

三七球磨法超微粉碎运动仿真研究

Dynamic simulation and experimental research on superfine pulverization of notoginseng by ball milling

周玉梅 黄志洪 韦鸿钰 朱立学 骆少明

ZHOU Yu-mei HUANG Zhi-hong WEI Hong-yu ZHU Li-xue LUO Shao-ming

(仲恺农业工程学院机电工程学院, 广东 广州 510225)

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, Guangdong 510225, China)

摘要:采用 PFC3D 软件建立球磨介质运动的三维离散元数值模型,赋予不同的边界条件,对三七球磨的运动过程进行仿真,分析磨球的运动情况和球体之间的平均接触力,研究不同的球磨因素对三七球磨法超微粉碎效果的影响,并通过单因素试验研究验证仿真结果。结果表明,影响三七球磨粉碎的关键因素依次为转速>球料比>中小球比,对应的最佳水平为:转速 500 r/min,球料比 8:1,中小球比 1:4,为三七球磨法超微粉碎回归正交试验设计给出了因素水平参考范围,提供了一种新思路。

关键词:三七;球磨法;超微粉碎;运动仿真;球磨机

Abstract: Three dimensional discrete element numerical model was established by PFC3D with different boundary conditions, the grinding process was simulated, and the average contact force between balls was also analyzed. The effects of different milling factors on the superfine pulverization of notoginseng were investigated, and the simulation results were proved through the single factor experiments. The results showed that the order of key factors, which affected the milling process was rotation speed, ball material ratio and mass ratio of balls. The optimum conditions were as followed: the rotation speed of 500 r/min, ball material ratio of 8 to 1, and mass ratio of balls of 1 to 4, which provide the reference for the design of orthogonal experiments.

Keywords: notoginseng; ball milling method; superfine pulverization; dynamic simulation; ball mill

三七是五加科植物三七的干燥根,有散瘀止血、消肿定痛的功效,是中国治疗心脑血管等疾病的传统名贵中药材^[1]。与传统加工相比,利用超微粉碎制得的超微粉末具备

溶出率高、溶出速度快和吸收性好等优点^[2-3]。然而,球磨法粉碎三七的破碎机理与工艺研究尚未完善,且球磨机运转时罐体封闭,其内部真实运动情况也难以直接观察,内部球磨介质也不满足连续性的假定,对三七的球磨法超微粉碎破碎机理与工艺研究带来了一定的困难。目前,国内外在散粒物料动力学的研究中,主要运用离散元法来分析散粒群体的力学行为^[4]。R. Venugopal^[5]通过光弹试验证明了离散单元方法的可靠性;P. W. Cleary^[6]完善了空间三维离散元方法的基本算法;黄晚清等^[7]运用离散元法对三七重力场内的两种粒径球体组成的微观混合结构进行研究,分析各种类型配位数的大小及分布,得出单一接触类型的配位数及分量配位数分布与体积组成有关;金辉霞等^[8]采用 PFC3D 对转筒内颗粒的混合过程进行仿真,研究不同的转速、填充率、转筒对颗粒混合过程的影响,分析各因素对颗粒混合程度与混合速度的影响;该类研究的深化,为球磨三七的内部运动仿真分析提供了研究方向与理论指导。本研究拟利用 PFC3D 软件,通过程序编写,建立球磨介质运动的三维离散元数值模型,赋予不同的边界条件,对药用三七球磨的运动过程进行仿真,分析其运动情况和球体之间的平均接触力,研究不同的球磨因素对三七球磨法超微粉碎效果的影响,并通过单因素试验进一步验证仿真结果。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

三七;产地云南,广东众生药业股份有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

超声波清洗机:CE-5200A 型,洁康超声波(香港)有限公司;

电热鼓风干燥箱:GZX-9070MBE 型,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;

高速多功能粉碎机:BJ-100 型,浙江爱雪厨房设备有限公司;

基金项目:广东省自然科学基金重点项目(编号:S2013020012890);广东省科技计划项目(编号:2012B020313006)

