

顾思忠, 刘 斌, 杨兆丹. 胡萝卜在微波干燥条件下的热物理性质和多孔特性[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 897-903.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.04.026

胡萝卜在微波干燥条件下的热物理性质和多孔特性

顾思忠, 刘 斌, 杨兆丹

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134)

摘要: 利用微波干燥试验系统, 实时测量胡萝卜样品微波干燥过程中的温度和质量变化, 在样品相同部位选取切片, 观察不同干燥时期样品细胞微观图像。分析干燥过程中不同含水率样品的密度、导热系数、比热、热扩散率等物理性质参数的变化, 并从多孔介质的角度, 研究孔隙率、孔隙分形维数、孔径、比表面积等多孔特性参数在不同干燥节点(100%、85%、70%、55%、40%) 的变化规律。通过改变微波加热功率, 分析微波功率对样品热质传递的影响。结果表明: 微波干燥过程中, 胡萝卜皮层细胞形成一层致密薄膜阻碍水分迁移, 细胞破损首先发生在样品内部。含水率降低至 30% 时, 样品内部出现焦糊现象, 随后中心处细胞全部塌陷。但是整个干燥过程的密度变化并不大, 减小量约为 5 kg/m^3 。导热系数总体呈现先增大后减小的趋势, 在含水率为 60% 时达到极大值, 随着含水率的降低样品内部温度更加趋向于均匀一致。随着干燥的进行, 孔隙率和孔隙分形维数不断增大, 孔隙变得越来越复杂。干燥过程中的温度变化具有明显的阶段性, 热量传递和水分传递方向具有一致性。干燥初期, 微波功率(0.6 kW、0.8 kW、1.0 kW) 越大, 样品温度升高至 100°C 的速度越快, 此时内部温度高于表面温度, 而干燥后期内外温度基本恒定, 但是二者大小关系比前期复杂。

关键词: 胡萝卜; 微波干燥; 热物理性质; 多孔介质特性; 温度分布

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018) 04-0897-07

Thermophysical properties and porous property analysis of carrot under microwave drying condition

GU Si-zhong, LIU Bin, YANG Zhao-dan

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: The system of microwave drying was used to measure the temperature and mass changes of carrot in real time during microwave drying. The slices at the same part of the sample were selected and the microscopic images of cells in different drying periods were compared. The changes of property parameters of carrot samples with different water content were analyzed in drying process, such as density, thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity, etc. From the perspective of porous media, the variation of porous characteristic parameters, like porosity, fractal dimension, aperture and specific surface area, was studied under different drying nodes (100%, 85%, 70%, 55%, 40%). The influence of microwave power on the heat and mass transfer of samples was analyzed by changing the microwave heating power. The results showed that cortical cells of the carrot formed a dense film which could hinder water migration during microwave drying.

The broken cells first occurred inside the sample. When the water content was 30%, internal of carrot appeared the scorch. Then, all of center cells collapsed. In the whole drying process, the density did not fluctuate much, and its reduction was about 5 kg/m^3 after drying. Thermal conductivity increased as the water content decreased initially and decreased afterwards. It reached the maximum when the water content was 60%. The tempera-

收稿日期: 2018-01-03

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51706154); 2017 国家重点研发计划重点专项(2017YFD0401305); 天津商业大学人才启动项目(R160117)

作者简介: 顾思忠(1993-), 男, 山东邹城人, 硕士研究生, 主要从事制冷系统优化及节能技术研究。(E-mail) 513399674@ qq.com

通讯作者: 刘 斌, (E-mail) lbtjcu@ tjcu.edu.cn

ture became uniform with the reduction of water content. Besides, porosity and pore fractal dimensions also increased. The internal pores became more and more complicated. In addition, the change of temperature had obvious stages during the drying process, and the transfer direction of heat and moisture was consistent. When the microwave power was set to different values: 0.6 kW, 0.8 kW, 1.0 kW, in the initial period of drying, the rate of temperature rise was proportional to the microwave power before temperature reached 100 °C, and the internal temperature was higher than that of the surface at this stage. The internal and external temperatures were basically constant in the late period of drying, but the relationship between them was more complex than that in the initial period.

