DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80064

基于Rocky Dem的辊式制粉机磨辊结构优化

李 炎[1,2] 张 磊[1,2]

（1.长江大学机械工程学院,湖北 荆州 434023;
2.低碳催化与二氧化碳利用全国重点实验室(筹),湖北 武汉 430100）

摘要:[**目的**]设计一种辊式制粉机并对磨粉系统进行结构优化。[**方法**]利用Rocky Dem离散元方法以1~5 mm粒径数量来确定磨粉系统转速比、磨辊直径、齿顶宽、快辊转速等主要参数的结构范围。设计正交试验,建立仿真模型获得1~2,2~3,3~4,4~5 mm各区间粒径数量。使用层次分析法对4个区间指标赋予权值,通过优劣解距离法将4个指标融合成一个综合值作为判别试验结果的依据,并以此来衡量磨粉性能的好坏,直观分析得出最优结构。[**结果**]与初始结构相比,优化后磨粉细化颗粒数量增加10 196,性能提升了14.2%。[**结论**]磨辊直径对磨粉效果的影响最大,最优结构为磨辊直径270 mm,快辊转速700 r/min,转速比2.7,齿顶宽1.2 mm。

关键词:辊式制粉机;磨辊;结构优化;离散元仿真;正交试验

Optimization of roll structure in rollermill based on Rocky Dem discrete element simulation

LI Yan[1,2] *ZHANG Lei*[1,2]

（1. *College of Mechanical Engineering*, *Yangtze University*, *Jingzhou*, *Hubei* 434023, *China*; 2. *State Key Laboratory of Low Carbon Catalysis and Carbon Dioxide Utilization*, *Wuhan*, *Hubei* 430100, *China*）

Abstract: [**Objective**] Designed a roller mill and optimize the structure of the milling system. [**Methods**] Using the Rocky DEM discrete element method, determined the structural range of key parameters such as the speed ratio of the milling system, roller diameter, tooth top width, and fast roller speed based on the particle size quantity of 1~5 mm. Orthogonal experiments were designed, and the particle numbers in each interval of 1~2, 2~3, 3~4, and 4~5 mm were obtained by simulation models. The four interval indicators were assigned to the weight using hierarchical analysis. Further the four indicators were integrated into a comprehensive value as the basis for judging the experimental results through TOPSIS. The grinding performance was measured in terms of the comprehensive value and the optimal structure was analyzed visually. [**Results**] Compared with the initial structure, the number of grinding refined particles increased by 10 196, and the performance of scratch system improved by 14.2%. [**Conclusion**] The diameter of the grinding roller has the most significant impact on the grinding effect. The optimal structure for the rollermill includes a grinding roller diameter of 270 mm, a fast roller speed of 700 r/min, a speed ratio of 2.7, and a tooth top width of 1.2 mm.

Keywords: rollermill; grinding roller; structural optimization; discrete element simulation; orthogonal experiment

魔芋作为贫困山区“两高一优”农业产品,口感舒爽、富含神经酰胺等功能成分,具有药用保健价值[1]。为了降低魔芋潮湿霉变,提高贮藏运输能力,常对其进行干燥处理,但粉末粒度对于口感品质有一定影响[2]。传统磨粉采用石磨、研钵等工具,费时费力。随着自动化技术的进步,自动磨粉机已基本取代人力畜力,提高了磨粉效率。张芷豪等[3]通过EDEM离散元仿真软件对磨辊结构进行仿真分析,得到更优的快辊转速、间距和转速比参数。李聪[4]通过ANSYS对磨辊温度场进行分析,得出辊式磨粉机磨辊温升的影响要素、机理及传热规律,对降低温升预测辊体温度分布和提高制粉质量提供了重要的理论依据。高杨杨[5]通过磨辊动力学特征研究,得到了磨辊转

基金项目:石油天然气装备教育部重点实验室开放基金(编号:OGE202303-21)
通信作者:张磊(1987—),男,长江大学讲师,博士。E-mail:leizhangjx@yangtzeu.edu.cn
收稿日期:2024-01-17 **改回日期:**2024-06-30

速、不平衡量与磨辊振幅的参数关系。上述研究大多围绕磨辊的传热规律、振动规律以及对磨辊的转速、间距和转速比参数展开，而有关磨辊的结构参数和齿形参数研究较少。EDEM 软件以球体模型黏结键断裂仿真模拟破碎，与实际情形不符，且计算过程中需要大量颗粒填充，仿真计算量大[6]。

