

连续复式茶叶理条机优化设计与试验

秦 宽^{1,2} 步坤亭^{1,2} 沈周高^{3,4} 曹成茂^{1,2} 葛 俊^{1,2} 方梁菲^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 210036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 210036;

3. 安徽农业大学茶与食品科技学院, 合肥 210036; 4. 茶树生物学与资源利用国家重点实验室, 合肥 210036)

摘要: 针对绿茶加工杀青理条复式工序中,因茶叶理条动力学机理不明而导致成条效果不理想的问题,研究茶叶在连续复式理条机锅槽内茶叶与锅槽连续碰撞规律,建立茶叶在锅槽内滚动、抛撒、碰撞3个阶段的动力学模型,确定连续复式茶叶理条机的成条机理。根据茶叶在锅槽内的运动成形规律,优化斜U形锅槽,并利用 Rocky Dem 建立热固耦合下茶叶-锅槽相互作用的仿真模型,通过对茶叶平均速度及受力进行分析,确定了锅槽往复运动速率、锅槽挡板角度和锅槽与水平面夹角的最优工作参数。在最优参数确定的基础上,采用三因素三水平正交试验,确定实际工况下的最优参数组合,试验结果表明,当锅槽挡板角度为114.1°、锅槽往复运动速率为190.9 r/min、锅槽与水平面夹角为3.2°时,成条率为85.89%,碎茶率为1.70%,满足理条农艺要求。验证试验表明,在该最优结构与作业参数组合下,成条率、碎茶率分别为84.26%、1.79%,与优化结果相对误差在5%以内,表明优化结果的可靠性与精度。该研究可为茶叶理条成形机理与理条机关键参数优化提供参考。

关键词: 茶叶理条机; 动力学模型; 成形机理; Rocky Dem; 热固耦合仿真; 正交试验

中图分类号: S226.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)03-0382-12

OSID:



Optimization Design and Experiment of Continuous Compound Tea Leaf Barber

QIN Kuan^{1,2} BU Kunting^{1,2} SHEN Zhougao^{3,4} CAO Chengmao^{1,2} GE Jun^{1,2} FANG Liangfei^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 210036, China

2. Anhui Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Laboratory, Hefei 210036, China

3. College of Tea and Food Science & Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 210036, China

4. State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Resource Utilization, Hefei 210036, China)

Abstract: In response to the problem of unsatisfactory strip formation due to the unknown mechanism of tea strip kinetics in the green tea processing and strip-forming compound process, the continuous collision law between tea leaves and pot trough in the pot trough of continuous compound barber was studied, the kinetic model of rolling, throwing and collision of tea leaves in the pot trough in three stages was established, and the barring mechanism of continuous compound tea barber was determined. According to the law of forming the movement of tea leaves in the pot trough, the inclined U-shaped pot trough was optimized, and the simulation model of tea-leaf-pot trough interaction under thermosolid coupling was established by Rocky Dem, by analyzing the average velocity and force of tea leaves, the optimal working parameters of pot trough reciprocating motion velocity, angle of pot trough baffle and angle between pot trough and horizontal surface were determined. On the basis of the optimal parameters, a three-factor, three-level orthogonal test was conducted to determine the optimal combination of parameters under actual working conditions. The test results showed that when the angle of the pot baffle was 114.1°, the reciprocating motion velocity of the pot was 190.9 r/min, and the angle between the pot and the horizontal surface was 3.2°, the strip formation rate was 85.89% and the broken tea rate was 1.70%, which satisfied the agronomic requirements of strip management. The validation tests showed that with this optimal combination of structure and operating parameters, the rate of forming and breaking tea was

收稿日期: 2022-12-09 修回日期: 2023-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105239, 52075003, 52205509)和茶树生物学与资源利用国家重点实验室开放基金项目(SKLT0F20210121)

作者简介: 秦宽(1989—),男,副教授,博士,主要从事特色经济作物装备研究, E-mail: qinkuan@ahau.edu.cn

通信作者: 曹成茂(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事特色经济作物装备研究, E-mail: caochengmao@sina.com

84.26% and 1.79% , respectively , with the relative error within 5% from the optimized results , indicating the reliability and accuracy of the optimized results. The research result can provide a reference for the optimization of the key parameters of tea barring and forming mechanism and barring machine.

Key words: tea leaf barber; dynamical model; forming mechanism; Rocky Dem; thermosolid coupling simulation; orthogonal test

0 引言

2020 年我国绿茶产量为 1.8427×10^6 t,占茶叶总产量的 61.70% ,位居各类茶之首^[1-2]。理条是绿茶初步加工的重要工序,能够保留营养成分,提升香气和茶叶造形。传统手工制茶因手掌频繁接触茶叶且翻炒时茶叶受力不均等而影响茶叶品质,因此逐渐被机械制茶所替代^[3-4]。现有连续复式茶叶理条机可连续完成茶叶杀青理条工序,提高制茶效率,但在理条环节仍存在成条率低、碎茶率高、成形效果不佳的问题。因此,研究连续高效,成形好、碎茶率低的茶叶理条机械具有重要意义。

目前国内外学者已进行了茶叶加工及理条成形的相关研究。在茶叶加工成形方面,日本、印度尼西亚等国家多是利用揉捻机对茶叶进行塑形^[5-6]。ABHIRAM 等^[7]采用高效电机结合变速驱动器,提高红茶加工轧制机成形效率。王纯贤等^[8]研究茶叶理条机传动机构及建立压力角数学模型相关理论,结合仿真试验得到减振最佳参数。张远明^[9]提出双旋筒式茶叶理条机,外筒带动内筒以一定频率来回摆动,改变理条机运动形式来提高成条质量。黄金刚等^[10]设计新型茶叶理条机自动加压系统,加大茶叶在锅槽内理条过程中的挤压力,使茶叶塑形更加紧凑。田波平等^[11]研制了可调控、通用性好的针形名优茶做形理条机并分析曲线锅槽和加压软茶棒对茶叶加工过程的影响。李兵等^[12-14]运用蚁群、遗传等算法优化茶叶理条机传动参数及温控系统,提高理条机传动性能及温控精度。傅杰等^[15]利用模糊算法结合 PID 控制进行优化,使得茶叶理条机温度控制稳定可靠。

上述学者对茶叶理条机传动形式、温控精度等结构和作业参数进行了研究,来提高茶叶理条效果,研究多采用经验分析、动力学仿真或试验对比茶叶理条后的品质来进行优化改进。茶叶理条机的理条过程是茶叶在连续振动的热锅槽内,通过持续的滚动、抛撒、碰撞 3 个运动过程,完成茶叶的理条成形,因此茶叶运动过程的理条成形机理研究对理条质量至关重要。但目前对于茶叶在热锅槽内的理条运动机理研究较少,缺乏连续复式茶叶理条机结构与作业参数改进的理论支撑。

综上所述,本文研究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,并以此为理论依据优化连续复式茶叶理条机关键结构与运动参数,提高理条后茶叶成形质量。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

连续复式茶叶理条机由斜 U 形锅槽、进料斗、升降调节机构、机架、偏心轮、连杆、带轮减速机构、电加热装置、导向机构、出料斗等组成。整机由电机作为配套动力,锅槽安装于固定在机架上的两段式加热装置上方,并配有升降调节机构来调节锅槽与水平面倾角,整机三维结构如图 1 所示。

