

微波干燥温度分布对胡萝卜干燥特性与品质的影响

付文杰^{1,2}, 李静¹, 裴永胜¹, 宁文楷^{1,2}, 李臻峰^{1*}

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

² 江苏新太机电科技有限公司 江苏无锡 214100)

摘要 为提升胡萝卜的干燥品质,减少局部过热和过分干燥问题,采用多物理场仿真与微波干燥试验,研究胡萝卜微波干燥中旋转运动与不同微波缓苏时间对温度分布、干燥特性、品质(色差、复水比、VC 含量、感官评价)的影响。结果表明:水分比的模拟值与试验值的 RMSE<5%,模型有效模拟了胡萝卜微波干燥热质传递的过程。旋转样品的温度均匀度指标 λ 较不旋转减至 0.092,干制品品质及其均匀性显著提高,其中色差值标准差减到 0.18。R1/4(旋转条件下加热 20 s 缓苏 60 s)条件下胡萝卜样品温度分布区间为 65~75 °C,色差、VC 含量均为最优。采用旋转与 1/4 的缓苏时间的干燥条件较优。本研究成果为胡萝卜微波干燥应用提供理论参考依据。

关键词 胡萝卜;微波干燥;模拟;温度分布;品质

文章编号 1009-7848(2023)05-0151-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.05.016

胡萝卜富含维生素 C 和膳食纤维等生物活性化合物^[1],被公认为具有抗癌活性的天然抗氧化剂的重要来源。新鲜胡萝卜在储存运输中易腐烂,而干燥加工能够抑制微生物的繁殖,易于运输,因此成为研究较多的食品储藏加工方法之一。微波干燥是一种利用微波辐射能对物料介质进行整体加热的方式,具有加热速度快、效率高、低能耗等优点,在农产品干燥中被广泛的利用^[2]。然而,微波加热极易产生加热不均匀的现象,会导致局部过热与局部过分干燥,甚至造成焦糊,从而影响干燥品质。

研究人员利用多物理场仿真探索干燥过程中的各种现象。如:Pham 等^[3]开发了微波干燥模型框架与三维模型,结果表明微波腔内的电场分布不均匀,其通过物料的运动^[4],如旋转、平移等,从空间上改变物料上电场分布,使物料温度分布趋于均匀。Chen 等^[5-6]建立了离散旋转的微波加热三维有限元模型,研究土豆泥在旋转转盘微波炉的温度分布;Shen 等^[7]对糙米的热质传递进行数值模拟,实现了移动物料连续微波干燥仿真。微波缓苏可进一步改善温度的均匀性,并使干燥温度、干

燥速率处于合适的范围,更有利于干制品品质的保留,减少劣变。陈燕等^[8]研究发现微波缓苏时间对荔枝裂壳率的影响最为显著;李天聪^[9]发现微波缓苏可降低内外温度差,缓解内外压力差,将温度维持在试验所需的恒定温度范围。以上模型虽然考虑了物料运动对微波加热过程的影响,但是模拟的旋转是不连续的,且未对后续的干制品品质指标进行分析。

本研究利用多物理场仿真模型对干燥过程的热质传递进行分析,结合品质指标,探究旋转与微波缓苏时间对胡萝卜干燥过程中温度分布及其均匀性、干燥速率及其均匀性以及干制品品质的影响,为明确胡萝卜微波干燥过程中的热质传递提供重要工具。

1 材料与方法

1.1 材料、仪器和设备

试验材料为新鲜胡萝卜采自当地超市,颜色鲜艳、无损伤。主要检测仪器设备有:HH-2 型数显恒温水浴锅,上海力辰邦西仪器科技有限公司;UV-1800 紫外分光光度计,日本岛津公司;3nh 精密色差仪,深圳三恩时科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 胡萝卜微波干燥模拟 胡萝卜微波干燥模拟中涉及到的符号及其命名如表 1 所示。

收稿日期:2022-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51508229);江苏省普通高校自然科学基金项目(KYCX19_1862)

第一作者:付文杰,女,硕士生

通信作者:李臻峰 E-mail:197045770@qq.com

表1 胡萝卜微波干燥模拟符号命名表

Table 1 Nomenclature of microwave drying simulation of carrot

符号	含义	符号	含义
μ_r	电磁磁导率	ρ	真密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
E	电场强度/ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$	C_p	比热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
k_0	自由空间中的波数	T	瞬时温度/ $^{\circ}\text{C}$
ϵ_r	相对介电常数	t	时间/s
σ	电导率/ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	k	导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
ω	角频率/ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	c	瞬时水分浓度/ $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
ϵ_0	真空介电常数/ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	D_{eff}	水分有效扩散系数/ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
μ_0	真空磁导率	DO	指前因子
ϵ'	介电常数	E_{adf}	水分扩散的活化能/ $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$
ϵ''	介电损耗因子	h_m	传质系数/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Q	物料吸收的微波能/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$	c_{eq}	平衡水分浓度/ $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
f	微波频率	w	湿基含水率/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
n	单位法向量	M	干基含水率/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
E_s	电场源	t	时间/s

1.2.1.1 控制方程 模型中将胡萝卜视为均匀介质,所建模型考虑了热量与质量的传递。微波能量转换而来的微波体积热 Q ,如式(3)所示;端口定义为理想电导体,边界条件如式(4)所示;微波炉墙壁和波导均为铜质,定义为来自材料的阻抗边界条件,如式(5)所示^[10]。

