

预处理方式对微波冷冻干燥苹果片水分变化及孔隙结构的影响

屈展平¹ 张小燕¹ 张静林¹ 谷玉娟^{1,2}

(1. 洛阳职业技术学院食品与药品学院, 河南 洛阳 471000;

2. 河南省地标药材与生命健康工程研究中心, 河南 洛阳 471000)

摘要: [目的] 探究预处理方式对苹果片微波冷冻干燥过程中水分变化和孔隙结构的影响。[方法] 将经超声、烫漂、冻融和渗透 4 种预处理的苹果片进行微波冷冻干燥, 对比分析不同预处理对样品干燥特性、水分迁移及微观孔隙结构的影响。[结果] 4 种预处理方式均能提高样品的有效水分扩散系数, 缩短 11.1%~44.4% 的干燥时间, 其中渗透预处理的干燥时间最短。低场核磁分析表明, 预处理加快了样品的自由水脱除, 促进了内部水分迁移。孔隙结构分析表明, 预处理能够改善样品内部结构, 提高孔隙率, 加快干燥进程; 其中渗透的孔径较小, 超声和冻融的孔隙率相近且孔径相对较大, 烫漂的孔隙率最大。[结论] 4 种预处理方式均可改善样品内部孔隙结构, 促进微波冷冻干燥过程的水分迁移, 提高干燥效率。

关键词: 苹果片; 预处理; 微波冷冻干燥; 水分迁移; 孔隙率; 微观结构

Effects of different pretreatment methods on moisture variation and pore structure of apple slices during microwave freeze-drying

Qu Zhanping¹ Zhang Xiaoyan¹ Zhang Jinglin¹ Gu Yujuan^{1,2}

(1. College of Food and Drugs, Luoyang Polytechnic, Luoyang, Henan 471000, China; 2. The Geographical Indication Medicines and Life Health Engineering Research Center of Henan Province, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of pretreatment methods on moisture variation and pore structure of apple slices during microwave freeze-drying. [Methods] Apple slices pretreated with four methods (ultrasound, blanching, freeze-thawing, and osmotic dehydration) are subjected to microwave freeze-drying. The effects of different pretreatments on drying characteristics, moisture migration, and microscopic pore structure of the samples are comparatively analyzed. [Results] All four pretreatment methods increase the effective moisture diffusion coefficient and reduce drying time by 11.1% to 44.4%, with osmotic dehydration requiring the shortest drying time. Low-field nuclear magnetic resonance (NMR) analysis indicates that the pretreatments accelerate free water removal, consequently enhancing internal moisture migration. Pore structure analysis reveals that the pretreatments improve the internal structure of the samples and increase porosity, thereby accelerating the drying process. Specifically, osmotic dehydration leads to smaller pore sizes, while ultrasound and freeze-thawing treatments result in similar porosity with relatively larger pore sizes. In contrast, blanching yields the highest porosity. [Conclusion] The four pretreatment methods improve the internal pore structure of the samples and promote moisture migration during microwave freeze-drying, thus enhancing drying efficiency.

Keywords: apple slice; pretreatment; microwave freeze-drying; moisture migration; porosity; microstructure

基金项目: 洛阳职业技术学院科研项目 (编号: 2024B02); 河南省自然科学基金 (编号: 252300420707); 河南省科技攻关项目 (编号: 252102110111)

通信作者: 屈展平 (1994—), 女, 洛阳职业技术学院讲师, 硕士。E-mail: quzhanping1013@163.com

收稿日期: 2025-08-29 **改回日期:** 2026-03-07

引用格式: 屈展平, 张小燕, 张静林, 等. 预处理方式对微波冷冻干燥苹果片水分变化及孔隙结构的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(8): 124-131.

Citation: Qu Zhanping, Zhang Xiaoyan, Zhang Jinglin, et al. Effects of different pretreatment methods on moisture variation and pore structure of apple slices during microwave freeze-drying[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 124-131.

苹果营养丰富、味道清甜,是最受欢迎的水果之一。苹果鲜果水分含量高,虽经过品质改良及保鲜处理可延长其保质期,但苹果作为新鲜果蔬品类受供需矛盾、交通限制等原因导致的滞销和腐败变质仍是造成苹果浪费的主要原因之一^[1]。近年来,中国果蔬切片等休闲食品产业增长迅速,而干制苹果片口感酥脆、营养丰富,深受消费者青睐^[2]。

苹果片通常采用干燥方式制备,而苹果中富含多酚等生物活性物质,常规的热风干燥等干制方式易发生褐变、营养物质降解等不良反应降低苹果片品质^[3-4]。宋娟等^[1]研究表明,冷冻干燥(freeze-drying, FD)是一种有效的加工方法,可以显著提高苹果片品质,但存在能耗高、操作和维护成本高、干燥周期长的劣势。而微波冷冻干燥(microwave freeze-drying, MFD)是在冷冻干燥的基础上辅以微波加热,可缩短干燥时间、大幅节约能耗,是一种更优的干燥方式^[5-6]。目前,MFD已被应用于土豆片、山药、面条等产品干燥,但MFD干燥过程中因微波的引入会产生加热不均匀,导致产品干燥不均匀,从而出现干制品焦化等品质问题^[7-9]。

