文章编号: 1671-251X(2022)10-0129-07　　DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022050041

采煤机螺旋滚筒装煤性能优化

李明昊[1]，牛昊[1]，范佳艺[2]，赵丽娟[3,4]，乔捷[1]

（1. 沈阳理工大学 机械工程学院，辽宁 沈阳 110159；2. 沈阳航空航天大学 机电工程学院，辽宁 沈阳 110136；3. 辽宁工程技术大学 机械工程学院，辽宁 阜新 123000；4. 辽宁省大型工矿装备重点实验室，辽宁 阜新 123000）

摘要: 螺旋滚筒是采煤机截割煤岩的直接机构，螺旋滚筒几何参数和截割策略的优化设计对提高滚筒装煤性能有重要影响。现有基于有限元和二维离散元法的螺旋滚筒优化设计大多基于单一或部分因素，未综合考虑多设计变量对螺旋滚筒装煤性能的影响，难以同时得到几何参数及运动学参数最优解。针对该问题，基于煤的物理力学特性参数测试结果，利用离散元分析软件 EDEM 构建采煤机螺旋滚筒截割煤壁耦合模型，对采煤机螺旋滚筒的装煤性能进行数值模拟，采用单因素法分析了螺旋滚筒螺旋升角、直径、筒毂直径、截割深度、转速及牵引速度对装煤性能的影响；基于离散元分析结果设计螺旋滚筒三因素三水平正交试验，通过极差分析得出几何参数中滚筒直径、筒毂直径、螺旋升角，运动学参数中截割深度、滚筒转速、牵引速度对螺旋滚筒装煤性能的影响依次减小；根据正交试验结果得出螺旋滚筒最优几何参数方案为 13°螺旋升角、1 300 mm 滚筒直径、475 mm 筒毂直径，最优截割策略为 600 mm 截割深度、58 r/min 滚筒转速、8 m/min 牵引速度，最优参数下螺旋滚筒装煤率为 76.39%，较优化前提高了 15.82%。

关键词: 采煤机；螺旋滚筒；装煤性能优化；离散元法；正交试验

中图分类号: TD421　　文献标志码: A

Optimization of coal loading performance of shearer screw drum

LI Minghao[1], NIU Hao[1], FAN Jiayi[2], ZHAO Lijuan[3,4], QIAO Jie[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
3. College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;
4. Liaoning Provincial Key Laboratory of Large-Scale Mining Equipment, Fuxin 123000, China)

Abstract: The screw drum is the direct mechanism of the shearer cutting coal and rock. The optimization design of geometric parameters and cutting strategy of screw drum has an important impact on improving coal loading performance of drum. The existing optimization design schemas of the screw drum based on the finite element method and the two-dimensional discrete element method are mostly based on a single factor or part factors. The influence of multiple design variables on the coal loading performance of the screw drum is not comprehensively considered. It is difficult to obtain the optimal solution of the geometric parameters and kinematic parameters simultaneously. In order to solve this problem, based on the test results of the physical and mechanical properties of coal, the coupling model of the shearer's screw drum cutting coal wall is established by

收稿日期: 2022-05-16; **修回日期**: 2022-10-12; **责任编辑**: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51674134)；辽宁省博士科研启动基金计划项目(2020-BS-153)；辽宁省教育厅青年科技人才“育苗”项目(LG202029)。

作者简介: 李明昊(1990—)，男，辽宁铁岭人，副教授，博士，研究方向为机械系统动力学分析与控制、刚柔耦合可靠性技术，E-mail: lmh0315@126.com。通信作者: 牛昊(2000—)，男，山西晋中人，硕士研究生，研究方向为现代设计理论与应用技术，E-mail: nh0509@126.com。

引用格式: 李明昊，牛昊，范佳艺，等. 采煤机螺旋滚筒装煤性能优化[J]. 工矿自动化，2022，48(10)：129-135.
LI Minghao, NIU Hao, FAN Jiayi, et al. Optimization of coal loading performance of shearer screw drum[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(10): 129-135.