目前，离散元法已被广泛应用于磨粉机与物料颗粒动态仿真，并取得了显著成果。曹成茂等[6]利用 Rocky DEM 离散元仿真软件，以宁前胡排种器的排种轮转速和导种槽倾角为试验因素进行二次回归正交旋转组合试验，并利用回归模型进行参数优化，得到宁前胡排种器更优的结构参数。秦宽等[7]利用 Rocky DEM 建立了热固耦合下茶叶—锅槽相互作用的仿真模型，通过对茶叶平均速度及受力进行分析，确定了锅槽往复运动速率、锅槽挡板角度和锅槽与水平面夹角的最优工作参数。金利[8]利用 Rocky DEM 软件，以筛孔孔径、螺距、叶片与壳体间隙为因素，在各因素水平范围内进行三元二次正交旋转组合仿真试验，从而确定了玉米秸秆捡拾制粒机输送除土装置的最优结构参数。研究拟以 FMFQ(S)60×2 型辊式制粉机的磨粉系统为研究模型，应用 Rocky DEM 离散元方法，通过正交试验确定磨粉系统最佳的结构参数与运动参数，以期为辊式制粉机的结构设计和优化提供依据。

1　设计和方法

1.1　辊式制粉机工作原理

辊式制粉机整体结构如图 1 所示，由喂料系统、输送系统、传动系统和磨粉系统组成，其中磨粉系统是通过一对相同直径且带有特定齿形的圆柱形磨辊，以不同转速相向旋转，将喂入两辊之间待磨物料研磨成粉。磨辊模型如图 2 所示，辊体表面齿形如图 3 所示。磨粉系统初始设计参数见表 1，初始参数与 FMFQ(S)60×2 型辊式制粉机的磨粉系统相同。辊式制粉机总体工作流程：原料从喂料口进入，调节喂料口角度控制下料量，通过带轮机构运转输送带，将原料送入磨粉系统，经过研磨，磨粉成品从出粉口流出。

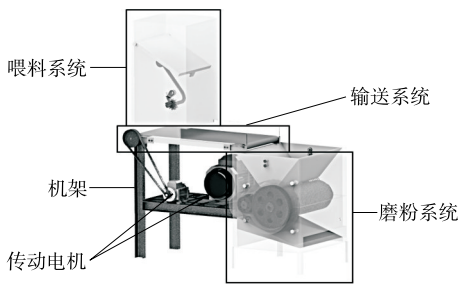


图 1　辊式制粉机模型图

Figure 1　Roller pulverizer model

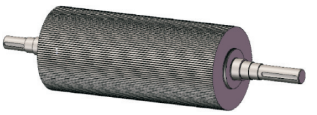


图 2　磨辊模型图

Figure 2　Grinding roll model

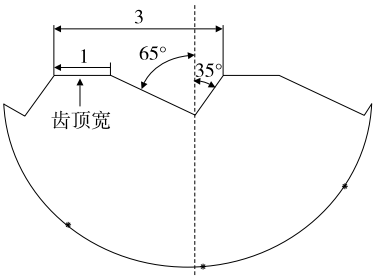


图 3　齿形图

Figure 3　Crenate

表 1　磨辊的初始结构参数与运动参数

Table 1　Initial structural and kinematic parameters of the grinding roll

转速比	磨辊直径/mm	齿顶宽/mm	快辊转速/(r·min^{-1})
2.5	250	1	600

1.2　磨粉系统仿真分析

磨粉系统是辊式制粉机的关键系统，其结构尺寸、运动参数、表面形状等影响粉末粒度，因此对磨粉机构进行结构优化，在最优结构下获得较细的魔芋粉颗粒。采用 Rocky DEM 软件对磨粉系统进行仿真试验计算，基于离散元方法对各种形状和尺寸的颗粒进行建模，构建颗粒的运输和磨辊间破碎过程，完成破碎颗粒粒径统计。

1.2.1　磨粉装置模型　为了简化仿真过程，仅考虑影响磨粉效果的关键零部件及支撑件、约束件，同时为了缩短仿真时间，将辊体和辊轴作为一个整体，并去除孔、圆角、倒角、阶梯轴等微小特征[9]，仿真模型如图 4 所示。

图 4　磨粉系统仿真模型

Figure 4　Simulation model of scratch system

1.2.2　颗粒模型　采用Rocky DEM中的Polyhedron颗粒单元,建立魔芋相似形状颗粒,设置垂直高宽比2,水平高宽比1,顶角个数50,颗粒形状如图5所示。颗粒大小为20~30 mm,其具体分布情况如图6所示。考虑到颗粒粒径和仿真效率,轧距设置为10 mm。

