

不同预处理方式对苹果片真空冻结特性的影响

王海鸥, 陈守江, 扶庆权, 王蓉蓉, 张伟, 陈璐璐, 吴金莹

(南京晓庄学院食品科学学院, 江苏南京 211171)

摘要: 为了解预处理对苹果真空冻结过程特性的影响, 采用冻融、热烫、超声波与未预处理 4 种预处理措施, 进行苹果片真空冻结试验, 分析各组在失水率、温度、组织内水分状态以及细胞结构等方面的差异。结果表明: 4 组苹果片 40 min 真空冻结失水率分别为 46.48%、27.49%、24.80% 和 22.92%, 冻融组失水率明显高于其他 3 组 ($p < 0.05$), 热烫组与未处理组也有显著性差异 ($p < 0.05$), 超声组与未处理组无显著差异 ($p > 0.05$); 苹果片真空冻结过程分为降压闪发段、冰晶生成段和深层冻结段 3 个阶段, 4 组冻结终温依次为 $-30.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-27.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-26.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-26.50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 冻融和热烫处理使苹果片 LF-NMR 自由水横向弛豫时间 T_{23} 峰位向左明显偏移, 组织内自由水束缚力增强; 冻融和热烫预处理对真空冻结前、后的苹果片细胞组织结构形态的破坏影响程度均高于其他 2 组; 4 组物料真空冻结特性所表现出来的差异性主要是由于物料组织结构产生不同程度破坏影响所致。

关键词: 预处理; 苹果片; 真空冻结; 冻融; 超声波

文章编号: 1673-9078(2016)11-241-247

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.11.037

Effect of Different Pretreatments on the Vacuum-freezing Characteristics of Apple Slices

WANG Hai-ou, CHEN Shou-jiang, FU Qing-quan, WANG Rong-rong, ZHANG Wei, CHEN Lu-lu, WU Jin-ying

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

Abstract: The vacuum-freezing characteristics of apple slices were investigated after freeze-thaw, blanching, and ultrasound pretreatments versus no pretreatment (four groups). The characteristics studied included: rate of water loss, temperature, moisture state in tissues, and cell structure. The water loss rate among the four groups after 40 min of vacuum-freezing was 46.48%, 27.49%, 24.80%, and 22.92%, respectively. The results showed that water loss rate of the freeze-thaw group was significantly higher than that of the other three groups ($p < 0.05$). The difference in water loss rate between the untreated and blanching groups was significant ($p < 0.05$), whereas no significant difference was noted between untreated and ultrasound groups ($p > 0.05$). The process of vacuum freezing apple slices is divided into three phases: depressurization flashing, ice forming, and deep freezing. The final freezing temperature of the freeze-thaw, blanching, and ultrasound and no pretreatment groups was $-30.40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-27.42\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-26.84\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $-26.50\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. The transverse relaxation time peak T_{23} value of free water in low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) of apple slices pretreated with freeze-thawing and blanching shifted significantly to the left, whereas the binding force on free water in tissues was enhanced. Freeze-thaw and blanching pretreatments caused greater damage to the structure and morphology of cells and tissues of apple slices compared with ultrasound and no pretreatment. The differences in the vacuum-freezing characteristics of the four groups were mainly due to the different extent of damage to the structures and tissues in apple slices caused by each pretreatment.

Key words: pretreatment; apple slices; vacuum freezing; freeze-thaw; ultrasound

冷冻是食品加工中的重要单元操作之一, 也是食品冷冻干燥加工的必要工序^[1-3]。食品传统冷冻方法按冷却介质与食品接触的状况可分为空气冻结法、直接

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31301592); 常州市科技支撑计划项目 (CE20152017); 南京晓庄学院人才引进项目 (2013xzrc04)

作者简介: 王海鸥(1978-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农产品加工技术与装备研究

接触冻结法和间接接触冻结法三大类^[4,5]。真空制冷是将物料置于密闭容器中, 利用抽真空降压的方法使物料中自由水蒸发, 物料自身温度迅速降低达到冷却和冻结状态的过程, 是目前降温速度最快的制冷方式, 且降温均匀, 无需外来介质, 清洁卫生无污染。因此, 真空制冷技术已在果蔬、鲜花、肉类与烘焙等众多农产品和食品加工领域得到了广泛的应用^[6-8]。

