

胡萝卜片微波-热风滚动床干燥物料特性研究

吕为乔¹ 宿佃斌¹ 王天行¹ 赵丹² 马季威² 李栋¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为了改善微波干燥果蔬的物料特性,通过搭建的微波-热风滚动床干燥(Microwave-hot-airflow rolling drying, MARD)试验台,研究了胡萝卜片在MARD不同干燥阶段的热像变化,通过低场核磁共振分析与成像(Low-field nuclear magnetic resonance analysis and imaging, NMR/MRI)研究了胡萝卜片在MARD不同干燥阶段水分状态和水分布,试验还测得在对应干燥阶段胡萝卜片介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 的变化规律。通过分析物料的脱水过程和干燥品质发现,MARD过程干燥速度逐渐降低,物料温度分布均匀,随着干燥进行温度稳定在设定范围;NMR波谱下的水分信号量逐渐降低且主峰向左移,水分的活跃程度降低;MRI信号显示,MARD干燥过程中水分分布均匀;随着MARD进行,物料介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 显著降低,边缘部位介电损耗比心部低,随着干燥的进行,这种差别逐渐减小,说明由介电特性差异导致的微波干燥不均的影响在MARD过程中减弱。

关键词: 胡萝卜片;微波干燥;滚动;热风;介电特性

中图分类号: TS255.36; TQ028.6+77 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)06-0352-07

Drying Characteristics of Carrot Slices during Microwave – Hot-airflow Rolling Drying

LÜ Weiqiao¹ SU Dianbin¹ WANG Tianxing¹ ZHAO Dan² MA Jiwei² LI Dong¹

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

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the drying quality of fruit and vegetables, microwave-hot-airflow rolling drying (MARD) device was developed, using which the thermal image of carrot slices during drying was measured. In addition, the moisture state and distribution in different drying stages were detected with low-field nuclear magnetic resonance analysis and imaging (NMR/MRI). The dielectric constant ϵ' and dielectric loss factor ϵ'' of carrot slices in the corresponding drying stage were also measured. The dehydration process and drying quality of the materials were analyzed by comprehensive indexes, and the results showed that the drying speed of carrot slices was decreased gradually, and the drying temperature was distributed evenly, and floated in the set range. In NMR spectrum, the water signal was decreased gradually and the main peak was shifted to the left, when the water was changed to the direction of compact combination with dry matter. The MR signal showed that the water distribution was uniform during MARD. With the development of MARD, the ϵ' and ϵ'' of materials were decreased significantly, and the dielectric loss at the edge was lower than that at the core. With the drying processing, the difference was decreased, indicating the effect of non-uniform microwave drying caused by the difference of dielectric properties would be weakened in the MARD process. The research provided a reference for improving the efficiency and quality of microwave drying of fruits and vegetables.

Key words: carrot slices; microwave drying; rolling; hot-airflow; dielectric properties

收稿日期: 2018-11-21 修回日期: 2019-01-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0400900、2018YFD700201)和中国农业大学基本科研业务费专项资金项目(2018QC013)

作者简介: 吕为乔(1984—),男,讲师,博士,主要从事农产品干燥技术与装备研究,E-mail: lvweiqiao@cau.edu.cn

通信作者: 李栋(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工物料特性研究,E-mail: dongli@cau.edu.cn

0 引言

微波是波长在 0.001 ~ 1 m 之间的电磁波,其热效应最早发现于 20 世纪 40 年代,随着大功率磁控管技术的成熟,几种固定波段的微波逐渐被应用到农产品干燥领域^[1-2]。微波干燥作为新型物理场干燥技术,其穿透能力强、干燥效率高,在果蔬干燥领域得到广泛研究和关注^[3]。然而,微波的能量随着穿透深度的增加逐渐减小,果蔬物料自身介电特性和吸收微波的能力参差不齐,干燥不均成为微波干燥的主要问题^[4]。使物料保持运动状态,并与传统手段相结合是解决微波干燥不均问题的主要思路。目前,微波干燥主要分为微波喷动床干燥、微波振动床干燥和微波滚动床干燥,排除水汽的主要方式是热风或者真空作用。华盛顿州立大学将微波和热风喷动干燥结合在一起,改善了蓝莓微波干燥的均匀性^[5]。文献[6-8]研制了负压微波喷动干燥装备,使物料脉冲式间歇喷动,并通过真空泵除水汽,该装备既提高了干燥均匀性,又对物料产生了膨化效应,在开发休闲食品方面有相关研究报道。在振动床方面,文献[9-10]研发了微波热风流态化干燥技术,对提高苹果丁干燥均匀性效果显著。微波-热风滚动床干燥(Microwave-hot-airflow rolling drying, MARD)是一种新的干燥模式,目前有少量的研究报道。文献[11-12]进行了水平转盘和转鼓微波干燥黄豆的均匀性试验,发现转鼓式结构中物料微波干燥的均匀性较好。

