

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80902

基于离散元的盘式磨粉机颗粒研磨 仿真及参数优化

吴 兰 于少博

(河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: [目的] 研究盘式磨粉机粉碎不同物料时不同工作参数对工艺效果的影响, 并对其工作参数进行优化。[方法] 采用 Rocky DEM 离散元软件对盘磨研磨过程进行模拟, 变量包括入料速度、磨盘间距、动磨盘转速和入料种类。分析这些因素对取粉率、耗电量和粉碎时间的影响, 并使用正交试验设计和矩阵分析方法对数值模拟结果进行综合评估。[结果] 盘磨研磨过程中不同入料参数对应的最优参数组合方案为: 粉碎小麦时磨盘间距 2.70 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 1 000 r/min; 粉碎玉米时磨盘间距 2.80 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 1 400 r/min; 粉碎荞麦时磨盘间距 2.60 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 600 r/min, 得到了不同颗粒大小与杨氏模量对应不同盘磨间距与动磨盘转速的回归模型。[结论] 通过正交试验与矩阵分析优化了小麦、玉米和荞麦的粉碎工艺, 并构建了自适应回归模型, 提升了磨粉机的操作效率和能效。

关键词: 五谷杂粮; 盘式磨粉机; DEM 仿真; 参数优化; 智能化升级

Particle grinding simulation and parameter optimization of disc mill based on discrete element

WU Lan YU Shaobo

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

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different operating parameters on the grinding performance of a disk mill when processing different materials, and to optimize its working parameters. [Methods] The grinding process of the disk mill was simulated using Rocky DEM discrete element software. Variables included feeding speed, grinding disc spacing, rotational speed of the dynamic disc, and material type. The effects of these factors on powder yield, energy consumption, and grinding time were analyzed. An orthogonal experimental design and matrix analysis were used to comprehensively evaluate the simulation results. [Results] The optimal parameter combinations for different feed materials in the disk milling process were determined as follows. For wheat: grinding disc spacing of 2.70 mm, feeding speed of 0.75 kg/min, and dynamic disc speed of 1 000 r/min; For corn: disc spacing of 2.80 mm, feeding speed of 0.75 kg/min, and disc speed of 1 400 r/min; For buckwheat: disc spacing of 2.60 mm, feeding speed of 0.75 kg/min, and disc speed of 600 r/min. Regression models were established to describe the relationship between different particle sizes and Young's modulus under varying grinding disc spacings and dynamic disc speeds. [Conclusion] The grinding processes for wheat, corn, and buckwheat were optimized through orthogonal testing and matrix analysis, and an adaptive regression model was developed to improve the operational efficiency and energy performance of the disk mill.

Keywords: cereals and miscellaneous grains; disc mill; DEM simulation; parameter optimization; intelligent upgrade

随着社会对饮食健康的日益重视, 中国的五谷杂粮产量持续上升, 同时, 人们对于五谷杂粮的加工质量的期望也在不断增长^[1-2]。在粮食生产过程中, 加工环节具有至关重要的地位。盘式磨粉机是五谷杂粮制粉过程中的

基金项目: 河南省科技创新领军人才(编号: 244200510021); 河南省高校科技创新团队(编号: 24IRTSTHN030)

通信作者: 吴兰(1981—), 女, 河南工业大学教授, 博士。E-mail: wulan@haut.edu.cn

收稿日期: 2024-09-02 改回日期: 2025-04-07

引用格式: 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.

Citation: WU Lan, YU Shaobo. Particle grinding simulation and parameter optimization of disc mill based on discrete element[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 102-111.

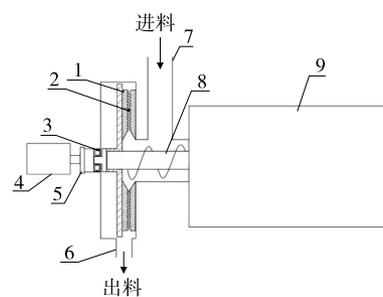
关键设备,它的核心任务是对各种物料进行精细的研磨和粉碎,以确保物料的粒度和品质能够尽可能地满足后续食品加工生产的需求。对盘式磨粉机进行智能化升级,以实现五谷杂粮制粉加工的减损节能和提质增效,是目前粮食加工领域的一个重要研究方向。不同的入料参数会对磨粉效果有很大影响,导致最终的产品满足不了需求。Mo等^[3]采用Fluent软件来分析盘式磨粉机在工作时磨粉仓内部的流动特性以及压力的分布情况。莫海军等^[4]采用Fluent软件对盘式磨粉机的粉碎流场进行数值模拟研究。此外,许多国外学者对各类磨粉机研磨功效进行了研究。Ilie等^[5]基于表面形貌的微观摩擦力模型,对盘式磨粉机研磨过程中粮食的运动、粮食之间的碰撞以及粮食与固体表面的碰撞进行了理论和试验研究。Paraschiv等^[6]建立了锤磨能耗最小、粉碎率最大的目标函数,为该领域锤式磨机的最佳工作参数、结构参数和功能参数的选择提供依据。

随着离散元分析的发展,离散元开始应用于颗粒破碎加工过程中的分析,离散元破碎方法是通过计算机计算破碎模型控制下的颗粒破碎的状态,从而得到颗粒场中各物理量的分布规律和变化形式,具有计算效率高、周期短的特点。刘海芃等^[7]采用离散元分析方法,对辊式磨粉机的磨辊研磨流程进行了模拟研究并进行加工参数优化。陈艳艳等^[8]为了提高球磨机的磨粉效果,利用离散元软件EDEM和ANSYS进行仿真模拟试验分析,优化了球磨机筒体结构。赵岐峰等^[9]基于离散元理论,建立破碎功率模型,分析了各工作参数对齿辊制粉功率的影响。研究拟利用Rocky DEM软件对盘式磨粉机工作区内的物料进行数值模拟,通过正交分析试验与多指标正交试验矩阵分析对加工参数进行优化,并对结果进行多元线性回归分析得到不同颗粒大小与杨氏模量对应不同盘磨间距与动磨盘转速的回归模型,以期为磨粉机的工作参数设定及设备的智能化升级提供参考。

1 盘式磨粉机原理及磨盘三维模型建立

图1展示了盘式磨粉机的原理。粮食颗粒从进料口进入,异步电机带动磨盘旋转,定磨盘固定在机架上,水平输送螺旋随动磨盘一同旋转并将粮食颗粒抽到磨粉仓中,粮食受到惯性作用在两磨盘中进行剪切、摩擦、挤压,粉碎完成后通过出料口完成磨粉过程。图2为磨齿磨粉示意图。

