

王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 不同真空冷冻干燥方法对杏鲍菇片干燥特性及品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 904-912.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2018.04.027

不同真空冷冻干燥方法对杏鲍菇片干燥特性及品质的影响

王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 张李阳, 王蓉蓉, 张伟, 华春
(南京晓庄学院食品科学学院, 江苏 南京 211171)

摘要: 为研究真空冷冻干燥方法对杏鲍菇片干燥特性及品质的影响, 采用热烫-真空冻结、不热烫-真空冻结、热烫-常压平板冻结、不热烫-常压平板冻结 4 种方法进行真空冷冻干燥对比试验和分析。结果表明, 杏鲍菇片在冻结阶段的冻结失水率差异显著, 由高到低分别是热烫-真空冻结组 (39.94%)、不热烫-真空冻结组 (33.80%)、不热烫-常压平板冻结组 (6.03%)、热烫-常压平板冻结组 (4.34%) ($P < 0.05$); 干燥工艺耗时由短到长分别为热烫-真空冻结组 (10.3 h)、不热烫-真空冻结组 (11.7 h)、热烫-常压平板冻结组 (15.2 h)、不热烫-常压平板冻结组 (16.5 h), 差异显著 ($P < 0.05$)。热烫-真空冻结组、热烫-常压平板冻结组冻干样品复水比分别为 8.46、8.43, 显著高于另外不热烫的 2 组冻干样品 ($P < 0.05$); 不热烫-真空冻结组冻干样品体积收缩比为 0.73, 显著低于其他 3 组 ($P < 0.05$); 2 种常压平板冻结组冻干样品综合色差指标 ΔE 显著高于 2 种真空冻结组, 其中不热烫-常压平板冻结组 ΔE 值最高 (8.06); 真空冻结组冻干样品硬度显著高于常压平板冻结组, 热烫前处理可显著减少冻干样品硬度 ($P < 0.05$)。微观组织扫描电镜观察结果显示, 不热烫-真空冻结组冻干样品组织网孔结构致密, 排列杂乱, 细胞壁出现褶皱、收缩、卷曲现象, 而其他 3 组冻干样品组织内部形成了蓬松饱满的多孔构造, 网孔边界清晰, 排列相对规则, 2 种常压平板冻结组冻干样品网孔结构孔隙明显大于 2 种真空冻结组。

关键词: 真空冷冻干燥; 杏鲍菇; 品质

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2018)04-0904-09

Effect of different vacuum-freezing drying methods on the drying characteristics and qualities of *Pleurotus eryngii* slices

WANG Hai-ou, FU Qing-quan, CHEN Shou-jiang, ZHANG Li-yan, WANG Rong-rong, ZHANG Wei, HUA Chun

(School of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different vacuum-freezing drying methods on the drying characteristics and qualities of *Pleurotus eryngii* slices, comparative experiments and analysis were performed based on four different vacuum-freezing drying methods including hot-water-blanching-vacuum-freezing group (HWBVF), vacuum-freezing group (VF), hot-water-blanching-plate-freezing group (HWBPF), plate-freezing group (PF). The results showed that significant difference was observed in mass loss rate of *Pleurotus eryngii* slices during freezing process in the four groups, which

收稿日期: 2017-10-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31301592); 农业部现代农业装备重点实验室开放课题 (201604002); 常州市科技支撑计划 (农业) 项目 (CE20152017); 南京晓庄学院人才引进项目 (2013xzc04)

作者简介: 王海鸥 (1978-), 男, 安徽桐城人, 博士, 副教授, 主要从事食品冷冻与干燥技术研究。 (E-mail) who1978@163.com

通讯作者: 华春, (E-mail) hc3501988@163.com

was ranked in a descending order as HWBVF 39.94%, VF 33.80%, PF 6.03% and HWBPF 4.34% ($P < 0.05$). Drying process time for the four groups was ranked in a ascending order as HWBVF 10.3 h, VF 11.7 h, HWBPF 15.2 h and PF 16.5 h, also showing significant difference ($P < 0.05$). Rehydration ratio of dried samples in HWBVF and HWBPF was 8.46 and 8.43, respectively, which was significantly higher than that in the other groups without

hot-water blanching ($P<0.05$). Shrinkage ratio of dried samples in VF was 0.73, significantly smaller than those in the other three groups ($P<0.05$). The comprehensive color difference ΔE of dried samples in HWBPF and PF was obviously higher than those in HWBVF and VF, and the highest ΔE 8.06 happened in PF. Hardness of dried samples in HWBVF and VF was significantly higher than that in HWBPF and PF, and hot-water blanching obviously reduced freeze-dried samples' hardness ($P<0.05$). It was found from the photographs of scanning electron microscopy that porous structure of dried samples in VF was dense, arranged in disorder, showing wrinkles, shrinkage, curl shape in cell walls. However, fluffy porous structure, clear mesh boundary and relatively neat arrangement were observed in the microstructure of dried samples in the other three groups. And hole dimension of the porous structure of dried samples in HWBPF and PF was significantly larger than that in HWBVF and VF.

