

干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响

巨浩羽¹, 肖红伟¹, 郑霞², 郭秀良³,
刘嫣红¹, 张卫鹏¹, 袁婧¹, 高振江^{1*}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832000;
3. 浙江科达生物科技有限公司, 丽水 323700)

摘要: 为了探究相对湿度和阶段降湿对热风干燥过程的影响, 该文在干燥温度 60℃、风速 3.0 m/s 条件下, 研究了相对湿度 (20%、30%、40%、50%) 及第一阶段相对湿度 50% 保持不同时间 (10、30、60、90 min), 第二阶段相对湿度 20% 下, 胡萝卜片的干燥特性和温度变化规律; 利用 Weibull 分布函数对干燥曲线进行拟合并分析干燥过程, 结合尺度参数估算水分有效扩散系数; 基于复水比、色泽、干燥时间和能耗对不同相对湿度条件下的干燥过程进行评价。研究结果表明: 相对湿度保持恒定条件下, 干燥速率先上升后下降, 且相对湿度越低干燥速率越大。降低相对湿度有利于缩短干燥时间, 热风相对湿度 20% 比 50% 条件下干燥时间缩短了 27.6%; 分段降湿干燥条件下, 热风相对湿度 50% 保持 30min 后降低为 20%, 其干燥时间比相对湿度恒定为 20% 条件下缩短了 18.5%, 干燥过程出现 2 个升速阶段; Weibull 分布函数可以很好地描述胡萝卜恒定湿度和阶段降湿干燥过程。尺度参数 α 范围在 1.864~3.635 h 之间, 形状参数 β 值在 1.296~1.713 之间, 水分有效扩散系数在 $1.17 \times 10^{-9} \sim 2.92 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。对绿红值、复水率、能耗和干燥时间进行综合评价显示, 热风相对湿度 50% 保持 30 min 干燥条件下绿红值最高为 41.4, 能耗相比于恒定相对湿度 20% 条件下减少了 6.0%, 复水比较高为 3.81, 综合评分较高为 0.91。该文揭示了干燥介质相对湿度对胡萝卜片干燥特性的影响规律, 对于优化干燥介质湿度控制策略以提高干燥速率和品质, 降低干燥能耗提供了科学依据和技术支持。

关键词: 湿度控制; 干燥; 模型; 胡萝卜; Weibull 函数; 水分有效扩散系数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.040

中图分类号: TS255.1; TQ028.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0296-09

巨浩羽, 肖红伟, 郑霞, 郭秀良, 刘嫣红, 张卫鹏, 袁婧, 高振江. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296—304. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.040 <http://www.tcsae.org>
Ju Haoyu, Xiao Hongwei, Zheng Xia, Guo Xiuliang, Liu Yanhong, Zhang Weipeng, Yuan Jing, Gao Zhenjiang. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 296—304. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.040 <http://www.tcsae.org>

0 引言

食品和农产品的干燥面广量大, 如何降低能耗获得优质的干燥产品是干燥研究的一个重要方向^[1]。大量试验表明, 干燥温度、风速和物料切片厚度对干燥速率有显著影响^[2-7]。而干燥介质湿度对干燥速率影响的研究较少, 且没有得到统一的结论。Duc 等^[8]研究发现, 油菜籽的干燥速率随干燥介质湿度的降低而增大。Zlatanovic 等^[9]在苹果块干燥中发现, 干燥时间随相对湿度的降低而缩短。Donadon 等^[10]和 Xiao 等^[11]也得出相同结论。然而, Janjai 等^[12]在荔枝的薄层干燥研究中发现, 温度在 50℃~70℃, 相对湿度为 10%~25% 范围内, 相对湿度对干燥速率无显著性影响。Curocio 等^[13]指出, 胡萝卜在热风温度 45℃,

相对湿度在 10%~30% 内的干燥条件下, 干燥时间基本一致。

较高的相对湿度可加快物料温度的升高, 从而加速物料内部水分子的迁移运动^[14]。使用高湿空气对湿物料预热处理, 使其中心和表面的温度、湿度趋于接近, 然后降低介质湿度, 进而使湿物料中心至表面的温度梯度和湿度梯度一致^[15], 有利于加速干燥并减少结壳现象。王庆惠等^[16]在圣女果的热风干燥研究中得出, 分段式变温变湿干燥工艺下, 圣女果的干燥时间从 24 h 缩短为 10 h。Dai 等^[17]在基于温湿度控制的杏子干燥动力学研究中发现, 前期干燥介质保持 65 g/kg 高湿含量, 后期连续排湿干燥, 比连续排湿的干燥时间缩短了 18.75%。然而其没有测定物料温度变化规律, 降湿的时机只能通过大量试验确定, 没有揭示物料温度和降湿时间的关系。因此, 研究热风干燥过程中相对湿度对干燥动力学、干燥品质和能耗的影响十分必要。

干燥过程涉及到传热传质效率、能源消耗和产品品质等重要指标, 对干燥过程进行有效地预测调控具有重要意义^[18]。理论模型、经验模型以及半经验模型被广泛用来描述干燥过程, 主要包括 Newton, Henderson-Pabis,

收稿日期: 2015-07-02 修订日期: 2015-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31201436)

作者简介: 巨浩羽, 男, 博士生, 研究方向为农产品干燥装备和技术。北京中国农业大学工学院, 100083。Email: ju56238@163.com

*通信作者: 高振江, 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农产品 (食品) 的加工技术与装备研究。北京中国农业大学工学院, 100083。

Email: zjgao@cau.edu.cn

Page, modified Page, two-terms 等^[19-21]。但模型参数都是由回归计算得出, 缺乏物理意义。Weibull 分布函数具有很好的适用性, 近年被用来描述干燥过程并取得一定进展^[22]。白峻文等^[18]和张卫鹏等^[23]将 Weibull 函数分别应用到葡萄和茯苓的干燥动力学研究中, 得出尺度参数、形状参数和干燥工艺以及传质过程的相关关系。将 Weibull 分布函数应用于不同相对湿度干燥条件下物料干燥特性的模拟, 有利于预测和控制干燥过程。

