

# 直触式超声强化热风干燥梨片的干燥特性

## Drying characteristics of direct-contact ultrasound enhanced hot-air drying of pear slices

孙畅莹<sup>1</sup> 刘云宏<sup>1,2</sup> 曾雅<sup>1</sup> 石晓微<sup>1</sup> 席慧涵<sup>1</sup>

SUN Chang-ying<sup>1</sup> LIU Yun-hong<sup>1,2</sup> ZENG Ya<sup>1</sup> SHI Xiao-wei<sup>1</sup> XI Hui-han<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 农产品干燥装备河南省工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Henan Engineering Technology Research Center of Agricultural Product Drying Equipment, Luoyang, Henan 471023, China)

**摘要:**为探讨直触式超声强化热风干燥梨片的干燥特性,进行梨片超声强化热风干燥试验,研究超声功率及热风温度对梨片干燥过程及产品品质的影响规律。结果表明:提高热风温度及直触式超声功率能够明显缩短干燥时间,较低温度下的超声强化效果要好于较高温度下的。BP神经网络模型能较好地预测梨片超声强化热风干燥过程中的水分变化规律。超声产生的空化效应和机械效应可增大水分流动性及提高梨片的复水率,且有利于保留梨片营养成分,但干燥温度过高则不利于总酚、总黄酮、V<sub>C</sub>等热敏性营养成分的保留。梨片超声强化热风干燥过程的层次分析法优化结果表明,最优干燥参数为热风温度 35 ℃、超声功率 48 W,此时梨片总酚含量为 408.88 mg/100 g,总黄酮含量为 157.94 mg/100 g, V<sub>C</sub>含量为 42.36 mg/100 g,复水率为 3.32。因此,将直触式超声强化技术用于梨片热风干燥中,能够显著缩短干燥时间、明显提高梨片干燥品质。

**关键词:**梨;超声强化;热风干燥;干燥特性

**Abstract:** In order to explore the enhancing effect of contact ultrasound on hot air drying process, ultrasound enhanced hot air drying of pear slices was performed. The effects of different ultrasound powers and drying temperatures on drying characteristics and several quality indicators of pear slices were studied. The results showed that

the improvement of hot air temperature and ultrasound power could significantly reduce drying time, and the stronger ultrasound enhanced effects could be achieved at lower temperatures. The BP neural network model was applied to predict the process of ultrasound enhanced hot air drying with high fitting precision. The cavitation and mechanical effects of ultrasound could increase moisture mobility and rehydration rate, and could improve the contents of the nutrients in pear slices. However, too high temperature was negative to the retention rate of total phenols, total flavonoids and ascorbic acid which were heat-sensitive nutrient components. The analytic hierarchy process was applied to determine the optimal parameters of ultrasound enhanced hot air drying of pear slices as hot air temperature of 35 ℃ and ultrasonic power of 48 W. The corresponding total phenol content, total flavonoid content, V<sub>C</sub> content and rehydration ratio were 408.88 mg/100 g, 157.94 mg/100 g, 42.36 mg/100 g and 3.32, respectively. Therefore, the reduction of drying time as well as the improvement of product quality could be achieved with the application of contact ultrasound on hot air drying of pear slices.

**Keywords:** pear; ultrasound enhancement; hot air drying; drying characteristics

**基金项目:**河南省高校青年骨干教师资助计划(编号:2015GGJS048);河南省高校科技创新人才资助计划(编号:19HASTIT013);河南省科技攻关项目(编号:172102310617);河南省高校科技创新团队资助计划(编号:16IRTSTHN009)

**作者简介:**孙畅莹,女,河南科技大学在读硕士研究生。

**通信作者:**刘云宏(1975—),男,河南科技大学副教授,博士。

E-mail:beckybin@haust.edu.cn

**收稿日期:**2018-04-09

梨(*Pyrus spp*)为蔷薇科梨属果实<sup>[1]</sup>,含有丰富的营养成分,具有生津润肺、清热解毒等功效<sup>[2]</sup>。梨除了鲜用之外,将其干燥制成梨片进行销售和贮藏是目前常用的手段<sup>[3]</sup>。热风干燥作为梨片干燥加工过程中最常用的干燥方式<sup>[4]</sup>,其优势在于操作简单、设备成本低,但同时具有热能利用率低、耗时长、干燥品质差等缺点<sup>[5]</sup>。若能通过有效手段来加快梨在干燥过程中的水分传递,将有利于减少干燥时间、保证产品品质。

