

一种小型家用磨面机的设计研究

Design and research of a new type of vertical home flour mill

谢明佐 贾瑞清 马 飞 宋 涛 周东旭

XIE Ming-zuo JIA Rui-qing MA Fei SONG Tao ZHOU Dong-xu

(中国矿业大学〔北京〕机电与信息工程学院, 北京 100083)

(School of Mechanical and Information Engineering, China University of Mining
and Technology, Beijing 10083, China)

摘要:设计了一款适合家用的小型多功能磨机,该装置采用立辊磨的磨制形式,同时配有外筒旋转驱动螺旋提升机构,能够实现磨粉均匀。针对磨机进行了功能结构及工作原理的介绍,以及立辊磨和提升机构运动学理论研究。对整机及其关键部件进行了结构设计。对外筒驱动的螺旋提升机构进行了面粉颗粒物料 EDEM 输送模拟仿真,研究物料输送效率影响因素,为磨机电机选型及整机设计提供参考。

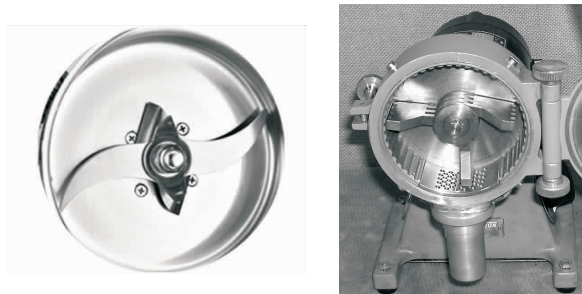
关键词:立辊磨;结构设计;螺旋提升机构;EDEM 仿真

Abstract: A small low speed milling machine has been designed for household use. The device adopts vertical roller mill grinding, and is equipped with the outer cylinder rotation drive screw lift to achieve a uniform grinding mechanism which ensures the produced flour's nutrition structure intact. The function structure and working principle of the mill, the kinematics theory of the roller mill and the lifting mechanism are applied. A new structure of the whole machine as well as its key parts has been performed. The software EDEM has been used to carry out the simulation of the particle transport of flour, and the factors which affecting the efficiency of material conveying have been studied. Thus this study provides reference for the selection of the motor and the design of the whole machine.

Keywords: vertical roller mill; structural design; spiral lifting mechanism; EDEM simulation

随着生活水平的日益提高,人们开始不断追求健康绿色、天然营养的食品,这也将成为现代社会的一种时尚和保障食品安全的一种趋势^[1]。长期以来,中国面粉加工常常采用大功率机械进行加工,精度及智能化程度低,市场占有率严重不足,单台一次加工量一般在 50 kg 以上,大型面粉加

工厂一次加工量更是以吨计^[2]。传统面粉加工存在以下问题:① 面粉量大不易保存,易发生腐败;② 高温高速钢磨容易造成营养流失,面粉营养价值相对不高;③ 超市面粉含有大量添加剂(如增白剂等)^[3]。目前国内外对小型家用磨面机研究较少^[4],市售产品以刀片切割和卧式碾磨 2 种为主,见图 1。其中刀片切割形式容易破坏面粉颗粒营养结构,研磨颗粒不够细;卧式碾磨通过动、静磨片对谷物颗粒进行高速研磨,磨制颗粒细,效率高,但高温容易破坏面粉营养结构,同时这种碾磨方式会对部分累积颗粒重复碾压,破坏面粉结构,颗粒也不够均匀。针对以上问题,本试验提出一种小型家用磨机,采用立式行星磨的形式,配有螺旋提升机构,低速磨制,能够实现对大颗粒面粉重复碾磨。



