

朱代根,陈君若,李明. 胡萝卜热风干燥过程热质耦合传递分析[J]. 江苏农业科学,2014,42(2):201-203.

胡萝卜热风干燥过程热质耦合传递分析

朱代根^{1,2}, 陈君若¹, 李明²

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650093; 2. 西南林业大学机械与交通学院, 云南昆明 650224)

摘要:基于 Fick 扩散第二定律和 Fourier 定律,建立了胡萝卜热风干燥的二维数学模型,模型中热空气和胡萝卜的物理性能均用局部温度和湿度值表示,用有限元软件 COMSOL Multiphysics 3.3 对热质耦合传递偏微分方程组进行求解,干燥过程的模型预测结果与试验实测结果相吻合,所建立的模型可以用来预测食品热风干燥过程。同时在干燥过程中初始温度、空气速度对胡萝卜水分变化影响小,干燥温度和物料尺寸大小对胡萝卜水分变化影响大。

关键词:胡萝卜;干燥;热质传递;数学模型

中图分类号: TS255.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)02-0201-03

热风干燥是目前最简单、经济的干燥方法之一,具有热效率高、干燥速率快、设备投资费用低等优势。当干热空气流过物料的表面积时,将热量传递给物料的同时带走物料的水分,从而便于物料的包装、运输、贮存、加工和使用。通常热空气的温度为 40℃ 到 80℃,流动速度为 0.5 m/s 到 5 m/s^[1]。

干燥过程是一个复杂的传热传质过程,对干燥过程进行准确的预测,可提高物料的干燥品质,减少能源消耗,为进一步优化干燥工艺和设备研究提供理论依据。目前国内外对胡萝卜热风干燥进行了大量的试验和模拟研究。Doymaz^[2]、刘正怀等^[3]、彭桂兰等^[4]研究了不同干燥介质温度、湿度、速度以及胡萝卜尺寸等因素对胡萝卜热风干燥的影响。由于影响干燥过程的因素很多,为了简化干燥数学模型,因此研究人员^[3-6]建立了薄层干燥模型。

刘国红等基于 Fick 第二扩散定律和 Fourier 定律,建立了胡萝卜热风干燥的一维数学模型,采用有限差分法进行求解^[7]。Aversa 等建立了食品对流干燥的多物理场数学模型,用有限元法进行求解,分析不同干燥介质温度、湿度、速度以及胡萝卜尺寸等因素对胡萝卜热风干燥的影响^[1,8-11]。模型能够模拟食物内自由水和束缚水的传递,但其模拟结果^[1,8]与实验数据有一定的偏差,特别是干燥开始 2 h 后偏差更大。

本研究基于 Fick 扩散第二定律和 Fourier 定律,建立了胡萝卜热风干燥的二维数学模型,采用有限元法进行求解,分析干燥过程的热质耦合传递现象。

1 数学模型

干燥过程的本质是一个动量、能量和质量的耦合传递过程^[12]。一方面,物料从干燥介质吸收热量,能量由物料的外部向其内部进行传递;另一方面,物料内部的水分则由内向外

传递,直到物料的含水量降低至满足工艺要求为止。在物料内部热量通过传导来传递,水分通过扩散来传递。

1.1 基本假设

为了简化模型的建立和求解,做如下假设:(1)物料内部热量只通过传导来传递;(2)物料内部质量只通过扩散来传递,不考虑其他传递方式;(3)干燥过程不考虑物料的收缩;(4)胡萝卜块各向同性;(5)不考虑蒸汽冷凝现象。

1.2 控制方程

根据 Fourier 定律,通过能量守恒可得到被干燥胡萝卜内热导的微分方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度(kg/m³); C_p 为定压比热容[J/(kg·K)]; T 为温度(K); t 为时间(s); k 为导热系数[W/(m·K)]。

根据 Fick 第二扩散定律,干燥物料内质量守恒有:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla C) = 0 \quad (2)$$

式中: C 为物料干基含水量(kg/kg); D 为水分在物料内的有效扩散系数(m²/s)。

物料的性能参数(ρ , C_p , k 和 D) 为局部温度 T 和干基含水量 C 的函数。因此方程(1)和方程(2)为非线性偏微分方程。其中 ρ 、 D 、 C_p 、 k 的计算公式^[1,13]如下:

$$\rho = 440.001 + 90 \cdot C \quad (3)$$

$$D = 2.68 \times 10^{-9} \exp\left(-\frac{0.0892}{C}\right) \exp\left(-\frac{36.8}{T}\right) \quad (4)$$