通过Solidworks对磨盘进行精确建模,并将其导入到Rocky DEM中进行模拟,模型如图3所示。磨盘的内径80 mm,外径150 mm,动磨盘齿高1.7 mm,静磨盘齿高1.3 mm,齿宽2°,两磨盘间距0.30~0.60 mm,入料速度0.50~1.25 kg/h,动磨盘转速200~1 400 r/min。



1. 动磨盘 2. 静磨盘 3. 轴承 4. 伺服电机 5. 间距调节器
6. 出料口 7. 进料口 8. 水平输送螺旋 9. 异步电机

图1 盘式磨粉机原理图

Figure 1 Schematic diagram of disk mill

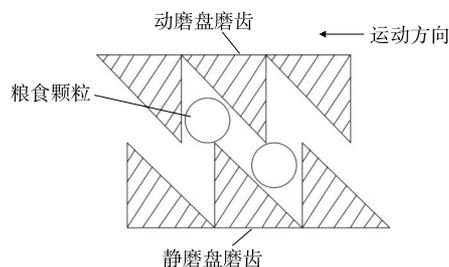


图2 磨齿磨粉示意图

Figure 2 Tooth grinding powder schematic diagram

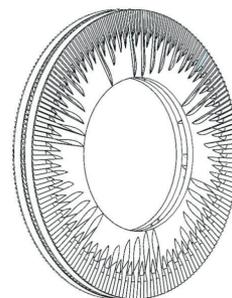


图3 磨粉机磨盘的几何模型

Figure 3 Geometric model of mill disk

2 磨粉过程的数值模拟

2.1 破碎模型的选择

Rocky DEM提供AB-T10与Tavares两种破碎模型,AB-T10破碎模型将每个颗粒视为一个独立的实体,并根据其所受冲击能量在瞬间发生破裂,形成碎片^[10-11],此模型适合磨粉机研磨时粮食的粉碎。

在Rocky中,比冲击能 e_t 是通过颗粒加载期间其所有接触点的接触力所做功的总和来计算的。为使颗粒破碎, e_t 应大于颗粒最小破损能 e_n 。最小破损能的颗粒尺寸函数:

$$e_n = e_{nr} \frac{L_r}{L}, \quad (1)$$

式中:

e_n ——材料参考颗粒尺寸的最小破损能, J/kg;
 e_{nr} ——材料参考颗粒尺寸的参考最小破碎比能, J/kg;
 L_r ——参考颗粒尺寸, mm;
 L ——实际颗粒尺寸, mm。

比碰撞能 e_c 可以得到颗粒粉碎时连续碰撞所造成的破碎, 当颗粒被释放并且 e'_i 的值降低到 e_n 以下时, e_x 的值被重置为零, 此时可以开始一个新的加载周期, 在这个周期中 e_c 的值将能够再次增加。

$$e_c = e_c + e'_i - \max(e'_i - \Delta t, e_x), \quad (2)$$

式中:

t ——给定时间, s;
 e'_i ——比冲击能的瞬时值, J/kg;
 $e'_i - \Delta t$ ——上一时间步的比冲击能, J/kg;
 e_x ——最大冲击能量值, J/kg。

在 AB-T10 模型中, 给定累积比接触能值的破碎概率计算:

$$P(e_c) = 1 - \exp\left(-\frac{Se_c L}{L_r}\right), \quad (3)$$

式中:

$P(e_c)$ ——累积比碰撞能的破碎概率;
 L_r ——参考颗粒尺寸, mm;
 L ——实际颗粒尺寸, mm;
 e_c ——比碰撞能, kg/J;
 S ——材料参数, kg/J。

如果用式(3)计算的值在任何时刻大于颗粒强度, 颗粒就会破碎。通过表达式(4)计算 t_{10} 参数的值。

$$t_{10} = M \left[1 - \exp\left(-Se_c \frac{L}{L_r}\right) \right], \quad (4)$$

式中:

t_{10} ——通过筛选尺寸为原始尺寸 1/10 的碎片的百分比, %;
 M ——材料破碎的最大 t_{10} , %。

2.2 颗粒属性确定

通过仿真来模拟盘磨磨粉过程中的颗粒破碎, 模拟了真实的粮食颗粒形状, 图 4 是 3 种具有不同大小和形状的颗粒。选用 Ab-T10 作为颗粒的破碎模型, 根据文献 [12-13] 设置模型的参数如表 1 所示, 设置颗粒生成时间 0.5 s, 仿真时间为每组仿真颗粒完全粉碎所用时间。

小麦、玉米和荞麦在研磨过程中物料和磨盘的接触参数、物料的物理参数由文献 [14-17] 可以得到, 如表 2 和表 3 所示。

磨盘研磨仿真过程中, 仿真时间在 0, 0.1, 0.5, 1.0 s 时粮食颗粒的状态变化如图 5 所示。进料口放置在两个盘磨之间的空腔中, 其主要功能是均匀地生成颗粒, 在重力和惯性的影响下移动到盘磨的研磨区域。通过盘磨摩擦、剪切和挤压的方式对粮食颗粒进行研磨, 研磨完成后对碎片进行统计分析。

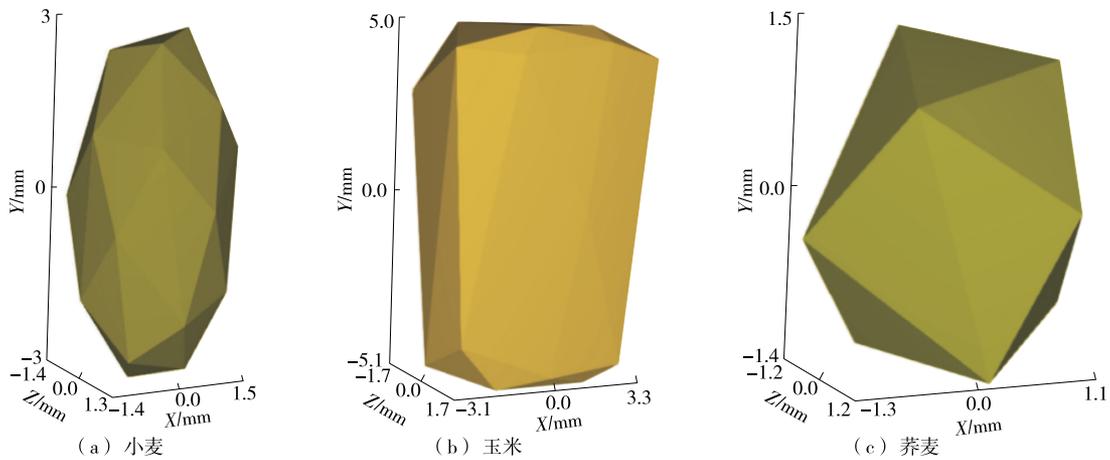


图 4 小麦、玉米及荞麦的颗粒模型

Figure 4 Grain models of wheat, corn, and buckwheat

表 1 Ab-T10 破碎模型参数设置

Table 1 Parameter settings of Ab-T10 crushing model

品种	参考尺寸/mm	最小破碎比能/(J·kg ⁻¹)	选择函数系数/(kg·J ⁻¹)	最大 T10 值/%	破碎后最小尺寸/mm
小麦	3	80.00	0.002 00	8.00	0.1
玉米	10	71.45	0.002 22	11.56	0.1
荞麦	3	90.00	0.002 00	12.00	0.1

