

赵丽娟,赵名扬.薄煤层采煤机装煤性能研究[J].煤炭学报,2017,42(7):1892-1898. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1314
Zhao Lijuan,Zhao Mingyang. Loading performance of thin seam shearer[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(7):1892-1898. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1314

薄煤层采煤机装煤性能研究

赵丽娟,赵名扬

(辽宁工程技术大学 机械工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘要:为了提高薄煤层采煤机的装煤性能及工作效率,运用理论分析与离散元数值模拟的方法对其进行了研究。针对理论落煤量及理论装煤量与牵引速度、滚筒截深、滚筒转速、螺旋升角的关系进行了理论分析;基于PRO/E与EDEM建立了采煤机截割部的离散元仿真模型及煤壁模型,模拟了采煤机截割、破碎煤岩的复杂过程,并获得了相应的装煤率;基于正交试验法分析了牵引速度、滚筒转速、叶片螺旋升角、滚筒截深对采煤机装煤性能的影响规律及显著程度。基于实际工况,得到了新型薄煤层采煤机的最优设计参数,为采煤机滚筒装煤性能的研究及优化提供了一种新方法。

关键词:薄煤层采煤机;滚筒;离散元;正交试验法;装煤性能

中图分类号:TD421.63 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)07-1892-07

Loading performance of thin seam shearer

ZHAO Li-juan,ZHAO Ming-yang

(College of Mechanical Engineering,Liaoning Technical University,Fuxin 123000,China)

Abstract: In order to improve the loading performance and working efficiency of thin seam shearer, it was investigated using the method of theoretical analysis and discrete element numerical simulation. The relationship of theoretical coal falling and theoretical loading quantity with traction speed, drum depth, roller speed, and helix angle were theoretically analyzed. The discrete element simulation model of shearer cutting unit and coal wall model were established based on PRO/E and EDEM. The complex process of broken coal rock cutting of shearer was simulated and the corresponding loading rate was obtained. The influence and significant extent of traction speed, roller speed, helix angle, and drum depth on shearer loading performance were analyzed based on the orthogonal test method. Based on the actual working conditions, the optimal design parameters of the new thin coal seam shearer were obtained, and the loading performance of shearer was improved greatly, which provides a new method for the research and optimization of shearer loading performance.

Key words: thin seam shearer; drum; discrete element method; orthogonal test; loading performance

螺旋滚筒作为采煤机破煤和装煤的主要工作机构,其性能好坏直接影响采煤机的工作效率。目前,比较成熟的采煤机多电机并联技术已经基本满足采煤机滚筒的截割性能要求^[1-5],而如何提高滚筒的装煤性能成为了薄煤层采煤机研究的热点问题^[6-9]。

国内外很多学者对其进行了研究;M. Ayhan 等通过井下试验将锥形筒毂和圆柱形筒毂滚筒的装煤效果进行对比发现,前者的装煤率明显高于后者^[10]。Rojek 等采用离散单元法建立了“截齿-岩石”模型,并对其进行了切削过程的2D/3D模拟^[11]。O. Su 等对

镐齿的截割过程进行离散元法模拟仿真,得到的仿真截齿应力最高值与实测的结果一致^[12]。李晓豁等利用粒子群算法对采煤机滚筒进行优化设计,其生产率和块煤率均有显著提高^[13-14]。杜长龙、刘送永等对4种排列方式的滚筒进行了截割实验,找到了排列方式与载荷、块煤率等参数的关系^[15]。但在物理样机上进行有关煤岩截割、破碎过程的试验具有较大的数据扰动性^[16],建立在传统连续介质力学基础上的有限元法又难以直接用于计算和模拟煤岩具体的截割、破碎过程,而离散元法在这一方面显示出巨大的生命力,通过离散元法可以补充甚至替代实际煤岩截割、破碎过程。

将离散元软件 EDEM 应用于采煤机领域,研究采煤机各参数对滚筒装煤性能的影响规律,为机械采煤效率的研究提供了一种新的理念和方法,节省人力及时间,极大地降低研发成本,提高工作效率,具有重要的理论意义及较强的工程应用价值。