Key words: carrot; microwave drying; thermal physical properties; characteristic of porous media; temperature distribution

随着果蔬产量的增大以及人们对优质食品需求量的增加,果蔬干燥技术越来越受到人们的欢迎。传统的热风干燥是利用强制对流的方式,将热风热量由物料外部传递到内部,水分由内部迁移到表面蒸发^[1]。这种方法的缺点是能源消耗大、效率低、产品品质低^[2]。热泵干燥、真空冷冻干燥、红外线干燥、微波干燥等干燥新技术^[3-9]的出现基本解决了传统干燥方式存在的问题,其中微波干燥技术最为方便快捷。

对于多孔物料干燥传热传质机理的研究很多,一般将干燥过程分为快速升温阶段、恒速干燥阶段和降速阶段。尹晓峰等^[10]利用正交试验法对稻谷进行热风干燥模拟,结果表明热风温度是影响稻谷热风干燥的最主要因素。李靖等^[11]利用组合干燥设备对几种常见果蔬进行干燥试验,并对干燥工艺进行了综合优化,确定了组合干燥的最佳工艺。于静静等^[12]通过对比不同干燥方式对红枣硬度的影响,发现微波干燥条件下硬度最大。Pitchai 等^[13]采用有限元模型对旋转物料的微波干燥过程进行模拟,识别出物料的冷点。Monteiro 等^[14]通过在微波真空干燥、微波多相闪蒸干燥、冷冻干燥 3 种条件下香蕉片的干燥试验及应力分析,发现微波多相闪蒸干燥的香蕉片孔隙率最大、脆性最好。Chaiyo 等^[15]探究了微波频率在干燥过程中的影响,指出物料中微波在横向上具有明显衰减的特点。综上所述,大量研究集中在对多孔物料的模拟研究^[16-19],但在建立模型时简化处理,对微波场的分布均匀化处理,使得研究结果与实际存在较大差别;另外,多数学者只考虑了孔隙率在对多孔果蔬热质传递中的影响,没有对果蔬内部微观细胞变化进行具体分析。本研究以胡萝卜为对象进行微波干燥试验,利用显微镜图形,通过分析热物性参数、多孔介质特性参数及温度变化,研究胡萝卜在强势差下的传热和水分迁移特性,

为果蔬干燥过程中微观结构变化研究以及多孔介质传热传质理论在多孔类型果蔬微波干燥方面的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新鲜胡萝卜采购于农产品批发市场。挑选大小均匀、成熟度一致、无机械损伤并且没有病害的胡萝卜,备用。

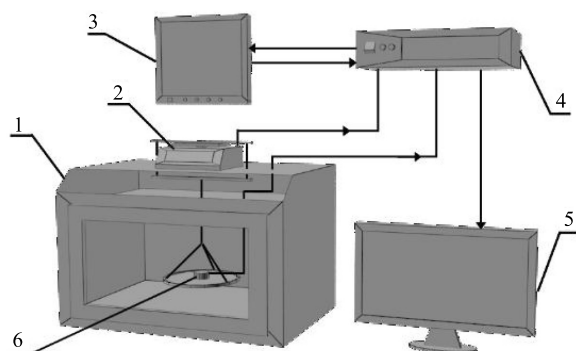
1.2 试验设备

DZGC-2 型微波炉,微波功率为 1 kW,功率可以调节到总功率的 20%、40%、60%、80%、100%,微波频率为 $(2\,450\pm 50)$ MHz。Hot Disk 热常数分析仪,型号为 TPS2500,温度范围为 10~100 K,导热系数范围为 0.005~500.000 W/(m·K),测量误差 $\pm 3\%$,由瑞典 Hot Disk 公司生产。BL-220H 型电子天平,最大量程为 220 g,精度为 0.001 g。安普特公司生产的电子计数秤,型号为 APT417,最大和最小量程分别为 20 kg、0.5 g,允许公差不大于 ± 0.1 g。Bayspec 公司生产的光纤测温装置,最大测量温度为 120 °C,测量探头采用陶瓷材质,探头直径 1.4 mm,测量精度为 0.01 °C。PAL-1 型可溶性固形物测定仪,测量范围 0.1%~53.0%,允许公差不大于 $\pm 0.2\%$ 。德国 Leica 公司生产的 DM2500P 型光学显微镜,目镜放大倍数为 10 倍。

