

高丽菜脉冲喷动床-低频微波干燥品质与能耗

王玉川¹, 王博², 王义祥³, 夏雅倩¹, 徐晶晶¹

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏大学 食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013; 3. 江苏省翠源食品股份有限公司, 江苏 盐城 224231)

摘要: 为解决调理蔬菜热风干燥(AD)产品粘连、品质差、能耗高及高污染等问题, 以高丽菜为实验原料, 利用常压脉冲喷动床-低频微波干燥(PSBLMD)中试平台, 进行调理高丽菜 PSBLMD 品质、均匀度及能耗研究, 并与 AD 方式进行对比分析。结果表明, PSBLMD 调理高丽菜(加糖比例 15%)抗坏血酸质量浓度、叶绿素质量浓度及复水比(4.69 mg/hg、3.48 mg/hg、26.22)均高于 AD 高丽菜相应值(1.46 mg/hg、3.14 mg/hg、19.40), PSBLMD 样品的水分、色差及收缩率均匀度(91.2%、93.7%、92.3%)达到 90%以上; 与 AD 方式相比, PSBLMD 不但可以有效解决高糖调理高丽菜干燥过程产品粘结问题, 提升干燥产品品质, 而且缩短干燥周期 50%以上且降低能耗 40%以上。

关键词: 脉冲喷动床; 低频微波干燥; 品质; 能耗; 高丽菜

中图分类号: TS 205.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2018)12—1299—07

Study on the Quality and Energy Consumption of Pulse Spouted Bed Low Frequency Microwave Drying of Cabbage

WANG Yuchuan¹, WANG Bo², WANG Yixiang³, XIA Yaqian¹, XU Jingjing¹

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Jiangsu Cuiyuan Food Co., LTD., Yancheng 224231, China)

Abstract: Hot air drying(AD) of vegetables has many disadvantages including agglomeration, poor quality, high energy consumption and heavy pollutions. In this study, we used cabbage as the raw material, pulse spouted bed low frequency microwave drying (PSBLMD) as the drying method to build a pilot scale research platform. The quality, uniformity and energy consumption of the PSBLMD-dried cabbages were compared with those of the AD-dried ones. Results shown that the amount of ascorbic acid, chlorophyll and the rehydration ratio of PSBLMD-dried cabbages with 15% sugar addition (4.69 mg/hg, 3.48 mg/hg and 26.22, respectively) was higher than those of the AD

收稿日期: 2018-07-17

基金项目: 苏北科技专项-富民强县项目(SZ-YC2017005)。

作者简介: 王玉川(1966-), 男, 河南周口人, 工学博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事农产品加工技术与工程化方面的研究。

E-mail: wyc453@163.com

引用本文: 王玉川, 王博, 王义祥, 等. 高丽菜脉冲喷动床-低频微波干燥品质与能耗[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(12): 1299-1305.

dried cabbages (1.46 mg/hg, 3.14 mg/hg and 19.40, respectively). The uniformity of the products regarding the moisture content, the color appeal and the shrinkage ratio of PSBLMD-dried cabbages were >90%. Compared to AD, PSBLMD not only effectively solved the agglomeration problem during the drying process, but also improved the quality of the dried products. It shortened the drying time by >50% and reduced the energy consumption by >40%.

Keywords: pulse-spouted bed, low frequency microwave drying, quality, energy consumption, cabbage

目前, 蔬菜热风干燥加工技术及装备相对成熟, 热风干燥蔬菜已广泛应用于食品工业配料、调味品、即食休闲制品和新鲜果蔬替代品等方面^[1]。但是, 传统热风干燥技术与装备存在高能耗、高成本、低品质及智能化程度低等突出难题, 这些难题已制约蔬菜干燥产业及骨干龙头企业的健康发展^[2]。

利用高效物理(微波、射频、红外等)辅助热风干燥加工技术及装备是提升传统常压蔬菜干燥加工行业的一个重要方向。国内外大量研究证明, 高效微波场组合传统热风干燥能够显著地提高干燥效率、缩短干燥周期、降低干燥能耗、减少环境污染、改善产品品质^[3]。但是, 微波组合热风干燥也存在均匀性差、品质劣变严重等难题, 制约这一技术的商业化应用。美国、加拿大等发达国家在微波场、流化床与传统热风干燥组合干燥技术及装备研究方面取得了突破, 部分研究成果已开始应用于果蔬干燥产业, 极大地提高了果蔬干燥效率, 有效降低了干燥能耗^[4]。

