

# 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

周頔<sup>1</sup>, 王海鸥<sup>2</sup>, 孙艳辉<sup>1</sup>, 龙门<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 杜庆飞<sup>1</sup>

(1. 滁州学院生物与食品工程学院, 安徽滁州 239000) (2. 南京晓庄学院食品科学学院, 江苏南京 211171)

**摘要:** 冻干前处理和冷却固化环节是果蔬冻干的关键工序, 为进一步缩短干燥时间并提高干制品品质, 该研究选用苹果片作为试验对象, 采用超声波技术、真空冻结技术、超声波-真空冻结技术, 将苹果片分为常规组、超声-常规组、真空冻结组、超声-真空冻结组, 比较不同前处理方式对苹果片冻干效率及干制品品质的影响。结果表明, 超声-常规组苹果片冻干效率最高, 由 16.00 h 缩短至 11.83 h; 干制品复水比最大, 较常规组增加了 62.16%; 色泽指标 b\* 值由 28.24 降至 19.46, 颜色更加洁白; 维生素 C 保留率最高, 可达 83.90%; 硬度最小且松脆可口, 感官评价最好。真空冻结组苹果片冻干时间由 16.00 h 缩短至 14.17 h; 干制品复水比较常规组增加了 17.99%; 色泽指标 b\* 值由 28.24 降至 22.98, 颜色较为洁白; 酥脆性良好且有较好的咀嚼感, 感官评价良好。研究结果为苹果片在冻干前处理环节参数优化及新型果蔬脆片的开发提供参考。

**关键词:** 苹果片; 超声波; 真空冻结; 真空冷冻干燥; 品质

文章编号: 1673-9078(2016)12-218-224

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.12.034

## Effects of Re-processing and Freezing Methods on the Efficiency of Vacuum Freeze-drying and Quality of Freeze-dried Apple Slices

ZHOU Di<sup>1</sup>, WANG Hai-ou<sup>2</sup>, SUN Yan-hui<sup>1</sup>, LONG Men<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, DU Qing-fei<sup>1</sup>

(1. College of Biotechnology and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

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

**Abstract:** Pre-treatment, cooling, and solidification are key processes in the freeze-drying of fruits and vegetables. In order to improve the efficiency of vacuum freeze-drying and ensure the quality of freeze-dried products, apple slices were subjected to different pre-processing and freezing methods including ultrasonication, vacuum freezing, and ultrasound-vacuum freezing. The apple slices were randomly divided into 4 groups: conventional group, ultrasound-conventional group, vacuum-freezing group, and ultrasound-vacuum-freezing group. The drying times and quality indicators for these groups were compared. The results showed that the ultrasound-conventional group, which was subjected to ultrasound followed by vacuum freezing in the refrigerator, showed the best drying efficiency. The drying time reduced from about 16.00 h to 11.83 h. The rehydration rate of dried apple slices was also the highest in this group, which increased by about 62.16% compared to the conventional group. The b\* value of dried apple slices reduced from 28.24 to 19.46, and the color was whiter. The retention rate of vitamin C was also the highest, reaching 83.90%. The hardness was the lowest, giving crisp apple slices, and the sensory evaluation gave the best results. The vacuum-freezing group, which was subjected to vacuum freezing during the process of pre-freezing, showed a reduction in the drying time of the apple slices from 16.00 h to 14.17 h and an increase in the rehydration rate of the dried products by 17.99%, compared to the conventional group. The b\* value of dried apple slices decreased from 28.24 to 22.98, and the color became white. The dried apple slices acquired moderate crispness and good chewiness, and the sensory evaluation was good. This study provides a reference for optimizing the parameters for the vacuum freeze-drying of apple slices and the development of new fruit slices.

**Key words:** apple slices; ultrasound; vacuum freezing; vacuum freeze-drying; quality

收稿日期: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (31301592); 安徽省热敏性物料加工工程技术研究中心开放基金 (2015RMZ05); 滁州学院实验室开放课题 (SWSP201512KF); 安徽省新型“创客”实验室建设与实践大学生创客实验室 (2015ckjh099)

作者简介: 周頔 (1989-), 女, 硕士, 助教, 研究方向: 食品加工技术

通讯作者: 王海鸥 (1978-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工技术与装备

中国是果蔬生产及出口大国,但脱水果蔬产业整体实力还比较薄弱,主要依靠价格优势参与国际竞争,出口脱水果蔬制品主要是通过热风干燥获得,加工产品外观、营养和口味等品质差,产品附加值低。