1.3 试验方案

整个试验系统(图 1)分为 3 个部分:微波干燥系统、质量测量系统和温度测量系统。微波干燥系统的主要设备是微波炉和控制面板,通过操作控制面板,实现调节微波功率大小等作用。质量测量系统主由电子秤组成,将电子秤固定于微波炉上方,并在电子秤上放一个铝合金薄板,薄板两侧各拴一根鱼肠线后穿过微波炉外壳,并在线另一侧悬挂另外

一块薄板,从此薄板中心引线穿过微波炉内腔,并悬挂试样托盘,通过这样一个简单的质量传递设计实现干燥过程中试样质量的实时测量。温度测量由光纤测温探头插入到试样内部来实现。试验过程中测得的质量和温度信号,经过数据处理器处理后再传输到计算机中记录保存。在控制面板中的设定数据可以与处理器中的数据进行比较,从而精确控制干燥条件的各个参数。



1:微波炉;2:电子秤;3:控制面板;4:数据处理器;5:计算机;6:胡萝卜试样。

图1 微波干燥试验系统示意图

Fig.1 The diagram of microwave drying system

将胡萝卜样品放至微波炉内托盘中,调节微波功率参数后即可进行干燥试验。在进行温度分布测量试验中,当微波功率较大时,为防止物料温度过高,将温度上限设为 120 ℃,当温度达到上限时将微波功率调至 40%,待温度降低至 60 ℃时调回至原始功率。从物性变化和热量传递 2 个角度进行参数测量。最后根据整个干燥过程中胡萝卜样品内部和表面温度随时间的变化,分析物料干燥热量传递和水分传递的依赖关系。

1.4 物理性质参数测定

1.4.1 含水率 将胡萝卜切成直径 4 cm、厚度 1 cm 的圆柱形试样,根据初始质量和干燥至全干的质量,计算得到新鲜胡萝卜含水率为 83%,并以含水率 60%、45%、30%、15% 为干燥状态点,依据这些状态点的参数分析物性变化。

1.4.2 密度 将不同含水率的胡萝卜切成 4 cm×4 cm×1 cm 的长方体,称量其质量 m 。用量筒量取 V_1 体积的水,将切好的胡萝卜用细绳悬挂并完全浸没到水中,记录此体积为 V_2 。计算胡萝卜密度(ρ),

$\rho = m / (V_2 - V_1)$ 。重复 3 次。

1.4.3 导热系数、比热、热扩散率 调节室内空调温度至 20 ℃。待室内温度稳定后,将调整好的热常数仪 7577 型探头放置在胡萝卜试样切面中心处,用夹具固定探头与试样,保证探头紧贴在试样表面。等待软件界面的数据波动稳定时开始记录,重复测量 3 次取平均值。

1.5 多孔介质特性参数测定

基于干燥过程中细胞形态变化,将胡萝卜视为多孔介质,从多孔介质角度研究胡萝卜试样特性参数(孔隙率、分形维数、比表面积等)变化和微波干燥过程中的细胞变化。胡萝卜样品大小为直径 4 cm、厚度 1 cm。为了简化分析,定义干燥节点为干燥后的质量与初始质量的百分比。由于干燥过程中样品水分不断减少,所以干燥节点可以直接反映干燥过程中样品含水率的变化。干燥节点分别取为 100%、85%、70%、55%、40%,到达节点后,对样品进行切片并借助光学显微镜进行细胞观察。

为了保证试验的精确性,去除胡萝卜样品中心部分,选取半径方向的 4 个位置切片并取样。用光学显微镜获取胡萝卜干燥过程的显微图像,分类整理后利用 Photoshop 软件对图像细胞进行描边处理,并将骨架部分填充为黑色,孔隙部分填充为白色。通过编写程序,利用 Matlab 软件对图像进行二值化处理并计算分形维数(图 2)。将二值化图像导入 Image-Pro Plus 软件,对图像添加标尺,利用软件的测量功能测量骨架面积、孔隙面积、骨架周长及最大、最小孔隙直径,计算孔隙率。

