

热烫藕条微波滚动干燥热场分布及脱水品质

吕为乔^{1,2}, 宿佃斌², 王天行², 宋凯², 段振华¹, 李国华²

(1. 贺州学院 食品科学与工程技术研究院, 广西 贺州 542899; 2. 中国农业大学 工学院, 北京 100083)

摘要: 为解决微波干燥不均问题,提升藕条的干燥品质,作者以热风干燥(Hot-Airflow Drying, AD)为对照,利用自主研发的微波热风滚动床干燥(Microwave Hot-Airflow Rolling-Bed Drying, MARD)装备,研究了沸水漂烫和未漂烫下藕条在 MARD 不同干燥阶段的热像分布,以及“干基水分质量分数-干燥时间”变化曲线,分析了不同工艺下物料的感官品质和微观结构。结果表明:藕条 MARD 过程在热风和微波的协同作用下温度逐渐升高,最终稳定在设定范围。沸水漂烫减少 MARD 干燥时间 10~15 min,对 MARD 过程热像分布影响不显著。沸水漂烫会使脱水藕条的色泽变暗,沸水漂烫和微波干燥过程都会破坏藕条的微观结构。

关键词: 微波干燥;滚动床;热像图;藕条;热风

中图分类号:S 645.1 文章编号:1673-1689(2020)07-0105-07 DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.07.015

Temperature-Field Distribution and Dehydrated Quality of Lotus-Root Sticks during Microwave Rolling-Bed Drying

LYU Weiqiao^{1,2}, SU Dianbin², WANG Tianxing², SONG Kai², DUAN Zhenhua¹, LI Guohua²

(1. Institute of Food Science and Engineering Technology, Hezhou University, Hezhou 542899, China; 2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of non-uniform drying during microwave drying and improve the drying quality of lotus root, a microwave hot-air flow rolling-bed drying (MARD) device was developed by our team. The hot-air flow drying (AD) was used as a control, and the thermal image distribution of lotus root with boiling-water blanching and non-blanching at different drying stages of MARD and the dry-basis water contents were studied. The sensory quality and micro-morphology of materials in different processes were investigated. As a result, with hot air and microwave, the temperature of lotus-root sticks was gradually increased, and finally stabilized within a set range during MARD. Boiling-water blanching reduced the drying time of MARD by 10-15 minutes, but had no significant effect on the temperature distribution of the materials during MARD. Boiling-water blanching darkened dehydrated lotus root, and both boiling water blanching and microwave drying destroyed the microstructure of lotus-root sticks.

Keywords: microwave drying, rolling bed, thermogram, lotus-root sticks, hot airflow

收稿日期: 2019-05-15

基金项目: 广西果蔬保鲜和深加工研究人才小高地开放课题项目(2018GSXGD14);国家级大学生创新训练项目(201910019099)。

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

微波干燥是利用特性波段电磁波对物料中水分子的高频作用,使水分子获得较高的能量,进而从物料中分离出来^[1-2]。微波干燥目前广泛应用在高分水分农产品的加工干燥中,如毛豆^[3]、生姜^[4]、香蕉片^[5]等。由于微波在农产品中具有较强的穿透性,物料为全体积受热,物料的形态、属性和所处的位置不同均会造成微波干燥不均^[6-7]。家用的微波炉,采用旋转盘的二维运动,来改善加热均匀性。前期有学者研究了微波热风振动床干燥^[8]、微波喷动床干燥^[9-10],在不同程度上改善了微波干燥的均匀性。作者采用自主研制的微波热风滚动床干燥(MARD)装备,以生鲜藕条为原料,对装备的原理和过程进行了优化分析。

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn)为多年生大型宿根草本植物,富含淀粉、纤维素、维生素等多种营养元素^[11-12]。为研究杀青处理方式对莲藕热风微波滚动床干燥过程和品质的影响,开发高品质的脱水果蔬食品,采用沸水漂烫的方法,研究漂烫处理对新鲜藕条干燥过程热像分布、干燥品质和微观结构的影响。为阐述沸水漂烫对 MARD 干燥过程的特定影响,并区别于微波的作用,作者在对藕条的干燥曲线、感官品质等指标进行分析时,以电热鼓风干燥(Hot-Airflow Drying, AD)工艺进行对照研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料

