

预冻及蔗糖浸渍方法对冻干苹果片品质的影响

Effects of pre-freezing and sucrose impregnation methods on the quality of freeze-dried apple slices

郭梓煜¹ 胡佳琦^{1,2} 杨菲菲^{1,2} 刘吾一^{1,2} 王海鸥¹

GUO Ziyu¹ HU Jiaqi^{1,2} YANG Feifei^{1,2} LIU Wuyi^{1,2} WANG Haiou¹

(1. 南京晓庄学院食品科学学院, 江苏 南京 211171; 2. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110161)

(1. College of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing, Jiangsu 211171, China;

2. Food College, Shenyang Agriculture University, Shenyang, Liaoning 110161, China)

摘要:[目的]探究真空冻结和常压冻结两种预冻方法以及预冻前浸渍蔗糖、冻干中间浸渍蔗糖两种浸渍方法对冻干苹果片品质的影响。[方法]将冻干工艺分为无蔗糖浸渍真空预冻(VFFD)、无蔗糖浸渍常压预冻(CFFD)、蔗糖前浸渍真空预冻(BSVFFD)、蔗糖中间浸渍真空预冻(MSVFFD)、蔗糖前浸渍常压预冻(BSCFFD)和蔗糖中间浸渍常压预冻(MSCFFD)6组,分析各组苹果片冻干样品的主要品质指标。[结果]MSVFFD组样品色泽 ΔL^* 相对较低, Δa^* 和 ΔE 相对较高,更偏深红色;蔗糖浸渍显著提高了冻干样品的产出率,其中MSVFFD组和MSCFFD组的最高,BSVFFD组和BSCFFD组的次之,未浸糖对照组的最低($P < 0.05$);蔗糖浸渍显著降低了冻干样品的形变率,浸糖处理组的形变率未见显著差异,但显著低于未浸糖的对照组($P < 0.05$);蔗糖浸渍显著提高了冻干样品的穿刺硬度和做功,其中MSVFFD组的最高,未浸糖的对照组的最低,真空冻结组硬度高于常压冻结组,中间浸渍组硬度高于前浸渍组($P < 0.05$);MSVFFD组和MSCFFD组的吸湿率最低,CFFD组的吸湿率明显高于其他组($P < 0.05$)。[结论]真空冻结和中间浸糖方法更有助于改善冻干苹果片品质,其中MSVFFD组赋予冻干产品较佳的综合品质。

关键词:苹果;真空冷冻干燥;预冻;蔗糖;浸渍;品质

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effects of two pre-freezing methods (vacuum freezing and atmospheric pressure freezing) and two dipping methods (sucrose impregnation before pre-freezing and sucrose impregnation during

freeze-drying) on the quality of freeze-dried apple slices.

[Methods] The freeze-drying process was divided into six groups: vacuum pre-freezing without sucrose immersion (VFFD), atmospheric pre-freezing without sucrose immersion (CFFD), vacuum pre-freezing with sucrose immersion (BSVFFD), vacuum pre-freezing with sucrose immersion (MSVFFD), atmospheric pre-freezing with sucrose immersion (BSCFFD) and atmospheric pre-freezing with sucrose immersion (MSCFFD). The main quality indexes of freeze-dried apple slices in each group were analyzed. [Results] The color ΔL^* of the MSVFFD group samples is relatively lower, while Δa^* and ΔE are relatively higher, presenting a deep red color. Sucrose impregnation significantly increased the yield of freeze-dried samples, with the highest in the MSVFFD and MSCFFD groups, followed by the BSVFFD and BSCFFD groups, and the lowest in the two control groups of VFFD and CFFD ($P < 0.05$). Sucrose impregnation significantly reduced the deformation rate of freeze-dried samples, and there was no significant difference among the deformation rates of the four groups with sucrose impregnation, but they were significantly lower than the two control groups of VFFD and CFFD ($P < 0.05$). Sucrose impregnation significantly enhanced the puncture hardness and work of freeze-dried samples. The MSVFFD group had the highest hardness, while the two control groups of VFFD and CFFD had the lowest hardness. Besides, the hardness of the three groups with vacuum freezing treatment was higher than that of the three groups with atmospheric freezing treatment, and the hardness of MSVFFD and MSCFFD groups was significantly higher than that of BSVFFD and BSCFFD groups, respectively ($P < 0.05$). The dried samples of MSVFFD and MSCFFD groups had the lowest moisture absorption rate, while CFFD group had a significantly higher moisture absorption rate than the other groups ($P < 0.05$). [Conclusion] The methods of vacuum freezing and sucrose

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:31872901);常州市农业科技支撑计划(编号:CE20202030)

作者简介:郭梓煜,男,南京晓庄学院在读本科生。

通信作者:王海鸥(1978—),男,南京晓庄学院教授,博士。

E-mail: who1978@163.com

收稿日期:2023-09-06 **改回日期:**2024-04-07

impregnation during freeze-drying are more helpful in improving the quality of freeze-dried apple slices, and the MSVFFD group endows freeze-dried products with better overall quality.

