

基于离散元 EDEM 的米粒破碎特性分析

Analysis of rice grain breakage characteristics based on
discrete element EDEM

刘 程 王旺平 宋少云

LIU Cheng WANG Wang-ping SONG Shao-yun

(武汉轻工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430024)

(School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430024, China)

摘要:目的:优化碾米机碾辊转速,减少碾白过程中米粒的碎米率。方法:利用 SolidWorks 软件建立挤压填充模型,采用 EDEM 软件中颗粒黏结模型建立单粒米粒以及两粒米粒碰撞接触模型,模拟不同含水率的米粒在不同下落速度下的碰撞过程,观察相应米粒碰撞结果。结果:米粒在碰撞过程中有 3 种临界状态,分别是完整米粒、轻微破碎米粒、断裂米粒。在设定的含水率范围内,米粒破碎率随着含水率和碰撞速度的增加而增加;单粒米粒和两粒米粒碰撞模型中完整米粒状态的临界破碎速度相近,分别为 23.5, 22.0 m/s。结论:速度和含水率对米粒破碎形态影响显著,并且在含水率为 10.6% 下,米粒不破碎能承受的最大速度为 22.0 m/s,此时米粒破碎率较小且满足碾白需求。

关键词:离散元; EDEM; 米粒; 破碎特性

Abstract: Objective: The rotational speed of the roller of the rice mill was optimized to reduce the crushing rate of rice grains in the process of whitening. Methods: The extrusion filling model was established by using SolidWorks software, and the collision contact model of single rice grain and two rice grains was established by using the particle bond model in EDEM software. The collision process of rice grains with different moisture content at different falling speeds was simulated, and the collision results of corresponding rice grains were observed. Results: There were three critical states of rice grains in the process of collision, which were intact rice grains, slightly broken rice grains and broken rice grains. Under the set moisture content range, the crushing rate of rice grains increased with the increase of moisture content and collision velocity, and the critical crushing rates of intact rice

grains in the collision model of single grain and two grains were similar, which were 23.5 m/s and 22.0 m/s, respectively. Conclusion: The speed and moisture content have a significant effect on the crushing morphology of rice grains, and when the moisture content is 10.6%, the maximum speed of non-crushing of rice grains is 22.0 m/s, at this time, the crushing rate of rice grains is small and meets the demand of milling.

Keywords: discrete element; EDEM; rice grain; crushing characteristics

碾米机碾白过程中存在米粒与米粒、米粒与碾辊、米粒与米筛之间的碰撞,在碰撞过程中会产生碎米,米粒破碎率是评价碾米机碾白效果的重要指标之一。有关米粒破碎特性的研究已有大量报道,如周显青等^[1]研究表明,糙米的品质对其力学特性及加工质量有较大的影响;吴中华等^[2]研究了含水率和温度对糙米籽粒压缩破裂载荷的影响,结果表明破裂载荷随温度升高而下降,随含水率下降而增大,且含水率对破裂载荷的影响更为显著;李毅念等^[3]分别以糙米的腹部、背部作为承压面,对糙米的 3 点弯曲破碎力学性能进行了测试,研究发现腹部的断裂能小于背部;冯帅博^[4]利用自制撞击力试验平台对不同含水率、不同品种的糙米进行撞击试验,分析了糙米的撞击力学特性,最终得知糙米撞击动量与撞击力、含水率有关且影响糙米撞击力因子的主次顺序为撞击动量、含水率、品种;Mohapatra 等^[5]研究了 3 种籼稻的物理、化学和力学性能,并对糙米进行不同程度的碾磨,采用碾磨系数和磨损指数表示糙米品质。

此外也有学者对碾米加工时米粒破碎原因进行了研究,如:崔帆等^[6]研究结果表明挤压破碎是碾白过程中糙米破碎的主要原因;张强等^[7]利用离散元 EDEM 进行了碾白室运动过程的模拟并对米粒破碎原因进行了分析,结果表明米筛形状、碾筋个数及碾辊直径都对米粒破碎率有显著影响;贾富国等^[8]对不同含水率的糙米进行碾

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(编号: B2020058)