作者简介:周玉梅(1977—),女,仲恺农业工程学院副教授,博士。

E-mail: zymtky@163.com

通讯作者:朱立学

收稿日期:2015-08-24

行星式球磨机:QM-3SP2 型,南京大学仪器厂;
激光粒度仪:Mastersizer 2000 型,马尔文仪器有限公司;
生物显微镜:L1100 型,深圳市艾尔玛机电设备有限公司。

1.2 方法

1.2.1 三七预处理 将三七于超声波清洗仪清洗三七表层灰尘,于 50 °C 电热干燥箱干燥 2 h,晾至室温。然后采用普通粉碎机对其进行初级粉碎 10 min,经 30 目筛网筛分,制得粗粉样品以备超微粉碎试验用。

1.2.2 超微粉碎单因素试验设计

(1) 中小球个数比对球磨效果的影响:固定球磨机转速为 300 r/min,球料比为 8 : 1($m : m$),研究中小球个数比(1 : 1,1 : 2,1 : 3,1 : 4,1 : 5,1 : 6)对球磨效果的影响。采用光学生物显微镜观察超微粉碎后三七表面形貌变化,利用激光粒度仪检测各种球磨参数下三七粉的粒径分布,对比不同因素水平下的超微粉碎结果。

(2) 球料比对球磨效果的影响:固定转速为 300 r/min,中小球个数比为 1 : 4,研究球料质量比(4 : 1,6 : 1,8 : 1,10 : 1,12 : 1,14 : 1)对球磨效果的影响。采用光学生物显微镜观察超微粉碎后三七表面形貌变化,利用激光粒度仪检测各种球磨参数下三七粉的粒径分布,对比不同因素水平下的超微粉碎结果。

(3) 球磨机转速对球磨效果的影响:固定球料比为 8 : 1($m : m$),中小球个数比为 1 : 4,研究球磨机转速(100,200,300,400,500,550 r/min)对球磨效果的影响。采用光学生物显微镜观察超微粉碎后三七表面形貌变化,利用激光粒度仪检测各种球磨参数下三七粉的粒径分布,对比不同因素水平下的超微粉碎结果。

1.2.3 球磨介质仿真参数选取及模型建立 PFC3D 软件运用离散单元法^[9],通过建立三七固体颗粒体系的参数化模型,整个系统看作为一系列独立的颗粒单元组成,进行模拟仿真,分析不同因素对应的球磨介质的运动规律和基本力学特征。试验平台选择的行星磨原型是 QM-3SP2 行星式球磨机,模拟计算的行星磨模型,按实体比例 1 : 1 尺寸建模。行星磨的物理属性参数及离散元的模型计算参数见表 1。根据表中参数建立罐体、球磨介质模型见图 1。然后赋予自转和公转运动模拟行星运动,并对每一时刻球磨罐内部的受力情况进行统计分析获得平均接触力变化规律。

2 结果与分析

球磨介质的中小球个数比、球料比以及转速对行星球磨过程的影响规律是仿真研究的内容,建立不同中小球个数比、球料比以及转速的仿真模型,分析其运动情况和球体之间

表 1 行星球磨物理和离散元模型计算参数表

Table 1 Parameters of planetary ball milling and discrete element model

球磨罐直 径/mm	球磨罐高 度/mm	公转半 径/mm	玛瑙球直 径/mm	玛瑙球密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
85	80	95	6/10/20	2.65×10^3
法向刚度	切向刚度	摩擦系数		法向/切向阻尼
		球—罐体	球—球	
4.0×10^5	3.0×10^5	0.5	0.5	0.3/0.3

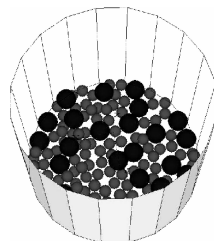


图 1 球磨罐体及研磨介质模型图

Figure 1 The model of ball milling tank and grinding media

的平均接触力,可以判断球磨罐内磨球的运动状态,理论预测出最适宜的球磨因素。

2.1 中小球个数比对球磨过程的影响

球磨机采用直径分别为 6 mm 和 10 mm 的小球和中球作为球磨介质,中球和小球相互协作,在球磨机的带动下粉碎物料。准确的中球和小球的个数配比,有利于三七球磨效果,针对中小球个数配比进行单因素试验仿真,确定转速为 300 r/min,球料比为 8 : 1($m : m$),中小球个数比分别为 1 : 1,1 : 2,1 : 3,1 : 4,1 : 5,1 : 6。球磨罐内部运动模拟见图 2。

