

基于离散元的茶叶抖筛机茶叶运动特性分析与试验

王小勇^{1,2} 朱珺语^{1,2} 张德^{1,2} 余志^{1,2} 倪德江^{1,2}

(1. 华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070; 2. 果蔬园艺作物种质创新与利用全国重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 为了降低茶叶抖筛机的误筛率,从颗粒动力学角度研究了筛面倾角、振动幅度、振动频率对茶叶颗粒在抖筛机筛网上运动特性的影响。结合离散元方法对茶叶颗粒在筛面的运动进行数值模拟,通过分析茶叶颗粒的筛分过程,明晰了抖筛过程中筛上茶叶颗粒的运移机理。结果表明:茶叶颗粒主要集中在筛网中间,频率太大或者太小都会造成茶叶颗粒在筛网上的横向偏析;茶叶颗粒在筛网上的平均速度、旋转动能与振幅、频率呈正相关,筛面倾角对茶叶颗粒在筛网上的平均速度、旋转动能影响较小,茶叶颗粒沿 X 轴方向和 Z 轴方向速度对茶叶颗粒在筛网上的平均速度贡献最大;迁移系数的变化幅度随着筛面倾角、振动幅度、振动频率的增加而呈现逐渐增加的趋势,对茶叶抖筛过程颗粒迁移能力影响由大到小为:振动幅度、振动频率、筛面倾角;当振动幅度为22.5 mm、筛面倾角为3°、振动频率为4.166 Hz时,茶叶抖筛试验误筛率最小,茶叶抖筛试验误筛率结果与仿真试验结果相差在5个百分点以内,表明DEM模拟具有较高的准确性。

关键词: 茶叶; 抖筛机; 离散元; 运动特性; 速度分布

中图分类号: S226.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0109-13

OSID:



Kinematic Characteristic Analysis and Test of Tea in Tea Vibrating-sifting Machine Based on DEM

WANG Xiaoyong^{1,2} ZHU Junyu^{1,2} ZHANG De^{1,2} YU Zhi^{1,2} NI Dejiang^{1,2}

(1. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. National Key Laboratory for Germplasm Innovation and Utilization of Horticultural Crops, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to reduce the error-sifting rate of the tea vibrating-sifting machine, the effects of inclination angle, vibration amplitude, and vibration frequency on the motion characteristics of tea particles on the sieve were studied from the perspective of particle dynamics. By combining the discrete element method to numerically simulate the movement of tea particles on the sieve surface, and analyzing the vibrating-sifting process of tea particles, the transport mechanism of tea particles on the sieve during the vibrating-sifting process was clarified. The results showed that tea particles were mainly concentrated in the middle of the sieve, and too high or too low frequency could cause horizontal segregation of tea particles on the sieve. The average velocity and rotational kinetic energy of tea particles on the sieve were gradually increased with the increase of amplitude and frequency. The inclination angle had little effect on the average velocity and rotational kinetic energy of tea particles on the sieve. The velocity of tea particles along the X -axis and Z -axis contributes the most to the average velocity of tea particles on the sieve. The variation amplitude of the migration coefficient was gradually increased with the increase of inclination angle, vibration amplitude, and vibration frequency. The order of influence of different parameters on the particle migration ability of tea vibrating-sifting process was as follows: amplitude, frequency, and inclination angle. When the vibration amplitude was 22.5 mm, the inclination angle was 3°, and the vibration frequency was 4.166 Hz, the error-sifting rate of the tea vibrating-sifting test was the smallest. The error between error-sifting rate results of the tea vibrating-sifting test and the simulation test results was within 5 percentages, indicating that the DEM simulation had high accuracy. The research result had important reference value for reducing the error-sifting rate of the tea vibrating-sifting machine.

Key words: tea; vibrating-sifting machine; DEM; motion characteristics; velocity distribution

收稿日期: 2023-05-23 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1000401)

作者简介: 王小勇(1992—),男,博士生,主要从事茶叶加工机械研究, E-mail: xiaoyongw@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 倪德江(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事茶叶加工与功能化学研究, E-mail: nidj@mail.hzau.edu.cn

0 引言

茶叶抖筛是毛茶精制加工过程重要工序,抖筛效果直接关系到茶叶的质量。茶叶抖筛是通过筛床运动让茶叶在筛网上做跳跃、前进、碰撞、抛体等多种运动,茶叶以不同方式通过筛网,最后按照茶叶的外形特征(长短、粗细、大小)进行分门别类。良好的抖筛效果可使毛茶通过筛网后茶叶外形整齐划一。如何降低误筛率则是茶叶抖筛研究的重点。

目前对茶叶抖筛的研究还比较少,相关类似抖筛的研究集中在作物以及矿业领域。为了提高筛分效率,有通过三平移并联机构^[1]、单自由度一平移两转动并联机构^[2]、三移动两转动机构^[3]等新型传动结构来实现筛分效率的提升;有通过蚁群算法^[4]、布谷鸟寻优算法^[5]等算法对设备倾斜角、振动方向角、曲柄半径等关键参数进行优化来提高筛分效率;还有一些研究学者通过分析颗粒在筛床上的运动来分析筛床的筛分性能。如 MA 等^[6-7]采用离散元方法模拟了颗粒在变振幅筛的分散与迁移, FENG 等^[8]模拟了玉米颗粒在清选装置中筛面上的运动规律;李耀明等^[9]基于平均偏移算法使用高速相机系统对颗粒进行染色并跟踪颗粒流动,研究了玉米混合物在仿生筛上的迁移机理。还有一些研究学者通过改变筛网的结构来改变颗粒的透筛性能,比如仿生筛^[10]、蚯蚓筛^[11-12]等;还有学者研究了筛孔的形状对颗粒分离和流动的影响^[13]。上述研究大多集中在如何提高物料筛分效率的角度上,而没有从降低误筛率的角度出发。经过加工后的毛茶外形并非规则的球形,大部分呈现椭圆状卷曲和 U 型状卷曲的外形,这种外形特点导致茶叶在筛网上的运动特性是一种复杂的动态行为,这种行为会严重影响茶叶的误筛率,并且茶叶在筛分过程中容易出现筛孔堵塞、茶叶挂网等现象。考虑到目前对于茶叶颗粒在筛网上的运动特性研究较少,且现有的筛分理论分析与模型并不适用于茶叶抖筛过程分析,因此探究茶叶颗粒在筛网上的运动行为对减少堵塞挂网、降低误筛率具有重要意义。

近年来,随着计算机技术的发展,离散元法已经成为研究颗粒运动的重要分析方法,在茶叶加工生产中得到了广泛的应用,如茶叶鲜叶分级^[14-15]、杀青^[16]、理条^[17]、干燥^[18]、筛分^[19-21]、风选^[22]等。

综上所述,本文通过建立茶叶颗粒与筛网碰撞的动力学模型,分析颗粒撞击筛孔后的行为,并建立茶叶颗粒 DEM 模型,研究不同倾斜角、振动频率和振幅下茶叶颗粒的分布、速度、力和迁移能力等运动特性,以降低茶叶抖筛过程的误筛率。

1 材料与方法

1.1 茶叶颗粒撞击筛孔后动力学分析

茶叶颗粒在筛面上受到筛床往复运动产生的惯性力后会产生沿筛床上下运动、茶叶颗粒离开筛面被抛起运动以及颗粒落到筛孔后的碰撞运动 3 种形式,假设茶叶颗粒质量为 m 、等效半径为 r 、角速度为 ω_1 ,以速度 v_1 与筛床相碰撞,碰撞的角度为 θ_1 ;发生碰撞后,茶叶颗粒以速度 v_2 、角速度 ω_2 离开筛面,反射角为 θ_2 ,以筛面方向为 x 轴,垂直筛面方向为 y 轴建立直角坐标系,茶叶在碰撞的瞬间受到筛面的法向支持力 N ,方向垂直于筛面,以及筛面的摩擦力 f ,方向沿筛面方向向后,整个分析如图 1 所示。

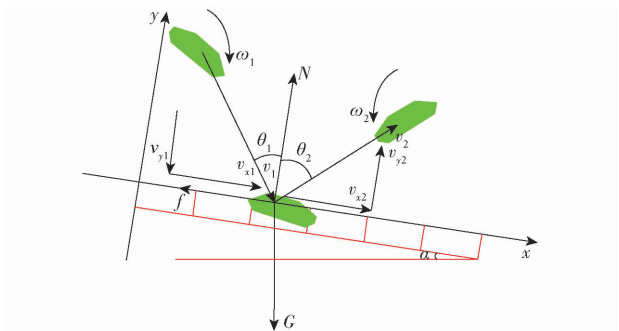


图 1 茶叶颗粒与筛网碰撞示意图
Fig. 1 Diagram of collision between tea and screen

将入射速度 v_1 与反射速度 v_2 分别沿 x 轴、 y 轴方向分解,则可知

$$v_{x1} = v_1 \sin \theta_1 = \frac{2A\pi f_n \sin(2\pi f_n t)}{\cos \alpha} \tag{1}$$

$$v_{y1} = v_1 \cos \theta_1 = \frac{2A\pi f_n \sin(2\pi f_n t)}{\sin \alpha} \tag{2}$$

$$v_{x2} = v_2 \sin \theta_2 \tag{3}$$

$$v_{y2} = v_2 \cos \theta_2 \tag{4}$$

- 式中 A ——茶叶抖筛机筛面振动幅度, m
 α ——筛面倾角, $(^\circ)$
 f_n ——筛面振动频率, Hz
 t ——筛分时间, s
 v_{x1} 、 v_{y1} ——茶叶入射速度 v_1 沿 x 轴、 y 轴方向的速度分量, m/s
 v_{x2} 、 v_{y2} ——茶叶反射速度 v_2 沿 x 轴、 y 轴方向的速度分量, m/s