图5　颗粒模型

Figure 5　Particle model

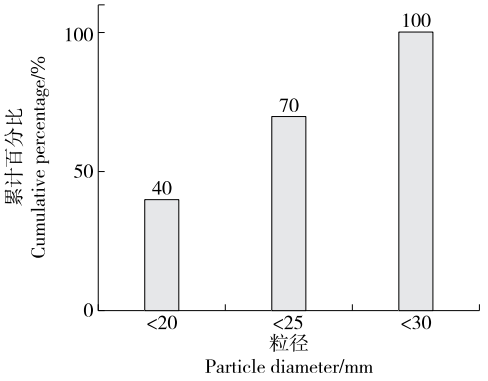


图6　颗粒数量分布图

Figure 6　Particle number distribution

1.2.3　边界条件　根据文献[10－11]确定材料参数及材料之间的接触参数,其数值见表2、表3。设置快辊和慢辊的运动框架,即转速和运动位置,法向接触模型为滞后线性弹簧模型(hysteretic linear spring),切性接触模型选用线性弹簧库伦极限模型(linear spring coulomb limit),求解时间3 s,采用GPU加速仿真运算,缩短仿真时间,提高效率。

表2　各材料参数

Table 2　Individual material parameters

材料	剪切模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
魔芋	34.0	0.40	1 100
钢	8.2×10^4	0.28	7 850

选用Ab-T10破碎模型,其基本公式如式(1)所示[12]。设置破碎后颗粒最小绝对尺寸1 mm。在漏斗正上方设置长0.5 m,宽0.1 m的进料口。颗粒以自重持续从磨粉装置进料口处下落进入磨辊之间,在差速磨辊的作用下

表3　各材料接触参数

Table 3　Contact parameters for each material

接触材料	弹性恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
魔芋与钢	0.52	0.65	0.022
魔芋与魔芋	0.48	0.33	0.030

将魔芋破碎成细小的粉末,流量为8 t/h。

$$e_{\min}=e_{\min,\mathrm{ref}}\frac{L_{\mathrm{ref}}}{L},\tag{1}$$

式中:

$e_{\min}$——最小破损能,J/kg;

$e_{\min,\mathrm{ref}}$——材料参考颗粒尺寸的参考最小比能量值,J/kg;

L_{ref}——参考颗粒尺寸,mm;

L——实际颗粒尺寸,mm。

1.2.4　结果处理　磨辊下方形成破碎颗粒,为了收集全时间段内全部破碎颗粒粒径数据,设置收集颗粒的立方区域如图7所示。统计并绘制粒径区域统计直方图,如图8(a)所示。由于破碎颗粒粒径主要分布在1~5 mm,占比77.13%,5 mm以上的颗粒数量对磨粉效果的影响可忽略。因此,剔除>5 mm的统计数据,粒径与数量分布如图8(b)所示。

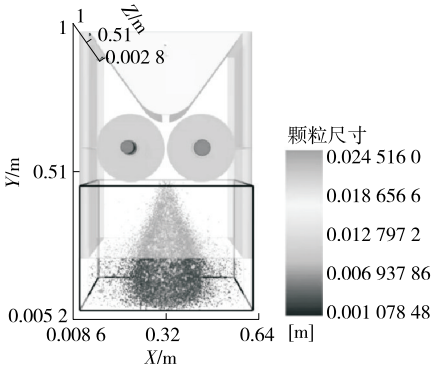


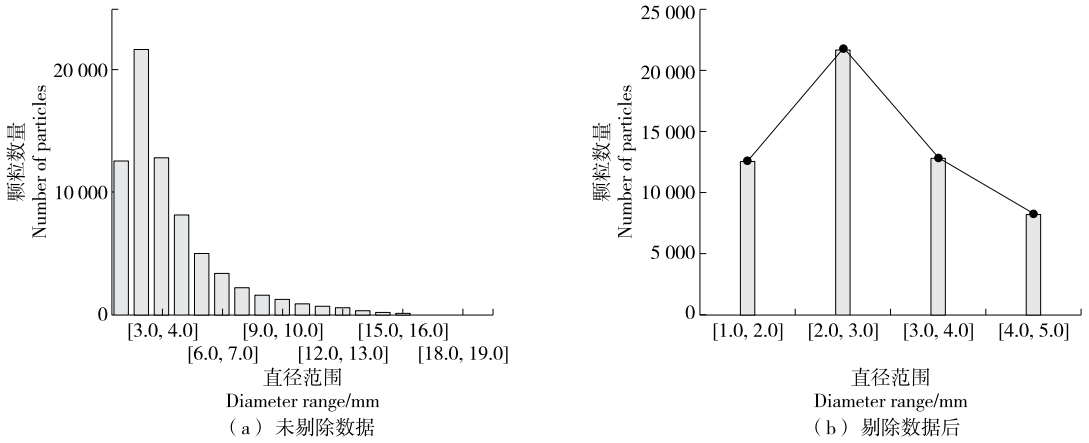
图7　划分立方体区域

Figure 7　Division of the cubic area

1.3　验证实验

为了验证仿真方法和结果的正确性与可靠性,采用文献[13]中与试验磨粉装置近似的差速辊式制粉机结构建立模型,结构参数见表4。玉米颗粒材料参数及颗粒与磨辊间力学参数均与试验参数一致,建立玉米籽粒Rocky Dem离散元破碎仿真模型。

