

微波施加方式对微波冷冻干燥均匀性的影响试验*

王海鸥^{1,2} 胡志超² 屠康¹ 吴峰² 钟挺² 谢焕雄²

(1. 南京农业大学食品科技学院, 南京 210095; 2. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

【摘要】 利用 WDG-5 型微波冻干设备试验分析了影响干燥均匀性的因素, 并试验分析了该设备的微波施加方式对料盘间、料盘内物料干燥均匀性的影响。试验表明, 微波冻干过程中 20 盘物料外层干燥快、中间层干燥慢, 微波交替开启方式与整体开启方式相比, 可提高料盘之间的干燥均匀性; 干燥过程中同一料盘内物料呈现周边物料干燥快、中心部位干燥慢的趋势, 微波交替开启方式与整体开启方式相比, 能明显改善同一料盘的干燥均匀性。

关键词: 微波 真空冷冻干燥 干燥均匀性 试验

中图分类号: TQ028.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0131-05

Effects on Microwave Vacuum Freeze Drying Uniformity Contributed by Microwave Loading Methods

Wang Haiou^{1,2} Hu Zhichao² Tu Kang¹ Wu Feng² Zhong Ting² Xie Huanxiong²

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2. Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract

Structural components and characteristics of WDG-5 type microwave freeze dryer were introduced, and the causes of uneven drying were analyzed. The experiments about the influence of microwave control methods on the drying uniformity were conducted on this dryer using the material of carrot. The results concluded that out layers of 20 material plates were dried faster than inner ones. Compared with the whole working method of microwave system, the two-group alternative working method evidently improved the drying uniformity among plate layers. As for the materials within the same layer plate, peripheral materials were dried faster than central ones. And the drying uniformity of the same plate materials was also improved greatly under the two-group alternative working method of microwave system in contrast with the whole working method.

Key words Microwave, Vacuum freeze drying, Drying uniformity, Experiment

引言

微波真空冷冻干燥(简称微波冻干)是以微波作为热源的冻干技术,与传统冻干相比,可提高干燥速率、减少干燥时间、降低能耗,极具应用潜力^[1~3]。而物料受热不均匀是微波加热一大缺陷,也是微波冷冻干燥中最突出的现象,改善微波冻干不均匀性是推进微波冻干技术工程化应用的首要任务^[4~6]。

目前国内外有不少关于微波加热均匀性的研究报道,但专门针对微波冻干均匀性的研究还很少,仅有一些在微小型设备上完成试验研究,不能完全反映工业化生产实际^[7~8]。为此,本文针对自行研制的微波冷冻干燥中试设备开展干燥均匀性的试验研究,并提出相应控制策略,以期微波冻干工业化生产设备的设计、工艺过程控制等提供借鉴。

收稿日期: 2010-08-16 修回日期: 2010-11-22

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA100400)

作者简介: 王海鸥, 博士生, 农业部南京农业机械化研究所助理研究员, 主要从事农产品加工技术装备研究, E-mail: wholcj@yahoo.com.cn

通讯作者: 屠康, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品检测、贮藏和加工研究, E-mail: kangtu@njau.edu.cn

1 试验用微波冻干设备

本微波冻干设备为农业部南京农业机械化研究所研发的 WDG-5 型中试试验设备,最大干燥面积为 5 m^2 ,设备主要由干燥仓、捕水仓、物料承载装置、微波系统、真空系统、制冷系统以及测控系统等 2 组成。设备的主体构造如图 1 所示,干燥仓与捕水仓呈上下连体配置,干燥仓底部通过屏蔽过流板与捕水仓连接,屏蔽过流板为一定规格的圆孔筛板,可以允许水蒸气自由透过,同时也能对微波进行屏蔽,防止微波泄露进入捕水仓引起有害升华。微波系统采用小功率多口馈入方式,微波馈入口沿干燥仓周向交错排列,上下左右不对称布置,馈入口排布展开如图 2 所示。微波总功率为 13 kW ,单只功率为 1.3 kW ,每只磁控管可独立启闭,微波功率连续可调($0 \sim 100\%$),冻干过程中可对微波系统进行精细化调节,便于改善干燥均匀性。组成物料承载装置的料盘和料架均采用低介电常数的高纯度聚四氟乙烯材料,料盘共 20 盘,每盘干燥面积 0.25 m^2 ,分两垛堆放在料架上,如图 3 所示。料盘底部为筛孔状,四周侧壁留有若干长圆孔,且堆垛时每层料盘之间均隔有一定间隙,允许水蒸气从各层料盘排出。本设备具备实时测温、实时称量、视频监控,压力监测、能耗跟踪等功能。

