

基于多孔介质热/质传递理论的流体—颗粒食品 热处理数值模拟研究进展

Review of numerical simulation of fluid-particle food thermal processing
based on heat and mass transfer theory of porous media

余冰妍 邓力 程芬 徐嘉石 宇

YU Bing-yan DENG Li CHENG Fen XU Jia SHI Yu

(贵州大学酿酒与食品工程学院, 贵州 贵阳 550025)

(School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

摘要:概述了基于多孔介质热/质传递理论构建数学模型的原理与发展,从蒸发描述、参数测定及定解条件设定等方面分析了多孔介质数学模型开发与应用的 key 问题及其研究进展,总结了多孔介质数学模型应用于流体—颗粒食品热处理的优势、挑战与发展前景。

关键词:食品;热处理;多孔介质;热/质传递;数值模拟

Abstract: This review outlined the principle and development of mathematical model based on the theory of heat and mass transfer in porous media. The research emphasis and its progress of mathematical model in the development and application were analyzed from the aspects of evaporation description, parameter determination and definite conditions and so on. Thereafter, an introduction of the advantages and disadvantages of the porous media mathematical model which applied in food thermal processing were given. Moreover, the development prospects of porous media mathematical model applied to fluid-particles food thermal processing were also summarized, which provided a reference for the numerical simulation research of fluid-particles food thermal processing in China.

Keywords: food; thermal processing; porous media; heat and mass transfer; numerical simulation; research progress

粒无菌工艺等,在食品加工中有重要地位,其工艺条件决定了颗粒食品内部温度、水分变化情况,直接影响着食品的风味、营养与安全品质。对食品热处理过程中的热/质传递机制探究一直是食品工程的重要任务。

然而,在流体—颗粒食品热处理过程中,温度随空间、时间变化,非稳态特征显著^[1]。直接温度检测很难获取食品颗粒的全局温度变化^[2]。因此,引入数值模拟技术是流体—颗粒食品热处理研究的必然趋势。同时,水分对食品品质影响较大,热处理过程颗粒食品内部水分传递机制复杂,水分含量变化会引起食物物性改变造成传递机制的改变^[3],直接将水分作为温度变化的动力学研究而非数学模型基础变量,会限制模型的可靠性、准确性,且油、蒸汽等流动相也会影响传热传质^[4]。因此,需要一种可同时模拟食品内部流动相的温度、水分等全局变化的数学模型,而基于多孔介质热/质传递理论所构建的流体—颗粒食品热处理数学模型可较好地解决该问题^[5]。当前,流体—颗粒食品热处理过程的多孔介质数学模型开发与应用已成为食品工程研究热点之一,在油炸^[6-7]、干燥^[8-9]、爆炒^[10-12]等方面均有较多应用,为流体—颗粒食品热处理的品质监控、参数优化、设备设计和自动控制提供了关键性的基础计算。

文章结合流体—颗粒食品多孔介质数学模型研究应用进展,概述了模型的原理及开发与应用的 key 问题,总结其优势、挑战以及发展方向,为开展流体—颗粒食品热处理过程数值模拟提供参考。

1 食品多孔介质数学模型概述

1.1 食品热处理多孔介质数学模型发展历程

多孔介质热/质传递数学模型的应用研究历史仅有100余年,而其在食品加工领域的应用时间更短。1971年,

流体—颗粒食品热处理,如烹饪炒制、干燥、液体颗

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31660449,31860443);贵州省重大科技专项计划项目(编号:黔科合重大专项字[2015]6004);贵州省科技计划项目(编号:黔科合农G字[2013]4016号,黔科合支撑[2017]2707号,黔科合平台人才[2018]5781号)

作者简介:余冰妍,女,贵州大学在读硕士研究生。

通信作者:邓力(1966—),贵州大学教授,硕士生导师,博士。

E-mail: denglifood@sohu.com

收稿日期:2018-11-23

King^[13]针对食品干燥过程提出的蒸汽扩散模型为其应用的开端,随着研究的深入,模型主要经历了梯度驱动模型、连续介质模型及混合模型的发展过程。

1.1.1 梯度驱动模型 梯度驱动指多孔介质内部各相在不同驱动力推动下运输的过程,包括温度场、湿度场、压力场等,随着研究的深入,研究者对颗粒食品内部各相传递机制有了更为完善的认知,从仅考虑流体扩散或毛细流动机制的单物理场驱动模型^[14-15]到认为各相的运输与迁移是多种力共同作用的结果而构建的多物理场驱动模型^[16-20],使多孔介质数学模型可更为真实地模拟颗粒食品热处理过程。