Li等^[10-13]研究表明,干燥过程中的热量传递和水分迁移过程受物料内部孔隙结构的影响,而对物料进行预处理可以改变物料的内部结构,从而改善干燥过程及制品品质。Wang等^[7]研究表明,采用蔗糖或盐溶液进行渗透预处理可提高干燥速率,且合适的处理浓度可以得到高品质干制品。Li等^[14]研究了基于脉冲流化床优化MFD在多种蔬菜和水果干燥中的均匀性,实现了高干燥均匀性,且拥有更大的蜂窝多孔结构,硬度及脆性也较FD样品更好。Wang等^[15]研究了超声、烫漂和渗透3种不同预处理对山药MFD样品孔隙结构的影响,结果表明,预处理均对产品的孔隙结构产生了显著影响,其中超声处理样品具备较均匀的海绵状孔隙结构。综上,对样品进行适宜的预处理不仅有利于提高干燥速率,还是一种有效避免MFD产品品质问题的应用方式。而目前有关MFD制备苹果片过程中水分迁移及内部孔隙结构变化的研究较少,且采用预处理方式改善苹果片MFD过程的研究也尚未见报道。

试验拟从苹果片MFD过程水分迁移规律及孔隙结构变化的角度出发,通过低场核磁共振技术及孔道结构压汞分析等手段,探究不同预处理方式对苹果片MFD过程中水分变化和孔隙结构的影响。选择超声、烫漂、冻融和渗透4种预处理方式^[16-18],以未处理苹果片作为对照,在相同条件下进行MFD干燥,并通过干燥特性、水分迁移规律和孔隙结构等方面的表征分析,探究预处理方式对苹果片MFD过程的影响,为不同预处理方式和MFD的

联合干燥应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

苹果:山东水晶红富士,初始干基含水率10.04 g/g,市售;

氯化钠:食品级,河南省卫群多品种盐有限公司;

微波冻干机:实验室自制^[19];

电子天平:A.2003N型,上海佑科仪器仪表有限公司;

电热恒温水浴锅:HH-S4型,北京科伟永兴仪器有限公司;

数控超声波清洗器:KQ-500DE型,昆山市超声仪器有限公司;

核磁共振分析仪:NMI120-015V-1型,上海纽迈电子科技有限公司;

压汞仪:AutoPore IV 9500型,美国麦克仪器公司;

扫描电镜:TM3030plus型,日本日立高新公司。

1.2 方法

1.2.1 预处理方式 选取无损伤的新鲜苹果清洗并擦干,去皮后切片(20 mm×20 mm×5 mm)备用。根据文献[20-22]及预试验,将苹果片进行烫漂(95℃水浴1 min)、渗透(按固液比1:8(g/mL)浸入5%氯化钠溶液中,65℃渗透3 h)、超声(30℃下、300 W超声30 min)、冻融(-18℃预冻8 h,室温解冻1 h,再冷冻8 h)4种预处理,并以未处理组作为对照。

1.2.2 微波冷冻干燥方法 预处理完成后,样品于低温冷冻8 h,冷冻状态下转入微波冷冻干燥机中,设置微波加热功率密度0.5 W/g,干燥室真空度为100 Pa,每隔30 min称重一次,至样品干基含水率<0.1 g/g时停止干燥。

1.2.3 干燥曲线绘制 根据薛扬等^[23]的方法,测定干燥过程中的干基含水率和干燥速率。

1.2.4 有效水分扩散系数测定 根据文献[24]的方法并修改。假设苹果片模型为长方体,水分扩散具有各向异性,沿着长、宽、高3个方向扩散,苹果片结构较为均匀,视其各方向的水分扩散系数相等,因苹果片的厚度远小于其长和宽,将其扩散过程视为在一个无限平板上一维传递。参考Newmen公式及Fick第二定律,按式(1)计算其有效水分扩散系数。

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \approx \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2}{L^2} D t \right], \quad (1)$$

式中:

MR ——苹果片水分比;

D ——有效水分扩散系数, m^2/s ;

L ——苹果片厚度, m ;

t ——干燥时间, s 。

将式(1)两端取自然对数得:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D}{L^2} t_0 \quad (2)$$

由式(2)可知, $\ln MR$ 与干燥时间 t 呈现线性相关, 采用 Origin 绘图软件对 $\ln MR$ 和 t 进行线性关系拟合, 通过拟合系数计算苹果片样品的水分扩散系数。

1.2.5 低场核磁共振检测 根据文献[24—26]的方法并修改。称取苹果片样品于测试管中, 磁体温度设置为 $(32.00 \pm 0.05)^\circ\text{C}$, 选择 Carr-Purcell-Meiboom-Gill 序列, 检测苹果片的弛豫时间 T_2 。测试参数: 采样频率为 200 kHz, 间隔时间为 400 ms, 采集次数为 72 008; 回波个数为 18 000, 回波时间为 0.3 ms; 样品测试累加次数为 64。每个苹果片样品均测定 3 次, 并通过 T_2 的 10 万次迭代反演, 获取反演图谱。

