

基于 Rocky DEM 的辊式磨粉机辊齿参数优化

刘一帆 张超 郭行

(河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: [目的] 探究 1B 辊式磨粉机中齿辊的表面技术参数对小麦研磨工艺效果的影响, 并对表面技术参数进行优化。[方法] 采用 Rocky DEM 软件对齿辊的研磨过程进行仿真模拟, 以齿辊的齿角、锋角、齿顶宽和斜度为变量, 分析其对小麦剥刮率及磨损量的作用效应, 并综合运用单因素法与正交试验结合矩阵分析, 对试验结果进行系统评估。[结果] 1B 齿辊磨损量最小且能够保持较高剥刮率时的表面技术参数组合为齿角 110°、锋角 40°, 齿顶宽 0.4 mm, 斜度 3%; 齿辊表面技术参数对剥刮率和磨损量的影响程度从大到小依次为斜度、锋角、齿角、齿顶宽。[结论] 通过多指标正交试验矩阵分析与评定, 完成齿辊表面技术参数优化并构建回归方程, 有效提升了辊式磨粉机的研磨效果, 同时降低了齿辊磨损量。

关键词: 齿辊; 剥刮率; 磨损量; DEM; 矩阵分析

Optimization of roller tooth parameters for roller mill based on Rocky DEM

Liu Yifan Zhang Chao Guo Xing

(Mechanical and Electrical Engineering Institute, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of the surface technical parameters of the toothed roller in a 1B roller mill on the wheat grinding process and to optimize these surface technical parameters. [Methods] The grinding process of the toothed roller was simulated using Rocky DEM software. Tooth angle, sharpness angle, tooth tip width, and inclination were selected as variables to analyze their effects on wheat scraping rate and wear loss. Single-factor experiments and orthogonal experiments combined with matrix analysis were comprehensively applied to systematically evaluate the experimental results. [Results] The optimal combination of surface technical parameters for the 1B toothed roller, which resulted in minimum wear loss while maintaining a relatively high scraping rate, was a tooth angle of 110°, sharpness angle of 40°, tooth tip width of 0.4 mm, and inclination of 3%. The degree of influence of the surface technical parameters of the toothed roller on scraping rate and wear loss, in descending order, was inclination, sharpness angle, tooth angle, and tooth tip width. [Conclusion] Through multi-index orthogonal experimental matrix analysis and evaluation, the optimization of the surface technical parameters of the toothed roller was completed and a regression equation was constructed, effectively improving the grinding performance of the roller mill while reducing the wear loss of the toothed roller.

Keywords: toothed roller; scraping rate; wear loss; DEM; matrix analysis

辊式磨粉机是小麦加工中的关键设备^[1], 其主要作用是对小麦颗粒进行研磨粉碎, 使小麦颗粒尽可能地满足后续加工处理的需要, 齿辊是辊式磨粉机中最重要的研磨部件。小麦颗粒进入研磨区域后, 齿辊对其进行挤压、剪切等作用, 致使小麦颗粒破碎, 从而改变粒径, 在粒径改变的同时, 齿辊的表面也会被磨损, 磨损量的大小直接

关乎齿辊的寿命, 且磨损后的齿辊的各项工作参数和工艺效果都会受到严重影响。

目前国内外学者对辊式磨粉机研磨过程的研究非常广泛, 离散单元法在其中发挥了极其重要的作用^[2]。李仲斌等^[3]利用离散元建立单辊破碎机的理论模型, 得到单辊破碎机的辊齿磨损量, 分析得出物料对辊齿表面的反作

基金项目: 河南省科技厅自然科学基金项目—科技攻关项目(编号: 242102110133); 河南省科技研发计划联合基金(编号: 242103810063)

通信作者: 张超(1991—), 男, 河南工业大学副教授, 博士。E-mail: zcjd.haut.edu.cn

收稿日期: 2025-09-02 **改回日期:** 2026-04-10

引用格式: 刘一帆, 张超, 郭行. 基于 Rocky DEM 的辊式磨粉机辊齿参数优化[J]. 食品与机械, 2026, 42(8): 88-95.

Citation: Liu Yifan, Zhang Chao, Guo Xing. Optimization of roller tooth parameters for roller mill based on Rocky DEM[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 88-95.

