

基于 EDEM 的双锅曲毫机仿真试验

Simulation test of double-pan roasting machine based on EDEM

李为宁¹ 宋扬扬¹ 李 兵^{1,2}

LI Wei-ning¹ SONG Yang-yang¹ LI Bing^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 安徽 合肥 230036; 2. 安徽农业大学茶树生物学与资源利用
国家重点实验室, 安徽 合肥 230036)

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 2. State Key
Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

摘要:利用 Solidworks 建立了双锅曲毫机的 3D 几何模型, 基于离散元法建立茶叶颗粒的颗粒模型和接触力学模型。将上述模型导入 EDEM 软件中, 并根据实际珠茶炒制工艺设置关键技术参数。以提高珠茶成形率和降低珠茶碎茶率为目标, 对炒板关键运动学参数摆幅及摆速进行了仿真计算, 得到了珠茶颗粒在成形过程中的运动学及动力学曲线。为验证仿真的正确性, 设计了二因素三水平正交试验, 结果表明: 珠茶做形品质的主要影响因素依次为摆速和摆幅。当弧形炒板的摆速为 85 r/min, 摆幅为 80° 时, 珠茶颗粒的成形率为 91.1%, 碎茶率为 6.5%, 同时具有较好的成茶品质。EDEM 仿真与正交试验结果基本一致。

关键词: 双锅曲毫机; EDEM; 仿真分析

Abstract: Because traditional design method is difficult to analyze the movement process of gunpowder tea particles in frying pan, the 3D geometric model of the double-pan roasting machine was designed based on Solidworks, the tea particle model of geometric and contact mechanics was established based on the discrete element method, the models were imported into EDEM, and the key technical parameters were set up according to the actual frying process of gunpowder tea. The swing amplitude and swing speed of the key kinematics parameters of the frying plate were simulated based on EDEM in order to improve the shaping rate of gunpowder tea and reduce the broken rate of gunpowder tea, the kinematics and dynamics curves of gunpowder tea particles in the shaping process were obtained. The orthogonal experiment of 2

factors and 3 levels was designed in order to test the correctness of the simulation. The results showed that: the main factors affecting the shaping quality of gunpowder tea were swing speed and swing amplitude respectively. The shaping rate of gunpowder tea was 91.1% and the broken rate of gunpowder tea was 6.5%, when the swing speed of the frying plate was 85 r/min and the swing amplitude was 80 degrees, the tea quality was good. The EDEM simulation results were basically consistent with the orthogonal test results.

Keywords: double-pan roasting machine; EDEM; simulation analysis

珠茶是绿茶中炒青绿茶圆炒青的品种之一, 双锅曲毫机是其加工做形的关键设备, 双锅曲毫机的做形过程对珠茶的外形和内质口感都有着很大的影响。所谓珠茶做形就是将揉捻叶炒制成颗粒球状, 茶叶的外部形状变化的过程^[1]。在做形过程中, 曲柄摇杆机构带动弧形炒板在半球形炒锅中往返摆动, 推动茶叶不断翻炒, 茶叶受到弧形炒板推力、自身重力、相互之间的摩擦力以及锅体内表面挤压力的作用, 同时在炒锅底部的电加热盘的作用下, 珠茶的外观和内质方面发生相应的变化, 最终卷曲成球状^[2]。

离散元法是一种数值模拟方法, 结合牛顿第二定律计算大量颗粒在给定条件下如何运动等非连续介质问题^[3]。20 世纪 90 年代后, 有学者^[4]开始运用离散元法研究物料颗粒与农业机械相关零部件之间的相互作用及物料颗粒的流动问题。目前, 离散元素法在茶叶机械领域中尚未广泛应用, 对双锅曲毫机的研究应用涉及较少, 主要是对其曲柄摇杆结构进行了优化设计, 未分析关键结构参数对珠茶颗粒成形过程的影响。中国的一些学者^[5-7]对双锅曲毫机的零部件进行了实体建模, 得出了零部件的几何参数, 研究了双锅曲毫机在做形过程中对

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2018YFD0700504, 2017YFD0400801); 安徽省教育厅自然重点项目 (编号: KJ2017A133)

