

基于离散元的辊式磨粉机齿辊功率研究

Research on the tooth roll power of roller mill based on discrete element

赵岐峰¹ 武文斌¹ 王雪峰¹ 贾华坡²

ZHAO Qifeng¹ WU Wenbin¹ WANG Xuefeng¹ JIA Huapo²

(1. 河南工业大学, 河南 郑州 450001; 2. 郑州科技学院, 河南 郑州 450001)

(1. Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Zhengzhou Institute of Science and Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:目的: 优化辊式磨粉机 I 皮磨小麦制粉操作参数, 降低制粉能耗。方法: 利用 EDEM 离散元仿真软件, 对轧距、喂料量、转速及转速比等关键制粉因素设计 Box-Behnken 试验, 探究操作参数与制粉功率的关系。结果: 对齿辊破碎功率影响的显著性排名依次为: 转速比、轧距、喂料量、转速比二次项、轧距二次项、轧距和转速比交互、喂料量和转速比交互、轧距和喂料量交互。根据 I 皮磨粉机出粉要求不同, 得到最优参数组合: 较细出粉时轧距为 0.67 mm、喂料量 803.60 kg/(cm·d)、快辊转速 537.68 r/min、转速比 2.64。较粗出粉时得到低功耗的最佳轧距为 0.79 mm、喂料量 803.83 kg/(cm·d)、快辊转速 576.08 r/min、转速比 2.23。结论: 仿真模拟结果与实测结果误差在合理范围内, 建立的离散元制粉模型可用于小麦制粉时的功率预测。

关键词: 小麦; 磨辊; EDEM 仿真; 功率模型

Abstract: Objective: To optimize the operating parameters of wheat milling in roller mill I skin mill to reduce the energy consumption of milling. **Methods:** Using EDEM discrete element simulation software, Box-Behnken test was designed for key milling factors such as roll pitch, feeding amount, rotational speed and rotational speed ratio to investigate the relationship between operating parameters and milling power. **Results:** The significance rankings of the effects on the toothed roll crushing power were, in order, speed ratio, roll pitch, feed volume, speed ratio quadratic term, roll pitch quadratic term, interaction of roll

pitch and speed ratio, interaction of feed volume and speed ratio, and interaction of roll pitch and feed volume. According to the different requirements of the I-skin mill, the optimal parameter combinations were obtained: the finer powder output with a rolling pitch of 0.67 mm, a feeding amount of 803.60 kg/(cm·d), a fast roller speed of 537.68 r/min, and a rotational speed ratio of 2.64, and the coarser powder output with the optimal low-power consumption of 0.79 mm, a feeding amount of 803.83 kg/(cm·d), a fast roller speed of 576.08 r/min, and a rotational speed ratio of 2.23. **Conclusion:** The error between the simulation results and the measured results is within a reasonable range, and the established discrete element milling model can be used for power prediction in wheat milling.

Keywords: wheat; grinding roller; EDEM simulation; power model

小麦是全球第三大谷物, 仅次于大米和玉米, 中国小麦产量占全球产量 17%, 是世界最大小麦生产国之一。近些年小麦面粉市场需求量大, 生产企业规模逐渐壮大, 且维持较高的产能水平, 小麦制粉的能耗问题也就日益突出。

齿辊是辊式磨粉机的核心部件, 在研磨过程中能对小麦产生挤压力、剪切力等作用力, 从而使小麦粒子的胚乳被剥刮和破碎^[1-3]。辊式磨粉机因轧距、喂料量、转速以及转速比变化会产生磨辊的功率波动, 同时也会影响其对小麦粒子的破碎效果。Takamasa 等^[4]研究了齿辊对小麦颗粒的剪切作用, 发现随着齿辊使用时间增长, 剪切率减小, 淀粉损伤率增加, 出粉率增加。黄奇鹏等^[5]对磨粉机齿辊磨损和能耗的关系进行了研究, 基于邦德理论建立了研磨功耗与齿深关系公式, 发现随着齿辊的逐渐磨损, 功耗会急剧增大。Fang 等^[6]研究了辊齿排列方

基金项目: 河南省重点研发与推广项目(编号: 2018304); 河南省重点研发与推广专项项目(编号: 222102110392)