低频微波(915 MHz)与高频微波(2 450 MHz)相比, 具有穿透能力大、微波功率易于调控及提高干燥加工产能等优势^[4]。微波加热与脉冲喷动床干燥结合传统热风干燥的微波-脉冲喷动床干燥技术能够实现蔬菜高效、节能及均匀干燥。但是, 国内外微波-脉冲喷动床组合干燥研究重点在高频微波方面, 在低频微波-脉冲喷动床组合干燥方面相关研究文献鲜有报道^[5]。

针对热风干燥蔬菜干燥时间长、耗能高、品质低及重污染等难题及漂烫加糖调理导致干燥过程产品黏连、费时及费力等问题, 作者以高丽菜为实验原料, 进行低频微波-脉冲喷动组合干燥品质、均匀性及能耗研究, 探讨低频微波-脉冲喷动干燥组合技术替代传统热风干燥技术的可行性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

高丽菜, 购于江南大学天惠超市。漂烫前去除蛀虫、腐烂叶片, 清洗后切成 10 mm×10 mm 正方形片状, 去除茎和根后放入 0~4 °C 冷藏柜内待用。经检测, 新鲜高丽菜的水分质量分数为 92.4%; 调理用葡萄糖: 江苏翠源食品股份有限公司提供, 生产厂家为山东青州市华康生物科技有限公司。

1.2 实验方案

实验方案见表 1。两个批次预处理的高丽菜样品用于本次实验, 第一批样品主要用于研究不同加糖比例调理预处理对高丽菜脉冲喷动床-低频微波干燥(PSBLMD)与热风干燥(AD)品质影响, 包括水分质量分数、叶绿素、抗坏血酸、复水能力; 第二批样品主要用于研究在加糖质量分数为 15% 调理预处理条件下高丽菜 PSBLMD 与 AD 干燥均匀度(水分、色差及收缩率)及干燥能耗。

表 1 实验方案

Table 1 Experimental design of the study

调理预处理	应用	测量项目
第一批样品 加糖质量分数 5%、 10%、15%	脉冲喷动床-低频微波干燥 (PSBLMD) 热风干燥(AD)	含水率、叶绿素、抗坏血酸、复水能力
第二批样品 加糖质量分数 15%		均匀度(水分质量分数、色差、收缩率)、干燥能耗

1.3 实验仪器

使用的主要仪器见表 2。

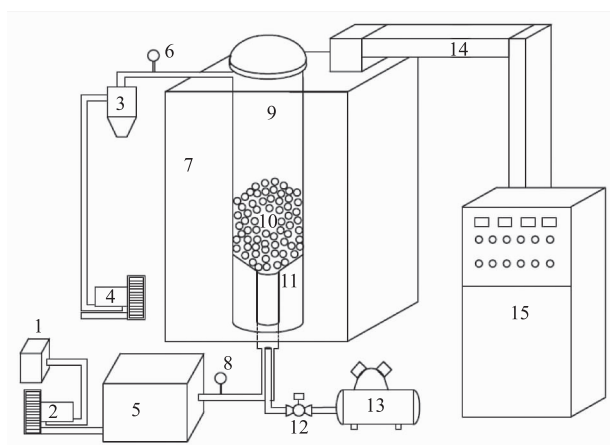
1.4 PSBLMD 中试设备

本实验采用的 PSBLMD 中试平台由作者设计加工^[1]。它是由 915 MHz 微波发生器、微波加热腔、喷动床、送风装置、抽湿装置、脉冲喷动装置及控制装置等组成, 见图 1-2。

表2 实验仪器名称及制造厂家

Table 2 Name and manufacturer of laboratory equipment

名称	型号	制造厂家
电热鼓风干燥箱	GZX-9140MBE	上海博讯实业有限公司医疗设备厂
电子天平	FA1004	上海舜宇恒平科技仪器有限公司
光纤测温仪表	MD-A	加拿大 Neoptix 公司
分光光度计	UV2600	天肯(上海)贸易有限公司
色差仪	CR-400	日本佳能公司
红外热像仪	IRI 4010	英国 IRISYS 公司



