

微波流态化干燥姜片复水能力和物性分析*

吕为乔¹ 韩清华² 李树君² 周海军² 孙丽娟³ 李仪凡²

(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;

3. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 针对微波干燥对脱水蔬菜复水能力和应用品质的影响,研究了在单位质量微波功率为 0.6、0.9、1.2 W/g 的微波流态化干燥(MFD),及在 75℃电热鼓风干燥(AD)条件下干燥姜片的复水特性。试验发现,微波干燥姜片的复水能力要弱于热风干燥。随着水浴温度的升高,各组产品的复水能力增加,复水比之间的差距缩小。经动力机械分析仪(DMA)测定复水姜片的蠕变特性,微波流态化干燥所得姜片在复水后的硬度大,在不同微波功率间的差异不明显。通过扫描电子显微镜(SEM)发现,微波流态化干燥姜片的微观结构变化远大于热风干燥。结合干制品的复水和蠕变过程,分析认为姜片组织结构的变化会影响水分的渗透与吸收。复水能力是脱水蔬菜品质的重要指标,改进后的微波-电热鼓风干燥能在保证工作效率的基础上,改善微波干燥产品的复水能力。

关键词: 姜片 微波流态化 复水 蠕变 微观结构

中图分类号: TS255.36; TQ028.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)08-0200-06

Rehydration Capacity and Physical Properties of Ginger Slices Dried by Microwave Fluidization

Lü Weiqiao¹ Han Qinghua² Li Shujun² Zhou Haijun² Sun Lijuan³ Li Yifan²

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

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

3. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to discuss the influence of microwave drying on dehydrated vegetable's rehydration capacity and application quality, the rehydration characteristics of dried ginger slices processed by microwave fluidized drying (MFD) with the microwave power of 0.6, 0.9, 1.2 W/g and hot-air drying (AD) with the temperature of 75℃ were studied. With different temperatures of the soaking water, the dried ginger slices' rehydration capacities were different, and the difference among the samples from different drying processes decreased with the rise of temperature. In the stress characteristics determined by the dynamic mechanical analyzer (DMA), the hardness of the rehydrated ginger slices from MFD was great, and the differences among different microwave powers were not obvious. Through observation by scanning electron microscopy (SEM), it was found that the microstructure of the samples from MFD changed much more than that from hot-air drying, and the structure variation might influence the penetration and absorption capacity of the moisture. Rehydration capacity is an important indicator of the dried vegetables' quality. With the microwave-hot air combined drying, the microwave drying's efficiency was not decreased obviously, but the product quality was improved. The results indicated that the drying process and technology can be improved by the reference of above achievements.

Key words: Ginger slices Microwave fluidization Rehydration Creep Microstructure

收稿日期: 2014-10-29 修回日期: 2014-11-27

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD04B06)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100802)

作者简介: 吕为乔, 博士生, 主要从事农产品加工工程研究, E-mail: lvweiqiao@163.com

通讯作者: 李树君, 研究员, 博士生导师, 主要从事高新技术在农产品加工中的应用研究, E-mail: bnx@caams.org.cn

引言

微波组合干燥能同时利用热风、真空、冷冻等辅助手段,在干制蔬菜、水果过程中,实现高效率、低营养损失的脱水^[1-2]。Andres等研究了热风微波耦合干燥苹果块的工艺和效果,认为微波功率在组合干燥时的影响最显著,不同功率间的收缩特性、微观结构存在显著的差别^[3]。Bondaruk等研究了微波真空干燥马铃薯细块的品质,发现淀粉和总糖分比热风干燥损失少,微观结构有着不同程度的改变^[4]。Sharma等通过热风微波耦合干燥大蒜,发现比单纯的热风干燥产品质量高,干燥时间节省80%~90%^[5]。此外,Wang等研究了预处理对莴笋微波冷冻干燥效果的影响,发现微波漂烫能降低莴笋初始冻结点的温度并减小冰晶体积,有效加快微波干燥进程^[6]。曹有福等研究了微波真空冷冻装置并对冬枣进行干燥试验,与普通真空冷冻干燥相比,干燥品质相似,在干燥时间和能耗上占有显著优势^[7]。