Key words: vacuum freeze-drying; *Pleurotus eryngii*; quality

杏鲍菇 (*Pleurotus eryngii*) 又名刺芹侧耳, 被称为“平菇王”、“干贝菇”, 菇体具有杏仁香味, 肉质肥厚, 口感鲜嫩, 味道清香, 营养丰富, 还具有降血脂, 降胆固醇, 促进胃肠消化, 增强机体免疫能力等功效, 是集食用、食疗、药用于一体的食用菌品种^[1-4]。在国内外消费市场的拉动下, 近年来中国杏鲍菇生产发展较快, 目前已成为第二大工厂化食用菌栽培品种^[5-6]。

干燥是杏鲍菇深加工的常用方法, 目前主要有自然干燥、热风干燥、微波干燥、红外干燥、真空干燥、真空冷冻干燥等方法^[7-16]。真空冷冻干燥技术可以最大程度地保留接近鲜品的菇体形态、色、香、味及大部分营养成分, 是生产高品质杏鲍菇干制品的最佳干燥方式, 但同时也存在干燥时间长、耗能大、成本高等缺陷, 限制了其大规模化应用^[17-18]。创新工艺方法, 提高冻干品质, 降低加工成本, 一直是国内外食品冷冻干燥加工领域学者的关注热点。国内外不少学者已在超声波、高压脉冲、渗透等各种冻干前处理技术以及冻干-热风、冻干-微波、冻干-真空微波等多种组合干燥技术方面做了大量探索工作, 以缩短干燥时间, 提高冻干效率和品质, 取得很多具有重要价值的研究结论和成果^[19-21]。王海鸥等^[22-24]对传统的冷冻干燥工艺进行创新, 提出一种新型的“真空冻结冷冻干燥”工艺方法, 以快速真空冻结方式替代传统的常压速冻方法, 即将切分后的新鲜物料置于密闭真空环境下, 利用抽真空减压的方式, 使物料中水分在低压状态下快速蒸发并带走大量热量, 从而使物料快速降温冷却、达到冻结状态并脱水, 冻结物料在原位继续进行冷冻干燥过程, 达到简化冻干工序, 缩短冷冻干燥时间的效果。

热烫是钝化生鲜原料酶活性, 保护色泽, 灭菌灭虫的常用手段, 普遍应用于生鲜食品加工中^[25-27]。

本研究以热烫作为前处理, 采用真空冻结冷冻干燥、传统冷冻干燥 2 种方法进行杏鲍菇冷冻干燥试验, 分析比较冻结失水率、冻结温度、冻干耗时、冻干样品复水比、硬度、外观形态及内部微观组织结构等指标, 探索不同真空冷冻干燥方法对杏鲍菇干燥特性及品质的影响, 为杏鲍菇冷冻干燥加工技术优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器设备

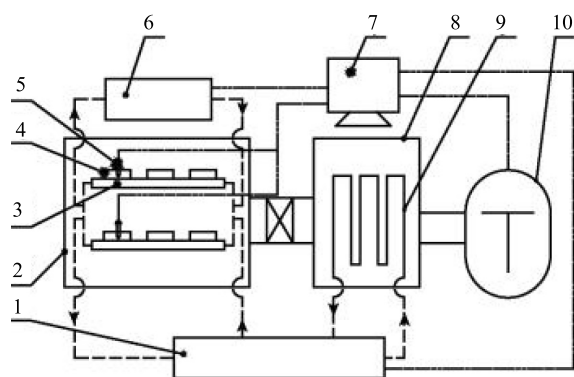
杏鲍菇原料采购于南京本地苏果超市。SCI-ENTZ-50F 冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司产品; EVO-LS10 型扫描电子显微镜, 德国 ZEISS 公司产品; TA.XTplus 物性测试仪, 英国 Stable Micro System 公司产品; 3nh 高品质电脑色差仪, 深圳市三恩时科技有限公司产品; DHG-9070B 电热恒温鼓风干燥箱, 上海申贤恒温设备厂产品; HHS 型电热恒温水浴锅, 上海博讯实业有限公司产品。

冷冻干燥试验所采用 SCIENTZ-50F 冷冻干燥机结构示意图如图 1 所示, 主要包括干燥仓、隔板、制冷器、加热器、冷阱仓、制冷盘管、真空泵及测控系统等。其中制冷器可向干燥仓内的隔板供给冷量, 使物料降温冻结, 实现物料预冻, 也可向冷阱仓制冷盘管提供冷量, 捕集从物料中蒸发、升华出来的大量水蒸汽。加热器在冷冻干燥期间通过隔板为物料的升华和解析干燥提供热量。冻结和干燥过程中物料温度可通过温度传感器进行实时监测。

1.2 试验方法

杏鲍菇真空冷冻干燥工艺主要工序包括: 杏鲍菇挑选、清洗、切片、烫漂、冷冻(真空冻结/常压平板冻结)、真空冷冻干燥。

1.2.1 杏鲍菇挑选、清洗、切片 挑选新鲜、大小基



1: 制冷器; 2: 干燥仓; 3: 隔板; 4: 物料; 5: 温度传感器; 6: 加热器;
7: 测控系统; 8: 冷阱仓; 9: 制冷盘管; 10: 真空泵。

图1 SCIENTZ-50F 冷冻干燥机示意图

Fig.1 Schematic of the experimental device of vacuum freeze-drying

本一致、无虫害、肉质致密、不空心、无机械损伤的杏鲍菇(初始湿基含水率为 89.8%),用自来水清洗干净,去除伞盖部分及子实体尾部,取中段为试验材料,然后横向(切刀垂直于子实体生长方向)切成厚度约为 5 mm 的近圆形片状,备用。

1.2.2 烫漂 将杏鲍菇切片放入 $(95 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的热水中进行烫漂,漂烫时间为 2 min,然后立即捞出,用自来水冷却至室温沥干。

1.2.3 真空冻结 开启冷冻干燥机的制冷器,将冷阱中制冷盘管温度降至 -50°C 以下,然后将杏鲍菇切片一层平铺至物料盘上,将料盘置于干燥仓隔板上,密闭干燥仓后开启真空泵,使干燥仓压强由常压状态持续下降达到水分闪点 $(800 \sim 1\,000\text{ Pa})$,物料中水分在真空状态下迅速蒸发并带走大量热量,使物料快速降温冻结,真空冻结过程维持 0.5 h,干燥仓压强最终维持在 $20 \sim 30\text{ Pa}$ 。

