

马铃薯升华干燥过程中的仿真研究

张福建, 郭韵

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620

摘要:目的 为了了解马铃薯升华干燥效果和马铃薯的升华干燥时间, 优化冻干过程, 减少冻干能耗, 采用 COMSOL Multiphysics 软件对马铃薯切片进行模拟。方法 综合利用传热学、传质学和有关学科知识, 建立马铃薯切片在升华干燥过程中的物理模型和数学模型, 模拟马铃薯片的升华干燥过程。结果 冰质量与初始时刻冰质量之比随着干燥时间增加逐渐减少, 脱水速率随着干燥时间增加逐渐减小。考虑模拟忽略了蒸汽从切片四周流出的实际情况, 导致冰质量与初始时刻冰质量之比实际值小于模拟值, 脱水速率实际值高于模拟值。实际上升华干燥能除去马铃薯切片 85% 以上甚至 90% 以上的水分, 干燥效果较好。随着马铃薯切片厚度的增加, 马铃薯切片的升华干燥时间逐渐增大。马铃薯升华干燥时所处的冻干仓温度越高, 升华干燥完成时所用的时间越少。冻干仓压力越大, 马铃薯升华干燥时间越长。隔板温度越大, 马铃薯的升华干燥时间越短。结论 在对马铃薯进行冻干时, 应尽量增加冻干仓温度, 降低冻干仓压力, 增加隔板温度, 减小马铃薯厚度, 以降低马铃薯在冷冻干燥过程中的能耗。

关键词: 马铃薯切片; 升华干燥时间; 冻干能耗; 脱水速率

中图分类号: TS205 文献标识码: A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0003.004

Simulation Study on Sublimation Drying Process of Potatoes

ZHANG Fujian, GUO Yun

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: Objective In order to understand the sublimation drying effect and sublimation drying time of potatoes, optimize the freeze-drying process, and reduce energy consumption during freeze-drying, the COMSOL Multiphysics software was used to simulate potato slices. **Methods** By integrating knowledge of heat transfer, mass transfer, and related disciplines, a physical model and a mathematical model of potato slices during the sublimation drying process were established to simulate the sublimation drying process of potato slices. **Results** The ratio of ice mass to initial ice mass gradually decreased as the drying time increased, and the dehydration rate gradually decreased as the drying time increased. Considering that the simulation neglected the actual situation of steam flowing out from around the slices, the actual value of the ratio of ice mass to initial ice mass was lower than the simulated value, and the actual dehydration rate was higher than the simulated value. In fact, sublimation drying could remove over 85% or even over 90% of the moisture from potato slices, resulting in a good drying effect. As the thickness of potato slices increased, the sublimation drying time of potato slices gradually increased. The higher the temperature in the freeze-drying chamber during potato sublimation drying, the less time was needed for sublimation drying to be completed. The greater the pressure in the freeze-drying chamber, the longer the sublimation drying time of potatoes. The higher the temperature of the partition, the shorter the

收稿日期: 2023-02-17 修回日期: 2023-03-20 文章编号: 1672-058X(2024)03-0026-07

基金项目: 国家自然科学基金资助(51606116); 上海市科学委员会项目资助(19195810800)。

作者简介: 张福建(1996—), 男, 河南开封人, 硕士, 从事冷冻干燥研究。Email: 1665670417@qq.com。

通讯作者: 郭韵(1976—), 女, 教授, 硕士生导师, 从事新能源利用开发、能源经济等研究。Email: graceguo1980@126.com。

引用格式: 张福建, 郭韵. 马铃薯升华干燥过程中的仿真研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 26—32.

ZHANG Fujian, GUO Yun. Simulation study on sublimation drying process of potatoes[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(3): 26—32.

sublimation drying time of potatoes. **Conclusion** When freeze-drying potatoes, it is advisable to increase the temperature of the freeze-drying chamber, reduce the pressure in the freeze-drying chamber, increase the temperature of the partition, and decrease the thickness of the potatoes to reduce the energy consumption during the freeze-drying process.

