

超声功率对铁棍山药超声强化热泵干燥水分迁移的影响

薛扬¹, 刘云宏^{1,2*}, 刘恩宠¹, 孙雪¹

(¹河南科技大学食品与生物工程学院 河南洛阳 471000

²食品绿色加工与质量安全控制河南省国际联合实验室 河南洛阳 471000)

摘要 为探讨铁棍山药超声强化热泵干燥的水分迁移规律,对山药进行直触超声强化热泵干燥试验,研究超声功率对干燥特性及水分变化的影响。结果表明:在热泵干燥过程中施加超声有利于加快脱水进程。随着超声功率从 0 W 提高至 60 W,干燥时间从 630 min 缩短至 390 min,平均干燥速率由 0.0053 g/(g·min)提高到 0.0086 g/(g·min),有效水分扩散系数由 $0.887 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,增大至 $1.393 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。扫描电镜结果表明:施加超声使物料组织结构变疏松,产生微孔道。随着超声功率的提高,微孔道数量变多,孔隙率变大。低场核磁共振分析表明:铁棍山药中存在自由水、不易流动水和结合水 3 种状态水,且在干燥过程中其内部水分能够相互转化。自由水的含量不断降低,直至被完全去除;不易流动水的含量在干燥过程中先增高后降低,在干燥结束时仍存在部分不易流动水;结合水的含量在超声强化热泵干燥过程中几乎不变。铁棍山药的核磁共振成像显示,在干燥过程中,物料水分从外到内逐渐流失。提高超声功率能有效加快物料内部水分迁移,促进水分的去除。本研究结果可为果蔬超声强化热泵干燥技术的研发与应用提供参考。

关键词 干燥; 铁棍山药; 超声; 热泵干燥; 水分迁移

文章编号 1009-7848(2023)02-0213-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.02.021

铁棍山药(*Dioscorea opposita*)属于薯蓣科薯蓣属植物^[1],含有大量碳水化合物、多糖、维生素及多种微量元素、必需氨基酸、多酚、尿囊素等物质,有很高的营养、保健价值,具有补脾养胃、生津益肺、补肾涩精的功效^[2]。新鲜的铁棍山药含水率较高,若储藏不当容易导致块茎发芽、腐烂、褐变等一系列品质劣变^[3]。一般可对铁棍山药进行干燥加工。干燥不仅降低铁棍山药的水分活度,延长其贮藏期和货架期,而且干燥后的铁棍山药片为果蔬脆片,丰富了山药制品种类,拓宽了市场销量。

热泵干燥(Heat pump drying, HPD)是一种将热量从低位热源转移到高位热源进行干燥的现代干燥技术^[4],具有低能耗、高品质^[5]、污染少等优点,被广泛应用于农业和食品工业等领域,如葡萄^[6]、香菇^[7]、辣椒^[8]等果蔬的干燥过程中。HPD 是利用干燥介质进行外部加热,对于内部介质热传递阻力大的物料,容易产生脱水时间长、干燥速率不高等缺点。近年来,直触超声技术(Contact ul-

trasound, CU)在食品干燥领域备受青睐,它直接通过超声辐射盘传入物料内部。CU 独特的机械效应和空化效应^[9],使物料的组织结构变蓬松,微孔道数量增多,有效降低了物料内部的传质阻力,促进干燥过程中的水分扩散,提高干燥速率,保证产品品质^[10]。

将 HPD 和 CU 两种技术联合的超声强化热泵干燥(Contact ultrasound enhanced heat pump drying, CU-HPD)应用于农产品干燥,理论上能够强化 HPD 过程中的传质进程,促进物料内部水分扩散,进而提高干燥效率和提升产品品质^[11]。为了探明 CU 对 HPD 的传质强化效果,需要采取有效措施来探讨 CU 对 HPD 中水分状态和脱水过程的影响。低场核磁共振技术(Low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)是一种快速、准确的水分检测手段,通过检测样品中质子的弛豫特性来反映样品中水分的状态及其变化规律^[12],该技术在食品的干燥、储藏等领域具有广泛的应用^[13-14]。目前未见铁棍山药 CU-HPD 水分变化的研究报道。

本文以铁棍山药为试验材料,进行 CU-HPD 试验,通过扫描电镜(Scanning electron morphology, SEM)图片分析 CU 功率对铁棍山药组织结构

收稿日期: 2022-02-05

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102110080);河南省高校科技创新人才项目(19HASTIT013)

第一作者: 薛扬,男,硕士生

通信作者: 刘云宏 E-mail: beckybin@haust.edu.cn

的影响,利用 LF-NMR 分析不同 CU 功率下铁棍山药的水分迁移规律,并结合核磁共振成像技术(Magnetic resonance imaging, MRI)分析铁棍山药在 CU-HPD 过程中的水分分布状况,以期 CU-HPD 技术在果蔬干燥领域中的应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材 料

本试验所用的铁棍山药购于洛阳市龙翔农贸市场,其大小均匀、新鲜无损伤。

1.2 仪器与试剂

柠檬酸、L-抗坏血酸、D-异抗坏血酸钠,以上试剂均为分析纯级,天津德恩化学试剂有限公司。

超声强化热泵干燥装置,由河南科技大学自制,具体结构和参数参见文献[15];NMI120-015V-1 型核磁共振分析仪,上海纽迈电子科技有限公司;TM3030Plus 型扫描电子显微镜,日本日立高新技术公司;果蔬切片机,福瑞特多功能不锈钢切片机,佛山市凌齐电器有限公司;恒佳 DT 系列电子天平,常熟市嘉衡天平仪器有限公司。