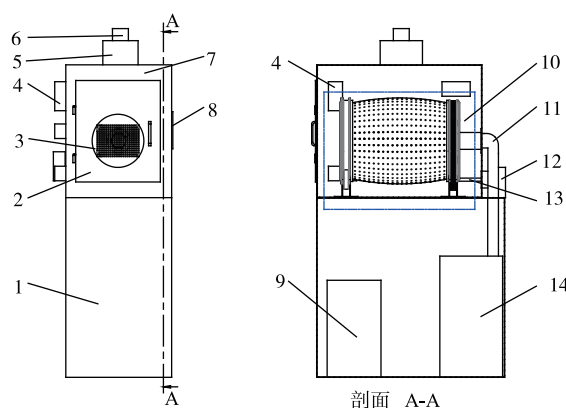
生鲜莲藕,购于本地农贸市场,含水率 81.90%。去皮、切条,截面为 0.5 cm×0.5 cm,清水洗去淀粉后备用。

1.2 主要仪器与设备

微波热风滚动床干燥装备(ORW2S-3000R 型):南京奥润微波电子科技有限公司产品;电热鼓风干燥箱(GZX-9140MBE 型):上海博讯实业有限公司医疗设备厂产品;色差仪(HP-200 型):厦门新锐仪器仪表有限公司产品;扫描电子显微镜(Hitachi S3400 型):日本日立公司产品;数字风速仪(UT363 型):东莞优利德科技有限公司产品;电子天平(FA1004 型):上海舜宇恒平科技仪器有限公司产品。

MARD 干燥装备为作者所在团队自主研发设计,原理图如图 1 所示。该装备由 3 组 100~1 000 W 的 2 450 MHz 微波源组成,微波功率可独立连续控

制。物料置于腰鼓形滚动床体内侧,转速为 1~10 r/min 连续可调,床体和传动此轮均采用聚四氟乙烯材料制成,确保对微波干燥过程无干扰。热风功率 3 000 W,风速和风温连续可调。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。间歇设定时间后,微波源继续开启。



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

图 1 微波热风滚动床干燥装备原理图

Fig. 1 Schematic diagram of MARD

1.3 干燥工艺

1.3.1 MARD 干燥 将准备好的藕条 2 组,每组 1 000 g,分别进行沸水漂烫和对照组(未漂烫)处理,漂烫时间为 1 min,处理后置于 MARD 装备滚动床体中。同时开启热风 and 微波。入口热风风速调到 2 m/s,温度设为 65 ℃。微波总功率设为 800 W,3 个磁控管的功率系统设定为平均分配,物料最高温度设为 75 ℃。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 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^[13]。试验每 10 min 对物料称量一次,直至干燥终点,为了表征试验误差,每组试验重复 3 次,绘制物料“干基含水率-干燥时间”关系曲线。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。

1.3.2 AD 干燥 将准备好的藕条 2 组,每组 500 g,分别进行沸水漂烫和对照组(未漂烫)处理,漂烫为沸水,漂烫时间为 1 min。为了保证过程的稳定

性,将处理后的物料置于标准化的电热鼓风干燥箱中进行AD干燥。试验中,热风温度设为75℃,试验测得入口风速1 m/s。同样,试验每15 min对物料称量一次,直至物料干基含水率控制在8%以下。为了表征试验误差,每组试验重复3次,绘制物料“干基含水率-干燥时间”关系曲线。

1.4 分析方法

1.4.1 MARD过程的温度分布 试验在MARD工艺干燥开始阶段(干燥0 min,10 min)、中间阶段(干燥60 min)和干燥后期(漂烫处理物料干燥110 min,未漂烫处理物料120 min)暂停微波,打开仓门,利用FLIR E40型红外热像仪第一时间测得藕条的热像图,并观察热像图中最高温度与设定最高温度的关系,以及物料在微波干燥过程中温度的波动情况。