1.1.2 连续介质模型 连续介质模型是由基于连续介质理论的动量、能量及质量守恒方程以及描述具体传递现象的附加方程联合构建的数学模型,从多孔介质内部各相守恒关系出发,根据体积平均准则,将微观水平的多孔介质多相流动传递现象在宏观水平上考虑,得到一系列控制方程,为利用连续介质力学方法建立多孔介质内各相控制方程奠定基础。由于试验研究的缺乏和科研水平的落后,其方程的繁琐和各传递系数难以确定限制了连续理论模型的使用,目前仍为宏观研究多孔介质热/质传递的基础,被广泛应用^[21-22]。

1.1.3 混合模型 混合模型将梯度驱动模型和连续介质模型结合为一体,模型更加准确全面。随着研究的完整化和具体化,颗粒食品热处理中所发生的蒸发^[23-24]、形变^[25-26]等现象也被转换为适当的数学语言加载于混合模型中,多孔介质数学模型的设定与实际热处理过程越发接近,模型的鲁棒性及准确性均大幅度提高。

上述发展历程实则为将颗粒食品视为连续性介质基础上的修正与完善过程。此外,非连续性数学模型,如格子—波尔兹曼模型^[27]、分子动力学模型^[28]等,在多孔介质热/质传递研究中也都有所应用,但其应用对象更多为化工、地质领域,在此不做详细叙述。后面所提到的模型基本方程及关键问题的数学描述均以连续性颗粒食品介质热处理为对象。

1.2 多孔介质数学模型基本控制方程

在食品热处理多孔介质热/质传递数学模型中,其主要控制方程为质量、热量及动量守恒方程。

(1) 热量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \nabla \cdot (\rho C_p u T) = \nabla \cdot (K_{\text{eff}} \nabla T) - \Phi, \quad (1)$$

式中:

C_p ——颗粒食品比热容, J/(kg·°C);

ρ ——颗粒食品密度, kg/m³;

T ——颗粒食品温度, °C (K);

t ——热处理时间, s;

u ——流体速度, m/s;

K_{eff} ——颗粒食品有效导热系数, W/(m·K);

Φ ——源项(由是否有热源或相变决定)。

(2) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial (S_i \rho_i \varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot n_i = \Phi, \quad (2)$$

式中:

S_i ——具体流动相饱和度, 下标 i 包括液态水(w)、水蒸气(v)及气体(g);

φ ——孔隙率;

n_i ——流体质量流量, kg/(m²·s)。

(3) 动量守恒方程: 在研究复杂流体流动时, 常采用 Navier-Stokes 方程进行动量描述。

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i u) = -\nabla P + \rho g + \mu \Delta u, \quad (3)$$

式中:

P ——颗粒承受压力, Pa;

g ——单位质量体积力, m/s²;

μ ——流体动力黏度, kg/(m·s)。

此外, 模型还有用于描述颗粒食品内部热/质传递状态与内在联系的附加方程, 以及用于确定颗粒食品初始状态及其边界与周围环境质/能交换状态的定解条件方程, 均与热处理实际操作过程特征相关。

2 颗粒食品多孔介质数学模型中的关键问题及其研究

多孔介质数学模型间的差异主要在于其方程设定或模型参数的不同, 而方程的设定包括控制方程源项、定解条件等的设定。

2.1 颗粒食品多孔介质数学模型的蒸发问题

蒸发是颗粒食品热处理时常见现象。蒸发会带走颗粒食品内部的水分与热量, 对其温度、水分变化影响极为显著^[12,29], 蒸发现象的数学描述被引入多孔介质数学模型的构建中是必然结果。