1 滚筒装煤性能的理论分析

1.1 数学模型的建立

采煤机在工作过程中,截齿截落的煤岩颗粒随着滚筒叶片的旋转而运动,煤岩颗粒的运动和接触受力与滚筒的结构和运动参数有直接的影响^[17-18],利用散体力学理论对其中的某一个煤岩颗粒进行运动状态分析,如图1所示。

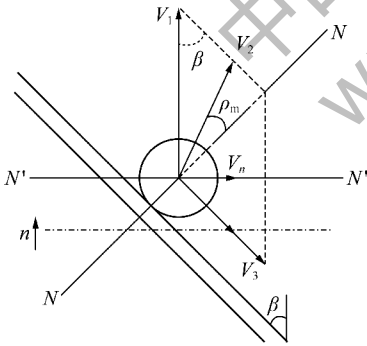


图1 颗粒在叶片上运动分析

Fig.1 Particle motion on the blade

图1中, V_1, V_2 分别为煤岩颗粒在叶片推动下的圆周速度和叶片相对滑动速度,根据速度投影定理将 V_1, V_2 投影到 $N-N'$ 方向可知:

$$V_2 = V_1 \frac{\sin \beta}{\cos \rho_m} \quad (1)$$

式中, $V_1 = \pi n D_c$; β 为叶片螺旋升角, ($^\circ$); ρ_m 为煤与叶片之间的摩擦角, ($^\circ$); n 为滚筒转速, r/min; D_c 为滚筒直径, mm。

则煤流轴向速度 V_n 为

$$V_n = V_2 \cos(\beta + \rho_m) = \pi n D_c \frac{\sin \beta \cos(\beta + \rho_m)}{\cos \rho_m} \quad (2)$$

单头螺旋叶片滚筒的最大可能煤流断面面积 F_{\max} 为

$$F_{\max} = \frac{\pi}{4} (D_y^2 - D_g^2) \left(1 - \frac{\delta}{L \cos \beta} \right) \quad (3)$$

式中, D_y 为叶片直径, mm; D_g 为筒毂直径, mm; δ 为叶片厚度, mm; L 为叶片导程, mm。

螺旋滚筒的理论装煤量 Q_z 为

$$Q_z = F_{\max} V_n \psi_z \quad (4)$$

式中, ψ_z 为充满系数。

将式(1), (4)代入式(5), 可得多头螺旋滚筒的理论装煤量为

$$Q_z = \frac{\pi^2}{4} (D_y^2 - D_g^2) \left(1 - \frac{Z\delta}{L \cos \beta} \right) L \psi_z n D_c \times \frac{\sin \beta \cos(\beta + \rho_m)}{\cos \rho_m} \quad (5)$$

式中, Z 为叶片头数。

采煤机滚筒理论落煤量 Q_L 为

$$Q_L = D_c B V_q \lambda \quad (6)$$

式中, B 为采煤机截深, mm; V_q 为采煤机牵引速度, m/min; λ 为煤的松散系数。

则采煤机滚筒的理论装煤率为

$$\eta = \frac{Q_z}{Q_L} \quad (7)$$

1.2 滚筒装煤性能影响因素分析

以 MG400/951-WD 新型薄煤层采煤机为研究对象, 该型采煤机为一种矮机面、大功率, 采用前滚筒截割底煤的机型, 其滚筒直径为 1 150 mm, 宽度为 800 mm, 叶片直径为 930 mm, 筒毂直径为 530 mm, 叶片厚度为 70 mm, 叶片头数为 2。

由式(7)可知, 采煤机滚筒的装煤率由理论装煤量和理论落煤量决定, 二者越接近, 滚筒的装煤率越高。由式(5), (6)可知, 滚筒直径一定时, 采煤机的理论装煤量与滚筒转速、叶片螺旋升角有很复杂的函数关系, 而理论落煤量又与滚筒截深、牵引速度有直接关系。利用 Matlab 软件可绘制出理论装煤量与滚筒转速、叶片螺旋升角的关系, 如图2所示。

