

# 苹果微波干燥的变温控制方法研究

李静<sup>1</sup>, 宋飞虎<sup>1</sup>, 浦宏杰<sup>1</sup>, 李臻锋<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏省食品先进制造装备重点实验室, 江苏无锡 214122)

(2. 宁波魁联机电科技有限公司, 浙江宁波 315000)

**摘要:** 在苹果脱水处理中, 微波干燥可以有效缩短干燥时间, 提高干燥品质。试验采用 6 种设定温度下的恒温微波干燥方案、3 种变温微波干燥方案, 研究苹果在不同方案下的干燥特性及品质。试验结果表明: “恒温”干燥方案中, 干燥速率在干燥中期缓慢降低, 会造成制品的品质较低。“干燥速率控制”方案中, 干燥速率在干燥中期控制为恒速, 但在干燥初期控制存在缺陷; “线性温度控制”方案中, 干燥速率在干燥中期基本保持恒速, 并且干燥耗时、耗能合理, 感官质量、色泽品质等均优于恒温干燥; “三段温度控制”方案中, 简化了“线性温度控制”方案所用设备的复杂程度, 虽制品品质指标略有下降, 但设备简化, 更利于工业应用。该研究为微波干燥技术应用于苹果的干燥理论提供了技术依据。

**关键词:** 微波干燥; 干燥速率; 变温; 苹果

文章编号: 1673-9078(2015)7-218-224

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.7.034

## Microwave Drying of Apples Based on Stage-changed High-temperature Treatment

LI Jing<sup>1</sup>, SONG Fei-hu<sup>1</sup>, PU Hong-jie<sup>1</sup>, LI Zhen-feng<sup>1,2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China) (2.Ningbo Queland Mechatronics Technology Co. Ltd., Ningbo 315000, China)

**Abstract:** Microwave drying can shorten the drying time and improve the product quality of dehydrated apples. The drying characteristics of apple were investigated using six fixed-temperature and three stage-changed temperature microwave-drying strategies. The results showed that the drying rate with the fixed-temperature strategy slowly decreased in the middle stage, leading to reduction in the quality of dehydrated apple. The controlled drying-rate strategy showed a constant drying rate in the middle stage, but a defective initial stage. The drying rate for the linear-temperature strategy was nearly constant; drying time and energy consumption were acceptable, while sensory and color quality improved. To simplify the linear-temperature strategy, a three-step temperature strategy was used. The quality of the products decreased slightly, but the equipment used was greatly simplified so as to be more conducive for industrial applications. These results indicate a potential application of microwave drying techniques for apple processing.

**Key words:** microwave drying; drying rate; stage-changed temperature; apple

微波干燥技术由于其效率高、能耗低等优点, 目前广泛地应用于食品工业领域<sup>[1]</sup>。微波干燥过程中, 磁控管发出的电磁波直接作用于物料的离子及偶极分子, 引起其振动及相互间摩擦产生热量, 从而迅速提高对象的温度。若磁控管停止工作, 对象内的离子及偶极分子的各种动作随之立刻停止, 其温度下降的速度明显快于其它由外而内的加热干燥方式<sup>[2]</sup>。因此, 通过自动调节微波功率可以快速、有效地控制微波干燥过程中对象的温度。

收稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(21206051); 江苏省产学研联合创新资金(BY20130155-22)

作者简介: 李静(1972-), 女, 讲师, 研究方向: 无损检测与过程装备

干燥过程中如果参数设置不当, 物料在快速脱水过程中容易造成内部组织结构破坏、风味损失及表面焦糊<sup>[3]</sup>, 从而影响制品品质。为了解决上述问题, 长期以来大量研究人员进行了相应的工作。Kowalski<sup>[4-6]</sup>等以樱桃、甜菜根、胡萝卜为试材采用改变热风温度等方式对热风干燥过程变温对品质的影响进行了研究, 并确定通过合理控制参数, 变温干燥比恒温干燥更能提高产品品质。Clary<sup>[7]</sup>等在微波真空干燥中加入温度测量以控制微波功率, 降低温度超限对制品的影响, 改进葡萄干燥品质。Chua<sup>[8]</sup>等利用双级热泵对香蕉片进行变温干燥, 有效减少耗时及改进色泽品质。Chong<sup>[9]</sup>等应用间歇式热泵干燥机, 对榴莲蜜进行变温间歇干燥, 确定优化干燥条件。王庆惠<sup>[10]</sup>等采用分段