Keywords: potato slices; sublimation drying time; freeze-drying energy consumption; dehydration rate

1 引言

真空冷冻干燥相比于传统的热干燥效果较好,且冷冻干燥制品复水性很强,能保持产品原来的色、香、味、营养等成分和原外观。传统的热干燥不仅会破坏物料内部结构,使物料在干燥过程中发生大的形变,而且高温可能会使物料中的营养成分分解,干燥效果比真空冷冻干燥差。但是不管热干燥和真空冷冻干燥都会消耗大量能量,所以为了更好地了解物料在真空冷冻干燥的时间,优化干燥过程,以减少物料在真空冷冻干燥时的能耗,本文拟对马铃薯的真空冷冻干燥进行模拟和优化。

马铃薯是生活中最常见的农产品之一,产量大且营养价值极高,被许多国家广泛种植,因此研究马铃薯的冷冻干燥时间和传热传质有重要意义。为了更好地了解马铃薯冷冻干燥时间,深入理解马铃薯冷冻干燥过程中的热质传递机理,需要通过数值模拟分析马铃薯在升华干燥过程中的传热传质^[1-3]。郭帅帅利用 COMSOL multiphysics 软件模拟了胡萝卜冷冻干燥过程中的相变过程,温度场、压力场,发现升华干燥过程中边缘位置吸热大于中间位置,在靠近升华前沿的部分,压力较高^[4]。J. Ravnik 等利用了一维小瓶近似法、时间步进的非线性迭代模型以及 Knudsen 的水蒸气扩散模型,计算了甘露醇水溶液在冷冻干燥中干燥层和冻结层间的热质传输,并表明了该模型能精确预测在干燥过程中物质的温度状态^[5]。有学者使用薄层干燥模型模拟物料的干燥时间,模拟干燥过程的传热传质^[6-8]。马青对冻干过程中的相变过程进行了数值模拟,分别对预冻过程、升华干燥过程、解吸干燥过程进行了数学描述,结论是在预冻过程中物料高度会对冰晶大小产生影响,干燥时间主要取决于升华过程,升华速率前期快于后期等^[9]。这些学者模拟了含湿多孔介质在冷冻干燥过程中的传热传质,冷冻干燥能除去 90% 左右的水分,模拟效果较好,模型适用于一般含湿多孔介质冷冻干燥。

材料的冷冻干燥过程中主要有冻结、升华、解析三个过程,其干燥阶段大多发生于升华过程,升华干燥能除去物料大部分水分,解析阶段主要是除去物料内部少量的吸附水和结合水,而结合水和吸附水占比很小。

升华干燥时间在某种意义上来说决定着冻干能耗,减少升华时间能减少冻干能耗。为了了解马铃薯升华干燥效果和马铃薯的升华干燥时间,优化冻干过程,减少冻干能耗,拟对马铃薯冷冻干燥过程中的升华干燥进行模拟研究。

马铃薯在冷冻干燥过程中主要发生热传递和湿传递,采用 COMSOL Multiphysics 软件对马铃薯切片进行模拟,综合利用传热学、传质学和有关学科知识,建立马铃薯切片在升华干燥过程中的物理模型和数学模型,模拟马铃薯片的升华干燥过程。在其他条件不变的情况下,分别对马铃薯在不同厚度、冻干仓温度、冻干仓压力、隔板温度等因素下进行升华干燥模拟,了解不同因素对升华干燥的影响程度,有利于提高冻干效率和减少冻干能耗。

2 模型建立

2.1 物理模型的建立

本文假设马铃薯切片在冻干机的环境下进行升华干燥模拟。市场上选择的新鲜马铃薯的初始含水率为 81.85% 左右,马铃薯的共晶点温度为 $-22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,一般预冷冻温度低于共晶点 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,所以选取马铃薯切片预冷冻温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10]。为了加快马铃薯的干燥,在不影响马铃薯冻干质量的情况下把冻干箱隔板温度提高到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度提高到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。以减少大量升华阶段的时间。

考虑模拟是连续性模拟,马铃薯内部具有各向同性,因此选取马铃薯圆柱一个过圆心的半截面来模拟马铃薯升华干燥过程中传热传质。图 1 采用 COMSOL Multiphysics 软件建立马铃薯切片物理模型,在模型开发器下面的几何中建立直径 50 mm 高 10 mm 的二维轴对称瞬态模型。同时加入了达西定律、多孔介质的传热、变形几何接口等。并在上述接口中建立了模型的初始状态和边界条件。用变形几何跟踪升华界面,计算耦合的质量平衡和热平衡。升华干燥模拟采用了干燥层和冷冻层方法,干燥初始先假设切片有一个微小的干燥层,厚度为 0.05 mm,并假设升华产生的蒸汽全部进入干燥层并通过上表面流出圆柱。如图 1 所示,上层为干燥层,下层为冷冻层,中间那条线代表升华界面。