利用真空制冷技术冻结物料已见有相关研究报道。

王海鸥等根据冷冻干燥加工工艺要求和真空冷却技术特点,基于冷冻干燥设备提出了真空冻结冷冻干燥一体化的冻干加工技术,利用真空冻结替代传统低温冷库冻结,简化冻干加工工艺,缩短干燥时间,并进行了果蔬冻干试验研究,申请获得相关专利^[9-11]。张海峰等以鲜羊肉为原料进行了真空冻结试验,分析冻结过程水分汽化和冻结特点、物料组织结构状态及质量损失等^[12]。彭润玲等针对液态、浆态和固态3种不同类型物料,试验研究了真空室压力、物料含水量和尺寸对抽真空自冻结降温速率和对冻结最终温度的影响规律^[13]。

果蔬速冻和冻干加工工艺中通常需要进行预处理措施,预处理技术也是近年来果蔬加工领域的研究热点。国内外很多学者已开展了热烫、超声波、冻融、糖液渗透与高压脉冲电场等预处理措施对果蔬冷冻干燥、热风干燥过程及品质的影响^[1-19]。果蔬真空冻结整个过程呈现有物料失水、温降和组织冻结这些主要过程特性和效果,而不同预处理措施对真空冻结特性的影响至今还未见有相关报道。本研究以苹果片为研究对象,探讨热烫、超声波及冻融预处理对苹果片真空冻结过程的失水变化、温度变化、组织内水分状态以及细胞结构等特性的影响差异,为改善果蔬真空冻结效果和推动真空冻结技术在果蔬加工中实际应用提供理论和技术基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

山东烟台产新鲜红富士苹果(超市购置);SCIENTZ-50F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);EVO-LS10型扫描电子显微镜(德国ZEISS公司);低场核磁共振成像分析系统MesoMR23-060V-I(上海纽迈电子科技有限公司);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 苹果预处理方式

将苹果洗净去皮、去核和切片,切片尺寸约为30 mm×30 mm×5 mm,每片质量4 g左右,共分为对照组、超声组、热烫组与冻融组4组,每组处理取5个苹果片,分别记为1~5号。在前期预实验的基础上并结合苹果速冻和冻干加工前处理要求,选取各组预处理条件参数。4组处理条件分别为:对照组:真空冻

结前不作任何处理;超声组:用超声功率400 W、超声水温20℃以及超声时间10 min的处理条件对苹果片进行超声波处理;热烫组:将苹果片在沸水中烫漂3 min后取出,用冷水冷却至室温;冻融组:将苹果片置于冷冻冰箱中,在-20℃条件下冷冻3 h后置于室温(20℃)下解冻1 h,使其达到完全解冻状态。

1.2.2 真空冻结操作

将经过上述预处理的4组苹果片每片上穿插3根牙签,然后分组立放在冻干机4个装料盘中,使苹果片呈悬空状,不与干燥盘接触,尽可能降低因装料盘对物料导热带来的真空冻结实际效果影响。提前半小时开启制冷机组,使冷阱温度达到-50℃。将布置好的4组装料盘同一批次放入冻干仓进行处理,以保证各组物料真空冻结处理在相同的真空压强与冷阱温度等环境参数下进行,密闭后开启真空泵机组,进入抽真空冻结过程,随着压强的逐渐降低,物料中水分不断汽化蒸发,达到自发失水降温冻结效果。

1.2.3 指标测定

1.2.3.1 失水率的测定

对每组预处理的5个苹果片分别单独称初始质量,记为 m_0 ,做4个时间段的抽真空冻结处理试验,抽真空时间分别设为10 min、20 min、30 min和40 min,抽真空结束后再单独记录各片质量,记为 m_t ,取5个苹果片失水率平均值作为最终结果。失水率计算公式如下:

$$w = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\%$$

式中, w ,失水率,%; m_0 ,苹果片初始质量,g; m_t ,真空冻结一定时间后的苹果片质量,g。

1.2.3.2 物料温度的测定

用SCIENTZ-50F冷冻干燥机所配置的热电偶温度传感器,分别测定各组苹果片在真空冻结期间温度变化。

1.2.3.3 LF-NMR自旋-自旋横向弛豫时间(T_2)测定

从4组预处理苹果片中各取30 g为待测样品,利用低场核磁共振成像分析系统CPMG脉冲序列测量样品的自旋-自旋横向弛豫时间(T_2)。将样品分别置于磁场中心位置的射频线圈中心,利用FID信号调节共振中心频率,然后进行CPMG脉冲序列扫描试验。试验参数:采样点数TD=680000,重复扫描个数NS=4, TW=4500, NECH=17000, TE=0.4。扫描试验结束后,利用 T_2 反演拟合软件拟合出 T_2 值,获得 T_2 图谱。