扫码移动阅读

using discrete element analysis software EDEM. The numerical simulation of coal loading performance of the shearer's screw drum is carried out. The single-factor method is used to analyze the influence of the spiral angle, diameter, hub diameter, cutting depth, drum rotation rate and traction speed of the screw drum on the coal loading performance. The three factors and three levels orthogonal test of the screw drum is designed based on the results of discrete element analysis. Through range analysis, the influence of geometric parameters of drum diameter, drum hub diameter and spiral rise angle, and kinematic parameters of cutting depth, drum rotation rate and traction speed on the coal loading performance of the screw drum is reduced in turn. According to the orthogonal test results, the optimal geometric parameters of the screw drum are 13° spiral rise angle, 1300 mm drum diameter and 475 mm drum hub diameter. The optimal cutting strategy is that the cutting depth is 600 mm, the drum rotation rate is 58 r/min, and the traction speed is 8 m/min. Under the optimal parameters, the coal loading rate of the screw drum is 76.39%, which is 15.82% higher than before.

Key words: shearer; screw drum; coal loading performance optimization; discrete element method; orthogonal test

0 引言

螺旋滚筒是采煤机破煤和装煤的直接机构，其装煤性能对采煤机工作效率有直接影响。如果螺旋滚筒破煤之后不能实现有效装煤，残留的浮煤落在采空区需人工清理，影响综采工作面生产效率，且受工作面气流影响，易形成浮煤飞扬，危害工作面人员身体健康，对工作面安全生产带来隐患。提高采煤机螺旋滚筒的装煤性能，最大程度地消除工作面安全隐患，是螺旋滚筒优化设计领域的重点研究课题。

目前，螺旋滚筒的优化设计主要采用有限元法和二维离散元法[1]。文献[2]针对薄煤层采煤机滚筒的装煤性能进行了分析，基于理论公式和二维离散元法得到螺旋滚筒不同设计变量对装煤性能的影响程度。文献[3]基于采煤机螺旋滚筒的装载机理和截割性能分析，得到螺旋滚筒优化设计变量对螺旋滚筒综合性能的影响程度，但未求出最优解，且设计变量不丰富。文献[4]针对井下特殊条件，研究了工作面倾角对采煤机滚筒装煤效果的影响，并得出定量化规律。文献[5]采用有限元法研究了异形滚筒的装煤性能和块煤率，通过多组仿真得到了筒毂锥顶半角的最优解。现有研究大多基于单一或部分因素对螺旋滚筒进行优化，未综合考虑螺旋滚筒设计变量对装煤性能的影响。而螺旋滚筒设计变量多，难以同时得到滚筒几何参数及运动学参数的最优解。针对该问题，本文基于煤的物理力学特性测试结果，建立了螺旋滚筒截割煤壁耦合模型；对采用不同设计变量时的螺旋滚筒模型进行装煤性能仿真，得到滚筒设计变量对装煤性能的影响规律；基于正交试验法设计螺旋滚筒的三因素三水平正交试验，得到螺旋滚筒最优几何参数和截割策略。

1 离散元数值模拟理论

1.1 煤颗粒接触模型

离散元法主要思想是将物体分成若干个离散体，通过设置离散体之间的接触模型[6]对其进行数值模拟分析。构建接触模型是离散元法的关键。

本文将煤颗粒设置为球体。假设 2 个煤颗粒分别以速度v_1, v_2和角速度 ω_1, ω_2 运动并产生接触[7]，接触模型如图 1 所示。其中F_{cn}, F_{ct}, F_{dn}, F_{dt}分别为煤颗粒之间的法向接触力、切向接触力、法向接触阻尼力、切向接触阻尼力，R_1, R_2 为 2 个煤颗粒的半径。

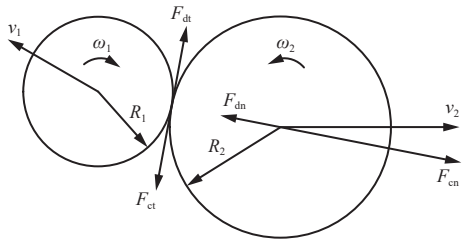

图 1 煤颗粒接触模型

Fig. 1 Coal particles contact model

基于煤颗粒受力分析，结合常用的 Hertz 接触模型，建立煤颗粒接触模型的力与位移关系式：

$$F = \frac{4}{3}E^{*}R^{*\frac{1}{2}}\varepsilon^{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

$$U = \left(\frac{3FR^{*}}{4E^{*}}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2}$$