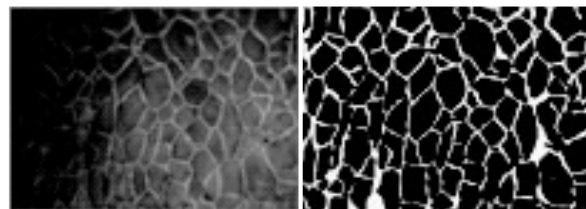


图2 胡萝卜细胞图像二值化

Fig.2 Binarization of carrot cell images

2 结果与分析

2.1 微波干燥过程中胡萝卜细胞显微结构变化

胡萝卜属于肉质根,横向结构可以划分为表皮层、皮层和中柱^[20]。胡萝卜微波干燥至不同含水率

时,不同部位的显微结构变化如图 3 所示。新鲜胡萝卜表皮细胞错落排列,细胞较小,皮层部分细胞形状近似矩形,细胞间隙较小、排列紧密,中心位置细胞体积大且呈椭圆形,各部分细胞饱满,含水量较多。含水率为 60% 时,表皮细胞排列更加紧密,部分细胞失水凹陷,表面出现一层致密的薄膜并紧贴在细胞上;中柱细胞体积明显减小,失水较为严重,有些细胞甚至破裂。干燥至含水率 45% 时,表皮形成的薄膜更加致密,中柱和皮层细胞均出现破裂,但中柱的破裂程度较为严重。含水率 30% 时,皮层处细胞大部分已经失水塌陷,中柱细胞几乎全部塌陷且出现黑色焦糊物质。当含水率降低到 15% 时,表皮部分已难以辨别细胞位置,皮层细胞几乎全部破裂,中柱细胞全部失水变得扁平。

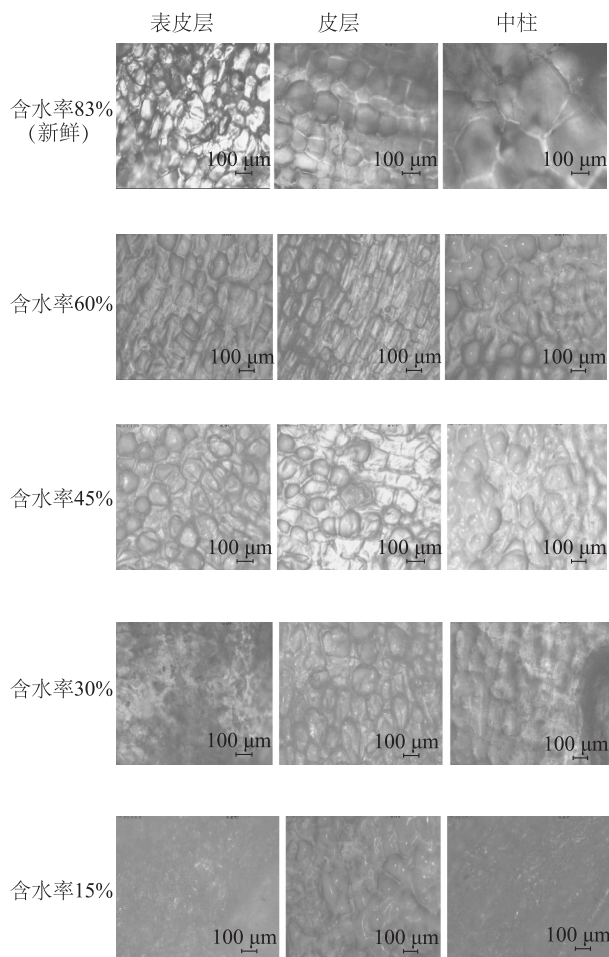


图 3 不同微波干燥时期胡萝卜细胞微观图像

Fig.3 The microscopic image of carrot cells in different microwave drying periods

不同部位物理结构的差异可能会导致水分均匀的物料出现同一层面水分不均的情况^[21]。但在胡萝卜的微波干燥过程中,中心处的失水程度要大于外围,失水速率和破裂程度也更大一些,这与细胞体积大小有关。相同面积下,小细胞拥有更多的数量和更大的比表面积,因此细胞壁能更多地保护细胞。大细胞中水分相对较多,在干燥过程中,水分透过细胞壁流出,由于细胞壁比表面积较小,不足以支撑细胞失水后的凹陷形变,导致中柱细胞破裂严重。相反,外围小细胞拥有较大的比表面积,渗透压力也相对较小,水分在迁移时不足以破坏细胞结构。

