

# 不同截齿安装角对采煤机截割性能的影响

毛 君<sup>1,2</sup>, 刘歆妍<sup>1</sup>, 陈洪月<sup>1,2</sup>, 宋秋爽<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中国煤炭工业协会 高端综采成套装备动力学测试与大数据分析中心, 辽宁 阜新 123000;

3. 中国煤矿机械装备有限责任公司, 北京 100011)

**摘 要:**为研究采煤机滚筒与围岩的相互作用机制,以MG500/1180-WD型号采煤机为研究对象,采用EDEM离散元仿真软件建立三维仿真模型,综合考虑煤岩块度、顶板压力对采煤机截割性能的影响,研究采煤机截割煤岩的动态过程,利用单因素试验法研究不同截齿安装角对采煤机装煤率、截割阻力以及截割比能耗等因素的影响。结果表明:随着截齿安装角增大,采煤机装煤率呈先增大后减小的趋势,滚筒截割阻力及截割比能耗均呈先减后增的趋势。综合考虑当安装角为45°时,采煤机的截割效率最高。研究结果可为采煤机高效截割提供了改进参考方案。

**关键词:**采煤机;离散元法;截齿安装角;截割比能耗

**中图分类号:**TD421 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)10-0144-06

## Different installation angle of cutting picks affected to cutting performances of coal shearer

MAO Jun<sup>1,2</sup>, LIU Xinyan<sup>1</sup>, CHEN Hongyue<sup>1,2</sup>, SONG Qiushuang<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Dynamics Test and Large Data Analysis Center of

Advanced Fully Mechanized Completed Equipment, China National Coal Association, Fuxin 123000, China;

3. China National Coal Mining Equipment Company Limited, Beijing 100011, China)

**Abstract:** In order to study the interaction mechanism between the cutting drum of the coal shearer and the surrounding rock, based on a MG500/1180-WD mode coal shearer as the study object, the EDEM discrete element simulation software was applied to establish a 3D simulation model. In a comprehensive consideration of the coal and rock lump size and roof pressure affected to the cutting performances of the coal shearer, a study was conducted on the dynamic coal and rock cutting process. A single factor experiment method was applied to study the different installation angle of the cutting picks affected to the coal loading rate of the coal shearer, the cutting resistance, the specific energy consumption of cutting and other factors. The results showed that with the installation angle of the cutting pick increased, the coal loading rate of the coal shearer would be in a tendency with a increasing first and then a decreasing and the cutting resistance of the cutting drum and the specific energy consumption of the cutting would be in a tendency with a decreasing first and then increasing. In a comprehensive consideration, when the installation angle was 45°, the cutting rate of the coal shearer would be the highest. The study results could provide the improved references to the high efficient cutting of the coal shearer.

**Key words:** coal shearer; discrete element method; installation angle of cutting picks; specific energy consumption of cutting

## 0 引 言

滚筒是采煤机破碎煤岩的重要部件,兼具采煤和装煤的功能,其结构参数、运动参数以及两者间的匹配性都直接影响滚筒的截割性能<sup>[1]</sup>。目前国

内外对截齿安装参数的研究有:文献[2-5]利用LS-DYNA建立有限元模型,分析了截割过程中煤岩的破碎过程,不同截齿安装角对截割阻力、截割块煤效率的影响以及切削厚度与比能耗之间的关系。文献[6]分析了不同安装角对截齿受力的影响,并给

收稿日期:2017-04-11;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.10.025

基金项目:辽宁省教育厅创新团队资助项目(LT2013009);国家能源研发(实验)中心重大资助项目(2010\_215)

作者简介:毛 君(1960—),男,辽宁岫岩人,教授,博士生导师。Tel:13704181080, E-mail:13704181080@139.com

引用格式:毛 君,刘歆妍,陈洪月,等.不同截齿安装角对采煤机截割性能的影响[J].煤炭科学技术,2017,45(10):144-149.

MAO Jun, LIU Xinyan, CHEN Hongyue, et al. Different installation angle of cutting picks affected to cutting performances of coal shearer[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 144-149.