因此, 本文以选取热风干燥最常见的加工物料胡萝卜片为试验原料, 研究其在不同相对湿度和分段降湿下的干燥特性, 以 Weibull 函数分析干燥过程, 并测定不同干燥条件下产品色泽、复水率和能耗。本研究将揭示不同相对湿度对胡萝卜片干燥特性和品质的影响规律, 为干燥过程中干燥介质相对湿度的优化调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要试验装置及工作原理

基于温湿度控制的箱式热风干燥实验装置(中国农业大学工学院农产品加工技术与装备实验室自制)如图 1 所示。其主要由电加热管、干燥室、排湿风机、加湿湿帘、内循环风扇以及自动控制部分组成。当干燥室温度小于预设值时, 电加热管工作; 干燥室温度大于预设值时, 电加热管停止工作。干燥室相对湿度小于设定相对湿度范围值时, 加湿电磁阀打开, 湿帘对干燥室加湿; 相对湿度大于设定相对湿度范围时, 排湿离心风机打开, 对干燥室排湿。

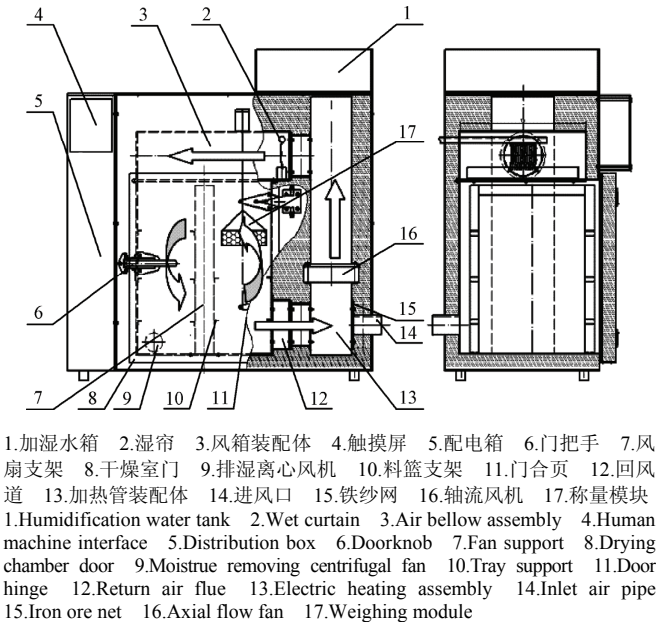


图 1 温湿度控制内循环热风干燥机总体结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of hot air internal recycle dryer based on being controlled temperature and humidity

其他仪器设备: YP 型电子天平(上海精科天平, 精度 0.1 g), FZQ-400/2D 型真空包装机(北京市天月缘包装机械有限公司), DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科技有限公司); DDS 334 型单相电子式

电度表(青岛电度表厂), 干燥器、培养皿若干。

1.2 试验原料

试验选用胡萝卜为原料, 购买自北京当地农贸市场。平均直径为(3±0.5) cm, 长度为(15±1) cm。初始湿基含水率为 92.8%±0.5% (烘干法, 105℃, 24 h)。将胡萝卜切分为(1.0±0.1) cm 的薄片, 再取长(2.0±0.1) cm, 宽(2.0±0.1) cm 的中心部分, 试验前放置于(4±1)℃的冰箱中保存。

1.3 试验方法

开启内循环热风干燥机预热至设定温湿度。将胡萝卜片单层平铺于 2 个料盘(长 170 mm, 宽 120 mm, 高 50 mm)中, 平均质量为(310±5) g。一个料盘中随机取 3 个胡萝卜片, 将温度传感器 Pt100(北京优普斯科技中心)插入到胡萝卜片的中心处, 另一料盘用于定时测定质量变化, 当质量变化小于 0.2 g/h 时干燥结束^[6]。根据前期预试验, 试验参数设置如表 1 所示, 其中热风温度均为 60℃, 风速为 3.0 m/s。每次试验重复 3 次, 取平均值作为结果。

表 1 试验设计与试验参数 Table 1 Experimental design and experimental parameters			
工艺 Process	试验序号 Experimental number	相对湿度 Relative humidity RH/%	分段时间 Stage time/h
恒定湿度 Constant relative humidity	1	20	至结束 To end
	2	30	至结束 To end
	3	40	至结束 To end
	4	50	至结束 To end
阶段降湿 Stage down relative humidity	5	50	10 min
	6	20	至结束 To end
	7	50	30 min
	8	20	至结束 To end
	9	50	60 min
	10	20	至结束 To end
	11	50	90 min
	12	20	至结束 To end

1.4 试验参数计算方法

1.4.1 水分比和干燥速率的计算方法

干燥特性曲线中, 胡萝卜片干燥过程含水率使用湿基含水率 $\varphi(\%)$ 表示。干燥速率 DR 计算公式为^[24-26]:

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1}$$
 (1)

式中: t_1 和 t_2 为干燥时间, h; DR 为干燥过程时间为 t_1 和时间 t_2 之间的干燥速率, g/(g·h); M_{t_1} 和 M_{t_2} 为干燥时间为 t_1 和 t_2 时刻的干基含水率, g/g; 其中干基含水率的计算方法为^[18]:

$$M_t = \frac{W_t - G}{G}$$
 (2)

式中: W_t 为干燥任意时刻的总质量, g; G 为干物质质量, g。

1.4.2 Weibull 函数模型参数计算方法

Weibull 分布函数表示为如下形式^[5]:

$$MR = \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (3)$$

式中: MR 为水分比。 α 为尺度参数, h , 表示干燥过程中的速率常数, 约等于干燥过程中物料脱去 63% 水分所需要的时间; β 为形状参数, 其值与干燥过程开始时的干燥速率有关, 当 $\beta > 1$ 时, 干燥速率会先升高后降低, t 为干燥时间, h ; 其中水分比 MR 水分比计算公式为^[27,28]:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (4)$$