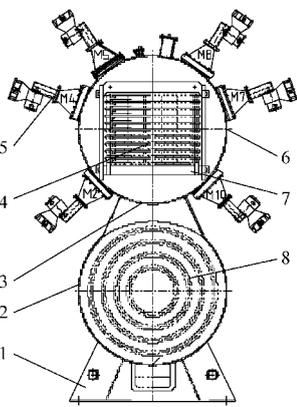


图 1 微波冻干设备结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of microwave freeze drier

1. 机座 2. 捕水仓 3. 屏蔽过流板 4. 料盘 5. 微波磁控管 6. 干燥仓 7. 料架 8. 制冷盘管

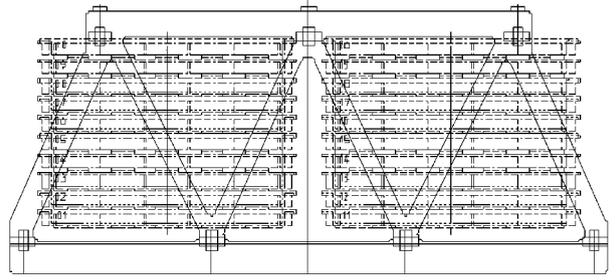


图 3 料盘堆放方式

Fig. 3 Stacking method of material plates

及物料在微波场中的位置等;在工艺参数方面,有冻干过程中的微波调控方式等工艺条件。

根据不均匀性产生的原因,目前微波干燥设备在解决微波加热不均匀性的方法主要有两方面:通过改善微波腔中电磁场的均匀性,提高物料对微波能吸收的均匀性;通过在干燥过程中改变物料位置,改善微波能吸收的均匀性。微波冻干过程处于低温且接近真空的环境,工业化生产时很难使物料在微波场中实现运动,无法通过改变物料位置来提高干燥均匀性,因此本设备冻干过程中物料处于静态。微波系统设计成 10 个馈能口,10 个小功率磁控管在干燥仓上沿着螺旋线排布,在结构设计上尽可能提高干燥仓微波场的均匀性,且每只磁控管可独立启闭,微波功率连续可调,以便于通过微波调控来改善干燥均匀性。

由于本设备干燥过程中物料位置固定不变,而干燥仓中微波电磁场又不能保证绝对均匀,只有通过调控微波来不断变化电磁场分布,以提高物料对微波能吸收的均匀性。具体的微波调控措施包括:微波间歇式开启(power cycling)、变频(VFM)、相位控制(phase control)以及微波功率调节等方法。本设备微波磁控管采用微波频率 2450 MHz ,每只磁控管通过变压调节器来调整微波功率。与普通的微波干燥设备不同,微波冻干设备微波功率加载受到干燥过程中低压放电的限制,冻干过程中微波功率的调节原则为:在确保不产生持续持续低压放电现象、产品温度满足冻干要求的前提下,干燥过程中应尽可能提高微波功率,以缩短干燥时间,节省能耗。为满足此要求,本设备试验时微波功率施加要根据实际工艺过程而定,因此不作为本文的考虑因素。本设备微波系统由 10 个独立的微波发生装置组合而成,干燥过程中在确保微波功率满足上述条件的前提下,微波施加可以通过两种方式实现:整体连续开启和分组间歇交替开启,这两种微波施加方法对仓内不同位置物料的干燥均匀性有着不同的影响。

鉴于上述分析并结合本设备具体特点,本文以

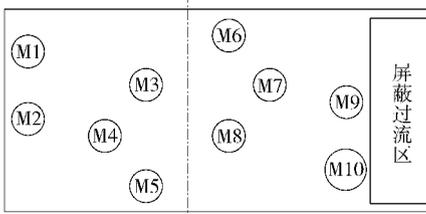


图 2 微波馈口分布图

Fig. 2 Distribution of microwave feeding entry

影响微波冷冻干燥均匀性的因素很多,这些因素又以复杂的方式交互影响着干燥效果。在设备设计方面,具体影响因素有仓体结构与尺寸、馈能口的数量及排布方式、波导管的结构形式等;在物料方面,有被干燥物料的几何形状、介电特性、热特性以