式中：F 为煤颗粒之间的作用力；E^{*}为煤颗粒之间的等效弹性模量；R^{*}为煤颗粒之间的接触半径；ε为煤颗粒相互重叠值；U 为煤颗粒之间的相对位移。

煤颗粒在破碎碰撞过程中的法向刚度 k_n、切向刚度 k_s 分别为

$$k_n = \frac{2E}{3(1-\mu^2)} R^{*\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$k_s = \left(\frac{E}{1+\mu}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{[12(1-\mu)R^* F_n]^{\frac{1}{3}}}{2-\mu} \tag{4}$$

式中：E 为煤颗粒的弹性模量；μ为煤颗粒的泊松比；F_n 为煤颗粒在破碎碰撞过程中的法向力。

1.2　煤颗粒运动学分析模型

螺旋滚筒通过截齿截割煤层，通过螺旋叶片装煤。建立被截落的煤颗粒与螺旋叶片之间的运动学分析模型[8-9]，如图 2 所示。其中 P_t 为落煤切向力，P_x 为轴向抛煤力，N为叶片对煤颗粒产生的正压力，β为螺旋叶片升角。

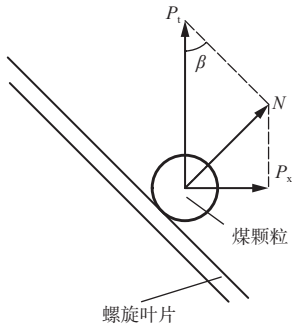

图 2　煤颗粒运动学分析模型

Fig. 2　Kinematics analysis model of coal particles

对煤颗粒进行平衡受力分析，得

$$\begin{cases} P_t = N(\sin\beta + \alpha\cos\beta) \\ P_x = N(\cos\beta - \alpha\sin\beta) \end{cases} \tag{5}$$

式中α为叶片与煤颗粒之间的摩擦因数。

基于煤颗粒运动学分析理论，得到螺旋滚筒装煤功率：

$$p = 0.001 N v_t(\sin\beta + \alpha\cos\beta) \tag{6}$$

式中 v_t 为煤颗粒切向速度。

$$v_t = \pi m D_1 \sin\beta \sin(\beta+\rho)/\cos\rho \tag{7}$$

式中：m 为滚筒转速；D_1 为煤颗粒所处位置与滚筒回转中心的距离；ρ为摩擦角。

基于式(7)可得

$$N = \frac{100\cos\rho v_q v_j K_z}{\pi m^2 D_2 \sin\beta \sin(\beta+\rho)(\sin\beta + \alpha\cos\beta)} \tag{8}$$

式中：v_q为牵引速度；v_j为截齿截割的线速度；K_z为装煤阻力系数；D_2为螺旋滚筒直径。

2　基于离散元的螺旋滚筒装煤性能分析

2.1　煤物理力学特性测试

选取切割机将煤样切割成标准试样，采用捣碎法、比重瓶和烘干法测试煤样的物理特性，如图 3 所示。测得煤样密度为 1 325.5 kg/m^3，天然含水率为 8.63%，孔隙率为 9.53%，坚固性系数为 2.0，弹性模量为 4 388 MPa，泊松比为 0.23。