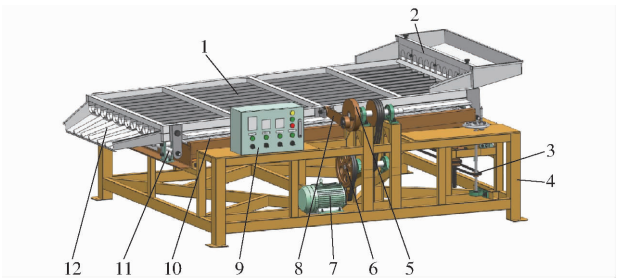


图 1 连续复式茶叶理条机主体结构图

Fig.1 Main structure diagram of continuous compound tea leaf barber

1. 斜 U 形锅槽 2. 进料斗 3. 升降调节机构 4. 机架 5. 偏心轮 6. 带轮减速机构 7. 电机 8. 连杆 9. 控制柜 10. 电加热装置 11. 导向机构 12. 出料斗

连续复式茶叶理条机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 000×1 950×1 000
锅槽尺寸(长×宽)/(mm×mm)	2 540×1 340
额定电压/V	380
配套动力/kW	1.1
生产率/(kg·h ⁻¹)	≥60

1.2 工作原理

连续复式茶叶理条机工作时通过电机提供动力,经偏心曲柄滑块机构将动力传递到锅槽,使其进行横向往复直线振动。待锅槽预热达到理条温度

后,茶叶由进料斗进入并由调节挡板控制其进料量。茶叶进入锅槽后,在锅槽的往复直线振动和锅槽与水平面倾角作用下进行螺旋前进运动,在运动过程中受锅槽内壁的滚动摩擦力、茶叶之间及茶叶与锅槽内壁碰撞的挤压力,使茶叶外形发生变化并逐渐形成条状,待锅槽内的茶叶全部由出料斗流出,完成一次茶叶理条工序。后续生产线上茶叶可通过控制上料机的速度,持续给进料斗送料,完成高效连续化茶叶理条。

2 茶叶-锅槽动力学模型建立

茶叶在锅槽带动下在锅槽内的运动主要分为3个阶段(图2):茶叶沿着锅槽内壁滚动、滑动阶段;当茶叶沿着锅槽内壁达到一定高度时离开锅槽内壁作抛撒运动阶段;茶叶落到另一侧锅槽内壁时发生的碰撞运动阶段。

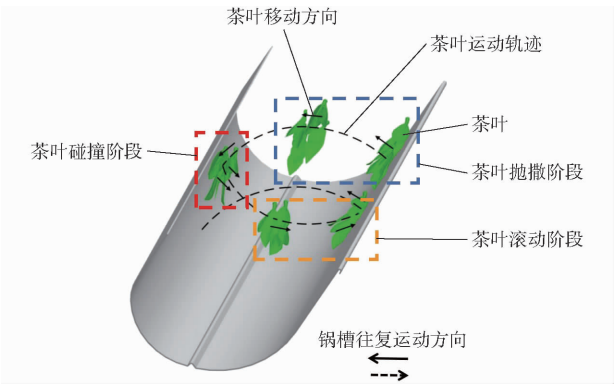


图2 锅槽内茶叶运动示意图
Fig. 2 Diagram of movement of tea leaves in pot trough

茶叶在理条过程中主要受到沿着锅槽内壁运动时的摩擦、茶叶与锅槽内壁碰撞时产生的切向挤压使茶叶从片状逐渐形成条状,茶叶间碰撞对成形影响较小。因为茶叶具有典型的颗粒离散特征^[16-18],故将茶叶颗粒看作质点,忽略茶叶与茶叶之间碰撞影响,取单个茶叶为研究对象对其进行动力学分析。

2.1 茶叶沿锅槽内壁滚动分析

茶叶沿着锅槽内壁滚动过程中,受到挤压摩擦作用使茶叶外形发生变化,受力分析如图3所示。将地面作为绝对坐标系, xoy 为相对坐标系且固定在锅槽上。

锅槽运动速度 v 由半径为 R 的曲柄滑块机构做圆周运动时锅槽往复运动速率产生,茶叶沿着锅槽内壁运动的相对速度 v_1 由锅槽水平往复运动产生,根据图3中的几何关系, v 、 v_1 分别为

$$v = 2\pi R f_n \tag{1}$$

$$v_1 = -\frac{2\pi R f'_n}{\cos\varphi} \tag{2}$$

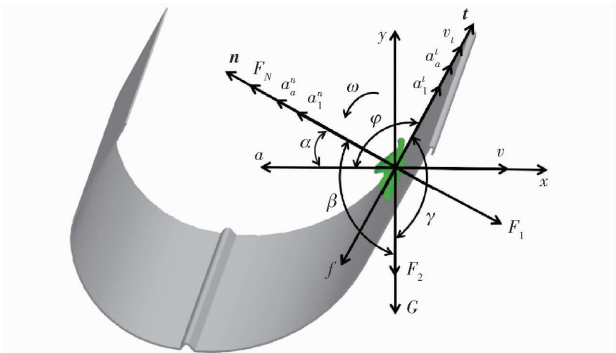


图3 茶叶沿着锅槽内壁运动分析
Fig. 3 Movement analysis of tea along inner wall of pot groove

式中 f_n ——锅槽往复运动速率, r/min
 φ ——锅槽挡板角度, (°)

茶叶沿着锅槽内壁运动时的相对速度产生的科氏力为 F_1 ,锅槽运动速度产生的科氏力为 F_2 ,方向与其加速度方向相反,计算式分别为

$$F_1 = 2mv_1\omega \tag{3}$$

$$F_2 = 2mv\omega \tag{4}$$

式中 ω ——茶叶角速度, rad/s
 m ——茶叶质量, g

锅槽内壁对茶叶的支持力为

$$F_N = F_1 + ma_a^n - (F_2 + G)\cos\beta \tag{5}$$

式中 F_N ——锅槽内壁对茶叶的法向支持力, N
 G ——茶叶所受重力, N

a_a^n ——茶叶绝对加速度在锅槽内壁上的法向分量, m/s²

β ——竖直方向重力 G 与法向量 n 之间的夹角, (°)

锅槽内壁对茶叶的摩擦力为

$$f = (F_2 + G)\cos\gamma - ma_a^t = \mu F_N \tag{6}$$

式中 f ——茶叶沿锅槽内壁切向摩擦力, N
 a_a^t ——茶叶绝对加速度在锅槽内壁上的切向分量, m/s²

γ ——茶叶所受重力 G 与切向量 t 之间的夹角, (°)

μ ——茶叶与锅槽内壁的摩擦因数

茶叶只要是沿着锅槽内壁运动,则锅槽内壁的法向量 n 始终与锅槽内壁的切向量 t 保持垂直,所以有

$$v_{1x}n_x + v_{1y}n_y = 0 \tag{7}$$

其中
$$\begin{cases} n_x = \frac{\frac{|v_{1x}|}{v_{1x}}v_{1y}}{\sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2}} & (v_{1x} \neq 0) \\ n_y = \frac{\frac{|v_{1x}|}{v_{1x}}}{\sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2}} & (v_{1x} \neq 0) \end{cases} \tag{8}$$

槽往复运动速率有关,计算式为

$$v_x = 2\pi Rf_n$$

(21)

根据图 4 中的几何关系可知,茶叶抛出后在锅槽内水平面上的抛撒距离 S 为

$$S = \frac{\sin(2\theta) v_0^2}{g}$$

(22)

式中 θ ——抛出初始速度 v_0 与平行于地面平面的夹角, ($^\circ$)

g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

根据图 4 可知,茶叶在锅槽内水平面上的轴向抛撒距离 Δy 为

$$\Delta y = S\sin\Phi$$

(23)

其中 $\Phi = \arctan \frac{v_y}{v_x}$

(24)

式中 Φ ——抛出初始速度 v_0 在平行于地面平面上的投影与 v_x 的夹角, ($^\circ$)

将式(20)、(22)、(24)代入式(23)可得茶叶在锅槽内水平面上的轴向抛撒距离 Δy 为

$$\Delta y = \sin\left(\arctan \frac{v_y}{v_x}\right) \sin(2\theta) \frac{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}{g}$$

(25)

