

土豆对流干燥过程中温度场的数值模拟

缪丽华, 范小平, 胡晓露, 向红, 周家华

(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘要: 根据土豆切样在对流干燥过程中发生的物理变化, 基于费克第二扩散定律和傅立叶定律, 建立了对流干燥系统传质传热过程的数学模型以及几何物理模型, 并利用有限元数值模拟方法对干燥过程中土豆切样内部的瞬态温度场及其影响因素进行了仿真预测。最后, 设计并采用对流干燥实验对数值模拟得到的代表性结果进行了验证, 结果表明实验值与模拟值在趋势上表现了较好的一致性。

关键词: 对流干燥; 土豆; 数学模型; 温度场; 数值模拟

文章编号: 1673-9078(2013)1-42-46

Numerical Simulation of Temperature

Profiles during Convective Drying of Potato

MIAO Li-hua, FAN Xiao-ping, HU Xiao-lu, XIANG Hong, ZHOU Jia-hua

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: According to the physical changes of potato sample occurred in the process of convective drying, on the base of Fick's second law and Fourier's equation, mathematical model and geometric physical model were set up in the process of heat and mass transfer during convective drying. Transient temperature profiles and influencing factors of internal potato were calculated by utilising the finite element numerical simulation method. At last, comparison of experimental data against numerical simulation representative results designed in convective drying has shown a very good agreement, implying that the model can be used to predict transient temperature profiles in potato.

Key words: convective drying; potato; mathematical model; temperature distribution; numerical simulation

农产品的对流干燥是一个复杂的传热传质过程。随着干燥温度的升高, 热量从干燥介质传递至物料表面, 物料表面温度随之升高, 湿分蒸发形成内外湿度梯度, 内部湿分传递到物料表面而蒸发^[1,2]。热量传递过程会直接影响到湿物料内部水分的质量传递, 温度对湿物料的干燥速率影响显著^[3]。利用物料的传热传质模型分析其内部热质传递过程, 对于预测干燥过程物料内部的湿度和温度分布具有重要的意义。然而, 通过传统实验测定对流干燥过程中物料内部温度的瞬态分布十分困难, 采用的测温设备通常会破坏物料内部的质构, 难以做到无损测量。而数值模拟方法基于对流干燥过程中发生的热量、质量、动量传递的耦合数学模型, 能准确地预测干燥过程中物料内部的瞬态温度场, 对深入认识物料的对流干燥过程机制, 优化对流干燥工艺, 具有重要的理论研究和实际指导意义。

收稿日期: 2012-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31201401)

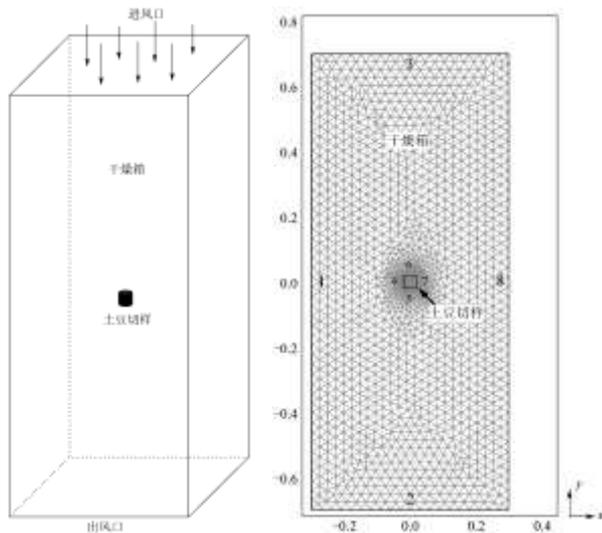
作者简介: 缪丽华 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为农产品干燥机理

通讯作者: 范小平 (1981-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为农产品深加工过程机理与技术