2.2 微波干燥过程中胡萝卜物理性质变化

干燥过程中胡萝卜密度先升高后降低,在含水率到达 30% 时,出现小幅度增加的趋势。从总体看,整个干燥过程中密度变化不大,干燥结束时密度为 $1\,018.55\text{ kg/m}^3$,与新鲜时的密度 ($1\,023.00\text{ kg/m}^3$) 相比,仅减小不到 5.00 kg/m^3 。这是因为物料在干燥过程中常常伴随着体积的缩小^[22],再加上失水后质量变小,因此密度变化不大。

干燥过程中,胡萝卜导热系数(λ)、比热(C_v)、热扩散率(a)随含水率变化(图 4)的拟合方程及拟合优度(R^2)分别为: $\lambda = 0.534\,62 - 0.015\,78x + 5.598\,43 \times 10^{-4}x^2 - 4.708\,64 \times 10^{-6}x^3$, $R^2 = 0.968\,66$; $C_v = 0.879\,90 + 0.042\,83x$, $R^2 = 0.960\,26$; $a = 0.301\,33 - 0.002\,35x$, $R^2 = 0.806\,68$ 。由此可见,导热系数基本遵循三次曲线的变化规律,含水率 60% 之前,由于内部失水,部分细胞破裂,原本密集排列的细胞结构变得松散,细胞间的孔道打开,导热性能增强,所以导热系数持续增加;含水率为 60% 时,导热系数达到最大值 $0.58\text{ W/(m} \cdot \text{k)}$,随后导热系数不断减小。水分的减少导致更多细胞破损,胡萝卜组织结构坍塌严重,外观上表现为体积收缩形变,影响了其导热能力;其次,水分减少导致导热介质减少。干燥后期出现焦糊现象和组织碳化,改善了导热性能,因而导热系数趋向于平缓。可以预测,如果继续干燥至完全碳化,导热系数将会显著提升。

比热和热扩散率随含水率变化的一次曲线相关程度较高。干燥过程中温度增加,虽然温度变化对胡萝卜比热有影响,但随着温度升高,比热增加非常缓慢^[23],因此可以忽略温度的影响。比热主要取决于内部水分含量,含水率降低时,比热随之减小。相反,热扩散率随着含水率的降低而增加。

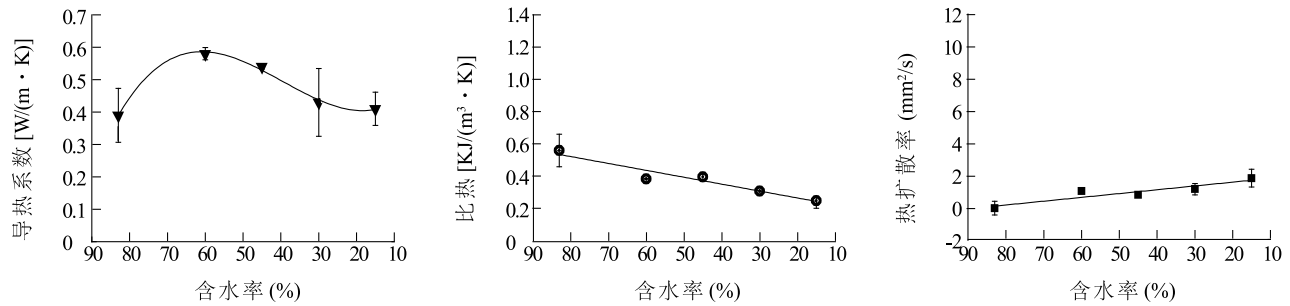


图4 胡萝卜热物性参数随含水率变化曲线

Fig.4 The curve of thermophysical properties of carrot with different water contents