1.4.2 脱水藕条干燥色泽 在色泽变化上,采用“Hunter Lab”色度空间法,测定藕条脱水产品的色泽品质变化。其中,其中 L 代颜色的深浅,正值亮度较高; a 代表颜色的红绿方向,正值红度较高; b 值代表颜色的黄蓝方向,正值黄度较高^[4]。试验采用HP-200型测色色差仪测定藕条脱水产品的色泽品质变化,基于藕条干燥产品色泽指标的数值变动较大,将4组不同工艺下的脱水藕条粉碎,然后测量数 L 、 a 、 b 。为了表征测量误差,每个阶段抽样3次,测定均值和标准差。

1.4.3 脱水藕条的微观结构 分别取4组不同干燥工艺中的脱水藕条各一块,贴到样品台上、镀膜,通过Hitachi S3400型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope,SEM)扫描观察,在适宜的倍数下拍照,采集数据。

2 结果与讨论

根据试验过程监测到的数据,得到未漂烫藕条MARD干燥、沸水漂烫藕条藕条MARD干燥、未漂烫藕条AD干燥、沸水漂烫藕条AD干燥4组干燥工艺下的“干基水分质量分数-干燥时间”的规律性变化曲线,结果见图2。可以发现,在相同干燥参数下,未漂烫藕条MARD干燥,达到干燥终点时所需要的时间为120 min,沸水漂烫藕条的干燥时间为110 min,沸水漂烫显著提高了干燥效率。在干燥过程中,物料在开始阶段水分降低较快,随着干燥的持续进行,干燥速度逐渐降低。分析认为,物料的游

离水首先被微波干燥,剩余不易流动水和结合水干燥阻力较大,干燥速度降低。

在AD干燥中,未漂烫藕片的干燥时间为405 min,沸水漂烫后的藕片干燥时间为390 min。沸水漂烫同样提高了热风干燥的效率。分析认为沸水漂烫过程破坏了细胞的组织结构,使水分更容易从干物质中分离出来。AD干燥过程中,干燥速度开始阶段比较平稳,随着干燥的进行,先升高,后降低。分析认为物料在开始阶段逐渐升温,自由水含量较高但起始温度较低,AD干燥的速度较为平稳。随着干燥的进行,物料温度升高,干燥速度加快。在干燥后期,剩余水分与干物质的结合力较强,同时,由于表面硬化,传质阻力增大,导致干燥速率变慢

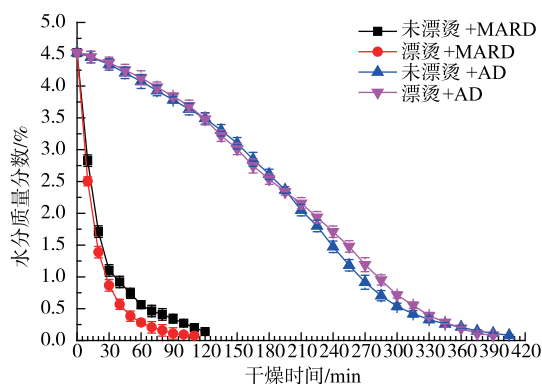


图2 不同工艺下藕条干燥过程的水分变化曲线

Fig. 2 Moisture content of lotus-root sticks during different drying process

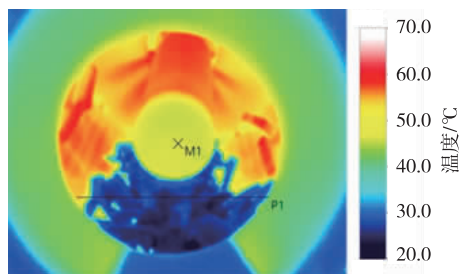
2.1 藕条干燥过程的热像结果

藕条MARD干燥过程热像图的分布,反映了物料的干燥状态。物料最高温度设为75℃,但物料处于滚动状态,传感器对物料的监测有一定浮动。与此同时,物料本身在MARD干燥过程温度分布也有一定的波动。试验采用红外热像仪对干燥初期(物料放入阶段干燥0 min、干燥10 min)、中期(干燥60 min)和后期(干燥终止阶段110 min、120 min)物料的温度进行监测,能在宏观上反映物料的温度状态。未漂烫藕条MARD干燥、沸水漂烫藕条藕条MARD干燥两组工艺下的红外热像图如图3和图4所示。在热像图中存储物料的地方取线,可通过热像仪系统软件提取相关温度。