Keywords: apple; vacuum freeze-drying; pre-freezing; sucrose; impregnation; quality

苹果中含有丰富的膳食纤维和维生素,具有降低结肠癌风险的作用,被公认为是营养价值最高的健康水果之一^[1]。干燥加工是增加苹果附加值的常用方法之一。其中,真空冷冻干燥是先将含水物料冷冻成固体,再在低温低压条件下利用冰的升华性能,使物料低温脱水而达到干燥的一种干燥手段^[2]。而且真空冷冻干燥苹果片在口感和风味等方面具有较好的产品品质^[3-6]。

果蔬干燥前通常需要进行护色、调味等处理,其中糖浸渍是一种常用的预处理方法,其将物料浸入糖溶液,使糖液中的糖分子在渗透压的作用下渗透到组织的细胞间隙,对果蔬组织具有较好的护色作用,并可增加产品含糖量,改善口感^[7]。王海鹏等^[8]研究了多种多元糖对冻干苹果片微观结构和综合品质的影响。预冻是真空冷冻干燥加工中非常重要的工序,有常压冻结和真空冻结两种方式。常压预冻是指在常压条件下利用风冷或者隔板接触冷却的方式使物料降温,将物料中水分冻结并维持所需的冷冻温度,是目前冻干加工中应用最为广泛的预冻方式;而真空冻结是将物料置于密闭舱内,通过抽真空降低舱内气压,物料中水沸点随环境压强的下降而下降,水分快速蒸发并从物料中吸收大量热量,从而将物料快速冷却冻结^[9]。真空冻结均匀快速,操作简单,且清洁无污染,是目前最为高效的冻结方式^[10-11]。Wang 等^[12-14]、周颀等^[15]研究了苹果的真空冻结和冻干加工,但不同的预冻方法和浸糖方法相结合对冻干苹果片综合品质的影响有待深入探究。

研究拟以苹果片为研究对象,对真空冻结、常压冻结两种预冻方法以及预冻前浸渍蔗糖、冻干中间浸渍蔗糖两种浸渍方法进行系统组合,分别进行无蔗糖浸渍真空预冻(VFFD)、无蔗糖浸渍常压预冻(CFFD)、蔗糖前浸渍真空预冻(BSVFFD)、蔗糖中间浸渍真空预冻(MSVFFD)、蔗糖前浸渍常压预冻(BSCFFD)和蔗糖中间浸渍常压预冻(MSCFFD)6 种冻干工艺对比试验,分析其对冻干产品色泽、产出率、形变率、质构特性、吸湿性以及微观结构的影响,以期果蔬真空冷冻干燥加工技术提升和品质提升提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

苹果:品种为富士(*Malus domestica*),产地新疆阿克苏,硬度(2.5 ± 0.4) N,可溶性固形物含量(15.2 ± 0.3)%,市售;

蔗糖:食品级,市售;

氯化钠:分析纯,西陇科学股份有限公司。

1.2 试验仪器

真空冷冻干燥机:BLK-FD-1 型,江苏博莱客冷冻科技发展有限公司;

电子天平:JJ1000Y 型,常熟市双杰测试仪器厂;

阿贝折射仪:2WAJ 型,上海光学仪器一厂;

电脑色差仪:NH310 型,深圳市三恩时科技有限公司;

质构仪:TMS-PRO 型,美国 FTC 公司;

扫描电子显微镜:EVO-LS10 型,德国蔡司公司。

1.3 试验步骤

1.3.1 苹果样品及浸渍溶液配制 挑选大小一致的新鲜完好苹果,清洗去皮,利用打孔器制成直径 10 mm、厚度 5 mm 的标准样品。蔗糖浸渍苹果片工艺条件:蔗糖质量分数 40%、料液比 1:2 (g/mL),浸渍时间 1 h。

1.3.2 冷冻干燥工艺 每组试验均处理 50 个苹果片样品,每组试验重复 3 次。

(1) 无蔗糖浸渍真空预冻(VFFD):提前 30 min 开启冻干机的制冷系统对冷阱进行制冷,使得冷阱温度达到 -40 °C。将处理好的苹果片样品放入干燥仓,开启真空泵使干燥仓内压强下降,物料中水分蒸发使得物料温度快速下降,真空冻结 40 min,样品中心温度冷冻曲线如图 1 所示,样品被冷冻至 -24 °C。开启加热器,隔板采用渐进式升温程序,“温度—时间”控制程序设定为: -30 °C—60 min, -25 °C—60 min, -20 °C—60 min, -15 °C—60 min, -10 °C—60 min, -5 °C—120 min, 0 °C—120 min, 5 °C—60 min, 10 °C—60 min, 20 °C—60 min, 30 °C—60 min, 40 °C—180 min,设置隔板加热压强阈值为 50 Pa,确保干燥仓压强 < 50 Pa,开启隔板加热,通过升温控制程序将冻干过程中的干燥仓压强控制在 < 50 Pa。当样品温度达到 (35 ± 0.5) °C 时,物料实测湿基含水率 $< 5\%$,判定为冷冻干燥终点,获得干燥样品。