式内循环热风干燥技术对圣女果进行干燥特性研究,得到了较为理想的试验结果。王华红<sup>[11]</sup>等研究了苦瓜切片在恒温与变温热风干燥方式的干燥特性,认为变温干燥可以保留比恒温干燥更好的色泽。

国内外大量变温研究集中在热风干燥中,鲜有在微波干燥过程中对干燥速率控制研究报道。试验以苹果为原料,进行6种设定温度下的恒温干燥,分析干燥结果,提出变温干燥方案,控制不同干燥阶段干燥速率,以提高干燥品质。同时,改进变温干燥方案,保障干燥品质基础上简化设备,为工业化应用提供技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验系统

本研究设计了在线检测质量的微波干燥系统,如图1所示。系统包括在线质量检测单元、微波干燥单元、温度和功率控制单元与数据采集单元。在线质量检测单元含电子秤(P-2002, Denver Instrument, Denver, CO, USA)用于样品在线质量检测。微波干燥单元含有微波炉(Beaumarck 02314, Matsushita Electric Ind. Co. Ltd., Yamatokoriyama, Japan),聚四氟乙烯托盘用于装载苹果样品。温度和功率控制单元包括测量温度的光纤传感器(Nortech Fibronic Inc., Quebec, Canada), 220 VAC 功率控制电路。数据采集单元包含模拟量输入输出模块 PCI 6014 (National Instruments, TX, USA)。

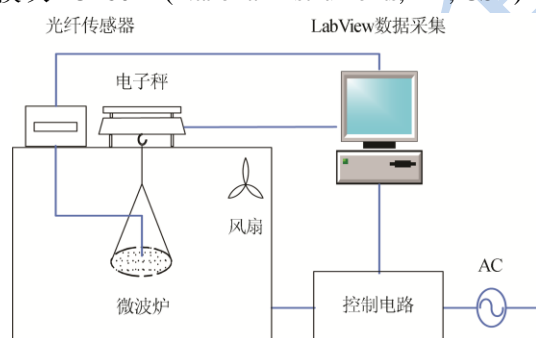


图1 微波干燥系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the microwave drying system

### 1.2 试验材料

红富士苹果样品采购自当地市场,分割成 $10 \times 10 \times 10$  mm的立方体;  $80^\circ\text{C}$ 水浴中浸泡1 min以防止酶促反应。每个立方体样品初始时约为40 g,最终脱水至含水率为10%(w.b.)。在实验中,每个工况下均选用三个平行样进行重复性实验。

### 1.3 数学计算方法

样品微波干燥过程中的干燥曲线采用水分比(moisture ratio, MR)随干燥时间的变化曲线。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中:  $M_0$ 为样品的初始干基含水率, g/g;  $M_e$ 为样品的干燥到平衡时的干基含水率, g/g;  $M_t$ 为样品t时刻干基含水率, g/g。

干燥速率(drying rate, DR)的计算公式如下:

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中: DR为样品的干燥速率, g/h;  $M_{t2}$ 、 $M_{t1}$ 为样品 $t_2$ 、 $t_1$ 时的干基含水率, g/g。

### 1.4 试验方法

#### 1.4.1 恒温干燥

样品分别在 $30^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $50^\circ\text{C}$ 、 $60^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$ 、 $80^\circ\text{C}$ 下恒温干燥。通过电子秤在线采集样品质量,同时,实时记录样品中心温度和微波功率。

#### 1.4.2 干燥速率控制干燥

样品在设定干燥速率曲线下进行干燥。通过电子秤在线采集样品质量,实时计算水分比,同时,实时记录样品温度和微波功率。通过水分比设定值和实测值偏差确定调节温度值,实现水分比控制。同时,为了避免设定调节温度过低造成干燥效率降低及过高造成物料焦糊,设定温度调节范围为 $25^\circ\text{C} \sim 75^\circ\text{C}$ 。

#### 1.4.3 线性温度控制干燥

样品在设定干燥温度曲线下进行干燥。根据“干燥速率控制”方案实测温度曲线,进行干燥温度的分析与优化,设定干燥温度曲线控制方案。干燥过程前120 min设定温度曲线由 $25^\circ\text{C}$ 线性上升到 $50^\circ\text{C}$ ,然后保持 $50^\circ\text{C}$ 直到干燥结束。干燥过程中的样品质量、实测温度及功率在线采集。