1.2.4 常压平板冻结 将平铺一层杏鲍菇切片的料盘置于干燥仓隔板上,密闭干燥仓后开启制冷器对隔板供给冷量,隔板温度设定为 -35°C ,在常压下进行平板冷冻 3 h。

1.2.5 真空冷冻干燥 杏鲍菇切片经过真空冻结或常压平板冻结后,开启加热器,物料在原位进行真空冷冻干燥过程。隔板采用渐进式升温程序,“温度-时间”控制程序设定为: $-20^\circ\text{C}-1\text{ h}$, $-10^\circ\text{C}-1\text{ h}$, $0^\circ\text{C}-1\text{ h}$, $10^\circ\text{C}-1\text{ h}$, $20^\circ\text{C}-2\text{ h}$, $30^\circ\text{C}-2\text{ h}$, $40^\circ\text{C}-2\text{ h}$, $50^\circ\text{C}-2\text{ h}$,干燥仓压力控制在 50 Pa 以下。前期试验结

果表明,当物料温度达到 $(40.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 时,物料实测含水率在 5% 以下,此时判定为冷冻干燥终点,获得真空冻结冷冻干燥杏鲍菇样品。

1.2.6 不同冻干工艺方法 本试验中,杏鲍菇真空冷冻干燥工艺流程以上述主要工序为基础进行组合集成,采用 4 组不同冻干方法进行对比试验,分别为:①热烫-真空冻结组,工序为杏鲍菇挑选、清洗、切片→烫漂→真空冻结→真空冷冻干燥→成品;②不热烫-真空冻结组,工序为杏鲍菇挑选、清洗、切片→真空冻结→真空冷冻干燥→成品;③热烫-常压平板冻结组,工序为杏鲍菇挑选、清洗、切片→烫漂→常压平板冻结→真空冷冻干燥→成品;④不热烫-常压平板冻结组,工序为杏鲍菇挑选、清洗、切片→常压平板冻结→真空冷冻干燥→成品。

1.3 测定指标

1.3.1 物料冻结温度与冻结失水率 在 4 种冻干方法的物料冻结阶段,随机选取 4 片杏鲍菇,用温度传感器在线测定杏鲍菇片的中心温度,记录冻结操作结束后物料温度,取平均值记录为冻结温度;分别记录物料冻结前、后质量,计算冻结失水率 (M_d) , $M_d = [(m_0 - m_d) / m_0] \times 100\%$,式中 m_0 为杏鲍菇片入仓前初始质量, m_d 为杏鲍菇片冷冻结束后质量。

1.3.2 冻干过程物料温度及失水率 在 4 种冻干方法的真空冷冻干燥阶段,随机选取 4 片杏鲍菇,用温度传感器在线测定杏鲍菇片的中心温度,干燥期间每间隔 2 h 记录 1 次杏鲍菇片温度,并分别称量物料质量,取平均值,对冻干过程中的物料温度和失水率进行追踪,该阶段物料失水率是相对于入仓冻结之前物料而言,包括冻结过程和冻干过程的总失水。冻干过程物料失水率按下式进行计算: $M_D = [(m_0 - m_t) / m_0] \times 100\%$,式中 M_D 为冻干失水率, m_0 为杏鲍菇片入仓前初始质量, m_t 为干燥 $t\text{ h}$ 时物料质量。

1.3.3 干燥工艺耗时 4 种冻干方法中都有冻结和冻干工序,而且这 2 个工序中均会发生脱水现象,因此将物料完成冻结和冻干 2 个工序过程所需的总时间记录为干燥工艺耗时。

1.3.4 冻干样品复水比 准确称取 1 g 左右的冻干杏鲍菇片放入 30°C 左右的蒸馏水中充分吸水 30 min,捞出后用滤纸吸干样品表面的水分,再次准确称量质量,每组样品平行测定 3 次,计算冻干样品复水比 (R_f) [26], $R_f = m_h / m_q$,式中, m_q 为样品复水前质

量, m_h 为样品复水后质量。

1.3.5 冻干样品体积收缩比 用体积置换法^[26]测定:用粒径 0.105~0.210 mm 的石英砂作为置换介质,分别测定未处理鲜切杏鲍菇片体积、冻干杏鲍菇片体积,每组样品平行测定 3 次。计算冻干样品体积收缩比(R_s), $R_s = v_d/v_0$, 式中, v_d 为冻干杏鲍菇片体积, v_0 为未处理鲜切杏鲍菇片体积。

1.3.6 冻干样品色泽 用 3nh 高品质电脑色差仪分别对热烫前杏鲍菇片新鲜样品、冻干样品进行色泽测定,根据 CIELAB 表色系统,读取 L^* 、 a^* 、 b^* 值,每组样品平行测定 5 次。计算色差值 ΔE , $\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$, 式中 L_0^* 、 L^* 分别为鲜切、冻干样品明暗度指数, a_0^* 、 a^* 分别为鲜切、冻干样品红绿度指数, b_0^* 、 b^* 分别为鲜切、冻干样品黄蓝度指数。

1.3.7 冻干样品硬度 冻干样品硬度采用 TA.XT-plus 物性测试仪进行测试。参数设置如下:P/5 型穿刺探头,测试速率 0.5 mm/s,测试距离 10 mm,触发点 10 g。产品硬度以质构图中的峰值表示,数值越大表明样品硬度越大。每种冻干样品硬度测定重复 5 次。

1.3.8 冻干杏鲍菇片的外观形态及组织结构扫描电镜观察 用数码相机对 4 种冻干杏鲍菇片拍摄外观照片。从冻干杏鲍菇片中分别制取断面观察样本(自然形成的断面),用碳导电胶将横断面观察样本粘在样品托上,采用离子溅射仪在断面观察样本上喷金,再用扫描电子显微镜观察拍照。