出了煤质、截齿参数与安装角间的定量关系。文献[7]应用分形理论分析了截割阻力谱的分形特征与安装角及切削厚度的关系。文献[8]利用试验方法,分析了煤岩性质、截齿结构参数等对滚筒截割转矩、截割比能耗的影响,并得出相关参数间的关系表达式。笔者以 MG500/1180-WD 型号采煤机为研究对象,以离散元理论为基础,利用 EDEM 仿真软件建立煤岩破碎模型,模拟采煤机的截割过程。由于滚筒截割性能除受滚筒结构、工作参数、煤岩物理参数影响外,还受到顶板压力的影响。为此,为了更加真实地模拟煤岩状态,在煤层上方施加荷载模拟顶板压力。综合考虑煤岩块度、黏结度、顶板压力对采煤机截割性能的影响;分析不同截齿安装角对采煤机截割性能的影响;揭示滚筒与煤岩间的相互作用机制。

1 滚筒截割仿真模型建立

1.1 颗粒模型及参数设定

为更好地模拟实际工况下煤岩的破碎情况,参考文献[9]将煤岩模型简化为不规则的颗粒。通过 Pro/E 软件在 0~50 mm 范围内创建 9 种不同粒径形状的几何体,导出为 .STL 文件,作为煤岩颗粒模板。在 EDEM 软件中通过创建多个球面来对其进行填充,生成的颗粒模型如图 1 所示。

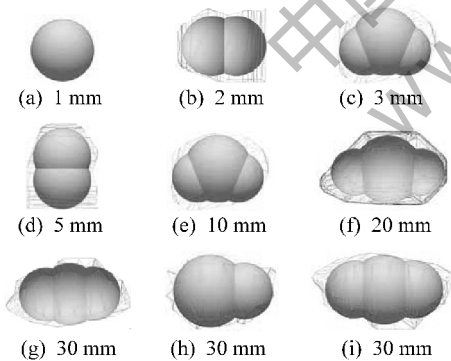


图 1 颗粒模型

Fig. 1 Particle model

在 EDEM 软件中添加煤、岩石 2 种材料,材料参数见表 1。图 1a 材料为岩石,图 1b—图 1i 的材料为煤,图 1b—图 1d 为细骨料,图 1e—图 1i 为粗骨料。采用正态分布法在给定范围内随机生成不同大小的煤岩颗粒。设置颗粒总数为 30 万个,参照文献[9]设置粗细骨料比为 2 : 3,通过颗粒工厂将不同尺寸、材料的颗粒进行随机混合,形成煤岩复合体。

表 1 煤岩材料参数

Table 1 Material parameters of coal and rock

参数	煤	岩石
泊松比	0.5	0.2
剪切模量/MPa	$1.0 \times 10^2$	$5.0 \times 10^7$
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 400	2 600

笔者采用 Hertz-Mindlin 黏结模型模拟煤岩的物理状态。通过设置颗粒间的法向、切向黏结强度使颗粒能够承受一定的拉伸、剪切作用,当颗粒间的作用力超过黏结强度时黏结发生破坏。定义法向和切向应力的最大值如下<sup>[10]</sup>:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{\max} &< \frac{-F_n}{A} + \frac{2T_t}{J}R \\ \tau_{\max} &< \frac{-F_t}{A} + \frac{T_n}{J}R \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$A = \pi R^2 \quad (2)$$

$$J = \frac{1}{4} \pi R^4 \quad (3)$$

$$R = \sqrt{R_A R_B} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$  分别为颗粒间的法向、切向应力最大值,MPa;  $F_n$ 、 $F_t$  分别为颗粒的法向、切向力,N;  $T_t$ 、 $T_n$  分别为颗粒的法向、切向力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $A$  为单位接触面积, $\text{mm}^2$ ;  $J$  为极惯性矩, $\text{mm}^4$ ;  $R$  为颗粒黏结半径,mm;  $R_A$ 、 $R_B$  分别为球 A、B 的颗粒半径,mm。

