

油茶籽微波干燥数值模拟与试验研究

肖 李^{1,2,3} 李立君^{1,2,3} 罗 红^{1,2,3} 黄 丹^{1,2,3}

(1. 湖南省林业装备工程技术研究中心, 湖南 长沙 410004; 2. 国家林业草原经济林果采收装备工程技术研究中心, 湖南 长沙 410004; 3. 中南林业科技大学机械与智能制造学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: [目的] 掌握新鲜油茶籽的微波加热特性和含水率变化规律。[方法] 通过电磁—流/固传热耦合数值模拟, 计算分析单颗油茶籽的升温特性, 确定物料摆放位置和微波功率范围; 开展单颗和小批量油茶籽的微波干燥试验, 根据内部和表面实测温度, 校验数值模拟结果; 采用 Two-term、Henderson and Pabis 和 Midilli and Kucuk 3 种模型分别拟合油茶籽的干基含水率变化, 分析油茶果的微波干燥动力学特性。[结果] 油茶籽的实测温度与仿真温度整体变化趋势一致, 验证了数值模拟的可靠性; 油茶籽的微波干燥过程可分为加速、恒速和减速 3 个阶段, Midilli and Kucuk 模型能更准确地描述油茶籽的微波干燥动力学特性; 微波干燥油茶籽的最佳工艺条件为微波功率 200~350 W、单次加热 5 min、间隔 2 min, 此时单批 (200 g) 油茶籽达到预期干基含水率 9% 需 42~126 min, 其干燥效率相对于传统热风干燥和红外干燥提升了 70%~90%, 且能有效避免过热焦化和开裂。[结论] 微波加热技术可实现新鲜油茶籽的高效可控干燥。

关键词: 油茶籽; 微波干燥; 数值模拟; 温度分布; 干基含水率

Numerical simulation and experimental study of microwave drying of *Camellia oleifera* seeds

XIAO Li^{1,2,3} LI Iijun^{1,2,3} LUO Hong^{1,2,3} HUANG Dan^{1,2,3}

(1. Engineering Research Center for Forestry Equipment of Hunan Province, Changsha, Hunan 410004, China; 2. National Forestry and Grassland Engineering Technology Research Center for Harvesting Equipment of Non-Wood Forest Fruits, Changsha, Hunan 410004, China; 3. College of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: [Objective] To understand the microwave heating characteristics and moisture content changes of fresh *Camellia oleifera* seeds. [Methods] Numerical simulations coupling electromagnetic loss with solid/fluid heat transfer are conducted to analyze the temperature rise characteristics of a single *C. oleifera* seed, thereby determining the appropriate sample placement and microwave power ranges. Microwave drying experiments of individual and small batches of *C. oleifera* seeds are performed to validate the numerical results against the actual internal and surface temperatures. Two-term, Henderson and Pabis, and Midilli and Kucuk models are employed to fit the dry basis moisture content changes to analyze the microwave drying kinetics of *C. oleifera* seeds. [Results] The actual temperatures of *C. oleifera* seeds are in general consistence with the simulated results, which validates the reliability of the numerical simulations. The microwave drying process of *C. oleifera* seeds can be divided into three stages: acceleration, stabilization, and deceleration, and the Midilli and Kucuk model can accurately describe this drying kinetics behavior. Under the preferred drying conditions (microwave power of 200~350 W, single heating duration of 5 min, and interval duration of 2 min), a single batch of *C. oleifera* seeds (200 g) can achieve the desired dry basis moisture content (9%) in 42~126 min. This drying method has a 70%~90% higher efficiency than conventional hot-air drying or infrared drying and avoids carbonization and cracking due to overheating. [Conclusion] Microwave heating technology can realize efficient and controllable drying of fresh *C. oleifera* seeds.

Keywords: *Camellia oleifera* seeds; microwave drying; numerical simulation; temperature distribution; dry basis moisture content

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 52306124); 湖南省自然科学基金 (编号: 2022JJ40860)

通信作者: 罗红 (1989—), 男, 中南林业科技大学副教授, 博士。E-mail: luohong2017@hnu.edu.cn

收稿日期: 2024-07-05 改回日期: 2025-01-03

如何实现鲜果脱壳后的油茶籽绿色高效节能干燥,是油茶生产技术领域长期以来的重要关注点。目前,农产品干燥技术主要包括热风干燥^[1]、红外干燥^[2]和微波干燥^[3-4]等。热风干燥技术成熟度高,但能效较低,且干燥周期长。红外干燥能效得以提升,但穿透性较差。不同于传统热风干燥和红外干燥,微波干燥利用物料内部分子在高频电磁场中往复振荡产生的能量损耗(体积热),实现物料由内而外整体升温^[5-6],达到绿色高效、节能保质的干燥效果。唐小闲等^[7]研究了三华李片的热风、红外、微波干燥特性,发现微波干燥速率最快,干燥效果最佳。陈苏森等^[8]研究表明,微波干燥在保持斑兰叶品质方面优于红外干燥。姜龙等^[9]发现在 0.7 W/g 微波功率下,姜片干燥时间仅需 1.83 h,相比传统热风干燥节省了 6.67 h。

尽管微波干燥在能效上具有显著优势,但其快速加热特性会带来温度不均、干燥时长难以控制等问题,从而影响物料的干燥品质,甚至造成其表面焦化和爆裂。王磊等^[10]建立了果浆微波干燥的电磁-质热传递耦合模型,分析了料层电场分布对微波能量利用率和干燥均匀性的影响规律。付文杰等^[11]结合微波干燥多场耦合模拟与试验,分析了不同旋转运动与微波缓苏时间下胡萝卜的温度分布,揭示了温度分布对干燥品质的影响规律。甘婷等^[12]采用几种不同数学模型对芒果微波干燥曲线进行非线性拟合,发现 Wang and Singh 模型最适合描述该微波干燥过程,其决定系数为 0.995 7。宋树杰等^[13]使用可调微波干燥机对熟化紫薯片进行干燥,发现采用 Modified Page 模型可实现干燥曲线最优拟合,其决定系数高达 0.999 7。

