

核桃的变温滚筒催化红外-热风联合干燥研究

曲文娟¹, 凡威², 曹非凡², 马海乐¹, 师俊玲³, 潘忠礼⁴, 蒋群辉⁵

(1. 江苏大学食品物理加工研究院, 江苏镇江 212013) (2. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)
(3. 西北工业大学生命学院, 陕西西安 710072) (4. 美国加州大学戴维斯分校生物与农业工程系, 美国加州 95616) (5. 镇江美博红外科技有限公司, 江苏镇江 212013)

摘要: 为了提高硬壳坚果类产品干燥效率, 创新研制了一台新型多机组式滚筒变温催化红外干燥设备, 并采取变温滚筒催化红外-热风联合干燥技术, 对核桃干燥效果、能耗和动力学过程进行了研究。研究表明, 红外辐射温度、辐射距离和滚筒转速均对干燥效果有显著影响。在优选的最佳辐射温度 300+400 °C、辐射距离 30 cm、滚筒转速 25+35+35 Hz 条件下催化红外预干燥 22.50 min 然后在温度 43 °C、风速 3 m/s 条件下热风干燥 14 h, 总干燥时长为 14.38 h, 与单一热风干燥 (20 h) 相比, 干燥时长缩短了 28.10%, 且节约了 25.04% 的能耗, 干制核桃表壳无褐斑, 开壳率为 0%, 颜色指标 L 为 54.24, a 为 10.61, b 为 19.89, 呈较亮的红黄色。此外最大干燥速率 0.28 g/(g·min) 也显著高于单一热风的最大干燥速率 0.11 g/(g·min)。相应的建立了用于预测其干燥过程中含水率以及干燥速率变化的 Henderson-Pabis 模型, R^2 为 0.99, $RMSE$ 为 0.03, 拟合效果良好。本研究得出变温滚筒催化红外-热风干燥是一种适宜硬壳坚果类产品干燥的新型高效节能方法。

关键词: 催化红外干燥; 变温干燥; 滚筒干燥; 热风干燥; 核桃

文章编号: 1673-9078(2021)07-137-147

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.7.0162

Walnut Drying by Combined Drum Catalytic Infrared with a Variable Temperature and Hot Air

QU Wen-juan¹, FAN Wei², CAO Fei-fan², MA Hai-le¹, SHI Jun-ling³, PAN Zhong-li⁴, JIANG Qun-hui⁵

(1. Institute of Food Physical Processing, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China) (2. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China) (3. School of Life Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China) (4. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis 95616, USA) (5. Maybo Innovation Co. Ltd., Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to improve the drying efficiency of hard shell nuts, this work developed a new type of multi-unit drum-type catalytic infrared drying equipment with a variable temperature, and adopted a combined drying technology of drum catalytic infrared with a variable temperature and hot air. In this work, the walnut drying effect, energy consumption and kinetic process were studied. The results showed that the catalytic infrared temperature, radiation distance, and rotating speed of the drum all had significant effects on the drying performance. After 22.50 min of infrared radiation pre-drying under the optimal radiation temperature of 300+400 °C, radiation distance of 30 cm and rotation speed of 25+35+35 Hz, and then 14 h of hot air drying under the temperature of 43 °C and speed of 3 m/s, the total drying time was 14.38 h. Compared with that of single hot air drying, the drying time was shortened by 28.10% and the energy consumption was saved 25.04%. The dried walnut shell had no brown spots, the shell opening rate was 0%, the L value was 54.24, the a value was 10.61, the b value was 19.89 and the color was bright red and yellow. In addition, the maximum drying rate (0.28 g/g·min) was significantly higher than that of the single hot air drying (0.11 g/g·min). Correspondingly, the Henderson-Pabis model established can well predict the changes of water content and drying rate

引文格式:

曲文娟, 凡威, 曹非凡, 等. 核桃的变温滚筒催化红外-热风联合干燥研究[J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 137-147, +175

QU Wen-juan, FAN Wei, CAO Fei-fan, et al. Walnut drying by combined drum catalytic infrared with a variable temperature and hot air [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 137-147, +175

收稿日期: 2021-02-15

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项 (2017YFE0105300); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目 (NY-010)

作者简介: 曲文娟 (1980-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品物理加工技术与装备

of walnut in the drying process and the fitting effect was good with R^2 of 0.99 and $RMSE$ of 0.03. Therefore, the combined drying technology of drum catalytic infrared with a variable temperature and hot air is a kind of new type drying method with high efficiency and energy saving, suitable for drying nuts products.

Key words: catalytic infrared drying; variable temperature drying; drum drying; hot air drying; walnut

核桃是世界著名干果之一，果仁含有丰富的蛋白质、不饱和脂肪酸、多种人体必需氨基酸和矿物质，具有较高营养价值、药用价值、经济价值^[1]。2012年，世界上核桃总产量达250万t以上^[2]，呈逐年增加趋势。由于核桃的收获时间集中，新鲜核桃含水率较高，如不及时处理会很快腐烂变质，影响食用安全。干燥脱水可以实现核桃的安全贮藏和货架期延长。

目前国内外采取的核桃干燥方式主要是热风干燥，利用热风在温度40~50℃将农产品干燥至安全水分(8%)，达到脱水和安全保藏的效果^[2]。但热风干燥耗时长、能耗大，且对核桃品质有一定不利影响^[3,4]。在不损伤核桃品质的前提下，为了缩短干燥时长，国内外相继开发了一些新型干燥技术，如射频、微波、远红外等单独干燥和联合干燥技术^[1]，但仍有一定缺点，一直未能产业化应用。近几年，国际上又出现了一种新型催化红外辐射加热技术。它是以天然气为热源，通过钯、铂等催化剂将天然气高效转化为红外辐射能，能量转化率达90%以上。其明显优势为热能转化率高，比电热风、电转化为红外辐射能(电红外辐射)更加节能^[5-8]。当红外加热器发射出的红外线照射到被加热物料上时，物料中的水分直接吸收红外辐射能，物料温度迅速升高，从而实现物料快速脱水干燥，具有升温快、处理时间短、产品品质高、高效节能等优点，可应用于食品和农产品烫漂、干燥等^[9-12]领域，工业化推广价值高。陈文敏等^[13]研究了不同温度下红外对红枣的处理，结果发现：与传统热风干燥进行对比，50℃红外干燥的红枣，能耗较低、营养物质保留率高、色泽和外观质量最好。唐璐璐等^[14]研究了不同干燥温度下热风干燥、红外干燥和真空干燥对丰水梨片干燥特性的影响，得出相同干燥温度下红外干燥的干燥速率最快，干燥时间最短。雷宏杰等^[15]采用三种干燥方式(热风干燥、真空干燥和红外干燥)对花椒叶进行干燥，发现红外干燥的耗时短，且干制花椒叶中黄酮和总酚含量高。Pan等^[16]研究了用红外辐射和冷冻干燥联合方法处理香蕉片的干燥和质量特性，结果表明，该技术可用于生产高脆度香蕉片，并减少了所需冷冻干燥时间。

虽然国内目前已有一些采用红外进行农产品和食品干燥的技术和装备研发报道，但是都是建立在恒温式电红外加热方式、静态电红外加工设备^[5-16]，还存

在电红外发生器以及电红外加工设备辐射温度不均匀、电转化为红外辐射能(电红外辐射)的转化率低、装备结构设计不科学，且干燥效率和产品品质无法兼顾等问题^[13-17]。目前未见有滚筒式催化式红外加工设备及相关技术研究报道，亟需判断此法的可行性。