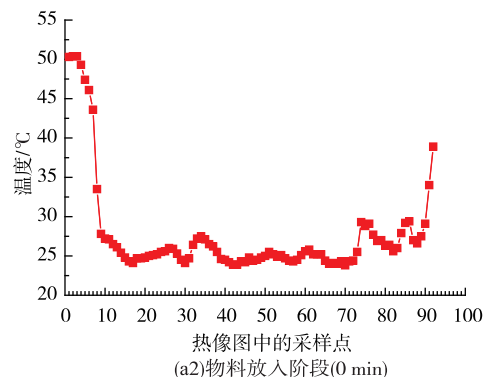
结果发现,未漂烫以及沸水漂烫藕条在MARD干燥过程有着相同的规律,起始阶段物料温度较低,干燥仓体的温度已通过热风系统首先升温。随

着 MARD 干燥工艺的进行, 物料温度逐渐升高, 物料的升温速度高于仓体的升温速度, 在开始阶段和

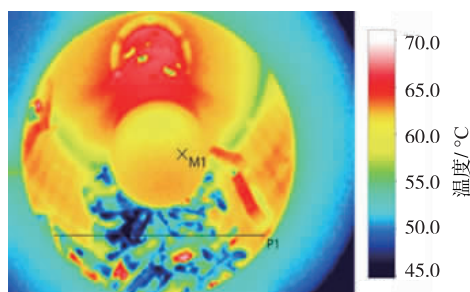
中间阶段物料均未达到设定的最高温度, 微波干燥持续进行。在最终阶段, 物料的水分大部分散失, 受



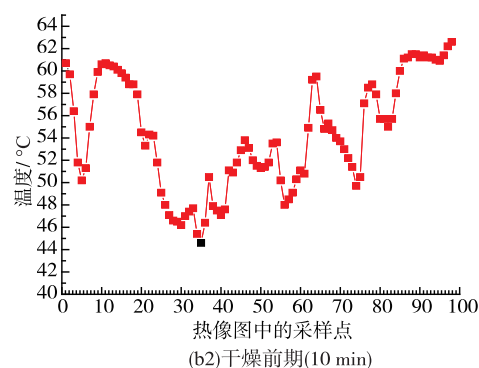
(a1)物料放入阶段(0 min)



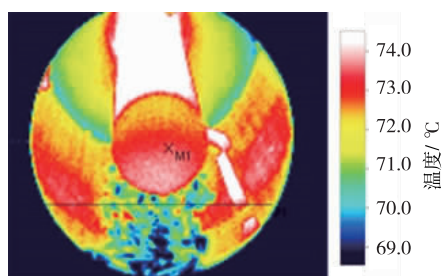
(a2)物料放入阶段(0 min)



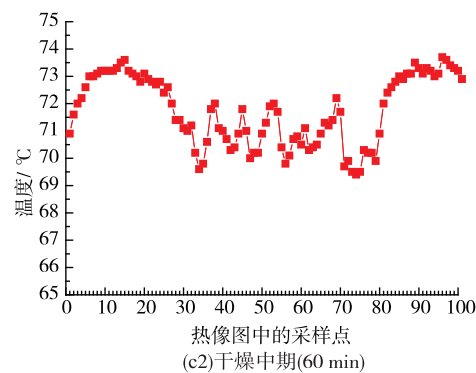
(b1)干燥前期(10 min)



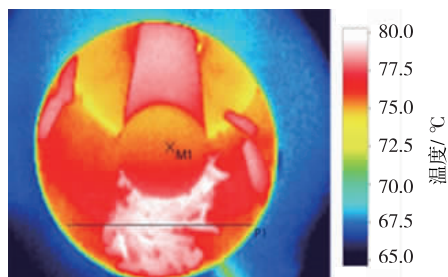
(b2)干燥前期(10 min)



