

引用格式: 刘晋霞, 马超, 焦志愿, 等. 镶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.

# 镶型截齿对含不同分布夹矸层煤岩的截割过程研究

刘晋霞<sup>1,2</sup>, 马 超<sup>2</sup>, 焦志愿<sup>2</sup>, 于鲁达<sup>2</sup>

(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:** 在采用综合机械化采煤设备进行煤炭开采时, 由于煤岩中常随机分布有厚度较小、硬度较高的夹矸层, 而导致采煤机镶型截齿使用寿命大大缩短。为揭示夹矸层对镶型截齿截割煤岩过程的影响, 在分析镶型截齿截割煤岩过程、假设夹矸层在煤岩中的分布情况的基础上, 将 Pro/E 建立镶型截齿及煤岩模型导入 LS-DYNA 完善后, 设定材料属性及边界条件, 修改 K 文件后, 分别模拟镶型截齿截割不同分布夹矸层的煤岩。模拟结果与理论计算结果共同表明夹矸层厚度、位置、层数对镶型截齿截割煤岩过程中截割力的影响规律。研究结论为采煤机采煤工艺的确定、镶型截齿的选用与设计及采煤机其他部件性能参数的设计提供理论依据。

**关键词:** 镶型截齿; 煤岩; 夹矸层; LS-DYNA; 截割力

中图分类号: TD42 文献标志码: A 文章编号: 1672-3767(2018)05-0097-07

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.05.013

## The Process of Conical Pick Cutting Coal with Rock Parting Based on LS-DYNA

LIU Jinxia, MA Chao, JIAO Zhiyuan, YU Luda

(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:** The service life of conical picks of shearers is greatly shortened in mining thin coal seam containing hard rock parting with fully mechanized mining equipment. To reveal how the rock parting affect the coal cutting process of conical picks, a model of conical pick and coal seam was first established by Pro/E based on the analysis of the coal cutting process and the hypothesis of the rock parting distribution in coal seam. Then the model was perfected by LS-DYNA and simulated the cutting processes of coal with different distributions of parting after the material properties and boundary conditions were set, and the K file was modified. The simulation results and theoretical calculation results reveal the influences of parting's thickness, location and number of layer on the cutting force of conical pick, which provide theoretical foundations for the determination of coal mining technology, selection and design of picks, and design of performance parameters of shearers.

**Key words:** conical pick; coal; rock parting; LS-DYNA; cutting force

综合机械化采煤设备已普遍应用于不同厚度煤层的开采, 而煤层中的夹矸层对于综采设备, 尤其是采煤机滚筒上的截割刀具具有较大威胁, 夹矸层内的炭质砂岩以及硫化铁结核, 会导致镶型截齿快速磨损, 大幅增加

收稿日期: 2017-09-07

基金项目: 中国煤炭工业协会项目(MTKJ2016-292); 山东省高等学校科技计划项目(YB06)

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

E-mail: xiari\_liu@163.com

其更换率<sup>[1-2]</sup>,进而影响采煤的效率与成本。据多年的研究和实际开采经验,当夹矸层厚度不大,且不稳定时,一般采用直接机制的开采方式提高开采效率<sup>[3]</sup>。因此,采煤机镐型截齿对含不同分布夹矸层煤岩的截割过程研究,对提高镐型截齿的使用寿命、降低镐型截齿损耗以及镐型截齿的选型设计均具有重要意义。