式中: M_0 为初始干基含水率, g/g ; M_t 为 t 时刻的干基含水率, g/g 。

模型的拟合程度使用如下指标来评价^[19,23]:

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

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

式中: $MR_{exp,i}$ 为干燥试验实测的第 i 个水分比; $MR_{pre,i}$ 为模型计算得出的第 i 个水分比; N 为试验测得数据个数; R^2 为拟合决定系数; $RMSE$ 为均方根误差。

1.4.3 有效水分扩散系数计算

水分有效扩散系数通常用简化的费克第二定律计算^[5], 即:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \approx \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t\right) \quad (7)$$

式中: D_{eff} 为水分有效扩散系数, m^2/s ; L 为物料的厚度, m ; t 为干燥时间, s 。

估算水分扩散系数 D_{cal} 计算公式如下^[5]:

$$D_{cal} = \frac{L^2}{3600\alpha} \quad (8)$$

式中: D_{cal} 表示估算水分扩散系数, m^2/s ; L 为胡萝卜片的厚度, m 。

其中 D_{eff} 和 D_{cal} 有如下关系^[5]:

$$D_{eff} = \frac{D_{cal}}{R_g} \quad (9)$$

式中: R_g 为一个与尺寸相关的参数。

1.4.4 色泽、复水性和能耗测定

采用 SMY-2000SF 型色差计 (北京盛名扬科技开发有限公司) 测定干燥后胡萝卜片 a^* (绿红值), 测定方法见文献^[29-31], 胡萝卜主导颜色是红色, a^* 越大, 则表示胡萝卜片越红, 品质越好^[32]。

将称好的一定质量的样品放入 40°C 恒温蒸馏水中, 30 min 后, 取出沥干 20 min, 并用吸水纸拭干表面水分, 称取复水后的质量, 计算公式为^[33,34]:

$$RR = \frac{m_2}{m_1} \quad (10)$$

式中: RR 为复水率, g/g ; m_2 为复水后质量, g ; m_1 为复水前质量, g 。

能耗的测定由以下公式计算^[34]:

$$Q = \frac{1000 W}{m_i \cdot (\varphi_0 - \varphi_i)} \quad (11)$$

式中: Q 为该次试验的单位能耗, $\text{kW}\cdot\text{h/kg}$; W 为此次试验前后电度表示数之差, $\text{kW}\cdot\text{h}$; m_i 为该次试验物料初始质量, g 。 φ_i 为物料终了湿基含水率, %; φ_0 为物料初始湿基含水率, %。

1.4.5 综合评价方法

为使数据具有统一性, 需对评价指标进行归一化。

正向指标 (复水率 RR , 绿红值 a^*) 和负向指标 (干燥时间 t , 能耗 Q) 归一化公式分别如下^[23]:

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (12)$$

$$y_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (13)$$

式中: y_i 为归一值, x_i 为指标实际值, x_{\max} 和 x_{\min} 分别为指标最大值和最小值。

按照公式 (14) 进行加权得到干燥条件的综合评分 Y ^[23]。

$$Y = y_1 l_1 + y_2 l_2 + y_3 l_3 + y_4 l_4 \quad (14)$$

式中: y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 分别为复水率、绿红值、干燥时间、能耗归一化后的结果, l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 分别对应其权重。在保证干燥品质绿红值 a^* , 复水比 RR 良好条件下, 使得干燥能耗 Q 和干燥时间 t 减小, 采用层次分析方法^[23], 得出绿红值 a^* 、复水比 RR 、能耗 Q 和干燥时间 t 的权重分别为 0.3、0.2、0.25、0.25。

2 结果与分析

2.1 不同恒定相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响

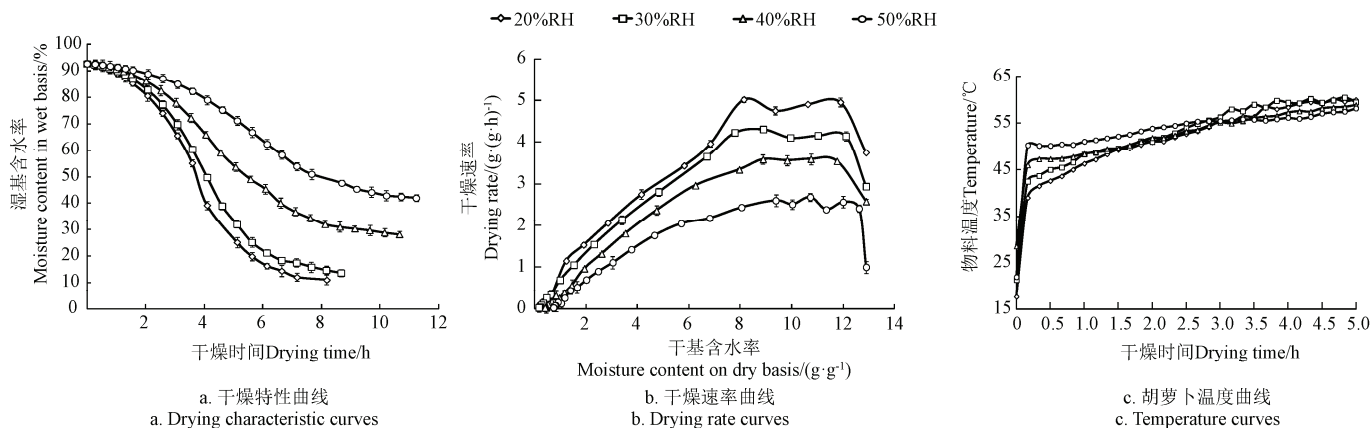
不同恒定相对湿度下胡萝卜的热风干燥特性和速率曲线如图 2 所示。由图 2a 可知 60°C 下, 热风相对湿度为 20%、30%、40%、50% 条件下, 干燥时间分别为 8.1、8.6、10.6 和 11.2 h。由此可知, 降低相对湿度有利于缩短干燥时间, 提高干燥效率。这与 Kaya 等^[35]研究结论相一致。相对湿度 50% 时终了湿基含水率为 42.0%, 这是因为相对湿度越大, 平衡湿基含水率越大^[36-37]。由图 2b 可知, 不同相对湿度下干燥速率先上升后下降, 且相对湿度越低干燥速率越大。干燥初始阶段, 物料处于预热阶段, 干燥速率增加; 之后干燥过程为由外部水分扩散控制的恒速干燥阶段; 最后干燥过程为内部水分扩散控制的降速阶段。由费克定律及其边界条件可知, 环境相对湿度越低, 物料和环境之间的水蒸气压差越大, 干燥速率越大。因此相对湿度 20% 下干燥速率最大^[38]。而 Janjai 等^[12]和 Curocio 等^[13]研究认为干燥相对湿度对干燥速率影响不显著, 可能是其相对湿度变化范围较小所致。

