

磨粉机粉碎流场数值模拟及参数优化

Numerical simulation of pulverizing flow field and parameter optimization of the mill

莫海军¹ 凌 涛¹ 张泽军²

MO Hai-jun¹ LING Tao¹ ZHANG Ze-jun²

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641;

2. 深圳市香雅食品有限公司, 广东 深圳 518000)

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China; 2. Shenzhen Xiangya Food Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

摘要:采用 Fluent 软件对“粉碎—盘磨”两级磨粉机的粉碎流场进行数值模拟研究,对比分析刀片分布方案对循环流场的影响及规律;运用正交试验设计方法对粉碎刀片进行参数优化,分析刀片偏转角、刀片长度及刀片间距对粉碎效果的影响规律,并进一步探讨刀片转速对粉碎效果的影响;为获得磨粉最佳的性能参数,对物料粉碎进行试验,以粉碎转速、粉碎时间、磨盘间隙为影响因素,以粒度合格率和耗电量为目标函数,进行三因素三水平回归试验,利用 Design-Expert 软件对该模型优化求解得到最佳参数组合。结果表明:刀片呈上下螺旋状分布,刀片偏转角为 60°、刀片长度为 120 mm、刀片间距为等距 30 mm 时,有着良好的粉碎效果;刀片转速对物料最大剪切应变率、动压力、湍流动能的影响呈线性关系;当粉碎转速为 1 500 r/min,粉碎时间为 20 s,磨盘间隙为 0.045 mm 时,粒度合格率(80 目以上为合格)达 90.4%,耗电量为 118.3 kJ。

关键词:两级磨粉机;粉碎流场;数值模拟;粉碎刀片;性能参数

Abstract: The Fluent software was used to simulate the pulverization flow field of the “pulverizing-disc grinding” two-stage mill. The influence and law of the blade distribution scheme on the circulating flow field were compared and analyzed. The parameters of the pulverizing blade were optimized by orthogonal design method. The rules of the blade deflection angle, the blade length and the blade pitch on the pulverization effect were analyzed, and the influence of the blade rotation speed on the pulverization effect was further discussed. The material pulverization

was experimented to obtain the best performance parameters of the Mill. Taking the pulverization rotating speed, the pulverization time and the disc gap as the influencing factors, the three-factor and three-level regression experiments were carried out with the particle size qualification rate and power consumption as the objective function. The optimum parameter combination was optimized by using Design-Expert software. The results show that the pulverization effect is good when the blade has a spiral distribution, the blade deflection angle is 120 mm, the blade spacing is 30 mm. The effect of blade rotation speed on the maximum shear strain rate, dynamic pressure and turbulent flow energy of the material is linear. When the pulverizing rotation speed is 1 500 r/min, the pulverization time is 20 s, and the grinding disc gap is 0.045 mm, the particle size pass rate (more than 80 mesh is qualified) up to 90.4%, and the power consumption is 118.3 kJ.

Keywords: two-stage mill; the pulverization flow field; numerical simulation; pulverizing blade; performance parameters

目前五谷杂粮磨粉主要有超微粉碎、气流粉碎、锤片式粉碎等方法^[1]。而超微粉碎通常采用一种盘式磨粉机^[2-3],它需要加工 2~3 次才能使磨料颗粒大小达到使用要求。同时,磨粉过程会产生大量的热量,影响物料品质和口感;而磨盘磨损产生的金属粉末会造成物料污染^[4]。为了减少加工次数以及消除高温和物料污染等问题,张付军等^[5]研制出盘摆式磨粉机,徐宏形等^[6]研制出新型双磨盘式磨粉机,王雪梅等^[7]研制出一种新型盘式磨粉机。这类磨粉机虽对盘式磨粉磨盘进行了优化研究,但仍存在卡料,磨粉不均,颗粒度难以控制等问题。

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是以计算机计算为基础,对流场中的各种复杂运动进行数值模拟^[8]。并逐渐应用于制粉行业,在深入分析高速

基金项目:广东省级科技计划项目(编号:2016B090918096)