胡萝卜为干燥原料,重点考查微波施加方式对物料干燥均匀性的影响。

2 试验方法

2.1 冻干工艺过程简介

微波冷冻干燥主要工艺过程为:原料分选、清洗、切片→烫漂→装盘→冻结→冷冻干燥→成品。过程简介如下:挑选表面光滑短粗、大小一致的胡萝卜,清洗后去皮、切片,切片厚度为5 mm左右;将切片后的胡萝卜置于90℃水中烫漂1 min后,立即放入冷水降温,沥干后装盘,然后放入冷冻库,将原料冻结到-25℃;冷冻干燥时,干燥仓真空度维持在50 Pa左右。

考虑到设备的生产率,试验设备装料20盘,每盘装料量均为1.5 kg,胡萝卜片均匀铺在料盘内,一共装料30 kg。料盘按照1~20进行编号并标记方向(前、后、左、右),进仓装料时按盘号由小到大的顺序装盘,堆成里外两垛,每垛各10盘,每盘放置方向保持一致。对本设备的先前试验发现,干燥过程中不同料盘之间以及同一料盘的不同部位均存在干燥速度的差异。

2.2 微波施加方式

试验采用两种微波施加方法:①整体连续式开启法,即整个干燥过程中10个磁控管同时开启,并调节各个馈入口的微波功率使其均衡相等。②交替间歇式开启法,将磁控管分成左、右侧两组,左侧为1~5号磁控管,右侧为6~10号磁控管,干燥过程中两组磁控管交替开启,两组交替开启时间均为10 min,调节左右两组开启的各个馈入口微波功率保持均衡相等。

根据前期试验经验,为防止冻干过程中微波场低压放电问题,微波总功率控制趋势为:干燥前期采用小功率微波加热,待物料表层水分升华、孔道打通后,出现升华高峰,此时加大微波功率并维持一段时间,在干燥后期由于物料水分逐渐减少,升华速度降低,再用小微波功率加热。本试验中,两种开启法的冻干试验时间均控制在5 h,其中微波总功率控制方案分为3个阶段:0~1 h,微波功率为6 kW;1~4 h,微波功率为8 kW;4~5 h,微波功率为5 kW。

2.3 不同料盘间干燥均匀性测定

为分析整个干燥过程中物料脱水量的变化,冻干试验时每隔1 h就关停微波和真空,快速出仓对各盘物料进行称量,然后再按照原定位置进仓继续干燥。通过记录物料质量,分别计算每一盘物料的脱水量,利用脱水量均匀度 K_a 来描述各盘之间的干燥均匀性,计算公式为

$$K_a = \frac{\bar{X} - \Delta x}{\bar{X}} \times 100\%$$

式中 \bar{X} ——所有料盘脱水量平均值

Δx ——所有料盘脱水量均方差(反映各盘脱水量的离散程度)

K_a 越接近于100%,则干燥越均匀。

2.4 同一料盘干燥均匀性测定

由于试验中装料共20盘,若每一料盘内的物料干燥均匀性均通过上述称量法来测定,不仅难度大,而且实际操作起来非常不便。为此采用如下方法:干燥5 h后,选定1、11号料盘(在底层)、5、15号料盘(在中间)以及10、20号料盘(在顶层)作为测试盘,对料盘中不同部位的物料进行取样,按照GB 5009.3—2010《食品安全国家标准 食品中水分的测定》测定干燥后物料含水率(湿基),并按照上述同样方法计算含水率的均匀度 K_s ,用 K_s 来描述同一盘内物料的干燥均匀性。取样时,在每个测试部位取5个胡萝卜片,料盘中物料取样点分布如图4所示,对料盘分别标记 x 、 y 两轴, y 轴由料盘靠近仓门侧指向仓内侧, x 轴由料盘左侧指向右侧(以面向干燥仓门口为基准),两轴交点 O 的坐标为(0,0)。