不同恒定相对湿度下胡萝卜 5 h 内温度曲线如图 2c 所示。由图可知, 不同相对湿度物料被迅速预热到较高温度, 然后缓慢上升, 最后和环境温度趋于一致。干燥初期, 物料会被加热到环境所对应的湿球温度值^[39]。由空气的湿焓图可知, 干球温度一定时, 相对湿度越高,

湿球温度越高, 焓值越高^[40]。根据傅里叶导热定律, 干燥介质焓值越高, 物料升温越快, 因此当相对湿度 50% 干燥条件下, 前期物料升温速度最快, 且达到的温度最高 (约 50.3℃)。预热结束后, 一部分热量用来蒸发水分, 一部分则用于物料升温, 最终物料温度和环境温度趋于平衡。不同湿度下的温度曲线变化趋势与李长友等^[41]和 Barati 等^[42]的研究结果一致。

不同相对湿度干燥条件下, 干燥在 0~10 min 时, 物

料处于预热状态, 温度迅速上升, 干燥速率上升; 当 10~150 min 时, 物料温度缓慢上升, 此时干燥速率近似认为恒速干燥段; 当 150 min 以后, 物料温度趋于环境温度, 干燥速率处于降速干燥阶段。因此可以从物料的温度曲线判断物料干燥阶段。此现象与朱文学等对干燥特性曲线的描述相一致^[43]。由图 2c 可知相对湿度 50% 时干燥 10 min 时, 物料预热完成, 基于较高物料温度, 此时降低相对湿度可能取得较快干燥速率。



注: RH 为相对湿度, 干燥温度为 60℃, 风速为 3.0 m·s⁻¹。

Note: RH is relative humidity, drying temperature is 60℃ with velocity at 3.0 m·s⁻¹.

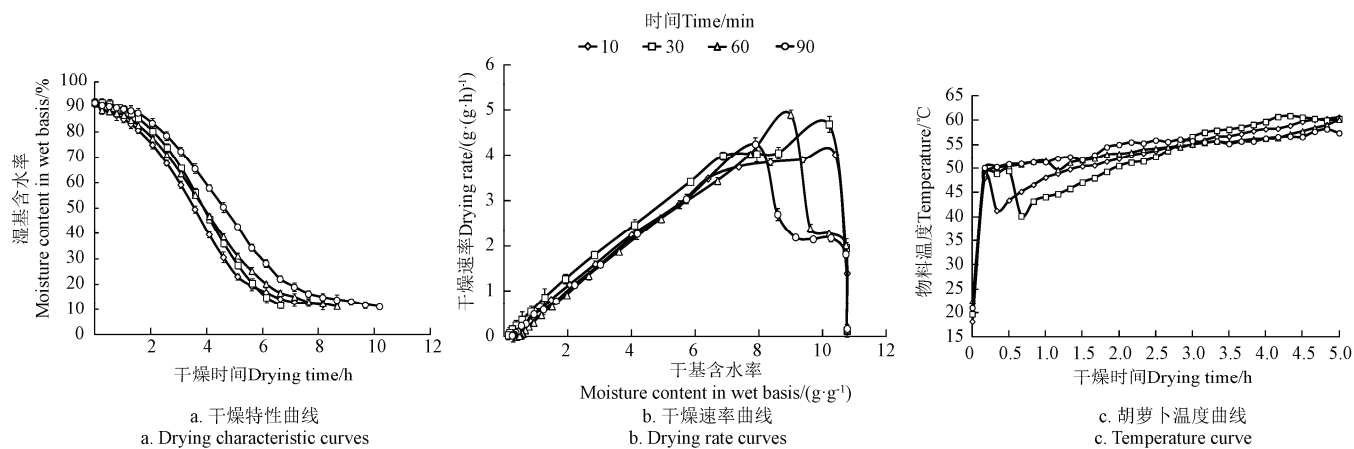
图 2 恒定相对湿度下胡萝卜的干燥特性、速率和温度曲线

Fig.2 Drying characteristic, drying rate and temperature curves at constant drying relative humidity

2.2 阶段降湿条件下胡萝卜的热风干燥特性

分段降湿条件下胡萝卜的干燥特性和干燥速率曲线和温度曲线如图 3 所示。由图 3a 可知, 前期热风相对湿度 50% 条件下保持时间为 10、30、60、90 min 时, 干燥时间分别为 8.1、6.6、8.6、10.1 h。当相对湿度 50% 保持 30 min 而后采取恒定相对湿度 20% 的干燥时间比始终采取相对湿度 20% (8.1 h) 条件下缩短了 18.5%; 保持 10 min 时干燥时间无显著性差异 ($P>0.05$); 保持 60 或 90 min

时, 干燥时间延长。由此可见, 干燥初期保持较高湿度一定时间有利于缩短干燥时间, 但保持时间长则干燥时间增加; 保持时间短, 干燥时间无显著性差异。由图 3b 可知, 不同条件下干燥速率先升高后降低, 相对湿度 50% 保持 30、60 和 90 min 时, 干燥速率出现 2 个升速阶段。这可能是由于, 干燥初期物料升温, 干燥速率增大; 环境湿度降低后, 干燥速率再次升高所致。且当相对湿度 50% 保持 30 min 后, 后期干燥速率大于其余 3 种条件 ($P<0.05$)。



注: 时间为第一阶段相对湿度 50% 的保持时间。

Note: Time means first relative humidity 50% keeping period.