在超微粉碎过程中,物料粉碎是通过球磨介质之间以及球磨介质与罐体内壁之间的相互运动而形成的,所以不同的球磨介质需要充分混合。由图 2 可知,当中小球个数比为 1 : 1,1 : 2,1 : 3 时中小球混合并不均匀,大部分中球(蓝色)位于小球(红色)的上方,不利于三七粉碎;而中小球个数比在 1 : 4,1 : 5 时,中小球混合充分,但是个数比 1 : 4 时球体介质聚集更为集中。个数比为 1 : 6 时,由于中球数目相对小球偏少,这种情况也不利于三七粉碎。因此,优先选择中小球个数比为 1 : 4。

图 3 为不同中小球比的三七粉碎后的显微结构,当中小球个数比在 1 : 2,1 : 4,1 : 5 时,不规则小颗粒充满视野,表示粉体已无完整组织细胞,细胞壁破碎,细胞组织被破坏。

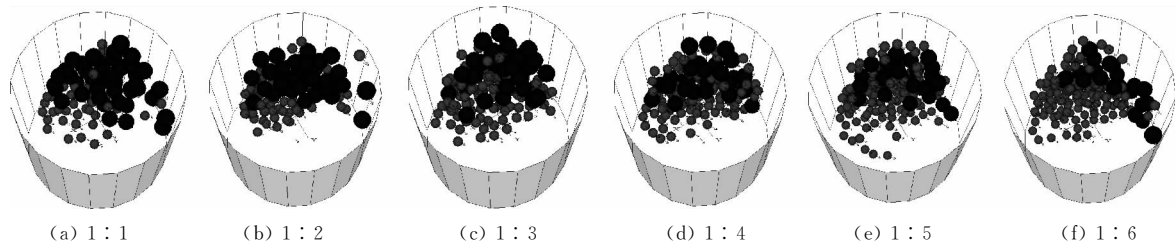


图 2 不同中小球数比的球磨罐内部运动仿真图

Figure 2 Motion simulation in the ball milling tank under different mass ratio of balls

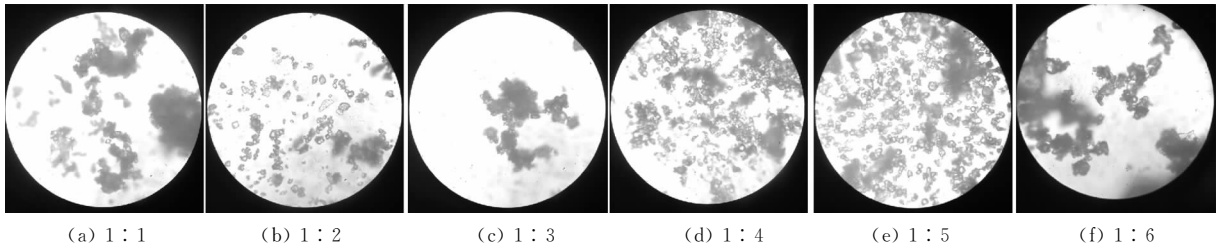


图 3 不同中小球数比的三七超微粉碎后光学显微图像

Figure 3 Optical microscopic images of particle size for notoginseng under different mass ratio of balls ($\times 400$)

图 4 为相对应的球体之间平均接触力变化规律图。由图 4 可知,随着中小球个数比的增大,研磨球数不断增多,球体之间的平均接触力在减小。这是因为过多的研磨球导致罐体内部介质增大,填充率增多,引起了研磨球的运动空间减少,减小了有效的冲击高度,降低了粉碎的能力。此外,中小球个数比在 1:4 时三七的粒径最小^[10]。因此,中小球个数不能过多,宜控制在 1:4。