#### 1.4.4 三段温度控制干燥

样品在设定的简化干燥温度曲线下进行干燥。为了简化系统,将“线性温度控制”方案中的设定温度进一步简化为3段式控温方案。干燥过程中,前60 min保持 $30^\circ\text{C}$ ,然后在 $40^\circ\text{C}$ 干燥60 min,最后在 $50^\circ\text{C}$ 干燥到结束。干燥过程中的样品质量、实测温度及功率在线采集。

干燥方案参数设定见表1。每组试验重复3次。

表 1 干燥方案参数设定

Table 1 Parameters used for various drying methods

方案	参数设定			干燥时间
	控制参数	阶段	参数设定值	
恒温干燥	温度		30 °C	0~结束
			40 °C	0~结束
			50 °C	0~结束
			60 °C	0~结束
			70 °C	0~结束
			80 °C	0~结束
干燥速率控制	干燥速率	I	$m = m_0 - 0.227\tau \text{ g}$	0~120min
		II	50 °C	120 min 到结束
线性温度控制	温度	I	$t = 0.2083\tau + 25 \text{ °C}$	0~120 min
		II	50 °C	120 min 到结束
三段温度控制	温度	I	30 °C	0~60 min
		II	40 °C	60~120 min
		III	50 °C	120 min 到结束

### 1.5 试验指标

#### 1.5.1 颜色测定

干燥后的苹果粒的颜色采用比色计(CR-300X, Minolta Camera Co. Ltd., Japan), 对 5 mm 直径的表面进行测量, 用于评价产品的颜色质量。L\*坐标的范围从 0(黑)到 100(白), a\*坐标表示的是红-绿色, b\*坐标表示的是黄-蓝色。测量三次并取平均值。苹果表面干燥后的褐变程度可以换算成白变(Whiteness Index, WI)指数, 低 WI 褐变程度高。

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (3)$$

#### 1.5.2 维生素 C 的测定

采用 2,6-二氯酚滴定法。

#### 1.5.3 感官质量评价

表 2 苹果感官质量评价表

指标	状态	加权值
风味	具有浓郁苹果香味	4
	具有较浓苹果香味	3
	具有较淡苹果香味	2
	无苹果香味, 有焦糊味	1
外观	淡黄色, 表面无烧伤	3
	黄色, 有轻微烧伤	2
	黄褐色, 严重烧伤	1
一致性	一致	3
	较一致	2
	不一致	1

对于干燥产品复水: 在 500 mL 烧杯里加入 150 mL 沸水后持续加热煮沸 5 min; 然后添加干燥产品 5 g 后再煮沸 5 min; 样品沥干后, 再用滤纸吸干表面多余的水分。取 5 g 复水后的样品置于透明容器中。试验结束后将复水制品由具有一定品尝经验的 9 人组成评价小组评价, 取平均分。复水制品的感官评价采用 10 分制, 用加权法对制品的风味、外观、一致性 3 个指标进行综合评定, 具体方法表 2。

## 2 结果及讨论

### 2.1 干燥曲线

#### 2.1.1 恒温干燥

微波干燥过程中, 水分在可以分为 3 种形态: 结合水、半结合水和自由水。干燥过程中, 自由水首先被去除, 干燥温度越高, 自由水汽化速度越快, 对应的干燥速率越大<sup>[12]</sup>。在干燥初期和中期, 物料内部自由水分含量大, 微波加热导致样品内自由水汽化, 快速溢出的同时会造成细胞肿胀, 导致细胞壁破裂, 从而形成孔道。干燥温度越高, 细胞壁破裂越严重, 形成孔道较大。孔道大有利于水分散发, 从而提高干燥速率; 但物料中的风味物质也会脱离严重, 并且高速散发的水分会加速带走一部分风味物质。同时, 细胞壁的破裂严重会引起样品微观结构塌陷, 造成组织萎缩, 从而使孔道消失, 反而不利于水分散发, 并容易发生物料糊化<sup>[13]</sup>。