1.3 试验设计

前期研究证实了在超声频率为 28 kHz 时^[16],本超声系统的谐振匹配效果最好,因此,本研究中固定了超声频率为上述参数。由于超声功率是探讨超声强化效应最重要的参数,因此本研究针对不同超声功率下的物料微观孔道及水分迁移进行探索。热泵干燥温度过低导致干燥速率过小,温度过高则容易导致品质劣变速率加快,因此,本研究设定了较为适中的热泵干燥温度(45 ℃)。本研究首先在干燥温度为 45 ℃的条件下对铁棍山药进行 HPD 试验。之后在单一 HPD 的基础上,分别施加 20,40,60 W 共 3 个超声功率,进行 CU-HPD 试验,探讨不同超声功率对铁棍山药干燥的强化效应;结合 SEM 照片分析超声功率对铁棍山药孔隙率的影响;利用 LF-NMR 研究不同 CU 功率对铁棍山药水分变化的影响;通过 MRI 技术分析铁棍山药 CU-HPD 过程中水分分布状态。

1.4 试验方法

1.4.1 铁棍山药片干燥处理 新鲜铁棍山药的初始干基含水率采用 105 ℃直接干燥法^[17]测得,为

(3.37±0.10)g/g。将预处理后的铁棍山药切成 5 mm 厚的薄片,每组试验取(60±5)g 样品平铺于超声托盘上。打开超声强化热泵干燥设备,设置不同的 CU 功率(20,40,60 W),进行 CU-HPD 试验。试验过程中每隔 30 min 进行 1 次称重,直至连续 2 次物料所称质量不变时,干燥结束。每组试验重复 3 次。

1.4.2 干燥特性的计算

1.4.2.1 干基含水率(M) 干基含水率(M)的计算公式为:

$$M(\text{g/g}) = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中, M ——物料的干基含水率,g/g; m_t —— t 时刻物料的质量,g; m_d ——物料中绝干物质的质量,g。

1.4.2.2 干燥速率(DR) 干燥速率(DR)的计算公式为:

$$\text{DR}[\text{g}/(\text{g} \cdot \text{min})] = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中,DR——干燥速率,g/(g·min); M_{t_1} —— t_1 时刻物料的干基含水率,g/g; M_{t_2} —— t_2 时刻物料的干基含水率,g/g

1.4.2.3 水分比(MR) 水分比(MR)的计算公式为:

$$\text{MR} = \frac{M_t - M_c}{M_0 - M_c} \quad (3)$$

式中,MR——物料的水分比; M_t ——物料在 t 时刻的干基含水率,g/g; M_0 ——物料的初始干基含水率,g/g; M_c ——物料的平衡干基含水率,g/g。

1.4.2.4 有效水分扩散系数(D_{eff}) 本文将铁棍山药片的水分扩散视为一维扩散。根据菲克扩散定律计算不同 CU 功率下物料的有效水分扩散系数^[18]。

有效水分扩散系数(D_{eff})可用下列公式计算求得。

$$\text{MR} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{L^2}\right) \quad (4)$$

式中: D_{eff} ——有效水分扩散系数,m²/s; L ——物料的厚度,m; t ——干燥时间,s。

将上式简化,等式两边同时取对数可得:

$$-\ln \text{MR} = -\ln \frac{8}{\pi^2} + \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{L^2} \quad (5)$$

由上式可得 $-\ln MR$ 与 t 呈线性关系,其斜率为 K 。

$$K = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} \quad (6)$$

可根据上式计算 D_{eff} 值。

1.4.3 扫描电镜图片分析和孔隙率的计算 利用 SEM 设备得到放大倍数为 150 倍的 SEM 图片,观察不同 CU 功率下 CU-HPD 对铁棍山药微观结构的影响。使用图像分析软件对 SEM 图片进行处理,采用二值化的方法将图片中的孔道进行标记,利用测量功能对孔道面积和孔径进行测量,孔道面积用像素表示,孔径用孔隙多项直径平均值表示^[19]。

孔隙率的计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{A_0}{A} \quad (7)$$

式中, ε ——孔隙率; A_0 ——总孔隙面积; A ——图像面积。

1.4.4 低场核磁共振分析 将待测样品放入低场核磁共振分析仪中,利用多脉冲回波序列(Carr-purcell-meiboom-gill, CPMG)采集样品的横向弛豫时间(Transverse relaxation time, T_2),利用反演软件对所得数据进行反演,得到铁棍山药样品的 T_2 反演谱。其主要参数设置如下:偏移频率为 307 229.85 Hz,90°脉冲时间为 11.52 μs ,180°脉冲时间为 26.00 μs ,采样点数为 479 992,前置放大倍数为 1,采样等待时间为 2 000 ms,回波时间为 0.3 ms,累加次数为 16,回波个数为 15 000。

1.4.5 核磁共振成像分析 将待测样品置于低场核磁共振分析仪中,使用多层自旋回波序列(Multi-slice spin echo, MSE)采集待测样品的质子密度图像。具体参数设置如下:采样层数为 5,层厚为 2 mm,层间隙为 0.4 mm,重复采样等待时间为 500 ms,累加次数为 2,回波时间为 20 ms。

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 软件进行数据整理,Origin、Image-Pro Plus 等软件进行试验数据分析及图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 铁棍山药 CU-HPD 的干燥特性

