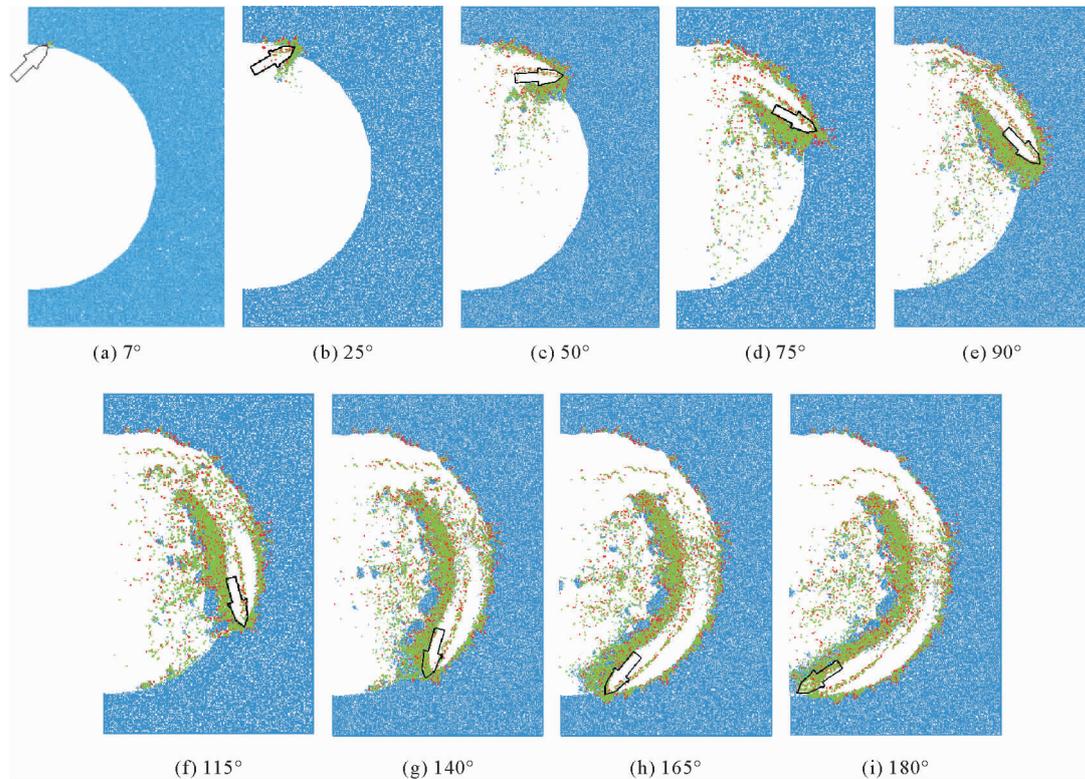


图 7 表 1 序号 1 参数下的镐型截齿煤岩截割过程

Fig. 7 Cutting coal rock process of conical pick of No. 1 in Tab. 1

4.2 不同截割速度时截齿截割力的统计

忽略镐型截齿接触煤岩瞬间产生的大幅脉冲,统计不同截割速度的截割力变化,见表 4。由表 4 可知,当牵引速度、滚筒角速度最大时,镐型截齿在截割过程中的截割力均值、峰值及波动分别最大、最小。

由表 4 中序号 1、2、3 截割力统计参数可知,滚筒角速度一定时,截割力均值、峰值及最大波动均随牵引速度的增加而增大。由表 4 中序号 4、1、5 截割力统计参数可知,牵引速度一定时,截割力均值及其最大波动均随滚筒角速度的增大而减小,其峰值呈无规律波动,但相差不大。由此可知在一定牵引速度下,提高滚筒角速度可改善截齿的受力情况。