作者简介: 赵岐峰, 男, 河南工业大学在读硕士研究生。

通信作者: 武文斌(1959—), 男, 河南工业大学教授, 博士。

E-mail: wuwenbin59@163.com

收稿日期: 2023-05-22 **改回日期:** 2023-12-27

式对小麦研磨磨下物粒度分布的影响,并建立了预测模型。小麦和辊齿的作用是复杂的,影响因素较多,目前经验理论很难直接表征小麦和齿辊作用的机理。

离散单元法具有散体物料的动力学计算能力,可以清晰地展现散体物料与机械结构的相互作用,离散元仿真技术被广泛应用于粮机领域,然而对于小麦制粉的相关研究存在空缺。Kaliramesh 等^[7]基于 Hertz-Mindlin 接触模型和 JKR 模型进行了红东小麦的筛分研究,发现筛网的开孔率和颗粒的内聚力共同影响筛分效果。张文龙等^[8]基于 Bond 模型建立小麦粒子模型,测定了小麦的力学参数和接触参数。刘海涛等^[9]通过 Hertz-Mindlin with Bonding 模型建立青贮玉米颗粒模型,分析了影响粒籽破碎率的影响因素以及破碎机理。

研究拟基于离散元理论,建立破碎功率模型,分析磨辊轧距、喂料量、转速及转速比对齿辊制粉功率的影响,建立相关操作参数与功率响应的回归方程,以期优化 I 皮磨粉机小麦制粉操作参数,降低制粉能耗,同时为面粉生产活动提供理论参考。

1 建立研磨模型

1.1 对辊模型建立

齿辊是制粉中的核心部件,主要有辊径、辊长、齿角、齿斜度、齿数等重要参数^[10]。基于实际辊式磨粉机磨辊系统中一对磨辊建立如图 1 所示的皮磨齿辊模型。润麦后的小麦由喂料辊均匀喂料,经对辊的差速转动形成挤压、剪切和揉搓的作用而破碎。

1.2 小麦研磨模型

小麦籽近似椭球体,通常用长度、宽度和厚度来表征外形尺寸。试验选用产地为河南周口的小麦,使用游标卡尺随机测量 60 粒小麦粒,取平均值建立小麦粒子三维模型,并导入 EDEM 中利用 API 接口进行颗粒替换并建立颗粒粘结模型^[10-13],如图 1 所示。

基于 Bonding 模型由多个小颗粒组成小麦的形状,小颗粒之间以键连接,通过颗粒连接键的断裂表征物体的破碎情况,各颗粒之间遵循牛顿定律和接触理论^[14]。

颗粒和颗粒之间通过 Bond 键连接,能够抵抗法向力、切向力及扭矩,当两硬球颗粒之间 Bonding 键受拉伸、

压缩、扭转等外力作用且达到最大剪切量或两球间距过大时发生断裂。相邻两颗粒间的黏结力满足以下公式^[15-17]:

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n S_n A \delta_t \\ \delta F_t = -v_t S_t A \delta_t \\ \delta T_n = -\omega_n S_t J \delta_t \\ \delta T_t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \delta_t \end{cases}, \quad (1)$$

$$A = \pi R_B^2, \quad (2)$$

$$J = \frac{1}{2} \pi R_B^4, \quad (3)$$

式中:

δF_n ——法向力, N;

δF_t ——切向力, N;

v_n ——法向速度 m/s;

v_t ——切向速度, m/s;

S_n ——法向刚度, N/m;

S_t ——切向刚度, N/m;

δ_t ——仿真时间步长, s;

A ——颗粒间的接触面积, m^2 ;

δT_n ——法向力矩, $N \cdot m$;

δT_t ——切向力矩, $N \cdot m$;

ω_n ——法向角速度, rad/s;

ω_t ——切向角速度, rad/s;

J ——颗粒惯性矩, mm^4 ;

R_B ——黏结半径, mm。

当 Bond 键受到力和力矩大于极限值或者颗粒之间间距大于设定接触半径,黏结键发生断裂,计算公式为:

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2T_t}{J} R_B \\ \tau_{\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{T_n}{J} R_B \end{cases}, \quad (4)$$

式中:

$\sigma_{\max}$ ——法向剪切力, N;

$\tau_{\max}$ ——切向剪切力, N。

1.3 模型属性设置

在离散元软件 EDEM 中颗粒与颗粒、颗粒与几何体均采用 Hertz-mindlin(no slip)模型,且颗粒和颗粒之间附加 Bond 模型。仿真过程中,小麦颗粒与颗粒之间、颗粒与几何体之间的接触作用需要限定的参数有恢复系数、静摩擦系数、动摩擦系数^[18-19]。并通过标定小麦 Bond 键黏结参数获得单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力值。颗粒与几何体具体材料属性以及接触参数,如表 1 所示。