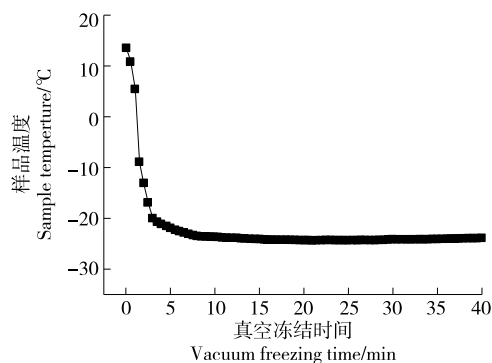


图 1 真空冻结过程中苹果片冷冻曲线

Figure 1 Freezing curve of apple slices during vacuum freezing

(2) 无蔗糖浸渍常压预冻(CFFD):将处理好的苹果片样品放入干燥仓,开启冻干机制冷系统,在常压下对干燥仓中的样品进行冷冻,冻结时间 4 h,将物料温度降至 -40°C 。开启真空泵,将干燥仓压强降至 50 Pa,开启加热器,按照 VFFD 组中设定的温度程序进行冷冻干燥,获得干燥样品。

(3) 蔗糖前浸渍真空预冻(BSVFFD):预冻前采用 40%蔗糖溶液将苹果片样品浸渍 1 h,浸渍料液比为 1:2 (g/mL),其他处理过程同 VFFD。

(4) 蔗糖中间浸渍真空预冻(MSVFFD):按照 VFFD 的方法进行苹果片样品的真空预冻和升华干燥,待冷冻干燥升温程序执行 8 h 后中断干燥过程,将样品取出,用 40%蔗糖溶液将半干燥样品浸渍 30 min,浸渍料液比为 1:2 (g/mL),重复 VFFD 的处理过程,完成真空预冻和冷冻干燥,获得干燥样品。

(5) 蔗糖前浸渍常压预冻(BSCFFD):预冻前用 40%蔗糖溶液将苹果片样品浸渍 1 h,浸渍料液比为 1:2 (g/mL),其他处理过程同 CFFD。

(6) 蔗糖中间浸渍常压预冻(MSCFFD):按照 CFFD 的方法进行苹果片样品的真空预冻和升华干燥,待冷冻干燥升温程序执行 8 h 后中断干燥过程,将样品取出,用 40%蔗糖溶液将半干燥样品浸渍 30 min,浸渍料液比为 1:2 (g/mL),重复 CFFD 的处理过程,完成常压预冻和冷冻干燥,获得干燥样品。

1.3.3 色差测定 利用电脑色差仪进行测定。 L^* 表示明暗度,其值越大,表明样品越偏白色; a^* 代表红绿色,若 $a^* > 0$ 时,值越大表明样品颜色越偏红色,若 $a^* < 0$,值越小表明样品颜色越偏绿色; b^* 表示黄蓝色,若 $b^* > 0$,值越大表明样品颜色越偏黄色,若 $b^* < 0$,值越小表明样品颜色越偏蓝色^[16]。按式(1)计算色差值。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

1.3.4 产出率测定 按式(2)计算冻干样品产出率,每组样品重复测定 3 次,结果取平均值。

$$P_0 = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

P_0 ——冻干苹果片产出率,%;

m_1 ——鲜切苹果片质量,g;

m_2 ——冻干苹果片质量,g。

1.3.5 形变率测定 利用游标卡尺精确测量鲜切苹果片和冻干苹果片的厚度,按式(3)计算冻干样品形变率,每组样品重复测定 3 次,结果取平均值。

$$P_1 = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

P_1 ——冻干苹果片形变率,%;

h_1 ——鲜切苹果片厚度,mm;

h_2 ——冻干苹果片厚度,mm。

1.3.6 组织微观结构扫描电镜观察 参照李兴霞等^[17]的方法。

1.3.7 穿刺测试 利用质构仪“穿刺-25 N”程序对冻干苹果片进行穿刺测试。探头 P2,载荷单元 25 N,恒定速率 1 mm/s,穿刺距离 2 mm,记录穿刺硬度与做功参数,每组样品重复测定 5 次,结果取平均值。

1.3.8 吸湿性 将冻干苹果片放置在盛有饱和氯化钠溶液的玻璃干燥器中,分别静置 0,1,2,3,4,5,6,7,24,48,72 h,称量冻干苹果片质量,按式(4)计算冻干样品的吸湿率,每组样品重复测定 5 次,结果取平均值。

$$P_2 = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

P_2 ——冻干苹果片吸湿率,%;

m_1 ——冻干苹果片静置初始时刻(0 h)质量,g;

m_2 ——冻干苹果片静置一定时间后的质量,g。

1.4 数据处理

利用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行单因素方差分析(ANONA),采用 Duncan's 法对均值进行多重比较显著性分析,显著水平 $P < 0.05$ 。采用 Excel 软件作图。