近年来, 一些研究人员致力于建立农产品、食品干燥系统的几何模型, 并研究了热质传递过程的变化特点, 如 Doymaz I 等^[4]、刘国红等^[5]建立了块状胡萝卜的干燥模型, S. Janjai 等^[6]建立了荔枝干燥过程中的二维有限元模型, 并对其干燥品质变化及工艺进行了优化。朱代根等^[7]以圆柱状鸡肉块为研究对象, 建立了二维数学模型并分析了物料的热质耦合传递过程。Stefano Curcio 等^[8]建立了胡萝卜的二维轴对称干燥模型, 并对物料的温度及湿度场的变化进行了研究。李业波等^[9,10]、Joykumar S. N 等^[11]研究了土豆干燥过程中的内部热质传递特征, 主要分析了水分含量的变化。然而, 目前重点针对物料在干燥过程中温度场的数值模拟研究较少。本文以土豆切样为研究对象, 根据其在对流干燥过程中发生的多种物理变化, 建立能描述质量、热量传递过程的数学控制模型以及干燥系统的几何物理模型, 在此基础上, 利用有限元数值模拟方法对土豆切样内部在对流干燥过程中的瞬态温度场及其影响因素进行仿真预测, 并对数值模拟得到的代表性结果进行实验验证。

1 物理模型

本研究以一圆柱状土豆切样为研究对象, 将其放于长方体对流干燥器的中心位置处, 如图 1a 所示。其中, 干燥器尺寸: 60 cm (长)×60 cm (宽)×140 cm (高), 土豆切样尺寸: 4 cm (长)×2 cm (半径), 初始含水率为 80%。为提高数值模拟效率, 本文重点研究干燥系统中心截面内的瞬态温度场, 据此建立的二维几何物理模型如图 1b 所示(已进行有限元网格化)。



(a)对流干燥系统示意图 (b)物理模型
图 1 对流干燥系统示意图及其物理模型

Fig.1 Convective drying system schematic and physical model

注:单位为 m, 图 1b 中数字“1~8”为物理模型的边界代号。

2 数学模型

2.1 基本假设

土豆对流干燥过程中的热质传递过程较为复杂, 影响因素众多, 为简化问题, 提高数值模拟效率, 拟采用以下基本假设:

- (1) 干燥介质(热空气)是连续从干燥箱进口处进入, 并在轴向方向流经待干燥的圆柱状物料;
- (2) 初始状态下物料的温度、湿度呈均匀分布;
- (3) 忽略干燥过程中物料因体积收缩产生的对内部热质传递的影响。

2.2 数学控制方程

对流干燥过程中, 土豆切样内部及干燥介质中的水分传递符合费克第二扩散定律, 建立的非稳态质量传递方程如式 1、2 所示^[12]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_{eff} \nabla C) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_a \nabla C_2) + u \nabla C_2 = 0 \quad (2)$$

其中, C -土豆切样中的水分摩尔浓度, mol/m^3 ; D_{eff} -土豆切样中水分有效扩散系数, m^2/s ; D_a -干燥介质中水分扩散系数, m^2/s ; C_2 -干燥介质中的水分摩尔浓度, mol/m^3 ; u -干燥介质速度, m/s 。

对流干燥过程中, 土豆切样内部及干燥介质中的热量传递符合傅立叶定律, 建立的非稳态热量传递方程如式 3、4 所示^[13]:

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) = 0 \quad (3)$$

$$\rho_a C_{pa} \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} \right) + \nabla \cdot (-k_a \nabla T_2) + \rho_a C_{pa} u \nabla T_2 = 0 \quad (4)$$

其中, T -土豆切样的温度, K ; ρ_s -土豆切样的密度, kg/m^3 ; C_p -比热容, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$; k_{eff} -有效传热率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; ρ_a -干燥介质的密度 kg/m^3 ; C_{pa} -干燥介质比热容 $\text{J/kg}\cdot\text{K}$; T_2 -干燥介质温度 K 。

在如图 1a 所示的对流干燥器中, 干燥介质的非等温湍流采用 $\kappa-\epsilon$ 模型, 该模型建立在以 κ 、 ϵ 为变量的半经验传递方程的基础上, κ 为湍流动能, ϵ 为湍流能量耗散速率。由非稳态动量平衡与连续性方程的耦合可导出式 5^[14]:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_a u = 0 \quad (5)$$

2.3 边界条件

对流干燥过程中, 图 1b 所示物理模型的边界条件设定如表 1 所示。

表 1 有限元边界条件

Table 1 Finite element boundary conditions

边界代号	边界条件		
	质量传递	热量传递	动量传递
1、8	绝缘/对称	热绝缘	对数的墙函数
2	对流通量	对流通量	出口/压力, 粘滞应力
3	浓度	温度	进口/速度
4、5、6、7	连续	连续	对数的墙函数