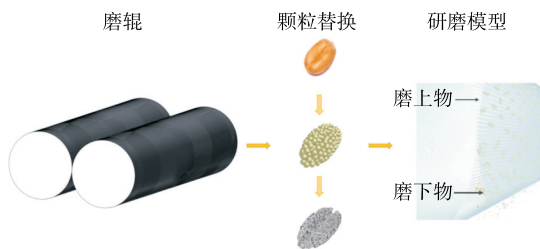


图 1 研磨模型建立图

Figure 1 Grinding model establishment diagram

表 1 全局变量属性表

Table 1 Table of global variable properties

项目	属性	单位	值
小麦颗粒	泊松比		0.42
	剪切模量	Pa	6.607E+007
	密度	kg/m ³	3 071
磨辊	泊松比		0.25
	剪切模量	Pa	4.5E+010
	密度	kg/m ³	7 500
小麦—小麦	恢复系数		0.5
	静摩擦系数		0.3
	动摩擦系数		0.04
小麦—磨辊	恢复系数		0.45
	静摩擦系数		0.554
	动摩擦系数		0.05
Bonding 黏结参数	单位面积法向刚度	N/m ²	3.61E+009
	单位面积切向刚度	N/m ²	1E+009
	临界法向应力	Pa	1E+007
	临界切向应力	Pa	1E+008

2 基于 EDEM 的齿辊研磨分析

2.1 研磨功率分析

2.1.1 操作参数范围确定 磨辊研磨小麦过程中,磨辊转速、转速比、喂料量、轧距影响破碎效果和功率,因此选择磨辊转速、转速比、喂料量、轧距作为仿真试验因素。根据面粉厂磨粉机制粉工艺,确定试验因素范围。

在具有心磨工艺的粉路中,I 皮磨粉机(IB)磨轧距建议 0.5~0.8 mm,实际生产中对轧距的把控往往存在偏差,且小轧距对磨下物质量影响显著,因此适当扩大研究范围;目前关于磨辊转速对制粉特性影响的相关研究较少,面粉厂粉路中根据不同工艺快辊转速一般取 400~800 r/min,在针对 IB 磨的制粉特性研究中根据面粉厂常用转速适当缩减范围;根据小麦的品种及面粉厂的日产

量(根据磨辊的长度计算流量),一般建议 IB 磨流量在 800~1 300 kg/(cm·d);快慢辊转速的比值是由快慢辊带轮直径决定,通常设置在 1.25~2.50,IB 常用 2.50,由于存在制造安装误差,其实际转速比与理论值存在差距,因此适当扩大研究区间。具体参数设计如表 2 所示。

2.1.2 仿真试验 皮磨的齿辊是制粉时消耗功率的主要部件,在制粉过程中,转矩可以反映磨辊在载荷状态下的运行情况。齿辊在空载无料和负载制粉状况下转矩随时间发生的变化如图 2 所示。

磨辊转矩大小与制粉所需要的功率有密切联系,对入磨前小麦一齿辊无相互作用,齿辊不做功。研磨时,两辊间压力升高,出现不平衡的研磨力,磨辊的转矩出现波动变化,且快辊转矩略高于慢辊。图 3 为 EDEM 后处理中导出磨辊转矩数据。

一对齿辊研磨小麦所需功率可根据式(5)进行计算:

$$P=\frac{2\pi(n_1T_1+n_2T_2)}{60\,000},\tag{5}$$

式中:

P ——一对齿辊消耗功率,kW;

n_1 ——快辊转速,r/min;

n_2 ——慢辊转速,r/min;

T_1 ——快辊转矩,N·m;

T_2 ——慢辊转矩,N·m。

按照 Box-Behnken 试验原则进行 27 次试验,所得试验因素设计编码及结果如表 3 所示。

对试验结果进行分析,得到研磨小麦操作参数对功率的二阶回归模型:

表 2 试验因素表

Table 2 List of experimental factors

水平	A 轧距/ mm	B 喂料量/ (kg·cm ⁻¹ ·d ⁻¹)	C 转速/ (r·min ⁻¹)	D 转速比
-1	0.4	800	450	1.25
1	0.8	1 300	650	3.00