不同温度下恒温干燥曲线如图 2 所示。图 2b 为干燥速率随水分比的变化曲线, 由图可知, 恒温干燥

的干燥过程可分为三个阶段：以 80 °C 干燥速率曲线为例，干燥初期 AB 为物料预热阶段，干燥速率上升至峰值，水分汽化溢出达到极值；干燥中期 BC 为物料主要失水阶段，干燥速率由峰值缓慢下降，从物料内部扩散至表面的水分不断减少；干燥后期 CD 为半结合水溢出阶段，干燥速率快速下降。恒温干燥的预热上升阶段很短，特别在干燥温度较低时几乎可以忽略。干燥温度越高，干燥速率越高，速度下降梯度越大。

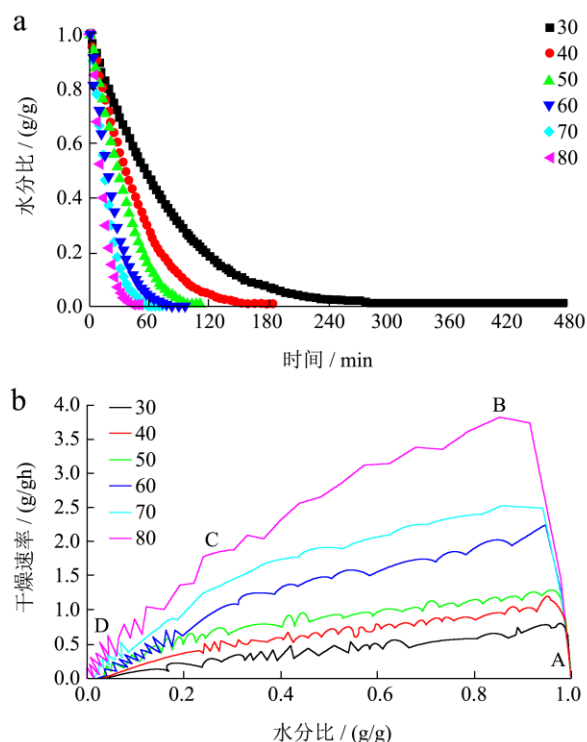


图 2 恒温干燥方案的干燥曲线

Fig.2 Drying curves obtained with fixed temperature strategy

注：a：水分比随时间的变化；b：干燥速率随水分比的变化。

### 2.1.2 干燥速率控制方案

利用具有在线质量测量与温度控制的微波干燥系统，将干燥中期的干燥速率控制为恒速。干燥中期开始阶段将干燥速率适当降低，避免自由水快速汽化，减小由此造成孔道过大带来的风味损失，同时避免由于细胞壁破裂严重造成的组织塌陷；干燥中期后期阶段，在孔道稳定形成后将干燥速率适当提高，可有效减少耗时，提高干燥效率。“干燥速率控制”方案参数设置如表 1 所示。

“干燥速率控制”方案下实测干燥速率随水分比的变化如图 3a 所示。干燥初期 AB 阶段，干燥速率出现剧烈波动，迅速加速又迅速回落。分析原因，主要由于物料初始含水率与设定值有差异，导致干燥开始时瞬时微波功率波动大，干燥速率不稳定。干燥中期

BC 阶段，干燥速率随水分比基本保持恒速，在 0.41 g/gh 左右，意味水分从物料内部转移到表面的速率基本等于表面扩散到空气中的速率，避免了恒温干燥中干燥速率随时间降速的趋势，达到设计目的。干燥后期 CD 阶段，设计为恒温 50 °C 干燥阶段，在孔道已经稳定的情况下，保持较高干燥温度，干燥速率曲线为快速降速阶段，有效减小耗时。