2.3 微波干燥过程中胡萝卜的多孔介质特性

根据公式 $\varepsilon = A_0/A$ (A_0 为孔隙面积, A 为总面积) 计算孔隙率 (ε)。孔隙分形维数采用盒维法^[24-26] 计算。由于孔道变化较为复杂, 所以只对最大和最小孔道直径进行测定, 测定结果见表1和图5。干燥节点 100%、85%、70%、55%、40% 对应的时间分别为 0 s、330 s、510 s、680 s 和 880 s。可以看出, 孔隙分形维数均为非整数, 根据多孔介质分形理论知识可知, 微波干燥中胡萝卜属于多孔介质范畴。孔隙率随着含水率的降低而增大, 干燥结束时约为干燥初期的 2 倍。由于只有物料外表面部分与外界空气直接接触, 因此水分蒸发只能在物料表面进行, 而表面附近的水分也会首先蒸发。随着干燥的进行, 表皮细胞逐渐形成一层致密的薄膜, 只有当内部水分蒸发的蒸汽压力足以透过膜层时, 水分才能传输到外界。在干燥初期, 样品内部含水率较高, 水蒸气压力较大, 由于挤压和水分的流失, 细胞破碎较多, 孔道显著增多, 孔隙复杂程度变大, 随着干燥进行, 含水率逐渐降低, 由于内部孔隙空间的增大和蒸汽压力的逐渐降低, 细胞破损速率也随之降低, 此时内部孔道基本被打通, 孔隙复杂程度降低, 因此孔隙率和孔隙分形维数增加比前期缓慢。微波干燥的整个过程中孔径一直增大, 最大和最小孔径增大至 90 μm 、7 μm 左右, 比初始孔径分别增大了 3.0 倍和 2.3 倍。这是由于失水后, 细胞之间相互粘连, 形成较大范围的细胞粘连区域, 因此细胞排列不再紧密, 另外, 内部蒸汽不能及时扩散到外界, 填充在细胞间的孔道中, 由于压力作用扩大了孔道的范围。

表1 不同干燥节点时胡萝卜孔隙率和孔隙分形维数

Table 1 The porosity and fractal dimension of carrot in different drying nodes

干燥节点 (%)	孔隙率	孔隙分形维数
100	0.228	1.945
85	0.340	2.010
70	0.392	1.962
55	0.411	1.985
40	0.424	1.997

干燥节点为干燥后的质量与初始质量的百分比。

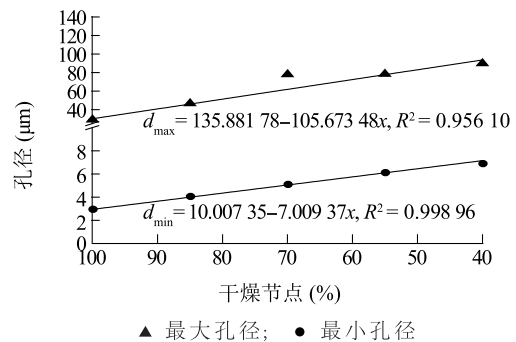


图5 胡萝卜干燥过程中孔径随干燥节点的变化

Fig.5 The changes of pore diameter of carrot in different drying nodes

干燥过程中, 部分细胞逐渐破碎, 孔道面积逐渐增大, 细胞比表面积(细胞周长与细胞面积的比值)呈现降低的趋势, 总换热面积减小(图6)。胡萝卜干燥至干燥节点 70% 后, 比表面积变化不到 0.01, 说明胡萝卜内外部压力和热量传递基本平衡。