由图2可知, 当滚筒转速较小时, 叶片螺旋升角对装煤量的影响不大。当叶片螺旋升角一定时, 滚筒转速增大, 叶片的周向速度和轴向速度会同时增大, 使滚筒截落的煤岩颗粒越来越多, 理论装煤量随之增大, 并呈线性趋势。当滚筒转速为定值时, 理论装煤量随着叶片螺旋升角的增加而增大。

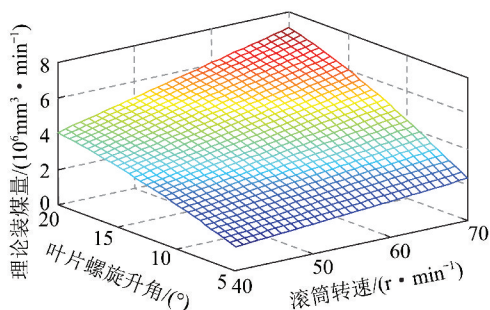


图2 滚筒理论装煤量与螺旋升角、滚筒转速关系曲面
Fig. 2 Relation surface of helical vane angle, rotation speed and coal capacity of the drum

图3为采煤机牵引速度、滚筒截深与理论落煤量的关系曲面。由图3可知,采煤机牵引速度越大,截深越深,采煤机的单位落煤量越大,煤体越过筒毂被抛到采空区的概率也显著加大,使滚筒叶片中的截落煤被叶片的作用力推送到刮板输送机上,从而提高了采煤机的装煤性能。因此,薄煤层采煤机在实际工作过程中,由于其滚筒直径受到煤层工作面厚度限制,大多数薄煤层采煤机选择大截深以提高采煤机滚筒的装煤率。

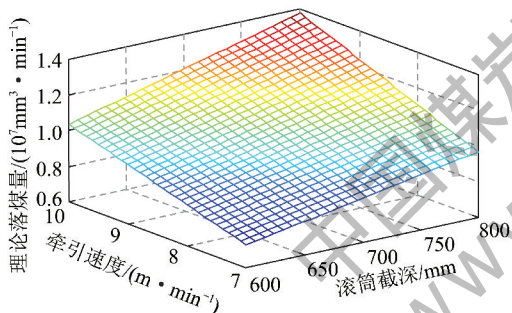


图3 滚筒理论落煤量与牵引速度、滚筒截深关系曲面
Fig. 3 Relation surface of traction speed, drum depth and theoretical coal falling of the drum

2 EDEM 离散元数值模拟

离散元法是模拟散装物料加工时的颗粒运动特征的一种方法,其基本思想是将散体材料简化成若干颗粒的集合,每个颗粒单元都具有相应的尺寸、质量和接触参数等属性,通过各个单元的运动和相互位置来描述整个系统的演化过程^[19-20]。以牛顿第二定律、力位移关系原理和接触本构模型作为基础来确定颗粒的运动规律,如此循环计算,直到系统中所有颗粒都达到某种平衡状态。其模拟循环计算程序流程如图4所示。

2.1 离散元仿真模型的建立

通过对某工作面煤岩样进行物理、力学测试,得到煤的密度为 $1\,325.5\text{ kg/m}^3$,孔隙率 9.905% ,弹性

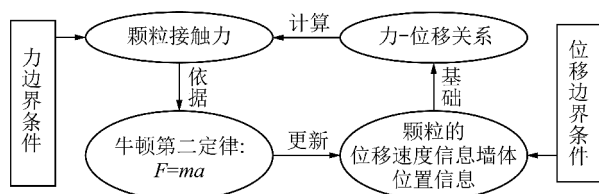


图4 离散元模拟循环计算程序流程

Fig. 4 Discrete element simulation calculation program graph
模量为 $4\,250\text{ MPa}$,泊松比为 0.235 ,抗压强度为 16.745 MPa ,抗拉强度为 0.955 MPa ,黏聚力为 1.65 MPa ,内摩擦角为 58.5° ,坚固性系数为 1.95 ,剪切模量 G 根据弹性模量算得为 $1\,720.6\text{ MPa}$ 。

