

基于低场核磁的马铃薯切片干燥过程水分迁移规律研究

朱文学^{1,2} 尤泰斐¹ 白喜婷^{1,2} 刘思佳¹ 侯亚玲¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471023; 2. 农产品干燥技术与装备河南省工程技术研究中心, 洛阳 471023)

摘要: 为研究马铃薯切片热泵干燥过程中内部水分迁移规律, 利用低场核磁共振技术检测横向弛豫时间 T_2 , 分析峰面积 A_{2x} 的变化, 建立水分变化动力学模型。结果表明: 热泵干燥过程中, 提高热风温度能够显著提高干燥速率, 加快结合水、不易流动水以及自由水的迁移。干燥过程中自由水和结合水先于不易流动水发生变化, 自由水含量在前 90 min 基本保持不变, 之后迅速下降, 不易流动水和结合水含量均表现为先升高后降低的趋势。自由水被脱除后, 不易流动水和结合水依次达到最大值, 随着干燥进行不易流动水逐渐被脱除, 随后结合水开始被脱除至干燥结束。马铃薯切片热泵干燥过程属于内部扩散控制, 水分有效扩散系数范围为 $5.228 \times 10^{-8} \sim 1.434 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 建立的干燥动力学模型决定系数均大于 0.98, 可用于预测马铃薯切片干燥过程中不同状态的水分迁移规律。

关键词: 马铃薯; 干燥; 水分迁移; 低场核磁共振; 数学模型

中图分类号: S375; S532 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)12-0364-07

Analysis of Moisture Transfer of Potato Slices during Drying Using Low-field NMR

ZHU Wenxue^{1,2} YOU Taifei¹ BAI Xiting^{1,2} LIU Sijia¹ HOU Yaling¹

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China

2. Agricultural Product Drying Technology and Equipment of Henan Engineering Technology Research Center, Luoyang 471023, China)

Abstract: In order to study the law of internal water migration in the process of potato chip heat pump drying, the changes of transverse relaxation time T_2 and peak area A_{2x} were analyzed by low-field NMR technique, and a dynamic model was established for different states of moisture change in the drying process. The results showed that in the process of heat pump drying, increasing the hot air temperature can significantly increase the drying rate and accelerate the migration rate of bound water, immobilized water and free water. In the drying process, the free and bound water was changed before the immobilized water, and the free water content was remained basically the same for the first 90 min, and then dropped rapidly. The proportions of the immobilized and bound water both showed a rise and then decrease. In the trend, after the free water was removed, the immobilized water and the bound water successively reached a maximum value, and as the drying proceeding, the flowing water was gradually removed, and then the bound water started to be removed until the drying was completed. The heat pump drying process of potato slices belonged to internal diffusion control, and the effective water diffusion coefficient was ranged from $5.228 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ to $1.434 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. A dynamic model was established for the changes of moisture content and its content in different stages of potato slice drying with time. The coefficient of determination of all models was greater than 0.98, which was a good predictor of the law of moisture migration of potato slices in different states during the drying process.

Key words: potato; drying; moisture transfer; low-field nuclear magnetic resonance; mathematical model

0 引言

我国马铃薯总产量居世界第一位, 马铃薯富含

淀粉、蛋白质、矿物质和维生素, 深受人们的喜爱^[1]。新鲜马铃薯含水率高, 由于贮藏技术落后, 每年损失超过 15%。马铃薯的干燥加工既能延长

贮藏期,又能提高马铃薯的附加值^[2]。热泵干燥操作简单、热效率高、品质好、处理量大,是目前广泛采用的马铃薯干燥方法^[3-4]。

低场核磁共振(Low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)技术通过弛豫时间的变化从微观的角度解释样品中水分的状态和变化规律^[5-7],是一种有效、快速、无损的检测方法。近年来国内外学者已在果蔬、肉制品、水产品加工过程中的水分状态和变化等方面进行了深入研究^[8-19]。KAMAL等^[20]研究了苹果酱的储存时间和糖浓度对水体动力学的影响。WANG等^[21]研究了不同预处理方式对胡萝卜片水分迁移和品质特性的影响。ZHU等^[22]研究了甜樱桃在贮藏期间的水分损失和软化过程,并分析了甜樱桃在4℃储存期间的水分分布和迁移。这些研究都表明利用LF-NMR方法确定农产品及食品加工和贮藏过程中水分状态的可行性。

