

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.030

多孔介质常压冷冻干燥质热耦合传递数值模拟

任广跃 张 伟 张乐道 段 续

(河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471023)

摘要: 以苹果片为研究对象,研究了基于涡流管制冷效应的常压冷冻干燥技术处理含湿冷冻多孔物料的干燥机制。利用 ANSYS ICEM CFD 软件对常压冷冻干燥工况建立二维几何模型并对其进行网格划分,采用多孔介质模型,通过有限体积法对控制方程进行离散,迭代求解不同风速和温度下冷冻物料内部水分比及中心温度随时间的变化。通过分析不同干燥工况下物质热传递变化得出最佳组合参数,研究该干燥条件下不同干燥时刻的速度场、温度场、压力场以及多孔介质干区迁移界面变化规律,并采用入口风速 2.5 m/s、辐射温度 283.15 K,对模型进行验证。借助 SPSS-21 软件对物料内部含水率与中心温度的试验值和模拟值进行相关性分析,其 R^2 分别为 0.564 和 0.982,表明试验值与模拟值有较好的一致性,所建模型适用于多孔介质的冷冻干燥。

关键词: 多孔介质; 苹果片; 常压冷冻干燥; 质热耦合

中图分类号: TS205.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0214-07

Numerical Simulation of Mass and Heat Transfer of Porous Media during Atmospheric Freeze Drying

Ren Guangyue Zhang Wei Zhang Ledao Duan Xu

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

Abstract: This research aims to explore the drying behaviors of the saturated frozen porous media during atmospheric freeze drying, which is based on the refrigeration of vortex tube. The experimental study to analyze heat and mass transfer in drying of apples was undertaken numerically. In the numerical part, a two-dimensional geometric model of atmospheric freeze drying conditions was constructed by using the software of ANSYS ICEM CFD, and the model was divided into meshes for the computational domain which can make the numerical simulation results clearer. The changes of moisture ratio and core temperature of frozen material was obtained through iterative solution, which was adopted the methods of porous jump model and the finite-volume method (FVM), under different conditions of inlet velocity and radiation temperature. The optimal combination of the parameters was got by means of analyzing the changes of mass and heat transfer of drying sample during different conditions. According to the simulation results of optimal parameters, heat and mass transfer for material can be investigated from velocity field, temperature field, pressure field and the migration of drying area in porous media under different time. In the experimental part, apple slices was applied to drying process. As expected, while drying condition was carried out at a wind speed of 2.5 m/s on the inlet and an irrational temperature of 283.15 K, experimental values are fitted with the simulated values. The correlation analysis was carried out between experimental and simulated value of material moisture ratio and core temperature through the SPSS-21 analysis software, the R^2 value was 0.564 and 0.982 respectively. Such a methodology could be reasonable for studying of freeze drying.

Key words: porous media; atmospheric freeze drying; mass and heat transfer

收稿日期: 2015-09-07 修回日期: 2015-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271972)

作者简介: 任广跃(1971—),男,教授,主要从事农产品干燥技术研究, E-mail: guangyueyao@163.com

引言

常压冷冻干燥 (Atmospheric freeze drying, AFD) 是指在常压或接近常压下, 对物料采取特定手段进行除湿, 使得物料周围低温空气中的水蒸气分压保持低于升华界面上饱和水蒸气分压的状态, 冷冻物料的水分得以升华, 冷冻干燥可以在常压下进行^[1-3]。与常规的真空冷冻干燥技术相比, AFD 具有成本低、能源消耗少的优点。

除湿是 AFD 技术的重要环节, 除湿方式关系到能源利用率和干燥时间长短。目前, 已有大量针对除湿方法的研究^[4-7]。AFD 过程中存在升华速率低、冰晶易融化等缺点。为了克服这些缺点, 研究者致力于基于吸附流化床、吸附固定床以及热泵原理的 AFD, 将超声波、微波和红外辐射作为热源或振动等机械的方式辅助 AFD 以加速水分升华速率, 缩短干燥时间^[8-11]。计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 能够解决复杂流体流动问题, 减少试验过程中参数优化的资源耗费。因此, 很有必要借助数值模拟的方法对系统特征进行求解^[12-14]。近年来, 有关学者^[15-17]将多孔介质看作一个钝体, 采用 CFD 对流场中物理量的变化进行模拟, 得到钝体表面对流热传递系数, 通过契尔顿-柯尔本类比方法求出对流质传递系数, 从而研究多孔介质干燥过程的质热传递。然而, 在食品干燥数值研究中, 很少有将物料与流场看作一个整体, 而且模拟大多是热风干燥, 冷风对冷冻物料的研究较少, 主要集中在对物料预冻过程现象的研究上^[18-20]。Li 等^[21]采用冰晶均匀退却模型 (Uniformly retreating ice front, URIF), 利用 CFD 模拟了多孔介质 AFD 相变过程和水蒸气在其中的扩散。但该研究是将纯冰板与多孔介质耦合在一起, 升华过程假设为纯冰板表面的升华, 水蒸气扩散过程看作是升华相变产生的水蒸气在多孔干燥物料中的扩散, 并没有将冰晶和多孔介质看作一个整体 (冰晶嵌入在多孔介质内部)。目前缺乏一种通过 CFD 将流场和冷冻物料结合起来的模拟方法。