基于对微波流态化干燥姜片的研究,发现振动流态化减轻了微波干燥不均和原料局部过热对产品品质的干扰,使单纯微波干燥根茎类蔬菜的工艺得以实现,并抛弃在设备中馈入热风、提供真空环境等辅助手段,工艺和设备简单,提高了可操作性。然而,单纯的微波干燥会影响干制品的复水能力,这是影响脱水蔬菜和一些干制品品质的重要指标^[8-9]。王青海等在微波干燥烟叶中发现当单位质量微波功率大于0.6 W/g时,烟叶的组织结构会受到不同程度的破坏^[10]。本文在前期研究姜片微波流态化干燥和分阶段微波-热风组合干燥的工艺和品质的基础上^[11-12],对脱水姜片的关键指标复水特性进行深入研究,以期为工艺优化和品质分析提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

新鲜的生姜,购于农贸市场;品质均匀,无机械损伤;经GB/T 8858—1988《水果、蔬菜产品中干物质和水分含量的测定方法》测得试验原料的含水率为90.5%(干基含水率953.6%)。

1.2 试验仪器与设备

WB6E型微波流态化干燥试验平台(图1),由中国农业机械化科学研究院与南京凯乐电器微波设备有限公司联合设计^[13],该设备上方有6支可独立馈入微波的磁控管,微波功率可以连续调节,物料盘与振动电机相连,物料可以在托盘中实现翻滚、游动,振动频率可以连续调节;Q800型动力机械分析

仪,美国纽卡斯尔TA仪器公司;Hitachi S3400型扫描电子显微镜,日本Hitachi公司。此外,还有数显恒温水浴锅、HP-200型精密色差计、电子天平等。

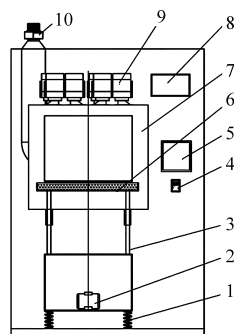


图1 微波流态化干燥装备示意图

Fig. 1 Schematic of microwave fluidized drying test device

1. 减振弹簧 2. 振动电动机 3. 振动机架 4. 变频器 5. 触摸屏
6. 物料盘 7. 微波干燥室 8. 监视器 9. 磁控管 10. 引风机

1.3 试验方法

1.3.1 微波流态化干燥工艺

将清洗后的生姜切片(厚度为3~5 mm),分3组放入微波干燥室内,单位质量微波功率分别为0.6、0.9、1.2 W/g,振动频率为30~45 Hz,进行微波流态化干燥。在干基含水率降到 $(300 \pm 100)\%$ 时停止微波馈入,缓苏30~60 min,然后继续干燥,直至干基含水率不高于8%。根据NY/T 1073—2006和相关研究,低于这个含水率的果蔬制品可以在较长时间内安全贮藏^[14-16]。

1.3.2 电热鼓风干燥工艺

将清洗后的生姜切片(厚度为3~5 mm),放入电热鼓风干燥箱中,干燥温度为75℃,风速为1 m/s,直至物料的干基含水率降到8%以下安全贮藏水平。

1.3.3 微波-电热组合干燥(改进工艺)

将清洗后的生姜切片(厚度为3~5 mm),放入微波干燥腔里,单位质量微波功率为0.9 W/g,振动频率为30~45 Hz,进行微波流态化干燥。在干基含水率降到 $(300 \pm 100)\%$ 时,放入电热鼓风干燥箱中,干燥温度为75℃,风速为1 m/s,直至物料的干基含水率降到8%以下安全贮藏水平。

1.4 检测方法

对微波流态化干燥和电热鼓风干燥工艺下干姜片的复水过程、复水后物性、复水前微观结构进行研究,并与改进后微波-电热组合干燥工艺的干姜片复水能力进行比较。

1.4.1 干燥姜片的复水特性检测

每组工艺准备5 g左右的干姜片,分别同时置于40、60、80℃的恒温水中,用水量为干质量的100倍,各浸泡10 min,沥干表面水分称量复水质量,得到干姜片在不同温度下的复水曲线。在90 min时,