长期以来,物料内部水分迁移规律是干燥研究领域内的研究热点和难点,本文以马铃薯切片为研究对象,利用低场核磁共振技术研究物料内部水分的状态及分布规律,为物料内部水分迁移规律的研究提供参考,也为改进马铃薯切片干燥工艺提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

新鲜荷兰十五马铃薯购于洛阳大张超市;AB104-N型电子天平,上海第二天平仪器厂;GHRH-20型热泵干燥机,广东省农业机械研究所与河南科技大学联合设计制造;NMII20-015V-1型核磁共振分析仪,上海纽迈电子科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备及处理

将马铃薯去皮,切成指定厚度,尺寸为20 mm×20 mm的马铃薯切片。用无菌水洗去表面淀粉,用滤纸拭去表面水分后放入物料盘中。根据预试验结果,在风速1.5 m/s、厚度5 mm的条件下,分别选取40、50、60、70℃温度进行热泵干燥试验,干燥过程中每隔30 min取样一次。

1.2.2 LF-NMR 检测

参数设置:当温度稳定在(32.0±0.1)℃范围内时,利用分析软件FID脉冲序列矫正初始系统参数^[23]。多脉冲回波序列CPMG参数设为:主频21 MHz,偏移频率305 468.85 Hz,90°脉冲时间13 μs,180°脉冲时间26 μs,采样点数432 008,重复采样等待时间400 ms,累加次数64,回波时间

0.18 ms,回波数12 000,模拟增益20.0 dB,数字增益3 dB。

检测方法:称取1.0 g干燥样品,放入直径18 mm样品管中,用封口膜封口后,放入核磁共振仪器中测定,获取指数衰减图谱。测量时放入的样品高度不超过20 mm。每次采集信号3次,用于观测信号幅值的稳定性和数据修补,最后应用核磁共振横向弛豫时间 T_2 反演软件MuhiExp Inv Analysis反演得到 T_2 的反演谱。

1.3 计算方法

1.3.1 初始干基含水率

物料初始含水率测定采用105℃恒温干燥法,参照GB 5009.3—2010^[24]。

1.3.2 干燥速率

干燥速率的计算公式为

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

式中 D_R ——干燥速率,%/min

M_{t_1} —— t_1 时刻的干基含水率,%

M_{t_2} —— t_2 时刻的干基含水率,%

1.3.3 水分比

由于马铃薯平衡干基含水率远小于初始干基含水率 M_0 和 t 时刻含水率 M_t ,水分比计算公式可简略为

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

式中 M_R —— t 时刻物料水分比

1.3.4 水分有效扩散系数

用Fick扩散定律计算马铃薯切片干燥过程中物料的水分有效扩散系数,公式为

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4H^2}\right) \quad (3)$$

式中 M_e ——物料的平衡干基含水率,%

D_{eff} ——水分有效扩散系数,m²/s

H ——物料厚度,m

n ——迭代数

其简化形式为

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

两边取对数后可写为

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4H^2} \quad (5)$$

$\ln M_R$ 与 t 呈线性关系,其直线斜率

$$k = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4H^2} \quad (6)$$

对不同条件的 $\ln M_R$ 与 t 用 OriginPro 8.0 进行线性拟合确定 k 值,由式(6)即可得到有效水分扩散系数 D_{eff} 。

2 试验结果与讨论

2.1 热泵干燥规律

图1、2是马铃薯切片热泵干燥过程中的水分比、干燥速率随干燥时间的变化曲线。由图1可知,随着热风温度的升高,干燥速率明显加快,干燥时间缩短。这是由于在相同含湿量的情况下,热风温度越高,其在饱和前所能容纳的蒸汽量也就越大,干燥能力就越强^[25]。热风温度的提高有利于增大物料内的水分子动能,进而加快传热和传质速率。由图2干燥速率曲线可知,干燥前期干燥速率迅速上升达到最大值,随后逐渐下降。这是由于干燥前期主要由表面汽化主导,水分从表面扩散到干燥介质中的速率等于或小于水分从内部转移到表面的速率。随后干燥速率进入降速干燥阶段,干燥开始由表面汽化控制过渡到内部扩散控制,到达干燥后期由于水分迁移阻力增大,水分子扩散作用变弱,干燥速率呈现逐渐减小的趋势^[26]。

