

核桃滚筒催化红外—热风干燥试验及能耗分析

Experiment and energy consumption analysis of walnut drum catalytic infrared-hot air drying

曲文娟¹ 凡 威² 马海乐¹ 师俊玲³ 潘忠礼⁴

QU Wen-juan¹ FAN Wei² MA Hai-le¹ SHI Jun-ling³ PAN Zhong-li⁴

(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)

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

摘要:为了提高硬壳坚果类产品干燥效率,在研制的滚筒式催化式红外干燥设备基础上进行核桃红外干燥试验,考察工艺参数对脱水率、颜色和开壳率的影响。将滚筒催化红外—热风联合干燥和单一热风干燥作比较,对二者的干燥时间、干燥曲线、干燥速率曲线和能耗进行对比分析。研究表明,催化红外温度、距离和滚筒转速均对干燥效果和产品质量有显著影响,先在最佳的距离 30 cm、温度 450 ℃、滚筒转速 1.5 r/min 条件下滚筒催化红外预干燥 9.5 min,然后在温度 43 ℃、风速 3 m/s 条件下热风干燥 16 h,与单一热风干燥(20 h)相比,显著提高了干燥速率,缩短了 19.2% 的干燥时间,节约了 11.6% 的能耗,且干制核桃的品质良好。

关键词:滚筒催化红外干燥;热风干燥;核桃;品质;能耗

Abstract: In order to improve the drying efficiency of hard shell nut products, a new type of drum catalytic infrared drying equipment was developed in this paper. On the basis of the developed equipment, the effects of technological parameters on dehydration rate, color and shell opening rate were investigated. The drying time, drying curve, drying rate curve and energy consumption of the drum catalytic infrared-hot air drying were compared with that of the single hot air drying. The results showed that the catalytic infrared temperature, distance and drum rotational speed all had significant influence on drying performance

and product quality. After drum catalytic infrared pre-drying 9.5 min at the optimal radiation distance of 30 cm, radiation temperature of 450 ℃, drum speed of 1.5 r/min and then continuing to hot air drying 16 h at temperature of 43 ℃ and air speed of 3 m/s, compared with the single hot air drying (20 h), the drying rate was significantly improved, the drying time was shortened 19.2%, the energy consumption was saved 11.6%, and the dried walnut quality was good.

Keywords: drum catalytic infrared drying; hot air drying; walnut; quality; energy consumption

核桃为胡桃科胡桃属植物,其果仁富含蛋白质和不饱和脂肪酸,营养、保健以及经济价值较高^[1-2]。干燥处理是核桃安全贮藏和延长货架期最常见的加工方式之一。目前核桃的干燥方式主要为热风干燥,干燥速率低、时间长、能耗高,严重制约了核桃干果质量和产业的发展^[3-4]。

近年来国际上出现了一种新型干燥方法——催化式红外辐射干燥。催化式红外辐射干燥^[5-6]以天然气作为能源,利用红外加热器发射出的红外线照射到被加热物料上,无需加热介质,物料中的水分直接吸收红外辐射能量,从而使物料内部温度快速升高,实现物料快速脱水干燥的目的。相较于目前出现的如热风、射频、微波、电红外等干燥技术,催化红外干燥能够显著缩短干燥时长,并且催化红外干燥是由天然气在催化剂的作用下反应产生热能,与上述电转化为热能的干燥技术相比,热能转化率更高,更节能^[7-8]。一些研究^[9-11]也表明,催化红外干燥或者红外热风联合干燥不仅增加了能量利用效率,同时

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(编号:2017YFE0105300)

作者简介:曲文娟(1980—),女,江苏大学教授,博士。

E-mail: wqu@ujs.edu.cn

收稿日期:2021-02-16

获得更高的产品质量,如较高的营养保留率、更好的颜色以及复水性能等。Nowak 等^[9]对苹果片干燥研究得出,红外干燥比热风干燥缩短了 50% 的干燥时间。Sakai 等^[10]对胡萝卜干燥得出红外干燥具有较低的维生素、 β -胡萝卜素和风味物质损失。Gabel 等^[11]对红外干燥和热风干燥洋葱片进行比较研究得出,红外干燥比热风干燥得到的洋葱片具有更好的颜色和风味物质保留。