超声波作为一种高频机械振动波,在介质内部能够产生空化效应和机械效应,从而能促进水分扩散与迁徙<sup>[6]</sup>。由于超声波良好的强化传质效应,超声在干燥方面的应用引起人们越来越多的关注。直触式超声强化干燥是目前干燥研究热点之一,这种干燥方式是将物料直接放在辐射板上,超声能量能直接传播到物料内部,从而减少能量损耗、提高强化效率<sup>[7]</sup>。Kek 等<sup>[8]</sup>对比了直触式超声波和气介式超声波对番石榴对流干燥的强化效果,发现在缩短干燥时间和降低能耗损失方面,直触式超声能够取得比气介式超声更为有效、明显的效果。Ortuno 等<sup>[9]</sup>通过直触式超声功率对橙皮干燥过程中的水分迁移及微观结构变化的研究,发现增大超声功率能够显著提高传质系数和水分扩散系数,且橙皮细胞结构中产生大量的微孔洞,从而提高橙皮的水分迁移。上述研究表明,将直触式超声与热风干燥相结合,能够有效促进传质过程、缩短干燥时间。然而,目前缺乏将直触式超声应用于梨片热风干燥过程强化的研究报道。

本试验拟以皇冠梨为原料,在梨片热风干燥过程中采用直触式超声进行干燥过程的强化,探讨不同超声功率对梨片热风干燥特性的强化效应,建立干燥过程的 BP 神经网络数学模型,分析超声对梨片总酚、总黄酮、V<sub>C</sub>、复水品质指标的影响,并采用层次分析法(AHP)对梨片超声强化热风干燥过程进行参数优化。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

皇冠梨:河南洛阳大张超市,采用 105 °C 烘箱法<sup>[5]</sup>测定新鲜皇冠梨的干基含水率为(890±5)%;

没食子酸(纯度≥95%)、儿茶素(纯度≥95%)、Folin-Ciocalteu 试剂:上海源叶生物科技有限公司;

其他试剂均为分析纯试剂。

### 1.2 仪器与设备

超声强化热风干燥装置:河南科技大学自制,具体结构和参数见文献<sup>[10]</sup>;

切片机:SHQ-1 型,德州天马粮油机械有限公司;

电子天平:DT-2000E 型,常熟市嘉衡天平仪器有限公司;

电热鼓风干燥箱:101-3ES 型,北京市永光明医疗仪器厂;

超声波清洗机:SB-120DT 型,宁波新芝生物科技有限公司;

紫外-可见分光光度计:T6 新世纪型,北京普析通用仪器有限公司;

高速离心机:TG16-WS 型,湘仪离心机仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 梨片干燥处理 将梨清洗干净后去皮,用切片机将梨切成直径 50 mm、厚度 5 mm 的圆形梨片。干燥时,将约 70 g 梨片均匀平铺在超声强化热风干燥机中的超声振动圆盘上,将热风干燥风速固定为 1 m/s,设定超声功率分别为 0,24,48 W,热风温度分别为 35,45,55 °C,研究超声强化热

风干燥特性及品质特性。干燥过程中,每隔 30 min 将物料连同超声辐射装置从热风干燥设备取出并快速称重,然后放入干燥仓中继续进行干燥。连续 2 次所称质量保持不变时,表明已没有水分脱除,结束干燥。每次称量质量减去超声辐射装置质量即为物料质量。每组试验均重复 3 次。

### 1.3.2 指标测定

(1) 干燥过程中样品干基含水率<sup>[11-12]</sup>:

$$M = \frac{M_t - M_d}{M_d} \times 100\% , \quad (1)$$

式中:

$M$ ——物料的干基含水率,%;

$M_t$ ——干燥  $t$  时间对应的物料质量,g;

$M_d$ ——物料所含绝干物料质量,g。

(2) 总酚含量的测定:采用 Folin-Ciocalteu 法<sup>[13]</sup>。

(3) 总黄酮含量的测定:采用 NaNO<sub>2</sub>-Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>-NaOH 法<sup>[14]</sup>。

(4) V<sub>C</sub> 含量的测定:采用 2,4-二硝基苯肼比色法<sup>[15]</sup>。

(5) 复水率的测定:参照文献<sup>[16]</sup>。

1.3.3 BP 神经网络模型 利用 BP 神经网络进行干燥过程模拟。将热风温度、超声功率及干燥时间参数作为输入层向量,即输入层节点数为 3。输出层向量为梨的实时含水率,即输出层节点数为 1。根据 Kolmogorov 定理<sup>[17]</sup>和多次训练,隐藏层节点数为 7 时可实现最优的训练效果。综上,采用 3-7-1 单隐层 BP 神经网络模型对梨的含水率进行训练和预测。网络模型结构见图 1。