质量不再有较大变化时完成复水,各温度下的复水比计算公式为

$$R = \frac{m_2}{m_1}$$

式中 m_2 ——产品复水后的质量

m_1 ——产品复水前的质量

1.4.2 复水姜片的 DMA 应力特性检测

用动力机械分析仪 (Dynamic mechanical analysis, DMA) 进行,复水姜片蠕变特性的测定是在恒定压力下压缩一定规则形状的姜片,达到极限值时,再以零应力抽回探头,实现压缩物料的自然松弛,这一蠕变过程反映在输出随时间变化的压缩曲线中。图 2 为压缩试验的夹具示意图^[17]。

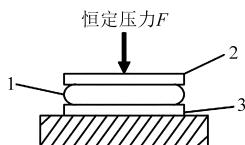


图2 DMA压缩姜片夹具示意图

Fig.2 Loading sketch of ginger slice in compression clam

1. 姜片样品 2. 压缩板(可移动) 3. 固定底盘

夹具下面为固定底盘,中间装载待测样品。样品应裁成规则的形状和可以量化的表面积,用来计

表1 不同工艺下的干燥姜片的复水比

Tab.1 Rehydration ratios of dried ginger slices from different drying processes

水浴温度/℃	75℃电热鼓风干燥工艺	单位质量微波功率/(W·g ⁻¹)		
		0.6	0.9	1.2
40	5.12 ± 0.12	4.25 ± 0.13	4.18 ± 0.13	3.81 ± 0.15
60	5.18 ± 0.13	4.64 ± 0.14	4.36 ± 0.13	4.22 ± 0.10
80	5.34 ± 0.13	5.10 ± 0.11	4.83 ± 0.10	4.66 ± 0.12

可以发现,微波干燥姜片复水能力不及热风干燥,并随微波功率的增大而减小。在不同水浴温度下,水温高则复水能力强。在80℃和40℃水浴温度下,75℃热风干燥姜片的复水比相差0.22,而0.6、0.9、1.2 W/g单位质量微波干燥姜片的复水比分别相差0.85、0.65、0.85。可见,微波干燥的姜片复水能力对水温更敏感。

算应力和压强。样品上方是可移动的压缩板,通过压缩板对物料施加一个恒定的力,可以传达精密的应力信息^[1]。本试验检测的是不同干燥工艺下,在60℃复水90 min后姜片的蠕变过程。其中,主要测试参数如下:预紧压缩力,0.03 N;压强,0.02 MPa;恒定温度,32℃;热机时间,1 min;蠕变时间,5 min;恢复时间,5 min。

1.4.3 干燥姜片的微观结构检测

为了解释干燥姜片复水过程和复水后蠕变特性的差异,对干燥姜片进行SEM形貌分析。取每组工艺下的干燥姜片,喷金处理,在Hitachi S3400 SEM下进行观察,比较微观结构的差异。

2 结果与讨论

2.1 干燥姜片的复水特性

在0.6、0.9、1.2 W/g不同单位质量微波功率下,微波流态化干燥工艺干燥姜片的时间1~3 h,而75℃电热鼓风干燥的时间大概需要8.5 h,这大大提高了姜片的干燥速度。在微波流态化干燥工艺下,姜片的复水能力变差。在不同水浴温度下,姜片的复水比也有所不同,如表1所示。

在获取干燥姜片在不同水浴温度下复水比的过程中,每10 min测量一次复水数据,测定结果如图3所示。

在开始阶段,产品复水速度较快。随着复水过程的持续进行,样品进入稳定的吸水阶段。在最后的60~90 min水分在组织内部接近饱和,复水速度逐渐降低,复水比逐渐稳定在一个水平。在研究范