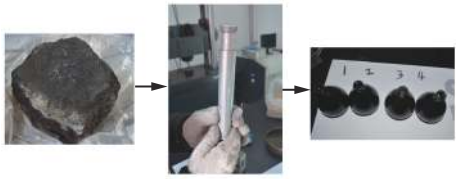

图 3　煤样物理特性测试

Fig. 3　Physical characteristics test of coal samples

选取电阻应变片和微机控制电子式万能试验机测试煤样的力学特性，如图 4 所示。测得煤样抗拉强度为 1.08 MPa，抗压强度为 17.71 MPa。

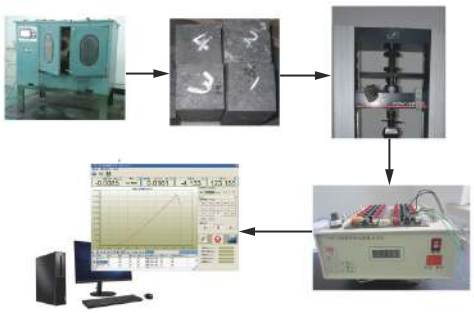

图 4　煤样力学特性测试

Fig. 4　Mechanical characteristic test of coal samples

2.2　滚筒截割煤壁耦合模型建立

基于煤样物理力学特性测试数据，采用离散元分析软件 EDEM 建立煤壁。以 MG400/950 型采煤机为研究对象，为使滚筒装煤性能最优且不堵塞叶片，选取 2 头的 TY1150 型顺序式排列螺旋滚筒，截割方式为抛射截割。建立螺旋滚筒截割煤壁耦合模型，如图 5 所示。

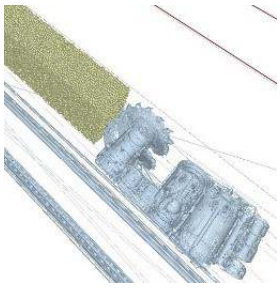

图 5　螺旋滚筒截割煤壁耦合模型

Fig. 5　Coupling model of screw drum cutting coal wall

2.3　装煤性能仿真

设置 EDEM 仿真步长为 0.1 s，仿真时间为 10 s；采煤机牵引速度为 4 m/min，滚筒转速为 58 r/min。仿真得到的采煤机螺旋滚筒装煤效果如图 6 所示。

对采煤机螺旋滚筒装煤效果进行统计分析。将煤颗粒落在刮板输送机上的有效装煤区域定义为区域Ⅰ，落在刮板输送机以外的其他区域定义为区域

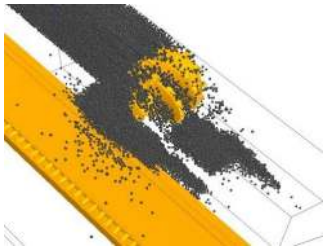

图 6　螺旋滚筒装煤效果仿真结果

Fig. 6　Simulation results of coal loading effect of screw drum

Ⅱ，如图 7 所示。则采煤机装煤率为落在区域Ⅰ的煤质量与截落的所有煤质量之比[10]。利用 EDEM 后处理模块统计采煤机装煤率，可知该工况下装煤颗粒数为 8 028，未成功装煤颗粒数为 5 225，装煤率为 60.57%。

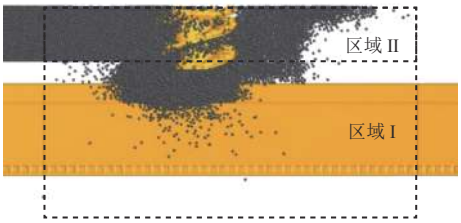

图 7　螺旋滚筒装煤效果统计

Fig. 7　Statistics of coal loading effect of screw drum

3　螺旋滚筒设计变量对装煤性能的影响分析

螺旋滚筒的螺旋升角、直径、筒毂直径、截割深度、转速和牵引速度是影响装煤效果的重要因素，其中滚筒直径影响螺旋叶片的几何形状，筒毂直径影响滚筒容煤量，螺旋升角影响滚筒截齿的位置和滚筒排煤效果[11]。将上述 6 种参数选为螺旋滚筒设计变量，初始值分别为 13°，1 150 mm，525 mm，800 mm，58 r/min，8 m/min。采用单因素法研究各变量对螺旋滚筒装煤性能的影响。

3.1　螺旋升角对装煤率的影响

设置螺旋升角分别为 8，11，13，15，18°，其他设计变量均取初始值，计算采煤机装煤率，并对计算结果进行数据拟合，得到螺旋升角对装煤率的影响规律，如图 8 所示。