本文以苹果片为研究对象, 采用有限体积法, 将流场和冷冻物料作为一个系统, 以等同于物料冷冻温度的低温液态水为介质, 对模拟过程分为 2 部分同时进行: 一部分是物料内部的低温液态水汽化为水蒸气 (试验过程中为冰晶升华为水蒸气); 另一部分是蒸发的水蒸气扩散至物料外部气流场中, 直至物料内部水蒸气体积分数达到 0.1 以下, 此时的物料达到所需的干燥含水量。使用多孔介质模型模拟苹果片 AFD 过程的质热传递, 并将试验结果与模拟

结果进行对比, 验证模型的正确性和模拟方法的可行性, 为食品类多孔介质的干燥提供理论依据。

1 模型的建立

1.1 物理模型

图 1a 为 AFD 工作原理图。空气经压缩机由低压气体转变为高压气体; 在冷干机的作用下将压缩空气与制冷剂进行热交换, 空气中大部分水蒸气冷凝析出, 根据变压吸附原理, 利用吸附剂除去剩余的水蒸气和其他杂质, 从而得到纯净绝干的空气; 干空气进入恒温水槽, 在搅拌器推动下, 使干空气经蒸发器和加热器热交换后达到适合的温度, 并保证空气温度均匀, 以减少进入涡流管时空气温度的波动; 高压空气进入涡流管的喷嘴, 高速气流沿切线方向形成自由漩涡, 角速度的不同使气流产生分层, 中心部分气流角速度最大, 其在向外层角速度较低的气流传递能量的同时失去能量, 动能、速度和温度随之降低, 从而将气体分离成两股气流, 一股为冷气流, 另一股为热气流, 冷气流从入口进入干燥仓; 物料在冷气流对流传热、远红外卤素辐射板加热以及铝制导热盘导热的作用下进行质热传递, 从出口流出的热气流可以用作其他用途; 干燥仓内气流和物料内部蒸发的水蒸气随着干燥仓的出口流出^[22]。

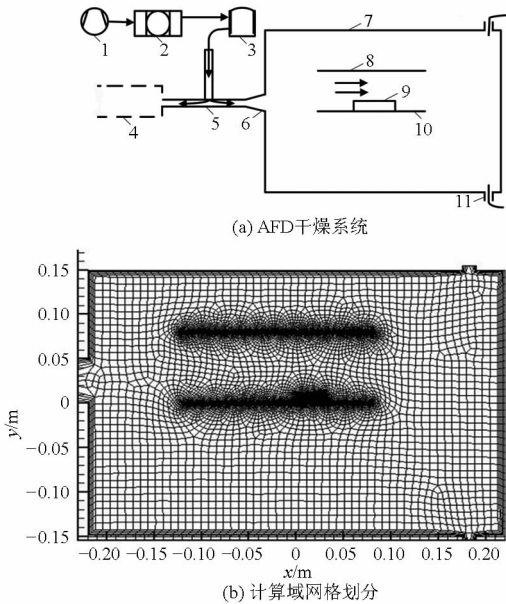


图1 AFD干燥系统和计算域网格划分

Fig. 1 AFD drying system and computational domain mesh

1. 压缩机 2. 冷干机 3. 恒温水槽 4. 热气流出口 5. 涡流管
6. 气流入口 7. 干燥仓 8. 辐射板 9. 物料 10. 导热盘 11. 气流出口

干燥仓尺寸(长×宽×高)为0.44 m×0.3 m×0.3 m, 苹果片尺寸(长×宽×高)为0.03 m×0.01 m×0.01 m, 并置于干燥仓中心位置, 物料能够充分暴露于冷空气和热辐射环境中。采用 ANSYS ICEM CFD

建立二维几何模型,运用非结构化四面体网格进行网格划分,在辐射板、导热盘和物料周围采用加密处理,以适应分析的精细度要求,整个计算域共划分网格节点数 25 655 个,网格单元 25 709 个。如图 1b 所示。

1.2 数学模型

基于连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程,建立二维非稳态流场和多孔介质区域的控制方程。为便于计算,作如下假设:仓体壁面绝热且仓体密封性良好;仓内气体视为牛顿流体,物料视为多孔介质;物料的热物性是稳定的,不随温度的变化而变化;不考虑物料干燥过程中物料的收缩和变形;物料内部初始含水率和温度是均匀的;忽略物料内部孔道的具体分布;气相和液相均为不可压缩流体且为连续相,相间发生质量、动量和热量传递,且流动为层流。