真空冷冻干燥技术是国际公认的生产高品质、高附加值脱水食品的加工技术,是一项极具发展潜力的高新食品加工技术。然而该技术虽可获得较好的产品品质,仍存在干燥时间长、能耗大、产品成本高等缺陷,较大程度上限制了其在果蔬等食品加工工业的广泛应用<sup>[1]</sup>。

真空冷冻干燥工艺过程可分为物料的前处理(预处理和制备)、冷却固化、升华干燥、解析干燥和后处理(封装和储存)五大工序<sup>[2]</sup>。近年来,国内外学者在前处理方式上开展了一些探索研究,试图缩短冻干时间、提高冻干制品的品质。部分国内外学者开始采用超声波、高压脉冲电场等技术对果蔬片的干制进行探索研究,如严小辉等<sup>[3]</sup>分析了超声波对半干型荔枝干燥过程的影响,结果表明超声波处理可显著缩短冻干时间,并较好地诠释了超声波处理缩短干燥时间的机制。Yali Wu等<sup>[4]</sup>采用高压脉冲电场探索其对苹果冻干过程的影响,结果表明适当条件的高压脉冲电场处理可显著降低冻干的能源消耗,提高生产效率。其中超声波前处理技术的研究主要集中在对果蔬片冻干效率的探索,对干制品品质及其微观组织变化的研究仍需进一步完善。

冷却固化工序也是影响冻干效率及干制品品质的关键点,近年来真空冷却冻结技术作为一个新颖的物料降温方式受到研究者的关注<sup>[5,6]</sup>。传统的冷库冻结耗时长且需增加辅助设备,而真空冷却技术则是利用抽真空减压的方式,使物料内水分在低压状态下迅速汽化的同时从物料本身吸收大量热量,从而使物料快速降温并脱水<sup>[7]</sup>。目前该技术在果蔬采后预冷等领域已有一些应用,但作为冷却固化方式应用于果蔬干燥预冻环节的研究还很少。

综合来看,虽已有一些关于超声波和真空冻结技

术对果蔬干燥过程的影响研究,但系统地对三种不同处理组(超声波处理组、真空冻结处理组及超声波-真空冻结联合处理组)苹果片的冻干特性对比研究还未见报道。因此,本研究以苹果片为研究对象,探索不同前处理和冷却固化方式对苹果片冻干效率及干制品品质的影响,以期为提高果蔬冷冻干燥效率、增强果蔬干制品品质提供一些理论和技术基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜红富士苹果,市售;草酸、碳酸氢钠、抗坏血酸,天津市科密欧化学试剂有限公司;2,6-二氯酚钠,上海金穗生物科技有限公司。

SCIENTZ-10ND 冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;UWave-1000 型微波-紫外-超声波三位一体合成萃取反应仪,上海新仪微波化学科技有限公司;TA.XTplus 物性测试仪,英国 Stable Micro System 公司;JSM-6510V 型扫描电镜,日本电子株式会社;3nh 高品质电脑色差仪,深圳市三恩时科技有限公司;DHG-9101-OSA 型电热恒温鼓风干燥箱,上海三法科学仪器有限公司;HHS 型电热恒温水浴锅,上海博迅实业有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 苹果的前处理

将苹果分为4组,依据不同的前处理和冷却固化方式分别定义为常规组、超声-常规组、真空冻结组和超声-真空冻结组。每组苹果均洗净去皮、去核、切片,切片厚度5 mm,各取10片,分别标记为1~10号。根据前期试验探索,超声-常规组参数是以冻干时间和复水比为考察指标,采用正交优化出的最优结果;真空冻结组参数的选取也是基于前期试验摸索结果。4组前处理工艺具体参数见表1。

表1 苹果片前处理工艺

Table 1 Pretreatment of apple slices

组名	前处理方式
常规组	-30℃冰箱中预冻2h待用
超声-常规组	超声波处理后(超声功率200W,超声水温35℃,超声处理时间10min),-30℃预冻2h待用
真空冻结组	苹果片竖立于真空冷冻干燥仓料盘中,仅抽真空不加热,持续50min(仓料盘温度为20℃,真空度1Pa)
超声-真空冻结组	先经超声波处理,而后将苹果片竖立于真空冷冻干燥仓料盘中,仅抽真空不加热,持续50min