1.空气过滤器;2.送风机;3.气固分离器;4.抽湿风机;5.加热器;6.温湿度表;7.微波加热腔;8.温度表;9.干燥仓;10.样品;11.喷动床;12.脉冲电磁阀;13.空气压缩机;14.波导;15.微波发生器(含环路器、水负载)

图1 PSBLMD 中试实验设备系统图

Fig. 1 Schematic diagram of PSBLMD pilot scale test equipment

微波发生器产生的微波频率为 915 MHz,微波功率为 5 kW(南京三乐公司制造),微波发生器通过环路器、水负载、波导与微波加热腔相连接。微波加热腔设计为长方体,内尺寸为长 800 mm、宽 800 mm、高 1 250 mm,采用不锈钢材料制作,微波溃口设计在腔体上方。喷动床设计为圆柱型,采用玻璃制作,直径为 300 mm、高 1250 mm,上下端采用不锈钢法兰固定,喷动床锥度为 60 度,分布器采用圆柱型结构,直径为 80 mm,设计为垂直移动,实现干燥物料的排出。送风装置带走物料干燥过程产生的水蒸汽,由送风机、加热器、温度控制器构成。抽湿装置除去物料干燥过程产生的水蒸汽,由气固分离器、抽湿风机及温湿度计构成。送风机及抽湿风机转速根据喷动床出口空气温湿度通过变频器进行

调节。脉冲喷动装置由空压机、脉冲电磁阀及定时器组成,高压气体通过分布器进入喷动床,脉冲喷动气体的频率及时间由定时器进行控制。



(a)微波加热腔与微波发生器



(b)热风供给及抽湿装置



(c)脉冲喷动装置

图2 PSBLMD 中试实验设备实物图片

Fig. 2 PSBLMD pilot test scale equipment

1.5 调理预处理

1.5.1 高丽菜 AD 调理预处理 采用传统热水漂烫工艺。每次漂烫时,从冷藏柜内取出样品约 500 g,放入 95~98 ℃热水中漂烫 60 s(样品升温时间控制在 10 s 内),漂烫后沥水、称质量,按样品质量分数分别加入 5%、10%、15%的葡萄糖粉,拌匀后静置 5 min 待用。

1.5.2 高丽菜 PSBLMD 调理预处理 采用低频微波(915 MHz)干法漂烫工艺,漂烫与干燥过程采用一体化装置。每次漂烫时,从冷藏柜内取样品约 1 kg,按样品质量分数分别加入 5%、10%、15%的葡萄糖粉,拌匀后放入干燥仓内进行低频微波漂烫,微波功率 2.6 kW(阳极电流 0.4 A),漂烫时间 60 s(样品温度升到 98 ℃停止加热),漂烫结束后样品不需要取出,静置 5 min 后直接进入 PSBLMD 程序。

1.6 干燥过程及干燥参数

1.6.1 PSBLMD 干燥过程及参数 高丽菜样品在干燥仓内漂烫结束后直接进行干燥,干燥结束后样品从下部取出。根据预实验,干燥参数设定为:样品质量 1 kg,干燥时间 2.5 h,微波功率采用两段式,干燥前 1 小时设定为 1.95 kW(阳极电流 0.3 A),干燥 1 h 后到干燥结束设定为 1.3 kW(阳极电流 0.2 A),

送风温度为 70 ℃, 脉冲喷动频率为 12 次/min, 每次喷动时间为 2 s, 干燥前 1 小时送风机与抽湿风机频率设定为 50 Hz, 干燥 1 h 后频率调整为 30 Hz。在干燥过程中, 样品温度采用光纤传感器进行测量。

1.6.2 AD 干燥过程及参数 每次干燥取漂烫加糖调理预处理高丽菜样品约 1 kg, 放入不锈钢网筛托盘内, 单层摆放厚度约 5 mm 及 10 mm 两种方案, 用于干燥能耗对比, 放入热风干燥箱中, 烘箱温度设定为 80 ℃, 烘干时间约 5.5 h。

1.7 品质测量

高丽菜抗坏血酸含量采用国标 (GB 5009.86 - 2016) 第三法“2,6-二氯酚酚滴定法”^[6]进行测量, 叶绿素的含量测定采用农业行业标准 (NY/T3082 - 2017) 分光光度法^[7], 复水能力采用复水比计算, 并参照农业行业标准 (NY/T1045-2014)^[8]进行检测。