传热方程由能量守恒定律与固体材料的傅里叶传热定律共同建立,如式(6)、(7)、(8)所示^[11]。

物料所有边界均为传热界面,其边界条件如式(9)所示^[7]。水分传递的控制方程如式(10)所示^[3]。本模型中,水分扩散系数由类阿伦尼乌斯方程计算,如式(11)所示^[12]。胡萝卜的水分由内部向表面扩散并蒸发,定义其边界条件如式(12)所示^[13]。

综上,胡萝卜微波干燥多物理仿真模型的参数,如表3所示。

表2 胡萝卜微波干燥模拟控制方程

Table 2 Control equation of microwave drying simulation of carrot

	控制方程	公式序号
微波热源	$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0$	(1)
	$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$	(2)
	$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2$	(3)
磁场边界条件	$n \times E = 0$	(4)
	$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r - j\sigma/\omega}} n \times H + E - (n \cdot E)n = (n \cdot E_s)n - E_s$	(5)
传热方程	$\rho C_p = \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$	(6)
	$k = \frac{0.148 + 0.641M}{1 + M}$	(7)
	$C_p = 1.755 + 2.345w$	(8)
传热边界条件	$n \cdot (-k) \nabla T = h_T (T_A - T) + \lambda n \cdot (D \nabla c)$	(9)
传质方程	$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_{\text{eff}} \nabla c) = 0$	(10)
	$D_{\text{eff}} = 2.779 \times 10^{-4} \exp \left(-0.97 - \frac{E_{\text{adf}}}{RT} + 0.059M \right)$	(11)
传质边界条件	$n \cdot (-D_{\text{eff}} \nabla c) = h_m (c_{\text{eq}} - c)$	(12)

表 3 胡萝卜微波干燥模拟的初始条件及材料参数

Table 3 Initial conditions and material parameters of microwave drying simulation of carrot

参数	数值及公式	参考文献
初始条件	初始环境温度 $T_0/^\circ\text{C}$	20
	压力 P_0/Pa	101 325
	初始水分浓度 $c_0/\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}$	45 500
	初始湿基含水率 $w_0/\%$	89
样品直径/mm		40
样品厚度/mm		5
微波频率/f/GHz		2.45 [14]
水的分子的质量 $M_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$		0.018 [7]
水的介电常数 ϵ'_{wa}	$0.2833T+80.67$	[14]
水的介电损耗 ϵ''_{wa}	$0.05T+20$	[14]
水的导热系数 $k_w/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$0.57+1.7\times 10^{-3}T$	[14]
水的密度 $\rho_w/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	998	[13]
活化能 $E_{\text{aw}}/\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$	29 850.17	[13]
胡萝卜的介电常数 ϵ'_{ca}	65	[15]
胡萝卜的介电损耗 ϵ''_{ca}	15	[15]
胡萝卜的真密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 490	[11]
胡萝卜的比热容 $C_p/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	3 640	[11]
传热系数 $h_f/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	25	[16]
传质系数 $h_m/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.018	[17]
通用气体常数 $R/\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	8.314	[13]

1.2.1.2 几何模型与网格划分 如图 1 所示,胡萝卜微波干燥几何模型及样品位置与编号。对建立的几何模型,将转盘及转盘上的胡萝卜样品定义为旋转域,如图 2 所示。微波炉腔体是不包含旋转域的部分,旋转域是相对于整个微波炉腔体做旋转运动。将微波炉腔体与旋转域分别设置为独立的装配体,互相配合完成的整个几何模型,保证了在划分网格时,微波炉腔体与旋转域的网络相互独立,没有相连的部分,避免了因旋转而导致的

网格畸变^[5]。

对于微波炉腔体与旋转域互相有接触的界面,即在相同位置处有两个边界,将其定义为一致边界对。对于一致边界对,将其边界定义为理想电导体,如式(5)所示,一致边界对保证了微波炉腔体与旋转域的连接性,解决了计算时微波能量不能穿透一致边界对而导致胡萝卜样品无温度升高的问题。

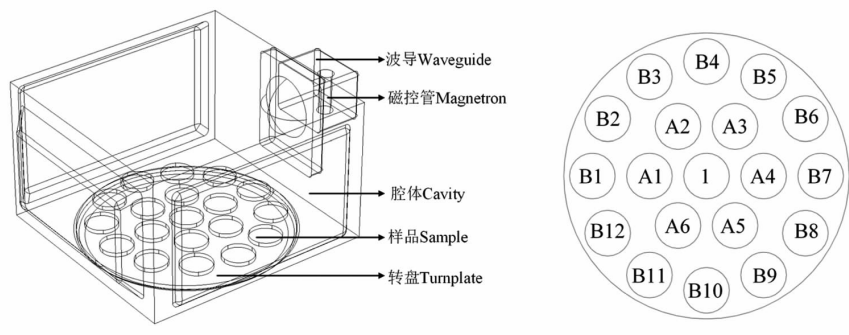


图 1 胡萝卜微波干燥几何模型

Fig.1 The geometric model of microwave drying carrot

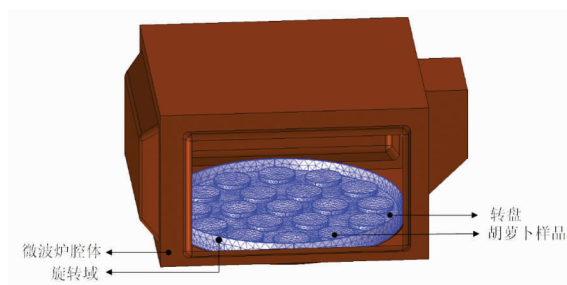


图2 旋转域

Fig.2 Rotation domain

1.2.2 胡萝卜微波干燥试验

1.2.2.1 微波干燥试验 新鲜胡萝卜切割成直径4 cm,厚度5 mm,质量为(6.67±0.2)g的薄片。采用烘干法(将样品置于105℃烘干至恒重)测得胡萝卜初始含水率(湿基)为(89.13±0.2)%,干燥至胡萝卜湿基含水率为10%时停止,重复3次取平均值。本研究中,利用红外热像仪获取样品表面的温度分布,将样品的所有红外图像导入FLIR工具软件中,得到表面上所有点的温度^[18]。