表 4 不同截割速度截割过程中的截割力统计

Tab. 4 Statistics of cutting force with various cutting speeds in the cutting process

| 速度序号 | 截割力均值 | 截割力峰值 | 截割力最大波动 | N |
|------|-------|-------|---------|---|
| 1 | 503.7 | 2 195 | 262.2 | |
| 2 | 587.2 | 2 369 | 270.6 | |
| 3 | 616.6 | 2 536 | 272.2 | |
| 4 | 504.6 | 2 133 | 264.7 | |
| 5 | 496.9 | 2 089 | 239.5 | |

5 不同截割速度的裂纹数量生成

5.1 裂纹数量在截割过程中的变化

表 1 所示 5 种截割速度时生成的裂纹数量在截割过程中的变化如图 9 所示。由图 9 可知,拉伸、剪切裂纹在不同截割速度的截割过程中均近似线性增加,且拉伸裂纹数量波动更为明显。进一步分析图 9 可知,当牵引速度、滚筒角速度分别增大时,镐型截齿煤岩截割过程中的拉伸、剪切裂纹数量的波动分别增多、减少。

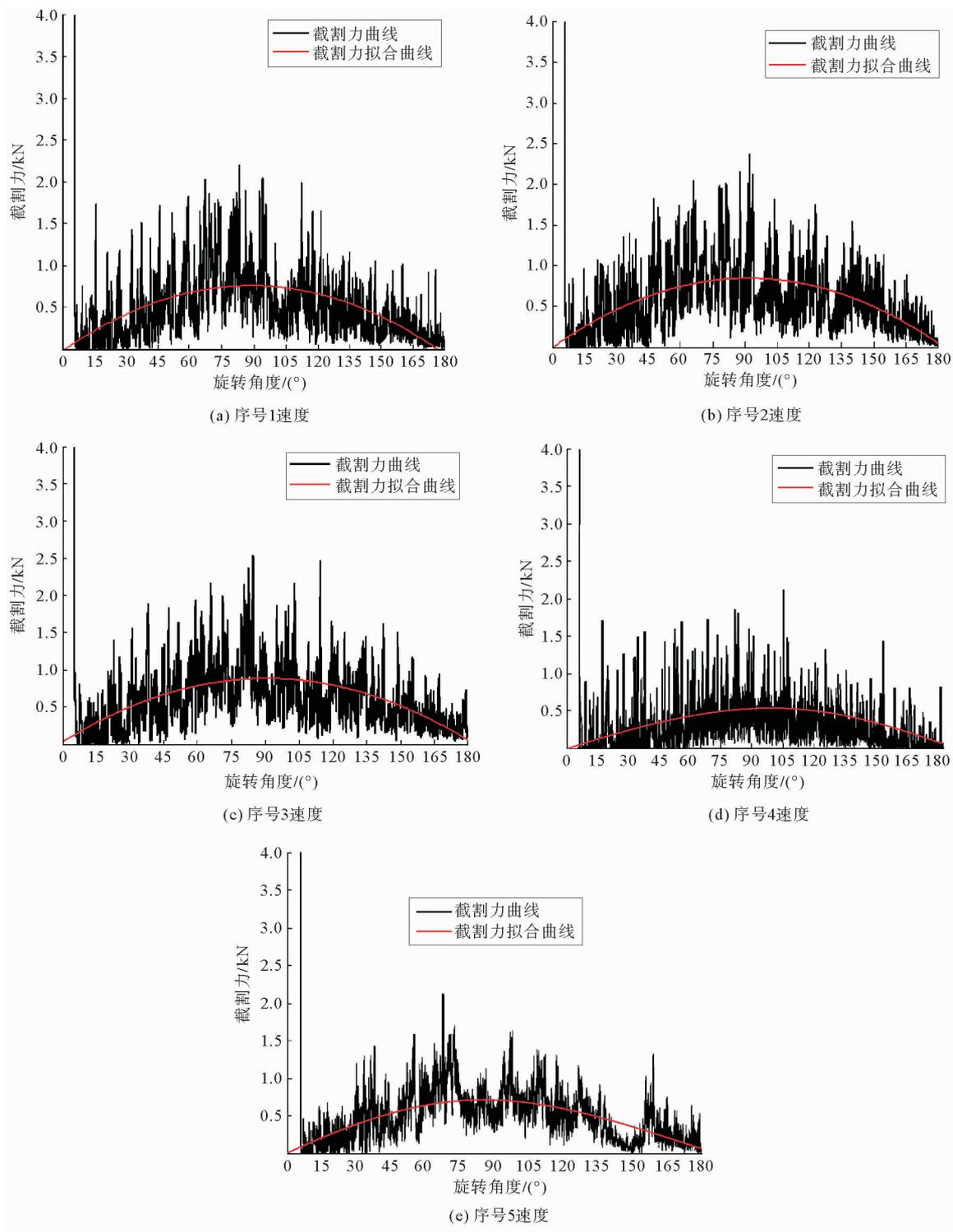


图 8 截割力在不同截割速度截割过程中的变化

Fig. 8 Changes of cutting force with various cutting speeds in the cutting process