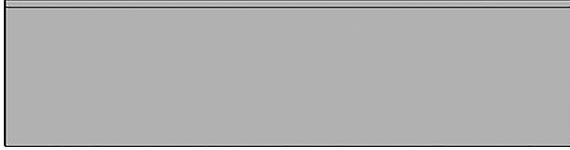


图 1 马铃薯切片物理模型

Fig. 1 Physical model of potato slices

2.2 传热传质模型的建立

为了简化模型,做出如下假设^[11-12]:将马铃薯切片假设为各向同性连续材料,假设马铃薯切片内部的初始温度和冰含量是均匀分布的;升华界面上水蒸气的浓度与冰平衡;冰升华后,形成的固体基质是可渗透的,允许蒸汽通过。

综合利用传热学、传质学和有关学科知识,建立马铃薯切片在升华干燥过程中传热传质的数学模型^[13-14]。

2.2.1 传热方程

在冷冻层没有对流,只有热传导,传热方程如下:

$$(\rho_1 C_{1,p}) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda_1 \nabla T) = 0$$

ρ_1 为冷冻层马铃薯切片的有效密度(kg/m^3), $C_{1,p}$ 为冷冻层马铃薯切片有效比热($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); λ_1 为冷冻层马铃薯切片的有效导热系数($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$); T 为马铃薯切片的温度(K), t 为干燥时间。

干燥层因蒸汽的扩散和渗透有传热和对流。传热方程如下:

$$(\rho_2 C_{2,p}) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_v C_{p,v} u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-\lambda_2 \nabla T) = 0$$

ρ_2 为马铃薯骨架和水蒸气混合的有效密度(kg/m^3), $C_{2,p}$ 为马铃薯骨架和水蒸气混合的有效比热($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); λ_2 为马铃薯骨架和水蒸气混合的有效导热系数($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$); ρ_v 为蒸汽密度(kg/m^3), $C_{p,v}$ 为蒸汽比热($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); u 是根据达西定律得到的速度。

在蒸汽域中,密度是用蒸汽的摩尔质量 M_v 和理想气体定律计算的:

$$\rho_v = \frac{M_v p_v}{RT}$$

其中, R 是通用气体常数。

假设相变边界上的热力学平衡,则升华前沿的温度 T_s 如下:

$$T_s = 2.19 \times 10^{-3} \frac{L_s}{(28.89 - \log(p_v))}$$

其中, L_s 是升华潜热, p_v 是相变边界上的蒸汽压。

升华界面处的干燥层和冷冻层温度相等,两边热流通过以下条件连接:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n} + V \rho_{s1} C_{1,p} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n} + V \rho_{s2} C_{2,p} T - L_s N_{v,n} - N_{v,n} C_{p,v} T$$

$$V_s = \frac{Q_s}{\rho_{ice} L_s}$$

其中, V_s 是升华界面速度(m/s); $N_{v,n}$ 为垂直升华方向的蒸汽通量($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$); Q_s 是界面处法向热通量的突变(J)。

2.2.2 传质方程

仅在干燥层有蒸汽的扩散和渗透,因此马铃薯切片传质仅发生在干燥层。传质方程为

$$\frac{\varepsilon M_v}{R} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p_{2,v}}{T} \right) + \nabla \cdot \vec{N}_v = -\rho_{2,p} \frac{C}{t}$$

其中, ε 是产品的孔隙率; $p_{2,v}$ 为干燥区水蒸气分压(Pa); $\rho_{2,p}$ 为干燥区多孔介质的密度(kg/m^3)。

根据质量传递和达西定律,能得到通过孔隙的蒸汽流率 Q_m 和质量通量 N_v :

$$\nabla \cdot \left(-\frac{\rho_v k}{\mu_v} \nabla p_v \right) = Q_m$$

$$N_v = \varepsilon \rho_{ice} V_s$$

其中, ρ_v 是蒸汽密度(kg/m^3); μ_v 是蒸汽动力黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$); p_v 是蒸汽分压(Pa); k 是干燥产品渗透率(m^3); ρ_{ice} 是冰的密度(kg/m^3)。

2.2.3 初始条件和边界条件

初始条件:

$$t=0, T=T_i=243.15 \text{ K}, p=p_c=24 \text{ Pa}$$

边界条件:

$$t>0, 0 < z \leq Z_0, T_a=303.15 \text{ K}, T_s=263.15 \text{ K}$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial t} + L_s Q_m = q_r + q_c + q_d$$