(a) 旋转刀片式

(b) 卧式碾磨式

图 1 常用磨制方式

Figure 1 Common grinding methods

1 磨机的工作原理及结构设计

1.1 整体功能结构及工作原理

1.1.1 磨机的整体功能结构 如图 2 所示,该设备由电机、传动机构、磨辊磨环、螺旋提升机构、面斗以及壳体等部分构成。

该设备的直径为 340 mm,高为 500 mm,同普通家用高压锅、电饭煲大小相似,满足在家中使用的要求。

作者简介:谢明佐,男,中国矿业大学(北京)在读硕士研究生。

通信作者:贾瑞清(1958—),男,中国矿业大学(北京)教授,博士生导师,博士。E-mail: ruiqingjia@163.com

收稿日期:2017—05—03

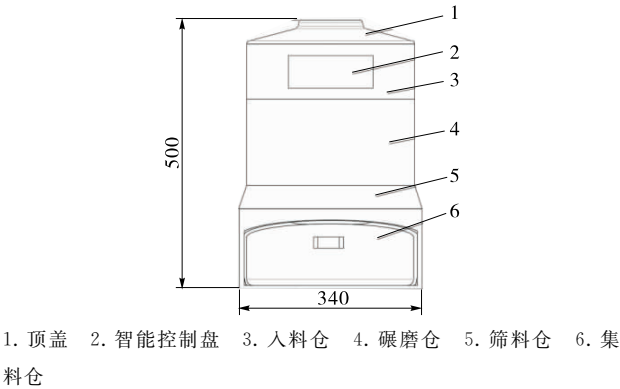


图 2 磨机功能结构图
Figure 2 Functional structure of mill

1.1.2 磨机的工作原理 整个面粉磨制过程主要通过磨辊与磨环的作用将谷物颗粒磨碎,然后通过螺旋提升机构提升进行重复磨制,使面粉颗粒均匀一致。

首先接通电源,使电机空转,然后将谷物颗粒倒入入料仓,选择对应的档位,打开下料闸门,这时磨面机开始自动磨制面粉。

磨制过程中,首先谷物颗粒由于重力作用掉入入料仓,在配料盘的离心作用下进入磨辊和磨环的空隙,磨辊与磨环的相互作用将谷物颗粒碾碎成较小颗粒,当颗粒足够小时便会通过锥形筛掉入面斗,较大的颗粒通过锥形筛滑落到提升机构底盘,通过外筒旋转的螺旋提升机构重新回到入料仓重复磨制,直至都碾碎成小颗粒落入面斗,面粉磨制完成,电机自动停止。

1.2 磨机的结构设计

1.2.1 磨机的总体结构设计 磨机作为家电产品,在总体结构设计^[5]时既要满足家电产品的便携与美观,又要满足其基本功用。重点考察以下因素:

- (1) 结构紧凑美观,重量适中便于移动,要求各个机构布置及选材合理。
- (2) 工作过程平稳,噪音低。
- (3) 使用快捷智能,便于拆卸清洗。

根据以上设计要求,将磨机分为动力机构、传动机构、支撑机构、碾磨机构、提升机构、附属系统等主要功能体系^[6]。总装图见图 3。

磨面机的磨粉原理主要借鉴国外的 Szego 行星磨的粉磨原理^[7],并加以改进创新。

当打开入料闸门,入料仓中的谷物颗粒掉落在旋转的配料盘上,在离心力的作用下滑到料仓边缘并进入碾磨仓,磨辊对谷物颗粒进行挤压、剪切和研磨,从而将谷物碾细。磨辊上加工有对称的螺旋磨纹,既能保证谷物颗粒碾磨时受挤压和剪切作用,又有良好的沟槽导向作用,使磨细的颗粒及时排出以防多次碾压破坏面粉营养结构,同时具有良好的散热作用。