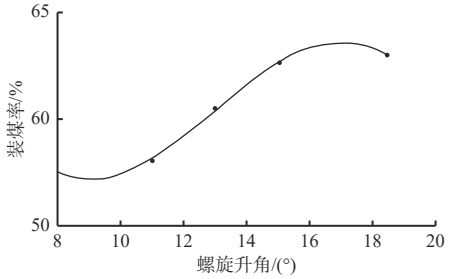

图 8　螺旋升角对采煤机装煤率的影响规律

Fig. 8　Influence law of spiral rising angle on coal loading rate of shearer

从图 8 可看出，随着螺旋升角增大，装煤率增大，但后期增长速度减缓。这是因为随着螺旋升角增大，煤颗粒与螺旋叶片接触时速度得到提升，使较多的煤颗粒落在区域Ⅰ，提高了装煤率。当螺旋升角超过 17°时，煤颗粒的法向速度和轴向速度产生临界值的改变，煤颗粒加速度降低，使得装煤率呈缓慢增长趋势。

3.2　螺旋滚筒直径对装煤率的影响

设置滚筒直径分别为 1 050，1 100，1 150，1 200，1 300 mm，其他设计变量均取初始值，计算采煤机装煤率，并对分析结果进行数据拟合，得到滚筒直径对装煤率的影响规律，如图 9 所示。

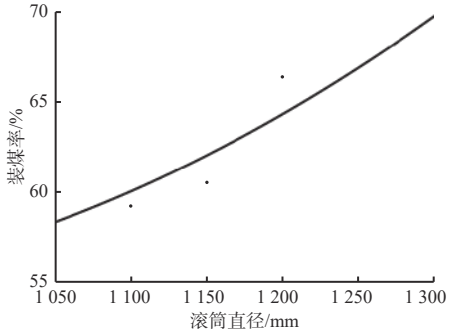

图 9　滚筒直径对采煤机装煤率的影响规律

Fig. 9　Influence rule of drum diameter on coal loading rate of shearer

从图 9 可看出，采煤机装煤率随滚筒直径增大而增大。这是因为滚筒直径增大时，采煤机容煤量增加，使螺旋叶片内的煤颗粒更多地落到区域Ⅰ上，提高了装煤率。

3.3　筒毂直径对装煤率的影响

设置筒毂直径分别为 475，500，525，550，570 mm，其他设计变量均取初始值，计算采煤机装煤率，并对分析结果进行数据拟合，得到筒毂直径对装煤率的影响规律，如图 10 所示。

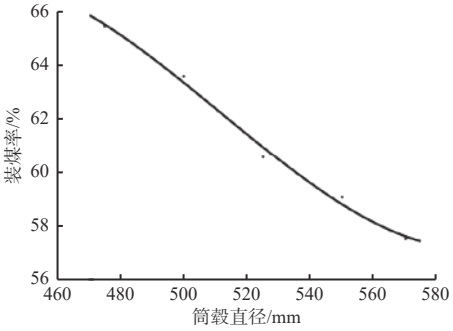

图 10　筒毂直径对采煤机装煤率的影响规律

Fig. 10　Influence rule of hub diameter on coal loading rate of shearer

从图 10 可看出，采煤机装煤率随筒毂直径增大而减小。这是因为随着筒毂直径增大，采煤机容煤

量减小，不利于螺旋叶片内的煤颗粒落到区域 I 上，降低了装煤率。

3.4　截割深度对装煤率的影响

设置截割深度分别为 600, 650, 700, 750, 800 mm，其他设计变量均取初始值，计算采煤机装煤率，并对计算结果进行数据拟合，得到截割深度对装煤率的影响规律，如图 11 所示。

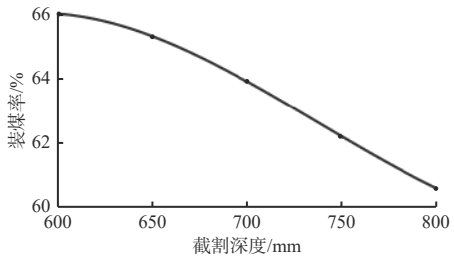

图 11　截割深度对采煤机装煤率的影响规律

Fig. 11　Influence law of cutting depth on coal loading rate of shearer

从图 11 可看出，随着截割深度增大，装煤率减小。这是因为截割深度增大时，开采深度增加，使得螺旋滚筒端盘处的煤颗粒不能及时经过螺旋叶片排出，落在区域 Ⅱ，降低了装煤率。