作者简介: 李为宁, 男, 安徽农业大学在读硕士研究生。

通信作者: 李兵 (1971—), 男, 安徽农业大学副教授, 博士。

E-mail: libing@ahau.edu.cn

收稿日期: 2019-01-14

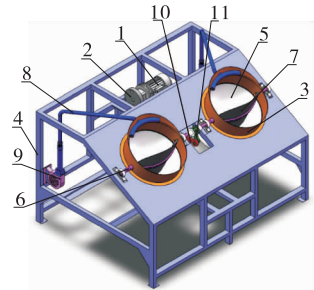
球形茶的做功功率以及不同的投叶量对双锅曲毫机做形的影响。

本试验拟通过 EDEM 离散元仿真软件,研究双锅曲毫机做形过程中茶叶颗粒的运动规律,同时对影响珠茶做形效果的相关因素进行仿真分析,并进行试验验证,寻找珠茶做形效果的最佳参数组合,为珠茶做形等相关茶叶机械的设计与开发提供理论依据。

1 双锅曲毫机的总体结构与工作原理

双锅曲毫机由减速电机、偏心轮、电加热盘、机架、炒锅、炒板支撑曲轴、炒板、风管、风机、连杆、摇杆等组成,见图 1。双锅曲毫机的相关设计参数见表 1。双锅曲毫机依据人工炒茶的过程设计而成,其工作原理是位于机架下方的减速电机作为动力输出,采用曲柄摇杆机构作为传动结构,将动力传递给炒板支撑曲轴,炒板支撑曲轴带动炒板在空间中往复摆动,对茶叶进行炒制做形。在珠茶做形的过程中,茶叶在炒锅内受到炒板对茶叶施加的推力、锅壁对茶叶产生的反作用力以及茶叶之间的相互挤压和摩擦,随着炒锅温度的升高,茶叶逐渐干燥圆紧,迫使其逐渐卷曲收紧成球状^[8]。可以根据具体实际情况的不同,通过调节曲柄摇杆机构中的摇杆长度大小,对炒板的摆幅和摆速进行调整,以实现不同摆幅和摆速条件下双锅曲毫机的茶叶加工过程。在炒板运行的进程过程中,茶叶颗粒受到炒板的推力以及锅壁对茶叶的反

作用力比较明显,炒板对茶叶的做形效果显著,有利于茶叶的成形,但是茶叶的翻炒效果不明显。在炒板运行的回程过程中,不同位置的茶叶颗粒与炒板脱离接触时的速度大小不同,下部与锅壁接触的茶叶颗粒获得的速度大于上部的茶叶颗粒,下部茶叶颗粒在脱离炒板时开始沿锅壁作抛体运动,到达一定高度时下落,上部茶叶颗粒在自身重力作用下作自由落体运动。因此,上部的茶叶颗粒先于下部的茶叶颗粒落入炒锅中,翻炒效果显著,但是失去炒板的推力作用,茶叶颗粒受到的挤压作用较弱,做形效果不明显。



1. 减速电机 2. 偏心轮 3. 锅沿 4. 机架 5. 炒锅 6. 炒板支撑曲轴 7. 炒板 8. 风管 9. 风机 10. 连杆 11. 摇杆

图 1 双锅曲毫机 3D 结构图

Figure 1 Structure diagram of double-pan roasting machine

表 1 双锅曲毫机的结构设计参数

Table 1 Structure design parameters of double-pan roasting machine

炒锅直径/mm	炒锅数量	炒板摆幅/(°)	炒锅摆速/(r · min ⁻¹)	驱动电机额定功率/kW	茶叶投叶量/kg	外形尺寸/mm ³
600	2	70~90	65~85	0.37	4~5(初烘叶)	2 115×890×1 175

2 离散元法简介

2.1 珠茶颗粒模型

珠茶颗粒模型通过振动运动方程来表现颗粒接触过程,分解其振动运动可以得到它的法向振动运动方程:

$$m_{1,2} \frac{d^2 u_n}{dt^2} + c_n \frac{du_n}{dt} + K_n u_n = F_n \quad (1)$$

颗粒接触过程分为颗粒的滚动和颗粒的切向滑动过程:

$$m_{1,2} \frac{d^2 u_s}{dt^2} + c_s \frac{du_s}{dt} + K_s u_s = F_s \quad (2)$$

$$I_{1,2} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (c_s \frac{du_s}{dt} + K_s u_s) s = M \quad (3)$$

式中:

$m_{1,2}$ ——颗粒的等效质量,kg;

θ ——颗粒自身的旋转角度,rad;

F_n, F_s ——颗粒所受外力的法向分量和切向分量;