其中, p 为马铃薯表面压力(Pa); z 为升华界面位移(cm); q_r 、 q_c 、 q_d 分别为辐射、对流、导热换热量(J)。

2.2.4 热物性参数

马铃薯的导热系数计算公式^[15]如下:

$$\lambda = \rho \sum \frac{M_i^v}{\rho_i} \lambda_i$$

$$M_i^v = \frac{M \rho_i / \rho_i}{\sum (M_i / \rho_i)} = \frac{M_i}{\rho_i}$$

其中, M_i^v 为马铃薯各成分的体积分数(%); M_i 马铃薯各成分的质量(g); ρ_i 为马铃薯各成分的密度(kg/m^3);

λ_i 为马铃薯各成分的导热系数($W/(m \cdot K)$)。连续性模拟所需的主要物性参数如表 1 所示。

表 1 马铃薯的物性参数

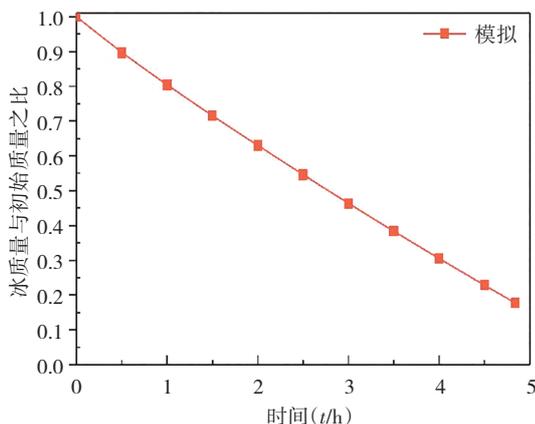
Table 1 Physical parameters of potatoes

参数名称	数值	单位
马铃薯导热系数 λ_p	0.52	$W/(m \cdot K)$
马铃薯密度 ρ_p	1 015	kg/m^3
马铃薯骨架比热 $C_{p,p}$	1 539	$J/kg/K$
升华潜热 L_s	2.79×10^6	J/kg
冰密度 ρ_{ice}	913	kg/m^3
冰比热 $C_{p,ice}$	1 967.8	$J/kg/K$
冰导热系数 λ_{ice}	2.1	$W/(m \cdot K)$
蒸汽的摩尔质量 M_v	18	g/mol
蒸汽比热 $C_{p,v}$	1 674.7	$J/kg/K$
蒸汽传热系数 λ_v	0.03	$W/(m \cdot K)$
蒸汽动力黏度 μ_v	8.36×10^{-6}	$Pa \cdot s$
真空室压力 P_c	24	Pa
切片初温 T_i	243.15	K
隔板温度 T_s	263.15	K
环境温度 T_a	303.15	K
孔隙率 ε	0.53	-

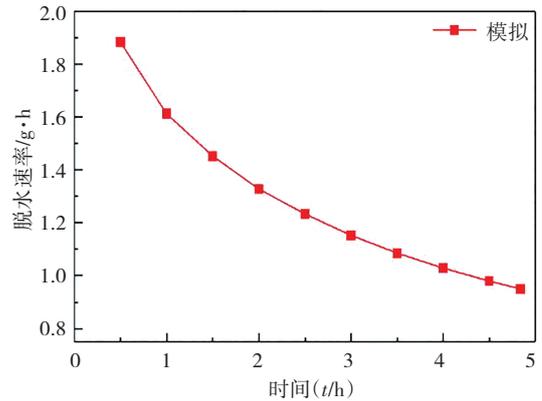
3 结果分析与讨论

3.1 干燥特性曲线

图 2 为马铃薯切片的升华干燥特性曲线,升华干燥总时长为 4.84 h。图 2(a)为冰质量与初始冰质量之比,由图可知冰质量与初始冰质量之比随着干燥时间逐渐减少,表明马铃薯切片的水分随着干燥时间增加逐渐减少。图 2(b)可知马铃薯切片脱水速率随着干燥时间的增加逐渐减小。随着升华干燥的进行,干燥层厚度逐渐增大,导致蒸汽通过干燥层流出马铃薯切片上表面的阻力增大,从而造成切片脱水速率减小。升华干燥过程中,由于升华界面不断下降,干燥层厚度逐渐增加,孔隙率增大,导致有效导热系数不断减少,从而导致冰质量与初始冰质量之比下降速度变缓。