随着仿真时步的增加,颗粒间的黏聚力、力矩会不断更新,随时步变化的数学表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \delta F_n &= -v_n S_n A \delta t \\ \delta F_t &= -v_t S_t A \delta t \\ \delta T_n &= -w_n S_n J \delta t \\ \delta T_t &= -w_t S_n \frac{J}{2} \delta t \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中:  $\delta F_n$ 、 $\delta F_t$  分别为相应时间点颗粒的法向、切向力,N;  $\delta T_n$ 、 $\delta T_t$  分别为相应时间点颗粒的法向、切向力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $\delta t$  为时间步长,s;  $v_n$ 、 $v_t$  分别为颗粒的法向、切向速度,m/s;  $\omega_n$ 、 $\omega_t$  分别为颗粒的法向、切向角速度,rad/s;  $S_n$ 、 $S_t$  分别为颗粒的法向、切向接触刚度,N/m。煤岩特性十分复杂,要使仿真煤壁与实际工况下煤岩特性完全相似较为困难,因此主要考虑煤岩硬度与抗压强度,通过计算确定颗粒间的黏结参数,使得煤岩抗压强度达到 18 MPa,煤岩普氏系数  $f$  为 3<sup>[11-12]</sup>。颗粒黏结参数如下:单

位面积法向刚度  $5.0\times10^7\text{ N/m}^3$ ;单位面积切向刚度  $2.0\times10^7\text{ N/m}^3$ ;单位面积法向应力  $3.0\times10^7\text{ Pa}$ ;单位面积切向应力  $6.0\times10^6\text{ Pa}$ 。

1.2 仿真模型的建立

为了清晰描述滚筒截割煤岩过程及滚筒的装煤效果,建立包含滚筒、刮板输送机中部槽和煤层 3 个部分的虚拟仿真模型。采用 Pro/E 软件建立滚筒、刮板的三维模型,建模时忽略其内部复杂的几何结构,并进行适当的简化。参考 MG500/1180-WD 型号采煤机,确定滚筒的主要结构参数,其中滚筒直径为 1 800 mm,筒毂直径为 1 000 mm,滚筒宽度为 1 000 mm,螺旋叶片升角为  $25^\circ$ ,头数为 3,采用顺序式的截齿排列方式,截线距为 80 mm,截齿锥角为  $80^\circ$ ,煤壁与刮板输送机中部槽的距离  $L=250\text{ mm}$ ,滚筒底端距中部槽的高度  $S=800\text{ mm}$ 。如图 2 所示, $X$  向为滚筒轴向方向, $Y$  向为滚筒牵引方向, $Z$  向为竖直方向,在截割煤岩过程中滚筒进行直线往复和旋转运动。

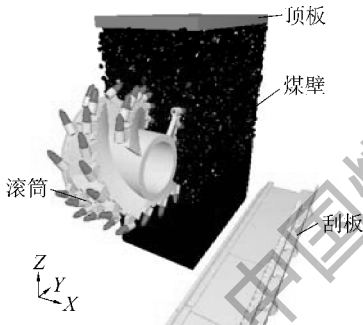


图 2 滚筒截割模型  
Fig. 2 Drum cutting model

构建模型模拟采高为 3 m 的煤层。煤层上方通过创建一定质量的箱体模拟煤壁受到的顶板压力,单位面积上的顶板压力计算式如下<sup>[13-14]</sup>:

$$P_c = \gamma_z h k_1 + \frac{D \gamma_L L_0 k_2}{2 L_K} \tag{6}$$

其中: $P_c$  为单位面积上的顶板压力,MPa; $\gamma_z$ 、 $\gamma_L$  分别为直接顶、基本顶岩石容重, $\text{kg/m}^3$ ;  $h$ 、 $D$  分别为直接顶、基本顶岩层厚度,m;  $k_1$  为悬顶片帮系数;  $k_2$  为动压系数;  $L_0$  为基本顶初次来压步距,m;  $L_K$  为控顶距,m。根据仿真所模拟的煤壁条件,设置顶板压力为  $1.2\times10^7\text{ N}$ 。