K_n, K_s ——接触模型中的法向及切向弹性系数;

u_n, u_s ——颗粒的法向和切向相对位移,m;

$I_{1,2}$ ——颗粒的等效转动惯量,kg · m²;

s ——旋转半径,m;

M ——颗粒所受外力矩,N · m;

c_n, c_s ——接触模型中的法向及切向阻尼系数^[9]。

颗粒摩擦力会影响到颗粒的接触过程,颗粒的滚动与切向滑动的极限判断条件根据滑动模型建立^[10-11]:

$$F_s = \mu K_n u_n \operatorname{sgn} \left[K_s \left(u_s + \frac{d\theta}{2} \right) \right] \quad (4)$$

式中:

μ ——颗粒摩擦系数;

$\operatorname{sgn}[\]$ ——符号函数, $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$ 。

2.2 茶叶颗粒的运动方程

颗粒受到的作用力通过力—位移关系得出,运用牛顿第二定律得出在这个过程中要用到的位移。颗粒 i 的运动方程根据牛顿第二定律得出:

$$\begin{cases} m_i \ddot{u}_i = \sum F; \\ I_i \ddot{\theta}_i = \sum M. \end{cases} \quad (5)$$

式中:

m_i ——颗粒 i 的质量, kg;

I_i ——颗粒 i 的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

$\ddot{u}_i$ ——颗粒 i 的加速度, m/s^2 ;

$\ddot{\theta}_i$ ——颗粒 i 的角加速度, rad/s^2 ;

$\sum F$ ——颗粒在质心处的合外力, N;

$\sum M$ ——颗粒在质心处的合外力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

下一时间步长的更新速度通过对式(5)用欧拉法两边同时积分得到:

$$\begin{cases} (\dot{u}_i)_{N+1/2} = (\dot{u}_i)_{N-1/2} + \left[\frac{\sum F}{m_i} \right]_N \Delta t; \\ (\dot{\theta}_i)_{N+1/2} = (\dot{\theta}_i)_{N-1/2} + \left[\frac{\sum M}{I_i} \right]_N \Delta t. \end{cases} \quad (6)$$

式中:

N ——时间 t , s;

Δt ——时间步长^[12]。

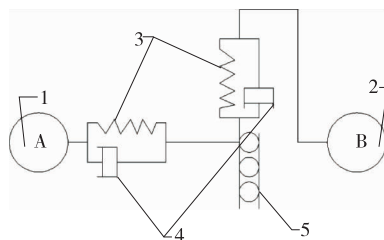
位移等式通过对式(6)积分获得:

$$\begin{cases} (u_i)_{N+1} = (u_i)_N + (\dot{u}_i)_N \Delta t; \\ (\theta_i)_{N+1} = (\theta_i)_N + (\dot{\theta}_i)_N \Delta t. \end{cases} \quad (7)$$

接触力学模型的设置是 EDEM 仿真软件进行模拟仿真的重要基础设置,常用的接触力学模型包括 6 种:运动表面接触模型、弹性接触模型、摩擦带电接触模型、无滑动的 Hertz-Mindlin 接触模型、黏结接触的 Hertz-Mindlin 模型和线性黏附接触模型^[13]。茶叶颗粒形状为球状,颗粒表面无黏附力,所以选择 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型作为茶叶颗粒之间及茶叶颗粒与锅体之间的接触模型,其接触模型如图 2 所示。

茶叶颗粒间的切向力、法向力、切向阻尼力和法向阻尼力^[14]分别为:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \alpha^3}, \quad (8)$$



1. 珠茶颗粒 A 2. 珠茶颗粒 B 3. 颗粒刚度(弹簧) 4. 阻尼器
5. 摩擦器

图 2 颗粒间接触模型

Figure 2 Inter particle contact model

$$F_t = -S_t \delta, \quad (9)$$

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_n^{rel}}, \quad (10)$$

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^* v_t^{rel}}, \quad (11)$$

式中:

R^* ——等效颗粒半径, m;

E^* ——等效弹性模量, Pa;

α ——法向重叠量, m;

δ ——切向重叠量, m;

S_t ——切向刚度, N/m;

S_n ——法向刚度, N/m;

F_n ——法向力, N;

F_t ——切向力, N;

F_n^d ——法向阻尼力, N;

F_t^d ——切向阻尼力, N;

m^* ——等效质量, kg;

v_n^{rel} ——法向相对速度, m/s;

v_t^{rel} ——切向相对速度, m/s;

m_A, m_B ——颗粒 A、B 的质量, kg;