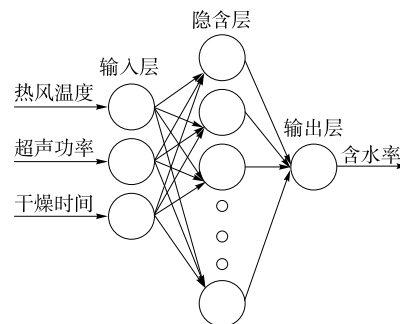


图 1 BP 神经网络模型结构图

Figure 1 BP neural network model structure diagram

1.3.4 AHP 的工艺参数优化 采用层次分析法(AHP)<sup>[18]</sup>进行超声强化热风干燥梨片的干燥参数优化。以总酚、总黄酮、V<sub>C</sub>含量及复水率 4 个品质指标为多指标性成分,在确定和对比同一层次目标的相对重要性的基础上进行比较矩阵的构建,各层次评分标准见表 1,4 项指标进行成对比较判断的优先矩阵见表 2。

平均随机一致性指标 RI(random index)见表 3。

一致性比例的计算方法<sup>[18]</sup>:

$$CR = \frac{CI}{RI} , \quad (2)$$

式中:

$CR$ ——一致性比例;

$CI$ ——指标权重系数;

表 1 各层次评分标准

Table 1 Evaluation standard of different levels

相对重要性	定义
1	重要程度相同
3	重要程度稍强
5	重要程度强
7	重要程度非常强
9	绝对重要
2,4,6,8	以上重要程度的中间值
倒数	若 $i$ 与 $j$ 的重要程度的比值为 $a_{ij}$ , 则 $j$ 与 $i$ 的重要程度的比值为 $1/a_{ij}$

表 2 梨片 4 个品质指标成对比较判断的优先矩阵

Table 2 Priority matrix about pair-wise comparison judgment of pear slices' four quality indexes

评价指标	总酚	总黄酮	V <sub>C</sub>	复水率
总酚	1	3	1/3	3
总黄酮	1/3	1	1/4	2
V <sub>C</sub>	3	4	1	4
复水率	1/3	1/2	1/4	1

表 3 平均随机一致性指标表

Table 3 Mean random consistency indexes

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

RI——平均随机一致性指标。

当  $CR < 0.1$  时,说明各指标判断优先矩阵满足一致性要求,所得权重系数合理有效。利用 AHP 方法,可计算确定总酚、总黄酮、V<sub>C</sub>、复水率对应的权重系数  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 、 $w_4$  分别为 0.261 1, 0.126 1, 0.523 4, 0.089 4。本研究所计算出的 CR 为 0.054 2,明显小于 0.100 0,因此,所建立的优先矩阵满足一致性要求。

指标综合评分计算方法为:

$$V = 0.261\ 1 \times \frac{a}{H_a} + 0.126\ 1 \times \frac{b}{H_b} + 0.523\ 4 \times \frac{c}{H_c} + 0.089\ 4 \times \frac{d}{H_d}, \quad (3)$$

式中:

V——综合评分;

a——总酚含量,mg/100 g;

b——总黄酮含量,mg/100 g;

c——V<sub>C</sub>含量,mg/100 g;

d——复水率;

H<sub>a</sub>——最高总酚含量,mg/100 g;

H<sub>b</sub>——最高总黄酮含量,mg/100 g;

H<sub>c</sub>——最高 V<sub>C</sub>含量,mg/100 g;

H<sub>d</sub>——最大复水率,mg/100 g。

#### 1.4 数据处理

采用 ORIGIN 8.5 软件进行数据处理及分析,采用

MATLAB R2014a 软件进行神经网络计算,采用 AHP 10.5 软件进行层次分析法计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 梨片超声强化热风干燥过程

如图 2 所示,在同一温度条件下,超声功率增大会导致梨片的干燥时间显著缩短。以热风温度为 45 °C 为例,未采用超声强化(0 W)的单一热风干燥所需干燥时间为 1 440 min,当采用功率为 24,48 W 的超声进行强化时,所需干燥时间分别缩短至 1 080,600 min,减少幅度分别为 25% 和 58.3%。可见,在梨片热风干燥中应用直触式超声,可以实现明显的干燥强化效果,且超声功率越大,强化效果越明显。在直触式超声强化热风干燥过程中,超声辐射板产生的