1.2.2.2 试验方案 按表4的方案进行试验。首先分析旋转对微波干燥的影响,在旋转的基础上,通过微波缓苏时间进一步减弱加热不均匀的现象。

1.2.3 试验指标

1) 含水率及水分比的测定 干基含水率^[19]计算公式:

$$M_t(\text{g/g}) = \frac{W_t - G}{G} \quad (13)$$

式中, M_t ——胡萝卜的干基含水率,g/g;
 W_t ——任意时刻的总质量,g; G ——干质量,g。

不同干燥时间的胡萝卜的水分比^[19]计算公

表4 试验设计方案
Table 4 Experimental design scheme

试验编号	干燥方式	缓苏方式
NR1/4	不旋转	加热 20 s, 缓苏 20 s
R1/2	旋转	加热 20 s, 缓苏 20 s
R1/3	旋转	加热 20 s, 缓苏 40 s
R1/4	旋转	加热 20 s, 缓苏 60 s
R1/5	旋转	加热 20 s, 缓苏 80 s

式:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (14)$$

式中, M_0 、 M_t ——分别为胡萝卜初始、 t 时刻的干基含水率,g/g。

2) 复水比的测定 将干燥的胡萝卜称重,放入80℃水浴锅中复水30 min,沥干表面水分后再次称重。复水比^[20]计算公式:

$$R_t = \frac{W_f}{W_0} \quad (15)$$

式中, W_0 ——干制品复水前的质量,g; W_f ——复水完全时沥干的质量,g。

3) 色差的测定 取5 g干燥后的样品,用精密色差仪检测直径5 mm的物料表面,重复5次,取平均值。用色差计每次测定时提供3个值: L^* 、 a^* 、 b^* 分别代表明度、红、绿系数,黄、蓝系数^[21]。

4) 感官评价 选取10位具有一定评价经验的评价人员,对各干燥后的样品进行评价^[22]。采用10分制,综合评定胡萝卜干制品的风味、形态、一致性和口感,具体评定方法见表5。

表5 胡萝卜感官质量评价表

Table 5 Carrot sensory quality evaluation table

指标	状态
风味	浓郁胡萝卜香味 8~10; 较淡胡萝卜香味 5~7; 无胡萝卜香味,有焦糊味 0~4
形态	表面平整 8~10; 表面起泡 5~7; 表面卷曲 0~4
整体一致性	一致 8~10; 较一致 5~7; 不一致 0~4
复水后口感	脆嫩香甜 8~10; 口感较软,味道较淡 5~7; 有焦糊味 0~4

5) VC含量的测定 采用紫外分光光度法测定VC含量^[23]。

6) 均匀性的测定 由于试验中很难测量每

一个胡萝卜样品温度分布与干燥程度,因此选择通过多物理场仿真模拟胡萝卜样品温度及干燥程度。运用公式(16)与(17)计算均匀性指标^[24]。

$$\sigma(^{\circ}\text{C}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i - \bar{\mu})^2}{n-1}} \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{\sigma^2 - \sigma_0^2}}{(\mu - \mu_0)} \quad (17)$$

式中, σ_0 ——样品温度初始标准差, $^{\circ}\text{C}$; σ ——样品温度最终标准差, $^{\circ}\text{C}$; μ_0 ——样品温度初始平均值, $^{\circ}\text{C}$; μ ——样品温度最终平均值, $^{\circ}\text{C}$; λ ——均匀度指数, λ 越小均匀度越大。

2 结果与讨论

2.1 旋转对胡萝卜微波干燥的影响

2.1.1 旋转对胡萝卜微波干燥特性的影响 如图 3a 所示, 胡萝卜样品上的电场分布最大值为 2 638 V/m, 最小值为 51.97 V/m, 不同位置上电场分布差别很大。如图 3b 所示, NR1/4 试验进行到 180 s 时, 样品 B12 温度为 55.37 $^{\circ}\text{C}$, 样品 B9 温度为 34.83 $^{\circ}\text{C}$, 不同位置上的胡萝卜样品温度差异很大, 这是由于电场分布与温度分布相似, 胡萝卜样品电场分布不均匀(如图 3a 所示), 电场分布高的胡萝卜样品吸收更多的微波能量, 样品温度升高更明显。

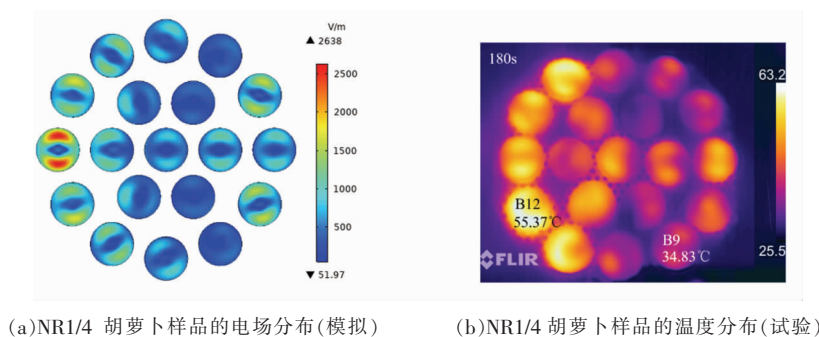


图 3 NR1/4 的 180 s 胡萝卜样品电场分布(模拟)与温度分布(试验)