μ_A, μ_B ——颗粒 A、B 的泊松比;

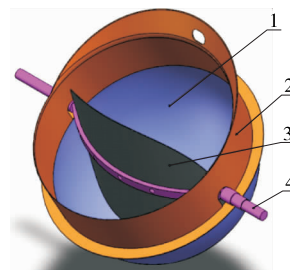
E_A, E_B ——颗粒 A、B 弹性模量, Pa;

R_A, R_B ——颗粒 A、B 的半径, m。

3 EDEM 仿真分析

3.1 双锅曲毫机炒锅模型与茶叶颗粒参数

为了能够更加清晰、直观地观察不同摆幅和摆速条件下弧形炒板对茶叶颗粒的仿真效果,利用三维建模软件 Solidworks 创建双锅曲毫机的炒锅 3D 模型,如图 3 所示。茶叶颗粒在炒制过程中形状差异明显,不同形状茶叶颗粒之间的相互影响也不尽相同,形状不同的茶叶颗粒不仅对双锅曲毫机做形效果产生一定的影响,而且增加了模拟仿真的运行时间,由于珠茶颗粒外形为球状,故珠茶颗粒模型采用默认的球形颗粒^[15-16],如图 4 所示。除颗粒外,双锅曲毫机的弧形炒板和锅体材料均为钢材,颗粒参数设置^[17]如表 2 所示。



1. 炒锅 2. 锅沿 3. 炒板 4. 炒板支撑轴

图 3 双锅曲毫机炒锅 3D 模型

Figure 3 3D model of frying pan of double-pan roasting machine

表 2 茶叶颗粒参数

Table 2 Tea particle parameters

接触类型	颗粒密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒直 径/mm	颗粒 泊松比	颗粒剪切 模量/Pa	茶叶颗粒间 恢复系数	茶叶颗粒间 静摩擦系数	茶叶颗粒间 动摩擦系数	茶叶颗粒—炒 锅恢复系数	茶叶颗粒—炒 锅静摩擦系数	茶叶颗粒—炒 锅动摩擦系数
Hertz-Mindlin 模型	532	10	0.4	$1\text{e}+0.7$	0.36	1.00	0.71	0.50	0.80	0.60

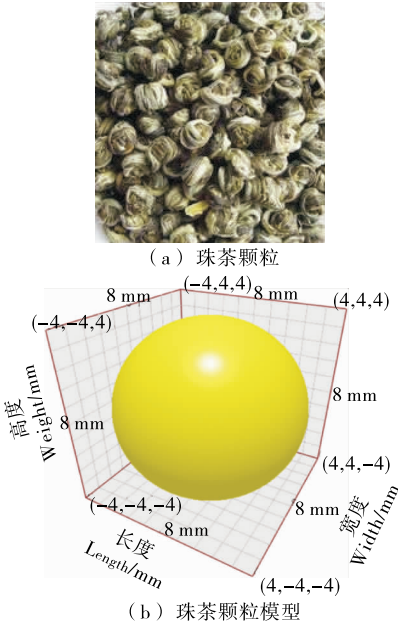


图 4 珠茶颗粒模型建模

Figure 4 Tea particle model modeling

3.2 双锅曲毫机运动仿真

3.2.1 建立颗粒工厂 定义好的茶叶颗粒在指定的虚拟平面表面生成,此虚拟平面位于炒锅正上方。选择生成茶叶颗粒的数为 1 000,每秒钟生成 500 个茶叶颗粒,开始时间为 $1\text{e}-12\text{ s}$,EDEM 在仿真过程中记录数据的时间间隔为 0.01 s ^[18],如图 5 所示。

3.2.2 设置仿真时间和网格大小 EDEM 仿真的时间步长一般为瑞利时间步长的 30%。设置仿真时间、数据写出频率和仿真网格大小,相关设置:设置仿真总时长 10 s;