综上,微波技术已被广泛应用于农产品加工处理中,但在油茶籽干燥中的应用相对较少,尤其是关于油茶籽微波干燥过程中多场耦合数值模拟的研究鲜有报道。研究拟通过电磁-流/固传热耦合数值模拟,获取单颗油茶籽的微波加热特性,确定合理的物料摆放位置和微波功率范围。在此基础上,开展单颗油茶籽和小批量油茶籽的微波干燥试验,校验数值模拟结果,并对其干燥动力学行为进行预测。结合数值模拟与试验手段,掌握油茶籽微波干燥过程的温升特性和干基含水率变化规律,为油茶籽微波干燥工艺控制提供依据。

1 微波加热数值建模

1.1 几何模型

针对油茶籽干燥需求,设计一套微波加热系统,以 1.5 kW 磁控管为微波功率源。该磁控管可产生 2.45 GHz 高频电磁场,经截面尺寸为 86.4 mm×43.2 mm 的标准铝制波导,以 TE₁₀ 模式传输至矩形多模谐振腔。为保证腔

体的结构强度和热稳定性,谐振腔采用 304 不锈钢制造,腔体尺寸为 308 mm×258 mm×270 mm。

使用 COMSOL Multiphysics 6.1 有限元软件建立微波加热系统的参数化三维模型,如图 1(a)所示。根据实验室测得的新鲜油茶籽(湖南浏阳油茶基地“华金”树种)的特征尺寸,构建单颗油茶籽的等效三维模型。为减少微波能量损失,油茶籽下方放置 $\phi 100\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的石英玻璃托盘,托盘下方放置多孔氧化铝隔热垫块。所有组件(包括垫块、玻璃托盘、油茶籽、谐振腔和波导内空气域)均采用自适应自由四面体网格离散化处理。为提高仿真计算精度,对油茶籽和玻璃托盘进行网格细化,如图 1(b)所示。

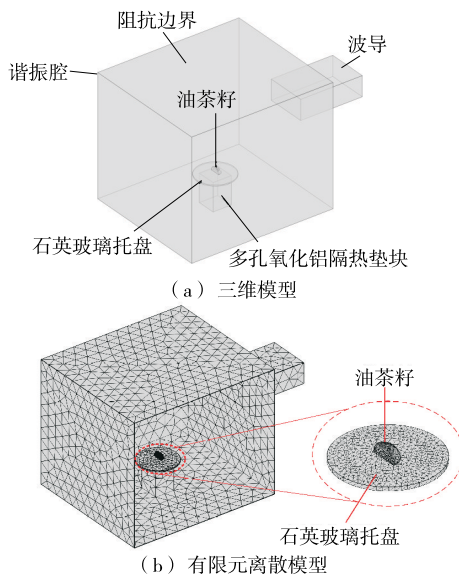


图 1 油茶籽干燥的微波加热系统

Figure 1 Microwave heating system used for *Camellia oleifera* seed drying

1.2 控制方程

微波加热是一个电磁-传热耦合问题,其中材料的相对介电常数 ϵ_r 是决定其微波耦合能力和加热特性的关键参数,其表达式:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (1)$$

式中:

ϵ_r' ——相对介电常数的实部(值越大,材料在电场中的储能能力越强);

ϵ_r'' ——介电损耗因子(值越大,材料在电场中的能量损耗越大)。

根据麦克斯韦方程组,材料内的电场分布 E 可通过求解 Helmholtz 方程^[14]确定:

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \right) E = 0, \quad (2)$$

式中:

E ——电场强度, V/m;

∇ ——梯度算子;

μ_r ——相对磁导率;

σ ——电导率, S/m;

ϵ_0 ——真空介电常数, 取 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m;

k_0 ——自由空间波数;

f ——频率, Hz。

考虑非磁性电介质, 微波场中的能量损耗以介电损耗为主, 可表示为^[15]:

$$Q_d = \pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' (E)^2, \quad (3)$$

根据能量守恒定律, 该介电损耗可转换为体积热源, 与固体传热方程耦合为^[16]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q_d, \quad (4)$$

式中:

Q_d ——介电损耗, W/m³;

T ——温度, K;

ρ ——密度, kg/m³;

k ——热导率, W/(m·K);

C_p ——恒压比热容, J/(kg·K)。

当空气流速较低时, 微波加热腔内气流可视为层流, 其连续性(质量)方程和动量方程可分别表示为^[17]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \mathbf{u}) = 0, \quad (5)$$

$$\rho_i \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_i \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}, \quad (6)$$

式中:

ρ_i ——流体密度, kg/m³;

p ——流体压力, Pa;

$\boldsymbol{\tau}$ ——黏性应力张量, Pa;

$\mathbf{u}$ ——流体速度矢量, m/s;

$\mathbf{F}$ ——体积力矢量, N/m³。

为描述空气域中的传热, 可采用流体传热方程:

$$\rho_i C_{pf} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (q + q_r) = Q_p + Q_{vd} + Q, \quad (7)$$

式中:

C_{pf} ——流体的恒压比热容, J/(kg·K);

Q_p ——压力变化所做的功, W/m³;

Q_{vd} ——黏性耗散, W/m³;

Q ——其余热源, W/m³;

q ——对流热通量, W/m²;

q_r ——辐射热通量, W/m²。

根据式(1)~式(7), 可计算固体/流体介质的介电损耗和热生成率, 从而为油茶籽微波加热过程的电磁一流固传热耦合数值模拟和温度预测提供了理论依据。

1.3 材料参数

结合文献[18—19]和COMSOL材料数据库, 确定用于油茶籽微波加热仿真的材料参数见表1。为模拟微波在腔体内的反射和吸收, 304不锈钢腔体内壁设置为阻抗边界。由于石英玻璃、多孔氧化铝和空气均为微波透明材料, 在微波干燥过程的温度变化较小^[17], 其材料参数可视为定值。

Xie等^[18]采用开端同轴探头法, 获得了油茶籽粉体在20~90℃范围内的相对介电参数。为模拟油茶籽在更宽温度范围内的微波响应特性, 对该测试结果进行外插处理, 获得油茶籽的相对介电参数曲线如图2所示。由图2可知, 在给定温度范围内, 油茶籽相对介电参数的实部和虚部均处于较高水平, 且随着温度的升高而增长, 表明油茶籽具有较强的微波耦合和吸收能力, 能直接被微波高效加热。