关于镐型截齿截割性能的研究,目前诸多学者已采用理论分析、试验及模拟仿真的方法做了大量研究。Evans<sup>[4]</sup>基于拉碎理论,认为煤岩破碎是由镐型截齿楔入煤岩时的拉应力超过煤的抗拉强度所造成,建立了镐型截齿截割力模型。Göktan 等<sup>[5-6]</sup>对 Evans 截割力公式中,当镐型截齿半锥角为 0°时的截割力进行了修正。刘晋霞等<sup>[7]</sup>基于 Evans 理论及采煤机截割工况,提出一种镐型截齿旋转截割力模型,并计算了镐型截齿几何参数、安装角以及截割参数对煤岩截割过程的影响情况。KANG 等<sup>[8]</sup>研制了镐型截齿直线截割模拟实验台,进行截割煤岩实验,并在 ANSYS 中模拟实验台工作情况,模拟的镐型截齿受力精确度达 96.74%。MEZYK 等<sup>[9]</sup>与 ROJEK 等<sup>[10]</sup>分别使用有限元法与离散元法研究镐型截齿等厚度、旋转截割煤岩条件下的截割力变化情况。张鑫等<sup>[11]</sup>分析单个截齿的受力模型,对镐型截齿钻进工况的载荷规律进行了模拟研究。LIU 等<sup>[12]</sup>、ZHANG 等<sup>[13]</sup>以及张艳林等<sup>[14]</sup>利用 LS-DYNA 分别针对镐型截齿不同截割角和安装角、不同煤岩硬度以及不同截割速度下的截割煤岩过程进行模拟研究。关于含夹矸层煤岩对镐型截齿截割性能的影响研究并不多见,从有限的文献来看<sup>[15-16]</sup>,该方面研究以试验方法对镐型截齿磨损失效及合金头崩落情况为主,而关于镐型截齿对含夹矸层煤岩截割过程的研究则未有报道。

本研究在分析采煤机镐型截齿截割煤岩过程及旋转截割力模型的基础上,考虑夹矸层的分布特征,以含夹矸的薄煤层为例,假设夹矸层的厚度、层数、在煤岩中的位置等特征参数,建立含不同分布夹矸层的煤岩模型,并采用 LS-DYNA 软件动态模拟镐型截齿截割煤岩过程,对镐型截齿截割含夹矸层煤岩过程中截割载荷的变化规律展开研究。

## 1 镐型截齿截割煤岩的过程

### 1.1 镐型截齿截割煤岩过程分析及截割参数

采煤机截割煤岩过程中,镐型截齿以安装角  $\gamma$  安装于滚筒上截割煤岩,如图 1 所示,其中,  $R$  为截割半径,镐型截齿在采煤机牵引速度  $v$  以及滚筒旋转角速度  $\omega$  带动下截割煤岩,  $O$  和  $O_1$  点分别为镐型截齿开始截入煤岩和截割煤岩结束时的滚筒轴心位置,1、2 分别为截齿截割前后形成的截割长幅摆线式截割轨迹,两轨迹所围区域即为截割过程的截割厚度变化,  $h_{\max}$  为截割过程中最大截割厚度。式(1)为镐型截齿截割轨迹公式,其中,  $t \in (kT \sim kT + T/2)$ ,  $T = 2\pi/\omega$ ,  $k = 0, 1, \dots$ 。采用的相关截割参数见表 1<sup>[17]</sup>。

$$\begin{cases} x = vt + R \sin \omega t \\ y = R \cos \omega t \end{cases} \quad (1)$$

### 1.2 镐型截齿旋转截割煤岩的力学模型

采煤机镐型截齿在截割煤岩时,形成旋转截割工况,其截割力  $Z$  的形成与镐型截齿的半锥角  $\alpha$ 、安装角度  $\gamma$ 、采煤机牵引速度  $v$ 、滚筒转速  $\omega$  以及煤岩的抗拉强度  $\sigma_t$ 、抗压强度  $\sigma_y$  有关,其力学模型为<sup>[7]</sup>:

$$Z = \frac{4\pi\sigma_t^2 h^2 [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)]^2}{\sigma_y \cos^4 \alpha \cos^2 \gamma} \quad (2)$$

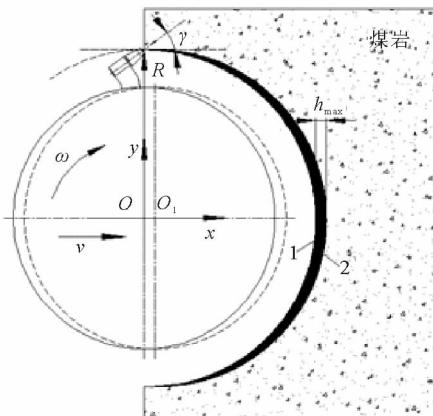


图 1 采煤机镐型截齿截割煤岩示意图

Fig. 1 Cutting coal diagram of conical pick

表 1 镐型截齿截割参数

Tab. 1 Cutting parameters of conical pick

参数	截割半径 $R/m$	滚筒转速 $\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	牵引速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	安装角 $\gamma / (^{\circ})$
取值	0.75	7.55	0.13	45