图 3 阶段降湿下胡萝卜的干燥特性、速率和温度曲线

Fig.3 Drying characteristic, drying rate and temperature curve at step down drying relative humidity

不同条件下, 5 h 内胡萝卜的温度曲线由图 3c 所示。由图可知, 物料被预热到 50.3℃, 当干燥介质降低为相对湿度 20%时, 由于物料和空气中的水蒸气分压差增大, 干燥速率增加。水分蒸发带走大量热量使物料内部温度降低, 最后物料温度趋于环境温度。相对湿度 50%保持 10 min 后, 物料温度虽然升到较高温度, 但可能由于排湿过早, 物料表面快速蒸发导致表面结壳, 阻碍水分迁移^[44]。相对湿度 50%保持 30 min 时, 物料被充分预热, 内部水分梯度和温度梯度相一致, 当相对湿度降为 20%后干燥速率增加, 并出现恒速干燥段。且 3.0 h 后, 物料温度均大于其他 3 种情况 ($P<0.05$)。较高的物料温度加速了内部水分的迁移。当相对湿度 50%保持 60 min 或 90 min 后降为相对湿度 20% 时同样出现升速干燥段, 但保持时间过长, 导致总干燥时间延长。因此在干燥前期, 当物料被预热到湿球温度且稳定后, 降低干燥介质的相对湿度有利于缩短干燥时间, 提高干燥效率。

2.3 基于 Weibull 分布函数的干燥过程模拟

2.3.1 基于尺度参数 α 和形状参数 β 对干燥过程分析

利用 Weibull 分布函数对不同干燥条件下胡萝卜干燥曲线进行拟合, 结果见表 2, 由决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 可知, Weibull 函数可准确描述不同相对湿度

下胡萝卜的干燥过程。

尺度参数 α 表示干燥过程的速率常数。由表 2 可知, 恒定相对湿度条件下 α 在 1.864~3.635 h 之间, α 值越大, 则干燥时间越长, 此结论与张卫鹏等^[23]、Uribe 等^[45]的研究结论相一致; 在阶段降湿干燥条件下, α 值在 2.143~2.803 之间, 热风相对湿度 50%保持 30 min 时, α 值大于相同相对湿度保持 10 min 条件下 α 值, 可能是因为前期保持较高湿度, 干燥速率慢, 水分比降低到 0.37 时所用时间长, 但后期干燥速率加快, 总干燥时间较短。

形状参数 β 表示干燥初始阶段物料的干燥速率。当 $\beta>1$, 干燥速率呈现先升速后降速的阶段, 干燥过程为表面和内部水分共同控制; 当 β 在 0.3~1 之间时, 干燥速率为降速干燥, 干燥过程为内部水分扩散控制。由表 2 可知, β 值在 1.296~1.713 之间, 故干燥过程存在延滞阶段, 干燥速率呈现先升速后降速的阶段 β 值范围与茯苓的气体射流干燥条件下范围不一致^[23], 与猕猴桃的中短波红外干燥方法下一致^[46]。由此可见, α 值反映水分比降低到 0.37 时所需要的干燥时间, 而 β 与干燥设备、物料种类和干燥温度、湿度等因素有关。 R_g 值与物料的几何尺寸相关, 与水分有效扩散系数不相关^[18], 其在 7.98~10.62 之间波动可能与物料干燥过程中的收缩有关^[23]。

表 2 不同干燥条件下 Weibull 模拟结果
Table 2 Weibull model simulation result at different drying conditions

序号 Test No.	尺度参数 Scale parameter α /h	形状参数 Shape parameter β	决定系数 Coefficient of determination R^2	均方根误差 Root mean squared error RMSE	估算水分 扩散系数 Calculated moisture diffusion coefficient $D_{cal}/(10^{-8}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	水分有效 扩散系数 Moisture effective diffusivity coefficient $D_{eff}/(10^{-9}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	几何参数 Geometric factor R_g
1	1.864	1.296	0.999	5.13×10^{-3}	2.15	2.63	8.16
2	2.104	1.380	0.999	6.89×10^{-3}	1.90	2.34	8.14
3	2.580	1.299	0.996	1.80×10^{-2}	1.55	1.46	10.62
4	3.635	1.300	0.996	1.97×10^{-2}	1.10	1.17	9.42
5	2.143	1.297	0.996	1.93×10^{-2}	1.87	1.89	9.83
6	2.187	1.601	0.997	1.71×10^{-2}	1.83	2.92	6.26
7	2.605	1.537	0.992	3.16×10^{-2}	1.54	1.78	8.62
8	2.803	1.713	0.996	2.32×10^{-2}	1.42	1.79	7.98

2.3.2 水分有效扩散系数分析

Weibull 分布函数可以估算干燥过程中水分扩散系数 D_{cal} , 而不用考虑干燥过程为表面还是内部水分扩散。不同条件下的 D_{eff} 和 D_{cal} 计算结果见表 2。 D_{cal} 在 $1.10\times10^{-8}\sim2.15\times10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$, 其变化规律和 α 值变化规律相反, 当相对湿度 50%保持 30 min 干燥条件下的 D_{cal} 小于恒定相对湿度 20%干燥条件下 D_{cal} , 但干燥时间短。这可能是因为物料收缩缩短了水分子迁移的路径。不同干燥条件下的 D_{eff} 在 $1.17\times10^{-9}\sim2.92\times10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 范围内, 当相对湿度 50%保持 30 min 时 D_{eff} 值最大, 说明干燥初期高湿保持一定时间有利于提高水分扩散系数, 缩短干燥时间。