表1 油茶籽微波加热模拟中的材料参数[†]

Table 1 Material parameters used in microwave heating simulations of *Camellia oleifera* seeds

参数	单位	油茶籽	空气*	石英玻璃*	多孔氧化铝*	304不锈钢*
相对介电常数实部	—	温度相关 ^[18]	1	2.55	4.3	1
相对介电常数虚部	—	温度相关 ^[18]	0	0	—	—
电导率	S/m	/	0	0	0	1.39×10^6
密度	kg/m ³	1 003 ^[19]	1.29	2 230	2 770	87 001.29
导热系数	W/(m·K)	0.55 ^[19]	0.026	1.35	0.35	400
比热容	J/(kg·K)	2 000 ^[19]	1 004	703	885	385
相对磁导率	—	1	1	1	1	1

[†] *为COMSOL内置材料数据库。

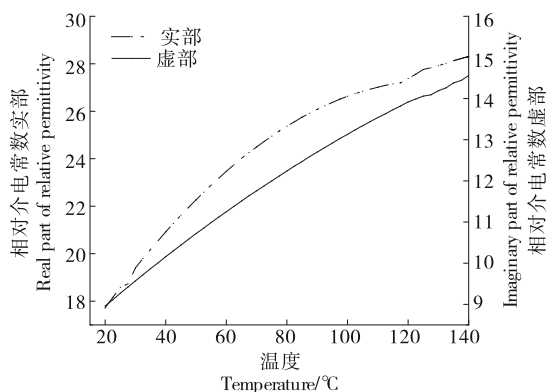


图2 油茶籽的相对介电常数随温度的变化规律

Figure 2 Variation of the relative permittivity of *Camellia oleifera* seed with temperature

2 结果与讨论

2.1 数值模拟结果

2.1.1 物料位置对加热特性的影响 研究^[20]表明,当物料位于腔体水平截面中心时,其温度分布趋于均匀。为进一步确定油茶籽的摆放高度,以油茶籽底面与谐振腔底面的距离为变量(55~85 mm)进行微波加热数值模拟,设定微波功率为 200 W,加热时间为 5 min。通过在油茶籽内部设置温度探针,获得其加热后的内部温度如图 3 所示。由图 3 可知,不同摆放高度下油茶籽的最终温度差异较大,为 63.5~270.0 °C。罗贤飞^[21]研究表明,油茶籽榨油前的烘焙干燥处理温度一般为 90~150 °C;该温度区间可保证较高的干燥效率,同时提高油茶籽的抗氧化能力。当摆放高度为 60 mm 或 80 mm 时,油茶籽加热后的温度为 95~100 °C,加热速度较快且符合干燥温度区间,有助于实现油茶籽高效干燥,并减少其干燥过程中的过热效应。

为比较 60, 80 mm 两个摆放高度下的微波加热均匀性,在油茶籽上选取 5 个等距水平切面,获得其加热后的

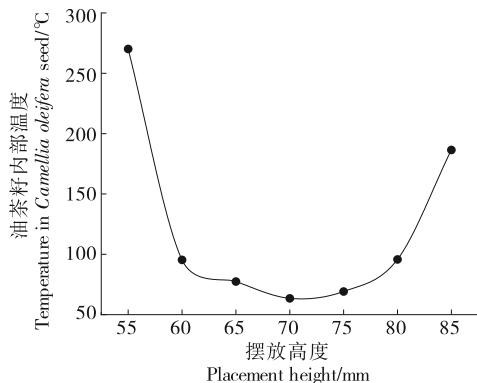


图3 不同放置高度下油茶籽微波加热后的内部温度

Figure 3 Internal temperatures of *Camellia oleifera* seeds after heating at different placement heights

温度分布如图 4 所示。对比可知,前者的最大温差明显低于后者,表明在 60 mm 摆放高度下,油茶籽加热后的整体温度梯度较低,温度均匀性较高。综合加热效率和温度均匀性,确定油茶籽在微波谐振腔内的摆放高度为 60 mm。

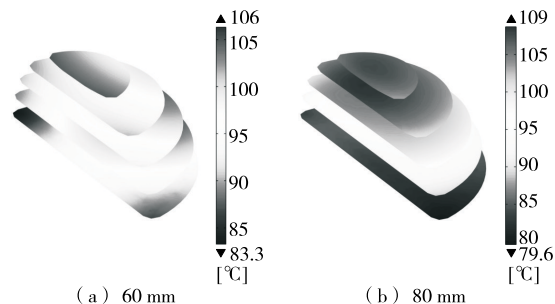


图4 不同摆放高度下油茶籽微波加热后的切片温度

Figure 4 Slice temperatures of *Camellia oleifera* seeds after heating at different placement heights

2.1.2 微波功率对加热特性的影响 微波干燥时,功率过高将引起热量快速累积,导致物料过热焦化;功率过低将导致物料升温过慢,无法满足高效干燥要求,且功率过低时常规磁控管无法正常运行。为确定适用于油茶籽干燥的微波功率范围,模拟 6 种功率(150, 200, 250, 300, 350, 400 W)下的微波加热过程,获得油茶籽内部的实时温度曲线如图 5 所示。由图 5 可知,微波功率越高,油茶籽升温越快。当功率为 150 W 时,油茶籽加热 300 s 后的温度为 70 °C 左右,加热速率较低,难以实现快速干燥。当功率为 400 W 时,油茶籽加热 300 s 后的温度为 160 °C 左右,可能造成油茶籽过热焦化和内部营养成分改性^[22],影响干燥品质。因此,150, 400 W 微波功率均难以满足油茶籽的高效稳定干燥要求。当功率为 200~350 W 时,油茶籽加热 300 s 后的温度为 94.0~143.5 °C,加热速率较快且符合干燥温度范围^[21]。综合考虑干燥效率和干燥品质,确定油茶籽的微波干燥功率为 200~350 W,单次加热时间为 5 min。

