

陶志超,杨 昭,余 飞,等. 绿豆种子超声波-热泵联合间歇干燥动力学研究[J]. 江苏农业科学,2020,48(5):193-197.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.05.041

绿豆种子超声波-热泵联合间歇干燥动力学研究

陶志超,杨 昭,余 飞,杨宗豫

(天津大学机械工程学院,天津 300350)

摘要:在连续干燥的基础上进行超声波-热泵联合间歇干燥动力学试验,探究不同干燥温度(28、33、38 ℃)、相同超声波条件(功率 100 W、频率 28 kHz)和不同间歇比(0、1/3、1/2)条件下绿豆种子的干燥动力学。结果表明,间歇干燥可以减少有效干燥时间,提高能量利用率;不同干燥温度须采取合适的间歇比才能更有效地提升干燥效果,温度较低时采用高间歇比,温度较高时采取低间歇比;缓苏期的存在确实能够提升后续干燥阶段的干燥速率,在干燥后期效果尤为明显。

关键词:绿豆种子;超声波-热泵联合;干燥动力学;间歇干燥

中图分类号: TS210.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)05-0193-05

绿豆是我国主要的食用豆类作物之一,其营养丰富,食用价值很高^[1],富含碳水化合物、脂肪、蛋白质、膳食纤维、矿质元素、维生素等^[2],产量和出口量均位于世界前列,在现代农业中占据重要位置。然而要保证绿豆来年的丰收需要大量的种子,而一般新收获的种子水分含量高达 25%~35%,高水分会加强种子呼吸作用,导致其发热霉变^[3],所以必须及时干燥,把种子水分降到安全水平以保证种子活力和安全贮藏。

收稿日期:2019-03-07

基金项目:天津市自然科学基金重点项目(编号:16JCZDJC33900)。

作者简介:陶志超(1993—),男,湖北云梦人,硕士,主要从事热泵技术研究。E-mail:916485490@qq.com。

通信作者:杨 昭,博士,教授,主要从事制冷与热泵技术研究。

E-mail:zhaoyang@tju.edu.cn。

对于种子、果蔬等热敏性物料,传统对流干燥方式将不适用,因为这种干燥方式对物料长时间高温干燥后,干燥产品的风味、颜色和营养成分会受到严重损害,干燥产品的质量降低^[4]。热泵干燥可以比较精确地控制干燥箱内温湿度条件,具有环境友好、干燥产品质量较高的特点^[5],但其较低的干燥温度会极大地延长干燥时间。超声波作为一种机械振动波,在物料内部会产生空化作用和机械效应,从而可以提高水分的扩散与迁移^[6]。因此国内外许多学者提出,将超声波技术应用于热风干燥,降低水分扩散阻力,加快物料的干燥速率^[7-8]。

间歇干燥是一种在干燥过程中改变对物料供应热能大小的干燥方式,可以通过改变干燥空气的流速、温度、湿度或者压力来实现,相比于连续干燥可以提高能源利用率和干燥质量^[9]。目前,这种干

[5] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品添加剂 维生素 C(抗坏血酸):GB 14754—2010[S].

[6] 王学奎,黄见良. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2015:189-191.

[7] 高俊凤,孙 群,曹翠玲,等. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:103-105.

[8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2004:197-199.

[9] 蔡 冲. 植物生物学实验[M]. 北京:北京师范大学出版社,2013:130-131.

[10] 秦跃龙. CO₂ 马铃薯块茎采后品质的影响研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2014:10.

[11] 石 瑛,秦 昕,卢翠华,等. 不同马铃薯品种贮藏期间还原糖及干物质的变化[J]. 中国马铃薯,2002,16(1):16-18.

[12] 田甲春,田世龙,程建新,等. 贮藏温度对马铃薯品质和采后生理的影响[J]. 保鲜与加工,2017,17(3):16-20.

[13] 陈 芳,胡小松. 马铃薯块茎“低温糖化”机理的研究及进展[J]. 马铃薯杂志,1998,12(1):52-55.

[14] 司怀军,戴朝曦,田振东,等. 贮藏温度对马铃薯块茎还原糖含量的影响[J]. 西北农业学报,2001,10(1):22-24.

[15] 朱 旭. 贮藏温度和堆码高度对克新 1 号马铃薯贮藏损失[D]. 长春:吉林大学,2014:4-5.