表2 材料接触属性参数

接触属性	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
小麦—小麦	0.25	0.80	0.05
小麦—铸铁	0.50	0.50	0.01
荞麦—荞麦	0.17	0.65	0.40
荞麦—铸铁	0.38	0.24	0.13
玉米—玉米	0.56	0.31	0.29
玉米—铸铁	0.66	0.40	0.27

表3 材料物理特性参数

材料	泊松比	杨氏模量/GPa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
小麦	0.30	0.354	1 480.00
荞麦	0.42	0.089	1 146.84
玉米	0.40	0.298	769.06
荞麦铸铁	0.30	185.000	7 300.00

3 仿真结果分析

3.1 工艺效果评定指标的确定

取粉率是指在粉碎系统中,粮食颗粒被研磨并通过筛网后,其通过的物料流量占总流量的百分比。使用 Rocky DEM 软件在模拟过程中对碎片的粒度进行了统计,选定筛孔为 0.28 mm 的 60 目的筛子来测定取粉率,所以计算粒径 $<0.28 \text{ mm}$ 的碎片所占的百分比。在粮食加工的整个过程中,制粉是最耗能的一环,因此提高磨粉机的能效,减少能耗和排放是极其重要的,仿真所参照的实物为 HK-860 磨粉机全功率 3 kW/h、转速 1 400 r/min,根据异步电机的运行时间及转速对应的功率来计算耗电量。将磨粉机在研磨过程中的耗电量作为另一个评价指标。粉碎时间是决定磨粉机是否容易堵料的关键因素,为了保证磨粉机平顺工作,粉碎时间对于磨粉机具有重要意义,粉碎时间是从颗粒开始产生到颗粒完全粉碎的时间,故将其作为第 3 个评价指标。

3.2 工作参数对工艺效果指标的单因素分析

为了研究磨盘加工参数如何影响取粉率、耗电量及粉

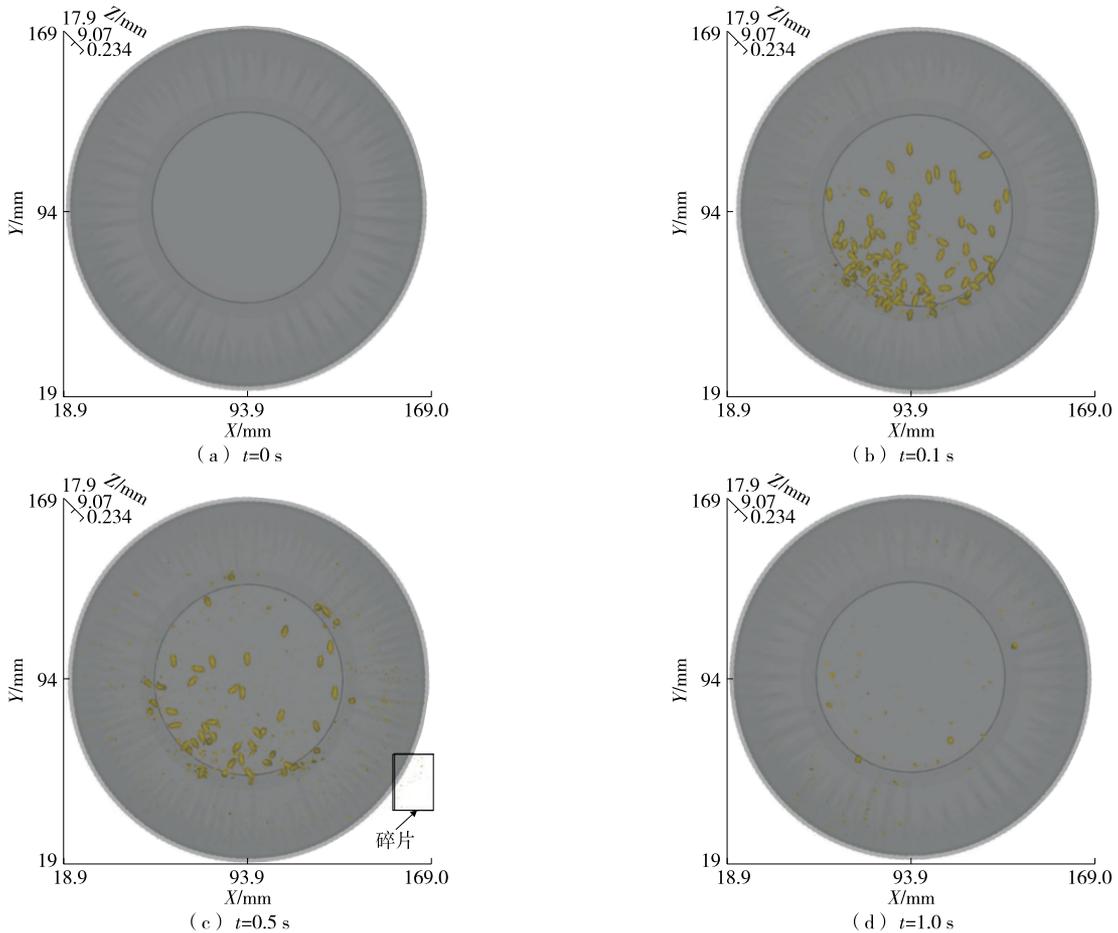


图5 磨盘研磨过程中粮食颗粒的变化

Figure 5 Changes of grain particles during the grinding process of the mill

碎时间,开展了涉及单一变量的颗粒粉碎试验。初始的处理基准条件:盘磨间距 2.60 mm,入料速度 0.5 kg/min,动磨盘转速 1 400 r/min,颗粒种类为小麦,分别对应 HK-860 磨粉机最小盘磨间距 2.60 mm、最小入料速度 30 kg/h、全功率转速 1 400 r/min。根据盘磨间距、入料速度、动磨盘转速设置 3 组仿真,每组 4 个对照水平,颗粒种类设置一组仿真,3 个对照水平。

