

炒青绿茶离散元仿真参数标定研究

王小勇^{1,2} 余志^{1,2} 张德^{1,2} 陈玉琼^{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: 针对炒青绿茶精制装备仿真分析中缺少准确的离散元仿真参数问题,以炒青绿茶为研究对象,标定炒青绿茶离散元仿真关键参数。通过斜面法与自由落体法对茶叶-茶叶和茶叶-钢板之间离散元参数进行研究,确定静摩擦因数、滚动摩擦因数和碰撞恢复系数的取值范围。通过提升法台架试验获得炒青绿茶实际堆积角,建立炒青绿茶离散元模型,模拟堆积角形成过程。以炒青绿茶实际堆积角为响应值,使用 Plackett - Burman 试验筛选出对炒青绿茶堆积角有显著影响的参数,通过最陡爬坡试验获取近似最佳响应范围,最后通过 Box - Behnken 获得影响显著参数最优组合。结果表明:当剪切模量为 2.930 MPa、茶叶-茶叶静摩擦因数为 0.771、茶叶-茶叶滚动摩擦因数为 0.133、茶叶-茶叶碰撞恢复系数为 0.354 时,炒青绿茶仿真堆积角为 30.12°,与实际堆积角误差为 1.59%,表明可以采用优化标定参数模拟炒青绿茶外部接触特征。

关键词: 炒青绿茶; 离散元法; 堆积角; 参数标定

中图分类号: S226.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0418-10

OSID:



Calibration of Simulation Parameters for Roasted Green Tea Based on Discrete Element Method

WANG Xiaoyong^{1,2} YU Zhi^{1,2} ZHANG De^{1,2} CHEN Yuqiong^{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: Aiming to lack of accurate discrete element simulation parameters in the simulation analysis of roasted green tea refining equipment, taking roasted green tea as the research object, the discrete element simulation parameters of roasted green tea were calibrated. The contact parameters between roasted green tea and materials were measured by using the inclined plane method and the free fall method to determine the range of values for static friction coefficient, rolling friction coefficient, and collision recovery coefficient. The actual stacking angle of roasted green tea was obtained through bench tests of the cylinder lifting method. A discrete element model of roasted green tea was established, and the formation process of stacking angle was simulated. Using the actual stacking angle of roasted green tea as the response value, the Plackett - Burman experiment was used to screen out the parameters that had a significant impact on the stacking angle of roasted green tea. The steepest climb test was used to approximate the optimal response range, and finally the optimal combination of significant influencing parameters was obtained through Box - Behnken. The results showed that when the shear modulus was 2.930 MPa, the coefficient of static friction between tea particles was 0.771, the coefficient of rolling friction between tea particles was 0.133, and the coefficient of collision recovery between tea particles was 0.354, the simulated stacking angle of roasted green tea was 30.12°, and the error with the actual stacking angle was 1.59%. The optimized calibration parameters can be used to simulate the external contact characteristics of roasted green tea.

Key words: roasted green tea; discrete element method; stacking angle; parameters calibration

收稿日期: 2023-11-27 修回日期: 2024-01-10

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

绿茶是中国生产和消费最广泛的茶类,炒青绿茶作为绿茶中的典型代表,在茶叶加工中占有重要地位,是采摘茶树嫩梢经过摊青、杀青、揉捻、干燥、精制等工序加工而成的产品^[1-2]。精制是炒青绿茶加工的重要工序,主要包括圆筛、抖筛、风选、拣梗和车色等步骤,研究茶叶与精制设备之间的工作机理,将有助于提升茶叶品质和设备的使用性能^[3]。使用传统方法很难分析茶叶在精制设备中的运动机理,而离散元法作为一种有效分析颗粒运动特性的方法,具有缩短研发周期、减少研发费用等优点,可用于研究茶叶颗粒群与精制装备之间复杂的碰撞与运动机理^[4-5]。通过离散元法进行仿真试验时,茶叶颗粒的几何尺寸、密度、含水率、泊松比等本征参数可以通过试验方法测量计算,但是茶叶颗粒之间、茶叶颗粒与设备之间的静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数等接触参数则需要通过参数标定来实现^[4]。

为了提高仿真模型的精确性,国内外众多学者已经对玉米^[6-8]、油茶籽^[9]、绿豆^[10]、甘蔗^[11]、辣椒^[12]、燕麦^[13]、苜蓿^[14]、胡麻籽^[15]等具有近似对称形状的农业物料进行离散元参数标定,相关研究可以为炒青绿茶离散元仿真提供依据。然而由于不同物料之间离散元参数具有较大差异,并且炒青绿茶的外形特征并非近似对称,须对其离散元仿真关键参数进行标定。

目前针对茶叶领域离散元方面的研究主要集中在茶叶加工过程运动特性和茶叶加工设备作业参数优化上,尚无对茶叶颗粒离散元仿真参数标定的研究。赵立华等^[16]通过构建茶叶颗粒离散元模型,研究了杀青过程中茶叶的受力和运动规律,确定了杀青滚筒卸叶板螺旋角和转速的最优值;秦宽等^[17]通过离散元法研究了连续复式茶叶理条机理条过程中热固耦合条件下的运动机理,并以此为理论依据确定锅槽往复运动速率、锅槽挡板角度、锅槽与水平面夹角的最佳工作参数;LUO 等^[18]通过离散元法研究了风速分布、风向对风选的影响,并基于试验结果确定最佳风选参数。离散元仿真过程中茶叶颗粒模型多为离散的球形^[19-20]或直条形^[21],但是经过加工的炒青绿茶并非规则的球形或者直条形,大部分呈现椭球形、卷曲 U 形或卷曲 O 形。因此有必要对颗粒之间形态差异较大、外形特征并非近似对称且多类型特征混合的炒青绿茶物料进行离散元仿真参数标定研究。