在现有的带蒸发的多孔介质数学模型中, 根据蒸发项的不同描述方式, 数学模型可分为相变界面蒸发模型和分布式蒸发模型^[30]。相变界面蒸发模型又可分为表面蒸发模型和移动边界蒸发模型, 表面蒸发模型是指假设蒸发现象只发生在颗粒食品表面, 蒸发项设于数学模型的边界条件, 如针对颗粒食品干燥^[31]或豆腐深层油炸过程^[32]所构建的热/质传递数学模型, 其蒸发项位于能量控制方程的边界条件。

$$h(T_f - T_{\text{surf}}) = K_{\text{eff}} \nabla T - H_v I, \quad (4)$$

式中:

h ——对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

T_f ——流体介质温度, $^{\circ}C(K)$;

T_{surf} ——颗粒表面温度, $^{\circ}C(K)$;

H_v ——水的蒸发潜热, J/kg ;

I ——水分蒸发量, $kg/(m^3 \cdot s)$ 。

移动边界蒸发模型认为蒸发发生在一个界面上,类似于食品冷冻、解冻过程界面的形成,蒸发界面随热处理进行向颗粒食品内部移动,将多孔食品分为干/湿区,干区水分以蒸汽形式存在,湿区为液态水^[33]。数学建模时根据不同区域各相传递机制构建其具体控制方程,蒸发项的数学描述则位于干/湿区边界处的热量平衡方程中。

$$-K_{eff}^{core} \nabla T + K_{eff}^{crust} \nabla T - n_v(h_w - H_v) = \frac{dX(t)}{dt} [(1-\varphi)\rho_s(h_s^{core} - h_s^{crust}) + \varphi\rho_v(H_v - h_w)], \quad (5)$$

式中:

core——颗粒食品中心部位/湿区;

crust——颗粒食品外壳部位/干区;

eff——有效或等效值;

h_w ——水的热焓, J/kg ;

$X(t)$ ——干/湿区界面位置, m ;

h_s ——颗粒食品热焓, J/kg 。

然而,进一步试验研究^[34]发现,流体—颗粒食品在热处理过程中,蒸发现象并未有清晰的边界限制,移动边界模型或许因忽略颗粒食品内部发生的相变散热而过高地预测颗粒食品的中心温度。基于此,提出了分布式蒸发模型^[35],模型考虑蒸发分布在颗粒食品某个区域而非一个界面上,在食品油炸^[36]、干燥^[37]等处理过程均有应用。分布式蒸发模型多以颗粒食品内部各单相流体为对象构建控制方程,蒸发项数学描述位于液态水、气体质量守恒方程、热量守恒方程及其边界条件中,即:

$$\frac{\partial(S_w\rho_w\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot n_w = -I, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(S_g\rho_g\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot n_g = I, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(\rho C_p)_{eff} T] + \nabla \cdot [(C_p n)_{eff} T] = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) - H_v I. \quad (8)$$

式(6)中 I 表示液态水因蒸发过程的减少量;式(7)中 I 表示蒸发时的气体生成量;式(8)中 $-H_v I$ 表示颗粒食品表征体元的蒸发散失热量。与式(4)相比,因考虑颗粒食品内部各相流动,则边界能量守恒还需加上流体所带走的热量,即:

$$h(T_f - T_s) = K_{eff} \nabla T + (C_p n)_{fluid} T - H_v I, \quad (9)$$

式中:

fluid——颗粒食品内部流动相总和。

综上,食品热处理热/质传递数学模型中的蒸发处理方式多样,从忽略蒸发对热/质传递的影响到考虑蒸发对其的影响,从认为蒸发发生在一个界面上到利用分布式模型表述蒸发现象的改变,提高了数学模型的准确性和普适性。

2.2 颗粒食品多孔介质数学模型的参数测定

食品种类多、结构复杂,构建数学模型时需输入的参数众多,其或表征了颗粒食品内部固有性质,或表征了其传热、传质效率,或体现了内部传递机制,因受多方面因素影响而测定困难且其变化可能导致颗粒食品内部传热、传质规律的改变。在各参数中,对流传质系数和对流换热系数为食品非固有属性参数,参数值与过程条件及处理方式相关,其不仅是界定颗粒食品体系边界条件类型的第一步^[38],也是表征热处理过程颗粒食品热/质传递效率的关键参数;渗透率是多孔介质的基本参数,是流体在压力驱动下可通过多孔介质能力的量化,用于表征多孔食品内部传递机制。