$$C_p = 1750 + 2345 \cdot \left(\frac{C}{C+1}\right) \quad (5)$$

$$k = 0.49 - 0.443 \cdot \exp(-0.206 \cdot C) \quad (6)$$

以上模型包含热质传递的相互耦合关系。式(4)表明温度和水分含量对物料内部质量传递的影响。式(6)表明水分含量对物料内部热传递的影响。

1.3 初始条件

初始温度分布均匀,初始水分含量分布均匀,则初始条件为:

$$T|_{t=0} = T_0, C|_{t=0} = C_0$$

1.4 边界条件

方程(1)的边界条件为第三类边界条件,即给定物体表

收稿日期:2013-03-18

基金项目:国家自然科学基金(编号:31100424);云南省教育厅科学研究基金(编号:2012C096)。

作者简介:朱代根(1979—),男,福建顺昌人,博士研究生,从事机械系统多相耦合理论及其数值模拟研究。E-mail: argen243@163.com。

通信作者:陈君若,教授,博士生导师。E-mail: chenjunmo@126.com。

面上的对流换热系数 h 和周围流体的温度 T_{air} , 边界方程为:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = h_r (T_{\text{air}} - T_s) \quad (7)$$

式中: n 为方向向量; T_s 为物料表面温度 (K), h_r 为对流换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]; T_{air} 为加热介质 (热空气) 的温度 (K)。

方程 (2) 的边界条件为第三类边界条件, 即规定边界上物体与周围干燥介质间的对流传质系数 h_m , 以及周围介质的水分浓度, 边界方程为:

$$-n(D \nabla c) = h_m (C_b - C_{gb}) \quad (8)$$

式中: n 为方向向量, C_{gb} 为热空气湿度 (g/kg), C_b 为干燥物表面湿度 (g/kg), h_m 为质量传递系数 (m/s)。

1.5 相间传递系数确定

相间传热时, 流体与固体之间通过固体表面的滞流 (层流) 边界层进行传热。固体与流体间的质量传递, 只考虑固体表面的水分蒸发。其相间热质传递系数采用文献 [14 - 16] 中给出的经验公式:

$$\text{努赛尔数: } Nu = \frac{h_r d_E}{\lambda_{\text{air}}} = 2.0 + 0.6 (Pr)^{1/3} (Re)^{1/2}$$

$$\text{舍伍德数: } sh = \frac{h_m d_E}{D_{AB}} = 2.0 + 0.6 (Sc)^{1/3} (Re)^{1/2}$$

其中: d_E 为物料的当量直径 (m), λ_{air} 为空气的热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$], Pr 为普朗特数; Re 为雷诺数, Sc 为施密特数, D_{AB} 为气相有效质量扩散系数, 计算如下:

$$d_E = \sqrt[3]{6 \frac{V_E}{\pi}}, Re = \frac{d_E v \rho_{\text{air}}}{\eta_{\text{air}}}, Sc = \frac{\eta_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}} D_{AB}}$$

$$D_{AB} = 1.87 \times 10^{-10} \frac{(T_f + 273)^{2.072}}{P}$$

其中 $T_f = \frac{T_s + T_{\text{air}}}{2}$, $P = 1 \text{ atm}$; v 为空气速度 (m/s)。

热空气参数 ($10 < T_f < 80 \text{ }^\circ\text{C}$) 计算如下:

$$\rho_{\text{air}} = -3.510101 \times 10^{-8} T_f^3 + 1.583982684 \times 10^{-5} T_f^2 - 4.699520220 \times 10^{-3} T_f + 1.29213571428571$$

$$\eta_{\text{air}} = 1.7676768 \times 10^{-13} T_f^3 - 5.541125541 \times 10^{-11} T_f^2 + 4.983297258297 \times 10^{-8} T_f + 17.1964285714285 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_{\text{air}} = 6.8181818 \times 10^{-10} T_f^3 - 1.474025974 \times 10^{-7} T_f^2 + 8.029112554113 \times 10^{-5} T_f + 0.0240834714285714$$

$$Pr = -2.272727 \times 10^{-8} T_f^3 + 4.1991342 \times 10^{-6} T_f^2 - 3.5335497835 \times 10^{-4} T_f + 0.719$$

1.6 求解方法

控制方程和边界条件组成了一非线性偏微分方程组, 用解析方法不能求出方程组的解, 因此本研究利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 3.3 求解。应用软件中的广义传热和扩散两个模型来耦合求解方程组。该软件实质上是一个多重物理量偏微分方程求解工具, 它一个重要特征是可以集中于模型本身, 而不必花太多时间考虑方程求解和结果可视化问题。

2 结果与分析

2.1 模型的验证

计算结果与 Bialobrzeski 等^[15]提供的试验数据相比较进行验证。通过本试验获得的数据 (胡萝卜的尺寸、初始水分含量、初始温度、热空气的温度、速度)。