为了突破目前国内外生产的红外加工设备存在的干燥均一性差的问题，消除局部过热现象，研究拟创新研制一台设计更为科学的变温式滚筒式催化式红外加工设备，通过设备的创新多机组合使用设计，实现坚壳硬果类农产品的变温高效干燥，达到保障核桃干燥品质、提高干燥效率、降低能耗的目的。目前国内外未见有采用变温式滚筒式催化式红外进行核桃干燥的相关报道，亟需提供一套完整的工艺方案与配套设备。研究拟将变温滚筒催化红外干燥与热风干燥联合应用于新鲜核桃的干燥，探讨不同工艺条件下联合干燥核桃的干燥效果、动力学过程以及设备能耗，以期为新果的新型干燥技术开发提供更丰富的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验原料

新鲜带青皮核桃，清香型，陕西农贸市场，于-20℃冰箱贮藏备用。

1.2 主要仪器与设备

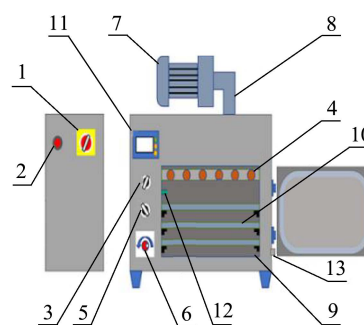


图1 热风干燥设备

Fig.1 Hot air drying device

注：1.电源总开关；2.电源指示灯；3.电加热开关；4.加热器；5.风机开关；6.风速调档按钮；7.风机；8.气体管道；9.干燥室(350 mm×400 mm×200 mm)；10.料盘；11.电器控制器；12.温度传感器；13.出风口。

热风干燥设备(见图1)，由江苏大学食品学院联

合泰州圣泰科红外科技有限公司自制而成（镇江，中国）；变温滚筒催化红外干燥设备（见图2），由江苏大学自制而成（镇江，中国）；BAS2202S天平，Sartorius公司（哥根廷，德国）；CR400全自动色差仪，日本柯尼卡美能达公司（东京，日本）；AT600+手持式红外测温仪，希玛公司（香港，中国）；HP-9800 20A电监测仪，深圳市宏品电子科技有限公司（深圳，中国）；XMTZC05HM小米体脂秤，小米科技有限责任公司（安徽，中国）。

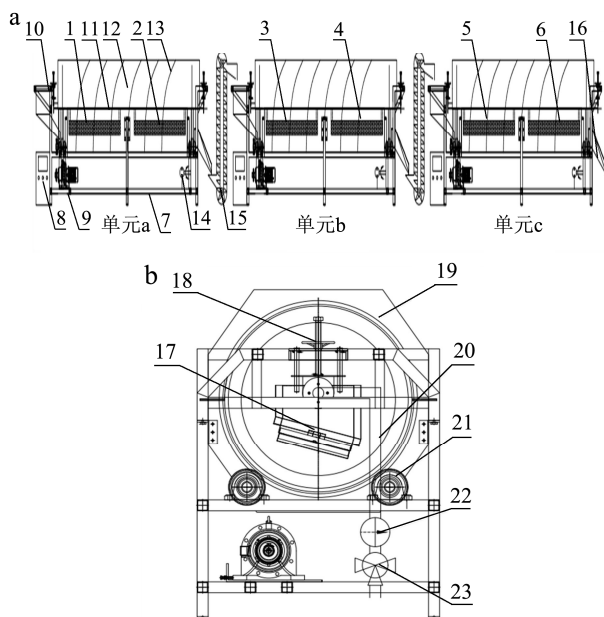


图2 变温滚筒催化红外干燥设备

Fig.2 Drum catalytic infrared drying device with a viable temperature

注：a：正面图；b：侧面图。1、2、3、4、5、6：催化式红外发生器（1800 mm×480 mm×40 mm）；7：机架；8：电器控制箱；9：滚筒转动电机；10：进料斗；11：支撑轴；12：滚筒干燥室（ ϕ 1000 mm×4000 mm）；13：滚筒干燥室内壁挡板；14：空气泵；15：物料传送带；16：出料斗；17：温度传感器；18：红外板距离调整装置；19：滚筒干燥室外壁；20：气体管道；21：传动齿轮；22：燃气压力表；23：燃气调节阀门。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理

试验前将新鲜核桃从冷藏室中取出，放至室温（25℃）待用，除去外层青皮及表面附着物，选取表面无明显裂痕、无机械损伤、无虫害的新鲜核桃作为试验原料，测得核桃的干基含水率范围为40%~55%。

1.3.2 干燥试验

(1) 变温滚筒催化红外-热风联合干燥试验：

调节催化红外辐射距离至设定值，调节催化红外发生器1、3、5和2、4、6的温度至设定值，调节滚

筒转动电机控制催化红外干燥单元a、b、c的滚筒转速至设定值。随后将新鲜核桃倒入干燥单元a的进料口，经过单元a、b、c的变温滚筒催化红外预干燥后从单元c的出料口收集核桃，然后将核桃迅速转移至热风干燥设备中，在43℃，风速为3 m/s条件下继续热风干燥至核桃达到安全水分8%即停止干燥。

变温滚筒催化红外预干燥阶段的单因素试验设计如下：

- 1) 催化红外发生器1、3、5和2、4、6的催化红外辐射温度组合为：300+350、300+400、350+400、350+450℃；
- 2) 催化红外辐射距离为：25、30、35 cm；
- 3) 干燥单元a、b、c的滚筒转速组合为：15+25+35、15+35+35、25+25+25、25+25+35、25+35+35、35+35+35 Hz。

整个滚筒催化红外预干燥阶段分别记录样品的干基含水率下降率、表面温度、表面颜色以及开壳率，用于考察干燥效果和产品质量。

待前期变温滚筒催化红外预干燥阶段的工艺参数优化完成后，在最优工艺条件下进行变温滚筒催化红外-热风联合干燥，并与单一热风干燥进行对比试验。

(2) 对照：单一热风干燥

选取一定量新鲜核桃，置于热风干燥设备中干燥，热风干燥设备温度为43℃，风速为3 m/s，待干燥至核桃干基含水率达到安全贮藏含水率8%即停止干燥。记录干燥时长以及每隔一段时间取样品记录样品质量用于绘制干燥曲线和干燥速率曲线。

1.3.3 变温滚筒催化红外-热风联合干燥动力学模型建立

目前，用于描述物料干燥过程的数学模型已有上百种，主要分成三大类：理论、半经验和经验模型^[2]，应用最广泛的还是Page模型、Henderson-Pabis模型和Wang and Singh模型^[18]，如表1所示。

表1 主要干燥模型

Table 1 Main drying models		
模型	方程	参数
Page	$MR = \exp(-kt^N)$	k, N
Henderson-Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	a, k
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	a, b

因此，本研究对新鲜核桃的变温滚筒催化红外-热风联合干燥过程采用表1的3种传统干燥模型进行拟合，干燥过程中的水分比MR计算公式^[19]如下：

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

式中， M_t ：干燥t时样品的干基含水率，g/g； M_i 、 M_e ：

样品的初始、平衡干基含水率, g/g。

由于 M_e 相比于 M_t 和 M_i 很小, 通常在工程应用中忽略不计, 因此, 水分比的计算公式可以简化为^[19,20]:

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (2)$$

由于表 1 中 Henderson-Pabis 模型和 Page 模型均为指数形式, 为了方便求解方程中的系数, 对其公式进行线性化处理后可得:

$$\ln(MR) = \ln a - kt \quad (3)$$

$$\ln[-\ln(MR)] = \ln k + n \ln t \quad (4)$$

在选择最优干燥动力学模型以及判断模型优劣时, 有两个评价准则^[19-21]: 相关系数 R^2 和均方根误差 $RMSE$ 。相关系数是用来表示各变量之间的密切关系, R^2 越大且接近 1, 表明回归关系越显著; 均方根误差 $RMSE$ 反映的是实际值和期望值之间的差异程度, 其值越小表明回归方程的预测精度越高。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pre},i})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中, $MR_{\text{pre},i}$: 预测水分比; $MR_{\text{exp},i}$: 实测水分比; MR_{exp} : 实测水分比的平均值; N : 试验测得数据的组数; n : 常数的个数。

1.3.4 干燥试验测定方法

1.3.4.1 核桃表面温度和开壳率的测定

采用手持式红外测温仪测定核桃上下左右 4 个位点的表面温度, 取平均值。核桃开壳率的计算是以 100 个核桃样本中开壳核桃个数所占的百分比计算 (%)。

1.3.4.2 核桃表面颜色的测定

试验中采用全自动色差仪来测定核桃的表面颜色^[22]。由于核桃不同部位的色泽差异较大, 为了保证测量的准确性, 测量时每个核桃表面标记 4 个位点, 将色差仪的光孔垂直压在核桃表面上, 读数, 取平均值。用数值 L 、 a 、 b 表示颜色, 其中 L 值表示亮度, a 值表示红色或绿色, 而 b 值表示黄色或蓝色。 a 值越大表示颜色越接近红色, a 负值越大, 颜色越接近绿色; b 正值越大, 颜色越接近黄色, b 负值越大, 颜色越接近蓝色。色差 ΔE 的计算公式^[22]如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L-L_0)^2 + (a-a_0)^2 + (b-b_0)^2} \quad (7)$$

式中, L_0 、 a_0 、 b_0 : 干燥前的初始值; L 、 a 、 b : 干燥结束的终点值。 ΔE 值越大, 代表干燥核桃制品的颜色与新鲜核桃的颜色差别越大^[23]。

1.3.4.3 干基含水率、干基含水率下降率和干燥速率

的测定^[20,21]

水分含量测定参照 GB/T 5009.3-2016 中 105 °C 恒重法测得, 每个样品测定 3 次, 取平均值。

干基含水率 M_t (g/g) 的计算公式如下:

$$M_t = \frac{G_t - G_d}{G_d} \quad (8)$$

式中, G_t : 干燥 t 时样品的质量, g; G_d : 样品的干重, g。

干基含水率下降率 M_R (%) 的计算公式如下:

$$M_R = \frac{M_i - M_t}{M_0} \times 100 \quad (9)$$

干燥速率 D_R (g/(g·min)) 的计算公式如下:

$$D_R = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

式中, t_1 、 t_2 : 干燥时间, min; M_{t1} 、 M_{t2} : 干燥 t_1 、 t_2 时样品的干基含水率, g/g。

1.3.4.4 能耗的计算^[24]

干燥能耗以每干燥单位质量 (kg) 计算核桃的能耗, 单位为 kJ/kg。采用电监测仪对每次试验的电耗记录 (kW·h), 采用电子秤对每次试验的液化气消耗量称重 (kg)。

1.3.5 数据统计分析

所有试验均做 3 次不同批次的重复试验, 所有数据均以“平均值±标准偏差”的形式表示, 采用 origin 软件画图。利用 SPSS 17.0 软件对试验数据进行显著性分析, 采取 Duncan 检验, 当 $p < 0.05$ 时, 数据被视为具有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 催化红外辐射温度对核桃预干燥效果和

品质的影响结果

经课题组前期研究结果得知, 当催化红外辐射温度超过 450 °C 时, 干燥核桃样品表面会出现焦褐色, 严重影响核桃品质; 而当辐射温度为 300 °C 时催化红外预干燥阶段仅去除了 5.4% 的水分, 脱水率很低, 推荐催化红外辐射温度介于 300 °C 到 450 °C 之间。因此变温滚筒催化红外预干燥阶段将辐射距离固定在 30 cm, 干燥单元 a、b、c 的滚筒转速分别固定在 25、35 和 35 Hz, 进行不同催化红外辐射温度 (300+350、300+400、350+400、350+450 °C) 条件下的预干燥试验, 试验结果见图 3 和表 2。

图 3a 显示, 核桃含水率的下降率随着催化红外辐射温度的增加而显著增大 ($p < 0.05$)。当催化红外温度为 350+450 °C 时, 红外预干燥阶段去除了 20.30% 的水

分；当催化红外温度为 300+350 °C 时红外预干燥阶段仅去除了 11.12% 的水分。由此得出催化红外温度越高，脱水效果越好。这是因为催化红外温度越高，核桃表面温度越高，已由表 2 测得的核桃表面温度证实由 300+350 °C 到 350+450 °C 样品表面温度提升了 20 °C 左右，因此在 350+450 °C 22.5 min 的催化红外预干燥阶段脱水率提高了 9.18%，表现出较高的脱水效率。姜苗^[2]在研究核桃干燥时发现，温度对干燥强度影响较大，温度越高，干燥强度越大，这与本文的研究结论一致。刘治华^[25]在研究金银花干燥时也发现干燥受温度影响很大，温度升高，干燥速率变大。

由图 3b 可知，不同催化红外温度处理后，与新鲜核桃的深红色 ($L=36.70, a=14.75, b=17.24$) 相比，干燥核桃整体颜色偏较亮的深黄色 ($L=53.86\sim 56.90, a=10.61\sim 11.00, b=19.86\sim 20.73$)；不同催化红外温度下样品的 $L、a、b$ 以及 ΔE 数据之间没有显著性差异 ($p>0.05$)，表明该试验范围内不同催化红外温度并未引核桃颜色明显变化。

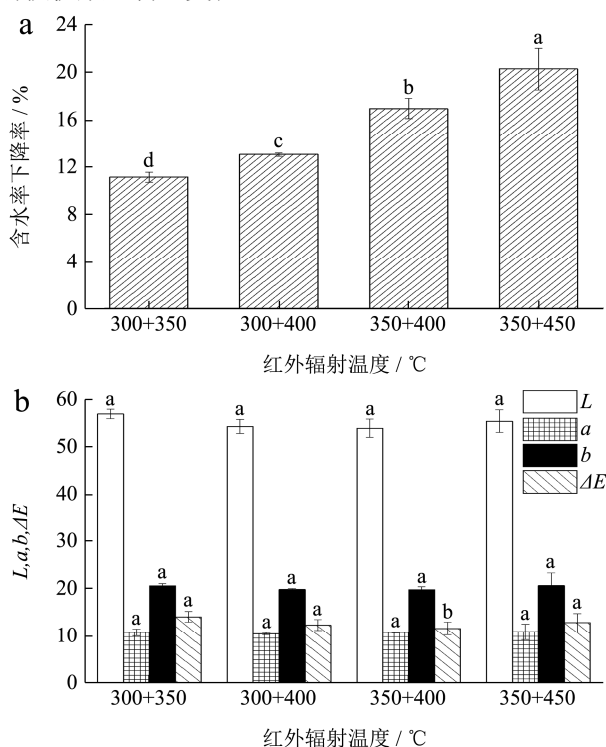


图 3 不同催化红外辐射温度下样品的含水率下降率 (a) 和色度值 (b)