1.8 均匀度测定

水分检测方法采用国标 (GB 5009.3-2016)“食品安全国家标准食品中水分的测定第一法(直接干燥法)”^[9]; 收缩率检测方法参照国标 (GB/T6949 - 1998) 煤的相对感观密度的方法进行测量^[10], 先测量样品的感观密度, 根据样品质量, 再计算出样品体积, 最后计算干制品收缩率^[11]; 色差检测方法采用 CR-400 色差仪器测量新鲜及干燥样品的 L 、 a 、 b , 再计算 ΔE 。

从干燥制品中随机抽 10 批样品, 每批样品质量大约 10~15 g, 测量 10 批样品的水分、收缩率及色差值, 计算平均值 (MEAN), 求取标准偏差 (SD), 按式 (1) 计算干燥样品水分、收缩率及色差的均匀度。

$$UD = (1 - SD/MEAN) \times \% \quad (1)$$

产品温度均匀性采用红外热成像仪测量及分析。物料从喷动床内取出后立刻放置于一个自制的保温圆柱型塑料容器 (直径 15 cm, 高 10 cm) 内, 然后采用红外热成像进行干燥产品温度分布测定。

1.9 能耗测量

不同干燥方式的能耗采用现场测量方式, 具体方法是在干燥设备进线及设备各系统进线安装电表, 测量一个干燥周期内干燥设备及各系统所消耗的电度数, 根据一个干燥周期内生产干制品的质量计算单位干制品所消耗的电度数 (kWh/kg)。

1.10 数据分析方法

本实验数据处理采用 SPSS 21.0 软件进行分

析, 每个实验至少重复 3 次, 实验数据表示为平均值 $\pm$ 标准差, 统计结果以 one way ANOVA 方法进行显著性检验, $p < 0.05$ 为组间显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同加糖质量分数对 PSBLMD 及 AD 高丽菜含水率的影响

不同的预处理方式影响蔬菜的内部结构及分组成, 进而影响其干燥特性及品质属性。从表 3 可以看出, 加糖比例对两种干燥方式高丽菜的最终含水率有一定的影响, 在同样的干燥时间下, 随着加糖质量分数的增加, 干燥高丽菜的含水率有所降低。产生这种现象的原因主要是葡萄糖液的渗透作用, 加糖比例高导致高丽菜内部迁移到外部的水分增加, 提高干燥速率^[12]。同时, 从表 3 也可以看出, 高丽菜干燥到同样的水分质量分数 (8% 以下), PSBLMD 方式能够显著地缩短干燥周期 (干燥时间为 2.5 h), 与 AD 方式 (干燥时间为 5.5 h) 相比, PSBLMD 缩短干燥时间 50% 以上。

表 3 不同加糖质量分数 PSBLMD 及 AD 高丽菜含水率

Table 3 Moisture contents of the cabbages dried by PSBLMD and AD with different added sugar ratios

干燥方式	加糖质量分数		
	5%	10%	15%
PSBLMD (2.5 h)	7.92 $\pm$ 0.34	7.59 $\pm$ 0.39	7.36 $\pm$ 0.41
AD (5.5 h)	7.53 $\pm$ 0.24	7.43 $\pm$ 0.28	7.35 $\pm$ 0.36

2.2 不同加糖质量分数对 PSBLMD 及 AD 高丽菜抗坏血酸质量分数的影响

抗坏血酸是脱水蔬菜产品中重要的营养成分, 不同的预处理及干燥方式对高丽菜抗坏血酸产生重要的影响。从表 4 可以看出, 随着加糖质量分数的增加, 干燥高丽菜样品抗坏血酸质量分数减少。这种原因主要是干燥样品中葡萄糖比例增加导致抗坏血酸质量分数降低。从表 4 也可以看出, 在同样的加糖质量分数条件下, 采用 PSBLMD 方式干燥的高丽菜中抗坏血酸保留量明显高于 AD 方式, 即 PSBLMD 样品中抗坏血酸质量分数是 AD 样品抗坏血酸质量分数的 2 倍多。这种原因主要是因为相对于 AD 方式, 高丽菜采用低频微波干法漂烫及 PSBLMD 能够缩短漂烫及干燥时间, 减少高丽菜中抗坏血酸损失^[2]。这种现象表明, 低频微波漂烫与脉