催化红外辐射干燥可以对物料进行快速加热,使得物料在短时间内失去大量水分,但干燥时间过长易导致表层褐变^[12-13],产品品质下降。目前使用的红外装备都是建立在静态加工^[14]基础上,而且存在温度不均匀^[15]、电转化为红外辐射能(电红外辐射)的转化率低^[15]、装备结构设计不科学^[16],以及干燥效率和产品品质无法兼顾^[17]等问题。如果设计一台滚动式红外装备是可以解决上述问题的,但目前未见有任何滚动式催化红外加工设备及相关干燥技术的研究报道,亟需判断此法的可行性。研究拟将滚筒催化红外与热风干燥联合应用于新鲜核桃的干燥,并探讨不同干燥条件和方式对干燥效果、产品品质和能耗的影响,以期为干果干燥产业的发展提供一种更为高效节能的手段。

1 材料与方法

1.1 试验原料与试剂

新鲜带青皮核桃:清香,于 9 月份成熟时采摘于陕西,于-20℃条件下贮藏备用。

1.2 主要仪器与设备

热风干燥设备:由电源总开关、电源指示灯、电加热开关、加热器、风机开关、风速调档按钮、风机、气体管道、干燥室(350 mm×400 mm×200 mm)、料盘、电器控制器、温度传感器、出风口组成,江苏大学食品学院联合泰州圣泰科红外科技有限公司研制;

滚筒催化红外干燥设备(见图 1):江苏大学食品学院联合,镇江美博红外科技有限公司研制;

天平:BAS2202S 型,德国 Sartorius 公司;

电监测仪:HP-9800 20A 型,深圳市宏品电子科技有限公司;

电子秤:XMTZC05HM 型,小米科技有限责任公司;

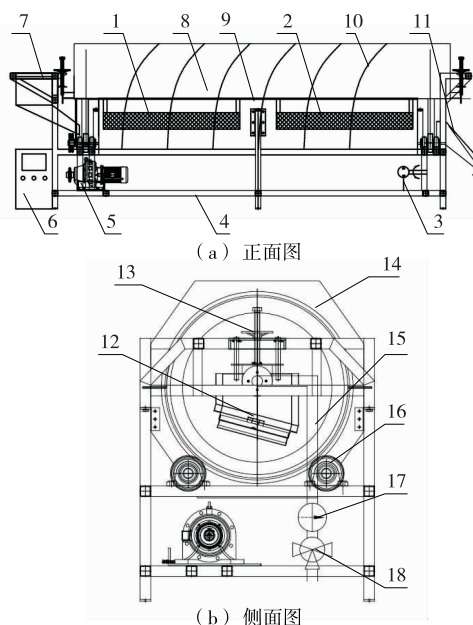
全自动色差仪:CR400 型,日本柯尼卡美能达公司;

手持式红外测温仪:AT600+型,香港希玛仪器仪表有限公司。

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杂质,清洗后于通风处沥干表面水分,置于密封袋中备用。

1.3.2 滚筒催化式红外—热风干燥工艺优化 调节催化



1,2. 催化式红外发生器(1 800 mm×480 mm×40 mm) 3. 空气泵 4. 机架 5. 滚筒转动电机 6. 电器控制箱 7. 进料料斗 8. 滚筒干燥室(Φ 1 000 mm×4 000 mm) 9. 支撑轴 10. 滚筒干燥室内壁挡板 11. 出料料斗 12. 温度传感器 13. 红外板距调整装置 14. 滚筒干燥室外壁 15. 燃气管道 16. 传动齿轮 17. 燃气压力表 18. 燃气调节阀

图 1 滚筒催化红外干燥设备

Figure 1 Drum catalytic infrared drying device

红外辐射距离至设定值,调节催化红外发生器温度至设定值,调节滚筒转速至设定值,然后将核桃倒入滚筒干燥室进行红外干燥一段时间,随后转入热风干燥(温度 43℃、风速 3 m/s)一段时间至核桃达到安全水分 8%即停止干燥。单因素试验设计如下:

(1) 催化红外辐射距离对干燥效果的影响:固定温度 450℃、滚筒转速 2.0 r/min,红外辐射距离分别为 25,30,35 cm,测定干基含水率下降率、表面温度、表面颜色和开壳率。