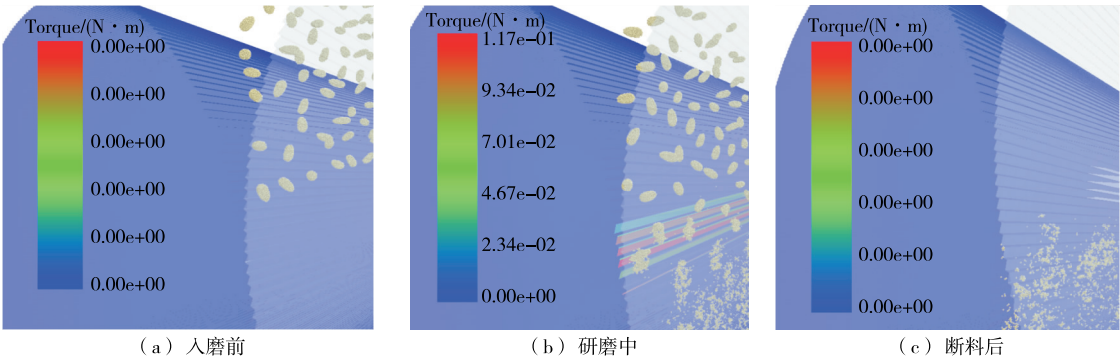


图 2 齿辊研磨小麦仿真扭矩图

Figure 2 Simulated torque diagram of toothed roller grinding wheat

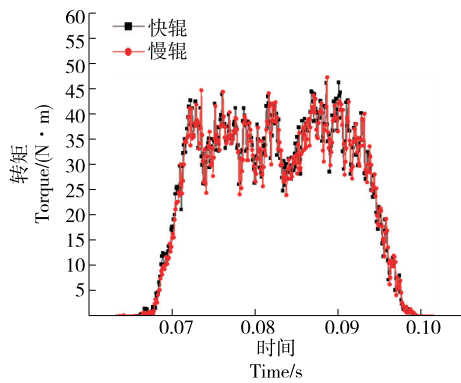


图3 磨辊转矩随时间变化图

Figure 3 Variation of grinding roll torque with time

表3 试验因素设计编码及结果表

Table 3 Experimental factor design codes and results table

试验号	A	B	C	D	功率/kW
1	-1	-1	0	0	2.101 10
2	1	1	0	0	1.978 59
3	-1	1	0	0	3.412 93
4	-1	0	0	-1	4.138 72
5	0	1	0	-1	3.841 34
6	0	-1	0	1	1.249 87
7	0	0	1	-1	2.993 93
8	0	0	1	1	1.664 17
9	1	0	1	0	1.587 51
10	1	-1	0	0	1.154 77
11	0	1	1	0	2.428 90
12	0	1	0	1	2.043 12
13	0	0	0	0	1.874 35
14	0	1	-1	0	2.320 38
15	1	0	0	1	1.481 30
16	0	0	-1	1	1.610 97
17	-1	0	1	0	2.686 80
18	0	-1	1	0	1.437 17
19	0	0	0	0	1.803 21
20	0	-1	0	-1	2.277 44
21	-1	0	-1	0	2.616 15
22	0	0	-1	-1	3.083 06
23	-1	0	0	1	2.300 20
24	1	0	-1	0	1.544 19
25	0	0	0	0	1.862 18
26	0	-1	-1	0	1.378 99
27	1	0	0	-1	2.454 19

$$\alpha = 7.736\ 54 - 10.848\ 3A + 0.003\ 900\ 04B - 0.001\ 496\ 71C - 3.497\ 54D - 0.002\ 440\ 05AB - 0.000\ 341\ 625AC + 1.236\ 61AD + 5.034e - 07BC - 0.000\ 880\ 743BD + 0.000\ 406\ 657CD + 6.692\ 29A^2 + 6.193\ 67e - 07B^2 + 4.662\ 92e - 07C^2 + 0.624\ 227D。 (6)$$

回归方程方差分析结果如表4所示,拟合模型 $P < 0.000\ 1$,说明该模型所表示的因变量和自变量之间关系极显著。失拟项 $P > 0.05$,表明拟合方程拟合良好。A、B、D、AD、AB、BD、 A^2 、 D^2 的 $P < 0.01$,说明以上因素对功率的响应极显著。

表4 回归方程方差分析表[†]