通过矢量网络分析仪对物料介电特性进行分析、使用低场核磁共振分析及成像(Low-field nuclear magnetic resonance analysis and imaging, NMR/MRI)方法对物料的水分状态和分布进行分析是目前微波干燥常用的研究方法,在微波干燥蘑菇、莴苣、马铃薯等研究中多有报道^[13-17]。本文设计聚四氟乙烯材料的腰鼓形滚动床,使微波与热风系统相结合,将热风直接馈入到物料表面,并通过红外传感器和可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)调控微波功率,以介电特性分布不均且含水率较高的胡萝卜片为原料,研究高含水率果蔬微波干燥过程的温度环境、水分迁移环境以及微波作用下物料的介电特性变化,以期提升果蔬物料的微波干燥品质。

1 材料与方法

1.1 主要原料

新鲜胡萝卜(*Daucus carota* L. var. *sativa* Hoffm.),购于本地市场,所有试验原料来自同一批

次,无虫害、无机械损伤,在 4℃ 温度冷藏备用。用 105℃ 电热鼓风法测得本批次胡萝卜湿基含水率为 90.50%,干基含水率为 9.52%。

1.2 仪器与设备

课题组与南京澳润微波科技有限公司联合研制的 ORW2S-3000R 型热风微波滚动床干燥机原理如图 1 所示。采用变频微波源,功率 100 ~ 2 000 W 连续可调。干燥腔体为多模不锈钢微波谐振腔,尺寸:650 mm × 500 mm × 500 mm。腰鼓形滚筒转速可调,调速范围广,转速为 1 ~ 10 r/min,传动装置采用齿轮传动,传动比准确,齿轮采用聚四氟乙烯材料制作,确保对微波干燥过程无干扰。热风功率 3 000 W,连续可调,最大风量 408 m³/h,最大风压达到 1 100 Pa,热风温度从 20℃(室温)到 180℃ 可调。为了控制热风循环量,在进风口设计了可调节风门。在干燥仓侧门上有红外传感器,实时监测滚动床上物料的温度,若温度超过设定值,微波源停止工作。设定间歇时间后,微波源继续开启。监测温度有一定的误差,物料在设定温度附近浮动。本试验利用热像仪系统分析干燥过程的热环境。

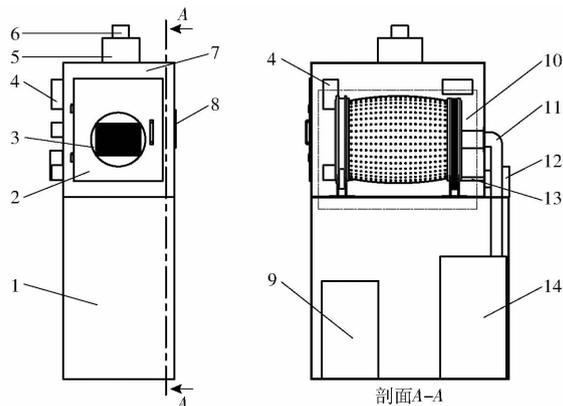


图1 微波-热风滚动床干燥机原理图

Fig. 1 Schematic of MARD device

1. 第二箱体 2. 侧开门 3. 观察窗 4. 微波源 5. 排风机
6. 排风管 7. 第一箱体 8. 触控屏 9. 热风管 10. 滚动床装置
11. 热风进口 12. 电动机 13. 传动轴 14. 热风机

此外,主要分析仪器有 MiroMR20-030V-I 型低场核磁共振分析仪(纽迈电子科技有限公司)、FLIR E40 型红外热像仪(前视红外热像系统贸易有限公司)、HP-200 型测色色差仪(新锐仪器仪表有限公司)、E5061 型矢量网络分析仪(安捷伦技术有限公司)等。