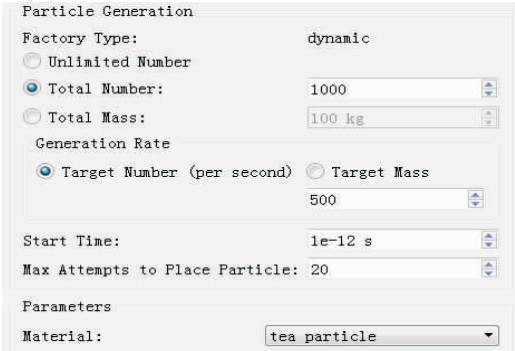


图 5 颗粒工厂参数设置

Figure 5 Particle factory parameter settings

仿真网格大小设为 $2R_{\min}$,然后运行仿真^[19-20]。为了减少仿真的计算时间,提高仿真效率,可以将仿真区域划分成多个小的网格使得计算模块只检测含有接触的部分。根据模型中的茶叶颗粒的半径度量网格尺寸的大小,一般情况下设置为最小颗粒半径的 2 倍^[21]。

3.3 仿真结果与分析

由双锅曲毫机的工作原理可知,茶叶颗粒在锅体内的做形过程关键在于珠茶颗粒在炒锅中能否均匀翻转^[22]。以 2 s 为界,2 s 前为茶叶颗粒填充过程,茶叶颗粒在颗粒工厂中生成并在重力的作用下落入双锅曲毫机的炒锅底部,并在底部逐渐堆积。2 s 后,茶叶颗粒在弧形炒板的推力作用下开始沿着锅壁运动。

以弧形炒板的摆幅和摆速为仿真因素,对双锅曲毫机珠茶做形的过程进行仿真。通过茶叶颗粒做形过程中的速度、作用力与时间的变化曲线,分析弧形炒板的摆幅和摆速在不同条件下对珠茶做形效果的影响(图 6)。

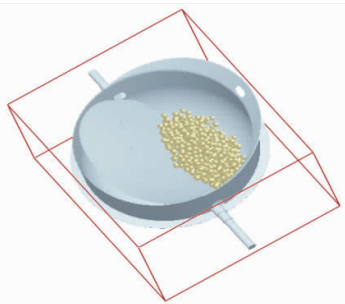


图 6 双锅曲毫机仿真模型

Figure 6 Simulation model of double-pan roasting machine

3.3.1 弧形炒板的摆幅对茶叶做形的影响 由图 7(a)可知,摆幅为 $70^{\circ}, 80^{\circ}, 90^{\circ}$ 时,茶叶颗粒的平均速度分别为 $0.70, 1.25, 1.15\text{ m/s}$ 。在双锅曲毫机的弧形炒板的摆速一定情况下,随着弧形炒板摆幅的增大,茶叶颗粒获得的平均速度先增大后减小,并且在弧形炒板的进程中,茶叶颗粒脱离弧形炒板接触时达到当前速度的最大值。由图 7(b)中可知,在摆幅为 $70^{\circ}, 80^{\circ}, 90^{\circ}$ 时,茶叶颗粒间的相互作用力平均值分别为 $0.48, 0.46, 1.15\text{ N}$ 。在双锅曲毫机的弧形炒板的摆速一定的情况下,随着弧形炒板摆幅的增大,茶叶颗粒间的相互作用力明显增大,颗粒间的挤压、碰撞作用显著;摆幅增大,茶叶颗粒获得的平均速度增大,茶叶颗粒在炒锅中的翻炒作用明显。摆幅过小,

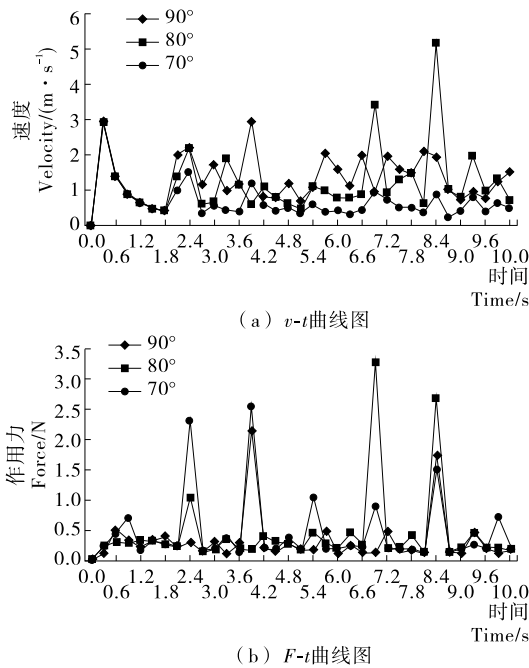


图 7 不同摆幅条件下茶叶颗粒的 $v-t$, $F-t$ 曲线
Figure 7 $v-t$, $F-t$ curves of tea particles under different swing amplitude conditions