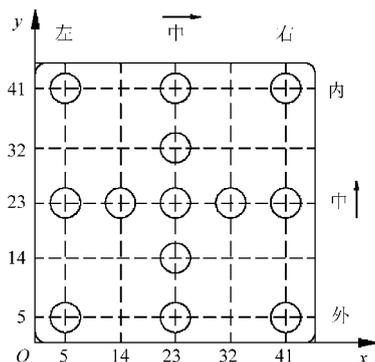


图4 料盘中含水率测点分布

Fig. 4 Distribution of the testing point of material moisture content in the plate

3 试验结果与分析

3.1 不同料盘之间的干燥均匀性

干燥第4、5小时的20个料盘脱水量测定结果如图5、6所示,两种开启方式下均呈现中间层脱水量少,顶层和底层脱水量多的不均匀趋势。相比较而言,在整体开启方式下,中间层料盘脱水量与顶层、底层的脱水量相差更大,干燥不均匀现象严重。而采用交替开启方式,可明显缩小中间层物料与外层物料的脱水量差异。整体和交替两种开启方式下的各盘脱水量最大差异在干燥第4小时分别为0.16 kg、0.25 kg,而在干燥第5小时分别为0.1 kg、0.16 kg,表明料盘间物料干燥程度差异在逐渐降

低。试验整个干燥过程中 20 盘物料的脱水量均匀度变化如图 7 所示,交替开启方式均高于整体开启式,且随着干燥的进行,两种方式下的脱水量均匀度均逐渐增加,即内外层物料脱水量的差异在逐渐缩小。干燥第 5 小时时,整体开启式和交替开启式的脱水量均匀度分别达到 94.2%、97.5%。

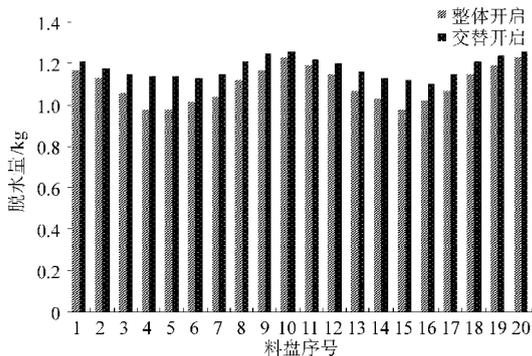


图 5 干燥第 4 小时各盘脱水量

Fig. 5 Dehydration of all plates after 4 hours drying

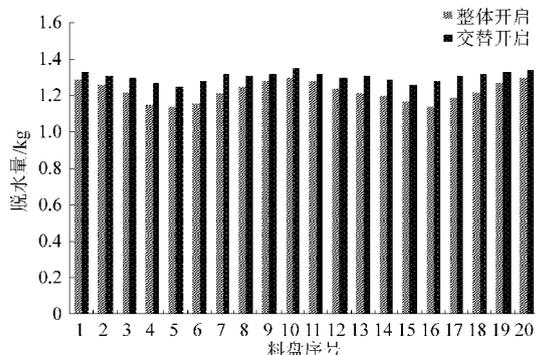


图 6 干燥第 5 小时各盘脱水量

Fig. 6 Dehydration of all plates after 5 hours drying

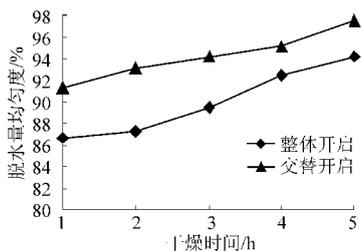


图 7 脱水量均匀度在干燥过程中的变化

Fig. 7 Changes of degree of uniformity of all plates dehydration during the drying process

本设备冻干仓为圆筒形,微波馈入口周向分布,馈入口附近场强相对较高,且物料离馈入口越近,越先吸收微波能,同时顶层或底层附近料盘物料升华气体流通阻力小,而靠近中间料盘气流通小,流通相对不畅。因此,内外两堆各 10 层料盘的堆料方式不可避免地造成外层物料脱水快,中间层物料脱水慢的现象,造成干燥不均匀。在整体开启状态下,10 个磁控管同时开启且在 3 个干燥阶段功率保持稳定,冻干仓内微波场分布较为固定,所以干燥不均匀