作者简介:莫海军(1966—),男,华南理工大学副教授,博士。

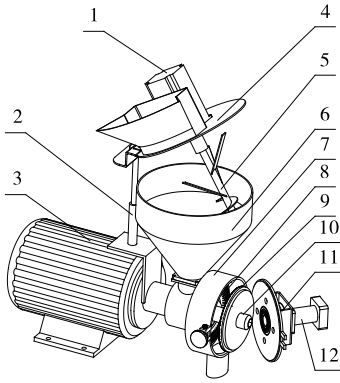
E-mail: mohj@scut.edu.cn

收稿日期:2019-05-10

剪切、搅拌和磨粉上有着非常好的仿真效果^[9-11],具有计算效率高,结果可视化等特点^[12-13]。试验拟采用 Fluent 软件对“粉碎—盘磨”两级磨粉机的第一级粉碎进行流场数值模拟分析,以揭示流场内部的粉碎机理,寻求粉碎刀片的最优分布方案及设计参数;通过粉碎试验,得到刀片转速、粉碎时间和磨盘间隙的最佳性能参数组合,以期解决磨粉卡料、磨粉不均等问题,实现一次性磨粉。

1 两级磨粉机的工作原理

如图 1 所示,两级磨粉机主要由粉碎单元和盘磨单元两部分组成,第一部分是粉碎单元,利用刀片将粗料进行粉碎,获得粗细均匀的颗粒状粉体,然后通过螺杆将粉碎的物料送入第二部分盘磨单元,物料在动静两磨盘的间隙中受到剪切和挤压,从而破碎成细粉,并在旋转离心力的作用下被甩出,完成制粉过程。



1. 粉碎电机 2. 电动推杆 3. 研磨电机 4. 粉碎腔盖 5. 粉碎刀片 6. 粉碎腔 7. 研磨腔 8. 定磨盘 9. 动磨盘 10. 动磨盘安装法兰 11. 调节螺栓 12. 步进电机

图 1 两级磨粉机结构示意图

Figure 1 The structure of two-stage mill

2 流体控制方程

粉碎刀片在高速旋转粉碎过程中,会搅拌引起强大的湍流,引发物料相互碰撞、摩擦并与刀片发生剪切,实现物料粉碎的目的。由于高速旋转粉碎过程中物料的循环走向十分复杂,假设物料是不可压缩的流体,对刀片进行模型简化,对粉碎过程进行数值分析,可以很好地辅助设备参数化设计。磨料颗粒流流动控制方程主要包括质量守恒方程、动量守恒方程、湍流模型方程。由于 RNG $k-\epsilon$ 模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动,适合粉碎室内旋转剪切流场的模拟^[14-15],因此,所建立的湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 两方程模型^[16]。

质量守恒方程:

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i, \quad (2)$$

式中:

$$i=1, 2, 3;$$

$$F_1 = 0;$$

$$F_2 = 0;$$

$$F_3 = -\rho g。$$

RNG $k-\epsilon$ 两方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = G_k + \rho \epsilon - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left[1.39(\mu + 0.117455 \rho \frac{k^2}{\epsilon}) \right] \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{C_{1\epsilon}^* \epsilon}{k} G_k - 1.68 \rho \frac{\epsilon^2}{k} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left[1.39(\mu + 0.117455 \rho \frac{k^2}{\epsilon}) \right] \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\}, \quad (4)$$

式中:

$$C_{1\epsilon}^* = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/4.377)}{1 + 0.012\eta^3};$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon};$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$$

ρ ——流体密度, 710 kg/m^3 ;

t ——时间, s;

u_1, u_2, u_3 ——速度矢量在 x_1, x_2, x_3 方向的分量;

p ——流体微单元体上的压力, Pa;

k ——湍动能, m^2/s^2 ;

ϵ ——耗散率, $\%$;

u_i, u_j ——时均速度分量;

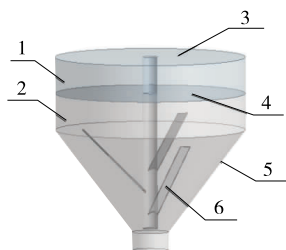
x_i, x_j ——各坐标分量;

μ ——流体黏度, $1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;