2 结果与分析

2.1 冻干苹果片色泽

由表 1 可知,CFFD 组和 BSCFFD 组苹果片冻干后 L^* 值增加,冻干样品颜色变得更亮白,其余各组 L^* 值均减小,冻干样品颜色变暗,其中 MSVFFD 组的最小($P < 0.05$),颜色最暗。6 组冻干样品的 Δa^* 均为正值,其中 VFFD 组和 MSVFFD 组的显著高于其他组($P < 0.05$),苹果片冻干后颜色变得更红。6 组冻干样品的 Δb^* 均为正值,其中 VFFD 组的明显高于其他组($P < 0.05$),苹果片冻干后颜色更黄。从 ΔE 来看,MSVFFD 组和 CFFD 组的显著高于其他组($P < 0.05$),其中 MSVFFD 组的颜色整体偏暗、红、黄,冻干样品呈现较深的色泽。果蔬干燥加工过程中引起色泽变化的原因通常包括:果蔬中叶绿素、类胡萝卜素等色素物质的氧化降解等变化,氧化酶和过氧化酶等参与的酶促褐变,氨基酸和羰基化合物参与的美拉德反应(非酶褐变),以及因组织中水分和空气被脱除而引起的透明度变化^[17-18]。6 组冻干试验中,物料预冻采用了真空冻结和常压冻结两种方式,在冻结时间、温度、环境压强和气体组成等条件方面有着较大差异,可能会影响预冻过程中苹果片酶促褐变等色泽变化差异;蔗糖浸渍采用了预冻前浸糖和冻干中间浸糖两种方法,使得蔗糖溶液对鲜切苹果片的护色作用、蔗糖渗透进入组

表 1 苹果片冻干后色泽变化[†]

Table 1 Effects of freeze-drying on the color changes of the apple slices

处理方式	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
VFFD	-7.79 ± 1.71^b	10.10 ± 1.13^c	14.49 ± 2.14^c	12.71 ± 0.75^a
CFFD	8.79 ± 1.45^d	4.91 ± 2.25^a	6.42 ± 1.48^b	19.89 ± 4.09^b
BSVFFD	-1.94 ± 1.13^c	3.99 ± 1.66^a	7.81 ± 2.01^b	10.03 ± 3.79^a
MSVFFD	-17.92 ± 2.19^a	11.37 ± 2.28^c	7.38 ± 1.74^b	22.62 ± 5.14^b
BSCFFD	8.33 ± 1.38^d	4.08 ± 1.28^a	5.13 ± 1.79^{ab}	11.60 ± 1.42^a
MSCFFD	-4.02 ± 1.44^c	7.72 ± 1.79^b	4.03 ± 1.06^a	13.06 ± 4.54^a

[†] 同列字母不同表示存在显著性差异($P < 0.05$)。

组织的程度产生较大差异,进而影响冻干后续热干燥过程中的色素变化、美拉德反应褐变等色泽变化。预冻方式和浸糖方式两者叠加对苹果片冻干过程中的色泽产生了错综复杂的影响,最终形成了 6 组冻干样品的色泽差异。

2.2 冻干苹果片产出率和形变率

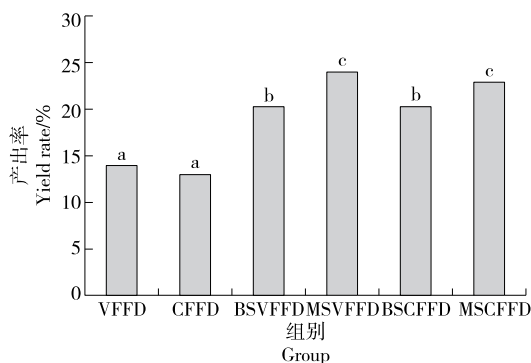
由图 2 可知,MSVFFD 组和 MSCFFD 组冻干苹果片产出率最高且两者之间无显著差异,BSVFFD 组和 BSCFFD 组产出率次之且两者之间无显著差异,VFFD 组和 CFD 组产出率最小且两者之间无显著差异。表明蔗糖浸渍处理可以显著提高冻干样品的产出率,40% 的蔗糖溶液具有较高的渗透压,在浸渍过程中大量蔗糖分子会迁移进入苹果片组织内部,增加了苹果片的固形物含量,提高了冻干样品的产出率。此外,无论是真空冻结还是常压冻结,采用中间浸糖处理的苹果片产出率均显著高于前浸糖处理组。中间浸糖组中蔗糖浸渍的样品为已预干燥 8 h 的苹果片半成品,样品组织中大部分冰晶已被升华脱除,在内部形成蜂窝状网络结构,组织孔道疏松通透,对水和蔗糖分子的迁移阻力小,有利于蔗糖溶液在组织中高效迁移渗透,其产出率明显较高;而前浸糖组浸渍的样品为新鲜苹果片,其水分含量高,组织结构致密,细胞结构完整,蔗糖分子无法穿透细胞膜进入胞内,只能进入细胞壁,在细胞间隙通道中迁移扩散,其迁移阻力明显