本文以炒青绿茶为研究对象,通过物理试验确

定其静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数范围,在 EDEM 软件中建立炒青绿茶离散元模型,以堆积角物理试验测得堆积角为目标值,通过 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box - Behnken 试验对炒青绿茶离散元仿真关键参数进行显著性分析及优化,以为炒青绿茶精制设备设计提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用湖北省恩施市伍家台村(109.53°E, 30.7°N,海拔 787 m)种植的茶叶,品种为当地群体种,鲜叶采摘为机械采摘,以一芽三叶为主,兼具一芽多叶、茶梗、单片以及其它茶类夹杂物;鲜叶采摘后根据茶树机采鲜叶加工技术的要求,确定工艺流程为:摊青(7 h,厚度为 10 cm 左右,含水率 70% 左右)一杀青(6CC - 120 型筒式炒干机,浙江绿峰机械有限公司,2 min,温度 300℃,含水率在 58% ~ 62%)一揉捻(6CRZ - 55 型茶叶揉捻机,浙江绿峰机械有限公司,空揉 2 ~ 3 min—轻压 6 ~ 8 min—重压 8 ~ 10 min—轻压 5 ~ 7 min—松压 2 ~ 3 min,含水率 58% 左右)一炒二青(6CC - 120 型筒式炒干机,浙江绿峰机械有限公司,温度 130℃,时间 15 ~ 20 min,含水率 40% 左右)一炒三青(6CC - 120 型筒式炒干机,浙江绿峰机械有限公司,温度 100℃,时间 40 ~ 50 min,含水率 20% 左右)一辉干(6CC - 120 型筒式炒干机,浙江绿峰机械有限公司,温度 90℃,时间 60 min,含水率 6% 左右)。成品炒青绿茶如图 1 所示。



图 1 炒青绿茶实物图

Fig. 1 Physical objects of roasted green tea

1.2 颗粒尺寸和密度

由于炒青绿茶外形差异较大,为确定炒青绿茶离散元仿真模型,将炒青绿茶外形特征根据卷曲程度分为 U 形、椭球形和 O 形(图 2)。针对椭球形颗粒,特征尺寸是指长轴长度(L_l)、短轴长度(W_l)、厚度(D_l);对 U 形颗粒而言,特征尺寸是指颗粒长度(L_u)、宽度(W_u)、粗细度(D_u);对 O 形颗粒而言,特征尺寸是指颗粒长度(L_o)、直径(W_o)、厚度(D_o)。

随机选取茶叶颗粒 1 000 粒,使用游标卡尺(精度 0.01 mm,量程 150 mm)分别测量每种形状颗粒的特征尺寸并统计每种形状颗粒所占的数量百分比,尺寸结果见表 1。椭圆形、U 形、O 形颗粒质量占比分别为 30.5%、38.9%、30.6%。

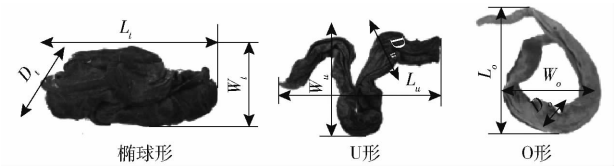


图 2 茶叶形状示意图
Fig.2 Diagram of tea shape

表 1 物料特征尺寸

参数	数值
L_t	7.14 ~ 15.35
W_t	4.74 ~ 6.49
D_t	2.22 ~ 4.55
L_u	12.45 ~ 21.47
W_u	6.01 ~ 12.31
D_u	1.52 ~ 3.72
L_o	9.98 ~ 17.30
W_o	6.86 ~ 13.02
D_o	1.01 ~ 3.62

考虑到茶叶颗粒的不规则性以及茶叶颗粒之间的间隙问题,采用粉碎后测量茶叶体积比直接测量茶叶体积将更加准确,因此采用粉碎法测量^[22]。高速粉碎机(FW80 型)以 10 000 r/min 的转速将茶叶进行粉碎,粉碎完毕后通过 200 目筛进行过滤,过滤后使用量筒(精度 0.000 2 L,量程 0.01 L)测量体积,使用电子天平(精度:0.1 mg,量程:120 g)测量质量,最后计算密度,重复试验 4 次,取平均值。计算式为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(1)

式中 ρ ——粉碎样品密度,kg/m³
 m ——粉碎样品质量,kg
 V ——粉碎样品体积,m³

最终得到茶叶颗粒密度为 558.39 kg/m³。

1.3 炒青绿茶仿真参数测量与分析

炒青绿茶接触参数包括静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数等。本文参考其它物料接触参数测量方法,采用斜面法测量物料间的静摩擦因数^[10],采用斜面滚动法测量物料与材料间的滚动摩擦因数^[13],采用自由落体法测量物料间的碰撞恢复系数^[9]。

1.3.1 静摩擦因数

采用斜面法测量茶叶-茶叶静摩擦因数以及茶叶-钢板静摩擦因数,试验装置如图 3 所示。茶叶

在斜面上主要受力有自身重力 G 、斜面的支持力 N 以及摩擦力 f ,将重力分解为平行于斜面方向和垂直于斜面方向的分力 F_1 、 F_2 ,随着倾斜角的不断增大,当平行于斜面方向分力 F_1 与摩擦力 f 相等时,茶叶开始出现沿斜面向下滑动趋势。静摩擦因数计算式为

$$\mu_s = \tan \theta$$

(2)

式中 μ_s ——茶叶静摩擦因数
 θ ——斜面与水平面夹角,(°)

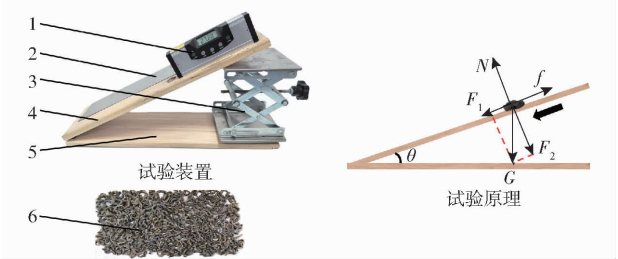


图 3 物料静摩擦因数测量试验装置

Fig.3 Test platform of static friction coefficient

1. 数显角度仪 2. 接触钢板 3. 升降台 4. 移动板 5. 固定板
6. 茶叶种群板

测量茶叶-钢板静摩擦因数时,将 450 mm × 85 mm × 0.75 mm 的钢板和数显角度仪(成都市三和量具有限公司,量程:4 × 90°,精度 0.05°)固定在倾斜木板上,倾斜木板下方放置一升降台,将待测样品放置在钢板上,然后缓慢旋转升降台旋钮,提升倾斜木板,待待测样品出现滑动趋势时停止旋转旋钮,通过数显角度仪记录此刻倾斜木板提升角度。测量茶叶-茶叶静摩擦因数时,将茶叶粘贴在尺寸为 190 mm × 155 mm × 0.75 mm 的钢板上,将茶叶种群板固定在倾斜木板,同样旋转升降台旋钮,提升倾斜木板,待茶叶出现向下运动趋势时停止旋转旋钮,记录该时刻倾斜木板角度。考虑到茶叶本身之间的差异,随机选取茶叶 20 粒,每次放置在钢板或茶叶种群板上的位置各不相同,茶叶-茶叶静摩擦因数以及茶叶-钢板静摩擦因数如表 2 所示。