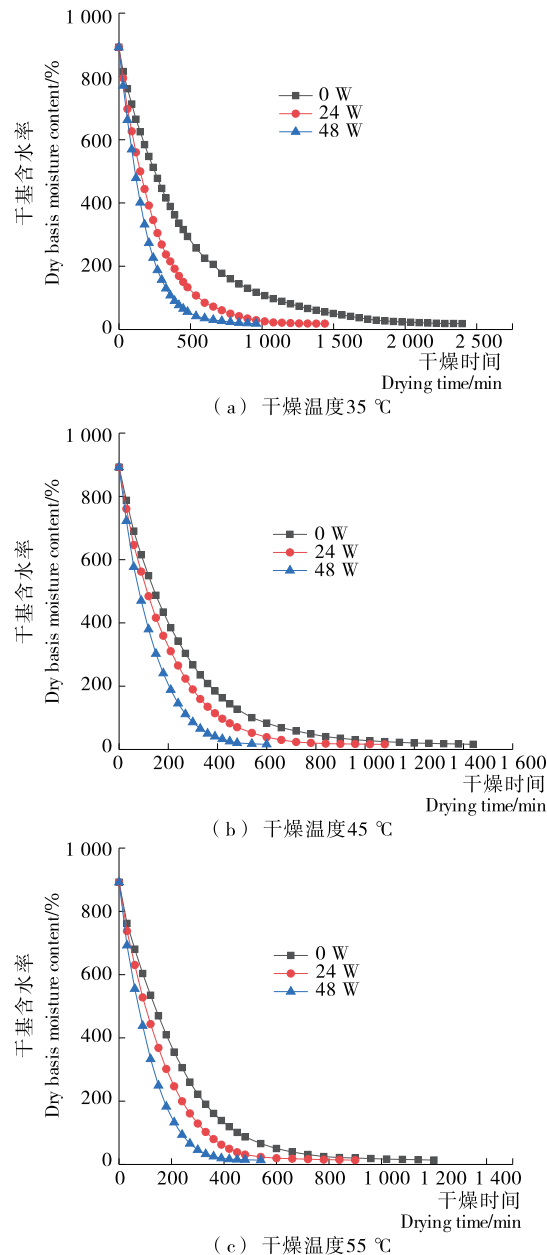


图 2 不同温度及超声功率下热风干燥梨片的干燥曲线  
Figure 2 Drying curves of hot air dried pear slices under different temperatures and ultrasonic powers

超声波可直接传入物料并作用于物料内部,超声产生的空化效应可在梨片内部组织液体中快速产生大量微泡,这些微泡随即爆破的瞬间能产生强大的动能和压缩能<sup>[9]</sup>,从而提高内部水分的湍动并提高水分子能量;超声的机械效应可使梨片组织结构发生高频、反复扩张和收缩<sup>[7]</sup>,进而提高水分流动性及减弱与管壁结合紧密的水分的吸附力<sup>[19]</sup>。超声产生的高频振动及微泡冲击还能够增大梨片内部细胞间隙和扩张毛细微管<sup>[20]</sup>,有利于强化传质通道及促进内部水分向外迁移。随着超声功率增大,超声在物料内部产生的机械效应和空化效应也越强,对梨片水分流动性及向外迁移通道的影响越明显,越有利于传质速率的提高及干燥时间的缩短。

由图 2 可以看出,温度对梨片干燥曲线的影响,在同样的超声功率条件下,温度提高会缩短干燥时间。以超声功率 24 W 时为例,干燥温度为 55 ℃ 时所需干燥时间为 900 min,与 35 ℃ 时所需干燥时间 1 440 min 相比缩短了 37.5%。这是由于提高干燥温度有利于增加分子内能和加快分子运动,有利于促进物料表面的热空气对流及增加对物料内部的热量传递,加速了表面水分子的扩散以及内部水分子的迁移,导致传质速率有所提高<sup>[21]</sup>;同时温度不断升高时,物料表面与内部温度差随之增大,致使梨片与干燥介质之间的蒸汽压差增大,梨片水分外迁速率也随之提高。

### 2.2 基于 BP 神经网络的干燥过程模拟

梨在不同热风温度、超声功率、干燥时间下,对应的含水率共 257 组数据,从中随机选取 230 组进行网络训练,剩余的 27 组数据用于网络测试。在进行神经网络拟合之前,对数据进行归一化处理,将有量纲的表达式转化为无量纲的表达式,使其在  $[-1, 1]$ 。使用 Matlab 神经网络工具箱的 newff 函数,按照上述的网络结构和数据建立模型。将 230 组数据训练完成后,得到如图 3 所示的训练误差曲线,经过 281 次训练停止,均方误差值小于 0.000 5。