1.2.2 磨机关键部件的设计

- (1) 动力及传动机构:磨机主要通过配备变频器的小型

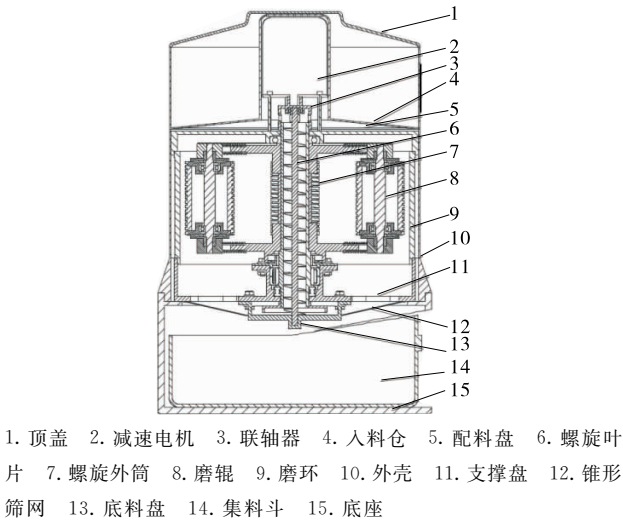


图 3 磨机总装图
Figure 3 Mill assembly drawing

减速电机提供动力,然后通过联轴器与螺旋外筒相连接,同时螺旋外筒又作为立辊磨的主轴。外筒的下端分别通过一组滑动轴承和一组滚针轴承,固定在下支撑盘上,上端以一组滚动轴承固定于上支撑盘。滚动轴承承受主轴轴向力,滚针轴承承受主轴径向力^[8]。螺旋叶片下端通过键槽的方式固定在底料盘上,上端通过一组滚珠轴承固定在联轴器上,保证其位置固定^[9]。

(2) 碾磨机构:采用立辊磨的形式,避免了其他形式的磨机对面粉颗粒的重复碾压造成营养结构破坏,该磨机由螺旋外筒作为其主轴为其提供动力,主轴通过花键与上下行星架连接将动力传递给行星架系,行星架通过连接管连接滑槽,滑槽可以通过调节连接管外的预紧弹簧来调节其径向位置,从而调节磨辊与磨环之间的间隙,实现对磨制面粉颗粒大小的控制。四对磨辊均布在行星架上每一对竖直方向的滑槽之间,磨辊主要由磨辊轴、磨辊外环和上下深沟球轴承以及密封装置构成,磨辊外环带有螺旋状磨纹,磨环固定在磨机的底架上^[10]。

(3) 提升机构:由于低速状态下可能存在面粉碾压不均,所以装置设置了螺旋提升机构,碾压较小的面粉颗粒时

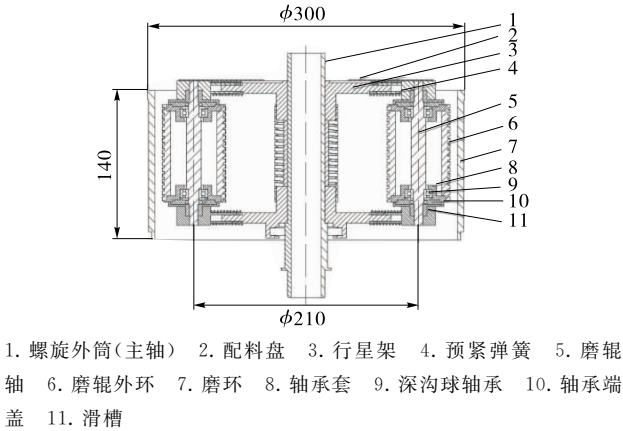


图 4 碾磨机构
Figure 4 Milling mechanism

可以通过锥形面筛落入集料头，未能经过筛选的颗粒滑落至底料盘，通过螺旋提升机构重新运送至入料斗进行二次碾压，直至所有面粉颗粒碾压均匀。

该磨面机的提升机构见图 5。提升机构主要原理是，通过外筒旋转从而垂直向上提升面粉颗粒。机构主要由螺旋叶片、螺旋外筒、底料盘组成。螺旋叶片固定在底料盘上，螺旋外筒在轴承的固定下通过联轴器与电机相联。