Fig.3 Electric field distribution (simulation) and temperature distribution (experiment) of 180 s carrot samples with NR1/4

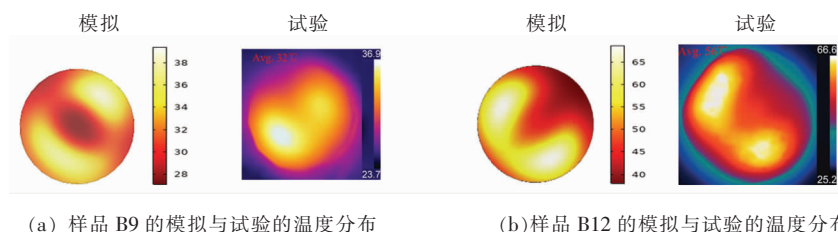


图 4 NR1/4 试验与模拟的胡萝卜样品 B9、B12 的温度分布(320 s)

Fig.4 Temperature distribution of B9 and B12 of carrot samples in NR1/4 experiment and simulation (320 s)

样品 B9 处于电场强度低的区域, 样品 B12 处于电场强度高的区域。如图 4 所示(以 320 s 为例)样品 B9、B12 模拟与试验的温度分布。模拟结果与试验结果在热点与冷点位置上基本相似, 两者的热点温度略高, 可能是由于试验中的微波炉在干燥过程中与外界存在气流交换, 在模型中未考虑这一因素。综上, 仿真模型很好地模拟了胡萝卜样品的电场分布差异、温度分布差异以及温度变化。

如图 5 所示, NR1/4 的温度均匀性指数 λ 最高值为 0.42, R1/4 的 λ 最高值为 0.092。整个干燥过程中 NR1/4 的温度均匀性指数始终高于 R1/4 的指数, R1/4 的温度分布更为均匀。

如图 6a 所示, 胡萝卜样品的平均干燥速率的模拟值和试验值具有良好的一致性 ($\text{RMSE}_{\text{NR1/4}} = 2.29\%$, $\text{RMSE}_{\text{R1/4}} = 3.95\%$)。NR1/4 的样品 B12、B9 的干燥时间分别为 70, 125 min, B9 的干燥时间相

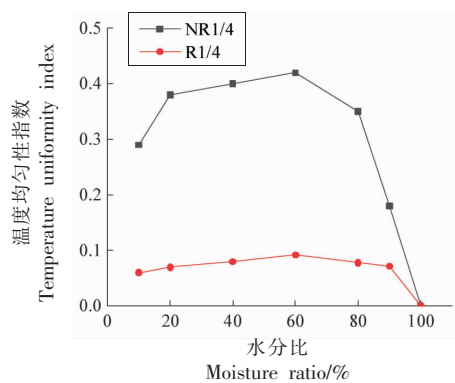


图5 NR1/4与R1/4的温度均匀性指数

Fig.5 Temperature uniformity index of NR1/4 and R1/4

对于B12延长了78.6%。如图6b所示,R1/4的样品B12、B9的干燥时间分别为75,78 min,B9的干燥时间相对于B12延长了4%。旋转运动可有效改善干燥速率的一致性,使整体样品的干燥时间

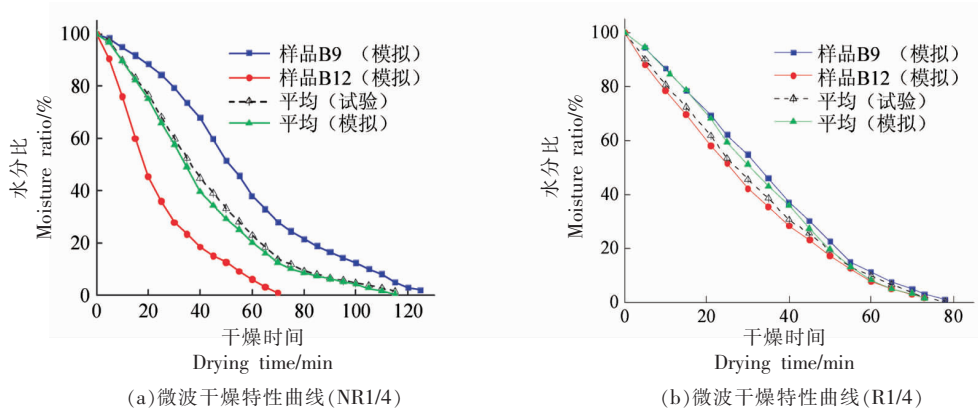


图6 胡萝卜微波干燥特性曲线

Fig.6 Microwave drying characteristic curve of carrot

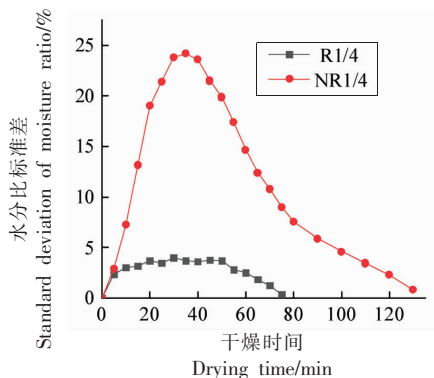


图7 微波干燥水分比的标准差(模拟)