Fig.3 Moisture content reduction rates (a) and color values (b) of samples under different catalytic infrared radiation temperatures

注：不同字母表示在水平 $p<0.05$ 时存在显著性差异。

由表 2 可知，随着催化红外温度的增加，核桃表面温度不断升高，所以脱水效果越好，但是发现在较高的催化红外温度 350+400 °C 和 350+450 °C 下，短

间内样品表层温度升温太快太高 (达到 73~75 °C 和 77~79 °C)，样品的水分下降较大，但是，当核桃内部水分迁移速率明显低于表层水分散失速率，会导致核桃表壳发生破裂现象^[26]，这两种温度条件下的开壳率达到了 16.67% 和 33.33%，且在催化红外温度 350+450 °C 下，由于温度过高，核桃表面不平整，使得局部出现了小褐斑和细纹，这是由于过高的处理温度使得表层硬壳发生了多酚褐变现象^[27]，这对产品的品质影响较大。朱德泉等^[26]在研究核桃干燥时发现温度过高会导致核桃外壳变为黑褐色，产品品质大大下降，这与本研究结论一致。因此为了保障核桃品质，催化红外辐射温度不易太高，综合考虑干燥效果与产品品质，催化红外温度组合 300+400 °C 时核桃的干燥效果和品质较好，样品的脱水率较高，且未出现褐斑和开壳现象，因此将该温度条件用于后续的试验中。

表 2 不同催化红外辐射温度条件下样品的表面温度和开壳率

Table 2 Surface temperatures and shell opening rates of samples under different catalytic infrared radiation temperatures

催化红外温度/°C	表面温度/°C	开壳率/%	备注
0	25	0.00	-
300+350	55~58	0.00	-
300+400	63~65	0.00	-
350+400	73~75	16.67±0.58	表壳出现褐斑和细纹
350+450	77~79	33.33±0.58	表壳出现褐斑，细纹多

2.2 催化红外辐射距离对核桃预干燥效果和品质的影响结果

将催化红外温度固定在 300+400 °C，滚筒转速固定在 25+35+35 Hz，进行不同催化红外辐射距离 (25、30 和 35 cm) 条件下的预干燥试验，试验结果见图 4 和表 3。

图 4a 显示核桃的干基含水率下降率随着催化红外辐射距离的增加而降低。当催化红外距离为 35 cm 时，红外预干燥阶段去除了 10.05% 的水分；当催化红外距离为 25 cm 时红外预干燥去除了 13.42% 的水分，由此得出催化红外辐射距离越近，脱水效果越好。这是因为随着催化红外辐射距离越近，核桃表面温度越高，已经由表 2 测得的核桃表面温度证实由辐射距离 35 cm 到 25 cm 样品表面温度提升了 10 °C 左右，因此催化红外辐射距离 25 cm 下的脱水效果较好。吴本刚

[7]在研究胡萝卜红外热风联合干燥时发现红外辐射距离越近,干燥速率越大,这与本研究结论一致。

由图4b可见,催化红外辐射距离在25和30cm时样品的L、a、b和ΔE之间没有显著差异(p>0.05),干制核桃颜色呈较亮的深黄色(L=51.85~52.23, a=12.17~12.33, b=20.22~20.42, ΔE=15.64~15.88);催化红外辐射距离在35cm时,核桃颜色变化明显,偏较淡的浅黄色(L=51.30, a=11.79, b=19.38, ΔE=15.82)。

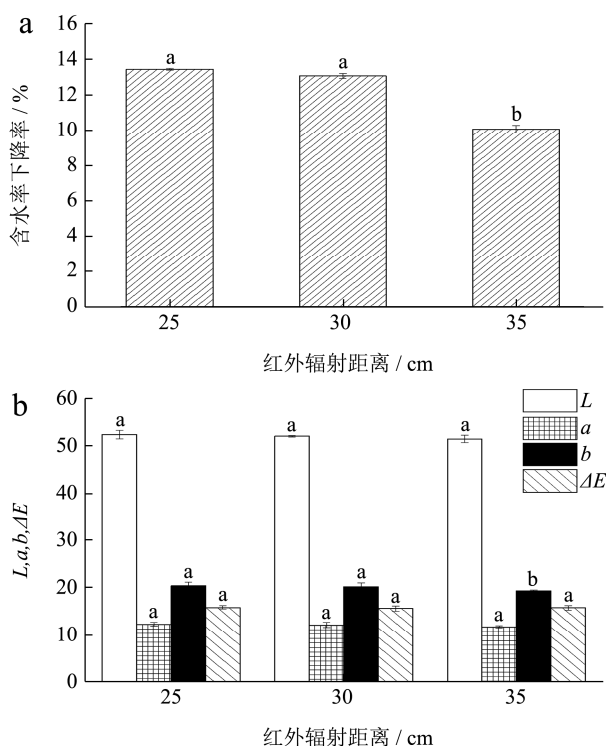


图4 不同催化红外辐射距离下样品的含水率下降率(a)和色度值(b)

Fig.4 Moisture content reduction rates (a) and color values (b) of samples under different catalytic infrared radiation distances

注:不同字母表示在水平p<0.05时存在显著性差异。

表3 不同催化红外辐射距离下样品的表面温度和开壳率

Table 3 Surface temperatures and shell opening rates of samples under different catalytic infrared radiation distances

催化红外辐射距离/cm	表面温度/℃	开壳率/%	备注
25	68~72	11.67±0.58	表壳出现褐斑和细纹
30	63~65	0.00	-
35	58~61	0.00	-

由表3知,随着催化红外辐射距离越来越远,核桃表面温度越高,脱水效果越好。但是当催化红外辐射距离太近,为25cm时发现部分样品表壳出现了小褐斑,而且出现了较多细纹,表壳发生破裂,开壳率达到11.67%,这是因为核桃表壳温度太高(达到

68~72℃)造成的褐变和裂壳。朱德泉等[26]也报道温度过高会造成核桃褐变。因此为了保障核桃品质,催化红外辐射距离不易太近。综合考虑干燥效果和产品质量,推荐较优的催化红外辐射距离为30cm,此时样品的脱水率较高,且未出现褐斑和开壳现象,因此将该距离条件用于后续的试验中。

2.3 滚筒转速组合对核桃预干燥效果和品质的影响结果

预试验结果表明,在距离为30cm,温度为300+400℃的条件下采用滚筒催化红外进行预干燥时发现,转速小于15Hz时,预处理时间过长,核桃开壳现象严重,所以本试验采用的不同转速组合分别为15+25+35、15+35+35、25+25+25、25+25+35、25+35+35和35+35+35Hz,在此条件下进行预干燥试验,试验结果见图5和表4。