2.2.1 对流换热系数 对流换热系数是指当环境流体与颗粒食品间存在温度梯度时,单位面积上流体与颗粒食品间的传热速率。颗粒食品的对流换热系数研究较多,主要的测量方法可分为温度测量以及表面热通量测量。

(1) 温度测量:分为稳态测量和瞬时测量两种。稳态测量要求测试过程温度保持恒定,可采用传热较好的金属代替颗粒食品,其更适用于类似生鲜产品且具有高导热性能的产品^[39],但未考虑颗粒食品的蒸发和传质,对多数存在蒸发的食品热处理过程,采用该法得到的换热系数与实际值相比偏小,其传热方程^[40]为:

$$\frac{T_{amb} - T}{T_{amb} - T_i} = \exp \frac{-hAt}{\rho C_p V}, \quad (10)$$

式中:

T_{amb} ——环境温度, $^{\circ}C(K)$;

A ——颗粒食品表面积, m^2 ;

V ——颗粒食品体积, m^3 。

瞬时温度测量是通过试验获得颗粒食品加热过程的中心温度—时间曲线,结合其导热方程、定解条件:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, 0 \leq x \leq L, t \geq 0, \quad (11)$$

式中:

x ——样品位置, m ;

α ——导温系数, m^2/s ;

L ——样品传热特征尺寸, m 。

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, -K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h(T \Big|_{x=L} - T_{\infty}),$$

$$T \Big|_{t=0} = T_i. \quad (12)$$

式(11)、(12)经分离变量后得其分析解,结合无量纲温度比率与时间的对数回归方程计算得传热系数。但该方法受颗粒食品几何形状限制,不同形状其无量纲温度分析解表达式不同,研究者通过此方法测定了表面涂抹胶体的马铃薯油炸^[41]、芋头油炸^[42]、蛋糕焙烤^[43]等过程的换热系数,但该方法得到的传热系数为整个过程的平均传热系数,且能量平衡方程中忽略了蒸发散热,导致结果有所偏差。

(2) 表面热通量测量:基础原理为包含颗粒食品水分蒸发散热和其自身导热两项的能量平衡方程:

$$hA(T_{\text{amb}} - T_s) = \frac{dm}{dt} \Delta H_v - C \cdot C_p \frac{dT}{dt}, \quad (13)$$

式中:

dm/dt ——颗粒食品水分损失率;

C ——颗粒食品水分含量, kg/kg^[44]。

表面热通量测定法的最大困难是颗粒食品表面温度的测量,目前多数研究者^[38,45-46]是将热电偶插入颗粒食品表面下方几毫米处(避免热电偶与表面分离)测定,是颗粒食品表面温度的近似值。此法考虑了蒸发散热,对包含蒸发过程的流体—颗粒食品热处理过程采用此方法准确度更高,广泛应用于颗粒食品油炸过程的参数测定。

2.2.2 对流传质系数 对流传质系数为颗粒食品内部质量在水分含量梯度驱动下的传递速率。颗粒食品的传质系数研究相对较少,现有的传质系数试验测定方法为无量纲水分含量分析解,此外还可由对流换热系数换算得到。

颗粒食品无量纲水分含量分离变量与无量纲温度分离变量同理:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t}, t > 0, \quad (14)$$

式中:

D ——扩散系数, m^2/s 。

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, -D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} = h_m (C|_{x=L} - C_\infty),$$

$$C|_{t=0} = C_0, \quad (15)$$

式中:

h_m ——对流传质系数, m/s ;

C_0 ——颗粒食品初始水分含量, kg/kg;

C_∞ ——平衡水分含量, kg/kg。

不同形状的颗粒食品其微分方程表达式及定解条件的无量纲水分含量分离变量分析解可参见文献^[47]。与无量纲温度分离变量法相比,包含了蒸发散失水分,准确率有所提高。目前,测定过南瓜^[48]、米饼^[49]以及甜点^[50]等油炸过程的对流传质系数,但多以油炸处理为对象,可参考对比数据仍太少,热处理方式及条件、颗粒食品种类