建立模型后,将余下的 27 组数据进行测试,预测含水率与实测含水率的网络输出回归直线如图 4 所示 ( $y = 0.993 2x + 7.001 3$ ),决定系数  $R^2$  为 0.995 8,说明梨超声联合热风干燥过程中含水率变化的 BP 神经网络模型预测值与实测值拟合较好,BP 神经网络能够实现良好的干燥过程性能预测。

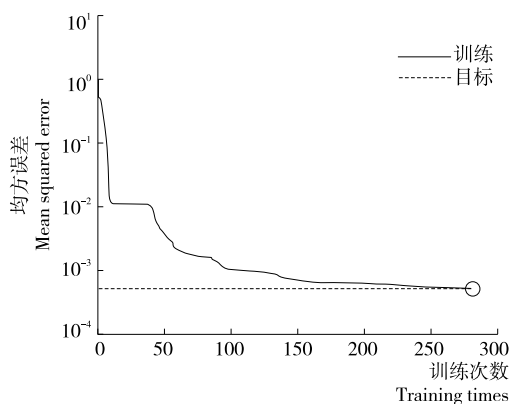


图 3 训练误差曲线

Figure 3 Training error curve

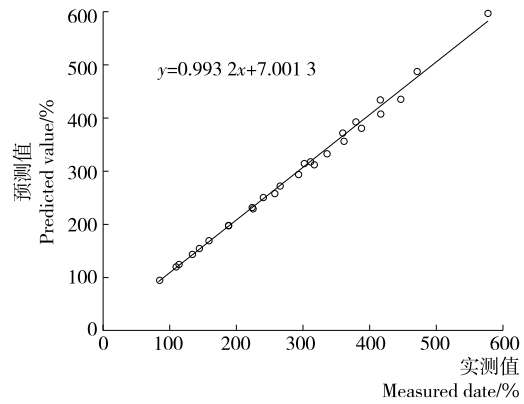


图 4 网络输出回归直线

Figure 4 Network output regression line

### 2.3 干燥条件对梨片品质的影响

不同干燥温度及超声功率条件下,梨片总酚含量、总黄酮含量、V<sub>C</sub> 含量及复水率的结果见表 4。由表 4 可知,超声功率及热风温度对梨片品质均有显著影响 ( $P < 0.05$ )。在同一超声功率下,随着热风温度的升高,梨片的总酚、总黄酮含量也随之上升,但当温度继续升高时,总酚、总黄酮含量却有所下降,即整体呈现先上升后下降的趋势。酚类物质及黄酮类物质均为热敏性和氧敏性的生物活性物质,在温度较低时,温度升高会导致干燥时间的缩短,梨片与氧气接触时间就越短,会减少酚类物质及黄酮类物质被氧化的时间,最终有利于总酚、总黄酮含量的上升。但温度过高会导致酚类物质及黄酮类物质的降解速率增大,从而不利于总酚与总黄酮物质的保留<sup>[22-23]</sup>。在温度较低时,增大超声功率有利于提高总酚和总黄酮含量。例如,在温度为 35, 45 ℃ 时,单纯热风干燥梨片的总酚含量分别为 307.49, 344.27 mg/100 g, 当超声功率为 24 W 时,总酚含量分别增加了 4.67%, 14.62%; 超声功率提高至 48 W 时,总酚含量分别增加了 32.97%, 35.66%。当温度为 35 ℃, 超声功率为 0, 24, 48 W 时,梨片的总黄酮含量分别为 130.46, 144.21, 157.94 mg/100 g, 超声功率为 24, 48 W 时总黄酮含量比超声功率为 0 W 时分别提高了 10.54%, 21.06%, 这是由于提高超声功率会强化其产生的空化效应和机械效应,减小梨片内部水分外迁通道阻力并缩短干燥时间,进而缩短了酚类物质及黄酮类物质的氧化降解反应时间。但在干燥温度为 55 ℃ 时,随着超声功率的提高,总酚、总黄酮含量呈下降趋势,这是由于在温度较高时,物料细胞组织敏感性增强,较高的超声功率容易造成梨片内部细胞组织的损伤,物料内部的活性成分容易在多酚氧化酶和过氧化物酶等催化酶的作用下发生较快的氧化反应,从而导致梨片中总酚和总黄酮物质快速降解<sup>[24]</sup>。此外,超声功率增大虽然会增大物料的传质通道,但同时也会增大物料内部的细胞间隙,从而加快了酚类物质及黄酮类物质从细胞中的析出速率,这将大幅增加与氧气的接触几率及降解反应速率,从而导致梨片中总酚、总黄酮含量降低。综上所述,在较低温度下,施加超声功率对提高干燥梨片的总酚、总黄酮含量具有积极作用,且超声功率越高其保护作用越强;但在较高温度下,超声功率升高则不利于梨片总酚、总黄酮物