该文采用基于有限体积法的 ANSYS 16.0 软件进行计算,其控制方程在 N - S 方程基础上,结合 VOF 多相流模型和 Realizable $k - \varepsilon$ 输运模型进行求解。流场控制方程如下:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \tag{2}$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \tag{3}$$

蒸汽相连续性方程

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \mathbf{u}_v) = \frac{1}{\rho_v}(\dot{m}^- - \dot{m}^+) \tag{4}$$

气相连续相方程

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \mathbf{u}_g) = 0 \tag{5}$$

其中,气、汽、液体积分数所占比例应满足

$$\alpha_l + \alpha_v + \alpha_g = 1 \tag{6}$$

其物性方程为

$$\rho = a_l \rho_l + a_v \rho_v + a_g \rho_g \tag{7}$$

式中 ρ ——流体混合物密度

t ——干燥时间 μ ——动力粘度

$\mathbf{u}$ ——流速 p ——压力 $\mathbf{g}$ ——重力

$\mathbf{F}$ ——其他阻力 E ——总能量

k_{eff} ——有效热导率 T ——温度

S_h ——包括所有体积热源的源项

α_l ——液体体积分数

α_v ——汽体体积分数

α_g ——气体体积分数

ρ_l ——液体密度 ρ_v ——汽体密度

ρ_g ——气体密度

$\dot{m}^-$ ——相变中减少的质量

$\dot{m}^+$ ——相变中增加的质量

试验物料为苹果片,引入多孔介质模型。多孔介质作为流场中的一个动量源项。源项主要包括两部分:粘性损失项和惯性损失项。该项能够影响多孔介质区域的压力梯度。

动量源项方程

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}| u_i \right) \tag{8}$$

式中 α ——多孔介质的渗透性

C_2 ——惯性阻力因子

$\mathbf{u}$ ——速度

u_i ——垂直于多孔介质表面的速度分量

能量控制方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma \rho_f E_f + (1 - \gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho_f E_f + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + \bar{\tau} \mathbf{u}) + S_f^h \tag{9}$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \tag{10}$$

式中 γ ——多孔介质的孔隙率

$\bar{\tau}$ ——粘性应力张量

下标 f 表示流体,包括汽体和气体, s 表示多孔介质的骨架。

1.3 初始条件和边界条件

初始条件和边界条件如表 1 所示。

2 模拟结果及分析

2.1 入口风速对物料质热传递的影响

在入口干空气温度为 263.15 K、辐射板温度为 283.15 K、辐射强度为 4 W/cm² 条件下,入口空气风速不同(1.5 m/s、2.5 m/s、3.5 m/s)时,物料内部水分含量变化和物料中心温度的变化趋势如图 2 所示。

图 2a 为不同风速下物料内部水分和水蒸气含量的变化。线型表示物料内部水分含量变化,“线型 + 符号”表示水蒸气生成量,它们的斜率分别表示物料内部水分含量变化速率和水蒸气生成速率。在干燥开始的 30 min 内,3 个风速下物料内部水分均急剧下降且呈线性趋势,下降速率差别较小;3 个风速下水蒸气生成量迅速增加,水蒸气生成速率随着风速的增大而减小。随着干燥过程的进行,当干燥时间大于 30 min 时,水蒸气生成量先增加后减少,

表 1 初始条件和边界条件

Tab.1 Initial and boundary condition	
初始条件	物料初始温度 253.15 K,含水率 84% ;
	空气温度 263.15 K; $t=0,u=0$
入口边界	空气温度 263.15 K;
	干空气速度 1.5 m/s、2.5 m/s、3.5 m/s;
	气流密度 1.342 kg/m ³ ;
	动力粘度 1.65 × 10 ⁻⁵ Pa·s;
出口边界	导热率 $\lambda=220\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
	压力出口;表压为 0
壁面边界	固定壁面无滑移边界条件;
	绝热边界条件
辐射板边界	温度 283.15 K、288.15 K、293.15 K;
	辐射强度 4 W/cm ²
导热盘边界	铝;壁面无滑移边界条件,耦合传热
	苹果片孔隙率 $\varepsilon=0.7$; $\rho=1\,600\text{ kg}/\text{m}^3$;
多孔介质边界	$C_p=1\,810\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; $\lambda=0.78\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
	渗透率 $1/\alpha=583\,090$;
	惯性阻力 $C_2=204.08$;
	冻结潜热 291 kJ/kg;多孔介质物料与气流界面为
	自由界面,自由界面与计算域的初始条件为一个整体