不同超声功率下铁棍山药 CU-HPD 的干燥

特性曲线如图 1 所示。从图 1a 可知,施加 CU 能够减少干燥时间,且随着超声功率的逐渐增大,干燥时间显著减少。在未施加超声(0 W)时,干燥过程所需的时间为 630 min,平均干燥速率为 0.0053 g/(g·min)。当分别施加功率为 20,40,60 W 的超声波时,干燥所需的时间分别为 600,450,390 min,对应减少的幅度为 4.8%,28.6%,38.1%;平均干燥速率分别为 0.0056,0.0075,0.0086 g/(g·min),分别提高了 5.7%,41.5%,62.3%。由此可见,相较于单一的干燥条件,施加 CU 可以缩短干燥时间,提升干燥速率。这是由于在 CU-HPD 干燥过程中,将铁棍山药切片直接放在超声辐射板上,超声能直接传入物料内部^[11]。在超声的机械效应和空化效应作用下,铁棍山药内部结构变得疏松,降低了物料内部对水分的束缚力,从而有效降低内部扩散阻力,提高水分迁移能力,使干燥速率得以提升。

从图 1b 可知,铁棍山药的干燥过程呈现为降速干燥过程,这说明铁棍山药干燥的快、慢受内部扩散阻力影响,属于内部扩散控制,这与图 1a 干燥曲线反映的结果相一致,即物料在降速干燥阶段,流动性较弱的不易流动水存在于细胞质中,相对较难被去除,就导致干燥速率逐渐变得缓慢^[20]。与单一的 HPD 相比,CU-HPD 可将干燥时间缩短 4.8%~38.1%,平均干燥速率提高 5.7%~62.3%,表明 CU 与 HPD 结合,能有效缩短干燥时间,提高干燥速率。

2.2 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数是表征物料在一定条件下脱水能力的参数^[21],铁棍山药在 CU-HPD 下的有效水分扩散系数 D_{eff} 为 $0.887 \times 10^{-10} \sim 1.393 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,其具体变化规律如表 1 所示。从表 1 可知,铁棍山药的 D_{eff} 值随着超声功率的提高而变大。在超声功率为 0 W 时 D_{eff} 值为 $0.887 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,将超声功率提升至 20,40,60 W 时, D_{eff} 分别为 0.970×10^{-10} , 1.267×10^{-10} , $1.393 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,与未施加超声时相比 D_{eff} 值分别增大 9.4%,42.8%,57.0%,这说明 CU 能够加快铁棍山药内部的水分扩散,且超声功率越高,铁棍山药内部水分扩散的越快。这是由于 CU 作用于铁棍山药时,能使其内部致密的组织结构变得疏松,并产生细小的微观孔道,减小

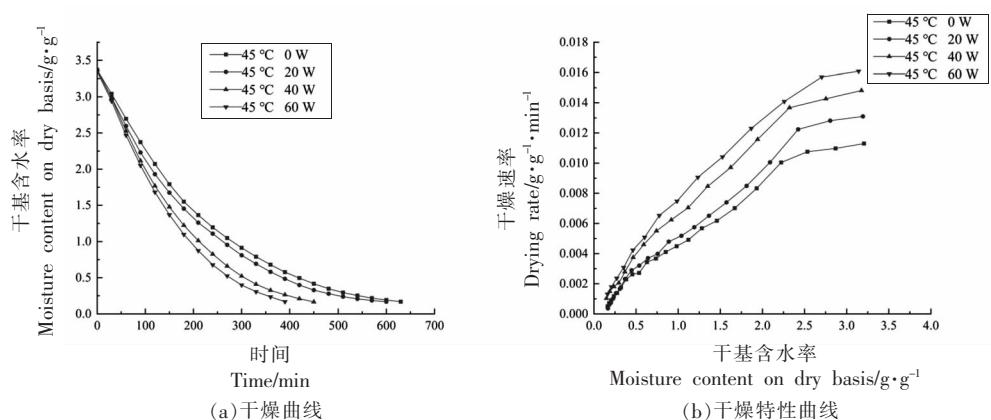


图1 不同 CU 功率下铁棍山药 CU-HPD 的干燥特性曲线

Fig.1 Drying characteristic curves of *Dioscorea opposita* by CU-HPD under different ultrasonic power

表 1 不同 CU 功率下铁棍山药的有效水分扩散系数

Table 1 Effective moisture diffusion coefficients of *Dioscorea opposita* under different ultrasonic power

超声功率/W	线性模拟方程	R^2	有效水分扩散系数/ $10^{-10}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
0	$-\ln M=0.0021t-0.0412$	0.998	0.887 ^d
20	$-\ln M=0.0023t-0.0319$	0.998	0.970 ^c
40	$-\ln M=0.0030t-0.0614$	0.995	1.267 ^b
60	$-\ln M=0.0033t-0.0759$	0.992	1.393 ^a

注:不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

组织结构对水分的束缚力,降低铁棍山药干燥时的传质阻力,有利于水分的去除。

2.3 铁棍山药的微观结构

不同 CU 功率下铁棍山药的微观结构如图 2 所示。由图可见,在未施加超声(0 W)时,铁棍山药切面的表面比较皱缩,组织结构较为致密,微孔道的数目不多,且孔径较小。这种结构会使铁棍山药的传质阻力变大,从而不利于物料内部的水分迁

移。施加超声能够发现山药切面的部分组织结构变得疏松,微孔道的数目增多,孔径变大。CU 功率越大,铁棍山药切面的组织结构越疏松,微孔道越多,孔径越大。这与万芳新等^[22]在胡萝卜超声强化远红外辐射干燥的研究结果类似,这说明施加 CU 能够强化干燥过程中铁棍山药的内部传质,促进物料内部水分扩散,且随着 CU 功率的提高,这种强化效应越明显,越有利于物料内部的水分扩散。