质的保留。Altemimi 等<sup>[25]</sup>通过桃和南瓜的超声强化热风干燥研究,发现在低温下施加超声对总酚物质的保留率要好于在高温下施加超声的。Tiho 等<sup>[26]</sup>研究干燥温度对成熟水果中总酚及总黄酮等抗氧化物质含量影响,表明在 60 °C 时的黄酮保留率要低于 40 °C 的,也证明在较低温度干燥下更有利于黄酮类物质的保留率。

在温度相同的情况下,随着超声功率的升高,梨片  $V_c$  含量随之增加。以温度 35 °C 为例,超声功率为 0 W 时,梨片的  $V_c$  含量为 30.21 mg/100 g,而采用功率为 24.48 W 的超声强化后,对应的  $V_c$  含量比超声功率为 0 W 时分别提高了

15.19%,40.22%。这是由于超声功率大,干燥时间短, $V_c$  与氧气接触时间短,且随着干燥时间的缩短,超声功率大的水溶性  $V_c$  随着水分向外迁移量要少于超声功率小的。在超声功率相同的情况下,梨片  $V_c$  含量均随温度的升高而减少。以 24 W 为例,干燥温度 45,55 °C 时梨片  $V_c$  含量比干燥温度为 35 °C 时的(34.80 mg/100 g)分别减少了 18.45%,24.51%。 $V_c$  含有多个不饱和键及活性基团,具有较高的热敏性,在较高的干燥温度下,极易导致  $V_c$  降解速率的加快,从而造成  $V_c$  损失率的提高。Kaya 等<sup>[27]</sup>在猕猴桃干燥研究中,发现提高干燥温度导致猕猴桃中  $V_c$  损失率不断增加。

表 4 不同干燥温度及超声功率对梨片影响总酚、总黄酮、 $V_c$  含量及复水率的影响<sup>†</sup>

Table 4 Effects of hot air temperature and ultrasound power on total phenol, total flavonoids,  $V_c$  and rehydration ratio

温度/°C	功率/W	总酚含量/ ( $10^{-2}$ mg · g <sup>-1</sup> )	总黄酮含量/ ( $10^{-2}$ mg · g <sup>-1</sup> )	$V_c$ / ( $10^{-2}$ mg · g <sup>-1</sup> )	复水率
35	0	307.49±7.62 <sup>cC</sup>	130.46±7.39 <sup>cC</sup>	30.21±1.08 <sup>cA</sup>	2.73±0.08 <sup>cA</sup>
45	0	344.27±9.47 <sup>cB</sup>	208.32±5.93 <sup>aA</sup>	24.75±0.69 <sup>cB</sup>	2.66±0.06 <sup>cB</sup>
55	0	411.41±9.32 <sup>aA</sup>	162.20±5.99 <sup>bB</sup>	22.37±0.81 <sup>cC</sup>	2.57±0.06 <sup>cC</sup>
35	24	321.84±8.65 <sup>bC</sup>	144.21±8.52 <sup>bC</sup>	34.80±0.86 <sup>bA</sup>	2.85±0.09 <sup>bA</sup>
45	24	394.62±10.37 <sup>bA</sup>	211.42±7.39 <sup>aA</sup>	28.38±1.06 <sup>bB</sup>	2.87±0.08 <sup>bA</sup>
55	24	367.47±8.53 <sup>bB</sup>	180.32±6.57 <sup>aB</sup>	26.27±0.64 <sup>bC</sup>	2.76±0.06 <sup>bB</sup>
35	48	408.88±11.69 <sup>aB</sup>	157.94±4.96 <sup>aB</sup>	42.36±0.86 <sup>aA</sup>	3.32±0.06 <sup>aA</sup>
45	48	467.02±11.93 <sup>aA</sup>	193.84±5.63 <sup>bA</sup>	34.32±1.02 <sup>aB</sup>	3.15±0.08 <sup>aB</sup>
55	48	286.94±7.51 <sup>cC</sup>	148.16±6.55 <sup>cC</sup>	30.32±0.82 <sup>aC</sup>	2.99±0.07 <sup>aC</sup>