作者简介:刘程,男,武汉轻工大学在读硕士研究生。

通信作者:王旺平(1979—),男,武汉轻工大学副教授,博士。

E-mail: wwp@whpu.edu.cn

收稿日期:2021-12-15 **改回日期:**2022-04-15

米加工试验,研究糙米的含水率对精米率、碾米加工的能量耗、裂纹率及碎米率的影响规律。

上述研究大多是对糙米的力学特性的分析,以及结合米粒整机碾白表现对米粒破碎进行的分析,缺乏碾白过程中对米粒与各部件以及米粒与米粒间碰撞的深入研究。研究拟结合离散元法,利用 EDEM 软件对不同含水率、不同速度下的单粒米粒以及两粒米粒碰撞进行仿真,分析米粒碰撞时的碰撞破碎特性,以期为碾米机碾辊转速优化提供理论依据,减少碾白过程中米粒的碎米率。

1 米粒离散元接触力学模型

EDEM 是一种离散元素法建模软件,可用于模拟和分析颗粒处理及生产操作过程,快速创建颗粒实体的参数化模型,EDEM 软件已逐步应用于农业工程中,如谷物清选、干燥及输送等^[9]。颗粒黏结模型(Bonded Particle Model)属于 EDEM 中一种基础模型,其原理是利用理想的弹性黏结键对基本粒子进行黏结,形成一个可破碎的聚合体。基本粒子间的黏结键可因拉伸、剪切、压缩等外部载荷的作用发生形变,从而达到模拟破碎的效果。

1.1 创建米粒离散元模型

依次选取含水率为 10.6%,11.7%,13.9%,15.4% 的糙米样品。建模时将米粒简化为椭球体,用长轴短轴的长度区分米粒的尺寸大小。然而现实中米粒的宽(W)与厚(T)并不相等,如图 1 所示。因此,设米粒长为 L,短轴为宽(W)与厚(T)之和的 1/2,即 $(W+T)/2$ 。最终得到长轴为 6.6 mm,短轴为 2.2 mm 的近似椭球体来模拟真实米粒^[10]。

EDEM 中米粒模型构建过程如图 2 所示:先用 SolidWorks 建立一个挤压填充模型^[11],向其中填充椭球体,再通过 EDEM 仿真挤压成型。填充椭球体的物理半径 0.22 mm,颗粒间接触半径 0.264 mm(图 3)。当黏结的颗粒距离小于 0.264 mm 时颗粒间就会形成黏结键。在几何体内部生成颗粒填充物后,将生成后的颗粒通过椭球几何体上半部挤压向下运动,得到如图 2(b)所示完整椭球体。利用 EDEM 中 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型在椭球聚集体中的球颗粒间引入平行黏结键,即可形成用于模拟的可破碎米粒的椭球聚集体,如图 2(c)所示。最终形成的带有黏结键的米粒模型(图 4)。模型中颗粒颜色从蓝色到红色变化,代表键受力由小到大。图 4 为新建的米粒模型,此时颗粒受力最小,显示为蓝色。

两粒米粒碰撞模型建立过程同上,只需增加一组挤

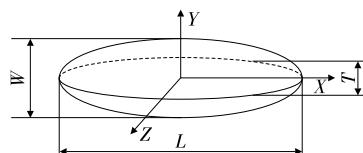


图 1 米粒简化椭球体模型

Figure 1 Simplified ellipsoidal model of rice grain

压几何体模型,两组同时进行,如图 5 所示。

1.2 离散元仿真参数标定

当利用 EDEM 中 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型对不同含水率的单粒米冲击破碎过程进行模拟时,还需确定除基本颗粒物性参数(泊松比、剪切模量和密度)和接触参数(恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数)以外的黏结参数,包括弹性黏结键单位面积法向和切向刚度、临界法向和切向应力以及黏结键截面半径等。目前黏结参数通过单轴压缩、三轴压缩、巴西盘劈裂等常规力学试验获取。所建模型的黏结参数以及球颗粒间静摩擦系数见表 1^[12]。

