

脱水蔬菜热泵-热风组合干燥试验

张绪坤¹, 李华栋², 徐刚², 顾震²

(1. 南昌航空大学航空与机械工程学院, 南昌 330063; 2. 江西省科学院食品工程创新中心, 南昌 330029)

摘要:为了解决脱水蔬菜热泵干燥中后期干燥效率较差的问题, 文章进行了热泵、热风组合干燥试验。结果表明: 采用热泵-热风组合干燥装置生产脱水蔬菜, 其耗能只有隧道式干燥的 74.1%, 网带式干燥的 84.7% 和真空冷冻干燥的 9.4%。胡萝卜产品经 24 h 充分复水后, 组合干燥的复水性比热泵干燥高 16.6%, 比热风干燥高 24.5%。采用前期热泵除湿干燥与后期热风干燥的组合干燥技术, 克服了单一热泵干燥的缺点, 降低了能耗, 提高了产品质量。

关键词:脱水, 热泵干燥, 组合干燥, 产品质量控制, 能耗, 蔬菜

中图分类号: S226.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0226-04

张绪坤, 李华栋, 徐刚, 等. 脱水蔬菜热泵-热风组合干燥试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 226-229.

Zhang Xukun, Li Huadong, Xu Gang, et al. Combined heat-pump and hot-air drying of dehydrated vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 226-229. (in Chinese with English abstract)

0 引言

干燥是一个复杂的传热传质过程, 它不仅受到物料特性和干燥介质参数的影响, 还与干燥工艺有着重要关系^[1]。对农产品的干燥不仅是去除物料中的水分, 而且还要保持它的色、香、味及它的质地, 甚至保留农产品的生物活性。

热泵干燥较传统的热风对流干燥具有明显的节能效果。但在干燥的中后期, 由于空气与干燥物料之间的传质系数变小, 去除剩余的水分需要很长的干燥时间和消耗较多的能量。并且由于干燥室进出口空气状态变化很小, 蒸发器吸收水分的显热和潜热有限, 热泵系统运行工况变差^[2], 热泵干燥变成了低温条件下的热风干燥, 干燥的效率显著下降。热泵不应为干燥系统的加热装置, 而应作为除湿装置^[3]。组合干燥或联合干燥是解决单一热泵干燥时间长、效率低的有效方法之一^[4]。

李远志等进行了箱式结构热泵干燥白菜、胡萝卜的试验, 干燥时间为 10 h, 物料终了含水率分别为 10.56% 和 14.81%^[5], 未达到脱水蔬菜产品含水率的要求。Alves-Filho 等(1998)采用两个串联热泵流化床干燥器, 在第一级干燥器内要使得产品的湿含量达到临界湿含量, 半干产品在第二级内以较高温度快速的终结干燥。在低温条件下降低湿含量有利于保持产品的质量, 在高温条件下进行终结干燥可以提高热泵干燥效率^[3]。为了提高降速干燥阶段的传热速率, Marshall 和 Metaxas(1998)进行了高频(RF)与传统热泵联合干燥碎砖和黏土团的试验, 结果表明采用脉动试高频加热, 热泵干燥的性能系数(COP)和单位能耗除湿量(SMER)均得到提高^[3]。

华南农业大学李远志等进行了前期热风与后期热泵的结合干燥胡萝卜试验, 结果表明结合干燥比较适合热敏性物料。对结合干燥工艺优化结果表明前期热风干燥阶段越短, 胡萝卜素保存率、复水比、彩度越高, 延长热风干燥阶段虽然可以加快干燥速度, 但对产品品质不利^[6]。说明热敏性物料在高含水条件下不宜采用热风干燥。

热泵-热风组合干燥就是在干燥的前期采用热泵低温干燥, 在中后期采用热风干燥, 这种组合干燥工艺的特点是在物料处于热敏湿敏的条件下采用温和的热泵除湿干燥, 而在干燥的后期适当提高干燥温度, 使物料表面和内部的温差增大, 促进热量向内部传递, 使得水分在干湿界面获得足够的热量汽化, 缩短整个干燥过程的时间。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用的胡萝卜、青辣椒从市场购得, 试验样品要求新鲜不腐烂, 用保鲜膜包装后放在冷藏柜内待用。