及尺寸等因素对传质系数的具体影响还需深入研究。

对流传质系数也可由对流换热系数换算得到,刘易斯类比是常用的换算关系式,研究者曾利用此关系式计算得到面包焙烤^[51]、鸡胸肉烘烤^[52]、咖啡焙烤^[53]等过程的对流传质系数。文献^[54]指出,对流传质系数与对流换热系数间的增加趋势并无显著相关性,其增加速率和达到最大值的时间点均不尽相同。因此,利用对流换热系数换算得到的对流传质系数可能与实际值产生较大偏差。

2.2.3 渗透率 渗透率是多孔介质数学模型中不可缺少的参数,是研究颗粒食品内部传递机制且提高模型可靠性所必需的参数。渗透率可分为固有渗透率和相对渗透率,一般需试验测量的为固有渗透率,但目前无针对颗粒食品固有渗透率测定的商业仪器,少有的可参考文献中设备均为团队自研。由文献^[3]可知,颗粒食品固有渗透率的测定可基于达西定律或卡曼—科泽尼模型计算得到。

(1) 达西定律:基于达西定律测定颗粒食品固有渗透率需经试验获得在一定时间段内,流体经恒定压力驱动通过特定食品样品截面的流量,按式(16)计算。

$$k = \frac{V}{\Delta P} \frac{\mu \Delta x}{A}, \quad (16)$$

式中:

k ——颗粒食品固有渗透率, m^2 ;

Δx ——样品厚度, m 。

利用此法测量的最大挑战在于获得通过食品组织的流体流量,试验需在保证颗粒食品完整性的基础上使流体在恒定压力下仅通过食品上下截面。研究者曾利用此方法测定过新鲜土豆及牛肉^[55]、烹饪后的牛排^[56]、苹果^[57]的固有渗透率且均使用自研试验装置。

(2) 卡曼—科泽尼模型:由卡曼—科泽尼模型计算颗粒食品渗透率需先测定颗粒食品的孔隙率,再由孔隙率与固有渗透率的相关性求出固有渗透率。

$$k = c \frac{\varphi^3}{(1 - \varphi)^2}, \quad (17)$$

式中:

c ——卡曼—科泽尼模型常数。

研究者曾利用此模型测定了面包^[58]、苹果组织^[57]的固有渗透率,但多数食品体积在热处理过程中有所改变,收缩或膨胀,必将导致颗粒食品孔隙结构发生改变,热处理过程的孔隙率动态变化由试验获取难度太大。因此,由卡曼—科泽尼模型计算颗粒食品热处理的固有渗透率或将产生较大偏差,以达西定律为依据的测定方法更为可靠。

2.3 其他问题

2.3.1 定解条件设定数学模型 定解条件由边界条件和初始条件构成,初始条件表征了颗粒食品在热处理前的状态;边界条件描述了热量与质量如何在边界传递,定解条件的正确表达才能使模型准确预测颗粒食品空间温度和水分含量及分布的变化趋势^[59]。同时,定解条件的设定保证了数学模型求解的单值性,则试验值与模拟值才具有可比性,以此证明数学模型的可靠。

2.3.2 食品形变问题 作为吸湿性材料,食品内部存在填充不同流动相的孔隙空间,热处理过程颗粒食品内部热/质传递不均匀,在表面张力及热应力存在的条件下易产生形变现象,改变颗粒内部结构及流动相的流动状态。现有研究中,考虑形变的多孔介质数学模型多存在于食品干燥或烘烤过程的热/质分析,为处理其他流体—颗粒食品热处理模型提供了参考方法,如从水分含量^[59-61]或固体力学变化^[62-63]角度出发探究形变与其关系以加入数学模型中,增加模型的准确性和实用性。

3 应用于食品热处理的优势与局限

作为流体—颗粒食品热处理过程控制及生产可视化研究手段,多孔介质数学模型模拟技术的应用存在一定的优势:①模型的数值求解方法已趋于成熟,基于不同数值求解方法的商用计算流体动力学软件层出不穷,如COMSOL Multiphysics、Ansys等,便于流体—颗粒食品热处理热/质分析;②模型以各流动相的热量、质量传递与转化为对象,详细分析颗粒食品内部水分、空气等的分布与迁移规律,从物理原理了解传递机理,指导热处理工艺过程;③无操作条件限制,可通过改变模型控制方程、参数数值等得到不同操作下的结果,方便省力。