(2) 催化红外辐射温度对干燥效果的影响:固定板距 30 cm、滚筒转速 2.0 r/min,红外辐射温度分别为 350,400,450,500℃,测定干基含水率下降率、表面温度、表面颜色和开壳率。

(3) 滚筒转速对干燥效果的影响:固定板距 30 cm、温度 450℃,滚筒转速分别为 1.2,1.5,1.8,2.0,2.4 r/min,测定干基含水率下降率、表面温度、表面颜色和开壳率。

1.3.3 不同干燥方法的对比 分别采用优化后的滚筒催化式红外—热风干燥工艺(红外距离 30 cm、红外温度 450℃、滚筒转速 1.5 r/min、红外干燥时间 9.5 min、热风温度 43℃、热风风速 3 m/s、热风干燥时间 16 h)和单一热风干燥工艺(温度 43℃、风速 3 m/s、干燥时间 20 h)进

行核桃干燥至安全水分达到 8% 以下,对二者的干燥时间、干燥曲线、干燥速率曲线和能耗进行对比分析。

1.3.4 表面温度、开壳率和色泽的测定

(1) 表面温度: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。

(2) 开壳率:以核桃样本中开壳核桃个数所占的百分比表示。

(3) 色泽:采用全自动色差仪测定核桃上下左右 4 个位点的色度值 L 、 a 、 b ^[18],取平均值,按式(1)计算色差 ΔE 。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}, \quad (1)$$

式中:

L_0 、 a_0 、 b_0 ——干燥前样品的初始值;

L 、 a 、 b ——干燥后样品的终点值。

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。

1.3.5 干基含水率、干基含水率下降率和干燥速率的测定 干基含水率、干基含水率下降率、干燥速率分别按式(2)~式(4)计算^[19-20]:

$$M_t = \frac{G_t - G_d}{G_d}, \quad (2)$$

$$M_R = \frac{M_i - M_t}{M_i} \times 100, \quad (3)$$

$$D_R = \frac{M_i - M_{t_2}}{t_2 - t_1}, \quad (4)$$

式中:

M_t ——干燥 t 时样品的干基含水率, g/g;

G_t ——干燥 t 时样品的质量, g;

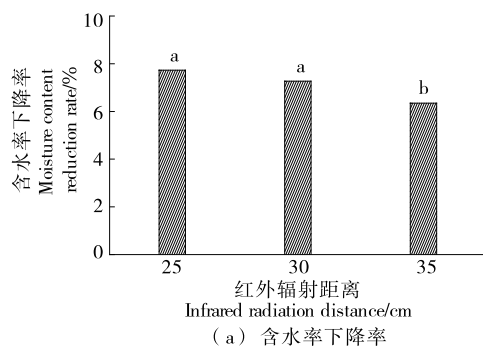
G_d ——样品的干重, g;

M_R ——干基含水率下降率, %;

M_i ——干燥前样品的初始干基含水率, g/g;

D_R ——干燥速率, g/(g · min);

t_1 、 t_2 ——干燥时间, min;



M_{t_1} 、 M_{t_2} ——干燥 t_1 、 t_2 时样品的干基含水率, g/g。

1.3.6 能耗的计算 参照文献[21]。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)。干燥能耗以干燥单位质量(1 kg)核桃的能耗计算,单位为 kJ/kg。

1.3.7 数据统计分析 所有试验均做 3 个平行试验,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,代表数据之间存在显著性差异。

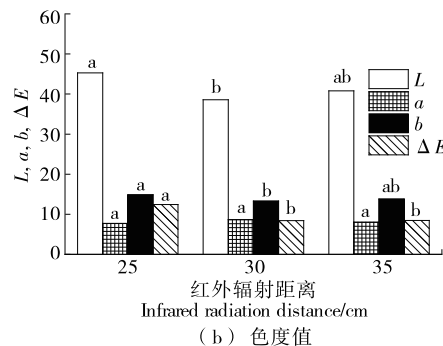
2 结果与讨论

2.1 催化红外辐射距离对核桃预干燥效果和品质的影响

考察不同红外辐射距离对核桃预干燥效果的影响,试验结果见图 2 和表 1。

图 2(a)显示核桃的干基含水率下降率随催化红外辐射距离的降低而增大,表明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,辐射距离 25 cm 时样品表面温度最高,接近 70 °C,因此催化红外辐射距离 25 cm 下的脱水效果最好。吴本刚^[16]的研究结论也证实,红外辐射距离越近,干燥速率越大。