颗粒材料玉米籽粒,泊松比0.3,剪切模量1.31×10^8 Pa,密度1.394 g/cm^3,与玉米籽粒颗粒碰撞恢复系数0.151,静摩擦系数0.086,动摩擦系数0.072;磨辊材料合金工具钢,泊松比0.25,剪切模量8×10^{10} Pa,密度7.85 g/cm^3,与玉米籽粒颗粒碰撞恢复系数0.702,静摩擦系数0.304,动摩擦系数0.053。



（a）未剔除数据　　（b）剔除数据后

图 8　统计数据直方图

Figure 8　Histogram of statistical data

表 4　磨辊参数

Table 4　Parameters of grinding roller

结构参数			运动参数		齿形参数				
直径/mm	长度/mm	轧距/mm	快辊转速/(r·min^{-1})	转速比	破碎辊锋角/(°)	破碎辊钝角/(°)	齿顶宽/mm	磨齿高/mm	磨齿间距/mm
250	340	3	4 588	1.2	10	55	2	8	5

试验表明，黄贮玉米籽粒经过差速辊磨后被破碎成4种状态：完全破碎状态、标准破碎状态、基本破碎状态和未破碎状态。经测量，4种状态的黄贮玉米籽粒粒径均介于2~12 mm，其中，完全破碎状态粒径为2.0~4.5 mm，标准破碎状态粒径为4.5~7.0 mm，基本破碎状态粒径为7.0~9.5 mm，未破碎状态粒径为9.5~12.0 mm。经3次仿真试验，最终结果取平均值。由表5可知，绝对误差均＜4%，验证了仿真结果的准确性。

表 5　试验与仿真结果对比

Table 5　Comparison of experimental and simulation results

玉米籽粒状态	粒径范围/mm	试验结果/%	仿真结果/%	绝对误差/%
完全破碎状态	2.0~4.5	16.30	19.69	3.39
标准破碎状态	4.5~7.0	64.40	63.09	1.31
基本破碎状态	7.0~9.5	12.10	12.24	0.14
未破碎状态	9.5~12.0	7.20	4.98	2.22

2　磨粉系统结构优化

2.1　单因素试验

为了确定各参数的最优值，设置转速比1.5~3.0，快滚转速400~700 r/min，磨辊直径200~275 mm，磨辊齿顶宽0.5~2.0 mm。通过仿真计算获得各因素下的颗粒粒径数据，结果如图9所示。

由图9(a)可知，当转速比为2.5时，颗粒粒径为1~5 mm的数量最多，优化结构转速比设置为2~3。由图9(b)可知，当快辊转速为600 r/min时，颗粒粒径为1~5 mm的数量最多，优化参数设置为550~700 r/min；由图9(c)可知，当磨辊直径为250 mm时，颗粒粒径为1~5 mm的数量最多，优化参数设置为225~275 mm；由图9(d)可知，当磨辊齿顶宽为1 mm时，颗粒粒径为小1~5 mm的数量最多，优化参数设置为0.5~1.5 mm。

2.2　正交试验

2.2.1　试验设计　根据快辊转速、磨辊直径、转速比及齿顶宽的优化范围，设计包括空白列的五因素四水平$L_{16}(4^5)$正交试验方案。各因素水平见表6，正交试验方案及结果见表7。

2.2.2　试验结果　由表7可知，不同粒径区间的颗粒数变化趋势存在差异。由于单个区间不能完全表征磨粉效果的好坏，不同粒径反映的磨粉效果不同，粒径越小、数量越多，磨粉效果越好。因此，以一个综合指标表示磨粉系统的破粒效果，将4个区间指标进行融合。

3　结果分析

3.1　指标融合处理

根据破碎颗粒粒径4个区间指标对磨粉效果的表征程度赋予权值，采用主观因素赋权方法——层次分析法完成多指标赋权。根据每个指标对磨粉效果的影响程度，对各指标两两进行比较，构造判断矩阵。两指标相比以同等重要、稍微重要、明显重要、强烈重要、极端重要的