#### 1.2.2 真空冷冻干燥终点的确定

苹果片真空冷冻干燥升温程序设定为:0℃~1h、10℃~1h、20℃~2h、25℃~3h、30℃~4h和35℃

~6h。通过前期实验摸索,当物料温度达到 $26\pm 0.2$ ℃时,物料实测含水率约为5%,此时判定为冻干终点。记录相应的真空冷冻干燥时间,测定产品复水比。

### 1.2.3 品质指标的测定

#### 1.2.3.1 含水率的测定

含水率的测定参照 GB 5009.3-2010。

#### 1.2.3.2 复水比的测定

将真空冷冻干燥好的苹果片 ( $m_1$ , g) 放入蒸馏水中充分吸水 30 min, 复水后沥干表面和四周的水, 准确称量 ( $m_2$ , g), 复水比= $m_2/m_1$ <sup>[8]</sup>。

#### 1.2.3.3 维生素 C 含量的测定

采用 2, 6-二氯靛酚法<sup>[9]</sup>。测试结果按每 100 g 冻干苹果片含维生素 C 的 mg 数表示。

#### 1.2.3.4 色泽的测定

取处理完毕的苹果片用色差计进行色差值的测定。根据 CIELAB 表色系统,  $L^*$  为明亮度指数,  $a^*$  和  $b^*$  为彩度指数。  $L^*$  值越大表明样品颜色越接近于白色; 当  $a^*$  值为正值时, 值越大说明样品的颜色越接近红色; 当  $a^*$  值为负值时, 绝对值越大说明样品的颜色越接近绿色; 当  $b^*$  值为正值时, 值越大说明样品的颜色越接近黄色; 当  $b^*$  值为负值时, 绝对值越大说明产品的颜色越接近蓝色。

#### 1.2.3.5 硬度和脆性的测定

采用 TA.XTplus 物性测试仪进行测试, 参数设置如下: P/2 型穿刺探头, 测试速率 0.5 mm/s, 测试距离 8 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, 单位为  $N/cm^2$ ; 产品脆度以穿刺过程中应力值变化波动而凸显出的峰个数多少表示, 峰数越多产品脆度越大<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.3.6 感官评定

表 2 感官评定分值表

Table 2 Sensory evaluation of apple slices

指标	状态	评分
外观	乳白色或浅黄色, 表面平整、皱缩度很小	3
	黄色, 表面较平整、皱缩度小	2
	深黄色或褐色, 表面不平整, 皱缩度很大	1
口感	口感疏松、质脆, 硬度适中	4
	口感较疏松、质脆, 硬度较适中	3
	脆感弱, 硬度偏大或偏小	2
	无脆感, 硬度过大或过小	1
风味	浓郁的果香味	3
	淡淡的果香味	2
	无果香味, 有焦糊味或其他异味	1

根据食品感官评价标准, 结合冻干苹果片的特点, 制定适合本试验的感官评价标准。选取 10 名感官评价员, 评价体系采用 10 分制, 使用加权法对苹果片干制品的感官品质进行评价, 其中外观占比 30% 和口感占比 40%、风味占比 30%, 将外观、口感和风味用分数

表示, 由得分进行综合评定。具体方法见表 2。

#### 1.2.3.7 微观组织结构观察

将经过不同前处理后、具代表性的冻干苹果片置于扫描电镜下进行组织结构观察, 具体操作为: 处理好的苹果片切面用导电胶将其贴到扫描样品台上, 先在真空镀膜仪上给苹果片镀金属膜, 再通过扫描电子显微镜进行扫描观察拍照。

#### 1.2.4 数据处理

采用 SPSS 软件对试验数据进行显著性分析, 显著性水平  $p < 0.05$ 。每组试验均取 3 次平行进行测定, 以平均值表示最终结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同前处理对苹果片冻干时间及干制品复水比的影响

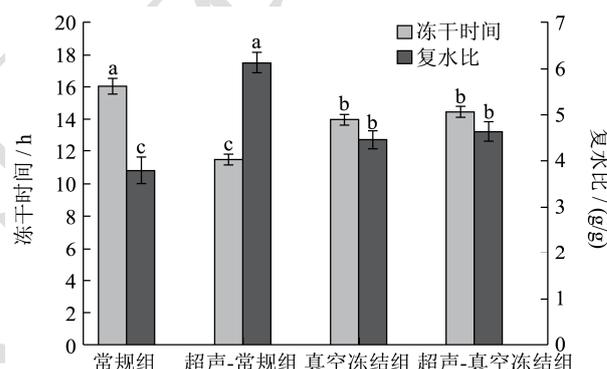


图 1 不同前处理对苹果片真空冷冻干燥时间和复水比的影响

Fig.1 Drying times and rehydration rates of freeze-dried apple slices after different pretreatments