1.3 仿真参数的设定

仿真模型中的颗粒接触数较高,为确保仿真的稳定性,设置固定时间步长为 20%。在不影响仿真结果的前提下,尽量减少实际仿真时间,设定目标存

储时间间隔为 0.05 s,网格尺寸为最小颗粒半径的 3 倍。设置仿真条件为:滚筒牵引速度 3 m/min,转速 30 r/min,截深 800 mm。

2 截齿安装角对滚筒截割性能的影响

截齿安装参数主要是指截齿在滚筒螺旋叶片、端盘上的安装角度,包括安装角、倾斜角以及二次旋转角,安装角是指截齿轴线与齿尖运动轨迹切线方向的夹角,目前国内采煤机滚筒上的截齿安装角通常为  $30^\circ\sim50^\circ$ ,倾斜角、二次旋转角通常只存在于端盘截齿上,而对于叶片截齿而言,倾斜角、二次旋转角通常为  $0^\circ$ <sup>[15-16]</sup>。笔者主要研究螺旋叶片上不同截齿安装角度对滚筒截割性能的影响,利用图 2 所示的仿真模型,分别对截齿安装角为  $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$  时采煤机的截割性能进行分析,主要对截割过程中的截割比能耗、滚筒载荷、载荷波动系数、装煤率等因素进行分析。

1) 装煤率。截割过程中滚筒的落煤轨迹如图 3 所示,为分析不同截齿安装角对采煤机装煤率的影响,在仿真模型中划分统计区域,如图 4 所示,统计区 I 为滚筒后侧采空区,统计区 II 为刮板所在区域,且随刮板移动。通过分析统计区 I 内的颗粒累积质量占滚筒截煤总量的比例,间接获得煤岩颗粒的装煤率。仿真统计结果见表 2。其中装煤率为仿真稳定后(约 10 s)的数据平均值。