由图 2(b)可知,核桃的 L 、 b 和 ΔE 值均随催化红外辐射距离的减少而增大,而 a 值之间无显著性差异($P > 0.05$);在辐射距离 25 cm 时干制核桃整体颜色偏红褐色,在距离 30, 35 cm 时核桃颜色较好,呈亮的红黄色,且核桃在 25 cm 时表壳出现了小褐斑和细纹。这是因为过高的表壳温度使得表层多酚发生褐变产生了黑褐色,而且表层水分散发过快造成局部产生细微裂缝^[1],但并未造成核桃沿纵向轴裂开,开壳率为 0%。因此为了保障核桃品质,催化红外辐射距离不宜太近,综合考虑干燥效果和核桃品质,推荐较优的催化红外辐射距离为 30 cm,此时样品的脱水率较高,且呈较亮的红黄色,因此将该板距用于后续的试验中。



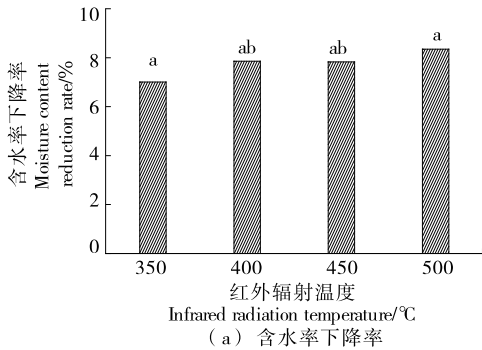
字母不同表示在 $P < 0.05$ 水平存在显著性差异

图 2 不同催化红外辐射距离下样品的含水率下降率和色度值

Figure 2 Moisture content reduction rates and color values of samples under different catalytic infrared radiation distances

表 1 不同催化红外辐射距离下样品的表面温度和开壳率
Table 1 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	67~69	0	表壳出现褐斑和细纹
30	62~64	0	—
35	57~59	0	—



字母不同表示在 $P<0.05$ 水平时存在显著性差异

图 3 不同催化红外辐射温度下样品的含水率下降率和色度值

Figure 3 Moisture content reduction rates and color values of samples under different catalytic infrared radiation temperatures

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

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

催化红外辐射温度/℃	表面温度/℃	开壳率/%	备注
0	25	0	—
350	56~59	0	—
400	60~62	0	—
450	62~64	0	—
500	67~69	0	表壳出现褐斑和细纹

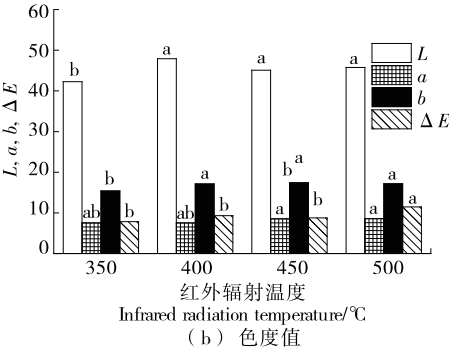
高,因此脱水效果越好。姜苗^[22]的研究结论也证实温度对核桃的干燥强度、干燥速率和时间影响较大,温度越高,干燥强度越大。

由图 3(b)可知,核桃的 L 、 a 、 b 和 ΔE 值均随催化红外辐射温度的增加而增大;500℃时整体颜色偏红褐色,400、450℃时颜色较好呈较亮的红黄色,350℃时颜色偏暗黄色,且核桃在 500℃时表壳出现了小褐斑和细纹,这是由高温造成的^[1],但是开壳率为 0%。朱德泉等^[1]也证实温度过高极易导致核桃外壳及果仁变为黑褐色甚至焦黑色,质量大大下降。因此为了保障核桃品质,催化红外