表 2 材料之间接触参数

参数	数值
茶叶-钢板静摩擦因数	0.456 ~ 0.674
茶叶-茶叶静摩擦因数	0.700 ~ 0.933
茶叶-钢板碰撞恢复系数	0.226 ~ 0.450
茶叶-茶叶碰撞恢复系数	0.252 ~ 0.362
茶叶-钢板滚动摩擦因数	0.133 ~ 0.223
茶叶-茶叶滚动摩擦因数 ^[18,23-30]	0.100 ~ 0.200

1.3.2 碰撞恢复系数

采用自由落体法测量茶叶-茶叶碰撞恢复系数,如图 4 所示。

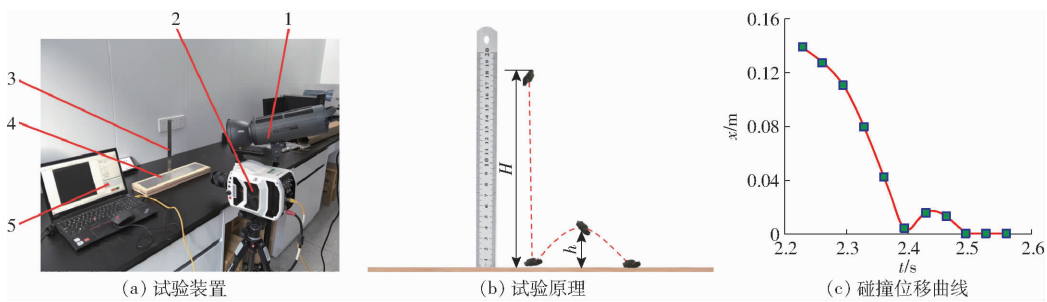


图 4 碰撞恢复系数测量过程

Fig. 4 Measurement process of recovery coefficient

1. 光源 2. 高速摄像机 3. 钢尺 4. 接触钢板 5. 计算机

测试装置由钢尺、接触钢板、茶叶种群板、高速摄像机(型号:Phantom V1840,分辨率:2 048 像素 × 1 952 像素,最高拍摄速率:233 380 f/s)等组成,钢尺为物理试验影像分析软件 Tracker 中的标杆。考虑到茶叶具有离散的颗粒特性,将待测样品简化成质点,茶叶种群板水平放置,令待测样品从高度 H 以速度 0 m/s 自由下落,待测样品与茶叶种群板接触后开始反弹,通过摄像机记录待测样品反弹后高度,最后由物理试验软件 Tracker 选择 10 个最接近竖直方向的轨迹记录获取碰撞位移曲线,通过碰撞位移曲线获得待测样品反弹高度 h 。待测样品与茶叶种群板接触碰撞开始到产生最大压缩时刻的压缩冲量为 I_1 ,此时刻待测样品速度为 v_1 ;从最大压缩到脱离茶叶种群板表面时刻恢复冲量为 I_2 ,此时刻待测样品速度为 v_2 ,由于碰撞前后茶叶种群板速度为零,则根据动量定理,碰撞恢复系数可以表示为

$$e = \frac{I_2}{I_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}} \tag{3}$$

式中 e ——物料碰撞恢复系数

测量茶叶-钢板碰撞恢复系数采用同样方法,只是将茶叶种群板替换成钢板即可,每组试验重复 10 次,通过公式(3)计算茶叶-钢板碰撞恢复系数,茶叶-茶叶碰撞恢复系数以及茶叶-钢板碰撞恢复系数如表 2 所示。

1.3.3 滚动摩擦因数

采用斜面滚动法测定茶叶-钢板滚动摩擦因数,如图 5 所示。测试装置由水平钢板、倾斜钢板以及支架组成,通过预试验得出倾斜钢板倾斜角 α 为 33° 时效果较好。将待测样品放置倾斜钢板上,位置为沿倾斜面方向距离 X 处, X 为 22.5 mm 。令待测样品以初始速度为零开始向下滚动,当待测样品滚落至水平钢板后静止,测量待测样品在水平钢板上运动距离 L ,根据能量守恒可得滚动摩擦因数 μ_k 计算公式为

$$\mu_k = \frac{X \sin \alpha}{X \cos \alpha + L} \tag{4}$$

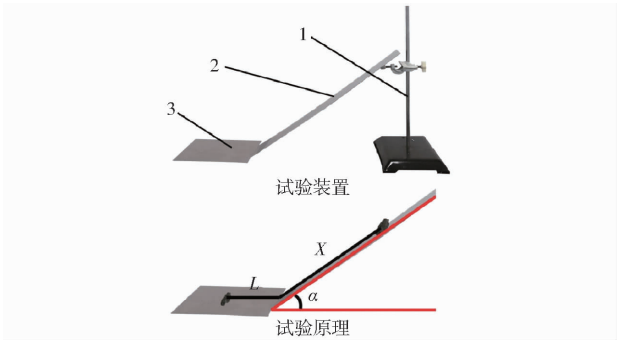


图 5 物料滚动摩擦因数测量试验装置

Fig. 5 Test platform of rolling friction coefficient

1. 支架 2. 倾斜钢板 3. 水平钢板

同样考虑到茶叶颗粒外形的不规则性,重复试验 20 次,茶叶-钢板滚动摩擦因数如表 2 所示。茶叶-茶叶滚动摩擦因数测量较为困难,因此通过查阅文献[18,27]初步确定茶叶-茶叶滚动摩擦因数范围为 $0.1 \sim 0.2$ 。