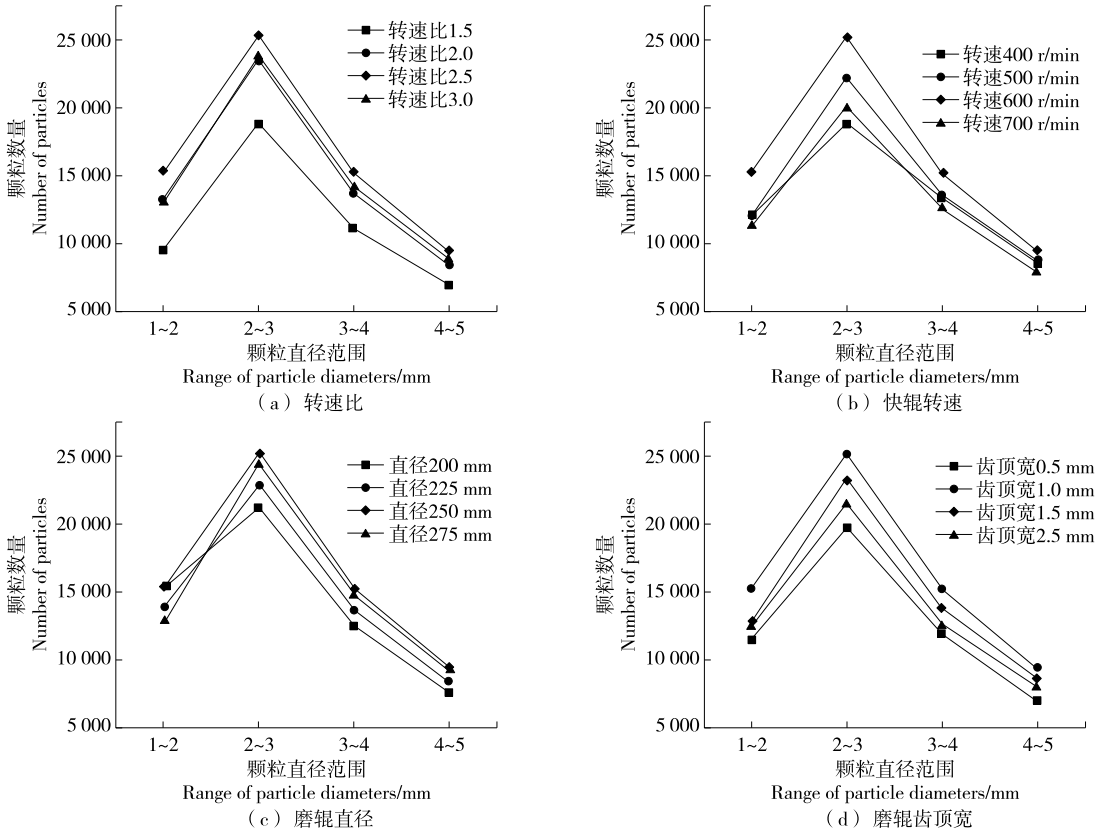


图 9　粒径分布数量与快辊转速、磨辊直径、磨辊齿顶宽和转速比的关系

Figure 9　Relationship between the number of particle size distributions and the speed of the fast grinding roller, the diameter of the grinding rollers, the width of the top of the teeth of the grinding rollers, and the speed ratio

表 6　$L_{16}(4^5)$正交试验因素水平表

Table 6　$L_{16}(4^5)$ orthogonal experimental factor levels

水平	A快辊转速/(r·min^{-1})	B磨辊直径/mm	C转速比	D齿顶宽/mm
1	550	240	2.1	0.8
2	600	250	2.3	1.0
3	650	260	2.5	1.2
4	700	270	2.7	1.4

程度来赋值1,3,5,7,9,介于以上强度中间值时赋值2,4,6,8,若两因素比较结果相反则采用对应的倒数表示[14],判断矩阵$\boldsymbol{A}$如式(2)所示,粒径数量判断矩阵的相对标度值见表8。

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 3 & 5 & 7\\ \frac{1}{3} & 1 & 4 & 6\\ \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & 1 & 2\\ \frac{1}{7} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & 1\end{bmatrix}。\tag{2}$$