Fig.7 Standard deviation of moisture ratio in microwave drying (simulation)

相近。如图7所示,干燥过程中,NR1/4与R1/4的19个胡萝卜样品微波干燥水分比的标准差。水分比MR在50%~60%区间标准差达到峰值,R1/4的胡萝卜样品水分比的标准差的最大值为4.12%,远低于NR1/4的标准差的最大值24.86%,整个干燥过程标准差呈现先升后降的趋势,旋转运动下胡萝卜样品的干燥更为均匀。这是由于加热时,微波腔内磁场分布是基本不变的。NR条件下B12、B9分别处于电场强度的高、低处(如图3a所示),并在整个干燥过程中保持不变,吸收的微波能量B12明显大于B9,B12的干燥失水驱动力更强,干燥速率更快,干燥时间更短。旋转运动时,B12、B9随着旋转运动,交替出现在电场强度的高、低处,吸收的微波能量趋同,温度变化趋同,干燥速率与干燥时间相近。因此,旋转对胡萝卜微波干燥均匀性的改善十分显著。

2.1.2 旋转对微波干燥品质均匀性的影响 如图8a所示,NR1/4的胡萝卜样品B12色差最大为31.65,而R1/4的样品B12为5.73,NR1/4的整体色差明显大于R1/4,NR1/4的色差标准差11.34明显大于R1/4的0.18(如表6所示),R1/4的色差更小且均匀性更好。如图8b所示,NR1/4的胡萝卜样品B6复水比最大为3.96 g/g;R1/4的样品平均复水比为4.31 g/g,NR1/4的复水比标准差0.46 g/g明显大于R1/4的0.04 g/g(如表6所示),R1/4的复水比更大且均匀性更好。这是由于NR1/4干燥进行到100 min后,水分比的标准差

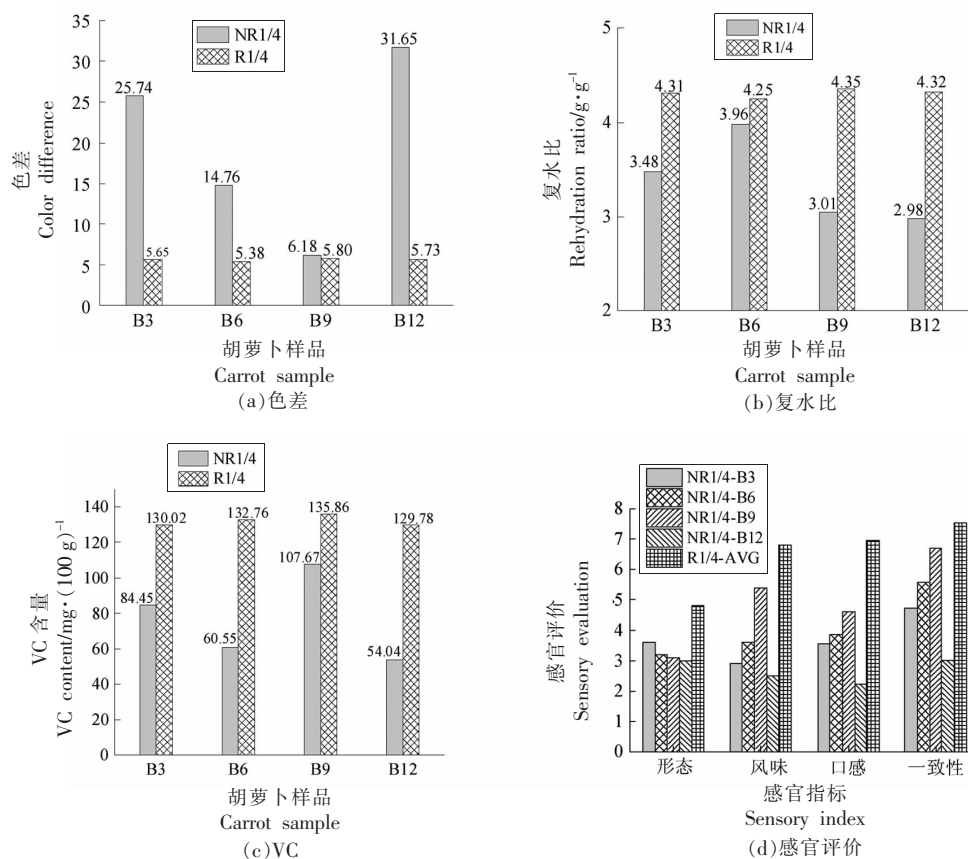


图 8 微波干燥胡萝卜样品的品质指标

Fig.8 Quality indexes of microwave dried carrot samples

表 6 干制品品质指标的标准差

Table 6 Standard deviation of dry product quality index

干燥方式	色差	复水比/g·g ⁻¹	VC 含量/ mg·(100 g) ⁻¹
NR1/4	11.34	0.46	24.45
R1/4	0.18	0.04	2.84