2.2 球料比对球磨过程的影响

球料比是指球磨过程中,球磨介质与物料之间的质量比

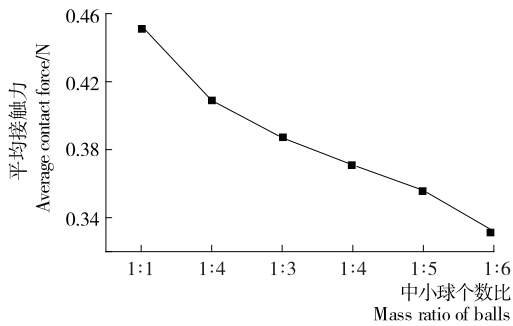


图 4 不同中小球个数比的平均接触力图

Figure 4 The average contact force between balls under different mass ratio of balls

值,针对球料比进行单因素试验仿真,确定转速为 300 r/min,中小球个数比为 1:4,球料比分别为 4:1,6:1,8:1,10:1,12:1,14:1($m:m$)。球磨罐内部运动模拟见图 5。由图 5 可知,球料比为 4:1 和 6:1($m:m$)时,球磨介质数量少,球磨效率低;球料比为 14:1($m:m$)时,球体数量过多,罐内空间过小,球体运动明显减弱,分散在罐体底部滑动,同样不利于球磨三七粉末;在球料比为 8:1,10:1,12:1($m:m$)时,中小球球磨介质混合较好,球体与内壁接触的面积较大,增加碰撞几率。而球料比为 8:1($m:m$)时,球体混合更为集中,有利于三七粉碎,因此优先选择球料比为 8:1($m:m$)。

图 6 为不同球料比三七粉碎后的微观结构,当球料比在 4:1,6:1,14:1($m:m$)时,显微镜中可看到较大块状颗粒;当球料比在 8:1,10:1,12:1($m:m$)时,淡黄色、棕黄色、棕色等不规则小颗粒较多,表示粉体已无完整组织细胞,细粉细胞壁破碎,细胞组织结构被破坏。图 7 为相对应的球体之间平均接触力变化规律,球料比分别为 8:1,10:1,12:1($m:m$)时,球体之间平均接触力较大,可知其罐体内部介质运动更为复杂,对三七的粉碎效果更佳。此外,球料比为 8:1($m:m$)时三七粉碎后的粒径最小^[10]。因此,球料比应当控制在 8:1~12:1($m:m$)。

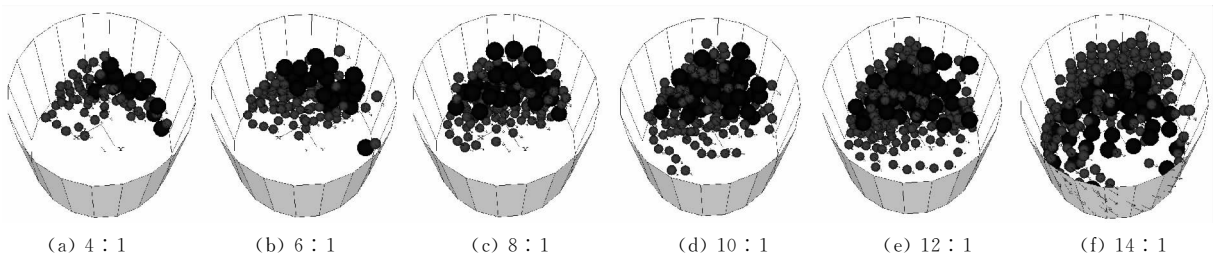


图 5 不同球料比的球磨罐内部运动仿真图

Figure 5 Motion simulation in the ball milling tank under different ball material ratio

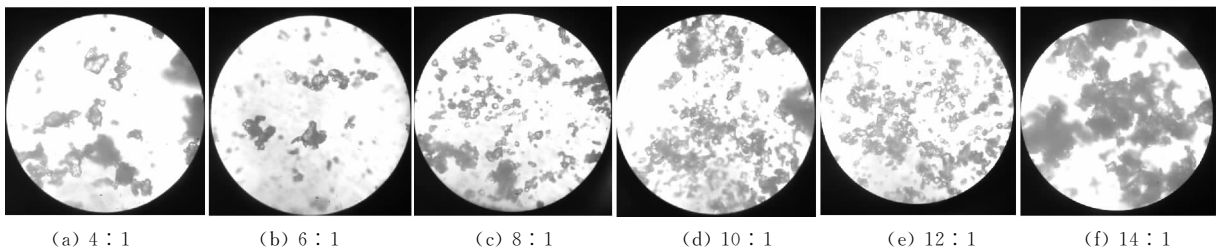


图 6 不同中小球数比的三七超微粉碎后的显微图像

Figure 6 Optical microscopic images of particle size for notoginseng under different mass ratio of balls ($\times 400$)