G_k ——由时均速度梯度引起的紊流动能, m^2/s^2 。

3 数值模拟模型及边界条件

在 SolidWorks 里进行三维建模,然后导入 Fluent 软件,并对模型进行布尔运算,获得如图 2 所示的数值模拟模型。然后利用 Fluent 模块中的 Mesh 进行自动网格划分,接下来在 Steup 中进行条件定义并进行分析计算。粉碎腔顶部定义为压力出口,粉碎腔壁面定义为无滑移的固壁,刀片定义为相对相邻区域旋转的壁面。针对粉碎流场模型,采用欧拉多相流模型,第一相为空气,第二相定义为直径为 2.5 mm 的谷物颗粒流,两相的相互作用 Drag 力定义为 Syamlal-Obrien,采用稳态隐式分离求解算法,压力速度耦合问题采用 Phase Coupled SIMPLE 算法,动量方程按一阶迎风格式进行离散求解^[17]。



1. 空气 2. 谷物 3. 压力出口 4. 交界面 5. 粉碎腔壁面
6. 粉碎刀片

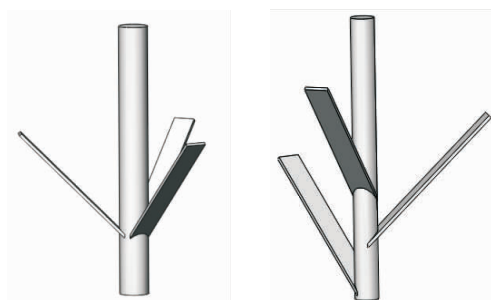
图 2 数值模拟模型

Figure 2 The model of numerical simulation

4 数值模拟结果与分析

4.1 刀片分布方案对粉碎流场的影响

刀片的分布方案会对两级磨粉机第一级粉碎流场产生很大影响。试验设计了两种刀片分布方案,如图 3 所示,刀片呈圆形阵列分布和呈上下螺旋状分布,通过数值模拟仿真可对比分析出两种刀片分布方案粉碎的优劣。



(a) 圆形阵列 (b) 上下螺旋状

图 3 刀片分布方案

Figure 3 The distribution scheme of the blade

4.1.1 刀片呈圆形阵列分布 如图 4 所示,在刀片旋转的范围内,形成较大的速度,在中心范围外到中心范围内有一个呈圆形状分布的速度梯度,物料在经过这一速度梯度时会被刀片粉碎。另外还可以看出物料的循环过程,由于刀片高速旋转形成强大的漩涡并产生负压,会对物料形成一个吸附流场,中心范围外的物料及上方的物料会被吸附到中心范围内,形成一个粉碎循环。但是,由于刀片呈圆形阵列分布,整个粉碎流场在空间上分布很对称,较为单一,粉碎过程只会产生于物料与刀片粉碎的瞬间,即每循环一次刀片粉碎一次。

4.1.2 刀片呈上下螺旋状分布 如图 5(a) 所示,相对刀片呈圆周阵列分布而言,在刀片旋转的范围内,同样会形成较大的速度,但图 5(b)~(d) 显示,在中心范围外到中心范围内会形成呈空间交错分布的 3 个速度梯度,物料在经过这 3 个速度梯度时会被刀片粉碎。另外还可以看出物料的循环过程,由于刀片高速旋转形成强大的漩涡并产生负压,会对物料形成一个吸附流场,从刀片旋转的