2 米粒碰撞仿真过程与结果

2.1 单粒米粒碰撞仿真

对相同含水率的单粒米粒设定不同的碰撞速度进行

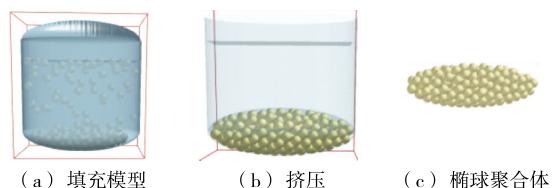


图 2 EDEM 中米粒模型构建过程

Figure 2 Establishment of a single ellipsoidal polymer

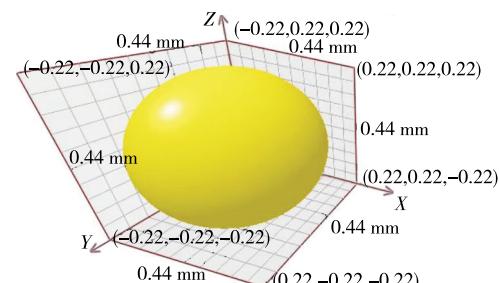


图 3 填充颗粒模型图

Figure 3 Scheme of the filled particle



图 4 椭球聚集体离散元模型

Figure 4 Discrete element model of ellipsoidal polymer

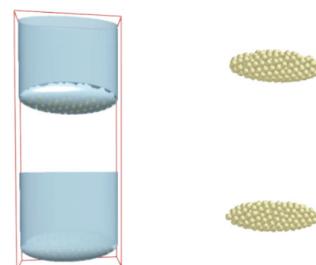


图 5 两粒米粒离散元接触模型

Figure 5 Discrete element contact model of two rice grains

碰撞仿真,碰撞结果见表 2,仿集中出现的 4 种米粒碰撞状态分别为米粒完整、米粒基本完整、米粒轻微断裂、米粒断裂。由表 2 可知,当含水率固定时,米粒破碎率随米粒碰撞速度的增加而升高;黏结键断裂个数也随之增加,米粒状态也发生了变化。当速度为 15.0~22 m/s 时,米粒完整且无连接键被破坏,模型见图 6;当速度为 22.5~23.5 m/s 时,米粒轻微碎裂,部分连接键被破坏,填充颗粒部分脱落,模型见图 7;当速度为 24.0~27.5 m/s 时,米粒断裂,中间连接键断裂,模型见图 8。因此,米粒破碎状态可分为完整米粒、轻微破碎米粒、断裂米粒 3 种状态。

根据米粒破碎状态可反向推导出不同含水率的单粒米粒临界破碎速度。由图 9 可知,米粒破碎临界速度随含水率增加而降低。含水率 10.6% 的完整米粒能承受的最大临界破碎速度为 23.5 m/s,含水率 13.9% 的轻微破

表 1 弹性黏结键参数

Table 1 Parameters for elastic connection keys

米粒含 水率/%	单位面积法向刚 度 $\bar{k}_n/(N \cdot m^{-3})$	单位面积切向刚 度 $\bar{k}_s/(N \cdot m^{-3})$	临界法向强度 $\bar{\sigma}_n^{\max}/(N \cdot m^{-2})$	临界切向强度 $\bar{\sigma}_s^{\max}/(N \cdot m^{-3})$	黏结键截面 半径 R_B/mm	颗粒间摩擦 系数 $\mu_{r,c}$	剪切模量 G/Pa	接触半径 R_c/mm
10.6	1.00×10^{13}	1.00×10^{13}	2.30×10^7	2.30×10^7	0.22	0.5	2.02×10^8	0.264
11.7	1.33×10^{14}	1.33×10^{14}	2.17×10^7	2.17×10^7	0.22	0.4	1.86×10^8	0.264
13.9	2.50×10^{14}	2.50×10^{14}	1.70×10^7	1.70×10^7	0.22	0.3	1.62×10^8	0.264
15.4	2.50×10^{14}	2.50×10^{14}	1.40×10^7	1.40×10^7	0.22	0.2	1.36×10^8	0.264

表 2 不同含水率单粒米粒在不同速度下的碰撞结果

Table 2 Collision results of single rice grain with different moisture content

含水率 10.6%				含水率 11.7%			
速度/(m · s ⁻¹)	破碎键个数	米粒破碎率/%	米粒状态	速度/(m · s ⁻¹)	破碎键个数	米粒破碎率/%	米粒状态
17.5	0	0.0	米粒完整	22.0	0	0.0	米粒完整
18.0~23.5	1~2	0.1~0.3	米粒基本完整	22.5	3	0.4	米粒基本完整
24.0	44	5.2	米粒轻微断裂	23.0~23.5	49~58	5.8	米粒轻微断裂
24.5	57	6.8	米粒断裂	24.0	103	12.2	米粒断裂