3.5　滚筒转速对装煤率的影响

设置滚筒转速分别为 50, 54, 58, 62, 66 r/min，其他设计变量均取初始值，计算采煤机装煤率，并对分析结果进行数据拟合，得到滚筒转速对装煤率的影响规律，如图 12 所示。

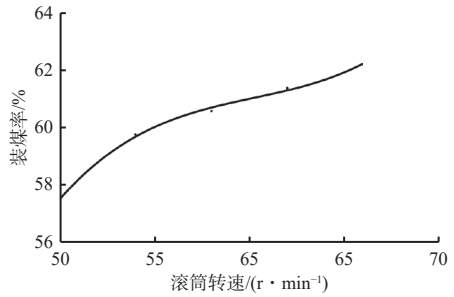

图 12　滚筒转速对采煤机装煤率的影响规律

Fig. 12　Influence of drum rotation rate on coal loading rate of shearer

从图 12 可看出，装煤率随滚筒转速提高而增大。这是因为随着滚筒转速增大，煤颗粒以更快的速度经螺旋叶片排出，提高了装煤率。

3.6　牵引速度对装煤率的影响

设置牵引速度为分别 6, 7, 8, 9, 10 m/min，其他设计变量均取初始值，计算采煤机装煤率，并对计算结果进行数据拟合，得到牵引速度对装煤率的影响规律，如图 13 所示。

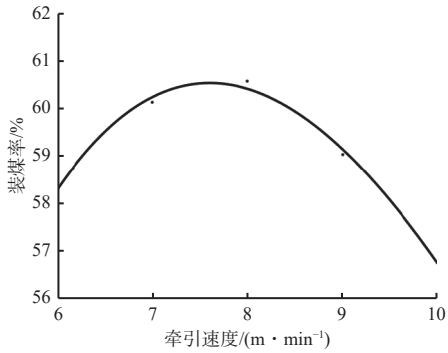

图 13　牵引速度对采煤机装煤率的影响规律

Fig. 13　Influence law of traction speed on coal loading rate of shearer

从图 13 可看出，装煤率随牵引速度的提高呈先增大后减小的变化规律。这是因为牵引速度较小时，截割的煤颗粒较少，螺旋叶片内部容纳的煤颗粒因螺旋叶片内运动空间较大，向螺旋叶片边缘处运动，不能及时有效地经螺旋叶片排出。随着牵引速度增大，上述现象得到一定程度改善。但当牵引速度超过 8 m/min 时，截割的煤颗粒超过滚筒容煤量，造成煤颗粒堵塞，降低了装煤率。

4　螺旋滚筒优化及截割策略研究

4.1　多因素分析

螺旋滚筒的单因素分析不能完全反映各设计变量对装煤性能的影响。正交试验法可分析螺旋滚筒多个设计变量在交互作用下对装煤性能的影响[12]。

4.1.1　正交试验设计

将螺旋升角、滚筒直径、筒毂直径、截割深度、滚筒转速、牵引速度 6 种设计变量作为试验因素，分别定义为 a, b, c, d, e, f。基于单因素分析结果，对 6 种试验因素分别选取不同的水平，见表 1。

表 1　正交试验因素水平

Table 1　Factor levels of orthogonal test

设计变量	符号	水平		
		1	2	3
螺旋升角/(°)	a	11	13	15
滚筒直径/mm	b	1 050	1 150	1 300
筒毂直径/mm	c	475	525	570
截割深度/mm	d	600	700	800
滚筒转速 /(r·min⁻¹)	e	54	58	62
牵引速度/(m·min⁻¹)	f	7	8	9

以螺旋升角、滚筒直径、筒毂直径作为几何因素，截割深度、滚筒转速、牵引速度作为运动学因素，按照 $L_9 3^3$ 正交表进行离散元模拟试验，结果见表 2—表 5。其中 X_r 为因素 X(X=a, b, c, d, e, f)的第

r(r=1, 2, 3)个水平值; L_1, L_2, L_3 分别为对应的因素水平为 1, 2, 3 时的装煤率之和; l_1, l_2, l_3 分别为 L_1, L_2, L_3 平均值。