Table 4 Analysis of variance table of regression equation

来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值
模型	15.510 0	14	1.110 0	285.470 0	0.000 1
A	4.150 0	1	4.150 0	1 068.690 0	0.000 1
B	3.440 0	1	3.440 0	886.510 0	0.000 1
C	0.005 0	1	0.005 0	1.290 0	0.278 9
D	5.930 0	1	5.930 0	1 528.970 0	0.000 1
AB	0.059 5	1	0.059 5	15.340 0	0.002 0
AC	0.000 2	1	0.000 2	0.048 1	0.830 1
AD	0.187 3	1	0.187 3	48.260 0	0.000 1
BC	0.000 6	1	0.000 6	0.163 2	0.693 3
BD	0.148 5	1	0.148 5	38.250 0	0.000 1
CD	0.005 1	1	0.005 1	1.300 0	0.275 6
A^2	0.382 2	1	0.382 2	98.460 0	0.000 1
B^2	0.008 0	1	0.008 0	2.060 0	0.176 9
C^2	0.000 1	1	0.000 1	0.029 9	0.865 7
D^2	1.220 0	1	1.220 0	313.840 0	0.000 1
误差	0.046 6	12	0.003 9		
失拟	0.043 7	10	0.004 4	3.020 0	0.274 5
纯误差	0.002 9	2	0.001 4		
合计	15.560 0	26			

[†] $R^2 = 0.997\ 0$; $R^2_{\text{adj}} = 0.993\ 5$ 。

2.2 操作参数的优化

对以上数据进行分析得到对齿辊破碎功率影响显著的因素,排名先后顺序为:转速比、轧距、喂料量、速比二次项、轧距二次项、轧距和转速比交互、喂料量和转速比交互、轧距和喂料量交互。由于磨粉机出厂时其转速比已经确定,因此转速比的设定尤为重要,它将影响后续功率消耗以及工艺设置。转速比确定后,可根据具体的工艺要求设定轧距、喂料量、转速等工艺参数。

磨辊制粉过程中的操作参数之间存在耦合关系,共同影响制粉功率,如图4所示。在喂料量和轧距的交互作用中,喂料量的增加及轧距的减小都增加了辊间压力,磨辊转矩增加使功率上升,两者交互对功率作用显著。