创建采煤机截割部的离散元模型需要设置模型的参数和材料属性,并对颗粒属性进行定义。采煤机截割部的材料属性为钢(steel),泊松比为 0.3 ,杨氏模量为 $7 \times 10^{10}\text{ Pa}$,密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$;矿物的材料属性为煤(coal),泊松比为 0.235 ,杨氏模量为 $1.72 \times 10^9\text{ Pa}$,密度为 $1\,325\text{ kg/m}^3$ 。并对材料间相互约束条件进行设置,煤与煤之间恢复系数取 0.5 ,静摩擦因数 0.8 ,动摩擦因数 0.58 ;煤与滚筒之间恢复系数取 0.5 ,静摩擦因数 0.9 ,动摩擦因数 0.58 。根据仿真模型需要,煤岩颗粒的半径设置为 20 mm ,颗粒选用黏结模型(Hertz-Mindlin with bonding)。

利用三维建模软件PRO/E建立新型薄煤层采煤机截割部和煤壁模型,并进行虚拟装配和干涉检查,以保证采煤机截割部离散元仿真的准确性。将模型保存为.IGS文件格式,导入到EDEM软件中,通过颗粒工厂进行煤岩颗粒群的生成,并进行仿真参数设置,最终截割部的EDEM仿真模型如图5所示。

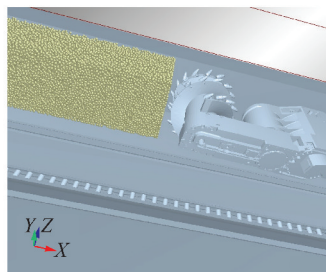


图5 截割部的EDEM仿真模型

Fig. 5 Cutting of EDEM simulation model

2.2 仿真结果及可行性分析

设置薄煤层采煤机参数为:滚筒的截深为 700 mm 、转速为 50 r/min 、牵引速度为 8 m/min ,仿真时间为 10 s ,进行仿真,其装煤效果如图6所示。在EDEM后处理模块中还可看到滚筒平稳截割过程中颗粒的速度云图,如图7所示。

图6中统计区I为截落到传输带上的煤岩颗粒,统计区II为未落到传输带上的煤岩颗粒。通过

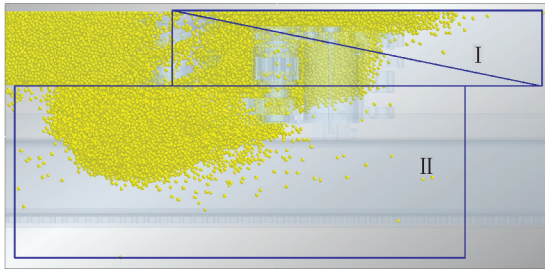


图 6 装煤效果图

Fig. 6 Mass ejection coal rendering

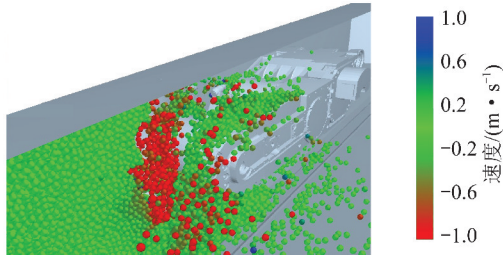


图 7 滚筒颗粒速度云图

Fig. 7 Drum speed particle velocity contours

EDEM 后处理功能对统计区 I 和统计区 II 进行颗粒累计质量计算和统计,其统计区 I, II 内颗粒总质量与时间关系如图 8,9 所示,并得到滚筒抛射装煤率与截煤时间关系如图 10 所示。