最大值与风速相关但都小于 1,这是因为水分升华过程中,物料表面的水蒸气在压力差的作用下先扩散至干燥仓中被气流带走,水蒸气达到峰值时,此时物料内的水分大部分已蒸发为水蒸气。3 个风速下水蒸气的体积分数几乎都在干燥 60 min 时达到峰值,其峰值随着风速的增大而减小且减小量相等,这是因为在相同温度下,增大介质风速,能够降低水蒸气浓度,增强由表面向外部对流扩散的驱动力。当干燥时间达到 170 min 时,水蒸气体积分数下降至 0.3 左右,物料含水率则无限接近于 0。干燥时间达到 220 min 后,水蒸气生成量先增加后减少,增加的量较少。这是由于在干燥过程中,较少的水蒸气可能还未获得足够的能量向外扩散或者未被气流带走就已经冷凝,而此时气流场比较稳定,在风速较小的情况下,物料受辐射温度影响较大,通过吸收能量而再次蒸发。当水分比达到 0.1 时干燥结束。因此,从图 2a 中还可以看出,增大入口风速整体上可以缩短干燥时间。

图 2b 为不同风速下物料中心温度的变化趋势。在干燥初始阶段,干燥时间小于 60 min 时,物料中心温度由 253.15 K 迅速升至 278 K 左右。这与水的导热系数远大于干空气的导热系数以及此时气流场处于较强烈的非稳定状态有关。当干燥时间大于 60 min 时,物料中心温度随着风速的增大而减小,其减小量较小,这是因为风速的大小直接影响水蒸气的扩散,风速越大,干空气的动量越大,越易带走物

料上部的热量并推动其向干燥仓右侧移动,能被物料吸收的热量变少。不同风速下的物料中心温度在干燥 60 min 时基本趋于稳定,这与水蒸气含量在此时达到峰值并开始下降有关。

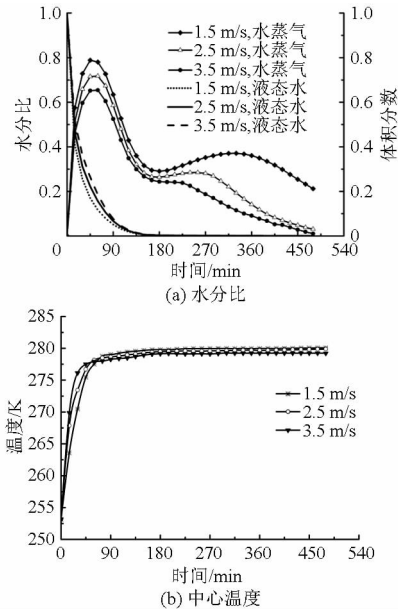


图 2 不同入口风速下物料内部水分比和中心温度随时间变化曲线

Fig.2 Change curves of moisture ratio and core temperature with t for various inlet velocities

2.2 辐射温度对物料质热传递的影响

在入口干空气温度为 263.15 K、空气风速为 2.5 m/s、辐射强度为 4 W/cm² 条件下,辐射温度不同(283.15 K、288.15 K、293.15 K)时,物料内部水分含量变化及中心温度的变化如图 3 所示。图 3a 为不同辐射温度下物料内部水分和水蒸气含量变化。在物料干燥开始的 30 min 内,3 个温度下水分含量下降速率和水蒸气生成速率基本相同。随着干燥过程进行,水分含量下降速率和水蒸气生成速率逐步减小,辐射温度为 288.15 K 和 293.15 K 时水分下降速率差别不大。当干燥时间达到 60 min 时,水蒸气体积分数最大且这个最大值随着温度的升高而增加。主要是因为在入口空气风速不变的情况下,提高温度有利于加快水分蒸发速率;其次,温度升高,物料上部空气分子运动剧烈程度增加,使周围的空气密度相对减小,风速最大值分布与干燥物料的距离缩短,且在 288.15 K 和 293.15 K 下物料迎风面(左侧)处会发生小范围的回流,使得物料迎风面处的水蒸气扩散速率逐步减小,物料内部干区面积随之减小,水蒸气能够得到短暂的保留。当干燥时间大于 60 min 时,3 个温度下的水蒸气体积分数迅速下降,在 170 min 至 260 min 之间有较小的上升幅度,此时物料内部水分已无限接近于 0。这可能

与冷凝的水蒸气重新生成有关,干燥后期,物料受辐射温度的影响较大,少量的冷凝水生成水蒸气,该解释如图 2a 所示。从图 3a 还可以看出,辐射温度为 283. 15 K 时,水蒸气下降速率较快,主要因为辐射温度与气流温度相差越大,冷凝越容易发生。