2.2 催化红外温度对核桃预干燥效果和品质的影响

考察不同红外温度对核桃预干燥效果的影响,试验结果见图 3 和表 2。

图 3(a)显示,核桃的干基含水率下降率随催化红外辐射温度的增加而增大。当催化红外辐射温度为 500℃时,催化红外预干燥阶段去除了 8.3% 的水分;当催化红外辐射温度为 350℃时催化红外预干燥阶段去除了 7.0% 的水分。由此得出催化红外辐射温度越高,脱水效果越好。这是因为催化红外辐射温度越高,核桃表面温度越



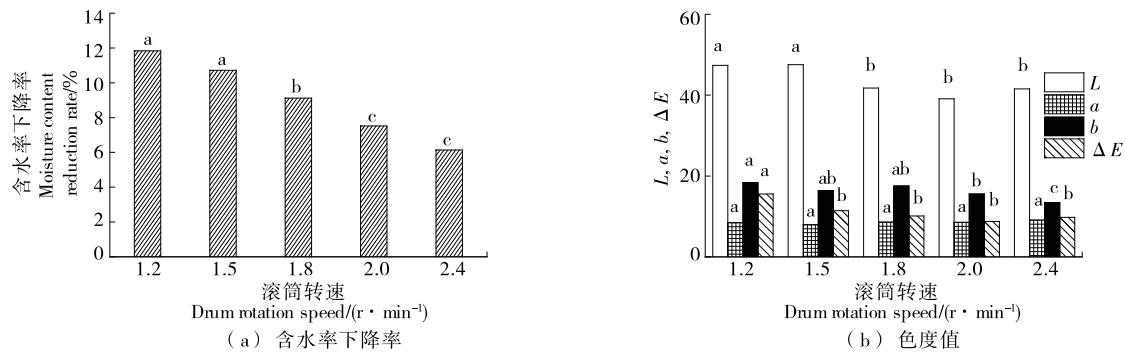
辐射温度不宜太高,综合考虑干燥效果和核桃品质,推荐较优的催化红外辐射温度为 450℃,此时样品的脱水率较高,且品质较好,未发生褐变和开壳现象,并将该板温用于后续的试验中。

2.3 滚筒转速对核桃预干燥效果和品质的影响

考察不同滚筒转速对核桃预干燥效果的影响,试验结果见图 4 和表 3。

图 4(a)显示了滚筒转速越低,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,因此脱水效果越好。当滚筒转速为 1.2 r/min 时,催化红外预处理阶段的时间为 11.01 min,含水率下降率达到最高,去除了 11.8% 的水分;当滚筒转速为 1.8 r/min 时,催化红外预处理时间为 7.75 min,去除了 9.1% 的水分;当滚筒转速为 2.4 r/min 时,催化红外预处理时间为 6.20 min,去除了 6.1% 的水分,发现脱水率数据之间存在显著性差异 ($P<0.05$),由此得出,较低的滚筒转速更有利于提高脱水效果。

由图 4(b)可知,核桃的 L 、 b 和 ΔE 值均随滚筒转速的降低而增大,干制核桃颜色越深。在转速 1.2 r/min 时干制核桃整体颜色偏红褐色,在 1.5、1.8、2.0 r/min 时呈较亮的红黄色,在 2.4 r/min 时核桃颜色偏暗黄色,而且在 1.2 r/min 时表壳出现了褐斑和较多细纹,且产生了裂壳现象,开壳率为 50.0%。因此为了保障核桃品质,滚筒



字母不同表示在 $P<0.05$ 水平时存在显著性差异

图4 不同滚筒转速条件下样品的含水率下降率和色度值

Figure 4 Moisture content reduction rates and color values of samples under different drum rotation speeds

表3 不同滚筒转速条件下样品的表面温度、催化红外辐射时间和开壳率

Table 3 Surface temperatures, catalytic infrared radiation times and shell opening rates of samples under different drum rotation speeds

滚筒转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	红外辐射 时间/min	表面温 度/ $^{\circ}\text{C}$	开壳率/ %	备注
1.2	11.01	75	50.0	表壳出现褐斑和细纹多
1.5	9.50	69~70	0.0	—
1.8	7.75	66~68	0.0	—
2.0	7.00	62~64	0.0	—
2.4	6.20	58~60	0.0	—