1.2.3.4 真空冻结前苹果片组织结构扫描电镜观察

分别从经过4组预处理后、冻结前的苹果片中选取代表性样本,用3%戊二醛(pH 7.2)固定24 h,然后

用30%~100%乙醇进行梯度脱水,每级15 min。75%叔丁醇过渡干燥,100%叔丁醇置换2次,用100%叔丁醇将样本0℃~4℃冷藏固化10 min,待完全固化后置真空干燥器内抽真空干燥2~3 h,最后从干燥好的苹果片中制取横断面观察样本(非切开),用碳导电胶将横断面观察样本粘在样品托上,采用离子溅射仪在横断面观察样本上喷金,扫描电镜观察拍照。

1.2.3.5 真空冻结后苹果片组织结构扫描电镜观察

分别从4组真空冻结的苹果片中选取代表性样本,用卡洛液(60%无水乙醇,30%氯仿,10%冰乙酸,V/V)在-20℃固定24 h,固定好后样品移至室温,然后再按照1.2.3.3中同样的方法进行乙醇梯度脱水、叔丁醇过渡干燥、真空干燥以及制取横断面观察样本,扫描电镜观察拍照等^[2,3]。

1.2.4 数据处理

以预处理处理方式为影响因素,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法进行多重比较,显著性水平 $p<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 预处理对苹果片真空冻结失水率的影响

表1 不同预处理方式下苹果片真空冻结失水率

Table 1 Water loss rate of apple slices after different pretreatments

预处理方式	失水率/%			
	10 min	20 min	30 min	40 min
未处理	12.63±0.9 ^a	17.62±0.9 ^a	20.90±1.1 ^a	22.92±1.0 ^a
超声	14.34±0.9 ^a	19.20±1.3 ^{ab}	22.42±1.2 ^{ab}	24.80±1.0 ^{ab}
热烫	16.70±1.1 ^b	21.42±1.5 ^b	25.10±1.4 ^b	27.49±1.2 ^b
冻融	25.31±1.3 ^c	38.04±2.3 ^c	43.63±1.6 ^c	46.48±2.5 ^c

注:表1中标注字母不同者表示有显著性差异($p<0.05$)。

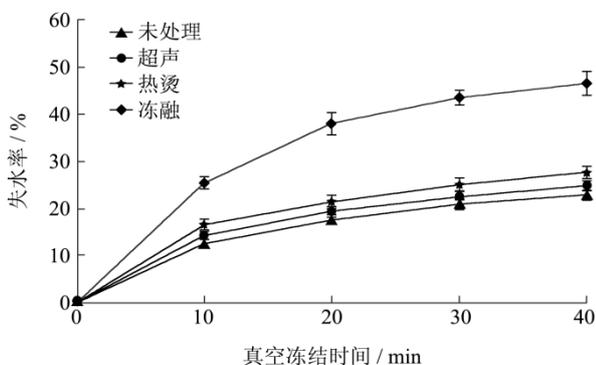


图1 不同预处理对苹果片真空冻结失水率的影响

Fig.1 Effect of different pretreatments on water loss rate of apple slices during vacuum freezing

4组预处理苹果片真空冻结失水率测定结果如表

1和图1所示。可见,相对于未处理组而言,真空冻结前对苹果片进行冻融、热烫与超声预处理均可不同程度地增加冻结过程中失水率,40 min真空冻结后苹果片失水率由大到小依次为冻融组>热烫组>超声组>未处理组,分别为46.48、27.49、24.80和22.92%。

其中,冻融处理影响最显著,冻融组苹果片失水率明显高于其他3组($p<0.05$),冻融组苹果片在10、20、30和40 min的4个真空冻结时间段失水率比未处理组分别提高了101.27%、115.90%、108.93%和102.85%,增幅均超过1倍;其次是热烫处理方式,4个真空冻结时间段失水率分别提高了32.35%、21.85%、20.26%和20.00%;再次是超声波处理方式,4个真空冻结时间段失水率分别提高了13.28%、9.32%、7.22%和8.23%。各组差异显著性分析及多重比较结果表明,在4个不同真空冻结时间段冻融组失水率与其他三组均有显著性差异($p<0.05$),热烫组与未处理组、冻融组均有显著性差异($p<0.05$),热烫组与超声组没有显著性差异(除处理10 min时刻)($p>0.05$),超声组与未处理组没有显著差异($p>0.05$)。