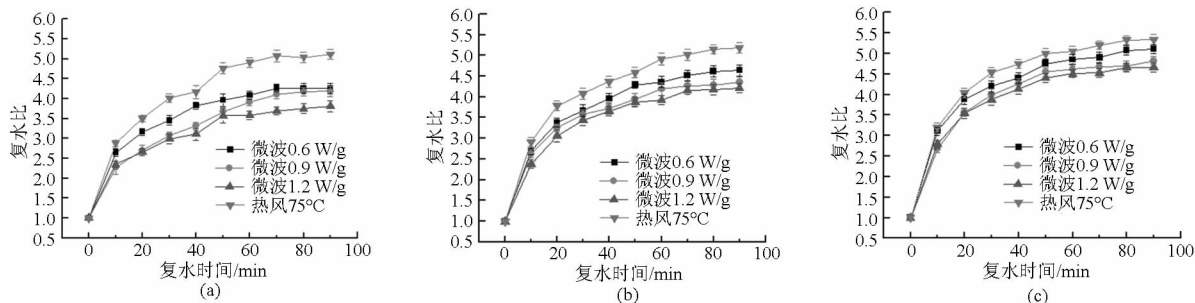


图3 不同干燥姜片的复水过程

Fig.3 Rehydration processes of different dried ginger slices

(a) 40℃ (b) 60℃ (c) 80℃

围内,水浴温度越高,产品的复水能力越强。

分析认为,微波干燥的姜片复水能力比热风干燥的姜片差,是微波干燥使组织结构受到破坏的结果。在 40℃ 的较低温度下,微波干燥的姜片与热风干燥姜片的复水能力相差较大。在 80℃ 时,水分能更进一步结合到姜片组织内部及高分子间,组织结构不规则所能带来的影响变小,此时姜片复水能力的差距变小。在 3 个不同微波功率干燥的干姜片中,功率低的组织结构破坏小,故复水性和持水能力强。

2.2 复水姜片的应力特性

将 1.3.1 节和 1.3.2 节不同干燥工艺下得到的姜片产品,在 60℃ 的水温下恒温水浴,待复水 90 min 后擦干样品表面的水分,在 DMA 上测得复水姜片的蠕变特性。试验采用恒定的压力压缩一定规则形状的姜片,达到极限值时,再以零应力抽回探头,实现压缩物料的自然松弛。蠕变和松弛的过程反映了姜片的硬度和弹性,也反映了姜片本身组织结构的变化。在复水姜片中,组织结构完整则蠕变的幅度大,质地松软,而且松弛后能恢复到一定的水平。不同样品的蠕变曲线如图 4 所示。

在 DMA 测定的蠕变曲线上,新鲜姜片的蠕变幅度最小,极值不超过 10%,说明新鲜原料的硬度最大。75℃ 热风干燥所得姜片复水后的蠕变幅度最大,极值超过了 40%。相对于 75℃ 热风干燥,其他微波流态化干燥所得姜片复水后的蠕变幅度较小,说明复水后的硬度高,在不同微波功率间的差异不明显。分析认为,新鲜姜片蠕变最小,是因为有机物质与水分以各种化学键和化学基团之间的紧密结

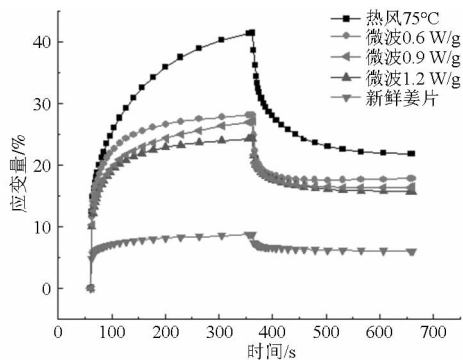


图 4 不同姜片的蠕变和松弛曲线

Fig. 4 Creeping and relaxing curves of different dried ginger slices

合,形成稳定的有机体。而微波流态化干燥姜片复水后蠕变较小,是因为组织结构受到微波的破坏,复水后不能有效地回复原型,故质地较硬。热风干燥蠕变最大,松弛后的恢复幅度也最大,说明水分与有机质之间的结合难以达到干燥前的水平,但组织结构较好,蠕变后仍有较大的恢复能力。