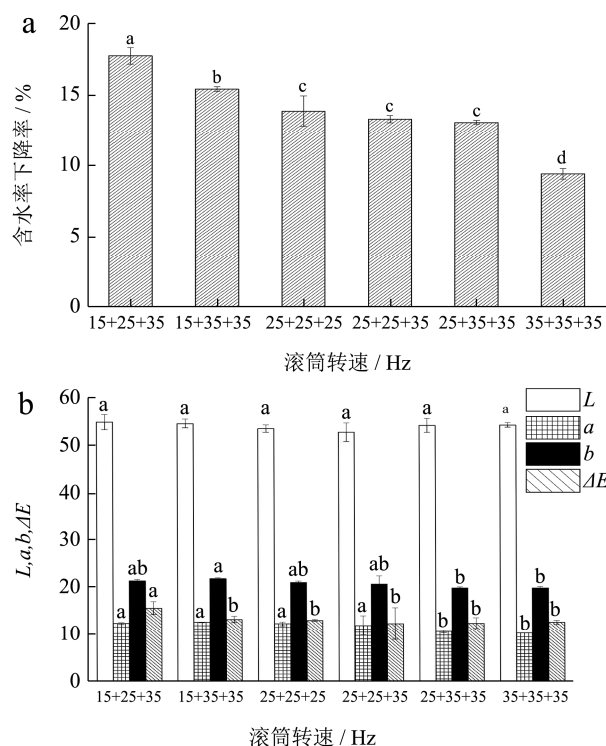


图5 不同滚筒转速条件下样品的含水率下降率(a)和色度值(b)

Fig.5 Moisture content reduction rates (a) and color values (b) of samples under different drum rotation speeds

注:不同字母表示在水平p<0.05时存在显著性差异。

图5a显示了不同干燥单元的滚筒转速越低,样品的含水率下降率越大,脱水效果越好。这是因为滚筒转速越低,催化红外辐射时间越长,核桃表面温度越高,已经由表4测得的核桃表面温度和催化红外辐射时间证实,因此脱水效果越好。当滚筒转速组合为

15+25+35 Hz 时, 催化红外预处理时间为 31.00 min, 含水率下降率达到最高, 去除 17.73% 的水分; 当滚筒转速为 35+35+35 Hz 时, 催化红外预处理时间为 19.50 min, 除去了 9.39% 的水分, 发现由 35+35+35 Hz 到 15+25+35 Hz 催化红外处理时间增加了 11.50 min, 因此脱水效果提高了 8.34%, 较低的滚筒转速更有利于提高干燥效率。吴本刚^[7]在研究胡萝卜红外热风联合干燥时也发现红外处理时间越长干燥效果越好, 这与本研究结论一致。

由图 5b 可见, 不同滚筒转速条件下样品的白色值 L 之间没有显著性差异 ($p>0.05$), 核桃呈现出较亮的颜色 ($L=52.82\sim 54.95$); 但是随着滚筒转速降低, 催化红外处理时长越长, 干燥后核桃的红色度 a 和黄色度 b 值越大, 表明样品经长时间的催化红外干燥后颜色偏深红黄色, 且与新鲜核桃之间的颜色差 ΔE 越来越大。当滚筒转速为 35+35+35 Hz 时, 核桃呈较淡的浅红黄色 ($L=54.34, a=10.27, b=19.91, \Delta E=12.62$); 当滚筒转速组合为 15+25+35 Hz 时, 核桃呈深红黄色 ($L=54.95, a=12.35, b=21.37, \Delta E=15.62$)。此外表 4 的观察还发现, 较低的滚筒转速造成了核桃表壳产生较多细纹、褐斑以及开壳现象, 当滚筒转速组合为

15+25+35 Hz 时, 50.00% 的样品出现开壳情况; 除去转速组合 25+35+35 Hz 和 35+35+35 Hz, 其他转速组合的催化红外预干燥处理后样品均出现了不同程度的表面开裂现象, 开壳率为 16.67%~44.33%, 这严重影响了核桃的品质, 不利于后期贮藏和销售。这是因为核桃在高温的催化红外下干燥时间太长造成的褐变和裂壳, 朱德泉等^[26]也报道干燥时间过长会造成核桃颜色加深变黑褐色。因此为了保障核桃品质, 催化红外辐射时间不易太长。综合考虑图 5a 的干燥效果、图 5b 的颜色以及表 4 的开壳情况, 推荐选择 25+35+35 Hz 的滚筒转速组合, 样品的脱水率较高, 且未出现褐斑和开壳现象。

经催化红外辐射温度、距离、滚筒转速三个因素的逐级优化试验, 获得了变温滚筒催化红外预干燥的较优工艺参数为: 催化红外发生器 1、3、5 和 2、4、6 的辐射温度 300+400 °C、辐射距离 30 cm、干燥单元 a、b、c 滚筒转速 25+35+35 Hz、处理时间 22.50 min。在此条件下, 核桃预脱水率高达 13.04%±0.14%, 无褐变和开壳情况, 颜色指标 L 为 54.24, a 为 10.61, b 为 19.89, 呈较亮的红黄色。

表 4 不同滚筒转速条件下样品的催化红外辐射时间、表面温度和开壳率

Table 4 Infrared radiation times, surface temperatures and shell opening rates of samples under different drum rotation speeds

滚筒转速/Hz	红外辐射时间/min	表面温度/°C	开壳率/%	备注
15+25+35	31.00	65~68	50.00±1.00	表壳出现褐斑, 细纹多
15+35+35	28.00	64~66	44.33±0.58	表壳出现褐斑, 细纹多
25+25+25	28.50	65~67	16.67±0.58	表壳出现褐斑和细纹
25+25+35	25.50	64~66	16.67±0.58	表壳出现褐斑和细纹
25+35+35	22.50	63~65	0.00	-
35+35+35	19.50	53~57	0.00	-

表 5 两种干燥方式的干燥时长、干基含水量、开壳率和单位质量能耗

Table 5 Drying times, dry base moisture contents, shell opening rates and energy consumptions per unit gram of two drying methods

干燥方式	红外预干燥时长/min	热风干燥时长/h	干燥总时长/h	干基含水量/%	开壳率/%
单一热风干燥	0	20±0.02	20±0.02	7.92±0.02	0
变温滚筒催化 红外热风联合干燥	22.50±0.00	14±0.02	14.38±0.02 (↓28.10%)	7.71±0.03	0

干燥方式	红外干燥能耗/(kJ/kg)	滚筒电机能耗/(kJ/kg)	热风干燥能耗/(kJ/kg)	总能耗/(kJ/kg)
单一热风干燥	0	0	2508.39±0.56	2508.39±0.56
变温滚筒催化 红外热风联合干燥	120.84±0.00	3.56±0.23	1755.87±0.26	1880.27±0.49 (↓25.04%)

2.4 干燥方式的对比性试验结果

在上述最优的变温滚筒催化红外-热风联合干燥工艺条件下进行与单一热风干燥效率的对比试验, 试验结果见图 6 和表 5。

由图 6a 和 b 可见, 新鲜核桃在联合干燥和单一热风干燥过程中均表现出两个阶段加速干燥阶段 (0~0.38 h 和 0~1.00 h) 和降速干燥阶段 (0.38~14.38 h 和 1.00~20.00 h), 降速阶段又包括两段, 这与张波^[28]研究核桃干燥曲线时得到的结论一致, 核桃干燥包括