1.4 剪切模量与泊松比

剪切模量表征材料抵抗切应变的能力,泊松比表征材料在拉伸或压缩时横向收缩或膨胀的程度,剪切模量与泊松比之间的关系可以表示为

$$K = \frac{E}{2(1 + \mu)} \tag{5}$$

式中 K ——茶叶剪切模量,MPa

E ——茶叶弹性模量,MPa

μ ——茶叶泊松比

关于茶叶颗粒离散元标定研究较少,考虑到不同茶叶颗粒泊松比与剪切模量均不相同,因此本文在预试验的基础上参照文献[18,23-30]确定炒青绿茶泊松比与剪切模量取值范围为 $0.3 \sim 0.5$ 和 $2.50 \sim 3.00\text{ MPa}$ 。

1.5 仿真试验

炒青绿茶外形非对称性,通过试验法测量物料之间的滚动摩擦因数较为困难,因此本文采用仿真逼近方法标定茶叶的滚动摩擦因数。通过茶叶堆积试验得到物料的堆积角,然后利用上文物理试验得到的参数范围进行茶叶堆积角仿真试验,调整茶叶

滚动摩擦因数使得仿真堆积角逼近茶叶本身的堆积角,从而确定茶叶滚动摩擦因数。

1.5.1 实际堆积角测量

为了获得精确的茶叶滚动摩擦因数,采用圆筒提升法进行茶叶堆积角试验。按照比例选取茶叶颗粒800粒,试验时将圆筒垂直置于水平钢板上,圆筒内径为70 mm,高度为240 mm。分别将茶叶放入圆筒中,

以速度0.1 m/s垂直于平面缓慢抬起圆筒,茶叶在重力作用下开始下落,当物料停止运动时,在形成的圆锥体正面和侧面两个方向分别拍照。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,求得物料轮廓倾角,每组试验重复3次,共获取6次数据,最终得到炒青绿茶堆积角为29.65°,实际堆积角轮廓提取过程如图6所示。

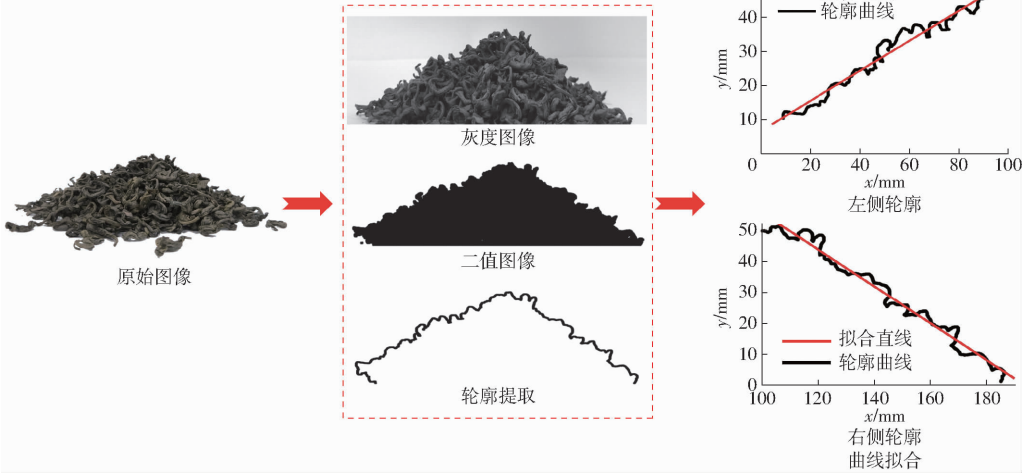


图6 实际堆积角轮廓提取
Fig.6 Image processing of stacking angle

1.5.2 茶叶颗粒离散元模型建立

茶叶属于离散颗粒物料,离散元法已在茶叶杀青^[16]、理条^[17,21]、干燥^[19-20]和筛分^[26-27]等茶叶加工工序中得到应用。考虑到炒青绿茶外形特点,无法使用单个颗粒对其完成建模。为了准确建立炒青绿茶离散元模型,结合测量数据,利用 Solidworks 软件建立炒青绿茶三维模型。对三维模型进行网格划分后导入到 EDEM 软件中,考虑离散元仿真参数标定的效率和精确性,采用多球体自动填充建模方式对样品模型快速填充,然后手动修改,炒青绿茶颗粒实物图和离散元模型如图7所示。考虑到茶叶颗粒之间的粘附力较小,可以忽略,因此茶叶颗粒之间的

接触模型选择 Hertz – Mindlin (no Slip) 接触力学模型。参数标定试验过程中不仅要考虑茶叶之间物料接触,还要考虑茶叶和装备材料之间接触。本研究装备接触材料选用常见的钢材,茶叶与接触材料的本征参数如表3所示。

表3 茶叶和钢板本征参数		
Tab.3 Intrinsic parameters of tea and steel plate		
参数	茶叶	钢板
密度/(kg·m ⁻³)	558.39	7 850
泊松比	0.3~0.5	0.3
剪切模量/MPa	2.50~3.00	7.80×10 ⁴

在离散元仿真模型中,建立与实际试验相同的钢管,在钢管内部以动态方式生成800个颗粒,当颗粒静置平稳后以速度0.1 m/s提升钢管;仿真时间为3 s,时间步长为瑞利步长的30%,网格尺寸为颗粒最小半径的10倍,EDEM 仿真试验结果如图8所示。

1.5.3 Plackett – Burman 试验

通过 Design-Expert 软件进行 Plackett – Burman 试验,以炒青绿茶堆积角为响应值,选择泊松比、剪切模量、茶叶-茶叶静摩擦因数、茶叶-茶叶滚动摩擦因数、茶叶-茶叶碰撞恢复系数、茶叶-钢板静摩擦因数、茶叶-钢板滚动摩擦因数和茶叶-钢板碰撞恢复系数8个因素进行 Plackett – Burman 试