图 1 和图 2 为胡萝卜立方体边长为 10 mm, 初始水分含量为 8.2, 初始温度为 25 $^\circ\text{C}$, 热空气的速度为 4 m/s 时, 在不同的干燥温度下, 热风干燥过程胡萝卜温湿度随时间变化的计算结果和实验实测数据的比较。

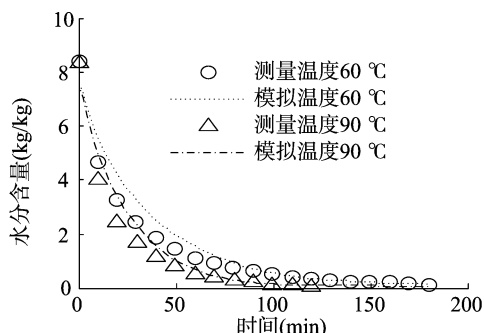


图1 胡萝卜干燥过程水分含量变化曲线

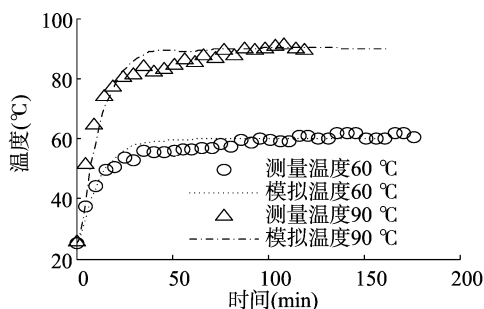


图2 胡萝卜干燥过程中心点温度变化曲线

图 1 和图 2 表明, 整个干燥过程, 模型预测结果与试验实测数据相吻合, 说明所建数学模型可以用来模拟胡萝卜干燥过程的热质耦合传递现象。

2.2 干燥参数对干燥过程中物料水分含量变化的影响

图 3 给出了胡萝卜不同初始温度 (25、30、35 $^\circ\text{C}$) 对干燥过程其水分含量变化的影响。由公式 (4) 可知道, 温度越高, 水分在物料内的有效扩散系数越大, 因此初始温度为 35 $^\circ\text{C}$ 时, 胡萝卜的水分含量下降最快, 但不同初始温度对胡萝卜水分含量的变化影响小。Aversa 等^[1]模拟结果表明, 当初始温度较低时, 物料表面会出现冷凝现象, 干燥开始阶段物料的水分含量会有所上升。由于冷凝现象只出现在干燥的开始阶段, 且对干燥过程影响小, 所以本研究建的模型没有考虑蒸汽冷凝问题。

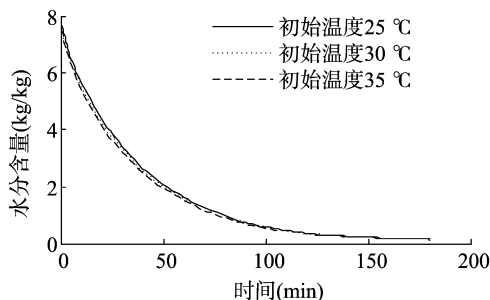


图3 初始温度对胡萝卜干燥过程水分含量变化的影响

根据相间传递系数确定方法可知, 空气速度的变化直接影响雷诺数, 进而影响物料表面的热质传递系数 h_r 和 h_m 。提高空气速度使物料表面的热质传递系数均增大, 因此, 空气

速度越大,则胡萝卜的干燥速率越快。图 4 显示,空气速度为 4.0 m/s 时,胡萝卜的水分含量下降最快,但空气速度对物料内部的热质传递系数影响小,所以空气速度对水分含量的变化影响小。

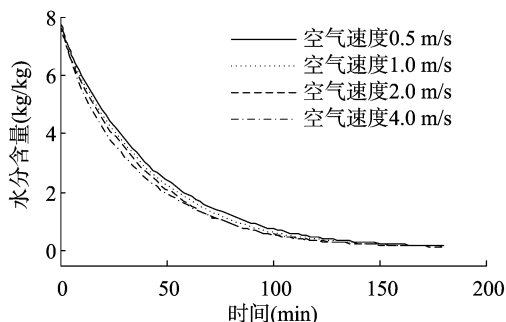


图4 空气速度对胡萝卜干燥过程水分含量变化的影响

根据材料的性能参数和相间传递系数确定方法可知,随着空气温度升高,则物料内部和表面热质传递系数均增大。因此,空气温度越高,则胡萝卜的干燥速率越快。结果(图 5)显示,空气温度为 90 ℃ 时,胡萝卜的水分含量下降最快。胡萝卜干燥过程中,空气温度一般不超过 70 ℃,否则干燥产品质量将显著变差^[2]。与物料初始温度及空气速度相比,干燥温度对物料水分含量的影响较大。