† 不同小写字母代表不同功率下含量的差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母代表不同温度下含量的差异显著( $P<0.05$ )。

在温度相同的情况下,提高超声功率会增大干制梨片的复水率。以 45 °C 为例,超声功率为 0,24,48 W 时的梨片复水率分别为 2.66,2.87,3.15,超声功率为 24,48 W 时梨片复水率比超声功率为 0 W 时分别增加了 7.89%,18.42%。随着超声功率的不断增大,梨片内部组织间隙也随之增大,同时超声波所产生的微孔道增多,致使物料内部结构更加疏松,进而导致梨片复水率的增大。由表 4 可知,随着热风温度不断升高,梨片的复水率呈下降趋势,这是由于温度升高会提高物料内部与物料表面形成的蒸汽压差,使梨片表面产生硬化现象<sup>[28]</sup>,同时细胞组织及毛细管的收缩严重,从而不利于梨片的复水。

#### 2.4 AHP 干燥参数优化

不同热风温度和超声功率下的梨片干燥 AHP 综合评分结果见表 5。由表 5 可知,最优综合评分对应的干燥温度和超声功率分别为 35 °C 和 48 W,其干制梨片的总酚、总黄酮、 $V_c$  含量分别为 408.88,157.94,42.36 mg/100 g,复水率为 3.32。次优组合为 45 °C 和 48 W,且施加超声功率试验组的综合评分皆较高,说明在梨片热风干燥过程中辅以超声强化,能在有效缩短干燥时间的同时,实现保护营养成分、提高产品品质的目的。

### 3 结论

进行了直触式超声强化热风干燥梨片的试验研究。结果

表 5 超声强化热风干燥梨片的 AHP 综合评分表

Table 5 AHP comprehensive evaluation table for ultrasound enhanced hot air drying of pear slices

干燥温度/°C	超声功率/W	综合评分
35	0	0.721
45	0	0.694
55	0	0.673
35	24	0.773
45	24	0.775
55	24	0.712
35	48	0.936
45	48	0.886
55	48	0.704

表明,热风温度和超声功率对梨片干燥特性均有显著影响,温度越高,超声功率越大,越有利于水分的脱除,则干燥时间越短。通过 BP 神经网络对干燥过程中含水率变化进行训练和预测,所建立的数学模型能够实现较高的预测精度。品质特性研究表明,超声功率与热风温度对梨片总酚、总黄酮、 $V_c$  含量及复水率均有显著影响。研究发现:低温下施加超声有利于总酚和总黄酮物质的保留,而高温下施加超声则会降低总酚和总黄酮含量;提高超声功率有利于提高  $V_c$  含量,而提高干燥温度则会降低  $V_c$  含量;超声功率越大,则梨片的

复水率越高,而温度升高则不利于产品的复水。上述研究结果表明,直触式超声对热风干燥进程有明显的强化效应,在较低温度下施加超声更有利于保护热风干燥产品品质。超声强化热风干燥梨片的 AHP 干燥参数优化为热风温度 35 ℃、超声功率 48 W,对应的梨片总酚含量、总黄酮含量、V<sub>c</sub>含量分别为 408.88,157.94,42.36 mg/100 g,复水率为 3.32。

本试验通过直触式超声强化热风干燥梨片的干燥特性及品质特性研究,证实直触式超声可有效改善常规热风干燥的时间长和品质低等状况,研究结果可为直触式超声强化热风干燥技术的理论研究及应用提供参考。不过,本试验也发现在低温下,直触式超声对干燥过程能够表现更好的强化效果,因此,在不同温度下尤其是在低温下,直触式超声对干燥过程中水分迁徙以及传质孔道的影响机理需要进行更深入的研究。