高于中间浸糖组,因此其产出率明显较低^[8]。

由图 3 可知,CFFD 组形变率最高,VFFD 组次之,有蔗糖浸渍的无显著差异,但显著低于对照组($P < 0.05$)。表明蔗糖浸渍能够有效减少苹果片在冷冻干燥过程中的收缩变形作用,有助于维持原有的组织形态,可能是由于蔗糖分子进入苹果组织内部改变了细胞组分和结构形态,有助于干燥过程中形成较为稳固的多孔网络结构,使之在冻干过程中不易坍塌,使得冻干产品的形变率较小^[19]。

2.3 冻干苹果片微观结构

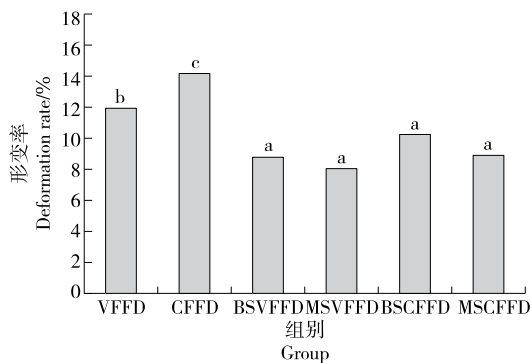
由图 4 可知,冻干样品呈现出不同特征的蜂窝状多孔网络结构。从孔室尺寸上看,采用常压冻结的 CFD、BSCFFD、MSCFFD 3 组冻干样品形成的孔隙尺寸整体上比 VFFD、BSVFFD、MSVFFD 的大,其主要原因可能是真空预冻使样品在真空条件下进行极快速的降温冷冻处理,在组织内部形成相对细小且均匀的冰晶体,经升华干燥后形成较小的致密多孔网络结构。从整体形貌上看,未浸蔗糖的 CFD 组和 VFFD 组的孔室结构疏松,孔壁较薄,孔室棱角边界不清,孔隙不饱满;蔗糖浸渍的 BSVFFD 组和 MSVFFD 组样品则呈现相对均匀而致密的多孔结构,孔室棱角边界清晰,孔隙相对饱满;蔗糖浸



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 2 冻干苹果片产出率

Figure 2 The yield rate of freeze-dried apple slices



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 3 冻干苹果片的形变率

Figure 3 The deformation rate of freeze-dried apple slices

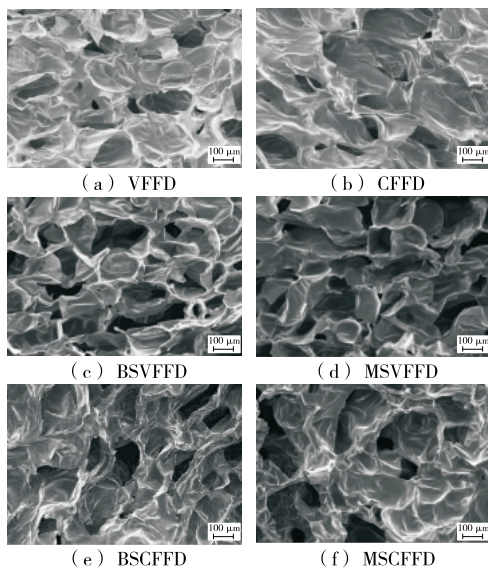


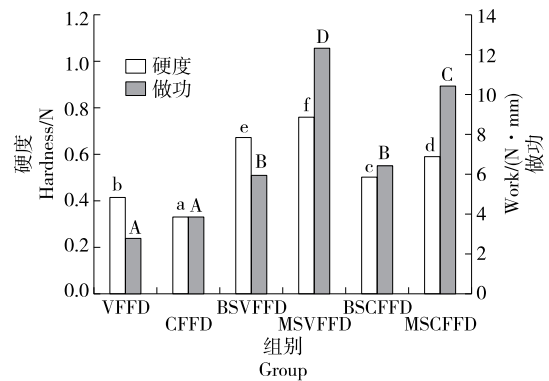
图4 冻干苹果片扫描电镜图

Figure 4 Scanning electron microscopy (SEM) of freeze-dried apple slices (100×)