1.3 试验方法

将准备好的新鲜胡萝卜原料清洗,沥干水分后利用专用切片装置切片,厚度为(5 ± 0.2) mm。每组物料 800 g,置于 MARD 转动床体中,同时开启热风 and 微波。风量为 100 m³/h,入口热风温度设为

65℃。除绘制干基含水率和干燥时间关系曲线以外,微波功率设为800 W,物料最高温度设为70℃。当检测到物料的最高温度超过设定值时,微波源自动停止工作,经过设定的间歇时间(20 s)后再继续工作,确保传感器监测的最高温度不超过设定值。干燥终点时,物料干基含水率控制在8%以下^[16-18]。

(1) 干基含水率-干燥时间关系曲线

准备胡萝卜片9组,每组物料800 g,微波功率分别为600、800、1 200 W,对应的热风入风口最高温度为60、65、70℃,物料最高温度依次设为65、70、75℃,测量干基含水率和干燥时间关系曲线。为了表征试验误差,每组试验做3组重复。试验每10 min对物料称量一次,直至干燥终点。为保证干燥后期品质,最后一阶段通过经验观察并多次测量得到,干燥时间和干燥曲线为近似结果。

(2) 热像分析

温度监测对表征干燥工艺具有重要作用,设备自身传感器监测的是滚动床内部某一点的温度。为了进一步研究物料在MARD过程的温度场分布,试验利用FLIR E40型红外热像仪测量胡萝卜片在干燥开始阶段(0 min)、中间阶段(40 min)和干燥后期(80 min)的热像图,并观察热像图中最高温度与设定最高温度的关系,红外热像图反映了物料在微波干燥过程中温度的均匀度,对控制干燥过程和干燥品质有重要作用。

(3) 水分分布状态分析

质子在磁场中形成核磁能级,在垂直于磁场的方向以脉冲的形式照射电磁波,部分低能态的氢质子跃迁到高能态^[15]。如果停止激发脉冲,氢质子将返回到原来的低能态,氢质子在核系统内部释放能量的过程称为自旋-自旋弛豫,弛豫时间用 T_2 表示。 T_2 反映了氢质子所处的化学环境,与氢质子所受的束缚力和自由度有关。氢质子受束缚力越大或自由度越小,弛豫时间 T_2 越短,在 T_2 谱上峰位置越靠左;反之则弛豫时间 T_2 越长,在 T_2 谱上峰位置越靠右^[19]。将弛豫时间对应的信号作为空间坐标进行区分,得到二阶张量,利用这个信息得到核磁共振图像^[20]。试验利用NMR/MRI测量胡萝卜片在不同干燥阶段关于弛豫时间 T_2 的信号量曲线及关于MRI的空间分布,分析水分分布状态的变化。

(4) 介电特性分析

微波干燥是利用水分子在微波场下的高速运动来产生水分蒸发的能量,物料吸收微波的多少,与自身的介电特性密切相关^[21-22]。宏观上的介电特性可以用介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 分析。其中

ϵ' 反映了材料在电磁场中存储电能的能力, ϵ'' 影响电磁能向热能的转化^[23]。胡萝卜片在单纯的微波干燥中,心部易褐变,四周干燥速度慢,说明物料在微波干燥中介电特性分布不均。为了研究胡萝卜片在微波干燥过程的介电特性分布变化,试验利用矢量网络分析仪,测量不同干燥阶段心部和边缘两个部位物料的介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 。为了表征测量误差,每个阶段抽样5次,测定平均值和标准差。

(5) 脱水产品的色泽变化

采用HP-200型测色色差仪测定胡萝卜片脱水产品的色泽品质变化。其中 L^* 为明度指数, a^* 、 b^* 为彩度指数。该描述方法用的是CLELAB色度空间法,颜色在 L^* 、 a^* 、 b^* 3个不同的坐标轴间取值,具体色度趋向如表1所示^[24]。胡萝卜片物料特性分布不均,心部为淡黄色,边缘为红褐色。利用色差仪测量干燥胡萝卜片不同部位色泽的变化,进而分析MARD工艺对胡萝卜片感官品质的影响。为了表征测量误差,每个阶段抽样5次,测定平均值和标准差。