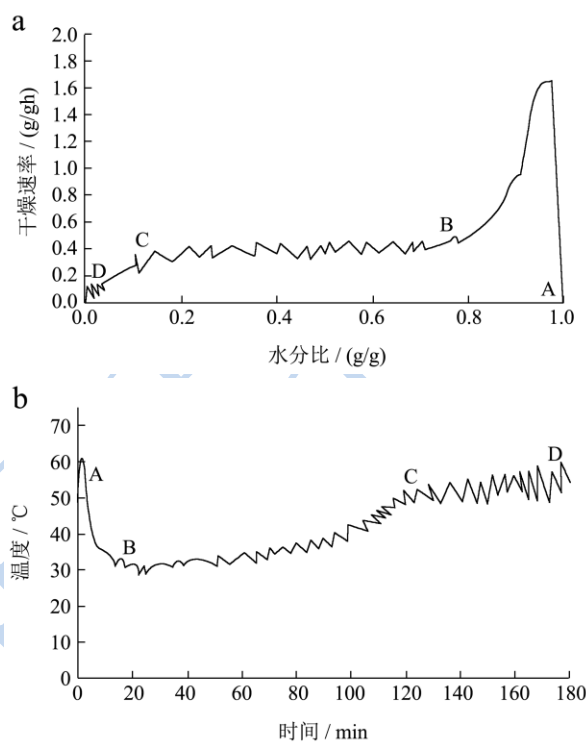


图 3 干燥速率控制方案的干燥曲线

Fig.3 Drying curves obtained with controlled drying rate

注：a：干燥速率随水分比的变化；b：温度曲线。

图 3b 为“干燥速率控制”方案下实测的温度变化曲线。干燥初期 AB 阶段，由于参数设定导致微波功率波动大，物料温度也在 10 min 内由室温迅速升至 62.3 °C 随即下降至 30 °C 左右，有待改进。在干燥中期阶段 BC 阶段，基于干燥速率恒速控制策略，温度由 30 °C 缓慢上升至 50 °C。

“干燥速率控制”方案中，在干燥开始阶段对干燥速率的控制是不成功的，功率的瞬间波动造成温度的剧烈波动，但在 10 min 后，控制系统不受初始状态的影响可以将干燥速率控制得很好，并保持到干燥结束。

### 2.1.3 线性温度控制方案

“干燥速率控制”方案可以在大部分干燥时间内有效控制干燥速率，但在干燥初始阶段控制不稳定；并且整个干燥系统需要准确称重，计算水分比，并实时计算温度设定值，整个系统较为复杂。

为了简化系统，本研究提供了一种“线性温度控

制”方案。对“干燥速率控制”方案中实测温度曲线进行平滑、优化，通过变温控制实现对干燥过程控制。参数设定见表1。该控制方案中不需要在线检测质量，工业应用中可以有效地简化设备。

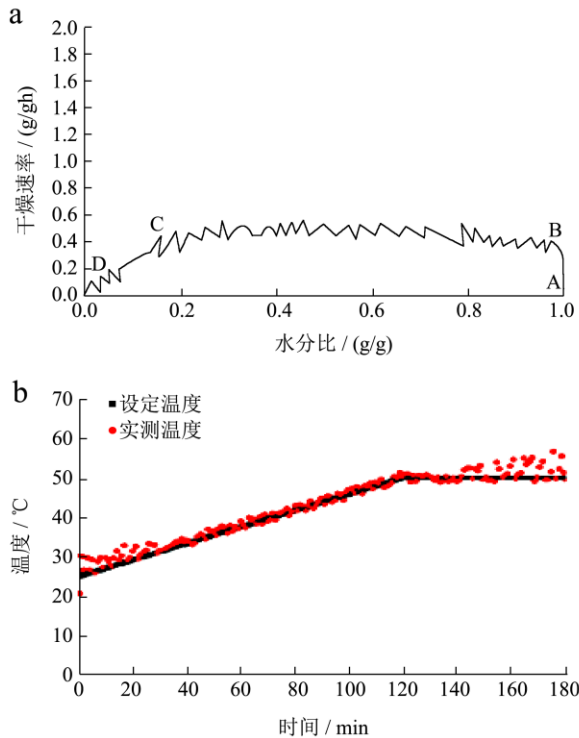


图4 线性温度控制方案的干燥曲线

Fig4 Drying curves obtained with linear temperature control

注：a：干燥速率随水分比的变化；b：温度曲线。

图4为“线性温度控制”方案下的干燥曲线。由图4a可知，“线性温度控制”下干燥初期预热AB阶段很短，有效避免了“干燥速率控制”方案中干燥初期的剧烈波动。干燥中期BC阶段，干燥速率基本保持恒速，平均为0.42 g/gh，与“干燥速率控制”方案的平均干燥速率基本一致，实现了对干燥速率的控制目的。干燥后期CD与“干燥速率控制”方案相同。

图4b为“线性温度控制”方案的温度设定值与实测值，由图可知，实测温度接近设定值。

### 2.1.4 三段温度控制方案

“线性温度控制”方案中的变温控制有效保证干燥速率恒速，但干燥过程中设定温度线性变化会造成控制系统复杂，磁控管负荷的波动较大，影响设备的可靠性和使用寿命，不利于工业应用。为了进一步简化控制体系，以适应实际生产要求，简化“线性温度控制”为三段恒温温度控制，“三段温度控制”方案参数设定见表1。