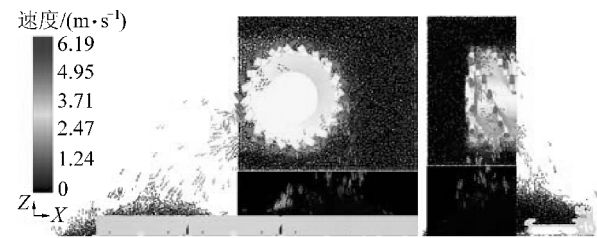


图 3 滚筒落煤轨迹  
Fig. 3 Trajectory of roller falling coal

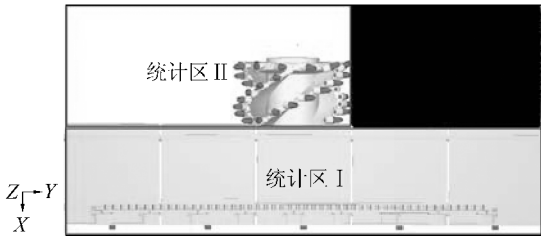


图 4 统计区域示意  
Fig. 4 Statistical area schematic diagram

2) 滚筒截割阻力。滚筒载荷是参与截割过程的所有截齿载荷的矢量和<sup>[17]</sup>。笔者利用 EDEM 后

处理功能,导出不同截齿安装角下滚筒的截割阻力

数据,并通过 MATLAB 软件绘制曲线如图 5 所示。

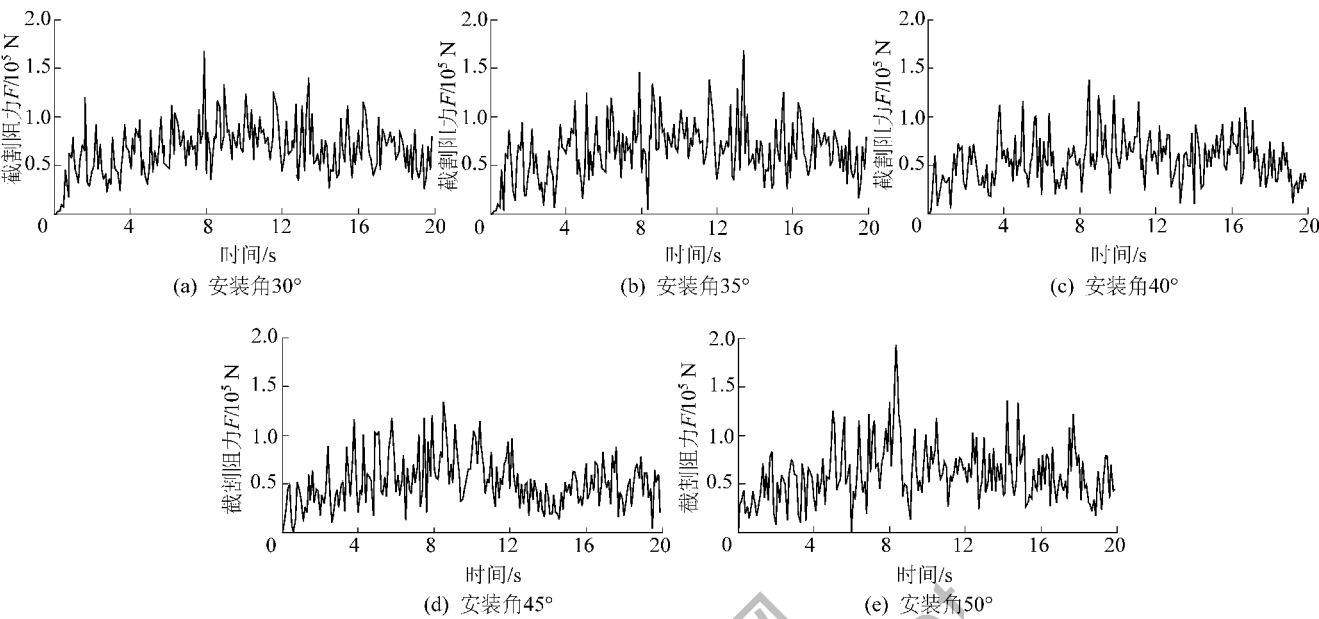


图 5 滚筒截割阻力数值曲线

Fig. 5 Value curve of drum cutting resistance

由图 5 可知,滚筒载荷并不是一个定值,而是随时间在一定范围内呈不规则波动。这是由于参与截割的截齿位置、数量及其偏角都在随时间不断变化,且煤岩崩落没有规律,因此其所受各向阻力并不随滚筒转动而具有周期性。为了定量描述滚筒载荷波动的大小,引入载荷波动系数,通常滚筒载荷的波动系数不超过 5%,波动系数表达式如下<sup>[18-19]</sup>。

$$\zeta = \frac{1}{\bar{F}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r (F_i - \bar{F})^2}{r}} \tag{7}$$

$$\bar{F} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r F_i \tag{8}$$

式中:  $\zeta$  为滚筒载荷波动系数;  $F_i$  为滚筒瞬时载荷,

$N$ ;  $\bar{F}$  为滚筒载荷均值,  $N$ ;  $i$  为记录滚筒载荷的时刻点,  $i=0, 0.1, 0.2, \dots, r$ ;  $r$  为记录滚筒载荷的时间点总数,取 250。

3) 截割比能耗。利用 EDEM 后处理功能导出不同截齿安装角时滚筒的截割转矩,结合不同时刻截落煤岩颗粒的累积质量,根据式(9)得到不同截齿安装角时滚筒的截割比能耗曲线<sup>[20]</sup>,如图 6 所示。仿真统计结果见表 2。

$$H_w = \frac{\rho_m t_n \bar{T}_m}{9\,550 \times 3\,600 M_m} \tag{9}$$

式中:  $H_w$  为截割比能耗,  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;  $\rho_m$  为煤岩密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为截割时间,  $\text{s}$ ;  $n$  为滚筒转速,  $\text{r}/\text{min}$ ;  $\bar{T}_m$  为滚筒转矩均值,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $M_m$  为截落的煤岩质量,  $\text{kg}$ 。