1.2.6 扫描电镜分析 采用扫描电镜检测苹果片切片孔隙的形貌。将样品黏附在样品台上, 取其放大 100 倍的图片进行观察。

1.2.7 压汞仪孔隙分析 采用压汞仪进行苹果片样品的孔隙分析, 压汞仪的低压测试范围 4~345 kPa, 高压测试范围 0.1~414 MPa, 结果由测试软件计算得出。

1.2.8 数据处理 所有试验均进行 3 次重复, 取平均值用于统计分析, 最终结果采用平均值 $\pm$ 标准差形式表示。试验数据分析采用 SPSS 20 软件, 通过 Duncan 法进行多重比较, 显著性水平表示为 $P < 0.05$, 采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 干燥特性分析

由图 1 可知, 未处理组干燥时间最长为 270 min, 其次是冻融、超声、烫漂, 渗透的干燥时间最短为 150 min, 相较于未处理组缩短 44.4%。在 0 min 时, 未处理、超声、烫漂、冻融、渗透样品的干基含水率分别为 10.04, 8.93, 7.43,

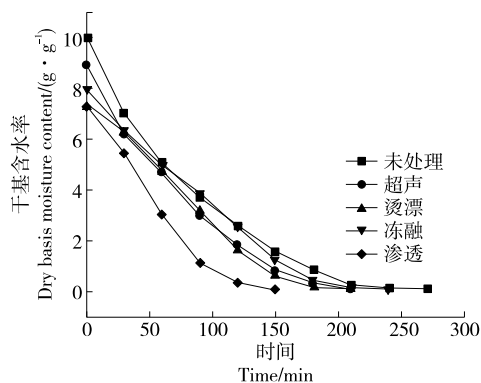


图 1 不同预处理方式下苹果片的干燥曲线

Figure 1 Drying curves of apple slices under different pretreatment methods

9.02, 7.31 g/g, 表明经不同预处理后样品初始干基含水率均有所下降, 可能是预处理对细胞结构造成一定损伤并脱除少量水分, 有利于缩短干燥时间。4 种预处理方式对苹果片干燥时间影响显著 ($P < 0.05$), 表明适当的预处理可以明显提高苹果片的干燥速率, 缩短干燥周期。

由图 2 可知, 苹果片干燥过程主要以降速阶段为主, 而降速阶段往往发生在干燥的中后期。与未处理样品相比, 经过预处理的样品在干燥后期均有较大的干燥速率, 其中渗透预处理在干燥各阶段均具有最大干燥速率。

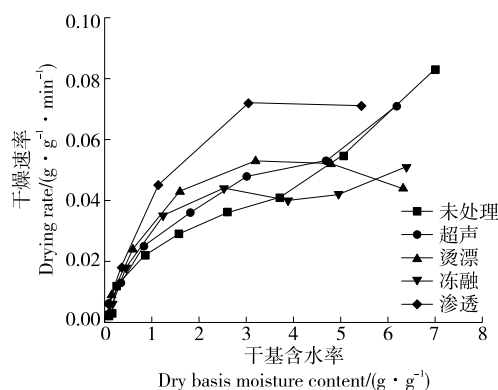


图 2 不同预处理方式下苹果片的干燥速率变化曲线

Figure 2 Drying rate curves of apple slices under different pretreatment methods

渗透预处理具有最短的干燥时间和最快的干燥速率可能是因为以下原因: 一方面, 渗透预处理的浓度梯度导致细胞失水, 初始含水率相对稍低; 另一方面, 植物细胞膜和细胞壁具有半透性, 其影响水分的存在状态和水分进出细胞, 经过渗透预处理的苹果片细胞膜和细胞壁遭到了一定的损伤, 对水分的束缚能力较小, 水分更容易逸出。烫漂预处理是一种时间相对较短的高温作用, 能够直接破坏细胞膜的结构并引起细胞壁果胶的降解, 增大细胞膜通透性, 降低水分转移阻力, 有利于缩短干燥时间。超声预处理对果蔬物料的作用以物理作用为主, 其空化作用、机械效应、热效应等使物料内部组织更疏松, 从而形成微孔道, 加快干燥过程中水分迁移速率。冻融预处理主要有冷冻和融化两个过程, 一方面苹果片中的糖分含量相对较高, 水分升华较慢, 另一方面苹果水分含量多, 冷冻过程中形成的冰晶较大, 破坏细胞结构, 增大通透性, 有利于水分迁移; 所以经冻融处理的苹果片相较于未处理的干燥时间仍缩短。该试验结果与杨丽阳等^[27]的研究结果类似。

2.2 有效水分扩散系数

由表 1 可知, 不同预处理方式下苹果片样品的有效水

表1 不同预处理方式下苹果片的有效水分扩散系数[†]