如图 1 所示,茶叶在碰撞过程中,摩擦力主要作用是减小茶叶沿筛面方向的速度,如果茶叶沿顺时针方向旋转,摩擦力可以增加茶叶角速度;如果茶叶沿逆时针方向旋转,则摩擦力减小茶叶角速度。

根据牛顿第二定律可知,茶叶颗粒在反弹前,在垂直筛面方向和沿着筛面方向的合力可以表示为^[23]

$$f - G\sin\alpha = m \frac{dv_x}{dt} \tag{5}$$

$$N - G\cos\alpha = m \frac{dv_y}{dt} \tag{6}$$

$$(f - G\sin\alpha)r = I \frac{d\omega}{dt} \tag{7}$$

式中 G ——茶叶颗粒重力, N
 ω ——茶叶颗粒角速度, rad/s
 I ——茶叶颗粒通过其质心转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
假设茶叶颗粒为均匀球体, 则

$$I = \frac{2}{5}mr^2 \tag{8}$$

其中 $r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$ (9)

式中 S ——茶叶轮廓面积, mm^2
对式(5)~(7)在时间 t 内进行积分, 得到

$$\int (f - G\sin\alpha) dt = m(v_{x2} - v_{x1}) \tag{10}$$

$$\int (N - G\cos\alpha) dt = m(v_{y2} - v_{y1}) \tag{11}$$

$$r \int (f - G\sin\alpha) dt = I(\omega_2 - \omega_1) \tag{12}$$

茶叶颗粒在反弹前属于滑动, 则摩擦力 f 可以表示为

$$f = \mu N \tag{13}$$

式中 μ ——茶叶与筛面的滑动摩擦因数

则可以得到茶叶颗粒反射速度 v_2 和反射后茶叶颗粒角速度 ω_2 为

$$v_2 = \left[1 - \frac{\mu \left(1 + \frac{v_{y2}}{v_{y1}} \right)}{\tan\theta_1} \right] v_1 \tag{14}$$

$$\omega_2 = \left[1 + \frac{5\mu \left(1 + \frac{v_{y2}}{v_{y1}} \right) v_{x1}}{2r\omega_1 \tan\theta_1} \right] \omega_1 \tag{15}$$

根据碰撞恢复系数 e 的定义, 则式(14)、(15)可以更改为

$$v_2 = \left[1 - \frac{\mu(1+e)}{\tan\theta_1} \right] v_1 \tag{16}$$

$$\omega_2 = \left[1 + \frac{5\mu(1+e)v_{x1}}{2r\omega_1 \tan\theta_1} \right] \omega_1 \tag{17}$$

根据式(1)、(2)、(16)、(17)可知反弹后茶叶颗粒速度 v_2 、角速度 ω_2 都与筛面倾角 α 、筛面振动频率 f_n 、筛面振幅 A 有关。

茶叶下落与筛床碰撞后可以通过上下运动进入筛孔, 也可以通过碰撞后旋转进入筛孔。茶叶在筛分过程中出现筛孔堵塞、茶叶挂网等现象后, 使筛孔的通畅性下降, 应该筛下茶叶没有被筛下, 筛面茶混入筛下茶, 筛面茶筛净率下降, 误筛率增大, 因此研究茶

叶颗粒在发生碰撞后的行为非常必要。根据茶叶颗粒与筛网碰撞位置的不同, 将茶叶颗粒与筛网筛孔边碰撞分为两种情况: 一种是与筛网筛孔边上端相碰撞, 另一种是与筛网筛孔边下端相碰撞。依据茶叶颗粒质心位置的不同, 将茶叶质心位置分为位于碰撞点左侧与右侧两种情况。依据碰撞后茶叶颗粒旋转方向不同将茶叶颗粒旋转方向分为顺时针旋转与逆时针旋转两种情况。根据上述分类情况可知, 茶叶在筛孔边上端相碰会出现 4 种情况, 如图 2 所示, 其中图 2a 为茶叶质心位于碰撞点左侧, 碰撞后顺时针旋转; 图 2b 为茶叶质心位于碰撞点左侧, 碰撞后逆时针旋转; 图 2c 为茶叶质心位于碰撞点右侧, 碰撞后顺时针旋转; 图 2d 为茶叶质心位于碰撞点右侧, 碰撞后逆时针旋转。茶叶在筛孔边下端相碰同样会出现 4 种情况, 如图 3 所示。图 3a 为茶叶质心位于碰撞点左侧, 碰撞后逆时针旋转; 图 3b 为茶叶质心位于碰撞点左侧, 碰撞后顺时针旋转; 图 3c 为茶叶质心位于碰撞点右侧, 碰撞后逆时针旋转; 图 3d 为茶叶质心位于碰撞点右侧, 碰撞后顺时针旋转。

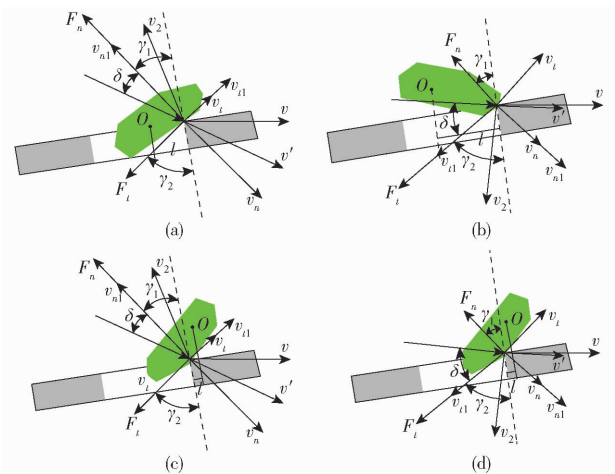


图 2 茶叶在筛孔边上端相碰受力分析
Fig. 2 Force analysis of tea collide at top of sieve

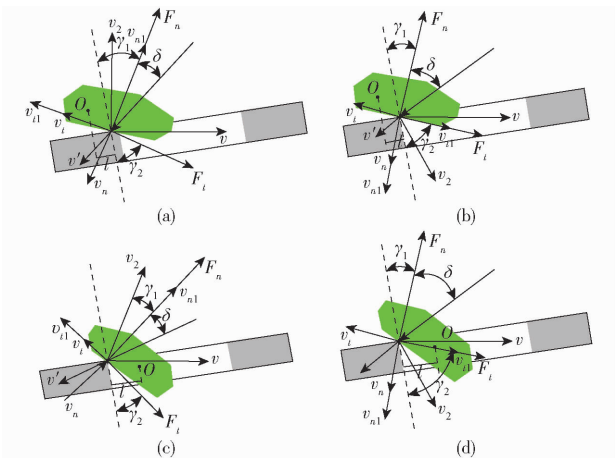


图 3 茶叶在筛孔边下端相碰受力分析
Fig. 3 Force analysis of tea collide at bottom of sieve

通过比较茶叶颗粒与筛床碰撞时法向力与切向力产生的力矩,则可以判断颗粒与筛孔碰撞后的转动状态,根据图 2a 可知

$$M = M_t - M_n = l\sqrt{F_n^2 + F_t^2} \sin \left(\arctan \frac{F_n}{F_t} - \gamma_1 \right) \quad (18)$$

其中 $M_n = F_n l \cos \gamma_1$ (19)

$$M_t = F_t l \cos \gamma_2 \quad (20)$$

式中 M_n 、 M_t ——茶叶受到法向力和切向力相对于茶叶质心产生的力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

M ——茶叶转动总力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

F_n 、 F_t ——茶叶受到的法向力和切向力,N

l ——茶叶碰撞点与茶叶质心沿筛面方向距离, m

 γ_1 ——法向力与轴线的夹角, ($^{\circ}$) γ_2 ——切向力与轴线的夹角, ($^{\circ}$)

通过前面分析可知,反弹后茶叶颗粒角速度与入射角度以及茶叶与筛面的摩擦因数有关,而反弹后茶叶颗粒速度同样与入射角以及茶叶与筛面的摩擦因数有关。当茶叶颗粒处于图 2c、3a 所示状态时,茶叶颗粒与筛床碰撞时茶叶转动的总力矩始终大于 0,故茶叶颗粒经过碰撞后会远离筛网,不利于茶叶通过筛网。当茶叶颗粒处于图 2b、3d 所示状态时,茶叶已经进入筛孔。当茶叶颗粒处在其余 4 种状态时,茶叶颗粒与筛床碰撞时法向力与切向力产生的力矩有可能大于或小于零,一旦茶叶颗粒处于图 2a、3b 状态时,茶叶转动的总力矩大于零,茶叶颗粒碰撞后进入筛孔正上方区域,有利于茶叶穿过筛孔;当茶叶颗粒处于图 2d、3c 状态时,茶叶转动的总力矩小于零,茶叶颗粒碰撞后刚好进入筛网。

1.2 DEM 模型

1.2.1 粒子接触模型

采用 Hertz - Mindlin (no Slip) 模型建立了茶叶颗粒的离散元接触力学模型。茶叶在筛网上颗粒之间碰撞导致颗粒在运动过程中的力、位移和速度发生变化。颗粒之间的接触关系如图 4 所示。

茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间接触,法向接触力和法向阻尼力可以表示为

$$F_n^c = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{2/3} \quad (21)$$

$$F_n^d = -2\sqrt{5/6}\beta\sqrt{S_n m_e v_n^{vel}} \quad (22)$$

式中 F_n^c ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间法向接触力, N

R^* ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间等效
接触半径, m

E^* ——等效弹性模量, Pa

δ_n ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 接触法向重叠量, m

F_n^d ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间法向
阻尼力, N

 S_n ——法向刚度, N/m m_e ——等效质量, g

v_n^{vel} ——相对速度的法向分量, m/s

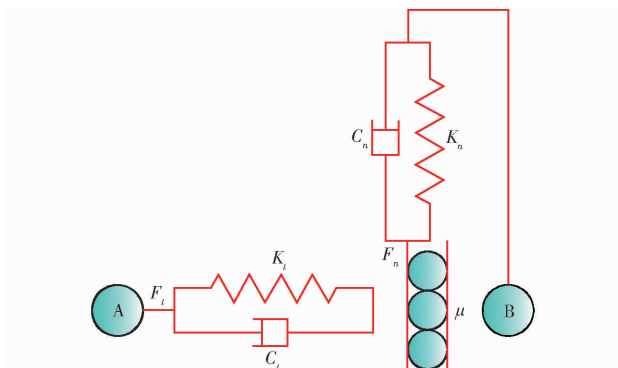
 β ——阻尼系数

Fig. 4 Discrete element mechanical contact model of tea

茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 接触法向重叠量、等效半径计算式为

$$\delta_n = R_1 + R_2 - |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| \quad (23)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (24)$$

式中 R_1 、 R_2 ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 的半径, m

r_1, r_2 ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 的中心位置向量, m

接触半径 a 计算式为

$$a = \sqrt{\delta_n R^*} \quad (25)$$

等效弹性模量 E^* 计算公式为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (26)$$

式中 E_1 、 E_2 ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 弹性模量, Pa

ν_1, ν_2 ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 泊松比
阻尼系数 β 与法向刚度计算式为

阻尼系数 β 与法向刚度计算式为

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (27)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (28)$$

茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间接触,切向接触力和切向阻尼力可以表示为

$$F_t^c = -S_t \delta_t \quad (29)$$

$$F_t^d = -2\sqrt{5/6}\beta \sqrt{S_t m_e v_t^{vel}} \quad (30)$$

式中 F_t^c ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间切向接触力,N
 S_t ——切向刚度,N/m
 δ_t ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 接触切向重叠量,m
 F_t^d ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间切向阻尼力,N
 v_t^{rel} ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间相对速度的切向分量,m/s

切向刚度计算公式为

$$S_t=8G^*\sqrt{R^*\delta_n}$$

(31)

其中

$$G^*=\frac{2-\nu_1^2}{G_1}+\frac{2-\nu_2^2}{G_2}$$

(32)

式中 G^* ——等效剪切模量,Pa
 G_1 、 G_2 ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 的剪切模量,Pa

茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间的摩擦力 f_{AB} 计算公式为

$$f_{AB}=\mu_sF_n^c$$

(33)

式中 μ_s ——茶叶颗粒 A 与茶叶颗粒 B 之间静摩擦因数

滚动摩擦力矩 T_i 计算式为

$$T_i=-\mu_iF_n^cR_i\omega_i$$

(34)

式中 μ_i ——滚动摩擦因数
 R_i ——颗粒质心到接触点的距离,m
 ω_i ——颗粒在接触点处的角速度,rad/s

1.2.2 颗粒模型

试验材料采自安徽省黄山市休宁县山培村,以一芽二叶为主,兼具一芽三叶以及其它茶类夹杂物,根据绿茶加工技术要求经过摊青、杀青、揉捻、定形、辉干,然后按照精制加工经过复火、滚条、圆筛后茶叶作为试验原料。结合试验茶叶物料外形特征,茶叶可以分为椭圆状卷曲颗粒和 U 形状卷曲颗粒,采用 Solidworks 构建椭圆状卷曲颗粒和 U 形状卷曲颗粒几何模型,在 EDEM 中根据茶叶颗粒几何模型轮廓自动填充颗粒,结合模型精度与运算速度,手动对填充颗粒进行修改,确定每个填充球的直径和坐标来满足茶叶颗粒外形,填充球之间通过粘合力粘合。椭圆状卷曲颗粒采用 41 个填充球,U 形状卷曲颗粒采用 46 个填充球进行填充,茶叶颗粒填充模型如图 5 所示。设置茶叶颗粒相关物理参数^[18-22]如表 1 所示,完成茶叶颗粒离散元建模。

为了验证模型的准确性,通过 EDEM 对茶叶颗粒休止角进行模拟,并与实际情况进行对比。圆筒垂直放置在平面上,圆筒材料为钢,圆筒直径为 70 mm,

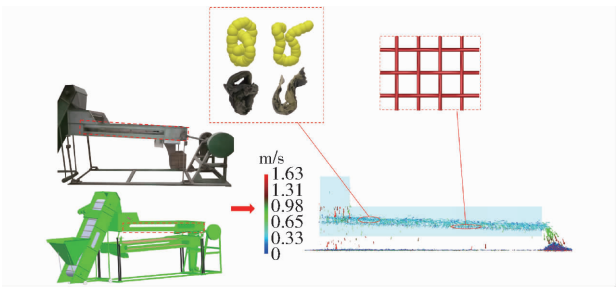


图 5 茶叶抖筛和茶叶颗粒离散元模型
Fig. 5 Tea vibrating-sifting and tea discrete element model

表 1 材料物理参数与接触参数

Tab.1 Parameters and contact parameters of materials physical

参数	数值
茶叶颗粒密度/(kg·m ⁻³)	355
茶叶颗粒泊松比	0.4 ^[21]
茶叶颗粒剪切模量/Pa	2.7×10 ⁶ ^[21]
筛体密度/(kg·m ⁻³)	7 850 ^[21]
筛体泊松比	0.3 ^[21]
筛体剪切模量/Pa	7.8×10 ¹⁰ ^[21]
茶叶-茶叶恢复系数	0.2
茶叶-茶叶静摩擦因数	0.9
茶叶-茶叶滚动摩擦因数	0.1
茶叶-筛体恢复系数	0.3
茶叶-筛体静摩擦因数	0.8
茶叶-筛体滚动摩擦因数	0.1

高度为 240 mm。将一定量的茶叶颗粒放入圆筒中,以速度 0.1 m/s 垂直于平面缓慢抬起圆筒,当茶叶颗粒停止运动时,测量休止角。EDEM 中模拟的操作步骤与实际相同。重复试验 3 次,结果取平均值。为了准确测量休止角,拍摄茶叶颗粒在自然形成的休止角图像,通过 Matlab 软件对图像进行灰度化二值化处理,提取茶叶轮廓图像进行拟合,如图 6 所示。台架试验茶叶休止角为 32.48°,模拟试验茶叶休止角为 30.95°,台架试验与模拟试验茶叶休止角的误差为 4.71%。由于台架试验中茶叶颗粒的形状除了椭圆状卷曲颗粒和 U 形状卷曲颗粒以外,还有其它形状的颗粒,这是产生误差的主要原因。结果表明:在误差允许范围内,茶叶颗粒离散元模型准确有效。这为研究茶叶在筛面上的动态特性提供了基础。

1.2.3 设备模型

采用三维绘图软件 Solidworks 绘制了茶叶抖筛机的三维模型,抖筛机筛网为金属丝编织筛网,采用不锈钢丝编织而成,筛面尺寸为 800 mm×240 mm,筛孔边长为 3 mm,如图 5 所示。筛网模型保存成 igs 格式后进行网格划分导入 EDEM 软件^[24]。颗粒工厂设为 220 mm×100 mm 的长方形,同时动态产

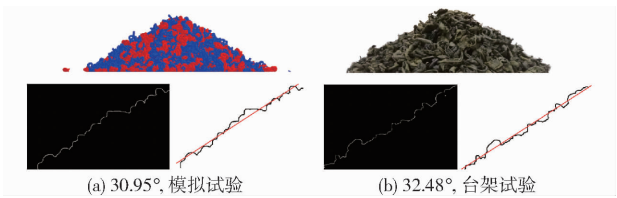


图 6 休止角模拟试验和台架试验对比

Fig. 6 Comparison of natural angle of repose between simulated experiment and bench test

生椭圆状卷曲颗粒和 U 形状卷曲颗粒两种类型的颗粒。颗粒由颗粒工厂以随机的初始位置、随机的初始角度和随机的方向产生,然后落入筛网。颗粒工厂共产生 4 000 个茶叶颗粒,取仿真时间为 5 s,设置茶叶仿真数据保存频率为 0.01 s。仿真网格大小设为最小颗粒半径的 3 倍。

1.3 模拟试验设计

根据茶叶颗粒撞击筛孔后动力学分析,反弹后茶叶颗粒的速度、角速度都与筛面倾角、筛面振动频率、筛面振动幅度有关,因此选取筛面倾角、振动幅度和振动频率作为仿真试验因素(表 2),本研究进行了 3 种因素的单因素模拟,第 1 项研究为当筛面倾角为 3°、振动频率为 4.166 Hz 时,3 个振动幅度(20、22.5、25 mm)对茶叶颗粒运动过程的影响,第 2 项研究为当振动幅度为 22.5 mm、振动频率为 4.166 Hz 时,3 个筛面倾角(2°、3°、4°)对茶叶颗粒运动的影响,第 3 项研究为当振动幅度为 22.5 mm、筛面倾角为 3°时,3 个振动频率(4、4.166、4.333 Hz)对茶叶颗粒运动的影响,其中当振动幅度为 22.5 mm、筛面倾角为 3°、振动频率为 4.166 Hz,重复进行了模拟,因此本研究进行了 7 次仿真。

表 2 因素水平			
Tab. 2 Experimental factors and levels			
水平	因素		
	振动幅度 A/mm	筛面倾角 B/(°)	振动频率 C/Hz
1	20.0	2	4.000
2	22.5	3	4.166
3	25.0	4	4.333

1.4 评价指标

1.4.1 茶叶颗粒筛面分布均匀性系数

将筛网在整个 Y 轴方向划分 10 个区域,为保证筛网上的茶叶颗粒能够落入到其中一个区域,每个区域的最终尺寸为 867 mm × 40 mm × 24 mm(图 7)。通过每个时刻的茶叶在每个区域的颗粒数量来计算茶叶颗粒在筛面上分布的均匀性,其计算公式为^[25]

$$U = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^9 (m_i - \overline{m}_i)^2}{9}} \times 100\% \quad (35)$$