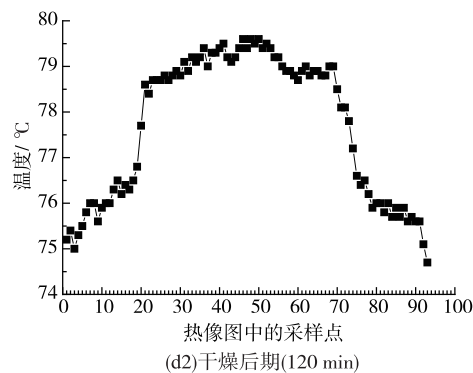
(c1)干燥中期(60 min)



(c2)干燥中期(60 min)



(d1)干燥后期(120 min)



(d2)干燥后期(120 min)

图3 新鲜藕条 MARD 干燥过程的热像分布以及对应的采样点温度

Fig. 3 Thermogram and corresponding temperature of sampling points during MARD for fresh lotus-root sticks

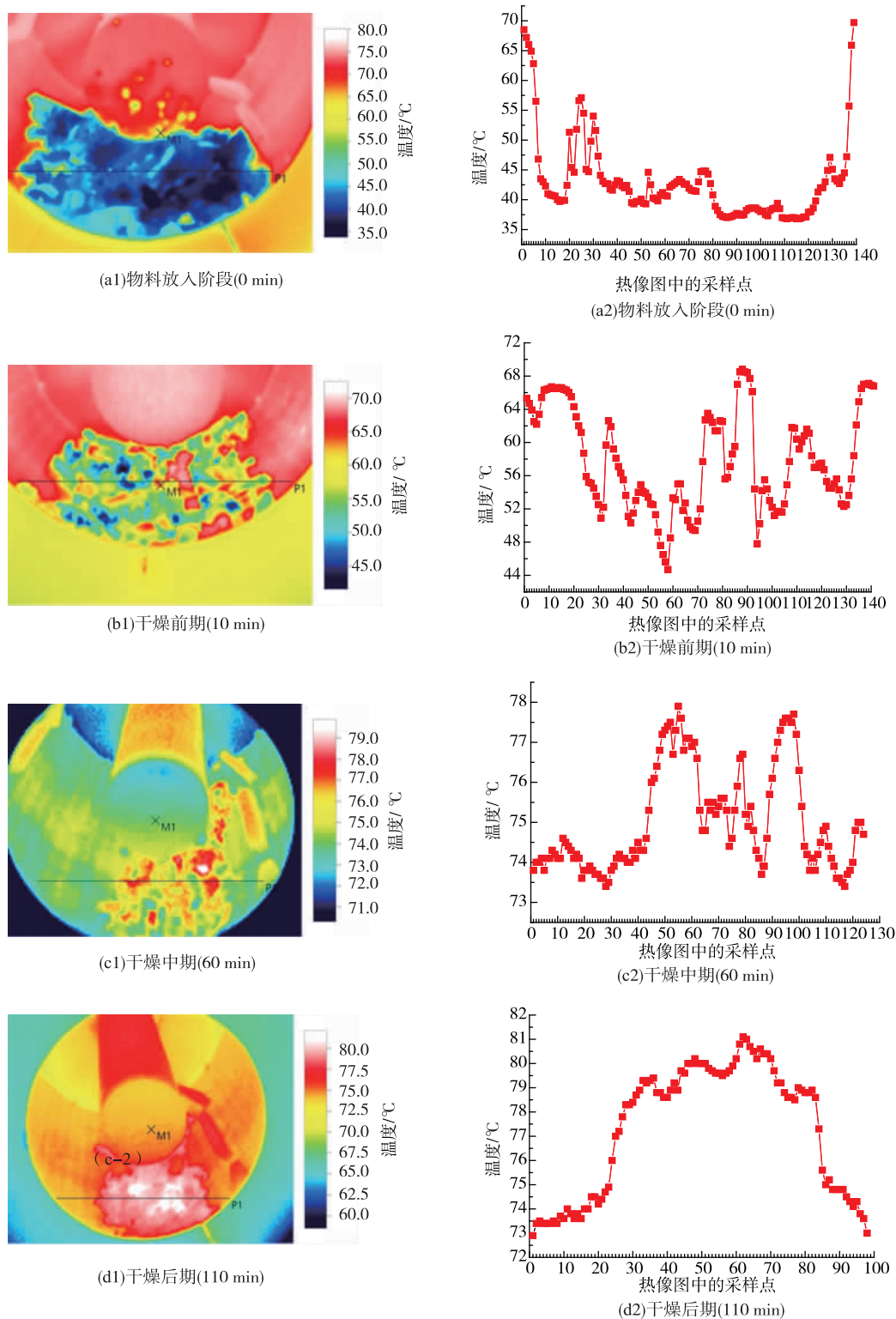


图4 沸水漂烫物料MARD干燥过程的热像分布以及对应的采样点温度

Fig. 4 Thermogram and corresponding temperature of sampling points during MARD for boiling-water blanching lotus-root sticks

热基数变小。温度升高较快,围绕设定值浮动,局部地区超过了设定温度 75 ℃,因此干燥最终阶段是控制物料品质的关键阶段。

比较沸水漂烫对物料温度的影响,图 4 漂烫物料起始温度比图 3 未漂烫物料高,物料在 MARD 干燥过程中升温速度较快。由于整个干燥过程藕条温度平均值较高,同时生物组织中的水分受过漂烫处理,物料在 MARD 中的干燥时间减少了约 10 min,在干燥 110 min 时达到干燥终点。

2.2 脱水藕条色泽变化

试验得到“未漂烫+AD, 漂烫+AD, 未漂烫+MARD 以及漂烫+MARD”4 组不同工艺下的脱水藕条产品,如图 5 所示。未经漂烫的 MARD 产品和 AD 产品色泽明亮,漂烫过的 MARD 产品和 AD 产品色

泽较暗,基于藕条干燥产品色泽指标的数值变动较大,将 4 组不同工艺下的脱水藕条打粉,每组粉体抽样 3 次,测定均值和标准差。利用“Hunter Lab”色度空间法,颜色在 L 、 a 、 b 3 个不同指标的坐标轴间取值,不同工艺下脱水藕粉的色泽指标如表 1 所示。

