doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.035

名优绿茶高温高频异形锅槽杀青理条机设计与试验

葛　俊[1]　徐　微[1]　曹成茂[1]　方继东[2]　陈　奎[3]　祝海峰[4]　秦　宽[1]
吴正敏[5]　毕海军[5]　孙　燕[1]　方梁菲[1]
（1.安徽农业大学工学院，合肥 230036；2.岳西县顺达机械有限公司，安庆 246600；
3.绩溪县农业农村局，宣城 245300；4.岳西县农业机械服务中心，安庆 246600；
5.安徽农业大学茶业学院，合肥 230036）

摘要：针对传统绿茶杀青理条过程中因传热效率低、锅槽结构存在局限而导致茶叶运动特性受限、受热不均，茶叶易出现局部焦糊、杀青不彻底、成条松散、色泽暗淡等问题，设计了一种高温高频异形锅槽杀青理条机，研究在高温热风加热条件下茶叶在高频往复振动异形锅槽内各阶段的运动规律和受力特点，确定影响茶叶杀青理条效果的关键因素。根据设计目标，分析计算得出关键工作参数范围：锅槽往复运动频率范围为 4.66～6.00 Hz，理条夹角范围为 40°～50°，热风加热温度范围为 300～360℃，并利用 Rocky DEM 建立茶叶杀青理条仿真模型，确定最优作业参数组合。在仿真结果的基础上，利用试验样机开展三因素三水平正交试验，以成条率和碎茶率为评价指标，通过 Design-Expert 13 对关键参数的数学模型进行优化求解。结果显示，最佳工作参数组合为：锅槽往复运动频率 5.34 Hz、理条夹角 46.2°、热风加热温度 329.2℃，此时成条率为 90.91%，碎茶率为 1.22%。最佳参数验证试验结果表明，成条率与碎茶率分别达到 88.96%、1.27%，与优化结果的相对误差均在 5% 以内，显示了优化结果具有很好的可靠性和精度。

关键词：茶叶杀青理条机；异形锅槽；高温热风；仿真分析；正交试验
中图分类号：S226.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)17-0380-12　　**OSID**：

Design and Experiment of High-temperature and High-frequency Irregular-pan Premium Tea Fixation and Shaping Machine

Ge Jun[1]　Xu Wei[1]　Cao Chengmao[1]　Fang Jidong[2]　Chen Kui[3]　Zhu Haifeng[4]　Qin Kuan[1]
Wu Zhengmin[5]　Bi Haijun[5]　Sun Yan[1]　Fang Liangfei[1]
(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Yuexi Shunda Machinery Co.*, *Ltd.*, *Anqing* 246600, *China*
3. *Jixi County Agriculture and Rural Affairs Bureau*, *Xuancheng* 245300, *China*
4. *Yuexi County Agricultural Machinery Service Center*, *Anqing* 246600, *China*
5. *School of Tea Science*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*)

Abstract: Aiming to address the problems encountered in the conventional green tea fixation and shaping process, including restricted tea-leaf movement and uneven heat distribution caused by low heat-transfer efficiency and structural limitations of traditional troughs, which often lead to local scorching, incomplete fixation, loose strip formation, and dull leaf color, a high-temperature, high-frequency fixation and shaping machine equipped with a specially shaped trough was developed. The movement behavior and force characteristics of tea leaves at different processing stages within the high-frequency reciprocating specially shaped trough under high-temperature hot-air heating conditions were investigated to identify the key factors affecting fixation and shaping performance. Based on the design objectives, the operating parameter ranges were determined through theoretical analysis and calculations, with the reciprocating frequency of the trough ranging of 4.66～6.00 Hz, the shaping angled from 40° to 50°, and the hot-air

收稿日期：2026－01－13　修回日期：2026－04－17
基金项目：国家自然科学基金项目(52105239、52203031)和茶树种质创新与资源利用全国重点实验室基金项目(SKLTEAZZ202516)
作者简介：葛俊(1984—)，男，讲师，博士，主要从事农业工程与农业机械化等研究，E-mail：gejunahau@ahau.edu.cn
通信作者：秦宽(1989—)，男，副教授，博士，主要从事农业机械化装备研究，E-mail：qinkuan@ahau.edu.cn

temperature ranged from 300℃ to 360℃. A discrete element simulation model of the fixation and shaping process was established by using Rocky DEM to determine the optimal combination of operating parameters. Based on the simulation results, a three-factor, three-level orthogonal experiment was conducted by using a prototype machine, with strip formation rate and broken tea rate selected as evaluation indices. The mathematical models of the key parameters were optimized by using Design-Expert 13. The results showed that the optimal operating parameter combination consisted of a reciprocating frequency of 5.34 Hz, a shaping angle of 46.2°, and a hot-air temperature of 329.2℃, under which the strip formation rate reached 90.91% and the broken tea rate was 1.22%. Validation experiments conducted under the optimized conditions yielded a strip formation rate of 88.96% and a broken tea rate of 1.27%, with relative errors of less than 5% compared with the predicted values, demonstrating the high reliability and accuracy of the optimization results. The research result can provide a theoretical basis and technical reference for the design and optimization of fixation and shaping machines for premium green tea production.

Key words: tea fixation and shaping machine; irregular pan; high-temperature air; simulation analysis; orthogonal experiment

0　引言

2024 年中国茶叶产量达到 3.74×10^6 t，较上年增产 5.5%，其中绿茶约占 55% 左右[1-2]。品质优良、具有独特风味和外形的高档绿茶称为名优绿茶[3]，杀青与理条是其关键加工工序。杀青通过高温钝化酶活性，以形成特有的色、香、味[4]；理条通过外力使茶叶条形索直，促进香气和滋味的形成[5]。传统杀青与理条多为单机作业，存在加工效率低、加热温度不足、茶叶受热不均等问题[6]。因此，设计可实现杀青与理条协同作业的高温高频杀青理条机，并研究其高效均匀加热方式及协同作业参数组合，以获得优良加工效果，具有重要意义。

国内外茶叶杀青技术起步较早，对茶叶理条设备也有大量研究。日本多饮蒸青绿茶，设备以蒸汽杀青与分段揉捻为主；而印度、斯里兰卡、肯尼亚等红茶主产国主要采用萎凋、揉捻等工艺，多用揉捻机和压碎-撕裂-卷曲（Crush - tear - curl，CTC）技术实现连续化加工[7-8]。彭秀英等[9]通过模糊控制算法与变频技术相结合，实现了杀青温度和时长的精准控制。施重驹等[10]通过多相流耦合联合仿真分析杀青过程，并结合正交试验优化参数组合，显著提高了杀青均匀性和热能利用率。杨莹等[11]设计了新型隧道式高效杀青机，采用蒸汽杀青技术结合下鼓上抽式脱湿系统，实现多酚类物质有效保留。王攀等[12]通过建立理条部件温度场模型，优化电阻丝布置方式，提高了加热均匀性。施卓奇等[13]通过改进电机安装位置与连杆结构，结合有限元分析验证连杆强度，实现了茶叶成条率的提升与碎茶率的降低。徐勇等[14]建立钢槽温度场模型，分析不同往复频率下电热管温度分布，并优化排布参数提出柔性加热膜包覆方案，使升温速度提高 16 倍。

综上，茶叶杀青理条设备研究主要集中在温度控制、结构参数及作业方式，并通过有限元分析、热力学仿真、模糊控制算法和正交试验等方法开展相关研究。现有设备使茶叶在锅槽内不断碰撞、翻滚、抛撒，以完成杀青理条作业。本课题组前期开展了连续复式茶叶理条装备研究，秦宽等[15]通过优化设计与试验分析，揭示了锅槽结构及振动特性对茶叶理条效果的影响规律，为后续研究奠定了基础。加热温度与锅槽结构直接影响茶叶加工效果，高温加热配合锅槽高频往复振动可提升作业效率，但在新型加热方式及锅槽结构方面的研究较少，缺少相关理论支撑与参数优化。因此，本文将对高温热风加热条件下高频往复振动异形锅槽内的茶叶运动机理进行研究，通过数值仿真与试验分析相结合的方法，研究不同运动特性与工作参数对茶叶杀青理条效果的影响，以提高加工效率与质量。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

名优绿茶高温高频异形锅槽杀青理条机由出料斗、异形锅槽、理条控风装置、杀青控风装置、双温可调式高温热风炉、主风管、进料斗、机架、传动机构、偏置曲柄滑块机构、电机、分风管、支撑限位导向机构等组成，整机结构如图 1 所示。