为了检验各元素重要度之间的协调性,需对判断矩阵进行一致性检验。首先,计算各行元素几何平均值b_j,如式(3)所示;对b_j进行归一化,求得特征值对应的特征向量$\boldsymbol{W}_j$,如式(4)所示;按照式(5)计算最大特征根λ_{max};最后通过式(6)计算一致性指标C_I,从表9中依据指标个数n得到平均随机一致性指标R_I,按式(7)计算C_I与R_I的比值,获得一致性比例C_R。根据一致性结果(表10),$C_R<0.1$,所以一致性检验通过,说明判断矩阵构造合理。

$$b_j=\left(\prod_{n}^{j=1}a_{ij}\right)^{1/n},\tag{3}$$

$$\boldsymbol{W}_j=\frac{b_j}{\sum_{k=1}^{n}b_k}\ (j=1,2,\cdots,n),\tag{4}$$

$$\lambda_{max}=\frac{1}{n}\sum_{n}^{i=1}\frac{(\boldsymbol{A}\boldsymbol{W})_i}{W_i},\tag{5}$$

$$C_I=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1},\tag{6}$$

$$C_R=\frac{C_I}{R_I},\tag{7}$$

式中:

a_{ij}——i行j列的元素;

表 7　正交试验方案

Table 7　Orthogonal experimental protocol

试验号	A	B	C	D	空列	颗粒数量			
						1~2 mm	2~3 mm	3~4 mm	4~5 mm
1	1	1	1	1	1	13 330	23 563	14 048	8 797
2	1	2	2	2	2	12 253	20 925	12 492	8 036
3	1	3	3	3	3	12 302	25 676	15 331	9 506
4	1	4	4	4	4	12 642	25 141	14 989	9 482
5	2	1	2	3	4	13 393	21 739	12 861	7 967
6	2	2	1	4	1	11 180	20 779	12 498	7 905
7	2	3	4	1	2	11 704	24 779	14 914	9 109
8	2	4	3	2	3	12 289	25 808	15 190	9 242
9	3	1	3	4	3	12 730	22 308	13 174	8 244
10	3	2	4	3	4	12 273	24 719	14 520	9 421
11	3	3	1	2	1	12 809	23 887	14 713	9 087
12	3	4	2	1	2	12 286	24 048	14 290	8 931
13	4	1	4	2	2	12 392	24 413	14 573	9 050
14	4	2	3	1	3	12 332	23 373	13 801	8 681
15	4	3	2	4	4	11 997	25 716	15 485	9 673
16	4	4	1	3	1	12 850	25 267	14 823	9 481

表 8　判断矩阵的相对标度值

Table 8　Relative scale values of the judgment matrix

指标	1~2 mm 数量	2~3 mm 数量	3~4 mm 数量	4~5 mm 数量
1~2 mm 数量	1.000	3.000	5.000	7.000
2~3 mm 数量	0.333	1.000	4.000	6.000
3~4 mm 数量	0.200	0.250	1.000	2.000
4~5 mm 数量	0.143	0.167	0.500	1.000

表 9　n，R_I 指标

Table 9　n, R_I correspondence

n	1	2	3	4	5
R_I	0	0	0.52	0.89	1.12

b_j——各行元素几何平均值；

λ_{max}——最大特征根；

n——指标个数；

C_I——一致性指标；

C_R——一致性比例；

R_I——平均随机一致性指标。

对判断矩阵进行归一化处理后，通过算数平均法[式(8)]求得每一个指标权值，如图 10 所示。

表 10　一致性检验

Table 10　Consistency test

最大特征根	C_I 值	R_I 值	C_R 值	一致性检验结果
4.119	0.04	0.882	0.045	通过

$$\omega_i=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n}a_{kj}}, \tag{8}$$

式中：

ω_i——第 i 个指标的权重值；

a_{ij}——判断矩阵第 i 行第 j 列的元素；

a_{kj}——判断矩阵第 k 行第 j 列的元素；

n——指标数。

获取权重后，将 4 个指标融合成一个新的综合指标。采用优劣解距离法(TOPSIS)来进行指标融合，通过构造评价问题的正理想解和负理想解(各指标的最优解和最劣解)，计算每个方案到理想方案的相对距离(即靠近正理想解和远离负理想解的程度)[15]对方案进行排序。

由于颗粒数越多，越能反映磨粉效果，属于效益型指标，无需正向化处理，仅需利用式(9)进行规范化处理，得到规范化矩阵。给规范矩阵中每个元素按式(10)赋上各指标权重值，得到加权规范矩阵。

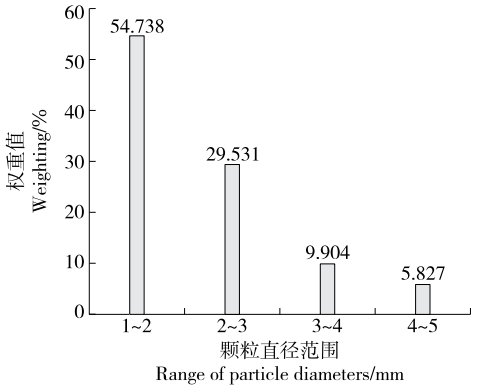


图 10　计算权重结果

Figure 10　Calculation of weighting results

$$b_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}x_{ij}^2}},\tag{9}$$

$$c_{ij}=b_{ij}\cdot\omega_j。\tag{10}$$

正理想解即为每个指标在各方案之间的最大值c_j^+，负理想解即为每个指标在各方案之间的最小值c_j^-[16]。根据式(11)和式(12)计算各方案到正、负理想解的欧氏距离d_i^+和d_i^-。通过式(13)得到各方案的综合指标值r。以此综合指标值为判断磨粉效果好坏的依据，对16种试验方案进行排序，如表11所示。

$$d_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(c_j^+-c_{ij})^2},\tag{11}$$