采煤机镐型截齿在截割煤岩时,形成旋转截割工况,其截割力  $Z$  的形成与镐型截齿的半锥角  $\alpha$ 、安装角度  $\gamma$ 、采煤机牵引速度  $v$ 、滚筒转速  $\omega$  以及煤岩的抗拉强度  $\sigma_t$ 、抗压强度  $\sigma_y$  有关,其力学模型为<sup>[7]</sup>:

其中  $h$  为截割厚度。由式(2)可知在半锥角  $\alpha$ 、安装角度  $\gamma$  一定的情况下, 镶型截齿截割力  $Z$  与截割煤岩的抗拉强度  $\sigma_t$ 、截割厚度  $h$  呈二次函数关系, 而与抗压强度  $\sigma_y$  成反比关系。

在实际截割过程中, 截割厚度  $h$  呈先增大后减小的变化趋势, 且在达到最大截割厚度  $h_{\max}$  前后, 截割厚度变化速度不一致。截割厚度  $h$  随采煤机牵引速度  $v$ 、滚筒旋转角速度  $\omega$ 、截割半径  $R$  以及截割时间  $t$  变化关系如式(3)所示。

$$h = \frac{1}{m\omega} \sqrt{\omega^2 m^2 (v^2 t^2 + R^2 + 2vtR \sin \omega t) + 4\pi m \omega (v^2 t + R v \sin \omega t) + 4\pi^2 v^2} - \sqrt{v^2 t^2 + 2vtR \sin \omega t + R^2} \quad (3)$$

其中,  $m$  为滚筒上同一截线的截齿数, 此处研究单齿截割的情况,  $m=1$ 。

## 2 镶型截齿-含夹矸煤岩模型的建立

### 2.1 夹矸层在煤岩中的分布假设

较薄夹矸层在煤层中呈层状不均匀的分布规律, 层数不等, 其夹层厚度在  $0\sim0.4$  m 之间。为分析不同分布、厚度的夹矸层对镶型截齿破煤过程的影响, 此处假设煤层厚度为 1.5 m, 且含有不同厚度、不同位置、不同层数的共 7 种夹矸层分布形式, 如图 2 所示。

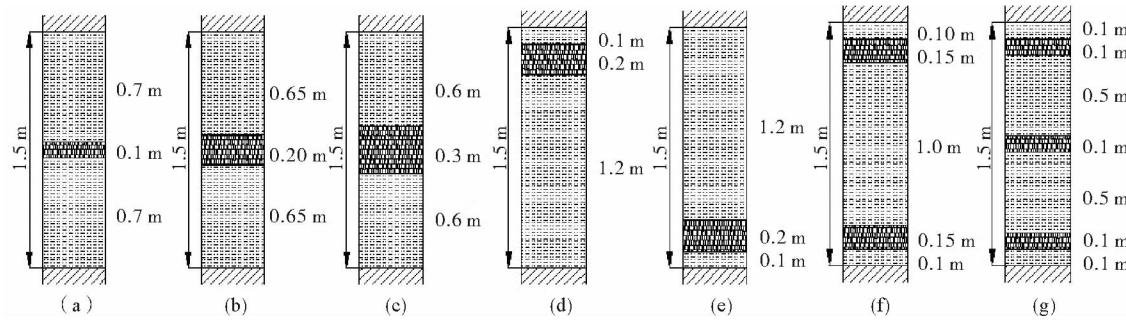


图 2 煤岩夹矸层分布形式

Fig. 2 The distribution of coal seam with parting

### 2.2 镶型截齿-煤岩模型的建立

#### 2.2.1 镶型截齿的几何结构及参数

镶型截齿主要由合金头、齿身、齿柄三部分组成, 其主要几何参数有镶型截齿长度  $L$ 、齿尖夹角  $\alpha_{jj}$  ( $\alpha_{jj}=2\alpha$ ) 等, 如图 3 所示, 镶型截齿模型的建立选用型号为 JZA89/43-U170-H 的镶型截齿, 其几何参数见表 2。