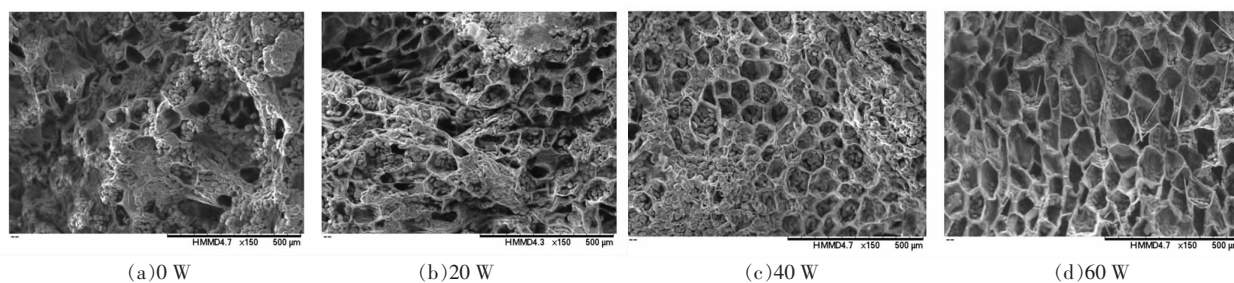


图 2 不同 CU 功率下铁棍山药的微观结构

Fig.2 Microstructure of *Dioscorea opposita* under different ultrasonic power

利用图像处理软件 Image-Pro Plus 计算不同 CU 功率下铁棍山药的孔隙率及平均孔径。不同

CU 功率下铁棍山药的孔隙率及平均孔径如表 2 所示。未施加超声(0 W)时,孔隙率为 0.083,平均

孔径为 $9.331 \mu\text{m}$ 。当分别施加 20, 40, 60 W 超声时, 铁棍山药相应的孔隙率分别为 0.176, 0.281 和 0.381, 平均孔径分别为 $10.907, 13.563 \mu\text{m}$ 和 $17.702 \mu\text{m}$ 。超声功率越大, 铁棍山药的孔隙率及平均孔径越大, 与图 2 反映的一致。Shi 等^[9]在香蕉片的超声-远红外辐射干燥中发现超声功率增大, 物料的孔隙率也逐渐变大。

2.4 铁棍山药 CU-HPD 的水分迁移规律

根据 LF-NMR 原理, 质子的不同化学环境会导致其不同的 T_2 弛豫时间以及不同的自由度。 T_2 弛豫时间可以间接反映水的相性特征^[23], 因此, 利用物料的 T_2 弛豫时间曲线可以表征干燥过程中物料内部的水分状态变化和水分迁移规律。弛豫时间越短, 水与物料的结合越紧密, 自由度越低, 流动性就越差。反之, 弛豫时间越长, 自由度越高, 水分流动性就越好。被不同 T_2 峰覆盖的信号面积可以代表不同状态水分的相对含量^[24]。图 3 是新鲜铁棍山药片的 T_2 弛豫时间曲线, 该曲线上有 3 个峰 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} , 由此可以将铁棍山药 T_2 弛豫时间曲线划分为 3 个区域: $0.01 \sim 10 \text{ ms}$ 、 $10 \sim 100 \text{ ms}$ 和 $100 \sim 10\,000 \text{ ms}$, 其对应的峰面积分别为 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} , 它们分别代表结合水、不易流动水和自由水。结合水通过氢键与大分子物质紧密结合^[25], 不易流动水存在于细胞质基质中^[26], 自由水则存在于细胞间隙以及流动性较高的纤维组织之间^[13]。根据 T_2 弛豫时间曲线, 新鲜铁棍山药核的磁共振信号中 A_{23} 明显高于 A_{22} 和 A_{21} , 说明新鲜铁棍山药的水分主要是自由水, 而且远多于不易流动水和结合水的含量。

图 4 是不同超声功率下 CU-HPD 过程中铁棍山药的 T_2 弛豫时间曲线。由图可知, 新鲜的铁棍山药核磁共振信号幅值最大, 说明新鲜的铁棍山药水分含量最高。随着干燥的进行, 整个横向弛豫时间曲线的峰有一定程度的左移, 峰面积不断减小。其中结合水的弛豫时间和 A_{21} 基本不变; 不易流动水的弛豫时间逐渐变短, A_{22} 则是先增高后降低; 自由水的弛豫时间变短, A_{23} 一直降低, 直至为 0。这说明在干燥过程中, 铁棍山药内部的结合水含量非常稳定, 不易流动水的含量先增大再减小, 自由水的含量则是不断减少, 直至完全去除。即干燥过程对物料中结合水的影响比对自由水的

表 2 不同 CU 功率下铁棍山药的孔隙率和平均孔径
Table 2 Porosity and average pore size of *Dioscorea opposita* under different ultrasonic power

超声功率/W	孔隙率	平均孔径/ μm
0	$0.083 \pm 0.003^{\text{d}}$	$9.331 \pm 0.025^{\text{d}}$
20	$0.176 \pm 0.007^{\text{e}}$	$10.907 \pm 0.012^{\text{e}}$
40	$0.281 \pm 0.010^{\text{b}}$	$13.563 \pm 0.032^{\text{b}}$
60	$0.381 \pm 0.013^{\text{a}}$	$17.702 \pm 0.018^{\text{a}}$

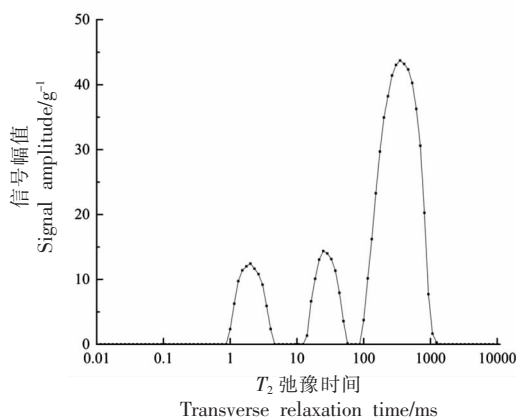


图 3 新鲜铁棍山药的 T_2 弛豫时间曲线
Fig.3 Transverse relaxation time curve of fresh *Dioscorea opposita*