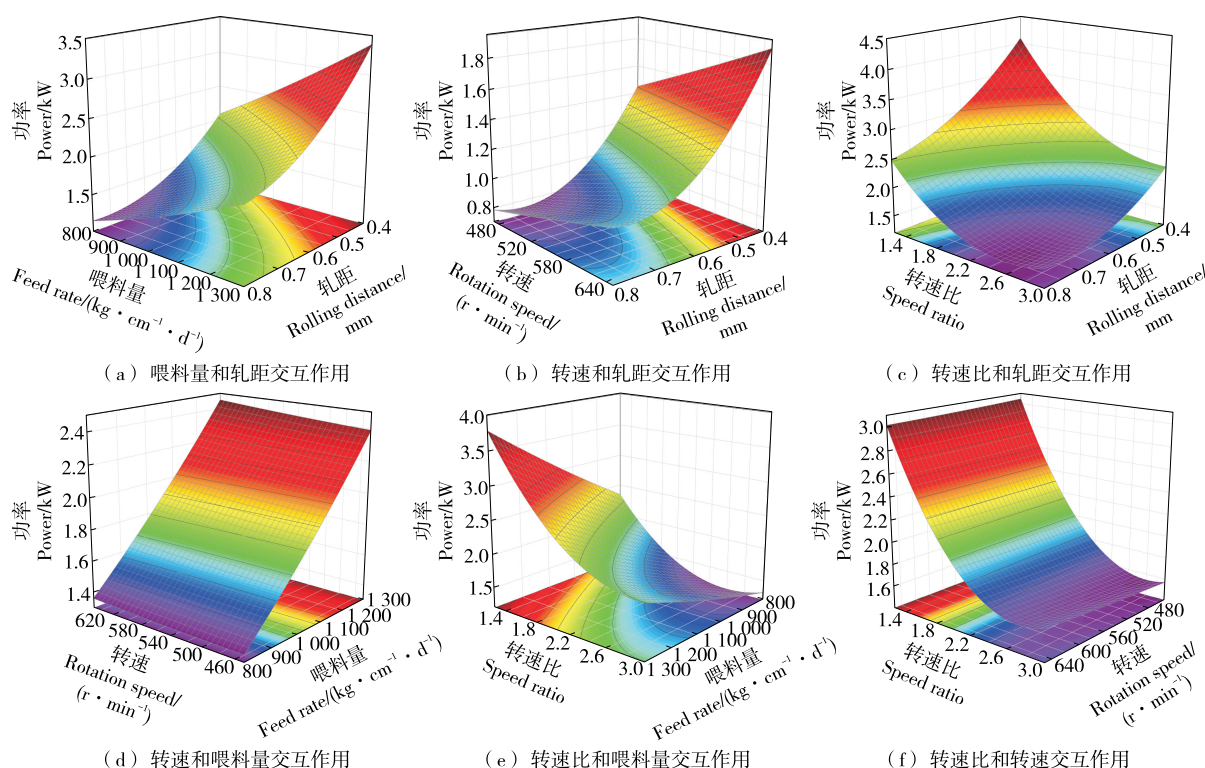


图 4 功率模型响应曲面图

Figure 4 Power model response surface diagram

转速比对制粉功率的影响最显著,转速比增加即快慢辊的转速差增大,磨辊破碎小麦的剪切力增加,挤压力减小,辊间载荷减小,因此所需功率降低。磨辊转速的变化对制粉功率的影响相对复杂,转速变化也影响转矩变化,转速增加,辊齿破碎小麦所需转矩减小,相反则转矩增加,因此转速的变化对磨辊制粉功率影响较低。

皮磨制粉的目的是尽可能地将小麦胚乳和麸皮分离干净。出细粉时,需要减小轧距或增大转速比,但会增加麸皮破碎,降低出粉质量,增加后期分离麸皮成本;出粗粉时,需要增大轧距或减小转速比,虽减少了麸皮破碎,但容易造成该道工序利用率降低,反而增设工序增加整条产线能源消耗。通过响应面优化,根据出粉要求不同,需要出细粉时,得到较低功耗的最佳轧距为 0.67 mm、喂料量 803.6 kg/(cm · d)、快辊转速 537.68 r/min、转速比 2.64;需要出粗粉时,得到低功耗的最佳轧距为 0.79 mm、803.83 kg/(cm · d)、快辊转速 576.08 r/min、转速比 2.23。

3 实验验证

试验地点为郑州某面粉厂,日处理小麦 800 t。设备型号为 FMFQ100 × 25,入磨小麦(经润麦处理)含水率为 16.0%。

以 IB 轧距变化对磨粉机制粉功率产生的影响为研究对象,分别测量 IB 磨轧距为 0.5~0.8 mm 时的电流数

据,根据测量的电流数据,计算磨粉机 IB 磨工作时的功率数据,计算公式为:

$$P = \frac{\sqrt{3} \times U \times I \times \cos\theta}{1\,000}, \quad (7)$$

式中:

P ——磨粉机功率, kW;

U ——工作电压, V;

I ——工作电流, A;

$\cos\theta$ ——功率因数,取 0.78。

图 5 为拟合方程功率与实测功率变化趋势图。随着

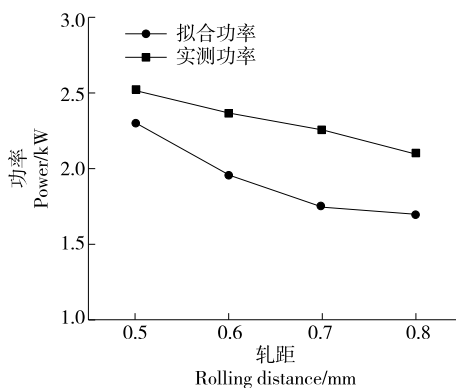


图 5 拟合方程功率与实测功率变化趋势图

Figure 5 Trend of the power of the fitted equation and the measured power

轧距的增大,拟合方程功率与实测功率均呈降低的趋势,这是因为随着轧距的增大,小麦和齿辊的接触效率降低,辊间压力减少,因此功率降低。仿真分析功率与实测功率相近且趋势相同,且数据之间差值较小,证明了离散元仿真模型具有一定的可靠性。

4 结论

研究利用离散单元法,建立辊式磨粉机皮磨制粉模型,优化了齿辊运行的操作参数:轧距、喂料量、转速、转速比。由于仿真分析,简化了辊式磨粉机的模型,以耗能最多的对辊系统为研究对象,因此造成了仿真分析和实际数据间的差距。离散单元法的利用可为今后辊式磨粉机的制粉研究,优化辊式磨粉机结构部件提供思路,简化小麦制粉试验研究的繁琐性,以及可减少试验需要大量使用小麦而造成的浪费。