转速不宜过低,综合考虑干燥效果和核桃品质,推荐较优的滚筒转速为 1.5 r/min,此时样品的脱水率较高,且品质良好,未发生褐变和开壳现象。

综上所述,滚筒催化红外干燥参数——温度、距离和滚筒转速均对干燥效果和产品品质有显著影响。其最优工艺参数为:温度 450°C 、距离 30 cm、滚筒转速 1.5 r/min、处理时间 9.5 min。在此条件下,滚筒催化红

外预干燥去除了 10.7% 的表壳水分,且干制核桃无褐变和开壳现象,呈较好的亮红黄色。在上述滚筒催化红外预干燥工艺参数下,虽然核桃表壳温度达到 $69\sim 70^{\circ}\text{C}$,但是核仁温度仅为 $45\sim 47^{\circ}\text{C}$,且处理时间短(为 9.5 min),随后立即转入低温(43°C)下进行热风干燥,因此整个滚筒催化红外—热风干燥过程均是在低温下(50°C 以下)进行的,是可以避免核仁内脂肪发生氧化,保障产品品质。

2.4 不同干燥方式的对比

采用最优的滚筒催化红外—热风干燥工艺条件与单一热风干燥工艺进行对比试验,试验结果见图 5 和表 4。

由图 5 可知,核桃在两种工艺干燥过程中均呈现两个阶段——加速干燥阶段和降速干燥阶段,与张波^[23]对核桃干燥曲线研究的结论一致。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。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高物料温度,尽快排出核桃外壳中的水分,提高干燥速率,缩短干燥时间。与单一热风干燥相比,滚筒催化红外—热风干燥的第一阶段的干燥速率更高。随

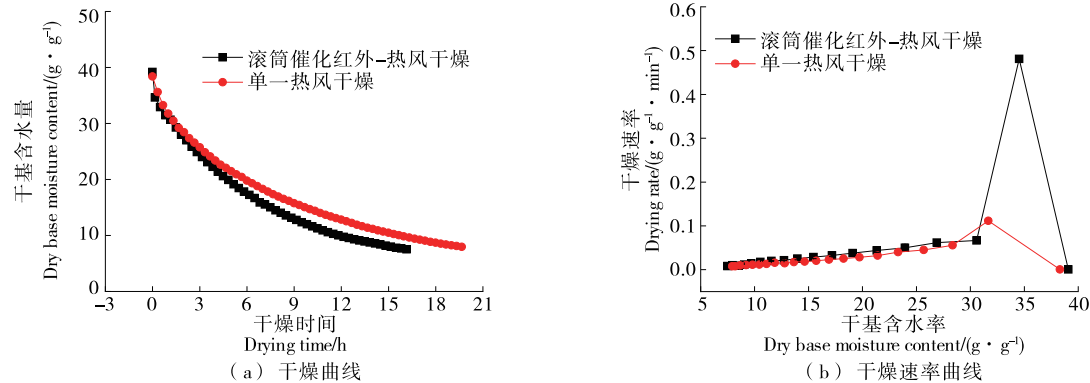


图5 两种干燥方式的核桃干燥曲线和干燥速率曲线

Figure 5 Drying curves and drying rate curves of walnut of two drying methods

表 4 两种干燥方式的干燥时间、开壳率和单位质量干燥能耗

Table 4 Drying times, shell opening rates and energy consumptions per unit kilogram volume of two drying methods

干燥方式	红外干燥 时间/min	热风干燥 时间/h	干燥总 时间/h	开壳率/ %	红外干燥能耗/ (kJ · kg ⁻¹)	滚筒电机能耗/ (kJ · kg ⁻¹)	热风干燥能耗/ (kJ · kg ⁻¹)	总干燥能耗/ (kJ · kg ⁻¹)
单一热风干燥	—	20	20.00	0	0.0	0.0	2 508.4	2 508.4
滚筒催化红外— 热风干燥	9.5	16	16.16(↓19.2%)	0	208.0	2.8	2 006.7	2 217.5(↓11.6%)

着干燥时间的继续增加,干燥速率逐渐变缓慢。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,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,因此这一阶段采用较低温度的热风干燥效果更好^[22]。由图 5(b)可知,滚筒催化红外—热风干燥的后期干燥速率趋同于单一热风干燥,因此试验采取的先滚筒催化红外预干燥再进行低温热风干燥的顺序是正确的,在提高脱水速率和缩短干燥时间的同时保障了产品品质。张波^[23]在射频热风联合干燥核桃的研究中也有相似的结论:联合干燥方式显著优于单一干燥方式,提高了干燥速率。