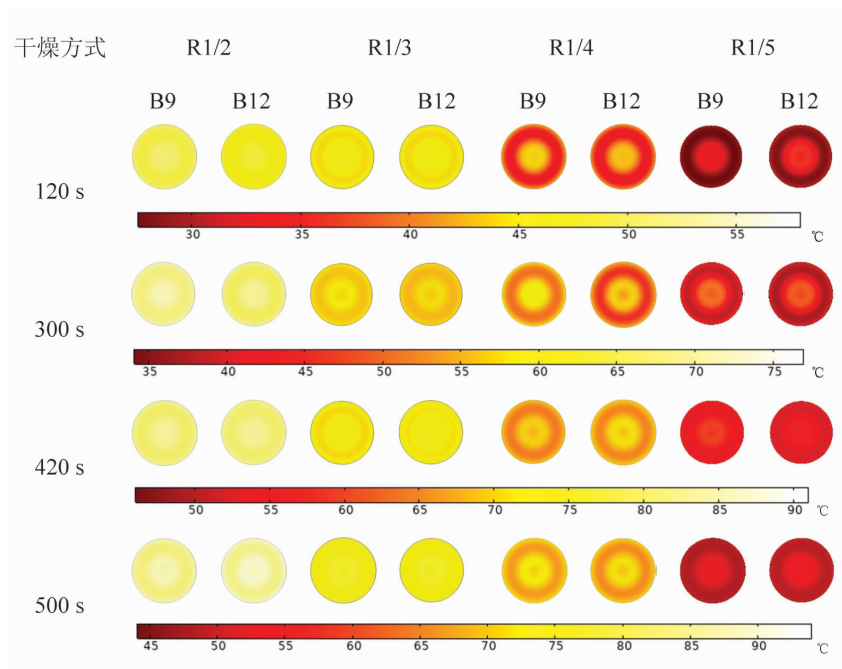
降到一个低水平(图 7),而在 100 min 前已干燥完成的样品(如样品 B12 等)继续干燥,诱发美拉德反应,导致色差变大,结构被破坏,复水比减小,样品的一致性较差。R1/4 的胡萝卜样品干燥速率相差不大,干燥结束时间相近,其色差复水比指标更好且更均匀。如图 8c 和 8d 所示,NR1/4 的胡萝卜样品的整体 VC 含量、感官评价都低于 R1/4。

结果表明,旋转条件下,不同位置胡萝卜样品的干燥特性趋于均匀,品质指标趋于均匀且得到明显的提升。

2.2 微波缓苏时间对胡萝卜微波干燥的影响

2.2.1 对微波干燥特性的影响 如图 9 所示,不同缓苏时间下胡萝卜样品的温度分布。120 s 时,R1/2 缓苏条件下样品的温度最高为 54 ℃,而 R1/5 条件下温度最低为 32 ℃。随着干燥的进行,温度升高并逐渐趋于稳定。500 s 时,R1/2 缓苏条件下样品温度 90 ℃,R1/5 条件下温度 51 ℃。随着缓苏时间的延长,样品温度降低。

如图 10 所示,胡萝卜样品水分比的模拟值和试验值具有良好的一致性 (RMSE_{R1/2}=3.32%, RMSE_{R1/3}=2.87%, RMSE_{R1/4}=3.95%, RMSE_{R1/5}=4.76%)。R1/2、R1/3、R1/4、R1/5 的胡萝卜微波干燥时间分别为 36、52、78、120 min,R1/2 相对于 R1/5 干燥时间缩短了 70%。干燥时间随缓苏时间的减少而缩短,这是由于缓苏时间的短,物料干燥温度高,水分在物料中的有效水分扩散系数增大,干燥速率变快,干燥时间缩短。这与张黎骅等^[25]的研究结论一致。



注:一行中的温度分布图的图例一致。

图9 不同微波缓苏时间胡萝卜样品的温度分布(模拟)

Fig.9 Temperature distribution of carrot samples with different microwave tempering time (simulation)

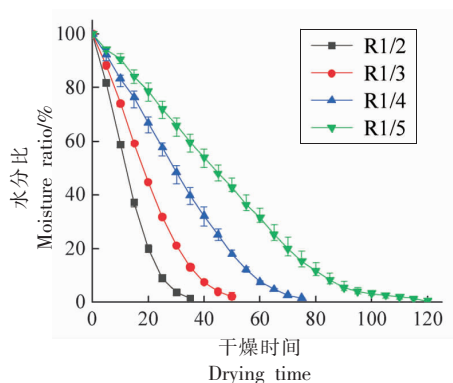


图10 不同微波缓苏时间干燥特性曲线

Fig.10 Drying characteristic curves of different microwave tempering time

2.2.2 对干燥品质的影响 如图 11a 所示, R1/4 的缓苏条件下胡萝卜干制品色差最小为 5.60 ± 0.25 , R1/2 条件下色差最大为 27.43 ± 0.52 , 这是由于 R1/2 的缓苏条件下胡萝卜温度过高(如图 9), 诱发美拉德反应, 出现焦糊现象, 色差变大。随着缓苏时间的延长, 焦糊现象消失。然而缓苏时间过长, 会使干燥时间过长, 导致胡萝卜褪色发白, 色差变大。如图 11c 所示, 不同缓苏条件下胡萝卜干

制品 VC 含量差异明显, R1/4 缓苏条件下的 VC 含量最高为 $(132.56 \pm 3.65) \text{mg}/100 \text{g}$, R1/2 条件下 VC 含量最低为 $(87.98 \pm 4.32) \text{mg}/100 \text{g}$ 。如图 11b 所示, 不同缓苏条件下胡萝卜干制品复水性并无明显差异。如图 11d 所示, R1/2 的胡萝卜干制品出现较明显的焦糊、皱缩、硬化, 且气味损失严重, 感官评价得分较低, R1/3、R1/4、R1/5 的干制品组织形态、色泽、香气及口感等方面表现好, 感官品质得分高且相差不大。