注: 图中同一指标字母不同者表示有显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 下列图中含义相同。

由图 1 可知, 3 种前处理方式均可使苹果片真空冷冻干燥时间缩短, 其中超声-常规组最显著 ( $p < 0.05$ ), 冻干时间可由 16.00 h 缩短至 11.83 h, 缩短了 26.06%, 其次是真空冻结方式, 可由 16.00 h 缩短至 14.17 h, 最后是超声波-真空冻结方式, 可由 16.00 h 缩短至 14.83 h。3 种不同前处理均可使冻干苹果片的复水比增加, 其中超声波预处理对复水性能的影响最显著, 由 3.78 g/g 增加至 6.13 g/g, 增加了 62.16%, 真空冻结及超声波-真空冻结处理均可使干制品的复水性能略微增加, 较常规组分别增加了 17.99% 和 22.49%, 这与苹果片的冻干时间趋势类似。

超声-常规组苹果片冻干时间显著缩短, 这可能是因为适当的超声波预处理可使苹果片产生空化效应或组织破碎, 内部组织更加疏松, 从而形成微孔道, 使

得水分在冻干过程中逸出更加顺利<sup>[11]</sup>,也使得干制品复水时水分再次进入组织内部更加通畅,复水性能显著提高。

真空冻结组苹果片的冻干时间也有一定程度的缩短,这是因为真空冷却处理创造的低温、低压环境可快速去除物料表面的残留水及表层组织中的水分,达到了预干燥的目的<sup>[7]</sup>,使物料在进行真空冷冻干燥前就已经失去了一部分水分,进而提高冻干效率。另一方面,真空冻结时苹果片中的水分快速闪发<sup>[4]</sup>,会使得冻干苹果片内部孔隙扩大,进而有利于复水时水分的吸收。

超声-真空冻结组苹果片的冻干时间缩短了约 1.5 h,但不如超声波或真空冻结技术单独使用效果显著。结合图 5 可知超声波和真空冻结联合处理可使苹果片组织细胞间出现孔隙,同时在真空冷却环节已预先失去部分水分,从而使得冻干时间较常规组缩短、干制品的复水性较常规组略微增强;但二者联合作用使苹果片内部组织结构呈现出的排列较杂乱,组织结构过于破碎、交织,因此苹果片冻干效率及干制品复水性的增强不如超声-常规组和真空冻结组苹果片显著。

## 2.2 不同前处理对苹果片维生素 C 含量的影响

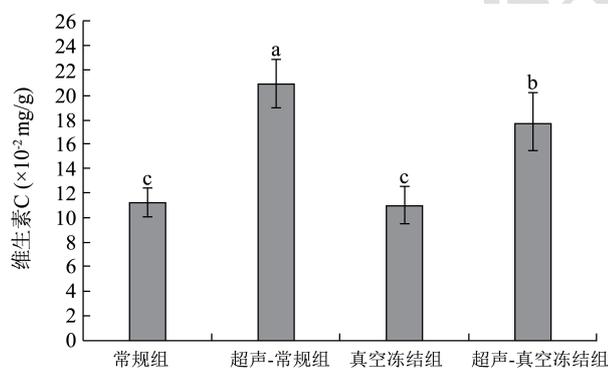


图2 不同前处理后冻干苹果片中的维生素 C 含量

Fig.2 Vitamin C content of freeze-dried apple slices after different pretreatments

由图 2 可知,超声-常规组和超声-真空冻结组的苹果片维生素 C 含量显著高于常规组 ( $p < 0.05$ ),而真空冻结组和常规组无显著差异 ( $p > 0.05$ ),其中超声-常规组苹果片的维生素 C 保留率可达 83.90%,较常规组提高了 38.76%,超声-真空冻结组苹果片的维生素 C 保留率较常规组提高了 26.14%。这表明超声波处理有利于冻干苹果片中维生素 C 的保留、而真空冻结方式对维生素 C 的保留无显著改善效果 ( $p > 0.05$ )。

水溶性维生素中的维生素 C 受温度、时间、氧气、

水分活度等影响会发生降解,而在干燥过程中对维生素 C 含量影响最大的 2 个因素是干燥温度和干燥时间<sup>[12]</sup>。本试验干燥程序设置的最高温度为 35 °C,相对来说温度对维生素 C 的损失影响较小,造成维生素 C 损失的主要因素是冻干时间的长短。经超声波处理后,与常规组相比,冻干时间显著缩短 ( $p < 0.05$ ),有利于苹果片中维生素 C 的保留;而在预冻过程中选用的真空冻结方式,对维生素 C 的保留无明显改善 ( $p > 0.05$ ),结合图 5 电镜结果分析这可能是由于真空冻结使苹果片中的水分快速脱离、组织孔隙迅速变大,水溶性维生素 C 在此过程中发生溶出现象,因此真空冻结组和超声-真空冻结组苹果片虽冻干时间缩短,但在真空冻结环节中已损失部分维生素 C,最终冻干成品的维生素 C 含量较超声-常规组成品略低。