从40 min真空冻结过程中的失水率变化趋势来看,4组预处理苹果片均呈现出先快后慢的类似趋势,在0~10 min段失水速率最快,为主体失水阶段,其失水量占整个过程总失水量的一半以上,4组中失水速率由高到低分别是冻融、热烫、超声与未处理组。而在10~40 min段失水率增加缓慢,失水速率相对较低,各组处理的失水量约占整个过程失水总量的40~45%。4组处理中,冻融组苹果片失水率增加速度最快,其他3组增速则相当。

在真空制冷过程中,物料中水分蒸发的驱动力来自于水分蒸汽压与真空冻结室压力之差。物料终温和失水率是真空冻结效果主要性能指标,其主要影响因素包括:物料初始温度、物料内部水分状态、物料内部组织特性、真空压力、真空持续时间和冷阱冷凝温度等。由于本试验中,4组物料同批次进行真空冻结处理,物料初温与真空处理条件均一致,而4组失水率所表现出来的差异可能主要是由于物料内部水分状态和物料内部组织结构造成了不同的影响。

2.2 预处理对苹果片真空冻结温度的影响

苹果片在真空冻结过程中温度变化驱动力来自于物料自身所含水分的相态变化,其中包括水分蒸发汽化(部分自由水由液态转变为汽态,从物料中脱除被排出)和水分冻结(物料中剩余水分因温降由液态转变为固态)。4组预处理苹果片真空冻结温度变化如图2所示。

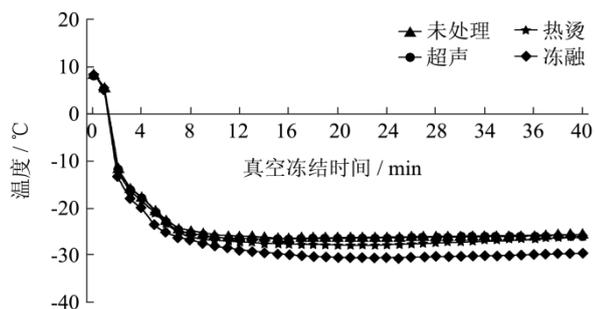


图2 苹果片真空冻结过程中的温度变化

Fig.2 Changes in the temperature of apple slices during vacuum freezing

从4组物料温度变化曲线可以看出,整个真空冻结过程大致可分为如下三个阶段。

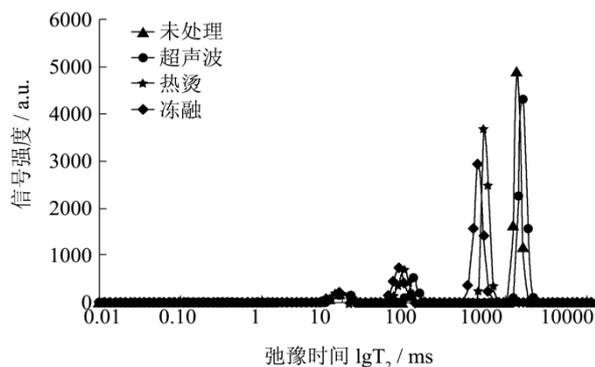
(1) 降压闪发段:随着真空泵抽真空的进程,冻干仓环境压强在1 min内就达到了物料初温所对应的水分饱和蒸气压(沸点),出现水分蒸发闪点,苹果片表层水分开始大量沸腾蒸发,因相变带走大量热量,使物料温度由初温10 °C左右快速下降到-10 °C以下的过冷状态,4组处理物料降压闪发段耗时均在2 min左右,各组温度差异不大。

(2) 冰晶生成段:物料中水分急速闪蒸持续进行,物料达到过冷状态后,部分水分开始由液态变成固态形成冰晶,并放出大量的相变潜热,使得物料降温速度减慢,在此期间物料温度持续下降直至达到某一平衡温度,但温度曲线变化相对降压闪发段较为平缓。在该阶段,未处理组、热烫组与超声组降温持续时间约为10 min,而冻融组物料降温持续时间达16 min,而且温度变化速度均明显快于其他3组,此现象与冻融处理物料的高失水率和高失水速率相对应,失去水分越多及越快,其温度变化也越明显,这也反映了真空冻结过程中能量守恒原理。