表1 色泽参数 L^* 、 a^* 、 b^* 的物理意义

Tab. 1 Physical meaning of color parameters L^* , a^* and b^*		
色差因素	正向	负向
L^*	偏浅	偏深
a^*	接近红色	接近绿色
b^*	接近黄色	接近蓝色

2 结果与讨论

2.1 干基含水率-干燥时间关系

胡萝卜片分3组,每组使用物料800 g,微波功率600、800、1 200 W,物料最高温度65、70、75℃,测量干基含水率和干燥时间关系曲线。当检测到物料的最高温度超过设定值时,微波源停止工作,经过设定的间歇时间后再继续工作。为了监测MARD过程胡萝卜片干燥质量的变化规律,得到物料干基含水率-干燥时间的关系曲线,如图2所示。由图2可以发现,在MARD干燥过程中,物料在初始40 min内干燥速度较快,在干燥后期干燥速度较慢。其中在干燥40~50 min阶段,干燥速度明显降低。说明胡萝卜片在干燥后期,随着大部分水分的蒸发,物料吸收微波的效率较低,干燥速度较慢。在干燥时间上,低功率组(600 W和最高温度65℃)干燥时间为120 min,高功率组(1 200 W和最高温度75℃)干燥时间为70 min。干燥功率与干燥速度呈正相关。为保证干燥后期不被糊化,最后一阶段(最后10~

20 min) 通过经验观察并多次测量得到,干燥时间为近似结果。

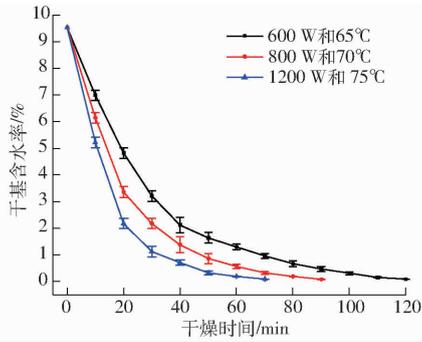


图 2 胡萝卜片在 MARD 过程干基含水率-干燥时间关系曲线

Fig. 2 Relationship diagram between dry base moisture content and drying time of carrot slices during MARD

2.2 MARD 过程的热像分布

由于红外传感器监测物料温度的对象是一个点,物料在 MARD 过程中不断滚动,导致干燥过程物料的温度有一定的误差。与此同时,红外传感器不能完全真实反映物料的温度分布。本试验采用热红外成像仪对干燥仓体、干燥前期(0 min)、干燥中期(40 min)和干燥后期(80 min)的物料进行分析,得到不同干燥阶段的热像分布图,如图 3 所示。由图 3 可以发现,MARD 开始阶段物料含水率较高,并在微波和热风的协同作用下快速蒸发,物料在开始阶段并未达到最高温度。随着干燥的持续进行,物料温度逐渐升高。在干燥后期,物料达到最高温度,微波源开始间歇工作,物料达到稳定的温度。在 MARD 过程中,物料不停地翻转,干燥温度分布均

匀。相对于传统的微波干燥,热风 and 滚动床的结合有效地实现了微波干燥过程胡萝卜片干燥温度的均匀稳定^[25]。随着含水率降低物料体积和质量均变小,红外传感器监测温度存在一定的误差,后期热像局部温度超过设定值 70℃ 属于合理范围。微波功率在高温环境下会不断启停,由于干燥后期物料温度升高,微波间歇工作。该过程与干基含水率-干燥时间曲线中,后期物料降水速度变慢的结果相吻合。