3.2.1 磨盘间距对取粉率、耗电量及粉碎时间的单因素分析 该组仿真试验以盘磨间距作为变量,盘磨间距是指动磨盘与静磨盘平面之间不计算齿高的距离,分别取 2.60,2.70,2.80,2.90 mm,在保持其他参数不变的前提下,通过数值模拟分析了取粉率、耗电量及粉碎时间的相关数据,其结果如图 6 所示。由图 6 可知,取粉率与盘磨间距成反比,耗电量和粉碎时间与盘磨间距成正比。这是由于间距缩小,颗粒受到磨盘齿的压力增加,也限制了物料的流动性,增加了颗粒之间的摩擦和碰撞机会,导致颗粒的破碎率增加,从而增加了取粉率。利用 Origin 软件分析得出盘磨间距与取粉率、耗电量、粉碎时间的拟合方程,3 组拟合的决定系数 R^2 分别为 0.999 71,0.999 91,0.999 88,证明拟合曲线得到较好的效果。

$$y_1 = 125.345x - 28.25x^2 - 78.8025, \quad (5)$$

$$y_2 = 1953.34949x - 245.93325x^2 + 16.23, \quad (6)$$

$$y_3 = 0.62119x^2 - 3.21838x + 5.32, \quad (7)$$

式中:

y_1 ——取粉率,%;

y_2 ——耗电量,J;

y_3 ——粉碎时间,s;

x ——磨盘间距,mm。

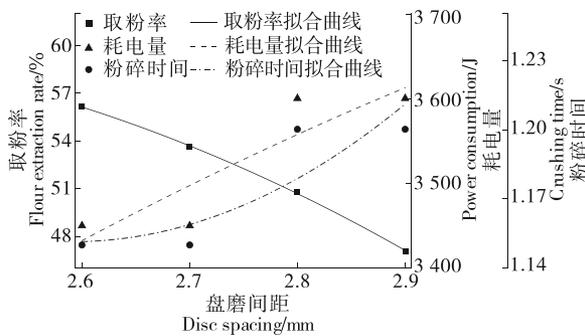


图 6 不同间距下取粉率、耗电量及粉碎时间的试验结果及拟合曲线

Figure 6 Experimental results and fitting curves of powder yield, energy consumption, and grinding time at different spacings

3.2.2 入料速度对取粉率、耗电量及粉碎时间的单因素分析 该组仿真试验以入料速度作为变量,分别取 0.50,0.75,1.00,1.25 kg/min,其他参数保持不变,通过数值模拟

得出其取粉率、耗电量和粉碎时间,如图 7 所示。由图 7 可知,在 0.9 kg/min 的入料速度时取粉率达到最高,过低的入料速度会降低磨粉机的产能,相反会导致磨粉机可能无法及时处理所有进入的原料,导致磨粉不完全,效率下降,取粉率降低。耗电量和粉碎时间与入料速度成正比,这是因为高入料速度可能导致物料在磨粉机内堆积和堵塞,堆积的物料需要更多时间来处理,从而增加整体粉碎时间和功耗。利用 Origin 软件分析得出入料速度与取粉率、耗电量、粉碎时间的拟合方程,3 组拟合的决定系数 R^2 分别为 0.999 96,0.999 98,0.999 82,证明拟合曲线得到较好的效果。

$$y_1 = 48.56 + 14.3129x - 8.12601x^2, \quad (8)$$

$$y_2 = 2071.82458x - 799.50228x^2 + 2573.1, \quad (9)$$

$$y_3 = 0.59616x - 0.21442x^2 - 0.8967, \quad (10)$$

式中:

y_1 ——取粉率,%;

y_2 ——耗电量,J;

y_3 ——粉碎时间,s;

x ——入料速度,kg/min。

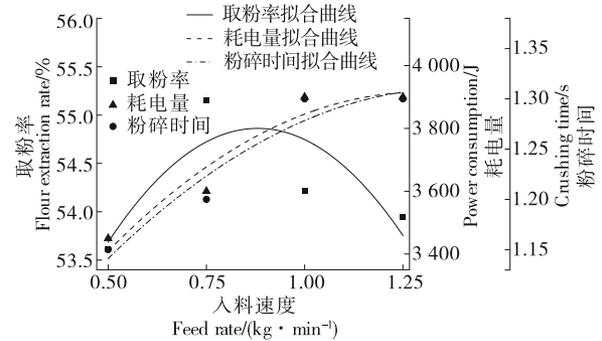


图 7 不同入料速度下取粉率、耗电量及粉碎时间的试验结果及拟合曲线

Figure 7 Experimental results and fitting curves of powder yield, energy consumption, and grinding time at different feeding speeds

3.2.3 动磨盘转速对取粉率、耗电量及粉碎时间的单因素分析 该组仿真试验以动磨盘转速作为变量,分别取 200,600,1 000,1 400 r/min,其他参数保持不变,通过数值模拟得出其取粉率、耗电量和粉碎时间,如图 8 所示。由图 8 可知,取粉率和耗电量与动磨盘转速成正比,粉碎时间与动磨盘转速成反比。动磨盘转速太低会导致研磨效率降低,颗粒在盘磨中的速度较低,与齿齿碰撞的力度、摩擦力较小,导致颗粒粉碎不完全,颗粒在磨盘间堆积,粉碎时间增加,使得磨粉机堵料。利用 Origin 软件分析得出入料速度与取粉率、耗电量、粉碎时间的拟合方程,3 组拟合的决定系数 R^2 分别为 0.990 10,0.999 19,0.999 28,证明拟合曲线得到较好的效果。