根据图 4 中锅槽倾斜面 $ABCD$ 与水平面的夹角关系,此时茶叶在锅槽倾斜面上的抛撒距离 L_{BD} 和倾斜面上的轴向抛撒距离 L_{AD} 为

$$L_{BD} = \frac{S}{\cos\sigma}$$

(26)

$$L_{AD} = \frac{\Delta y}{\cos\sigma}$$

(27)

式中 σ ——锅槽倾斜面 $ABCD$ 与水平面夹角, ($^\circ$)

由式(26)、(27)可知,锅槽倾斜面上茶叶的抛撒距离 L_{BD} 及轴向抛撒距离 L_{AD} 均与锅槽与水平面夹角 σ 有关,当锅槽与水平面夹角 σ 增加时,锅槽内茶叶的抛撒距离 L_{BD} 及轴向抛撒距离 L_{AD} 都会增加,此时茶叶在锅槽内的滑移速率也会相应增加,从而影响茶叶的成条效果。因此茶叶抛撒过程中,锅槽与水平面夹角 σ 是影响茶叶在锅槽倾斜面上轴向移动的关键因素。

2.3 茶叶落到锅槽内壁的碰撞分析

茶叶在完成抛落运动后,与水平往复运动的锅槽发生碰撞运动,此时茶叶与锅槽内壁发生碰撞可简化为有摩擦力的刚体碰撞问题^[22-23],且滑动摩擦力在碰撞过程中方向不变,摩擦因数为 μ 。茶叶与锅槽内壁碰撞分析如图 5 所示。

根据式(1)中的水平方向锅槽运动速度 v 及图 5 的几何关系可知,此时茶叶质心法向初始速度 v_{n0} 与切向初始速度 v_{t0} 为

$$v_{n0} = -\frac{2\pi Rf_n}{\cos\delta}$$

(28)

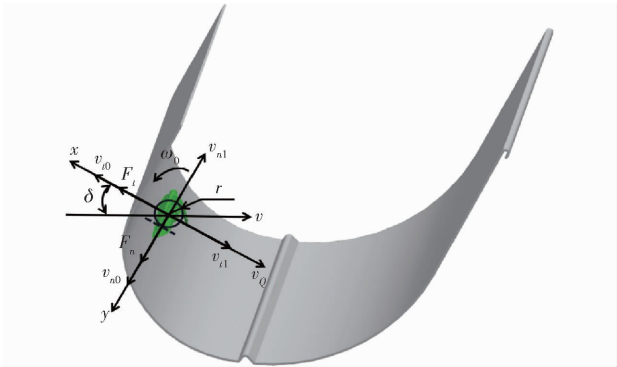


图 5 茶叶与锅槽内壁的瞬时碰撞分析
Fig. 5 Analysis of instantaneous collision between tea leaves and inner wall of pot and groove

$$v_{n0} = -\frac{2\pi Rf_n}{\sin\delta}$$

(29)

式中 δ ——锅槽运动方向与切向初始速度夹角, ($^\circ$)

假设茶叶与锅槽碰撞瞬间为平面点线接触且固定不动,恢复系数 e 已知。取半径为 r 的茶叶截面为分析对象,则根据恢复系数定义得

$$e = -\frac{v_{n1}}{v_{n0}}$$

(30)

式中 v_{n1} ——碰撞后茶叶质心法向反弹速度, m/s
在茶叶与锅槽内壁碰撞过程中所受到的法向冲量 P_n 与切向冲量 P_t 为

$$P_n = \int F_n dt = m(v_{n1} - v_{n0})$$

(31)

$$P_t = \int F_t dt = m(v_{t1} - v_{t0})$$

(32)

式中 v_{t1} ——碰撞后茶叶质心切向反弹速度, m/s
 F_n ——茶叶所受法向冲力, N
 F_t ——茶叶所受切向摩擦力, N

整理式(31)、(32)得此时摩擦因数 μ 为

$$\mu = \frac{\int F_t dt}{\int F_n dt}$$

(33)

联立整理式(28)~(32)得碰撞后茶叶质心切向反弹速度 v_{t1} 为

$$v_{t1} = -\mu v_{n0}(e + 1) + v_{t0}$$

(34)

又因为茶叶在与锅槽发生碰撞时,会带有茶叶转动情况,根据动量矩定理得茶叶质心的动量矩 P 为

$$P = I\omega_0 = M_e$$

(35)

其中 $M_e = rP_t$

(36)

式中 I ——茶叶转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 ω_0 ——茶叶绕质心转动角速度, rad/s
 M_e ——外力对于茶叶质心力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
结合以上各式求得发生碰撞后茶叶质心角速度

ω_1 为

$$\omega_1 = -\frac{\mu v_{n0}(e+1)mr}{I} \tag{37}$$

由运动学定理可以得到茶叶在与锅槽内壁发生碰撞后切向速度 v_Q 为

$$v_Q = -\frac{(mr^2+1)}{I}(e+1)\mu v_{n0} + v_{n0} \tag{38}$$

通过上述分析可知,茶叶碰撞过程的速度与锅槽往复运动速率 f_n 、摩擦因数 μ 、茶叶绕质心转动的角速度 ω_0 有关。当锅槽往复运动速率增加时,茶叶质心初始速度也随之增加,因此锅槽往复运动速率是影响茶叶与锅槽内壁发生碰撞后角速度及切向速度的主要因素。

根据茶叶在锅槽内的整个运动过程的动力学分析可知,理条机锅槽往复运动速率直接影响茶叶在锅槽内各个阶段的运动速度,锅槽挡板角度影响茶叶在锅槽内壁滚动阶段受力及加速度,影响茶叶在滚动阶段的运动状态,从而影响茶叶成条效果,锅槽与水平面夹角影响茶叶在锅槽倾斜面的轴向滑移。因此有必要对锅槽挡板角度、锅槽往复运动速率及锅槽与水平面的夹角关键参数进行相关分析。

3 锅槽-茶叶耦合模型建立与关键参数对理条质量影响分析

通过对理条机理的动力学分析确定影响理条质量的关键因素后,需分析茶叶理条机关键因素对作业质量的影响。在连续复式茶叶理条机工作过程中,锅槽的往复运动速率快、温度高,不易直接分析锅槽内的茶叶颗粒运动情况,因此采用可热固耦合的离散元数值模拟方法分析关键因素对作业质量的影响关系^[24-26]。

3.1 锅槽基本参数与影响理条质量关键因素

锅槽是茶叶理条机工作部件的关键组成部分,茶叶成条质量与锅槽结构及运动有关,锅槽三维结构如图 6 所示。锅槽安装于 45 kW 两段式电加热装置上方 30 mm 处,采用滚动摩擦较小的横向导向机构支撑,并由升降调节机构调整锅槽整体与水平面倾角来控制茶叶在锅槽内轴向滑移速率。单个斜 U 形锅槽结构采用 1 mm 厚的 316 不锈钢制成,长 2500 mm,宽 102 mm,高 80 mm。斜 U 形状的锅槽挡板角度 φ 对茶叶滚动抛撒翻动起重要作用,并且能够加强对茶叶的摩擦挤压作用,使茶叶成条塑形更加紧凑。根据茶叶在锅槽内动力学分析,影响理条质量的关键因素为锅槽挡板角度 φ 、锅槽往复运动速率 f_n 和锅槽与水平面夹角 σ ,根据实际理条情况,设置仿真试验因素与水平:锅槽往复运动速率为

180、190、200 r/min,锅槽挡板角度为 90°、110°、130°,锅槽与水平面夹角为 2°、3°、4°。以茶叶颗粒受力、速度为指标开展单因素试验,分析关键因素对作业质量的影响关系。