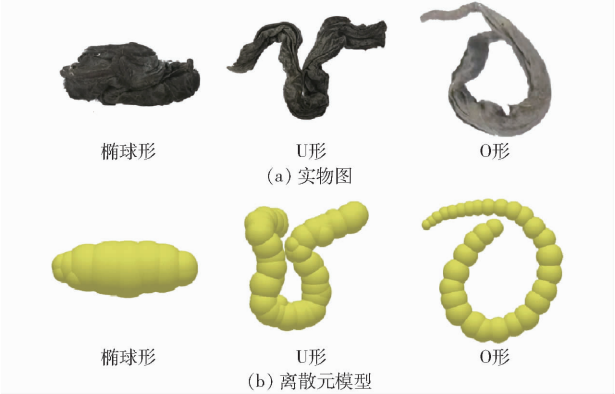


图7 炒青绿茶实物图和离散元模型
Fig.7 Physical objects and discrete element model
of roasted green tea

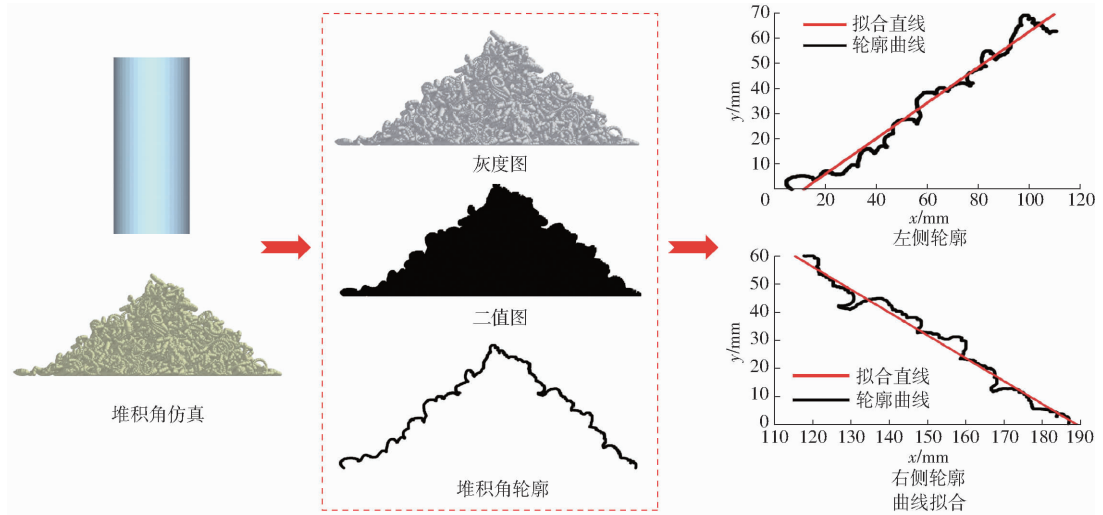


图 8 堆积角仿真试验

Fig. 8 Simulation test of repose angle

验,筛选出对炒青绿茶堆积角有显著影响的参数。结合前期参数试验和参考文献[11-12],8个参数范围值均取最大值和最小值2个水平,编码如表4所示。仿真试验采用与实际同样的方式提取图像轮廓并拟合求物料堆积角,分别沿 x 、 y 方向对茶叶堆积角进行图像采集,测量堆积物料左、右侧堆积角数值,总共4个数值,取平均值并计算与实际堆积角误差。仿真试验堆积角轮廓提取结果如图8所示。

表 4 因素编码

Tab. 4 Factors codes

参数	编码	
	-1	1
泊松比 X_1	0.3	0.5
剪切模量 X_2 /MPa	2.50	3.00
茶叶-茶叶静摩擦因数 X_3	0.700	0.933
茶叶-茶叶滚动摩擦因数 X_4	0.100	0.200
茶叶-茶叶碰撞恢复系数 X_5	0.252	0.362
茶叶-钢板静摩擦因数 X_6	0.456	0.674
茶叶-钢板滚动摩擦因数 X_7	0.133	0.223
茶叶-钢板碰撞恢复系数 X_8	0.226	0.450

1.5.4 最陡爬坡试验

结合 Plackett – Burman 试验筛选出对炒青绿茶堆积角有显著影响的参数,进行最陡爬坡试验,快速确定最佳参数区间与上升路径方向,步长根据参数区间进行确认,其它非显著影响参数取平均值。

1.5.5 Box – Behnken 试验

结合最陡爬坡试验确认的最佳参数区间进行 Box – Behnken 试验,对结果进行响应面分析,选择显著影响参数进行试验,其它非显著影响参数取平均值,并建立显著性响应因子与响应值之间的二阶回归方程,最终找到具有显著影响参数中最接近实

际堆积角最优参数组合。

2 结果与分析

2.1 Plackett – Burman 试验结果

Plackett – Burman 试验结果如表 5 所示。使用 Design-Expert 对 Plackett – Burman 试验结果进行显著性分析,结果如表 6 所示。根据贡献率大小对参数进行显著性排序,筛选出 4 个对炒青绿茶堆积角影响显著性参数,分别为剪切模量 X_2 、茶叶-茶叶静摩擦因数 X_3 、茶叶-茶叶滚动摩擦因数 X_4 、茶叶-茶叶碰撞恢复系数 X_5 。通过帕累托图(图 9)不仅可以看到各因子显著性排序,还可以得到各因子的正负效应,因此在设计最抖爬坡试验时,茶叶-茶叶滚动摩擦因数 X_4 和茶叶-茶叶静摩擦因数 X_3 是上升路径,剪切模量 X_2 和茶叶-茶叶碰撞恢复系数 X_5 是下降路径。

2.2 最陡爬坡试验结果

根据 Plackett – Burman 试验筛选出 4 个对茶叶堆积角有显著性影响的参数进行最陡爬坡试验,其中对堆积角显著性影响较小的参数取值: X_1 为 0.4、 X_6 为 0.565、 X_7 为 0.178、 X_8 为 0.338。最后通过仿真堆积角与试验堆积角相对误差作为评价指标来获取显著性参数的最佳范围,试验方案及结果如表 7 所示。随着 X_2 和 X_5 的减小,以及 X_3 和 X_4 的增大,炒青绿茶仿真堆积角与试验堆积角的误差呈现先减小后增大趋势。试验方案 2 相对误差最小,表明试验方案 2 接近最优值,因此选取剪切模量 2.90 MPa、茶叶-茶叶静摩擦因数 0.746 6、茶叶-茶叶滚动摩擦因数 0.12、茶叶-茶叶碰撞恢复系数 0.34 作为后续 Box – Behnken 试验的中心点,试验方案 1 与试验方案 3 作为低水平与高水平。