表 11　综合得分指数表

Table 11　Composite score index

试验号	正理想解距离(d^+)	负理想距离(d^-)	综合得分指数r	排序
1	0.310 537	0.805 451	0.721 738 340	3
2	0.756 798	0.359 481	0.322 034 947	15
3	0.366 123	0.746 735	0.671 006 698	5
4	0.267 662	0.759 189	0.739 337 249	2
5	0.568 986	0.748 139	0.568 009 008	10
6	0.999 811	0.000 599	0.000 599 014	16
7	0.583 654	0.556 252	0.487 980 697	14
8	0.374 947	0.739 326	0.663 505 652	6
9	0.537 887	0.550 521	0.505 804 011	13
10	0.406 932	0.634 837	0.609 383 640	8
11	0.306 989	0.699 898	0.695 110 761	4
12	0.446 439	0.562 812	0.557 653 567	11
13	0.388 829	0.625 018	0.616 481 457	7
14	0.494 732	0.507 008	0.506 127 467	12
15	0.466 825	0.718 713	0.606 233 292	9
16	0.204 723	0.808 251	0.797 899 197	1

$$d_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(c_j^--c_{ij})^2},\tag{12}$$

$$r_i=\frac{d_i^-}{d_i^-+d_i^+}。\tag{13}$$

3.2　结果分析

极差反映了各因素对试验结果的影响程度，极差越大说明该因素的水平变化对试验结果的影响越大[17]。由表12可知，辊式制粉机的磨辊直径对磨粉效果的影响最大，其次为快辊转速和齿顶宽，转速比的最小。根据k值，最佳的水平组合方式为$A_4B_4C_4D_3$，即磨辊直径270 mm，快辊转速700 r/min，转速比2.7，齿顶宽1.2 mm。

将原始水平组(见表1)与正交试验得出的最优水平组进行仿真模拟对比，结果如图11所示。由于只有两组数据，无法使用优劣解距离法计算综合得分指数，此处采用加权求和的形式计算得出综合得分。通过对比发现，相较于原始水平组，最优水平组的磨粉效果提升了14.2%，验证了正交试验结果的正确性。

表 12　正交极差结果

Table 12　Orthogonal polarization results

综合影响值	影响因素			
	A	B	C	D
k_1	0.614	0.603	0.554	0.568
k_2	0.430	0.360	0.513	0.574
k_3	0.592	0.615	0.587	0.662
k_4	0.632	0.690	0.613	0.463
R	0.202	0.330	0.100	0.199

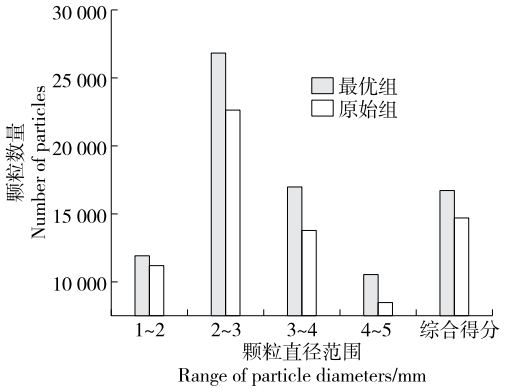


图 11　最优组与原始组仿真结果对比

Figure 11　Comparison of simulation results between the optimal group and the original group

4　结论

(1) 通过层次分析法计算不同直径范围的破碎颗粒对磨粉效果的影响权重，其中1~2 mm赋权54.738%、2~

3 mm 赋权 29.531%、3~4 mm 赋权 9.904%、4~5 mm 赋权 5.827%。

（2）使用优劣解距离法将四指标融合成一个综合指标，通过试验得出，当磨辊直径为 270 mm，快辊转速为 700 r/min，转速比为 2.7，齿顶宽为 1.2 mm 时，磨粉效果最佳，与初始结构相比，磨粉效果提升了 14.2%。

上述研究结果以磨粉效果为目标进行磨辊的结构参数和运动参数优化，并未从能量角度考虑磨粉系统能耗，后续研究可在此基础上结合磨粉系统能耗进行进一步分析和优化。

参考文献

[1] 龚雪, 解松峰, 夏曾润, 等 . 魔芋精粉对鲜湿米粉品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 186-192.
GONG X, XIE S F, XIA Z R, et al. Study on the effects of adding konjac refined flour on the quality of fresh wet rice noodle[J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 186-192.