Table 1 Effective moisture diffusion coefficients of apple slices under different pretreatment methods

预处理方式	线性拟合方程	R^2	有效水分扩散系数/ ($\times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
未处理	$\ln MR = -0.00030t + 0.4057$	0.960	0.762 ^a
超声	$\ln MR = -0.00035t + 0.4417$	0.934	0.875 ^c
烫漂	$\ln MR = -0.00037t + 0.6250$	0.930	0.941 ^d
冻融	$\ln MR = -0.00032t + 0.5694$	0.933	0.810 ^b
渗透	$\ln MR = -0.00050t + 0.5028$	0.946	1.270 ^e

[†] 字母不同代表差异显著($P < 0.05$)。

分扩散系数为 $0.762 \times 10^{-9} \sim 1.270 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。其中,经超声、烫漂、冻融及渗透预处理的苹果片干燥过程中有效水分扩散系数均高于对照组,且干燥时间明显减少,表明预处理可有效提高干燥效率。渗透预处理水分扩散明显较快,可能是细胞内外渗透压改变了自由水分布,有利于冻干过程中水分升华;超声和烫漂通过改变物料内部结构减少水分转移阻力,有利于水分扩散;冻融过程中水分相态变化改变了物料内部结构,有利于水分扩散。

2.3 苹果片的水分迁移规律

苹果片的水分迁移通过低场核磁技术进行表征,其原理是基于水分中的氢核在磁场作用下发生自旋,从高能态向低能态进行非辐射跃迁。通过测定氢质子的横向弛豫时间 T_2 来评估水分的自由度:弛豫时间越短,氢质子

所受束缚越强,水分自由度越低;同时,质子密度反映了对应水分的信号强度。结合弛豫时间与反演图谱,可进一步解析水分的自由度、空间分布及其迁移规律^[24, 28-29]。不同果蔬的 T_2 反演图谱根据样品的不同会有所差异,苹果片反演图谱上的3个峰对应的水分状态分别为结合水 T_{21} (0.01~10 ms)、不易流动水 T_{22} (10~200 ms)、自由水 T_{23} (>200 ms),对应峰面积分别记为 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} ,对应不同状态的水分含量^[30]。

由图3可知,随着干燥的进行,各水分状态对应的峰逐渐左移,弛豫时间有不同程度减小,峰面积整体呈减小趋势。其中,自由水 T_{23} 左移程度最大,峰面积 A_{23} 一直减小直至0,表明自由水含量在干燥过程中持续降低直至被完全脱除;不易流动水 T_{22} 在干燥中期稍有增大后持续变短,峰面积 A_{22} 呈先增大再减小趋势,这是因为干燥前期大量自由水被脱除,有部分自由水因样品中糖类物质浓度升高而被束缚,转化为不易流动水;结合水 T_{21} 弛豫时间略有变短后基本趋于稳定,峰面积 A_{21} 前期基本维持稳定后期稍有增加,可能是因为干燥中后期以脱除不易流动水为主,占比增高的碳水化合物和少量不易流动水通过氢键结合更紧密,使结合水含量稍有增加^[28]。

4种预处理样品与未处理组相比均可不同程度地加快水分迁移,其中渗透预处理在60 min时已无自由水峰 A_{23} ,超声和冻融在90 min,烫漂在150 min也已基本脱除自由水,说明预处理能有效缩短干燥前期的时间,这是因为渗透预处理对细胞壁的破坏使其对水的束缚能力降低,更利于水分迁移,而超声和冻融通过物理作用改善了