2.4 色泽、复水比和能耗的比较

不同干燥条件下的绿红值 a^* 、复水率 RR 和能耗测定结果如表 3 所示。相对湿度 50%保持 30 min 时, a^* 值最高, 可能是干燥过程在短时间内完成, 有利于胡萝卜色

泽的保存, 当恒定相对湿度 50%干燥条件下, 由于水的活性和酶的作用、氧化和长时间的高温引起酶促褐变使 a^* 值减小。

复水性主要取决于物料细胞和结构的破坏程度^[34]。当恒定相对湿度 20%干燥条件下复水率较低, 可能是因为物料结壳而阻碍了水分子向内部的扩散。且复水率还会受到复水前含水率的影响, 恒定相对湿度 50%干燥条件下, 干燥终了含水率较高, 因此复水率也较低。当相对湿度 50%保持 30 min 干燥条件下复水率比较高, 品质较好。

为验证控湿能够降低能耗, 假定恒定相对湿度 20%干燥条件下能耗为 1, 其他干燥条件下能耗与此做比值。由表 3 可知, 当相对湿度 50%保持 90 min 后变为相对湿度 20%干燥条件下能耗最高, 比恒定相对湿度 20%干燥条件下增加了 43.0%, 而相对湿度 50%保持 30 min 后变

为相对湿度 20%干燥条件下能耗减少了 6.0%。因此前期保持一定时间较高相对湿度有利于缩短干燥时间，降低能耗。

表 3 不同干燥条件下色泽、复水率、能耗和综合评分结果
Table 3 Color value, rehydration ratio, energy consuming and comprehensive score under different drying conditions

试验序号 Test number	绿红值 a^* Red green	复水率 Rehydration ratio/(g·g ⁻¹)	能耗 Energy	综合评分 Comprehensive score
1	36.6 ^b	3.26 ^d	1.00 ^f	0.67 ^c
2	36.0 ^c	3.75 ^{bc}	1.19 ^c	0.52 ^d
3	33.5 ^e	3.49 ^{cd}	1.33 ^b	0.15 ^f
4	31.5 ^f	3.24 ^d	0.98 ^f	0.28 ^e
5	41.2 ^a	3.82 ^{ab}	1.08 ^d	0.82 ^b
6	41.4 ^a	3.81 ^{ab}	0.94 ^e	0.91 ^a
7	35.1 ^d	4.07 ^a	1.04 ^e	0.45 ^d
8	36.2 ^c	3.40 ^d	1.43 ^a	0.25 ^e

注：不同字母 a、b、c 表示不同干燥条件下差异显著 ($P < 0.05$)，恒定相对湿度 20%下能耗为 6.55 (kW·h)·kg⁻¹。

Note: Different letters a, b, c indicate significant difference ($P < 0.05$) of difference drying methods, energy consuming of constant 20% relative humidity drying condition was 6.55 (kW·h)·kg⁻¹.

2.5 不同干燥方式综合评价

由表 3 可知，相对湿度 50%保持 30 min 后变为相对湿度 20%条件下综合评分最高。干燥前期较高相对湿度可以使物料迅速升温，防止物料表面干燥过快而导致结壳，当物料温度达到湿球温度且稳定后降低干燥介质的相对湿度条件下可降低能耗，缩短干燥时间，获得较好产品品质。

3 结 论

1) 恒定相对湿度 20%~50%下，干燥速率先上升后下降，且相对湿度越低干燥速率越大。降低相对湿度有利于缩短干燥时间，相对湿度 20%比相对湿度 50%干燥条件下干燥时间缩短 27.6%。

2) 阶段降湿干燥条件下，当物料被预热到湿球温度且稳定后，降低相对湿度有利于缩短干燥时间，热风相对湿度 50%保持 30 min 后变为 20%，干燥时间比恒定相对湿度 20%条件下缩短了 18.5%；

3) Weibull 分布函数可以很好地描述胡萝卜恒定湿度和阶段降湿干燥过程。尺度参数 α 范围在 1.864~3.635 h 之间，形状参数 β 值在 1.296~1.713 之间，基于 Weibull 分布函数水分有效扩散系数在 $1.17 \times 10^{-9} \sim 2.92 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。

4) 对绿红值、复水率、能耗和干燥时间进行综合评价显示，热风相对湿度 50%保持 30 min 干燥条件下绿红值最高为 41.4，能耗相比于恒定相对湿度 20%条件下减少了 6.0%，复水比较高为 3.81，综合评分较高为 0.91。

【参 考 文 献】

- [1] 王军, 王琳琳, 韩玲, 等. 曲拉热风干燥工艺参数筛选及色泽品质评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 296—304. Wang Jun, Wang Linlin, Han Ling, et al. Parameters screening of Qula hot-air drying and evaluation of color quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(16): 296—304. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王文明, 陈红意, 赵满全. 提高紫花苜蓿热风干燥品质的工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 337—345. Wang Wenming, Chen Hongyi, Zhao Manquan. Technological parameters optimization for improving quality of heated-air dried alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.1): 337—345. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郑霞, 肖红伟, 王丽红, 等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜片的干燥时间[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 262—269. Zheng Xia, Xiao Hongwei, Wang Lihong, et al. Shorting drying time of Hami-melon slice using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 262—269. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王宁, 刘文秀, 李凤城, 等. 杏低温薄层干燥试验与建模[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 140—143. Wang Ning, Liu Wenxiu, Li Fengcheng, et al. Thin layer drying model of apricot at low temperature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 140—143. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 269—276. Zhang Weipeng, Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, et al. Improving quality of Poria cocos using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 269—276. (in Chinese with English abstract)
- [6] 巨浩羽, 肖红伟, 白竣文, 等. 苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44 (增刊 2): 186—191. Ju Haoyu, Xiao Hongwei, Bai Junwen, et al. Medium and short wave infrared drying characteristics and color changing of apple slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 186—191. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张绪坤, 姚斌, 吴起, 等. 用傅里叶数与优化法分析污泥过热蒸汽干燥有效扩散系数[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 230—237. Zhang Xukun, Yao Bin, Wu Qi, et al. Analysis of effective diffusivity of sludge in superheated steam drying based on Fourier number method and optimization method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 230—