#### 2.2.2 煤岩模型的几何参数

为较真实地反映镶型截齿与煤岩间的作用力, 防止镶型截齿与煤岩边界在截割过程中受到过分挤压, 原则上煤岩应为无限大或镶型截齿截割煤岩位置尽可能远离边界约束位置, 此处建立煤岩模型时, 将其厚度适当放大, 取煤岩模型的长度  $a$ 、厚度  $b$  与高度  $c$  分别为 1.5、0.2 与 1.84 m, 且截割表面由表 1 中的截割参数代入式(1)后, 所得镶型截齿截割轨迹来确定, 进而创建此参数时的煤岩模型。

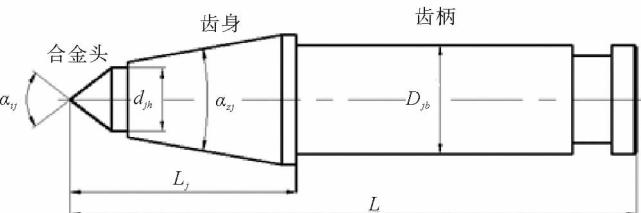


图 3 镶型截齿几何结构

Fig. 3 The geometry structure of conical pick

表 2 镶型截齿尺寸参数

Tab. 2 The size parameter of conical pick

镶齿长度 $L/\text{mm}$	齿身长度 $L_j/\text{mm}$	齿柄直径 $D_{jb}/\text{mm}$	齿尖夹角 $\alpha_{jj}/(^{\circ})$	齿尖合金头 直径 $d_{jh}/\text{mm}$	齿身锥角 $\alpha_{sj}/(^{\circ})$
223	89	43	75	25	20

### 2.2.3 镶型截齿-煤岩模型的构建

在 Pro/E 中分别建立镶型截齿及煤岩的三维几何模型, 导入 ANSYS 后, 对煤岩模型进行平面切割, 分别获得图 2 中各夹矸层的煤岩中分布情况。分别采用自由网格划分与映射网格划分方法将镶型截齿与煤岩、夹矸层划分为四面体和六面体网格。为提高计算速度, 应限制截割模型的总网格数量, 将煤岩和夹矸层网格粗大化, 但为避免模拟过程中出现刺穿现象, 此处设置煤岩和夹矸层网格小于镶型截齿网格, 分别形成类似图 4 所示的镶型截齿-含夹矸煤岩模型。

### 2.3 材料模型及相关参数设定

镶型截齿的材料设置为 MAT-RIGID, 材料的密度为  $7.8 \text{ g/cm}^3$ , 弹性模量为  $2.70 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 泊松比为 0.3。由于夹矸与煤岩具有非均质特性, 难以准确描述, 选用适合于大应力、变形的 MAT-JOHNSON-HOLMQOIST-CONCRETE 模型模拟夹矸和煤岩, 不同地区的夹矸与煤岩材料属性大不相同, 选用夹矸与煤岩材料属性见表 3<sup>[18-19]</sup>。

### 2.4 接触模型及边界的设定

镶型截齿在截割含夹矸煤岩过程中, 要截入煤岩和夹矸层表面, 因此定义镶型截齿和煤岩、夹矸层的接触类型为面面接触, 定义镶型截齿表面为 Contact, 煤岩和夹矸层表面定义为 Target 表面。

在煤岩的有限域表面施加无反射边界条件来模拟煤岩的无限大空间, 并分别对煤岩的底部、背面及顶部施加全约束, 镶型截齿保留绕滚筒轴心旋转的自由度。

## 3 仿真求解与结果分析

### 3.1 仿真求解

根据煤岩与夹矸材料模型与参数, 对 LS-DYNA 生成的 K 文件进行修改, 再导入 LS-DYNA 软件中, 对镶型截齿截割过程进行仿真求解。

在后处理器模块 LS-PREPOST 中, 整理镶型截齿截割含各种夹矸层分布的煤岩, 进行模拟仿真试验, 其截割力变化如图 5 所示。图 5 中各分图分别与图 2 中各分图夹矸层分布形式相对应, 其中实线与虚线分别表示截齿截割到煤岩与夹矸层时的截割力曲线变化情况。