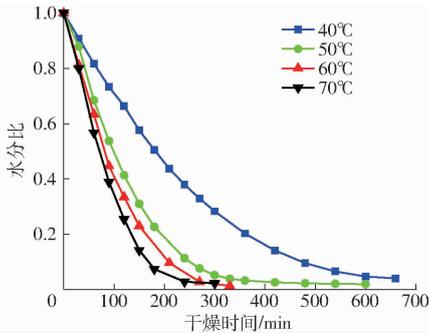


图1 不同热风温度下水分比曲线

Fig. 1 Variation curves of moisture ratio at different air temperatures

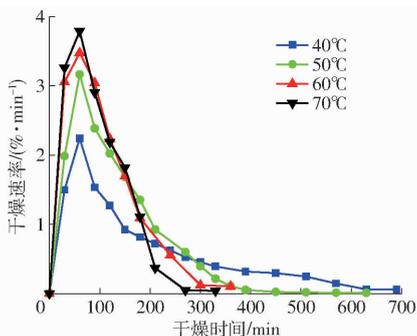


图2 不同热风温度下干燥速率曲线

Fig. 2 Variation curves of drying rate at different air temperatures

2.2 干燥过程中内部水分分布状态与迁移规律

2.2.1 横向弛豫时间反演谱

由于不同温度下马铃薯切片的横向弛豫时间

T_2 反演谱相似,故以热风温度 60°C 为例进行说明。图3是新鲜马铃薯切片的 T_2 反演图谱,按波峰所在区域划定物料中水分的3种状态,横向弛豫时间 T_2 范围分别为结合水横向弛豫时间 T_{21} ($0.1 \sim 1 \text{ ms}$)、不易流动水横向弛豫时间 T_{22} ($1 \sim 10 \text{ ms}$)和自由水横向弛豫时间 T_{23} ($> 10 \text{ ms}$)。由于峰面积 A_{2x} ($x = 1, 2, 3$)可以表示不同状态的含水率,故用 A_{2x} 对物料中不同状态含水率进行分析^[27]。由图4发现,随着干燥进行,整个 T_2 图谱逐渐向结合水 T_{21} 峰移动,自由水 T_{23} 峰逐渐减小并向不易流动水 T_{22} 峰靠拢,最后只有结合水 T_{21} 一个小峰。这是因为物料内自由水的自由度大,易被脱除,不易流动水和结合水自由度低于自由水,其流动性低,在大部分自由水脱出后才开始去除^[28]。图4中,由于3种相态水分的流动性和含量均不断降低,其曲线呈现不断向左移动,波峰面积不断减小的趋势。为研究各状态水分的迁移规律,故对各状态水分峰面积 A_{2x} 进行研究。

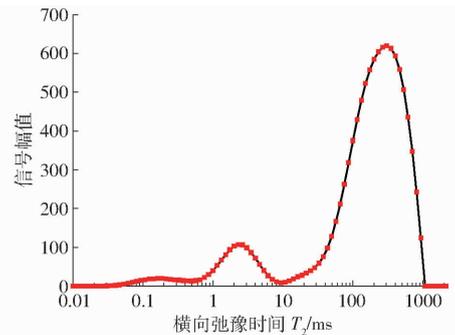


图3 新鲜马铃薯切片 T_2 反演图谱

Fig. 3 Inversion spectrum of transverse relaxation time T_2 of fresh potato sample

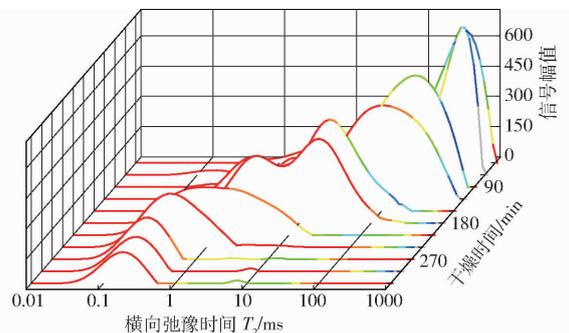


图4 60°C 下新鲜马铃薯切片干燥过程中的 T_2 弛豫谱
Fig. 4 Spectra of T_2 relaxation of fresh potato during drying process at 60°C

