

农产品热风干燥传热传质 数值模拟研究进展

刘格含¹,王 鹏^{2,*},吴小华²,山 强¹,范芃佐²

(1.北京工业大学环境与能源工程学院,北京 100124;

2.北京石油化工学院机械工程学院,深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室,北京 102617)

摘 要:干燥是农产品安全贮藏的重要手段。热风干燥具有成本低、效率高、可持续大量干燥等优点,在农产品干燥中应用十分广泛。农产品热风干燥过程包含复杂的传热传质过程,对该过程进行准确预测可为绿色节能提质增效的干燥工艺开发、设备研制等提供重要理论依据。本文综述了农产品热风干燥传热传质过程的三种常用的数值模拟方法,即干燥动力学模型方法、连续介质假设模型方法和孔道网络模型方法。简要回顾这三种方法的发展历程,重点介绍其基本理论及数学模型,阐述其在农产品热风干燥研究中的应用,总结其优缺点,并对其未来发展进行展望。

关键词:农产品,贮藏,热风干燥,热质传递,数值模拟

Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer by Hot Air Drying of Agricultural Products

LIU Ge-han¹, WANG Peng^{2,*}, WU Xiao-hua², SHAN Qiang¹, FAN Peng-zuo²

(1.College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2.Beijing Key Laboratory of Pipeline Critical Technology and Equipment for Deepwater Oil & Gas

Development, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: Drying is an important means of agricultural products during storage processing. Hot air drying is widely used in industry because of its low cost, high efficiency, sustainable mass drying and so on. The hot air drying involves complex heat and mass transfer process which is closely related to the development of green and energy-saving drying process and equipment. In this paper, three kinds of numerical simulation methods of heat and mass transfer in hot air drying are reviewed, namely, drying dynamics model, continuum hypothesis model and pore network model. The basic theories and research status of the numerical simulation methods, merits and demerits, and application of prospects in drying are summarized.

Key words: agricultural products; storage; hot air drying; heat and mass transfer; numerical simulation

中图分类号: TS219

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)22-0342-10

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020010245

引文格式: 刘格含, 王鹏, 吴小华, 等. 农产品热风干燥传热传质数值模拟研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 342-350, 357.

LIU Ge-han, WANG Peng, WU Xiao-hua, et al. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer by Hot Air Drying of Agricultural Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(22): 342-350, 357. (in Chinese with English abstract) <http://www.spgykj.com>

近年来,我国农产品产量位居世界前列,农产品产销关系到国民经济发展全局。大多数果蔬、粮食和食用菌等农产品通常含水率较高,易腐烂变质,采摘后的农产品处理不当会造成大量产后损失。干燥可以去除物料中大量水分,降低水分活度从而抑制微生物活动,是农产品保藏的重要加工技术手段。传统干燥方式以自然晾晒或烘、烤干为主,这些传统

干燥加工受气候因素影响很大,如日光、环境温度、湿度等,因此存在霉变、干燥周期长、灰尘与虫蝇的污染等问题而难以保证干制质量。为了提高干燥效率、降低能耗,在干燥过程中陆续采用生物质、太阳能、热泵等为主要热源的烘干方式,并发展了热风干燥、微波干燥、真空干燥和红外干燥等一系列先进干燥技术^[1-4]。在这些干燥工艺中,热风干燥具有工艺

收稿日期: 2020-02-03

作者简介: 刘格含(1992-),女,硕士研究生,研究方向: 动力工程, E-mail: 599264172@qq.com。

* 通信作者: 王鹏(1989-),男,博士,讲师,研究方向: 农产品热泵干燥技术, E-mail: wangp@bipt.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFD0700200)。