图 3b 为不同辐射温度下物料中心温度的变化

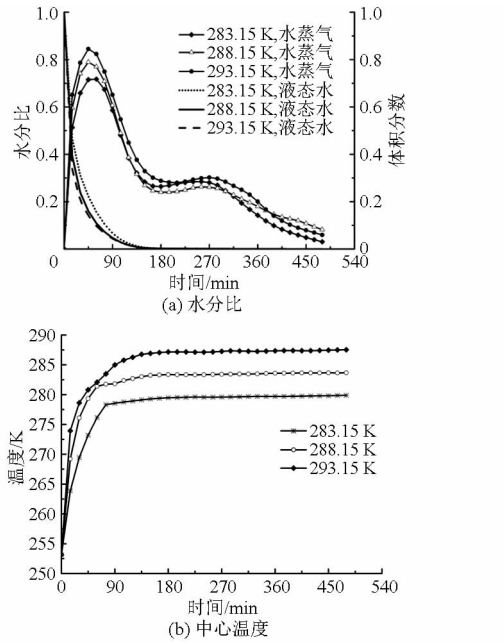


图 3 不同辐射温度下物料内部水分比和中心温度随时间变化曲线
Fig. 3 The variation of moistureratio and core temperature with t for various radiation temperature

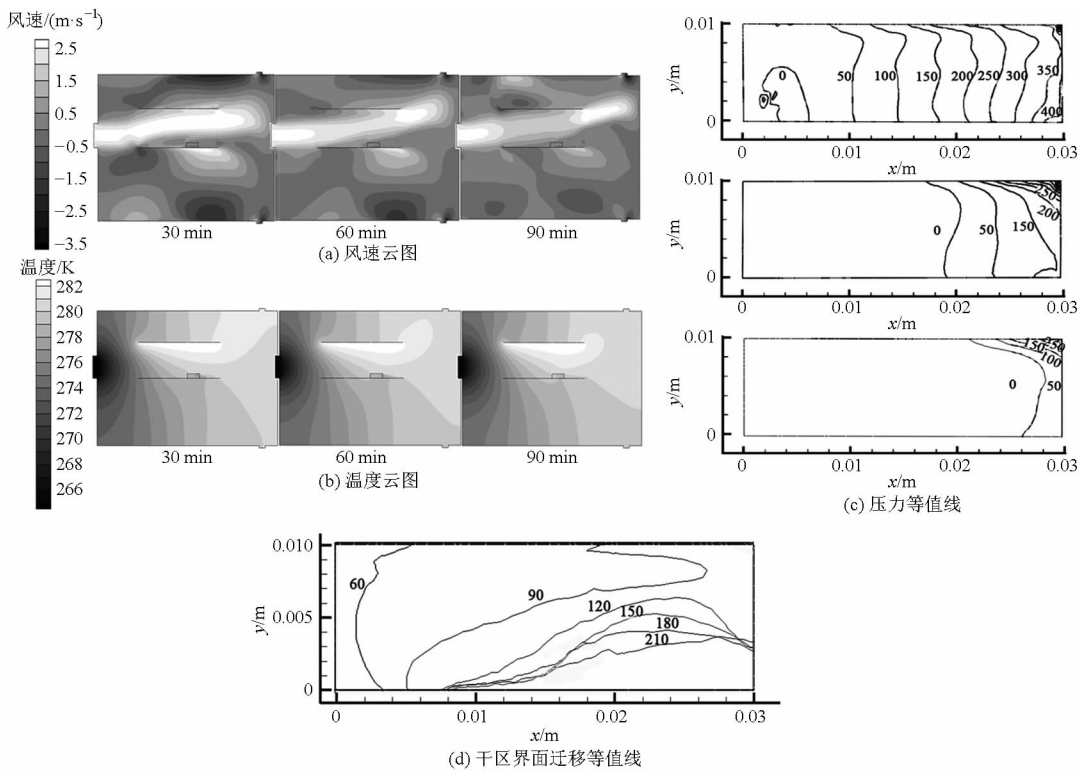


图 4 不同干燥时间下的等值线图和多孔介质内部干区界面的迁移等值线图
Fig. 4 Contour map in different drying time and migration contour map of drying area in porous media

趋势。当干燥时间小于 90 min 时,物料中心温度随着干燥的进行迅速上升,即物料中心温度由初始温度 253. 15 K 上升至最大值,该最大值与辐射温度有关,随着辐射温度的升高而增加。这与温度升高、热传递系数增加、物料内能增加、中心温度随之增加有关。随着干燥过程的进行,物料中心温度基本保持恒定,呈现等差增长趋势。

2. 3 流场和多孔介质区中物理量随时间的变化

当入口干空气温度 263. 15 K、风速 2. 5 m/s、辐射板温度 283. 15 K、辐射强度 4 W/cm² 时,模拟得到不同干燥时间下干燥仓内速度场、温度场和压力场迁移等值线图,以及多孔介质区干区迁移等值线图,如图 4 所示。