由表 4 可知,两种方式干燥的核桃样品均未出现开壳和褐变现象,产品品质好且呈较亮的红黄色。与单一热风干燥相比,滚筒催化红外—热风干燥的干燥时间缩短了 19.2%,能耗降低了 11.6%。这是因为滚筒催化红外—热风干燥的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,排出了大部分的表壳水分,减少了干燥总时间,与 Atungulu 等^[24]的研究结论相一致。由此得出在保障产品品质的前提下,滚筒催化红外—热风干燥比单一热风干燥更高效,既缩短了干燥时间,又节约了能耗。

3 结论

针对硬壳坚果热风干燥存在的加工时间长、能耗大的问题,在研制的滚筒式催化红外设备基础上开展催化红外—热风联合干燥技术研究。催化红外干燥阶段(温度 450 ℃、距离 30 cm、滚筒转速 1.5 r/min、处理时间 9.5 min)预先去除了 10.7%的表壳水分,随后转入热风干燥(温度 43 ℃、风速 3 m/s、处理时间 16 h),与传统热风干燥(20 h)相比,干燥时间缩短了 19.2%,能耗降低了 11.6%,且干制品无褐变和开壳现象,品质较好。滚筒催化红外—热风干燥技术是一种适用于硬壳坚果类产品干燥的新型高效节能技术,具有明显的高效节能优势,具有广阔的应用前景和工业化推广价值。后续将对干燥前后核桃仁的营养品质进行深入分析,以进一步提高产品品质。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 王庆惠, 闫圣坤, 李忠新, 等. 核桃深层热风干燥特性研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 60-63.

[5] 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.

[6] 张磊, 余筱洁, 白竣文, 等. 红外干燥方式对紫甘蓝干燥特性的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(12): 202-209, 176.

[7] LIU Yun-hong, MIAO Shuai, WU Jian-ye, et al. Drying characteristics and modeling of vacuum far-infrared radiation drying of flos loniceriae[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(4): 338-348.

[8] 付瑞鹏, 王华, 张昂, 等. 催化式红外辐射对葡萄籽灭菌的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(10): 150-156.

[9] NOWAK D, LEWICKI P P. Infrared drying of apple slices[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2004, 5(3): 353-360.

[10] SAKAI N, HANZAWA T. Applications and advances in far-infrared heating in Japan [J]. Trends in Food Science & Technology, 1994, 5(11): 357-362.

[11] GABEL M M, PAN Zhong-li, AMARATUNGA K S P, et al. Catalytic infrared dehydration of onions[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(9): E351-E357.

[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.

[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.

[14] CHEN Chang, VENKITASAMY C, ZHANG Wei-peng, et al. Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 285: 110105.

[15] LEE E H. A review on applications of infrared heating for food processing in comparison to other industries[J]. Innovative Food Processing Technologies, 2021(9): 431-455.

[16] 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: 27-28.

(下转第 193 页)