综上, R1/4 缓苏条件下胡萝卜干制品的色差、复水比, VC 含量和感官评价均较好, R1/4 缓苏条件是较合适的干燥条件。

3 结论

1) 模型模拟结果与试验结果基本相符, 胡萝卜样品的电场分布与温度分布规律一致。水分比的模拟值和试验值的 RMSE 均小于 5%, 模拟可以准确描述胡萝卜实际微波干燥过程中温度的分布和水分比的变化情况。

2) 旋转运动可显著提升干燥特性及其均匀性。旋转条件下温度分布均匀度指标 λ 较不旋转

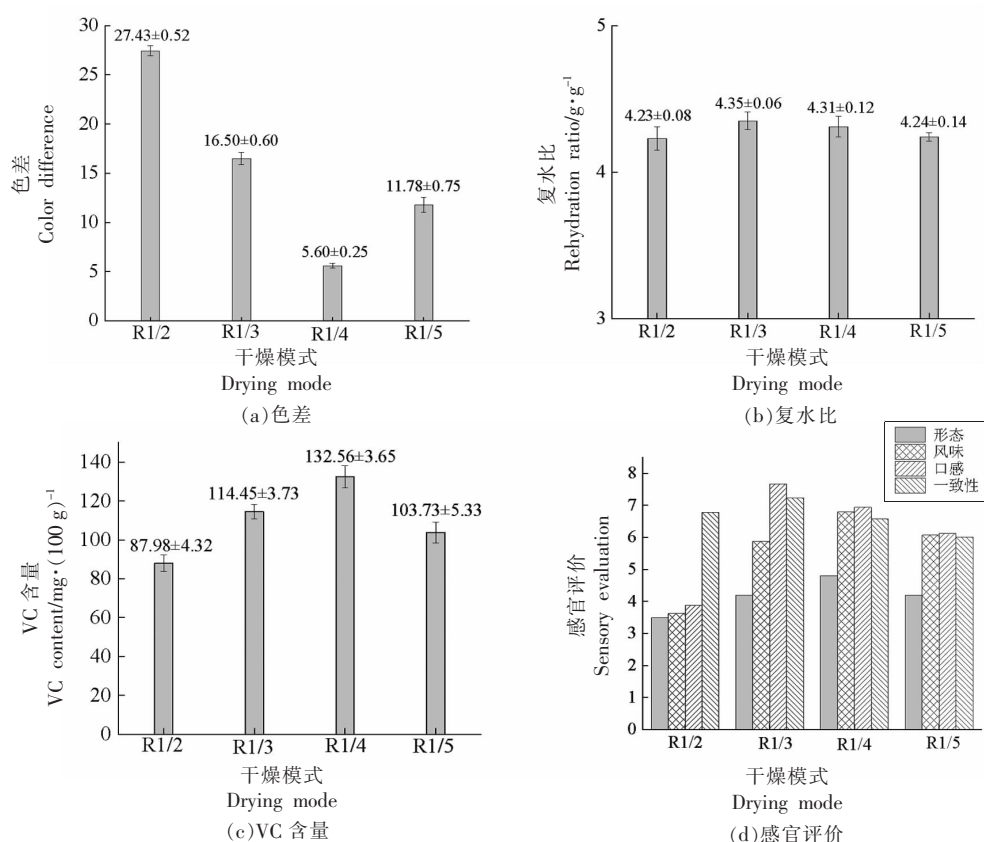


图 11 微波干燥胡萝卜样品的品质指标

Fig.11 Quality indexes of microwave dried carrot samples

减至 0.092。处于冷、热点样品的品质劣变减少,其中色差值减到 5.64,其标准差减到 0.18。缩短缓苏时间能显著提高干燥温度,维持合适的温度分布范围 65~75 ℃,更有利于干燥过程与干制品品质。

3) R1/4 的条件下干制品品质最优,色差 5.60;VC 含量 132.56 mg/100 g;复水比 4.31 g/g,感官评价最高。

参 考 文 献

- [1] SHARMA K D, KARKI S, THAKUR N S. Chemical composition, functional properties and processing of carrot—a review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 49(1): 22–32.
- [2] 杨洲, 段洁利. 微波干燥及其发展[J]. *粮油加工与食品机械*, 2000, 1(3): 5–6.
YANG Z, DUAN J L. Microwave drying and its development[J]. *Grain and Oil Processing and Food Machinery*, 2000, 1(3): 5–6.
- [3] PHAM N D, KHAN M, KARIM M A. A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying[J]. *Food Chemistry*, 2020, 325(6): 12–32.
- [4] 俞建峰, 赵江, 陈海英, 等. 胡萝卜片微波干燥均匀性研究[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(4): 656–660.
YU J F, ZHAO J, CHEN H Y, et al. Study on microwave drying uniformity of carrot slices[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(4): 656–660.
- [5] CHEN J, PITCHAI K, BIRLA S, et al. Modeling heat and mass transport during microwave heating of frozen food rotating on a turntable[J]. *Food and Bio-products Processing*, 2016, 34(2): 116–127.
- [6] CHEN J, PITCHAI K, BIRLA S, et al. Heat and mass transport during microwave heating of mashed potato in domestic oven—model development, validation, and sensitivity analysis[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 79(10): 1991–2004.