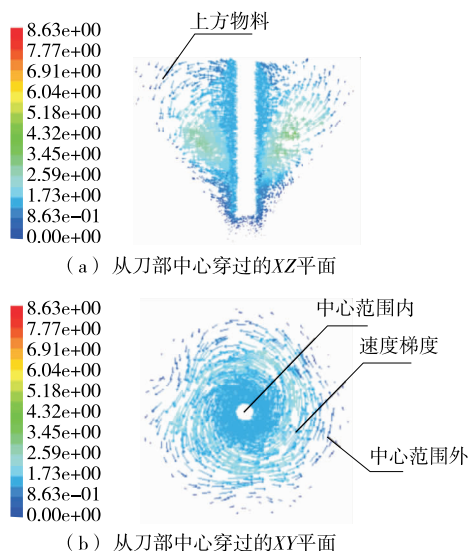


图 4 刀片呈圆形阵列分布的速度矢量图

Figure 4 Velocity vector chart for blade distributed in circular array

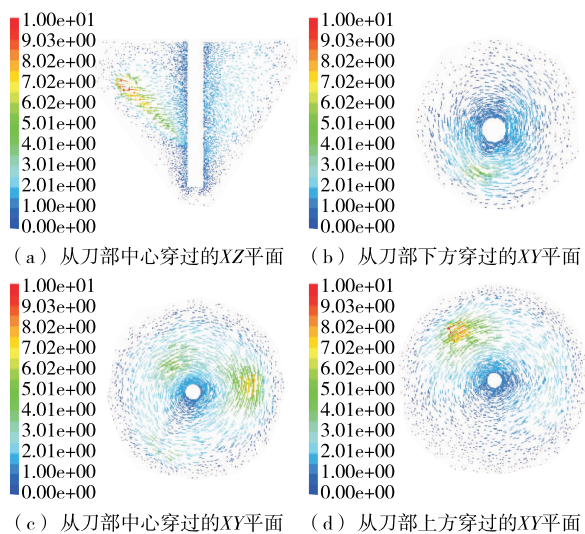


图 5 刀片呈上下螺旋状分布的速度矢量图

Figure 5 Velocity vector chart for blade distributed in up and down spiral

范围由外到内形成循环。不过由于刀片呈螺旋状分布,形成的涡流会促使下方物料向上移动,而物料进入刀片旋转范围内时,会经过 3 个速度梯度,形成多次剪切,即每循环一次刀片粉碎 3 次。并且,由于刀片呈螺旋状分布,所形成的粉碎流场湍流强度更大,更多的物料之间会形成相互碰撞、剪切,让旋转剪切粉碎的意义得以体现。

4.2 刀片粉碎正交试验

影响两级磨粉机第一级刀片粉碎效果的参数有刀片偏转角、刀片长度、刀片间距,基于多因素试验的方法设计如表 1 所示的正交试验因素水平表,进行正交试验,优

化刀片的设计参数。

对每组因数的刀片进行建模,在 Fluent 软件中,设置刀片的恒定转速为 1 500 r/min,通过数值模拟,得到如图 6 所示的刀片粉碎时的湍流动能云图。最大湍流动能是粉碎刀片与物料剪切的性能指标,根据仿真结果,记录每组粉碎刀片的最大湍流动能,并通过分析与计算,绘制出表 2。由表 2 可知,刀片偏转角的影响最明显,其次是

刀片长度,而刀片间距影响较小,为方便安装可取刀片间距为等距 30 mm,故最佳的优组合为刀片偏转角 60°、刀片长度 120 mm、刀片间距为等距 30 mm。对最优方案经过 5 次重复试验,该参数下混合杂粮山药、核桃、黄豆、红小豆在刀片粉碎短时间内(30 s 内)可达到粒径小于 2 mm 的效果(粉碎粒度过大易导致磨盘卡料),满足第一级粉碎要求。

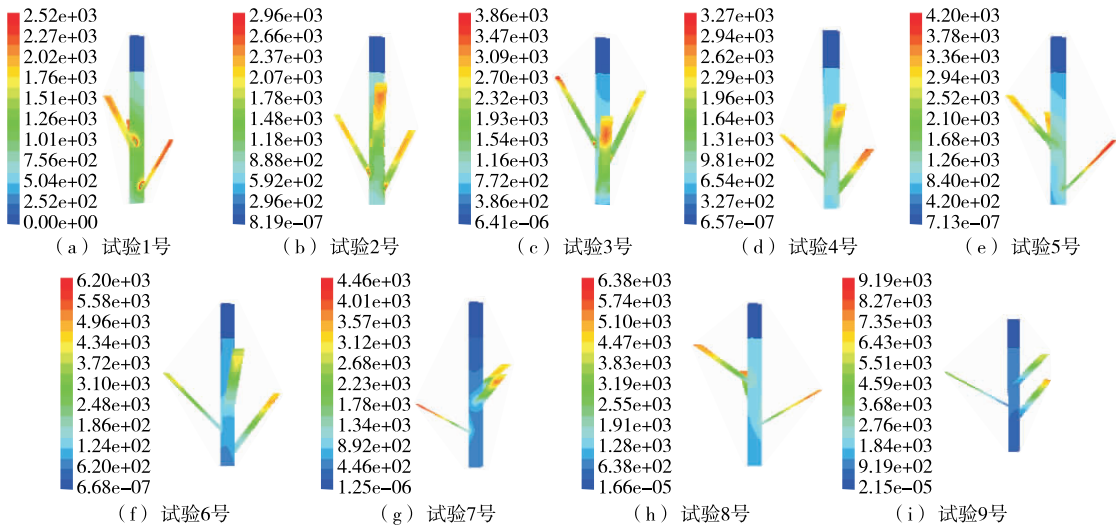


图 6 粉碎刀片湍流动能云图
Figure 6 Velocity contour of pulverizing blade

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Orthogonal test factor level table