2.2.2 自由水分状态

图5为马铃薯切片自由水峰面积 A_{23} 随时间的变化曲线。由图5看出,自由水在干燥开始90 min内缓慢下降,之后迅速减少,40、50、60、 70°C 干燥条件下分别经过360、240、210、180 min脱除自由水。这是由于前90 min主要是表面水分汽化,随着干燥的进行,物料由内到外形成水分梯度,内部自

由水需要扩散到表面才能脱除,水分脱除速度有所减慢^[29]。干燥温度的升高,可以减少自由水脱去的时间。自由水峰面积 A_{23} 为 0 时,物料的水分比约为 0.14,说明新鲜马铃薯中自由水约占总水分的 86%。

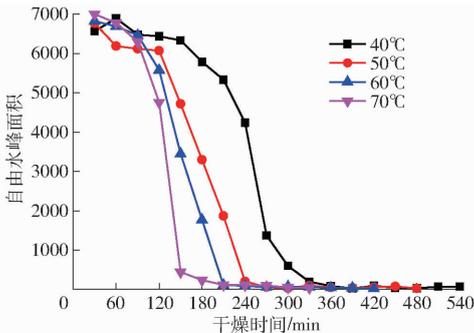


图 5 不同热风温度下马铃薯切片自由水峰面积随时间的变化曲线

Fig. 5 Free water area changing curves of potato slices with drying time at different temperatures

2.2.3 不易流动水分状态

图 6 为马铃薯切片不易流动水峰面积 A_{22} 随时间的变化曲线。不同干燥温度条件下不易流动水的峰面积 A_{22} 呈现先增大再减小的变化。不易流动水在 40、50、60、70℃ 时分别经过 300、210、180、160 min 升高到最大值,这是因为随着干燥进行水分子活化能逐渐增大,自由水从无序状态过渡至有序状态或从分散状态过渡至成簇状态,部分自由水转变为不易流动水,另外随着干燥的进行,物料内部物质在酶的作用下开始分解,一部分结合水转化为不易流动水^[30]。不易流动水含量减小是因为随着干燥的进行,物料内的不易流动水随内部扩散逐渐脱除^[28]。

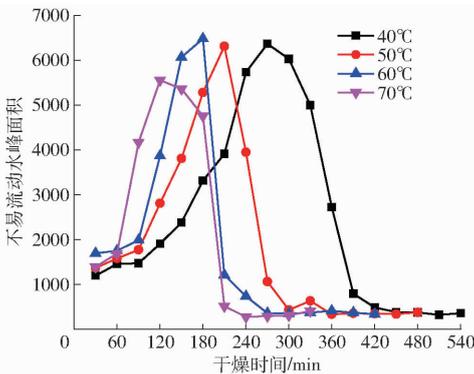


图 6 不同热风温度下马铃薯切片不易流动水峰面积随时间的变化曲线

Fig. 6 Immobilized water area changing curves of potato slices with drying time at different temperatures

2.2.4 结合水分状态

图 7 是马铃薯切片结合水峰面积 A_{21} 随时间的变化曲线。由图 7 可知,在干燥过程中,结合水峰面积 A_{21} 随着干燥的进行总体呈现先增加后减小的趋

势。干燥温度的升高,结合水达到最大值所需的时间逐渐减少,40、50、60、70℃ 温度时,分别在 360、300、210、180 min 时峰面积 A_{21} 达到最大值,滞后于不易流动水的变化。干燥前期,自由水分子动能逐渐增大,其扩散能力逐渐增强,一部分自由水与淀粉等营养物质结合使结合水含量升高^[31]。干燥后期,物料中有些物质在酶的作用下分解,结合水转变为不易流动水被脱除,结合水减少。

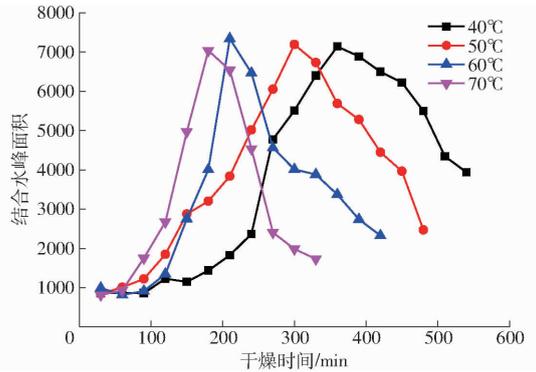


图 7 不同热风温度下马铃薯切片结合水峰面积随时间的变化曲线

Fig. 7 Bound water area changing curves of potato slices with drying time at different temperatures