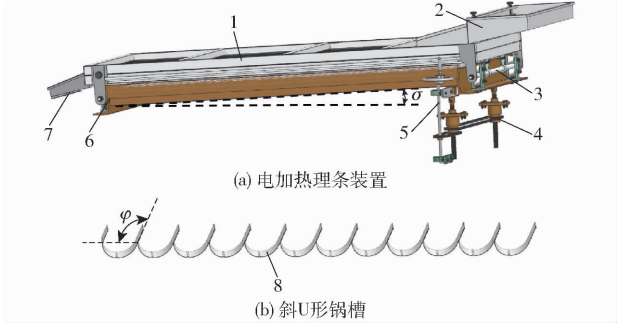


图 6 理条关键部件三维结构示意图
Fig.6 Three dimensional structure diagrams of key parts of strip cutting

1. 锅槽主体 2. 进料斗 3. 导向机构 4. 滚珠丝杆 5. 升降调节手柄 6. 电加热装置 7. 出料斗 8. 锅槽

3.2 锅槽-茶叶热固耦合仿真模型建立

Rocky Dem 可以基于三维软件对颗粒外形进行真实建模并采用自定义多面体(Custom Polyhedron)导入,且可耦合加热模型,使仿真模拟更加接近实际工况。根据试验绿茶物理真实参数,建立一芽一叶茶叶模型长度为 32.45 mm,茎秆直径为 2.0 mm,茎叶夹角为 25.3°,一芽两叶茶叶模型长度为 36.4 mm,茎秆直径为 2.5 mm,茎叶夹角为 20.7°。茶叶建模完成后如图 7a 所示,将建立的三维锅槽模型导入,并将建模完成的茶叶落入锅槽中,如图 7b 所示。

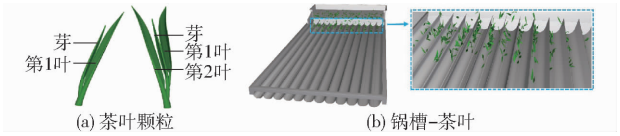


图 7 锅槽-茶叶热固耦合仿真模型
Fig.7 Thermostructural coupling simulation models of pot and trough and tea

3.3 仿真参数设置与仿真过程

仿真设置茶叶颗粒与锅槽接触模型中 Normal Force(法向力)为 Hertzian Spring Dashpot, Tangential Force(切向力)为 Mindlin - Deresiewicz, Rolling Resistance Model(滚动阻力模型)为 Type C; Linear Spring Rolling Limit, Numerical Softening Factor(数值软化因子)为 0.2。在 Geometries 中设置锅槽前段温度为 463.15 K,后段温度为 423.15 K,并设置茶叶颗粒及锅槽相关物理参数,如表 2 所示。根据实际工况,动态生成的茶叶颗粒在落入锅槽以后的运动状态在 3 s 后基本趋于稳定,设置仿真总时间为 6 s,茶叶颗粒在锅槽内的仿真运动状态如图 8 所示。

表 2 材料仿真参数及接触互作参数
Tab.2 Material simulation parameters and
contact interaction parameters

参数	数值
茶叶颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	562.4
茶叶颗粒泊松比	0.4
茶叶颗粒杨氏模量/Pa	2.8×10^7
锅槽密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 800
锅槽泊松比	0.3
锅槽杨氏模量/Pa	1.82×10^8
茶叶颗粒间静摩擦因数	0.8
茶叶颗粒间动摩擦因数	0.15
茶叶颗粒间恢复系数	0.37
茶叶颗粒-锅槽静摩擦因数	0.65
茶叶颗粒-锅槽动摩擦因数	0.15
茶叶颗粒-锅槽恢复系数	0.4

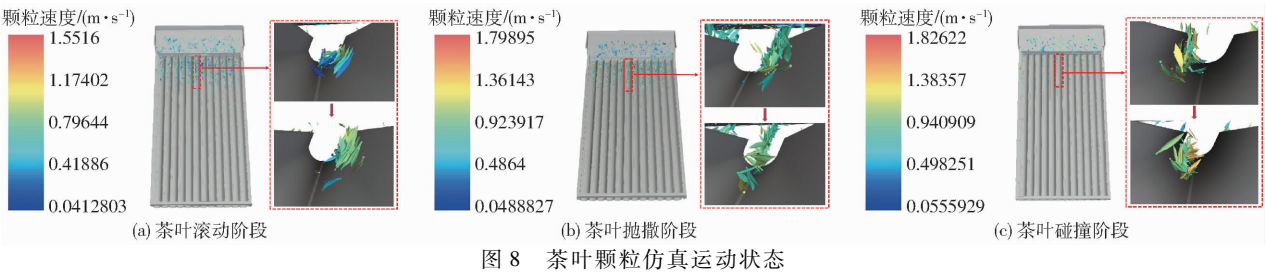


图 8 茶叶颗粒仿真运动状态
Fig. 8 Tea particle simulation motion states

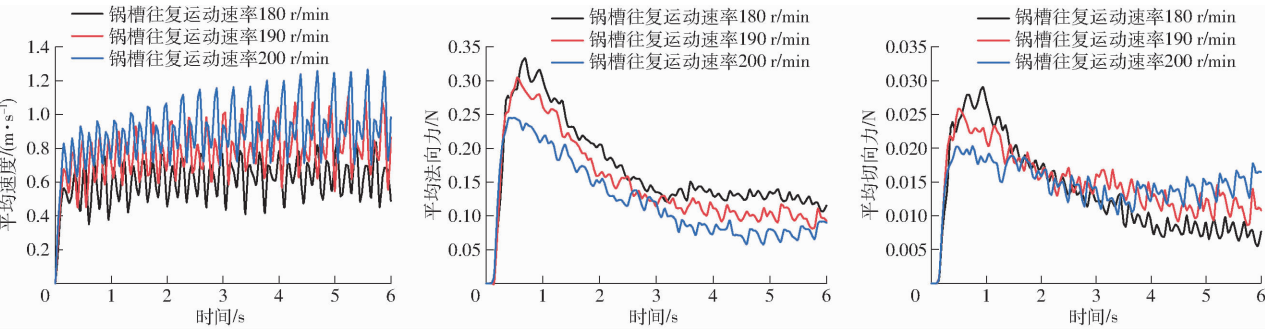


图 9 不同锅槽往复运动速率下茶叶颗粒平均速度、平均法向力、平均切向力变化曲线
Fig. 9 Curves of average velocity, average normal force and average tangential force of tea
particles at different pot and groove motion velocity

破坏其它槽内茶叶颗粒的运动循环,易出现碎茶,此外该频率下茶叶沿着锅槽内壁运动接触面积大且时间长,所受切向摩擦力比较大,茶叶颗粒受力不均匀,降低成条质量;当锅槽往复运动速率为 190 r/min 时,茶叶颗粒平均速度稳定在 0.75 m/s 左右,平均法向力为 0.11 N,平均切向力为 0.012 N,茶叶颗粒受到的摩擦挤压力均匀且离散程度高,此时茶叶颗粒在锅槽带动下做抛撒运动,运动形式规律,利于理条成形。

3.4.2 不同锅槽挡板角度下茶叶理条运动

锅槽挡板角度直接影响茶叶颗粒在锅槽内的滚动和抛撒运动姿态,从而影响茶叶成条效果。仿真结果表明,不同的锅槽挡板角度对于茶叶颗粒的平

3.4 仿真结果分析

3.4.1 不同锅槽往复运动速率下茶叶理条运动

仿真结果表明,锅槽往复运动速率对茶叶颗粒在锅槽内的速度和受力有着明显影响,如图 9 所示。锅槽往复运动速率为 180 r/min 时,3 s 后茶叶颗粒平均速度稳定在 0.6 m/s,平均法向力为 0.13 N,平均切向力为 0.008 N,此时茶叶颗粒整体平均速度较小,茶叶颗粒沿着锅槽内壁来回滚动,易造成茶叶颗粒在锅槽内堆积,导致刚由原方向摩擦塑造条直状的外形又会因为反方向摩擦运动而变松,理条效果不佳;锅槽往复运动速率为 200 r/min 时,3 s 后茶叶颗粒平均速度稳定在 0.92 m/s,平均法向力为 0.07 N,平均切向力为 0.016 N,此时茶叶颗粒整体平均速度较大,容易造成大多数茶叶颗粒发生越槽,