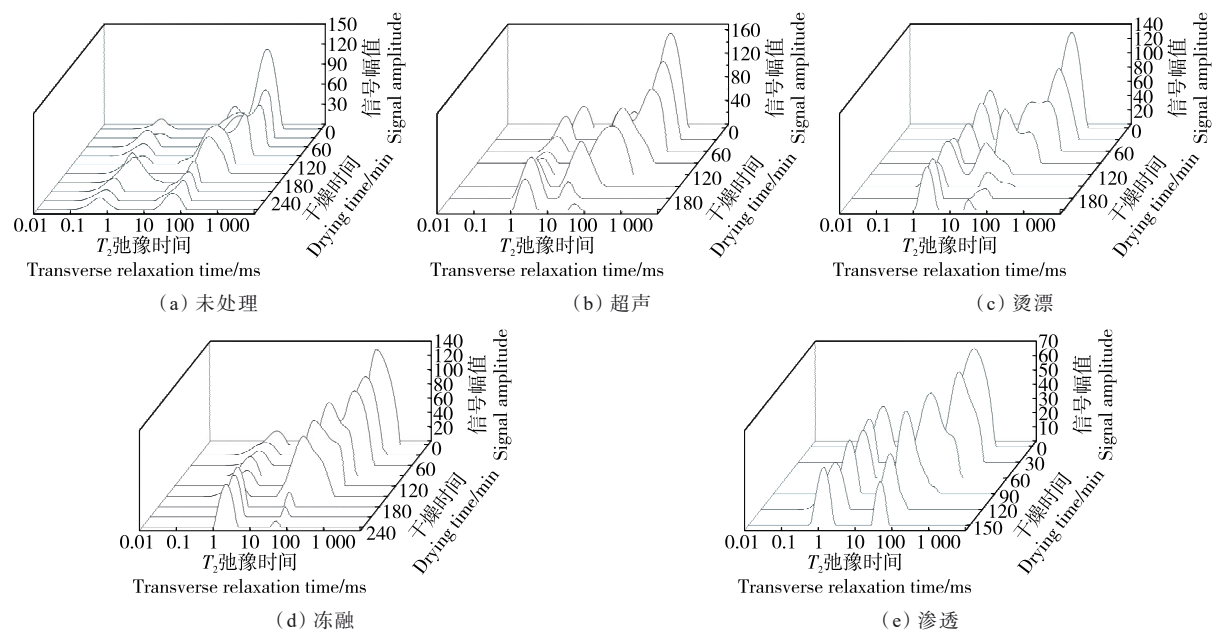
图3 不同预处理方式下苹果片的 T_2 弛豫时间曲线

Figure 3 Transverse relaxation time curves of apple slices under different pretreatment methods

细胞内部结构,使其结构疏松且孔隙较大,有利于自由水脱除。干燥 150~210 min 时,相同时间点时经过预处理的,不易流动水含量明显低于未处理组,此阶段主要由不易流动水主导,预处理后的苹果片因内部结构改变及孔隙率增加更有利于内部水分扩散,从而提高干燥效率。干燥后期,主要由结合水控制,此时自由水及不易流动水已基本脱除,水分进一步与大分子物质结合,维持相对稳定的自由度。

2.4 苹果片的微观结构

由图 4 可知,未处理样品孔隙较少且孔径较小,与预处理相比其内部结构较为致密,损伤较小。经过预处理的样品在不同程度上增加了样品的孔隙和孔径,表明预处理导致苹果片的微观结构产生损伤。其中,经过超声预处理苹果片的孔隙结构呈现出较高的疏松度,为不规则的网络结构,产品质地较为绵软;烫漂预处理的样品孔隙较小,但相对较多,内部结构较薄且呈现无序的排列,损伤较为严重;冻融预处理的样品内部结构相对规则,孔隙相对较大;渗透预处理样品组织结构薄且出现部分坍塌,孔隙较多。

塌,孔隙较多。

以上情况的原因可能在于,超声预处理苹果片的过程中,由于超声波的持续机械效应作用,导致苹果片组织发生周期性收缩与膨胀,进而产生微观的网络状结构。由于该结构效应所产生的作用力超过了样品微细孔道内的水分束缚力,水分便经由这些网络结构的通道向外迁移,并在样品内部形成更多的孔隙结构;烫漂预处理是样品在短暂的高温环境下细胞破裂失水,从而导致样品发生皱缩,细胞在破裂收缩过程中形成断裂片层的微观结构,增加了样品的孔隙率;冻融预处理在预冻阶段样品内部水分的冻结形成晶核,体积有所增大,融化过程中形成较大的孔隙;渗透预处理的高浓度盐水使样品细胞失水过多,从而导致结构损伤及细胞膜通透性改变,微波冻干过程中水分的快速逸出使这些微孔道进一步扩大并形成均匀的蜂窝状结构。综上,渗透预处理可以获得较多微小孔道,超声和烫漂预处理的孔隙较多,而冻融预处理的孔径较大,符合预处理样品干燥时间短及水分迁移快的干燥特性。

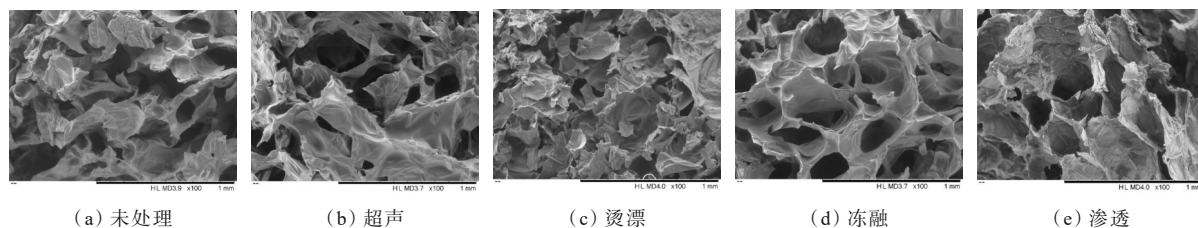


图 4 不同预处理方式下苹果片的 SEM 图像

Figure 4 SEM images of apple slices under different pretreatment methods

2.5 对苹果片孔隙结构影响

2.5.1 进汞量 根据 Washburn 方程可知,注汞压力越大,对应的液态汞进入的孔半径就越小,且每个压力值均对应一个孔径值^[31]。由图 5 可知,渗透预处理的累计进汞量最大,而未处理的最小,进汞曲线的趋势类似但稍有差异。当进汞压力<100 kPa 时,各组进汞量均呈上升趋势,其中冻融和超声预处理的累计进汞量增速较大且部分几乎重合,说明在此压力范围内两种预处理样品的孔径分布基本相同,且大孔较多;而烫漂和渗透预处理在相同压力下累计进汞量相对较少,孔径较小。当进汞压力>100 kPa 时,未处理、超声、烫漂、冻融预处理样品累计进汞量均逐渐趋于平缓,进汞量已达饱和,而渗透预处理样品仍有缓慢增加,说明其较小孔隙较多。未处理组累计进汞量最少,说明其孔隙率最小。