茶叶颗粒获得的平均速度小,茶叶颗粒在炒锅中不易翻炒成形,摆幅过大,增大了炒板对茶叶颗粒的推力,茶叶颗粒间的碰撞、挤压作用加剧,碎茶率增大,不利于珠茶成形。

3.3.2 弧形炒板的摆速对茶叶做形的影响 由图 8(a)可知,在炒板的摆速为 75,85,95 r/min 时,茶叶颗粒的平均速度分别为 0.57,0.63,0.52 m/s。在双锅曲毫机的炒板的摆幅一定情况下,随着弧形炒板摆速的增大,茶叶颗粒获得的平均速度先增大后减小,并且在弧形炒板的进程过程中,茶叶颗粒脱离弧形炒板接触时达到当前速度的最大值。由图 8(b)可知,在炒板的摆速为 75,85,95 r/min 时,茶叶颗粒间的相互作用力平均值分别为 0.21,0.35,0.20 N。在双锅曲毫机的弧形炒板的摆幅一定的情况下,随着弧形炒板摆速的增大,茶叶颗粒间的作用力先增大后减小,颗粒的平均速度先增大后减小。随着弧形炒板摆速的增大,茶叶颗粒获得的平均速度增大,茶叶颗粒在炒锅中的翻炒作用明显,颗粒间的作用力增大,使得颗粒之间挤压、碰撞作用显著,有利于珠茶颗粒的成形。摆速过小,导致颗粒获得的平均速度过小,相互挤压、碰撞作用减弱,颗粒成形效果差。摆速过大,茶叶颗粒间的碰撞、挤压作用加剧,碎茶率增大,不利于珠茶炒制成形。

4 双锅曲毫机珠茶做形试验

在投叶量和炒锅温度都相同的条件下,为了进一步

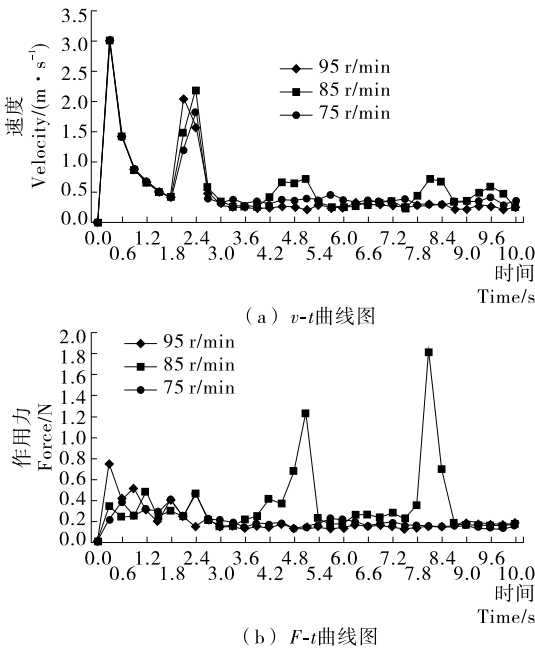


图 8 不同摆速条件下茶叶颗粒的 $v-t$, $F-t$ 曲线
Figure 8 $v-t$, $F-t$ curves of tea particles under different swing speed conditions

验证双锅曲毫机中炒板的摆速和摆幅对茶叶做形效果的影响,结合单因素试验,选择炒板摆幅、炒板摆速为试验因素,以碎茶率和成形率作为指标,采用二因素三水平正交试验^[23],因素水平表见表 3,每个序号对应的试验重复 3 次,选取平均值,结果及分析见表 4。

在碎茶率指标上,比较极差的大小可得到: $R_B < R_A$,说明弧形炒板的摆速对碎茶率的影响比较显著。在成形率指标上,比较极差的大小可得到: $R_B < R_A$,说明弧形炒板的摆速对成形率的影响比较显著。

由表 4 可知,在碎茶率和成形率指标上,A、B 两个因素的最优水平都为 A_2B_2 ,即在弧形炒板的摆速为 85 r/min,弧形炒板的摆幅为 80°条件下,碎茶率为 6.5%,成形率为 91.1%,此时双锅曲毫机具有较好的成茶品质。

5 结论

(1) 运用 Solidworks 软件建立双锅曲毫机的 3D 几何模型,采用 EDEM 软件建立珠茶颗粒模型,以提高珠茶成形率和降低珠茶碎茶率为目标,运用 EDEM 软件对茶