加速和降速阶段。姜苗^[2]在研究核桃干燥时发现降速阶段包括第一降速阶段和第二降速阶段,这与本文的研究结论一致。在相对较高的初始含水率阶段,核桃原料的含水率在较短的干燥时间内呈线性下降,这是干燥过程的第一个阶段,常常被认为是热转移限制阶段^[2]。这也就表示在这一干燥阶段,初始含水量较高的原料可在高温下快速脱水,因此在此阶段加入催化红外预干燥处理可以快速提升物料温度,尽快排出核桃外壳中的水分,提高干燥速率,缩短干燥时间,由图 6b 的结果证实,变温滚筒催化红外-热风干燥的第一阶段的最大干燥速率[0.28 g/(g·min)]显著高于单一热风的干燥速率[0.11 g/(g·min)]。姜苗^[2]在研究核桃干燥时也发现当含水率较高时,温度的上升对干燥速率增加的影响更大,可以很好地解释本研究中催化红外预干燥的引入提高干燥速率的原因。随着干燥时间的继续增加,干燥速率逐渐下降。降速干燥阶段核桃内部的水分去除是一个质量转移限制过程^[2],应该根据含水率变化适当减少能量,最大限度地减少核桃的过度干燥和保护产品品质,因此这一阶段采用低温的热风干燥效果更好,使核桃与热风设备环境达成湿热平衡,由图 6b 发现联合干燥组的后期干燥速率趋同于单一热风干燥,因此本试验采取的先变温滚筒催化红外高温干燥再进行低温热风干燥的联合是正确的。姜苗^[2]在研究核桃干燥时也报道了当干燥进行到后期再提高干燥温度已无太大作用,从节能方面考虑,可以适当降低干燥温度。综上所述,本研究得出变温滚筒催化红外-热风联合干燥显著优于单一干燥,可以提高干燥速率和缩短干燥时间。张波^[28]在射频热风联合干燥核桃的研究中也得出相似的结论,在热风、真空和热风辅助射频三种干燥方式中,射频热风联合干燥核桃的时间最短(138 min),该文报道的干燥时间比本研究短的原因是将 20% (d.b.) 的带壳核桃干燥到含水率为 8%,而本研究的核桃起始含水率较高(40%~55%),故干燥时间长一些。

通过对比分析表 5 发现,当两种干燥方式都使样品干燥至含水率小于 8%时,核桃样品都没有发生开裂和褐变现象,产品品质均较好。单一热风干燥的时长为 20 h,变温滚筒催化红外-热风联合干燥的总时长为 14.38 h,与单一热风干燥相比,联合干燥组的干燥时长缩短了 28.10%。

2 种不同干燥过程的能耗见表 5,变温滚筒催化红外-热风干燥的能耗包括:红外干燥能耗、滚筒电机能耗和热风干燥能耗三部分:(1)称重获得的液化气消耗量为 0.47 kg,催化红外每消耗 1 kg 液化气产生的能量为 45208.80 kJ,干燥的新鲜核桃质量为 174 kg,则

单位质量红外能耗为:(0.47 kg×45208.80 kJ/kg)/174 kg=120.84 kJ/kg;(2)记录获得的滚筒电机耗电为 0.17 kW·h,干燥的新鲜核桃质量为 174 kg,则单位质量滚筒电机能耗为:(0.17 kW·h×3600)/174 kg=3.56 kJ/kg;

(3)记录获得的热风干燥耗电为 3.02 kW·h,干燥的新鲜核桃质量为 6.2 kg,则单位质量热风能耗为:(3.02 kW·h×3600)/6.2 kg=1755.87 kJ/kg;单一热风干燥仅包括热风干燥能耗:记录获得的热风干燥耗电为 4.32 kW·h,干燥的新鲜核桃质量为 6.2 kg,则单位质量热风能耗为:(4.32 kW·h×3600)/6.2 kg=2 508.39 kJ/kg。通过对比分析发现,22.50 min 的滚筒催化红外预干燥处理仅消耗了 120.84 kJ/kg 的能耗,大大降低了整个干燥过程的能耗,与单一热风干燥相比节约了 25.04% 的能耗。这是因为联合干燥组的变温滚筒催化红外预干燥处理显著提高了快速干燥阶段的干燥速率,已经由图 6a 和 b 证实。由此得出在保障产品品质的前提下,变温滚筒催化红外-热风联合干燥方法比单一热风干燥更高效,即缩短了干燥时长,又节约了能耗。Atungulu 等^[29]在研究核桃催化红外预干燥时得出催化红外预处理可以显著提高加工效率。

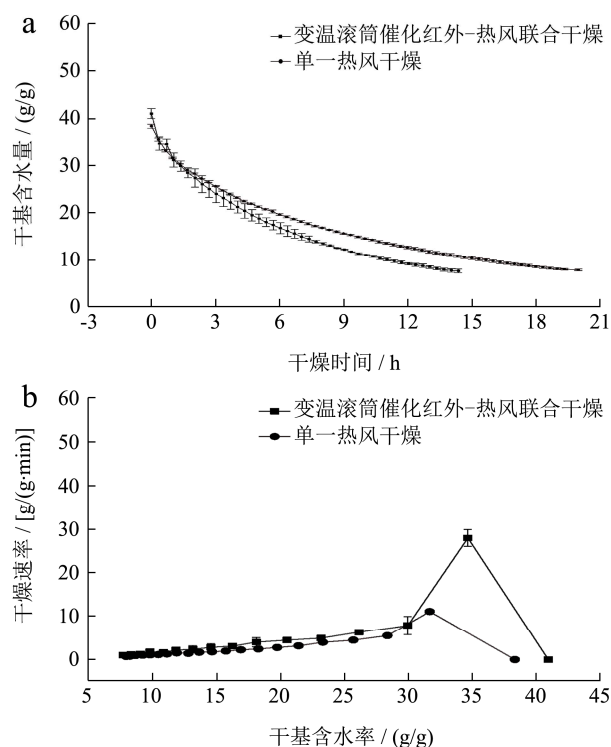


图 6 两种干燥方式的核桃干燥曲线 (a) 和干燥速率曲线 (b)
Fig.6 Drying curves (a) and drying rate curves (b) of walnut of two drying methods

2.5 变温滚筒催化红外-热风联合干燥动力学结果

表 6 不同干燥模型的相关参数

Table 6 Related parameters of different drying models

Henderson-Pabis				Page				Wang and Singh			
<i>a</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>k</i>	<i>N</i>	<i>R</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>RMSE</i>
0.90	0.11	0.99	0.03	0.26	0.69	0.99	0.06	0.004	-0.10	0.99	0.06