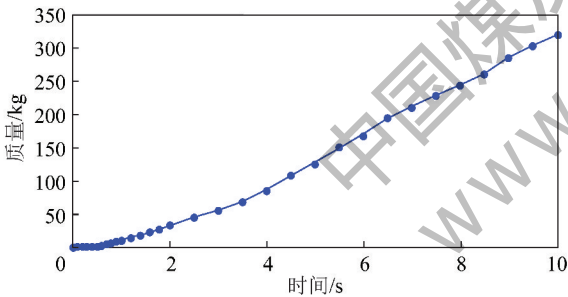


图 8 统计区 I 内颗粒质量与时间关系

Fig. 8 Relationship of particles quality with time in statistical area I

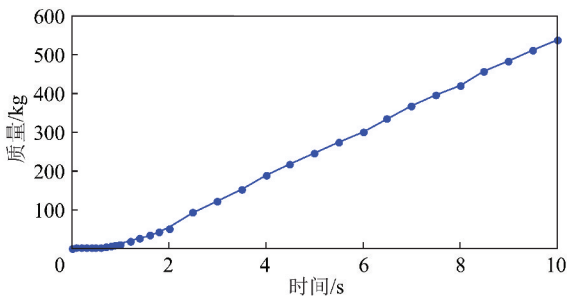


图 9 统计区 II 内颗粒质量与时间关系

Fig. 9 Relationship of particles quality with time in statistical area II

由图 10 可知,采煤机滚筒在刚开始截煤时,落到统计区 I 中的浮煤颗粒为 0,则总截煤质量等于

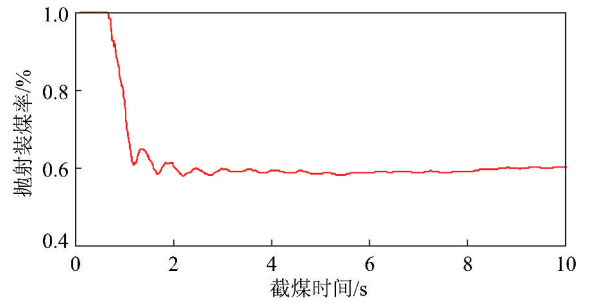


图 10 抛射装煤率

Fig. 10 Mass ejection rate of coal

统计区 II 中的颗粒质量,装煤率为 100%。随着滚筒继续截煤,装煤率先急剧下降,在 1.4 s 时开始有小幅上升并最终在一个恒定值上下波动,说明采煤机在刚截煤时,滚筒由于刚开始加载,整机产生强烈振动,在 1.4 s 后,整机振动开始趋于平稳状态,此时采煤机的装煤率为 60.27%。基于 MG400/951-WD 型薄煤层采煤机滚筒的结构参数及运动学参数,根据理论分析中式(5),(6)可计算出该工况下采煤机的理论装煤量为 $6.0 \times 10^6 \text{ mm}^3/\text{min}$,理论落煤量为 $9.7 \times 10^6 \text{ mm}^3/\text{min}$,其相应的理论装煤率为 61.89%,则装煤率的理论值与仿真值的相对误差为 2.62%,误差较小,可忽略,则可认为仿真结果与理论分析结果相符,从而验证了利用离散元法对滚筒装煤效果仿真的可行性。

3 滚筒装煤性能的正交试验设计

螺旋滚筒高效截割、破落煤岩是一个复杂的,具有非平衡、非线性、时变性和强耦合特点的演化过程,是多因素耦合作用的结果。而影响采煤机装煤性能的因素众多,若进行全面试验,包含的水平组合数较多,工作量较大,消耗时间长。而正交试验法可用部分试验来代替全面试验,通过部分试验结果的分析了解全面试验的情况,从而找出最优的水平组合,可节省大量时间、降低开发成本。

3.1 试验方案设计

基于 MG400/951-WD 新型薄煤层采煤机,在滚筒直径等结构参数一定的情况下,由理论分析可知,采煤机装煤性能主要与滚筒截深、采煤机牵引速度、螺旋滚筒转速、叶片螺旋升角等因素有关,因此将截深、牵引速度、滚筒转速及螺旋升角 4 个参数选为本试验的试验因素,分别记为 A, B, C 及 D。根据采煤机的实际工作情况,各因素均取 3 种水平,进行四因素三水平正交试验,其因素水平表见表 1。