影响要小得多^[27]。

由图 4a~4d 可知, 施加 CU 之后, A_{23} 下降速度明显加快, 且超声功率越高, A_{23} 下降速度越快。在 A_{23} 减小的过程中 A_{22} 先缓慢增大, 然后逐渐下降。 A_{21} 则几乎不变。这表明在铁棍山药 CU-HPD 过程中, 铁棍山药内部的自由水含量一直在减少, 直至完全去除; 不易流动水含量先缓慢增大, 后逐渐减小, 干燥结束时物料中仍存在部分不易流动水; 结合水含量则在干燥过程中几乎不变。

2.5 铁棍山药 CU-HPD 的水分状态变化

T_2 弛豫时间曲线的变化与水分状态的变化密切相关。不同超声功率对水分变化有不同程度的作用。在干燥温度 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 不同超声功率下铁棍山药 CU-HPD 的水分状态变化曲线如图 5 所示。超声功率为 0 W 时, A_{23} 在 540 min 完全消失, 施加 CU 之后, A_{23} 完全消失的时间随着 CU 功率的提高而逐渐缩短至 480~300 min; 在 A_{23} 下降的过程中, A_{22} 先增大后减小, 但在干燥结束时并未完全消失。提高超声功率, A_{22} 达到峰值的时间由

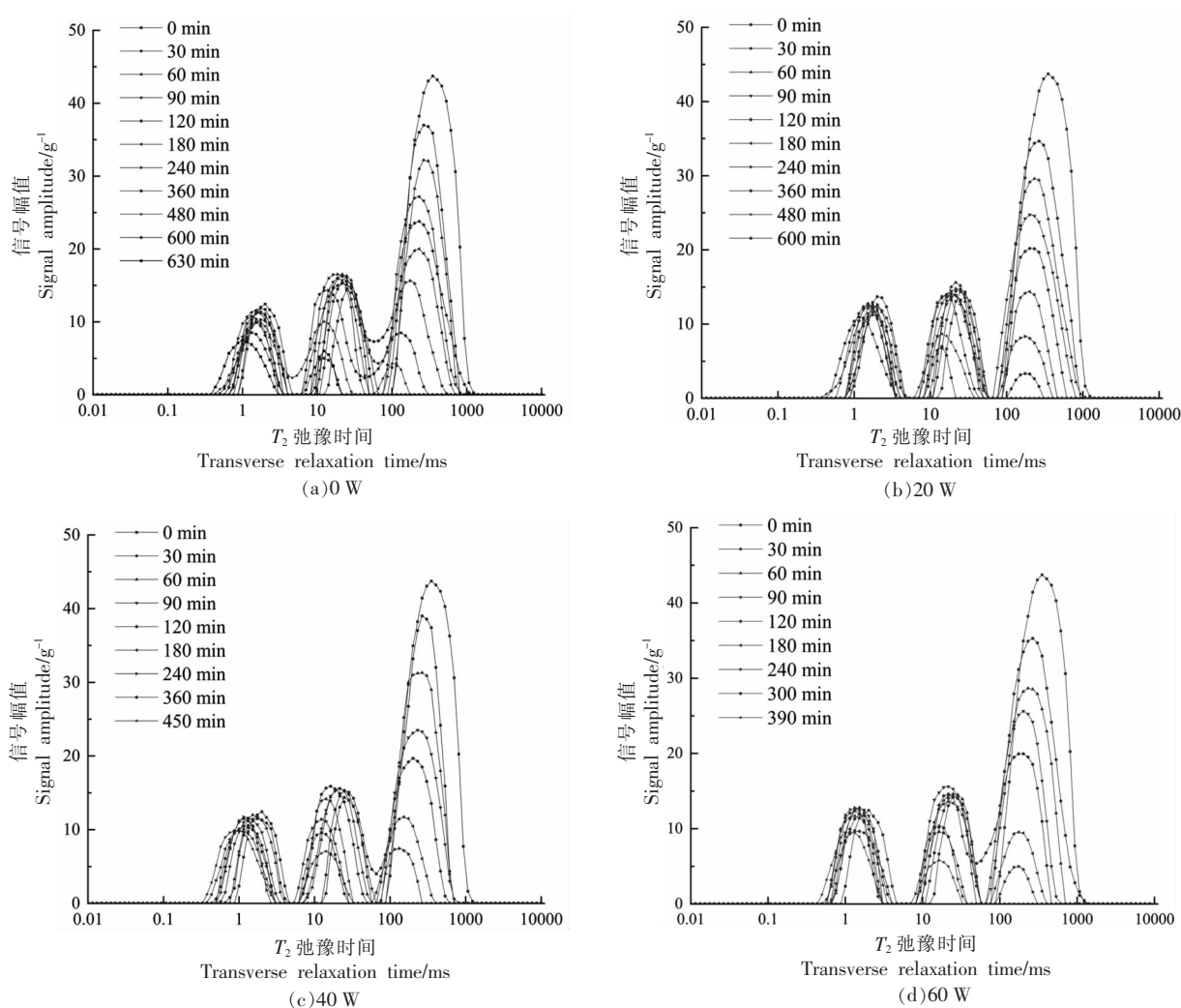


图4 不同CU功率下铁棍山药的 T_2 弛豫时间曲线

Fig.4 Transverse relaxation time curves of *Dioscorea opposita* under different ultrasonic power