2.3 水分状态

试验对不同干燥阶段胡萝卜片取样分析,测得干燥 0、40、80 min 物料在 NMR 下的横向弛豫时间 T_2 ,不同弛豫时间对应的信号量如图 4 所示。信号量 A_2 ,又称为总的信号幅度,它反映在某一状态下氢质子的多少,为无量纲指标,在农产品干燥中信号量的信息主要来源于水分^[26]。在信号量与 T_2 的关系曲线中,右侧倾向于自由水,左侧倾向于结合水,中间为不易流动水。对于 3 种水分的划分,目前在弛豫时间上尚没有具体的量化指标^[14-27]。在图 4 的信号量与 T_2 的关系曲线中发现,氢质子在 NMR 中的横向弛豫时间在 1 000 ms 以内,信号量在横坐标的对数曲线上波峰变化规律显著。在开始阶段,NMR 图谱的主峰值靠右,绝大多数氢质子的弛豫时间较长,说明新鲜物料的自由水含量较高。随着干燥的进行,在 MARD 干燥 40 min 后,主峰值减小,位置向左移动,说明物料的自由水转变为不易流动水。在干燥后期以结合水的状态为主。NMR 图谱表明,随着干燥的进行,水分向更难以蒸发的方向转变,同

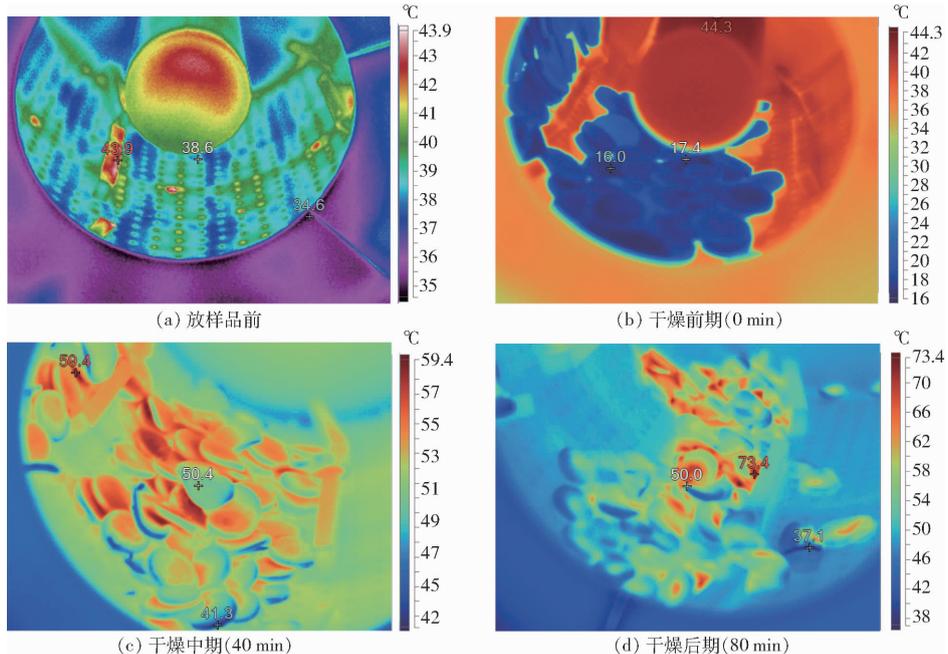


图 3 不同 MARD 阶段胡萝卜片的红外热像图

Fig. 3 Infrared thermographs of carrot slices at different MARD stages

时造成了后期干燥的困难和干燥速度的变慢。NMR 图谱结果与 MARD 后期干燥速度变慢、干燥热像图中温度升高的结果相一致,共同表征了水分

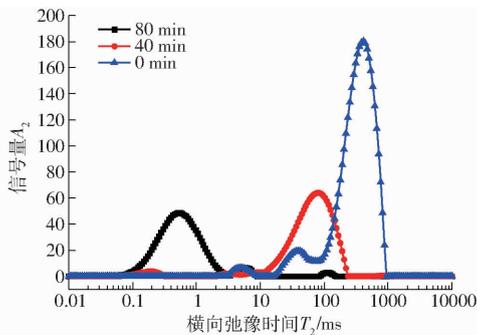


图4 不同 MARD 干燥阶段胡萝卜片的 NMR 信号量-弛豫时间关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of NMR signal amplitude and relaxation time of carrot slices at different drying stages of MARD