- [7] SHEN L, ZHU Y, LIU C, et al. Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 195(1): 64–88.
- [8] 陈燕, 陈羽白. 荔枝的微波干燥特性及其对品质的影响研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 3(4): 54–62.
CHEN Y, CHEN Y B. Experimental study on litchi microwave drying characteristics and its effect on the quality of litchi[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 3(4): 54–62.
- [9] 李天聪. 枸杞微波间歇干燥特性研究与试验[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
LI T C. Chinese wolfberry microwave intermittent drying characteristic research and test[D]. Yingchuan: Ningxia University, 2017.
- [10] MIKA B, ZW A, YG A, et al. Modelling of simultaneous heat and mass transfer considering the spatial distribution of air velocity during intermittent microwave convective drying[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 15(2): 153–168.
- [11] ARCHANA M, PUNAM TRIPATHY P. Modeling and simulation of moisture transfer during solar drying of carrot slices[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41(8): 56–76.
- [12] BIALOBRZEWSKI I, ZIELINSKA M, MUJUMDAR A S, et al. Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout–fluidized–bed drier[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(19): 4704–4716.
- [13] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot–air drying of sweet potato [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 65(8): 98–112.
- [14] ZHU H, GULATI T, DATTA A K, et al. Microwave drying of spheres: Coupled electromagnetics–multiphase transport modeling with experimentation. Part I: Model development and experimental methodology [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2015, 96(8): 314–325.
- [15] 杨庆浩. 微波食品介电特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
YANG Q H. Research on dielectric properties of the foods heated by microwave[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [16] MAHAPATRA A, TRIPATHY P P. Experimental investigation and numerical modeling of heat transfer during solar drying of carrot slices [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2019, 55(5): 1287–1300.
- [17] SINHAL K. Computer simulation of drying of food products with superheated steam in a rotary kiln[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2012, 4(1): 11–29.
- [18] KUMAR C, JOARDDER M, FARRELL T W, et al. Investigation of intermittent microwave convective drying (IMCD) of food materials by a coupled 3D electromagnetics and multiphase model [J]. *Drying Technology*, 2018, 7(5): 75–89.
- [19] JU H Y, HAMED M E, FANG X M, et al. Drying characteristics and modeling of yam slices under different relative humidity conditions[J]. *Drying Technology*, 2016, 12(8): 185–198.
- [20] 张德录, 钱勇. 对 GB5497–85 粮食油料测定水分方法的改进[J]. *黑龙江粮油科技*, 1998(1): 44–45, 50.
ZHANG D L, QIAN Y. Improvement of GB5497–85 method for determination of moisture in grain oils[J]. *Heilongjiang Grain and Oil Technology*, 1998(1): 44–45, 50.
- [21] LI Z F, RAGHAVAN G S V, WANG N. Carrot volatiles monitoring and control in microwave drying [J]. *LWT–Food Science and Technology*, 2010, 43(2): 291–297.
- [22] 秦学磊, 张国治, 聂波, 等. 不同干燥工艺对胡萝卜品质影响的研究[J]. *粮食加工*, 2017, 10(6): 54–60.
QIN X L, ZHANG G Z, NIE B, et al. Study on the effects of different drying methods on the quality of carrots[J]. *Grain Processing*, 2017, 10(6): 54–60.
- [23] 董书军, 刘涛, 李丽, 等. 果蔬 VC 紫外分光光度直接测定法的改进[J]. *食品科技*, 2013, 10(3): 276–279, 283.
DONG S J, LIU T, LI L, et al. Improvement of the direct determination method of VC in fruits and vegetables by ultraviolet spectrophotometry[J]. *Food Science and Technology*, 2013, 10(3): 276–279, 283.
- [24] WANG S, YUE J, TANG J, et al. Mathematical modelling of heating uniformity for in–shell walnuts

subjected to radio frequency treatments with intermittent stirrings[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 35(1): 97–107.

[25] 张黎骅, 刘波, 刘涛涛, 等. 银杏果微波间歇干燥

工艺的优化[J]. *食品科学*, 2014, 35(2): 7–13.

ZHANG L H, LIU B, LIU T T, et al. Optimization of intermittent microwave drying of ginkgo fruit[J]. *Food Science*, 2014, 35(2): 7–13.

Effect of Microwave Drying Temperature Distribution on Drying Characteristics and Quality of Carrot

Fu Wenjie^{1,2}, Li Jing¹, Pei Yongsheng¹, Ning Wenkai^{1,2}, Li Zhenfeng^{*}

(¹College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Key Laboratory of Advanced

Food Manufacturing Equipment Technology, Wuxi 214122, Jiangsu)

(²Jiangsu Xintaiye Electromechanical Technology Co. Ltd, Wuxi 214100, Jiangsu)

Abstract In order to improve the quality of dried carrot, and reduce the overheating area and excessive drying problem, the combination of multi-physical field simulation and microwave drying test system was performed in the study. The effect of carrots rotation and tempering time on the temperature distribution, drying characteristics and quality (color, rehydration rate, VC content and sensory evaluation) under microwave drying was also investigated. The results showed that the RMSEs of simulated moisture ratio and experimental value were all less than 5% under the developed drying modes, which accurately simulated the heat and mass transfer process of microwave drying for carrot. The temperature uniformity index λ of rotating samples decreased to 0.092 compared with that of non-rotating samples, which indicated that the temperature uniformity of dried products could be improved significantly. The quality of carrot was also improved during rotation, wherein the standard deviation of color difference was decreased to 0.18. Under R1/4 (the samples were rotated during drying, and tempered for 60 s in a single cycle stage) condition, the temperature distribution range of carrot samples was 65–75 °C. In addition, the color difference and VC content were the best among all drying modes. Therefore, the combination of rotation and tempering could be used to improve temperature uniformity and quality during microwave drying. Those results can provide a guidance for industrial application of microwave drying carrot.

Keywords carrot; microwave drying; simulation; temperature distribution; quality