(3) 深层冻结阶段:随着真空冻结处理时间延续,苹果片中尚未冻结的水分继续蒸发,并使水分继续冻结,此时两者达到平衡,即水分蒸发的相变潜热与水分冻结的相变潜热,物料温度不再下降而是维持在一定水平,直至物料中绝大部分水分被冻结成冰晶后,苹果片组织愈加密实固化,孔道堵塞,组织内部水分向外迁移和蒸发的阻力也越来越大,水分蒸发作用逐渐减弱,此时苹果片达到最终冻结温度。其中冻融组苹果片真空冻结终温约维持在-30.40 °C,热烫组、超声组和未处理组苹果片真空冻结终温维持依次为-27.42 °C、-26.84 °C和-26.50 °C,各组真空冻结终温状态均出现在25 min左右。此后,可能还有很少量的残存液态水会继续蒸发,但由于周围环境温度要远高

于冻结物料温度,因此环境也对冻结物料进行补热,此时的水分蒸发潜热不足以使物料维持冻结终温,苹果片温度开始缓慢升高,甚至有部分冻结冰晶会受到外界补热的影响开始升华干燥,因此总体表现为4组苹果片在达到冻结终温后,在持续的真空条件下失水作用仍持续进行,维持极低的失水速率。

2.3 预处理对样品自旋-自旋弛豫特性影响

图3 不同预处理苹果片 LF-NMR 横向弛豫时间 T₂ 图谱Fig.3 LF-NMR transverse relaxation time T₂ of apple slices after different pretreatment

LF-NMR 测定的横向弛豫时间 T₂ 反映了样品内部氢质子所处的化学环境,与氢质子所受的束缚力及其自由度有关,与样品内部结构有密不可分的关系。氢质子受束缚越大或自由度越小, T₂ 弛豫时间越短,在 T₂ 谱上峰位置较靠左;反之则 T₂ 弛豫时间越长,在 T₂ 谱上峰位置较靠右。本试验测得4组预处理苹果片样品的 LF-NMR T₂ 谱如图3所示。

试验所用新鲜苹果初始含水率为86.32% (w.b.),一般以游离在细胞组织之间流动性较大的自由水 T₂₃、受一定束缚力约束的不易流动水 T₂₂、与细胞内部物质结合紧密的结合水 T₂₁ 3种形式存在^[18,19],而真空冻结过程中是依靠自由水蒸发来实现制冷作用。4组 T₂ 峰谱图中的自由水 T₂₃ 出现在100~2000 ms区域,相对未处理组苹果片 T₂₃ 峰位(1417 ms)而言,超声波组苹果片 T₂₃ 峰位(1629 ms)呈现出明显的右移变化,而热烫组 T₂₃ 峰位(533 ms)、冻融组 T₂₃ 峰位(464 ms)则呈现出明显的左移变化,表明热烫和冻融处理均会使苹果片自由水的自由度减少或束缚力增强,苹果片自由水的自由度变化可能与预处理措施对苹果细胞组织结构形态、水分和溶质分布状态等影响有关。通常认为,自由水 T₂₃ 峰位发生左移变化,水分自由度降低,真空冻结过程中的水分蒸发汽化要克服的阻力越大,水分越难脱离。但实际上,冻融组和热烫组苹果片的真空冻结失水率却远高于未处理组,可能由于苹果片组织局部自由水蒸发汽化是在瞬间完成,相

变作用强度大,自由水蒸发汽化压差驱动力远高于组织对自由水的束缚力,预处理对自由水自由度状态的改变不足以影响真空冻结过程中水分蒸发效果。

2.4 预处理对真空冻结前组织结构的影响

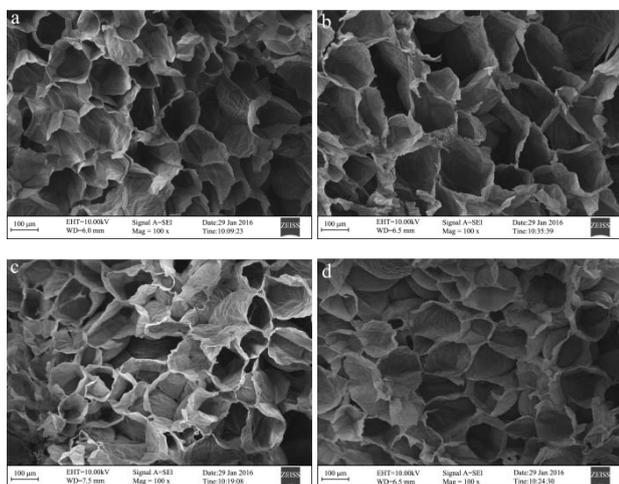


图4 苹果片真空冻结前组织结构扫描电镜图($\times 100$ 倍)

Fig.4 Scanning electron microscopy images of apple slices before vacuum freezing ($\times 100$ times)