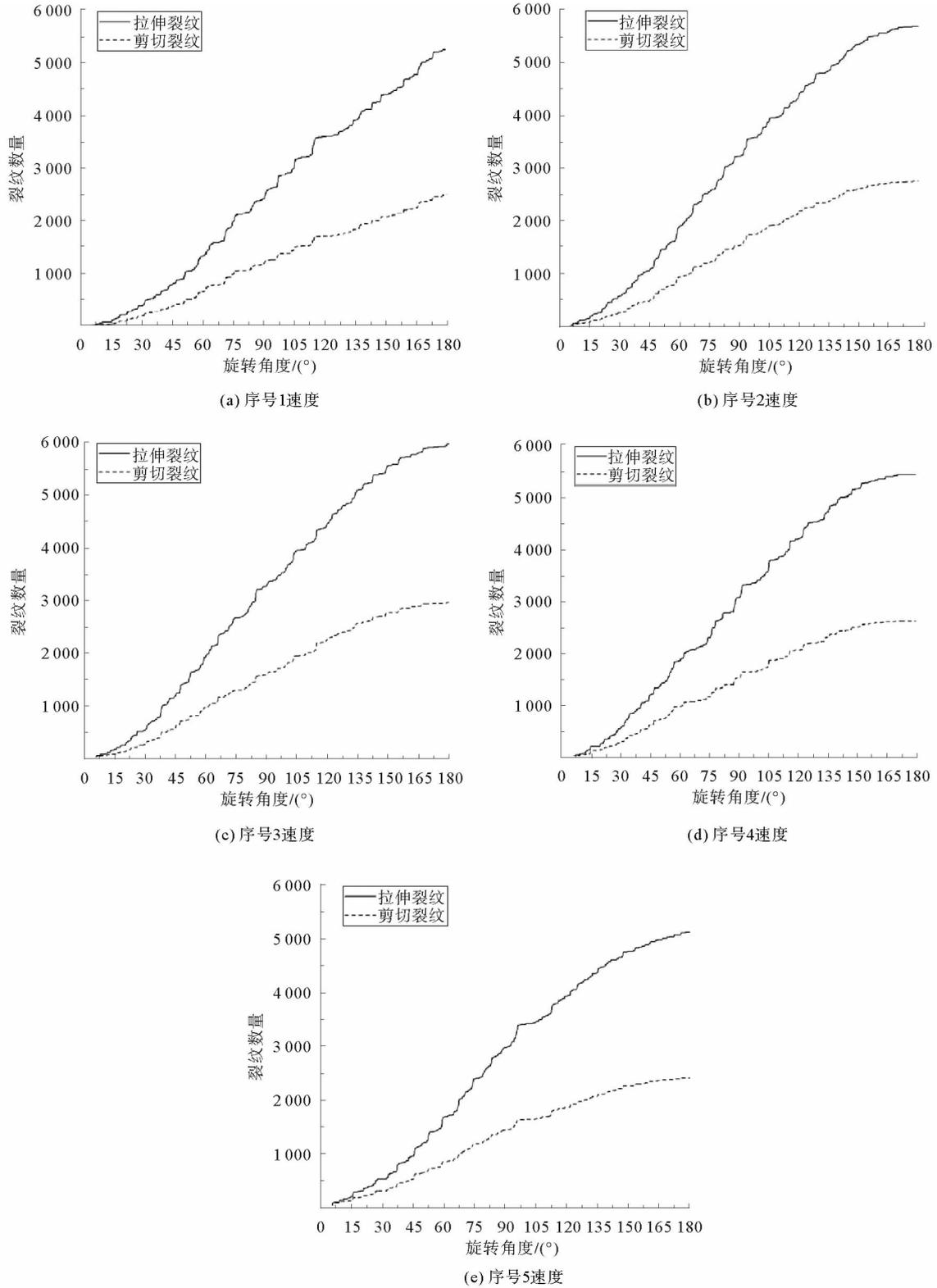


图9 裂纹数量在不同截割速度截割过程中的变化

Fig. 9 Changes of crack number with various cutting speeds in the cutting process

5.2 不同截割速度时生成裂纹数量统计

统计不同截割速度截割过程中的裂纹数量变化,见表5。由表5可知,当牵引速度、滚筒角速度最大时,在镐型截齿截割过程中生成的裂纹数量分别最大、最小。

由表5中序号1、2、3裂纹数量统计可知,滚筒角速度一定时,拉伸、剪切裂纹数量均随牵引速度的增大而增加。由表5中序号4、1、5裂纹数量统计可知,牵引速度一定时,拉伸、剪切裂纹数量均随滚筒角速度的增大而减小。

结合表4中序号1、2、3及表5中序号1、2、3推断,随牵引速度的线性增加,截割力均值及产生的裂纹数量均非线性增加,截割比能耗也随之呈非线性减小趋势。

6 结论

主要研究了镐型截齿截割速度对煤岩截割过程的影响,主要考虑牵引速度、滚筒角速度对截割速度的影响,利用PFC建立不同截割速度的煤岩截割模型,模拟镐型截齿煤岩截割过程。得出如下结论:

1) 镐型截齿在截割过程中,其截割速度总体呈非线性减小趋势。滚筒角速度一定时,随牵引速度的增大,截割速度的非线性减小趋势增强;牵引速度一定时,截割速度随滚筒角速度的增大而明显增大。

2) 镐型截齿截割过程中截割力均值、峰值及最大波动均随牵引速度、滚筒角速度的增加分别增大、减小。在一定牵引速度下,提高滚筒角速度可改善截齿的受力情况。

3) 截割过程中产生的拉伸、剪切裂纹均随牵引速度、滚筒角速度的增加分别增大、减小,且截割力均值及产生的裂纹均随牵引速度的线性增加而呈非线性增加。滚筒角速度一定时,增大牵引速度可降低截割比能耗。

参考文献:

- [1] MURO T, TRAN D T. Regression analysis of the characteristics of vibro-cutting blade for tuffaceous rock[J]. Journal of Terramechanics, 2003, 40(3): 191-219.
- [2] 李国华, 石喜富, 祁成柱, 等. 用真实煤样进行煤炭截割的试验研究[J]. 煤矿机械, 2001(11): 20-22.
LI Guohua, SHI Xifu, QI Chengzhu, et al. Experimental of coal cutting with genuine samples[J]. Coal Mine Machinery, 2001(11): 20-22.
- [3] 姬国强, 廉自生, 卢焯. 基于LS-DYNA的镐型截齿截割力模拟[J]. 科学之友(B版), 2008(4): 131-132.
JI Guoqiang, LIAN Zisheng, LU Chuo. Simulation of pick-type pick cutting force based on LS-DYNA[J]. Friend of Science Amateurs, 2008(4): 131-132.
- [4] 杜鑫, 应明, 韩冰. 不同截割线速度截齿受力的分析[J]. 煤矿机械, 2013, 34(11): 91-92.
DU Xin, YING Ming, HAN Bing. Analysis of cutting pick stress with different cutting linear velocity[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(11): 91-92.
- [5] 贾嘉, 王义亮, 杨兆建, 等. 截割角和截割线速度对镐型截齿截割性能的影响[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 174-179.
JIA Jia, WANG Yiliang, YANG Zhaojian, et al. Cutting angler and cutting linear velocity affected to cutting performances of pick-shaped cutter[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 174-179.
- [6] 史小军. 采煤机滚筒截割动力学研究[J]. 机械管理开发, 2020, 35(8): 30-32.
SHI Xiaojun. Study on cutting dynamics of shearer roller[J]. Mechanical Management and Development, 2020, 35(8): 30-32.
- [7] 李晋瑜. 采煤机截割载荷谱研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 37.
LI Jinyu. Study on cutting load spectrum of shearer[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 37.
- [8] 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 Jiling, WANG Yiliang, et al. Study on influence of installation angle of shearer to force[J]. Coal Technology, 2017, 36(4): 277-279.

表5 裂纹数量在不同截割速度截割过程中的统计

Tab. 5 Statistics of crack number with various cutting speeds in the cutting process

| 速度序号 | 剪切裂纹 | 拉伸裂纹 |
|------|-------|-------|
| 1 | 2 482 | 5 255 |
| 2 | 2 738 | 5 664 |
| 3 | 2 962 | 5 951 |
| 4 | 2 610 | 5 405 |
| 5 | 2 408 | 5 118 |

- [9]刘春生,白云锋,张艳军.截齿切削厚度与截割比能耗的算法及误差分析[J].黑龙江科技大学学报,2019,29(5):575-579.
LIU Chunsheng,BAI Yunfeng,ZHANG Yanjun.Algorithm behind cutting thickness and specific energy of conical picks and its error analysis[J].Journal of Heilongjiang University of Science & Technology,2019,29(5):575-579.
- [10]刘晋霞,马超,焦志愿,等.镐型截齿对含不同分布夹矸层煤岩的截割过程研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(5):97-103.
LIU Jinxia,MA Chao,JIAO Zhiyuan,et al.The process of conical pick cutting coal with rock parting based on LS-DYNA [J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2018,37(5):97-103.
- [11]陈二伟.基于 MATLAB 的采煤机截割参数优化设计[J].机械管理开发,2019,34(7):30-33.
CHEN Erwei.Optimal design of shearer cutting parameters based on MATLAB[J].Mechanical Management and Development,2019,34(7):30-33.
- [12]秦大同,王镇,胡明辉,等.基于多目标优化的采煤机滚筒最优运动参数的动态匹配[J].煤炭学报,2015,40(增2):532-539.
QIN Datong,WANG Zhen,HU Minghui,et al.Dynamic matching of optimal drum movement parameters of shearer based on multi-objective optimization[J].Journal of China Coal Society,2015,40(S2):532-539.
- [13]NING J G,WANG J,JIANG J Q,et al.Estimation of crack initiation and propagation thresholds of confined brittle coal specimens based on energy dissipation theory[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2017,51:119-134.
- [14]GOSPODARCZYK P.Modeling and simulation of coal loading by cutting drum in flat seams[J].Archives of Mining Sciences,2016,61(2):365-379.
- [15]KOYAMA T,JING L.Effects of model scale and particle size on micro-mechanical properties and failure processes of rocks-A particle mechanics approach[J].Engineering Analysis with Boundary Elements,2007,31(5):458-472.
- [16]王立平.采掘机械镐型截齿截割破岩机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2017:83-84.
WANG Liping.Study on failure mechanism of rock cutting by conical picks of mining machinery[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2017:83-84.
- [17]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 Jinxia,MA Chao,ZENG Qingliang,et al.Research on cutting force of conical pick in cutting coal process[J].Journal of China Coal Society,2017,42(5):1325-1330.

(责任编辑:吕海亮)