237. (in Chinese with English abstract)
- [8] Duc L A, Han J W, Keum D H. Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L)[J]. *Journal of Stored Products Research*. 2011, 47(1): 32—38.
- [9] Zlatanovic I, Komatina M, Antonijevic D. Low-temperature convective drying of apple cubes[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2013, 53(1): 114—123.
- [10] Donadon J R, Resende O, Teixeira S D P, et al. Effect of hot air drying on ultrastructure of crambe seeds[J]. *Drying Technology*, 2013, 31(3): 269—276.
- [11] Xiao Hongwei, Gao, Zhenjiang, Lin Hai, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes[J]. *Journal of Food Processing Engineering*, 2010, 33(5): 899—918.
- [12] Janjai S, Precoppe M, Lamlert N, et al. Thin- layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.)[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2011, 89(3): 194—201.
- [13] Curcio S, Aversa M, Calabrò V, et al. Simulation of food drying: fem analysis and experimental validation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(4): 541—553.
- [14] Barati E, Esfahani J. A new solution approach for simultaneous heat and mass transfer during convective drying of mango[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(4): 302—309.
- [15] Ju Haoyu, El-Mashad H, Fang Xiaoming, et al. Drying characteristics and modeling of yam slices under different relative humidity conditions. *Drying Technology*[J], 2015, with doi:10.1080/07373937.2015.1052082.
- [16] 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 Qinghui, Li Zhongxin, Yang Jinsong, 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 (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(3): 271—276. (in Chinese with English abstract)
- [16] Dai Jianwu, Rao Junquan, Wang, Dong, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves[J]. *Drying Technology*, 2015, 33(12): 365—376.
- [18] 白峻文, 王吉亮, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 278—285.
- Bai Junwen, Wang Jiliang, Xiao Hongwei, et al. Weibull distribution for modeling drying of grapes and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(16): 278—285. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
- Zhang Qian, Xiao Hongwei, Dai Jianwu, et al. Air impingement drying characteristics and drying model of Hami melon flake[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(Supp.1): 382—388. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李维新, 魏巍, 何志刚, 等. 糖姜间歇微波真空干燥特性及其动力学模型[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊 1): 262—266.
- Li Weixin, Wei Wei, He Zhigang, et al. Intermittent microwave vacuum drying characteristics and dynamics model of sugar ginger[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(Supp.1): 262—266. (in Chinese with English abstract)
- [21] Pillai M G. Thin layer drying kinetics, characteristics and modeling of plaster of paris[J]. *Chemical Engineering Research and Design*. 2013, 91(6): 1018—1027.
- [22] Bantle M, Kolsaker K, Eikevik T M. Modification of the weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food[J]. *Drying Technology*, 2011, 29(10): 1161—1169.
- [23] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 317—324.
- Zhang Weipeng, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Drying characteristics of poria cocos with different drying methods based on Weibull distribution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(5): 317—324. (in Chinese with English abstract)
- [24] Bai Junwen, Sun Dawen, Xiao Hongwei, et al. Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2013, 20(4): 230—237.
- [25] Xiao Hongwei, Pang Changle, Wang Lihong, et al. Drying kinetics and quality of Monukka Seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(2): 233—240.
- [26] 肖红伟, 张世湘, 白峻文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 318—323.
- Xiao Hongwei, Zhang Shixiang, Bai Junwen, et al. Air impingement drying characteristics of apricot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(7): 318—323. (in Chinese with English abstract)
- [27] Xiao Hongwei, Yao Xuedong, Lin Hai, et al. Effect of SSB (superheated steam blanching) time and drying temperature on hot air impingement drying kinetics and quality attributes of yam slices [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2012, 35(3): 370—390.
- [28] Xiao Hongwei, Lin Hai, Yao Xuedong, et al. Effects of different pretreatments on drying kinetics and quality of