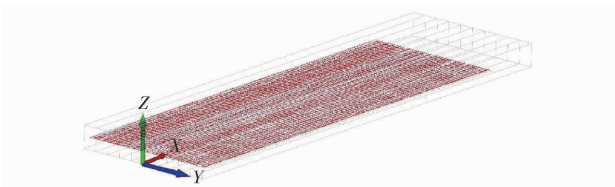


图 7 筛网在 Y 轴方向区域划分示意图

Fig. 7 Diagram of screen grid division in Y-axis direction

式中 U ——茶叶颗粒筛面分布均匀性系数,%
 m_i ——在时刻 t 下筛面第 i 个区域的颗粒数量
 $\overline{m}_i$ ——在时刻 t 下筛面平均每个区域的颗粒数量
 T ——选取筛分时间段,s

1.4.2 茶叶颗粒速度标准差和变异系数

茶叶颗粒速度计算式为

$$\overline{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (36)$$

式中 v_i ——筛分过程中筛网上第 i 个颗粒速度,m/s
 $\overline{v}$ ——筛网上所有颗粒平均速度,m/s
 n ——颗粒数

在时刻 t 下茶叶颗粒筛面上的速度 $\overline{v}(t)$ 可以表示为^[23]

$$\overline{v}(t) = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t \overline{v} \quad (37)$$

则茶叶颗粒平均速度标准差和变异系数表示为^[26]

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^t (\overline{v}_j - \overline{v}(t))^2}{t - 1}} \quad (38)$$

$$c_v = \frac{\sigma}{\overline{v}(t)} \times 100\% \quad (39)$$

式中 σ ——茶叶颗粒平均速度标准差,m/s
 $\overline{v}_j$ ——在筛分时间 t 范围内平均速度,m/s
 c_v ——变异系数,%

1.4.3 迁移系数

采用迁移系数来描述茶叶颗粒在筛面上经过每次抖动后沿筛面方向的迁移位移^[8],计算式为

$$\gamma_x = \frac{|\overline{x}_i - \overline{x}_{i-1}|}{L \cos \alpha} \quad (40)$$

式中 γ_x ——茶叶颗粒沿筛面 x 方向上的迁移系数
 $\overline{x}_i, \overline{x}_{i-1}$ ——第 i 时刻和第 $i-1$ 时刻茶叶颗粒沿筛面 x 方向的平均位移,mm
 L ——筛面长度,mm

1.4.4 茶叶误筛率

茶叶在抖筛过程中总会存在一些不应该透筛的颗粒,而这些颗粒在筛分过程因为碰撞接触导致茶叶颗粒透筛,因此引入误筛率评估筛分效果,计算公式为^[27]

$$\xi_n = \frac{W_a}{W_b} \times 100\%$$

(41)

式中 ξ_n ——误筛率, %
 W_a ——筛下茶叶颗粒中不应该通过筛网茶叶颗粒质量, kg
 W_b ——茶叶在抖筛过程中实际获得的筛下茶叶质量, kg

2 仿真试验结果与分析

2.1 颗粒群运动轨迹

取筛面倾角为 3°、振动频率为 4.166 Hz、振动幅度为 22.5 mm, 仿真得到茶叶抖筛中茶叶颗粒群

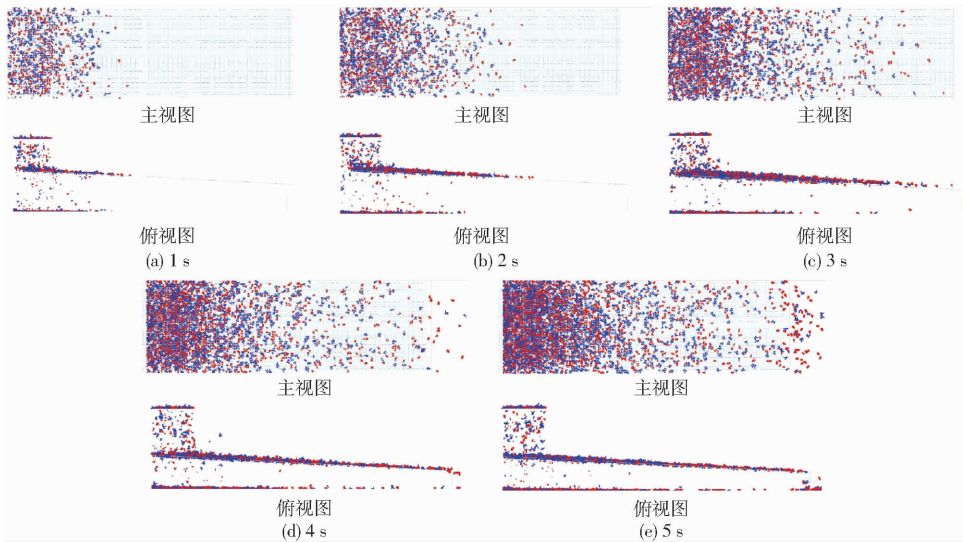


图 8 茶叶抖筛模拟茶叶颗粒群运动截图

Fig. 8 Tea vibrating-sifting simulation of tea group movement screenshot

2.2 茶叶颗粒在筛网上分布均匀性

比较不同振动幅度、筛面倾角、振动频率下茶叶颗粒在筛网上横向的均匀性, 时间区间设置为 4.63 ~ 4.88 s, 计算茶叶颗粒在不同区域里面的数量, 热图如图 9 所示。较多的茶叶颗粒数量采用空白表示, 较少的颗粒数量采用蓝色表示, 居中的颗粒数量采用白色表示。通过整个筛网区域可以看出, 较多的茶叶颗粒集中在筛网中间, 而两侧区域茶叶颗粒较少。如图 9a ~ 9c 所示, 筛面倾角 3° ~ 4° 之间均匀性相差不大, 但明显比筛面倾角 2° 时筛面分布更加均匀。根据式(40) 计算, 筛面倾角为 3° 时, 茶叶颗粒在筛网上分布的均匀性较 2° 提升 8.54%。筛面倾角为 2° 时, 筛网上过多的颗粒集中, 不仅会造成更多的颗粒碰撞导致碎茶, 更会造成误筛率提升。如图 9b、9d、9e 所示, 随着振动幅度的增加, 茶叶颗粒在筛网上的均匀性逐渐增加。振动幅度 22.5 mm 和 25 mm 均匀性较 20 mm 分别提升 7.82% 和 33.06%; 当振动幅度为 20 mm 时, 在筛网中间区域会造成大量颗粒集中; 当振动幅度为 25 mm 时, 筛

的运动轨迹, 如图 8 所示。图中红色为椭圆状卷曲颗粒, 蓝色为 U 形状卷曲颗粒, 通过设置不同的仿真参数, 仿真结果在微观上会存在区别, 但是在整体宏观颗粒群上却呈现一定的规律性。在筛面上靠近进料端的茶叶颗粒数量较多, 靠近出料端的茶叶颗粒数量较少。从图 8 中可以看出, 在 1 ~ 3 s 的运动截图中, 红色椭圆状卷曲颗粒运动在 U 形状卷曲颗粒的前端, 相比 U 形状卷曲颗粒更易下滑。从筛下物中可以看出, 红色椭圆状卷曲颗粒更容易透筛, 颗粒在筛网进料端部分透筛量较多, 在出料端部分透筛量较少。椭圆状卷曲颗粒容易出现堵塞塞孔, U 形状卷曲颗粒则容易出现挂筛。

网上茶叶颗粒数量明显减少, 这是由于筛网振动幅度较大, 茶叶颗粒在筛网上停留的时间较短, 最终会导致误筛率提升。如图 9b、9f、9g 所示, 随着振动频率的逐渐增加, 均匀性同样逐渐增加, 振动频率 4.166 Hz 和 4.333 Hz 均匀性较 4 Hz 分别提升 22.09% 和 26.06%, 振动频率为 4 Hz 和 4.333 Hz 时, 茶叶颗粒在筛网上存在明显的横向偏析现象, 容易造成筛网局部空间颗粒聚集, 不利于颗粒筛分。

2.3 不同因素对茶叶颗粒速度的影响

不同因素下筛面茶叶颗粒的平均速度随时间变化趋势如图 10 所示, 选取茶叶颗粒在筛网上的时间为 4.0 ~ 4.5 s, 茶叶颗粒在筛面上的运动呈现规律性的波动。如图 11a 所示, 筛面倾角的变化对茶叶颗粒在筛网上的速度影响不大, 在 4.0 ~ 4.5 s 之间颗粒的平均速度为 0.38 m/s 左右。随着振动幅度的增大, 茶叶颗粒的平均速度在不断增大, 在 4.0 ~ 4.5 s 之间颗粒的最大平均速度由 0.53 m/s 增加到 0.67 m/s, 这主要是因为振动幅度增加导致茶叶在