2.4 初始条件

土豆对流干燥系统的初始条件如表 2 所示。

表 2 初始条件

Table 2 Initial conditions

物理量	含义	初始条件
C_b	干燥介质水分摩尔浓度	5.47 mol/m^3
T_2	干燥介质温度	343 K
p_0	干燥器中的压力	1 atm
u	干燥介质速度	5 m/s
T_0	物料初始温度	300 K
C_0	物料的水分摩尔浓度	$48888 \text{ mol/m}^3 = 0.80 \text{ kg H}_2\text{O/kg}_{\text{wb}}$

3 模拟结果及分析

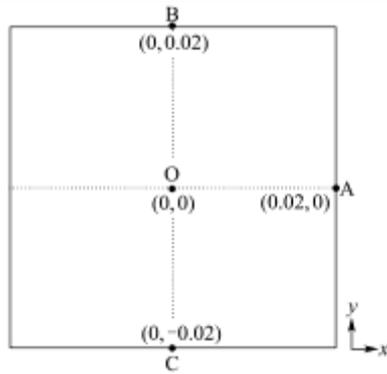


图 2 土豆切块中心截面坐标示意图 (m)

Fig.2 Potato sample center section coordinates schematic

图 2 为土豆切样中心截面示意图,中心点 $O(0,0)$,物料径向表面点 $A(0.02,0)$,靠近进风口处物料轴向表面点 $B(0,0.02)$,靠近出风口处物料轴向表面点 $C(0,-0.02)$ 。其中,OA 方向为物料径向方向,BC 方向为物料轴向方向。

基于前文 1、2 节建立的物理模型和数学模型,采用有限元数值模拟方法可预测得到对流干燥系统的瞬态温度场。图 3 所示为当热风温度 $T=343\text{ K}$,热风相对湿度 $RH=50\%$,热风速率 $V=0.1\text{ m/s}$ 时,干燥时刻 $t=300\text{ min}$ (18000 s) 时土豆对流干燥系统内部的温度场。

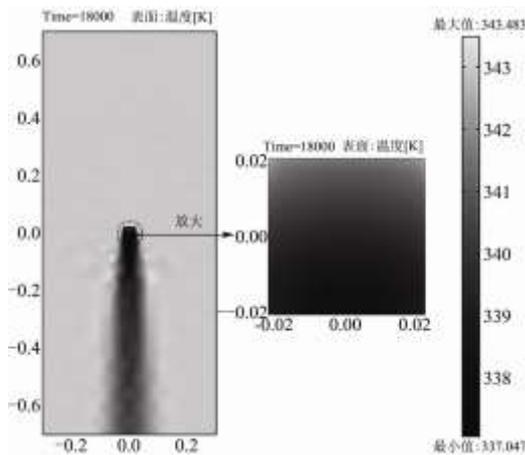


图 3 对流干燥 18000s 时刻系统内部的温度场

Fig.3 Internal temperature profile in convective drying system at time of 18000s

3.1 物料径向各点温度分布

当热风温度 $T=343\text{ K}$,热风相对湿度 $RH=50\%$,热风速率 $V=5\text{ m/s}$ 时,物料(土豆切样)OA 方向 ($y=0$) 的径向各点的温度变化如图 4 所示。

由图 4 可知,物料内部径向各点初始温度为 300 K ,随着对流干燥过程的进行,各点温度逐渐升高,当干燥至 180 min 时,径向各点温度基本一致,且趋于平衡。干燥初期,物料径向各点温度上升速率较快,后期温度上升较为缓慢并逐渐趋于平衡温度。OA 方

向的径向点,越靠近 A 点越易达到平衡温度。

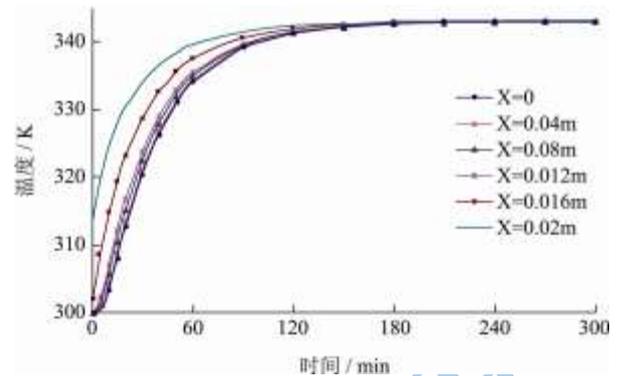


图 4 土豆切样 OA 方向径向各点温度随干燥时间的变化

Fig.4 Temperature developing within the potato sample in OA radial direction at different drying time