对比水分状态分析结果可知,马铃薯切片干燥过程中内部水分迁移规律为:部分自由水先向不易流动水和结合水转变,之后不易流动水向结合水发生转变,结合水向不易流动水的转变伴随着整个干燥过程。

2.3 水分有效扩散系数计算及模型拟合

2.3.1 水分有效扩散系数

由表 1 可知,干燥温度在 40 ~ 70℃ 时, D_{eff} 从 $5.228 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 上升到 $1.434 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 上升幅度达 174.23%, 因此温度对 D_{eff} 有显著影响。温度升高,物料内水分子动能增大,使得水分扩散能力增大,故在实际生产中,可通过增大温度加快生产效率。但由于高温下还原糖美拉德反应加快^[32], 高于 70℃ 时马铃薯片褐变加重。

表 1 马铃薯切片的水分有效扩散系数

Tab. 1 Effective moisture diffusivity of potato slices at different temperatures

干燥温度/℃	线性模拟方程	决定系数 R^2	水分有效扩散系数 $D_{eff}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
40	$\ln M_R = -0.00516t + 0.174$	0.984	5.228×10^{-8}
50	$\ln M_R = -0.00766t + 0.154$	0.993	7.761×10^{-8}
60	$\ln M_R = -0.01368t + 0.322$	0.996	1.387×10^{-7}
70	$\ln M_R = -0.01415t + 0.169$	0.989	1.434×10^{-7}

2.3.2 干燥动力学模型

根据不同温度干燥条件下 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 随干燥

时间的变化规律,分别建立 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 随干燥时间变化的动力学模型。通过对所得数据研究发现, A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 的变化趋势是典型的非线性函数。利用 OriginPro 8.0 软件对 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 的变化进行曲

线拟合得到 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 随干燥时间变化的动力学模型回归方程及其参数,如表 2 所示。 y 表示不同温度干燥条件下的 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 值, x 为干燥时间,单位 min。

表 2 不同温度条件下 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 随干燥时间变化的动力学模型及其参数
Tab.2 Kinetic models of A_{21} , A_{22} and A_{23} vs drying time and their parameters for potato slices under different temperatures

水分状态	回归方程	干燥温度/°C	模型参数			决定系数 R^2
结合水	$y = ax^9 + bx^8 + cx^7 + dx^6 + ex^5 + fx^4 + gx^3 + hx^2 + ix + j$	40	$a = 0$ $d = 3.02 \times 10^{-9}$ $g = -0.07674$ $j = 483.8$	$b = 1.30 \times 10^{-15}$ $e = -1.57 \times 10^{-6}$ $h = 6.764$	$c = -3.08 \times 10^{-12}$ $f = 0.0004634$ $i = -277.9$	0.9903
		50	$a = 4.63 \times 10^{-17}$ $d = -5.72 \times 10^{-8}$ $g = 0.4178$ $j = -1.09 \times 10^4$	$b = -1.08 \times 10^{-13}$ $e = 1.83 \times 10^{-5}$ $h = -27.63$	$c = 1.06 \times 10^{-10}$ $f = -0.003571$ $i = 925.5$	0.9928
		60	$a = -3.13 \times 10^{-16}$ $d = 2.89 \times 10^{-7}$ $g = -1.653$ $j = 4.07 \times 10^4$	$b = 6.59 \times 10^{-13}$ $e = -8.48 \times 10^{-5}$ $h = 102.5$	$c = -5.88 \times 10^{-10}$ $f = 0.01526$ $i = -3260$	0.9962
		70	$a = 0$ $d = 8.50 \times 10^{-9}$ $g = -0.0461$ $j = 143.6$	$b = 0$ $e = -3.35 \times 10^{-6}$ $h = 1.241$	$c = -8.02 \times 10^{-12}$ $f = 0.0005959$ $i = 13.05$	0.9917
不易流动水	$y = ax^9 + bx^8 + cx^7 + dx^6 + ex^5 + fx^4 + gx^3 + hx^2 + ix + j$	40	$a = 9.33 \times 10^{-18}$ $d = -9.87 \times 10^{-9}$ $g = 0.05602$ $j = -794$	$b = -2.12 \times 10^{-14}$ $e = 2.86 \times 10^{-6}$ $h = -3.75$	$c = 1.98 \times 10^{-11}$ $f = -0.0005062$ $i = 139.9$	0.9892
		50	$a = -4.91 \times 10^{-17}$ $d = 5.19 \times 10^{-8}$ $g = -0.2701$ $j = 6141$	$b = 1.10 \times 10^{-13}$ $e = -1.53 \times 10^{-5}$ $h = 15.33$	$c = -1.03 \times 10^{-10}$ $f = 0.002663$ $i = -436.7$	0.9991
		60	$a = 1.94 \times 10^{-16}$ $d = -2.13 \times 10^{-7}$ $g = 1.546$ $j = -4.14 \times 10^4$	$b = -4.31 \times 10^{-13}$ $e = 6.75 \times 10^{-5}$ $h = -102.6$	$c = 4.07 \times 10^{-10}$ $f = -0.01317$ $i = 3429$	0.9957
		70	$a = -3.14 \times 10^{-15}$ $d = 1.33 \times 10^{-6}$ $g = -4.108$ $j = 7.74 \times 10^4$	$b = 5.07 \times 10^{-12}$ $e = -0.0003087$ $h = 225$	$c = -3.49 \times 10^{-9}$ $f = 0.04501$ $i = -6585$	0.9862
自由水	$y = b + (a - b) / [1 + \exp((x - x_0) / dx)]$	40	$a = 6481.46233$	$b = 38.71071$	$x_0 = 247.42681$	0.9954
		50	$a = 6479.34023$	$b = 2.7045$	$x_0 = 180.19796$	0.9942
		60	$a = 6822.24881$	$b = 6.79829$	$x_0 = 152.05146$	0.9979
		70	$a = 6731.01474$	$b = 93.12971$	$x_0 = 127.08695$	0.9976