表 5 茶叶 Plackett – Burman 试验结果
Tab.5 Plackett – Burman test results of tea

序号	因素								茶叶堆积角
	X_1	X_2/MPa	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	$\theta/(\text{°})$
1	0.5	3.00	0.700	0.200	0.362	0.674	0.133	0.226	31.35
2	0.3	3.00	0.933	0.100	0.362	0.674	0.223	0.226	28.91
3	0.5	2.50	0.933	0.200	0.252	0.674	0.223	0.450	41.70
4	0.3	3.00	0.700	0.200	0.362	0.456	0.223	0.450	29.97
5	0.3	2.50	0.933	0.100	0.362	0.674	0.133	0.450	33.43
6	0.3	2.50	0.700	0.200	0.252	0.674	0.223	0.226	38.34
7	0.5	2.50	0.700	0.100	0.362	0.456	0.223	0.450	29.74
8	0.5	3.00	0.700	0.100	0.252	0.674	0.133	0.450	28.43
9	0.5	3.00	0.933	0.100	0.252	0.456	0.223	0.226	30.75
10	0.3	3.00	0.933	0.200	0.252	0.456	0.133	0.450	34.68
11	0.5	2.50	0.933	0.200	0.362	0.456	0.133	0.226	39.47
12	0.3	2.50	0.700	0.100	0.252	0.456	0.133	0.226	32.62

表 6 Plackett – Burman 试验参数显著性分析
Tab.6 Significance analysis of Plackett – Burman test parameters

参数	效应值	均方和	贡献率/%	显著性排序
X_1	0.75	1.70	0.78	6
X_2	-5.05	76.46	35.22	2
X_3	3.28	32.31	14.88	3
X_4	5.46	89.27	41.12	1
X_5	-2.09	13.13	6.05	4
X_6	0.99	2.95	1.36	5
X_7	0.088	0.023	0.011	8
X_8	-0.43	0.55	0.25	7

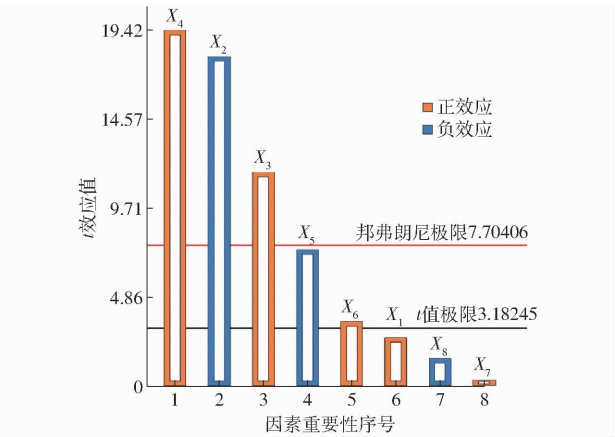


图 9 Plackett – Burman 试验帕累托图

表 7 最陡爬坡试验设计方案与结果
Tab.7 The steepest climbing test design scheme and results

序号	因素				堆积角/	相对误差/%
	X_2/MPa	X_3	X_4	X_5	(°)	
1	3.00	0.700 0	0.10	0.362	32.26	8.80
2	2.90	0.746 6	0.12	0.340	31.05	4.72
3	2.80	0.793 2	0.14	0.318	32.28	8.87
4	2.70	0.839 8	0.16	0.296	38.16	28.70
5	2.60	0.886 4	0.18	0.274	39.73	34.00
6	2.50	0.933 0	0.20	0.252	44.39	49.71

$$\begin{aligned} \theta = & 4\,071.42 - 1\,491.28X_2 - 2\,692.34X_3 + \\ & 346.12X_4 - 5\,324.86X_5 + 334.23X_2X_3 - \\ & 553.75X_2X_4 + 727.27X_2X_5 + 879.83X_3X_4 + \\ & 1\,236.34X_3X_5 + 3\,056.82X_4X_5 + 183.39X_2^2 + \\ & 805.37X_3^2 - 1\,424.58X_4^2 + 280.92X_5^2 \end{aligned} \quad (6)$$

由表 9 可知,茶叶-茶叶滚动摩擦因数 X_4 对炒青绿茶堆积角的影响极显著,各因素对炒青绿茶堆积角的影响由大到小为:茶叶-茶叶滚动摩擦因数、剪切模量、茶叶-茶叶静摩擦因数、茶叶-茶叶碰撞恢复系数,结果与 Plackett – Burman 试验显著性排序相同。

由表 9 可知,4 个因素之间交互作用对炒青绿茶堆积角的影响由大到小为 X_2X_5 、 X_2X_3 、 X_4X_5 、 X_3X_5 、 X_2X_4 、 X_3X_4 。

2.4 堆积角参数优化及验证

Box – Behnken 试验结果表明,各个因素之间存在交互作用,为获取最佳的炒青绿茶堆积角参数组合,以实际堆积角平均值 29.65° 为优化目标,采用 Design-Expert 软件进行求解,目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \theta = 29.65^\circ \\ \text{s. t.} \begin{cases} 2.80\text{ MPa} \leq X_2 \leq 3.00\text{ MPa} \\ 0.700\,0 \leq X_3 \leq 0.793\,2 \\ 0.10 \leq X_4 \leq 0.14 \\ 0.318 \leq X_5 \leq 0.362 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 Box – Behnken 试验结果

进一步采用 Box – Behnken 试验进行响应面分析,参考 Plackett – Burman 试验的显著性参数和最陡爬坡试验筛选出的中心点,进行四因素三水平响应面试验,试验设计方案与结果如表 8 所示。根据试验结果,得到堆积角对 4 个显著性因素的二次多元回归方程为