2.4 微波干燥过程中胡萝卜温度变化规律

图7显示微波干燥过程中, 不同功率下, 胡萝卜表面温度和中心温度随时间的变化规律。可以看出, 干燥初始阶段温度迅速升高, 在 60% (0.6 kW)、

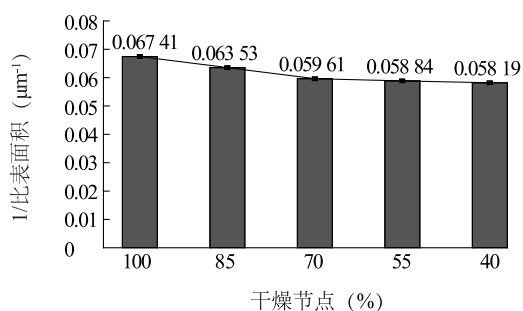


图6 胡萝卜比表面积随干燥节点的变化

Fig.6 The changes of specific surface area of carrot in different drying nodes

80% (0.8 kW)、100% (1.0 kW) 微波功率下,胡萝卜中心温度升高到 100 °C 的时间分别为 150 s、60 s、40 s,这说明微波功率越大,物料初始升温速度越快,而此时的热量也主要用于提升物料内部温度。随后出现短暂的温度恒定阶段,这个阶段的热量主要用于水分的蒸发,因为是相变阶段,故物料温度几乎没有变化。物料对微波的吸收主要取决于内部水分,随着干燥时间的推进,内部含水量也显著降低,胡萝卜对微波的吸收能力减小,导致生成的热量减少,但热量迁移和内部的对流换热并没有停止,所以在 250 s 到 450 s 之间出现温度下降阶段。而在 200 s 到 450 s 之间,80% 和 100% 微波功率下连续出现 2 次温度骤降与骤升,最大温差接近 50 °C,这是由于初始微波功率较大,物料温度在 200 s 时已经接近 120 °C,为了避免测温探头损坏,将微波功率下调至 40%,此时物料内部水分吸收的微波能量显著降低,产生的热量随之降低。当物料内部水分汽化需要的热量大于吸收微波所产生的热量时,外在表现为温度降低。当温度降低至 60 °C 左右时,升高功率至初始状态,物料吸收的能量增加,并及时补充水分蒸发消耗的热量,使物料温度升高,这个温度升高阶段和干燥初始温度升高阶段基本相同。所以 80% 和 100% 功率下 2 次较大降温主要是由功率降低至 40% 导致的。450 s 之后,水分传递近乎停止状态,温度梯度变小,各功率下胡萝卜温度基本已经超过 100 °C,温度小幅上升。当内部水分降至 40% 时,由于内部焦糊物质的形成,导热能力得到增强,热扩散率的增大表明内部温度更容易趋向一致,此时热量的获得与热量迁移、内部换热达到平衡,所以温度较为平稳。对比胡萝卜内外温度变化可知,干燥初期内部温度

相对较高,热量主要是从内向外迁移,与水分传输的方向一致。干燥后期,含水率、内部孔道和微波功率等因素均出现变化,此时内外温度差别变得较为复杂。

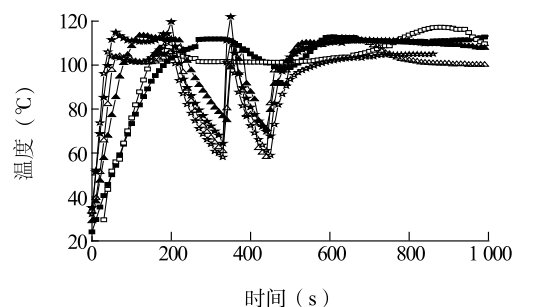


图7 不同微波功率下胡萝卜表面和中心温度变化

Fig.7 The surface and center temperature changes of carrot under different microwave power

3 结论

从胡萝卜微波干燥的热物理性质参数和多孔介质特性参数角度分析,主要得到以下结论:(1)胡萝卜表层细胞较小,中部细胞较大。微波干燥过程中,表面细胞逐渐形成致密的薄膜,阻碍水分散失,内部部分细胞由于失水和受压坍塌破裂。干燥至含水率为 30% 时,内部出现轻微的焦糊现象,继续干燥至 15% 时,皮层细胞几乎全部破裂,内部组织碳化严重。(2)水分的减少和体积的缩小导致在整个试验过程中胡萝卜密度发生波动,但整体变化不大,仅减小了不到 5.00 kg/m³。导热系数随含水率的变化基本符合三次曲线,先增大后减小,在含水率为 60% 时出现较小峰值,然后由于细胞破裂和含水率降低导热能力减小,随着焦糊物质和组织碳化的形成,导热能力得到改善。另外,热扩散率随含水率的减小而增大,比热与之相反,呈现线性下降趋势。(3)胡萝卜的分形维数为非整数,可以作为多孔介质分析胡萝卜热量水分传递特性。孔隙率随干燥的进行逐渐增大,干燥结束时约为干燥初期的 2 倍。由于细胞破裂和孔道直径的变化,干燥质量为初始质量的 40% 时,最大和最小孔径分别增大到新鲜状态的 3.0 倍和 2.3 倍左右,孔隙复杂程度不断增大,孔隙分形维数也随之增大。比表面积随含水率下降缓慢

