

振动磨机参振质量对小麦麸皮超微粉碎性能的影响

Effects of vibration mill's vibration mass on superfine grinding performance of wheat bran

程敏^{1,2} 孙艳岭¹ 张海红^{1,2} 刘保国¹

CHENG Min^{1,2} SUN Yan-ling¹ ZHANG Hai-hong^{1,2} LIU Bao-guo¹

(1. 河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南省粮食加工智能装备工程研究中心, 河南 郑州 450001)

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Henan Engineering Research Center of Intelligent Equipment for Grain Processing, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:目的:优化小麦麸皮超微粉碎性能。方法:分别调控磨介质量和小麦麸皮质量,开展小麦麸皮振动超微粉碎试验。结果:当麸皮质量不变时,麸皮超微粉体产量随磨介质量的增加呈先增大后减小的非线性特征,最大差异率达到 123.53%;麸皮微粉品质也随磨介质量的增加呈先升高后降低趋势。当磨介质量不变时,麸皮超微粉体产量随麸皮质量的增加呈先减小后增大的非线性特征,最大差异率高达 588.69%;麸皮微粉品质也随麸皮质量的增加呈先降低后升高趋势。麸皮超微粉体产量关于麸皮质量的灵敏度大于其关于磨介质量的灵敏度。结论:振动磨机的磨介质量和麸皮质量对小麦麸皮超微粉碎性能具有显著影响,但影响程度不同。

关键词:振动磨机;参振质量;小麦麸皮;超微粉碎;粉碎性能;灵敏度

Abstract: Objective: Explore the effects of vibration mill's vibration mass on superfine grinding performance of wheat bran.

Methods: A series of vibration impact grinding experiments of wheat bran was carried out by adjusting the grinding medium mass and wheat bran mass, respectively. **Results:** When the wheat bran mass was unchanged, the yield of wheat bran superfine powder showed a non-linear characteristic of first

increasing and then decreasing with the increase of the quality of the grinding medium, and the maximum difference rate reached 123.53%. The quality of wheat bran micro powder also increased firstly and then decreased with the increase of grinding medium mass. However, when the grinding medium mass was unchanged, the yield of wheat bran superfine powder showed characteristic of first decreasing and then increasing with the increase of the quality of the grinding medium, and the maximum difference rate reaches 588.69%. With the increase of wheat bran mass, the quality of wheat bran micro powder decreased firstly and then increased. It was also found that the sensitivity of wheat bran superfine powder yield to wheat bran mass was higher than that of wheat bran superfine powder yield to grinding medium mass. **Conclusion:** The grinding medium mass and wheat bran mass of vibration mill have significant effects on the superfine grinding of wheat bran, but the effect levels are different.

Keywords: vibration mill; vibration mass; wheat bran; superfine grinding; grinding performance; sensitivity

小麦麸皮是面粉加工的副产物,具有密度小、韧性大的物理特性,常规粮食粉碎设备很难对其进行超微粉碎^[1-3],限制了其深度开发与综合利用水平。振动磨机作为一种依靠磨介在高频振动过程中产生的冲击、剪切、挤压、摩擦等破碎效应而粉碎物料的介质类磨机,比较适合超微粉碎小麦麸皮^[4-6]。而在利用振动磨机超微粉碎小麦麸皮时,磨筒内的磨介质量和麸皮质量构成了振动磨机的参振质量。二者的变化将会引起振幅、振强、惯性力等振动特性参数的变化^[7-9],进而影响小麦麸皮的超微粉碎性能。目前,有关振动磨机参振质量变化对其超微

基金项目:河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(编号:2020BS020);河南省科技攻关项目(编号:212102110312);郑州市 R&D 专项经费补助科研项目(编号:22ZZRDZX14)

作者简介:程敏,男,河南工业大学讲师,博士。

通信作者:刘保国(1962—),男,河南工业大学教授,博士。

E-mail: bglu1978@sina.com

收稿日期:2022-10-28 **改回日期:**2023-03-16

粉碎性能影响的研究尚未见报道,亦未探明磨介质量和麸皮质量对麸皮超微粉碎效果影响的主次关系,不利于优化小麦麸皮振动超微粉碎工艺效果,降低其加工成本。

目前,关于磨介质量和物料质量对振动磨机粉碎性能影响的研究主要从振动特性和粉碎性能两个方面展开。在振动特性方面,通常利用相同的质量结合系数将磨介和物料质量转化为一个等效质量,进行动力学建模与分析,而未考虑磨介和物料的差异性对质量结合系数的影响^[10]。李鹏等^[11-12]认为磨介质量具有时变特性,将磨介质量产生的碰撞力归化到惯性力和阻尼力之中,得到磨介质量在时间维度上的结合质量和当量阻尼。闻邦椿等^[13]研究发现,振动机械的质量结合系数与振幅有关,而与时间无关。在粉碎性能方面,通常以磨介填充率、物料填充率或球料比来表征磨介质量或物料质量,通过开展系列化振动粉碎试验,利用回归分析法建立磨介质量或物料质量与粉体产量、粒径之间的函数关系^[14-15]。李成华等^[16]利用振动磨机超微粉碎黑木耳时得到了磨介填充率、球料比与粉体粒径之间的二次非线性关系式,揭示了磨介和黑木耳质量对其超微粉碎效果的影响规律。韩跃新等^[17]探明了磨介填充率对磨矿产品的粒度组成和各粒级铝硅比分布的影响规律。以上研究虽然从不同视角揭示磨介和物料质量对振动磨机粉碎性能的影响,但其主次影响关系需开展灵敏度分析进行确定。