## 2.3 不同前处理对苹果片色泽的影响

表 3 不同前处理后冻干苹果片的色泽比较

Table 3 Color of freeze-dried apple slices after different pretreatments

组名	色泽		
	L*	a*	b*
常规组	84.51±1.44 <sup>a</sup>	4.60±1.66 <sup>a</sup>	28.24±2.22 <sup>a</sup>
超声-常规组	85.92±1.73 <sup>a</sup>	0.64±1.16 <sup>a</sup>	19.46±1.12 <sup>c</sup>
真空冻结组	83.73±2.49 <sup>a</sup>	2.53±2.21 <sup>a</sup>	22.98±1.34 <sup>b</sup>
超声-真空冻结组	85.75±2.00 <sup>a</sup>	1.07±0.81 <sup>a</sup>	22.10±0.82 <sup>b</sup>

注:同一列中字母不同者表示有显著性差异 ( $p < 0.05$ ),下列表中含义相同。

表 3 显示,4 组冻干苹果片的明亮度 L\*值和 a\*值无显著差异 ( $p > 0.05$ ),而 b\*值差异显著 ( $p < 0.05$ ),3 种前处理后的冻干苹果片 b\*值均明显低于常规组,且超声-常规组差异最显著 ( $p < 0.05$ )。这表明超声波预处理和真空冻结方式均会使冻干苹果片颜色更加洁白,更易于被消费者接受。

超声波预处理大大加速了水分的逸出,可使苹果片冻干时间显著缩短,降低干燥期间颜色变化反应时间,而真空冻结可快速降低苹果片表面温度,并去除其表面的残留水及表层组织中的水分,这些因素都可能减缓了苹果片的褐变速度,从而使其颜色更加洁白。另一方面,超声波处理对果蔬物料也有灭酶护色的效果<sup>[13]</sup>。常规组苹果片切片后组织损伤严重,不经护色处理,在有氧常压下冷冻 2 h,仍会有褐变发生,且在解析干燥期间,物料温度在 35 °C 下保持 3~4 h,也会导致一定的褐变反应,使得常规组苹果片的色泽比其他冻干组差。而一定强度的超声波处理所形成的空穴气泡在破裂瞬间能产生局部高温、高压、强的剪切力,

致使酶结构改变而失活，从而使经超声处理后的苹果片色泽更加洁白；结合图 5 可知超声波处理还能破坏苹果片的细胞结构，造成苹果片内离子强度改变，从而增大了酶失活的可能性，一定程度上阻止了苹果片的褐变。