### 参考文献

- [1] 蒋小雅,郑炯.不同干燥方式对梨干质构特性和微观结构的影响[J].食品与发酵工业,2016,42(3):137-141.
- [2] 刘云宏,孙悦,王乐颜,等.超声波强化热风干燥梨片的干燥特性[J].食品科学,2015,36(9):1-6.
- [3] 李丽梅,李雪梅,关军锋,等.北方23个梨品种鲜榨梨汁的理化特性分析和感官评价[J].食品与机械,2013,29(2):44-48.
- [4] DUARTE Y, CHAUX A, LOPEZ N, et al. Effects of blanching and hot air drying conditions on the physicochemical and technological properties of yellow passion fruit (*passiflora edulis* var. *flavicarpa*) by products [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(3): 212-220.
- [5] 刘云宏,吴建业,刘建国,等.超声渗透脱水-热风干燥梨的研究[J].食品科学,2014,35(3):23-28.
- [6] 罗登林,徐宝成,刘建国.超声波联合热风干燥香菇片试验研究[J].农业机械学报,2013,44(11):185-189,179.
- [7] 孙悦,刘云宏,于慧春,等.基于Weibull分布函数的超声强化热风干燥紫薯的干燥特性及过程模拟[J].食品科学,2017,38(7):129-135.
- [8] KEK S P, CHIN N L, YUSOF Y A. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices[J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2013, 91(4): 495-506.
- [9] ORTUÑO C, PÉREZ-MUNUERA I, PUIG A, et al. Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying[J]. *Physics Procedia*, 2010, 3(1): 153-159.
- [10] LIU Yun-hong, SUN Yue, YIN Yong, et al. Hot air drying of purple-fleshed sweet potato with contact ultrasound assistance. *Drying Technology*, 2016, 35(5): 564-576.
- [11] COHEN J S, YANG T C S. Progress in food dehydration[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1995, 6: 20-25.
- [12] SEREMET C L, BOTEZ E, NISTOR O V, et al. Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices[J]. *Food Chemistry*, 2016, 195: 104-109.
- [13] KIM D O, JEONG S W, LEE C Y. Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums[J]. *Food Chemistry*, 2003, 81(3): 321-326.
- [14] SUN Li-jun, ZHANG Jian-bao, LU Xiao-yun, et al. Evaluation to the antioxidant activity of total flavonoids extract from per-simmon (*Diospyros kaki* L.) leaves[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2011, 49(10): 2 689-2 696.
- [15] 左丽丽,安婷,戴美娇,等.基于模糊数学评价法优化软枣猕猴桃果汁工艺[J].食品研究与开发,2018,39(2):127-131.
- [16] 吴锦铸,胡卓炎,何松,等.干制工艺对胡萝卜复水性的影响[J].食品科学,1998,19(12):23-27.
- [17] 林喜娜,王相友,丁莹.双孢蘑菇远红外干燥神经网络预测模型建立[J].农业机械学报,2010,41(5):110-114.
- [18] GENG Zhi-qiang, ZHAO Shan-shan, TAO Guang-can, et al. Early warning modeling and analysis based on analytic hierarchy process integrated extreme learning machine (AHP-ELM): Application to food safety[J]. *Food Control*, 2017, 78(78): 33-42.
- [19] DENG Yun, ZHAO Yan-yun. Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(9): 1 575-1 585.
- [20] 和大奎,朱文学,于斌,等.地黄浸膏超声真空干燥特性和动力学研究[J].江苏农业科学,2017,45(13):157-164.
- [21] THUWAPANICHAYANAN R, PRACHAYAWARAKORN S, SOPONRONNARIT S. Heat and moisture transport behaviour and quality of chopped garlic undergoing different drying methods[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 136(6): 34-41.
- [22] OGRODOWSKA D, TANSKA M, BRANDT W, et al. The influence of drying process conditions on the physical properties, bioactive compounds and stability of encapsulated pumpkin seed oil[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(10): 1 265-1 280.
- [23] SHI Xiao-fei, CHU Jian-zhou, ZHANG Yan-fen, et al. Nutritional and active ingredients of medicinal chrysanthemum flower heads affected by different drying methods[J]. *Industrial Crops & Products*, 2017, 104: 45-51.
- [24] SANTACATLINA J V, CONTRERAS M, SIMAL S, et al. Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 28: 100-109.
- [25] ALTEMIMI A, WATSON D G, CHOUDHARY R, et al. Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from peaches and pumpkins[J]. *Plos One*, 2016, 11(2): 1-20.
- [26] TIHO T, YAO J C N, BROU C Y, et al. Drying temperature effect on total phenols and flavonoids content, and antioxidant activity of borassus aethiopicum mart ripe fruits' pulp [J]. *Journal of Food Research*, 2017, 6(2): 50-64.
- [27] KAYA A, AYDIN O, KOLAYL S. Effect of different drying conditions on the vitamin C (ascorbic acid) content of Hayward kiwifruits (*Actinidia deliciosa* Planch)[J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2010, 88(2): 165-173.
- [28] 陆学中,刘亚男,张德榜,等.高湿预处理对怀山药热风干燥特性及复水性的影响[J].食品与机械,2017,33(11):147-151.