从所得藕片色泽数值上看,相对于 AD 干燥, MARD 干燥产品的 L 值和 b 值变化不显著,未漂烫的产品中, MARD 工艺下的产品红度指数 a 值偏高。相对于未漂烫的产品, L 值减小, a 值增大,且在 95% 的置信区间上有显著差异,说明无论是 MARD 还是 AD 工艺,沸水漂烫均能显著降低产品的亮度,红度值显著升高。从物料的 b 值上看,黄度指标变化不显著。



图 5 不同工艺下藕条干燥形态及藕粉

Fig. 5 Dehydrated lotus-root sticks and corresponding powders in different drying processes

表 1 不同工艺下脱水藕粉的 Hunter Lab 色泽指标
Table 1 "Hunter Lab" color index of dehydrated lotus-root powders in different drying processes

干燥工艺	明度指标 L	红度指标 a	黄度指标 b
未漂烫+MD	77.52±1.01 ^c	3.24±0.26 ^b	13.10±0.46 ^b
漂烫+MD	76.10±0.39 ^b	4.25±0.21 ^c	13.01±0.71 ^b
未漂烫+AD	78.25±0.25 ^c	2.62±0.04 ^a	12.71±0.10 ^a
漂烫+AD	75.71±0.13 ^a	4.59±0.07 ^d	14.07±0.20 ^c

注:相同字母间的数据不存在显著性差异,显著水平为 $p \leq 0.05$ 。

2.3 藕条干燥后的 SEM 形貌

在未经漂烫和漂烫的藕条经过 MARD 干燥和

AD 干燥的产品中取样处理,经扫描电子显微镜扫描观察,得到样品 500 倍的微观形貌,如图 6 所示。图中 6(a)和 6(b)相比较反映了漂烫对 MARD 干燥过程的影响,发现二者结构紧密,呈层状断面,未见清晰的细胞内结构和特殊大分子组织,漂烫对微波干燥形貌的影响不显著。图中 6(c)和 6(d)相比较反映了漂烫对 AD 干燥过程的影响,未漂烫藕条热风干燥后产品有清晰的淀粉颗粒,而经过漂烫的藕条的微观结构中,未发现清晰的淀粉颗粒,说明沸水漂烫过程对物料的组织结构发生了破坏性改变。以上 4 组数据也说明了,微波和沸水漂烫都会破坏物料的组织结构。结合藕条的干燥速度曲线,说明