1.2 试验方法

1.2.1 干燥前的预处理工艺

原料挑选、整理→清洗→切除根梢→切片→5倍的水中微沸漂烫→迅速冷却→沥水→按干燥要求均匀铺在料架上。

1.2.2 含水率的测定

常压烘箱干燥法^[7]。

1.2.3 叶绿素含量测定

比色法。

1.2.4 维生素C含量测定

二氯酚法。

1.2.5 复水比的测定

取胡萝卜干样约 3 g, 记录其质量为 G_F , 复水容器采用 100 mL 的烧杯, 用 20 倍于样品的清水并使样品浸渍其中。在室温下, 30 min 捞起, 并沥水 15 min, 记录质

收稿日期: 2007-10-17 修订日期: 2008-10-17

基金项目: 科技部农业科技成果转化资金项目 (05EFN213600146)

作者简介: 张绪坤(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事干燥设备研究。
江西省南昌市丰和南大道 696 号 南昌航空大学航空与机械工程学院,
330063. Email: Xukun008@163.com

量为 $G_{\text{复}}$ 。每个处理做 4 次，取平均值。复水比= $G_{\text{复}}/G_{\text{干}}$ 。

1.2.6 耗电量的测定

用三相有功功率表记录压缩机和系统的电耗。

1.3 组合干燥工艺

脱水蔬菜的组合干燥工艺包括预处理和组合干燥两个部分，干燥工艺为：

原料→清洗切片→热烫→热泵低温干燥→热风干燥。

2 结果与分析

2.1 组合干燥、热泵干燥及热风干燥速度的对比

图 1 为胡萝卜组合干燥、热泵干燥和热风干燥曲线。热风干燥条件是：温度 65°C 、干燥室空气流速 2.2 m/s 。热泵干燥条件是：温度 35°C ，干燥室进口空气相对湿度 41.0% 、空气流速 2.2 m/s 。热风干燥过程中干燥速度明显高于热泵干燥，热泵干燥时物料水分降低到 20% 后，干湿界面向物料中心退缩，外部干区的导热系数小，热量难以传递到干湿界面供水分汽化，整个干燥过程受干区部位热传导的控制，所以干燥速度慢，物料含水率从 20.8% 降低到 14.7% 需要 1.5 h 。含水率继续下降需要更长时间，这就是热泵干燥特点，后期干燥速度慢。热风干燥速度虽然快，但其产品质量差，如色泽、复水性和产品中营养成分的保存等较差。如果采用单一热泵干燥方式，为了达到脱水蔬菜要求的水分含量，干燥时间将超过 10 h 。这导致加工耗能太高，产量下降，加工成本升高。而且在热泵干燥温度下，长时间干燥造成微生物大量繁殖以及产品中营养成分和色素等化学组分发生氧化反应，产品品质同样下降。

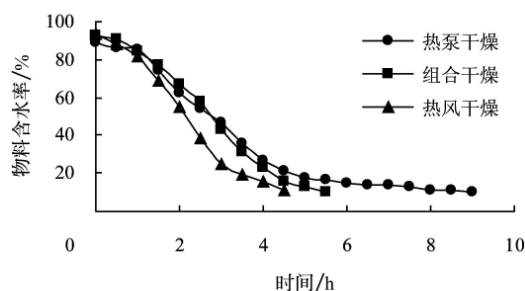


图 1 热泵、组合、热风干燥曲线

Fig.1 Drying curves of heat-pump drying, combined drying and hot-air drying

在组合干燥试验中，热风与热泵干燥条件与前面所述相同，组合干燥就是在开始 2.5 h 采用热泵干燥，热泵干燥后，物料含水量由 12.70 kg/kg 降低到 1.36 kg/kg ，绝大部分水分已去除，热泵回收干燥废气中的热量有限，然后采用热风干燥。组合干燥与热泵干燥比较，干燥时间大幅度缩短。单一热泵干燥 9 h ，含水率才达到 10.5% 。而组合干燥 5.5 h ，含水率 10.3% ，产品的质量、色泽、营养成分比热风干燥大幅度提升，由于最后采用热风干燥缩短加工时间，高温还可以达到杀菌效果。因此，组合干燥产品不存在微生物污染问题。与热风干燥比较，尽管组合干燥比热风干燥时间增加 1 h 左右，但产品质量