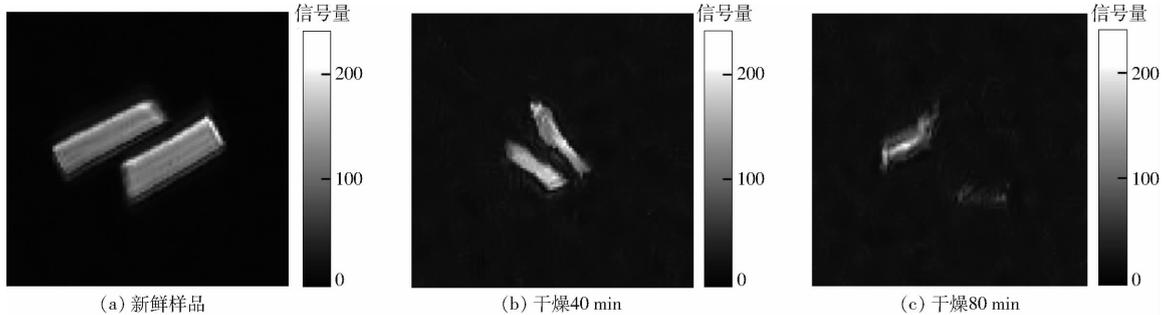


图5 胡萝卜片 MRI 断面扫描结果

Fig. 5 Cross-sectional scanning results of MRI of carrot slices

2.4 介电特性

介电特性与物料吸收微波的过程密切相关,胡萝卜片心部和边缘介电特性存在一定的差异,胡萝卜片在 MARD 过程中,介电特性不断变化。试验测得了 MARD 干燥 10、20、30、40、50、60、70、80 min 胡萝卜片心部和边缘介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 的变化,测量结果为无量纲指标,如图 6 所示。结果发现,随着干燥的进行,胡萝卜片的含水率降低,边缘介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 显著降低。比较而言,介电常数 ϵ' 降低幅度更大,说明物料储能的能力减弱,导致干燥后期微波干燥的能效降低。对于不同区域来说,边缘部位介电常数较高,但介电损耗较低,说明微波储能的能力较高,但向内能转化的能力较低。这一结果造成心部更容易吸收微波能促进水分蒸发。但随着干燥的进行,心部和边缘的这种差别逐渐减小,宏观上表现为微波能将集中到含水率高的位置。随着干燥的进行,物料在干燥均匀性上具有自我调整的能力。同时,适当的进行翻滚,并施加足够强度的热风,能调整介电特性,避免干燥不均造成的品质劣变。

流动特性。

MRI 可以提供自旋的空间信息,得到质子在物料空间的分布。样品复杂结构的清晰度主要受组分中含水率的影响。图像中的亮度越高,说明氢质子的状态越活跃,在胡萝卜片脱水过程中,表现为水分的多少及其活跃程度。试验测得 MARD 干燥 0、40、80 min 物料的 MRI 图,经过统一映射,得到的结果如图 5 所示。所有样品在三维空间内部切分扫描。可以发现,新鲜的胡萝卜片内部水分丰富且分布均衡。随着干燥的进行,含水率逐渐降低。在干燥后期,水分出现轻微的干燥不均现象,由于水分信号非常低,结合实际品质结果在可接受的范围。MRI 信号显示,胡萝卜片在热风微波滚动床协同作用下,干燥过程不均现象不明显。与文献[28]报道的静态物料微波干燥相比,热风 and 床体的滚动缓解了胡萝卜片微波干燥不均的问题。

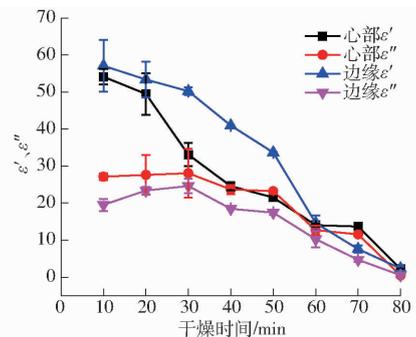


图6 MARD 过程中胡萝卜片心部和边缘介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 变化曲线

Fig. 6 Changing curves of dielectric constant ϵ' and dielectric loss factor ϵ'' in core and edge of carrot slices during MARD

2.5 色差和感官品质

新鲜胡萝卜片和脱水后胡萝卜片的色差如表 2 所示。随着 MARD 干燥的完成,胡萝卜片的 L^* 值显著减小,在外观上表现为明度减小,在彩度上, a^* 和 b^* 变小,物料更接近于红色和黄色。相对于新鲜胡萝卜的色差 ΔE ,心部比边缘变化值更大。产品的色泽影响到产品的感官品质。试验尽可能减小 ΔE ,以接近物料原有的颜色。