1.2　工作原理

名优绿茶高温高频异形锅槽杀青理条机工作时，热源由双温可调式高温热风炉提供，经主、分风管分别输送至杀青与理条控风装置实现高温热风加热；电机提供动力，通过传动机构及偏置曲柄滑块机构驱动异形锅槽往复振动；支撑限位导向机构固定于机架上，对锅槽起支撑与导向作用。待炉温达到设定值后对锅槽预热，茶叶由进料斗进入锅槽内。

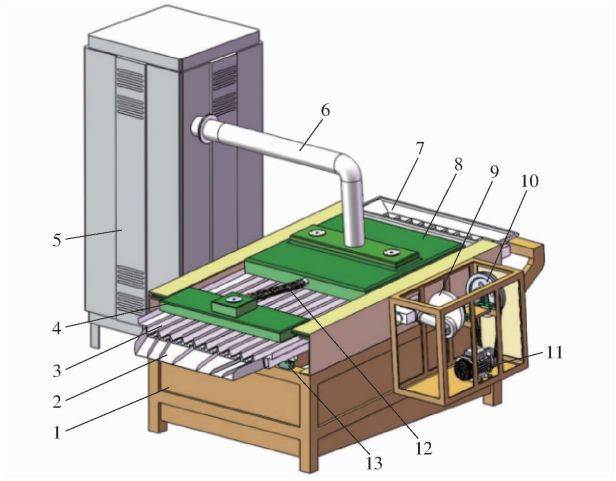


图 1 整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of whole machine

1. 机架 2. 出料斗 3. 异形锅槽 4. 理条控风装置 5. 双温可调式高温热风炉 6. 主风管 7. 进料斗 8. 杀青控风装置 9. 偏置曲柄连杆滑块机构 10. 传动机构 11. 电机 12. 分风管 13. 支撑限位导向机构

鲜叶叶片较大,首先在异形锅槽上半段与锅槽侧壁发生碰撞并呈现腾空状态,腾空状态下的茶叶将被杀青控风装置排出的高温热风包覆加热,迅速完成杀青作业,在锅槽往复运动与热风的作用下,茶叶初具条形后落入异形锅槽的下半段不断与锅槽内壁碰撞、搓擦,此时主要完成理条作业。整个过程中,茶叶既有横向运动也有纵向运动,在热力和机械力的双重作用下,茶叶同时进行杀青与理条作业,逐渐呈现色泽翠绿、条形索直的状态,经理条控风装置定型后由出料斗排出,最终完成杀青理条。

2 锅槽结构设计与关键工作参数分析

常见 U 形锅槽杀青理条机主要采用底部电加热方式,以热传导为主,温度通常为 240 ~ 280℃,此温度导致酶的活性钝化缓慢,叶绿素降解加剧,因此需要更长的理条路径和时间使茶叶酶钝化,此过程茶叶香气流失,叶绿素降解后颜色偏深。此外,配合此理条温度,振动频率不宜过高且锅槽形状设计为较平缓的 U 形锅槽,保证茶叶不因过分撞击而破碎,但也因此出现因撞击次数和力度不足,导致茶叶理条形状不够索直。针对上述问题,在本课题组现有的连续复式茶叶理条机研究基础上进行优化[15]。首先采用高温热风包覆加热,以热对流传热为主,杀青温度可达 300 ~ 360℃,热量迅速穿透鲜叶,高温快速破坏酶的活性,叶绿素和多酚类物质大量被保留,可使茶色翠绿,滋味鲜爽[16]。高温状态下,理条路径和时间需缩短,因此研制一种异形锅槽配合高频往复运动,提高茶叶在锅槽内的平均速度,增加撞击次数和力度,使茶叶条形紧索。

2.1 理条关键结构设计

异形锅槽的槽宽与槽深尺寸沿用课题组以往 U 形锅槽的设计参数。为提高茶叶与锅槽的碰撞次数与力度,采用多段倾斜侧板组成,以替代传统平缓的 U 形锅槽。各倾斜侧板尺寸设计依据其与茶叶接触所产生的运动,其截面如图 2 所示,整体结构呈轴对称样态,*AB*、*BC*、*FG* 段共同构成杀青空间,称为区域Ⅰ;*CD*、*DE*、*EF* 形成理条空间,称为区域Ⅱ,其中 *EF*、*CD* 分别与 *DE* 形成理条夹角 α;*EF*、*FG* 段对称构成中间结构。

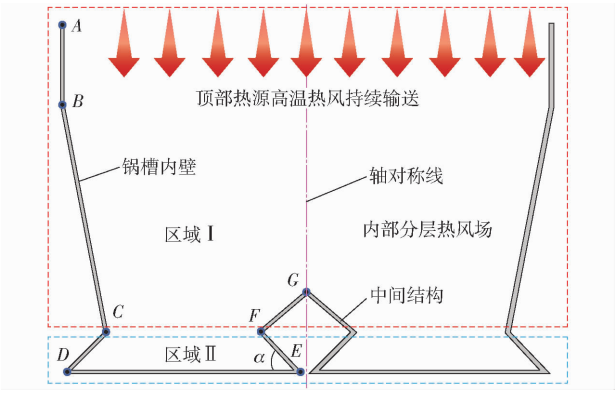


图 2 异形锅槽区域分解示意图

Fig. 2 Diagram of irregular pot groove area decomposition

在区域Ⅰ内,*BC* 段既保留了茶叶在 U 形槽内的滚动成形效果,又作为抛撒运动的起始段,在高频往复运动条件下承担主要碰撞作用,是区域Ⅰ内主导作用段;*AB* 段为 *BC* 段的延伸,可防止茶叶越槽,长度为 *BC* 段的 1/3。*FG* 段上的茶叶运动以碰撞为主,为保证茶叶在离开 *BC* 段抛撒后具有足够腾空空间,使其在热风包覆下充分加热杀青,点 *G* 高度需低于点 *B*,*FG* 段长度略小于 *AB* 段。茶叶在该空间内碰撞与腾空状态交叠出现,高温热风包覆加热使其迅速均匀受热,便于色泽与滋味的形成。

在区域Ⅱ内,其截面形状近似等腰梯形,茶叶主要在 *DE* 段进行滚动搓擦运动,故 *DE* 段为区域Ⅱ内的主导段。如图 2 所示,与 *DE* 段形成理条夹角的 *CD* 段与 *EF* 段有助于茶叶在往复滚动过程中实现翻动与成形。由于锅槽整体纵向相对于水平面呈一定倾斜角度,在茶叶自身重力与锅槽高频往复运动共同作用下,使得茶叶在锅槽中能够顺利向前运动,持续翻动促进茶叶条形逐渐索直。

其中,中间结构部分使锅槽单体中具有两处理条空间,且倾斜的锅槽内壁增加了茶叶理条成形的撞击次数与力度,缩短了理条路径,使茶叶更易卷曲成形、条形索直。

2.2 关键工作参数分析

茶叶在锅槽内的成形过程主要依靠其在锅槽内

壁的反复搓擦、碰撞、翻滚与抛撒等作用，在冲击力、切向力及摩擦力的综合作用下，形态由松散鲜叶逐步转变紧实条形。如图 3 所示，茶叶主要有 3 种运动状态：茶叶沿异形锅槽斜面滚动运动、茶叶随着锅槽往复振动的抛撒运动、茶叶与锅槽斜面的碰撞运动。在茶叶杀青理条的力学建模中，由于茶叶的尺寸与锅槽相比较小，单片茶叶虽会发生翻滚、变形，但在大量茶叶的群体运动中，旋转效应平均化，故可将茶叶看作质点以分析其受力与运动特性[17]。

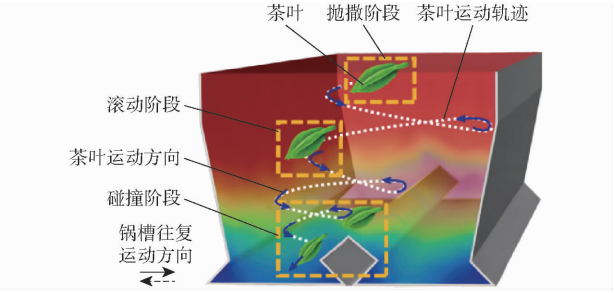


图 3　锅槽热风场中茶叶运动过程示意图

Fig. 3　Diagram of tea leaf movement in hot-air field

在杀青理条的滚动与碰撞运动过程中，茶叶受到支持力 F_N 与摩擦力 F_f 以及自身重力 G，锅槽以一定的速度带动茶叶运动，其在斜面上的运动受力关系如图 4 所示。