性相对严重。而通过采用交替开启两侧磁控管的方法,使干燥仓内微波场分布发生间断性变化,物料受热相对均匀,干燥均匀性得到明显改善。基于上述原因,在干燥初期,靠近外层料盘物料要先于中间层开始升华高峰,中间层与外层物料脱水量差异较大,脱水量均匀度低;而随着干燥进行,中间层物料的升华高峰逐渐到来,其升华速度快速增加,而外层物料水分渐少,升华速度达到平衡并逐渐下降,中间层与外层物料脱水量差异随干燥时间慢慢缩小,脱水量均匀度逐渐提高,因此各层之间的干燥不均匀性随着干燥进程而逐渐得以缓解。

3.2 同一料盘内的干燥均匀性

干燥 5 h 后,两种微波开启方式下 1、5、10 号盘胡萝卜片的含水率分布如图 8 所示。由图 8 可知,在微波整体开启方式下,3 个测试盘中的物料含水率均存在较大的不均匀性,中间物料含水率明显高于周边物料,而且位于中间的 5 号盘与位于顶层的 10 号、底层的 1 号盘相比,盘内物料的含水率差异更大;在微波交替开启的方式下,测试盘中物料含水率亦存在着一定差异,且不均匀性趋势与微波整体开启方式相似,但相比较而言,交替开启方式下物料含水率差异要小得多,其干燥均匀性要比整体开启方式好。

1、5、10 号盘的各测点物料含水率均匀度如表 1 所示,由表 1 可见,与整体开启方式相比,微波交替开启可明显改善物料的干燥均匀性,尤其是 5 号盘中各测点含水率均匀度可提高 58.1%。试验中,11、15、20 号盘测试结果也与 1、5、10 号盘的测试结果类似。

表 1 1、5、10 号盘含水率均匀度

Tab. 1 Degree of uniformity of material moisture content in plate 1, 5 and 10 %

测试盘编号	开启方式	
	整体开启	交替开启
1	73.0	83.9
5	52.8	83.5
10	71.0	84.6

试验中,20 盘物料在干燥仓中堆放成两堆,整体呈现出料盘周边物料干燥速度快、中心部位干燥慢的趋势,而且这种趋势在微波整体开启方式下更为明显。究其原因,一方面可能是由于微波馈口布置在物料外周,微波对物料由外而内穿透造成微波场强由外而内的衰减,物料料层外围场强高,中心部位场强低;另一原因可能是由于设备采用堆垛式的架料方式,尽管中间物料升华的水蒸气能排出料堆,