用力和物料在摩擦力作用下的滑移距离等为影响磨损的主要因素。侯宁沛等^[4]对工作 80 d 后的 FMFQ 型磨粉机进行齿辊表面形貌的测量,测量出齿型磨损深度和对剥刮率的影响程度,为进一步研究齿辊磨损过程提供依据。王雪峰等^[5]利用图像处理技术提取喷砂辊的磨损图像,更加准确地描述了磨损状态变化,并提出 PSO-LS-SVM 算法,可预测磨损剩余使用寿命。Patwa 等^[6]对不同含水率的小麦进行物理测定,结果表明随着含水率的增大,小麦的摩擦系数和磨损量随之增大。Mesaki 等^[7]通过试验发现,快慢辊具有不同的磨损特征,经计算得知快辊的磨损量为慢辊的 2.5 倍。刘海芃等^[8]通过 DEM 软件对磨辊研磨过程进行分析,探讨出 1B 制粉工序中最佳的齿角、锋角、轧距和落料点间距的组合,为磨辊研磨过程的仿真分析提供了参考方法。吴兰等^[9]基于离散元法,对盘磨研磨过程进行模拟分析,探究入料速度、入磨物料种类等因素对取粉率、耗电量和破碎时间的影响,通过矩阵分析法得到最佳的参数组合。Jiang 等^[10]研究了压实区域中磨辊的压力分布情况,建立了分析压力分布的数学模型,为改进立式磨粉机的生产流程以及提升磨下物的产量和品质提供了理论依据。黄奇鹏等^[11]通过分析磨粉机齿辊在研磨过程中的物料粒度和齿形参数的关系,确定邦德理论更适用于齿辊功耗的研究,得到齿辊功耗与齿型、物料特性、齿辊转速等有关。Campbell 等^[12]通过设置不同的磨辊配置方式进行研磨试验,表明在钝对钝(D-D)的磨辊配置下,研磨效果更好。

磨辊磨损是磨粉机的重要失效形式之一^[13],但从以

上国内外学者对磨辊方面的研究可知,以往研究主要集中在辊式磨粉机齿辊的能耗分析、力学分析、工况分析以及关键零部件的仿真研究,对于磨辊表面磨损的研究主要集中在磨粉机的不同工况条件,但齿辊表面技术参数对磨损量影响的研究较少。

研究拟采用离散单元法对辊式磨粉机齿辊的研磨过程进行模拟,重点研究齿角、锋角、齿顶宽及斜度等参数在单位时间步长内对剥刮率与齿辊磨损的影响,并通过单因素与正交试验方法对齿辊表面技术参数进行优化,以期对辊式磨粉机齿辊的结构设计提供理论依据。

1 齿辊三维模型建立

在 SolidWorks 中建立齿辊的三维模型后,以 stl 格式导出并导入 Rocky DEM 软件内进行离散元仿真分析,具体模型如图 1 所示。该齿辊齿型参数及工况条件如表 1 所示。

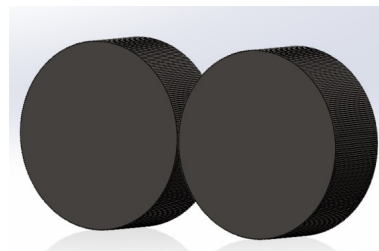


图 1 齿辊模型

Figure 1 Toothed roller model

表 1 齿辊参数

Table 1 Toothed roller parameters

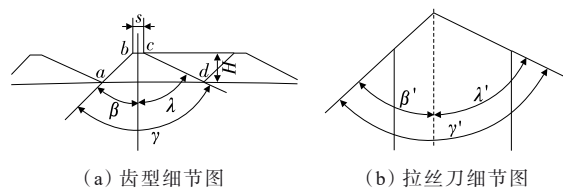
齿角/ $^{\circ}$	锋角/ $^{\circ}$	齿顶宽/mm	斜度/%	齿辊直径/mm	齿辊长度/mm
90~110	25~45	0.2~0.4	2~6	250	100
齿数/ cm^{-1}	轧距/mm	快辊转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	快慢辊速比	排列方式	
3.5	0.8	600	1.5:1	钝—钝	

齿型细节如图 2(a)所示,齿形参数包括齿角 γ 、锋角 β 、钝角 λ 和齿顶宽 S 。 ab 所在平面为锋面, cd 所在面为钝面, s 为齿顶宽, ab 与 cd 的夹角为齿角 γ , ab 与齿辊直径所成夹角为锋角 β , cd 与齿辊直径所成夹角为钝角 λ 。

由于磨齿具有一定的斜度,所以在齿辊横断面上表达齿角时具有一定偏差,且难以测定,所以在工程实际中,往往由拉丝刀的角度来表达齿辊的齿角,如图 2(b)所示。

2 研磨过程模拟

小麦颗粒模型采用 Rocky DEM 中颗粒模拟的 Polyhedron 模型进行拟合,中心点个数选择 50,颗粒选择 Ab-T10 破碎模型,根据文献[14—16]设置相关参数如