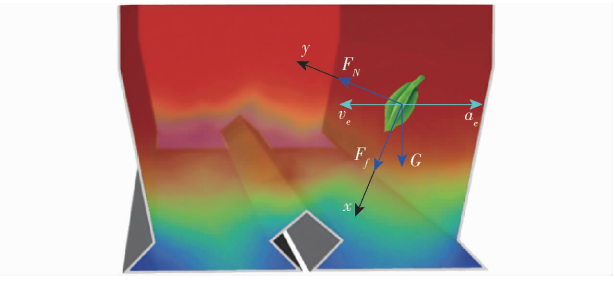


图 4　茶叶沿锅槽斜面的运动分析

Fig. 4　Analysis of rolling of tea leaves along inclined surface of pot slot

锅槽的往复运动由偏置曲柄滑块机构实现，作简谐往复运动，其角频率为 ω，往复运动频率为 f_n，运动幅值 A 为 0.025 m，则可得锅槽运动速度 v_e[18] 计算公式为

$$v_e = A\omega\cos(\omega t) \tag{1}$$

其中

$$\omega = 2\pi f_n \tag{2}$$

由式(1)对时间求导可得锅槽加速度 a_e 近似值

$$a_e = -A(2\pi f_n)^2\sin(\omega t) \tag{3}$$

由式(1)、(3)可得锅槽往复运动频率直接影响其运动速度，从而影响茶叶的 3 种运动状态，故需合理的运动频率保证加工效果。本文研究高温状态下高频往复运动锅槽内茶叶的杀青与理条，热风温度高于常见杀青温度，高温易导致茶叶焦糊与爆点，故热风加热温度为必要考虑参数。传统 U 形槽中锅槽侧壁角度影响茶叶滚动受力及成条效果；改进为由杀青空间和理条空间组成的异形锅槽后，两区域侧壁角度对加工效果产生不同影响，其中理条空间内的理条夹角对茶叶运动状态与受力特征影响更为显著，直接关系到成形效果。因此，在保持其他结构参数和工艺条件一致的前提下，以锅槽往复运动频率、热风加热温度、理条夹角为关键参数，确定其范围后，通过试验系统研究其对茶叶运动特性及杀青理条效果影响的规律。

2.3　工作参数范围确定

设计目标为 30 s 内完成杀青，杀青时间段内茶叶发生扰动至少 140 次，1 min 内完成杀青理条，单台产量为 100 kg/h。单片茶叶质量约为 0.21 g；杀青前鲜叶含水率 75%，杀青后降至 60%；杀青目标叶温 80℃，杀青叶温上限 105℃；茶叶与锅槽的静摩擦因数为 0.65[19-21]。

2.3.1　锅槽往复运动频率 f_n

茶叶在锅槽内的运动应在有效杀青时间内保证足够的扰动频次。同时其运动强度不宜过于剧烈，以避免茶叶破碎及越槽。在锅槽往复振动的作用下，茶叶在锅槽内呈现周期性扰动，有利于叶片理条成形。扰动次数受振动频率影响，为缩短杀青时间并保证受热均匀，需要提高茶叶在锅槽内的扰动次数。因此，本文选取杀青阶段单片茶叶的扰动次数至少为 140 次[22]，则有

$$f_n t_{res} \geqslant 140 \tag{4}$$

式中　t_{res}——杀青时间，s

经计算可得锅槽往复运动频率下限为 4.66 Hz。

由式(1)、(3)可得锅槽加速度最大值为

$$a_{\max} = A(2\pi f_n)^2 \tag{5}$$

散装物料在振动槽体内运动不能过于剧烈，存在一个被允许的最大加速度 a_{allow}（通常为重力加速度 g 的若干倍）为[23]

$$a_{allow} = Kg \tag{6}$$

则有

$$a_{\max} \leqslant a_{allow} \tag{7}$$

式中　K——动设备系数，经验范围内取 3.6[24]

整理式(4)～(7)可得

$$f_n \leqslant \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{Kg}{A}} \tag{8}$$

计算可得锅槽往复运动频率上限为 6.00 Hz，故最终锅槽运动频率范围为

$$4.66\ \text{Hz} \leqslant f_n \leqslant 6.00\ \text{Hz} \tag{9}$$

2.3.2　理条夹角 α

茶叶的主要成形过程则依赖于理条空间的结构特征，其在理条空间内主要受到自身重力、锅槽对茶叶的支持力、惯性力以及摩擦力的共同作用，受力关

系如图 5 所示。根据振动斜面颗粒运动理论,当沿接触面方向的惯性力分量大于最大静摩擦时,茶叶开始产生滑移运动,由图 5 中的受力关系可得

$$ma_e\cos\alpha \geqslant \mu(mg\cos\alpha + ma_e\sin\alpha) \tag{10}$$

式中 μ——茶叶与锅槽的静摩擦因数

整理可得

$$\tan\alpha \leqslant \frac{1}{\mu}\left(1 - \frac{\mu g}{a_e}\right) \tag{11}$$

结合式(5)、(9)、(11),计算可得 $\alpha \leqslant 51.56°$。

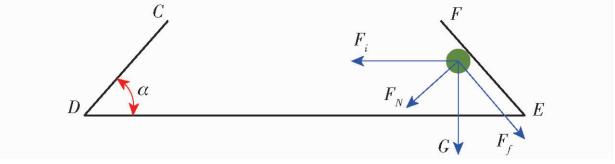


图 5 锅槽理条空间内茶叶受力示意图

Fig. 5 Force diagram of tea leaves in trough shaping space

在有效加工时间内,茶叶应在锅槽内形成稳定的滚动、贴壁和回落的循环运动,以保证在切向力和法向力的共同作用下实现理条成形。茶叶要在理条空间内形成稳定的循环运动,则需在惯性力减弱或反向时也能够依靠重力克服摩擦力沿斜面滚动,即

$$mg\sin\alpha \geqslant \mu mg\cos\alpha \tag{12}$$

由于茶叶具有变形复杂、表面黏湿等特点,接触过程中除库仑摩擦外还存在液桥黏附作用,使实际摩擦行为更为复杂[25]。通常采用等效摩擦因数进行表征,并在计算中取保守值以反映黏附效应影响,由式(12)计算可得 $\alpha \geqslant 40.36°$。取整后最终确定理条夹角范围为 $40° \leqslant \alpha \leqslant 50°$。

2.3.3 热风加热温度 T

杀青过程中热风加热所提供的热量要大于总热量需求,但不能过高,否则易造成叶片的焦糊。根据茶叶产量计算可得单位时间内茶叶流动质量 m_s 为 0.027 8 kg,茶叶含水率由杀青前含水率 M_0 降至杀青后含水率 M_1 的过程中,叶片水分蒸发所需热量 Q_l 为

$$Q_l = m_s(M_0 - M_1)Q_w \tag{13}$$

式中 Q_w——水的汽化潜热,J/kg

茶叶的初始温度 T_0 约为 25℃,加热至杀青时目标叶温 T_1 所需热量 Q_y 为

$$Q_y = c_y m_s(M_0 - M_1)(T_1 - T_0) \tag{14}$$

式中 c_y——茶叶比热容,J/(kg·K)

则杀青过程中单位时间的总热量需求 Q_{need} 为[26]

$$Q_{need} = \frac{Q_l + Q_y}{t} \tag{15}$$

整理计算可得杀青总热量需求 Q_{need} 为 14.017 kW。根据牛顿冷却定律可得热风加热单位时间内的供热能力为

$$Q_{sup} = h_{eff}(T - T_1)A_{pan} \tag{16}$$

式中 h_{eff}——等效换热系数,取 44 W/(m²·K)

A_{pan}——热风加热有效面积,取 1.44 m²

为了满足总热量需求则有

$$Q_{sup} \geqslant Q_{need} \tag{17}$$

由式(13)~(17)整理计算可得 $T \geqslant 301.23$℃,茶叶的表面温度不能超过杀青时茶叶表面温度上限 T_2,同理分析计算可得 $T \leqslant 359.16$℃,为方便后续试验设计,最终确定热风加热温度范围 300℃ $\leqslant T \leqslant$ 360℃。