研究拟通过调控磨介质量和麸皮质量改变振动磨机的参振质量,利用振动粉碎试验平台开展麸皮振动超微粉碎试验。选取麸皮粉体的质量分数作为产量指标,微粉粒度分布特征参数作为品质指标,分别探究磨介质量和麸皮质量对麸皮超微粉碎性能的影响规律,在此基础上对麸皮粉体产量进行灵敏度分析,确定磨介质量和麸皮质量对麸皮产量影响的主次关系,以期对小麦麸皮超微粉碎性能的研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

小麦麸皮:烟农 19,依次用 5,20 目标准试验筛对麸皮原料进行筛分处理,取 5,20 目筛上的麸皮作为粉碎试验试样,含水率约为 13.4%^[5],郑州市金苑面粉厂。

1.2 仪器与设备

实验型振动磨: MZ03 型,青岛帕罗德粉体设备有限公司;

干法粒度分析仪: NKT2010-L 型,济南耐克特分析仪器有限公司;

电子天平: JYT-5 型,常熟市佳衡天平仪器有限公司;

水分测定仪: MB45 型,常州奥豪斯仪器有限公司;

标准试验筛: 5, 20, 60, 200 目,衡水绿若丝网制品有限公司。

1.3 试验方法

实验型振动磨的额定功率为 3 kW,激振器工作频率

为 50 Hz,磨筒内温度保持在 25 ℃。按表 1 进行试验,分别考察磨介质量(2~5 kg)、麸皮质量(100~400 g)对麸皮超微粉体产量及其品质的影响。

表 1 小麦麸皮振动超微粉碎试验方案

Table 1 Experiment projects of wheat bran superfine grinding

编号	磨介材料	磨介尺寸/mm	磨介质量/kg	麸皮质量/g	粉碎时间/h
A	不锈钢	14	2	300	1.0
B	不锈钢	14	3	300	1.0
C	不锈钢	14	4	300	1.0
D	不锈钢	14	5	300	1.0
E	不锈钢	14	4	100	1.0
F	不锈钢	14	4	200	1.0
G	不锈钢	14	4	400	1.0

1.4 指标测定

1.4.1 麸皮粉体分级方法 采用筛分法和粒度分析法按表 2 对麸皮粉体进行分级。

表 2 小麦麸皮粉体分级方法

Table 2 Classification method of wheat bran powder

粉体类别	分级方法	筛网目数	粒径 $d_n/\mu\text{m}$	粉体质量标记
未粉碎麸皮	筛分	>20	>900	m_{wu}
粗粉	筛分	20~60	280~900	m_{wc}
细粉	筛分	60~200	74~280	m_{wf}
微粉	粒度分析	200~500	25~74	m_{wm}
超微粉	粒度分析	<500	<25 ^[18]	m_{ws}

利用筛分法分离出麸皮微粉后,再利用激光粒度分析仪对微粉进行粒度分析,可得到超微粉体积百分比和粒度分布特征曲线。根据超微粉百分比可以计算出微粉中的超微粉质量^[5]。不考虑麸皮粉体在筛分过程中的损失,麸皮粉体总质量为

$$m_w = m_{wu} + m_{wc} + m_{wf} + m_{wm} + m_{ws}, \quad (1)$$

式中:

m_w ——麸皮粉体的总质量,g。

将各种麸皮粉体质量分别与麸皮粉体总质量相除即可得到对应的麸皮粉体质量分数。

$$\begin{cases} M_{wc} = m_{wc}/m_w \times 100\% \\ M_{wf} = m_{wf}/m_w \times 100\% \\ M_{wm} = m_{wm}/m_w \times 100\% \\ M_{ws} = m_{ws}/m_w \times 100\% \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

M_{wc} ——未粉碎麸皮质量分数,%;

M_{wf} ——麸皮粗粉质量分数,%;

M_{wm} ——麸皮细粉质量分数,%;

M_{ws} ——麸皮微粉质量分数, %。

1.4.2 麸皮粉体产量差异性分析 选取麸皮粉体质量分数作为产量指标,按式(3)计算其产量指标的差异率。

$$D_R = (C_V - R_V) / R_V \times 100\% \quad (3)$$

式中:

D_R ——麸皮粉体产量差异率, %;

C_V ——麸皮粉体质量分数当前值, %;

R_V ——麸皮粉体质量分数参考值, %。

$D_R < 5\%$,表示产量差异不显著; $D_R > 5\%$,表示产量差异显著。

1.4.3 麸皮微粉粒度特征曲线相似度计算 选择麸皮微粉粒度分布特征作为品质指标,利用欧式距离法计算麸皮微粉粒度分布特征曲线之间的相似性,从整体上把握麸皮微粉品质的变化规律^[19]。假设 A、B 为 n 维空间上的任意两点, A 点坐标向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, B 点坐标向量 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, 则 A、B 两点的欧式距离为

$$d(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

式中:

$d(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ ——n 维空间中任意两点的欧式距离。

其相似度为

$$W_{AB} = 1 / [1 + d(\mathbf{X}, \mathbf{Y})] \quad (5)$$

式中:

W_{AB} ——n 维空间中任意两点的相似度。

相似度越大,二者之间的差异性越小;相似度越小,二者之间的差异性越大,表明此时参振质量对麸皮微粉粒度分布特征的影响越显著。

1.4.4 麸皮粉体灵敏度分析 利用回归分析法建立麸皮粉体质量分数与磨介质量或麸皮质量之间的函数关系后,需进行灵敏度分析。假设其关系式可表示为 $y_M = f(x_m)$, 则其灵敏度为^[20]

$$S = \frac{dy_M}{dx_m} \quad (6)$$

式中:

S——灵敏度(其值正负均可), %/kg(%/g);

y_M ——麸皮粉体质量分数, %;

x_m ——磨介质量或麸皮质量, kg(g)。

2 结果与分析

2.1 试验结果

小麦麸皮振动粉碎试验完成后,根据试验方案对麸皮粉体进行筛分分级和微粉粒度分析,试验结果见表 3。

表 3 小麦麸皮振动超微粉碎试验结果[†]

Table 3 Experimental results of vibration impact grinding of wheat bran

试验号	未粉碎麸皮质量/g	粗粉质量/g	细粉质量/g	微粉质量/g	超微粉体积百分比/%	粉体总质量/g
A	162.0	92.8	19.1	24.9	32.67	298.8
B	158.9	75.9	25.6	31.5	42.90	291.9
C	140.3	101.8	33.7	17.6	45.63	293.4
D	81.6	102.7	61.3	44.8	39.38	290.4
E	0.2	7.4	33.6	56.0	32.75	97.2
F	64.1	66.4	30.1	37.0	39.45	197.6
G	215.4	109.6	26.4	46.2	40.71	397.6

[†] 微粉质量是指未分离出超微粉时的 200 目筛下物总质量,即表 1 中微粉质量 m_{wm} 与超微粉质量 m_{ws} 之和。

2.2 磨介质量对小麦麸皮振动粉碎性能的影响

2.2.1 小麦麸皮微粉粒度分布 由图 1 可知,小麦麸皮微粉的粒度分布特征曲线均呈双粒径峰现象,表明麸皮微粉在两个粒径处出现了集聚效应^[10]。

由表 4 可知,随着磨介质量的增加,麸皮微粉主峰粒径值先减小后增大,次峰粒径值先增大后减小。麸皮微粉的中值粒径 D_{50} 先减小后增大,与麸皮微粉主峰粒径变化趋势一致,与文献[16]的结论相同。以试验 C 为比对标准,根据欧式距离法计算出的麸皮微粉粒度分布特征曲线的相似度与麸皮微粉的主峰粒径和中值粒径的变化规律趋于一致,表明微粉品质随磨介质量的增加呈先升高后降低趋势。这主要是随着磨介质量的增大,磨介数量也增加,相当于增大了麸皮被磨介粉碎的概率。当磨介数量继续增加时,麸皮微粉将出现团聚效应,微粉品质

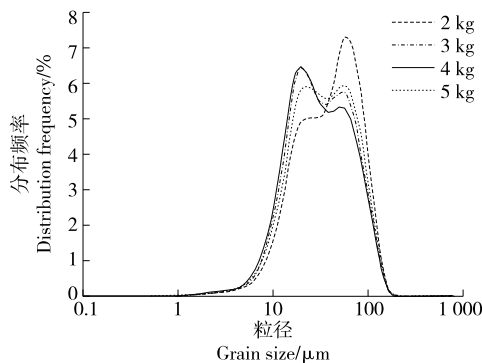


图 1 不同磨介质量下小麦麸皮微粉粒度分布
Figure 1 Particle size distribution of wheat bran micro powder with different masses of grinding medium

表 4 不同磨介质量下小麦麸皮微粉粒度分布特征参数

Table 4 Particle size distribution characteristic parameters of wheat bran micro powder with different masses of grinding medium

试验号	主峰		次峰		D ₅₀ /μm	相似度/%
	粒径/μm	质量分数/%	粒径/μm	质量分数/%		
A	64.94	7.32	27.57	5.01	38.95	13.64
B	19.77	6.41	56.90	5.75	29.51	43.52
C	19.77	6.50	49.86	5.32	27.65	—
D	56.90	5.97	22.56	5.90	32.00	26.51

降低^[21-22]。综上,试验 C 的麸皮微粉品质最佳。

2.2.2 小麦麸皮粉体质量分数 由图 2 可知,随着磨介质量的增加,麸皮粗粉的质量分数先减小后增大,细粉的质量分数近似线性增加;而微粉、超微粉的质量分数呈先增大后减小再增大趋势,具有显著的非线性特征。以试验 C 的麸皮粉体质量分数作为参考值,可以计算得到磨介质量变化引起的麸皮粉体质量分数之间的差异率见表 5,此时以粉体质量分数的最小值作为参考值。