图 4a 为干燥时间 30 min、60 min 和 90 min 下干燥仓内速度场分布云图。在干燥过程中,风速和温度之间相互影响。随着干燥时间的增加,在物料上部及辐射板下部区域,速度最大值的分布由区域偏中心位置向两侧移动,中心区域的速度梯度逐渐减小。图 4b 为 3 个干燥时间下干燥仓内温度场分布云图。与图 4a 中所指区域相对应,随着干燥过程的进行,温度最大值的分布与干燥物料间的距离缩短,且在 281 ~ 282 K 温度范围内距离缩短的更加显著。图 4c 为 3 个干燥时间下多孔介质内部压力场分布等值线图。风速和温度共同影响着多孔介质区内部压力的分布,在干燥时间为 30 min 时,物料内部压

强从左侧(迎风面)向右侧(背风面)推进,且压力梯度呈现较一致的纵向平行分布,这是由于物料迎风面受到风速高于背风面,气流带动辐射热量向物料的背风面移动,使得迎风面吸收的辐射能小于背风面,致使温度也小于右侧。干燥时间为 60 min 和 90 min 时,压力梯度等值线集中在物料的右上侧,这可能与该处温度较高有关。图 4d 为 6 个干燥时间(60、90、120、150、180、210 min)下多孔介质干区迁移等值线图。在速度场、温度场以及压力场的推动下,物料内部水蒸气逐渐向右下侧推进,这是因为物料迎风面和其上表面充分暴露在流场中,受风速和温度的影响比较大,更易于进行质量和热量传递,因此物料干燥区域的迁移方向朝向右下侧移动^[17,23]。

3 模型验证

3.1 试验材料与设备

试验用物料为苹果,购于洛阳当地超市,选择果实硕大、果形端正、色泽鲜艳、肉质致密、含水率较高、无损伤的新鲜水晶富士苹果。试验之前,将苹果清洗、去皮处理,切成 0.03 m × 0.01 m × 0.01 m 的苹果片 3 组作为样品。为防止苹果褐变,尽快将其放入设定好的冰箱冷冻室(−253.15℃)预冻 1 h,以备试验。

搭建的基于涡流管制冷的常压冷冻干燥设备如图 1a 所示。压缩机为往复风冷移动式 V0.6 型(福建泉州杰霸机电集团有限公司);冷干机为 HF-1.5H 型(临安汇发机械设备有限公司);低温恒温水槽为 CCTB-1/2 型(上海华岩仪器设备有限公司);VAIR 涡流管为 VC62010-G-S 型(上海寄亚机电模具科技有限公司);干燥仓、内部构件及在线控制系统显示屏均为实验室定制。

3.2 试验方法

采用由模拟方法分析得出的最优参数组合进行试验验证。放入物料之前,将设备按照正常的流程打开,使干燥仓内的温度达到 263.15 K,当显示屏显示仓内温度达到 263.15 K 时,维持 5 min,立即关闭设备;放入提前冷冻好的物料后,开启设备,设置入口风速为 2.5 m/s,入口温度为 263.15 K,辐射温度为 283.15 K,苹果片温度为 253.15 K(预冻温度),开始试验。整个试验过程中空气为绝干洁净状态。在该试验条件下做 3 次平行试验取平均值,绘制出物料水分比和内部中心温度随时间变化的曲线图。

3.3 测定指标

(1)含水量的称量:采用每 30 min 称量一次,记录水分含量的变化,将所得的数据用水分比

(Moisture ratio, MR) $M_R^{[24]}$ 表示。计算公式为

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \tag{11}$$

式中 M —— t 时刻物料干基含水率
 M_e ——物料平衡干基含水率
 M_0 ——物料初始干基含水率

(2)物料中心温度测量:采用 FLIR i7 型手持红外热像仪探测器(FLIR, Forward Looking Infrared Radar, 美国 FLIR Systems 公司),FLIR 开机后对准目标对象,定位物料中心坐标(0.015 m, 0.005 m),并测量温度,每 30 min 测量一次,记录温度的变化。

3.4 数据处理

采用 SPSS-21 软件对模拟值和试验值进行相关性分析($P \leq 0.05$)。

3.5 结果分析

图 5 是模拟值与试验值的对比。图 5a 中,在干燥开始的 60 min 内,试验结果显示物料内部水分呈现下降趋势,模拟结果显示水蒸气含量急速上升,这与模拟过程中物料内部的水分先行蒸发为水蒸气有关。当干燥时间大于 60 min 时,物料内部水分比的试验值和模拟值整体上都呈现下降趋势。模拟结果中的水蒸气体积分数变化在 140 min 至 270 min 间略微上升,但并不影响物料干燥过程的进行。从图中还可以看出,干燥过程主要发生在降速干燥阶段,该结果与多种食品的干燥情况相似^[25-26]。图 5b 中,在干燥 160 min 之内,物料中心温度均呈现迅速上升趋势,但模拟值和试验值有一定的偏差,偏差较