简单、成本低、干燥品质好、使用范围广等特点,在农产品干燥生产实践作为最主要的干燥方式之一^[5]。

热风干燥是通过介质(如空气)的加热,将热量传递到物料,除去物料中水的过程。物料周围环境温度升高,物料表面的水分在蒸发、扩散作用下,流向热空气;物料内部与表面产生水分梯度差,内部的水分以气态或液态的形式向表面扩散,物料水分持续减少;同时物料表面和内部产生温度梯度,热量从表面向中心传递,最终达到保持物料整体处于适宜含水率的目的^[6]。整个过程包含复杂的热质耦合传递作用,水分在干燥过程中以气态或液态形式在物料表面与内部的迁移过程决定干燥时长,而干燥环境与物料的温度又影响水分传递过程。干燥时长与温度是衡量干燥能耗的重要指标。对于种子、菌类、中药材等高热敏性、高活性成分而言,温度也是决定干燥品质的重要操作参数之一。除此之外,热风干燥过程中的风速、物料结构、表面积等也影响着物料干燥过程,导致物料干燥过程中传热传递规律更为复杂^[7]。过程中物料内部干燥机理极为复杂,而温度与干燥环境相对湿度影响干燥速率与品质。可以说,农产品热风干燥过程中的热质传递过程直接影响干燥的品质、能耗,对该过程的机理研究与准确预测可以为绿色节能的干燥工艺开发、设备研制等提供理论指导,在农业增效、提供有效供给和保证干燥工艺安全方面有重要意义^[8]。

针对干燥过程热质耦合传输过程的研究,目前的研究手段大多采用实验研究和数值模拟研究^[9-11]。实验研究一般通过采集干燥过程中的温度、湿度、水分等数据,针对数据或现象进行假设验证、分析总结,这种研究方法的优点是实验数据真实有效,但对于大多数具有复杂容水结构、物性非匀质等特点的农产品,干燥中物料内部湿热传输过程无法直接观察,单靠实验研究将难以查明热质耦合传递规律。数值模拟方法通过基于干燥机理的热质传递控制方程求解,得到干燥热空气和物料内部的温度、水分等的参数,以此分析干燥过程,从而获得干燥过程物料品质变化机理。对于干燥周期长、工艺复杂、数据难采集等的干燥过程,数值模拟具有直观性与快速计算的优点。由于绝大部分农产品内部结构本身具有复杂性,干燥传输过程的影响因素具有多样性,传热传质规律复杂,数值模拟在探究干燥过程中的湿份传输规律、温度分布等方面发展迅速,已然成为现代农产品干燥研究的重要方式方法^[12]。本文将对研究农产品热风干燥热质传输过程的三种常用的数值模拟方法进行综述,简要回顾这些方法的发展历程,重点介绍其基本理论及数学模型,阐述其在农产品热风干燥研究中的应用,总结各自优缺点,并对这些方法的发展进行一定的展望,目的是在为农产品热风干燥的深入研究提供一些参考借鉴价值。

1 基于干燥动力学模型的热风干燥传热传质研究

干燥动力学对农产品的数值模拟一般针对薄物料层建模,薄层干燥数学模型广泛用来描述热风干

燥中不同时刻水分比的变化,从而获得干燥过程中的物料干燥特性变化或对干燥器进行能耗分析等,广泛用于农产品加工、食品工业等领域的研究^[13-17]。现已获得的干燥动力学的薄层干燥方程有多种,一般按数学模型的推导是否基于相关理论及数学模型相关参数确定是否基于实验过程,将薄层干燥数学模型分为理论方程、半理论半经验方程和经验方程^[18]。以下给出一些典型干燥动力学模型的物料干燥应用研究现状。

1.1 理论方程

最常用于描述干燥过程的理论方程是基于菲克扩散定律推导得出,是一种在忽略干燥过程中物料体积变化、收缩应力等作用下,探究物料内部水分随干燥时间变化的方程式。假设干燥过程中的湿份只以液态形式转移,其推动力是湿份浓度梯度产生的扩散迁移。水分比(MR)的概念作为含水量的无量纲形式被引入,将其定义为在t时刻除去游离水与初始时刻的游离水的比例:

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad \text{式(1)}$$

式中: M_t 为t时刻干基含水量,%; M_0 为初始干基含水量,%; M_{eq} 为平衡干基含水量,%。

根据对水分比定义式积分结合液态扩散理论得出模型,该模型一般称为指数模型:

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad \text{式(2)}$$

理论模型是通过对于干燥过程基本理论推导得出、用于表示干燥中物料内部水分变化过程的数学模型,但实际的干燥过程较为复杂,单纯的理论模型在干燥研究中应用有限。

1.2 半理论半经验方程

干燥过程是一个复杂的热质耦合传输过程,仅采用菲克扩散理论来构建干燥动力学方程明显不能够反应出全部的影响因素,导致计算精度较低。为了克服这一不足,众多学者在理论方程的基础上,对数学模型进行修改,将复杂的、干扰因素众多的干燥过程通过实验数据进行简化修正,一定程度地提高了计算精度。