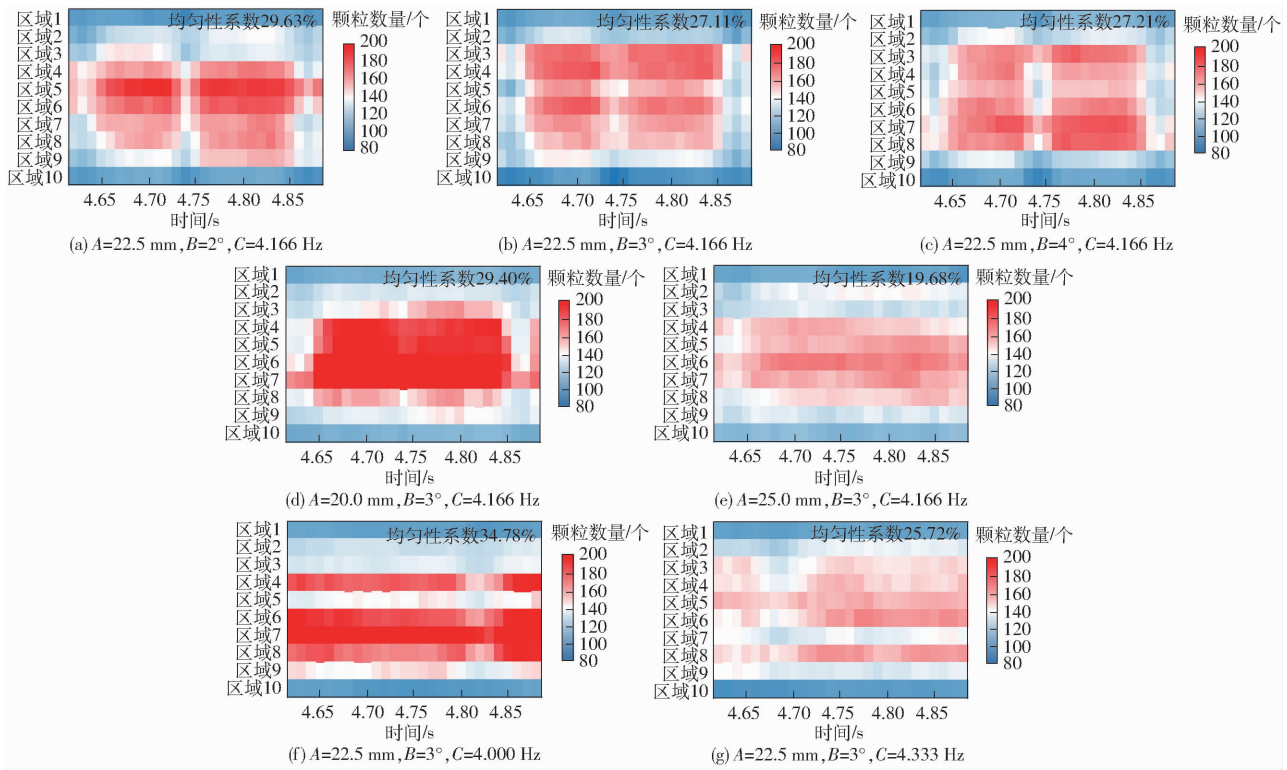


图9 茶叶颗粒在筛网上的分布热图

Fig.9 Heatmaps of tea distribution in screen

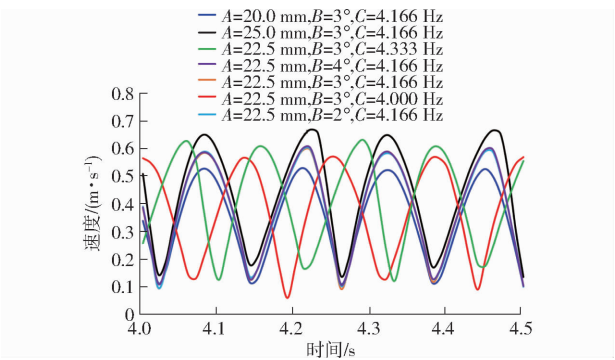


图10 茶叶颗粒速度随时间变化曲线

Fig.10 Variation characteristics curves of tea velocity with time

筛面上受到的惯性力更大,从而获得的能量更多。随着振动频率的增大,茶叶颗粒的平均速度同样在

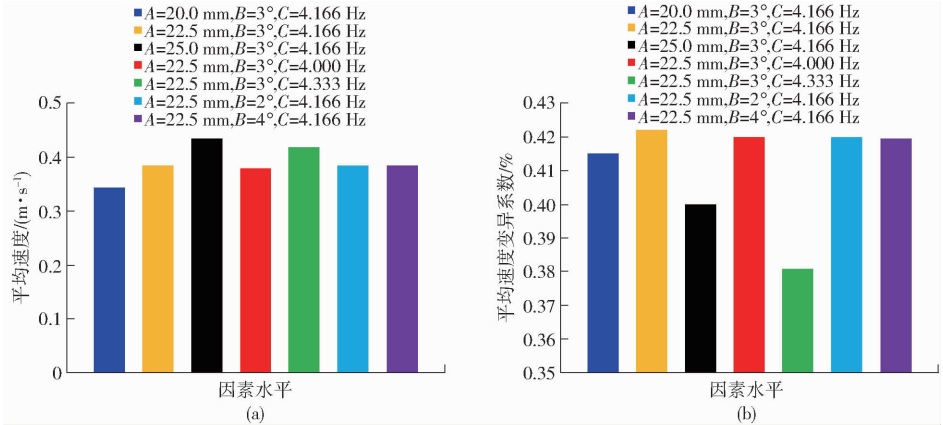


图11 茶叶颗粒平均速度及其变异系数柱状图

Fig.11 Average velocity and variation coefficient bar chart of tea

不断增大,4.0~4.5 s 区间内平均速度由 0.377 m/s 增加到 0.412 m/s。

为了进一步分析不同因素水平下茶叶在筛网上平均速度的波动特性,通过不同因素水平下平均速度变异系数来分析平均速度的变化特性。如图 11b 所示:当振动幅度为 22.5 mm、筛面倾角为 3°、振动频率为 4.166 Hz 时,变异系数最大;当振动幅度为 22.5 mm、筛面倾角为 3°,振动频率为 4.333 Hz 时,变异系数最小。随着筛面倾角不断增加,变异系数呈先增大后减小的趋势,但增加和减小的幅度很小;随着振动幅度的增加,变异系数呈先增加后减小的趋势;随着振动频率的增加,变异系数同样呈先增加后减小的趋势。结果表明:振动幅度为 22.5 mm、筛

面倾角为 3°、振动频率为 4.166 Hz 时,速度波动最大;当振动幅度为 22.5 mm、筛面倾角为 3°、振动频率为 4.333 Hz 时,速度波动最小。

选取茶叶颗粒在筛网上的两个运动周期(4.0 ~ 4.5 s),比较茶叶颗粒在不同振动幅度、筛网倾角、振动频率下茶叶颗粒沿筛面 X 轴方向速度,结果如图 12a 所示。茶叶颗粒沿筛面 X 轴方向速度呈现周期性的变化,并且茶叶颗粒沿筛面 X 轴正方向位移大于沿筛面 X 轴负方向位移,说明茶叶能够沿着筛面出料端方向移动。倾斜角对茶叶颗粒沿筛面 X 轴方向速度的影响较小,随着筛面倾角的增大,茶叶颗粒沿筛面 X 轴方向平均速度维持在 0.08 m/s 左右,但是速度的最大值在不断增大,由 0.359 m/s 增加到 0.376 m/s,原因在于筛面倾角增大,茶叶颗粒在筛网上受到的摩擦力在减小,导致茶叶沿筛面 X 轴方向速度的最大值增加,但对整个茶叶颗粒沿筛面 X 轴方向速度影响较小。随着振动幅度的增加,沿筛面 X 轴方向平均速度由 0.047 m/s 提升到

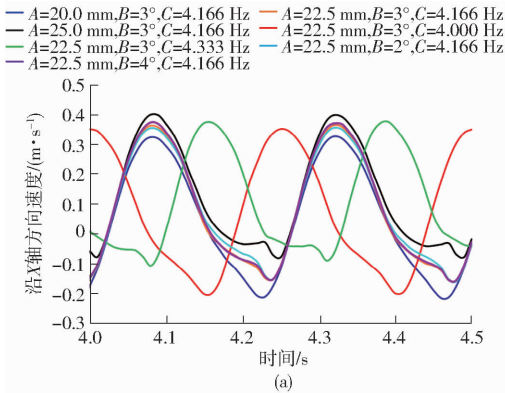
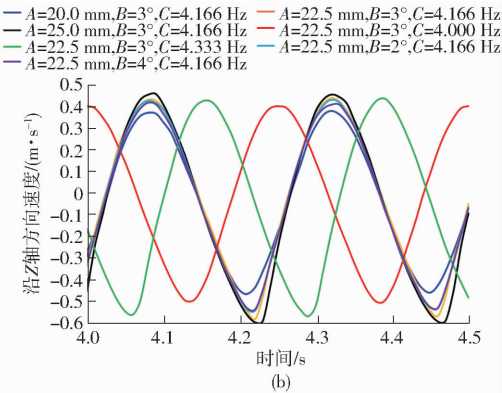


图 12 茶叶颗粒沿筛面方向速度随时间变化曲线

Fig. 12 Tea velocity along screen surface with time

比较茶叶颗粒在不同振动幅度、筛面倾角、振动频率下茶叶颗粒沿筛面 Z 轴方向速度,结果如图 12b 所示。茶叶颗粒沿筛面 Z 轴方向速度同样呈现周期性的变化,并且茶叶颗粒沿筛面 Z 轴负方向速度大于沿筛面 Z 轴正方向速度,说明茶叶能够穿透筛孔完成透筛。筛面倾角对茶叶颗粒沿筛面 Z 轴方向速度的影响较小,但是可以看出当筛面倾角为 3°时,沿筛面 Z 轴方向速度的最大值较高,说明茶叶颗粒在筛网上跳动的位移较大,这样能够保证茶叶颗粒具有充裕的时间调整位姿,保证茶叶透筛。随着振动幅度的增加,茶叶颗粒在筛网上跳动的位移逐渐增大。当振动幅度为 25 mm 时,虽然跳动的位移能保证茶叶颗粒有充裕的时间调整位姿,但是茶叶颗粒在下落的过程中获得的能量也会增大,碰撞机率就会增加,碎茶频率也会加大,对筛分不利。随着振动频率的增加,沿筛面 Z 轴正方向和负方向