1.4 数据处理

采用 SPSS 软件对试验数据进行方差分析。若方差分析差异显著,则用 Duncan's 法进行多重比较,显著性水平 $P < 0.05$ 。

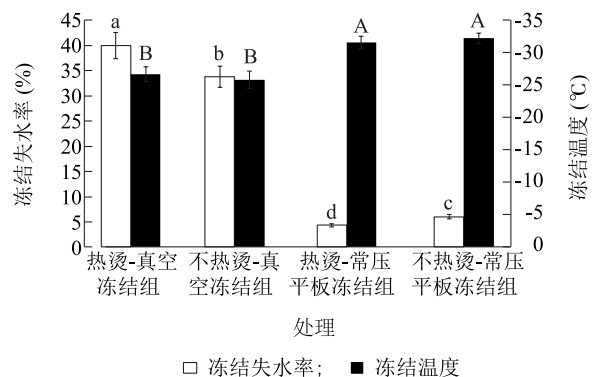
2 结果与分析

2.1 杏鲍菇切片冻结失水率与冻结温度

物料冻结是真空冷冻干燥工艺中的必有步骤,要求把物料冻结到共晶点温度以下后才能进入“温度-时间”程序控制的升华干燥过程。本试验 4 种冻干方法采用了 2 种完全不同的冻结方式,即真空冻结和常压平板冻结,冻结过程中物料均无法避免水分损失,但两者产生水分损失的原理不同,前者是物料由于减压条件而引起的水分蒸发过程,后者是在常压空气环境中的冷冻干耗现象^[28-30]。物料冻结

期间失去部分水分起到预干燥效果,将更有利于减轻后续冷冻干燥负荷。

本试验中各组物料的冻结失水率和冻结温度如图 2 所示。4 种冻干方法的冻结失水率差异显著,由高到低分别是热烫-真空冻结组、不热烫-真空冻结组、不热烫-常压平板冻结组、热烫-常压平板冻结组($P < 0.05$)。物料在冻结过程中真空冻结失水率远高于常压平板冻结失水率,这主要是由于上述不同冻结原理和条件所致。在 2 组新型真空冻结冷冻干燥方法中,真空冻结前对物料进行热烫处理可将冻结失水率从 33.80% 提高至 39.94%,主要原因是短时间的高温烫漂处理可以增加细胞组织透性,真空冻结过程中物料组织中水分蒸发阻力小,蒸发速度快,导致更高的失水率^[31-33]。在 2 组传统的常压平板冻结冷冻干燥方法中,平板冻结前对物料进行热烫处理反而将冻结失水率从 6.03% 降至 4.34%,其主要原因可能是由于热烫作用使得杏鲍菇片表层组织中部分水分流失,细胞间隙收缩,膨压下降,物料表层水分(或冰层)饱和蒸汽压与周围空气压强之差相应减小,使得常压平板冻结过程中产生冷冻干耗的驱动力变小。



相同指标中字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同冻干方法对杏鲍菇片冻结失水率和冻结温度的影响

Fig.2 Mass loss and frozen temperature of *Pleurotus eryngii* slices during the freezing process under different freeze-drying methods

在物料冻结温度方面,热烫-常压平板冻结组、不热烫-常压平板冻结组物料经 3 h 平板冷冻后,冻结温度分别为 -31.6°C 、 -32.2°C ,热烫前处理未对冻结温度产生显著影响;热烫-真空冻结组、不热烫-真空冻结组物料在 30 min 真空冻结期间,冻结温度分别达到 -26.7°C 、 -25.8°C ,也未见显著

差异。而杏鲍菇片共晶点温度测定值为 $-20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 组物料冻结温度均低于其共晶点温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 满足冻结工艺要求。在真空冻结冷冻干燥工艺方法中, 从能量守恒的角度来说, 真空冻结失水越多物料降温冻结越彻底, 对后续冷冻干燥更有利。本试验中热烫处理可显著增加杏鲍菇片的冻结失水率, 而对冻结温度未产生显著影响, 主要原因可能是盛放物料的料盘、隔板以及物料周围环境均存在一定的热量, 真空冻结过程中这些外来热量会传递给杏鲍菇片, 消耗水分蒸发所带走的热量, 无法绝对保证物料中水分“自我蒸发、自我冻结”的环境条件。

2.2 杏鲍菇切片冻干过程物料温度及失水率

冻干过程物料温度与失水率是能直接指示、判断物料冷冻干燥工艺进程的 2 个指标。试验中, 冻干是紧接着冻结过程之后在原位完成, 冻干升温加热控制程序起点(0 h)的冻干失水率即为冻结失水率。由冻干期间的冻干失水率和温度变化曲线可以判断 4 种冻干杏鲍菇片的冻干进度由快到慢依次为热烫-真空冻结组、不热烫-真空冻结组、热烫-常压平板冻结组、不热烫-常压平板冻结组(图 3、图 4)。2 个真空冻结组中由于在真空冻结期间完成了 30% 以上失水率, 远高于 2 个常压平板冻结组冻结期间仅 5% 左右的失水率, 减少了后期冷冻干燥负荷, 因此整个冻干过程中保持明显较快的干燥进度, 但随着冻干时间的进行, 真空冻结组与常压平板冻结组的冻干失水率差异逐渐减小, 后期失水率增加缓慢, 直至干燥到 14 h 后 4 组维持相近的冻干失水率。另外一方面, 在采用相同冻结方式的冻干方法中, 热烫前处理均可提高物料冻干失水率, 加快冷冻干燥进度, 这与其他类似研究的结果^[31-33]相一致, 主要是由于热烫处理可增加物料细胞膜透性, 减少水分外溢阻力, 提高干燥速度。从物料温度曲线可知, 在冷冻干燥 6 h 后各组物料温度均达到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 表明脱除自由水冻结冰层为主的升华干燥已结束, 干燥过程转变为以脱除结合水为主的解析干燥阶段。当杏鲍菇片的中心温度达到 $(40.0\pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 物料实测含水率在 5% 以下, 无需继续维持解析干燥, 冷冻干燥过程结束。热烫-真空冻结组、不热烫-真空冻结组、热烫-常压平板冻结组、不热烫-常压平板冻结组的冷冻干燥终点时间分别为 9.8 h、11.2 h、12.2 h、13.5 h。