Henderson 和 Pabis 在指数模型基础上,推导方程:

$$MR = a \cdot \exp(-kt) \quad \text{式(3)}$$

式中:a和k均是由实验数据得出的经验参数,其中k包含扩散系数,t表示干燥时间。

该方程对于描述某些物料的中间干燥阶段较为吻合,如蓝莓干燥过程中出现的第二个降速干燥阶段^[19]。该模型也适用于描述苹果的干燥过程的水分变化^[20]。

将物料的几何形状、扩散系数和初始含水率等影响干燥过程的因子包含在该模型的系数中,提出两项模型(two-term model):

$$MR = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t) \quad \text{式(4)}$$

式中: a_1 、 a_2 、 k_1 、 k_2 均是由实验数据得出的经验参数。

王汉羊等^[21]通过山药切片的干燥实验验证了两项模型预测值与实验结果拟合良好,说明该模型能够描述及预测山药干燥过程的水分变化规律。王攀^[22]的实验也证明该模型适用于描述干燥过程中水稻等谷物物料内部水分变化过程。Omolola 等^[23]在对香蕉切片的干燥实验中指出,可以由菲克定律阐明香蕉干燥过程的水分迁移机理,使用两项模型描述干燥过程与该实验的统计数据吻合度较高。同样,也能在一些中草药的干燥中发现两项模型是最适合描述此类物料干燥行为的干燥模型^[24]。

对于一些含水率较高的物料,其干燥特性曲线的不同阶段特征较为明显。对于此类物料,单一模型可能并不适用于拟合整个干燥过程曲线,并考虑到由于干燥过程三个阶段的干燥机理各不相同,认为一般只有在降速干燥期可以认为与模型拟合良好。通过数据拟合,利用线性回归分析获得系数可以描述干燥前期曲线,因此在两项模型基础上附加单独项,通过三项特性曲线的拟合获得新的干燥动力学曲线,得到三项模型(Diffusion Approach)方程:

$$MR = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t) + a_3 \exp(-k_3 t) \quad \text{式(5)}$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 、 k_1 、 k_2 、 k_3 是由实验数据得出的经验参数。该模型是模拟山药、魔芋、猕猴桃等物料的干燥过程中水分变化的最佳模型^[25-27]。

Page 方程在对玉米的干燥实验中,在 Newton 方程积分形式所获得的方程基础上指出湿份扩散率与浓度梯度成正比关系,也将干燥物料表面空气流速影响考虑到模型中,提出薄层干燥方程:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad \text{式(6)}$$

式中: k 和 n 是与干燥物料相关的经验常数。

黄克昌等^[28]在考虑澳洲坚果果仁水分、品质等干燥特性的实验中建立干燥动力学方程,并获得 Page 模型与实验结果拟合良好的结论。实验也验证了该方程适用于切片型农产品的干燥研究^[29-30],是干燥实验中较为经典模型之一。

Page 方程通过最小二乘法处理得到修正方程,也称为修正 Page 方程(Modified Page equation):

$$MR = \exp[-(kt)^n] \quad \text{式(7)}$$

式中: k 和 n 是与干燥物料相关的经验常数。

杜伟锋等^[31]对中草药通过实验获得干燥速率、含水率、水分比等干燥特性建立干燥模型,采用修正 Page 方程能较好的预测不同温度、不同时刻的水分比。Ekeke 等^[32]采用芭蕉作为物料做切片薄层干燥实验,证明 Page 方程和修正 Page 方程是适用于预测该物料干燥过程的模型。

方程(3)~(7)都是用来对干燥过程中的湿份扩散进行描述和控制,其中涉及到物料形状、物性等因素,是半理论半经验方程。半理论半经验方程是以菲克扩散理论为基础,约束条件更贴近于实际,将复杂的、干扰因素众多的影响因素当量通过实验数据对进行简化修正,考虑到数学方程中,精度得到一定的提升,但方程参数的确定也需要大量的实验数据与时间。