[16] 周长艳. 不同贮藏条件下马铃薯生理特性的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

[17] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. Trends in Plant Science,2002,7(9):405-410.

[18] 刘喜平,陈彦云. 外源钾对马铃薯块茎贮藏期间酶活性的影响[J]. 安徽农业科学,2011,39(28):17548-17550.

干燥方式已经应用于多种热敏性物料。Chin 等研究了松杉灵芝的热泵间歇干燥工艺,结果表明,在干燥温度为 40.6 ℃ 时,间歇比 0.8 的干燥方式相比于连续干燥,总色差减少了 54.17%^[10];冯云等探究不同间歇比和不同微波功率对肉鸡翅根干燥动力学和干燥品质的影响,结果表明,间歇干燥相对于连续干燥能够提高外观完整性、减少能量消耗和降低收缩率等^[11]。李天夏以枸杞为对象,研究微波间歇比、风速和初始含水率对干燥速率、能耗和枸杞感官品质的影响,获得了其最佳工艺参数^[12]。

间歇干燥方式大多用于单一干燥技术,对于在多种干燥技术联合的基础上进一步采用间歇干燥方法的研究几乎没有。因此,本研究在超声波-热泵联合干燥的基础上进行绿豆种子间歇干燥,比较不同间歇比下的干燥动力学,并与连续干燥作比较,优化超声波-热泵联合干燥工艺,从而提高绿豆种子的贮藏特性,保证播种品质,并为超声波-热泵联合干燥技术在干燥行业的发展奠定实验和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用的绿豆种子为稻田绿豆,原产地为辽宁省朝阳市,购买于天津市某种子子公司。试验前根据国标 GB/T 3543.6—1995《农作物种子检验规程 水分测定》,采用低温烘干法测定绿豆种子初始干基含水率为 12%。通过人工配水至含水率 30%,然后密封存放于(4±1) ℃ 的冰箱中。

1.2 仪器设备

超声波与热泵联合干燥设备由天津大学先进制冷与热泵实验室研发,具体结构参考文献[13]。电热鼓风干燥箱(天津科学仪器设备有限公司),FZ-102 微型植物粉碎机(天津泰斯特仪器有限公司),JA5003 电子天平(上海精密科学仪器有限公司),THD-M1 系列超声波装置(深圳科美达超声波有限公司)。

1.3 试验方法

在干燥试验之前 12 h 从冰箱中取出绿豆种子,放置于室温环境,试验时将种子以单层均匀的形式平铺在物料托盘中。本试验的干燥条件如表 1 所示,为了与连续干燥进行对比,干燥温度设置为 28、33、38 ℃,超声波条件设置为功率 100 W、频率 28 kHz,其中包括 3 种干燥模式,每个模式的干燥时

间均为 12 h,连续干燥过程持续通入干燥空气,缓苏过程停止通气,具体如下:

干燥模式 1:以 1 h 为 1 个干燥阶段,在每个干燥阶段先连续干燥 40 min,后缓苏 20 min,间歇比为 $\alpha=1/3$;干燥模式 2:以 1 h 为 1 个干燥阶段,在每个干燥阶段先连续干燥 30 min,后缓苏 30 min,间歇比为 $\alpha=1/2$;干燥模式 3:连续干燥,间歇比为 0。

表 1 超声波-热泵联合间歇干燥试验条件

| 组数 | 干燥温度 (℃) | 超声波功率 (W) | 超声波频率 (kHz) | 间歇比 α |
|----|-------------|--------------|----------------|--------------|
| 1 | 28 | 100 | 28 | 0 |
| 2 | 28 | 100 | 28 | 1/3 |
| 3 | 28 | 100 | 28 | 1/2 |
| 4 | 33 | 100 | 28 | 0 |
| 5 | 33 | 100 | 28 | 1/3 |
| 6 | 33 | 100 | 28 | 1/2 |
| 7 | 38 | 100 | 28 | 0 |
| 8 | 38 | 100 | 28 | 1/3 |
| 9 | 38 | 100 | 28 | 1/2 |

1.4 干燥参数计算

本试验采用含水率随时间的变化曲线来描述绿豆种子的干燥过程,不同干燥时间种子的水分比由式(1)计算得到:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \tag{1}$$