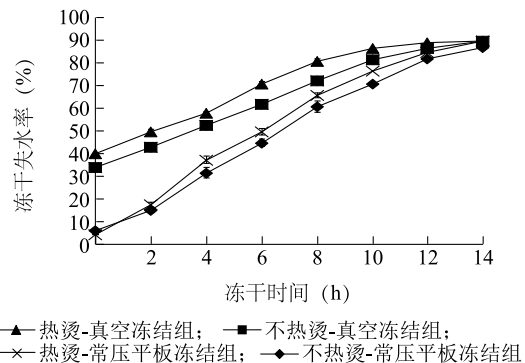


图 3 不同冻干方法对杏鲍菇片冻干失水率的影响

Fig.3 Mass loss of *Pleurotus eryngii* slices during the freeze-drying process under different freeze-drying methods

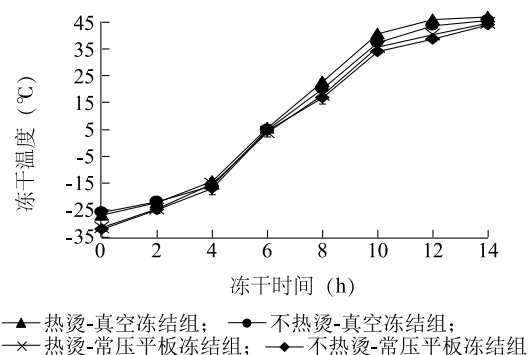


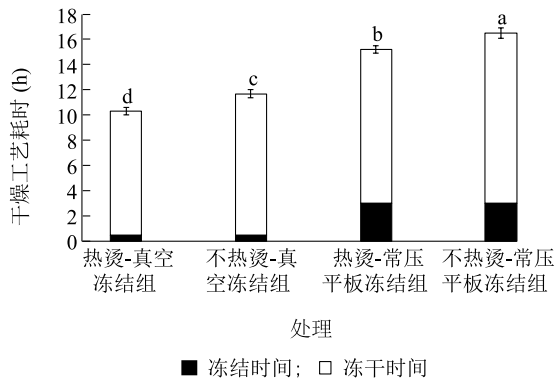
图 4 不同冻干方法对杏鲍菇片冻干温度的影响

Fig.4 Temperature of *Pleurotus eryngii* slices during the freeze-drying process under different freeze-drying methods

2.3 杏鲍菇切片干燥工艺耗时

干燥工艺耗时是直接反映冻干加工经济性的重要指标, 由冻结和冻干 2 个过程时间构成(图 5)。真空冻结组、常压平板冻结组中的冻结时间分别为 0.5 h、3.0 h, 热烫-真空冻结组、不热烫-真空冻结组、热烫-常压平板冻结组、不热烫-常压平板冻结组的冻干时间分别为 9.8 h、11.2 h、12.2 h、13.5 h, 总干燥工艺时间分别为 10.3 h、11.7 h、15.2 h、16.5 h, 差异显著($P<0.05$)。由此可见, 同样采用热烫前处理条件, 真空冻结冻干方法比常压平板冻结冻干方法可节省干燥工艺时间 32.23%, 其中冻结过程节省 2.5 h, 冻干过程节省 2.4 h, 表现出良好的加工经济性优势。杏鲍菇片冷冻干燥期间的脱水主要是在真空状态下以物料中冰晶升华干燥和后期解析干燥为主, 过程相对缓慢, 物料中冰晶含量、物料组织中水蒸气迁移孔道与外界的通畅性以及过程中细胞

多孔结构形态对冻干脱水速度和冻干时间具有较大影响。



相同指标中字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图5 不同冻干方法对杏鲍菇片干燥工艺耗时影响

Fig.5 Drying time of *Pleurotus eryngii* slices during the freeze-drying process under different freeze-drying methods

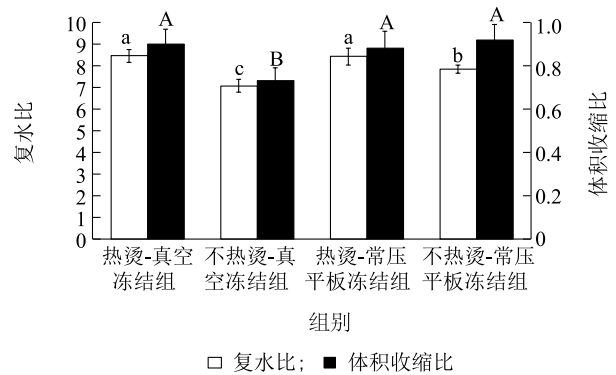
2.4 杏鲍菇切片冻干样品复水比和体积收缩比

冻干样品复水是外源水重新进入物料组织内部的复原过程,是干燥脱水的部分可逆过程,所以复水性能的好坏与冻干样品组织内部多孔结构及细胞透性有着密切联系。4种冻干样品的复水比和体积收缩比测试结果(图6)显示,热烫-真空冻结组、热烫-常压平板冻结组冻干样品的复水比相近,显著高于另外2组样品,不热烫-真空冻结组冻干样品复水比最低。热烫前处理可以提高冻干样品复水比,其主要原因可能是热烫处理使得细胞组织软化、通透性增加,冻干样品加水复原时也更有利于重新吸收水分,恢复到原有新鲜状态^[22-25]。