1.3 经验方程

除了上述两种方程模型,还有一种根据实验数据直接得到数学关系式模型,与干燥过程并无物理联系,通常被认为是经验方程。其优点是方程等式本身根据实验数据观察统计,由实际操作经验所建立干燥模型,不包含类似理论方程中的假设,可将众多的干燥影响因素当量考虑到数学模型中,模型精度较高。指数形式的干燥动力学模型中的 k 的变化取决于风温,但并未阐明二者的内在关系,所以研究者提出在薄层干燥实验中以风温为变量,将整个干燥过程按时间段划分,并分段统计,通过连续计算短时间内增量的变化量推导出模型,获得典型经验方程:

$$t = a \cdot \ln MR + b \cdot (\ln MR)^2 \quad \text{式(8)}$$

式中: a 和 b 表示经验常数。

该模型克服了指数模型不能充分描述整个干燥过程的缺点,与玉米的薄层干燥实验数据拟合良好,而且也能拟合温度变化范围较大情况的实验数据。后续研究者进一步提出温度适用范围更宽的经验方程式(9),在肉类和马铃薯片的干燥研究中也得到广泛应用^[33-34]:

$$MR = 1 + a_1 t + a_2 t^2 \quad \text{式(9)}$$

式中: a_1 、 a_2 表示经验常数。

干燥动力学方程形式多样,理论方程可以简单解释干燥过程中的水分迁移基本机理,其参数具有物理意义,奠定了干燥过程传热传质基本原理,但简化了一定的实际干燥条件,如水分的迁移机理只考虑扩散作用,所以其应用受到一定限制。经验方程只依靠于实验数据,将经验参数等效于所有干燥影响因素,对于某种物料或某个实验过程,基于大量实验数据整理后得出,精度较高,但由于经验方程需要实验操作获得的经验建立模型,也导致其应用范围有限。半理论半经验方程由菲克定律为基础理论,同时借助实验数据来将其他众多因素当量考虑到方程中,兼顾理论方程和经验方程两者的优点,模型更接近于物料干燥过程,精度较高,适用范围较广,在工程应用中较为广泛。但干燥动力学模型的研究方法自身带有一定局限性,如随实验环境或实验方法的改变,都要从大量实验数据中获得经验参数,对干燥过程中物料内在机理研究的热质传递规律探索并不明确。表 1 给出一些常用干燥动力学模型,由表 1 可以看出,每种模型都至少包含一个“干燥特性参数 k ”,对于这个参数的获取,不仅受物料特性的影响,也受实验过程的影响,且模型也并没有考虑物料本身物性、结构与干燥过程热质传递的关系,实际上这些因素都影响模型的准确性与适用性。

2 基于宏观多孔介质连续模型的热风干燥传质研究

绝大部分如菌类、中药材、粮食等农产品,物料本身具有孔隙特征,或类似谷物等颗粒堆积形成的孔隙结构,都具有明显的孔隙性。通常农产品物料可以等效为多孔介质。因此采用宏观多孔介质连续性方法建模也是研究农产品干燥传热传质过程的常

表1 常用薄层干燥数学模型
Table 1 Mathematical models for thin-layer drying

模型	方程
指数模型 (Newton)	$MR = \exp(-kt)$
单项扩散模型 (Henderson and Pabis)	$MR = a \exp(-kt)$
两项扩散模型 (Two-term model)	$MR = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t)$
三项扩散模型 (Diffusion Approach)	$MR = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t) + a_3 \exp(-k_3 t)$
Thompson	$t = a \cdot \ln MR + b \cdot (\ln MR)^2$
Wang and Singh	$MR = 1 + a_1 t + a_2 t^2$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Two-term exponential	$MR = a \exp(-k_0 t) + (1-a) \exp(-kbt)$
Modified Page equation	$MR = \exp[-(kt)^n]$

用方法之一。干燥过程中水分在多孔介质内部的迁移涉及液态扩散、毛细作用、蒸发冷凝等现象,针对以上多孔介质中传热传质现象,发展了一系列基于宏观多孔介质干燥连续模型。具有代表性的有液态扩散理论、毛细管理论、蒸发冷凝理论等,以下对这些理论的数学模型简要概述。

2.1 液态扩散理论的数学模型

以 Lewis 为代表的液态扩散理论的数学模型:
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla (D \nabla C)$$
 式(10)
式中: t 为时间; C 为含湿量; D 为液相扩散系数。
如果需要找到一个适合的数学模型获得物料内部扩散作用与物料表面干燥过程外部的相互影响机制关系,该方程作为干燥过程中的质量传输方程数学模型,可有效计算物料局部含湿量的变化过程,对于干燥过程的质量传递预测有重要作用^[35]。多孔介质液体流动中存在压差和浓度差情况也会导致扩散作用:

$$\varphi = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$
 式(11)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$
 式(12)