含水率 13.9%				含水率 15.4%			
速度/(m · s ⁻¹)	破碎键个数	米粒破碎率/%	米粒状态	速度/(m · s ⁻¹)	破碎键个数	米粒破碎率/%	米粒状态
17.0	0	0.0	米粒完整	15.0	0	0.0	米粒完整
17.5	2	0.2	米粒基本完整	16.0	5	0.6	米粒基本完整
18.0~27.5	42~109	5.0~12.9	米粒轻微断裂	17.0~23.0	41~110	4.9~13.0	米粒轻微断裂
28.0	151	17.9	米粒断裂	24.0	145	17.2	米粒断裂

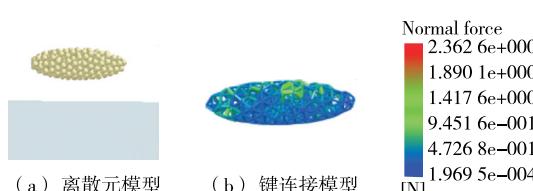


图 6 单粒米粒碰撞后完整米粒模型图

Figure 6 Model of intact rice grains after single rice grain collision

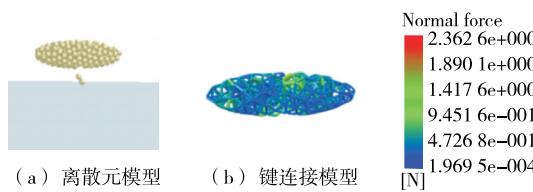


图 7 单粒米粒碰撞后轻微破碎米粒模型图

Figure 7 Model of slightly damaged rice grains after single rice grain collision

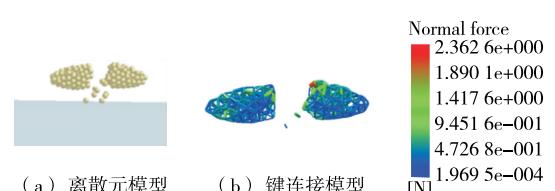


图 8 单粒米粒碰撞后断裂米粒模型图

Figure 8 Model of splitted rice grains after single rice grain collision

碎米粒能承受的最大临界破碎速度为 27.5 m/s。因此,不同含水率对米粒破碎速度有着直接影响且存在一个最优含水率对米粒破碎影响最小。

2.2 两粒米粒碰撞仿真

对相同含水率的两粒米粒设定不同的碰撞速度然后进行碰撞仿真,碰撞结果见表 3,仿集中出现的 4 种米粒碰撞状态分别为① 两粒米粒完整;② 米粒基本完整,下方米粒下部轻微破碎;③ 米粒基本完整,下方米粒上下部

位皆轻微破碎;④下端米粒断裂。由表 3 可知,含水率固定时,米粒破碎率随米粒碰撞速度的增加而升高,黏结键断裂个数也随之增加,米粒状态也发生了变化。

当速度为 13.0~22.0 m/s 时,两粒米粒完整且无黏结键被破坏,模型见图 10;当速度为 21~28 m/s 时,米粒基本完整,下方米粒和碰撞台接触部位轻微破碎,15 个黏结键被破坏,模型见图 11;当速度为 29~43 m/s 时,米粒基本完整,下方米粒上下部位皆轻微破碎,60~77 个黏结键被破坏,模型见图 12;当速度达到 44 m/s 时,米粒断裂,中间黏结键断裂,模型见图 13。因此,米粒状态可分为米粒完整、底部米粒下方轻微破碎或上下方皆轻微破碎、底部米粒断裂 3 种临界破碎形态。

根据米粒破碎状态可反向推导出不同含水率的两粒

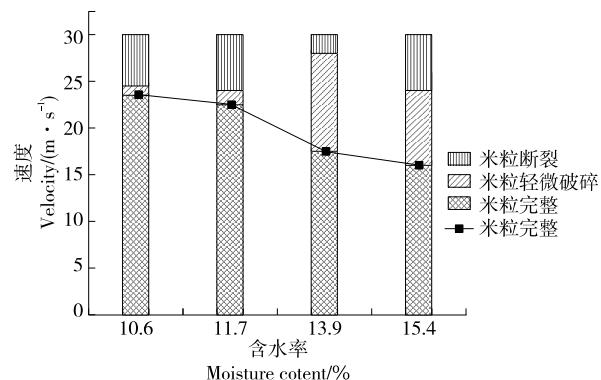


图 9 单粒米粒在不同含水率下临界破碎速度

Figure 9 Critical crushing velocity of single rice grain with different moisture content