注: a, 未处理; b, 超声波; c, 冻融; d, 热烫。

4组苹果片预处理后,断面观察样本扫描电子显微镜 SEM 观察结果如图4所示。未处理组和超声波组苹果片细胞组织形态相似,细胞排列层次分明、边界清晰,呈现膨胀饱满的外形,细胞壁伸展成相对规则形态,整体结构平滑完整,表明超声波只是在微观水平上对苹果片细胞结构产生破坏作用,在宏观水平上并未对细胞组织外形产生明显的变形破坏作用。而经过冻融和热烫处理的苹果片细胞组织形态呈现相似形态,整体表现为排列层次混乱,部分细胞塌陷和皱缩很明显,细胞壁卷曲皱褶严重导致细胞形体呈杂乱不规则状,由此可见,冻融和热烫处理对苹果片组织结构破坏作用不仅体现在微观水平上,也能在宏观上改变细胞外形和组织状态。实际上,从处理后的物料表观形态来看,苹果片冻融和热烫处理后组织软化以及体积缩小,而未处理组和超声组苹果片则质地硬实,体积基本不变,这种表观形态与各种处理对细胞组织结构影响相对应。

本研究中采用的超声、冻融与热烫预处理措施也是食品领域常用的物理加工方法,其对果蔬细胞组织结构均会产生不同程度的改变作用,可能进而导致如前所述的物料失水率和温度变化等真空冻结特性差异。

冻融处理包括物料冷冻和解冻两个过程。苹果片组织经过低温冷冻处理后,会存在细胞间结冰和细胞内结冰现象。细胞间结冰作用不仅使细胞间本身存有

的水分冻结,而且会使细胞内水分向外迁移凝聚成大冰晶体,造成细胞失水,同时也会因细胞间冰晶体尺寸过大,对细胞结构产生损伤。细胞内结冰是指细胞原生质和液泡结冰,冰晶体数目众多,体积一般比胞间结冰小,但通常会引起细胞膨胀而破裂,破坏生物膜、细胞器和衬质的结构。冻结物料融化后,细胞间和细胞内的冰晶体重新变成液态水,但不是完全可逆过程,这些液态水分与细胞组织空间的相对状态发生改变,在真空压差的作用下,苹果片组织内部的水分更容易迁移及汽化,所以冻融组失水率最高,为未处理组2倍多,在初始段失水速率和降温速度也最快,而且维持的冻结终温也最低。

热烫处理是一种时间相对较短的高温作用,可使细胞内原生质发生凝固、失水而和细胞壁分离,使细胞膜的通透性加大,组织相对柔韧、体积收缩,在内外压差驱动下,细胞组织内水分蒸发汽化速度加快,热烫组失水率也明显高于未处理组。

超声波作为一种特殊的能量形式,作用于物料中可以产生空化效应、机械效应和热效应,物料内部结构反复受到压缩和拉伸作用,不断收缩和膨胀,形成海绵效应,形成微细通道,使水分的表面附着力减小,有效减小物料中水分的迁移阻力,物料内部水分的扩散系数增加;在超声波场中,介质中空化气泡的形成、增长和剧烈破裂以及由此引发的空化效应产生强大冲击波,形成水分子的湍流扩散;同时在靠近固体表面的地方产生微射流,使水分子与固体表面分子之间的结合键断裂,使固体表面活化,有利于真空状态下水分蒸发汽化。超声波对物料的综合作用效应,也会引起细胞结构性损伤、细胞壁破裂以及细胞内水分通透性增加,在强大内外压差驱动下,细胞内水分更容易向外迁移迅速汽化,超声波组失水率也相对高于未处理组。

2.5 预处理对真空冻结后微观组织结构影响

各组预处理苹果片真空冻结后,断面观察样本扫描电子显微镜 SEM 观察结果如图5所示。未处理组和超声波组苹果片冻结后细胞组织形态仍然相似,脱水后形成的网孔结构与原始单体细胞形态能够较好关联,网孔与单体细胞壁构成的形体基本对应,细胞单体之间边界较为清晰,细胞尺寸分布较为均匀,而且真空冻结前和后苹果片单体细胞尺寸相近,均在 $100\ \mu\text{m}$ 左右,说明未处理组和超声波组苹果片在真空冻结过程中相对较好保存了细胞表观形态的完整性,这可能与真空冻结的冻结速度非常快,在几分钟内快速达到过冷状态并实现急速冻结,细胞内外形成的冰晶