2.3 转速对球磨过程的影响

QM-3SP2 行星式球磨机运行时的公转和自转具有恒定的传动比,为 1 : 2。针对自转转速进行单因素试验仿真,确定球料比为 8 : 1($m : m$),中小球个数为 1 : 4,自转转速分

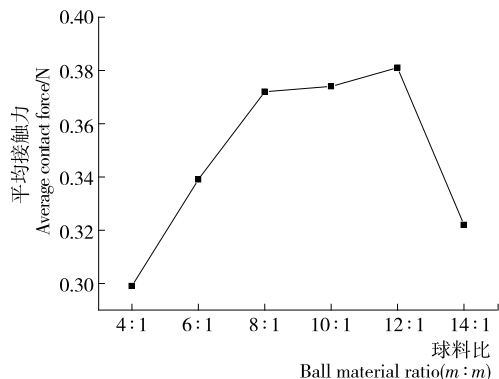


图 7 不同球料比的平均接触力图

Figure 7 The average contact force between balls under different ball material ratio

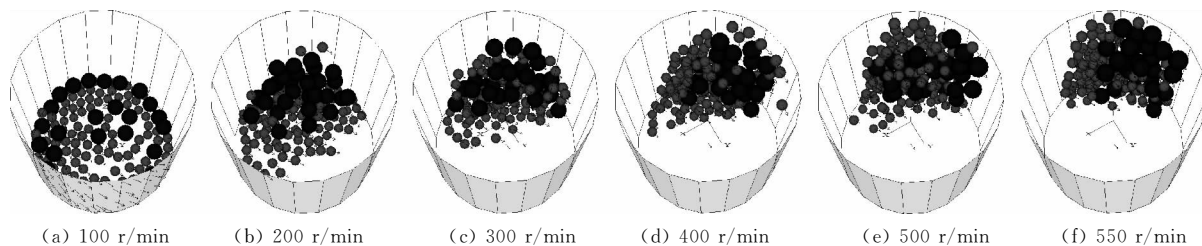


图 8 不同转速的球磨罐内部运动仿真图

Figure 8 Motion simulation in the ball milling tank under different rotation speed

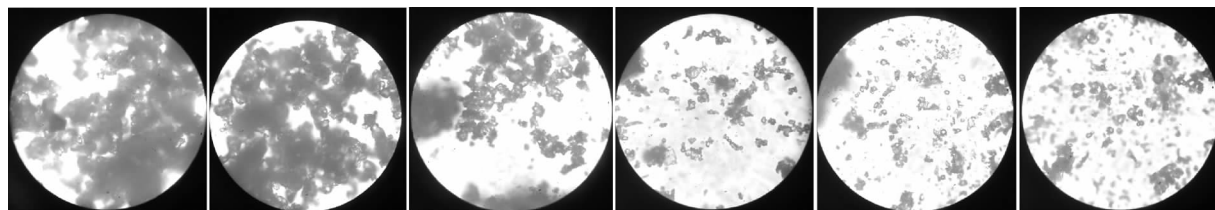


图 9 不同转速的三七超微粉碎后的显微结构

Figure 9 Optical microscopic images of particle size for notoginseng under different rotation speed($\times 400$)