- with egg yolk and egg yolk fractions[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2001, 21(1): 137-147.
- [45] MONICA P, TONG W, NURIA A. Characterization of mayonnaise properties prepared using frozen-thawed egg yolk treated with hydrolyzed egg yolk proteins as anti-gelator[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 529-536.
- [46] 朱洛毅. 日粮中添加棉粕和棉籽油对鸡蛋质量的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 54.
- [47] CREUSOT N, GRUPPEN H. Enzyme-induced aggregation and gelation of proteins[J]. *Biotechnol Adv*, 2007, 25(6): 597-601.
- [48] 汪师帅, 李斌, 黄婷, 等. 鸡蛋蛋白质改性研究进展[J]. *食品科技*, 2012, 37(2): 76-80.
- [49] 何灿, 高红亮. 谷氨酰胺酶的应用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(32): 15 883-15 885.
- [50] 胡新平. 磷脂酶 A-2 制备功能性蛋黄粉的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005: 1.
- [51] NIETO-NIETO TV, WANG Yi-xing, OZIMEK L, et al. Effects of partial hydrolysis on structure and gelling properties of oat globular proteins [J]. *Food Research International*, 2014, 55: 418-425.
- [52] HOU Yao, ZAHNG Xin-hui. Abstract: Limited hydrolysis of two soybean protein products with trypsin or neutrase and the impacts on their solubility, gelation and fat absorption capacity[J]. *Biotechnology*, 2011, 10(2): 190-196.
- [53] LOPEZ A, FELLERS C R, POWRIE W D. Enzymatic inhibition of gelation in frozen egg[J]. *Milk and Food Technology*, 1955, 18: 77-84.
- [54] NAKAMURA R, TANIGUCHI M, FUKANO T. Heat-induced gelation of hen's egg yolk low density lipoprotein (LDL) dispersion[J]. *Journal of Food Science*, 1982, 47(5): 1 449-1 453.
- [55] 李欢欢, 陈伊凡, 张晋, 等. 热处理对酶解蛋黄液功能特性和热稳定性的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(10): 105-114.
- [56] 艾民珉, 汤婷, 蒋爱民, 等. 化学作用力对皮蛋黄凝胶形成的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(6): 5-9.
- [57] YANG Yuan, ZHAO Yan, XU Ming-sheng, et al. Effects of strong alkali treatment on the physicochemical properties, microstructure, protein structures, and intermolecular forces in egg yolks, plasma, and granules[J]. *Food Chemistry*, 2020, 311: 125998.
- [58] 陈晓. 温度对蛋清和蛋黄碱诱导凝胶形成速度及品质的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2017: 55-62.
- [59] 王蓉蓉, 辛营营. 蛋黄凝胶形成及凝胶特性研究[J]. *农产品加工·综合刊*, 2011(12): 8-9.
- [60] PARASKEVOPOULOU A, KIOSSEOGLOU V. Texture profile analysis of heat-formed gels and cakes prepared with low cholesterol egg yolk concentrates[J]. *Journal of Food Science*, 1997, 62(1): 208-211.
- [61] JAAX S, TRAVNICEK D. The effect of pasteurization selected additives and freezing rate on the gelation of frozen defrosted egg yolk[J]. *Poultry Science*, 1968, 47(3): 1 013-1 022.
- [62] LOPEZ A, FELLERS C R, POWRIE W D. Some factors affecting gelation of frozen egg yolk[J]. *Milk and Food Technology*, 1954, 17: 334-340.
- [63] 陈旭, 蔡茜茜, 汪少芸, 等. 抗冻肽的研究进展及其在食品工业的应用前景[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 331-337.
- [64] MONICA P, NURIA C A, TONG W. Effect of freezing and food additives on the rheological properties of egg yolk [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105241.
- [65] REN Liu-yuan, LIU Jing-yuan, ZHANG Xue-qi, et al. Emulsion, gelation, physicochemical properties and microstructure of phosphorylated and succinylated egg yolk[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 131: 109675.
- [66] 刘静媛. 化学改性对大豆蛋白和蛋黄性质的影响[D]. 北京: 北京农学院, 2018: 39-40.
- [67] MA C Y, HARWALKAR V R, POSTE L M, et al. Effect of gamma irradiation on the physicochemical and functional properties of frozen liquid egg products[J]. *Food Research International*, 1993, 26(4): 247-254.
- [68] SANG Shang-yuan, CHEN Yu-ting, ZHU Xiao, et al. Effect of egg yolk lipids on structure and properties of wheat starch in steamed bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 86: 77-85.
- [69] 马爽, 刘静波, 王二雷. 蛋粉加工及应用的研究现状分析[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(2): 393-397, 400.
- [70] 严建业, 王璐, 李顺祥, 等. 蛋黄油的现代研究进展[J]. *中国中医药信息杂志*, 2012, 19(3): 106-110.
- (上接第 168 页)
- [17] PAN Zhong-li, SHIH C, MCHUGH 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): 1 944-1 951.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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(增刊 1): 382-388.
- [21] VIDYARTHI S K, EI-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.
- [22] 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: 28-32.
- [23] 张波. 核桃射频热风联合干燥特性及品质变化研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017: 15-21.
- [24] ATUNGULU G G, TEH H E, WANG Tian-xin, et al. Infrared pre-drying and dry-dehulling of walnuts for improved processing efficiency and product quality[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, 29(6): 961-971.