2.3 干燥姜片 SEM 形貌

SEM 形貌分析(图 5)是对复水过程和复水后蠕变特性的微观解释。通过单位质量微波功率为 0.6、0.9、1.2 W/g 的微波流态化干燥,及热风 75℃ 的电热鼓风干燥,得到 4 组干燥姜片。通过 SEM 观察,发现微波流态化干燥姜片的微观结构变化远大于热风干燥。在不同单位质量功率的微波流态化干燥中,随功率的不同呈一定差异,如图 5 所示。

在单位质量 0.6 W/g 微波功率的微波流态化干燥工艺下,干燥姜片的淀粉颗粒在大部分区域排布紧凑,细胞壁的轮廓容易分辨,如图 5a 所示。

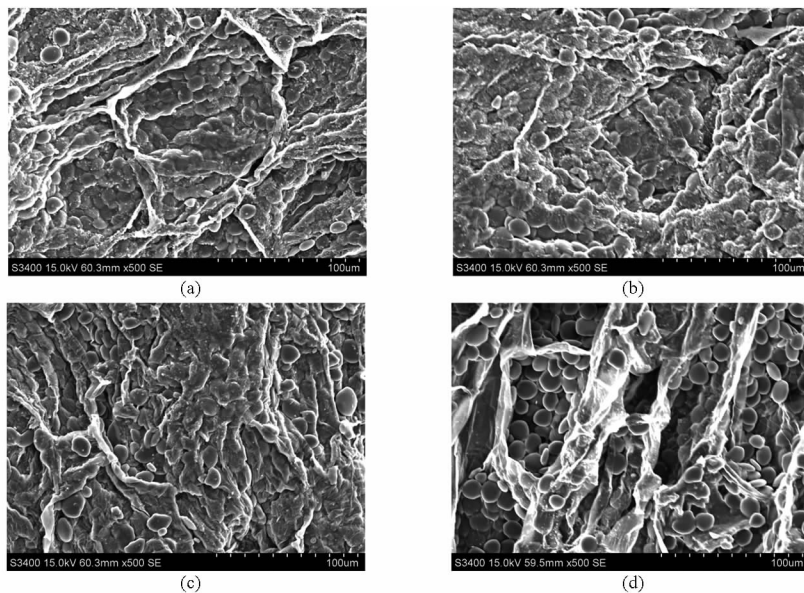


图 5 不同干燥姜片的 SEM 形貌图

Fig. 5 SEM images of different dried ginger slices

(a) 微波 0.6 W/g (b) 微波 0.9 W/g (c) 微波 1.2 W/g (d) 热风 75℃

1.2 W/g 微波流态化干燥工艺的产品只见到大量的淀粉颗粒无规则分布在机体中,看不清细胞壁轮廓和淀粉颗粒的紧凑排布,整个组织被微波搅成一团;0.9 W/g 微波流态化干燥工艺的 SEM 形貌介于两者之间,存在着不同程度的破坏,分别如图 5c、5b 所示。75℃ 热风干燥所得产品是组织结构保持最好的一组,细胞壁清晰可见,淀粉规则地镶嵌其中,如图 5d 所示。分析认为组织结构变差会影响水分的渗透与吸收,影响到产品的硬度和应力特性。这与不同工艺下干燥姜片的复水过程和蠕变特性的分析结果一致,进一步肯定了微波流态化干燥姜片的复水特性和作用机理。分析认为,与传统干燥相比,微波干燥使干制品的复水能力和复水后的硬度发生变化,合理地使用微波,能减少对组织的损伤,提高干燥速度和干燥品质。

2.4 改进工艺后的复水能力比较

对 1.3.3 节的微波-电热组合干燥工艺进行如下改进:先进行微波流态化干燥,当干基含水率降到 $(300 \pm 100)\%$ 时,放入电热鼓风干燥箱中,直至物料的干基含水率降到 8% 以下的安全贮藏水平。这种分段组合节省了中间产品的缓苏时间,避免了后期物料基数变小而引起的微波破坏严重,最终含水率难以控制等技术难题。改进后试验在转换点干基含水率为 300% 时,耗时 3.8 h,干燥时间与 2.1 节中单纯微波干燥 1~3 h 相差不大,远低于热风干燥的 8.5 h。在干燥产品的复水能力上,用 40、60、80℃ 的水浴温度浸泡 90 min,沥干后得到的复水结果与 75℃ 电热鼓风干燥、0.9 W/g 微波流态化干燥的复水结果形成对比,如图 6 所示。