式中: M_t 为物料在任意时间 t 的含水率(干基),g/g; M_0 为初始含水率(干基),g/g; M_e 为平衡含水率(干基),g/g。

绿豆种子干燥速率 DR 的计算采用以下公式:

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \tag{2}$$

式中: DR 为干燥时间 t_1 和 t_2 之间种子的干燥速率,g/(g·h); M_{t_1} 和 M_{t_2} 为干燥时间 t_1 和 t_2 物料的含水率(干基),g/g。

2 结果与分析

2.1 不同间歇比的干燥曲线分析

从图 1、图 2 和图 3 中可以看出,间歇干燥的确实可以减少有效干燥时间(有效干燥时间为除去缓苏期的干燥时间)。以 18.00% 为目标含水率,当温度分别为 28、33、38 ℃ 时,连续干燥($\alpha=0$)的总干燥时间分别为 246、172、128 min,有效干燥时间分别为 246、172、128 min,则单位时间内含水率分别降低了 0.048 8、0.069 8、0.093 8 g/(g·min);间歇比 $\alpha=$

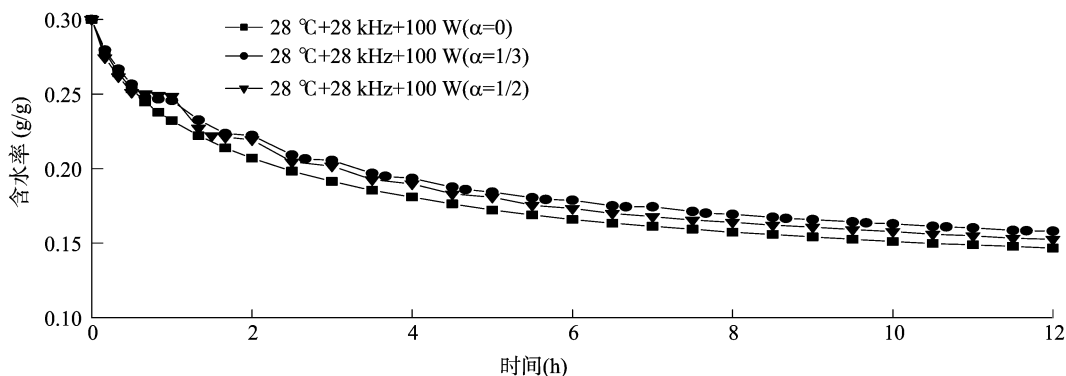


图1 干燥温度为 28 °C 时 3 种干燥模式的干燥曲线

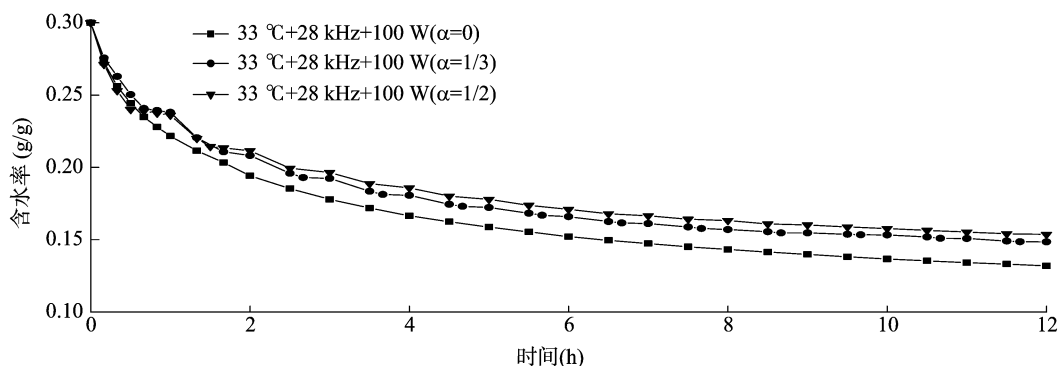


图2 干燥温度为 33 °C 时 3 种干燥模式的干燥曲线

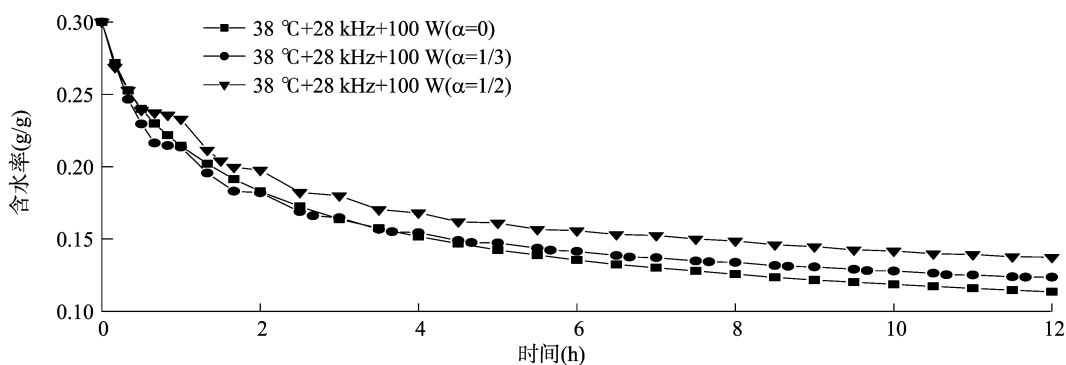


图3 干燥温度为 38 °C 时 3 种干燥模式的干燥曲线