体积收缩比反映干燥加工对样品原有外形的保持程度,与冻干样品组织内部多孔结构密切相关。冻干样品收缩比越接近1,其原有形态保持越好。由图6可知,不热烫-真空冻结组冻干样品体积收缩比最小,而其他3组则未见显著差异,表明不热烫-真空冻结组杏鲍菇在冷冻干燥期间内部组织有部分收缩或塌陷现象发生,影响到产品外形。

2.5 杏鲍菇切片冻干样品色泽

冻干杏鲍菇片色泽测定结果(表1)表明,不热烫-常压平板冻结组冻干样品明暗度 L^* 显著低于其他3组,红绿度 a^* 显著高于其他3组,黄蓝度 b^* 指标最高。2种真空冻结组冻干杏鲍菇片综合



相同指标中字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图6 不同冻干方法对杏鲍菇片复水比和体积收缩比的影响

Fig.6 Rehydration ratio and shrinkage ratio of dried *Pleurotus eryngii* slices under different freeze-drying methods

色差指标 ΔE 值明显小于2种常压平板冻结组,表明其冻干样品原有色泽改变最小,不热烫-常压平板冻结组冻干杏鲍菇片色泽改变最大。通过表观观察也发现,真空冻结2组冻干样品表观呈现相对亮白色泽,而不热烫-常压平板冻结组冻干样品呈现红黄颜色。引起冻干样品色泽差异的主要原因可能是在真空冻结阶段,鲜切杏鲍菇片始终处于低压无氧的真空环境中,物料组织内部空气由于内外强大的压差作用快速逸出,内部气体排除更彻底,有效阻止了冻结期间物料氧化褐变作用;而不热烫-常压平板冻结组由于未采取热烫灭酶、排气作用,且鲜切杏鲍菇片的冻结过程是在有氧的常压环境下进行,冻结时间长,无法有效防止因活性酶、氧气等作用而引起的物料色泽变化。

2.6 杏鲍菇切片冻干样品硬度

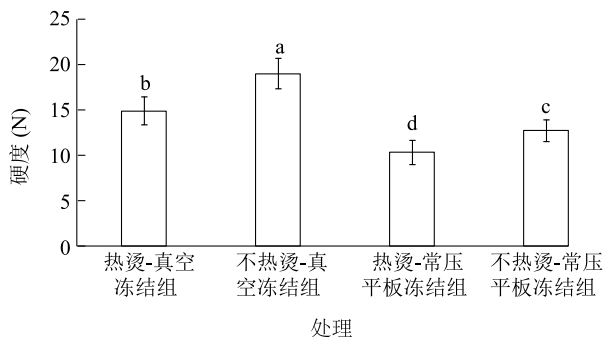
冻干样品硬度是指第一次穿破样品时的压力峰值,与冻干样品内部组织结构性密切相关。测定结果(图7)显示,4组冻干样品硬度值呈现显著差异,由高到低分别是不热烫-真空冻结组、热烫-真空冻结组、热烫-常压平板冻结组、不热烫-常压平板冻结组。可见,真空冻结组冻干样品硬度显著高于常压平板冻结组,热烫前处理可显著减少冻干样品硬度。导致冻干样品硬度差异的主要原因可能是真空冻结组冻干样品内部形成了相对致密的多孔构造,硬度较高;而热烫处理可使细胞原生质与细胞壁分离、组织软化,内部多孔构造组织更容易脆断破裂,冻干样品表现出相对较小的硬度特征。

表 1 不同冻干方法对杏鲍菇片色泽的影响

Table 1 Comparison of the color of dried *Pleurotus eryngii* slices under different freeze-drying methods

样 品	明暗度(L^*)	红绿度(a^*)	黄蓝度(b^*)	综合色差(ΔE)
新鲜杏鲍菇片	89.21±1.50	1.65±0.45	7.48±1.16	
热烫-真空冻结组冻干杏鲍菇片	91.18±1.14a	1.69±0.35b	8.84±0.73c	2.39±0.98c
不热烫-真空冻结组冻干杏鲍菇片	90.59±1.05a	1.63±0.37b	8.64±0.28c	1.80±0.68c
热烫-常压平板冻结组冻干杏鲍菇片	90.87±1.50a	1.20±0.32b	13.14±1.20b	5.92±1.18b
不热烫-常压平板冻结组冻干杏鲍菇片	88.29±0.82b	2.09±0.23a	15.48±1.02a	8.06±1.07a

同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。



不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 7 不同冻干方法对杏鲍菇片硬度的影响

Fig.7 Hardness of dried *Pleurotus eryngii* slices under different freeze-drying methods