式中: Φ 为渗透率; D 为扩散系数; $\partial C / \partial x$ 为浓度梯度。

刘志军^[36]对木材干燥过程研究中,类似微波干燥状态下,在物料内部温度持续保持较均匀的状态下,此时蒸汽压差是湿份迁移的主要驱动力,采用该数学模型对湿份迁移进行描述。

2.2 毛细管理论的数学模型

当多孔介质的孔隙中没有足够的液体,这时候就由气体去填充剩余的孔隙空间的状态,此时多孔介质中的液体流动则被称为“毛细流动”。由于气体受热蒸发脱离液膜导致气液界面两侧产生压力差,压力指向气液凹面方向,造成管内液体部分分压力小于气体部分压力,从而推动液体流动,导致出现物料内部湿份由低浓度处流向高浓度处的现象,这与扩散理论所得出的规律不一致。这种干燥过程中物料内孔隙湿份的流动驱动力是由毛细力起主导作用。数学上,毛细管理论可以表示为:

$$J = -K \nabla \psi$$
 式(13)

式中: J 为毛细通量; K 为水导系数; ψ 为毛

细势。
毛细流动在农产品干燥机理的研究中必不可少,因为液体流动近似为稳态,且流动忽略惯性力作用,常常采用达西定律来描述多孔介质干燥过程中的液体流动:

$$J = -\frac{k}{\mu} \nabla P$$
 式(14)

式中: k 表示渗透率; μ 表示动力粘度; P 表示压力。

但即使是实际干燥中毛细作用起主导作用,扩散、蒸发等依然会对干燥过程有着一定影响。在干燥研究中可以根据压差计算物料内部湿份迁移速率^[36]。

2.3 蒸发冷凝理论的数学模型

由于农产品作为多孔介质研究一般是颗粒结构或纤维结构,多孔介质的固体基质的温度对湿份扩散作用起到一定影响。之前的研究大多忽略了热效应,并没有考虑气液相变与温度之间的相互作用。在考虑热效应后给出描述干燥过程的数学模型。给出质量扩散方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \frac{1-\alpha}{\alpha} \rho_s \frac{\partial M}{\partial t}$$
 式(15)

给出热扩散方程:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T + k_p \frac{\partial M}{\partial t}$$
 式(16)

式中: M 表示物料含水量; C 为孔隙中的蒸汽浓度; D 为恒温状态下的蒸汽扩散系数; α 为孔隙空间体积系数。

系数一般情况下是常数, ρ 是密度。蒸汽在热效应下流动性大于水,蒸汽在较低温度处冷凝,此处孔隙中的水压力增大,水与蒸汽流动方向相反。该数学模型一般常见于研究堆积谷物中相变的扩散过程和干燥热质耦合水分传输数值模拟中^[37-38]。

2.4 Luikov 理论的数学模型

Luikov 对多孔介质干燥过程中液体蒸发的传热和传质机理展开进一步研究,他认为热传递、湿份传递、多孔介质中内部压力是相互影响的,首先提出湿热传递耦合模型理论。并给出相应的数学关系式:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = k_{11} \nabla^2 M + k_{12} \nabla^2 T + k_{13} \nabla^2 P$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k_{21} \nabla^2 M + k_{22} \nabla^2 T + k_{23} \nabla^2 P$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = k_{31} \nabla^2 M + k_{32} \nabla^2 T + k_{33} \nabla^2 P \quad \text{式(17)}$$

式中: k 均为耦合系数,反映不同传输现象之间的影响关系,如 k_{12} 表示物料温度对物料内部水分迁移运动的影响; M 表示物料含水率; T 表示温度; P 表示压力。

Luikov 理论在干燥湿热传递耦合模型发展上做出了巨大贡献,该理论认为若多孔介质中的压力梯度很小可以忽略,则多孔介质中湿份的主要驱动力为浓度梯度和温度梯度;若多孔介质中蒸发剧烈,则压力急剧上升,湿份传递的主要驱动力就成了压力梯度,这样的结果与达西定律一致。Luikov 理论模型可以描述不同物料的干燥过程,在干燥研究中的建模有很高的通用性。Jayapragasam 等^[39]通过数值计算获得 Luikov 解析解,并将所求解应用于大麦籽干燥实验的数值预测,将预测结果与实验数据对比以验证方程解的有效性,最终验证在压力梯度作用下的热质传递模型 Luikov 方程解与实验数据有较高一致性。但由于对于不同物质、不同环境下的耦合系数都会发生变化,因此对于耦合系数的确定的通用性不强,限制了其应用。