表 3 正交试验因素水平

Table 3 Levels of factors in orthogonal test		
水平	A 摆速/(r·min ⁻¹)	B 摆幅/(°)
1	75	70
2	85	80
3	95	90

表 4 试验结果及其分析
Table 4 Test results and analysis %

序号	A	B	碎茶率	成形率
1	1	1	8.3	74.2
2	1	2	7.8	78.6
3	1	3	7.6	82.5
4	2	1	7.4	86.7
5	2	2	6.5	91.1
6	2	3	7.1	88.5
7	3	1	8.1	81.6
8	3	2	7.9	83.3
9	3	3	8.9	85.4
碎茶率	k_1	7.9	7.9	$\sum_{i=1}^6 k_i = 46.4$
	k_2	7.0	7.4	
	k_3	8.3	7.9	
	R_1	1.3	0.5	
成形率	y_1	78.4	80.8	$\sum_{i=1}^6 y_i = 501.2$
	y_2	88.8	84.3	
	y_3	83.4	85.5	
	R_2	10.4	4.7	

叶颗粒在炒板的不同摆幅和摆速下进行仿真,得到茶叶颗粒的运动学和动力学曲线图。为了验证仿真结果的正确性,设计了二因素三水平的正交试验,结果表明:珠茶做形品质的主要影响因素依次为摆速和摆幅,在双锅曲毫机的弧形炒板摆速为 85 r/min、摆幅为 80°时,茶叶颗粒的成形率为 91.1%,碎茶率为 6.5%,仿真结果与正交试验结果基本一致。

(2) 本试验采用 Solidworks 软件建立的双锅曲毫机几何模型及 EDEM 软件建立的珠茶颗粒模型可以较为精确地分析珠茶在炒锅中的运动过程,为双锅曲毫机及相似茶机的设计提供了理论借鉴。

(3) 考虑到目前双锅曲毫机已经标准化,本文以 60 型双锅曲毫机为研究对象,并未考虑炒锅直径和炒板曲率对于珠茶成形的影响,在今后的研究中可以针对以上参数进一步对双锅曲毫机进行优化设计。

参考文献

[1] 安徽农学院. 制茶学[M]. 合肥: 中国农业出版社, 1989: 80-83.
[2] 权启爱, 姚作为. 我国珠茶炒干机的研制和发展[J]. 中国茶叶, 2018, 40(1): 15-19.
[3] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117-121.
[4] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2):

109-114.
[5] 王倩, 李尚庆, 范阳阳, 等. 基于 Pro/E 的茶叶双锅曲毫炒干机等的虚拟装配设计[J]. 农机化研究, 2013, 35(5): 155-158.
[6] 赵章风, 任超, 郑劲松, 等. 球形茶炒制设备的做功效率与茶叶成形关系研究[J]. 茶叶科学, 2018, 38(5): 527-536.
[7] 申东, 牟春林, 何萍, 等. 不同投叶量对珠形茶造形技术的影响[J]. 贵州科学, 2012, 30(2): 62-66.
[8] 王润龙. 双锅曲毫炒干机加工绿茶技术[J]. 茶叶通讯, 2005(4): 50-51.
[9] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真: 离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010: 9-11.
[10] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125-135.
[11] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM-CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43-51.
[12] 鹿芳媛, 马旭, 齐龙, 等. 基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 17-25.
[13] 陈进, 周韩, 赵湛, 等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79-83.
[14] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 27-35.
[15] ZHAO Tao, DAI Feng, XU Nu-wen, et al. A composite particle model for non-spherical particles in DEM simulations[J]. Granular Matter, 2015, 17(6): 763-774.
[16] FERELLECJ F, MCDOWELL G R. A simple method to create complex particle shapes for DEM[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2008, 3(3): 211-216.
[17] 朱志楠, 赵章风, 钟江, 等. 基于多相流耦合过程数值模拟的茶鲜叶离心式连续脱水设备参数模拟与优化[J]. 茶叶科学, 2017, 37(3): 280-289.
[18] 顿国强, 陈海涛, 冯夷宁, 等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 36-42.
[19] 赵章风, 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.
[20] CLEARY P W. Industrial particle flow modelling using discrete element method [J]. Engineering Computations, 2009, 26(6): 698-743.
[21] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 1-11.
[22] 潘科, 牟小秋, 崔鑫霞, 等. 投叶量对贵州珠形茶品质形成的影响[J]. 贵州科学, 2011, 29(6): 59-64.
[23] 盖钧镒. 实验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 96-104.