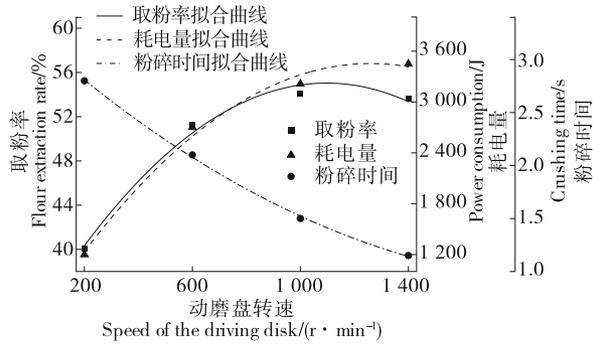


图8 不同动磨盘转速下取粉率、耗电量及粉碎时间的试验结果及拟合曲线

Figure 8 Experimental results and fitting curves of powder yield, energy consumption, and grinding time under different rotational speeds of the dynamic disc

$$y_1 = 33.03988 + 0.04013x - 1.82969 \times 10^{-5}x^2, \quad (11)$$

$$y_2 = 319.25 + 4.97587x - 0.00197x^2, \quad (12)$$

$$y_3 = 3.23812 - 0.00226x + 5.46875 \times 10^{-7}x^2, \quad (13)$$

式中:

y_1 ——取粉率,%;

y_2 ——耗电量,J;

y_3 ——粉碎时间,s;

x ——动磨盘转速,r/min。

3.2.4 入料种类对取粉率、耗电量及粉碎时间的单因素分析 该组模拟试验中,以小麦、玉米和荞麦为颗粒材料,保持其他参数不变进行数值模拟,其取粉率、耗电量和粉碎时间的变化如图9所示。由图9可知,荞麦与玉米在相同的条件下均高于小麦的取粉率,玉米取粉率最高,主要因素是颗粒相比于小麦和荞麦颗粒大、数量少,在粉碎时更容易接触到磨盘进行粉碎。荞麦取粉率比小麦高的主要因素是因为荞麦的杨氏模量比小麦低,更容易破碎。因此,在小麦、荞麦、玉米3种粮食中,颗粒大小对取粉率的影响效果最为关键,其次是杨氏模量。

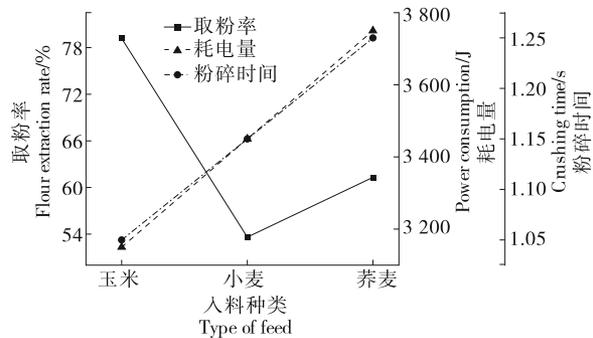


图9 不同入料种类下取粉率、耗电量及粉碎时间的试验结果及拟合曲线

Figure 9 Experimental results and fitting curves of powder yield, energy consumption, and grinding time under different material types

3.3 工作参数对工艺效果指标的多因素分析

通过单变量分析确定了各个因素对评价指标的影响,并构建了效果良好的回归模型。然而,试验中的3个评价指标相互依赖且制约,仅通过单因素分析无法全面体现其复杂性。为了深入探讨多种因素如何影响3个评价指标并优化参数,采用3种不同粮食进行三因素三水平的正交模拟试验。正交试验因素水平设计见表4,试验结果及数值模拟数据见表5。

表4 正交试验的因素水平

Table 4 Factor levels in orthogonal experiments

水平	A 盘磨间距/mm	B 入料速度/(kg·min ⁻¹)	C 动磨盘转速/(r·min ⁻¹)
1	2.60	0.50	600
2	2.70	0.75	1 000
3	2.80	1.00	1 400

表5 正交试验结果和极差分析

Table 5 Numerical simulation results and range analysis of orthogonal experiments

试验号	A	B	C	取粉率/%	耗电量/J	粉碎时间/s
1	1	1	1	55.74	2 828.760	2.20
2	1	2	2	56.47	2 785.770	1.30
3	1	3	3	58.28	3 000.000	1.00
4	2	1	3	54.11	3 214.350	1.50
5	2	2	2	55.15	3 600.000	1.20
6	2	3	1	50.45	2 699.970	2.10
7	3	1	3	50.76	3 600.000	1.20
8	3	2	1	47.24	2 142.900	1.55
9	3	3	2	50.45	2 678.625	1.25
取粉率	k_{11}	56.830	53.537	51.143		
	k_{12}	53.237	52.953	53.677		
	k_{13}	49.483	53.060	54.730		
	R_1	7.347	0.584	3.587		
耗电量	k_{21}	2 871.510	3 214.370	2 557.210		
	k_{22}	3 171.440	2 842.890	2 892.915		
	k_{23}	2 807.175	2 792.865	3 400.000		
	R_2	364.265	421.505	842.790		
粉碎时间	k_{31}	1.500	1.633	1.950		
	k_{32}	1.600	1.350	1.350		
	k_{33}	1.333	1.450	1.133		
	R_3	0.267	0.283	0.817		

由表 5 可知,取粉率与间距成反比,与动磨盘转速成正比,入料速度在 0.75 kg/min 时取粉率最佳。基于极差分析的比较,3 个主要的影响因素对取粉率的影响顺序是 A>C>B,即间距的影响最为显著,而入料速度的影响相对较小。

入料速度在 0.75~1.00 kg/min 时耗电量最佳,间距在 2.70 mm 时最佳,耗电量与动磨盘转速成正比。基于极差分析的比较,3 个主要的影响因素对耗电量的影响顺序为 C>B>A,即间距的影响最为显著,而入料速度的影响相对较小。

粉碎时间与转速成反比,入料速度在 0.75 kg/min、间距在 2.80 mm 时耗电量最佳。基于极差分析的比较,3 个主要的影响因素对粉碎时间的影响顺序为 C>B>A,即间距的影响最为显著,而入料速度的影响相对较小。

对于取粉率的最优工作参数为 A₁B₁C₃,即间距 2.60 mm、入料速度 0.5 kg/min、动磨盘转速 1 400 r/min。对于耗电量的最优组合为 A₃B₃C₁,即间距 2.80 mm、入料速度 1 kg/min、动磨盘转速 600 r/min。而对于粉碎时间的最优组合为 A₃B₂C₃,即间距 2.80 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 1 400 r/min。