3.2 物料轴向各点温度分布

当热风温度 $T=343\text{ K}$,热风相对湿度 $RH=50\%$,热风速率 $V=5\text{ m/s}$ 时,物料(土豆切样)OB 方向 ($x=0$) 的轴向各点的温度变化如图 5a 所示;物料 OC 方向 ($x=0$) 的轴向各点的温度变化如图 5b 所示。

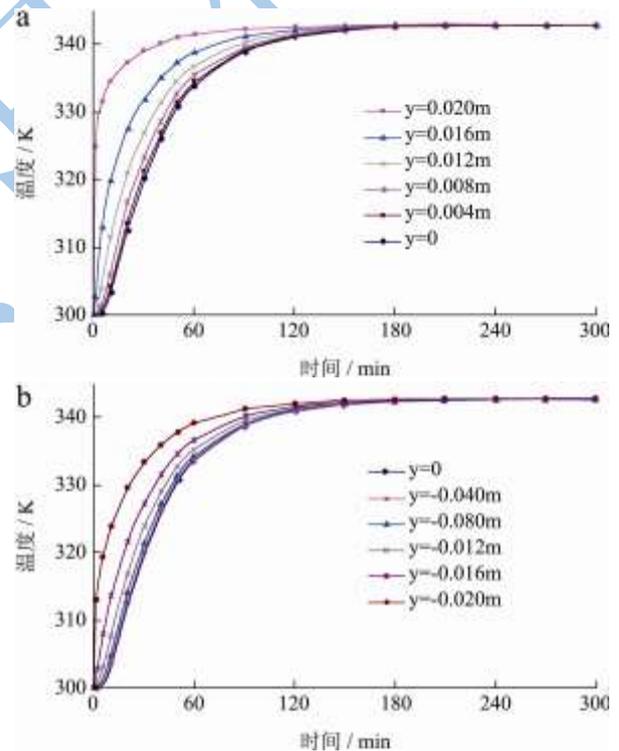


图 5 土豆切样轴向各点温度随干燥时间的变化

Fig.5 Temperature developing within the potato sample points in axial direction at different drying time

注:(a)OB 方向轴向点的温度随干燥时间的变化;(b)OC 方向轴向点的温度随干燥时间的变化。

由图 5a 可知,随着对流干燥过程的进行,土豆切样 OB 方向的轴向各点温度逐渐升高,当干燥至 $t=180\text{ min}$ 时刻,各点温度基本一致,且趋于平衡温度。干燥初期,各点温度上升速率较快,后期趋于平缓并

逐渐上升至平衡温度。B点干燥至 $t=120\text{ min}$ 时刻可升至平衡温度，而O点则需 180 min 。干燥前期，靠近B点的轴向点比靠近O点的区域的升温速率更快。OB方向的轴向点，越靠近B点升至平衡温度越快。

由图 5b 可知，随着对流干燥过程的进行，OC方向的轴向各点温度也逐渐升高，当干燥至 $t=180\text{ min}$ 时刻，轴向各点温度基本一致，且趋于平衡温度。干燥前期，靠近C点的轴向点比靠近O点的区域的升温速率更快。OC方向的轴向点，越靠近C点升至平衡温度越快。

3.3 热风速率对物料温度变化的影响

当热风温度 $T=343\text{ K}$ ，热风相对湿度 $RH=50\%$ ，热风速率 $V=0.1\text{ m/s}$ 、 1 m/s 、 5 m/s 时，模拟得到土豆切样中心截面（图 2）内的平均温度随干燥时间的变化如图 6 所示。