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 含夹矸层煤岩截割过程的总体分析

在图 5 中, 由于镶型截齿在截割到煤岩和夹矸层的结合处时, 齿尖开始截割夹矸层(或煤岩), 而齿体仍处于煤岩(或夹矸层)中, 截割力曲线发生重合, 实际的截割力应为两部分叠加而成; 又由于夹矸层的力学性质大于煤岩的力学性质, 镶型截齿截割夹矸层的截割力有大幅度增加; 煤岩及夹矸均为各向异性, 截割力在截割过程中表现出随机性的不规则波动, 总体趋势随截割厚度增加而增加。

将表 1~3 中相关参数代入式(2)与式(3)中, 计算镶型截齿截割图 2 中不同夹矸层分布煤岩的截割力, 平均值分别约为 10 700、15 400、19 400、11 200、13 100、12 800 和 12 200 N, 且截割煤岩部分截割力的数值范围与文献[7]的理论计算近似吻合, 说明本研究所建立的镶型截齿-煤岩模型可较为真实地反映煤岩的截割过程。

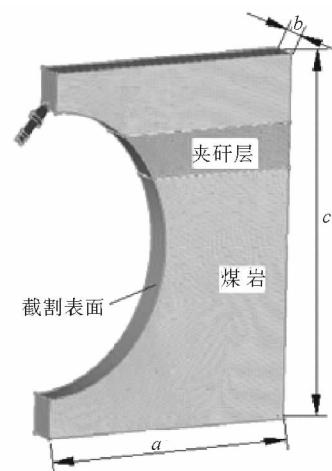


图 4 镶型截齿-含夹矸煤岩模型

Fig. 4 The model of conical pick and coal seam with parting

表 3 夹矸层及煤岩的材料属性参数

Tab. 3 The material property parameters of parting and coal

参数	夹矸	煤岩
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.18	1.4
体积模量/MPa	3 560	690
剪切模量/MPa	3 250	650
粘聚力/MPa	5.8	3.07
内摩擦角/(°)	45.5	34.3
抗拉强度/MPa	0.6	0.27
抗压强度/MPa	4.3	2.73