均速度及受力影响较大,如图 10 所示。锅槽挡板角度为 90°时,锅槽挡板角度竖直向上,茶叶颗粒 3 s 后平均速度稳定在 0.55 m/s,平均法向力为 0.16 N,平均切向力为 0.01 N,茶叶颗粒在结束锅槽内壁滚动且发生抛撒运动以后,会出现较大角度的弹射,在锅槽内的落点位置大部分落在竖直挡板上,茶叶也会出现越槽现象,影响成条品质;锅槽挡板角度为 130°时,锅槽挡板角度与 X 轴向倾角较大,茶叶颗粒 3 s 后平均速度稳定在 1 ms,平均法向力为 0.08 N,平均切向力为 0.008 N,茶叶颗粒受到挡板角度的限制,抛撒高度低,平均受力小,分离程度小,茶叶受热成条不均匀,降低了理条质量;锅槽挡板角度为 110°时,茶叶颗粒 3 s 后平均速度稳定在

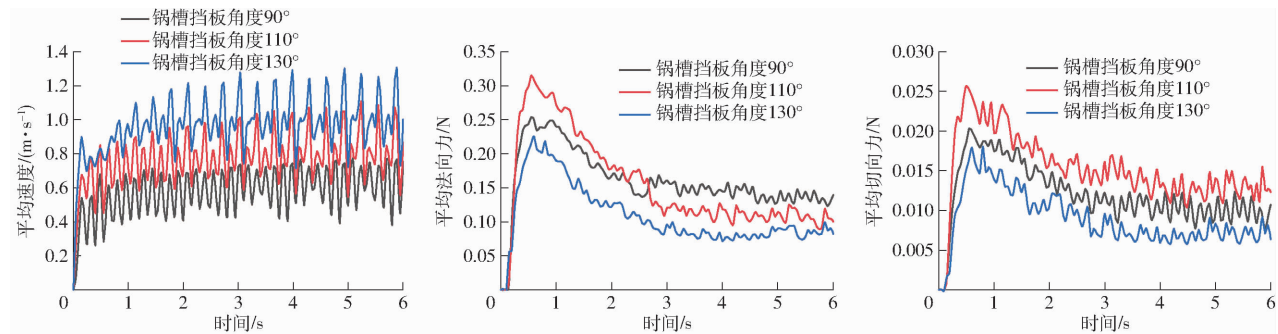


图 10 不同锅槽挡板角度下茶叶颗粒平均速度、平均法向力、平均切向力变化曲线
Fig. 10 Curves of average velocity, average normal force and average tangential force of tea particles at different pot and groove baffle angles

0.7 m/s,平均法向力为 0.13 N,平均切向力为 0.015 N,此时茶叶颗粒在锅槽内的抛撒运动高度适宜,并且落点位置位于锅槽挡板与锅槽圆弧底部附近,利于茶叶碰撞和滚动摩擦,易于茶叶塑形成条。

3.4.3 不同锅槽与水平面夹角下茶叶理条运动

锅槽与水平面夹角主要影响茶叶在锅槽内滑移速率从而影响理条时间。如图 11 所示。0~3 s,茶叶颗粒在锅槽的带动下平均速度逐渐增加,3 s 后基本趋于稳定。锅槽与水平面夹角为 2°时,茶叶颗粒的平均速度较小且稳定在 0.6 m/s,平均法向力为 0.15 N,平均切向力为 0.015 N,茶叶颗粒在锅槽内的滑移速率较慢易造成堆积,使得茶叶颗粒在锅槽

内的停留时间变长,导致理条过度,容易产生“焦茶”;锅槽与水平面夹角为 4°时,3 s 后茶叶颗粒的平均速度为 0.8 m/s,平均法向力为 0.10 N,平均切向力为 0.01 N,茶叶颗粒在锅槽内的滑移速率较大,使得茶叶颗粒在锅槽内停留时间短,茶叶颗粒在锅槽内的滚动碰撞不均匀致整体受力偏小,容易造成茶叶出现“未成条”及越槽现象;锅槽与水平面夹角为 3°时,茶叶颗粒平均速度适中,稳定在 0.7 m/s,平均法向力为 0.13 N,平均切向力为 0.013 N,茶叶颗粒在锅槽内的运动较规律且碰撞摩擦受力均匀,使得茶叶颗粒在适宜的锅槽停留时间内完成理条工序,保证了理条质量。

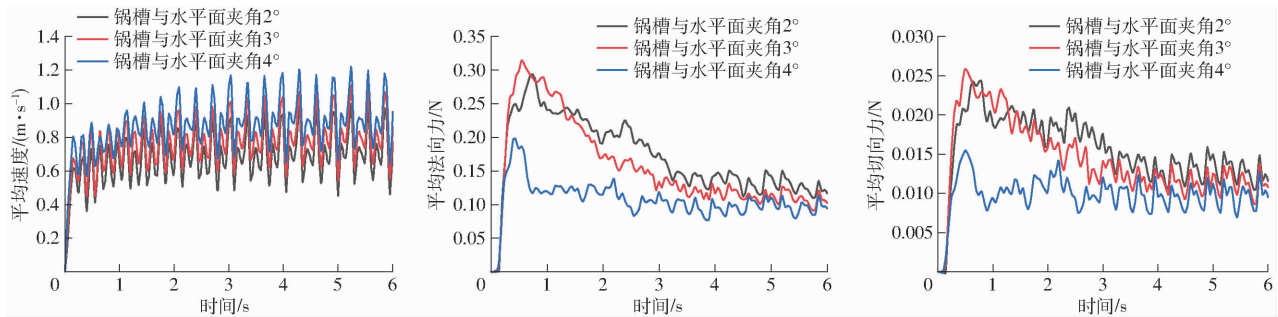


图 11 不同锅槽与水平面夹角下茶叶颗粒平均速度、平均法向力、平均切向力变化曲线
Fig. 11 Curves of average velocity, average normal force and average tangential force of tea particles at different angles between pot and horizontal plane

4 优化试验

在仿真试验分析关键参数影响理条质量的基础上,采用正交试验确定各结构与作业参数最优组合,提高连续复式茶叶理条机作业质量。

4.1 试验材料与方法

2022 年 4 月 5—7 日在安徽省安庆市岳西县安徽丰源机械有限公司进行样机试制与试验。选用当地一芽一叶及一芽两叶岳西翠兰绿茶鲜叶作为试验原料,经萎凋摊青后茶鲜叶的含水率在 70% 左右,即可进行茶叶理条试验。试验前,参照 JB/T 12833—2016《茶叶理条机》进行空载试验,保证理

条机可以正常启动运行。
根据仿真试验结果,设置试验因素编码如表 3 所示,进行三因素三水平正交试验^[27-29]。

表 3 试验因素编码
Tab. 3 Experimental factors codes

编码	因素		
	锅槽往复运动速率 $f_n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	锅槽挡板角度 $\varphi/(\text{°})$	锅槽与水平面夹角 $\sigma_3/(\text{°})$
-1	180	90	2
0	190	110	3
1	200	130	4

试验时,用 MT872D 型红外线测温仪测定达到

茶叶理条的温度为 190 ~ 200℃,将茶鲜叶放入理条机进料端,待茶叶全部从锅槽中流出,则完成一组理条工序。每进行一组试验时,预先清理锅槽内的茶叶并调整各试验因素水平,稳定后进行茶叶理条,试验过程如图 12 所示。理条后的成条效果和碎茶效果最能体现理条机的性能情况,因此选择成条率 Y_1 与碎茶率 Y_2 作为试验指标,根据 JB/T 12833—2016《茶叶理条机》、GB/T 8311—2013《茶粉末和碎茶含量测定》测定成条率 Y_1 和碎茶率 Y_2 。