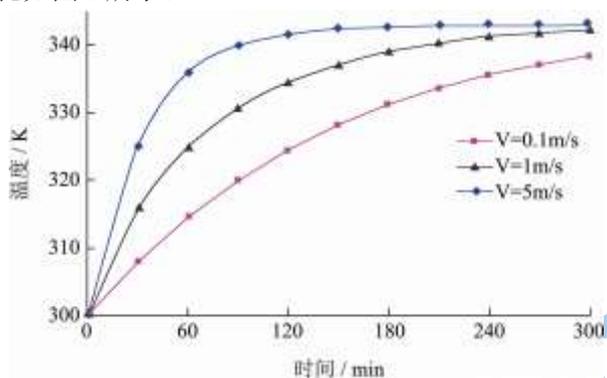


图 6 热风速率对土豆切样平均温度的影响

Fig.6 Affect of hot air rate on potato sample average temperature

由图 6 可知，随着对流干燥过程的进行，不同热风速率下，物料的平均温度均升高。热风速率越大，干燥初始阶段的温度上升越快，在相同的干燥时间内，温度越高。热风速率 $V=5\text{ m/s}$ 时，仅需 180 min 物料平均温度可升至平衡温度；当热风速率分别为 $V=1\text{ m/s}$ 、 0.1 m/s 时，干燥至 300 min ，物料平均温度仍未升至平衡温度。热风速率越大，对流扩散增强，物料内部温度传热动力越大，物料平均温度上升至平衡温度所需时间越短。

3.4 热风相对湿度对物料温度变化的影响

当热风温度 $T=343\text{ K}$ ，热风速率 $V=5\text{ m/s}$ ，热风相对湿度 $RH=20\%$ 、 30% 、 50% 时，模拟得到土豆切样中心截面内的平均温度随干燥时间的变化见图 7。

由图 7 可知，当 $RH=20\%$ 时，土豆物料需干燥 210 min 升至平衡温度；当 $RH=30\%$ 时，需干燥 180 min 升至平衡温度；当 $RH=50\%$ 时，只需干燥 150 min ，物料平均温度即可升至平衡温度。由于干空气的导热系数远小于水的导热系数，随着热风相对湿度的增加，

物料更易达到平衡温度。

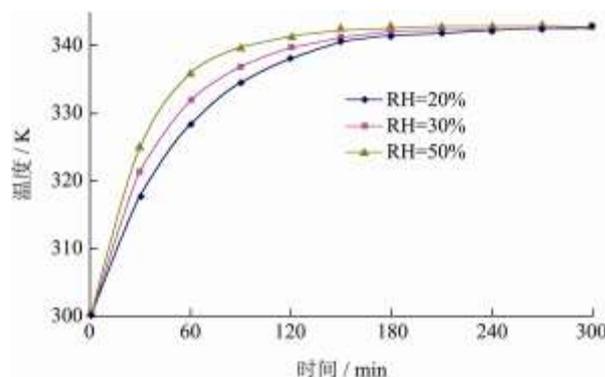


图 7 热风相对湿度对土豆切样平均温度的影响

Fig.7 Affect of relative humidity on potato sample average temperature

4 实验验证

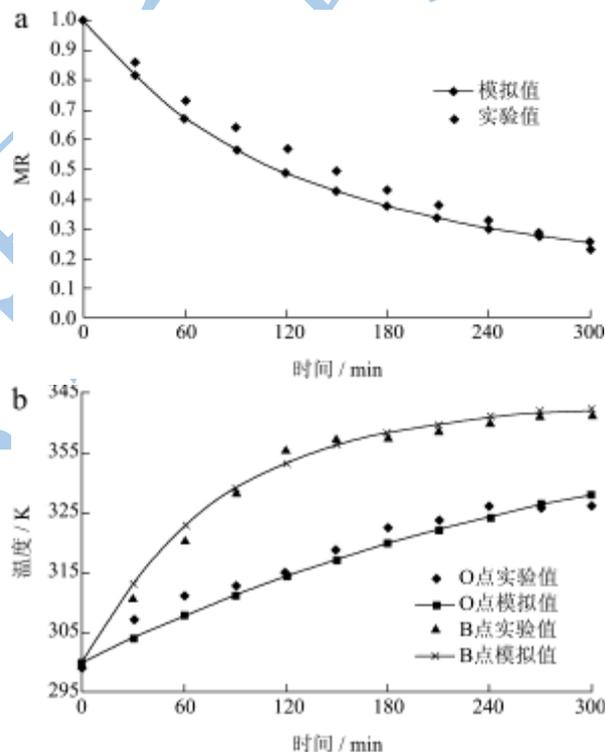


图 8 模拟值与实验值的水分含量及温度变化的比较

Fig.8 Comparison between model predictions and experimental data at moisture content and temperature developing