3.4 多指标正交试验矩阵分析评定

通过极差分析得出 3 个因素都会影响指标,并确定了 3 个指标的最佳组合值。为了优化磨粉机的运行参数,需要选出取粉率、耗电量和粉碎时间 3 个评价指标的最佳组合。矩阵分析法可以得出不同因素水平对试验结果影响的权重。基于文献[18]构建矩阵模型,并利用表 5 中的试验结果计算小麦取粉率的试验指标层矩阵(M_{w1})、小麦取粉率的因素层矩阵(T_{w1})、小麦取粉率的水平层矩阵(S_{w1})和小麦取粉率指标值的权重矩阵(W_{w1})。

$$M_{w1} = \begin{bmatrix} 56.830 & 0 & 0 \\ 53.237 & 0 & 0 \\ 49.483 & 0 & 0 \\ 0 & 53.537 & 0 \\ 0 & 52.953 & 0 \\ 0 & 53.060 & 0 \\ 0 & 0 & 51.143 \\ 0 & 0 & 53.677 \\ 0 & 0 & 54.730 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$T_{w1} = \begin{bmatrix} 0.006\ 27 & 0 & 0 \\ 0 & 0.006\ 27 & 0 \\ 0 & 0 & 0.006\ 27 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$S_{w1} = \begin{bmatrix} 7.347 \\ 11.518 \\ 0.584 \\ 11.518 \\ 3.587 \\ 11.518 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$W_{w1} = M_{w1} \times T_{w1} \times S_{w1} = \begin{bmatrix} 0.227\ 288\ 87 \\ 0.212\ 918\ 84 \\ 0.197\ 904\ 89 \\ 0.017\ 019\ 61 \\ 0.016\ 834\ 26 \\ 0.016\ 868\ 27 \\ 0.099\ 863\ 79 \\ 0.104\ 811\ 77 \\ 0.106\ 867\ 90 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

在使用矩阵分析法研究指标时,如果指标越小越好,则小麦取粉率的试验指标层矩阵 M_{w1} 中的 k_{ij} 的值应被替换为 $1/k_{ij}$,小麦耗电量与粉碎时间的试验指标层矩阵 M_{w2} 、 M_{w3} 如式(18)、式(19)所示。

$$M_{w2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2\ 871.510} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3\ 171.440} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2\ 807.175} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3\ 214.370} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2\ 842.890} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2\ 792.865} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2\ 557.210} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2\ 892.915} \\ 0 & 0 & \frac{1}{3\ 400.000} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$M_{w3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1.500} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1.600} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1.633} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1.633} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1.350} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1.450} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1.950} \\ 0 & 0 & \frac{1}{1.350} \\ 0 & 0 & \frac{1}{1.330} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

根据式(20)可得,对于评价指标的影响程度依次是 w_C 、 w_A 、 w_B ,分别为动磨盘转速、磨盘间距和入料速度。分

析式(20)中的各个变量在不同条件下的表现,可以发现磨盘间距 w_A 在 w_{A_1} 水平上具有最高的权重。同样,入料速度 w_B 和动磨盘转速 w_C 在 w_{B_2} 和 w_{C_2} 水平上的影响力最大。

通过对这些因素的综合权重评估,得出盘磨式磨粉机在粉碎小麦时的最佳工作参数组合是 $w_{A_1} w_{B_2} w_{C_2}$,即磨盘间距 2.70 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 1 000 r/min。

$$W_w = \frac{W_{w1} + W_{w2} + W_{w3}}{3} = \frac{1}{3} \times \left\{ \begin{matrix} [0.227\ 288\ 87] \\ [0.212\ 918\ 84] \\ [0.197\ 904\ 89] \\ [0.017\ 019\ 61] \\ [0.016\ 834\ 26] \\ [0.016\ 868\ 27] \\ [0.099\ 863\ 79] \\ [0.104\ 811\ 77] \\ [0.106\ 867\ 90] \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} [0.076\ 382\ 53] \\ [0.069\ 157\ 72] \\ [0.078\ 132\ 81] \\ [0.089\ 883\ 58] \\ [0.089\ 175\ 51] \\ [0.090\ 775\ 22] \\ [0.196\ 316\ 42] \\ [0.173\ 534\ 58] \\ [0.147\ 655\ 25] \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} [0.063\ 771\ 52] \\ [0.059\ 785\ 80] \\ [0.071\ 760\ 90] \\ [0.062\ 060\ 20] \\ [0.075\ 069\ 86] \\ [0.069\ 892\ 62] \\ [0.152\ 829\ 69] \\ [0.220\ 754\ 00] \\ [0.224\ 073\ 62] \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} [0.122\ 480\ 97] \\ [0.113\ 954\ 12] \\ [0.115\ 932\ 87] \\ [0.056\ 321\ 13] \\ [0.060\ 359\ 88] \\ [0.059\ 178\ 70] \\ [0.149\ 669\ 97] \\ [0.166\ 366\ 78] \\ [0.159\ 532\ 26] \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} w_{A_1} \\ w_{A_2} \\ w_{A_3} \\ w_{B_1} \\ w_{B_2} \\ w_{B_3} \\ w_{C_1} \\ w_{C_2} \\ w_{C_3} \end{matrix} \quad (20)$$

同理,可求得荞麦和玉米的 3 个单指标权重矩阵的平均值 W_c 和 W_b ,如式(21)和式(22)所示。

$$W_c = \frac{W_{c_1} + W_{c_2} + W_{c_3}}{3} = \frac{1}{3} \times \left\{ \begin{matrix} [0.146\ 460\ 92] \\ [0.142\ 320\ 73] \\ [0.140\ 324\ 25] \\ [0.099\ 527\ 27] \\ [0.096\ 712\ 52] \\ [0.097\ 400\ 85] \\ [0.090\ 286\ 30] \\ [0.092\ 513\ 90] \\ [0.092\ 765\ 19] \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} [0.028\ 828\ 91] \\ [0.028\ 130\ 12] \\ [0.027\ 400\ 62] \\ [0.063\ 637\ 24] \\ [0.070\ 615\ 52] \\ [0.062\ 605\ 57] \\ [0.300\ 953\ 87] \\ [0.225\ 221\ 38] \\ [0.192\ 606\ 37] \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} [0.027\ 121\ 02] \\ [0.025\ 914\ 02] \\ [0.026\ 196\ 65] \\ [0.071\ 655\ 20] \\ [0.078\ 714\ 57] \\ [0.069\ 318\ 11] \\ [0.187\ 421\ 54] \\ [0.233\ 714\ 79] \\ [0.279\ 944\ 09] \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} [0.067\ 470\ 28] \\ [0.065\ 454\ 96] \\ [0.064\ 640\ 51] \\ [0.078\ 273\ 24] \\ [0.082\ 014\ 20] \\ [0.076\ 441\ 51] \\ [0.192\ 887\ 24] \\ [0.183\ 816\ 69] \\ [0.188\ 438\ 55] \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} c_{A_1} \\ c_{A_2} \\ c_{A_3} \\ c_{B_1} \\ c_{B_2} \\ c_{B_3} \\ c_{C_1} \\ c_{C_2} \\ c_{C_3} \end{matrix} \quad (21)$$