2.5.2 孔径 由图 6 可知,在 10~10⁴ nm 的尺寸量级内,渗透预处理苹果片的累积压汞量最大,未处理苹果片的累积压汞量最小,超声、烫漂和冻融预处理的累积压汞量相

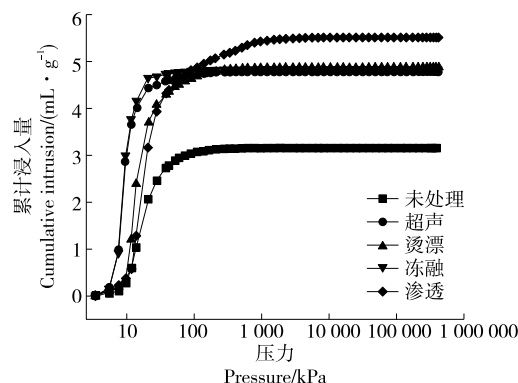


图 5 不同预处理方式下苹果片的进汞曲线

Figure 5 Cumulative mercury intrusion curves of apple slices under different pretreatment methods

差较小。在孔径范围 10⁴~10⁵ nm 时,各预处理苹果片的累积压汞量排序为:冻融>超声>烫漂>渗透>未处理;而在孔径>10⁵ nm 时,其排序变为:冻融>超声>渗透>烫漂>未处理;这表明冻融预处理更有利于形成大孔隙,超

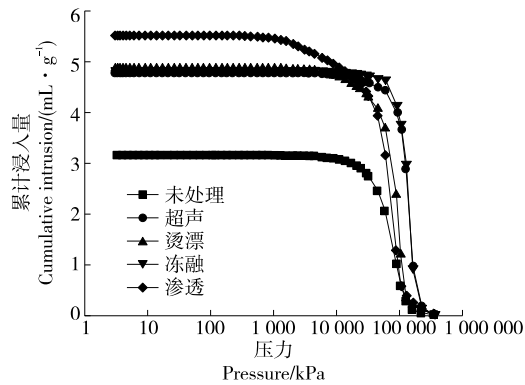


图6 不同预处理方式下苹果片的孔径累积压汞量
Figure 6 Cumulative mercury intrusion volume of apple slices under different pretreatment methods

声预处理的次之,烫漂预处理的孔径适中,而渗透预处理产生的孔隙大多分布在 $<10^4$ nm的尺寸量级,可获得较多的小尺寸孔隙。这是因为孔隙尺寸大小受多种因素影响,渗透预处理的失水导致结构性体积收缩较大,造成孔隙尺寸较小;冻融预处理在冻结融化过程中形成较大冰晶,冰晶升华出现较大的孔隙。该结果与微观结构的观察结果基本一致。

2.5.3 孔隙特征参数 由表2可知,不同预处理能够明显增大样品孔隙率,其中烫漂预处理的孔隙率最大为88.465%,超声、冻融及渗透预处理产生的孔隙率较为接近,分别为87.869%,87.997%,87.846%。而对孔径的影响方面,冻融预处理产生的孔径最大,平均孔径为109 272.61 nm,超声的次之,渗透的最小。由最大压力下表观密度可知,烫漂处理的表观密度最高,说明其骨架孔隙相对密实,可能因热处理导致部分孔隙塌陷或结构收缩,形成孔隙致密的孔道;超声和冻融预处理相较未处理组表观密度较低,可能是因为超声波产生的机械振动及冻结产生的体积变化使其物质分布松散及孔道增大造成的。而渗透处理的表观密度最低,表明其内部仍保持较多孔隙,与极低的面积中值孔径一致,可能是由于内部形

表2 不同预处理方式下苹果片的孔隙特征参数
Table 2 Pore characteristic parameters of apple slices under different pretreatment methods

预处理方式	平均孔径/ nm	最大压力下表观密 度/($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	孔隙率/ %
未处理	41 882.56 ^b	1.550 5 ^d	83.071 ^a
超声	90 384.14 ^c	1.513 5 ^b	87.869 ^b
烫漂	41 952.48 ^b	1.573 9 ^c	88.465 ^d
冻融	109 272.61 ^d	1.517 4 ^c	87.997 ^c
渗透	14 387.97 ^a	1.309 6 ^a	87.846 ^b

成大量的封闭微孔;同时受压汞法只能测量开孔孔隙的影响,导致累积压汞量和累积压汞体积与样品的实际孔隙体积存在一定差异,从而出现渗透处理样品的表观密度数值较低的情况。