表 2　几何因素正交试验结果

Table 2　Orthogonal test results of geometric factors

试验编号	因素水平			装煤率/%
	a	b	c	
1	a_1	b_1	c_1	61.47
2	a_1	b_2	c_2	58.07
3	a_1	b_3	c_3	63.87
4	a_2	b_1	c_2	59.06
5	a_2	b_2	c_3	57.54
6	a_2	b_3	c_1	74.23
7	a_3	b_1	c_3	58.08
8	a_3	b_2	c_1	67.48
9	a_3	b_3	c_2	71.38

表 3　几何因素极差分析

Table 3　Range analysis of geometrical factors

指标	a/(°)	b/mm	c/mm
L_1	183.41	178.61	203.18
L_2	190.83	183.09	188.51
L_3	196.94	209.48	179.49
l_1	61.14	59.54	67.73
l_2	63.61	61.03	62.84
l_3	65.65	69.83	59.83
极差	4.51	10.29	7.90

表 4　运动学因素正交试验结果

Table 4　Orthogonal test results of kinematic factors

试验编号	因素水平			装煤率/%
	d	e	f	
1	d_1	e_1	f_1	61.47
2	d_1	e_2	f_2	62.66
3	d_1	e_3	f_3	61.94
4	d_2	e_2	f_1	60.13
5	d_2	e_3	f_2	61.37
6	d_2	e_1	f_3	58.25
7	d_3	e_3	f_1	57.72
8	d_3	e_1	f_2	56.54
9	d_3	e_2	f_3	55.82

4.1.2　极差分析

极差反映了设计变量的波动性，通过极差分析可得到设计变量的影响程度。极差越大，表明该因素的影响程度越大[13]。由表 3 可知，因素 b, c, a 的极差依次减小，表明几何因素对采煤机螺旋滚筒装煤性能的影响程度由大到小依次为滚筒直径、筒毂直径、螺旋升角。由表 5 可知，因素 d, e, f 的极差依次减小，表明运动学因素对采煤机螺旋滚筒装煤性能的影响程度由大到小依次为截割深度、滚筒转速和牵引速度。

表 5　运动学因素极差分析

Table 5　Range analysis of kinematic factors

指标	d/mm	e/(r·min^{-1})	f/(m·min^{-1})
L_1	186.07	176.26	179.32
L_2	179.75	178.61	180.57
L_3	170.08	181.03	176.01
l_1	62.02	58.75	59.77
l_2	59.92	59.54	60.19
l_3	56.69	60.34	58.67
极差	5.33	1.59	1.52

4.2　螺旋滚筒优化及截割策略分析

由表 2 和表 3 可知，螺旋滚筒几何参数设计变量螺旋升角、滚筒直径和筒毂直径的最优水平分别为 a_2, b_3, c_1，因此几何参数最优设计方案为 13°螺旋升角、1 300 mm 滚筒直径、475 mm 筒毂直径。该设计变量水平下采煤机装煤率为 74.23%。

由表 4 和表 5 可知，螺旋滚筒运动学参数设计变量截割深度、滚筒转速和牵引速度的最优水平分别为 d_1, e_2, f_2，即最优截割策略为 600 mm 截割深度、58 r/min 滚筒转速、8 m/min 牵引速度。该设计变量水平下采煤机装煤率为 62.66%。

选取上述螺旋滚筒最优参数进行滚筒截割煤壁的 EDEM 仿真，得到采煤机装煤率为 76.39%，较优化前提高了 15.82%。

5　结论

（1）基于煤的物理力学特性参数测试结果，采用离散元分析软件 EDEM 构建了采煤机螺旋滚筒截割煤壁耦合模型，仿真得到螺旋滚筒截割煤层时的装煤性能数据。

（2）基于离散元分析结果，利用单因素法分析了螺旋滚筒几何参数和运动学参数对截割性能的影响。利用正交试验法设计了螺旋滚筒三因素三水平正交试验，通过极差分析得出几何参数中滚筒直径、筒毂直径、螺旋升角对采煤机螺旋滚筒装煤性能的影响依次减小，运动学参数中截割深度、滚筒转速、牵引速度对螺旋滚筒装煤性能的影响依次减小。

（3）基于正交试验分析结果，得到螺旋滚筒最优

几何参数方案为 13°螺旋升角、1 300 mm 滚筒直径、475 mm 筒毂直径，最优截割策略为 600 mm 截割深度、58 r/min 滚筒转速、8 m/min 牵引速度。优化后的采煤机装煤率为 76.39%，较优化前提高了 15.82%。

参考文献（References）：

[1] 赵丽娟，王雅东，刘旭南. 薄煤层采煤机强力螺旋滚筒设计研究[J]. 机械科学与技术，2019，38(11)：1712-1719.
ZHAO Lijuan，WANG Yadong，LIU Xu'nan. Design and simulation on powerful screw drum of thin coal seam shearer[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2019，38(11)：1712-1719.