由表 2 可知,不同温度干燥条件下拟合所得 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 随干燥时间变化的动力学模拟回归方程的决定系数 R^2 均大于 0.98,这表明所得回归方程具有较高的拟合精度。该模型能较为准确地预测马铃薯切片热泵干燥过程中任意时刻的水分变化及其分布,为提高干燥产品质量,研究干燥过程中的水分状态及其分布变化规律提供了参考。

3 结论

(1) 马铃薯内部水分以结合水、不易流动水和

自由水 3 种状态存在。自由水约占新鲜马铃薯总水分的 86%,为马铃薯特征水分。提高热泵干燥温度,可以提高干燥速率,促进水分迁移。

(2) 马铃薯切片热泵干燥过程中水分迁移规律为:部分自由水先向不易流动水和结合水转变,之后不易流动水向结合水发生转变,但结合水向不易流动水的转变伴随着整个干燥过程。

(3) 所建立的干燥动力学模型可用于模拟马铃薯切片热泵干燥过程中不同状态水分的迁移和转变规律。

参 考 文 献

- 1 KARIZAKI V M, SAHIN S, SUMNU G, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pretreatment on deep fat frying of potatoes[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(12): 3554 – 3563.
- 2 徐小东, 崔政伟. 农产品和食品干燥技术及设备的现状和发展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 171 – 174.
- 3 FRIAS A, CLEMENTE G, MULET A. Potato shrinkage during hot air drying[J]. Food Science and Technology International, 2010, 16(4): 337 – 341.
- 4 FAISAL S, TABASSUM R, KUMAR V. Performance evaluation and process optimization of potato drying using hot air oven[J]. Journal of Food Processing & Technology, 2013, 4(10): 273 – 281.
- 5 王永巍, 王欣, 刘宝林, 等. 低场核磁共振技术检测煎炸油品质[J]. 食品科学, 2012, 33(6): 171 – 175.
WANG Yongwei, WANG Xin, LIU Baolin, et al. Application of low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) to analyze frying oil quality[J]. Food Science, 2012, 33(6): 171 – 175. (in Chinese)
- 6 王雪媛, 高琨, 陈芹芹, 等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 275 – 281.
WANG Xueyuan, GAO Kun, CHEN Qinqin, et al. Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 275 – 281. (in Chinese)
- 7 毕金峰, 王雪媛, 周林燕, 等. 脉动压差闪蒸处理对苹果片水分散失特性及品质影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 376 – 382.
BI Jinfeng, WANG Xueyuan, ZHOU Linyan, et al. Effect of instant controlled pressure drop drying on water loss and quality in apple slices[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 2): 376 – 382. (in Chinese)
- 8 夏天兰, 刘登勇, 徐幸莲, 等. 低场核磁共振技术在肉与肉制品水分测定及其相关品质特性中的应用[J]. 食品科学, 2011, 32(21): 253 – 256.
XIA Tianlan, LIU Dengyong, XU Xinglian, et al. Application of low-field nuclear magnetic resonance in determining water contents and other related quality characteristics of meat and meat products: a review[J]. Food Science, 2011, 32(21): 253 – 256. (in Chinese)
- 9 LI C, LIU D, ZHOU G, et al. Meat quality and cooking attributes of thawed pork with different low field NMR T-21[J]. Meat Science, 2012, 92(2): 79 – 83.
- 10 CABALLERO D, CARO A, RODRIGUEZ P G, et al. Modeling salt diffusion in Iberian ham by applying MRI and data mining [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 189: 115 – 122.
- 11 张楠, 庄昕波, 黄子信, 等. 低场核磁共振技术研究猪肉冷却过程中水分迁移规律[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 103 – 109.