结果表明,改进工艺使物料的复水能力高于微波流态化干燥。物料在脱水的后期,在热风下进行,脱水的强度比较缓和。避免了微波在物料基数变小的情况下,以更高的强度对极性分子的破坏。保证

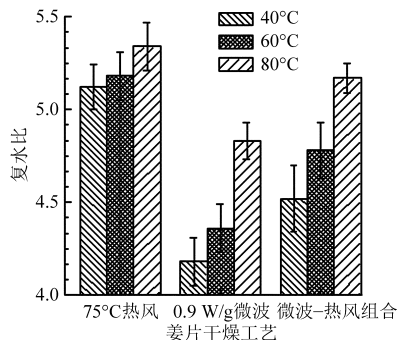


图 6 改进工艺后干燥姜片的复水能力比较

Fig. 6 Rehydration ability of products from different drying processes

了组织结构的复水能力。在整体上,弱于电热鼓风干燥,但由于干燥时间上有了显著的改进,组合干燥有着实际上的优势。研究结果为进一步的工艺优化提供了理论基础。

3 结论

(1) 与热风干燥相比,微波流态化干燥姜片在不同水浴温度下的复水能力不同,随着温度的增加姜片的复水能力增强,但各组产品之间的差距变小。在蠕变特性上,微波流态化干燥姜片复水后的硬度较大,在不同单位质量微波功率间的差异不明显。

(2) 通过 SEM 对干燥姜片组织结构的扫描观察发现微波流态化干燥姜片的微观结构变化远大于热风干燥,组织结构变差会影响水分的渗透与吸收,影响到复水后的硬度和蠕变能力。SEM 形貌的研究结果与不同干燥姜片的复水过程和复水后 DMA 测定的蠕变和蠕变特性的研究结果一致。

(3) 微波干燥在保持物料组织形态上有着自己的不足,通过微波-热风组合干燥工艺的改进,在效率相差不大的条件下,大大改善了产品的复水能力。在传统干燥基础上,合理的使用微波,能提高干燥速度,改善干燥品质。

参 考 文 献

- 张懋,徐艳阳,孙金才. 国内外果蔬联合干燥技术的研究进展 [J]. 无锡轻工大学学报,2003,22(6):103-106.
Zhang Min, Xu Yanyang, Sun Jincai. Research developments of combination drying technology for fruits and vegetables at home and abroad [J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2003, 22(6): 103-106. (in Chinese)
- 王娟丽,王以强,任石苟. 微波干燥技术在果蔬干制中的应用 [J]. 食品工程,2006(2):17-19.
Wang Juanli, Wang Yiqiang, Ren Shigou. Study of drying effect of some fruits and vegetables with the microwave dryer [J]. Food Engineering, 2006(2): 17-19. (in Chinese)
- Andres A, Bilbao C, Fito P. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(1): 71-78.
- Bondaruk J, Markowski M, Blaszczyk W. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2):306-312.
- Sharma G P, Prasad S. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 50(2): 99-105.
- Wang Y C, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Experimental investigation and mechanism analysis on microwave freeze drying of stem