3 杀青理条过程仿真模型建立与关键参数对杀青理条质量影响分析

由于杀青理条机在高温和高速往复振动条件下运行,难以直接观察各关键因素对茶叶加工质量的影响,因此利用 Rocky DEM 软件对茶叶颗粒在异形锅槽内的运动状态进行虚拟仿真试验。根据茶叶在异形锅槽的动力学分析以及实际杀青理条工况需求设置仿真试验因素与水平:锅槽往复运动频率为 4.66、5.33、6.00 Hz,理条夹角为 40°、45°、50°,热风加热温度 300、330、360℃。以茶叶颗粒的平均受力和平均速度作为评价指标,开展单因素试验,探究各关键因素对作业质量的影响规律。

3.1 茶叶颗粒基本参数与模型建立

本文以岳西翠兰为研究对象,根据安徽省地方标准 DB34/T 430—2018《地理标志产品 岳西翠兰》[27]可知采摘的鲜叶状态为一芽一叶和一芽两叶,本课题组现有茶叶模型根据真实茶叶参数建立,符合岳西翠兰形态特征,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°。将茶叶颗粒以 .STL 格式使用自定义多面体(Custom Polyhedron)将模型导入 Rocky DEM 软件中,其模型如图 6 所示。

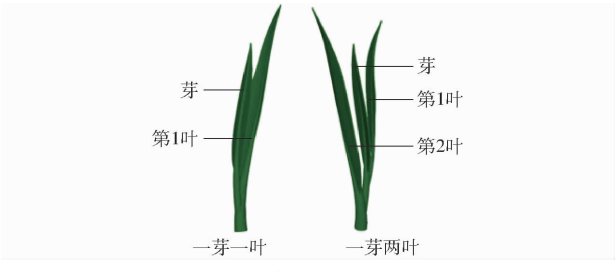


图 6 茶叶颗粒模型

Fig. 6 Tea particle model

3.2 异形锅槽基本参数与模型建立

异形锅槽是茶叶完成杀青与理条的主要作用空

间，异形锅槽的结构类型、运动状态与温度分布共同影响成茶的色、香、味、形。异形锅槽安装在控风装置下方 80 mm 处，控风装置通过边板固定在机架上；锅槽下方焊接有两根空心方管，空心方管与支撑限位导向机构滚动接触；锅槽与水平面的夹角由高度调节装置控制实现。单个异形锅槽结构采用 1 mm 厚的 316 不锈钢制成，长 2 900 mm，宽 120 mm，高 85 mm，由 10 个异形锅槽单体组成主要的杀青理条空间，异形锅槽剖面图如图 7a 所示。

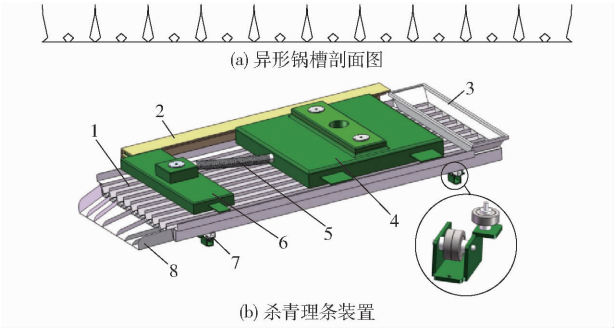


图 7　杀青理条关键部件结构图

Fig. 7　Schematics of key components of fixation-shaping machine

1. 异形锅槽　2. 支撑架　3. 进料斗　4. 杀青控风装置　5. 分风管　6. 理条控风装置　7. 支撑导向机构　8. 出料斗

利用 Solidworks 软件对杀青理条关键部件进行建模，并将其以. STL 格式导入 Rocky DEM 软件中，进料斗的长、宽、高分别为 1420、320、100 mm，锅槽整体长、宽、高分别为 2 900、1 200、85 mm，颗粒入口长、宽分别为 1 100、260 mm，杀青理条装置如图 7b 所示。

3.3　仿真参数设置与仿真过程

茶叶颗粒具有柔性、不规则、摩擦显著等特点，颗粒与锅槽以及颗粒之间的碰撞皆为非线性碰撞，为更加契合茶叶柔性颗粒在杀青理条过程中的受力和运动特征，在设置仿真物理条件时将 Normal Force 设为 Hertzian Spring Dashpot 来描述颗粒的法向碰撞行为；将 Tangential Force 设为 Mindlin – Deresiewicz 来描述颗粒切向碰撞行为；滚动阻力模型 Rolling Resistance Model 则设为 Type C：Linear Spring Rolling Limit 来模拟茶叶在锅槽内的抗滚动特性；将松弛因子 Numerical Softening Factor 设为 0. 2 加快仿真。

锅槽前段为热风杀青段，后段为理条定型段，两段所需温度不同，在 Geometries 中，前段温度按试验设置，后段统一设为 433. 15 K。根据本课题组已采集并标定的参数，结合相关参数数据，在 Materials、Materials Interactions、Particles 中分别设置锅槽和茶叶颗粒的相关物理特性，具体参数如表 1 所示。根据颗粒生成速度以及实际工况，在求解器中设置模拟持续时间为 8 s，每 0. 05 s 输出一次求解曲线以便后续分析，茶叶颗粒的仿真运动状态如图 8 所示。

表 1　仿真系统材料与接触参数

Tab. 1　Materials and contact interaction parameters of simulation system

参数	数值	文献序号
茶叶颗粒密度/(kg·m^{-3})	562. 4	[15]
茶叶颗粒泊松比	0. 4	[26]
茶叶颗粒杨氏模量/(N·m^{-2})	2. 8 × 10^{7}	[15]
锅槽密度/(kg·m^{-3})	7 800	[26]
锅槽泊松比	0. 3	[26]
锅槽杨氏模量/(N·m^{-2})	1. 82 × 10^{8}	[15]
茶叶颗粒间静摩擦因数	0. 8	[15]
茶叶颗粒间动摩擦因数	0. 15	[28]
茶叶颗粒间恢复系数	0. 37	[28]
茶叶颗粒–锅槽静摩擦因数	0. 65	[15]
茶叶颗粒–锅槽动摩擦因数	0. 15	[28]
茶叶颗粒–锅槽恢复系数	0. 4	[15]

3.4　仿真结果分析

茶叶在杀青理条过程中的品质形成与其在锅槽内的运动和受力状态密切相关。本文以平均速度、平均法向力和平均切向力表征茶叶颗粒的运动与受力特征。其中，平均速度反映茶叶的翻滚、抛撒和回落强度及受热均匀程度，平均法向力反映茶叶与锅槽接触时的压紧和支撑作用，平均切向力反映茶叶的摩擦揉搓、定向整形作用及剪切损伤风险。上述参数共同影响茶叶的成形和破损程度，并最终表现为成条率和碎茶率的变化。