“三段温度控制”方案的干燥速率曲线如图5a所示。干燥初期AB未出现剧烈波动。干燥中期BC阶段，实际由两段降速干燥过程组成，平均干燥速率

接近0.42 g/gh，基本保持恒速。实测温度如图5b所示，两个跳跃点I、II对应于两次温度设定变化，实测温度接近设定值。

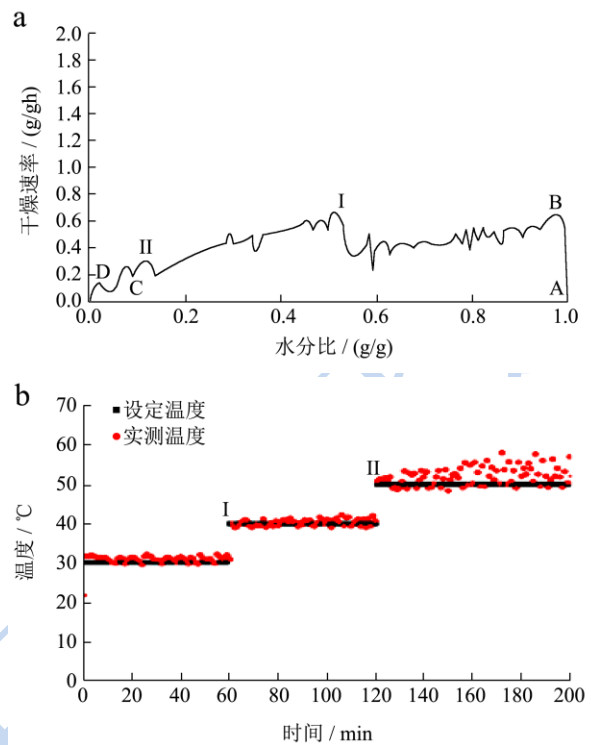


图5 三段温度控制方案的干燥曲线

Fig5 Drying curves obtained with 3-step temperature control

注：a：干燥速率随水分比的变化；b：温度曲线。

## 2.2 干燥时间与干燥能力

本研究中六种恒温干燥方案和三种变温干燥方案的耗时与耗能见表3。

恒温干燥耗时与温度呈反比，温度越高，耗时越短。三种变温方式的耗时较为接近，接近40℃恒温干燥时间，较高温干燥耗时有所延长。

耗能与恒温干燥温度并不成呈线性比例。低温干燥的长耗时、高温干燥的高功率都会造成耗能增加。如表3所示，恒温干燥中，60℃能耗最低，干燥温度上升或下降都会造成耗能增加。“干燥速率控制”的能耗为三种变温干燥方式中最小的，为16.96 kJ/g，接近恒温干燥中耗能最小值，即60℃时的16.44 kJ/g。线性温度控制与三段温度控制的耗能依次为17.83 kJ/g、18.15 kJ/g，能耗略有增加。

## 2.3 品质评定

### 2.3.1 色泽表征

干燥产品的色泽是影响消费者接受与否的主要原因，干燥过程中发生焦糊现象时，通常会引起产品较深的色泽<sup>[4]</sup>和不可接受的风味，这种改变主要由于干燥

过程中发生 Maillard 反应造成色素降解与酶促褐变。如表 4 所示, 恒温干燥中, 40 °C WI 最高, 褐变程度最低, 色泽品质最好; 随着温度升高, 制品 WI 降低且较鲜样的颜色变化更为显著; 80 °C 时 WI 显著降低,

褐变程度最高, 色泽品质最差。变温控制的三种方案 WI 指标接近 50 °C 恒温干燥, 褐变程度低, 色泽品质好。

表 3 苹果气味控制的干燥时间、干燥能力、质量评价与维生素 C 含量

Table 3 Drying time, energy consumption, sensory evaluation, and vitamin C content of apple volatiles