[2] 高魁东. 薄煤层滚筒采煤机装煤性能研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2014.
GAO Kuidong. Study on coal-loading performance of thin coal seam shearer[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2014.

[3] 曹杨，王灿，薛玉刚. 采煤机螺旋滚筒装载机理分析[J]. 煤矿机械，2015，36(9)：127-128.
CAO Yang，WANG Can，XUE Yugang. Mechanism analysis of shearer screw drum loading[J]. Coal Mine Machinery，2015，36(9)：127-128.

[4] 王灿. 工作面倾角对采煤机滚筒装煤效果影响研究[J]. 煤矿机械，2021，42(6)：56-57.
WANG Can. Research on influence of working face inclination angle on coal loading effect of shearer drum[J]. Coal Mine Machinery，2021，42(6)：56-57.

[5] 徐盼盼，刘送永，刘洋洋. 薄煤层采煤机鼓形滚筒装煤性能研究[J]. 煤炭科学技术，2020，48(3)：93-99.
XU Panpan，LIU Songyong，LIU Yangyang. Research on coal loading performance of globoid drum in thin coal seam shearer[J]. Coal Science and Technology，2020，48(3)：93-99.

[6] LIU Songyong，DU Changlong，ZHANG Jiajia，et al. Parameters analysis of shearer drum loading performance[J]. Mining Science and Technology，2011，21(5)：621-624.

[7] 田震，赵丽娟，张建军，等. 复杂煤层赋存条件下螺旋滚筒力学行为研究[J]. 机械科学与技术，2019，38(7)：1041-1047.
TIAN Zhen，ZHAO Lijuan，ZHANG Jianjun，et al. Study on mechanical behaviour of spiral drum under complex condition of coal seam[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2019，38(7)：1041-1047.

[8] 田震，赵丽娟，刘旭南，等. 基于离散元法的螺旋滚筒装煤性能研究[J]. 煤炭学报，2017，42(10)：2758-2764.
TIAN Zhen，ZHAO Lijuan，LIU Xunan，et al. Loading performance of spiral drum based on discrete element method[J]. Journal of China Coal Society，2017，42(10)：2758-2764.

[9] 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细观研究[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.

[10] 赵丽娟，范佳艺，刘雪景，等. 采煤机螺旋滚筒动态截割过程研究[J]. 机械科学与技术，2019，38(3)：386-391.
ZHAO Lijuan，FAN Jiayi，LIU Xuejing，et al. Exploring dynamic cutting process of shearer's drum[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2019，38(3)：386-391.

[11] 刘春生，于念君，张艳军. 极薄煤层采煤机滚筒的装煤过程与性能评价[J]. 黑龙江科技大学学报，2020，30(1)：86-93.
LIU Chunsheng，YU Nianjun，ZHANG Yanjun. Loading process and performance evaluation of shearer drum for extremely thin coal seams[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology，2020，30(1)：86-93.

[12] 马旭东，赵颖，刘元文，等. 基于正交试验的U型铜材模具参数优化[J]. 塑性工程学报，2022，29(1)：110-118.
MA Xudong，ZHAO Ying，LIU Yuanwen，et al. Parameter optimization of U-shaped copper mold based on orthogonal test[J]. Journal of Plasticity Engineering，2022，29(1)：110-118.

[13] 燕浩，刘梅清，梁兴，等. 基于正交试验大型轴流泵空化特性的数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2014，42(12)：35-40.
YAN Hao，LIU Meiqing，LIANG Xing，et al. Numerical simulation on cavitation characteristics of large-scale axial-flow pumps based on orthogonal experiment[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)，2014，42(12)：35-40.