体细小而均匀,所以冻结对细胞组织结构的直接破坏相对较小。

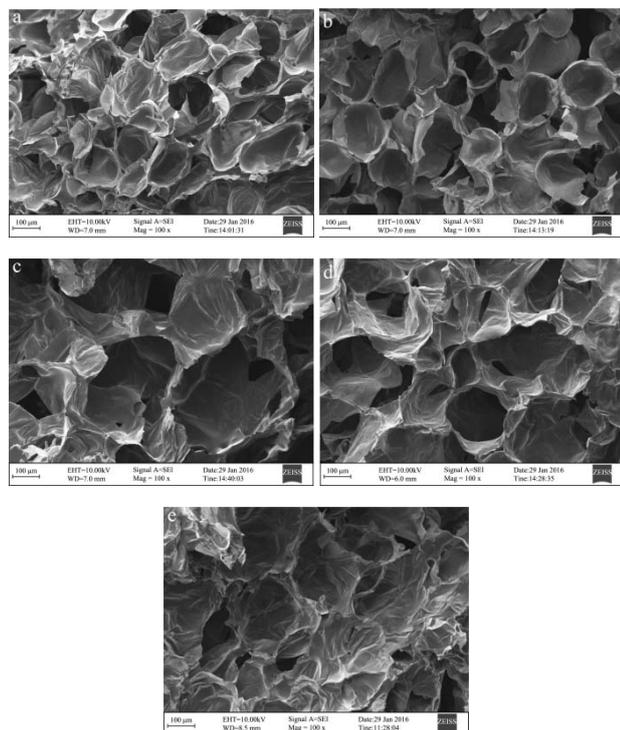


图5 不同预处理苹果片真空冻结后组织结构扫描电镜图($\times 100$ 倍)

Fig.5 Scanning electron microscopy images of apple slices after vacuum freezing ($\times 100$ times)

注: a, 未处理; b, 超声波; c, 冻融; d, 热烫; e, 常规冷冻。

而常规冻结苹果片脱水后形成的网孔结构与原始单体细胞形态不能直接对应,难以分清单体细胞之间的分界面,而且孔隙大小接近原始单体细胞尺寸的2倍,表明冷冻冰箱冻结破坏了细胞组织构造,可能是由于冷冻冰箱冻结速度比真空冻结要慢得多,在细胞内外结成的冰晶体均相对较大,单体细胞受到内外冰晶体膨胀挤压而改变了单体细胞原有的表现形态。

而冻融组和热烫组苹果片脱水后的网孔结构与单体细胞构造也难以直接对应关联,苹果片组织的微孔尺寸比未处理组和超声波处理组要大,而冻融组苹果片组织孔隙尺寸比常规冻结苹果片还要大,且可见明显孔壁破损现象,说明冻融苹果片细胞组织结构在真空冻结过程中受到的破坏更大。这可能与两种处理改变了细胞组织微观特性,细胞破损或者通透性明显提高,组织柔软松弛,细胞内部水分大量溶出,在骤然减压和强大压差驱动下,自由水在苹果片组织内局部强烈沸腾闪蒸并急速向外扩散,使得细胞组织结构进一步破坏,未逃逸的自由水会在原位快速冻结形成致密的冰晶体,由于细胞内水分溶出量大,在细胞外形

成了更多的冰晶体,体积膨胀更为明显,所以最终形成了大孔隙的组织构造。

3 结论

3.1 冻融、热烫和超声预处理均不同程度地增加了苹果片真空冻结过程中的失水率,40 min 真空冻结后苹果片失水率由大到小依次为冻融组>热烫组>超声波组>未处理组,分别为46.48、27.49、24.80和22.92%。其中冻融处理对苹果片失水率影响最大,冻融组失水率明显高于其他3组,与其他3组均有显著差异($p<0.05$),热烫组与未处理组有显著性差异($p<0.05$),超声组与未处理组无显著差异($p>0.05$)。

3.2 4组预处理苹果片在40 min 真空冻结过程中失水速率均呈现出先快后慢的类似趋势,在0~10 min 为主体、快速失水阶段,失水速率由高到低依次为冻融组>热烫组>超声波组>未处理组。

3.3 从物料温度变化可将苹果片真空冻结过程分为降压闪发段、冰晶生成段和深层冻结段3个阶段。4组预处理苹果片物料温度大小及变化与冻结过程中的失水率和失水速率相对应,水分失去越多,越快,其物料温度越低,降温越快。冻融组、热烫组、超声组与未处理组苹果片维持冻结终温依次为 -30.40°C 、 -27.42°C 、 -26.84°C 和 -26.50°C 。