ZHANG Nan, ZHUANG Xinbo, HUANG Zixin, et al. Change in water mobility in pork during postmortem chilling analyzed by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Food Science, 2017, 38(11): 103 – 109. (in Chinese)
- 12 AGIOMYRGIANNAKI A, PETRAKIS P V, DAIS P. Detection of refined olive oil adulteration with refined hazelnut oil by employing NMR spectroscopy and multivariate statistical analysis [J]. Talanta, 2010, 80(5): 2165 – 2171.
- 13 王晓玲, 吴晶, 谭明乾. 低场核磁共振集合化学计量学方法快速检测掺假核桃油[J]. 分析测试学报, 2015, 34(7): 789 – 794.
WANG Xiaoling, WU Jing, TAN Mingqian. Rapid detection of adulterated walnut oil by low field-nuclear magnetic resonance combined with chemometric method[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2015, 34(7): 789 – 794. (in Chinese)
- 14 ZHANG X, MORRIS R H, BENCSEK M, et al. Detection of virgin olive oil adulteration using low field unilateral NMR [J]. Sensors, 2014, 14(2): 2028 – 2035.
- 15 邵小龙, 张蓝月, 冯所兰. 低场核磁共振技术检测芝麻油掺假[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 110 – 113.
SHAO Xiaolong, ZHANG Lanyue, FENG Suolan. Application of LF-NMR for detection of sesame oil adulteration[J]. Food Science, 2014, 35(20): 110 – 113. (in Chinese)
- 16 CARNEIRO C D S, MARSICO E T, JUNIOR C C, et al. Low-field nuclear magnetic resonance (LF NMR 1H) to assess the mobility of water during storage of salted fish (*Sardinella brasiliensis*) [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 169: 321 – 325.
- 17 HEUDE C, LEMASSON E, ELBAYED K, et al. Rapid assessment of fish freshness and quality by 1H HR – MAS NMR spectroscopy[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(4): 907 – 915.
- 18 石芳, 肖星凝, 杨雅轩, 等. 基于低场核磁共振技术研究不同热风干燥工艺条件下香菇复水过程中的水分传递特性[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(10): 144 – 149.
SHI Fang, XIAO Xingning, YANG Yaxuan, et al. Characterization of moisture transfer in rehydration process for dried mushroom (*Lentinus edodes*) by different drying methods[J]. Food And Fermentation Industries, 2017, 43(10): 144 – 149. (in Chinese)
- 19 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 Na, LI Yu. Analysis on internal moisture changes of *Benincasa hispida* during vacuum drying process using low-field NMR[J]. Food Science, 2016, 37(23): 84 – 88. (in Chinese)
- 20 KAMAL T, ZHANG T, SONG Y, et al. Water dynamics and physicochemical analysis of two different varieties of apple Jam (Fuji) and (Yinduqing) by LF-NMR and MRI[J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(3): 225.
- 21 WANG Lin, XU Baoguo, WEI Benxi, et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: effect on the moisture

- migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying[J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2018, 40(1): 619–628.
- 22 ZHU D, LIANG J, LIU H, et al. Sweet cherry softening accompanied with moisture migration and loss during low temperature storage[J]. *J. Sci. Food Agric.*, 2017, 98(10):3651–3658.
- 23 PEREIRA F M V, CARVALHO A D S, CABEÇA L F, et al. Classification of intact fresh plums according to sweetness using time-domain nuclear magnetic resonance and chemometrics[J]. *Microchemical Journal*, 2013, 108(3): 14–17.
- 24 中华人民共和国卫生部. 食品中水分的测定:GB 5009.3—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- 25 巨浩羽,肖红伟,郑霞,等.干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J].*农业工程学报*,2015,31(16):296–304.
JU Haoyu, XIAO Hongwei, ZHENG Xia, et al. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(16): 296–304. (in Chinese)
- 26 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 Huimin, NIE Yuyan, SHEN Jin, et al. Drying characteristics of diced potato with thin-layer by hot-wind based on Weibull distribution function[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(17): 252–258. (in Chinese)
- 27 徐建国,张森旺,徐刚,等.莲子薄层热风干燥特性与水分变化规律[J].*农业工程学报*,2016,32(13):303–309.
XU Jianguo, ZHANG Senwang, XU Gang, et al. Thin-layer hot air drying characteristics and moisture diffusivity of lotus seeds [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(13): 303–309. (in Chinese)
- 28 张绪坤,祝树森,黄俭花,等.用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J].*农业工程学报*,2012,28(22): 282–287.
ZHANG Xukun, ZHU Shusen, HUANG Jianhua, et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(22): 282–287. (in Chinese)
- 29 邵小龙,汪楠,时小转,等.水稻生长过程中籽粒水分状态和横向弛豫特性分析[J].*中国农业科学*, 2017,50(2):240–249.
SHAO Xiaolong, WANG Nan, SHI Xiaozhuan, et al. Analysis of moisture state and transverse relaxation characteristics of grains during the growth process of rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(2):240–249. (in Chinese)
- 30 姚康德,刘静.聚合物中的水[J].*高分子材料科学与工程*,1999(1):6–10.
YAO Kangde, LIU Jing. Water in polymers[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 1999 (1):6–10. (in Chinese)
- 31 LV W, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Smart NMR method of measurement of moisture content of vegetables during microwave vacuum drying[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2017, 10(12):2251–2260.
- 32 吴惠玲,王志强,韩春,等.影响美拉德反应的几种因素[J].*现代食品科技*,2010,26(5):441–444.
WU Huiling, WANG Zhiqiang, HAN Chun, et al. Factors affecting the maillard reaction [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2010,26(5):441–444. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 333 页)

- 29 ZEWDU S, SURYABHAGAVAN K V, BALAKRISHNAN M. Geo-spatial approach for soil salinity mapping in Sego Irrigation Farm, South Ethiopia[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2015, 16(1):16–24.
- 30 SUDDUTH K A, KITCHEN N R, SADLER E J, et al. VNIR spectroscopy estimates of within-field variability in soil properties [J]. *Progress in Soil Science*, 2010, 1(3): 153–163.
- 31 张芳,熊黑钢,丁建丽,等.碱化土壤的野外及实验室波谱响应特征及其转换[J].*农业工程学报*,2012,28(5):101–107.  
ZHANG Fang, XIONG Heigang, DING Jianli, et al. Characteristics of laboratory-field measured spectra responding to alkalinized soil and conversion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(5): 101–107. (in Chinese)
- 32 屈永华,段小亮,高鸿永,等.内蒙古河套灌区土壤盐分光谱定量分析研究[J].*光谱学与光谱分析*,2009,29(5):1362–1366.  
QU Yonghua, DUAN Xiaoliang, GAO Hongyong, et al. Quantitative retrieval of soil salinity using hyper spectral data in the region of Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5): 1362–1366. (in Chinese)
- 33 李娜,吴玲,王绍明,等.玛纳斯河流域土壤盐渍化现状及其与光谱关系研究[J].*江西农业大学学报*,2011,33(6): 1242–1247.  
LI Na, WU Ling, WANG Shaoming, et al. Analysis on relationships between soil salinization and spectra in Manas River Valley [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(6): 1242–1247. (in Chinese)
- 34 张俊华,秦君琴,李明.基于土壤光谱特征的宁夏银北地区盐碱地盐分预测研究[J].*水土保持通报*,2013,33(5): 123–129,164.  
ZHANG Junhua, QIN Junqing, LI Ming. Prediction of soil salt content based on spectral characteristics of soil in Northern Yinchuan City, Ningxia Hui Autonomous Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(5): 123–129, 164. (in Chinese)