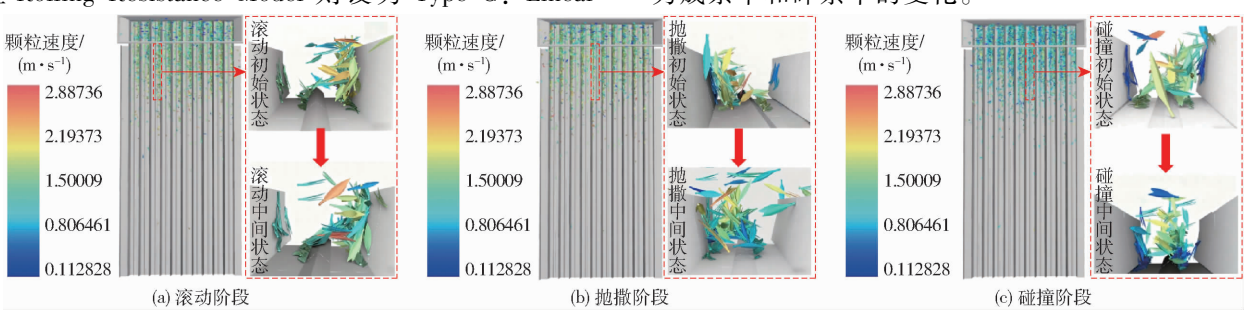


图 8　茶叶颗粒仿真运动状态

Fig. 8　Tea particle simulation motion state

3.4.1 不同锅槽往复频率对茶叶杀青理条效果的影响

如图 9 所示，1.5 s 后锅槽往复运动频率为 4.66 Hz 时，茶叶颗粒的平均速度为 1.3 m/s，平均法向力为 0.09 N，平均切向力为 0.011 N，此时茶叶颗粒运动较为缓慢，主要以滑动和滚动为主，在杀青空间内的抛撒高度与时间不足，不利于包覆加热杀青，理条夹角处易产生茶叶颗粒的堆积，导致理条不均匀，此时茶叶颗粒所受切向力作用小，虽不易造成破碎，但茶叶颗粒与锅槽的压紧和碰撞作用也较弱，不利于茶叶的理条成形；锅槽往复频率为 6.00 Hz 时，茶叶颗粒的平均速度为 1.7 m/s，平均法向力为 0.30 N，平均切向力为 0.036 N，此时茶叶颗粒运动较为剧烈，主要做抛撒运动，在杀青空间内抛撒幅度过大，茶叶颗粒易越槽，影响各槽内茶叶颗粒数量的均衡性，茶叶在理条空间内的时间相应减少，导致受力不均且无周期性变化，工况不稳定，理条时茶叶颗粒与锅槽内壁撞击力度大，易造成嫩芽的破碎，过大的切向力容易增大叶片表面的磨损，茶汁渗出过多，叶片间产生粘连，降低杀青理条质量。锅槽往复频率为 5.33 Hz 时，茶叶颗粒的平均速度为 1.5 m/s，平均法向力为 0.16 N，平均切向力为 0.020 N，此时茶叶颗粒运动为滑动、滚动、抛撒混合运动，在杀青空间内的抛撒高度大、离散程度高，有利于高温包覆均匀加热，在理条空间内既有滚动也有短暂的抛撒运动，茶叶颗粒与锅槽的压紧作用以及茶叶颗粒间的摩擦揉搓作用较为均匀，工况稳定，有利于茶叶在适度压紧和摩擦整形作用下完成理条。仿真结果表明，锅槽往复运动频率对茶叶颗粒在锅槽内的运动速度和受力都有着极为显著的影响，1.5 s 后茶叶颗粒平均速度和平均受力基本趋于稳定，呈现周期性变化。

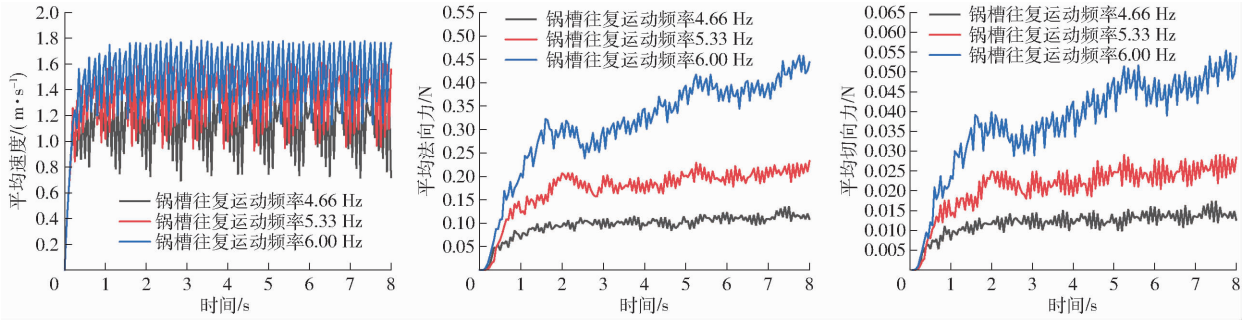


图 9 不同锅槽往复运动频率下茶叶颗粒平均速度、平均法向力、平均切向力变化曲线

Fig. 9 Curves of average velocity, normal force, and tangential force of tea particles at different pot and groove motion frequency

3.4.2 不同理条夹角对茶叶杀青理条效果的影响

如图 10 所示，3 s 后当理条夹角为 40°时，茶叶颗粒的平均速度约为 1.54 m/s，平均法向力约为 0.201 N，平均切向力约为 0.022 N。此时茶叶颗粒以滑动、滚动为主并伴随抛撒，茶叶颗粒所受的法向力较大，锅槽对茶叶压紧作用较强，有利于在理条时形成一定的压实和定型效果，但切向力相对较小，锅槽内壁对茶叶的摩擦揉搓作用较弱，茶叶成条所需的定向摩擦整形不足，易导致茶叶紧直度有限或局部理条力度不够的情况。理条夹角为 50°时，茶叶颗粒的平均速度约为 1.53 m/s，平均法向力约为 0.175 N，平均切向力约为 0.027 N，夹角增大后法向力减小、切向力增大，锅槽内壁对茶叶的压紧与支撑减弱，碰撞力降低，不利于压实成形。同时切向剪切与摩擦作用增强，虽有利于揉搓定向和条索形态整形，但过强的切向摩擦易使茶汁渗出，增加粘连风险。理条夹角为 45°时，茶叶颗粒的平均速度约为 1.55 m/s，平均法向力约为 0.189 N，平均切向力约为 0.024 N，此时法向的碰撞力与切向的摩擦力处于相对平衡状态，既能提供必要的支撑以利于条形保持与成形，又有适中的摩擦揉搓作用使紧直度提升，颗粒在理条空间内更易形成

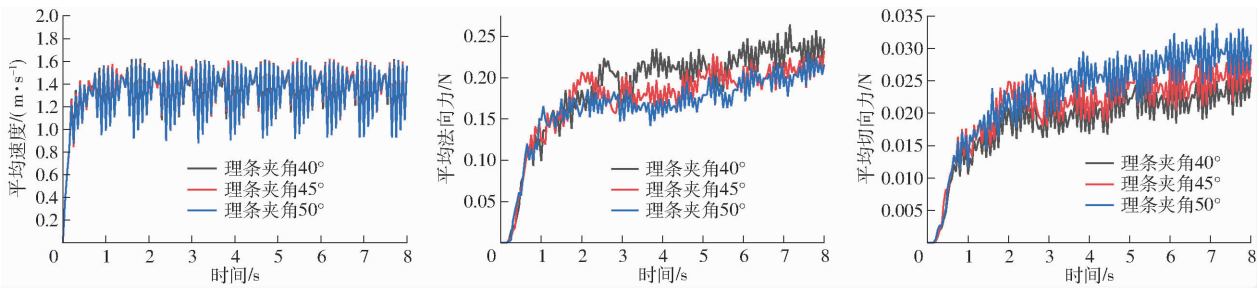


图 10 不同理条夹角下茶叶颗粒平均速度、平均法向力、平均切向力变化曲线

Fig. 10 Curves of average velocity, normal force, and tangential force of tea particles at different shaping angles

滑动、滚动、短暂抛撒的混合运动，受力分布较均匀，更有利于获得较好的理条一致性。仿真结果表明，理条夹角对茶叶颗粒在锅槽内的运动速度影响较小，但对受力都有着极为显著的影响，3 s 后茶叶颗粒平均速度和平均受力基本趋于稳定，呈现周期性变化。

3.4.3　不同热风加热温度对茶叶杀青理条效果的影响

如图 11 所示，4 s 后当热风加热温度为 300℃时，茶叶颗粒的平均速度为 1.554 m/s，平均法向力为 0.18 N，平均切向力为 0.021 N，此时茶叶颗粒运动速度适中，运动状态均衡，但温度偏低，杀青空间内水分蒸发较慢，加工过程中易出现“闷黄”现象，理条空间内茶叶颗粒滚动有序，摩擦揉搓和压紧作用略强，成形效果稳定，但由于茶叶含水率较大，定向整形效果受到限制。当热风加热温度为 360℃时，茶叶颗粒的平均速度为 1.564 m/s，平均法向力为 0.21 N，平均切向力为 0.024 N，此时茶叶运动速度略快，抛撒高度大，茶叶颗粒在杀青空间内包覆加热充分，杀青均匀，但加热温度较高，极易出现茶叶焦糊、脆化现象，碎茶率大幅提升，且过高温度导致茶叶颗粒间及与锅槽之间的碰撞力和剪切力增加，理条时嫩芽易破碎，茶叶成形不均匀，加工质量下降。当热风加热温度为 330℃时，茶叶颗粒的平均速度为 1.548 m/s，平均法向力为 0.16 N，平均切向力为 0.018 N，茶叶颗粒运动平稳，杀青空间内叶片水分蒸发速率适中，有利于热能均匀渗透叶片，理条空间内茶叶颗粒在适度法向力和切向力作用下有序翻滚和滑动，既不会因压紧作用过强导致碎茶率上升，又能通过适度摩擦揉搓和剪切作用促进理条成形，工况稳定。仿真结果表明，热风加热温度对茶叶颗粒运动受力呈先减后增趋势，但对运动速度影响较小，4 s 后茶叶颗粒平均速度和平均受力基本趋于稳定，呈周期性变化。