冲喷动干燥一体化工艺与设备能够减少高丽菜干燥过程中抗坏血酸损失。

表 4 不同加糖质量分数时 PSBLMD 及 AD 高丽菜抗坏血酸质量分数

Table 4 Ascorbic acid content of the cabbages dried by PSBLMD and AD with different added sugar ratios

干燥方式	加糖质量分数/(mg/kg)		
	5%	10%	15%
PSBLMD(2.5 h)	11.43±0.34	5.72±0.23	4.69±0.18
AD(5.5 h)	4.37±0.14	2.83±0.11	1.46±0.07

2.3 不同加糖质量分数对 PSBLMD 及 AD 产品叶绿素质量分数的影响

叶绿素是脱水蔬菜产品中重要的营养成分,不同的预处理及干燥方式都会带来干燥高丽菜产品中叶绿素的损失。不同加糖质量分数对 PSBLMD 及 AD 两种干燥方式高丽菜中叶绿素质量分数的影响见表 5。随着加糖质量分数的增加,干燥高丽菜样品中叶绿素质量分数同抗坏血酸质量分数一样减少。这种原因主要也是干燥样品中葡萄糖质量分数增加导致叶绿素质量分数降低。在同样的加糖质量分数条件下,采用 PSBLMD 方式高丽菜中叶绿素保留量高于 AD 方式,这种原因主要是因为相对于 AD 方式,高丽菜采用低频微波干法漂烫及 PSBLMD 方式干燥时间短等因素导致样品中叶绿素损失少^[3]。从表 5 可以看出,PSBLMD 样品与 AD 样品叶绿素质量分数的差值没有抗坏血酸质量分数显著,这种原因主要是加糖处理有利于保护叶绿素干燥过程中降解。这种现象表明,低频微波漂烫与脉冲喷动干燥一体化工艺与设备能够降低高丽菜中叶绿素损失。

表 5 不同加糖比例 PSBLMD 及 AD 高丽菜叶绿素质量分数
Table 5 Chlorophyll content of the cabbages dried by PSBLMD and AD with different added sugar ratios

干燥方式	加糖质量分数/(mg/kg)		
	5%	10%	15%
PSBLMD(2.5 h)	4.11±0.14	3.76±0.15	3.48±0.15
AD(5.5 h)	3.88±0.12	3.51±0.14	3.14±0.10

2.4 不同加糖质量分数对 PSBLMD 及 AD 高丽菜复水能力的影响

复水能力是脱水蔬菜重要的评价指标,它在一

定程度上表征干燥产品品质变化程度。预处理与干燥方式对干燥蔬菜复水能力有重要影响,从表 6 可以看出,干燥高丽菜的复水比随着加糖质量分数的增加而增加。这种现象主要因为葡萄糖分子与高丽菜其它成分相比更易吸收水分。因此,干燥样品中含糖量高,复水时吸收水分高,复水能力提高。从表 6 可以看出,与 AD 方式相比,在同等加糖质量分数条件下,PSBLMD 高丽菜样品的复水能力增加。产生这种现象的原因主要是低频微波漂烫及 PSBLMD 对高丽菜预处理及干燥加工过程品质影响小,其中干燥时间短、营养成分损失少是主要的因素^[1]。

表 6 不同加糖质量分数下 PSBLMD 与 AD 高丽菜复水比
Table 6 Rehydration ratio value of the cabbages dried by PSBLMD and AD with different added sugar ratios

干燥方式	加糖质量分数/(mg/kg)		
	5%	10%	15%
PSBLMD(2.5 h)	22.52±0.81	25.34±0.92	26.22±0.98
AD(5.5 h)	15.64±0.54	17.78±0.64	19.40±0.73

2.5 PSBLMD 及 AD 高丽菜均匀性分析

均匀性是评价微波干燥产品品质及技术可行性的重要指标,干燥产品均匀性目前尚无统一评价标准,一般使用均匀度评价干燥产品均匀性,包括水分(MC)、色差(ΔE)及收缩率(SR)均匀度^[1]。加糖质量分数影响微波干燥产品的均匀度,加糖质量分数高会使产品干燥过程黏连,均匀度下降。作者测量了加糖质量分数 15% 时高丽菜采用 PSBLMD 与 AD 两种干燥方式的 MC、 ΔE 及 SR 均匀度值,见表 7。