表 2 仿真结果统计

截齿安装角/ (°)	颗粒累积质量/kg		截落颗粒总质量/kg	装煤率/ %	滚筒截割阻力 均值/N	波动系数	截割比能耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> )	
	统计区 I	统计区 II					均值	标准差
30	494.55	211.48	706.03	69.5	6.567 4×10 <sup>4</sup>	0.042 5	1.332 2	0.465 0
35	526.09	205.61	731.70	71.9	6.243 0×10 <sup>4</sup>	0.036 3	1.167 0	0.441 8
40	611.23	152.81	764.04	80.4	5.517 2×10 <sup>4</sup>	0.027 1	1.046 1	0.375 7
45	623.42	173.79	797.21	78.2	5.172 9×10 <sup>4</sup>	0.032 9	0.890 0	0.313 1
50	542.44	170.91	774.91	70.5	6.010 0×10 <sup>4</sup>	0.040 4	0.924 6	0.444 6



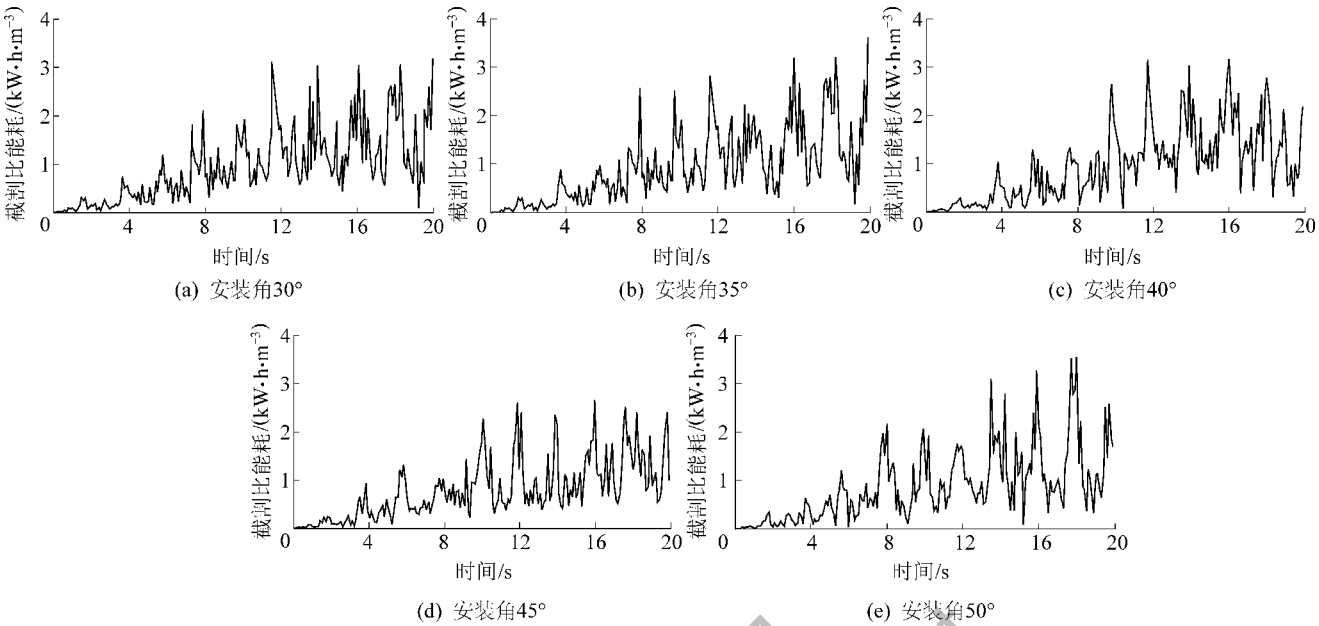


图 6 截割比能耗数值曲线

Fig. 6 Value curve of special energy consumption for cutting

3 仿真结果分析

通过对不同截齿安装角条件下得到的装煤率、截割阻力以及截割比能耗等仿真结果进行统计,得到各参数与截齿安装角之间的关系曲线,如图 7 所示。

着截齿安装角增大,截齿的切削厚度增大,截割阻力减小,采煤机截煤量增大,但当截齿安装角过大时,截齿所受合力与截齿轴线之间的夹角增大,使得截割阻力增大,影响采煤机的截煤性能。截齿安装角为 40°时装煤率最高,达到 80.4%。综合以上 3 个方面因素,在试验条件下,截齿安装角为 45°时滚筒的截割效率最高。