正交表的选择是正交试验设计的首要问题,一般情况下,应尽可能选用较小的正交表,以减少试验次

数,因此本文选用 $L_9 3^4$ 正交表,并将每个水平的数字换成该因素的实际水平值,得到 9 组正交试验方案。其中,试验号并非试验顺序,为了排除误差干扰,试验可随机进行,以确保正交试验具有代表性。利用 EDEM 软件对不同的试验方案分别进行模拟,得到相应的装煤率。利用 Matlab 软件对试验所得到的数据进行处理,得到各因素各水平下每种试验装煤率的和 K 、均值 k 、极差 R 及均方值 S 。试验结果见表 2。

表 1 因素水平表
Table 1 Factor level table

水平	因素			
	截深 A/ mm	牵引速度 B/ ($m \cdot min^{-1}$)	滚筒转速 C/ ($m \cdot min^{-1}$)	螺旋升 角 D/($^\circ$)
1	700	8	53	11
2	750	9	58	13
3	800	10	63	15

表 2 正交试验结果
Table 2 Results of orthogonal test

试验号	因素				装煤 率/%
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	57.96
2	1	2	2	2	62.15
3	1	3	3	3	59.83
4	2	1	2	3	62.73
5	2	2	3	1	64.65
6	2	3	1	2	64.03
7	3	1	3	2	63.67
8	3	2	1	3	65.04
9	3	3	2	1	68.34
K_1	179.94	184.36	185.03	190.95	
K_2	191.41	186.64	193.22	189.85	
K_3	197.05	192.20	188.15	188.61	
k_1	59.98	61.45	61.68	63.65	
k_2	63.80	62.28	64.41	63.28	
k_3	65.68	64.07	62.72	62.87	
R	5.70	2.62	2.73	0.78	
S	5.63	1.19	1.27	0.10	

3.2 试验结果分析

3.2.1 主次因素分析

极差 R 反映了该因素的水平波动性,因此根据极差大小,可判断因素的主次影响顺序。 R 越大,表示该因素对采煤机装煤率影响越大。由表 2 可知, $R(A) > R(C) > R(B) > R(D)$,因此采煤机装煤率的因素影响主次顺序为 A, C, B, D,即滚筒截深对采煤机装煤率影响最大,其次是牵引速度及滚筒转速,影响

最小的因素是叶片螺旋升角。

3.2.2 显著程度分析

极差分析只确定了因素影响的主次顺序,而方差分析可确定各因素影响作用是否显著,即均方值 S 越大,对采煤机装煤效果影响越显著,因素越重要。由表 2 可知, $S(A) > S(C) > S(B) > S(D)$,则对采煤机装煤率的影响因素中,A 高度显著,B 和 C 显著,D 显著程度最小。

3.2.3 因素趋势分析

以各因素水平为横坐标,装煤率均值 k 为纵坐标,利用 Matlab 软件绘制各因素与装煤率的趋势图。如图 11 所示。由图 11 可知,装煤率随着滚筒截深及牵引速度的增加而增大,但所增加的趋势有所不同。滚筒截深增加,装煤率呈现急速上升的趋势,而牵引速度增加,装煤率则呈现平缓上升的趋势。随着滚筒转速的增加,装煤率随之先增大后减小,且在 2 水平处出现极大值。随着叶片螺旋升角的增加,装煤率随之线性减小,但变化不大。