[2] 胡清明, 候俊鹏, 徐长顺, 等 . 魔芋精粉机人字齿传动系统动力学性能分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 113-119, 138.
HU Q M, HOU J P, XU C S, et al. Dynamic performance analysis of the herringbone transmission system of konjac fine flour[J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 113-119, 138.

[3] 张芷豪, 张政武 . 魔芋磨粉机磨粉系统工作参数分析及优化[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2023, 39(3): 8-14.
ZHANG Z H, ZHANG Z W. Analysis and optimization of working parameters of grinding system of konjac mill[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 39(3): 8-14.

[4] 李聪 . 辊式磨粉机磨辊热力学与传热特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020: 27-35.
LI C. Research on thermodynamics and heat transfer characteristics of grinding rolls in roller mill[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020: 27-35.

[5] 高杨杨 . 辊式磨粉机磨辊系统振动特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022: 23-39.
GAO Y Y. Study on the vibration characteristics of grinding roller system of roller mill[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022: 23-39.

[6] 曹成茂, 丁武阳, 刘忠滨, 等 . 基于 Rocky Dem 的宁前胡排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 53-64.
CAO C M, DING W Y, LIU Z B, et al. Design and test of seed discharger of Ningqianhu based on Rocky Dem[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 53-64.

[7] 秦宽, 步坤亭, 沈周高, 等 . 连续复式茶叶理条机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 382-393.
QIN K, BU K T, SHEN Z G, et al. Optimized design and test of continuous compound tea leaf slicer[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 382-393.

[8] 金钊 . 玉米秸秆捡拾制粒机输送除土装置的仿真与试验[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021: 22-40.
JIN Z. Simulation and test of conveying and de-soiling device of corn stover picking and pelletizing machine[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2021: 22-40.

[9] 林冬华, 武文斌, 李聪, 等 . 磨辊瞬态动力学有限元分析[J]. 粮食加工, 2018, 43(2): 44-51.
LIN D H, WU W B, LI C, et al. Finite element analysis of transient dynamics of grinding roll[J]. Grain Processing, 2018, 43(2): 44-51.

[10] 刘文政, 何进, 李洪文, 等 . 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125-135.
LIU W Z, HE J, LI H W, et al. Calibration of simulation parameters of miniature potato based on discrete elements[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125-135.

[11] 牛康, 苑严伟, 罗敏, 等 . 双层种箱式马铃薯排种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 32-39.
NIU K, YUAN Y W, LUO M, et al. Design and test of double-layer seed box type potato seed discharge device[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32(20): 32-39.

[12] 李洪成, 曾荣, 牛智有, 等 . 玉米籽粒冲击破碎中的 Ab-T10 破碎模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 437-444.
LI H C, ZENG R, NIU Z Y, et al. Parameter calibration of Ab-T10 crushing model in corn kernel impact crushing[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 437-444.

[13] 孙延成 . 基于差速辊的黄贮玉米籽粒破碎装置设计与试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022: 23-36.
SUN Y C. Design and experimental study on grain crushing device of yellow storage corn based on differential roller[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022: 23-36.

[14] VINCENT P. A comparative study on suitability of AHP and TOPSIS for identifying optimal conceptual design of bearing puller[J]. Journal of Engineering Research and Reports, 2023, 25(12): 194-205.

[15] 李泽宏, 张玲玉, 胡蝶, 等 . 基于 AHP-TOPSIS 方法的智能液压设备设计评价研究[J]. 包装工程, 2023, 44(14): 83-90.
LI Z H, ZHANG L Y, HU D, et al. Research on the evaluation of intelligent hydraulic equipment design based on AHP-TOPSIS method[J]. Packaging Engineering, 2023, 44 (14): 83-90.

[16] PRAYOGO B, YUDISAPUTRO H. Leveraging a multi-criteria decision-making approach with AHP & TOPSIS method for the selection of IoT-based inverter smart grid system and smart meter in solar photovoltaic and wind turbine installations at pelabuhan ratu CFPP[J]. Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan, 2023, 1(2): 118-131.

[17] 任宁, 王中营, 白晓丽, 等 . 基于离散元法的往复振动筛运动参数优化[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 63-67, 80.
REN N, WANG Z Y, BAI X L, et al. Motion parameter optimization of reciprocating vibrating screen based on discrete element method[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 63-67, 80.