(a) 齿型细节图

(b) 拉丝刀细节图

图 2 齿辊齿型

Figure 2 Toothed roller tooth profile

表 2~表 4 所示,根据文献[17]设置模拟仿真流量为 0.264 kg/s。仿真研磨过程如图 3 所示。

3 仿真结果分析

3.1 单因素分析

以剥刮率作为研磨过程的第 1 个评价指标,统计经过

表 2 小麦颗粒力学参数和接触参数
Table 2 Mechanical and contact parameters of wheat granules

接触材料	静摩擦因数	滚动摩擦因数	碰撞恢复系数
小麦—小麦	0.30	0.04	0.5
磨辊—小麦	0.56	0.05	0.4

表 3 小麦颗粒 Ab-T10 破碎参数
Table 3 Wheat granule Ab-T10 crushing parameters

颗粒特性选择函数参数/($\text{kg} \cdot \text{J}^{-1}$)	颗粒参考最小破碎比能/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	T10 最大值/%
0.001 46	85.74	4.97

表 4 材料物性参数
Table 4 Material property parameters

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
小麦	0.3	136	1 480
磨辊	0.3	79 000	7 860

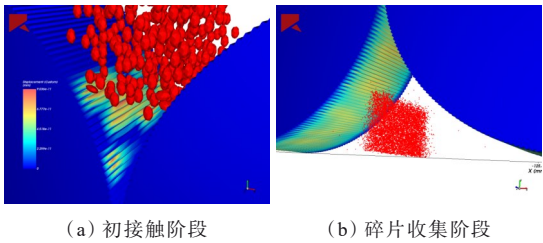


图 3 齿辊研磨过程
Figure 3 Grinding process of toothed roller

研磨后的碎片粒径,将能够通过 0.25 mm 的 60 目筛粉的颗粒质量的百分比作为剥刮率。齿辊在研磨结束后,对辊齿的最大磨损处与原有辊齿进行对比,将位置距离的最大差值作为最大磨损量,以齿辊在单位时间步长模拟

结束后的最大磨损量作为第 2 个评价指标。初始基准条件设置为齿角 110°、锋角 35°、齿顶宽 0.3 mm、斜度 4%,针对这 4 个变量,分别设置了 5 个不同水平的仿真试验组进行对比。

3.1.1 齿角分析 将齿辊的齿角作为第 1 组的变量,进行 5 组仿真模拟,分别取 90°,95°,100°,105°,110°,通过软件模拟出其磨损量和剥刮率,结果如图 4(a)所示。随着齿角的增大,剥刮率与磨损量均呈增大的趋势,因为齿角是决定研磨和粉碎作用力性质的关键因素,齿角的大小直接影响了小麦颗粒的粉碎程度。齿角越大,辊齿对小麦颗粒的挤压力也就越大,剪切力减小,在研磨过程中易将胚乳研磨成粉,同时能够保持麸皮的完整性,但磨损量也在随之增大,寿命也随之降低。齿角减小,在研磨过程中产生的麦渣和麦心的含量会上升,麸皮容易被切碎,但是磨损量也会减小。

利用 ORIGIN 软件统计试验结果,得到剥刮率和磨损量与齿角的线性回归方程如式(1)~式(2)所示,其中剥刮率和磨损量曲线的拟合结果的决定系数(R^2)分别为 0.998 08,0.992 81,残差平方和<0.000 1,表明拟合效果良好。

$y_1 = -0.001\,38x^2 + 0.334\,57x - 17.892\,43,$ (1)

$y_2 = -0.003\,63x^2 + 0.904\,99x - 50.641\,49,$ (2)

式中:
 y_1 ——剥刮率,%;
 y_2 ——磨损量,nm;
 x ——齿角,°。

3.1.2 锋角分析 将锋角 β 作为第 2 组的变量,取锋角 5 个水平(25°,30°,35°,40°,45°)进行模拟分析。在齿角一定时,锋角增大,钝角会随之减小。在齿辊 D-D 排列时,快辊辊齿钝角向下,慢辊辊齿钝角向上,此时齿辊对小麦颗粒的剪切力主要来自于钝角,锋角起辅助作用。

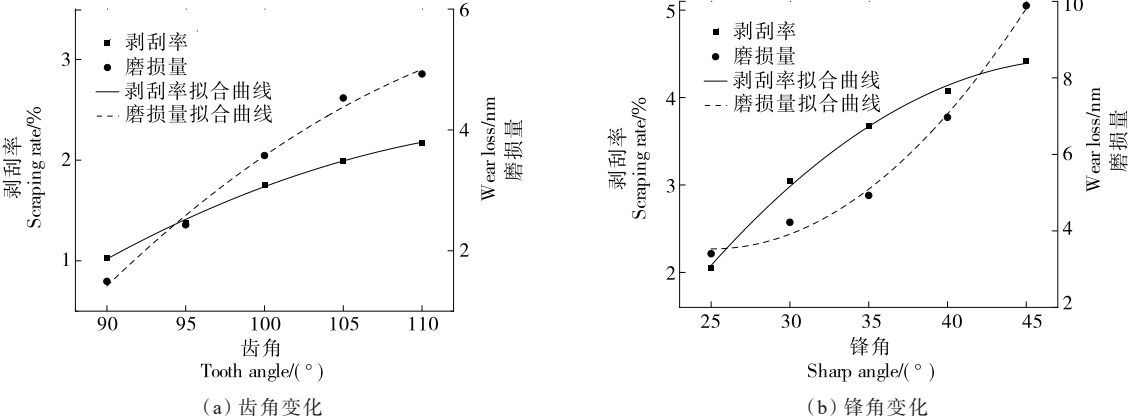


图 4 不同齿角和锋角试验结果与拟合关系曲线图
Figure 4 Experimental results and fitting relationship curves of different tooth angles and sharpness angles