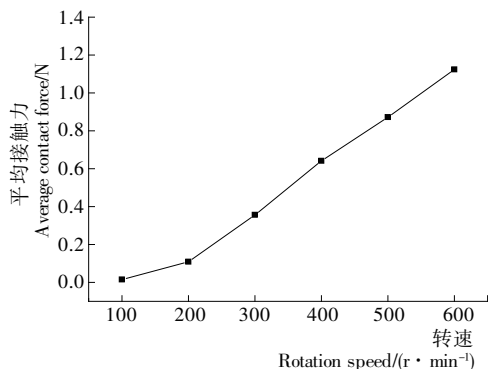


图 10 不同转速的平均接触力图

Figure 10 The average contact force between balls under different rotation speed

别为 100,200,300,400,500,550 r/min。球磨罐内部运动模拟轨道见图 8。在转速较低时,球体介质基本在罐体底部滑动,不能带动研磨的三七介质上升至一定高度,球体介质运动情况不剧烈,不利于三七粉碎;随着转速的提高,介质被提升到内壁更高的位置,同时更为贴近内壁,与内壁碰撞的几率增大,更有利于三七粉碎。

图 9 为不同转速的三七粉碎后的显微结构。随着转速增大,小颗粒逐渐增多,细胞组织结构被破坏。相对应的球体之间平均接触力变化规律见图 10。由图 10 可知,转速越高,越有利于介质获得更高的接触力去粉碎三七物料。但是过高的转速,一方面容易使研磨介质产生离心运动,导致其贴合在球磨罐壁随磨机做圆周运动,不利于球体介质的均匀混合,未能有效冲击三七粉末。另一方面使得球磨机和球磨罐体温度过高,导致三七粉末出现与罐壁粘团结块,烧焦损耗等现象,部分粉体出现团聚现象。当转速大于 400 r/min,粉体粒径开始有所增大,表明部分三七粉体出现团聚现象^[10]。因此,转速控制在 300~500 r/min 为宜。

综上所述,由于介质的能量是由球磨机罐体对介质做功产生的,而物料的粉碎主要是由介质对物料的冲击碰撞以及相互之间的摩擦作用引起的,所以平均接触力可以判断磨筒内钢球的运动状态,理论预测出最适宜粉磨的球体运动状态。根据上述对不同因素下的仿真运动图像和平均接触力大小的分析,取优选的水平所对应的平均接触力值,为中小球比 0.371 N,球料比 0.372 N,转速 0.872 N,可分析得影响三七研磨粒度的关键因素为转速 > 球料比 > 中小球比。并结合单因素试验结果分析,对应最佳水平为转速 500 r/min,球料比 8 : 1($m : m$),中小球比 1 : 4。

3 结论

本试验采用 PFC3D 软件模拟仿真及单因素试验相结合
(下转第 99 页)

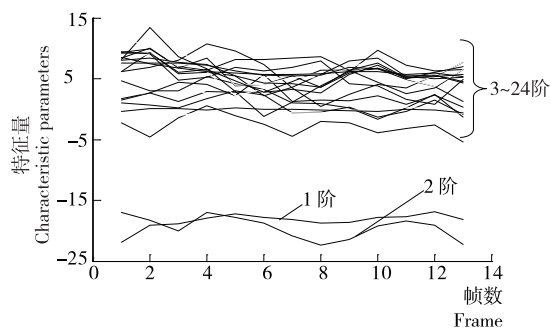


图8 开口榛子撞击声的MFCC特征参数

Figure 8 MFCC parameters of crack hazelnuts

断简单易行,识别率可达80%左右,但识别精度有待于进一步提高;撞击声信号的频谱特征明显,闭口榛子撞击声能量集中在5~8 kHz,开口榛子撞击声能量在全频段趋于分散,因为果形差异和开口长度与方向变化,难以以某固定频率的声压能量差异区分榛子开、闭口状态;对撞击声信号提取MFCC特征参数,也不能直接应用于榛子开、闭口状态的辨识,需要应用特定统计模型或是人工神经网络,进行数据训练和模型识别,这些工作将在后续的研究中展开。

参考文献

- [1] 罗青红, 史彦江, 宋锋惠, 等. 不同产地杂交榛果实品质比较分析[J]. 食品科学, 2013, 34(3): 50-54.
- [2] Pearson T C. Detection of pistachio nuts with closed shells using impact acoustics[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(2): 249-253.
- [3] Cetin A Enis, Pearson Tom C, Tewfik Ahmed H. Classification of closed and open shell pistachio nuts using principal component analysis of impact acoustics[C]// Proceedings-IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May, 17-21, 2004, Montreal, CANADA. New York: IEEE, 2004: 677-680.