干燥方式	耗时 /min	耗能/ (kJ/g)	质量 评价	维生素 C 含量 /( $\mu\text{g}/100\text{g}$ )	
恒温干燥	30°C 恒温	480	21.22	6.9	43.2 $\pm$ 1.23 <sup>b</sup>
	40°C 恒温	185	17.93	7.2	51.3 $\pm$ 0.89 <sup>bc</sup>
	50°C 恒温	110	17.52	7.5	55.6 $\pm$ 1.05 <sup>c</sup>
	60°C 恒温	90	16.44	6.8	52.4 $\pm$ 0.23 <sup>bc</sup>
	70°C 恒温	70	17.34	5.4	48.6 $\pm$ 0.91 <sup>bc</sup>
	80°C 恒温	50	17.92	4.4	35.6 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>
变温干燥	干燥速率控制	180	16.96	7.6	56.7 $\pm$ 1.09 <sup>c</sup>
	线性温度控制	180	17.83	7.9	57.6 $\pm$ 1.30 <sup>c</sup>
	三段温度控制	200	18.15	7.4	53.2 $\pm$ 0.96 <sup>c</sup>

注: 同一列不同字母表示有显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

表 4 苹果颜色比较表

Table 4 Comparison of apple color

干燥方式	$L^*$	$a^*$	$b^*$	WI	
鲜样	85.70 $\pm$ 0.89	-6.09 $\pm$ 0.26	23.2 $\pm$ 0.92	72.1 $\pm$ 0.56	
恒温干燥	30°C 恒温	65.06 $\pm$ 1.28 <sup>b</sup>	-3.67 $\pm$ 0.69 <sup>a</sup>	22.37 $\pm$ 1.25 <sup>a</sup>	58.4 $\pm$ 0.88 <sup>b</sup>
	40°C 恒温	69.50 $\pm$ 2.23 <sup>a</sup>	-3.42 $\pm$ 0.42 <sup>a</sup>	19.08 $\pm$ 1.56 <sup>b</sup>	63.9 $\pm$ 1.82 <sup>a</sup>
	50°C 恒温	63.94 $\pm$ 0.83 <sup>b</sup>	-2.19 $\pm$ 0.13 <sup>ab</sup>	15.42 $\pm$ 0.72 <sup>bc</sup>	60.7 $\pm$ 0.62 <sup>ab</sup>
	60°C 恒温	62.02 $\pm$ 1.46 <sup>bc</sup>	-0.88 $\pm$ 0.21 <sup>c</sup>	15.15 $\pm$ 0.28 <sup>bc</sup>	59.1 $\pm$ 0.86 <sup>b</sup>
	70°C 恒温	58.73 $\pm$ 0.86 <sup>bc</sup>	-1.57 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	17.94 $\pm$ 0.54 <sup>b</sup>	55.0 $\pm$ 0.46 <sup>bc</sup>
	80°C 恒温	55.6 $\pm$ 1.62 <sup>c</sup>	-0.59 $\pm$ 0.09 <sup>f</sup>	16.29 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	52.7 $\pm$ 1.28 <sup>c</sup>
变温干燥	干燥速率控制	63.22 $\pm$ 2.19 <sup>b</sup>	-1.10 $\pm$ 0.12 <sup>bc</sup>	14.58 $\pm$ 1.29 <sup>bc</sup>	60.4 $\pm$ 1.56 <sup>b</sup>
	线性温度控制	62.83 $\pm$ 1.92 <sup>b</sup>	-0.18 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	10.98 $\pm$ 0.45 <sup>c</sup>	61.2 $\pm$ 1.38 <sup>ab</sup>
	三段温度控制	61.84 $\pm$ 2.01 <sup>bc</sup>	-3.21 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	18.16 $\pm$ 0.92 <sup>b</sup>	57.6 $\pm$ 1.72 <sup>b</sup>

注: 同一列不同字母表示有显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

### 2.3.2 维生素 C 含量

表 3 所示为恒温干燥与变温干燥制品的维生素 C 含量。恒温干燥中, 30 °C 耗时长、80 °C 温度过高都会导致维生素 C 的破坏与流失, 中间温度 50 °C 的维生素 C 保存率是最高的, 与 Ahmet Kaya 的研究结果一致。变温控制的三种方案中维生素 C 的保存率均较好, 其中, “线性温度控制” 方案的维生素 C 的含量在所有干燥方式中是最高的。

### 2.3.3 感官评定

表 3 中评定小组给出的复水后产品的评价结果表明: 80 °C 时干燥样品的感官品质最差, 不被接受的最主要原因是样品带有明显焦糊味; 50 °C 时干燥样品的感官评定在恒温干燥方案下最高, 风味保持最好。三