$$W_b = \frac{W_{b_1} + W_{b_2} + W_{b_3}}{3} = \frac{1}{3} \times \left\{ \begin{matrix} [0.104\ 203\ 95] \\ [0.103\ 416\ 06] \\ [0.102\ 434\ 77] \\ [0.143\ 569\ 00] \\ [0.140\ 228\ 15] \\ [0.142\ 272\ 26] \\ [0.088\ 304\ 88] \\ [0.088\ 426\ 40] \\ [0.087\ 144\ 97] \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} [0.077\ 213\ 68] \\ [0.094\ 926\ 87] \\ [0.125\ 977\ 12] \\ [0.036\ 958\ 73] \\ [0.045\ 022\ 99] \\ [0.042\ 684\ 89] \\ [0.108\ 683\ 24] \\ [0.193\ 840\ 40] \\ [0.274\ 692\ 07] \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} [0.053\ 239\ 97] \\ [0.064\ 304\ 62] \\ [0.090\ 551\ 41] \\ [0.034\ 004\ 58] \\ [0.045\ 610\ 72] \\ [0.039\ 642\ 96] \\ [0.068\ 159\ 36] \\ [0.202\ 448\ 44] \\ [0.402\ 037\ 79] \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} [0.078\ 219\ 20] \\ [0.087\ 549\ 18] \\ [0.106\ 321\ 10] \\ [0.071\ 510\ 77] \\ [0.076\ 953\ 95] \\ [0.074\ 866\ 70] \\ [0.088\ 382\ 49] \\ [0.161\ 571\ 75] \\ [0.254\ 624\ 94] \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} b_{A_1} \\ b_{A_2} \\ b_{A_3} \\ b_{B_1} \\ b_{B_2} \\ b_{B_3} \\ b_{C_1} \\ b_{C_2} \\ b_{C_3} \end{matrix} \quad (22)$$

在对荞麦进行粉碎时工作参数的多指标优化最优组合是 $c_{A_1}c_{B_2}c_{C_1}$,即磨盘间距 2.60 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 600 r/min,在对玉米进行粉碎时工作参数的多指标优化最优组合是 $b_{A_1}b_{B_2}b_{C_1}$,即磨盘间距 2.80 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 1 400 r/min。通过对玉米、荞麦、小麦的颗粒大小和杨氏模量进行相关性分析,进一步探讨了这些物理参数对磨粉过程中磨盘间距和动磨盘转速的影响。利用 Origin 软件分析得出颗粒的大小、杨氏模量与盘磨间距、动磨盘转速的多元线性回归方程,

2 组拟合的决定系数 R^2 分别为 0.990 16, 0.991 63, 证明拟合曲线得到较好的效果。

$$y_1 = 10.78 + 119.217\ 27x_1 + 782.929\ 05x_2, \quad (23)$$

$$y_2 = 1.809 + 0.066\ 56x_1 + 1.180\ 9x_2, \quad (24)$$

式中:

y_1 ——动磨盘转速, r/min;

y_2 ——盘磨间距, mm;

x_1 ——颗粒大小, mm;

x_2 ——杨氏模量, GPa。

4 仿真试验的验证

采用 HK-860 磨粉机进行了 2 组试验,第 1 组设置转速 1 400 r/min、入料速度 0.5 kg/min、入料种类为小麦,间距分别为 2.60、2.70、2.80、2.90 mm。第 2 组是转速 1 400 r/min、入料速度 0.5 kg/min、间距 2.60 mm,入料种类分别为小麦、玉米、荞麦。每组试验进行 5 次取平均值。磨粉过程中,通过计时器精确记录磨粉时间,并根据转速计算相应的耗电量。磨粉完成后,采用 60 目筛网进行筛分,最终使用电子天平称取 60 目粉末的质量,并与物料磨

粉前的质量进行对比,以计算取粉率。

如图 10 和图 11 所示,在不同间距下取粉率、耗电量、粉碎时间的仿真值与实际值最大相对误差分别为 6.56%、8.70%、8.70%,在不同种类下取粉率、耗电量、粉碎时间的仿真值与实际值最大相对误差分别为 4.45%、8.33%、8.33%。实物试验与仿真试验相比,取粉率整体偏低,这是由于磨粉时,磨盘生热会蒸发一部分水分导致面粉质量减轻。结果表明,通过仿真进行的盘式磨粉机参数优化具有可靠性。

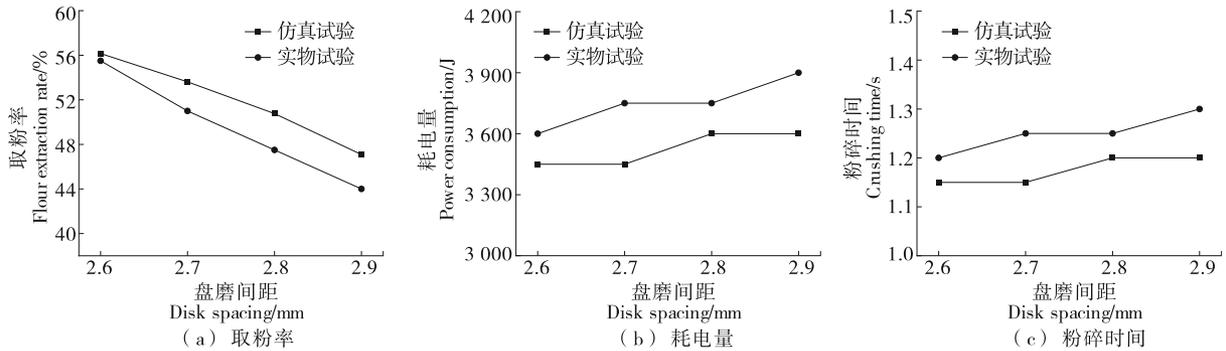


图 10 变间距下取粉率、耗电量及粉碎时间实物试验与仿真试验对比

Figure 10 Comparison of powder yield, energy consumption, and grinding time at varying spacings between real experiment and simulation experiment