表 3 不同含水率两粒米粒在不同速度下的碰撞结果[†]

Table 3 Collision results of double rice grains with different moisture content

含水率 10.6%				含水率 11.7%			
速度/(m·s⁻¹)	破碎键个数	米粒破碎率/%	米粒状态	速度/(m·s⁻¹)	破碎键个数	米粒破碎率/%	米粒状态
22.0	0	0.0	①	20.0	0	0.0	①
23.0~31.0	21~35	2.6~4.3	②	21.0~28.0	15~41	1.9~5.1	②
29.0~43.0	70~115	8.7~14.3	③	29.0~43.0	60~77	7.4~9.5	③
47.0	148	18.3	④	44.0	121	15.0	④
含水率 13.9%				含水率 15.4%			
速度/(m·s⁻¹)	破碎键个数	米粒破碎率/%	米粒状态	速度/(m·s⁻¹)	破碎键个数	米粒破碎率/%	米粒状态
16.0	0	0.0	①	13.0	0	0.0	①
17.0~20.0	21~31	2.6~3.8	②	14.0~17.0	21~28	2.6~3.5	②
21.0~30.0	51~66	6.3~8.2	③	18.0~27.0	51~73	6.3~9.0	③
31.0	148	18.3	④	28.0	127	15.7	④

[†] ①. 两粒米粒完整;②. 米粒基本完整,下方米粒下部轻微破碎;③. 米粒基本完整,下方米粒上下部位皆轻微破碎;④. 下端米粒断裂。

米粒临界破碎速度。由图 14 可知,两粒米粒与单粒米粒碰撞相似,也存在一个最优含水率,使米粒完整和不断裂时能承受较大的速度。两粒米粒碰撞下,米粒完整和不断裂时的最优含水率皆为 10.6%,其速度分别为 22, 46 m/s。

综上,含水率 10.6% 的单粒米粒碰撞或两粒米粒碰撞破碎速度相似。米粒完整时,单粒米粒和两粒米粒皆在含水率 10.6% 时临界破碎速度最大,碰撞效果最优,临

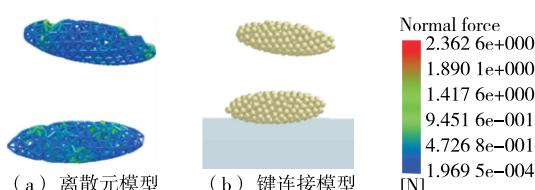


图 10 两粒米粒碰撞后完整米粒模型图

Figure 10 Model of intact rice grains after double rice grains collision

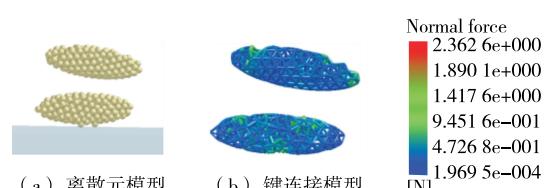


图 11 两粒米粒碰撞后轻微破碎米粒模型图

Figure 11 Model of slightly damaged rice grains after double rice grain collision

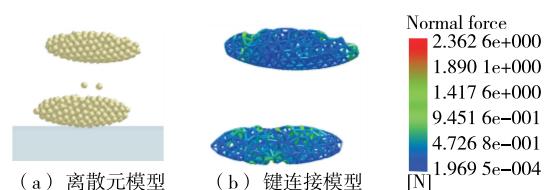


图 12 两粒米粒碰撞后上下部位少量破碎米粒模型图

Figure 12 Model of rice grains with small damages after double rice grains collision