(a) 冰质量与初始冰质量之比



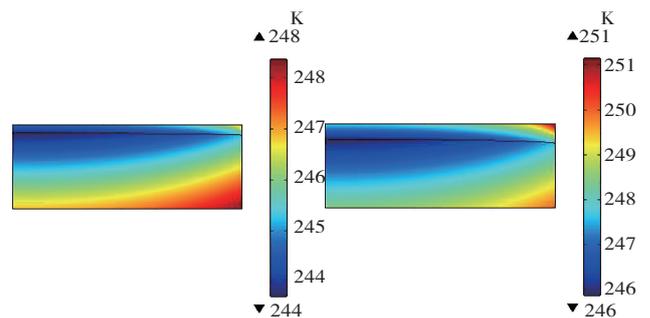
(b) 脱水速率

图 2 升华干燥特性曲线

Fig. 2 Characteristic curves of sublimation drying

张彤等^[13]通过对火龙果的实验和模拟分析得出火龙果含水率实验值比模拟值低,原因是模拟假设蒸汽全部从干燥层上表面流出切片,忽略了蒸汽从侧面流出切片的情况,而实验考虑了冰升华产生的蒸汽从侧面流出切片的情况,从而造成了火龙果含水率实验值比模拟值低,切片的脱水速率实验值大于模拟值。马铃薯的升华干燥模拟同样忽略了马铃薯切片升华出的蒸汽从侧面流出切片的情况,因此可以推出,马铃薯切片升华干燥后冰质量与初始冰质量之比实际值比模拟值低,脱水速率实际值大于模拟值。图 2(a)表明:升华干燥模拟除去了马铃薯切片 85%左右的水分,考虑实际情况,升华干燥模拟可以除去马铃薯切片 85%以上的水分甚至 90%以上水分,干燥效果较好。

图 3 为马铃薯切片在升华过程中的温度分布,马铃薯的温度随着升华时间的增加逐渐增加,中间那条白线代表升华界面。升华界面以下是冷冻层,以上是干燥层。升华界面是略微向上突起的曲面,这是因为隔板温度低于环境温度,在升华界面处,边缘位置吸热大于中间位置,导致中间位置的升华速度低于边缘位置,从而导致升华界面是四周低中间略高的曲面。



(a) 升华 0.5 h

(b) 升华 1 h

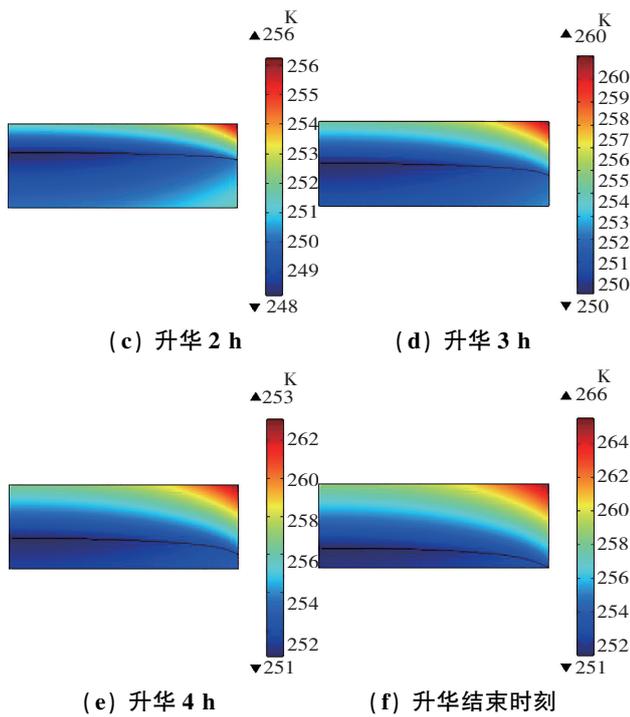


图 3 马铃薯切片温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of potato slices

图 4 为马铃薯切片在升华干燥过程中的压力分布。由图可知,蒸汽压力随着干燥时间增加逐渐增大,蒸汽压力主要在干燥层且由升华界面到干燥层上表面呈现递减的变化规律。图 4 中带箭头的线代表达西速度场,表明蒸汽在压力的作用下通过干燥层上表面流出马铃薯切片。