如图 4(b)所示,随着锋角的增大,钝角的减小,剥刮率和磨损量均在增大,但剥刮率在锋角 35°以前增速较大,在 35°之后增速较缓。磨损量与之相反,在 35°之前增速较慢,在 35°之后增速较快。这是由于钝角减小,对物料的剪切力作用变小,磨下物的麸皮粒度更大、剥刮率更大,但粗粒的含量减少。基于仿真结果,利用 ORIGIN 软件,建立了锋角同剥刮率与磨损量之间的拟合方程,如式(3)~式(4)所示。拟合方程的 R^2 分别为 0.997 04, 0.994 37, 残差平方和 $<0.000 1$, 表明拟合曲线的结果较好。

$$y_1 = -0.004 33x^2 + 0.418 98x - 5.686 09, \quad (3)$$

$$y_2 = 0.015 81x^2 - 0.792 38x + 13.458 37, \quad (4)$$

式中:

y_1 ——剥刮率, %;

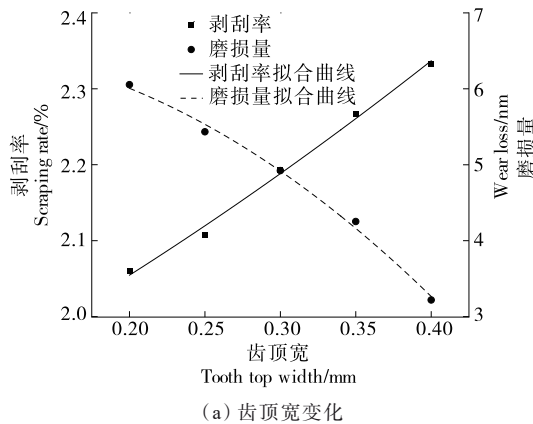


图 5 不同齿顶宽和斜度试验结果与拟合关系曲线图

Figure 5 Experimental results and fitting relationship curves of different tooth tip widths and inclinations

$$y_1 = 0.742 86x^2 + 0.966 29x + 1.831 54, \quad (5)$$

$$y_2 = -28.171 43x^2 + 3.190 86x + 6.495 43, \quad (6)$$

式中:

y_1 ——剥刮率, %;

y_2 ——磨损量, nm;

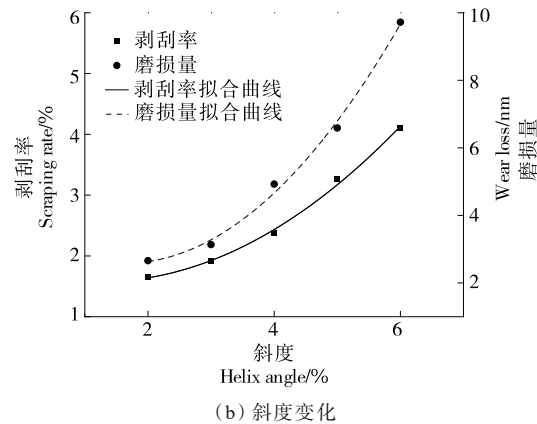
x ——齿顶宽, mm。

3.1.4 斜度分析 将斜度 X 作为第 4 组的自变量, 在其他条件因素不变的情况下, 设置斜度分别为 2%, 3%, 4%, 5%, 6%。通过软件数值模拟, 得到斜度与剥刮率和磨损量的结果如图 5(b)所示。斜度 X 是在辊面一端到另一端辊齿走过的弧长 S 与辊面长度 L 的比值, 如式(7)所示, 其值越大, 说明沿着圆周方向走过的弧长就越长。由图 5(b)可知, 随着斜度的增大, 剥刮率和磨损量均增大, 这是因为斜度增加, 磨辊表面母线上磨辊辊齿的交叉点数目随之增多, 辊齿对物料的剪切作用就越强, 导致麦皮更易碎, 进而导致剥刮率增加。

y_2 ——磨损量, nm;