由表 5 可知,在麸皮质量相同的情况下,磨介质量对麸皮粉体产量的影响非常显著,差异率总体上随磨介质量的增大而增大。因磨介质量变化引起各种粉体质量分

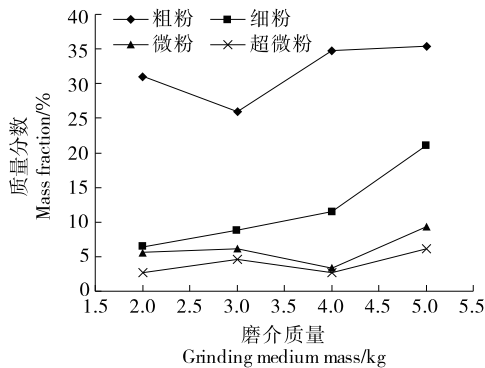


图 2 小麦麸皮粉体质量分数与磨介质量之间的关系

Figure 2 Relationship between mass fraction of wheat bran powder and masses of grinding medium

表 5 磨介质量引起的麸皮粉体质量分数之间的差异率[†]
Table 5 Difference rate of wheat bran powder mass fraction caused by grinding medium mass %

粉体类型	D _{R,A-C}	D _{R,B-C}	D _{R,D-C}	D _{R,max}
粗粉	-10.49	-25.10	1.87	36.01
细粉	-44.39	-23.76	83.72	230.36
微粉	72.09	88.96	186.81	186.81
超微粉	-0.73	68.98	121.90	123.53

[†] D_{R,A-C}表示试验 A 与试验 C 的麸皮粉体质量分数差异率; D_{R,max}表示麸皮粉体质量分数的最大差异率;负值表示产量下降,正值表示产量增加。

数最大值与最小值之间的差异率 D_{R,max} 远远大于 5%,其中超微粉体的 D_{R,max} 达到 123.53%,出现在试验 A 与 D 之间,说明增大磨介质量有助于提高麸皮超微粉体的产量。此时相当于增加了磨筒内磨介数量,降低了磨介振幅,从而提高了麸皮与磨介之间的接触粉碎概率。

2.3 麸皮质量对小麦麸皮振动粉碎性能的影响

2.3.1 小麦麸皮微粉粒度分布 由图 3 可知,当麸皮质量为 100 g 时,麸皮微粉粒径呈单粒径峰分布特征,但已出现双粒径峰分布特征趋势。随着麸皮质量的增大,麸皮微粉粒径呈显著的双粒径峰分布特征,同时主、次粒径峰也发生逆转,主峰由大粒径值转向为小粒径值,提高了麸皮的超微粉碎品质。当麸皮质量为 400 g 时,主峰粒径值对应的分布频率却低于 300 g 的,表明适当的麸皮质量才能实现最优的超微粉碎效果。

由表 6 可知,麸皮微粉的中值粒径 D₅₀ 先减小后增大,与麸皮微粉主峰粒径变化趋势一致;试验 G 与 C 之间的相似度最大为 31.50%。因此,当麸皮质量为 300 g 时,麸皮微粉的品质最好;当麸皮质量为 400 g 时,麸皮微粉品质次之。

2.3.2 小麦麸皮粉体质量分数 由图 4 可知,随着麸皮填充质量的增加,麸皮粗粉的质量分数先快速增大后逐渐减小,细粉的质量分数近似线性递减特性,微粉和超微粉质量分数均呈先急速减小后增大趋势。主要原因可能在于:随着麸皮质量的增大,单位质量麸皮得到的粉碎能

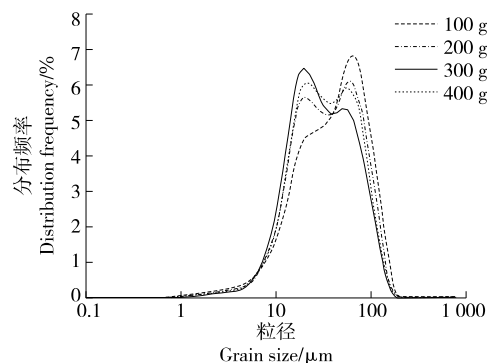


图 3 不同麸皮质量下小麦麸皮微粉的粒度分布

Figure 3 Particle size distribution of wheat bran micro powder with different masses of wheat bran

表 6 不同麸皮质量下小麦麸皮微粉粒度分布特征参数

Table 6 Particle size distribution characteristic parameters of wheat bran micro powder with different masses of wheat bran

试验号	主峰		次峰		D ₅₀ /μm	相似度/%
	粒径/μm	质量分数/%	粒径/μm	质量分数/%		
E	64.94	6.84	—	—	39.75	12.75
F	60.92	6.06	22.56	5.59	32.78	23.46
C	19.77	6.50	49.86	5.32	27.65	—
G	21.17	6.02	56.90	5.88	31.07	31.50

和接触概率有所降低;当麸皮质量增大到一定程度时,改变了磨筒内磨介的运动状态,麸皮与磨介之间的研磨粉碎作用增强^[9, 23]。此时,麸皮粗粉、细粉产量下降,微粉产量上升。以试验 C 的麸皮粉体质量分数作为参考值,可以计算出麸皮质量引起的麸皮粉体质量分数之间的差异率见表 7。

由表 7 可知,在磨介质量相同的情况下,麸皮质量对麸皮粉体产量的影响非常显著。其中,微粉产量的最大差异率达到 1 088.34%,超微粉产量的最大差异率为 588.69%,表明选择适当的麸皮填充量有助于提高小麦麸皮的超微粉碎效果。