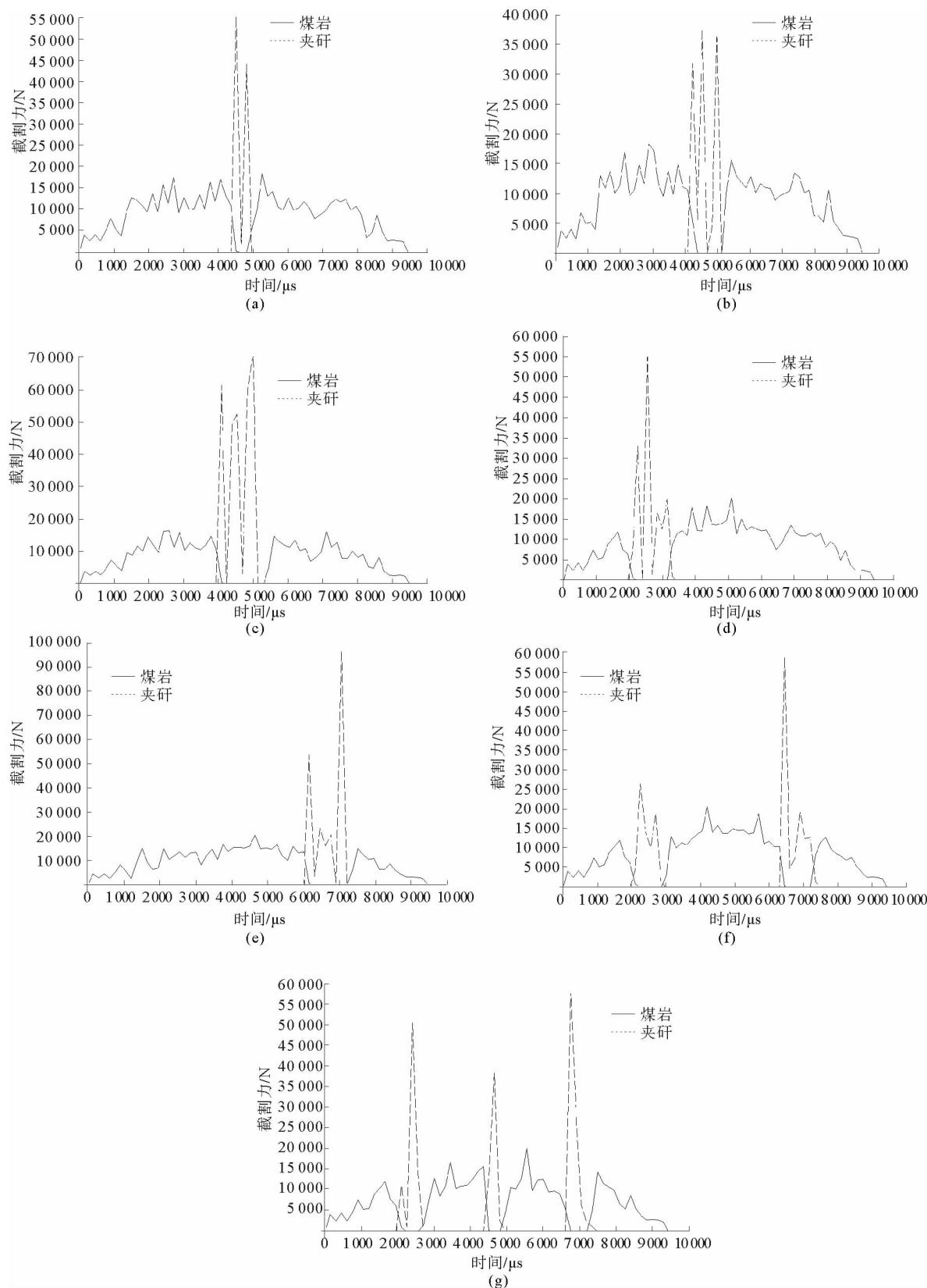


图 5 镶型截齿截割含不同分布夹矸层煤岩的截割力曲线

Fig. 5 The force of picks during cutting different distribution of coal seam with parting

### 3.2.2 不同厚度夹矸层对镐型截齿截割力的影响

图5(a)~(c)分别为镐型截齿截割煤岩中部位置处含有不同厚度夹矸层的截割力情况。由图可知,截割力在截割夹矸层时均出现较大的随机性波动,其波动幅值并不随夹矸层厚度变化而明显增大或减小。通过数值统计,整个截割过程中,图5(a)~(c)的截割力平均值分别约为13 000、14 500、18 000 N与理论计算值10 700、15 400、19 400 N之间存在一定误差但趋势相同。由此可知,镐型截齿平均截割力随截割夹矸层的厚度增加而呈非线性增加。

### 3.2.3 不同位置夹矸层对镐型截齿截割力的影响

图5(b)、(d)、(e)为镐型截齿截割煤岩不同位置处含有相同厚度夹矸层的截割力情况。同样截齿截割力在截割夹矸层时出现较大随机性波动,且其波动幅值不随夹矸层位置的不同有明显增大或减小。然而,夹矸层处于较高或较低位置时,其波动幅值局部会出现相对小的波动。统计图5(b)、(d)、(e)整个截割过程截割力的平均值分别为12 500、14 500、13 500 N,理论计算截割力平均值分别为11 200、15 400、13 100 N,由此可知截割夹矸层的位置越靠近中部和底部,截割力越大,这是由于在截割过程中截割厚度 $h$ 在靠近中部将达到最大值,而靠近底部相对较大而造成。

### 3.2.4 不同层数夹矸层对镐型截齿截割力的影响

图5(c)、(f)、(g)为镐型截齿截割煤岩含总厚度一定,层数和所处位置不同的夹矸层的截割力情况,可以看出截齿截割力的变化与夹矸层厚度及所处位置均有较大关系。经统计,整个截割过程中截割力的平均值分别约为18 000、14 000、13 000 N,理论计算截割力平均值分别约为19 400、12 800、12 200 N,可知当夹矸层总厚度相同,层数越多、越分散时,镐型截齿所受到的截割力越小。

## 4 结论

通过对采煤机镐型截齿截割煤岩过程及旋转截割力学模型分析的基础上,假设含夹矸层煤岩分布情况,建立了能够较为真实的反映镐型截齿截割过程的镐型截齿-含夹矸煤岩模型,并对夹矸层、煤岩、镐型截齿材料以及基础模型、边界条件进行合理设定,利用LS-DYNA软件对镐型截齿截割含夹矸层煤岩进行模拟计算,统计模拟截割力结果与理论计算相比较。得出以下主要结论:

1) 对于含夹矸层煤岩,其夹矸层厚度、位置、层数对镐型截齿截割力均有较大影响,并在整个截割过程呈现出一定规律:夹矸层厚度越大,截齿截割力越大;夹矸层总厚度一定的情况下,分布越分散,截齿截割力越小;夹矸层分布位置越靠近截割煤岩中部与底部,截齿截割力越大,且这些规律均为非线性变化。

2) 镐型截齿截割力在截割夹矸层时将出现更大的随机性波动,其波动幅值并不随夹矸层厚度、位置与层数变化而明显增大或减小;然而,夹矸层处于较高或较低位置时,其波动幅值局部会出现相对小的波动。

## 参考文献:

- [1]蒋金泉,代进,李洪,等.复杂结构薄煤层工作面煤壁破坏规律及应用[J].煤炭学报,2013,38(11):1912-1916.  
JIANG Jinquan, DAI Jin, LI Hong, et al. Failure law and application of complex structure thin coal seam mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(11): 1912-1916.
- [2]潘泱波,刘泽功.深孔预裂爆破弱化煤层夹矸技术的应用[J].中国安全生产科学技术,2013,9(9):107-110.  
PAN Yangbo, LIU Zegong. Application of deep hole pre-split blasting technology in weakening of dirt band[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(9): 107-110.
- [3]孙登林,王维维.综采工作面坚硬不均匀夹矸处理[J].黑龙江科技学院学报,2008,18(2):84-86.  
SUN Denglin, WANG Weiwei. Processing of hard and thick tonstein in fully-mechanized workface[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2008, 18(2): 84-86.
- [4]EVANS I. A theory of the cutting force for point-attack picks[J]. International Journal of Mining Engineering, 1984, 2(1): 63-71.
- [5]GOKTAN R M. A suggested improvement on Evans' cutting theory for conical bits[C]//Proceedings of the Fourth International Symposium on Mine Mechanization and Automation, 1997(1):57-61.
- [6]GOKTAN R M, GUNES N. Semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks[J]. Journal of the

- South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105(4): 257-263.
- [7] 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.
- [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(7): 129-136.
- [9] MEZYK A, KLEIN W, FICE M, et al. Mechatronic model of continuous miner cutting drum driveline[J]. Mechatronics, 2016, 37: 12-20.
- [10] 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.
- [11] 张鑫, 杨梅. 挖进机截割头钻进工况载荷的计算机模拟[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(3): 21-23.  
ZHANG Xin, YANG Mei. The computer simulation of drilling loads on the cutting head of tunneling machine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 24(3): 21-23.
- [12] 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(10): 4147-4159.
- [13] ZHANG Q, SHOU J L. Simulation study of the strength of pick based on LS-DYNA in different hardness of rock[J]. Advanced Materials Research, 2012, 567(4): 232-235.
- [14] 张艳林, 闫炳雷, 陈锷, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的掘进机截齿截割煤岩动力学分析[J]. 机械设计, 2013, 30(2): 74-77.  
ZHANG Yanlin, YAN Binglei, CHEN E, et al. Dynamic analysis on conical pick cutting based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(2): 74-77.
- [15] 王雁翔, 杨道龙, 王凌翔. 镐型截齿截割磨损研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(2): 47-49.  
WANG Yanxiang, YANG Daolong, WANG Lingxiang. Study on wear performance of pick cutting[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(2): 47-49.
- [16] DEWANGAN S, CHATTOPADHYAYA S, HLOCH S. Wear assessment of conical pick used in coal cutting operation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5): 2129-2139.
- [17] 刘送永, 杜长龙, 崔新霞. 滚筒式采煤机滚筒载荷谱的模拟分析与研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 11-13.  
LIU Songyong, DU Changlong, CUI Xinxia. The simulation analysis and investigation of the drum load spectrum of a shearer [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 27(1): 11-13.
- [18] 白庆升. 复杂结构特厚煤层综放面围岩采动影响机理与控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015: 73-83.
- [19] 罗晨旭. 滚筒采煤机开采含煤岩界面煤层截割特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 70-77.

(责任编辑:李磊)