1/3 的间歇干燥的总干燥时间分别为 296、243、125 min,有效干燥时间分别为 200、163、85 min,则单位时间内含水率分别降低了 0.060 0、0.073 6、0.141 2 g/(g·min);间歇比 $\alpha=1/2$ 的间歇干燥的总干燥时间分别为 346、271、180 min,有效干燥时间为 180、150、90 min,则单位时间内含水率分别降低了 0.066 7、0.080 0、0.133 3 g/(g·min)。虽然不同间歇比的间歇干燥相对于连续干燥总干燥时间较长,但单位时间内减少的含水率增加,从而使有效干燥时间减少。

另外,随着温度的变化,间歇比也会对干燥曲线产生不同的影响。当所有干燥方式的干燥时间都为 12 h 时,温度 28 °C 的最终含水率从高到底的间歇比顺序为 1/3、1/2、0;温度为 33 °C 的最终含水率从高到底的间歇比顺序为 1/2、1/3、0;温度为 38 °C 的最终含水率从高到底的间歇比顺序为 1/2、1/3、0。这可能是因为当温度较低时,干燥速率较低,所以缓苏时间长有助于提高干燥速率,导致最终的含水率降低。但当温度较高时,干燥期的干燥速率较高,缓苏期过长反而会降低整个过程的含水

率下降趋势,导致最终的含水率上升。所以不同温度下需采取合适的间歇比才能达到最佳的效果。

2.2 不同间歇比的干燥速率曲线分析

从图 4、图 5 和图 6 中可知,随着干燥的进行,连续干燥的干燥速率不断下降,直至后期干燥速率几乎为 0;而间歇干燥中,当干燥进入缓苏期时,干

燥速率很低,但缓苏期后的干燥期的干燥速率会得到明显的提升,即使到干燥后期干燥速率很低,缓苏期的存在仍能提高一定的干燥速率,从而加快干燥。种子的内部水分在缓苏期通过自由扩散的方式到达种子表面,从而使接下来的干燥阶段的干燥速率增大。