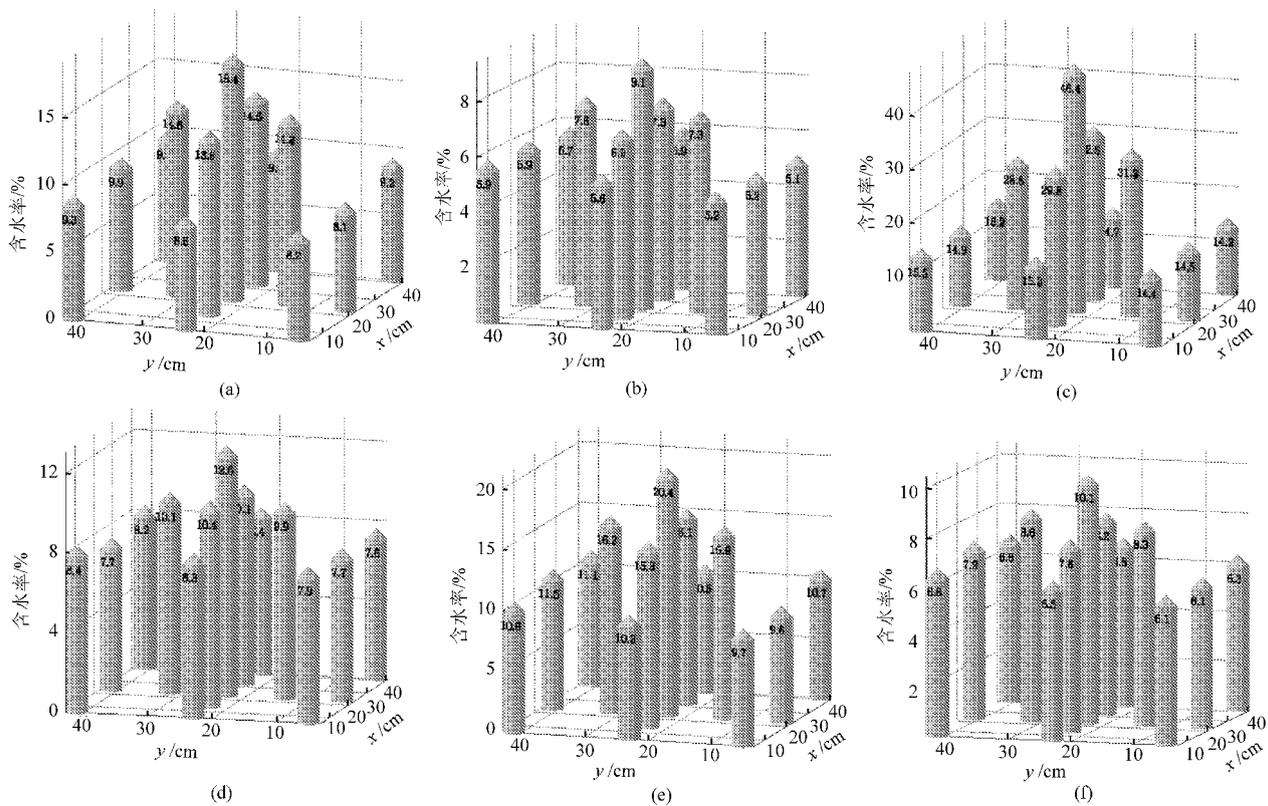


图8 1、5、10号盘物料含水率分布

Fig.8 Distribution of material moisture content in the plate 1,5 and 10

(a) 10号盘,整体开启 (b) 10号盘,交替开启 (c) 5号盘,整体开启 (d) 5号盘,交替开启 (e) 1号盘,整体开启 (f) 1号盘,交替开启

但由于其流通阻力相对较大,而外层物料升华的水蒸气流通阻力小,在升华高峰期间,物料料层内部局部气压要高于外层,导致外层物料干燥速度大于内部物料干燥速度。

4 优化方案

本试验中,将微波磁控管分成左右两组,按照一定的时间间隔交替开启,对改善本设备的干燥均匀性起到较好效果。按照试验中的微波控制方案,干燥5h后10号盘物料的平均含水率达到6.4%,5号盘的平均含水率为9.0%,从平均含水率指标基本可以判定10号盘已达到冻干产品要求,而5号盘也接近干燥终点。但整体来看,20盘物料仍存在不同料盘物料间和同一料盘内物料的干燥速度差异,影响干燥效率和干燥品质。根据上述试验,提出如下解决方案:

(1) 干燥后期精细调节微波开启和功率调整

在微波冻干过程后期,物料中残留水分递减,也必须适当降低微波功率输入,以避免干燥后期微波能量过剩而引起低压放电问题,防止损坏干燥设备和制品品质。因此,10只磁控管分两组交替开启的方案无法持续到干燥终点,而应该在干燥后期采用循环开启单只或两只磁控管的方法,且适当提高与中间层料盘相近的微波磁控管的开启频率和时间,

以加快中间料盘的干燥速度,尽可能使各层料盘干燥速度保持一致。

(2) 进一步优化微波系统的控制方案

可以从微波磁控管的分组方法、交替开启时间、功率调整方案等方面进一步优化微波控制系统控制方案,并尽可能进行自动控制,减少人工控制误差。

(3) 改变料盘铺料方式

可以从铺料方式上尽可能改善干燥均匀性。针对料盘中心部位干燥速度比周边物料干燥速度慢的问题,在装料时可以有选择性的进行铺料,即在料盘中心区域铺料要薄而疏,在料盘周边铺料要厚而密。针对各层料盘脱水量的差异问题,可以采用在外层料盘多铺料、中间层料盘适当少铺料的铺料方式。

(4) 改善料架和料盘结构设计

为确保干燥过程中(尤其是升华高峰期间)各层料盘气流畅通,通过改进料架和料盘的结构设计,适当增加料堆中料盘上下间距,降低水蒸气的流通阻力,减小料层内部的局部高压环境对干燥速度的影响。