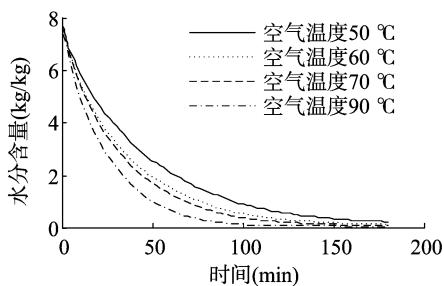


图5 干燥过程空气温度对胡萝卜水分含量变化的影响

图 6 给出了不同胡萝卜厚度(立方体边长为 5、10、20 mm)对干燥过程其水分含量变化的影响。根据相间传递系数确定方法可知,随着胡萝卜尺寸增大,物料表面热质传递系数减小。同时尺寸增大,增长了物料内部热质传递的路径长度,进而降低了物料干燥速率。结果表明,胡萝卜尺寸最小时,其干燥速率最快。

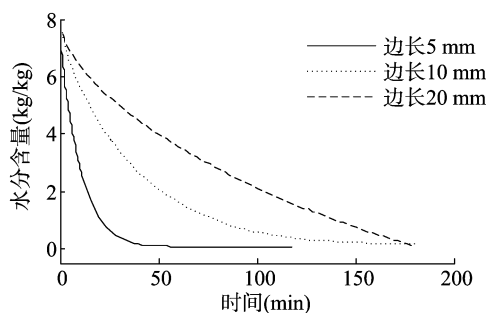


图6 厚度对胡萝卜干燥过程水分含量变化的影响

3 结论

本研究基于 Fick 扩散第二定律和 Fourier 定律,建立了胡萝卜热风干燥的二维数学模型,模型中热空气和胡萝卜的物

理性能均用当前局部温度和水分含量表示,并且充分考虑了热质耦合作用。用有限元法对热质耦合传递的偏微分方程组进行了求解。结果表明,所建模型的计算结果与试验实测结果相吻合,可以用来模拟和预测物料的干燥过程,得到任意时刻物料内部的温度和水分含量。在干燥工艺参数中,物料初始温度和空气速度对物料水分含量变化影响小,物料的几何尺寸和干燥温度对水分含量变化影响大;提高干燥温度和减小物料的几何尺寸能明显提高物料干燥速率。

参考文献:

- [1] Aversa M, Curcio S, Calabro V, et al. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3): 922–932.
- [2] Doymaz I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 359–364.
- [3] 刘正怀, 王 俊, 马 广. 萝卜丝薄层干燥模拟分析与试验研究[J]. 上海农业学报, 2006, 22(3): 76–79.
- [4] 彭桂兰, 吴文福, 陈晓光, 等. 萝卜丝薄层干燥试验及其数学模型的建立[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 79–81, 94.
- [5] Xanthopoulos G, Lambrinos G, Manolopoulou H. Evaluation of Thin – Layer models for mushroom (*Agaricus bisporus*) drying[J]. Drying Technology, 2007, 25(9): 1471–1481.
- [6] Madhiyanon T. Mathematical models based on heat transfer and coupled heat and mass transfers for rapid high temperature treatment in fluidized bed; Application for grain heat disinfestation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 2277–2290.
- [7] 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, 26(3): 81–85.
- [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(4): 541–553.
- [9] Aversa M, Curcio S, Vincenza C, et al. Transport phenomena modeling during drying of shrinking materials[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2010, 28: 91–96.
- [10] Curcio S, Aversa M. A multiphase model to analyze transport phenomena in convective drying [C]. Paris: COMSOL Conference, 2010.
- [11] Lemus – Mondaca R A, Vega – Gálvez A, Nelson O M. Computational simulation and developments applied to food thermal processing[J]. Food Engineering Reviews, 2011, 3(3/4): 121–135.
- [12] 刘相东, 杨彬彬. 多孔介质干燥理论的回顾与展望[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(4): 81–92.
- [13] Ruiz – López I I, Córdova A V, Rodríguez – Jimenes G C, et al. Moisture and temperature evolution during food drying – Effect of variable properties[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63: 117–124.
- [14] 刘显茜, 陈君若, 侯宏英, 等. 高温气流干燥氧化铝对流传热传质分析[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2008, 23(2): 47–51.
- [15] Bialobrzewski I, Zielinska M, Mujumdar A S, et al. Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout – fluidized – bed drier[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(19/20): 4704–4716.
- [16] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. Transport phenomena[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.