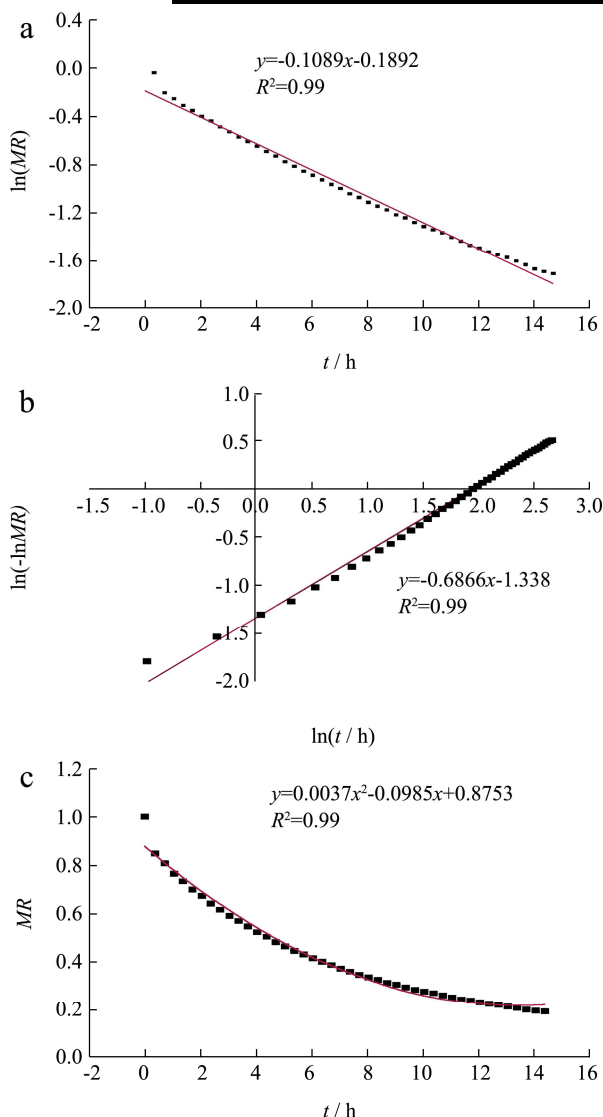


图 7 不同模型的 $\ln(MR)-t$ 曲线(a)、 $\ln[-\ln(MR)]-\ln t$ 曲线(b) 和 $MR-t$ 曲线 (c)

Fig.7 Curves of $\ln(MR)-t$ (a), $\ln[-\ln(MR)]-\ln t$ (b), and $MR-t$ (c) of different drying models

在最优的变温滚筒催化红外-热风联合干燥条件下，每隔一段时间测定水分比 MR ，根据表 1 的模型方程绘制该 $\ln(MR)-t$ 、 $\ln[-\ln(MR)]-\ln t$ 和 $MR-t$ 曲线，试验结果见图 7。

根据曲线图 7 的数据结合表 1 的公式分别计算 Page、Henderson-Pabis 和 Wang and Singh 模型的变量参数，并进行相应的模型验证试验，计算 R^2 和 $RMSE$ 值来评价模型的拟合程度，模型验证和模型相关参数结果见图 8 和表 6。

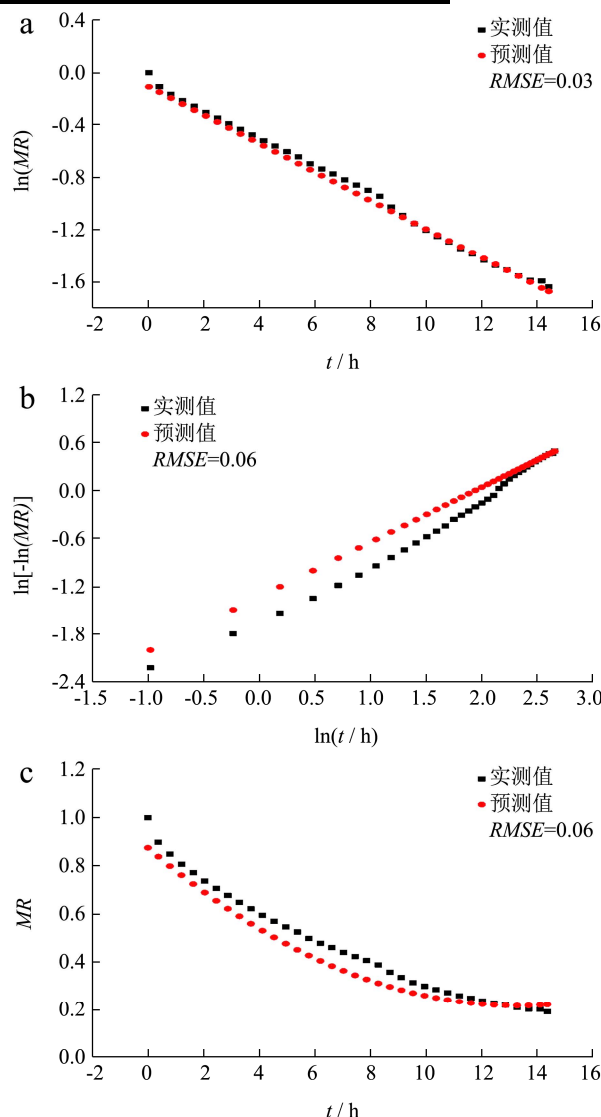


图 8 不同模型的水分比实测值与预测值的相关性

Fig.8 Correlation between measured values of water ratio and predicted values of different drying models

由表 6 的相关参数可以看出，三种模型对于核桃的变温滚筒催化红外-热风联合干燥的相关系数 R^2 均达到了 0.99 以上，拟合度很高。图 8 显示水分比 MR 的试验值和预测值具有很高的一致性，三种干燥模型的 $RMSE$ 值分别为 0.03、0.06 和 0.06，上述结果共同表明变温滚筒红外-热风联合干燥过程更符合 Henderson-Pabis 模型，该模型可以很好地预测核桃在变温滚筒催化红外-热风联合干燥过程中的含水率以及干燥速率变化，这与刘治华^[25]的研究结论相似：在金银花热风干燥中，Henderson-Pabis 模型对其干燥阶

段具有较高的拟合度, R^2 均大于 0.98。姜苗^[2]利用热风干燥的方式对核桃的干燥动力学进行研究时也发现, Henderson-Pabis 模型具有较好的拟合度, R^2 大于 0.82, 可以很好地预测核桃在热风干燥过程中的含水率以及干燥速率的变化。

3 结论

本文创新研制了一台新型多机组合式滚筒变温式催化红外干燥设备, 考察了催化红外辐射温度、距离及滚筒转速对核桃预干燥效果的影响。单因素优化试验得出催化红外辐射温度越高, 距离越近, 滚筒转速越低, 脱水率越高, 但当温度过高、距离太近、转速过低时, 核桃干燥后颜色变化较大, 易产生褐斑和裂壳, 影响产品品质。在优选的最佳催化红外温度组合 300+400 °C、辐射距离 30 cm、滚筒转速组合 25+35+35 Hz、处理时间 22.50 min 的催化红外预干燥阶段, 脱去了 13.04% 的外壳表面水分, 然后继续在热风温度 43 °C、风速 3 m/s 条件下热风干燥 14 h 至核桃干基含水率为 8%, 消耗的总干燥时长为 14.38 h, 与单一热风干燥 (20 h) 相比, 联合干燥组的时长缩短了 28.10%, 且节约了 25.04% 的单位体积能耗, 干制核桃表壳无褐斑, 开壳率为 0%, 颜色指标 L 为 54.24, a 为 10.61, b 为 19.89, 呈较亮的红黄色。干燥速率曲线也证实了变温滚筒催化红外预干燥处理显著提高了干燥速率, 最大干燥速率[0.28 g/(g·min)]显著高于单一热风的最大干燥速率[0.11 g/(g·min)]。由此得出与传统的热风干燥相比, 变温滚筒催化红外-热风联合干燥是一种适宜硬壳坚果类产品干燥的新型高效节能方法。