2.5 平均体积理论的数学模型

在宏观尺度农产品干燥研究中,基本上将多孔介质看成均匀连续介质体,通过物理定律以直观的方式推导出干燥过程微分方程。连续性方法为分析多孔介质内在属性和研究内在传递规律提供一种有效手段。鉴于多孔介质内在结构具有复杂性、存在多相共存的情况,从宏观到微观层面都很难对其获得完整数学描述。因此 Whitaker 提出利用已知的连续介质的输运方程,分别从气、液、固三相的各单相特性建立多孔介质中热量、质量和动量同时传递的理论,利用微积分的物理意义将这些方程按合适体积平均,获得描述多孔介质中热质传递方程,一般称之为“平均体积理论”。该理论中心思想是:采用代表性控制单元体 (Representative Volume Element, REV) 中获得变量的控制方程,然后基于 REV 体积上积分后求取平均变量值,用以获得代表整个宏观尺度上的数学特征值^[40]:

$$\langle \phi \rangle = \frac{1}{V} \int_{REV} \phi dV \quad \text{式(18)}$$

式中: V 为单元控制体的体积; $\int_{REV} \phi dV$ 为单元体内某变量的积分总和; $\langle \phi \rangle$ 为平均变量。

选取合适的包含固体基质和孔隙区域划入 REV, REV 应具有足够大的体积可以反映宏观效应,尺度应该远小于整个计算域的宏观尺度^[41]。平均体积理论认为所选取的代表性单元的数学特征可以反映整个多孔介质中的特征结构,依靠单元体中对湿份传递计算出的“有效传输系数”,这样就不必依靠实验获得经验参数^[42]。Whitaker 将平均体积理论应用到干燥过程中一般所用的方程如下:

连续性方程:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \langle U \rangle) = 0 \quad \text{式(19)}$$

式中: ε 为孔隙率; $\langle U \rangle$ 是相平均速度矢量。

动量方程:

$$\frac{\rho_f \partial \langle U \rangle}{\varepsilon \partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon} \langle U \rangle \cdot \nabla \cdot \langle U \rangle = \rho_f F - \nabla \langle p \rangle^f + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \langle U \rangle \quad \text{式(20)}$$

多孔介质中的流动与普通流动不同,流动规律不仅与流体性质有关,还与孔隙的渗透结构有关。对于研究多孔介质的流动除了 N-S 方程,还需要考虑多孔介质内部孔隙结构对流动的渗流作用,因此平均体积下达西定律表达式:

$$-\nabla \langle p \rangle^f = \frac{\mu}{k_d} \langle u \rangle \quad \text{式(21)}$$

式中: k_d 为多孔介质渗透率; $\langle p \rangle^f$ 为相压力平均值; u 为渗流速度。

由于大雷诺数流动下的达西定律受到限制,不少学者提出修正达西方程作为动量方程的补充,应用于动量方程的求解^[40]。

能量方程:在多孔介质中,由于存在不同相,存在固体和流体之间的换热,固、流体的传热特性也不相同,因此能量方程分为固体、流体能量方程。

$$\text{固体: } (1-\varepsilon)(\rho c)_s \frac{\partial \langle T \rangle^s}{\partial t} = (1-\varepsilon) \nabla \cdot (k_s \nabla \langle T \rangle^s) + (1-\varepsilon)q_s - h_f(\langle T \rangle^f - \langle T \rangle^s) \quad \text{式(22)}$$

$$\text{流体: } \varepsilon(\rho c_p)_f \frac{\partial \langle T \rangle^f}{\partial t} + (\rho c_p)_f \langle U \rangle \cdot \nabla \langle T \rangle^f = \varepsilon \nabla \cdot (k_f \nabla \langle T \rangle^f) + \varepsilon q_f + h_f(\langle T \rangle^f - \langle T \rangle^s) \quad \text{式(23)}$$

式中: c 为固体比热; c_p 为流体定压比热; k 为导热系数; q 为内热源所产生的单位体积的热量; $\langle T \rangle^f$ 和 $\langle T \rangle^s$ 分别代表固相平均温度和流体平均温度; h_f 为固流体间的表面换热系数。