2.4 小麦麸皮超微粉体产量的灵敏度分析

2.4.1 麸皮粉体产量关于磨介质量的灵敏度 由表 3 和图 2 可以求得,小麦麸皮粉体质量分数与磨介质量之间

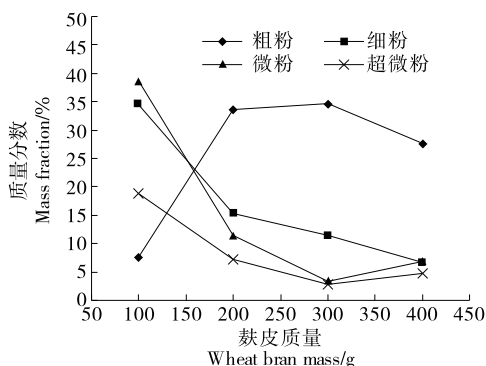


图 4 小麦麸皮粉体质量分数与麸皮质量之间的关系

Figure 4 Relationship between mass fraction of wheat bran powder and masses of wheat bran

表 7 麸皮质量引起的麸皮粉体质量分数之间的差异率

Table 7 Difference rate of wheat bran powder mass fraction caused by wheat bran mass %

粉体类型	D _{R,E-C}	D _{R,F-C}	D _{R,G-C}	D _{R,max}
粗粉	-78.07	-3.17	-20.55	355.98
细粉	200.87	32.55	-42.21	420.63
微粉	1 088.34	250.31	111.35	1 088.34
超微粉	588.69	166.42	72.63	588.69

的二次非线性拟合关系式:

$$\begin{cases} y_{gmc} = 1.43x_{gm}^2 - 7.852x_{gm} + 39.952 \\ y_{gmf} = 1.8125x_{gm}^2 - 7.9985x_{gm} + 15.464 \\ y_{gmm} = 1.3848x_{gm}^2 - 8.859x_{gm} + 18.408 \\ y_{gms} = 0.3577x_{gm}^2 - 1.6875x_{gm} + 5.1181 \end{cases} \quad (7)$$

式中:

- y_{gmc}——磨介质量下麸皮粗粉的质量分数, %;
- y_{gmf}——磨介质量下麸皮细粉的质量分数, %;
- y_{gmm}——磨介质量下麸皮微粉的质量分数, %;
- y_{gms}——磨介质量下麸皮超微粉的质量分数, %;
- x_{gm}——磨介质量, 2 kg ≤ x_{gm} ≤ 5 kg。

根据式(6)及式(7)可得,麸皮粉体质量分数关于磨介质量的灵敏度:

$$\begin{cases} S_{gmc} = 2.86x_{gm} - 7.852 \\ S_{gmf} = 3.625x_{gm} - 7.9985 \\ S_{gmm} = 2.7696x_{gm} - 8.859 \\ S_{gms} = 0.7154x_{gm} - 1.6875 \end{cases} \quad (8)$$

式中:

- S_{gmc}——麸皮粗粉的质量分数关于磨介质量的灵敏度, %/kg;
- S_{gmf}——麸皮细粉的质量分数关于磨介质量的灵敏度, %/kg;
- S_{gmm}——麸皮微粉的质量分数关于磨介质量的灵敏度, %/kg;
- S_{gms}——麸皮超微粉的质量分数关于磨介质量的灵敏度, %/kg。

由表 8 可知,麸皮各种粉体关于磨介质量的灵敏度是有差异的。当磨介质量为 2 kg 时,微粉的灵敏度为负值,但在数值上最大,表明此时磨介质量对微粉产量的影响最灵敏;当磨介质量为 3,4,5 kg 时,细粉的灵敏度最大。超微粉的灵敏度在数值上始终最小,说明麸皮超微粉体产量对磨介质量不敏感。

2.4.2 麸皮粉体产量关于麸皮填充质量的灵敏度 根据表 3 和图 6 可以求得,小麦麸皮粉体质量分数与麸皮质量之间的二次非线性拟合关系式:

表 8 麸皮粉体质量分数关于磨介质量的灵敏度

Table 8 Sensitivity of wheat bran powder mass fraction to grinding medium mass

磨介质量/kg	灵敏度/(%·kg ⁻¹)			
	粗粉	细粉	微粉	超微粉
2	-2.132	-0.748 5	-3.319 8	-0.256 7
3	0.728	2.876 5	-0.550 2	0.458 7
4	3.588	6.501 5	2.219 4	1.174 1
5	6.448	10.126 5	4.989 0	1.889 5

$$\begin{cases} y_{wbc} = -0.000 8x_{wb}^2 + 0.475x_{wb} - 30.775 \\ y_{wbf} = 0.000 4x_{wb}^2 - 0.268 7x_{wb} + 56.978 \\ y_{wbm} = 0.001 1x_{wb}^2 - 0.707 1x_{wb} + 116.8 \\ y_{wbs} = 0.000 3x_{wb}^2 - 0.216 5x_{wb} + 37.106 \end{cases}, \quad (9)$$