渍的 BSCFFD 组和 MSCFFD 组样品孔室边界特征明显, 孔隙尺寸较大且不均匀, 孔壁明显较厚, 并有局部皱缩现象。表明蔗糖浸渍处理有助于改善冻干样品的微观结构形态, 形成明显的孔隙网络结构, 其原因可能是蔗糖分子渗透进入苹果组织内部, 与细胞壁组分(纤维素、半纤维素、果胶等大分子物质)进行交联, 防止干燥过程中细胞壁组分降解, 提高细胞壁对因受热干燥而引起的局部应力应变的抵抗能力, 部分蔗糖分子也可能进入细胞内, 增加胞内基质中固形物浓度, 有助于干燥过程中形成相对稳固的骨架体系, 增强冻干苹果片多孔网络结构的稳定性, 从而更好地维持冻干样品原有形状^[5,8,20]。

2.4 冻干苹果片穿刺力学特性

由图 5 可知, 就穿刺硬度而言, 6 组样品间均存在显著差异, 由高到低分别为 $MSVFFD > BSVFFD > MSCFFD > BSCFFD > VFFD > CFFD$ ($P < 0.05$)。6 组样品的穿刺硬度总体上呈现两个趋势: ① 预冻方法相同时, 蔗糖浸渍可以显著增加冻干样品的穿刺硬度, 且中间浸糖方法比前浸糖方法在增加样品硬度方面更为有效, 可能是采用不同的浸渍方式, 蔗糖分子不同程度地渗透进入组织内部, 与细胞壁组分、细胞基质等产生化学交联和物理结合等作用而存在差异, 影响到冻干样品组织中的蜂窝孔室形态和结构坚固性, 中间浸糖法中会有更多的蔗糖分子进入苹果片组织, 所以其冻干样品表现出更高的穿刺硬度; ② 蔗糖浸渍方法相同时, 采用真空预冻的冻干样品穿刺硬度显著高于常压预冻组, 可能是两者冻结速度差异较大, 形成的冰晶体尺寸差异明显, 进而影响冻干后样品的孔隙结构形态, 真空预冻组冻干样品孔隙相



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图5 冻干苹果片穿刺硬度与做功

Figure 5 The puncture hardness and work of freeze-dried apple slices

对细小且均匀, 结构致密, 因此样品组织对穿刺探头破坏作用的抵抗能力相对较高, 呈现较高的穿刺硬度^[8,12]。做功在数值上是穿刺探头受力和穿刺距离的乘积, 是样品对外界破坏作用的抵抗能力的综合体现。6 组样品中, BSVFFD 组和 BSCFFD 组以及 VFFD 组和 CFFD 组间的穿刺做功无显著差异, 其他组均差异显著, 由高到低分别为 $MSVFFD > MSCFFD > BSVFFD = BSCFFD > VFFD = CFFD$ 。表明蔗糖浸渍可以显著提高冻干样品穿刺做功, 中间浸糖方式比前浸糖方式更能提高穿刺做功 ($P < 0.05$)。

2.5 冻干苹果片吸湿性

由图 6 可知, 随着冻干样品在恒湿密闭环境中暴露时间的延长, 6 组冻干苹果片吸湿率均逐渐增加, 其中 CFFD 组吸湿率明显高于其他组, 而 MSVFFD 组吸湿率则明显较低。总体来看, 预冻方法相同时, 蔗糖浸渍处理组吸湿率低于未浸糖组, 且中间浸糖组吸湿率比前浸糖组更低, 可能是苹果片半干样品经蔗糖中间浸渍处理再脱水干燥后, 蔗糖分子更容易沉积于苹果片表层及内部孔道, 形成致密保护屏障, 阻碍环境中的水蒸气进入内部

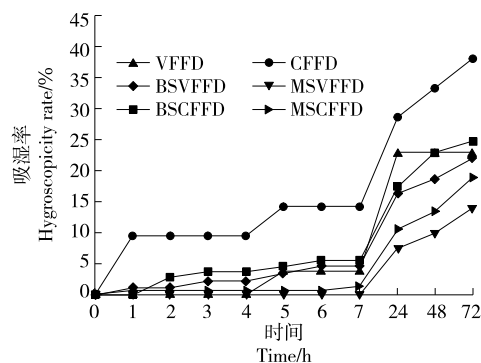


图6 冻干苹果片吸湿率变化

Figure 6 Changes of the hygroscopicity rate of freeze-dried apple slices

组织,因此,中间浸糖处理可有效降低冻干产品吸湿性,有利于冻干产品出仓后续处理过程的产品品质稳定^[5,8]。

3 结论

研究以鲜切苹果片为试验对象,以质量分数 40% 的蔗糖溶液为浸渍液,探究了真空冻结、常压冻结两种预冻方法以及预冻前浸渍蔗糖、冻干中间浸渍蔗糖两种浸渍方法对冻干苹果片品质的影响。结果表明,中间浸糖真空预冻组色泽更偏深红色,其 ΔL^* 相对较低, Δa^* 和 ΔE 相对较高 ($P < 0.05$);蔗糖浸渍显著提高了冻干样品的产出率,且中间浸糖组产出率显著高于前浸糖组 ($P < 0.05$);蔗糖浸渍显著提高了冻干样品的穿刺硬度和做功,中间浸糖真空预冻组的最高,未浸糖组的最低,真空预冻组硬度高于常压预冻组,中间浸糖组硬度高于前浸渍组 ($P < 0.05$);中间浸糖处理可有效降低冻干产品吸湿性,中间浸糖真空预冻和中间浸糖常压预冻的吸湿率最低,未浸糖的常压预冻组吸湿率明显高于其他组 ($P < 0.05$)。综合来看,真空冻结和中间浸糖两种处理组合,可以赋予冻干苹果片良好的色泽、较高的产出率、较小的形变率和吸湿率,改善其孔隙结构及质地特性,赋予冻干产品较佳的综合品质。