降低,干燥后期,几乎恒定在 0.58 左右。(4)微波干燥初期,温度升高速率与微波功率呈正相关,100%(1.0 kW)功率下升高至 100℃仅需要 40 s。整个干燥过程温度变化主要分为升温段、恒温段、降温段和再次恒温段。热量迁移和水分迁移方向一致,均为从内到外。干燥初期,内部温度较高,但在干燥后期表面温度和中心温度的大小关系变得更为复杂。

参考文献:

- [1] 于蒙杰,张学军,牟国良,等.我国热风干燥技术的应用研究进展[J].农业科技与装备,2013(8):14-16.
- [2] 安瑜.果蔬干燥新技术及存在的问题[J].食品工程,2013(2):9-11.
- [3] GUNGOR A, TSATSARONIS G, GUNERHAN H, et al. Advanced exergoeconomic analysis of a gas engine heat pump (GEHP) for food drying processes [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 91:132-139.
- [4] 林 姜,邓彩玲,徐玉娟,等.不同高跟热泵干燥条件对龙眼干燥品质的影响[J].食品科学,2014,35(4):30-34.
- [5] 崔 莉,宋祥云,杜利平,等.黄芩红外干燥特性及动力学模型研究[J].江苏农业科学,2017,45(20):216-221.
- [6] 胡晗艳,胡云峰,王 娜,等.真空冷冻干燥黑大蒜粉的加工工艺[J].中国调味品,2016,41(12):74-76.
- [7] 张秒高,张平湖,陈忠正.真空冷冻干燥技术在茶叶加工中的研究和应用进展[J].安徽农业科学,2014,42(30):10679-10680.
- [8] 任红兵.真空冷冻干燥技术及其在中药领域的应用[J].装备应用与研究,2016(20):12-21.
- [9] 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.
- [10] 尹晓峰,杨明金,李光林,等.稻谷薄层热风干燥工艺优化及数学模型拟合[J].食品科学,2017(8):198-205.
- [11] 李 靖.果蔬组合干燥试验研究及设备优化[D].西安:陕西科技大学,2016.
- [12] 于静静,毕金峰,丁媛媛.不同干燥方式对红枣品质特性的影响[J].现代食品科技,2011,27(6):610-614.
- [13] PITCHAI K, CJEN J, BIRLA S, et al. A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: Development and validation [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 60-71.
- [14] MONTEIRO R L, CARCIOFI B A M, LAURINDO J B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 178:1-11.
- [15] CHAIYO K, RATTANADECHO P. Numerical analysis of heat-mass transport and pressure buildup of unsaturated porous medium in a rectangular waveguide subjected to a combined microwave and vacuum system [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65:826-844.
- [16] 卜晓东,沈 妍,沈旭婷,等.三维多孔介质的流动传热模拟[J].企业技术开发,2016,35(23):80-82.
- [17] AHMADPOUR M, SIAVASHI M, DORANEHGARD M H. Numerical simulation of two-phase flow in fractured porous media using streamline simulation and IMPES methods and comparing results with a commercial software [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(10):2630-2637.
- [18] BANDMAN O. Using cellular automata for porous media simulation [J]. The Journal of Supercomputing, 2011, 57(2):121-131.
- [19] 杨屹立.甘蓝型油菜籽热风干燥传热传质研究[D].重庆:西南大学,2012.
- [20] 姜立娜.萝卜肉质根形成性状的分子生物学基础[D].南京:南京农业大学,2012.
- [21] 徐建国,徐 刚,张绪坤,等.利用核磁共振成像技术分析胡萝卜干燥过程中内部水分传递[J].农业工程学报,2013,29(12):271-276.
- [22] KERDPIBOON S, DEVAHASTIN S, KERR W L. Comparative fractal characterization of physical changes of different food products during drying [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 83(4):570-580.
- [23] 张 敏,钟志友,杨 乐,等.果蔬比热容的影响因素[J].食品科学,2011,32(11):9-13.
- [24] 王东生,曹 磊.混沌、分形及其应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1995.
- [25] LIU Y, CHEN L, WANG H, et al. An improved differential box-counting method to estimate fractal dimensions of gray-level images [J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2014, 25(5):1102-1111.
- [26] LIU Y, LIN J, CHEN K. A stable algorithm of box fractal dimension and its application in pore structure [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2015, 44(4):800-804.

(责任编辑:张震林)