表2 胡萝卜片 MARD 干燥前后的色泽指标

Tab.2 Chromatic aberration of carrot slices before and after MARD drying

测试部位	L^*	a^*	b^*	ΔE
新鲜胡萝卜片心部	43.89	13.44	20.60	—
脱水胡萝卜片心部	7.13	5.49	20.20	22.84
新鲜胡萝卜片边缘	46.59	26.05	36.23	—
脱水胡萝卜片边缘	-1.48	1.87	16.84	16.92

3 结论

(1) MARD 过程干燥速度逐渐降低,物料温度分布均匀,随着干燥的进行温度稳定在设定范围。相对于物料静止的微波干燥,热风 and 滚动床的结合实现了微波干燥过程胡萝卜片干燥温度的均匀稳定。

(2) NMR 波谱下的水分信号量逐渐降低且主峰向左移,水分向与干物质结合紧凑的方向转化, MRI 信号显示, MARD 干燥过程中水分分布均匀。相对于物料静止的微波干燥, MARD 过程水分状态变化较快,实现了胡萝卜片的均匀干燥。

(3) 随着 MARD 进行,物料介电常数 ϵ' 和介电损耗因子 ϵ'' 显著降低,心部介电损耗比边缘部位高。随着干燥的进行,这种差别逐渐减小,微波对水分的吸收具有自我调整的能力。

(4) 经过 MARD 脱水,胡萝卜片色泽变深,在彩度上,物料更接近于红色和黄色。相对于新鲜胡萝卜的色差 ΔE ,心部比边缘变化值更大,应尽可能减小物料色差,以保持物料原有的颜色。

参 考 文 献

- [1] TANG J. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(8): 1776 - 1793.
- [2] 苏慧, 郑明珠, 蔡丹, 等. 微波辅助技术在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 165 - 167. SU Hui, ZHENG Mingzhu, CAI Dan, et al. Research progress on application of microwave-assisted heating technology in food industry[J]. Food and Machinery, 2011, 27(2): 165 - 167. (in Chinese)
- [3] ZHANG M, TANG J, MUJUMDAR A, et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(10): 524 - 534.
- [4] FENG H, TANG J, CAVALIERI R P. Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature[J]. Journal of Electronic Packaging, 2002, 45(1): 129 - 135.
- [5] FENG H, TANG J, MATTINSON D S, et al. Microwave and spouted bed drying of frozen blueberries: the effect of drying and pretreatment methods on physical properties and retention of flavor volatiles[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1999, 23(6): 463 - 479.
- [6] YAN W, ZHANG M, HUANG L, et al. Study of the optimisation of puffing characteristics of potato cubes by spouted bed drying enhanced with microwave[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(8): 1300 - 1307.
- [7] WANG Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Study of drying uniformity in pulsed spouted microwave-vacuum drying of stem lettuce slices with regard to product quality[J]. Drying Technology, 2013, 31(1): 91 - 101.
- [8] WANG Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Microwave-assisted pulse-spouted bed freeze-drying of stem lettuce slices—effect on product quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(12): 3530 - 3543.
- [9] 韩清华, 谢时军, 李树君, 等. 多热源热风微波流态化干燥试验台[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 210 - 214. HAN Qinghua, XIE Shijun, LI Shujun, et al. Multiple-sources microwave combining with hot-air fluidized drying test device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 210 - 214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140235&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.035. (in Chinese)
- [10] 吕为乔, 王也, 韩清华, 等. 微波流态化干燥姜片工艺与品质分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 231 - 235. LÜ Weiqiao, WANG Ye, HAN Qinghua, et al. Process and quality of ginger slices microwave-fluidization drying[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 231 - 235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140837&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.037. (in Chinese)
- [11] 王瑞芳, 李占勇. 水平转盘与转鼓微波干燥均匀性的实验研究[J]. 天津科技大学学报 2009, 24(4): 58 - 61. WANG Ruifang, LI Zhanyong. Experimental study on microwave drying uniformity in rotating turntable and rotary drum[J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2009, 24(4): 58 - 61. (in Chinese)
- [12] WANG R, LI Z, SU W. Comparison of microwave drying of soybean in static and rotary conditions[J]. International Journal of Food Engineering, 2010, 6(2): 1 - 10.
- [13] 段续, 闫莎莎, 曾凡莲, 等. 基于介电特性的白蘑菇微波冻干传热传质模拟[J]. 现代食品科技, 2016, 32(6): 177 - 182. DUAN Xu, YAN Shasha, ZENG Fanlian, et al. Drying temperature characteristics and fissuring law of paddy rice kernel [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(6): 177 - 182. (in Chinese)
- [14] WANG Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effect of blanching on microwave freeze drying of stem lettuce cubes in a circular conduit drying chamber[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(2): 177 - 185.
- [15] 李冰, 尹青, 殷丽君, 等. 香菇热风微波流态化的干燥特性与机理分析[J]. 中国食品学报, 2015, 15(5): 134 - 139.