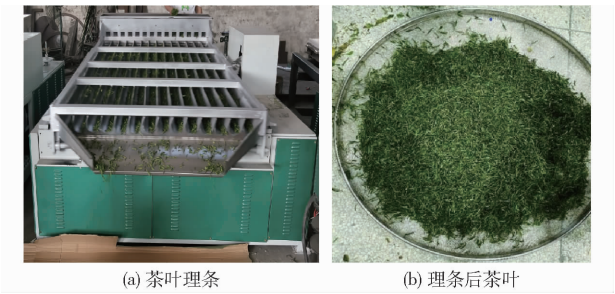


图 12 连续复式茶叶理条机理条试验

Fig. 12 Experiment on mechanism of continuous compound tea processing

4.2 试验方案与结果

试验方案与试验结果如表 4 所示。

表 4 正交试验方案与试验结果

Tab. 4 Orthogonal test scheme and test results

试验 编号	因素			成条率 $Y_1/\%$	碎茶率 $Y_2/\%$
	$f_n/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$\varphi/$ ($^\circ$)	$\sigma/$ ($^\circ$)		
1	180	90	3	76.41	2.40
2	200	90	3	79.23	2.38
3	190	110	3	85.32	1.69
4	190	90	4	76.20	2.39
5	200	130	3	78.83	2.29
6	180	110	4	77.84	2.35
7	180	110	2	81.55	1.75
8	200	110	4	82.73	1.99
9	190	110	3	87.52	1.61
10	190	110	3	84.91	1.78
11	190	130	2	79.41	2.30
12	190	90	2	78.32	2.19
13	180	130	3	80.24	1.93
14	190	130	4	83.55	1.82
15	200	110	2	79.12	2.33
16	190	110	3	86.10	1.58
17	190	110	3	84.66	1.89

4.3 试验结果分析

4.3.1 回归模型显著性检验及方差分析

根据表 4 的试验数据,通过 Design-Expert 11 软件得到成条率 Y_1 和碎茶率 Y_2 二次项回归模型为

$$Y_1 = 85.70 + 0.48X_1 + 1.48X_2 + 0.24X_3 - 1.06X_1X_2 + 1.83X_1X_3 + 1.56X_2X_3 - 3.04X_1^2 - 3.98X_2^2 - 2.35X_3^2 \quad (39)$$

$$Y_2 = 1.71 + 0.07X_1 - 0.13X_2 - 0.0025X_3 + 0.09X_1X_2 - 0.24X_1X_3 - 0.17X_2X_3 + 0.23X_1^2 + 0.31X_2^2 + 0.16X_3^2 \quad (40)$$

式中 X_1 ——锅槽往复运动速率编码值
 X_2 ——锅槽挡板角度编码值
 X_3 ——锅槽与水平面夹角编码值

对回归模型中各项回归系数及成条率 Y_1 与碎茶率 Y_2 进行 F 检验和方差分析,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,目标函数成条率 Y_1 、碎茶率 Y_2 两个回归方程极显著,且模型失拟项 P 值分别为 0.492 5、0.548 7,均大于 0.05,无失拟因素存在,回归模型与实际情况拟合程度较好;成条率 Y_1 、碎茶率 Y_2 回归方程的决定系数 R^2 分别为 0.954 2、0.928 5,表明回归方程预测值与实际值高度合理,故可以用上述成条率 Y_1 、碎茶率 Y_2 的回归方程代替试验真实点对试验结果进行分析。

由表 5 可知,成条率 Y_1 、碎茶率 Y_2 模型显著性 P 值分别为 0.000 7、0.003 0,均小于 0.01,说明该模型具有统计学意义。对于目标函数成条率 Y_1 ,其因素 X_2 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 极显著,回归项 X_1X_3 、 X_2X_3 显著;对于目标函数碎茶率 Y_2 ,其因素 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 极显著,回归项 X_2 、 X_2X_3 、 X_3^2 显著。由 F 检验值可知,影响成条率 Y_1 主次因素依次为:锅槽挡板角度 X_2 、锅槽往复运动速率 X_1 、锅槽与水平面夹角 X_3 ;影响碎茶率 Y_2 主次因素依次为:锅槽挡板角度 X_2 、锅槽往复运动速率 X_1 、锅槽与水平面夹角 X_3 。因素交互影响的响应曲面图,如图 13、14 所示。

根据回归方程和响应曲面可知,锅槽往复运动速率、锅槽挡板角度以及锅槽与水平面夹角各个影响因素直接存在交互作用,并且对成条率和碎茶率影响显著。由图 13a 可知,当锅槽挡板角度一定时,成条率随着锅槽往复运动速率的增加先增大后减小;当锅槽往复运动速率一定时,成条率随着锅槽挡板角度的增加先增大后减小,锅槽挡板角度的变化区间较大且对成条率指标影响更显著。由图 13b 可知,当锅槽往复运动速率一定时,成条率随着锅槽与水平面夹角的增加先增加后减小;当锅槽与水平面夹角一定时,成条率随着锅槽往复运动速率的增加先增大后减小,锅槽往复运动速率的变化区间较大且对成条率指标影响更显著。由图 13c 可知,当锅槽与水平面夹角一定时,成条率随着锅槽挡板角度的增加先增大后减小;当锅槽挡板角度一定时,成条

表 5 成条率 Y_1 与碎茶率 Y_2 的二次项模型方差分析

Tab.5 Variance analysis of quadratic model of stripe forming rate Y_1 and broken tea rate Y_2

方差来源	成条率 Y_1					碎茶率 Y_2				
	平方和	自由度	均方和	F	P	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	190.83	9	21.20	16.20	0.000 7 **	1.35	9	0.15 03	10.11	0.003 0 **
X_1	1.87	1	1.87	1.43	0.270 6	0.039 2	1	0.039 2	2.64	0.148 5
X_2	17.61	1	17.61	13.46	0.008 0 **	0.130 0	1	0.130 0	8.74	0.021 2 *
X_3	0.460 8	1	0.460 8	0.352 2	0.571 6	0.000 1	1	0.000 1	0.003 4	0.955 4
X_1X_2	4.47	1	4.47	3.42	0.106 9	0.036 1	1	0.036 1	2.43	0.163 2
X_1X_3	13.40	1	13.40	10.24	0.015 1 *	0.220 9	1	0.220 9	14.85	0.006 3 **
X_2X_3	9.80	1	9.80	7.49	0.029 1 *	0.115 6	1	0.115 6	7.77	0.027 0 *
X_1^2	38.97	1	38.97	29.78	0.000 9 **	0.232 5	1	0.232 5	15.64	0.005 5 **
X_2^2	66.77	1	66.77	51.03	0.000 2 **	0.391 7	1	0.391 7	26.34	0.001 4 **
X_3^2	23.25	1	23.25	17.77	0.004 0 **	0.107 8	1	0.107 8	7.25	0.031 0 *
残差	9.16	7	1.31			0.104 1	7	0.014 9		
失拟	3.84	3	1.28	0.961 2	0.492 5	0.039 5	3	0.013 2	0.815 3	0.548 7
误差	5.32	4	1.33			0.064 6	4	0.016 1		
总和	199.99	16				1.46	16			

注: ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$), * 表示影响显著 ($P < 0.05$)。