2.1.3 油茶籽微波加热特性分析 为分析油茶籽的微波加热特性,以 350 W 为例,截取微波加热后的全局温度分布图如图 6 所示。由图 6 可知,整个加热系统的高温区集中于油茶籽,而托盘、垫块和空气域均处于低温状态。表明微波能量可靶向作用于油茶籽,实现其选择性加热。为进一步分析油茶籽的内部温度,截取油茶籽在 3 个正交方向上的切片温度如图 7 所示。总体而言,油茶籽内部温度高于外缘温度,表明微波具有强穿透性,可实现油茶籽“由内而外”整体加热。根据能量守恒定律,选择加热和体积加热特性可显著减少热影响域和热功率损失,提高

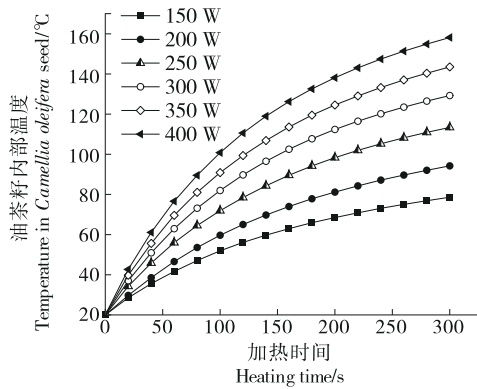


图5 不同微波功率下加热油茶籽的实时温度曲线

Figure 5 Real-time temperatures of *Camellia oleifera* seeds at different microwave power levels

干燥效率,这是常规红外干燥和热风干燥方法难以实现的。

2.2 微波干燥试验结果

2.2.1 油茶籽加热特性分析 试验装置为实验室自研的微波加热系统,其结构尺寸和工作参数与仿真设置相同。所有干燥试验均采用恒功率模式进行。参考仿真结果,设置微波功率为200,250,300,350 W 4个组,加热时间为5 min。为匹配仿真中的温度探针设置,将微型抗电磁干扰K型热电偶插入油茶籽,以获取其内部实时温度。采用Fotric 236红外热像仪获取油茶籽加热后的表面温度。

图8为热电偶测得的油茶籽加热过程的实时温度。总体而言,实测温度和仿真温度呈现出较好的一致性,验

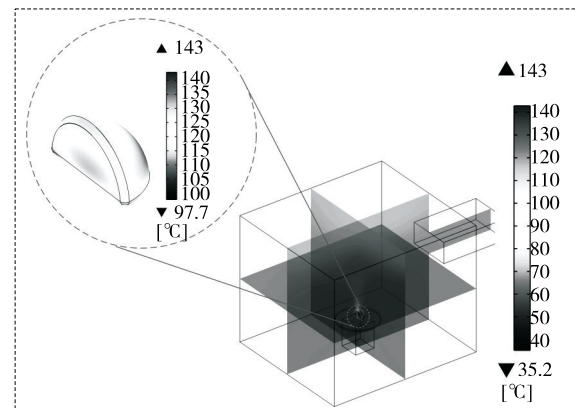


图6 微波加热系统的全局温度分布

Figure 6 Temperature distribution of microwave heating system

证了数值模拟的准确性。但二者仍存在一定差别,其主要原因为仿真中未考虑油茶籽含水率变化对其介电参数的影响。此外,热电偶测温本身存在滞后性,且接触测温可能对油茶籽的传热特性造成一定影响。因此,为进一步提高温度预测精度,后续需进一步完善仿真模型并进行温度修正。

由图8可知,油茶籽在加热初期温度增长迅速,是由于其初始含水率较高,微波耦合与吸收能力较强。当温度接近100°C时,油茶籽的温度增长趋势减缓,其原因在于:该温度点附近油茶籽的水分剧烈蒸发,需消耗额外热量;同时,随着含水量降低,油茶籽的吸波能力逐渐减弱,升温速率不断下降。

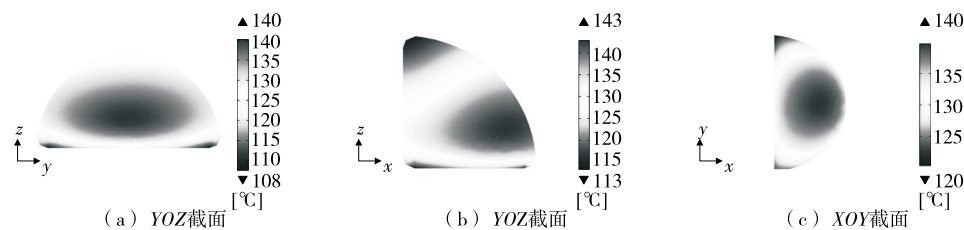


图7 油茶籽微波加热后的切面温度分布

Figure 7 Cross-sectional temperatures of *Camellia oleifera* seeds after microwave heating

图9为红外热成像仪获取的油茶籽加热后的表面温度。不同微波功率下,油茶籽加热后的表面最高温度保持在79.4~132.6°C,均低于图8中其内部同期温度。油茶籽表面高温区主要集中在中部,而外缘温度较低,其原因在于:微波可穿透油茶籽并在其内部形成高温区;该高温区向外导热,在临近的中部外表面也形成了局部高温区,与仿真结果规律一致,共同表明微波具有强穿透特性,可实现“由内而外”整体加热,这是常规热风加热和红外加热所不具备的。

在给定加热时间(5 min)和微波功率范围(200~350 W)内,加热后的油茶籽表面呈金黄色,未出现焦化和开裂现象,如图10(a)所示。而单次加热时间增加时,油茶籽表面容易过热焦化,且随功率增加焦化更明显,如图10(b)所示。当微波功率超过350 W时,油茶籽在加热前期便开裂、冒泡,如图10(c)所示。因此,微波功率过高或单次加热时间过长均不利于油茶籽的高效稳定干燥;相对于周期较长的热风干燥和红外干燥,微波快速干燥过程的工艺参数调控尤为重要。