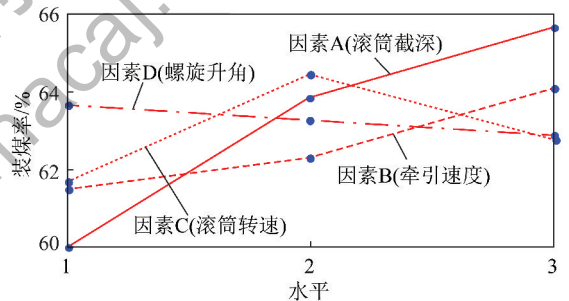


图 11 因素趋势分析

Fig. 11 Factor trend analysis

3.2.4 最优水平分析

根据表 2 中各因素的 k 值及图 11 可得出各因素的最优水平,因素 A, B, C, D 的最优水平分别为 A_3 , B_3 , C_2 , D_1 。根据采煤机的实际工作条件,可对其最优方案进行调整。由于因素 A (截深)对采煤机影响最显著,则可直接选择其最优水平 A_3 (截深为 800 mm)作为采煤机的最优参数。在确保采煤机滚筒不发生堵塞的情况下,应尽可能增大采煤机牵引速度来提高煤体的填充率,因此因素 B (牵引速度)的最优水平选为 B_3 (牵引速度为 10 m/min)。综合考虑截割电机功率及采煤机牵引速度与滚筒转速的匹配情况,确定滚筒转速的最优水平为 C_2 (滚筒转速为 58 r/min)。滚筒截深较大时,应尽量减小叶片螺旋升角以提高煤体的轴向速度,因此选用 D_2 (螺旋升角为 13°)作为该型采煤机的最优参数。则 MG400/951-WD 新型薄煤层采煤机截割坚固性系数为 1.95 的煤层时,其参数的最优设计方案为:滚筒截深为

800 mm, 牵引速度为 10 m/min, 滚筒转速为 58 r/min, 螺旋升角为 13°。以此优化结果设计的采煤机的装煤率较优化前提高了 26%, 大大提高了企业的经济效益, 具有较好的理论意义和广阔的应用前景。

4 结 论

(1) 通过散体力学对煤岩颗粒进行运动学分析, 得出煤岩颗粒的轴向速度公式及滚筒装煤率的理论公式。基于 Matlab 绘制了采煤机滚筒转速、叶片螺旋升角与理论装煤量的关系曲面, 得出当滚筒转速较小时, 叶片螺旋升角对装煤量的影响不大。而当螺旋升角一定时, 滚筒转速增大, 理论装煤量随之增大。

(2) 利用 EDEM 离散元软件建立了采煤机截割部仿真模型, 并通过仿真结果与理论分析结果的对比, 验证了利用离散元法对滚筒装煤效果仿真的可行性。EDEM 数值模拟为煤矿机械采煤效率的研究提供了一种新的理念和方法, 具有重要的理论意义及较强的工程应用价值。

(3) 基于 EDEM 数值模拟仿真, 对采煤机牵引速度、滚筒转速、叶片螺旋升角及滚筒截深进行了四因素三水平正交试验, 得出滚筒截深对采煤机装煤率影响最大, 其次是牵引速度及滚筒转速, 影响最小的因素是叶片螺旋升角。

(4) 结合采煤机的实际工作情况, 得出新型薄煤层采煤机装煤性能最优的设计方案为滚筒截深为 800 mm, 牵引速度为 10 m/min, 滚筒转速为 58 r/min, 螺旋升角为 13°, 其装煤率较优化前提高了 26%, 且工作状态良好, 性能稳定。

参考文献 (References):

[1] 李晓豁, 李婷, 焦丽, 等. 滚筒采煤机截割载荷的模拟系统开发及其模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 502-506.
Li Xiaohuo, Li Ting, Jiao Li, et al. Development of cutting load simulation system and its simulation study on drum shear[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 502-506.

[2] 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.

[3] 赵丽娟, 田震. 薄煤层采煤机截割部动态特性仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(9): 1329-1334.
Zhao Lijuan, Tian Zhen. Simulation on dynamic characteristics of cutting unit for thin seam shearer[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(9): 1329-1334.

[4] 刘长钊, 秦大同, 廖映华. 采煤机截割部机电传动系统动力学特

性分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 14-22.
Liu Changzhao, Qin Datong, Liao Yinghua. Dynamic analysis for the cutting electromechanical transmission system in the long-wall shearer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 14-22.

[5] Wang Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 153-260.

[6] 赵宏梅. 基于相似理论的叶片倾斜布置螺旋滚筒装煤性能的研究[J]. 机械设计与制造, 2009, 34(7): 163-165.
Zhao Hongmei. Research on loading performance of lean vanes based on similarity for spiral drum[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009, 34(7): 163-165.