表 8 Box – Behnken 试验设计与结果

Tab.8 Box – Behnken experiment design and results

序号	因素				堆积角/ (°)
	X_2 /MPa	X_3	X_4	X_5	
1	2. 80	0. 746 6	0. 12	0. 362	31. 20
2	3. 00	0. 746 6	0. 12	0. 318	33. 45
3	2. 90	0. 793 2	0. 12	0. 362	34. 81
4	2. 90	0. 746 6	0. 12	0. 340	30. 38
5	3. 00	0. 700 0	0. 12	0. 340	33. 62
6	2. 90	0. 793 2	0. 14	0. 340	35. 33
7	2. 90	0. 700 0	0. 12	0. 362	34. 18
8	2. 90	0. 746 6	0. 14	0. 362	36. 56
9	3. 00	0. 746 6	0. 10	0. 340	31. 55
10	2. 90	0. 746 6	0. 12	0. 340	33. 82
11	2. 90	0. 700 0	0. 10	0. 340	30. 11
12	2. 90	0. 700 0	0. 14	0. 340	31. 44
13	3. 00	0. 746 6	0. 14	0. 340	33. 45
14	2. 90	0. 700 0	0. 12	0. 318	37. 14
15	2. 90	0. 746 6	0. 10	0. 318	29. 70
16	2. 80	0. 746 6	0. 12	0. 318	36. 69
17	2. 90	0. 793 2	0. 12	0. 318	32. 70
18	2. 80	0. 793 2	0. 12	0. 340	32. 40
19	2. 90	0. 746 6	0. 14	0. 318	31. 27
20	2. 80	0. 700 0	0. 12	0. 340	34. 34
21	2. 90	0. 793 2	0. 10	0. 340	30. 72
22	2. 90	0. 746 6	0. 12	0. 340	29. 02
23	2. 90	0. 746 6	0. 12	0. 340	32. 16
24	2. 90	0. 746 6	0. 10	0. 362	29. 61
25	3. 00	0. 746 6	0. 12	0. 362	34. 36
26	2. 90	0. 746 6	0. 12	0. 340	30. 11
27	2. 80	0. 746 6	0. 14	0. 340	36. 37
28	3. 00	0. 793 2	0. 12	0. 340	37. 91
29	2. 80	0. 746 6	0. 10	0. 340	30. 04

表 9 方差分析

Tab.9 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	136. 23	14	9. 73	3. 01	0. 024 1 *
X_2	0. 91	1	0. 91	0. 28	0. 604 8
X_3	0. 77	1	0. 77	0. 24	0. 633 3
X_4	42. 9	1	42. 9	13. 25	0. 002 7 **
X_5	0. 004 408	1	0. 004 408	0. 001 362	0. 971 1
X_2X_3	9. 7	1	9. 7	3	0. 105 4
X_2X_4	4. 91	1	4. 91	1. 52	0. 238 6
X_2X_5	10. 24	1	10. 24	3. 16	0. 097
X_3X_4	2. 69	1	2. 69	0. 83	0. 377 5
X_3X_5	6. 43	1	6. 43	1. 99	0. 180 7
X_4X_5	7. 24	1	7. 24	2. 24	0. 157 1
X_2^2	21. 82	1	21. 82	6. 74	0. 021 1 *
X_3^2	19. 84	1	19. 84	6. 13	0. 026 7 *
X_4^2	2. 11	1	2. 11	0. 65	0. 433 4
X_5^2	12. 18	1	12. 18	3. 76	0. 072 9
残差	45. 32	14	3. 24		
失拟项	30. 97	10	3. 1	0. 86	0. 614 9
纯误差	14. 35	4	3. 59		
总和	181. 55	28			

注：* 表示影响显著 ($0. 01 \leq P \leq 0. 05$)，** 表示影响极显著 ($P < 0. 01$)。

优化结果显示当剪切模量为 2. 930 MPa、茶叶-茶叶静摩擦因数为 0. 771、茶叶-茶叶滚动摩擦因数为 0. 133、茶叶-茶叶碰撞恢复系数为 0. 354 时堆积角与实际最为接近。将优化后的参数输入离散元软件 EDEM 中进行炒青绿茶堆积角仿真,将所得结果与实际结果进行对比,如图 10 所示,炒青绿茶仿真堆积角为 30. 12°, 与实际堆积角误差为 1. 59%,表明可以采用优化标定参数进行炒青绿茶离散元仿真。



图 10 实际堆积角与仿真堆积角结果对比

Fig. 10 Comparison of actual and simulated stacking angle results

3 讨论

影响炒青绿茶参数标定的因素有炒青绿茶离散元模型、堆积角测量方法和参数优化方法。考虑到炒青绿茶外形特征的非对称性和多样性,建立炒青绿茶离散元模型,依据卷曲程度将模型分为 U 形、椭球形和 O 形 3 类,然后根据特征尺寸进行测量,根据仿真结果可知,3 类离散元模型可以准确模拟炒青绿茶堆积角形成过程;堆积角测量过程中通过图像处理技术提取堆积角轮廓进行拟合,可以显著降低人为测量误差,有助于提高炒青绿茶参数标定准确性;在参数优化方法上采用响应面法对仿真参数进行优化,油茶籽^[9]、绿豆^[10]、燕麦^[13]、苜蓿^[14]等其它颗粒离散元参数标定也采用响应面法进行优化,该方法优化后的参数具有较好的可靠性和准确性。然而参数标定中仅进行了堆积角测试,接下来将结合旋转滚筒、垂直振动等仿真模型开展仿真试验和实际现场试验,验证炒青绿茶离散元仿真关键参数的真实性和可靠性。

研究中标定的炒青绿茶 4 个显著性影响参数分别为剪切模量、茶叶-茶叶静摩擦因数、茶叶-茶叶滚动摩擦因数、茶叶-茶叶碰撞恢复系数,对比前人关于离散元参数标定的相关研究发现,在油茶籽^[9]、绿豆^[10]、甘蔗^[11]、苜蓿^[14]等物料参数标定中,物料间静摩擦因数、物料间滚动摩擦因数都对堆积角具有显著性影响,因此在后续的离散元仿真参数标定过程中,重点研究物料间静摩擦因数和物料间滚动摩擦因数的变化规律。

4 结论

(1)针对炒青绿茶进行离散元仿真参数标定,

Plackett – Burman 结果表明对炒青绿茶堆积角具有显著影响的参数为剪切模量、茶叶–茶叶静摩擦因数、茶叶–茶叶滚动摩擦因数、茶叶–茶叶碰撞恢复系数,其它仿真参数对炒青绿茶堆积角没有显著影响。

(2)最陡爬坡试验和 Box – Behnken 响应面试验结果表明,炒青绿茶二次多元回归模型的可靠性较好,通过回归模型得到对炒青绿茶堆积角具有显

著影响参数组合:剪切模量为 2.930 MPa、茶叶–茶叶静摩擦因数为 0.771、茶叶–茶叶滚动摩擦因数为 0.133、茶叶–茶叶碰撞恢复系数为 0.354。

(3)通过标定参数进行 EDEM 仿真试验,炒青绿茶仿真堆积角为 30.12°,与实际堆积角误差为 1.59%,可以采用优化标定参数模拟炒青绿茶外部接触特征。

参 考 文 献

[1] WANG J Q,FU Y Q,CHEN J X,et al. Effects of baking treatment on the sensory quality and physicochemical properties of green tea with different processing methods[J]. Food Chemistry,2022,380:132217.