180 min 缩短到 120~90 min, 且 CU 功率越大 A_{22} 达到峰值的时间越短; A_{21} 则是几乎不变。这说明铁棍山药在 CU-HPD 过程中自由水含量一直减小, 施加超声对提高自由水的流动性、促进自由水的脱除具有十分明显的作用, 且提高 CU 功率会显著缩短自由水被完全去除的时间。不易流动水含量先增大后减小, 随着 CU 功率的提高, 不易流动水达到峰值的时间越来越短, 这说明铁棍山药在干燥过程中内部水分存在相互转化的现象, 干燥中后期不易流动水逐渐去除, 而在干燥过程结束时, 物料中仍有部分不易流动水存在。结合水的含量在 CU-HPD 过程中几乎不变, 表明由于这部分水分的结合力强, 在干燥过程中难以除去, 施加 CU 对物料内部的结合水基本上没有产生作用。以

上结果表明, 在铁棍山药 CU-HPD 过程中, CU 能降低内部组织对不易流动水的束缚力和提高自由水的流动性, 从而促进内部水分迁移和去除^[20]。

2.6 铁棍山药 CU-HPD 的 MRI 图像分析

干燥温度 45 °C 时, 不同超声功率下铁棍山药 CU-HPD 过程中质子密度图像如图 6 所示, 在图像中信号越强, 表明质子密度越高, 即物料的含水量越高; 信号越弱, 质子密度越低, 物料的含水量越低^[20]。从图 6 可以看出, 新鲜铁棍山药的含水量很高, 随着干燥的进行, 物料中的水分不断被去除, 质子密度从外到内不断降低, 说明水分从外到内逐渐流失, 物料内水分含量不断降低。这和李定金等^[28]的研究结果一致。在干燥后期, 物料内部质子密度变化较慢, 说明铁棍山药内部水分由于扩

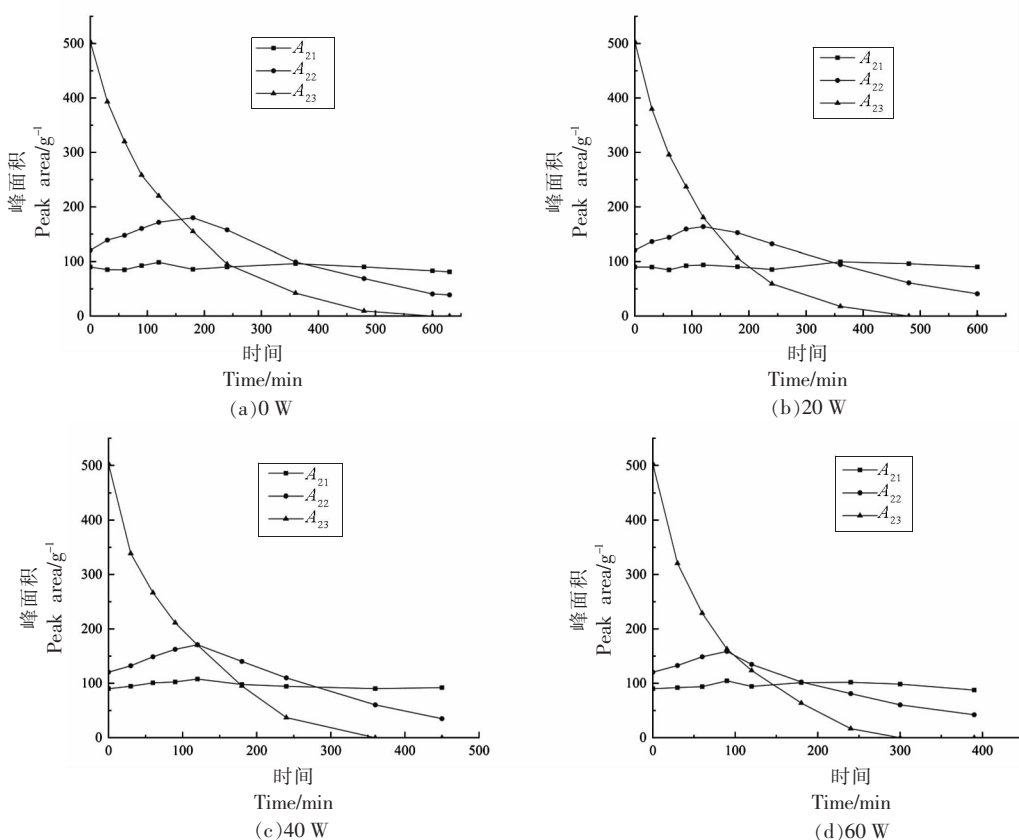


图 5 不同 CU 功率下不同状态水的峰面积

Fig.5 Peak area of moisture in different states under different ultrasonic power

散阻力的作用，比表面水分更难去除。干燥结束时，图像与背景色非常接近，说明此时物料的水分含量极低。比较不同超声功率下质子密度图的变化，发现在 0 W 时质子密度下降比较慢，随着超声功率的增加，相对质子密度下降较快。这一现象表