式中:

y_{wbc} ——麸皮填充质量下麸皮粗粉的质量分数,%;

y_{wbf} ——麸皮填充质量下麸皮细粉的质量分数,%;

y_{wbm} ——麸皮填充质量下麸皮微粉的质量分数,%;

y_{wbs} ——麸皮填充质量下麸皮超微粉的质量分数,%;

x_{wb} ——麸皮填充质量,100 g ≤ x_{wb} ≤ 400 g。

根据式(9)可得,麸皮质量分数关于麸皮填充质量的灵敏度表达式:

$$\begin{cases} S_{wbc} = -0.001 6x_{wb} + 0.475 \\ S_{wbf} = 0.000 8x_{wb} - 0.268 7 \\ S_{wbm} = 0.002 2x_{wb} - 0.707 1 \\ S_{wbs} = 0.000 6x_{wb} - 0.216 5 \end{cases}, \quad (10)$$

式中:

S_{wbc} ——麸皮粗粉的质量分数关于麸皮填充质量的灵敏度,%/g;

S_{wbf} ——麸皮细粉的质量分数关于麸皮填充质量的灵敏度,%/g;

S_{wbm} ——麸皮微粉的质量分数关于麸皮填充质量的灵敏度,%/g;

S_{wbs} ——麸皮超微粉的质量分数关于麸皮填充质量的灵敏度,%/g。

由表 9 可知,麸皮微粉关于麸皮质量的灵敏度在数值上最大,粗粉的次之,超微粉的总体上最小,细粉的灵敏度值介于粗粉和超微粉之间。综上,无论是调控磨介质量还是麸皮质量,对小麦麸皮超微粉体的产量影响最不敏感,反映了获得麸皮超微粉体的困难性,与粉碎理论相吻合。

2.4.3 麸皮超微粉体关于磨介质量和麸皮质量的灵敏度对比 由于磨介质量和麸皮质量的量纲、取值区间各不相同,其灵敏度不具有可比性,可利用极值法对其进行无量纲归一化处理。由于磨介质量和麸皮质量取值区间的

表 9 麸皮粉体质量分数关于麸皮质量的灵敏度

Table 9 Sensitivity of wheat bran powder mass fraction to wheat bran mass

麸皮质量/g	灵敏度/(%·kg ⁻¹)			
	粗粉	细粉	微粉	超微粉
100	0.315	-0.188 7	-0.487 1	-0.156 5
200	0.155	-0.108 7	-0.267 1	-0.096 5
300	-0.005	-0.028 7	-0.047 1	-0.036 5
400	-0.165	0.051 3	0.172 9	0.023 5

非负性,无量纲归一化计算式为^[24]:

$$X_i = (x_i - \min x_i) / (\max x_i - \min x_i), \quad (11)$$

式中:

X_i ——第 i 个无量纲值,且 $X_i \in (0, 1)$;

x_i ——第 i 个有量纲值。

利用式(11)对磨介质量和麸皮质量进行无量纲化,可以得到麸皮超微粉体质量分数关于磨介质量与麸皮质量的无量纲灵敏度计算式:

$$\begin{cases} S'_{gms} = 0.715 4X - 0.972 1 \\ S'_{wbs} = 61.034X - 44.61 \end{cases}, \quad (12)$$

式中:

S'_{gms} ——麸皮超微粉体质量分数关于磨介质量的无量纲灵敏度,%;

S'_{wbs} ——麸皮超微粉体质量分数关于麸皮质量的无量纲灵敏度,%。

分布曲线如图 5 所示,其中,P 点为两灵敏度曲线的交点,坐标值为(0.723 5, -0.454 5)。

由图 5 可知,当 $0 < X < 0.723 5$ 时, S'_{gms} 、 S'_{wbs} 均小于零,且 S'_{wbs} 的绝对值大于 S'_{gms} 的。当 $0.723 5 < X < 1$ 时, S'_{wbs} 的绝对值仍大于 S'_{gms} 的,且 S'_{wbs} 从负值变为正值。由此可知,麸皮超微粉体的质量分数关于麸皮质量

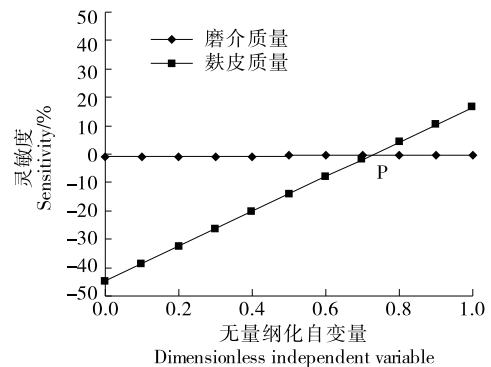


图 5 麸皮超微粉体质量分数关于磨介质量与麸皮质量的无量纲灵敏度

Figure 5 Dimensionless sensitivity of wheat bran superfine powder mass fraction to grinding medium mass and wheat bran mass

的灵敏度在数值上均大于磨介质量的,表明麸皮质量比磨介质量更容易引起麸皮超微粉体产量的变化。因此,在对小麦麸皮超微粉体产量进行调控时,更应关注磨筒内麸皮的填充率。总之,麸皮质量和磨介质量对小麦麸皮超微粉碎效果的影响是不均匀的,表明麸皮质量和磨介质量结合系数也应不同,二者对振动磨机振动特性的影响也是不均匀的,要想建立精准的外部动力学模型应利用振动试验分别识别出磨介质量和麸皮质量结合系数。