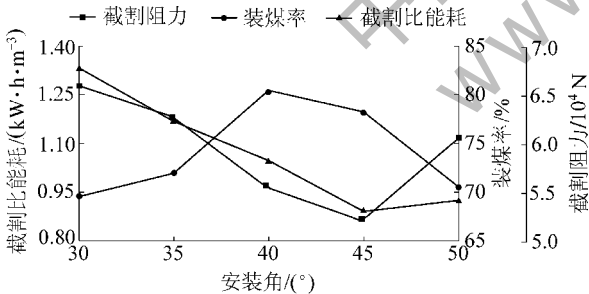


图 7 截割性能参数与截齿安装角关系曲线

Fig. 7 Relation curves of cutting performance parameters and cutting pick installation angle

由图 7 可知,滚筒截割阻力、截割比能耗随安装角增大呈先减小后增大的趋势,在截割过程中滚筒截割阻力、截割比能耗呈现出不规则的波动,但在不同的截齿安装角下,变化趋势具有一定的相似性。截齿安装角为 45°时均达到最小值,截割阻力为 51 729 N,截割比能耗为 0.89 kW·h/m³,载荷波动系数较小,截齿的磨损也较小。随着截齿安装角增大,滚筒装煤率呈先增大后减小的趋势,这是由于随

4 结 论

以 MG500/1180-WD 型号采煤机为研究对象,采用 EDEM 离散元仿真软件,对 5 种不同截齿安装角度下滚筒截割煤岩的动态过程进行模拟,从细观角度分析煤岩的破碎和崩落过程,分析截割过程中采煤机的装煤率、截割阻力以及截割比能耗等因素的变化趋势。通过分析得出:随着截齿安装角增大,滚筒装煤率呈先增大后减小的趋势,截齿安装角为 40°时采煤机装煤率最高,达到 80.4%。滚筒截割阻力、截割比能耗随安装角增大呈先减小后增大的趋势,截齿安装角为 45°时达到最小值,截割阻力为 51 729 N,截割比能耗为 0.89 (kW·h/m³),载荷波动系数较小,截齿的磨损也较小。综合以上 3 个方面因素,在试验条件下,截齿安装角为 45°时滚筒的截割效率最高。此研究成果可为研究截齿安装角对滚筒截割性能的影响