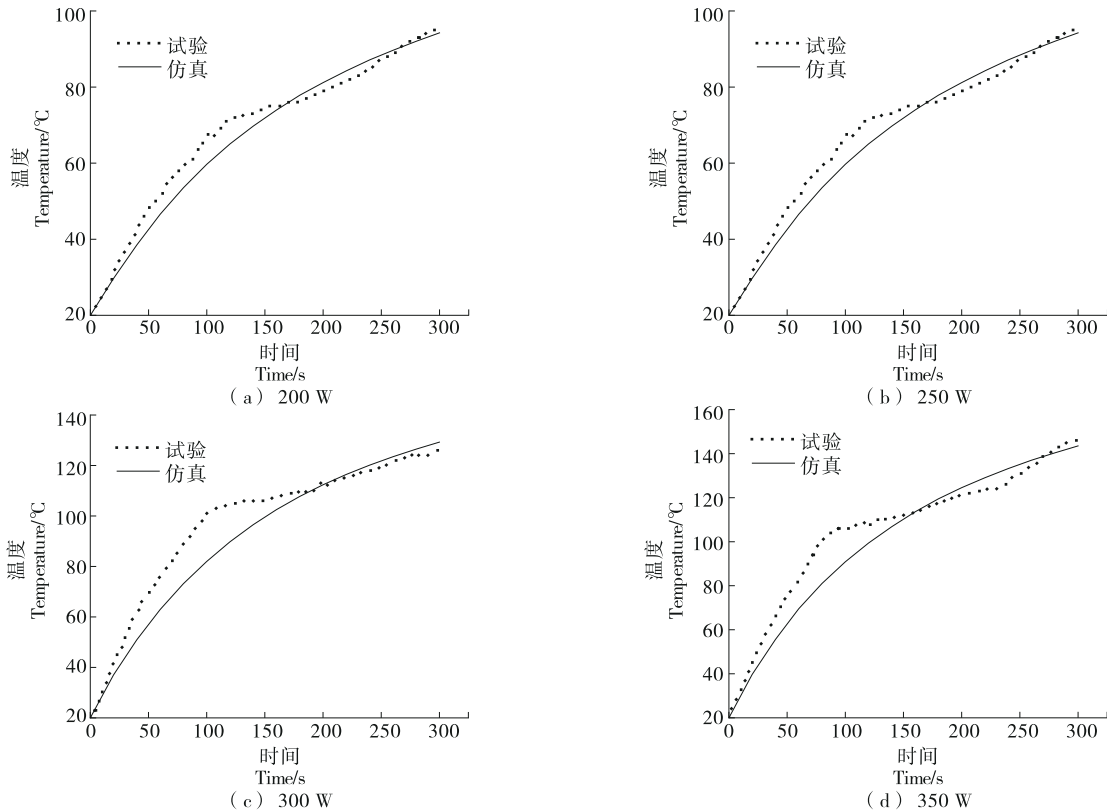


图 8 不同微波功率下油茶籽干燥过程的实测温度和仿真温度

Figure 8 Actual and simulated temperatures of *Camellia oleifera* seeds during drying at different microwave power

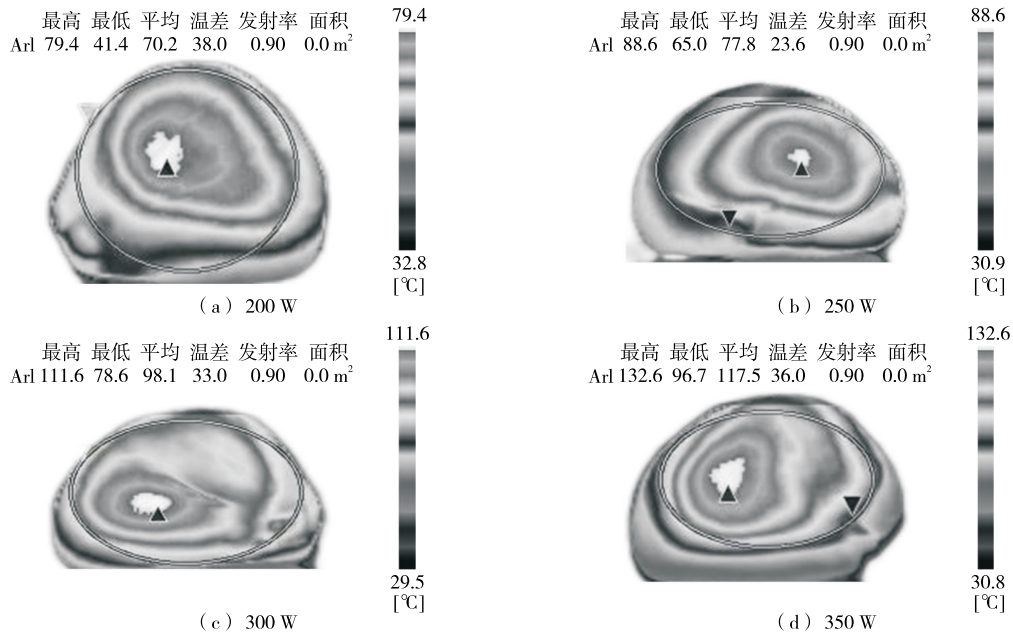


图 9 不同微波功率下油茶籽的温度分布

Figure 9 Temperature distributions of *Camellia oleifera* seeds at different microwave power

2.2.2 油茶籽干燥特性分析

(1) 小批量油茶籽干燥试验:综合单颗油茶籽的微波加热模拟和试验结果,确定适宜的摆放高度为 60 mm,微

波功率为 200~350 W,单次加热时间为 5 min。为进行工艺验证,选取 4 批大小均匀的新鲜油茶籽(单批质量 200 g),分别以 200,250,300,350 W 的微波功率进行干



图 10 不同微波功率和加热时间下的油茶籽

Figure 10 *Camellia oleifera* seeds at different microwave power and heating time

干燥, 单次加热 5 min, 间歇 2 min, 在间歇期内对油茶籽进行称重。干燥完成后, 利用式(8)和式(9)分别计算干燥过程的干基含水率和干燥速率, 以分析油茶籽的微波干燥特性。

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \times 100\%, \quad (8)$$

$$v_t = \frac{m_t - m_{t+\Delta t}}{\Delta t}, \quad (9)$$

式中:

M_t ——干基含水率, %;

v_t ——干燥速率, %/min;

m_t —— t 时刻样品质量, g;

t ——干燥时间, min;

m_d ——干燥后样品质量(干重), g。

为确定式(8)中的干重值, 采用 DHG-9075A 型鼓风干燥箱, 105 °C 恒温下对 200 g 油茶籽进行干燥。干燥过程中每隔 30 min 取出冷却称重一次, 当连续 2 次质量差 <

0.02 g 时停止干燥^[23]。通过 3 次重复试验, 确定 200 g 油茶籽的干重平均值为 103.80 g。

(2) 干燥结果分析: 通过微波干燥试验, 获得不同微波功率下油茶籽的干基含水率和干燥速率变化曲线如图 11 所示。由图 11 可知, 微波功率越高, 油茶籽干燥越快; 在 200, 250, 300, 350 W 下, 油茶籽达到安全含水量(干基含水率 9%)的时间^[24]分别为 126, 84, 56, 42 min。油茶籽的微波干燥过程可分为加速、恒速和减速干燥 3 个阶段。随着微波功率的增加, 初始干燥速率曲线变陡, 加速干燥阶段变短; 进入恒速干燥阶段, 干燥速率趋于相对稳定, 且干燥速率与微波功率呈正相关, 而持续时间与微波功率呈负相关; 减速干燥阶段, 干燥速率不断下降, 在较高微波功率下降幅更为明显。总体而言, 随着微波功率的增加, 3 个干燥阶段的持续时间均变短, 但整体变化规律保持一致。

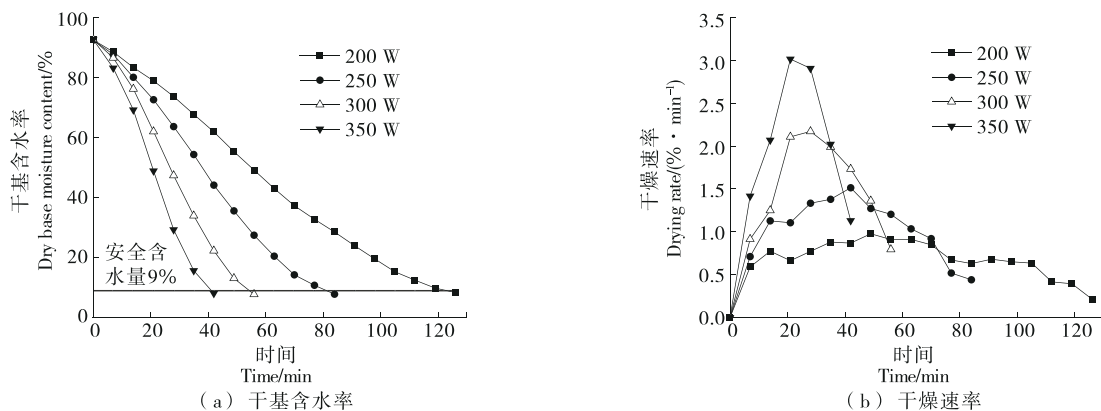


图 11 微波干燥过程油茶籽的干基含水率和干燥速率变化

Figure 11 Changes in dry basis moisture content and drying rate of *Camellia oleifera* seeds during microwave drying

(3) 干燥效率对比: 为比较分析不同方法的干燥效率, 基于实验室现有设备条件, 开展了小批量油茶籽的热风干燥和红外干燥对照试验。其中, 热风干燥采用 DHG-9075A 型鼓风干燥箱, 干燥温度为 105 °C; 红外干燥采用 YLHW 型红外干燥箱, 干燥温度为 80 °C。通过干燥试验, 确定了 200 g 油茶籽的热风干燥时间为 450 min, 红外干

燥时间为 420 min, 如图 12 所示。在 200~350 W 微波功率下, 油茶籽仅需 42~126 min 即可达到安全含水量, 干燥时间仅为热风干燥和红外干燥的 10%~30%, 干燥效率提升了 70%~90%, 且油茶籽干燥过程的最高温度为 96~146 °C, 处于合理干燥温度区间。

2.2.3 干燥动力学模型评价 为解析油茶籽的微波干燥

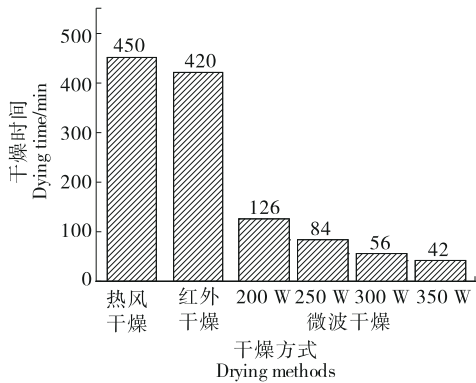


图 12 不同干燥方式下油茶籽的干燥时间对比

Figure 12 Comparison of drying time of *Camellia oleifera* seeds under different drying methods

动力学特性,采用 Three-Term、Henderson and Pabis、Midilli and Kucuk 3 种典型的干燥模型(见表 2)对试验数据进行拟合。采用调整决定系数(R^2_{Adj})、均方根误差(RMSE)、卡方值(χ^2)和赤池信息准则(AIC)4 个指标对各模型的拟合优度进行综合评估,结果见表 3。其中, R^2_{Adj} 值越高,RMSE、 χ^2 和 AIC 值越低,表明干燥动力学模型的拟合优度越高^[25-26]。

分别按式(10)~式(13)计算各拟合优度评价

表 2 干燥动力学模型^[25-26]

Table 2 Drying kinetics models

模型	表达式
Two-term	$MR = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Midilli and Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