明，在铁棍山药 CU-HPD 过程中 CU 对物料水分迁移有显著的影响，CU 功率越高其对物料内部水分迁移的强化效应就越明显，物料中水分去除的就越快。

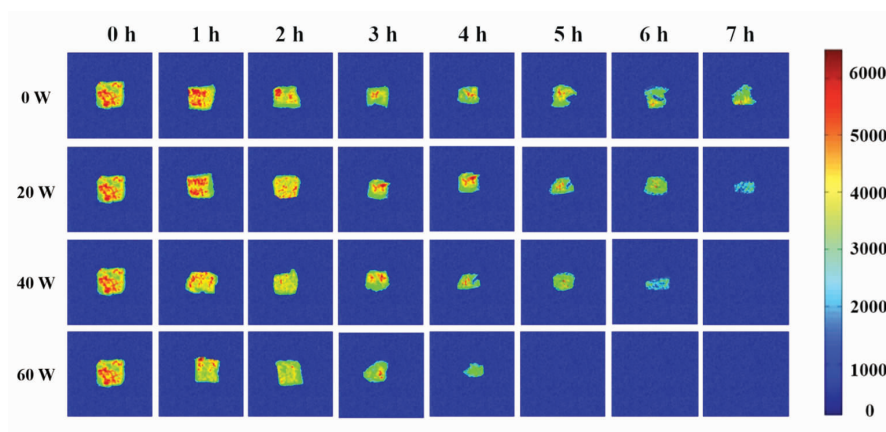


图 6 不同 CU 功率下铁棍山药 CU-HPD 过程中质子密度图像

Fig.6 Proton density image during CU-HPD of *Dioscorea opposita* under different ultrasonic power

3 结论

CU在铁棍山药HPD中的应用,有助于促进物料内部水分迁移,能够减少干燥时间,提高干燥速率。和单一的HPD相比,CU功率在20~60 W范围内,CU-HPD的干燥时间减少了4.8%~38.1%,干燥速率提高了5.7%~62.3%, D_{eff} 值增大了9.4%~57.0%。结合SEM图片,施加CU能够使铁棍山药内部组织结构变疏松,随着CU功率的提高,微孔道数量增加,孔径变大,孔隙率从0.083增大到0.381。

LF-NMR分析表明,铁棍山药内部存在3种状态水:自由水、不易流动水和结合水。水分状态分析表明,铁棍山药在CU-HPD中,物料内部水分存在相互转化。自由水的含量不断降低,直至完全去除;不易流动水的含量在干燥过程中先缓慢增高后逐渐降低,在干燥结束时仍存在少量不易流动水;结合水的含量几乎不变。提高CU功率,物料内部水分迁移速率变快,促进内部水分的去除。MRI图像显示,在CU-HPD过程中,物料水分从外到内逐渐流失,且CU功率越高,对铁棍山药内部水分向外扩散的促进作用越显著,越有利于水分的去除。

综上所述,在铁棍山药HPD过程中施加CU进行传质强化,有利于提高干燥速率,且CU功率越高,对物料内部水分状态的影响越显著,越有利于水分的去除。

参 考 文 献

- [1] 李红涛,袁书林. 山药产品的功能价值及开发利用探讨[J]. 中国食物与营养, 2009, 121(10): 15-18.
LI H T, YUAN S L. Discussion on functional value, development and utilization of yam products[J]. Food and Nutrition in China, 2009, 121(10): 15-18.
- [2] 王邈,李德远,李玮,等. 山药的药理作用分析及其开发利用[J]. 中国食物与营养, 2010, 127(4): 72-75.
WANG M, LI D Y, LI W, et al. Function of Chinese yam and its utilization[J]. Food and Nutrition in China, 2010, 127(4): 72-75.
- [3] ZHANG Z D, GAO W Y, WANG R F, et al. Changes in main nutrients and medicinal composition of Chinese yam (*Dioscorea opposita*) tubers during storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(10): 2535-2543.
- [4] 张艳来,尹凯丹,龙成树,等. 热泵技术在我国农产品干燥中的应用及展望[J]. 农机化研究, 2014, 36(5): 1-7.
ZHANG Y L, YIN K D, LONG C S, et al. Application and prospects of the agricultural product drying using the heat pump in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(5): 1-7.
- [5] HII C, LAW C, SUZANNAH S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 276-282.
- [6] VAZQUEZ G, CHENLO F, MOREIRA R, et al. Grape drying in a pilot plant with a heat pump[J]. Drying Technology, 1997, 15(3/4): 899-920.
- [7] 白旭升,李保国. 香菇热泵干燥特性及数学模型研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 42-48.
BAI X S, LI B G. Study on drying characteristics and mathematical model for heat pump drying of mushroom[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 42-48.
- [8] 姬长英,蒋思杰,张波,等. 辣椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 296-302.
JI C Y, JIANG S J, ZHANG B, et al. Heat pump drying properties of chili and optimization of technical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 296-302.
- [9] FUENTE-BLANCO S, RIERA-FRANCO E, ACOSTA-APARICIO V, et al. Food drying process by power ultrasound [J]. Ultrasonics, 2006, 44(3): e523-e527.
- [10] KROEHNKE J, SZADZINSKA J, STASIAK M, et al. Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots - Process kinetics and product's quality analysis[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 48(9): 249-258.
- [11] LIU Y H, ZENG Y, HU X Y, et al. Effect of ultrasonic power on water removal kinetics and moisture migration of kiwifruit slices during contact ultrasound intensified heat pump drying[J]. Food and Bioprocess Technology: An International Journal,