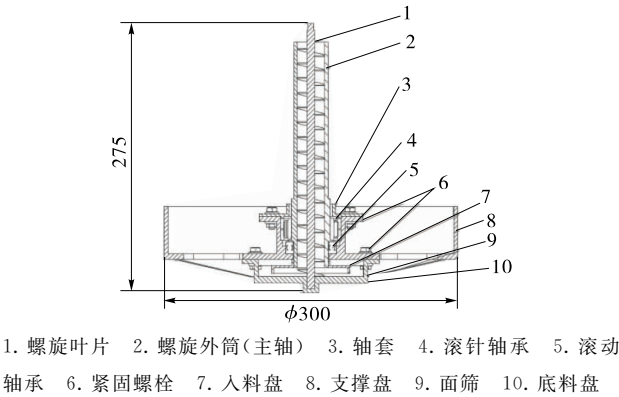


图 5 提升机构
Figure 5 Lifting mechanism

(4) 附属系统及整体外观图：附属系统主要包括智能控制设备、壳体、其他附属设备如集料斗等。其中磨机顶盖、磨机外壳、磨机底座可以快速拆卸，磨环、磨辊也可取下清洗，整机拆和清洗方便。整机外观效果见图 6。

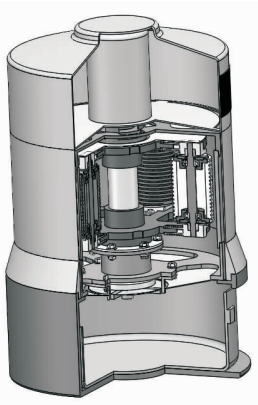


图 6 整机外观效果图
Figure 6 Overall effect drawing

2 磨机理论研究

2.1 立辊磨运动学微分方程

面粉磨制过程中受力情况十分复杂，在建立系统运动模型时作一定的简化，以单个磨辊为研究目标，在稳定工况下立辊磨的简化运动学模型^[7]见图 7。

螺旋外筒(主轴)与行星架通过键固定连接，整体以角速度 ω_1 沿顺时针方向转动。4 组磨辊随行星架沿顺时针方向旋转，同时在摩擦力作用下沿自身中心轴线以 ω_2 逆时针自转，其中前者为牵连运动，后者为相对转动。单个磨辊的运动见表 1。

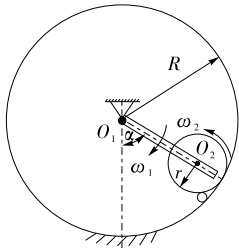


图 7 立辊磨运动学模型
Figure 7 Kinematics model of vertical roller mill

表 1 单个磨辊的运动
Table 1 The grinding roller motion

运动类型	运动状态	角速度
相对运动	沿 O_2 轴转动	$\omega_2 = \omega_1 R / r$
牵连运动	绕 O_1 轴匀速圆周运动	ω_1
绝对运动	平面复合运动	$\omega = \omega_2 + \omega_1$

设逆时针方向为正，则 ω_2 取正号， ω_1 取负号，可知：

$$\omega = \omega_2 - \omega_1。$$

即：

$$\omega = \omega_1 (R - r) / r。$$

由达郎伯—拉格朗日方程，可得到立辊磨运动学方程

$$d^2\theta/dt^2 - \omega_1 (R - r) = 0。$$

2.2 螺旋提升机构运动学模型

提升机构^[11]简化模型见图 8，假定在外筒中取一个颗粒 A，它和螺旋叶片上表面以及外筒内壁同时紧密接触，然后将螺旋叶片展开成平面图见图 9。图 9(a)中 V_A 是外筒上与颗粒 A 相接触的点的切向线速度， V_A 是颗粒 A 的速度， α 为螺旋叶片升角， γ 为 V_C 逆时针旋转到 V_A 时的夹角， V_{CA} 是颗粒 A 相对于外筒上颗粒 A 和外筒之间接触点的相对速度；图 9(c)中 V_L 和 V_T 分别是颗粒速度 V_A 的垂直方向速度分量和水平速度分量。

在图 9(a)中：

$$V_C = r \times \omega_1，$$



图 8 提升机构简化模型
Figure 8 Lifting mechanism simplified model

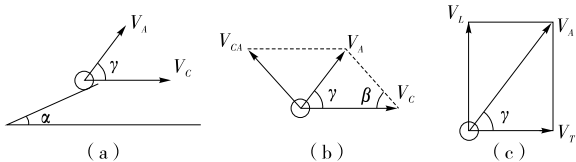


图 9 颗粒速度矢量图
Figure 9 Particle velocity vector diagram

$$\omega_1 = (\pi \times n_1) / 30,$$

(5)