5 结论

(1)微波冻干试验中,20盘物料呈现中间层干燥速度慢、外层干燥速度快的趋势,料盘之间的脱水

- 4 吉海彦,王鹏新,严泰来. 冬小麦活体叶片叶绿素和水分含量与反射光谱的模型建立[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3):514~516.
Ji Haiyan, Wang Pengxin, Yan Tailai. Estimations of chlorophyll and water contents in live leaf of winter wheat with reflectance spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(3):514~516. (in Chinese)
- 5 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- 6 郑咏梅,张军,陈星旦,等. 基于逐步回归法的近红外光谱信息提取及模型的研究[J]. 光谱学与光谱分析,2004, 24(6):675~678.
Zheng Yongmei, Zhang Jun, Chen Xingdan, et al. Research on model and wave and wavelength selection of near infrared spectral information [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(6):675~678. (in Chinese)
- 7 张淑娟,王凤花,张海红,等. 鲜枣品种和可溶性固形物含量近红外光谱检测[J]. 农业机械学报,2009,40(4):139~142.
Zhang Shujuan, Wang Fenghua, Zhang Haihong, et al. Detection of the fresh jujube varieties and SSC by NIR spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):139~142. (in Chinese)
- 8 夏俊芳,李培武,李小昱,等. 不同预处理对近红外光谱检测脐橙 VC 含量的影响[J]. 农业机械学报,2007,38(6):107~111.
Xia Junfang, Li Peiwu, Li Xiaoyu, et al. Effect of different pretreatment method of nondestructive measure vitamin C content of umbilical orange with near-infrared spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6):107~111. (in Chinese)
- 9 张喜杰,李民赞. 基于反射光谱的温室黄瓜叶片磷素含量分析与预测[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(10):2404~2408.
Zhang Xijie, Li Minzan. Analysis and estimation of the phosphorus content in cucumber leaf in greenhouse by spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10):2404~2408. (in Chinese)

(上接第 135 页)

量差异随着干燥进程而逐渐减小,且与整体连续开启方式相比,微波交替间歇开启方式能明显提高料盘之间的干燥均匀性。

(2)干燥过程中,同一料盘呈现周边物料干燥速度快、中心部位干燥速度慢的趋势,与整体连续开启方式相比,微波交替间歇开启方式可明显改善同一料盘的干燥均匀性。

参 考 文 献

- 1 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):105~108.
Cao Youfu, Han Qinghua, Li Shujun, et al. Design and experiment on microwave vacuum free drying equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):105~108. (in Chinese)
- 2 段续,张愨,朱文学. 食品微波冷冻干燥技术的研究进展[J]. 化工机械,2009(3):178~184.
Duan Xu, Zhang Min, Zhu Wenxue. Research progress of microwave freeze drying technique for foods [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2009(3):178~184. (in Chinese)
- 3 胡志超,陈有庆,谢焕雄,等. 微波真空冷冻干燥技术研究及应用现状[J]. 农机化研究,2009,31(9):6~9.
Hu Zhichao, Chen Youqing, Xie Huanxiong, et al. Present situation of research and application for microwave vacuum freeze drying technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(9):6~9. (in Chinese)
- 4 韩清华,李树君,马季威,等. 连续式微波真空干燥设备的研究[J]. 农业机械学报,2006,37(8):136~139.
Han Qinghua, Li Shujun, Ma Jiwei, et al. Study on continuous microwave vacuum drying equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8):136~139. (in Chinese)
- 5 徐小东,崔政伟. 农产品和食品干燥技术及设备的现状和发展[J]. 农业机械学报,2005,36(12):171~174.
- 6 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 & Technology, 2009, 24(4):58~61. (in Chinese)
- 7 施明恒,祝涛,王朝晖. 蜂王浆微波冷冻干燥特性的实验研究[J]. 东南大学学报,1998,28(11):1~6.
Shi Mingheng, Zhu Tao, Wang Zhaohui. Experimental investigation on the drying characteristics of royal jelly in microwave freeze drying [J]. Journal of Southeast University, 1998, 28(11):1~6. (in Chinese)
- 8 王朝晖. 微波冷冻干燥过程的传热传质机理[D]. 南京:东南大学,1996.
Wang Zhaohui. Heat and mass transfer during microwave freeze drying [D]. Nanjing: Southeast University, 1996. (in Chinese)