水平	A 刀片偏转角/(°)	B 刀片长度/mm	C 刀片间距/mm
1	30	80	等距(30—30)
2	45	100	递增(20—40)
3	60	120	递减(40—20)

表 2 试验设计及结果

Table 2 Test design and results

试验号	A	B	C	最大湍流动能/ (m ² · s ⁻²)
1	1	1	1	2 820
2	1	2	2	2 960
3	1	3	3	3 860
4	2	1	2	3 270
5	2	2	3	4 200
6	2	3	1	6 200
7	3	1	3	4 460
8	3	2	1	6 380
9	3	3	2	9 190
k ₁	3 213	3 517	5 133	
k ₂	4 557	4 513	5 140	
k ₃	6 677	6 417	4 173	
极差 R	3 464	2 900	967	

4.3 刀片转速对粉碎流场的影响

最大剪切应变率、动压力、湍流动能发生在粉碎刀片刀头附近,是刀片与物料剪切的性能指标。刀片在不同转速下对物料的粉碎效果不同,现分别在转速为 750, 1 000, 1 250, 1 500 r/min 下进行数字模拟,记录每次转速下的性能指标参数,绘制成曲线图。如图 7 所示,随着转速的增加,各项性能参数平稳线性增加,说明转速越高,刀片与物料剪切作用越明显。不过转速越高,粉碎时间越长,第一级刀片粉碎会造成谷物颗粒过细,容易导致出油粘连,不易输送,并且转速的提高是以消耗功率为前提

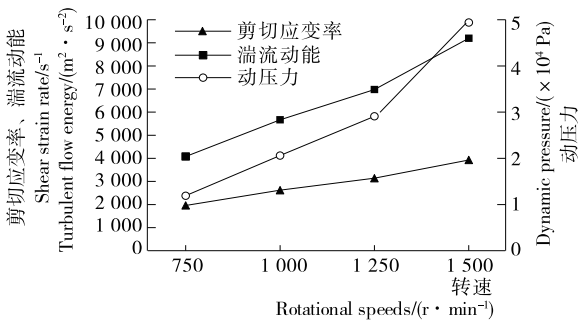


图 7 不同转速下的流场性能参数

Figure 7 Performance parameter chart of flow field at different rotational speeds

的,然而第一级物料粉碎程度若不够,谷物颗粒过大,磨盘易卡料,所以应该合理选择粉碎转速(粉碎阶段)、粉碎时间(粉碎阶段)和磨盘间隙(盘磨阶段)。

5 磨粉机关键性能参数试验

5.1 试验条件与方法

根据数值模拟结果及设计出的粉碎刀片,加工制造出一台磨粉机。每次取山药、核桃、黄豆、红小豆各 250 g 共 1 000 g 作为每次试验的原料。采用的主要仪器有:一套标准筛、三相四线电能表(功率精度 0.01 W)、电子微量天平(精度 0.1 g)。

粒度合格率是磨粉机作业性能的重要评价指标,按式(5)进行计算。

$$\eta = \frac{G - G_1}{G} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

η ——粒度合格率, %;

G_1 ——筛上(80 目筛)物料的质量, g;

G ——试验物料的总质量, g。

同样,耗电量也是评判磨粉机性能的重要指标,每次制粉,记录每个制粉步骤的有效功率,按照式(6)计算,即可得到每次制粉的耗电量。

$$W = P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + P_3 \cdot t_3, \quad (6)$$

式中:

W ——耗电量, J;

P_1 ——粉碎时的有效功率, W;

t_1 ——粉碎时的时间, s;

P_2 ——送料时的有效功率, W;

t_2 ——送料时的时间, s;

P_3 ——盘磨时的有效功率, W;

t_3 ——盘磨时的时间, s。

采用三因素三水平回归试验方法^[18-19],以粉碎转速、粉碎时间、磨盘间隙为影响因素,以粒度合格率和耗电量为目标函数,应用 Design-Expert 10 软件对试验进行设计,其因素水平编码如表 3 所示。