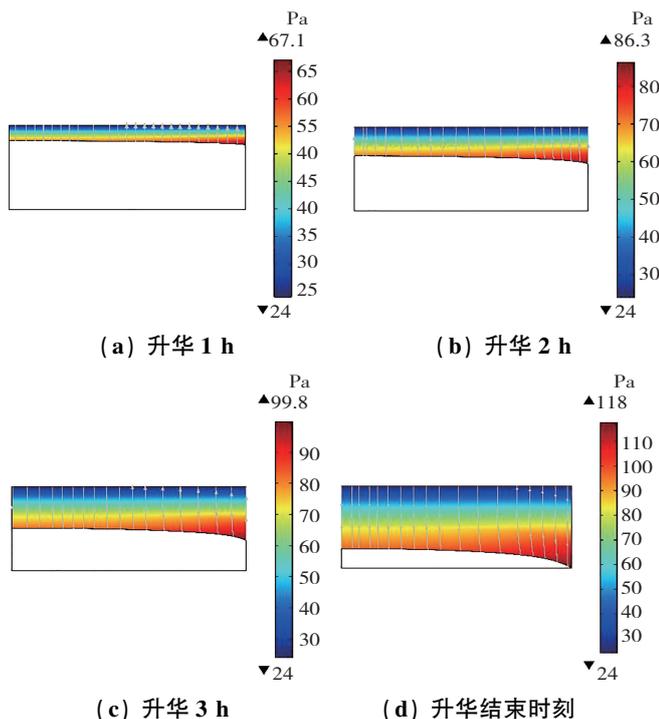


图 4 马铃薯切片压力分布

Fig. 4 Pressure distribution of potato slices

3.2 不同因素对马铃薯升华干燥的影响

马铃薯的厚度、冻干仓的环境温度、冻干仓压力、隔板温度等基本都会对马铃薯的升华速率产生影响。物料的冷冻干燥主要发生在升华干燥阶段,在升华阶段物料中的绝大部分水分会被除去。冻干机的加热系统和制冷系统等会产生大量的能耗,因此升华时间在某种意义上来说决定着冻干机的能耗,减少升华时间能减少冻干机能耗。在其他条件不变的情况下,分别对马铃薯在不同厚度、冻干仓温度、冻干仓压力、隔板温度等因素下进行升华干燥模拟,了解不同因素对升华干燥的影响程度,有利于提高冻干效率和减少冻干能耗。

3.2.1 不同厚度马铃薯切片升华周期

在预冻温度 243.15 K,压力 24 Pa,冻干仓温度 303.15 K,加热温度(搁板温度)263.15 K 的条件下,对不同厚度马铃薯进行升华干燥模拟,模拟结果如图 5 所示。随着马铃薯切片厚度的增加,马铃薯切片的升华干燥时间逐渐增大,马铃薯升华干燥所需要的能耗逐渐增大。所以在冷冻干燥过程中,应尽量减小马铃薯厚度,以起到节能的目的。

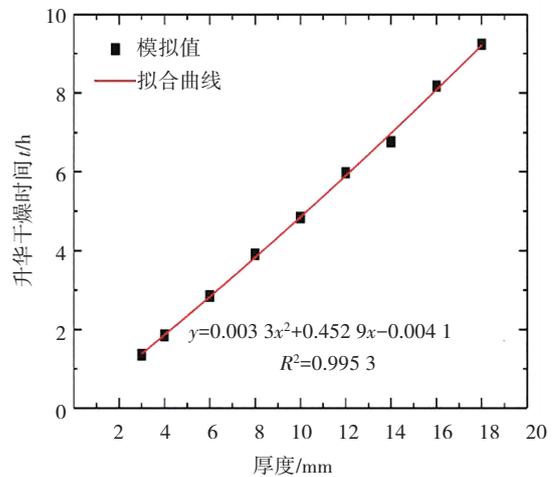


图 5 不同厚度的马铃薯切片升华干燥时间

Fig. 5 Sublimation drying time of potato slices with different thicknesses

3.2.2 环境温度对干燥时间的影响

在预冻温度 243.15 K,压力 24 Pa,马铃薯的厚度为 10 mm,加热温度(搁板温度)263.15 K 的条件下,以环境温度为变量,对马铃薯进行模拟,得到环境温度对干燥时间的影响。如图 6 所示,马铃薯升华干燥时所处的环境温度越高,升华干燥完成时所用的时间越少,升华干燥消耗的能量就越少。环境温度过高会影响马