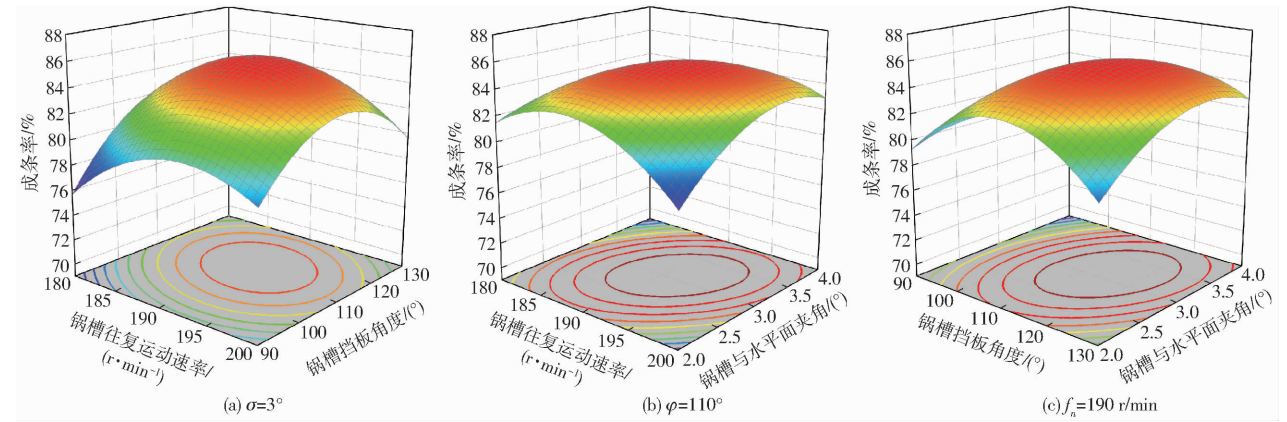


图 13 成条率指标响应曲面

Fig. 13 Response surfaces of strip forming rate index

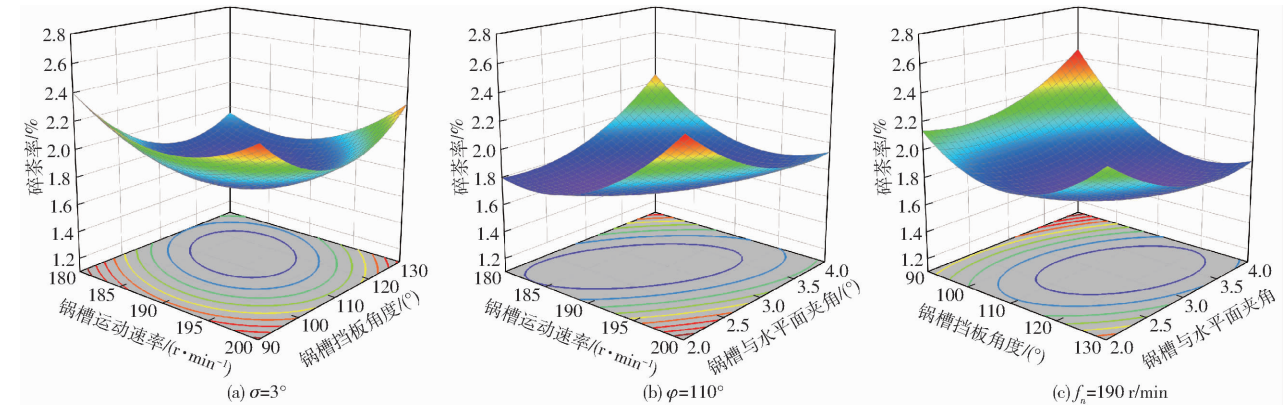


图 14 碎茶率指标响应曲面

Fig. 14 Response surfaces of broken tea rate index

率随着锅槽与水平面夹角的增加先增大后减小,锅槽挡板角度的变化区间较大且对成条率指标影响更显著。因此可知,成条率指标影响显著性顺序为:锅槽挡板角度、锅槽往复运动速率、锅槽与水平面夹角。

由图 14a 可知,当锅槽挡板角度一定时,碎茶率随着锅槽往复运动速率的增大而增加;当锅槽往复运动速率一定时,碎茶率随着锅槽挡板角度的增加而减小;锅槽挡板角度的变化区间较大且对碎茶率指标影响更显著。由图 14b 可知,当锅槽与水平面

夹角一定时,碎茶率随着锅槽往复运动速率增大而增加;当锅槽往复运动速率一定时,碎茶率随着锅槽与水平面夹角的增加而减小;锅槽往复运动速率的变化区间较大且对碎茶率指标影响更显著。由图 14c 可知,当锅槽与水平面夹角一定时,碎茶率随着锅槽挡板角度的增加先减小后增大;当锅槽挡板角度一定时,碎茶率随着锅槽与水平面夹角增大而减小;锅槽挡板角度的变化区间较大且对碎茶率指标影响更显著。因此可知,碎茶率指标影响显著性顺序为:锅槽挡板角度、锅槽往复运动速率、锅槽与水平面夹角。

为了获得连续复式茶叶理条机最佳性能参数组合,根据 JB/T 12833—2016《茶叶理条机》要求,保证连续式理条机的成条率在 60% 以上,成条率越高越好,而碎茶率在 3% 以下,碎茶率越低越好。因此结合试验因素边界条件,确立连续复式茶叶理条机的优化数学模型为

$$\begin{cases} \text{Max } Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \text{Min } Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \quad (41)$$

运用 Design-Expert 11 对目标参数的数学模型进行优化求解,得到最佳参数组合为:锅槽挡板角度为 114.1°、锅槽往复运动速率为 190.9 r/min、锅槽与水平面夹角为 3.2°,此组合下成条率为 85.89%,碎茶率为 1.70%。

4.3.2 验证试验

为验证最优参数的正确性与准确性,将样机调整为最优参数组合(锅槽挡板角度为 114.1°、锅槽往复运动速率为 190.9 r/min、锅槽与水平面夹角为 3.2°),进行验证试验,试验重复 3 次取平均值,试验结果如表 6 所示,在优化后参数组合条件下成条率为 84.26%,碎茶率为 1.79%,成条率相对误差为

1.9%,碎茶率相对误差为 5%,与优化结果相对误差在 5% 以内,说明验证试验与优化试验结果具有一致性和准确性,可保证连续复式茶叶理条机的理条质量达到农艺标准。

表 6 试验验证结果

Tab. 6 Experimental results of verification %		
试验编号	成条率	碎茶率
1	84.32	1.79
2	85.61	1.70
3	82.85	1.89
平均值	84.26	1.79

5 结论

(1)通过研究茶叶在连续复式理条机锅槽内茶叶与锅槽连续碰撞规律,建立茶叶在锅槽内滚动、抛撒、碰撞 3 个阶段的动力学模型,确定连续复式茶叶理条机的成条机理,得到影响茶叶成条关键因素为锅槽挡板角度、锅槽往复运动速率、锅槽与水平面夹角。

(2)利用 Rocky Dem 离散元数值模拟方法建立热固耦合的茶叶-锅槽仿真模型,分析影响理条质量的关键因素影响茶叶在锅槽内运动速度及受力的规律,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分别为 190 r/min、110°、3°。

(3)通过三因素三水平正交试验,得出连续复式茶叶理条机关键参数的最佳组合:锅槽挡板角度为 114.1°、锅槽往复运动速率为 190.9 r/min、锅槽与水平面夹角为 3.2°,此组合下成条率为 85.89%,碎茶率为 1.70%,均满足且超过农艺要求。验证试验成条率为 84.26%,碎茶率为 1.79%,与优化试验结果相对误差均在 5% 以内,验证了优化试验结果的正确性和准确性。

参 考 文 献

[1] 闫建伟,胡冬军,刘启合,等. 茶叶理条技术及机械研究进展[J]. 中国农机化学报,2022,43(2):75-83.
YAN Jianwei,HU Dongjun,LIU Qihe, et al. Research progress and development trend of tea stripping technology and machinery [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2022,43(2):75-83. (in Chinese)