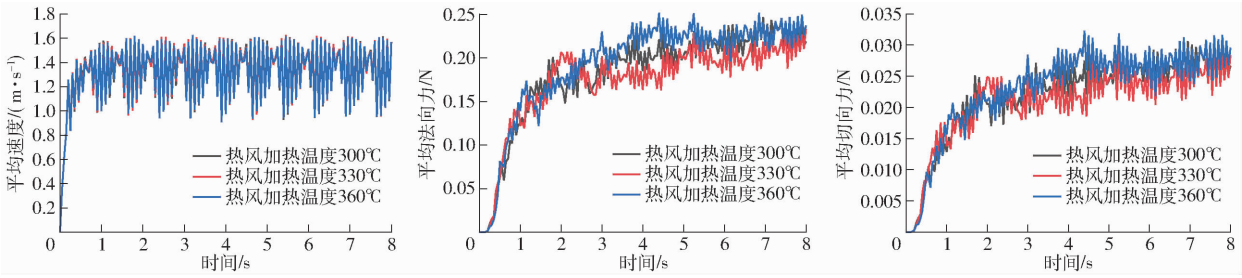


图 11　不同加热温度下茶叶颗粒平均速度、平均法向力、平均切向力变化曲线

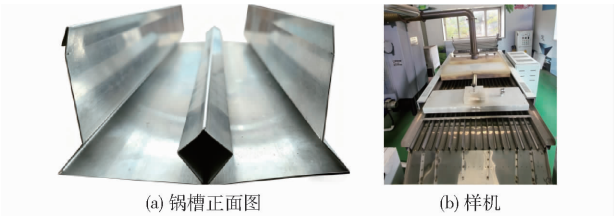
Fig. 11　Curves of average velocity, normal force, and tangential force of tea particles at different heating temperatures

4　杀青理条机性能与优化试验

为分析高温高频异形锅槽茶叶杀青理条机关键参数对茶叶品质的影响规律，采用正交试验筛选主要影响因素及其最佳水平组合，以提升设备工作性能和作业质量[29-30]。

4.1　试验条件与方法

2025 年 7 月在安徽省岳西县顺达机械有限公司进行样机试制与试验，试验所用设备主要包括：电子秤、DM500 型红外线测温仪、数字式风速计、网筛，试验所用样机如图 12 所示。试验使用的茶叶样品为岳西翠兰鲜叶，采摘鲜叶经挑选分级后在 25℃通风环境内摊放 8 h，摊叶厚度 3.5 mm，摊青后鲜叶减重 12% ~14% 即进行茶叶理条试验。试验前参照行业标准 JB/T 12833—2016《茶叶理条机》进行空载试验，对关键运行参数以及设备可靠性等进行验证，确保机器平稳运行。根据仿真试验结果，进行三因素三水平正交试验，设置试验因素编码如表 2 所示。



(a) 锅槽正面图　　(b) 样机

图 12　试验样机

Fig. 12　Experimental prototype

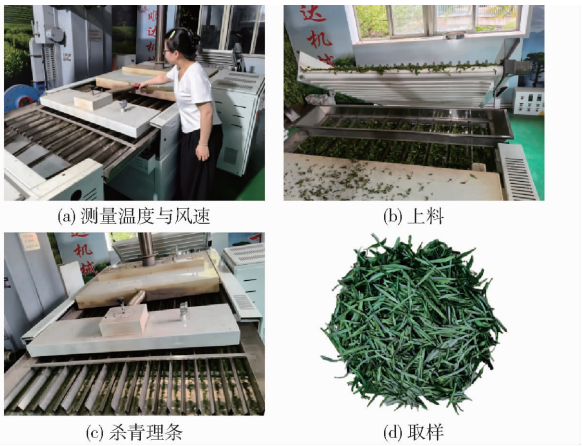
表 2　试验因素编码

Tab. 2　Experimental factors coding

编码	因素		
	锅槽往复运动频率/Hz	理条夹角/(°)	热风加热温度/℃
-1	4.66	40	300
0	5.33	45	330
1	6.00	50	360

试验开始时，测风仪测定热风风速为 1.5 m/s，DM500 型红外线测温仪测定理条温度达到 160℃，杀青温度达到各组试验所需温度时，通过上料机将鲜叶定量均匀投入进料斗，待茶叶全部流出出料斗，则完成一组茶叶杀青理条试验。每组试验前将锅槽内残留的茶叶清除，根据试验方案调整各组因素水平，待试验平台运行稳定后开始试验。

杀青理条试验过程如图 13 所示。杀青理条后茶叶的成条率和碎茶率最能体现茶叶杀青理条机工作性能，根据行业标准 JB/T 12833—2016《茶叶理条机》，成条率越高、碎茶率越低机器工作性能越好，因此选择成条率 Y_1 和碎茶率 Y_2 作为试验的评价指标，根据国标 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。



(a) 测量温度与风速 (b) 上料 (c) 杀青理条 (d) 取样

图 13 试验过程

Fig. 13 Experiment process

4.2 试验方案与结果

试验方案与试验结果如表 3 所示，表中 X_1、X_2、X_3 分别表示锅槽往复运动频率、理条夹角、热风加热温度编码值。

表 3 正交试验方案与试验结果

Tab. 3 Orthogonal test scheme and test results

试验序号	因素			成条率	碎茶率
	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%
1	-1	-1	0	81.22	1.61
2	0	1	-1	86.52	1.52
3	1	0	1	87.61	2.37
4	0	-1	1	86.27	1.79
5	-1	0	-1	82.83	1.72
6	1	-1	0	87.35	1.74
7	-1	1	0	86.24	1.48
8	1	0	-1	85.92	1.79
9	0	0	0	89.66	1.31
10	-1	0	1	83.16	1.69
11	0	0	0	90.43	1.16
12	0	-1	-1	85.43	1.94
13	0	0	0	90.58	1.22
14	1	1	0	85.28	1.58
15	0	1	1	88.49	1.83
16	0	0	0	91.56	1.19
17	0	0	0	91.97	1.28

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

将表 3 中试验数据导入 Design-Expert 13 中可得成条率 Y_1 和碎茶率 Y_2 的二次项回归模型为

$$Y_1 = 90.84 + 1.59X_1 + 0.782\,5X_2 + 0.603\,7X_3 - 1.77X_1X_2 + 0.340\,0X_1X_3 + 0.282\,5X_2X_3 - 3.81X_1^2 - 2.01X_2^2 - 2.15X_3^2 \quad (18)$$

$$Y_2 = 1.23 + 0.122\,5X_1 - 0.083\,8X_2 + 0.088\,8X_3 - 0.007\,5X_1X_2 + 0.152\,5X_1X_3 + 0.115\,0X_2X_3 + 0.246\,5X_1^2 + 0.124\,0X_2^2 + 0.414\,0X_3^2 \quad (19)$$

成条率和碎茶率的回归模型经过方差分析和显著性检验后的结果如表 4 所示。由表 4 可知目标函数成条率 Y_1 和碎茶率 Y_2 模型的 P 值分别为 0.000 1、0.000 6，均小于 0.001，失拟项的 P 值分别为 0.818 3、0.086 3，均大于 0.05，两个模型都极显著且失拟项不显著，表明模型可靠；成条率 Y_1、碎茶率 Y_2 回归方程的决定系数 R^2 分别为 0.972、0.956，表明所建立的模型的拟合效果良好，所选因素对响应变量具有显著解释作用，故可以用上述成条率 Y_1、碎茶率 Y_2 回归方程代替试验真实点对试验结果进行分析。

对于目标函数成条率 Y_1，其因素 X_1、X_1^2、X_3^2 影响极显著，因素 X_1X_2、X_2^2 影响高度显著，因素 X_2 影响显著；对于目标函数碎茶率 Y_2，其因素 X_3^2 影响极显著，因素 X_1^2 影响高度显著，因素 X_1、X_2、X_3、X_1X_3、X_2^2 影响显著。由 F 检验可知影响成条率 Y_1 主次因素依次为：锅槽往复运动频率 X_1、理条夹角 X_2、热风加热温度 X_3；影响碎茶率 Y_2 主次因素依次为：锅槽往复运动频率 X_1、热风加热温度 X_3、理条夹角 X_2。各因素交互影响的响应曲面图如图 14 所示。