明显改善。组合干燥时间缩短的原因是：在干燥开始阶段采用低温干燥，物料可避免高温干燥时经常出现的表面结壳现象，使得表面形成具有良好透气性能的多孔结构，这为后期干燥时水汽的溢出保留了通道，多孔表面一方面减少了水分向外传递的阻力，另一方面改善了产品的复水性。

2.2 组合、热泵及热风干燥产品营养成分的对比

蔬菜中一些营养、色素组分在干燥过程易发生变化是由于：（1）温度的促进作用容易发生化学变化；（2）这些组分处于水溶液环境中。热风干燥时，物料表面细胞组织中的这些营养和色素组分处于高水分的环境中，容易发生化学变化，这是高温干燥产品质量差的主要原因。如固体维生素 C 比较稳定，但在水溶液中极易氧化，氧化速度随温度、pH 值而不同^[8]。为了说明干燥方式对产品质量影响，本试验特地选用维生素 C 和叶绿素含量较高的青辣椒进行对比试验，试验结果如图 2 所示。试验结果表明，采用热泵-热风组合干燥得到的产品质量最好，热泵干燥次之，热风干燥产品质量最差。

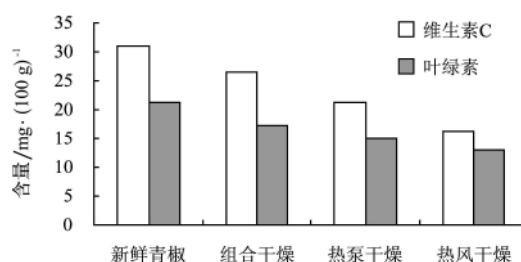


图 2 原料和试验样品中维生素 C 和叶绿素的含量
Fig.2 Vitamin C and chlorophyll contents of materials and green pepper samples

组合干燥过程中，干燥初始阶段采用低温热泵干燥，物料表面处于低温状态，所以干燥对这些成分影响小。干燥后期采用热风干燥，尽管表面温度较高，但此时表面处于干区，水分含量低，温度对营养成分和色素的影响减小。在物料内部，热量从外部传递到干湿界面后绝大部分热量由水分汽化所吸收，所以干湿界面内部温度并不高，该区域组分受外界温度影响相对小。

2.3 组合、热泵及热风干燥产品的复水性对比

脱水蔬菜一般都在复水后才食用，其复水后恢复原来状态的程度是衡量脱水蔬菜制品品质的重要指标。胡萝卜在干燥过程中会发生某些不可逆的变化。脱水制品复水性下降，虽然有细胞和毛细管萎缩、变形的原因，但更多的还是胶体中物理和化学变化原因。食品失水后盐分增浓的影响会使蛋白质部分变性，失去再吸水的能力，还会破坏细胞膜的渗透性。淀粉和果胶在热力的影响下发生变化，以至亲水性下降。正是这些变化，降低了脱水胡萝卜的吸水能力，胡萝卜在高温下干燥时间越长，复水性越差。

图 3 表示相同厚度的胡萝卜片组合干燥、热泵干燥和热风干燥产品的复水性。热泵干燥产品的复水性比热风干燥产品好，表现在复水速度快、复水比高。热风干燥时，由于温度高，蛋白质变性、糖分熔化导致物料表

面容易结壳，产品内部组织变硬，所以复水性差。将切片厚度为 3 mm 时的组合干燥、热泵干燥和热风干燥胡萝卜产品的复水性进行比较。经 24 h 充分复水后，组合干燥产品复水性比热泵干燥高 16.6%，比热风干燥高 24.5%。30 min 后干燥产品的复水比的对比如图 4 所示，复水比分别为：组合干燥 4.66，热泵干燥 4.53，热风干燥 3.62。