5.2 试验结果及分析

试验方案及结果如表 4 所示,模型的方差分析结果如表 5、6 所示。

表 3 因素水平编码

Table 3 Factors and levels

编码	x_1 粉碎转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	x_2 粉碎时间/ s	x_3 磨盘间隙/ mm
-1	1 000	10	0.02
0	1 250	20	0.06
1	1 500	30	0.10

由表 5、6 可知,影响粒度合格率和耗电量的因素主次顺序均为 x_3 、 x_1 、 x_2 。 x_1 、 x_3 和 x_3^2 对粒度合格率和耗电量有极显著影响($P < 0.001$), x_1^2 对粒度合格率有极显著影响($P < 0.001$), x_2 和 $x_1 x_3$ 对粒度合格率有显著影响($P < 0.05$), x_2^2 对耗电量有显著影响($P < 0.05$)。

应用 Design-Expert 10 软件对表 3 中的试验结果进行统计分析,同时进行回归方程模型检验,剔除不显著项后,可得到拟合良好、简化后的回归数学方程为:

$$y_1 = 72.7 + 7.83x_1 + 1.29x_2 - 25.49x_3 + 1.56x_1x_3 + 4.16x_1^2 + 22.75x_3^2, \quad (7)$$

$$y_2 = 107.4 - 5.54x_1 - 24.84x_3 - 3.62x_2^2 + 17.09x_3^2. \quad (8)$$

5.3 各因素对性能指标的影响

由图 8 可知,磨盘间隙从 0.10 mm 到 0.05 mm 过程中,粒度合格率显著提升,而进一步缩小磨盘间隙时,粒度合格率提升幅度不大,这是因为摩擦阻力增大,易发生振动,磨盘间隙不稳定所导致的结果。随着粉碎转速从 1 000 r/min 到 1 500 r/min 过程中,粒度合格率呈线性平稳上升。粉碎时间从 10 s 增加到 30 s,粒度合格率略微有所上升。

由图 9 可知,磨盘间隙从 0.10 mm 到 0.05 mm 过程中,耗电量增加缓慢,而进一步缩小磨盘间隙时,耗电量显著增加,这是因为摩擦阻力急剧增大。粉碎转速从 1 000 r/min 到 1 500 r/min 过程中,耗电量呈线性平稳上升。粉碎时间从 10 s 增加到 30 s,耗电量略微有所上升。

表 4 试验方案及结果

Table 4 Experimental scheme and results

试验号	x_1	x_2	x_3	粒度合格率 y_1 / %	耗电量 y_2 / kJ
1	-1	-1	0	69.05	109.36
2	-1	1	0	70.95	110.88
3	-1	0	-1	72.55	163.44
4	-1	0	1	19.40	106.80
5	0	-1	-1	75.05	146.83
6	0	1	-1	78.10	143.13
7	0	-1	1	22.50	95.95
8	0	1	1	26.75	97.53
9	0	0	0	72.60	107.58
10	0	0	0	72.90	106.10
11	0	0	0	73.00	105.42
12	0	0	0	74.00	110.30
13	0	0	0	71.00	107.58
14	1	-1	0	84.45	104.48
15	1	1	0	85.60	102.20
16	1	0	-1	85.70	142.56
17	1	0	1	38.80	96.96

表 5 粒度合格率方差分析结果[†]

Table 5 Results of variance analysis for the particle size pass rate

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F 值	Pr>F	显著性
x ₁	489.85	1	489.85	356.74	<0.000 1	* *
x ₂	13.39	1	13.39	9.75	0.016 8	*
x ₃	5 199.45	1	5 199.45	3 786.58	<0.000 1	* *
x ₁ x ₂	0.14	1	0.14	0.10	0.758 3	
x ₁ x ₃	9.77	1	9.77	7.11	0.032 1	*
x ₂ x ₃	0.36	1	0.36	0.26	0.624 4	
x ₁ ²	72.95	1	72.95	53.13	0.000 2	* *
x ₂ ²	1.78	1	1.78	1.30	0.292 5	
x ₃ ²	2 179.21	1	2 179.21	1 587.04	<0.000 1	* *
模型	7 929.90	9	881.10	641.68	<0.000 1	* *
失拟项	4.89	3	1.63	1.38	0.369 5	
误差	4.72	4	1.18			
总和	7 939.52	16				

† * 表示因素对试验指标有显著影响(P<0.05); * * 表示因素对试验指标有极显著影响(P<0.001)。

表 6 耗电量方差分析结果[†]