体积平均理论与代表性单元的提出在多孔介质的流动与传热领域受到广泛应用。国外较早将该理论应用于研究实际物料干燥中。Perre 等^[43]将该方程用于对流干燥过程中的输运过程研究,不仅获得物料干燥的传热传质耦合变化,也对干燥数学模型有了更完整的分类,并将该方法广泛应用于木材干燥研究中。Ma 等^[44]在对于干燥多孔介质物料的湿份流动与能量传输规律的相关研究中,平均体积方法有效的将宏观物理量与微观尺度联系起来。Esfahani 等^[45]在建立干燥过程的二维模型,结合平均体积下的热质传递方程获得物料温湿度分布,并在此基础上分析物料正背面在干燥中的影响。代表性体积单元应用于研究农产品或多孔材料具有离散分布性质的多相热质传输引起的力学特性变化^[46-47]有着重要意义。

国内对于农产品干燥数值模拟中对平均体积方法的应用较为普遍。胡爱娟等^[48]应用该理论建立模型,用以研究不同情况下多孔物料中的液体分布。李超新等^[49]通过平均体积法的数值计算分析气流场温度场分布,设计流场均匀的干燥装置。敖尚民^[50]采用平均体积理论所建立的多孔介质宏观控制方程,结合 IDEAL 算法对人参烘干房中气流组织及温度场均匀性对人参的相关影响进行了研究。对于颗

粒堆积的多孔介质农产品,如粮仓^[51-52]内部温湿度耦合数值模拟研究中,与有限元方法结合可以清晰的揭示空气流动与热源对粮食含湿量的影响。

平均体积理论从某种意义上是微观尺度与宏观尺度的耦合研究方法,对于在非连续假设条件下描述多孔介质几何形状参数、边界条件、方程封闭等的发展奠定了理论基础。但 Whitaker 的理论是建立在微积分的连续上,在一定程度上依然没有摆脱“连续性假设”,多孔介质的体积平均所得的控制方程实际上就是多孔介质的宏观控制方程,不能在微小尺度对孔隙结构准确描述,对于揭示干燥实验中物料出现的不规则干燥前沿机理以及多孔介质中各组分(液体、气体、气液混合物)的传输规律有一定局限性。

3 基于孔道网络模型的热风干燥传热传质数值模拟研究

宏观尺度的连续型模型在干燥过程数值模拟中将农产品看作均匀的、连续的介质,在揭示热风干燥过程的湿热传递规律中计算耗时短、应用广泛,但农产品具有各向异性的特征,绝大部分水分存在于物料内部的孔隙空间中,连续性方法在农产品的干燥研究中存在一定局限性,并不能充分揭示干燥过程物料内部热量与水分的传输机理。从物料内部孔道出发,充分探究不同物料内部结构与干燥条件的相互关系,将模型的构建从连续模型转变为离散模型,这样的模拟过程更接近真实物料内部孔道结构,能揭示更多反映物料对象的干燥特性。

3.1 孔道网络数理模型建立基本过程

3.1.1 农产品物料孔道网络物理模型构建 采用孔道网络模型对物料干燥行为研究是为了克服宏观干燥模型描述物质干燥过程相关缺点,是将干燥的研究从连续模型转为离散模型的开端。当然建立能够反映多孔介质内部复杂的孔隙结构是非常困难的,因此在孔道网络模型中,采用节点表示较大体积的孔隙,利用骨架表示固体基质,连接相邻节点之间的空隙为孔道或者喉道,如图 1(a)、图 1(b)所示。三者的分布服从根据实验显微技术观察所测得的农产品物料的孔隙结构分布规律从而建立能够反映真实多孔介质相关的数学特性。在控制网络的某些参数上,如配位数相等,则认为两种模型性质相同^[53],为简化多孔介质的复杂性,一般采取规则网络建模进行计算,如图 1(c)、图 1(d)所示^[54]。

3.1.2 孔道网络内基本传输方程 最初的孔道网络模型只是考虑了干燥中最简单的情况:理想状态下孔隙中完全充满液体的饱和多孔介质的等温干燥,其中毛细作用是孔道中水分迁移的主要机制。入侵渗流概念应用多孔介质的两相流动中。在这样的条件下,可以观察到干燥过程中由于液体吸收热量蒸发,蒸发导致气液界面在多孔介质的孔道中形成和移动。Prat 作为该模型的前驱者,指出在一定程度上干燥可以看作是一种不混溶流体的置换过程,是气相与液相的驱替过程:气相作为侵入相,液体作为被驱替相,孔道内临界毛细管压力由 Young-Laplace 方程确定^[53]。将标准的入侵渗流形式改进用于模拟