铃薯干燥后的品质,因此环境温度不易过高。

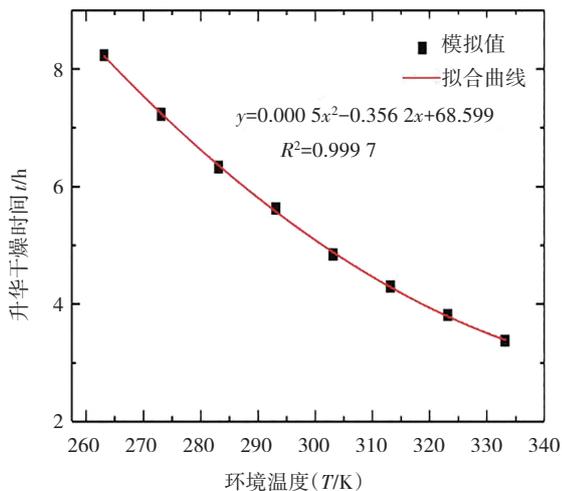


图 6 不同环境温度下的升华干燥时间

Fig. 6 Sublimation drying time at different ambient temperatures

3.2.3 冻干仓压力对干燥时间的影响

在马铃薯的预冻温度 243 K,环境温度 303.15 K,加热温度(搁板温度) 263.15 K,马铃薯厚度为 8 mm 的条件下,以冻干仓压力作为变量,对马铃薯进行升华干燥模拟,得到冻干仓压力对干燥时间的影响。如图 7 所示,随着冻干仓压力增大,马铃薯升华干燥时间增加,升华干燥消耗的能量就越多。原因是相变界面上水蒸气和冻干仓内气体的浓度差驱动着水蒸气流出马铃薯,冻干仓内的压力越高,冰升华的水蒸气流出马铃薯的驱动力越小,马铃薯升华干燥时间会越长。所以在冷冻干燥过程中,应尽量减小冻干仓压力,以起到节能的目的。

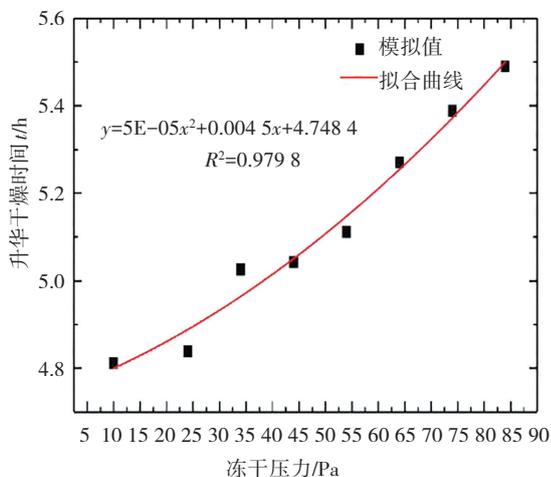


图 7 不同冻干仓压力下的升华干燥时间

Fig. 7 Sublimation drying time under different freeze-drying chamber pressures

3.2.4 搁板温度对干燥时间的影响

在马铃薯的预冻温度 243 K,环境温度 303.15 K,压力为 24 Pa,马铃薯厚度为 8 mm 的条件下,以加热温度(搁板温度)作为变量,对马铃薯升华干燥过程进行模拟,得出搁板温度对马铃薯干燥时间的影响。如图 8 所示,随着隔板温度的增加,马铃薯的升华干燥时间逐渐减少,升华干燥消耗的能量就减少。与环境温度的影响效果相比,搁板温度对升华时间的影响更大,所以升华过程中“热驱动力”主要来自于搁板对马铃薯的导热,相比之下,冻干仓对马铃薯的辐射换热的作用较小。所以在冷冻干燥过程中,应尽量增加隔板温度,以起到节能的目的。

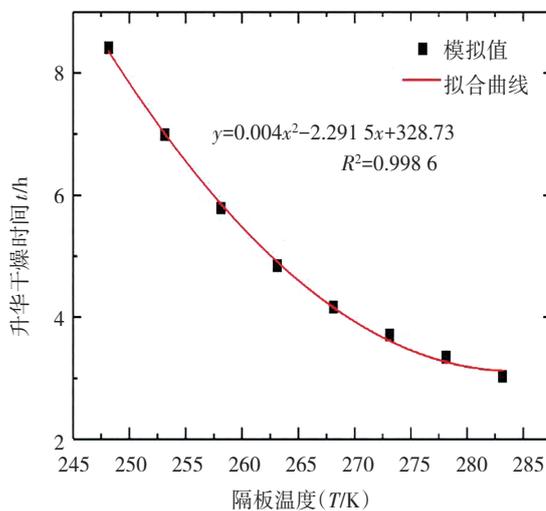


图 8 不同隔板温度下的升华干燥时间

Fig. 8 Sublimation drying time at different partition temperatures

除此之外,物料的预处理条件、冷阱捕水能力、预冻温度等因素也会对物料的升华速率产生影响。物料预冻的温度越低,升华速率就越快,物料预冻的温度越高,升华速率就越慢。冷阱捕水能力越好,冻干箱中就能保持一个较低的压强,升华速率就越快。