### 2.4 不同前处理对苹果片硬度和脆性的影响

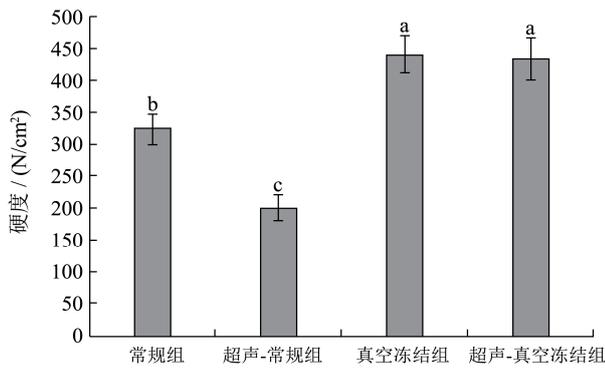


图 3 不同前处理冻干后苹果片的硬度

Fig.3 Hardness of freeze-dried apple slices after different pretreatments

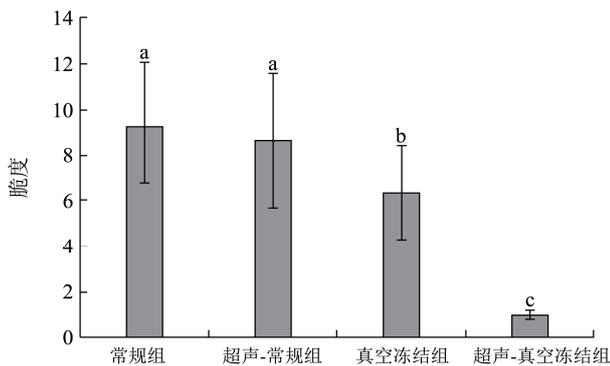


图 4 不同前处理冻干后苹果片的脆性

Fig.4 Fracturability of freeze-dried apple slices after different pretreatments

硬度和脆度指标是用来描述果蔬干制品品质特征的典型参数，这 2 个参数会显著地反映在消费者食用果蔬片时的口感上。图 3 中硬度指标显示，真空冻结组和超声-真空冻结组苹果片硬度最大，其次是常规组，超声-常规组的苹果片硬度最小。图 4 中脆性指标显示，超声-常规组苹果片脆性和常规组无显著差异，真空冻结组苹果片的脆性低于常规组，而超声-真空冻结组苹果片几乎没有脆性。

干制品的质构主要取决于果蔬细胞组织内的细胞基质和可溶性固体介质，而这两者均和水分子的含量、存在状态有直接关联<sup>[4]</sup>。结合图 5 分析可知特定条件的超声波处理使得苹果片的内部细胞组织出现了狭长型的孔隙、结构较松散，使得超声-常规组苹果片相较于常规组苹果片硬度变小；然而，经冻干后样品内部

细胞组织虽较松塌，但呈现一定的层次排列，使得超声组苹果片相较于常规组苹果片脆性无显著差异。预冻过程中采用真空冻结方式使得样品中水分迅速脱离，一定程度上避免了常规冷冻中冰晶形成对细胞的损害，细胞内溶物的流失减少，有效保持了细胞结构，进而使得真空冻结组冻干苹果片的组织结构较致密有序，表现出硬度增大和脆性下降。超声-真空冻结联合处理中，苹果片先经超声处理内部组织细胞出现狭长孔隙、结构松散，再经真空冻结方式使狭长孔隙中的水分快速脱离，二者联合作用虽使得苹果片细胞内溶物的流失减小，但使得内部细胞组织呈现出杂乱的排列或分离、部分毛细管口出现收缩，因此干制品的硬度增大、脆性显著下降。

对休闲类果蔬片而言，硬度和脆性是同时要求的 2 个重要品质指标。基于这两个指标并结合表 4 中感官指标综合分析可知，超声-常规组苹果片酥脆性好，但口感略偏软，适合相应的消费人群；真空冻结组苹果片酥脆性良好，有较好的咀嚼感，也被相应的消费者人群喜爱。相比之下，超声-真空冻结组苹果片的酥脆性较差、硬度偏大。

### 2.5 不同前处理对苹果片感官指标的影响

表 4 苹果片感官评价表

Table 4 Sensory evaluation of freeze-dried apple slices

组名	外观	口感	风味	总评分
常规组	2.2 <sup>b</sup>	3.4 <sup>a</sup>	2.4 <sup>b</sup>	8.0 <sup>b</sup>
超声-常规组	2.7 <sup>a</sup>	3.5 <sup>a</sup>	2.6 <sup>a</sup>	8.8 <sup>a</sup>
真空冻结组	2.5 <sup>a</sup>	3.4 <sup>a</sup>	2.4 <sup>b</sup>	8.2 <sup>b</sup>
超声-真空冻结组	2.5 <sup>a</sup>	2.8 <sup>b</sup>	2.3 <sup>b</sup>	7.6 <sup>c</sup>

感官评分情况见表 4。在外观上，超声-常规组的苹果片色泽亮白、表面平整、几乎无皱缩现象出现，得分最高；其次是真空冻结组和超声-真空冻结组，色泽较洁白、表面较平整、皱缩度小；最后是常规组，表面较平整、皱缩度小，但相比之下颜色偏黄，因此此项得分最低。在口感上，超声-常规组因苹果片柔软疏松、脆感好，得分最高；其次是常规组和真空冻结组，常规组苹果片较柔软，脆感好，真空冻结组苹果片咀嚼性强、脆感较好；最后是超声-真空冻结组，因脆感弱、硬度较大，此项得分最低。在风味上，超声-常规组果香浓郁、风味佳，得分最高；其余三组果香味也较浓郁，三组之间差异并不显著。感官评价总分表明评价员对 4 组冻干苹果片的喜爱度依次为超声-常规组 > 真空冻结组 > 常规组 > 超声-真空冻结组。