Table 6 Results of variance analysis for the power consumption

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F 值	Pr>F	显著性
x ₁	245.09	1	245.09	31.04	0.000 8	* *
x ₂	1.04	1	1.04	0.13	0.727 8	
x ₃	4 936.20	1	4 936.20	625.16	<0.000 1	* *
x ₁ x ₂	3.61	1	3.61	0.46	0.520 6	
x ₁ x ₃	30.47	1	30.47	3.86	0.090 2	
x ₂ x ₃	6.97	1	6.97	0.88	0.378 7	
x ₁ ²	36.82	1	36.82	4.66	0.067 7	
x ₂ ²	55.27	1	55.27	7.00	0.033 1	*
x ₃ ²	1 229.33	1	1 229.33	155.69	<0.000 1	* *
模型	6 542.17	9	726.91	92.06	<0.000 1	
失拟项	41.19	3	13.73	3.90	0.110 9	
误差	14.09	4	3.52			
总和	6 597.44	16				

† * 表示因素对试验指标有显著影响(P<0.05); * * 表示因素对试验指标有极显著影响(P<0.001)。

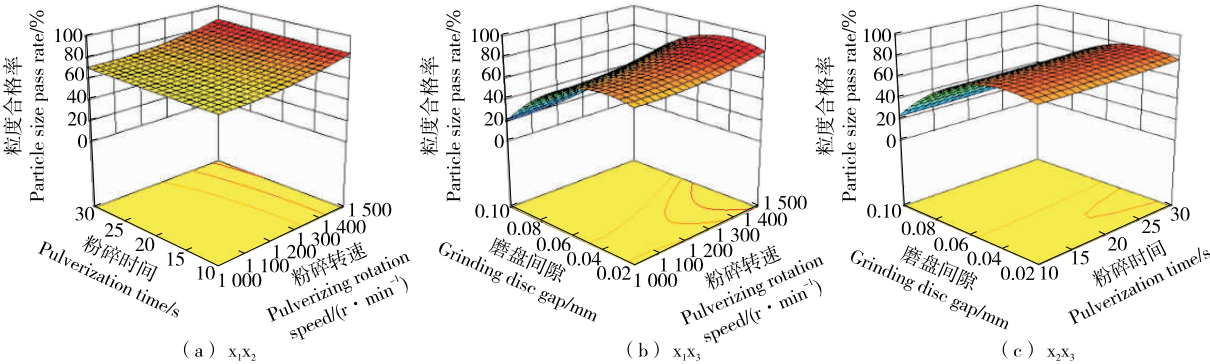


图 8 各因素对粒度合格率的响应曲面

Figure 8 Response surface of factor effect on particle size pass rate

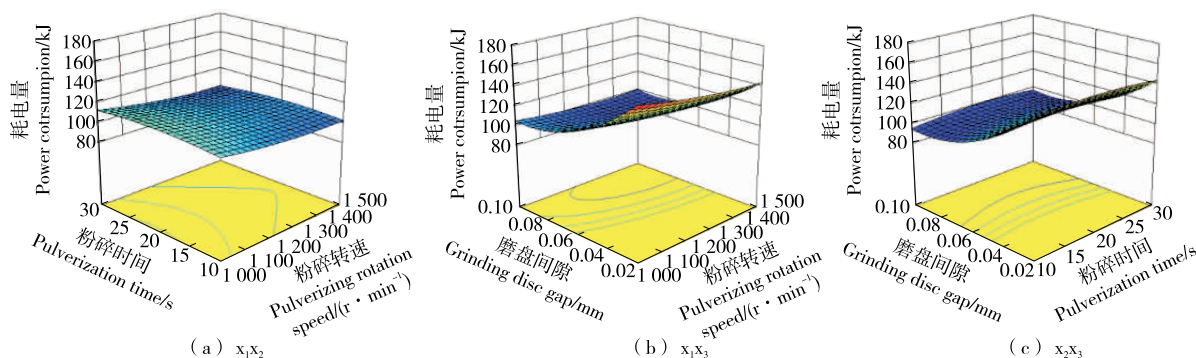


图 9 各因素对耗电量的响应曲面

Figure 9 Response surface of factor effect on power consumption

5.4 优化分析

利用 Design-Expert 软件中的 Optimization(最优化)模块,以最大粒度合格率和最小耗电量为优化目标,获得最佳优化参数:粉碎转速 1 494.9 r/min,粉碎时间 19.1 s,磨盘间隙 0.045 mm,为方便后续磨粉加工,取优化参数为:粉碎转速 1 500 r/min,粉碎时间 20 s,磨盘间隙 0.045 mm,此条件下的粒度合格率 90.4%,耗电量 118.3 kJ。