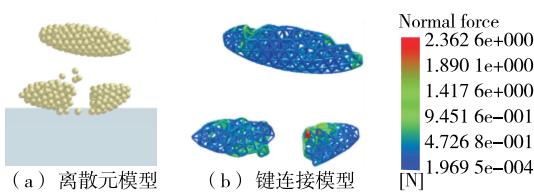


图 13 两粒米粒碰撞后断裂米粒模型图

Figure 13 Model of splitted rice grains after double rice grains collision

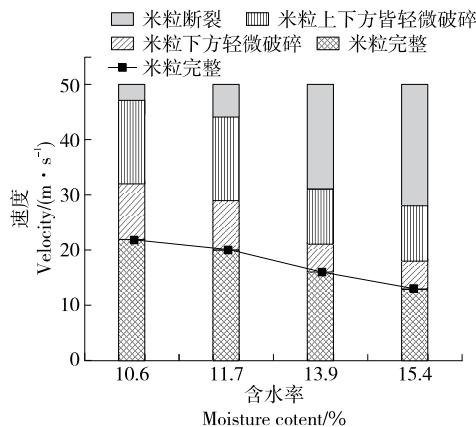


图 14 两粒米粒在不同含水率下的临界速度

Figure 14 Critical crushing velocity of single rice grain with different moisture content

界速度分别为 23.5, 22.0 m/s。含水率对米粒破碎具有较大影响,且在设定的范围内,含水率越高,米粒越容易破碎。

3 结论

运用 SolidWorks 建立米粒挤压模型,以含水率、碰撞速度为变量,利用 EDEM 中颗粒黏结模型对单粒米粒和两粒米粒进行碰撞仿真,结果表明单粒米粒碰撞断裂速度远小于两粒米粒碰撞断裂速度,不同速度对米粒破碎有着显著影响;不同含水率的米粒临界破碎速度不同,含水率对米粒破碎率影响显著,含水率越高,米粒越容易破碎。综上,存在一个最优含水率对米粒破碎率影响最小。但含水率设定相对较少,且梯度相对较大,后续需对更多不同含水率的米粒黏结键参数进行测定,寻找最优含水率和米粒不破碎所能承受的最大碰撞速度,从而对碾米机碾辊速度进一步优化,减少碾白过程中米粒的碎米率。

参考文献

- [1] 周显青, 张玉荣, 褚洪强, 等. 糜米机械破碎力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 255-262.
- [2] 吴中华, 王珊珊, 董晓林, 等. 不同温度及含水率稻米籽粒加工过程破裂载荷分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 278-283.
WU Z H, WANG S S, DONG X L, et al. Analysis of rice compression fracture load in processes with various temperatures and moisture content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 278-283.
- [3] 李毅念, 徐小琴, 丁为民. 糜米三点弯曲破碎力学性能试验分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 121-124, 130.
LI Y N, XU X Q, DING W M. Experiment analysis on three-point bending breaking force of brown rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 121-124, 130.
- [4] 冯帅博. 糜米的动态力学破碎研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020: 10-12.
FENG S B. Study on dynamic mechanical breaking of brown rice[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020: 10-12.
- [5] MOHAPATRA D, BAL S. Physical properties of indica rice in relation to some novel mechanical properties indicating grain characteristics[J]. Food & Bioprocess Technology, 2012, 5(6): 2 111-2 119.
- [6] 崔帆. 糜米碾白破碎机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019: 5-6.
CUI F. Study on white crushing mechanism of brown rice[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019: 5-6.
- [7] 张强, 廖敏, 杨亚军, 等. 糜米的碾白过程模拟及破碎影响分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14 969-14 975.
ZHANG Q, LIAO M, YANG Y J, et al. Simulation of grinding process and analysis of crushing effect of brown Rice[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14 969-14 975.
- [8] 曹宪周, 张超, 房凯文, 等. 糜米碰撞过程试验及仿真分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 80-83, 90.
CAO X Z, ZHANG C, FANG K W, et al. Experiment and simulation analysis of brown rice collision process [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 80-83, 90.
- [9] 庞晓霞, 阮竞兰. 基于离散元法砂辊碾米机碾白室内物料运动仿真[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 106-108.
PANG X X, RUAN J L. Motion simulation on materials inside whitening chamber of sand-roller rice machine based on discrete element method[J]. Food & Machinery, 2016, 32(4): 106-108.
- [10] MARKAUSKAS D, KACIANAUSKAS R. Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance[J]. Granular Matter, 2011, 13(2): 143-148.
- [11] 王秉. 基于 DEM 离散元技术的玉米直线振动筛仿真分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 89-92.
WANG B. Analysis and simulation of corn vibration screen based on DEM[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 89-92.
- [12] 曾勇. 横式碾米机内米粒碾白机理及破碎特性[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 7-9.
ZENG Y. Study on the whitening mechanism and the breakage characteristics of rice grains in a horizontal friction type mill[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019: 7-9.