表 3 干燥动力学模型拟合结果

Table 3 Fitting results of drying kinetics models

干燥模型	微波功率/W	R^2_{Adj}	RMSE	χ^2	AIC	拟合参数
Two-term	200	0.993 86	0.009 90	0.000 100	-167.373	$a_1=0.509\ 00, k_1=0.006\ 88, a_2=0.509\ 00, k_2=0.006\ 88$
	250	0.983 45	0.016 09	0.000 260	-99.363	$a_1=0.533\ 60, k_1=0.010\ 69, a_2=0.496\ 60, k_2=0.010\ 69$
	300	0.971 40	0.018 86	0.000 360	-63.472	$a_1=0.479\ 30, k_1=0.015\ 66, a_2=0.557\ 60, k_2=0.015\ 66$
	350	0.999 32	0.002 23	0.000 010	-77.492	$a_1=0.129\ 44, k_1=0.156\ 87, a_2=1.129\ 70, k_2=0.022\ 68$
Henderson and Pabis	200	0.994 63	0.009 90	0.000 10	-171.373	$a=1.018\ 00, k=0.006\ 88$
	250	0.986 76	0.016 09	0.000 260	-103.363	$a=1.030\ 00, k=0.010\ 69$
	300	0.980 93	0.018 86	0.000 360	-67.472	$a=1.037\ 00, k=0.015\ 66$
	350	0.981 16	0.016 61	0.000 390	-53.368	$a=1.026\ 94, k=0.018\ 54$
Midilli and Kucuk	200	0.999 05	0.003 90	0.000 020	-202.819	$a=0.991\ 70, k=0.003\ 09, n=1.325\ 00, b=0.002\ 88$
	250	0.997 80	0.005 87	0.000 030	-125.570	$a=0.992\ 90, k=0.003\ 74, n=1.451\ 00, b=0.005\ 22$
	300	0.999 84	0.001 39	0.000 001	-110.378	$a=0.999\ 40, k=0.005\ 79, n=1.486\ 00, b=0.007\ 67$
	350	0.999 35	0.002 19	0.000 001	-77.737	$a=1.000\ 47, k=0.008\ 02, n=1.321\ 21, b=0.002\ 75$

指标^[26-27]。

$$R^2_{Adj} = 1 - \frac{N-1}{N-n-1} \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{aver})^2}, \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}}, \quad (11)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N-n}, \quad (12)$$

$$AIC = 2n + N \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \right), \quad (13)$$

式中:

$MR_{exp,i}$ ——第*i*次试验无因次含水率,%;

$MR_{pre,i}$ ——第*i*次预测的无因次含水率,%;

MR_{aver} ——平均无因次含水率,%;

N ——观测次数;

n ——模型中常数个数。

由表 3 可知,Two-term、Henderson and Pabis、Midilli and Kucuk 模型的 R^2_{Adj} 值均高于 0.97,表明 3 个模型均能较好地吻合试验数据。相比较而言,Midilli and Kucuk 模型在不同微波功率下的 R^2_{Adj} 值最高,且 RMSE、 χ^2 和 AIC 值最低,表明该模型具有理想的拟合优度。结合图 13 可知, Midilli and Kucuk 模型能准确描述油茶籽的干燥动力学特性。

3 结论

通过多场耦合数值模拟和试验,综合分析了油菜籽微波干燥的可行性和技术特征。结果表明,微波加热具有强穿透性和材料选择特性,可靶向作用于油茶籽并实

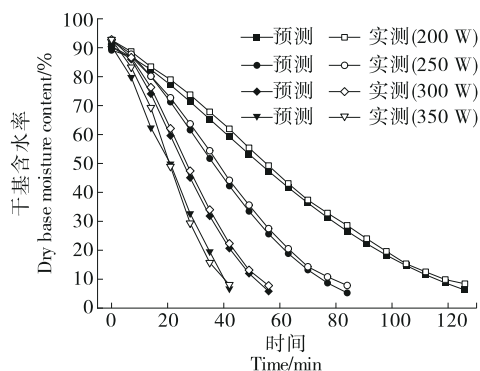


图 13 Midilli and Kucuk 模型的预测值与试验值对比

Figure 13 Comparison of predicted and experimental values using Midilli and Kucuk model

现其由内而外整体加热,减少热影响域和热功率损失,实现高效节能干燥。微波具有快速加热特性。在摆放高度为 60 mm、微波功率为 200~350 W 时,油茶籽可在 300 s 内快速升温至适宜的干燥温度区间(96~146 °C),并兼顾其温度均匀性。微波干燥油茶籽的最优工艺条件为微波功率 200~350 W、单次加热 5 min、间隙 2 min,此时单批(200 g)油茶果达到预设干基含水率 9% 所需时间为 42~126 min,其干燥效率相对于常规热风干燥和红外干燥提升了 70%~90%,且能避免过热焦化和开裂现象。油茶籽的微波干燥过程可分为加速干燥、恒速干燥和减速干燥阶段,增加微波功率可同时缩短 3 个阶段;采用 Midilli and Kucuk 模型能更准确地描述和预测油茶籽的微波干燥动力学特性,其决定系数 R^2_{Adj} 达 0.997 以上。需要说明的是,该研究的数值模拟未考虑水分和湿度的影响。后续研究将构建电磁一流/固传热一湿空气耦合模型,以更精确地预测油茶籽干燥过程中的温度和含水率变化。此外,为进一步评估油茶籽微波干燥工艺的适用性,后续研究还将对油茶油的品质(如不饱和脂肪酸、过氧化值、酸价等)进行测试分析。

参考文献

- [1] 樊梦珂,陈鹏泉,刘烨,等.高水分小麦热风干燥后品质的变化[J].食品与机械,2024,40(2): 139-145, 191.
FAN M K, CHEN P X, LIU Y, et al. Study of quality changes in high moisture wheat after hot air drying[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 139-145, 191.
- [2] 李义臻,郑霞,姚雪东,等.超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺优化[J].食品与机械,2023,39(3): 201-206, 240.
LI Y C, ZHENG X, YAO X D, et al. Optimization of the infrared drying process for ultrasonic pretreatment of Hami-melon slices[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 201-206, 240.
- [3] 吕为乔,宿佃斌,王天行,等.热烫藕条微波滚动干燥热场分布及脱水品质[J].食品与生物技术学报,2020,39(7): 105-111.