- 2020, 13(6): 430-441.
- [12] 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, 293.
XU J G, XU G, ZHANG X K, et al. Moisture transport in carrot during hot air drying using magnetic resonance imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(12): 271-276, 293.
- [13] 马慧俐, 王松磊, 贺晓光, 等. 不同干燥方式下黄牛肉水分分布迁移规律研究[J]. 核农学报, 2021, 35(1): 138-146.
MA H L, WANG S L, HE X G, et al. Water distribution and migration of yellow beef under different drying methods[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(1): 138-146.
- [14] JIANG M X, WU P, XING H, et al. Water migration and diffusion mechanism in the wheat drying[J]. Drying Technology, 2021, 39(6): 738-751.
- [15] LIU Y H, MIAO S, WU J Y, et al. Drying and quality characteristics of Flos Lonicerae in modified atmosphere with heat pump system[J]. Journal of Food Process Engineering, 2014, 37(1): 37-45.
- [16] 苗帅. 超声联合远红外辐射干燥设备的研制与试验研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2016.
MIAO S. Equipment development and experimental study on ultrasound combined far-infrared radiation drying[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2016.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard determination of moisture in food: GB 5009.3-2016 [S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
- [18] 尹慧敏, 聂宇燕, 沈瑾, 等. 基于Weibull分布函数的马铃薯丁薄层热风干燥特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 252-258.
YIN H M, NIE Y Y, SHEN J, et al. Drying characteristics of diced potato with thin-layer by hot-wind based on Weibull distribution function [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 252-258.
- [19] SHI X W, YANG Y, LI Z Y, et al. Moisture transfer and microstructure change of banana slices during contact ultrasound strengthened far-infrared radiation drying[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66(12): 102537.
- [20] 刘云宏, 孙畅莹, 曾雅. 直触式超声功率对梨片超声强化热风干燥水分迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 284-292.
LIU Y H, SUN C Y, ZENG Y. Effect of contact ultrasound power on internal moisture migration of pear slices during ultrasound enhanced hot air drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(19): 284-292.
- [21] 宋玉, 刘超, 段依梦, 等. 稻谷就仓干燥水分迁移规律及干燥动力学模型研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(10): 115-123.
SONG Y, LIU C, DUAN Y M, et al. Study on the regularity of moisture transfer and drying kinetics model of rice silo[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(10): 115-123.
- [22] 万芳新, 李武强, 杜小龙, 等. 胡萝卜切片的超声强化远红外干燥特性及动力学模拟[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(8): 147-156.
WAN X F, LI W Q, DU X L, et al. Ultrasound-enhanced far-infrared drying characteristics and dynamics simulation of carrot slices[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(8): 147-156.
- [23] LI W M, WANG P, XU X L, et al. Use of low-field nuclear magnetic resonance to characterize water properties in frozen chicken breasts thawed under high pressure[J]. European Food Research and Technology, 2014, 239(2): 183-188.
- [24] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 116-123.
LI D J, DUAN Z H, LIU Y, et al. Variation in water content during vacuum microwave drying of flavored yam chips process analyzed by low-field nuclear magnetic resonance imaging [J]. Food Science, 2019, 40(5): 116-123.
- [25] 朱文学, 尤泰斐, 白喜婷, 等. 基于低场核磁的马铃薯切片干燥过程水分迁移规律研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 364-370.
ZHU W X, YOU T F, BAI X T, et al. Analysis of moisture transfer of potato slices during drying using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):

- 364–370.
- [26] XI H H, LIU Y H, GUO L G, et al. Effect of ultrasonic power on drying process and quality properties of far-infrared radiation drying on potato slices[J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29 (1): 93–101.
- [27] 李娜, 李瑜. 利用低场核磁共振技术分析冬瓜真空干燥过程中的内部水分变化[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 84–88.
- LI N, LI Y. Analysis of internal moisture changes of *Benincasa hispida* during vacuum drying using low-field NMR[J]. Food Science, 2016, 37 (23): 84–88.
- [28] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 116–123.
- LI D J, DUAN Z H, LIU Y, et al. Variation in water content during vacuum microwave drying of flavored yam chips process analyzed by low-field nuclear magnetic resonance imaging [J]. Food Science, 2019, 40(5): 116–123.

Effect of Ultrasonic Power on Moisture Migration in Contact Ultrasound Enhanced Heat Pump Drying of *Dioscorea opposita*

Xue Yang¹, Liu Yunhong^{1,2*}, Liu Enchong¹, Sun Xue¹

¹School of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan

²Food Green Processing and Quality and Safety Control of Henan Province International Joint Laboratory, Luoyang 471000, Henan)

Abstract To explore the moisture migration law of *Dioscorea opposita* in contact ultrasound enhanced heat pump drying, this paper used the contact ultrasound enhanced heat pump drying equipment to study the effect of ultrasonic power on drying characteristics and water change. The results showed that applying contact ultrasound during the heat pump drying was beneficial to accelerating the dehydration process. With the increase of ultrasonic power, the drying time of *Dioscorea opposita* could be shortened from 630 min to 390 min, and the average drying rate could be increased from 0.0053 g/(g·min) to 0.0086 g/(g·min), the range of effective moisture diffusion coefficients was increased from 0.887×10^{-10} m²/s to 1.393×10^{-10} m²/s. Scanning electron microscopy results showed that contact ultrasound could loosen the material structure and produce micropores. With the increase of ultrasonic power, the number of micropores increased and the porosity increased. Low-field nuclear magnetic resonance analysis showed that there were three kinds of moisture in *Dioscorea opposita*: free water, immobilized water, and bound water. There was mutual migration of internal moisture during the contact ultrasound enhanced heat pump drying process. The content of free water decreased continuously until it was completely removed. The content of immobilized water first increased and then decreased in the drying process, and there was still some immobilized water existence at the end of drying. The content of bound water was almost unchanged during the drying process. The nuclear magnetic resonance imaging of *Dioscorea opposita* showed that the moisture of the material gradually lost from outside to inside during the drying process. Increasing ultrasonic power during the drying process could accelerate the internal moisture migration rate of *Dioscorea opposita* and promote the removal of internal moisture. This study could provide a reference for the development and application of contact ultrasound enhanced heat pump drying technology for fruits and vegetables.

Keywords drying; *Dioscorea opposita*; contact ultrasound; heat pump drying; moisture migration