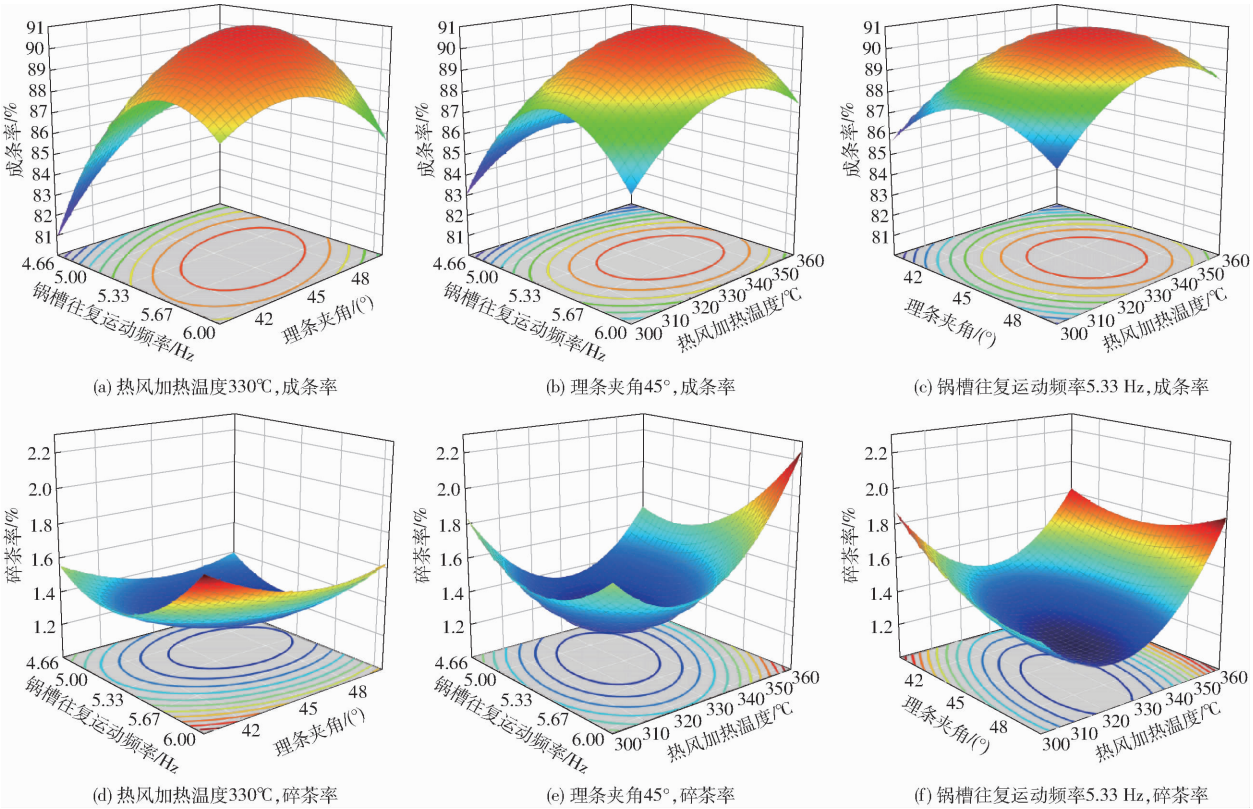
根据二次项回归模型的方差分析及响应曲面可知，锅槽往复运动频率、理条夹角及热风加热温度之间存在交互作用，对成条率和碎茶率有着明显的影响。由图 14a 可知，当理条夹角一定时，成条率随着锅槽往复运动频率的增加先增大后减小；当锅槽往复运动频率一定时，成条率随着理条夹角的增加先增大后减小，锅槽往复运动频率的响应值波动较大且对成条率的影响更显著。由图 14b 可知，当热风加热温度一定时，成条率随着锅槽往复运动频率的增加先增大后减小；当锅槽往复运动频率一定时，成条率随着热风加热温度的增加先增大后减小，锅槽往复运动频率的响应值波动较大并且对成条率的影响更显著。由图 14c 可知，当热风加热温度一定时，成条率随着理条夹角的增加先增大后减小；当理条夹角一定时，成条率随着热风加热温度的增加先增大后减小，理条夹角的响应值波动较大且对成条率的影响更显著。由上述分析可知，各因素对成条率指标的影响程度顺序为：锅槽往复运动频率、理条夹

表 4　成条率 Y_1 与碎茶率 Y_2 的二次项模型方差分析

Tab. 4　Variance analysis of quadratic model of stripe rate Y_1 and tea breakage 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	148. 98	9	16. 55	27. 46	0. 000 1 ***	1. 52	9	0. 168 9	17. 06	0. 000 6 ***
X_1	20. 19	1	20. 19	33. 50	0. 000 7 ***	0. 12	1	0. 12	12. 13	0. 010 2 *
X_2	4. 9	1	4. 9	8. 13	0. 024 7 *	0. 056 1	1	0. 056 1	5. 67	0. 048 8 *
X_3	2. 92	1	2. 92	4. 84	0. 063 8	0. 063	1	0. 063	6. 36	0. 039 6 *
X_1X_2	12. 57	1	12. 57	20. 85	0. 002 6 **	0. 000 2	1	0. 000 2	0. 022 7	0. 884 4
X_1X_3	0. 462 4	1	0. 462 4	0. 767 1	0. 410 2	0. 093	1	0. 093	9. 4	0. 018 2 *
X_2X_3	0. 319 2	1	0. 319 2	0. 529 6	0. 490 4	0. 052 9	1	0. 052 9	5. 34	0. 054 1
X_1^2	61. 04	1	61. 04	101. 26	<0. 000 1 ***	0. 255 8	1	0. 255 8	25. 84	0. 001 4 **
X_2^2	17. 01	1	17. 01	28. 22	0. 001 1 **	0. 064 7	1	0. 064 7	6. 54	0. 037 7 *
X_3^2	19. 51	1	19. 51	32. 36	0. 000 7 ***	0. 721 7	1	0. 721 7	72. 89	<0. 000 1 ***
残差	4. 22	7	0. 602 8			0. 069 3	7	0. 009 9		
失拟	0. 796 3	3	0. 265 4	0. 310 1	0. 818 3	0. 053 8	3	0. 017 9	4. 64	0. 086 3
误差	3. 42	4	0. 855 8			0. 015 5	4	0. 003 9		
总和	153. 2	16				1. 59	16			

注：*** 表示影响极显著（$P<0.001$），** 表示影响高度显著（$P<0.01$），* 表示影响显著（$P<0.05$）。



(a) 热风加热温度330℃，成条率　(b) 理条夹角45°，成条率　(c) 锅槽往复运动频率5.33 Hz，成条率

(d) 热风加热温度330℃，碎茶率　(e) 理条夹角45°，碎茶率　(f) 锅槽往复运动频率5.33 Hz，碎茶率

图 14　成条率与碎茶率指标响应曲面

Fig. 14　Response surfaces of indicators for yield rate and tea breakage rate

角、热风加热温度。

由图 14d 可知，当理条夹角一定时，碎茶率随着锅槽往复运动频率的增大而增大；当锅槽往复运动频率一定时，碎茶率随着理条夹角的增大而减小，锅槽往复运动频率的响应值波动较大并且对碎茶率的影响更显著。由图 14e 可知，当热风加热温度一定时，碎茶率随着锅槽往复运动频率的增大先减小后增大；当锅槽往复运动频率一定时，碎茶率随着热风加热温度的增加整体呈升高趋势，锅槽往复运动频率的响应值波动较大并且对碎茶率的影响更显著。由图 14f 可知，当热风加热温度一定时，碎茶率随着理条夹角的增大而减小；当理条夹角一定时，碎茶率随着热风加热温度的增大先减小后增大，热风加热温度的响应值波动较大并且对碎茶率的影响更显

著。由上述分析可知,各因素对碎茶率指标的影响程度顺序为:锅槽往复运动频率、热风加热温度、理条夹角。

为了获得高温高频异形锅槽茶叶杀青理条机能够实现高成条率和低碎茶率的最佳工作参数组合,对各因素的范围进行约束,确立高温高频异形锅槽茶叶杀青理条机的优化数学模型为

$$\begin{cases} \mathrm{Max}Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \mathrm{Min}Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{20}$$

运用 Design-Expert 13 软件对回归模型进行优化求解,得到各因素的最佳工作参数组合为:锅槽往复运动频率 5.34 Hz、理条夹角 46.2°、热风加热温度 329.2℃,该组合下的成条率为 90.91%,碎茶率为 1.22%。