[2] 石亚丽,朱荫,马婉君,等. 名优炒青绿茶挥发性成分研究进展[J]. 茶叶科学, 2021, 41(3):285 – 301.
SHI Yali,ZHU Yin,MA Wanjun,et al. Research progress on the volatile compounds of premium roasted green tea[J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(3): 285 – 301. (in Chinese)

[3] 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)

[4] MA Huaqing,ZHOU Lianyong,LIU Zihan,et al. A review of recent development for the CFD – DEM investigations of non-spherical particles[J]. Powder Technology,2022, 412:117972.

[5] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报,2021,52(4):1 – 20.
ZENG Zhiwei,MA Xu,CAO Xiulong,et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):1 – 20. (in Chinese)

[6] FANG M,YU Z,ZHANG W,et al. Friction coefficient calibration of corn stalk particle mixtures using Plackett – Burman design and response surface methodology[J]. Powder Technology, 2021, 396: 731 – 742.

[7] SHI L R, ZHAO W Y, SUN W,et al. Analysis of the metering performance for typical shape maize seeds using DEM[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023,16(1):26 – 35.

[8] SHI L R, ZHAO W Y, YANG X P. Effects of typical corn kernel shapes on the forming of repose angle by DEM simulation[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022,15(2):248 – 255.

[9] 丁亭亭,李凯,郝伟,等. 基于 RSM 和 GA – BP – GA 优化的油茶籽仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2023,54(2):139 – 150.
DING Xinting,LI Kai,HAO Wei,et al. Calibration of simulation parameters of *Camellia oleifera* seeds based on RSM and GA – BP – GA optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 139 – 150. (in Chinese)

[10] 张胜伟,张瑞雨,陈天佑,等. 绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):71 – 79.
ZHANG Shengwei,ZHANG Ruiyu,CHEN Tianyou,et al. Calibration of simulation parameters of mung bean seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(3):71 – 79. (in Chinese)

[11] ZHONG J,TAO L,LI S,et al. Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete element[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2022, 203: 107428.

[12] DU C,HAN D,SONG Z,et al. Calibration of contact parameters for complex shaped fruits based on discrete element method: the case of pod pepper (*Capsicum annuum*) [J]. Biosystems Engineering, 2023, 226: 43 – 54.

[13] 廖洋洋,尤泳,王德成,等. 燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):14 – 22.
LIAO Yangyang,YOU Yong,WANG Decheng,et al. Parameter calibration and experiment of discrete element model for mixed seeds of oat and arrow pea [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):14 – 22. (in Chinese)

[14] 马文鹏,尤泳,王德成,等. 基于 RSM 和 NSGA – II 的苜蓿种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(8):136 – 144.
MA Wenpeng,YOU Yong,WANG Decheng,et al. Parameter calibration of alfalfa seed discrete element model based on RSM and NSGA – II [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):136 – 144. (in Chinese)

[15] 石林榕,马周泰,赵武云,等. 胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报,2019,35(20):25 – 33.
SHI Linrong,MA Zhoutai,ZHAO Wuyun,et al. Calibration of simulation parameters of flaxed seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 25 – 33. (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] 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.

[19] 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)

[20] 赵晨,曹成茂,葛俊,等.自动化茶叶炒干机的设计与性能试验[J].安徽农业大学学报, 2022, 49(5): 823-831.
ZHAO Chen,CAO Chengmao,GE Jun,et al. Design and performance test of automatic tea fryer[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2022, 49(5): 823-831. (in Chinese)

[21] BI H,JIA P,QIN K,et al. Optimization design of pot slot structure of tea de-enzyming and carding machine[J]. Agronomy, 2022, 12: 2937.

[22] ZHANG Jian, XIE Can, CAO Liewang, et al. Determination of physical and interaction parameters of green pepper (*Zanthoxylum armatum*): investigation of the mechanism of significant factors against the repose angle[J]. LWT—Food Science and Technology,2022,162: 113409.

[23] 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)

[24] 李兵.基于 EDEM 的茶叶滚筒杀青机参数优化及试验研究[J].中国茶叶加工,2021(3):24-33.
LI Bing. Parameter optimization and experimental research of tea cylinder fixation machine based on EDEM[J]. China Tea Processing, 2021(3): 24-33. (in Chinese)

[25] 李兵,李为宁,柏宣丙,等.基于 EDEM 的茶叶揉捻机参数优化及试验研究[J]. 茶叶科学, 2020, 40(3): 375-385.
LI Bing, LI Weining, BAI Xuanbing,et al. Parameter optimization and experimental study of tea twisting machine based on EDEM[J]. Journal of Tea Science, 2020, 40(3): 375-385. (in Chinese)

[26] 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)

[27] 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)

[28] ZHANG K, HE C, WANG W, et al. Optimization and experiment of hot air tea roasting machine based on CFD-DEM coupling[J]. INMATEH—Agricultural Engineering, 2022, 67(2):95-105.

[29] 李为宁,柏宣丙,李兵.滚筒式茶叶提香机结构参数优化[J].浙江农业学报,2020,32(2):348-358.
LI Weining,BAI Xuanbing,LI Bing. Optimization of structural parameters of drum type tea re-dryer[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2020,32(2): 348-358. (in Chinese)

[30] ZHANG X, ZHU X. Simulation and experiment on the falling pattern of fresh tea leaves based on discrete elements[J]. HortScience,2023,58(9):1057-1067.