3 结论

试验表明,在利用振动磨机超微粉碎小麦麸皮时,磨介质量和麸皮质量对小麦麸皮超微粉碎性能的影响非常显著。小麦麸皮微粉的品质、超微粉体的产量与磨介质量、麸皮质量之间的总体变化趋势都是相反的,且变化程度是不均匀的。由于小麦麸皮超微粉体质量分数关于磨介质量和麸皮质量的灵敏度在数值上总体小于其他 3 种粉体的,提高小麦麸皮超微粉体的产量均难于其他 3 种小麦麸皮粉体。鉴于麸皮超微粉体质量分数关于麸皮质量的无量纲化灵敏度在数值上大于磨介质量的,调控麸皮质量比磨介质量更容易提高小麦麸皮超微粉体产量。后续将进一步从振动磨机振动特性、磨筒内磨介的运动特性、动力特性和能量传递规律等视角揭示磨介质量和麸皮质量形成超微粉碎性能的若干机制。

参考文献

- [1] ANTOINE C, PEYRON S, MABILLE F, et al. Individual contribution of gain outer layers and their cell wall structure to the mechanical properties of wheat bran[J]. *Journal of Agric Food Chem*, 2003, 51(7): 2 026-2 033.
- [2] 吴凡, 王展, 周坚, 等. 干燥方式对挤压麸皮理化性质和抗氧化活性的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(6): 67-72.
WU F, WANG Z, ZHOU J, et al. The effect of drying method on the physical and chemical properties and antioxidant activity of extruded wheat bran[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(6): 67-72.
- [3] HUEMERY Y, CHAURAND M, HOLOPAINEN U, et al. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part I: Influence of ultra-fine grinding[J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 53(1): 1-8.
- [4] ZHU K X, HUANG S, PENG W, et al. Effect of ultrafine grinding on hydration and antioxidant properties of wheat bran dietary fiber[J]. *Food Research International*, 2010, 43(4): 943-948.
- [5] 程敏, 刘保国, 曹宪周, 等. 振动磨机磨介特征对小麦麸皮超微粉碎效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 256-263.
CHENG M, LIU B G, CAO X Z, et al. Effect of grinding medium characteristics of vibration mill on superfine grinding of wheat bran[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(23): 256-263.
- [6] RAJAONARIVONY K R, MAYER L C, PIRIOU B, et al.

- Comparative comminution efficiencies of rotary, stirred and vibrating ball-mills for the production of ultrafine biomass powders[J]. *Energy*, 2021(3): 120508.
- [7] XU B, WANG S L, LI L Q. Effect of the vibration parameters on the ultra-fine particles preparation in a dry roller vibration mill[J]. *Modern Physics Letters B*, 2013, 27(19): 1-6.
- [8] 杨小兰, 刘极峰, 周亚军, 等. 离散元法之振动磨介流数值模拟与试验[J]. *振动工程学报*, 2016, 29(3): 479-487.
YANG X L, LIU J F, ZHOU Y J, et al. Discrete element on the numerical simulation and experiment of vibration grinding medium flow[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2016, 29(3): 479-487.
- [9] 程敏, 刘保国, 刘彦旭. 振动磨机研磨介质填充率的质量计量法及其修正[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(18): 2 164-2 171.
CHENG M, LIU B G, LIU Y X. Mass metric method and its correction of grinding medium filling rates for vibrating mill[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(18): 2 164-2 171.
- [10] 陶珍东, 郑少华. 粉体工程与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 136.
TAO Z D, ZHENG S H. *Powder technology and equipment*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 136.
- [11] 李鹏, 王树林. 振动磨机碰撞质量的时变分析[J]. *矿山机械*, 1998(10): 14-15.
LI P, WANG S L. Research on the dependence of the collision mass on time in vibration mill[J]. *Mining & Processing Equipment*, 1998(10): 14-15.
- [12] 朱岩, 王树林. 振动磨碰撞质量时变性的混沌运动研究[J]. *矿山机械*, 2008, 36(7): 61-64.
ZHU Y, WANG S L. Chaotic motion of avibromill with impact-mass time-varying property[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2008, 36(7): 61-64.
- [13] 闻邦椿, 刘树英, 何勃. 振动机械的理论与动态设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 96.
WEN B C, LIU S Y, HE Q. *Powder technology and equipment*[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 96.
- [14] 李状, 朱德明, 李积华, 等. 振动超微粉碎对毛竹笋干物化特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 259-263.
LI Z, ZHU D M, LI J H, et al. Influence of micronization on physicochemical properties of dried moso-bamboo shoots [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(3): 259-263.
- [15] PIEKAJ P, CIEPŁOK G. Experimental tests of the antiresonance vibratory mill of a sectional movement trajectory [J]. *Open Engineering*, 2021, 11(1): 1 180-1 184.
- [16] 李成华, 曹龙奎. 振动磨超微粉碎黑木耳的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 246-250.
LI C H, CAO L K. Experiment study on superfine pulverizing of black agarics with vibration ball mill [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 246-250.

(下转第 130 页)

食品工业, 2014, 35(5): 20-23.

LIN X, DENG S G, WANG P P, et al. Study on the application of slurry ice for the preservation of common mackerel[J]. The Food Industry, 2014, 35(5): 20-23.

[9] KEYS D R, LOWDER A C, MIRELES DEWITT C A. Conditions for the effective chilling of fish using a nano-sized ice slurry[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(3): e13564.