3.4 冻融和热烫处理使苹果片 LF-NMR 横向弛豫时间自由水 T_{23} 峰位向左明显偏移,尽管组织内自由水束缚力增强,但不足以影响预处理对真空冻结过程中蒸发失水的作用效果。

3.5 4组物料在失水率、失水速率和温度变化等方面所表现出来的差异性主要是由于不同预处理措施对物料组织结构产生不同程度影响所致,通过真空冻结前后苹果片组织结构电镜观察基本可以得到验证。冻融和热烫预处理对真空冻结前与后的苹果片细胞组织结构形态的破坏影响程度均高于超声预处理和未处理组。

参考文献

- [1] 赵凤敏,李树君,张小燕,等.常见浆果的真空冷冻干燥特性研究[J].现代食品科技,2014,30(4):220-225
ZHAO Feng-min, LI Shu-jun, ZHANG Xiao-yan, et al. Vacuum freeze-drying characteristics of common berries [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(4): 220-225
- [2] Lilian Daniel Kaale, Trygve Magne Eikevik, Tora Bardal, et al. The effect of cooling rates on the ice crystal growth in air-packed salmon fillets during superchilling and superchilled storage [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(1): 110-119

- [3] Lilian Daniel Kaale, Trygve Magne Eikevik. The influence of superchilling storage methods on the location/distribution of ice crystals during storage of *Atlantic salmon (Salmo salar)* [J]. Food Control, 2015, 52(2): 19-26
- [4] 邓敏,朱志伟.不同冻结方式对草鱼块品质特性的影响[J].现代食品科技,2013,29(1):55-58
DENG Min, ZHU Zhi-wei. Effect of different freezing way on the quality characteristics of grass carp cubes [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(1): 55-58
- [5] 欧阳杰,谈佳玉,沈建.速冻方式与温度对鲍鱼品质的影响[J].现代食品科技,2014,30(6):214-218
OU Yang-jie, TAN Jia-yu, SHEN Jian. Effect of freezing method and temperature on the quality of Abalone [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(6): 214-218
- [6] Drummond L, 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 & Technology, 2015, 50(9): 2066-2073
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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:中国专利,201010184053.5[P]2012-10-17
Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization Ministry of Agriculture. Microwave freeze-drying method for fruits and vegetables: Chinese patent, 201010184053.5 [P] 2012-10-17
- [11] 南京晓庄学院.一种连续式食品真空快速冻结设备:中国专利,201520021587.4[P]2015-6-24
Nanjing Xiaozhuang University. A continuous quick vacuum thawing equipment for food material: Chinese patent, 201520021587.4 [P] 2015-6-24
- [12] 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
ZHANG Hai-feng, BAI Jie. Thermal dynamical study of vacuum freezing of liquids [J]. Meat Research, 2008, 10(9): 62-65
- [13] 彭润玲,徐成海,张世伟,等.抽真空自冻结试验研究[J].真空科学与技术学报,2007,27(5):450-453
PENG Run-ling, XU Cheng-hai, ZHANG Shi-wei, et al. Experimental study of self-freeze materials by vacuum pumping [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2007, 27(5): 450-453
- [14] Garcia-Noguera J, Oliveira F I P, Weller C L, et al. Effect of ultrasonic and osmotic dehydration pre-treatments on the colour of freeze dried strawberries [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(9): 2222-2227
- [15] Schössler K, Jäger H, Knorr D. Novel contact ultrasound system for the accelerated freeze-drying of vegetables [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16(2): 113-120
- [16] 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
- [17] Costa M G M, Fonteles T V, de Jesus A L T, et al. High-intensity ultrasound processing of pineapple juice [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(4): 997-1006
- [18] 郭婷,何新益,邓放明,等.利用 LF-NMR 探讨冻融处理影响甘薯膨化产品品质的机理[J].农业工程学报,2013,29(17): 279-285
GUO Ting, HE Xin-yi, DENG Fang-ming, et al. Mechanism of freeze-thaw treatment influencing quality of puffing product for sweet potato using low-field nuclear magnetic resonance [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17): 279-285
- [19] 徐建国,徐刚,张绪坤,等.利用核磁共振成像技术分析胡萝卜干燥过程中内部水分传递[J].农业工程学报,2013,29(12): 271-276
XU Jian-guo, XU Gang, ZHANG Xu-kun, et al. Moisture transport in carrot during hot air drying using magnetic resonance imaging [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 271-276