当然,模型在应用仍存在些许局限:①流体—颗粒食品热处理过程涉及多物理学知识,缺少专业性知识理论,没有可直接用于指导多孔食品热处理过程中数学模型构建的书籍,建模困难;②颗粒食品在热处理过程中热物理性质变化显著,物性参数及过程传递参数测定困难,现有可用参数数据甚少;③现有的多孔介质数学模型多针对特定条件建立,不同流体—颗粒食品热处理过程间的数学模型交叉使用困难,模型普适性较差。

4 在食品热处理应用的发展趋势与前景

经历了近一个世纪的发展,多孔介质数学模型已逐渐趋于完整,现今的多孔介质数学模型更为接近热处理过程的真实情况,为流体—颗粒食品热处理过程物理机理提供更好的理解。近年来,基于多孔介质热/质传递理论的数学模型也得到了中国研究者的重视,油炸、干燥、爆炒等流体—颗粒食品热处理过程数学模型的构建众

多,为其过程设计、工艺优化及自动化设备生产提供指导,提高中国流体—颗粒食品热处理行业的技术水平。

随着数值模拟技术的发展和食品内部传递机制的理解,一个从基础原理出发、包含所有物理学现象数学描述、可在不同热处理间交互应用的多孔介质数学模型的构建是亟需解决的问题;同时,参数是模型的基础,探寻适合颗粒食品参数测定的设备及方法是提高模型精确性的需求,当传递机制与物性复杂性都不再是数学模型的瓶颈时,数值模拟技术必将在食品工业中发挥巨大潜能,得到更为广泛的应用。

参考文献

- [1] 邓力. 烹饪过程动力学函数、优化模型及火候定义[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 278-284.
- [2] 余冰妍, 邓力, 李文馨, 等. 猪里脊肉油传热过程中品质变化动力学研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 48-53.
- [3] GULATI T, DATTA A K. Enabling computer-aided food process engineering: Property estimation equations for transport phenomena-based models[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2): 483-504.
- [4] HALDER A, DHALL A, DATTA A K. An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying Part I: Model development and input parameters[J]. Food & Bioprocess Processing, 2007, 85(3): 209-219.
- [5] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质热质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 28-55.
- [6] NAGHAVI E A, DEGHANNYA J, GHANBARZADEH B. 3D computational simulation for the prediction of coupled momentum, heat and mass transfer during deep-fat frying of potato strips coated with different concentrations of alginate[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 235: 64-78.
- [7] MONDAL I H, DASH K K. Textural, color kinetics, and heat and mass transfer modeling during deep fat frying of chhenaJhili[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2016, 41(2): 1-13.
- [8] 王美霞, 刘斌, 王超, 等. 微波干燥过程中苹果切片的热质传递分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(21): 10-14.
- [9] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 228: 12-24.
- [10] 邓力. 炒的烹饪过程数值模拟与优化及其技术特征和参数的分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 282-292.
- [11] 邓力. 中式烹饪热/质传递过程数学模型的构建[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 285-292.
- [12] 崔俊. 爆炒烹饪的CFD数值模拟及功率测定研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017: 50-51.
- [13] KING C J. Freeze-drying of foods[M]. [S.l.]: CRC Press,