x ——锋角, °。

3.1.3 齿顶宽分析 将齿顶宽 S 作为第 3 组的试验变量, 分别设置为 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40 mm, 在保持其他参数不变的情况下, 通过数值模拟, 得到齿顶宽与剥刮率和磨损量的相关结果, 如图 5(a)所示。由图 5(a)可知, 随着齿顶宽的增大, 剥刮率随之增大, 但是齿辊的磨损量却随之减小, 这是由于齿顶宽增大时, 小麦颗粒会经历更长的研磨区域, 导致小麦颗粒被研磨的概率增加, 进而导致剥刮率增加, 同时, 齿顶宽增加, 也可以提高辊齿的耐磨性, 增加齿辊的使用寿命, 减少磨损量。齿顶宽与剥刮率和磨损量的拟合方程如式(5)~式(6)所示, 其 R^2 分别为 0.989 47, 0.995 32, 残差平方和 $<0.000 1$, 表明两条曲线的拟合结果均可靠。



$$X = \frac{S}{L} \times 100\%。 \quad (7)$$

根据 DEM 仿真结果散点图, 可模拟出斜度分别与剥刮率 y_1 和磨损量 y_2 的拟合曲线, 如式(8)~式(9)所示, 结果显示两组拟合曲线的 R^2 分别为 0.996 80, 0.995 89, 残差平方和 $<0.000 1$, 表明回归曲线拟合效果良好, 具有较优的结果。

$$y_1 = 0.113 07x^2 - 0.281 47x + 1.750 60, \quad (8)$$

$$y_2 = 0.370 64x^2 - 1.207 64x + 3.564 60, \quad (9)$$

式中:

y_1 ——剥刮率, %;

y_2 ——磨损量, nm;

x ——斜度, %。

3.2 多指标正交试验及分析

为系统评估多因素对双指标的作用效应并进行参数优化, 选用 $L_{16}(4^4)$ 正交表, 以齿角、锋角、齿顶宽和斜度为试验因素, 分析各因素对指标的影响程度。正交试验方

案及结果见表 5 与表 6。

由表 6 可知,剥刮率与齿角、锋角、齿顶宽和斜度均为正相关,4 个因素的影响程度依次为斜度、锋角、齿角、齿顶宽。对于剥刮率最大的最佳工作参数为齿角 110°、锋角 40°、齿顶宽 0.4 mm、斜度 6%。4 个因素对磨损量的影响程度依次为斜度、锋角、齿顶宽、齿角。对于磨损量最小的最优组合参数为齿角 95°、锋角 25°、齿顶宽 0.4 mm、

斜度 3%。

3.3 多指标正交试验矩阵分析评定

为优化齿辊的最佳表面设计参数,采用矩阵分析法评估各因素水平对试验指标的影响权重。基于矩阵模型^[18],将表 6 试验结果数据代入,构建剥刮率指标层矩阵(M_1)、因素层矩阵(T_1)和水平层矩阵(S_1),并通过计算得到剥刮率的权重矩阵(W_1)。

表 5 正交试验因素与水平				
Table 5 Orthogonal experimental factors and levels				
水平	A 齿角/(°)	B 锋角/(°)	C 齿顶宽/mm	D 斜度/%
1	95	25	0.25	3
2	100	30	0.30	4
3	105	35	0.35	5
4	110	40	0.40	6

表 6 正交试验结果和极差分析						
Table 6 Orthogonal experiment results and range analysis						
试验号	A	B	C	D	剥刮率/%	磨损量/nm
1	1	1	1	1	0.98	1.81
2	1	2	2	2	1.40	9.27
3	1	3	3	3	3.13	8.00
4	1	4	4	4	4.89	8.24
5	2	1	2	3	2.23	6.09
6	2	2	1	4	2.79	11.82
7	2	3	4	1	2.34	2.63
8	2	4	3	2	3.21	8.47
9	3	1	3	4	3.24	8.28
10	3	2	4	3	3.26	6.59
11	3	3	1	2	2.47	9.84
12	3	4	2	1	2.38	6.84
13	4	1	4	2	1.96	3.29
14	4	2	3	1	2.01	4.24
15	4	3	2	4	5.02	12.84
16	4	4	1	3	4.61	12.00
剥刮率	k_{11}	2.600	2.103	2.713	1.927	
	k_{12}	2.643	2.365	2.757	2.260	
	k_{13}	2.838	3.240	2.897	3.308	
	k_{14}	3.400	3.772	3.112	3.985	
	R_1	0.800	1.669	0.399	2.058	
磨损量	k_{21}	6.830	4.867	8.867	3.880	
	k_{22}	7.252	7.980	8.760	7.718	
	k_{23}	7.888	8.328	7.248	8.170	
	k_{24}	8.093	8.887	5.188	10.295	
	R_2	1.263	4.020	3.679	6.415	