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{p}{2\pi \times r},$$

(6)

式中：
 r ——螺旋叶片螺旋半径,mm；
 ω_1 ——外筒角速度,rad/s；
 n_1 ——外筒转速,r/min；
 p ——螺旋叶片螺距,mm。

根据速度合成定理可知,颗粒 A 的速度矢量等于外筒内壁上和颗粒接触点的速度矢量与颗粒相对于此接触点的矢量之和,见图 9(b)。

$$\tilde{V}_A = \tilde{V}_C + \tilde{V}_{CA}。$$

(7)

观察图 9(b),根据三角关系可以推出式(8):
 $V_A \times \sin\gamma = V_{CA} \times \sin\beta =$

$$\sqrt{V_A^2 + V_C^2 - 2 \times V_A \times V_C \times \cos\gamma} \times \sin\beta,$$

(8)

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{V_A \times \sin\gamma}{V_C - V_A \times \cos\gamma}。$$

(9)

当 V_A 、 V_C 、 α 已知时可以求得 γ 和 β 。其中 V_C 、 α 分别代表外筒转速、螺旋叶片升角,可以视为输送机的固定参数, V_A 代表物料颗粒的速度,对于不同的外筒转速、物料属性、颗粒和外筒内壁摩擦系数、颗粒和螺旋叶片摩擦系数、颗粒和颗粒间摩擦系数紧密相关。

$$V_A \text{ 数值大小可以根据能量守恒的方法进行分析。}$$

$$W_A = W_1 + W_2 + W_3 + W_4,$$

(10)

$$W_1 = mV_A^2/2,$$

(11)

式中：
 W_A —— 输送颗粒 A 所做得功,J；
 W_1 —— 颗粒 A 的动能,J；
 W_2 —— 颗粒 A 获得的势能,J；
 W_3 —— 颗粒 A 和其他颗粒、外筒以及螺旋叶片摩擦损失的能量,J；
 W_4 —— 颗粒 A 形变过程中损失的能量,J。

根据式(10)可知,相同的输送机输送量,不同材料的粉体颗粒由于其物理属性不同,输送时输送机的驱动功率是不同的。

V_A 的垂直速度分量和水平速度分量分别见式(12)和(13)。

$$V_L = V_A \times \sin\gamma,$$

(12)

$$V_T = V_A \times \cos\gamma。$$

(13)

3 螺旋提升机构 EDEM 仿真及分析

为了研究螺旋提升机构的提升输送能力,确定螺旋叶片升角和电机正常工作转速,采用 EDEM 软件^[12]进行运输机理的分析^[13]。

3.1 动态模拟

(1) 分析的物料对象为小麦粗面粉颗粒(平均颗粒直径为 1 mm),模拟前,预先定义碰撞模型(包括颗粒与颗粒,颗粒与外筒外壁及底料盘)为 Hertz-Mindlin(no slip)模型,同

时要定义好实体的材料特性,其中面粉和外筒、螺旋 S 叶片的材料特性^[14]见表 2。

表 2 材料特性参数表

Table 2 Material characteristic parameters

材料特性	泊松比	剪切模量/Pa	堆积密度/(kg·m ⁻³)
面粉	0.25	2.3×10 ⁶	690
钢	0.30	7.0×10 ¹⁰	785

(2) 需要设置好相关颗粒与壳体的摩擦因数,通过查阅资料^[15],确定面粉颗粒与面粉颗粒、面粉颗粒与钢之间的摩擦因数见表 3。

表 3 颗粒间、颗粒与壳体间的摩擦因数

Table 3 Friction coefficient between particles, particles and shells

特性	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
颗粒与颗粒	0.15	0.68	0.03
颗粒与钢	0.20	0.50	0.01

(3) 将前面所建立的 CAD 模型导入系统^[16],设置每个部分的材料特性并添加颗粒工厂,然后设置好颗粒和颗粒工厂相关参数,同时设置好仿真相关参数,开始仿真,动态仿真效果见图 10。