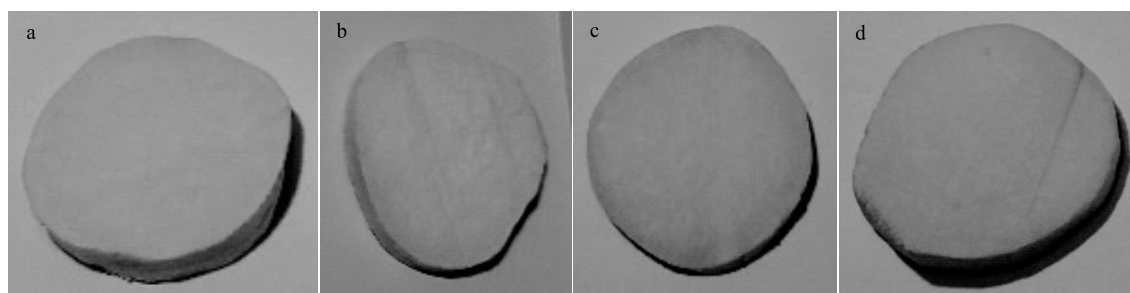
2.7 冻干杏鲍菇片的外观形态及组织结构

4 种杏鲍菇片冻干样品外观照片(图 8)显示,不热烫-真空冻结组冻干片呈现局部皱缩、塌陷现象,而其他 3 组冻干片外观形态差异较小,表面平整,基本保持了鲜切杏鲍菇片原有形态;在表观色泽上,与 2 组常压平板冻结冻干杏鲍菇片相比,2 组真空冻结冻干杏鲍菇片显得更亮白。4 种杏鲍菇片冻干样品微观组织扫描电镜观察结果(图 9)显示,不热烫-真空冻结组冻干样品组织网孔结构致密,排列杂乱,细胞壁出现褶皱、收缩、卷曲现象;而其他 3 组冻干样品组织内部形成了蓬松饱满的多孔构造,网孔边界清晰,排列相对规则。由此可见,不热烫-真空冻结组冻干样品与其他 3 组冻干样品在外观形态和微观结构方面表现出较大差异,主要原因可能是由于物料未经热烫处理,组织内部水蒸气向外迁移阻力大,真空冻结期间物料蒸发失水少,冻结不彻底,冷冻干燥期间冻结不充分冰晶升华速度快,升华水蒸气外迁阻力大,形成局部压力过大,产生局部融化和组织塌陷现象,引起样品表观不平整和微观组织皱缩变形的现象^[34],进而导致冻干样品复水比低、

体积收缩比低、硬度高、冻干耗时长等不良品质特性。此外,由图 9 可见常压平板冻结 2 组样品网孔结构孔隙明显大于真空冻结冻干的 2 组样品。其主要原因是冻干样品的蜂窝网孔形态与物料冻干前细胞组织中冰晶体形态密切相关,真空冻结属于一种极快速自我冷却过程,一部分水分从物料中快速蒸发的同时又将组织中残留水分快速冻结,在细胞组织中形成细密冰晶体网络结构,在冷冻干燥阶段组织中冰晶体升华后形成相对致密的网络孔道;而常压平板冻结组采用冻结速度较慢的平板冻结,细胞组织中生成冰晶体相对较大,后期升华干燥形成网络孔道也相对较大^[35]。

3 结 论

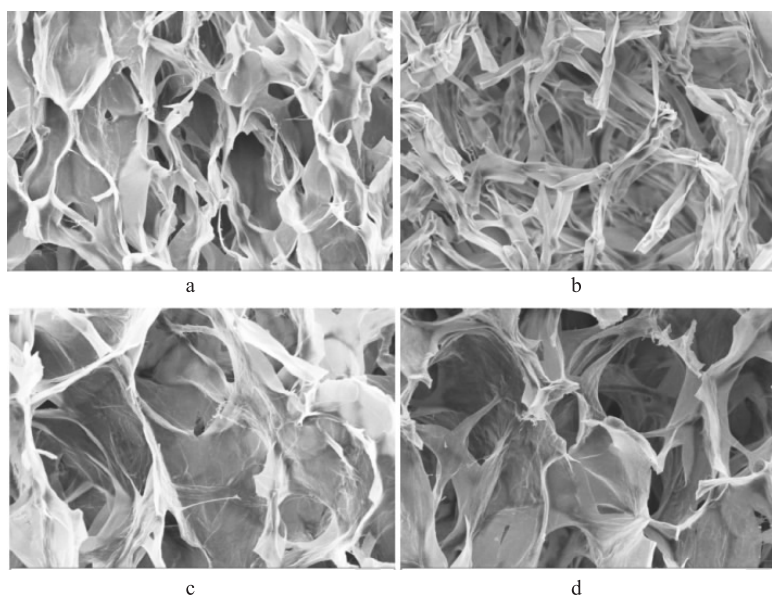
通过对比试验发现,4 种冻干方法制得的杏鲍菇片冻结失水率差异显著,由高到低分别是热烫-真空冻结组、不热烫-真空冻结组、不热烫-常压平板冻结组、热烫-常压平板冻结组,冻结前对物料进行热烫处理可使真空冻结组的冻结失水率从 33.80%提高至 39.94%,使常压平板冻结组的冻结失水率从 6.03%降至 4.34%。4 种冻干杏鲍菇片的冻干进度由快到慢依次为热烫-真空冻结组、不热烫-真空冻结组、热烫-常压平板冻结组、不热烫-常压平板冻结组,冷冻干燥终点时间分别为 9.8 h、11.2 h、12.2 h、13.5 h,干燥工艺耗时分别为 10.3 h、11.7 h、15.2 h、16.5 h,差异显著。热烫前处理可以显著提高冻干样品复水比,热烫-真空冻结组、热烫-常压平板冻结组冻干样品复水比显著高于另外 2 组样品,不热烫-真空冻结组冻干样品复水比最低。不热烫-真空冻结组冻干样品体积收缩比最小,而其他 3 组间则未见显著差异。在综合色差指标 ΔE 值方面,2 种常压平板冻结组杏鲍菇片 ΔE 值明显高于真空冻结组,其中不热烫-常压平板冻结组冻干杏鲍菇片色泽



a:热烫-真空冻结组;b:不热烫-真空冻结组;c:热烫-常压平板冻结组;d:不热烫-常压平板冻结组。

图8 不同冻干方法制得的杏鲍菇片样品外观照片

Fig.8 Appearance photographs of freeze-dried *Pleurotus eryngii* slices under different freeze-drying methods



a:热烫-真空冻结组;b:不热烫-真空冻结组;c:热烫-常压平板冻结组;d:不热烫-常压平板冻结组。

图9 不同冻干方法制得的杏鲍菇片扫描电镜照片(×800)

Fig.9 Scanning electron microscopy photographs of freeze-dried *Pleurotus eryngii* slices under different freeze-drying methods (×800)