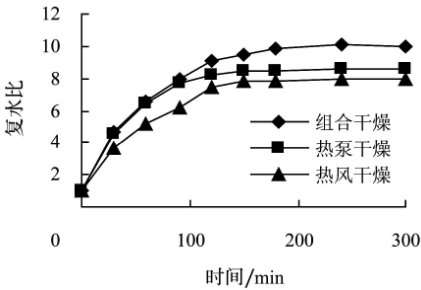


图 3 组合干燥、热泵干燥和热风干燥胡萝卜样品的复水比随时间变化

Fig.3 Changes of rehydration of carrot samples for combined drying, heat-pump drying and hot-air drying at different time periods

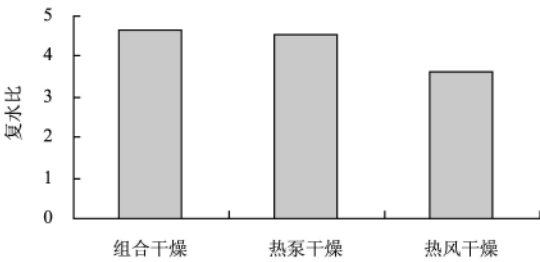


图 4 复水 30 min 胡萝卜干燥产品的复水比

Fig.4 Rehydration of carrot dried samples for 30 min

2.4 热泵-热风组合干燥与其他干燥的能耗对比

以胡萝卜片为原料，进行热泵干燥与热泵-热风组合干燥耗能试验，试验结果如表 1 所示。

表 1 热泵干燥与组合干燥能耗对比
Table 1 Energy consumption of heat-pump drying and combine drying

干燥方式	物料初始质量/kg	除水量/kg	初始含水率/%	终了含水率/%	干燥时间/min	总能耗/kW·h	单位能耗除湿量/kg·(kW·h) ⁻¹
热泵干燥	20.4	17.11	90.7	42.4	150	15.2	1.126
热泵干燥	14.5	12.67	89.4	15.8	360	27.4	0.462
组合干燥	17.3	15.78	92.4	10.5	360	29.3	0.540
组合干燥	28.6	25.60	90.6	9.7	360	30.2	0.850

从表 1 能看出，热泵在干燥初期能耗相对较低，若干燥时间为 150 min，单位能耗除湿量（*SMER*）为 1.126 kg/(kW·h)；若干燥时间为 360 min，单位能耗除湿量（*SMER*）为 0.462 kg/(kW·h)。如果从较高的水分一直到脱水蔬菜要求的水分，则整个干燥过程的能耗还要高。采用热泵-热风组合干燥，干燥时间为 360 min，达到脱水蔬菜含水率的要求，而单位能耗除湿量（*SMER*）分别为

0.54 kg/(kW·h)和 0.85 kg/(kW·h)，比单一热泵干燥能耗要低，处于一个比较合理的水平。

热泵-热风组合干燥与其他干燥方式的耗能对比见表 2。

表 2 热泵、热风组合干燥与其他干燥的耗能对比
Table 2 Energy consumption of combined drying and commercial drying

干燥方式	耗能/kJ·kg ⁻¹	数据来源
热泵-热风组合干燥	4235.3	试验值
隧道式干燥	5714.3*	资料数据
网带式干燥	5000.0*	资料数据
真空冷冻干燥	45000.0*	资料数据

注：带*号的数据来源于参考文献[9]。

从表 2 可看出，热泵-热风组合干燥平均耗能只有隧道式干燥的 74.1%，网带式干燥的 84.7%和真空冷冻干燥的 9.4%。因此，热泵-热风组合干燥具有明显的节能效果。