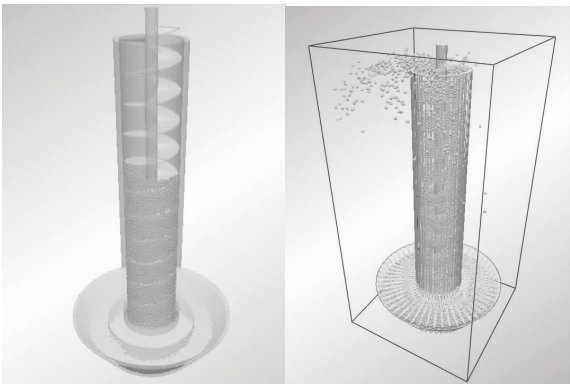


图 10 EDEM 仿真效果图
Figure 10 EDEM simulation effect diagram

3.2 数据分析与处理

通过 EDEM 软件对本例的分析内容主要包括:螺旋叶片螺旋升角、外筒转速、质量流率。分别建立螺旋叶片升角为 15°、30°、45°、60°、75°的提升机构简化模型,分别模拟在 100,200,300,400,500,600 r/min 转速下面粉颗粒输送情况,忽略振动等因素^[17],分析结果见图 11。

由图 11(a)可知,在外筒转速固定的情况下,不同螺旋升角下面粉颗粒的平均质量流率变化趋势;当外筒转速为 200 r/min,螺旋升角在 45°~60°时,面粉颗粒的平均质量流率达到一个高峰阶段。

由图 11(b)可知,当螺旋升角上升到 45°以后,面粉颗粒的平均质量流率随外筒转速的变化趋势基本趋于稳定:即在

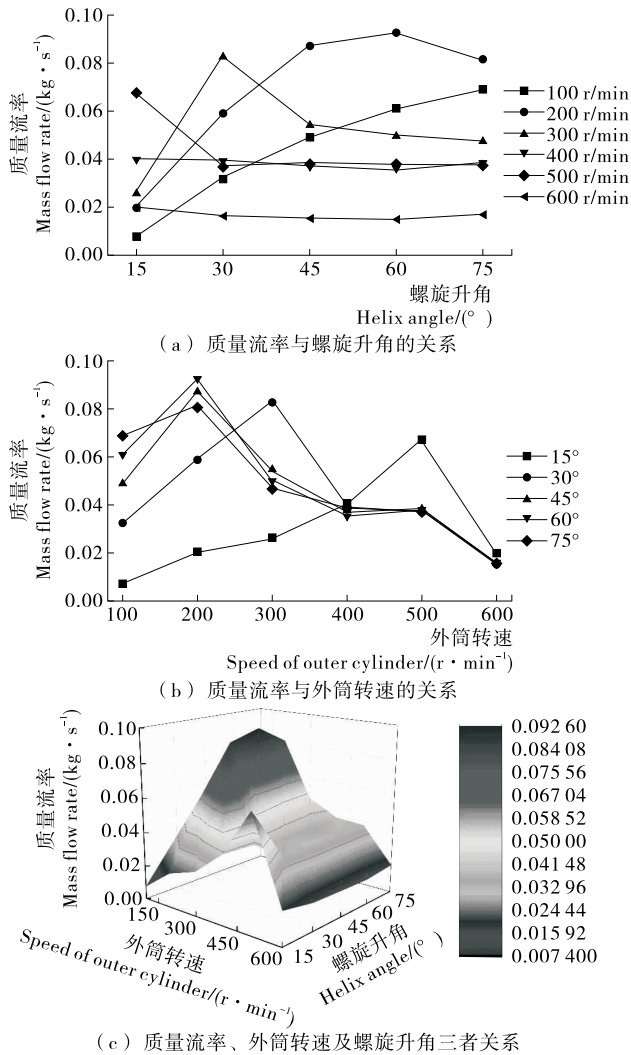


图 11 离散单元法分析结果

Figure 11 Analytical results of discrete element method

外筒转速从 100 r/min 上升至 200 r/min 过程中,平均质量流率逐渐升高并在 200 r/min 左右时达到峰值,随后随着外筒转速的加大逐渐减小。