3 结论

超声、烫漂、冻融及渗透4种预处理方式均能明显加快苹果片微波冷冻干燥进程,缩短干燥时间11.1%~44.4%,其中渗透预处理能够缩短干燥时间44.4%;4种预处理组的有效水分扩散系数均大于未处理组,表明预处理能够促进水分扩散,提高干燥效率。低场核磁结果表明,与未处理样品相比,4种预处理方式均能加快自由水及不易流动水的迁移,弛豫时间整体变短,预处理样品在60~90 min基本脱除自由水。通过扫描电镜及压汞仪对样品孔隙结构的分析表明,预处理能够明显改善样品内部结构,样品孔隙率相比未处理组均有增大,其中冻融、超声及渗透预处理组孔隙率接近,但超声和冻融的孔径较大,渗透的孔径较小;烫漂产生的孔隙率较高,但孔径适中,与未处理组接近。

综上,超声、烫漂、冻融及渗透4种预处理均能改善苹果片微观结构,从而加快水分迁移,缩短干燥时间;但4种预处理对样品孔隙结构的影响有所不同,其中冻融的孔径最大,渗透的孔径最小,烫漂的孔隙率最大。后续可进一步探究不同预处理方式对干燥苹果片品质的影响。

参考文献

- [1] 宋娟, 张海燕, 曾朝珍, 等. 干燥方式对苹果干品质特性及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 221-231.
Song J, Zhang H Y, Zeng C Z, et al. Effects of drying methods on quality characteristics and flavor of dried apples[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 221-231.
- [2] 郭梓煜, 胡佳琦, 杨菲菲, 等. 预冻及蔗糖浸渍方法对冻干苹果片品质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 185-191.
Guo Z Y, Hu J Q, Yang F F, et al. Effects of pre-freezing and sucrose impregnation methods on the quality of freeze-dried apple slices[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 185-191.
- [3] 任旭, 谢蔓莉, 叶发银, 等. 烫漂方式对苹果脆片褐变和多酚及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(1): 161-168.
Ren X, Xie M L, Ye F Y, et al. Effects of blanching treatments on browning, polyphenol composition and antioxidant activity of apple slices[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(1): 161-168.
- [4] Tepe T K. Convective drying of golden delicious apple enhancement: drying characteristics, artificial neural network

- modeling, chemical and ATR-FTIR analysis of quality parameters[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14 (12): 13 513-13 531.
- [5] Ren G Y, Zeng F L, Duan X, et al. The effect of glass transition temperature on the procedure of microwave-freeze drying of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Drying Technology, 2015, 33(2): 169-175.
- [6] Wang Z, Duan X, Ren G Y, et al. Improving effect of disaccharides and maltodextrin on preparation of egg yolk powder by microwave-assisted freeze-drying: functional properties, structural properties, and retention rate of active IgY [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134626.
- [7] 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.
- [8] Yin Y Z, Liu W C, Li L L, et al. Microwave freeze-drying characteristics and crosslinking behavior of wheat starch-laurel acid complex[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135235.
- [9] 张乐道, 李才云, 王雅博, 等. 微波真空冷冻干燥时怀山药的微 CT 孔道分布[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 72-78.
Zhang L D, Li C Y, Wang Y B, et al. Micro-CT pore distribution in Chinese yam under microwave freeze drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 72-78.
- [10] Li L L, Chen X Y, Cao W W, et al. Effects of freeze-thaw pretreatment with different freezing methods on the microwave freeze drying of carrots[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(10): 7 181-7 192.
- [11] 王庆惠, 牛潇潇, 刘佳, 等. 冷等离子预处理对枸杞干燥特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 116-121.
Wang Q H, Niu X X, Liu J, et al. Effects of cold plasma pretreatment on drying characteristics and quality of goji berries[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 116-121.
- [12] Xu Y R, Wan F X, Zang Z P, et al. Effect of different pretreatment methods on drying characteristics and quality of wolfberry (*Lycium barbarum*) by radio frequency-hot air combined segmented drying[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(11): 3 861-3 875.
- [13] 李义臻, 郑霞, 姚雪东, 等. 超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 201-206, 240.
Li Y C, Zheng X, Yao X D, et al. Optimization of the infrared drying process for ultrasonic pretreatment of Hami-melon slices[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 201-206, 240.
- [14] Li M R, Wang B, Wang Y C, et al. Evaluation of the uniformity, quality and energy cost of four types of vegetables and fruits after pilot-scale pulse-spouted bed microwave (915 MHz) freeze-drying[J]. Drying Technology, 2023, 41(2): 290-307.
- [15] Wang H, Duan X, Zhao L J, et al. Effects of different pretreatments on the pore structure of Chinese yam during microwave freeze drying[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 232-237.
- [16] Musielak G, Mieszczakowska-Frąc M, Mierzwa D. Convective drying of apple enhanced with microwaves and ultrasound: process kinetics, energy consumption, and product quality approach[J]. Applied Sciences, 2024, 14(3): 994.
- [17] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预干燥方式和水分转接点对真空冷冻联合干燥苹果脆片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 110-120.
Ma Y C, Bi J F, Yi J Y, et al. Effects of pre-drying methods and moisture conversion point on the quality of freeze dried apple chips[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 110-120.
- [18] 李旭好, 韩蒙, 李芳, 等. 预处理方式对干制莲藕品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 194-199.
Li X H, Han M, Li F, et al. Effects of different pretreatment methods on the quality characteristics of dried lotus root[J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 194-199.
- [19] 段柳柳, 段续, 任广跃. 怀山药微波冻干过程的水分扩散特性及干燥模型[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 23-30.
Duan L L, Duan X, Ren G Y. Water diffusion characteristics and microwave vacuum freeze-drying modelling of Chinese yam (*Dioscorea opposita*) tubers[J]. Food Science, 2019, 40 (1): 23-30.
- [20] 金听祥, 王广红, 彭钰航, 等. 不同预处理方式对胡萝卜热泵干燥品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 173-178.
Jin T X, Wang G H, Peng Y H, et al. Effect of different pretreatment on the quality of carrot heat pump drying[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(7): 173-178.
- [21] 王栋, 赵一凡, 邓志宁, 等. 烫漂预处理对苹果干燥过程中微观结构及质构品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(22): 207-218.
Wang D, Zhao Y F, Deng Z N, et al. Effect of blanching pretreatment before drying on the microstructure and texture quality of dried apple slices[J]. Food Science, 2024, 45(22): 207-218.
- [22] 马有川. 预处理对苹果脆片真空冷冻干燥特性和品质的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021: 22-37.
Ma Y C. Study on effects of pretreatments on the drying characteristics and quality of freeze-dried apple chips[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021: 22-37.
- [23] 薛扬, 刘云宏, 刘恩宠, 等. 超声功率对铁棍山药超声强化热泵干燥水分迁移的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2):