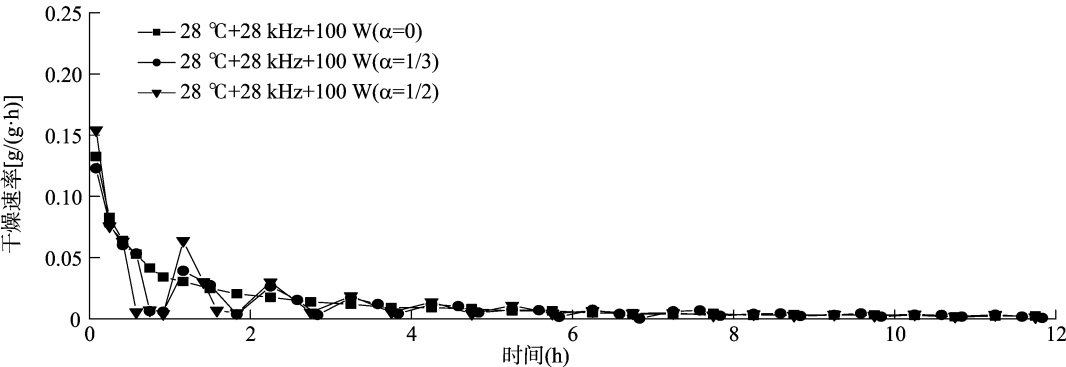


图4 干燥温度为 28 °C 时 3 种干燥模式的干燥速率曲线

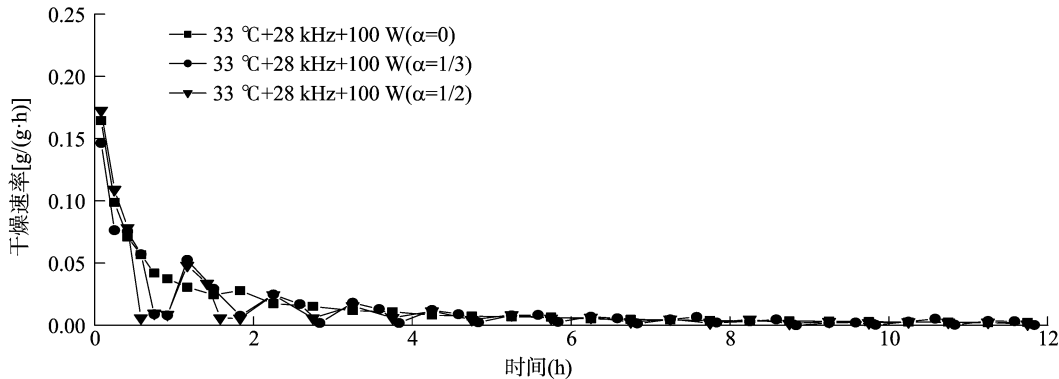


图5 干燥温度为 33 °C 时 3 种干燥模式的干燥速率曲线

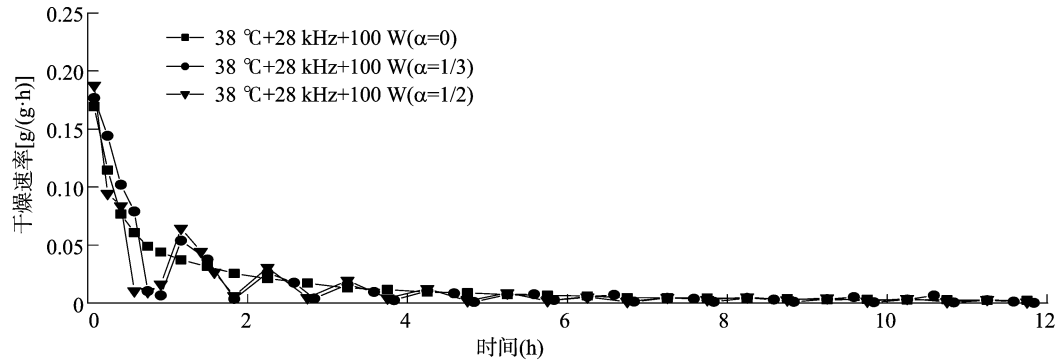


图6 干燥温度为 38 °C 时 3 种干燥模式的干燥速率曲线

2.3 干燥能耗除湿量分析

对于本系统,主要利用单位能耗除湿比 ($SMER$) 评价 3 种干燥模式的能量利用率,计算公式如下:

$$SMER = \frac{m_e}{W_1 + W_2} \quad (3)$$

式中: m_e 为总的除湿量, g; W_1 为热泵系统的总耗

功, $\text{kW} \cdot \text{h}$; W_2 为超声波系统的总耗功, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

本热泵系统的输入功率为 2.3 kW , 而超声波系统的功率为 0.1 kW , 则超声波-热泵联合干燥系统的总输入功率为 2.4 kW 。根据公式(3)对不同温度下 3 种干燥模式的单位能耗除湿量进行计算, 计算结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, 随着干燥温度的增加, $SMER$ 也增加。间歇干燥的 $SMER$ 明显高于连续干燥, 且 $SMER$ 会随着间歇比的增大而增加。这说明间歇干燥可以明显提高能量利用率, 而且间歇比越大, 能量利用率越高。