- sweet potato bars undergoing air impingement drying[J]. International Journal of Food Engineering, 2009, 5(5): 64—67.
- [29] 巨浩羽, 肖红伟, 方小明, 等. 果蔬真空-蒸汽脉动漂烫机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 230—238.
- Ju Haoyu, Xiao Hongwei, Fang Xiaoming, et al. Design and experiment of vacuum-steam pulsed blancher for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 230—238. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张茜, 肖红伟, 杨旭海, 等. 预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 276—281.
- Zhang Qian, Xiao Hongwei, Yang Xuhai, et al. Effects of pretreatment on air impingement drying characteristics and product color for line pepper [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 276—281. (in Chinese with English abstract)
- [31] Xiao Hongwei, Law C L, Sun Dawen, et al. Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying[J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 418—427.
- [32] 陈瑞娟, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对胡萝卜粉品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 48—53.
- Chen Ruijuan, Bi Jinfeng, Chen Qinqin, et al. Effects of different drying methods on carrot powder quality[J]. Food Science, 2014, 35(11): 48—53. (in Chinese with English abstract)
- [33] Xiao Hongwei, Bai Junwen, Xie Long, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered[J]. Food and Bioprocess Processing, 2015, 94(2): 581—591.
- [34] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277—284.
- Chen Jiankai, Lin Hetong, Lin Yifen, et al. Optimized technology of *Pleurotus eryngii* by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 277—284. (in Chinese with English abstract)
- [35] Kaya A, Aydin O, Demirtas C. Drying kinetics of red delicious apple[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4): 517—524.
- [36] 关志强, 王秀芝, 李敏, 等. 罗非鱼肉干燥过程平衡含水率模型研究[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 118—121.
- Guan Zhiqiang, Wang Xiuzhi, Li Ming, et al. Modeling of equilibrium moisture content of tilapia fillets during drying process[J]. 2012, 33(15): 118—121. (in Chinese with English abstract)
- [37] 关志强, 王秀芝, 李敏, 等. 荔枝肉干燥过程平衡含水率模型研究[J]. 食品科技, 2012, 35(5): 60—63.
- Guan Zhiqiang, Wang Xiuzhi, Li Min, et al. Equilibrium moisture content model in drying process of litchi flesh[J]. Food Science and Technology, 2012, 35(5): 60—63. (in Chinese with English abstract)
- [38] Bialobrzeski 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-fluid-bed drier[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(19/20): 4704—4716.
- [39] Aversa M, Curcio S, Calabrò V, et al. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3): 922—932.
- [40] 李长友. 粮食热风干燥系统火用评价理论研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 1—6.
- Li Changyou. Exergy evaluation theory of hot air drying system for grains[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [41] 李长友, 赵懿琨, 马兴灶. 荔枝干燥热湿特性模型解析与验证[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 289—298.
- Li Changyou, Zhao Yikun, Ma Xingzao. Model analytical and verification of heat and moisture characteristics in litchi drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 289—298. (in Chinese with English abstract)
- [42] Barati E, Esfahani J A. A new solution approach for simultaneous heat and mass transfer during convective drying of mango[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 102(4): 302—309.
- [43] 朱文学. 食品干燥原理与原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [44] 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, 28(22): 282—287.
- Zhang Xukun, Zhu Shusen, Huang Jianhua, 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 (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 282—287. (in Chinese with English abstract)
- [45] Uribe E, Vega-Gálvez A, Scala K D, et al. Characteristics of convective drying of pepino fruit (*solanum muricatum* ait.): application of Weibull distribution[J]. Food & Bioprocess Technology, 2011, 4(8): 1349—1356.
- [46] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 基于 Weibull 分布函数对猕猴桃切片中短波红外干燥过程模拟及应用[J]. 现代食品科技, 2014, 30(6): 146—151.
- Zeng Mucheng, Bi Jinfeng, Chen Qinqin, et al. Weibull distribution for modeling med- and short- wave infrared radiation drying of kiwifruit slices[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(6): 146—151. (in Chinese with English abstract)

Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs

Ju Haoyu¹, Xiao Hongwei¹, Zheng Xia², Guo Xiuliang³, Liu Yanhong¹,
Zhang Weipeng¹, Yuan Jing¹, Gao Zhenjiang^{1*}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Mechanical and Electric Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

3. Zhejiang Keda Biotechnology Co. Ltd, Lishui 323700, China)

Abstract: Drying is one of the most common processing methods for fruits and vegetables. Enhancing drying rate and dried products' quality as well as energy efficiency is very tempting for drying industry. Recently, a lot of investigations have illustrated that drying temperature, air velocity and sample's thickness have a significant influence on drying process. High drying temperature and velocity can extensively reduce drying time and enhance drying rate. However, few investigations take into account hot air relative humidity (RH) as important drying parameter in drying process. Some literatures showed that decreasing RH would lead to a steeper slope of moisture ratio decreasing. Whereas, some researches pointed out that there was no effect of RH on the drying rate in specified range of RH. In general, high RH can contribute to a rapid increase of product temperature. It is expected that with high RH pretreatment, the temperature and moisture tend to be equivalent and after that the RH can be reduced to enhance drying rate. In this circumstance, the temperature and moisture gradient between sample and drying air become consistent and the high efficient drying process could be achieved. Drying process refers to heat and mass transfer efficiency, energy consuming and products quality. Theoretical models, semi-theoretical and empirical models are widely used to describe drying process. However, those models neglect the fundamentals of the drying process and their parameters have no physical meaning and do not help in the optimization. Recently, Weibull model was used to describe drying process because of its applicability. Based on Weibull model, the relationship between scale parameters as well as shape parameters and drying process could be developed. So in current work, carrot slabs were used to explore the drying characteristics under the drying condition of constant RH and of decreasing RH step by step, together with constant drying temperature and constant air velocity. Result showed that under the condition of constant RH, drying rate would rise up in the initial drying period and then drop afterwards, additionally, drying rate was more rapid under lower RH. Drying time was decreased when reducing RH, and drying time under 20% RH was reduced by 27.6% compared to that under 50% RH. However, material's temperature would be the highest under 50% RH drying condition. Besides, under the drying condition of decreasing the RH step by step, when 50% RH was kept for 30 min and then was changed to 20% RH, the drying time was saved by 18.5% compared to constant 20% RH drying condition. When 50% RH was kept for 30 min or more than 30 min, there were 2 accelerating periods of drying rate. The material's temperature would decrease as the RH decreased because of moisture evaporation. Weibull model could fit the drying curves under different conditions accurately. The scale parameter ranged from 1.864 to 3.635 and the shape parameter ranged from 1.296 to 1.713. So there was a lag period according to the shape parameter value. Based on Weibull model, the moisture effective diffusivity calculated was in the range of 1.17×10^{-9} – 2.92×10^{-9} m²/s. Taking rehydration ratio, color value, drying time and energy consuming into account, 50% RH kept for 30 min and then reduced to 20% RH was proposed as the favorable condition for drying carrot slabs. The present work contributes to a better understanding of the effect of relative humidity on drying characteristics of carrot slabs, which is useful for enhancing drying rate and dried products' quality as well as energy efficiency.

Key words: humidity control; drying; models; carrot; Weibull model; moisture effective diffusivity