$$M_1 = \begin{bmatrix} 2.600 & 0 & 0 & 0 \\ 2.643 & 0 & 0 & 0 \\ 2.838 & 0 & 0 & 0 \\ 3.400 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.103 & 0 & 0 \\ 0 & 2.365 & 0 & 0 \\ 0 & 3.240 & 0 & 0 \\ 0 & 3.772 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.713 & 0 \\ 0 & 0 & 2.757 & 0 \\ 0 & 0 & 2.897 & 0 \\ 0 & 0 & 3.112 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.927 \\ 0 & 0 & 0 & 2.260 \\ 0 & 0 & 0 & 3.308 \\ 0 & 0 & 0 & 3.985 \end{bmatrix},$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0.087 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.087 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.087 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.087 \end{bmatrix},$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0.800 \\ 4.926 \\ 1.669 \\ 4.926 \\ 0.399 \\ 4.926 \\ 2.058 \\ 4.926 \end{bmatrix},$$

$$W_1 = M_1 \cdot T_1 \cdot S_1 = \begin{bmatrix} 0.036\ 777\ 91 \\ 0.037\ 386\ 16 \\ 0.040\ 144\ 51 \\ 0.048\ 094\ 19 \\ 0.062\ 061\ 08 \\ 0.069\ 792\ 90 \\ 0.095\ 614\ 79 \\ 0.111\ 314\ 51 \\ 0.019\ 140\ 20 \\ 0.019\ 450\ 62 \\ 0.020\ 438\ 32 \\ 0.021\ 955\ 14 \\ 0.070\ 121\ 44 \\ 0.082\ 238\ 95 \\ 0.120\ 374\ 53 \\ 0.145\ 009\ 83 \end{bmatrix}.$$

当采用矩阵分析法考虑的指标越小越好时,需将指标层矩阵中的 k_{ij} 替换为其倒数 $1/k_{ij}$,将表 6 试验结果数据代入,构建磨损量指标层矩阵(M_2)、因素层矩阵(T_2)和水平层矩阵(S_2),并通过计算得到剥刮率的权重矩阵(W_2)。

$$M_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{6.830} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{7.252} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{7.888} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{8.093} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4.867} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{7.980} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{8.328} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{8.887} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{8.867} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{8.760} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{7.248} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{5.188} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3.880} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{7.718} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{8.170} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{10.295} \end{bmatrix}$$

$$W_2 = M_2 \cdot T_2 \cdot S_2 = \begin{bmatrix} 0.022\ 488\ 09 \\ 0.021\ 179\ 49 \\ 0.019\ 471\ 82 \\ 0.018\ 978\ 58 \\ 0.095\ 343\ 58 \\ 0.058\ 150\ 02 \\ 0.055\ 720\ 12 \\ 0.052\ 215\ 28 \\ 0.048\ 385\ 61 \\ 0.048\ 976\ 62 \\ 0.059\ 193\ 60 \\ 0.082\ 697\ 61 \\ 0.177\ 183\ 87 \\ 0.089\ 074\ 03 \\ 0.084\ 146\ 07 \\ 0.066\ 777\ 41 \end{bmatrix},$$

$$W = \frac{W_1 + W_2}{2} = \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} 0.036\ 777\ 91 \\ 0.037\ 386\ 16 \\ 0.040\ 144\ 51 \\ 0.048\ 094\ 19 \\ 0.062\ 061\ 08 \\ 0.069\ 792\ 90 \\ 0.095\ 614\ 79 \\ 0.111\ 314\ 51 \\ 0.019\ 140\ 20 \\ 0.019\ 450\ 62 \\ 0.020\ 438\ 32 \\ 0.021\ 955\ 14 \\ 0.070\ 121\ 44 \\ 0.082\ 238\ 95 \\ 0.120\ 374\ 53 \\ 0.145\ 009\ 83 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0.022\ 488\ 09 \\ 0.021\ 179\ 49 \\ 0.019\ 471\ 82 \\ 0.018\ 978\ 58 \\ 0.095\ 343\ 58 \\ 0.058\ 150\ 02 \\ 0.055\ 720\ 12 \\ 0.052\ 215\ 28 \\ 0.048\ 385\ 61 \\ 0.048\ 976\ 62 \\ 0.059\ 193\ 60 \\ 0.082\ 697\ 61 \\ 0.177\ 183\ 87 \\ 0.089\ 074\ 03 \\ 0.084\ 146\ 07 \\ 0.066\ 777\ 41 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.029\ 633\ 00 \\ 0.029\ 282\ 83 \\ 0.029\ 808\ 16 \\ 0.033\ 536\ 39 \\ 0.078\ 702\ 33 \\ 0.064\ 121\ 46 \\ 0.075\ 667\ 46 \\ 0.081\ 764\ 89 \\ 0.033\ 762\ 90 \\ 0.034\ 213\ 62 \\ 0.039\ 815\ 96 \\ 0.052\ 326\ 37 \\ 0.123\ 652\ 65 \\ 0.085\ 656\ 49 \\ 0.102\ 260\ 30 \\ 0.105\ 893\ 62 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{bmatrix}。$$