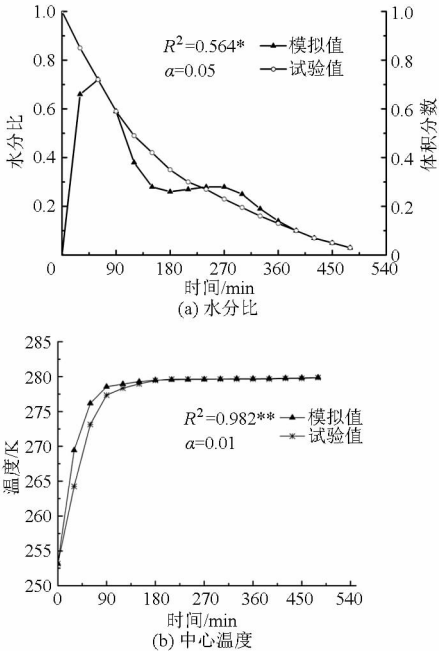


图 5 物料内部水分比和中心温度随时间变化曲线
Fig.5 Change curves of moisture ratio and core temperature with time

小;随着干燥过程的进行,模拟值和试验值几乎处于一条水平线上。此外,物料干燥过程中内部水分比和中心温度变化的模拟值与试验值显著相关,相关性分别为 $\alpha = 0.05$ 和 $\alpha = 0.01$ 。由此得出,采用多孔介质模型,对苹果片进行 AFD 的热质传递研究是合理的。

4 结 论

(1)根据多孔介质在常压冷冻干燥过程发生的多物理场变化,运用流体力学的基本原理建立了干燥仓内流体和多孔介质苹果片干燥过程的能量、动量和质量传递方程。

(2)对苹果片采用多孔介质模型,由 ANSYS 模拟出不同风速和温度下干燥仓内苹果片的水分比及中心温度变化。结果发现:风速的增加,能够提高干

燥速率,加快水蒸气的扩散,从而缩短干燥时间;增加辐射温度能够提高水分蒸发生成水蒸气的速率,对物料内部中心温度影响较显著,但对于干燥时间的影响不大。

(3)根据模拟结果,结合实际情况,选取较优的参数组合,即入口风速为 2.5 m/s ,辐射温度为 283.15 K 下,模拟得到干燥仓内物理场和多孔介质内部干区迁移在不同干燥时间的变化,并对模型进行试验验证。结果发现:模拟值和试验值吻合较好。在试验过程中,增大入口风速能使物料发生位移,提高辐射温度会增加物料组织结构的收缩程度以及降低品质,因此较优的参数组合,应该结合多方面因素进行考虑。同时,也验证了该数学模型的可行性和合理性,干燥方法的正确性,为更直观、更形象地探索常压冷冻干燥提供了新思路和新方法。

参 考 文 献

- 1 任广跃,李晖,段续,等.常压冷冻干燥技术在食品中的应用研究[J].食品研究与开发,2013,34(18):119-122.
- 2 CLAUSSEN I C, USTAD T S, STRMMEN I. Atmospheric freeze drying-a review [J]. *Drying Technology*, 2007, 25(6): 947-957.
- 3 BANTLE M, KOLSAKER K, EIKEVIK T M. Modification of the Weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food[J]. *Drying Technology*, 2011, 29(10):1161-1169.
- 4 BUBNOVICH V, REYES A, QUIJADA E, et al. Numerical simulation of lyophilization of carrot slices at atmospheric pressure in a fluidized bed[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012,109(4): 659-667.
- 5 CLAUSSEN I C, ANDRESEN T, TRYGVE M, et al. Atmospheric freeze drying-modeling and simulation of a tunnel dryer[J]. *Drying Technology*, 2007, 25(12):1959-1965.
- 6 STAWCZYK J, LI S, WITROWA-RAJCHERT D, et al. Kinetics of atmospheric freeze-drying of apple[J]. *Transport in Porous Media*, 2007, 66(1-2):159-172.
- 7 DUAN X, DING L, REN G Y, et al. The drying strategy of atmospheric freeze drying apple cubes based on glass transition[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2013, 91(4):534-538.
- 8 MICHAEL B, EIKEVIK T M. Parametric study of high-intensity ultrasound in the atmospheric freeze drying of peas[J]. *Drying Technology*, 2011, 29(10):1230-1239.
- 9 SANTACATALINA J V, FISSORE D, C  RCEL J A, et al. Model-based investigation into atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 151:7-15.
- 10 EIKEVIK T M, ALVES-FILHO O, MICHAEL B, et al. Microwave-assisted atmospheric freeze drying of green peas: a case study[J]. *Drying Technology*, 2012, 30(14):1592-1599.
- 11 RAHMAN S M A, MUJUMDAR A S. A novel atmospheric freeze-drying system using a vibro-fluidized bed with adsorbent[J]. *Drying Technology*, 2008, 26(4):393-403.
- 12 SUN D W, HU Z H. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2003, 26(1):19-27.
- 13 XIA B, SUN D W. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 34(1-3):5-24.
- 14 KURIAKOSE R, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(8):383-398.
- 15 TZEMPELIKOS D A, MITRAKOS D, VOUIROS A P, et al. Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 156:10-21.
- 16 KAYA A, AYDIN O, DINCER I. Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 88:323-330.
- 17 ATEEQUE MD, UDAYRAJ, 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.
- 18 姚智华,郭玉明.胡萝卜冷冻干燥预冻过程温度场的三维数值模拟[J].现代食品科技,2014,30(2):165-169.