冻干苹果片的形变率、吸湿率、质地等品质与其孔隙结构形状及分布特性密切相关,研究中仅利用扫描电镜观察组织断面的孔隙结构形状,缺乏量化指标的描述,分析主观性较强,而且反映的信息量有限,无法获取冻干样品整体三维空间的孔隙结构特性。后续可利用 X 射线计算机断层扫描等测试技术分析冻干样品的三维孔隙结构特性参数,深入探索冻干样品质地品质形成机制。

参考文献

- [1] 黄欣莹,姚卫蓉. 蜂蜜对苹果酶促褐变的抑制及有效成分分析[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(2): 55-62.
HUANG X Y, YAO W R. Inhibition on apple enzymatic browning by honey and analysis of its effective components[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(2): 55-62.
- [2] 赵梦月,段续,任广跃,等. 山茱萸微波冷冻干燥动力学及品质变化分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 111-117, 129.
ZHAO M Y, DUAN X, REN G Y, et al. Drying kinetics and quality changes analysis of Cornus officinalis dried by microwave freeze-drying[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 111-117, 129.
- [3] WANG H O, XUE Y L, HU Z C, et al. Addition of external water improves the quality attributes of vacuum-frozen and thawed apple slices[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 137: 1-13.
- [4] 王海鸥,王前菊,姜英,等. 葡萄糖—柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 477-486.
WANG H O, WANG Q J, JIANG Y, et al. Effects of immersion treatment with glucose and citric acid solutions on the quality of

- freeze-dried apple slices [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, 36(2): 477-486.
- [5] 肖敏,易建勇,毕金峰,等. 不同聚合度糖渗透对苹果片干燥特性及品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 53-58.
XIAO M, YI J Y, BI J F, et al. Effect of sugars with different degrees of polymerization on apple hot-air drying behavior and physical characteristics of instant controlled pressure drop dried apple chips[J]. Food Science, 2017, 38(9): 53-58.
- [6] 马有川,毕金峰,易建勇,等. 预冻对苹果片真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 241-250.
MA Y C, BI J F, YI J Y, et al. Effects of pre-freezing on the drying characteristics and quality parameters of freeze drying apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 241-250.
- [7] 陈童,张慙,陈晶晶. 超声波辅助渗透脱水处理及其对西兰花冻结品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(4): 33-40.
CHEN T, ZHANG M, CHEN J J. Optimization of ultrasonic-assisted osmotic dehydration and the influence on the quality of frozen broccoli[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(4): 33-40.
- [8] 王海鸥,王前菊,闫秋菊,等. 多元糖浸渍处理对真空冷冻干燥苹果片品质及微观孔隙结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(16): 43-48, 55.
WANG H O, WANG Q J, YAN Q J, et al. Effect of polysaccharide impregnating treatment on the quality and microstructure of vacuum freeze-dried apple slices[J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(16): 43-48, 55.
- [9] XIE H X, ZHAO R, LIU C J, et al. Dynamic changes in volatile flavor compounds, amino acids, organic acids, and soluble sugars in lemon juice vesicles during freeze-drying and hot-air drying[J]. Foods, 2022, 11: 2 862.
- [10] 王海鸥,段肖杰,吴雨龙,等. 柠檬果肉真空冻结过程中挥发性风味成分变化[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 2-9.
WANG H O, DUAN X J, WU Y L, et al. Changes of volatile flavor compounds in lemon pulp during vacuum freezing[J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 2-9.
- [11] HU J Q, SUN X Y, YANG F F, et al. Changes and correlation analysis of volatile compounds, key enzymes, and fatty acids in lemon juice vesicles during freeze-drying and hot-air drying[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(13): 6 330-6 339.
- [12] WANG H O, FU Q Q, CHEN S J, et al. Effect of hot-water blanching pretreatment on drying characteristics and product qualities for the novel integrated freeze-drying of apple slices[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2 018: 1347513.
- [13] 王海鸥,扶庆权,陈守江,等. 热烫处理苹果片真空冻结特性[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 57-63.
WANG H O, FU Q Q, CHEN S J, et al. Vacuum freezing properties of blanched apple slices[J]. Food Science, 2016, 37(23): 57-63.