参考文献

- [1] 黄奇鹏, 武文斌, 高杨杨, 等. 磨粉机磨辊磨损对制粉影响研究综述[J]. 粮食加工, 2020, 45(5): 4-7.
HUANG Q P, WU W B, GAO Y Y, et al. Review of the impact roller wear on the milling process[J]. Grain Processing, 2020, 45(5): 4-7.
- [2] 张克平, 谭成, 张锋伟. 基于 Fluent 的小麦辊式制粉流场模拟及试验验证[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(7): 11-18.
ZHANG K P, TAN C, ZHANG F W. Fluent-based simulation and experimental validation of wheat roller milling flow field [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2016, 31(7): 11-18.
- [3] 廖庆喜, 舒彩霞, 田波平. 辊式磨粉机对辊工作力学条件分析[J]. 包装与食品机械, 2005(2): 1-3, 26.
LIAO Q X, SHU C X, TIAN P P. Analysis of working mechanical conditions of roller mill rolls[J]. Packaging and Food Machinery, 2005(2): 1-3, 26.
- [4] TAKAMASA M, TAKESHI F, YOSHIO I. Study on wheat grinding and performance of grinding roll [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2001, 63(4): 67-72.
- [5] 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. Study on the relationship between grinding mill roll tooth parameters and power consumption [J]. Grain Oil and Food Science and Technology, 2019, 27(1): 30-33.
- [6] FANG C, CAMPBELL G M. Roller mill performance prediction IV: The effect of roll configuration on the particle size distribution of wheat initial breakage[J]. Journal of Cereal Science, 2003, 37(1): 21-29.
- [7] KALIRAMESH S, KINGSLEY A. Predicting particle separation and sieve blinding during wheat flour sifting [J]. Transactions of the Asabe, 2021, 64(3): 1 103-1 112.
- [8] 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.
- [9] 刘海涛, 张炜, 马军民, 等. 青贮玉米饲料籽粒破碎装置仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 32-39.
LIU H T, ZHANG W, MA J M, et al. Simulation analysis and experiment of corn silage seed crushing device[J]. Chinese Journal of Agricultural Chemistry, 2021, 42(8): 32-39.
- [10] 阮竞兰, 武文斌. 粮食机械原理及应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 122-153.
RUAN J L, WU W B. Principle and application technology of grain machinery [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2017: 122-153.
- [11] 瑞月. 圆锥破碎机工作机理及性能优化研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020: 1-6.
RUI Y. Research on the working mechanism and performance optimization of cone crusher [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020: 1-6.
- [12] QUIST J, EVERTSSON C A. Cone crusher modelling and simulation using DEM[J]. Minerals Engineering, 2016, 85: 92-105.
- [13] LINDQVIST M. Energy considerations in compressive and impact crushing of rock[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(9): 631-641.
- [14] LIU G S, DAI J C, WANG P, et al. Study of railroad ballast crushing parameters based on discrete element method[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2023, 24(3): 257-272.
- [15] JIANG E B, SHAN Z D, CHENG G, et al. Simulation and experimental research on extra-squeeze forming method during gradient sand molding[J]. China Foundry, 2022, 19(4): 288-298.
- [16] 张瑞新, 刘煜, 郑群飞, 等. 基于 EDEM 的双齿辊破碎机破碎效率影响因素仿真分析[J]. 金属矿山, 2018(2): 154-159.
ZHANG R X, LIU Y, ZHENG Q F, et al. Simulation analysis of factors influencing crushing efficiency of double tooth roll crusher based on EDEM[J]. Metal Mining, 2018(2): 154-159.
- [17] SUN K K, MA R D, LI G, et al. The influence of the structure of double toothed roller crusher on the crushing effect based on EDEM [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 423(1): 012152.
- [18] 刘进, 马立峰, 王志霞, 等. 基于 EDEM 的旋回破碎机能耗模型研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(2): 152-157.
LIU J, MA L F, WANG Z X, et al. Study on energy consumption model of gyratory crusher based on EDEM[J]. Coal Engineering, 2023, 55(2): 152-157.
- [19] 文书明, 刘建, 李成必, 等. 矿石碎磨能耗数学模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(9): 2 115-2 120.
WEN S M, LIU J, LI C B, et al. Mathematical model for energy consumption of ore crushing and grinding[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2018, 49(9): 2 115-2 120.