- 1971; 18-35.
- [14] DINCER I, YILDIZ M. Modelling of thermal and moisture diffusions in cylindrically shaped sausages during frying[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 28(1): 35-44.
- [15] DUTTA S K, NEMA V K, BHARDWAJ R K. Drying behaviour of spherical grains[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1988, 31(4): 855-861.
- [16] ATEBA P, MITTAL G S. Modelling the deep-fat frying of beef meatballs[J]. International Journal of Food Science & Technology, 1994, 29(4): 429-440.
- [17] 朱代根. 食品对流烹饪过程热质传递分析[J]. 科技信息, 2012(16): 38-39.
- [18] 尹海蛟, 杨昭, 陈爱强. 果蔬热处理传热过程的数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 344-348.
- [19] ZHANG Ji-feng, DATTA A K. Mathematical modeling of bread baking process[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(1): 78-89.
- [20] YAMSAENG S R, RUNGSEE C, PRASERTSIT K. Simulation of the heat and mass transfer processes during the vacuum frying of potato chips[J]. Songklanakarin Journal of Science & Technology, 2008, 30(1): 109-115.
- [21] 刘哈. 外部能量源作用下多孔介质相变传热传质耦合计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 14-17.
- [22] 朱杰. 多孔介质内的相变传热传质过程研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 8-17.
- [23] OUSEGUI A, MORESOLI C, DOSTIE M, et al. Porous multiphase approach for baking process-Explicit formulation of evaporation rate[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 535-544.
- [24] HALDER A, DATTA A K. Surface heat and mass transfer coefficients for multiphase porous media transport models with rapid evaporation[J]. Food & Bioprocess Processing, 2012, 90(3): 475-490.
- [25] LI Xiao-long, LLAVE Y, MAO Wei-jie, et al. Heat and mass transfer, shrinkage, and thermal protein denaturation of kuruma prawn (*Marsupenaeus japonicus*) during water bath treatment: A computational study with experimental validation[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 238: 30-43.
- [26] 王会林. 可变形多孔介质对流干燥过程热质传递机理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015: 10-12.
- [27] 宋林泉, 陈宝明, 郜凯凯. 基于 LBM 的多孔骨架热物性对固液相变的影响研究[J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(4): 356-364.
- [28] 张金. 多孔介质干燥分子尺度模型及模拟研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017: 7-21.
- [29] LLAVE Y, TAKEMORI K, FUKUOKA M, et al. Mathematical modeling of shrinkage deformation in eggplant undergoing simultaneous heat and mass transfer during convection-oven roasting[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 178: 124-136.
- [30] RAMACHANDRAN R P, AKBARZADEH M, PALIWAL J, et al. Computational fluid dynamics in drying process modelling: A technical review[J]. Food & Bioprocess Technology, 2018, 11(2): 271-292.
- [31] 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.
- [32] BAIK O D, MITTAL G S. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying[J]. Food Research International, 2005, 38(2): 183-191.
- [33] HALDER A, DHALL A, DATTA A K. Modeling transport in porous media with phase change: Applications to food processing[J]. Journal of Heat Transfer, 2011, 133(3): 1-13.
- [34] HALDER A, DHALL A, DATTA A K. An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying Part II: Results, validation and sensitivity analysis[J]. Food & Bioprocess Processing, 2007, 85(3): 209-219.
- [35] KHAN M I H, JOARDDER M U H, KUMAR C, et al. Multiphase porous media modelling: A novel approach to predicting food processing performance[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 58(4): 528-549.
- [36] ZHANG Zhi-jun, KONG N. Nonequilibrium thermal dynamic modeling of porous medium vacuum drying process[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012(6): 2 301-2 314.
- [37] WARNING A D, ARQUIZA J M R, DATTA A K. A multiphase porous medium transport model with distributed sublimation front to simulate vacuum freeze drying[J]. Food & Bioprocess Processing, 2015, 94: 637-648.
- [38] SANDHU J, PARIKH A, TAKHAR P S. Experimental determination of convective heat transfer coefficient during controlled frying of potato discs[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 180-184.
- [39] ALVIS A, VELEZ C, RADA-MENDOZA M, et al. Heat transfer coefficient during deep-fat frying[J]. Food Control, 2009, 20(4): 321-325.
- [40] SOSAMORALES M E, ORZUNAESPIRITU R, VELEZRUIZ J F. Mass, thermal and quality aspects of deep-fat frying of pork meat[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(3): 731-738.
- [41] KIM D N, MIN B, LEE S H, et al. Influence of surface coating with xanthan gum on heat transfer during deep-fat frying of potato strips[J]. Journal of Food Process Engineering, 2011, 35(6): 898-904.
- [42] AHROMRIT A, NEMA P K. Heat and mass transfer in

- deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2010, 47(6): 632-637.
- [43] SAKIN-YILMAZER M, KAYMAK-ERTEKIN F, ILICALI C. Modeling of simultaneous heat and mass transfer during convective oven ring cake baking[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 111(2): 289-298.
- [44] SAFARI A, SALAMAT R, BAIK O D. A review on heat and mass transfer coefficients during deep-fat frying: Determination methods and influencing factors[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 230: 114-123.
- [45] FERUH E, PETR D. Determination of heat transfer coefficient during high pressure frying of potatoes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 96(4): 528-532.
- [46] YAGUA C V, MOREIRA R G. Physical and thermal properties of potato chips during vacuum frying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(2): 272-283.
- [47] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 123-125.
- [48] AHROMIT A, NEMA P K. Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2010, 47(6): 632-637.
- [49] MOSAVIAN M T H, KARIZAKIV M. Determination of mass transfer parameters during deep fat frying of rice crackers[J]. *Rice Science*, 2012, 19(1): 64-69.
- [50] ERIMKOSE Y, DOGAN I S. Determination of simultaneous heat and mass transfer parameters of tulumba dessert during deep-fat frying [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2016, 41(4): 1-8.
- [51] NICOLAS V, SALAGNAC P, GLOUANNEC P, et al. Modelling heat and mass transfer in deformable porous media: Application to bread baking[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 130(3): 23-35.
- [52] RABELER F, FEYISSA A H. Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convective oven[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 237: 60-68.
- [53] FABBRI A, CEVOLI C, ALESSANDRINI L, et al. Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105(2): 264-269.
- [54] BIALOBRZEWSKI I. Determination of the mass transfer coefficient during hot-air-drying of celery root[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(4): 1 388-1 396.
- [55] DATTA A K. Hydraulic permeability of food tissues[J]. *International Journal of Food Properties*, 2006, 9(4): 767-780.
- [56] OROSZVARI B K, ROCHA C S, SJOHOLM I, et al. Permeability and mass transfer as a function of the cooking temperature during the frying of beefburgers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 74(1): 1-12.
- [57] FENG Hao, TANG Ju-ming, PLUMB O A, et al. Intrinsic and relative permeability for flow of humid air in unsaturated apple tissues[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 62(2): 185-192.
- [58] GOEDEKEN D L, TONG C H. Permeability measurements of porous food materials[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 58(6): 1 329-1 333.
- [59] SEYEDABADI E, KHOJASTEHPOUR M, ABBA-SPOURFARD M H. Convective drying simulation of banana slabs considering non-isotropic shrinkage using FEM with the Arbitrary Lagrangian-Eulerian method[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(S1): 36-49.
- [60] 刘显茜. 生物多孔材料非稳态收缩及其对传热传质影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010: 21-49.
- [61] DHALSAMANT K, TRIPATHY P P, SHRIVASTAVA S L. Moisture transfer modeling during solar drying of potato cylinders considering shrinkage[J]. *International Journal of Green Energy*, 2017, 14(2): 184-195.
- [62] 王会林, 卢涛, 姜培学. 生物多孔介质热风干燥数学模型及数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 325-333.
- [63] AJANI C, KUMAR A, CURCIO S, et al. Parametric study and shrinkage modelling of natural rubber sheet drying using COMSOL multiphysics[J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, 243(1): 1-8.
-
- (上接第 208 页)
- [41] GRASSIS, CASIRAGHI E, ALAMPRESE C. Fish fillet authentication by image analysis[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 234: 16-23.
- [42] SHI Ce, QIAN Jian-ping, HAN Shuai, et al. Developing a machine vision system for simultaneous prediction of freshness indicators based on tilapia (*Oreochromis niloticus*) pupil and gill color during storage at 4 °C[J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 134-140.
- [43] 胡记东, 刘远平, 孙爱华, 等. X 射线检测海水鱼片中鱼刺[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 151-156.
- [44] WANG Sheng, NIAN Rui, CAO Li-min, et al. Detection of fish bones in cod fillets by UV illumination[J]. *Journal of Food Protection*, 2015, 78(7): 1 414-1 419.
- [45] PARRA L, ROCHER J, ESCRIVÀ J, et al. Design and development of low cost smart turbidity sensor for water quality monitoring in fish farms[J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, 81: 10-18.