- lettuce cubes in a circular conduit [J]. *Drying Technology*, 2012, 30(11-12): 1377-1386.
- 7 曹有福,韩清华,李树君,等. 微波真空冷冻干燥装置设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 105-109.
Cao Youfu, Han Qinghua, Li Shujun, et al. Design and experiment on microwave vacuum freeze drying equipment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 105-109. (in Chinese)
- 8 Rahman M S. A theoretical model to predict the formation of pores in foods during drying [J]. *International Journal of Food Properties*, 2003, 6(1): 61-72.
- 9 颜伟强. 颗粒状切割块茎类蔬菜微波喷动均匀干燥特性及模型研究 [D]. 无锡:江南大学, 2011.
- 10 王青海,巩文萍,王静,等. 不同微波条件下烟叶微观结构的变化 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(12): 7430-7433.
Wang Qinghai, Gong Wenping, Wang Jing, et al. Study on changes of tobacco microstructure by different microwave treatment [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(12): 7430-7433. (in Chinese)
- 11 吕为乔,王也,韩清华,等. 微波流态化干燥姜片的工艺和品质分析 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 231-235
Lü Weiqiao, Wang Ye, Han Qinghua, et al. Analysis on the process and quality of ginger slices' microwave-fluidization drying [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(8): 231-235. (in Chinese)
- 12 Lü Weiqiao, Han Qinghua, Li Shujun, et al. Analysis on the physical properties of ginger (*Zingiber officinale*) slices dried by hot-air & microwave fluidization [J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2014, 23(3): 57-63
- 13 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设计 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 210-214.
Han Qinghua, Xie Shijun, Li Shujun, et al. Design of multiple-sources microwave combining with hot-air fluidized drying test device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 210-214. (in Chinese)
- 14 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.
- 15 Azam S, Roknul M, Zhang M, et al. A comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices [J]. *Drying Technology*, 2014, 32(6): 657-666.
- 16 韩清华,李树君,马季威,等. 微波真空干燥膨化苹果脆片的研究 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37(8): 155-159.
Han Qinghua, Li Shujun, Ma Jiwei, et al. Microwave vacuum drying and puffing characteristics of apple chips [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(8): 155-159. (in Chinese)
- 17 Li Qian, Li Dong, Wang Lijun, et al. Dynamic viscoelastic properties of sweet potato studied by dynamic mechanical analyzer [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 79(3): 521-525.
- 18 Zhou Yuguang, Wang Lijun, Li Dong, et al. Effect of sucrose on dynamic mechanical characteristics of maize and potato starch films [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 76(2): 239-243.

(上接第 177 页)

- 20 Kong S F, Liu H, Ma F S, et al. Research progress on biomass liquid-fuel products by thermo-chemical conversion [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 860: 472-478.
- 21 Iryani D A, Kumagai S, Nonaka M, et al. Production of 5-hydroxymethyl furfural from sugarcane bagasse under hot compressed water [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, 6: 441-447.
- 22 Kumar S. Hydrothermal treatment for biofuels: lignocellulosic biomass to bioethanol, biocrude, and biochar [D]. Auburn: Auburn University, 2010.
- 23 汪君,时澜,高英. 葡萄糖水热过程中焦炭结构演变特性 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 191-198.
Wang Jun, Shi Lan, Gao Ying. Structure evolution of char obtained from hydrothermal treatment of glucose [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(7): 191-198. (in Chinese)
- 24 Müller J B, Vogel F. Tar and coke formation during hydrothermal processing of glycerol and glucose. Influence of temperature, residence time and feed concentration [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2012, 70: 126-136.
- 25 Boocock D, Sherman K. Further aspects of powdered poplar wood liquefaction by aqueous pyrolysis [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1985, 63(4): 627-633.
- 26 Liu H, Li M, Yang S, et al. Understanding the mechanism of cypress liquefaction in hot-compressed water through characterization of solid residues [J]. *Energies*, 2013, 6(3): 1590-1603.
- 27 Akhtar J, Amin N A S. A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(3): 1615-1624.
- 28 Jin F, Zhou Z, Enomoto H, et al. Conversion mechanism of cellulosic biomass to lactic acid in subcritical water and acid-base catalytic effect of subcritical water [J]. *Chemistry Letters*, 2004, 33(2): 126-127.
- 29 Lee J, Jeffries T. Efficiencies of acid catalysts in the hydrolysis of lignocellulosic biomass over a range of combined severity factors [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(10): 5884-5890.
- 30 Miura T, Lee S, Inoue S, et al. Improvement of enzymatic saccharification of sugarcane bagasse by dilute-alkali-catalyzed hydrothermal treatment and subsequent disk milling [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 105: 95-99.