[10] 袁鹏翔. 流化冰对鲈鱼的保鲜研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2015: 10-12.

YUAN P X. Ice slurry on the preservation effect of squid[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2015: 10-12.

[11] KNODEL B D, FRANCE D M, CHOI U S, et al. Heat transfer and pressure drop in ice-water slurries [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(7): 671-685.

[12] ONOKOKO C L, GALANIS N, PONCET S, et al. Heat transfer of ice slurry flows in a horizontal pipe: A numerical study [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 142: 54-67.

[13] 高红岩, SIGURJÓN A, 胡瑞卿, 等. 流化冰预冷与冰温贮藏新鲜鳕鱼片质量特性分析研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(2): 48-52.

GAO H Y, SIGURJÓN A, HU R Q, et al. Analysis on quality of fresh cod (*Gadus Morhua*) fillets pre-cooled with slurry ice and further superchilled storage[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(2): 48-52.

[14] ZAKHARIYA S Y, FOTEDAR R, PRANGNELL D. The effects of two forms of ice on microbiological and physiochemical properties of barramundi (*Lates calcarifer*, Bloch) fillets[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39: 12540.

[15] 郭伟岳, 凌建刚, 叶宇飞, 等. 流化冰超冷却对养殖大黄鱼贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 307-312.

GUO R Y, LING J G, YE Y F, et al. Effect of superchilling in slurry ice on the preservation of farmed large yellow croaker[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(8): 307-312.

[16] LIN H M, DENG S G, HUANG S B, et al. Effects of precooling with slurry ice on the quality and microstructure of Anglerfish (*Lophius americanus*) liver [J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 45: 12193.

[17] 高蕊笑, 张庆钢, 王艺, 等. 冰浆的研究现状与发展趋势[J]. 制冷技术, 2019, 39(5): 65-71.

GAO R X, ZHANG Q G, WANG Y, et al. Research status and development trend of ice slurry [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2019, 39(5): 65-71.

[18] 刘瑶, 左进华, 高丽朴, 等. 流态冰预冷处理对甜玉米贮藏品质的影响[J]. 制冷学报, 2020, 41(3): 83-90.

LIU Y, ZUO J H, GAO L P, et al. Effect of slurry ice precooling treatment on quality of sweet corn[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(3): 83-90.

[19] 刘瑶, 左进华, 高丽朴, 等. 流态冰预冷处理对西兰花品质及生理的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(4): 77-86.

LIU Y, ZUO J H, GAO L P, et al. Effect of slurry ice precooling treatment on quality of broccoli[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 77-86.

[20] 南家莲. 用于非冷藏生鲜食品运输过程的多层瓦楞纸盒热性能模拟[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 137-141.

NAN J L. Simulating study on thermal performance of multilayer box for fresh food transportation[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 137-141.

[21] 安兆元, 师占群. 新型粉丝烘干室流场模拟与结构优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 68-73.

AN Z Y, SHI Z Q. Flow field simulation and structure optimization of a new type of vermicelli drying room[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 68-73.

(上接第 110 页)

[17] 韩跃新, 朱一民, 王泽红, 等. 介质特性对铝土矿在振动磨机中选择性磨矿的影响[J]. 现代矿业, 2009, 25(4): 36-39.

HAN Y X, ZHU Y M, WANG Z H, et al. Research on influence of medium characteristics on selective grinding of bauxite in vibration mill[J]. Morden Mining, 2009, 25(4): 36-39.

[18] JUNNING P Z. Technology of superfine grinding and its application in food industry[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2010, 17(10): 991-1 009.

[19] 李宏玲, 董玉德, 黄智豪, 等. 基于相似性理论的轮胎花纹相似度检测与分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(14): 1 646-1 652.

LI H L, DONG Y D, HUANG Z H, et al. Similarities detection and analysis of tire patterns based on similarity theory [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(14): 1 646-1 652.

[20] 陶晓东, 郭安福, 李辉, 等. 基于灵敏度分析的盘式开沟机性能分析及优化[J]. 工程设计学报, 2022, 29(1): 59-65.

TAO X D, GUO A F, LI H, et al. Performance analysis and optimization of disc ditcher based on sensitivity analysis [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(1): 59-65.

[21] 唐果宁, 黄良沛, 刘伟, 等. 团聚性对超细振动磨机粉碎影响的试验分析[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(S1): 48-51.

TANG G N, HUANG L F, LIU W, et al. Experimental research on glomeration to effect of ultra-fine vibration mill grinding [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(S1): 48-51.

[22] JAQUELINE M, FLORENCE S A, CELIA M L F. Effect of ball milling on structural and physicochemical characteristics of cassava and Peruvian carrot starches [J]. Starch, 2013, 65(3): 200-209.

[23] 程敏, 刘保国, 刘彦旭. 磨介球对小麦麸皮振动冲击破碎性能的影响[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 249-256.

CHENG M, LIU B G, LIU Y X. The influence of grinding ball on the vibration-impact crushing properties of wheat bran[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 249-256.

[24] 郭亚军, 易平涛. 线性无量纲化方法的性质分析[J]. 统计研究, 2008(2): 93-100.

GUO Y J, YI P T. Character analysis of linear dimensionless methods[J]. Statistical Research, 2008(2): 93-100.