4.3.2 试验验证

将样机的工作参数调整为最佳组合:锅槽往复运动频率 5.34 Hz、理条夹角 46.2°、热风加热温度 329.2℃,以验证最佳工作参数组合的正确性与准确性,重复试验 3 次取平均值,试验结果如表 5 所示。优化后参数组合下成条率为 88.96%,碎茶率为 1.27%,成条率相对误差为 2.14%,碎茶率相对误差为 4.1%,与优化结果相对误差在 5% 以内,表明验证试验与优化试验结果具有良好的一致性,从而验证了回归模型及其优化参数组合的可靠性与可行性。

表 5 试验验证结果

Tab.5 Experimental results of verification %

试验序号	成条率	碎茶率
1	89.18	1.29
2	88.40	1.30
3	89.30	1.22
平均值	88.96	1.27

5 结论

(1)为提高茶叶加工效率,采用高温热风加热,配合高频往复运动的异形锅槽对茶叶进行杀青理条作业。突破传统 U 形锅槽形状,采用多段斜板拼接而成的异形锅槽,增加撞击次数与力度,通过对茶叶在异形锅槽内的力学与运动学分析,确定影响茶叶成形的关键因素为:锅槽往复运动频率、理条夹角、热风加热温度。

(2)根据设计目标,分析计算得出锅槽往复运动频率范围为 4.66 ~ 6.00 Hz,理条夹角范围为 40° ~ 50°,热风加热温度范围为 300 ~ 360℃;利用离散元数值仿真软件 Rocky DEM 建立茶叶杀青理条仿真模型,对影响茶叶成形的锅槽往复运动频率、理条夹角、热风加热温度进行仿真模拟,通过茶叶颗粒在锅槽内的速度和受力变化规律得出最佳工作参数为:锅槽往复运动频率 5.33 Hz、理条夹角 45°、热风加热温度 330℃。

(3)采用三因素三水平正交试验得出最佳参数组合,利用 Design-Expert 13 对关键参数的数学模型进行优化求解,得出优化后的最佳工作参数组合为锅槽往复运动频率 5.34 Hz、理条夹角 46.2°、热风加热温度 329.2℃,该组合下的成条率为 90.91%,碎茶率为 1.22%。验证试验的成条率为 88.96%,碎茶率为 1.27%,与优化结果相对误差在 5% 以内,表明试验验证与优化试验结果的一致性与可靠性,试验结果满足农艺要求,可保证茶叶加工效率。通过与传统 U 形槽设备的对比,结果显示异形锅槽可有效提高成条率并降低碎茶率。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2025(3): 4 - 21.

[2] 王小勇, 余志, 张德, 等. 炒青绿茶离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 418 - 427.
Wang Xiaoyong, Yu Zhi, Zhang De, et al. Calibration of simulation parameters for roasted green tea based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 418 - 427. (in Chinese)

[3] 夏良胜. 浅谈名优绿茶品质特性与加工要求[J]. 茶业通报, 2017, 39(1): 24 - 27.

[4] 张尧, 王宇星, 程闯逸, 等. 茶叶杀青机概述[J]. 现代园艺, 2024, 47(13): 189 - 191.

[5] 程方平, 易文裕, 庹洪章, 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 status and development trend of tea carding machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(5): 69 - 74. (in Chinese)

[6] 王文明, 肖宏儒, 宋志禹, 等. 茶叶生产全程机械化技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 226 - 236.
Wang Wenming, Xiao Hongru, Song Zhiyu, et al. Research status and prospects of tea production mechanization technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 226 - 236. (in Chinese)

[7] 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.

[8] Laddi A, Prakash R N, Sharma S, et al. Significant physical attributes affecting quality of Indian black (CTC) tea[J]. Journal

of Food Engineering, 2012, 113(1): 69 – 78.
[9] 彭秀英, 陈亚, 罗艳蕾. 基于 PLC 控制的电加热滚筒杀青机温度控制系统[J]. 农机化研究, 2011, 33(4): 186 – 189.
Peng Xiuying, Chen Ya, Luo Yanlei. Constant temperature control system of electric heating cylinder water-removing machine based on PLC control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4): 186 – 189. (in Chinese)
[10] 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 Chongju, 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)
[11] 杨莹, 黄泽界, 何端, 等. 夏秋绿茶的杀青工艺及加工设备研究[J]. 现代食品, 2024, 30(12): 110 – 112.
Yang Ying, Huang Zejie, He Duan, et al. The research of kill-out technology and processing equipment for summer and autumn green tea[J]. Modern Food, 2024, 30(12): 110 – 112. (in Chinese)
[12] 王攀, 易文裕, 程方平, 等. 基于 CFD 的茶叶理条部件试验与优化[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(10): 86 – 91.
Wang Pan, Yi Wenyu, Cheng Fangping, et al. Experiment and optimization of tea slitting parts based on CFD[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 86 – 91. (in Chinese)
[13] 施卓奇, 祝叶峰, 周金亮, 等. 茶叶理条机传动结构的优化[J]. 云南科技管理, 2019, 32(3): 66 – 68.
[14] 徐勇, 闫建伟, 喻丽华, 等. 茶叶理条机加热结构优化及温度场仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(6): 206 – 212.
Xu Yong, Yan Jianwei, Yu Lihua, et al. Optimization of heating structure and simulation analysis of temperature field in tea carding machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(6): 206 – 212. (in Chinese)
[15] 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)
[16] 刘世雄, 曹成茂, 葛俊, 等. 热能循环式热风滚筒杀青机的设计与仿真[J]. 农机化研究, 2023, 45(10): 107 – 114.
Liu Shixiong, Cao Chengmao, Ge Jun, et al. Design and simulation of heat energy circulating hot air tea cylinder fixation machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10): 107 – 114. (in Chinese)
[17] Ali U, Kikumoto M, Cui Y, et al. Role of particle rotation in sheared granular media[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(9): 4599 – 4614.
[18] Gao D, Wu L, Hu K, et al. Simulation of screening performance of linear vibrating screen for sand sorting based on discrete element method[J]. Journal of Engineering Research and Reports, 2024, 26(2): 60 – 68.
[19] 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.
[20] 敖存, 唐德松, 张俊, 等. 不同杀青工艺对秋茶香气品质的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(5): 309 – 311.
Ao Cun, Tang Desong, Zhang Jun, et al. Effects of different fixation process on the aroma quality of autumn tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(5): 309 – 311. (in Chinese)
[21] 朱德文, 岳鹏翔, 袁弟顺. 不同杀青方法对绿茶品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 275 – 279.
Zhu Dewen, Yue Pengxiang, Yuan Dishun. Effects of different fixation methods on the quality of green tea[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 275 – 279. (in Chinese)
[22] 杭州千岛湖丰凯实业有限公司. 一种机械炒制扁形茶的工艺方法: 201711353651.9[P]. 2018 – 06 – 22.
[23] 赵志林. 散料振动输送的动力学分析与仿真研究[D]. 石家庄:河北科技大学, 2014.
Zhao Zhilin. Research on dynamic analysis and simulation of bulk material vibratory conveying[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
[24] Oehmen H H. Theory of vibrating conveyors[J]. Bulk Solids Handling, 1981, 1(2): 123 – 131.
[25] Louati H, Oulahna D, Ryck D A. Apparent friction and cohesion of a partially wet granular material in steady-state shear[J]. Powder Technology, 2015, 278: 65 – 71.
[26] 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)
[27] DB34/T 430—2018 地理标志产品 岳西翠兰[S].
[28] 胡冬军, 闫建伟, 张珍, 等. 基于堆积试验的针形茶叶离散元仿真参数标定[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(3): 66 – 73.
Hu Dongjun, Yan Jianwei, Zhang Zhen, et al. Simulation parameters calibration of needle-shaped tea based on pile-up test[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(3): 66 – 73. (in Chinese)
[29] 余磊, 毕海军, 吴启龙, 等. 茶叶杀青理条机理条部件的试验研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 225 – 231, 237.
Yu Lei, Bi Haijun, Wu Qilong, et al. Experiment on the components of the tea finishing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(8): 225 – 231,237. (in Chinese)
[30] 贾彭程. 燃气式茶叶杀青理条机锅槽结构对安吉白茶品质的影响[D]. 合肥:安徽农业大学, 2023.
Jia Pengcheng. Influence of the pot groove structure of gas-fired tea de-enzyming and carding machine on the quality of Anji white tea[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023. (in Chinese)