- [4] Pearson T C, A Enis Cetin, Ahmed H Tewfik, et al. Feasibility of impact-acoustic emissions for detection of damaged wheat kernels[J]. Digital Signal Processing, 2007, 17(3): 617-633.
- [5] Mahmoud Omid. Development of pistachio sorting system using principal component analysis (PCA) assisted artificial neural network (ANN) of impact acoustics[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(10): 7 205-7 212.
- [6] Adel Hosainpour, Mohammad H Komarizade, Asghar Mahmoudi, et al. High speed detection of potato and clod using an acoustic based intelligent system[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(10): 12 101-12 106.
- [7] Buerano J, Zalameda J, Ruiz R S. Microphone system optimization for free fall impact acoustic method in detection of rice kernel damage [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 85(7): 140-148.
- [8] 吴雪. 鸡蛋裂纹损伤检测的声振分析方法研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 10-13.
- [9] 胡红利, 闫洁冰, 邢文奇, 等. 基于撞击声的开心果分拣模型研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 157-160.
- [10] A Enis Cetin, Tom C Pearson, R Akin Sevimli. System for removing shell pieces from hazelnut kernels using impact vibration analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101(11): 11-16.
- [11] 李志忠, 滕光辉. 基于改进 MFCC 的家禽发声特征提取方法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 202-205.
- [12] 胡红利, 闫洁冰, 邢文奇, 等. 基于 MFCC 和 HMM 的气固流型辨识[J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(5): 555-560.
- [13] Mahmoud Omid, Asghar Mahmoudi, Mohammad H Omid. An intelligent system for sorting pistachio nut varieties[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(9): 11 528-11 535.
- [14] Mahmoud Omid. Design of an expert system for sorting pistachio nuts through decision tree and fuzzy logic classifier[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 4 339-4 347.

(上接第95页)

的方法分析球磨机转速、球料比和中小球质量比等球磨因素对球磨介质的运动状态、基本力学特征以及三七粉碎后粒径的影响规律。发现过高的转速、球料比、中小球比会导致球磨罐体的填充率和转速率过大,会对三七粉末粉碎的均匀性与粉碎粒度造成影响,应适当控制;确定影响三七超微粉碎关键因素:转速>球料比>中小球比,对应的最佳水平为转速 500 r/min,球料比 8:1(m:m),中小球比 1:4。仿真和试验分析可为二次回归正交旋转组合试验方案提供因素水平范围。然而,由于此仿真只是单独模拟磨球的运动,并没有考虑三七粉体对磨球运动的影响,因此还需要做进一步的研究。

参考文献

- [1] 孙小玲. 三七的研究进展[J]. 云南中医中药杂志, 2005, 26(6): 44-46.
- [2] 吴雪, 刘斌, 冯涛. 微射流均质机的超微粉碎机理分析[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 65-68.

- [3] 谢怡斐, 田少君, 马燕, 等. 超微粉碎对豆渣功能性质的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 7-11.
- [4] Emden H K, Simsek E, Rickelt S, et al. Review and extension of normal force models for the Discrete Element Method[J]. Powder Technology, 2007, 171(3): 157-173.
- [5] Rajamani R K, Venugopal R. 3D simulation of charge motion in tumbling mills by the discrete element method[J]. Powder Technology, 2001, 115(2): 157-166.
- [6] Cleary P W. Charge behaviour and power consumption in ball mills: sensitivity to mill operating conditions, liner geometry and charge composition[J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, 63(2): 79-114.
- [7] 黄晚清, 陆阳. 应用离散单元法研究散体微观结构[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(1): 69-73.
- [8] 金辉霞, 柏娜, 杨格兰. 转筒内颗粒混合过程的 DEM 仿真研究[J]. 控制工程, 2015, 20(3): 566-570.
- [9] 戚华彪, 周光正, 于福海, 等. 物质混合行为的离散单元法研究[J]. 化学进展, 2015, 27(1): 113-124.
- [10] 李壮哲, 卢伟文, 黄志洪, 等. 药用三七球磨法超微粉碎的试验研究[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2014, 27(2): 1-5.