表 7 加糖质量分数为 15% 时高丽菜 PSBLMD 与 AD 干燥样品 MC、 ΔE 及 SR 均匀度

Table 7 Uniformities of MC、 ΔE and SR of the cabbages dried by PSBLMD and AD with added sugar ratio of 15% 均匀度/%

干燥方式	MC	ΔE	SR
PSBLMD(2.5 h)	91.2±2.14	93.7±2.84	92.3±3.05
AD(5.5 h)	90.3±1.85	94.4±2.14	88.9±2.67

从表 7 可以看出,在加糖质量分数为 15% 的条件下,高丽菜采用 PSBLMD 方式干燥样品的水分、色差及收缩率均匀度全部在 90% 以上;采用 AD 方式,干燥样品的色差均匀度与水分均匀度在 90% 以上,但收缩率均匀度低于 90%。与 AD 方式相比,

PSBLMD 高丽菜样品的水分与收缩率均匀度有所增加,而色差均匀度有所降低。产生这种现象的原因是在 PSBLMD 干燥过程中,高压气体的脉冲喷动带动高丽菜的空间运动,实现产品在干燥过程中空间位置变换,减少冷热点现象的发生,解决了产品干燥不均匀的问题^[1],见图 3。

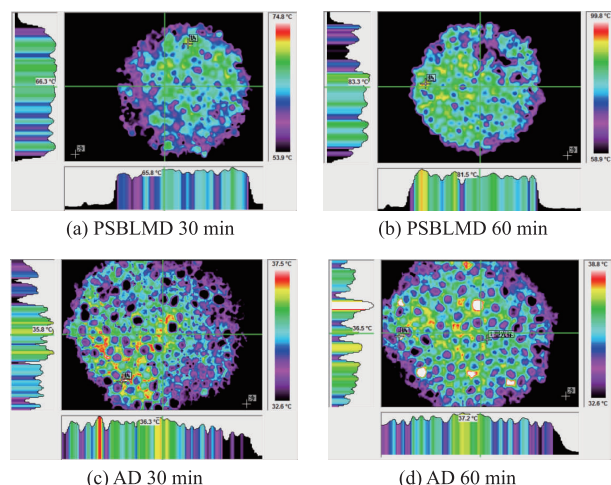


图 3 加糖质量分数为 15% 高丽菜 PSBLMD 与 AD 在不同干燥时间温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of the cabbages dried by PSBLMD and AD with added sugar ratio of 15% at different drying time

同时,由于低频微波的内热源特性及高穿透力性能,在 PSBLMD 干燥过程中高丽菜内外形成压差,除了提高干燥速率外,也能降低产品的收缩率。在 AD 干燥过程中,由于高比例的葡萄糖添加到高丽菜中,再者产品是静止干燥,产品易粘接成块状,导致干燥产品水分及收缩率的不均匀,即使企业采用人工翻动,也会带来部分产品结块现象,导致产品水分及收缩率不均匀性。这种结果表明,采用低频微波漂烫及 PSBLMD 能够改善高丽菜微波干燥均匀度,实现高丽菜微波均匀干燥。

2.6 PSBLMD 及 AD 高丽菜干燥能耗对比

干燥能耗是评价一种干燥方式可行性的重要指标。对于传统 AD 方式,干燥能耗主要由热风系统构成,而对于 PSBLMD 方式,干燥能耗主要由微波加热系统、送风与抽湿系统及脉冲喷动系统构成,见图 4。

由图 4 可以看出,PSBLMD 方式干燥能耗微波加热系统最高,占总能耗 62.5%,其次是送风与抽湿

系统,占总能耗 31.25%,脉冲喷动系统能耗最小,占总能耗 6.25%。图 5 显示了加糖质量分数为 15% 高丽菜采用 PSBLMD 与 AD 两种干燥方式下单位干燥产品消耗能耗的对比结果。由图 5 可以看出,AD 高丽菜单位能耗随着干燥产品厚度的增加成倍增加,这种现象主要是因为传统的热风干燥热质传递方向相反,干燥效率低,能量损耗高。另外,高比例糖加入高丽菜降低了水分迁移速率,这也是导致 AD 干燥时间长及能耗高的原因;相反,对于 PSBLMD 方式,高比例糖加入到高丽菜能够增加高丽菜的介电损耗因子,提高高丽菜在低频微波场下能量转化效率,有利于 PSBLMD 干燥^[13];再者,低频微波的高穿透性及脉冲喷动干燥联合能够提高干燥产品产量,相应地降低干燥产品能耗^[1];另外,本实验 PSBLMD 送风机与抽湿风机干燥后期转速降低也降低了干燥能耗。从图 5 可以看出,高丽菜采用 PSBLMD 方式单位产品能耗均低于两种装盘厚度 AD 方式的单位能耗,即比 5 mm 装盘厚度 AD 方式降低 43%,比 10 mm 单装盘厚度 AD 方式降低 77%。