3 结 论

1) 以胡萝卜片为原料进行组合干燥、热泵干燥和热风干燥试验，试验结果表明采用组合干燥 5.5 h，胡萝卜的水分含量达到 10.3%，而单一热泵干燥 9 h，水分含量才达到 10.5%。达到相近的物料含水条件下，组合干燥比单一热泵干燥缩短了 3.5 h。组合干燥比热风干燥时间增加 1h 左右，但产品质量明显改善。

2) 以青辣椒为原料进行组合干燥、热泵干燥和热风干燥的营养成分保留对比试验，试验结果表明采用热泵-热风组合干燥得到的产品质量最好，热泵干燥次之，热风干燥产品质量最差。

3) 胡萝卜干燥产品经 24 h 充分复水后，组合干燥产品复水性比热泵干燥高 16.6%，比热风干燥高 24.5%。复水 30 min 后干燥产品的复水比分别为：组合干燥 4.66，热泵干燥 4.53，热风干燥 3.62。

4) 以胡萝卜片为原料进行热泵干燥与组合干燥耗能试验，试验结果表明组合干燥比单一热泵干燥耗能要低一些。采用热泵-热风组合干燥，在被干燥的物料量达到一定数量时，胡萝卜的水分达到要求含水时的能耗为 4235.3 kJ/kg，处于一个比较合理的水平。其耗能只有隧道式干燥的 74.1%，网带式干燥的 84.7%和真空冷冻干燥的 9.4%。因此，热泵-热风组合干燥具有明显的节能效果。

[参 考 文 献]

[1] 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
[2] 王剑峰, 欧阳应秀, 朱永雷, 等. 相变材料应用于热泵干燥的实验研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(1): 22-26.
[3] Kudra T, Mujumder A S. Advanced Drying Technologies (先进干燥技术, 李占勇译) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
[4] Chau K J, Chou S K, Ho J C, et al. Heat pump drying: recent developments and future trends[J]. Drying Technology, 2002, 20: 1579-1610.
[5] 李远志, 郑春明, 陈照传, 等. 热泵干燥技术在脱水蔬菜加工中的应用研究[J]. 食品工业科技, 1998, (5): 7-8.

- [6] 李远志, 胡晓静, 张文明, 等. 胡萝卜薄片热风与热泵结合干燥工艺及特性研究[J]. 食品与发酵工业, 1999, 26(1): 3—6.
- [7] 吴 平. 食品分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1983.
- [8] 姚国雄, 王 璋, 吴榴英, 等. 食品生物化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
- [9] Alves-Filho O, Mujumdar A S. An examination of emerging drying technologies from the energy standpoint[R]. Brazil Drying'2004—Proceeding of the 14th International Drying Symposium(IDS 2004), 2004.
- [10] Ho J C, Chou S K, Mujumdar A S, et al. An optimization framework for drying of heat-sensitive products[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21: 1779—1798.
- [11] Chua K J, Hawlader M N A, Chou S K, et al. On the study of time-varying temperature drying kinetics and product quality[J]. Drying Technology, 2002, 20(8): 1559—1577.
- [12] Chua K J, Mujumdar A S, Hawlader M N A, et al. Convective drying of agricultural products: effect of continuous and stepwise change in drying air temperature[J]. Drying Technology, 2001, 19(8): 1949—1960.

Combined heat-pump and hot-air drying of dehydrated vegetables

Zhang Xukun¹, Li Huadong², Xu Gang², Gu Zhen²

(1. College of Aeronautical and Mechanical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Food Engineering Center, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: In order to improve the drying efficiency of heat pump for dehydrated vegetables during the falling drying period, the combined experiment of heat-pump and hot-air drying was carried out. The experimental results showed that the energy consumption of combined drying, was 74.1%, 84.7% and 9.4% of that of tunnel drying, band drying and vacuum freeze drying, respectively. After the carrot products were rehydrated for 24 hours, the rehydration of combined drying was 16.6% and 24.5% higher than that of heat-pump drying and hot-air convective drying, respectively. Therefore, compared with the conventional heat-pump drying, the energy consumption of the combined drying is reduced and the product quality is also improved.

Key words: dehydration, heat-pump drying, combined drying, product quality control, energy consumption, vegetables