微波和沸水漂烫在加快干燥速度的同时,破坏了藕片的组织结构,二者存在交互影响。

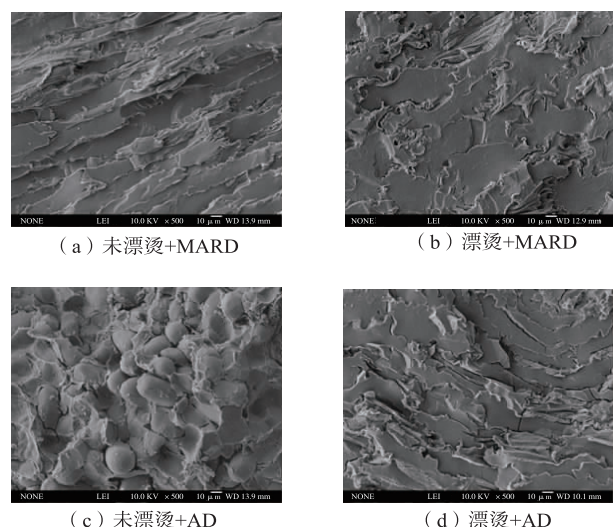


图6 不同工艺下脱水藕条的SEM形貌

Fig. 6 Microstructure of dehydrated lotus-root sticks in different drying processes

3 结语

在 MARD 干燥试验装备的基础上,以 AD 干燥过程为对照,以沸水漂烫为预处理手段,研究了藕条在 MARD 干燥过程的热像分布、水分变化规律以及干燥产品的品质和影响因素,得到如下结论:

1) 藕条 MARD 过程在热风 and 微波的协同作用下温度逐渐升高,最终稳定在设定范围。在 MARD 过程,物料温度场在滚动床内部动态调整,可实现均匀稳定干燥。

2) 随温度和水分的变化,藕条在 MARD 干燥过程中干燥速度先增大后减小,沸水漂烫显著减少 MARD 干燥时间,但漂烫处理对 MARD 过程热像分布影响不显著。

3) 沸水漂烫会使 MARD 工艺下脱水藕条的色泽变暗、同时使红度提高,沸水漂烫和微波干燥过程都会破坏藕条的微观结构。

参考文献:

- [1] 王也,吕为乔,李树君,等.农产品微波干燥技术与装备的研究进展[J].包装与食品机械,2016,34(3):56-61.
- [2] TANG J. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(8):1776-1793.
- [3] HU Q G, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(4):977-982.
- [4] LV W, LI S, HAN Q, et al. Study of the drying process of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices in microwave fluidized bed dryer[J]. *Drying Technology*, 2016, 34(14):1690-1699.
- [5] JIANG H, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Drying uniformity analysis of pulse-spouted microwave-freeze drying of banana cubes[J]. *Drying Technology*, 2016, 34(5):539-546.
- [6] 韩清华,李仪凡,赵东林,等.多馈源箱式加热器的微波场均匀性仿真分析[J].包装与食品机械,2012,30(6):6-9.
- [7] ZHANG M, TANG J, MUJUMDAR A S, et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(10):524-534.
- [8] 吕为乔,韩清华,李树君,等.微波干燥姜片模型建立与去水机理分析[J].农业机械学报,2015,46(4):233-237.
- [9] YAN W Q, ZHANG M, HUANG L 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.
- [10] 章虹,冯宇飞,张魁,等.茼蒿微波喷动均匀干燥工艺[J].食品与生物技术学报,2012,31(4):72-80.
- [11] 江宁,李丽娟,李大婧,等.莲藕片热风干燥特性及动力学模型[J].江苏农业科学,2015,43(1):247-250.
- [12] 刘春菊,钱旻,宋江峰,等.速冻莲藕片贮藏过程中品质变化动力学模型[J].农业工程学报,2017,33(6):301-308.
- [13] ROKNUL A S M, ZHANG M, MUJUMDAR A S, 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] 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.