速度的最大值先增大后减小。振动频率由 4 Hz 增加到 4.166 Hz 时,沿筛面 Z 轴正方向速度最大值由 0.405 m/s 增加到 0.441 m/s,负方向速度最大值由 0.502 m/s 增加到 0.579 m/s,说明随着频率增加,茶叶颗粒在筛网上跳动的位移逐渐增大,有利于筛分;由 4.166 Hz 增加到 4.333 Hz 时,沿筛面 Z 轴正方向速度最大值由 0.441 m/s 减小到 0.439 m/s,负方向速度最大值由 0.579 m/s 减小到 0.566 m/s,说明进一步增加频率并不能起到增大茶叶颗粒在筛网上跳动位移的效果,反而会起到阻碍作用。



速度的最大值先增大后减小。振动频率由 4 Hz 增加到 4.166 Hz 时,沿筛面 Z 轴正方向速度最大值由 0.405 m/s 增加到 0.441 m/s,负方向速度最大值由 0.502 m/s 增加到 0.579 m/s,说明随着频率增加,茶叶颗粒在筛网上跳动的位移逐渐增大,有利于筛分;由 4.166 Hz 增加到 4.333 Hz 时,沿筛面 Z 轴正方向速度最大值由 0.441 m/s 减小到 0.439 m/s,负方向速度最大值由 0.579 m/s 减小到 0.566 m/s,说明进一步增加频率并不能起到增大茶叶颗粒在筛网上跳动位移的效果,反而会起到阻碍作用。

比较茶叶颗粒在不同振动幅度、筛面倾角、振动频率下茶叶颗粒沿筛面 Y 轴方向速度,结果如图 13 所示。茶叶颗粒沿筛面 Y 轴方向速度远小于沿筛面 X 轴方向速度和沿筛面 Z 轴方向速度,说明茶叶颗粒在筛面的速度以沿筛面 X 轴方向速度和 Z 轴方向速度为主。如图 14 所示,当振动幅

度为 22.5 mm、筛面倾角为 3°、振动频率为 4.166 Hz 时,茶叶颗粒沿筛面 Y 轴方向速度最小,且波动幅度最小,说明茶叶颗粒沿筛面 Y 轴方向运动的能力较弱,不易造成茶叶颗粒沿 Y 轴方向聚集;除此之外,茶叶颗粒之间碰撞会减少,碎茶率也会进一步降低。当振动频率为 4 Hz 时,

茶叶颗粒沿 Y 轴方向速度较大并且速度波动较小,当振动频率为 4.333 Hz 时,茶叶颗粒沿 Y 轴方向速度较小并且速度波动较大,最终导致茶叶颗粒在筛网上存在明显的横向偏析现象,说明茶叶颗粒沿 Y 轴方向速度大小和波动情况是影响茶叶颗粒在筛面均匀性的原因之一。

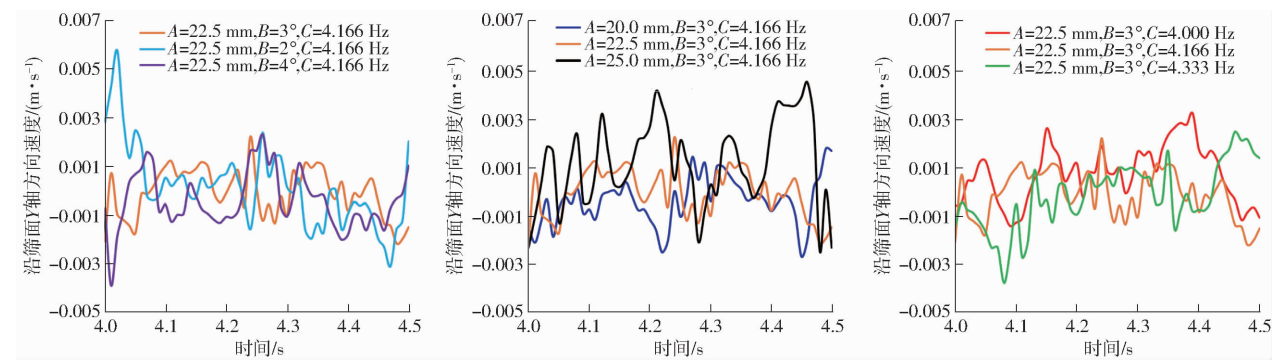


图 13 茶叶颗粒沿筛面 Y 轴方向速度随时间变化曲线
Fig. 13 Velocity of tea along Y-axis of screen surface

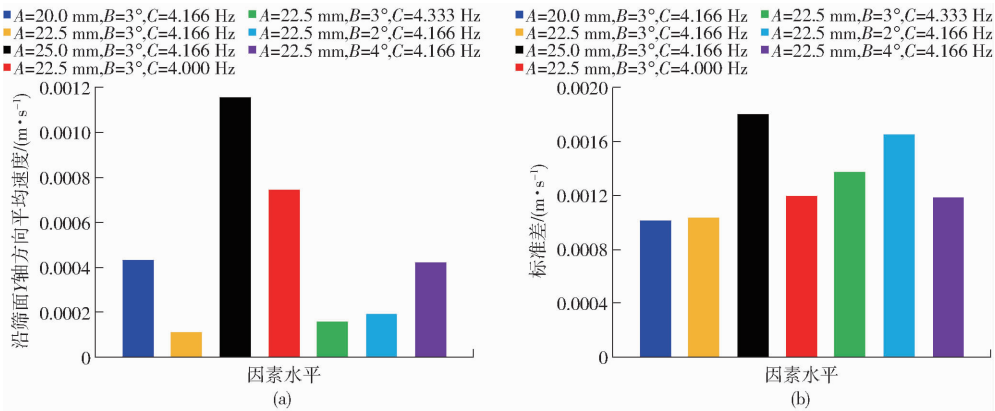


图 14 茶叶颗粒沿筛面 Y 轴方向平均速度及其标准差柱状图
Fig. 14 Average velocity and standard deviation bar chart of tea along Y-axis of screen surface

2.4 不同因素对茶叶颗粒作用力与能量的影响

分析了不同因素下筛面茶叶颗粒的平均力随时间的变化特性。选取茶叶颗粒在筛网上的时间为 4.0 ~ 4.5 s。如图 15 所示,茶叶颗粒在筛面上的平均作用力在 $1.3 \times 10^{-4} \sim 1.45 \times 10^{-3}$ N 之间。如图 16a 所示,筛面倾角从 2°增加到 3°时,平均力稍微

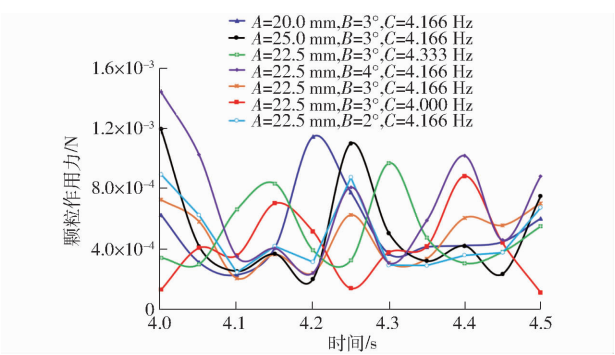


图 15 茶叶颗粒受力随时间变化曲线
Fig. 15 Variation characteristics curves of force on tea particles with time

减小,但从 3°增加到 4°时,平均力则增加 2.0×10^{-4} N。随着振动幅度的增加,平均力先增加后减小;随着频率的增加,平均力则一直增加。如图 16b 所示,平均力变异系数随不同因素水平的增加呈现相同的趋势,都是先减小后增加,当振动幅度为 22.5 mm、筛面倾角为 3°、振动频率为 4.166 Hz 时,变异系数最小。茶叶颗粒在筛网上受到的力决定了茶叶颗粒的运动特性,由于不同因素水平下茶叶颗粒在筛网上受到碰撞不同,茶叶颗粒的能量损失也不一样,最终茶叶颗粒平均力与平均速度变化也不相同。为了进一步探究不同因素对筛面茶叶颗粒平均力的影响,分析不同因素下筛面茶叶颗粒平均平移动能和平均旋转动能的变化趋势。如图 17 所示,茶叶颗粒在筛网上平均平移动能比旋转动能高一个数量级,意味着茶叶颗粒在筛网上运动以平移运动为主。如图 10 和图 17a 所示,在不同的因素水平下,平移动能的变化趋势和速度的变化趋势基本一致,说明茶叶颗

粒在筛面上的平均速度的变化是由平移动能的变化引起。如图 17b 所示,在不同的因素水平下,随着筛面倾角的增大,茶叶颗粒的旋转能力变化不大;随着振动幅度的不断增大,茶叶颗粒的旋转能力得到提

升;随着振动频率的不断增大,茶叶颗粒的旋转能力不断增大。这种变化趋势与茶叶颗粒沿筛面 X 轴方向速度的变化趋势相近,说明茶叶颗粒沿筛面 X 轴方向速度的变化是由旋转动能的变化引起。

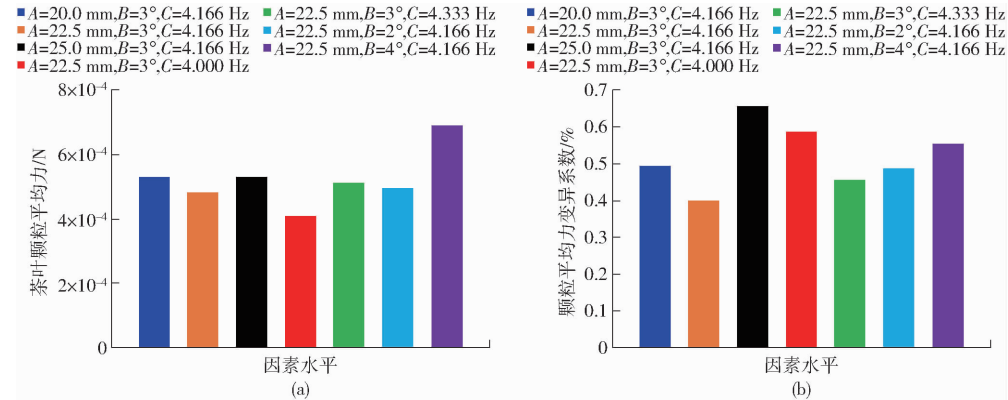


图 16 茶叶颗粒平均力和平均力变异系数柱状图

Fig. 16 Average force and variation coefficient bar chart of average force of tea