根据 W 的最终结果可得,各因素对两个评价指标的综合影响显著性由高到低排序为:斜度>锋角>齿顶宽>齿角。各个因素的影响权重分别为:齿角中 A_4 最大,即 110° ;锋角中 B_4 最大,即 40° ;齿顶宽中 C_4 最大,即 0.4 mm ;斜度中 D_1 最大,即斜度为 3% 。综合权重的分析结果可以得到最佳的齿辊表面技术参数组合为 $A_4B_4C_4D_1$ 。

3.4 试验验证

使用基于 MDDP 型辊式磨粉机的改装型可视化磨粉机进行试验,可视化磨粉机能够手动调节辊间轧距、快慢辊转速与喂料辊转速,将其工况设置为辊间轧距 0.8 mm ,快辊转速 600 r/min ,慢辊转速 400 r/min 。该可视化磨粉机的齿辊表面技术特性为锋角 35° ,齿角 100° ,斜度 4% ,齿顶平面 0.3 mm ,采用钝对钝的排列方式,与仿真试验的第 1 组第 3 项的齿辊表面技术参数为同一特性。试验材料为小麦,品种为周麦 22,产地周口,经润麦处理后含水率为 15.52% 。随机取 20 粒小麦,进行实际测量并取

平均值,得到其平均长径为 6.23 mm,中径为 3.18 mm,短径为 2.91 mm,与文献[15]中的小麦粒径一致。设置一组辊式磨粉机研磨试验,并重复进行 5 次,每次取小麦颗粒 2 kg。

研磨完成后依次用 4, 5, 6, 7, 8, 12, 16, 60 目筛网对磨下物进行筛分,对应筛网的孔隙分别为 4.75, 3.90, 3.35, 2.80, 2.36, 1.70, 1.00, 0.25 mm, 计算得到磨下物粒度分布,与仿真试验的第 1 组第 3 项进行粒度分布对比,得到如图 6 所示的粒度分布相对误差图,并将圆型检验平筛中的 60 目筛网筛分的磨下物进行剥刮率计算,与仿真试验 1.758% 的剥刮率进行计算,得到相对误差,如表 7 所示。

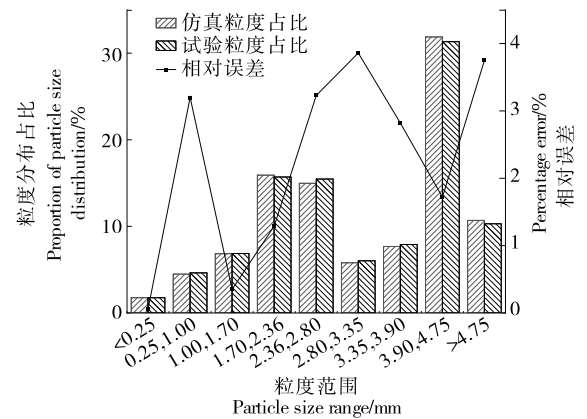


图 6 粒度分布对比图

Figure 6 Comparison diagram of particle size distribution

表 7 试验结果

Table 7 Experimental results

编号	筛下物质量/g	剥刮率/%	相对误差/%
1	33.22	1.661	5.517 6
2	34.28	1.714	2.502 8
3	37.05	1.853	5.375 4
4	35.13	1.757	0.085 3
5	36.23	1.812	3.043 2

由图 6 可知,试验的粒度分布与仿真存在相对误差,最大误差出现在 2.80~3.35 mm 范围,且不超过 4%。由表 7 可知,剥刮率最大误差为 5.5%。这是由于试验过程中齿辊会出现粘粉等现象,导致试验与仿真结果有一定误差,但总体在试验误差允许范围内,表明仿真试验的参数优化具有可靠性与可行性。

4 结论

以齿辊表面技术参数为优化对象,以实现最大剥刮率与最小磨损量为双优化目标,开展多目标参数优化研

究。通过单因素试验分析,得到齿角、锋角、齿顶宽与斜度等参数对剥刮率及磨损量的影响规律。通过矩阵分析法进行多指标综合权重评估,结果表明,剥刮率与磨损量两项评价指标存在显著的制约关系,经计算分析确定齿辊表面技术参数的最优组合方案为:齿角 110°、锋角 40°、齿顶宽 0.4 mm、斜度 3%。后续研究可针对齿辊表面技术参数与设备运行工况开展多因素联合优化,以进一步提升小麦制粉过程中的剥刮效率,延长齿辊使用寿命。

参考文献

[1] 黄奇鹏, 武文斌, 李聪, 等. 国内外磨粉机发展现状 & 展望[J]. 粮食加工, 2019, 44(1): 4-8.

Huang Q P, Wu W B, LI C, et al. Development status and prospect of grinding machines at home and abroad[J]. Grain Processing, 2019, 44(1): 4-8.

[2] 袁晓明, 王超, 阎鹏, 等. 离散元法在工农业上的应用研究综述[J]. 机械设计, 2016, 33(9): 1-9.