- LI Bing, YIN Qing, YIN Lijun, et al. Studies on characteristics and mechanism of hot air-microwave fluidized drying of lentinusedodes [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(5): 134 – 139. (in Chinese)
- [16] ROKNUL A S M, ZHANG M, WANG Yuchuan. 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.
- [17] 朱文学, 尤泰斐, 白喜婷, 等. 基于低场核磁的马铃薯切片干燥过程水分迁移规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 364 – 370.
- ZHU Wenxue, YOU Taifei, BAI Xiting, et al. Analysis of moisture transfer of potato slices during drying using low-field NMR [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 364 – 370. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181243&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.043. (in Chinese)
- [18] WANG R, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Microwave freeze-drying characteristics and sensory quality of instant vegetable soup [J]. Drying Technology, 2009, 27(9): 962 – 968.
- [19] 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.
- XU Jianguo, XU Gang, ZHANG Xukun, et al. Moisture transport in carrot during hot air drying using magnetic resonance imaging [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 271 – 276. (in Chinese)
- [20] JIN X, VANDER S R, GERKEMA E, et al. Moisture distribution in broccoli: measurements by MRI hot air drying experiments[C]//Procedia Food Science. 11th International Congress on Engineering and Food (ICEF11), 2011: 640 – 646.
- [21] LIU Z, ZHANG M, WANG Y. Drying of restructured chips made from the old stalks of *Asparagus officinalis*: impact of different drying methods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture 2015, 96(8): 2815 – 2824.
- [22] 朱新华, 郭文川. 影响食品射频-微波介电特性的因素及影响机理分析[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 410 – 414.
- ZHU Xinhua, GUO Wenchuan. A review of affecting factors and their mechanisms of the radio frequency-microwave dielectric properties of foods [J]. Food Science, 2010, 31(17): 410 – 414. (in Chinese)
- [23] 王玉川. 苜蓿颗粒负压微波高效节能均匀干燥机理及工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- WANG Yuchuan. Studies on mechanism and technology of negative pressure drying assisted by microwave for stem lettuce cubes with efficiency, energy-saving and uniformity[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013. (in Chinese)
- [24] SU Y, ZHANG M, ZHANG W, et al. Application of novel microwave-assisted vacuum frying to reduce the oil uptake and improve the quality of potato chips[J]. LWT—Food Science and Technology, 2016, 73: 490 – 497.
- [25] LV W, HAN Q, LI S, et al. Thermal dynamic and physical qualities of ginger (*Zingiber officinale*) slices in intermittent microwave fluidized drying[J]. IAEJ, 2015, 24(1): 39 – 46.
- [26] 毕金峰, 王雪媛, 周林燕, 等. 脉动压差闪蒸处理对苹果片水分散失特性及品质影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 376 – 382.
- BI Jinfeng, WANG Xueyuan, ZHOU Linyan, et al. Effect of instant controlled pressure drop drying on water loss and quality in apple slices[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.2): 376 – 382. (in Chinese)
- [27] BERTRAM H C, KARLSSON A H, ANDERSEN H J. The significance of cooling rate on water dynamics in porcine muscle from heterozygote carriers and non-carriers of the halothane gene—a low-field NMR relaxation study[J]. Meat Science, 2003, 65(4): 1281 – 1291.
- [28] LV W, ZHANG M, WANG Y, et al. Online measurement of moisture content, moisture distribution, and state of water in corn kernels during microwave vacuum drying using novel smart NMR/MRI detection system [J]. Drying Technology, 2018, 36(13): 1592 – 1602.