注：(a) 水分含量的变化；(b) 温度的变化。

为验证数值模拟结果的有效性和合理性，设计采用如下验证性实验：将新鲜土豆（市售）洗净、削皮、切样，得到圆柱状土豆切样的尺寸为： 4 cm （长） $\times 2\text{ cm}$ （半径）；采用的对流干燥系统为电热恒温鼓风干燥箱（DHG-9245A，上海一恒科学仪器有限公司），测温仪为数字温度表（DE3004，得益工业仪器有限公司）。实验操作参数条件与数值模拟相一致，即热风温度为 343 K ，热风速度为 0.1 m/s ，物料温度为 300 K ，

环境相对湿度为 50%。

实验先测得 O、B 两点（图 2）的温度，然后在干燥过程中每隔一定时间快速称取物料重量，计算物料水分含量的变化，并以湿分比（*MR*）表示，最后将得到的实验数据与模拟值进行比较。湿物料的湿分比 *MR* 是指某时刻待除去的自由湿分量与初始总自由湿分量之比^[15]。*MR* 采用式 6 进行定义：

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (6)$$

其中，*X-t* 时刻时物料内部干基含水量，kg/kg；*X₀*-物料初始干基含水量，kg/kg；*X_e*-物料平衡干基含水量，kg/kg。

将实验测得的湿分比、温度分别与模拟得到的结果进行对比，如图 8a、8b 所示，结果表明对流干燥过程中土豆切样水分含量、温度的实验值与模拟值在趋势上总体一致，验证了数值模拟所得结果的有效性、合理性。

5 结论

5.1 本文主要根据土豆切样在对流干燥过程中发生的多种物理变化，基于费克第二扩散定律和傅立叶定律建立了对流干燥系统的传质传热数学模型，在此基础上，利用有限元数值模拟方法对干燥过程中土豆切样内部的瞬态温度场及其影响因素进行了仿真预测，并对数值模拟得到的代表性结果进行了实验验证。

5.2 物料内部的温度随干燥时间的增加逐渐升高，直至平衡温度。OA 方向的径向点，越靠近 A 点越易达到平衡温度；OB 和 OC 方向轴向点，越靠近 B 点或 C 点，越易达到平衡温度。

5.3 干燥过程中，热风风速越大，物料上升至平衡温度所需时间越短。热风相对湿度增大，物料达到平衡温度的时间也缩短。

5.4 实验数据与模拟值在趋势上表现一致，表明所建立的物理模型、数学模型及采用的有限元数值模拟方法是合理、适用的。

参考文献

- [1] 文雪英. 胡萝卜热风干燥数值模拟研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2010
- [2] 应巧玲, 励建荣, 傅玉颖, 等. 食品薄层干燥技术的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(5): 115-118
- [3] 李远志, 胡晓静, 叶盛英, 等. 胡萝卜热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 食品与发酵工业, 1999, 25(6): 1-4
- [4] Doymaz I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots [J]. JOURNAL OF FOOD ENGINEERING, 2004, 61(3): 359-364
- [5] 刘国红, 陈君若, 刘美红, 等. 胡萝卜片热风干燥过程计算机仿真[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011(3): 81-85
- [6] Janjai S, Mahayothee B, Lamlert N, et al. Diffusivity, shrinkage and simulated drying of litchi fruit (*Litchi Chinensis* Sonn.) [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(2): 214-221
- [7] 朱代根, 陈君若, 刘显茜. 食品对流干燥热质耦合传递的数值模拟[J]. 农机化研究, 2011, 1: 49-52
- [8] Curcio S, Aversa M, Calabro V, et al. Simulation of food drying FEM analysis and experimental validation [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87: 541-553
- [9] 李业波, 刘登瀛. 土豆在脱水过程中的内部传热传质研究[J]. 农业机械学报, 1996, 1: 52-56.
- [10] 李业波, 秦玉昌, 李业德. 土豆干燥过程中内部传热传质的数值模拟[J]. 农业工程学报, 1996, 3: 56-59
- [11] Joykumar Singh N, Pandey R K. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 90(2): 317-322
- [12] 朱学文. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009
- [13] Sabarez H T. Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(2): 279-288
- [14] Verboven P, Scheerlinck N, De Baerdemaeker J, et al. Sensitivity of the food centre temperature with respect to the air velocity and the turbulence kinetic energy [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48: 53-60
- [15] 王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备, 2009, 7(1): 51-56

欢迎订阅中文核心期刊 · 《现代食品科技》

邮发代号：46-349

刊号：ISSN 1673-9078/CN 44-1620