### 2.6 不同前处理对苹果片微观组织结构的影响

响

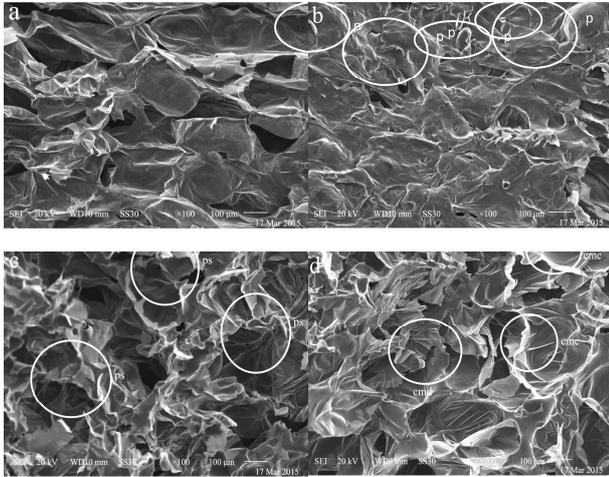


图5 不同前处理冻干苹果片的扫描电镜图(×100倍)

Fig.5 Electron micrographs of freeze-dried apple slices after different pretreatments (100× magnification)

注: a, 常规组 100 倍电镜照片; b, 超声-常规组 100 倍电镜照片; c, 真空冻结组 100 倍电镜照片; d, 超声-真空冻结组 100 倍电镜照片; 图中“p”代表孔隙; “ps”代表多孔结构; “cmc”代表毛细管口收缩; “cmd”代表毛细管变形。

经不同前处理后的冻干苹果片的微观结构如图 5 所示。图 5a 显示, 常规组苹果片组织孔隙很小, 结构紧密, 因此复水后较难恢复到原有结构, 复水性能相对较差。图 5b 显示超声-常规组苹果片组织孔隙较大, 结构松散, 超声波处理使得细胞发生了不规则的排列或分离, 形成了狭长型的孔隙, 有利于水分的逸出及干制品的复水。图 5c 显示真空冻结组苹果片组织孔隙大且受破坏程度较低, 组织变形性较好, 形成了偏圆形的多孔结构, 也有利于水分的逸出。图 5d 显示超声-真空冻结组苹果片细胞间呈现出杂乱的排列或分离, 部分毛细管的管口出现收缩, 变形较严重。

结合图 1 中苹果片的冻干时间和复水比试验数据, 可知单独的超声波处理, 在适宜的超声波作用下, 可使苹果片产生有益于干燥水分逸出和复水水分吸收的微观组织结构变化。单独真空冻结处理时, 大量水分的快速闪发作用也会使得冻干苹果片组织内部孔隙扩大, 进而有利于冷冻干燥时水分的逸出和复水时水分的吸收。而超声波和真空冻结组合处理, 由于两者的复合作用, 使苹果片内部细胞间呈现出杂乱的排列或分离, 组织结构过于破碎、交织, 相对于超声波、真空冻结单独处理的微观结构而言, 抽真空冻结时水分逸出和复水时水分的吸收均会受到一定程度的阻碍。

### 3 结论

3.1 在冻干时间和干制品复水比上, 超声波预处理和真空冻结方式均可使苹果片冻干时间缩短、冻干苹果片复水比增强, 其中超声波处理最显著 ( $p<0.05$ ), 可使苹果片冻干时间由 16.00 h 缩短至 11.83 h、干制品复水比较常规组增加 62.16%, 真空冻结处理可使冻干时间由 16.00 h 缩短至 14.17 h、干制品复水比较常规组增加 17.99%; 在维生素 C 含量上, 超声波处理有利于冻干苹果片中维生素 C 的保留, 超声-常规组苹果片的维生素 C 保留率最高, 可达 83.90%; 在色泽上, 三种前处理后的冻干苹果片  $b^*$  值均明显低于常规组 ( $p<0.05$ ), 其中超声-常规组差异最显著 ( $p<0.05$ ), 可使冻干苹果片的  $b^*$  值由 28.24 降至 19.46, 表明超声波预处理和真空冻结方式均会使冻干苹果片颜色更加洁白。

3.2 在硬度和脆性上, 超声-常规组苹果片硬度最小、脆性好, 真空冻结组苹果片酥脆性良好、有较好的咀嚼感; 感官分析表明评价员对 4 组冻干苹果片的喜爱度依次为超声-常规组 > 真空冻结组 > 常规组 > 超声-真空冻结组。

3.3 扫描电镜结果显示超声波预处理和真空冻结方式均会使冻干苹果片组织孔隙变大、结构变松散, 有利于水分的逸出, 其中超声波处理会使细胞间形成狭长型孔隙、真空冻结处理会使细胞组织形成偏圆形的多孔结构, 但二者叠加作用会使细胞呈现杂乱排列、组织结构变形较严重。