[7] 赵丽娟, 马强, 刘旭南, 等. 新型薄煤层采煤机装煤量与可靠性研究[J]. 机械设计, 2014, 31(7): 97-101.
Zhao Lijuan, Ma Qiang, Liu Xunan, et al. Coal capacity and reliability research on a new shearer working in shin coal seam[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(7): 97-101.

[8] 王玉宝. 影响小直径滚筒采煤机筒装煤性能因素分析[J]. 中国煤炭, 2006, 32(9): 48-49.
Wang Yubao. Analysis the factors of coal capacity of small diameter drum of shearer[J]. China Coal, 2006, 32(9): 48-49.

[9] 王传礼, 王鸿萍. 新型螺旋滚筒装煤性能的理论研究[J]. 煤矿机械, 2001, 40(2): 15-16.
Wang Chuanli, Wang Hongping. Research on coal capacity of a new shearer[J]. Coal Mine Machinery, 2001, 40(2): 15-16.

[10] Ayhan M, Eyyuboglu E M. Comparison of globoid and cylindrical shearer drums' loading performance[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2011, 66(7): 51-56.

[11] Rojek Jerzy, Oñate Eugenio, Labra Carlos, et al. Discrete element simulation of rock cutting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(6): 996-1010.

[12] Su O, Ali Akcın N. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(3): 434-442.

[13] 李晓豁, 林其岳, 何洋. 基于 GAAA 算法的螺旋钻采煤机输送机构参数的优化[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 498-501.
Li Xiaohuo, Lin Qiyue, He Yang. Parameter optimization of spiral conveyor for coal auger based on GAAA algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 498-501.

[14] 李晓豁, 穆永成, 石宁. 基于 PSO-GACA 的采煤机螺旋滚筒参数优化设计[J]. 广西大学学报, 2012, 37(3): 561-566.
Li Xiaohuo, Mu Yongcheng, Shi Ning. Parameter optimization design of screw drum for drum shearer based on PSO-GACA algorithm[J]. Journal of Guangxi University, 2012, 37(3): 561-566.

[15] 刘送永, 杜长龙, 崔新霞. 采煤机滚筒截齿排列的试验研究[J]. 中南大学学报, 2009, 40(5): 1281-1287.
Liu Songyong, Du Changlong, Cui Xinxia. Experimental research on picks arrangement of shearer drum[J]. Journal of Central South University, 2009, 40(5): 1281-1287.

[16] 刘春生, 张才, 赵红梅. 采煤机滚筒轴向力分析及定量估计[J]. 煤矿机械, 1998, 19(9): 14-17.
Liu Chunsheng, Zhang Cai, Zhao Hongmei. Analysis and quantita-

- tive estimation of stoker force in axial direction of drum of shearer [J]. *Coal Mine Machinery*, 1998, 19(9): 14-17.
- [17] 李贵轩, 李晓豁. 采煤机械设计[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1994: 89-96.
Li Guixuan, Li Xiaohuo. *Coal winning machine design* [M]. Shenyang: Liaoning University Press, 1994: 89-96.
- [18] 刘春生, 于信伟, 任昌玉. 滚筒式采煤机工作机构[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010: 51-52.
Liu Chunsheng, Yu Xinwei, Ren Changyu. *Working mechanism of drum shearer* [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 51-52.
- [19] 王刚, 袁康, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元法的锚固节理剪切行为宏观研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(12): 2381-2389.
Wang Gang, Yuan Kang, Jiang Yujing, et al. Macro-micro mechanical study on bolted joint subjected to shear loading based on DEM [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(12): 2381-2389.
- [20] 曹秒艳, 董国疆, 赵长财. 基于离散元法的固体颗粒介质传力特性研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(14): 62-69.
Cao Miaoyan, Dong Guojiang, Zhao Changcai. Research on pressure-transfer characteristics in the solid granule medium forming based on the discrete element method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(14): 62-69.