种变温干燥方案样品中感官评价优于或接近 50 °C 恒温干燥, 其中, “线性温度控制” 下的制品品质在所有干燥方式中是最高的, 这与 “线性温度控制” 对干燥速率的控制最优是一致的。“三段温度控制” 的感官评定较 “线性温度控制” 有所降低, 但也接近 50 °C 恒温干燥, 较其他恒温干燥高, 在工业应用中可行。

## 3 结论

传统的微波干燥注重干燥效率的同时往往无法兼顾干燥质量, 本文基于对恒温干燥过程的研究, 提出优化的变温干燥过程控制方案。优化的原则为在干燥过程中的中期保持干燥速率恒速, 避免水分快速溢出造成的孔道过大及组织塌陷, 做到保留更多风味成

分、避免物料焦糊,同时兼顾能耗和耗时。以苹果为对象进行实验研究,结果表明:通过本文设计的“线性变温控制”干燥过程,在保证干燥效率的基础上,物料在干燥过程的各阶段受到的破坏程度均较小,各项品质评价指标均为或接近各方案中最优。简化后提出的“三段温度控制”方案,保障制品品质的同时有效减少磁控管负荷的波动,更适用于工业应用。

### 参考文献

- [1] Chien Hwa Chong, Adam Figiel, Chung Lim Law, et al. Combined Drying of Apple Cubes by Using of Heat Pump, Vacuum-Microwave, and Intermittent Techniques [J]. Food Bioprocess Technol., 2014, 7(4): 975-989
- [2] H Feng, J Tang, O A Plumb. Heat and Mass Transport in Microwave Drying of Porous Materials in a Spouted Bed [J]. AIChE Journal, 2001, 47 (7): 1499-1512
- [3] Varitha J, Dijkanarukkulb P, Acharyaviriyab A. Combined microwave-hot air drying of peeled longan [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2): 459-468
- [4] S J Kowalski, J Szadzińska. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2014, 82: 65-70
- [5] S J Kowalski, J Szadzińska. Kinetics and Quality Aspects of Beetroots Dried in Non-Stationary Conditions [J]. Drying Technology: An International Journal, 2014, 32(11): 1310-1318
- [6] Stefan J Kowalski, Justyna Szadzińska, Joanna Łechtańska. Non-stationary drying of carrot: Effect on product quality [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(4): 393-399
- [7] Clary C.D, Mejia-Meza E, Wang S, Petrucci V E. Improving grape quality using microwave vacuum drying associated with temperature control [J]. Journal of Food Science, 2007, 72(1) 23-28
- [8] K J Chua, A S Mujumdar, M N A Hawlader, et al. Convective Drying of Agricultural Products. Effect of Continuous and Stepwise Change in Drying air Temperature [J]. Drying Technology, 2001, 19(8): 1949-4960
- [9] Chien Hwa Chonga, Chung Lim Lawa, Michael Clokea. Drying kinetics and product quality of dried Chempedak [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(4): 337-344
- [10] 王庆惠,李忠新,杨劲松,等.圣女果分段式变温变湿热风干燥特性[J].农业工程学报,2014,30(3):271-276  
WANG Qing-hui, LIZhong-xin, YANG Jin-song, et al. Dried characteristics of cherry tomatoes using temperature and humidity by stages changed hot-air drying method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (3):271-276
- [11] 王华红,赵士杰,张博.苦瓜切片热风干燥试验研究[J].农机化研究,2013,7:179-182  
WANG Hua-hong, ZHAO Shi-jie, ZHANG Bo. Experimental Study on Hot Air Drying of Balsam Pear Slice [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,7:179-182
- [12] 张绪坤,祝树森,黄俭花,等.用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J].农业工程学报,2012,22 (28): 282-287  
ZHANG Xu-kun, ZHU Shu-sen, HUANG Jian-hua, et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 22 (28):282-287
- [13] Roknul, Azam S M, Zhang Min, et al. A Comparative Study of Four Drying Methods on Drying Time and Quality Characteristics of Stem Lettuce Slices (*Lactuca sativa* L.) [J]. Drying Technology, 2014, 32 (6): 657-666
- [14] Feng H, Tang J, Cavalieri RP. Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature [J]. Transactions of the ASABE, 2002, 45(1): 129-135