- [14] 王海鸥, 陈守江, 扶庆权, 等. 热烫冻融组合处理对苹果片真空冻结特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(6): 180-186.
WANG H O, CHEN S J, FU Q Q, et al. Effect of combined treatments of heat-blanching and freeze-thawing on the characteristics of vacuum freezing of apple slices[J]. Food and Fermentation Industry, 2018, 44(6): 180-186.
- [15] 周頔, 王海鸥, 孙艳辉, 等. 不同前处理和冻结方式对苹果片真空冷冻干燥效率及干制品品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 218-224.
ZHOU D, WANG H O, SUN Y H, et al. Effect of different pre-processing and freezing methods on the vacuum freeze-drying efficiency and dry products quality of apple slices[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(12): 218-224.
- [16] 彭钰航, 王广红, 孙飞雪, 等. 胡萝卜热泵干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 211-216.
PENG Y H, WANG G H, SUN F X, et al. Optimization of carrot heat pump drying process by response surface methodology[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 211-216.
- [17] 李兴霞, 李越, 杨菲菲, 等. 吸湿性对冻干果蔬产品及其品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 159-165.
LI X X, LI Y, YANG F F, et al. The effect of hygroscopicity on quality characteristics of different freeze-drying fruit and vegetable products[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 159-165.
- [18] 吴昆明, 凌阿静, 胡新中, 等. 干燥方式对苦荞麦芽色泽、多酚及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(11): 115-120.
WU K M, LING A J, HU X Z, et al. Effects of drying methods on color, polyphenol content and antioxidant activity of tartary buckwheat sprouts[J]. Food and Fermentation Industry, 2016, 42(11): 115-120.
- [19] 李卓豪, 毕金峰, 易建勇, 等. 真空冷冻干燥果胶—纤维素—小分子糖气凝胶质构研究[J]. 核农学报, 2022, 36(9): 1 805-1 814.
LI Z H, BI J F, YI J Y, et al. Study on texture properties of freeze-dried pectin-cellulose-small molecule sugar aerogels[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(9): 1 805-1 814.
- [20] 田津津, 姚超阳, 张志强, 等. 真空冷冻干燥过程中升华温度对梨瓜细胞微观结构的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 12-17.
TIAN J J, YAO C Y, ZHANG Z Q, et al. Effects of sublimation temperature on cell microstructure of pear melon during vacuum freeze drying[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 12-17.
-
- (上接第 175 页)
- [21] 赵熙, 黄怀生, 粟本文, 等. 不同茶树品种制绿茶贮藏过程中品质变化规律[J]. 茶叶通讯, 2014, 41(4): 18-22.
ZHAO X, HUANG H S, SU B W, et al. Quality change of green tea made by different cultivars during storage[J]. Journal of Tea Communication, 2014, 41(4): 18-22.
- [22] DAI W, TAN J, LU M, et al. Metabolomics investigation reveals that 8-CN-ethyl-2-pyrrolidinone-substituted flavan-3-ols are potential marker compounds of stored white teas[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(27): 7 209-7 218.
- [23] 周树红. 成品普洱茶陈化机理及提质技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001: 25-28.
ZHOU S H. Studies on the mechanism of stale process and the technique for improving the quality of Puer tea[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001: 25-28.
- [24] 谢基雄. 不同储藏时间武夷岩茶的品质化学成分研发[D]. 福建: 福建农林大学, 2018: 24-25.
XIE J X. Studys on quality chemical composition of Wuyi rock tea under different storage time[D]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018: 24-25.
- [25] XU S S, WANG J J, WEI Y M, et al. Metabolomics based on UHPLC-Orbitrap-MS and global natural product social molecular networking reveals effects of time scale and environment of storage on the metabolites and taste quality of raw Pu-erh tea[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(43): 12 084-12 093.
-
- (上接第 184 页)
- [24] EGEE M B, PEREIRA-NETTO A B, CACHO J, et al. Comparative analysis of aroma compounds and sensorial features of strawberry and lemon guavas (*Psidium cattleianum* Sabine) [J]. Food Chemistry, 2014, 164: 272-277.
- [25] 邱珊莲, 张少平, 林宝妹, 等. 不同成熟期番石榴果实香气成分变化[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(13): 162-169.
QIU S L, ZHANG S P, LIN B M, et al. Changes of aroma components in guava fruit at different ripening stages[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(13): 162-169.
- [26] PINO J A, BENT L. Odour-active compounds in guava (*Psidium guajava* L. cv. Red Suprema) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93: 3 114-3 120.
- [27] JORDAAN M J, MAEGARIAA C A, SHAW P E, et al. Volatile components and aroma active compounds in aqueous essence and fresh pink guava fruit puree (*Psidium guajava* L.) by GC-MS and multidimensional GC/GC-O[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51: 1 421-1 426.
- [28] STEINHAUS M, SINYCO D, POLSTER J, et al. Characterization of the key aroma compounds in pink guava (*Psidium guajava* L.) by means of aroma re-engineering experiments and omission tests [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57: 2 882-2 888.