Yuan X M, Wang C, Yan P, et al. Review of discrete element method in industrial and agricultural applications[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(9): 1-9.

[3] 李仲斌, 王凌冰, 罗永攀. 基于离散元法的单辊破碎机磨损分析[J]. 烧结球团, 2021, 46(1): 49-54.

Li Z B, Wang L B, Luo Y P. Analysis on wear of single roll crusher based on discrete element method[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1): 49-54.

[4] 侯宁沛, 武文斌, 高杨杨, 等. 磨粉机齿辊磨损与研磨效果相关规律试验研究[J]. 粮食加工, 2021, 46(5): 15-20.

Hou N P, Wu W B, Gao Y Y, et al. Experimental study on the correlation between grinding roller wear and grinding effect of grinding machine[J]. Grain Processing, 2021, 46(5): 15-20.

[5] 王雪峰, 武文斌, 赵保伟, 等. 磨粉机磨辊表面磨损特征提取与识别[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 104-108.

Wang X F, Wu W B, Zhao B W, et al. Extraction and identification of wear features on grinding roller surface of grinding mill[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 104-108.

[6] Patwa A, Ambrose R P K, Dogan H, et al. Wheat mill stream properties for discrete element method modeling[J]. Transactions of the Asabe, 2014, 57(3): 891-899.

[7] 目崎 孝昌, 福森 武, 池田 善郎. 小麦粒粉碎用製粉ロールの摩耗特性[J]. 農業機械学会誌, 2001, 63(4): 110-116.

Mesaki Takamasa, Fukumori Takeshi, Ikeda Yoshio. Wear characteristics of wheat grinding roll[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2001, 63(4): 110-116.

[8] 刘海芃, 张超, 武文斌, 等. 基于 DEM 的磨粉机皮磨磨仿真及参数优化[J]. 包装工程, 2024, 45(3): 234-242.

Liu H P, Zhang C, Wu W B, et al. Simulation and parameter

- optimization of leather grinding of flour mill based on DEM[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(3): 234-242.
- [9] 吴兰, 于少博. 基于离散元的盘式磨粉机颗粒研磨仿真及参数优化[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 102-111.
- Wu L, Yu S B. Particle grinding simulation and parameter optimization of disc mill based on discrete element[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 102-111.
- [10] Jiang X H, Ye P, Li Z K. Analysis of grinding roller stress distribution of vertical roller mill[J]. Advanced Materials Research, 2014, 936: 1 862-1 867.
- [11] 黄奇鹏, 武文斌, 李聪, 等. 磨粉机磨辊齿型参数与功耗关系研究[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(1): 30-33.
- Huang Q P, Wu W B, Li C, et al. Research on the relationship between tooth profile parameters and power consumption of roller mill[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(1): 30-33.
- [12] Campbell G M, Fang C Y, Muhamad I I. On predicting roller milling performance VI: effect of kernel hardness and shape on the particle size distribution from first break milling of wheat [J]. Food and Bio products Processing, 2007, 85(1): 7-23.
- [13] 黄奇鹏, 高杨杨, 武文斌, 等. 磨粉机磨辊磨损研究进展[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(1): 46-51.
- Huang Q P, Gao Y Y, Wu W B, et al. Research progress of grinding roller wear of pulverizer[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(1): 46-51.
- [14] 张文龙, 武文斌, 吕少杰, 等. 制粉中的小麦力学参数和接触参数试验标定[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 105-112.
- Zhang W L, Wu W B, Lv S J, et al. Experimental calibration of wheat mechanical parameters and contact parameters in milling [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(2): 105-112.
- [15] 张超, 刘海芑, 张野, 等. 小麦籽粒 Ab-T10 破碎模型参数标定 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 117-123.
- Zhang C, Liu H P, Zhang Y, et al. Parameter calibration of wheat grain Ab-T10 crushing model[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 45(1): 117-123.
- [16] 朱忍忍, 宋少云, 张永林, 等. 基于 EDEM 的小麦磨粉过程仿真[J]. 武汉轻工大学学报, 2018, 37(1): 82-85.
- Zhu R R, Song S Y, Zhang Y L, et al. Simulation of wheat milling process based on EDEM[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2018, 37(1): 82-85.
- [17] 赵学敬, 金铁成. 磨辊流量公式参数解读与轧距计算程序 [J]. 粮食加工, 2009, 34(5): 18-20.
- Zhao X J, Jin T C. Parameter analysis of grinding roller flux formula and rolling distance calculation program[J]. Grain Processing, 2009, 34(5): 18-20.
- [18] 伍毅, 阮竞兰. 矩阵分析法在胶辊磨谷机工作参数优化中的应用[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(5): 83-88.
- Wu Y, Ruan J L. Application of matrix analysis method in working parameter optimization of rubber roll husker[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 33(5): 83-88.