- 213-222.
- Xue Y, Liu Y H, Liu E C, et al. Effect of ultrasonic power on moisture migration in contact ultrasound enhanced heat pump drying of *Dioscorea opposita*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 213-222.
- [24] 屈展平, 任广跃, 张迎敏, 等. 马铃薯燕麦复合面条热泵—热风联合干燥质热传递规律分析[J]. 食品科学, 2020, 41(5): 57-65.
- Qu Z P, Ren G Y, Zhang Y M, et al. Analysis of mass and heat transfer characteristics of potato and oat composite noodles during combined heat pump-hot air drying[J]. Food Science, 2020, 41(5): 57-65.
- [25] 陈毅, 顾莹, 宋平, 等. 利用低场核磁共振分析蓝莓贮藏过程中水分含量及迁移变化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 321-328.
- Chen Y, Gu Y, Song P, et al. Analysis of the moisture content and migration changes of blueberries during storage by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(17): 321-328.
- [26] 魏玉杰, 杨晓桐, 梁宏闪, 等. 谷朊粉与乙基纤维素对冻干苹果粉吸湿性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 18-24.
- Wei Y J, Yang X T, Liang H S, et al. Effects of wheat gluten and ethyl cellulose on hygroscopicity of freeze-dried apple powder[J]. Food Science, 2023, 44(12): 18-24.
- [27] 杨丽阳, 卢琪, 杨德, 等. 不同预处理和干燥方式下养心菜粉色泽、功能成分和抗氧化性水平的比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(4): 245-256.
- Yang L Y, Lu Q, Yang D, et al. Effect of pre-processing and drying techniques on physical, bioactive compound, and antioxidant properties of *Sedum aizoon* L[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(4): 245-256.
- [28] 陈烨聪, 康宏彬, 杨忠强, 等. 基于低场核磁的西梅干燥过程水分迁移规律[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 264-272.
- Chen Y C, Kang H B, Yang Z Q, et al. Analysis of moisture transfer of prunes during drying using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(22): 264-272.
- [29] 罗子旋, 姜凤利, 吴沛净, 等. 利用低场核磁共振技术探究机械损伤对蓝莓果实内部水分状态的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 204-211.
- Luo Z X, Jiang F L, Wu P J, et al. Exploring the effect of mechanical damage on the water state in blueberries using low-field nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. Food Science, 2025, 46(3): 204-211.
- [30] 沈海军, 徐子昂, 王文琪, 等. 基于熵权法、灰色关联度法和低场核磁共振检测的苹果品质评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 231-238.
- Shen H J, Xu Z A, Wang W Q, et al. Apple quality evaluation based on entropy weight method, grey relational degree method and low-field nuclear magnetic resonance detection[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 231-238.
- [31] 王栋, 王勇, 赵泽颖, 等. 不同干燥技术对西洋参片孔隙结构及人参皂苷溶出的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2025, 45(2): 146-153.
- Wang D, Wang Y, Zhao Z Y, et al. Effects of different drying techniques on the pore structure and ginsenoside solubilization of American ginseng slices[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2025, 45(2): 146-153.