改变最大。真空冻结组冻干样品硬度显著高于常压平板冻结组,热烫前处理可显著减少冻干样品硬度。扫描电镜观察结果表明,不热烫-真空冻结组冻干样品组织网孔结构致密,排列杂乱,细胞壁出现褶皱、收缩、卷曲现象,而其他3组冻干样品组织内部形成了蓬松饱满的多孔构造,网孔边界清晰,排列相对规则,常压平板冻结2组冻干样品网孔结构孔隙明显大于真空冻结冻干的2组样品。本试验结果表明,新型的热烫-真空冻结杏鲍菇冻干方法可以简化传统冻干工艺,缩短干燥时间,获得比传统冻干方法更优或相近冻干品质。

参考文献:

- [1] 李晓贝,周峰,杨焱,等. 栽培基质对杏鲍菇子实体蛋白质营养价值的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(23):262-267.
- [2] 张璇,胡花丽,王毓宁,等. 气调处理对杏鲍菇货架期品质影响的多变量分析[J]. 食品科学, 2014, 35(20):265-270.
- [3] 李志刚,宋婷,郝利平,等. 适宜压力条件保持减压贮藏杏鲍菇品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18):296-303.
- [4] 黄倩,岳田利,袁亚宏,等. 响应面优化超声-真空提取杏鲍菇多糖工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(16):77-82.
- [5] 张亚丽,赵书光,贾金川,等. 杏鲍菇工厂化安全高效生产关键技术[J]. 农村新技术, 2016, 38(8):18-20.
- [6] 唐利华,高君辉,茅文俊,等. 杏鲍菇工厂化栽培的液体菌种培

- 养条件的优化[J]. 上海农业学报, 2015, 31(1): 27-29.
- [7] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277-284.
- [8] 严启梅, 牛丽影, 袁春新, 等. 预处理对杏鲍菇脆片品质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(6): 74-77.
- [9] 裴斐, 王敏, 刘凌岱, 等. 即食杏鲍菇片真空低温脱水工艺[J]. 食品科学, 2011, 32(8): 167-171.
- [10] 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 25-30.
- [11] 刘春菊, 江宁, 严启梅, 等. 杏鲍菇真空微波干燥工艺[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 169-173.
- [12] 江宁, 刘春泉, 李大婧, 等. 不同干燥方法对杏鲍菇片品质和能耗的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(9): 232-235.
- [13] LI X, FENG T, ZHOU F, et al. Effects of drying methods on the tasty compounds of *Pleurotus eryngii* [J]. Food Chemistry, 2015, 166: 358-364.
- [14] 吴迪, 谷镇, 周帅, 等. 不同干燥技术对香菇和杏鲍菇风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(22): 188-191.
- [15] 赵文亚, 张慇. 不同干燥方式对杏鲍菇品质的影响[J]. 北方园艺, 2015(23): 134-137.
- [16] 邢亚阁, 蒋丽, 曹东, 等. 不同干燥方式对杏鲍菇营养成分的影响[J]. 食品工业, 2015(4): 1-3.
- [17] DUAN X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods [J]. Drying Technology, 2010, 28(4): 444-453.
- [18] RATTI C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 311-319.
- [19] 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(10): 524-534.
- [20] LITVIN S, MANNHEIM C H, MILTZ J. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. [J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(1): 103-111.
- [21] WANG R, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Effect of osmotic dehydration on microwave freeze-drying characteristics and quality of potato chips [J]. Drying Technology, 2010, 28(6): 798-806.
- [22] 王海鸥, 胡志超, 屠康, 等. 真空冷却预处理在微波冻干胡萝卜片中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 358-363.
- [23] 农业部南京农业机械化研究所. 果蔬微波冷冻干燥脱水加工方法; 201010184053.5 [P]. 2012-10-17.
- [24] 南京晓庄学院. 一种连续式食品真空快速冻结设备; 201520021587.4 [P]. 2015-06-24.
- [25] SEVERINI C, BAIANO A, DE P T, et al. Prevention of enzymatic browning in sliced potatoes by blanching in boiling saline solutions [J]. LWT - Food Science and Technology, 2003, 36(7): 657-665.
- [26] WANG Y, ZHANG M, MUJUMDAR 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.
- [27] SANJUÁN N, CLEMENTE G, BON J, et al. The effect of blanching on the quality of dehydrated broccoli florets [J]. European Food Research & Technology, 2001, 213(6): 474-479.
- [28] ZHANG Z, DRUMMOND L, SUN D W. Vacuum cooling in bulk of beef pieces of different sizes and shape - Evaluation and comparison to conventional cooling methods [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2): 581-587.
- [29] SUN D W, ZHENG L Y. Vacuum cooling technology for the agri-food industry: Past, present and future [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 203-214.
- [30] 石忠志, 陈阳楼, 樊成艳. 浅谈白条肉在冷却和冻结过程中的干耗 [J]. 肉类工业, 2011(6): 52-53.
- [31] GORNICKI K, KALETA A. Drying curve modelling of blanched carrot cubes under natural convection condition [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(2): 160-170.
- [32] NIETO A, SALVATORI D, CASTRO M A, et al. Air drying behaviour of apples as affected by blanching and glucose impregnation [J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(1): 63-79.
- [33] NIETO A, CASTRO M A, ALZAMORA S M. Kinetics of moisture transfer during air drying of blanched and/or osmotically dehydrated mango [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 50(3): 175-185.
- [34] KROKIDA M K, KARATHANOS V T, MAROULIS Z B. Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products [J]. Journal of Food Engineering, 1998, 35(4): 369-380.
- [35] 张海峰, 白杰. 采用真空制冷技术冷冻鲜羊肉的研究 [J]. 肉类研究, 2008, 10(9): 62-65.

(责任编辑: 张震林)