6 结论

在盘式磨粉的研究基础上增加了一级粉碎刀片装置,解决了传统磨粉机易卡料、磨粉不均等问题。通过对磨粉机粉碎流场进行数值模拟研究,发现刀片呈上下螺旋状分布时可增加刀片与物料的接触次数,提高粉碎效果。通过粉碎试验,发现刀片在高速短时间下进行粉碎即可达到细化粗料的目的,不过粉碎过度会造成谷物颗粒过细,容易导致出油粘连,不易输送,然而第一级物料粉碎程度若不够,谷物颗粒过大,磨盘易卡料。

根据数值模拟及样机粉碎试验的结果可知,当刀片偏转角为 60°、刀片长度为 120 mm、刀片间距为等距 30 mm 时,粉碎转速 1 500 r/min,粉碎时间 20 s,磨盘间隙 0.045 mm 时,粒度合格率为 90.4%,耗电量为 118.3 kJ,满足参数优化结果,能实现有效磨粉。

但是刀片呈螺旋状的分布方式只适用于漏斗型的粉碎腔,且试验仅从关键的物理参数上进行考虑,却未考虑刀片倾斜角、刀片形状对物料粉碎的影响,以及非均匀转速对粉碎效果影响如何都需进一步探讨。

参考文献

- [1] 刘也嘉,李楠楠,林利忠,等.干法制备大米粉的工艺及特性研究[J].粮食与饲料工业,2016,12(6):25-29.
- [2] 张长森,程俊华,吴其胜,等.粉体技术及设备[M].上海:华东理工大学出版社,2007:158-159.
- [3] 武文斌,黄卫文,段翠芳.盘式磨粉机的技术及应用[J].粮食与饲料工业,2004(1):5.
- [4] 张更超,应富强.超细粉碎技术现状及发展趋势[J].中国粉体技术,2003(2):46-50.

- [5] 张付军,冯群德,黄立志.S3R2715 型盘摆式磨粉机的设计[J].机械研究与应用,2003,16(S1):50-51.
- [6] 徐宏彤,庞建强.一种新型双磨盘式磨粉机的研究[J].甘肃科技,2006(9):40,64.
- [7] 王雪梅,薛振国.新型盘式磨粉机的研究[J].中国机械,2015(5):70-72.
- [8] 余金伟,冯晓峰.计算流体力学发展综述[J].现代制造技术与装备,2013(6):25-26.
- [9] DARELIUS A, RASMUSON A, WACHEM B V, et al. CFD simulation of the high shear mixing process using kinetic theory of granular flow and frictional stress models[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(8): 2 188-2 197.
- [10] DONIZAK J, JAROSZ P, KRASZEWSKA A. An application of numerical simulation of multiphase flow for the redesign of a mixer agitator in Pb refining process[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 530(1): 1-8.
- [11] 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.
- [12] TANG Guang-wu, WU Bin, BAI Deng-qi, et al. CFD modeling and validation of a dynamic slab heating process in an industrial walking beam reheating furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132(5): 779-789.
- [13] 张磊成,果晓东,赵恩铎,等.计算流体力学(CFD)发展简述[C]//北京力学学会第二十三届学术年会会议论文集.北京:[出版者不详],2017:101-103.
- [14] DONG L, JOHANSEN S T, ENGH T A. Flow induced by an impeller in an unbaffled tank-II: Numerical modeling[J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(20): 3 511-3 518.
- [15] 沈培玉,赵浩,张裕中.农产品物料高速切割粉碎流场数值模拟与试验[J].农业机械学报,2010,41(9):60-65.
- [16] 王福军.计算流体力学分析:CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:124-125.
- [17] 王海彦,刘永刚,胡凡金,等.ANSYS Fluent 流体数值计算方法与实例[M].北京:中国铁道出版社,2015:299-324.
- [18] 任露泉.试验设计及其优化[M].北京:科学出版社,2009:224-235.
- [19] 丁力,杨丽,刘守荣,等.辅助充种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J].农业工程学报,2018,34(22):1-11.