- LYU W Q, SU D B, WANG T X, et al. Temperature-field distribution and dehydrated quality of lotus-root sticks during microwave rolling-bed drying[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(7): 105-111.
- [4] 张瑞,李国伟,刘扬,等.坚果干燥技术研究现状分析及展望[J].新疆农机化,2023(2): 34-38, 48.
ZHANG R, LI G W, LIU Y, et al. Analysis and prospect of nut drying technology[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023(2): 34-38, 48.
- [5] 赵红霞,王应强,马玉荷,等.微波干燥条件对杏脯干燥特性与品质的影响[J].食品与机械,2023,39(4): 123-129.
ZHAO H X, WANG Y Q, MA Y H, et al. Effects of different microwave drying conditions on drying characteristics and quality of preserved apricots[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 123-129.
- [6] 王乐意,李长河,刘明政,等.中药材干燥技术与装备研究现状[J].农业工程学报,2024,40(2): 1-28.
WANG L Y, LI C H, LIU M Z, et al. Research status of drying technology and equipment for Chinese medicinal materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(2): 1-28.
- [7] 唐小闲,陈海荣,任爱清,等.不同干燥方法对三华李片干燥特性及营养成分的影响[J].食品研究与开发,2022,43(24): 42-50.
TANG X X, CHEN H R, REN A Q, et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and nutrient quality of Sanhua plum slices[J]. Food Research and Development, 2022, 43(24): 42-50.
- [8] 陈苏森,吉训志,张映萍,等.不同干燥方式对斑兰叶挥发性成分的影响[J].中国热带农业,2024(2): 53-60.
CHEN S S, JI X Z, ZHANG Y P, et al. The effect of different drying methods on the volatile components of *Pandanus amaryllifolius* roxb leaves[J]. China Tropical Agriculture, 2024(2): 53-60.
- [9] 姜龙,李丹丹,王文亮,等.生姜干燥技术研究进展[J].中国果菜,2024,44(2): 41-46.
JIANG L, LI D D, WANG W L, et al. Research progress of drying technology of ginger[J]. China Fruit & Vegetable, 2024, 44(2): 41-46.
- [10] 王磊,沈柳杨,刘成海,等.微波干燥浆果过程中料层电场分布影响能量利用分析[J].农业工程学报,2021,37(4): 1-10.
WANG L, SHEN L Y, LIU C H, et al. Effect of electric field distribution on energy use efficiency for berry puree under microwave drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 1-10.
- [11] 付文杰,李静,裴永胜,等.微波干燥温度分布对胡萝卜干燥特性与品质的影响[J].中国食品学报,2023,23(5): 151-161.
FU W J, LI J, PEI Y S, et al. Effect of microwave drying

- temperature distribution on drying characteristics and quality of carrot[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(5): 151-161.
- [12] 甘婷, 易萍, 黄敏, 等. 芒果微波干燥特性及数学模型研究[J]. 食品科技, 2024, 49(1): 19-26.
- GAN T, YI P, HUANG M, et al. Mango microwave drying characteristics and kinetic model analysis[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(1): 19-26.
- [13] 宋树杰, 王蒙. 熟化紫薯片微波干燥特性及数学模型[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(2): 85-93.
- SONG S J, WANG M. Microwave drying characteristics and kinetic model of cooked purple sweet potato slice[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(2): 85-93.
- [14] ZHOU J, YANG X Q, CHU Y, et al. A novel algorithm approach for rapid simulated microwave heating of food moving on a conveyor belt[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 282: 110029.
- [15] TAMANG S, ARAVINDAN S. Joining of dissimilar metals by microwave hybrid heating: 3D numerical simulation and experiment[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 172: 107281.
- [16] PATEL D K, BHOI N K, SINGH H. Microwave heating capabilities of different susceptor material: experimental and simulation study[J]. Silicon, 2022, 14(12): 6 621-6 635.
- [17] LUO H, ZHANG Y M, YU J W, et al. Microwave-enabled rapid volumetric heating of moldable low-dielectric-loss glass [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 57: 104364.
- [18] XIE W, CHEN P, WANG F, et al. Dielectric properties of *Camellia oleifera* seed kernels related to microwave and radio frequency drying[J]. International Food Research Journal 2019, 26(5): 1 577-1 585.
- [19] 王鹏凯. 多温区网带式干燥机热流场模拟与试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022: 7-13.
- WANG P K. Temperature and flow fields simulation and experimental research on multi-temperature zone mesh belt dryers[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022: 7-13.
- [20] PHAM N D, KHAN M H, KARIM M A. A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying[J]. Food Chemistry, 2020, 325: 126932.
- [21] 罗贤飞. 烘焙条件对油茶籽抗氧化能力和风味物质的影响研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023: 6-9.
- LUO X F. Study on the effect of roasting conditions on antioxidant capacity and flavor substances of *Camellina seed* oil [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023: 6-9.
- [22] 左青, 窦维祥, 左晖. 油茶籽制油技术实践[J]. 中国油脂, 2018, 43(7): 14-18.
- ZUO Q, DOU W X, ZUO H. Practical techniques for oil extraction from *Camellia oleifera* seeds[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(7): 14-18.
- [23] 丁卫新. 浅谈新国标中粮食水分测定[J]. 现代面粉工业, 2017, 31(1): 24-26.
- DING W X. Discussion on the determination of grain moisture content in the new national standard[J]. Modern Flour Milling Industry, 2017, 31(1): 24-26.
- [24] HUANG D, MEN K, TANG X, et al. Microwave intermittent drying characteristics of *Camellia oleifera* seeds[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(1): e13608.
- [25] 李大鹏, 李港庆, 汪志强. 油茶籽热风干燥特性及不同模型研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(8): 117-123.
- LI D P, LI G Q, WANG Z Q. Study on the three-factor characteristics of hot-air drying of *Camellia seed*[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(8): 117-123.
- [26] 黄敏, 甘婷, 易萍, 等. 芒果切片热风干燥特性及模型[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 179-186, 209.
- HUANG M, GAN T, YI P, et al. Hot air drying characteristics and model of Mango slices[J]. Food & Machinery, 2024, 40 (4): 179-186, 209.
- [27] 张雪波, 刘显茜, 邹三全, 等. 哈密瓜切片热风干燥特性及数学模型[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 130-136, 142.
- ZHANG X B, LIU X Q, ZOU S Q, et al. Hot-air drying characteristics and mathematical model of cantaloupe slices[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 130-136, 142.