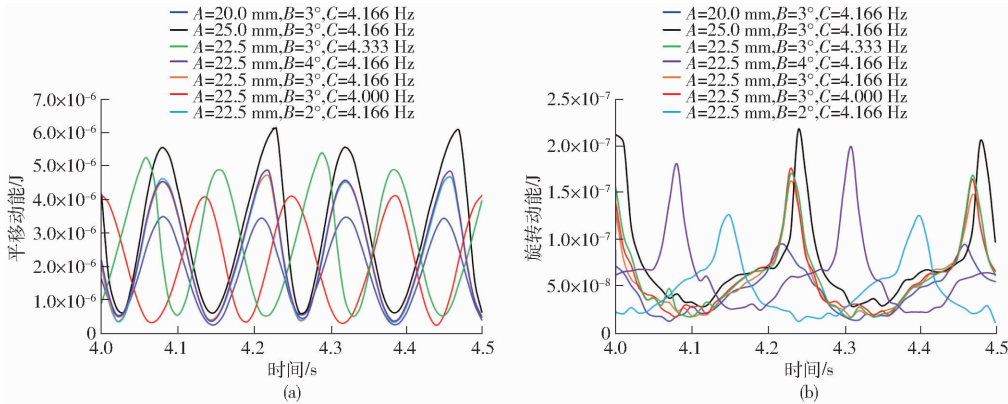


图 17 茶叶颗粒平移动能和旋转动能变化曲线

Fig. 17 Translation kinetic energy and rotational energy of tea

2.5 不同因素对茶叶颗粒迁移系数的影响

通过式(40)计算茶叶颗粒在筛面的迁移系数,结果如图 18 所示。迁移系数整体上随着轮次的增加逐渐下降,意味着总体上筛面前面的茶叶颗粒的迁移能力大于筛面后面茶叶颗粒的迁移能力;迁移系数始终大于 0,意味着茶叶颗粒在筛面上能够从进料端运输到出料端,不会出现堆积。在每个因素水平下,迁移系数在局部位置存在先上升后下降的趋势,这表明在局部时间段下,后面颗粒的迁移能力

大于前面颗粒的迁移能力,这可能是因为频率的影响导致,也可能是因为前面的颗粒在该时间段存在较多的碰撞导致迁移能力降低。随着振动幅度的不断增加,茶叶颗粒的迁移能力在不断提升,但是当振幅太小时,迁移系数下降的不很明显,这种情况下容易造成茶叶颗粒在筛网的堆积,从而导致误筛率上升。当振幅太大时,虽然迁移系数下降速率很快,但是由于茶叶颗粒在筛面运动的速度加大,就会出现明显的横向运动,导致茶叶在局部某些区域堆积,造成迁移系数升高。随着频率的增大,迁移能力在不断提升,当频率为 4 Hz 时,迁移系数波动较大,说明茶叶在筛面上运动不稳定;当频率为 4.333 Hz 时,茶叶运动速度得到提升,但是增加幅度较振幅 25 mm 时小,所以变化速率也较振幅 25 mm 时小些。在筛面倾角较小时,迁移系数下降较慢,局部轮次存在上升,说明茶叶堆积导致迁移能力下降;在筛面倾角较大时,局部轮次迁移系数上升,可能是因为角度太大导致茶叶堵塞筛孔挂筛的可能性增大,从而影

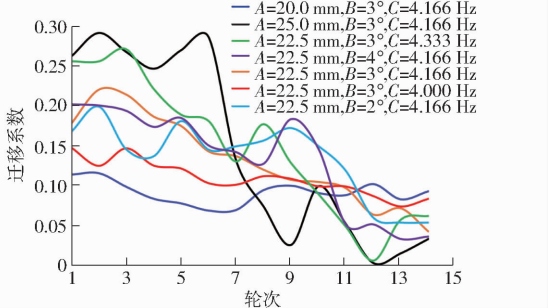


图 18 茶叶颗粒迁移系数变化曲线

Fig. 18 Migration coefficient variation curves of tea

响迁移系数。

3 抖筛试验

3.1 试验方法与指标

茶叶抖筛 DEM 模型是在茶叶抖筛机实际工作的基础上建立的,为了分析抖筛仿真试验与实际结果的差异,在实际试验和模拟试验中都使用相同的工作参数,根据抖筛仿真试验参数进行抖筛试验,试验材料与前文茶叶休止角试验为同一批茶叶原料,加工工艺流程参考文献[28],参照机械行业标准 JB/T 5676—2007《茶叶抖筛机》中指定的方法与指标,以误筛率作为评价指标。通过比较茶叶误筛率,验证茶叶抖筛 DEM 模型的准确性。试验重复 3 次,取平均值作为最终试验结果。

抖筛设备运转开始时,接取 15 min 首面筛筛下茶并称量,然后在不改变抖筛机工作参数条件下,将接取的茶样单独投入抖筛机进行复筛,再接取复筛后的首面筛筛上茶并称量^[28]。试验误筛率 ξ'_n 计算式为

$$\xi'_n = \frac{W_{fs}}{W'_e} \times 100\%$$

(42)

式中 W_{fs} ——复筛后接取的首面筛筛上茶质量,kg
 W'_e ——复筛前茶样质量,kg

3.2 误筛率结果分析

误筛率的模拟结果与试验结果如表 3 所示。仿真试验的误筛率高于实际试验,但是误差在 5 个百分点以内,尽管仿真结果与实际结果不同,但差异在可接受的范围内。振动幅度为 22.5 mm、筛面倾角为 3°、振动频率为 4.166 Hz 时,试验误筛率最小。

表 3 误筛率仿真试验结果与实际试验结果对比

Tab.3 Comparison of error-sifting rate simulation test results with actual test results

振动幅度/ mm	筛面倾 角/(°)	振动频率/ Hz	试验误筛 率/%	仿真误筛 率/%
20.0	3	4.166	7.05	10.25
22.5	3	4.166	5.75	9.91
25.0	3	4.166	8.30	9.77
22.5	3	4.000	9.53	12.40
22.5	3	4.333	6.47	10.78
22.5	2	4.166	7.78	11.84
22.5	4	4.166	8.79	10.14

4 讨论

不同因素水平下茶叶颗粒在筛网上分布不均匀,会影响茶叶抖筛过程的效率,从而导致误筛率提升,然而并不意味着茶叶在筛网上分布均匀,抖筛效

率就会提高。这有可能是因为茶叶颗粒在筛网上停留的时间较短,需要结合茶叶在筛网上的平移动能和旋转动能进行综合分析。然而,影响茶叶抖筛的因素不仅仅只有筛面倾角、振动频率和振动幅度,还包括筛网外形尺寸、筛网材料、运动形式,等等。为了进一步提高仿真结果的准确性,仿真模型可以从以下角度出发:模拟试验中只采用了椭圆颗粒和 U 形颗粒,然而除了椭圆颗粒与 U 形颗粒以外,还存在其它形状的茶叶颗粒,不同形状的茶叶颗粒与筛网的接触、通过筛网的概率则不一样,因此需要对茶叶颗粒进一步分类建模;模拟试验的投叶量与实际试验相差较大,可能会导致不同茶叶颗粒与筛网的接触时间不一样,因此未来可以引入深度学习等其它算法提高计算机的计算能力。

不同因素水平下茶叶颗粒的平均速度存在显著性的差异。本研究对物料筛分过程速度的精确控制具有较强的指导意义。在筛网上稳定的速度不仅可以提高抖筛效率,减少堵塞挂网等情况的发生,还可以促进智能化设备的设计。本文从颗粒速度、力、能量和迁移系数等方面研究了筛面倾角、振动幅度、振动频率对茶叶颗粒在抖筛机筛网上的运动特性影响。在后期研究上可以从茶叶颗粒在筛面上不同区域间的碰撞、能量损失等角度分析抖筛性能。

5 结论

(1)茶叶颗粒较多地集中在筛网中间,两侧区域茶叶颗粒较少;频率太大或者太小都会造成茶叶颗粒在筛网上的横向偏析。

(2)不同因素水平下茶叶颗粒在筛网上呈现规律性的波动,平移动能的变化趋势和速度的变化趋势基本一致,旋转动能的变化趋势和沿 X 轴方向速度的变化趋势基本一致。茶叶颗粒的平均速度随着振动频率和振动幅度的增大而增大,振动幅度为 22.5 mm、筛面倾角为 3°、振动频率为 4.166 Hz 时,速度波动最大。

(3)振动幅度对茶叶颗粒沿筛面 X 轴方向移动影响最大,其次是振动频率,最小是筛面倾角。

(4)不同因素水平下茶叶颗粒的迁移系数随着轮次的增加呈现下降的趋势,并且迁移系数始终大于 0,表明筛网上的茶叶颗粒总是能够从进料端运输到出料端而不会产生堆积现象。

(5)在相同投叶量和筛分时间下,不同参数对茶叶抖筛过程的影响由大到小为:振动幅度、振动频率、筛面倾角。茶叶抖筛试验误筛率结果与仿真试验结果趋于一致,误差结果相差小于 5 个百分点。

参 考 文 献

[1] 沈惠平,肖思进,尤晶晶,等. 一平移两转动并联运动振动筛动力学建模与精度分析[J]. 农业机械学报,2021,52(2): 394 – 400.
SHEN Huiping, XIAO Sijin, YOU Jingjing, et al. Dynamic modeling and precision analysis of parallel vibrating screen with one-translation and two-rotation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 394 – 400. (in Chinese)

[2] 王立军,段良坤,郑招辉,等. 三移动两转动振动筛驱动机构优化与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6):138 – 145.
WANG Lijun, DUAN Liangkun, ZHENG Zhaohui, et al. Optimization and experiment on driving mechanism of vibrating screen with three translations and two rotations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 138 – 145. (in Chinese)

[3] 谢俊,张晓庆,王成军. 基于三平移并联机构的茶叶筛分试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):101 – 104.
XIE Jun, ZHANG Xiaoqing, WANG Chengjun. Tea sieving based on three translation parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10):101 – 104. (in Chinese)

[4] 李兵,夏涛,宛晓春,等. 基于蚁群算法的茶叶抖筛机参数优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 84 – 87.
LI Bing, XIA Tao, WAN Xiaochun, et al. Optimized design of tea vibrating-shifting machine parameters based on ant colony algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 84 – 87. (in Chinese)

[5] 赵嘉乐,童昕,李占福,等. 基于离散元法的振动筛颗粒透筛和触筛分析[J]. 中国粉体技术,2022,28(4):125 – 133.
ZHAO Jiale, TONG Xin, LI Zhanfu, et al. Analysis on particles screen contact and penetration of vibration screen based on discrete element method[J]. China Powder Science and Technology, 2022, 28(4):125 – 133. (in Chinese)

[6] MA Z, LI Y, XU L, et al. Dispersion and migration of agricultural particles in a variable-amplitude screen box based on the discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142:173 – 180.