干燥动力学建模结果得出变温滚筒催化红外-热风联合干燥过程更符合 Henderson-Pabis 模型, R^2 为 0.99, $RMSE$ 为 0.03, 该模型拟合度较高, 可以很好地预测核桃在该干燥过程中的含水率以及干燥速率的变化, 为干果的新型干燥技术开发提供了理论模型。

参考文献

- [1] 王冰, 杨莉玲, 毛吾兰, 等. 新疆核桃干燥现状与技术优化[J]. 新疆农机化, 2017, 4: 29-32
WANG Bing, YANG Li-ling, MAO Wu-lan, et al. Current situation and optimization of walnut drying technology in Xinjiang [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2017, 4: 29-32.
- [2] 姜苗. 云南核桃热风干燥特性及其传质模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013
JIANG Miao. Drying characteristics and mass transfer simulation of sigillate walnut (*Juglans sigillata* Dode) during convection drying [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013
- [3] 王文倩, 王晗琦, 陈文, 等. 不同干燥方法对核桃品质及不饱和脂肪酸稳定性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2015, 33(1): 59-64
WANG Wen-qian, WANG Han-qi, CHEN Wen, et al. Effects of different drying methods on quality of walnuts and stability of unsaturated fatty acids [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 33(1): 59-64
- [4] 牛希跃, 陈胜慧子. 热风干燥对薄皮核桃品质的影响[J]. 南方农业, 2015, 9(27): 253-254, 256
NIU Xi-yue, CHEN Sheng-huizi. Effect of hot air drying on the quality of thin-skinned walnuts [J]. South China Agriculture, 2015, 9(27): 253-254, 256
- [5] Chen Chang, Venkatasamy C, Zhang W P, et al. Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 285: 1-13
- [6] Pan Z L, Venkatasamy C, Li X. Infrared Processing of Foods [M]. Reference Module in Food Science, Elsevier Inc, 2016
- [7] 吴本刚. 胡萝卜催化式红外干法杀青-红外热风顺序联合干燥技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014
WU Ben-gang. Study of carrot dry-blanching and dehydration using sequential infrared radiation heating and hot air drying [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014
- [8] 刘美娟, 吴本刚, 潘忠礼, 等. 胡萝卜丁催化式红外干法杀青同步脱水试验及动力学研究[J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 55-64
LIU Mei-juan, WU Ben-gang, PAN Zhong-li, et al. Experiments and kinetics study of carrot dices by simultaneous catalyse infrared dry-blanching and dehydration [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(1): 55-64
- [9] 张丽丽, 王相友. 红外辐射加热技术在果蔬脱水干燥中的应用研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 193-195
ZHANG Li-li, WANG Xiang-you. Development and discussion of infrared radiation drying technology on fruits and vegetables [J]. Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 193-195
- [10] 王相友, 林喜娜. 果蔬红外辐射干燥动力学的影响因素综述[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 114-120
WANG Xiang-you, LIN Xi-na. Influence factors of kinetics of infrared radiation drying for fruits and vegetables [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 114-120

- [11] Xiao H W, Pan Z L, Deng L Z, et al. Recent developments and trends in thermal blanching - a comprehensive review [J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(2): 101-127
- [12] 郑霞,万江静,高振江,等.红外干燥技术在果蔬加工中的研究现状与展望[J].江苏农业科学,2015,43(10):1-6
ZHENG Xia, WAN Jiang-jing, GAO Zhen-jiang, et al. Research status and prospects of infrared drying technology in fruit and vegetable processing [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(10): 1-6
- [13] 陈文敏,彭星星,孙田奎,等.红外温度对超声处理红枣的干燥特性及品质影响[J].现代食品科技,2015,31(6):224-229, 235
CHEN Wen-min, PENG Xing-xing, SUN Tian-kui, et al. Effect of infrared drying temperature on the drying characteristics and quality of jujube with ultrasonic pre-treatment [J]. Modern Food Science and Technology. 2015, 31(6): 224-229, 235
- [14] 唐璐璐,易建勇,毕金峰,等.不同干燥方式对丰水梨干燥特性及品质的影响[J].核农学报,2016,30(11):2171-2179
TANG Lu-lu, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Drying characteristics and quality of Housui pear slices processed using different drying methods [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(11): 2171-2179
- [15] 雷宏杰,纪珍珍,杨沫,等.不同干燥方式对花椒叶品质特性的影响[J].食品工业科技,2017,38(13):158-162
LEI Hong-jie, JI Zhen-zhen, YANG Mo, et al. Effect of different drying methods on the quality characteristic of dried pepper leaves [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(13): 158-162
- [16] Pan Z L, Shih C, Mc Hugh T H, et al. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying [J]. LWT - Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1944-1951
- [17] 邱丽.不同干燥方法对核桃品质及不饱和脂肪酸稳定性的影响[J].农业与技术,2018,38(8):65
QIU Li. Effects of different drying methods on walnut quality and stability of unsaturated fatty acids [J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(8): 65
- [18] 张绪坤,刘胜平,吴青荣,等.污泥低温干燥动力学特性及干燥参数优化[J].农业工程学报,2017,33(17):216-223
ZHANG Xun-kun, LIU Sheng-ping, WU Qing-rong, et al. Drying kinetics and parameters optimization of sludge drying at low temperature [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(17): 216-223
- [19] 李绚阳,李保明,郑炜超,等.鸡粪中低温干燥动力学特性与参数优化[J].农业工程学报,2018,34(10):194-199
LI Xuan-yang, LI Bao-ming, ZHENG Wei-chao, et al. Middle-low temperature drying dynamic characteristics for poultry manure and its parameter optimization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 194-199
- [20] 吴小华,马渊博,宁旭丹,等.西洋参分段式热风干燥动力学模型构建[J].农业工程学报,2020,36(5):318-324
WU Xiao-hua, MA Yuan-bo, NING Xu-dan, et al. Construction of staged hot-air drying dynamic model for American ginseng [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 318-324
- [21] 张茜,肖红伟,代建武,等.哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J].农业工程学报,2011,27(supp.1):382-388
ZHAN Qian, XIAO Hong-wei, DAI Jian-wu, et al. Air impingement drying characteristics and drying model of Hami melon flake [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(supp.1): 382-388
- [22] 徐保国,周天楚,魏本喜,等.催化式红外辐照改善樱桃番茄去皮效果及品质[J].农业工程学报,2018,34(24):299-305
XU Bao-guo, ZHOU Tian-chu, WEI Ben-xi, et al. Catalytic infrared radiation improving peeling effect and quality of cherry tomatoes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 299-305
- [23] Xiao H W, Law C L, Sun D W, et al. Color change kinetics of american ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying [J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 418-427
- [24] Vidyarthi S K, El- Mashad H M, Khir R, et al. Tomato peeling performance under pilot scale catalytic infrared heating [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 246: 224-231
- [25] 刘治华.金银花干燥动力学及其贮藏稳定性研究[D].济南:山东大学,2015
LIU Zhi-hua. Drying kinetics and storing stability of the flower bud of *Lonicera japonica* Thunb [D]. Jinan: Shandong University, 2015
- [26] 朱德泉,马锦,蒋锐,等.山核桃坚果分段变功率微波干燥工艺参数优化[J].农业工程学报,2016,32(15):268-274
ZHU De-quan, MA Jin, JIANG Rui, et al. Parameter optimization of hickory nut drying by phased varying power microwave [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(15): 268-274

(下转第 175 页)