Indian Journal of Chemical Technology, 1998, 5(6): 393 – 396.

14 SALVIA-TRUJILLO L, ROJAS-GRAU A, SOLIVA-FORTUNY R, et al. Physicochemical characterization and antimicrobial activity of food-grade emulsions and nanoemulsions incorporating essential oils[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 547 – 556.

15 LIU J, RU Q, DING Y. Glycation a promising method for food protein modification: physicochemical properties and structure, a review[J]. Food Research International, 2012, 49(1): 170 – 183.

16 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 荔枝果皮色差 a^* 值与其他品质指标的关联性[J]. 现代食品科技, 2014, 30(10): 68 – 73.

GUO Jiaming, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Relationship between color index a^* value and other quality indicators of litchi pericarp during storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(10): 68 – 73. (in Chinese)

17 阮文琉, 刘宝林, 宋晓燕. 荔枝的冷却方式选择[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 352 – 353.

RUAN Wenliu, LIU Baolin, SONG Xiaoyan. Comparion of cooling method for litchi fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(11): 352 – 353. (in Chinese)

18 陈洪国, 王育林, 彭永宏. 冷藏荔枝货架期品质与生理变化[J]. 亚热带植物科学, 2001, 30(3): 11 – 15.

Chen Hongguo, Wang Yulin, Peng Yonghong. Shelf-quality and physiological indices of litchi subjected to cool storage[J]. Subtropical Plant Science, 2001, 30(3): 11 – 15. (in Chinese)

19 ZHANG Z, PANG X, JI Z, et al. Role of anthocyanin degradation in litchi pericarp browning[J]. Food Chemistry, 2001, 75(2): 217 – 221.

20 罗静, 田丽萍, 张超, 等. 加工番茄果实硬度与相关性状间的分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 217 – 220.

LUO Jing, TIAN Liping, ZHANG Chao, et al. Analysis of firmness and related characters of processing tomato[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(28): 217 – 220. (in Chinese)

21 SAHOOLIZADEH A H, HEIDARI B Z, DEGHANI C H. A new face recognition method using PCA, LDA and neural network [J]. International Journal of Computer Science and Engineering, 2008, 2(4): 218 – 223.

22 QIU S, WANG J, GAO L. Discrimination and characterization of strawberry juice based on electronic nose and tongue; comparison of different juice processing approaches by LDA, PLSR, RF, and SVM [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(27): 6426 – 6434.

(上接第 220 页)

19 赵春江, 韩佳伟, 杨信廷, 等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 168 – 173.

ZHAO Chunjiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. Numerical simulation of temperature field distribution in refrigerated truck based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 168 – 173. (in Chinese)

20 彭润玲, 刘长勇, 徐成海, 等. 生物材料冻干过程分形多孔介质传热传质模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 318 – 322.

PENG Runling, LIU Changyong, XU Chenghai, et al. Simulation of heat and mass transfer in fractal porous media during freeze drying of biological materials[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 318 – 322. (in Chinese)

21 LI S, STAWCZYK J, ZBICINSKI I. CFD model of apple atmospheric freeze drying at low temperature[J]. Drying Technology, 2007, 25(7 – 8): 1331 – 1339.

22 任丽影, 任广跃, 杨晓童, 等. 涡流管制冷常压冷冻干燥怀山药[J]. 食品科学, 2015, 36(20): 7 – 12.

23 MOHAN V P C, PRABAL T. Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(21 – 22): 4638 – 4650.

24 OZTOP H F, AKPINAR E K. Numerical and experimental analysis of moisture transfer for convective drying of some products [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(2): 169 – 177.

25 AKPINAR E K, BICER Y, CETINKAYA F. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 308 – 315.

26 ZHU A S, SHEN X Q. The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72: 345 – 351.