[2] 张善明. 针形名优绿茶品质现状分析与做形工艺优化[D]. 武汉:华中农业大学,2020.
ZHANG Shanming. Analysis of quality of needle-shaped famous green tea and processing of shaping pattern[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2020. (in Chinese)

[3] 张铭铭,唐小林,范起业,等. 我国茶叶机械研究进展与展望[J]. 中国茶叶加工,2021(4):5-9.
ZHANG Mingming,TANG Xiaolin,FAN Qiye,et al. Research progress and prospect of tea machinery in China[J]. China Tea Processing,2021(4):5-9. (in Chinese)

[4] 程方平,易文裕,庾洪章,等. 茶叶理条机械研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报,2019,40(5):69-74.
CHENG Fangping,YI Wenyu,TUO Hongzhang,et al. Research current situation and development trend of tea carding machinery [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(5):69-74. (in Chinese)

[5] 杜颖颖,邹锋扬,叶美君. 印度尼西亚茶叶生产现状概述[J]. 中国茶叶加工,2017(3):5-9.
DU Yingying,ZOU Fengyang,YE Meijun. Overview of tea production in Indonesia[J]. China Tea Processing,2017(3):5-9. (in Chinese)

[6] QIN W,YAMADA R,ARAKI T,et al. Changes in morphological and functional characteristics of tea leaves during Japanese

- green tea (Sencha) manufacturing process[J]. Food and Bioprocess Technology,2021,15(1):82–91.
- [7] ABHIRAM G,MANATHUNGA M,RAVEENDRAN K,et al. Performance analysis of high-efficiency motor and variable speed drive in black tea processing machinery[J]. Journal of Biosystems Engineering,2020,45(4):310–317.
- [8] 王纯贤,魏硕硕,朱衍飞,等. 基于 ADAMS 的往复式茶叶自动理条机参数优化设计[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):450–453.
- WANG Chunxian,WEI Shuoshuo,ZHU Yanfei,et al. Parameter optimization design of reciprocating tea automatic cutting machine based on ADAMS[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2015,43(12):450–453. (in Chinese)
- [9] 张远明. 双旋筒式茶叶理条机的设计与存在问题分析[J]. 农业开发与装备,2009(10):23–25.
- ZHANG Yuanming. Design and analysis of existing problems of double-rotating cylinder tea cutting machine[J]. Agricultural Development & Equipments,2009(10):23–25. (in Chinese)
- [10] 黄金刚,孙志强,余小明,等. 全自动茶叶理条机加压系统设计[J]. 农业开发与装备,2019(12):103–106.
- HUANG Jin'gang,SUN Zhiqiang,SHE Xiaoming,et al. Design of automatic tea-cutting machine pressure system[J]. Agricultural Development & Equipments,2019(12):103–106. (in Chinese)
- [11] 田波平,孙秋梅,廖庆喜,等. 6CZZ–600 型针形名优茶做形机及成型工艺优化[J]. 农业工程学报,2005,21(4):65–68.
- TIAN Boping,SUN Qiumei,LIAO Qingxi,et al. 6CZZ–600 shaper and its optimized technology for famous needle-type tea[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(4):65–68. (in Chinese)
- [12] 李兵,夏涛,李尚庆. 基于蚁群算法的茶叶理条机参数优化设计[J]. 农业工程学报,2011,27(10):79–82.
- LI Bing,XIA Tao,LI Shangqing. Optimization design of tea carding machine parameters based on ant colony algorithm[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(10):79–82. (in Chinese)
- [13] 王小勇,李兵,曾晨,等. 基于遗传算法的茶叶理条机参数优化设计[J]. 茶叶科学,2016,36(4):440–444.
- WANG Xiaoyong,LI Bing,ZENG Chen. Optimization design of tea carding machine parameters based on genetic algorithms[J]. Journal of Tea Science,2016,36(4):440–444. (in Chinese)
- [14] 王小勇,李兵,曾晨,等. 基于模糊算法的茶叶理条机温度控制设计[J]. 茶叶科学,2015,35(4):363–369.
- WANG Xiaoyong,LI Bing,ZENG Chen. The temperature design of tea carding machine based on fuzzy controller[J]. Journal of Tea Science,2015,35(4):363–369. (in Chinese)
- [15] 傅杰,赵章凤,钟江,等. 茶叶理条机双模糊控制系统设计[J]. 机电工程,2017,34(9):993–998.
- FU Jie,ZHAO Zhangfeng,ZHONG Jiang,et al. Double fuzzy control system for tea carding machine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2017,34(9):993–998. (in Chinese)
- [16] 赵立华. 滚筒式绿茶杀青炒制运动机理及成形检测研究[D]. 淄博:山东理工大学,2022.
- ZHAO Lihua. Study on the movement mechanism and shape detection of roller type green tea sterilization and frying[D]. Zibo:Shandong University of Technology,2022. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 施重驹,张宪,钟江,等. 基于多相流耦合的热风杀青过程与杀青机结构优化研究[J]. 机电工程,2015,32(8):1050–1055.
- SHI Zhongju,ZHANG Xian,ZHONG Jiang,et al. Study on de-enzyme process and structure optimization of tea hot-air cylinder dryer based on multiphase flow theories[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2015,32(8):1050–1055. (in Chinese)
- [19] 秦宽,梁小龙,曹成茂,等. 茶园切抛组合式开沟刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):74–82.
- QIN Kuan,LIANG Xiaolong,CAO Chengmao,et al. Design and experiment of combined cutting and throwing ditching blade for tea garden[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(5):74–82. (in Chinese)
- [20] 方梅,郁志宏,张文杰,等. 盘刀式铡草机粉碎物料运动过程分析与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(7):76–84.
- FANG Mei,YU Zhihong,ZHANG Wenjie,et al. Analysis and experiments of the movement process for the shredded material of diskknife chaff cutter[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(7):76–84. (in Chinese)
- [21] ZHANG Y Z,TIAN L,CAO C M,et al. Optimization and validation of blade parameters for inter-row weeding wheel in paddy fields[J]. Frontiers in Plant Science,2022,13:1003471.
- [22] 王立军,刘天华,冯鑫,等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报,2021,37(20):313–322.
- WANG Lijun,LIU Tianhua,FENG Xin,et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in agricultural and food fields[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(20):313–322. (in Chinese)
- [23] 迟圣钟. 颗粒与运动壁面的碰撞反弹特性研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2021.
- CHI Shengzhong. Research on the collision characteristics between particle and moving wall[D]. Hangzhou:Zhejiang Sci-Tech University,2021. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 李为宁,宋扬扬,李兵. 基于 EDEM 的双锅曲毫机仿真试验[J]. 食品与机械,2019,35(6):90–95.
- LI Weining,SONG Yangyang,LI Bing. Simulation test of double-pan roasting machine based on EDEM[J]. Food & Machinery,2019,35(6):90–95. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 贾江鸣,叶玉泽,程培林,等. 手持式名优茶嫩梢采摘机械手设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2022,53(5):86–92.
- JIA Jiangming,YE Yuze,CHENG Peilin,et al. Design and experimental optimization of hand-held manipulator for picking famous tea shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):86–92. (in Chinese)
- [28] 胡永光,李建钢,陆海燕,等. 等直径滚筒式茶鲜叶分级机设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(增刊):116–121.
- HU Yongguang,LI Jian'gang,LU Haiyan,et al. Design and experiment of equant-diameter roller screening machine for fresh tea leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(Supp.):116–121. (in Chinese)
- [29] 张佳喜,黄涛,王茂博. 单马达往复式葡萄剪枝机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):106–116.
- ZHANG Jiayi,HUANG Tao,WANG Maobo. Design and experiment of single motor reciprocating grape pruning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):106–116. (in Chinese)