3.4 综合评价各项指标可知, 采用超声波-常规冻干处理, 即常规预冻前 ( $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2 h) 使用超声波处理 (超声功率 200 W, 超声水温  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 超声处理时间 10 min) 可使苹果片的冻干时间缩短约 4.5 h, 干制品复水比较常规组增加 62.16%, 颜色更加洁白, 硬度最小且酥脆可口, 感官评价最好。采用真空冻结方式替代冷库冻结, 即将物料竖立于真空冷冻干燥仓料盘中, 仅抽真空不加热, 持续 50 min (仓料盘温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 真空度 1 Pa), 可使冻干苹果片的冻干时间缩短约 2 h, 干制品复水比较常规组增加 17.99%, 颜色较为洁白, 酥脆性良好且有较好的咀嚼感, 感官评价良好。

3.5 几种处理对比研究表明, 超声波技术可显著提高冻干效率, 提高干制品色泽、质构等品质指标, 是较有经济价值的前处理技术; 真空冻结技术无需额外添加硬件设备, 即可达到提高冻干效率的目的, 是较有潜力的冷却固化方式, 进一步深入研究亟待开展; 超声波-真空冻结复合作用和单一技术相比, 对进一步提

高冻干效率和增强干制品品质无显著增效, 参数摸索和关键工艺点控制是下一步需研究的重点。

### 参考文献

- [1] Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(4): 311-319
- [2] 华泽钊. 冷冻干燥新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006  
HUA Ze-zhao. *New freeze drying technology* [M]. Beijing: Science press, 2006
- [3] 严小辉, 余小林, 胡卓炎, 等. 超声预处理对半干型荔枝干干燥时间的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 351-356  
YAN Xiao-hui, YU Xiao-lin, HU Zhuo-yan, et al. Effects of ultrasound pretreatment on drying time for intermediate-dried litchi [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 351-356
- [4] WU Ya-li, GUO Yu-ming, ZHANG Dong-guang. Study of the effect of high-pulsed electric field treatment on vacuum freeze-drying of apples [J]. *Drying Technology*, 2011, 29(14): 1714-1720
- [5] Liana Drummond, Meinert L, Koch A G, et al. Safety and quality evaluation of large meat joints cooled by a precommercial immersion vacuum cooling prototype [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2015, 50(9): 2066-2073
- [6] 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  
WANG Hai-ou, HU Zhi-chao, TU Kang, et al. Application of vacuum-cooling pretreatment to microwave freeze drying of carrot slices [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 358-363
- [7] Liu E, Hu X, Liu S. Theoretical simulation and experimental study on effect of vacuum pre-cooling for postharvest leaf lettuce [J]. *Journal of Food and Nutrition Research*, 2014, 2(8): 443-449
- [8] DUAN Zhen-hua, JIANG Li-na, WANG Ju-lan, et al. Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2011, 89(10): 472-476
- [9] 赵晓梅, 江英, 吴玉鹏, 等. 果蔬中Vc含量测定方法的研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(3): 197-199  
ZHAO Xiao-mei, JIANG Ying, WU Yu-peng, et al. Assay research on Vc in fruit and vegetable [J]. *Food Science*, 2006, 27(3): 197-199
- [10] 王雅娇, 郭洁, 姚思远, 等. 热风风速和相对湿度对扇贝柱干燥特性及品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(12): 2915-2920  
Wang Ya-jiao, GUO Jie, Yao Si-yuan, et al. Effects of different hot-air drying parameters on drying characteristics and quality of scallops [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(12): 2915-2920
- [11] 林平, 朱海翔. 超声波预处理对真空冷冻干燥胡萝卜的影响研究[J]. *食品科技*, 2010, 35(7): 116-119  
LIN Ping, ZHU Hai-xiang. Study of the influence of ultrasonic pre-processing on vacuum freeze-dried carrot [J]. *Food Science and Technology*, 2010, 35(7): 116-119
- [12] Nawirska A, Figiel A, Kucharska A Z, et al. Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 94(1): 14-20
- [13] Ertugay M F, Başlar M. The effect of ultrasonic treatments on cloudy quality-related quality parameters in apple juice [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 26(4): 226-231
- [14] Contreras C, Martin M E, Martínez-Navarrete N, et al. Effect of vacuum impregnation and microwave application on structural changes which occurred during air-drying of apple [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2005, 38(5): 471-477