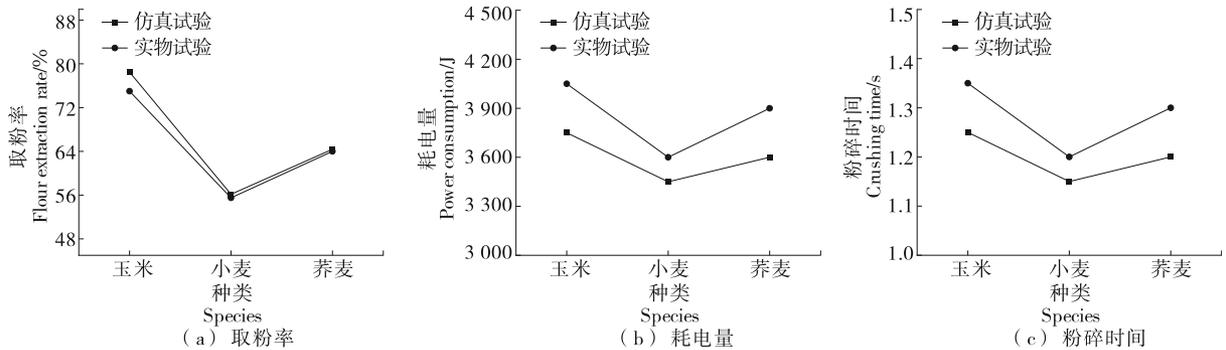


图 11 不同种类下取粉率、耗电量及粉碎时间实物试验与仿真试验对比

Figure 11 Comparison of powder yield, energy consumption, and grinding time in different types between real experiment and simulation experiment

5 结论

(1) 通过三因素三水平的正交试验进行多因素分析得出,当研究对象为小麦时,取粉率最高的参数组合为磨盘间距 2.60 mm、入料速度 0.5 kg/min、动磨盘转速 1 400 r/min。耗电量最低的参数组合为磨盘间距 2.80 mm、入料速度 1.00 kg/min、动磨盘转速 600 r/min。粉碎时间最短的参数组合为磨盘间距 2.80 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 1 400 r/min。

(2) 取粉率、耗电量、粉碎时间 3 个指标相互制约,无

法同时满足取粉率最高、耗电量最低、粉碎时间最短的工艺要求。通过矩阵分析法的综合评估以及结合实际工艺需求,确定盘式磨粉机在小麦粉碎过程中的最佳工作参数组合为磨盘间距 2.70 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 1 000 r/min,在对玉米进行粉碎时为磨盘间距 2.80 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 1 400 r/min,在对荞麦进行粉碎时为磨盘间距 2.60 mm、入料速度 0.75 kg/min、动磨盘转速 600 r/min。

(3) 在玉米粉碎时,适合较大磨盘间距和较高的转速。玉米颗粒较大,一次粉碎不能达到要求,较大的间距

减少了物料被过度剪切,而较高的转速提供了更强的摩擦力,为玉米的多次粉碎提供条件,提高了粉碎效率。相比之下,荞麦粉碎时,适合较小磨盘间距和较低的转速,这与荞麦颗粒较小、杨氏模量较低的特点相匹配,既能有效粉碎,又能减少能耗和设备磨损。因此,对五谷杂粮进行粉碎时先考虑颗粒粒径的大小与杨氏模量选择盘磨间距与动磨盘转速。

(4)对结果进行了多元线性回归分析,构建了不同杨氏模量和颗粒大小对应的盘磨间距与动磨盘转速的回归模型,该模型的预测能力可以为后续不同粮食的粉碎提供可靠的理论基础,可以在控制系统中嵌入该模型,实现设备在处理不同颗粒大小和硬度物料时的自适应参数调整,这不仅能提升设备的操作灵活性与精确度,还使得磨粉机能够在多变的生产条件下自动优化运行,使盘式磨粉机在面向不同的物料时,达到取粉率高、耗电量小和粉碎时间短的特点。

参考文献

- [1] 张强. 全谷物食品对人体健康最重要的营养健康因子研究[J]. 食品安全导刊, 2018(12): 49-50.
ZHANG Q. Research on the most important nutritional health factors of whole grain foods for human health[J]. China Food Safety Magazine, 2018(12): 49-50.
- [2] 曹娅, 冯云龙, 王强, 等. 谷物食品对于人体健康的影响[J]. 食品界, 2016(4): 44-46.
CAO Y, FENG Y L, WANG Q, et al. Effects of cereal food on human health[J]. Food Industry, 2016(4): 44-46.
- [3] MO H J, LING T, HONG R B. Flow field simulation of grain milling based on fluent[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1 633(1): 012154.
- [4] 莫海军, 凌涛, 张泽军. 磨粉机粉碎流场数值模拟及参数优化[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 58-64.
MO H J, LING T, ZHANG Z J. Numerical simulation of pulverizing flow field and parameter optimization of the mill[J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 58-64.
- [5] ILIE F, COTICI C D, HRISTACHE A F. Study of the grinding process by friction of cereal grains in stone mills[J]. Processes, 2023, 11(12): 3 376.
- [6] PARASCHIV G, MOICEANU G, VOICU G, et al. Optimization issues of a hammer mill working process using statistical modelling[J]. Sustainability, 2021, 13(2): 973.
- [7] 刘海芑, 张超, 武文斌, 等. 基于DEM的磨粉机皮磨研磨仿真及参数优化[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.
- [8] 陈艳艳, 曾其良, 郭纯, 等. 基于ANSYS/EDEM的球磨机筒体优化仿真分析[J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(2): 89-95.
CHEN Y Y, ZENG Q L, GUO C, et al. Simulation analysis of cylinder optimization of ball mill based on ANSYS/EDEM[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(2): 89-95.
- [9] 赵岐峰, 武文斌, 王雪峰, 等. 基于离散元的辊式磨粉机齿辊功率研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 104-109.
ZHAO Q F, WU W B, WANG X F, et al. Research on the tooth roll power of roller mill based on discrete element[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 104-109.
- [10] SHI F N, KOJOVIC T. Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect[J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 82(3): 156-163.
- [11] VOGEL L, PEUKERT W. From single particle impact behaviour to modelling of impact mills[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(18): 5 164-5 176.
- [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. Calibration of Ab-T10 breakage model parameters based on maize kernels impact experiments[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 437-444.
- [13] 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.
- [14] CHIARAVALLE A G, COTABARREN I M, PIÑA J. DEM breakage calibration for single particle fracture of maize kernels under a particle replacement approach[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2023, 195: 151-165.
- [15] LI G C, LI H Y, LI X, et al. Establishment and calibration of discrete element model for buckwheat seed based on static and dynamic verification test[J]. Agriculture, 2023, 13(5): 1 024.
- [16] LI H C, ZENG R, NIU Z Y, et al. A calibration method for contact parameters of maize kernels based on the discrete element method[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 664.
- [17] 张春, 杜文亮, 陈震, 等. 荞麦米筛分物料接触参数测量与离散元仿真标定[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 46-51.
ZHANG C, DU W L, CHEN Z, et al. The measurement of contact parameters of buckwheat rice screening material and discrete element simulation calibration[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 46-51.
- [18] 伍毅, 阮竞兰. 矩阵分析法在胶辊砻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.