综上所述,为了使磨机提升机构垂直输送的效率达到最大,同时保证磨机低温低速工作,选取提升机构螺旋叶片升角为 60°,外筒转速即电机正常工作转速为 200 r/min。

4 结论

(1) 通过分析当前中国面粉加工情况以及针对现有家用小型磨面机存在的问题,提出了一款新型家用小型立辊磨面机。磨机采用立辊行星磨的形式节省了产品空间,实现了低速磨制面粉,并采用螺旋提升机构既保证面粉颗粒均匀,又不破坏其营养结构。一次加工量在 3~5 kg,体积较小,同时可通过调节磨辊磨环间隙用作磨制其他谷物等用途,整个磨机可快速拆卸,便于清洗,适合家庭使用。

(2) 本试验对关键部件立辊磨和螺旋提升机构进行了理论分析,建立了运动学模型;对磨机进行了总体机械结构设计以及关键部件的机械结构设计;通过软件 EDEM 对螺旋提升机构进行了面粉粗颗粒物料输送分析,研究了螺旋叶

片和外筒转速分别对面粉颗粒平均质量流率的影响,从而确定了螺旋叶片升角为 60°,外筒转速为 200 r/min。

(3) 下一步将针对具体谷物颗粒进行试验研究,确定各零部件具体参数,通过测试确定磨机的主要技术指标,通过面粉营养结构分析作进一步改进,同时设计其智能控制系统,提高磨机操作的控制性能。

参考文献

- [1] 张乾坤. 中国绿色食品网络营销模式的检视与构建[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 206-208, 230.
- [2] 梁海霞, 刘会杰, 刘素山, 等. 我国磨粉机制造业的现状与发展[J]. 粮食加工, 2017(1): 52-53.
- [3] 谢娟. 面粉中过氧化苯甲酰及其测定方法研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 251-254.
- [4] 武文斌, 刘自然. 国外面粉加工新设备和新技术的应用[J]. 食品与机械, 2006, 22(4): 115-118, 121.
- [5] 成大先. 机械设计手册: 第一卷[M]. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2012:(2-3)-(2-258),(4-18)-(4-24).
- [6] 王乾, 郝绍毅, 贾瑞清, 等. 基于离心加载立辊式磨机关键部件的设计[J]. 煤矿机械, 2011(8): 21-23.
- [7] 王乾, 周红军, 贾瑞清, 等. 基于离心加载立辊式磨机的试验研究[J]. 煤矿机械, 2011(9): 54-56.
- [8] 濮良贵. 机械设计[M]. 8 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 307-336.
- [9] 成大先. 机械设计手册: 第二卷[M]. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2012:(7-202)-(7-384).
- [10] 董攀辉. 新型盘辊式磨粉机及其关键部件的分析研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014: 23-28.
- [11] 李健, 贾瑞清, 王乾, 等. 外筒驱动型垂直螺旋输送技术输送大豆的输送特性[J]. 江苏农业科学, 2017(1): 201-204.
- [12] 刘伟立, 卫红波. 基于 EDEM 软件的螺旋输送机仿真及分析[J]. 机械工程师, 2015(10): 121-123.
- [13] 吴超, 胡志超, 吴努. 基于离散单元法的螺旋输送机数值模拟与分析[J]. 农机化研究, 2015(2): 57-61, 70.
- [14] LEI Xiao-long, LIAO Yi-tao, LIAO Qing-xi. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016(131): 29-39.
- [15] 乌兰图雅, 王春光, 赵圆圆, 等. 螺旋输送装置转速和喂入量对输送性能的影响试验研究[J]. 农机化研究, 2015(7): 206-208, 212.
- [16] 宋欢, 李勇, 马迎亚, 等. 基于离散元法的定量螺旋输送机的优化研究[J]. 起重运输机械, 2016(2): 30-34.
- [17] 孟杰, 孟文俊. 影响 EDEM 仿真结果的因素分析[J]. 机械工程与自动化, 2014(6): 49-51.