[7] MA Z, LI Y, XU L. Discrete-element method simulation of agricultural particles' motion in variable-amplitude screen box[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118:92 – 99.

[8] FENG Xin, GONG Zhenping, WANG Lijun, et al. Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit[J]. Powder Technology, 2021, 385:501 – 516.

[9] 李耀明, 赵湛, 张文斌, 等. 基于 Mean shift 的筛面物料颗粒目标运动轨迹跟踪[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5):119 – 122.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, ZHANG Wenbin, et al. Trajectory tracking of particle material motion on sieve surface based on Mean shift algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5):119 – 122. (in Chinese)

[10] WANG Lijun, ZHANG Shuai, GAO Yunpeng, et al. Investigation of maize grains penetrating holes on a novel screen based on CFD – DEM simulation[J]. Powder Technology, 2023, 419:118332.

[11] 王立军,于泳涛,张帅,等. 蚯蚓运动特征仿生筛筛上玉米脱出物运动特性研究[J]. 农业机械学报,2022,53(3):158 – 166.
WANG Lijun, YU Yongtao, ZHANG Shuai, et al. Motion characteristics of maize mixture on bionic screen based on earthworm motion characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3):158 – 166. (in Chinese)

[12] 于泳涛. 基于蚯蚓运动特征的玉米清选仿生筛的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.
YU Yongtao. Design and experimental study of bionic screen for maize cleaning based on earthworm motion characteristics [D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[13] DONG K, ESFANDIARY A H, YU A B. Discrete particle simulation of particle flow and separation on a vibrating screen: effect of aperture shape[J]. Powder Technology, 2017, 314:195 – 202.

[14] 李兵,李为宁,柏宣丙,等. 基于 EDEM 的茶鲜叶分级机的筛分率的研究[J]. 茶叶科学,2019,39(4):484 – 494.
LI Bing, LI Weining, BAI Xuanbing, et al. Research on screening rate of fresh tea leaves classifier based on EDEM[J]. Journal of Tea Science, 2019, 39(4):484 – 494. (in Chinese)

[15] 吕昊威,武传宇,涂政,等. 基于 EDEM 的机采茶鲜叶振动式分级机分级参数优化[J]. 茶叶科学,2022,42(1):120 – 130.
LÜ Haowei, WU Chuanyu, TU Zheng, et al. EDEM-based optimization of classification parameters of machine-picked tea fresh leaf vibratory classifier[J]. Journal of Tea Science, 2022, 42(1):120 – 130. (in Chinese)

[16] 赵立华,程卫东,刘洋,等. 绿茶杀青机茶叶颗粒运动学仿真分析[J]. 中国农机化学报,2022,43(6):104 – 109.
ZHAO Lihua, CHENG Weidong, LIU Yang, et al. Kinematic simulation analysis of tea particles in green tea fixing machine[J]. Journal of Chinese Agriculture Mechanization, 2022, 43(6):104 – 109. (in Chinese)

[17] 秦宽,步坤亭,沈周高,等. 连续复式茶叶理条机优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):382 – 393.
QIN Kuan, BU Kunting, SHEN Zhougao, et al. Optimization design and experiment of continuous compound tea leaf barber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3):382 – 393. (in Chinese)

[18] 张开兴,王文中,赵秀艳,等. 滚筒式茶叶热风复干机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):377 – 386.
ZHANG Kaixing, WANG Wenzhong, ZHAO Xiuyan, et al. Design and experiment of drum-type hot air re-dryer for tea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):377 – 386. (in Chinese)

[19] ZHAO Z F, ZHU H J, CHEN G D, et al. Analysis of influence factors on the sieving efficiency in tea vibration sieving[J]. Agriculture Research, 2019, 8(2):279 – 286.

[20] RAVIKUMAR V, RANGANATHAN C R, SANTHANA BOSU S. Analytical equation for variation of discharge in drip irrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003,129(4): 295 – 298.

[21] 刘伟,汪小岳,丁为民,等. 背负式喷雾器变量喷雾控制系统设计与特性分析[J]. 农业工程学报,2012,28(9):16 – 21. LIU Wei, WANG Xiaochan, DING Weimin, et al. Design and characteristics analysis of variable spraying control system for knapsack sprayer[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(9):16 – 21. (in Chinese)

[22] 卢鑫羽,龚艳,陈晓,等. 电动履带式立式喷杆喷雾机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2021,42(8):83 – 91. LU Xinyu, GONG Yan, CHEN Xiao, et al. Design and experiment of electric crawler vertical boom sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(8): 83 – 91. (in Chinese)

[23] 迟媛. 履带车辆差速转向技术与理论[M]. 北京:化学工业出版社,2013.

[24] 张青松,齐涛,廖庆喜,等. 农田耕后地表微地貌自走遥控测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(4): 73 – 82,119. ZHANG Qingsong, QI Tao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of farmland surface micro-landform measuring device after rapeseed planter seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):73 – 82,119. (in Chinese)

[25] 李文哲,许绮川. 汽车拖拉机学(第 2 册)[M]. 北京:中国农业出版社,2006.

[26] JB/T 9782—2014 植物保护机械通用试验方法[S]. 2014.

[27] 蒋焕煜,周鸣川,李华融,等. PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性实验[J]. 农业机械学报, 2015,46(3): 73 – 77. JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, LI Huarong, et al. Experiment on dynamic droplet distribution uniformity for PWM variable spray system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):73 – 77. (in Chinese)

[28] 李民赞,李欣泽,杨玮,等. 无人机喷雾质量检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(增刊):36 – 42. LI Minzan, LI Xinze, YANG Wei, et al. Design and eperiment of UAV spray quality detection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(Supp.):36 – 42. (in Chinese)

[29] 曲峰,盛希宇,李熙,等. 3WZF – 400A 型果园风送喷雾机改进设计[J]. 农业机械学报, 2017,48(增刊): 15 – 21. QU Feng, SHENG Xiyu, LI Xi, et al. Improved design of 3WZF – 400A orchard air-assisted sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(Supp.):15 – 21. (in Chinese)

[30] GB/T 40331.2—2021 植物保护机械 大田作物喷雾沉积量的测试 第 2 部分:在作物上的测试[S].2021.

[31] MH/T 1002.1—2016 农业航空作业质量技术指标 第 1 部分:喷洒作业[S].2016.

(上接第 121 页)

[20] 赵章凤,张立彬,汪晓华,等. 茶叶圆筛条件分析与过程数值模拟[J]. 茶叶科学,2014,34(1):1 – 8. ZHAO Zhangfeng, ZHANG Libin, WANG Xiaohua, et al. Condition analysis and numerical simulation of tea plane circular sieve [J]. Journal of Tea Science, 2014, 34(1): 1 – 8. (in Chinese)

[21] 王成军,章天雨,郑艳,等. 两自由度往复式滚筒筛茶叶筛分模拟研究[J]. 茶叶科学,2016,36(6):613 – 620. WANG Chengjun, ZHANG Tianyu, ZHENG Yan, et al. Simulation study on the screening of the reciprocating roller screen with two degrees of freedom for tea[J]. Journal of Tea Science,2016,36(6):613 – 620. (in Chinese)

[22] LUO K, CAO C, WU Z, et al. Optimization of roasted green tea winnowing via fluid-solid interaction experiments and simulations[J]. Foods,2022, 11: 3271.

[23] CROSS R. Oblique impact of a steel ball[J]. Powder Technology, 2019,351: 282 – 290.

[24] 刘鹏,何进,章志强,等. 基于 CFD – DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):244 – 253. LIU Peng, HE Jin, ZHANG Zhiqiang, et al. Kinematic characteristic analysis and field test of chopped stalk in straw retention machine based on CFD – DEM coupling simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 1):244 – 253. (in Chinese)

[25] GAO Yunpeng, SONG Lianglai, WANG Lijun, et al. Behavior of maize particles on the bionic sieve designed based on the earthworm’s contour[J]. Powder Technology,2022,403:117399.

[26] WANG Jinwu, XU Changsu, XU Wenlong, et al. Discrete element method simulation of rice grain motion during discharge with an auger operated at various inclinations[J]. Biosystems Engineering, 2022,223(24): 97 – 115.

[27] JB/T 5676—2007 茶叶抖筛机[S]. 2007.

[28] 王小勇,余志,倪德江. 往复式茶叶振动抖筛机优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):143 – 153. WANG Xiaoyong, YU Zhi, NI Dejiang. Optimization design and experiment of reciprocating tea vibrating-sifting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):143 – 153. (in Chinese)