除了能够减少有效干燥时间、提高干燥速率和能量利用率外, 相关研究也证明间歇干燥可提高不同物料的干燥品质。Chua 等利用变温式的间歇干燥方法处理香蕉片, 发现香蕉片颜色劣变的情况得到有效改善^[14]; 马荐等采取缓苏干燥的方法对热敏性物料稻谷进行干燥, 得出缓苏干燥能够明显降低爆腰率的增值的结论^[15]; Cnossen 等也对稻谷的干燥进行研究, 认为间歇干燥可以有效提高稻谷的整米率^[16]。

表 2 不同干燥条件下的单位能耗除湿量

| 干燥温度 ($^{\circ}\text{C}$) | 间歇比 α | $SMER$ [$\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$] |
|--------------------------------|--------------|---|
| 28 | 0 | 0.204 9 |
| 28 | 1/3 | 0.284 3 |
| 28 | 1/2 | 0.393 7 |
| 33 | 0 | 0.224 5 |
| 33 | 1/3 | 0.303 5 |
| 33 | 1/2 | 0.391 0 |
| 38 | 0 | 0.249 1 |
| 38 | 1/3 | 0.353 4 |
| 38 | 1/2 | 0.434 3 |

3 结论

在超声波-热泵联合连续干燥动力学试验的基础上, 对种子进行超声波-热泵联合间歇干燥动力学试验, 分析结果后得到以下主要结论: (1) 间歇干燥虽然增加了总干燥时间, 但减少了有效干燥时间。(2) 不同干燥温度下间歇比对干燥过程会产生不同的影响, 温度较低时较高的间歇比有助于加快干燥过程, 温度较高时间歇比较低对干燥过程的促进作用更强, 所以不同的干燥温度须采用合适的间歇比才能更有效地提升干燥效果。(3) 缓苏期的存

在的确能够提升后续干燥阶段的干燥速率, 即使在后期干燥速率很低的情况下缓苏期仍然有一定的作用。(4) 间歇干燥可以明显提高能量利用率, 且能量利用率随着间歇比的增加而增大。

参考文献:

- [1] Du M X, Xie J H, Gong B, et al. Extraction, physicochemical characteristics and functional properties of mung bean protein[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 76: 131-140.
- [2] 曾 洁, 赵秀红. 豆类食品加工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 158.
- [3] 颜启传, 成灿山. 种子加工原理和技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001: 63.
- [4] Darvishi H, Khoshtaghaza M H, Minaei S. Drying kinetics and colour change of lemon slices[J]. International Agrophysics, 2014, 28(1): 1-6.
- [5] Kivevele T, Huan Z J. A review on opportunities for the development of heat pump drying systems in South Africa[J]. South African Journal of Science, 2014, 110(5/6): 1-11.
- [6] 罗登林, 徐宝成, 刘建学. 超声波联合热风干燥香菇片试验研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 185-189, 179.
- [7] 刘云宏, 孙畅莹, 曾 雅. 直触式超声功率对梨片超声强化热风干燥水分迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 284-292.
- [8] Bantle M, Eikevik T M. Parametric study of high-intensity ultrasound in the atmospheric freeze drying of peas[J]. Drying Technology, 2011, 29(10): 1230-1239.
- [9] Kumar C, Karim M A, Joardder M U. Intermittent drying of food products: a critical review[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121: 48-57.
- [10] Chin S K, Law C L. Product quality and drying characteristics of intermittent heat pump drying of ganoderma tsugae murrill[J]. Drying Technology, 2010, 28(12): 1457-1465.
- [11] 冯 云, 李沛生, 周厚源, 等. 微波间歇处理对肉鸡翅根干燥特性及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(10): 69-75.
- [12] 李天夏. 枸杞微波间歇干燥特性研究与试验[D]. 银川: 宁夏大学机械工程学院, 2017: 1-57.
- [13] 朱宗升. 超声波-热泵联合干燥热力学分析及青豆种子干燥特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2015: 15-16.
- [14] Chua K J, Mujumdar A S, Hawlader M A, et al. Batch drying of banana pieces - effect of step-wise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour[J]. Food Research International, 2001, 34(8): 721-731.
- [15] 马 荐, 李成华, 王丹阳. 干燥工艺参数对稻谷爆腰率增值的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(1): 114-117.
- [16] Cnossen A G, Jimenez M J, Siebenmorgen T J. Rice fissuring response to high drying and tempering[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(1): 61-69.