4 结论

(1) 采用 COMSOL Multiphysics version 5.6 软件对马铃薯升华干燥过程进行模拟。升华干燥总时长为 4.84 h。冰质量与初始时刻冰质量之比随着干燥时间增加逐渐减少,脱水速率随着干燥时间增加逐渐减小。考虑到模拟忽略了蒸汽从切片四周流出的实际情况,实际上升华干燥能除去马铃薯切片 85% 以上甚至 90% 以上的水分,干燥效果较好。

(2) 由于模拟只考虑了蒸汽从马铃薯切片干燥层上表面流出的情况,没有考虑蒸汽从切片四周流出的情况,导致冰质量与初始时刻冰质量之比实际值小于模拟值,脱水速率实际值高于模拟值。马铃薯的温度随着升华时间的增加逐渐增加,边缘位置吸热大于中间位置,导致中间位置的升华速度低于边缘位置,从而导致升华界面是四周低中间略高的曲面。

(3) 随着马铃薯切片厚度的增加,马铃薯切片的升华干燥时间逐渐增大。马铃薯升华干燥时所处的冻干仓温度越高,升华干燥完成时所用的时间越少。冻干仓压力越大,马铃薯升华干燥时间越长。隔板温度越大,马铃薯的升华干燥时间越短。因此,在对马铃薯进行冻干时,应尽量增加冻干仓温度,降低冻干仓压力,增加隔板温度,减小马铃薯厚度,以降低马铃薯在冷冻干燥过程中的能耗。

参考文献(References):

- [1] ATEEQUE M, UDAYRA J, MISHRA R K, et al. Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 78: 145—157.
- [2] ZHU A, SHEN X. The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 72: 345—351.
- [3] YUAN Y, ZHAO Z, XU Y, et al. Heat-mass transfer coupled with stress-strain model and simulation for vacuum shelling of chestnuts[J]. *Drying Technology*, 2013, 31(5): 527—534.
- [4] 郭帅帅. 冷冻干燥中传热传质过程的实验和数值模拟研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021.
GUO Shuai-shuai. Experimental and numerical simulation of heat and mass transfer in freeze drying[D]. Qingdao: Qingdao University, 2021
- [5] RAVNIK J, GOLOBIC I, SITAR A, et al. Lyophilization model of mannitol water solution in a laboratory scale lyophilizer[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2018, 45: 28—38.
- [6] GOYAL R K, O M, BHARGAVA V K. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of apple in tunnel dryer[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2011, 4(8): 1—16.
- [7] TZEMPELIKOS D A, VOUIROS A P, BARDAKAS A V, et al. Experimental study on convective drying of quince slices and evaluation of thin-layer drying models[J]. *Engineering in agriculture, environment and food*, 2015, 8(3): 169—177.
- [8] ALAM M S. Modeling of thin layer drying kinetics of grape juice concentrate and quality assessment of developed grape leather [J]. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014, 16(2): 196—207.
- [9] 马青. 冻干保存中相变传热过程的数值仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
MA Qing. Numerical simulation of phase transition heat transfer in lyophilized storage[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [10] 程远霞, 陈素芝, 朱文学, 等. 土豆冷冻干燥工艺的试验研究[J]. *食品科学*, 2005, 26(3): 113—116.
CHENG Yuan-xia, CHEN Su-zhi, ZHU Wen-xue, et al. Experimental study on freeze-drying technology of potato[J]. *Food Science*, 2005, 26(3): 113—116.
- [11] ADHAMI S, RAHIMI A, HATAMIPOUR M S. Comparison of quasi-steady-state and unsteady-state formulations in a freeze dryer modeling[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2014, 50(9): 1291—1300.
- [12] TRELEA I C, PASSOT S, FONSECA F, et al. An interactive tool for the optimization of freeze-drying cycles based on quality criteria[J]. *Drying Technology*, 2007, 25(5): 741—751.
- [13] 张彤, 余克志, 张得正. 火龙果真空冷冻干燥的模拟分析和实验研究[J]. *制冷学报*, 2022, 43(2): 142—150.
ZHANG Tong, YU Ke-zhi, ZHANG De-zheng. Simulation analysis and experimental study on vacuum freeze drying of Pitaya Fruit[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(2): 142—150.
- [14] YUAN Y, TAN L, XU Y, et al. Numerical and experimental study on drying shrinkage-deformation of apple slices during process of heat-mass transfer[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 136: 539—548.
- [15] POLLEY S L, SNYDER O P, KOTNOUR P. A compilation of thermal properties of foods[J]. *Food Technology*, 1980, 34(11): 76—94.

责任编辑:陈 芳