提供了一种新思路。

## 参考文献 (References):

- [1] 陆曾亮.采煤机滚筒装煤问题研究[J].煤矿机械与电气, 1981(3):1-4.  
LU Zengliang. Research on coal shearer drum mounted [J]. Mine Mechanical and Electrical, 1981(3):1-4.
- [2] 张丽明, 谢 进.采煤机滚筒破煤机理仿真研究[J].煤矿机械, 2013, 34(10):44-46.  
ZHANG Liming, XIE Jin. Simulation study of theory of cutting for shearer drum author institution [J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(10):44-46.
- [3] 王 丽, 高晓峰, 焦 丽, 等.螺旋滚筒截割煤岩的 LS-DYNA 仿真模拟[J].煤矿机械, 2013, 34(12):41-43.  
WANG Li, GAO Xiaofeng, JIAO Li, et al. Simulation and analysis for helical drum cutting coal rock by LS-DYNA [J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(12):41-43.
- [4] 王峥荣, 熊晓燕, 张 宏, 等.基于 LS-DYNA 采煤机镐型截齿截割有限元分析[J].振动.测试与诊断, 2010(2):163-165, 210.  
WANG Zhengrong, XIONG Xiaoyan, ZHANG Hong, et al. Study on conical pick cutting using LS-DYNA [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010(2):163-165, 210.
- [5] 周 游, 李国顺, 唐进元.截齿截割煤岩的 LS-DYNA 仿真模拟[J].工程设计学报, 2011, 18(2):103-108.  
ZHOU You, LI Guoshun, TANG Jinyuan. Simulation and analysis for pick cutting rock by LS-DYNA [J]. Journal of Engineering Design, 2011, 18(2):103-108.
- [6] 刘春生.采煤机镐型截齿安装角的研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2002, 21(5):661-663.  
LIU Chunsheng. Research on the installing angle of shearer pick-shaped cutter [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2002, 21(5):661-663.
- [7] 刘春生, 王庆华, 李德根.镐型截齿截割阻力谱的分形特征与比能耗模型[J].煤炭学报, 2015, 40(11):2623-2628.  
LIU Chunsheng, WANG Qinghua, LI Degen. Fractal characteristic and specific energy model of conical picks cutting resistance spectrum [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11):2623-2628.
- [8] 刘送永.采煤机滚筒截割性能及截割系统动力学研究[D].徐州:中国矿业大学, 2009:57-58.
- [9] 张建军, 郑 杨, 崔正龙.刨煤机刨削试验用模拟煤壁配比及结构层研究[J].煤矿机电, 2016(1):16-18.  
ZHANG Jianjun, ZHENG Yang, CUI Zhenglong. Research on proportion and structure layer of simulation call wall used for plow planning test [J]. Coal Mine Machinery, 2016(1):16-18.
- [10] 王国强, 赫万军, 王继新.离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M].西安:西北工业大学出版社, 2010:1-5, 16-18.
- [11] 李玉伟.割理煤岩力学特性与压裂起裂机理研究[D].大庆:东北石油大学, 2014.
- [12] 李贵轩, 李晓豁.采煤机械设计[M].沈阳:辽宁大学出版社, 1994.
- [13] 孙广义, 潘启新, 黄占龙.单体支柱工作面顶板压力计算的探讨[J].黑龙江矿业学院学报, 1998(1):6-9, 29.  
SUN Guangyi, PAN Qixin, HUANG Zhanlong. Analysis of roof pressure on divided support in longwall face [J]. Journal of Heilongjiang Mining Institute, 1998(1):6-9, 29.
- [14] 孙广义, 马云东, 李 东.顶板压力计算的盲数辨识研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2003, 22(S1):7-8.  
SUN Guangyi, MA Yundong, LI Dong. Study on the blind number recognition of the calculation of roof pressure [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2003, 22(S1):7-8.
- [15] 陆 辉, 王义亮, 杨兆建.采煤机镐形截齿疲劳寿命分析及优化[J].煤炭科学技术, 2013, 41(7):100-102, 106.  
LU Hui, WANG Yiliang, YANG Zhaojian. Analysis and optimization on fatigue life of pick cutter for cutting drum of coal shearer [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7):100-102, 106.
- [16] 刘春生, 于信伟, 任昌玉.滚筒式采煤机工作机构[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [17] 保晋 E 3.采煤机破煤理论[M].王庆康, 译.北京:煤炭工业出版社, 1992.
- [18] 薛佳鹏.采煤机滚筒截割过程运动参数匹配研究[D].太原:太原理工大学, 2014.
- [19] 王春华, 李贵轩, 姚宝恒.刀型截齿截割煤岩的实验研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2001, 20(4):487-488.  
WANG Chunhua, LI Guixuan, YAO Baoheng. The experiment study of flat pick cutting coal and rock [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2001, 20(4):487-488.
- [20] 刘送永.采煤机滚筒截割性能及截割系统动力学研究[D].徐州:中国矿业大学, 2009.

(上接第 139 页)

模具磨损量的影响分析[J].中南大学学报:自然科学版, 2009, 40(5):1245-1249.

LIN Gaogong, FENG Di, ZHENG Xiaoyan, et al. Analysis of influence of extrusion times on total die wear based on Archard theory [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(5):1245-1249.

[15] 郝志勇.刨煤机刨刀刨削煤岩力学特性研究及其优化设计[D].阜新:辽宁工程技术大学, 2013.

[16] 张 利. NSGA2 算法及其在电力系统稳定器参数优化中的应用[D].成都:西南交通大学, 2010.

[17] DEB K, PARTAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm NSGA-II [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 22(6):182-197.