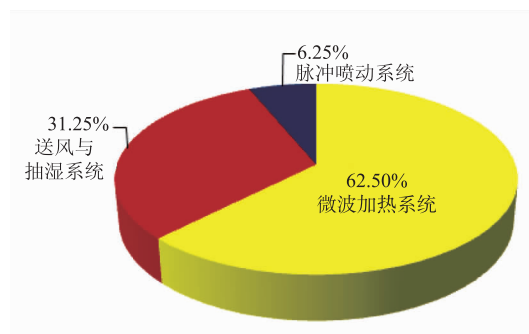


图 4 高丽菜 PSBLMD 能耗构成

Fig. 4 Energy consumption composition of the cabbages dried by PSBLMD

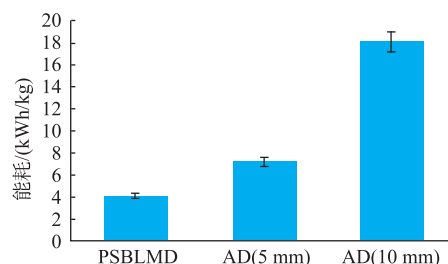


图 5 加糖质量分数为 15% 高丽菜 PSBLMD 与 AD 干燥能耗
Fig. 5 Energy consumption of the cabbages dried by PSBLMD and AD with added sugar ratio of 15%

3 结 语

根据上述研究结果得出:PSBLMD 技术及实验设备能够有效地解决添加高比例葡萄糖调理的高丽菜干燥过程粘连问题,提高干燥产品的水分、色差及收缩均匀度,实现高丽菜均匀干燥;与 AD 方式相比,PSBLMD 能够显著地缩短高丽菜干燥时间,降

低单位产品的干燥能耗,同时,也减少高丽菜干燥过程中叶绿素及抗坏血酸营养成分的损失,提高干燥高丽菜的复水能力;低频微波漂烫联合低频微波脉冲喷动干燥能够实现高糖调理高丽菜高效节能均匀干燥,但是在高温高湿空气能量回收及智能化检测与控制方面需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王玉川. 莴苣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,2013:1-6.
- [2] 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: 524-534.
- [3] ZHANG M, CHEN H Z, MUJUMDAR A S, et al. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2017, 57(6): 1239-1255.
- [4] 张懋, 王玉川, 艾伦·牟俊达. 食品高效优质干燥技术[M]. 南京:江苏省凤凰科学技术出版社, 2015: 245-249.
- [5] KARIM A, LAW C L. Intermittent and nonstationary drying technologies - principles and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016: 139-163.
- [6] 中华人民共和国卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定 GB/5009.86-2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
- [7] 全国果品标准化技术委员会. 水果、蔬菜及其制品中叶绿素含量的测定:分光光度法 NY/T3082-2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- [8] 中华人民共和国农业部. 绿色食品:脱水蔬菜 NY/T1045-2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- [9] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准:食品中水分的测定 GB/5009.3-2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
- [10] 国家质量技术监督局. 煤的视相对密度测定方法 GB/T 6949-1998[S]. 北京:中国标准出版社, 1998.
- [11] WANG Y C, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Study of drying uniformity in pulse-spouted microwave-vacuum drying of stem lettuce slices with regard to product quality[J]. **Drying Technology**, 2013, 31(1): 91-101.
- [12] WANG R, ZHANG M, MUJUDAR A S, et al. Effect of salt and sucrose content on dielectric properties and microwave freeze drying behavior of re-structured potato slices[J]. **Journal of Food Engineering**, 2011, 106(4): 290-297.
- [13] WANG Y C, ZHANG M, MUJMDAR 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.