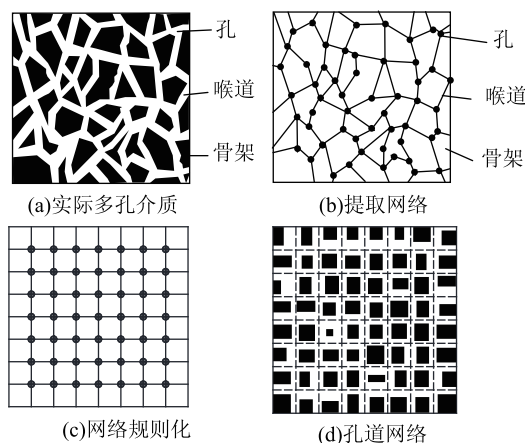


图1 孔道网络建模示意图
Fig.1 Pore network modeling

干燥过程中的毛细机理移动和液团簇的出现问题,两种基本原理相似但有区别^[55]。此时的模型假设多孔介质为刚性材料,只能用于吸湿作用不大的多孔介质研究^[56]。

对于孔道网络中存在气相的孔隙区域^[57-58],由质量守恒得:

$$\frac{\partial m_v}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla p_v) + S_m \quad (24)$$

式中: m_v 为蒸汽质量; k 为扩散系数; p 为蒸汽压, S_m 为源项,由水分蒸发得来,前一项表示扩散项。

对于孔道网络中的液相孔隙区域^[57-58],由质量守恒得:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} = -S_m \quad (25)$$

式中: m_l 为蒸汽质量; S_m 为源项; 为被蒸发的水分。

3.1.3 孔道网络模型干燥求解过程 第一步:根据孔道网络结构,将固体基质假设为刚性材料,水分只存在于节点和喉道内,干燥过程中将相邻节点、喉道存在水分聚集的区域称为液团;第二步:判断第一步所得液团边界毛细压力最小喉道;第三步:根据计算所得温度场选择小毛细压力喉道中气液界面蒸发,由液团蒸发量等于其周围所有气液界面蒸发量之和计算液团干燥时间;第四步:重复第一步更新孔道网络中的相分布,直到整个模型干燥完毕。

3.2 孔道网络模型研究现状

最初的模型建立重点在于湿份的传递,然而在干燥过程中,温度引起的物料变化是不可忽视的,Plourde 等^[59]在孔道网络基础模型上,在干燥温度远低于水分的蒸发温度的情况下,探究温度梯度对干燥过程的影响,建立了包括温度场计算的孔道网络模型。并给出了在温度梯度下的孔道网络模拟算法,这样初步实现了在孔道网络中传热传质的耦合。通过模拟验证温度梯度引起气液相界面表面张力梯度变化,从而对干燥过程的相分布造成一定影响,并指出可以通过此工作进而在微尺度上研究温度对干燥速率造成的影响。Metzger 等^[60]在等温条件借助原有的孔道网络模型,通过描述干燥过程中液态水

的对流作用和蒸汽扩散作用表达孔隙中的传质,也为了使模型更接近实际,引入传热过程,获得干燥曲线和固体基质温度随时间的变化规律。不同孔径分布和配位数的孔隙结构对模拟干燥过程存在影响,通过孔隙尺度上数值计算^[61]可得到干燥过程中的水分分布和干燥速率曲线。Metzger等^[62]将孔道网络模型与干燥技术结合应用:考虑到单个孔隙及其内部状态都有可能决定宏观表象,实际多孔介质中的孔径呈非均匀状态,于是单就对孔径的大小对干燥过程中可能出现的毛细作用、连通性以及多孔介质中的传递现象影响进行的深入研究,并初步考虑孔隙网络中的传热模型,表示可以通过这种在孔隙尺度上离散的孔隙建模得到在宏观尺度的建模中所需“传输系数”中液体渗透率。

农产品的热风干燥是一个热质传递耦合过程,因此对该模型的应用拓展到不同干燥阶段孔道网络结构对水份的蒸发影响。Surasani等^[63]在孔道网络对干燥的模拟中,在干燥过程的微尺度下将不同的干燥期与模型可视化所对应起来,分析了传热对干燥过程中的传质、冷凝等影响。甚至后来从更细微的角度研究孔道网络。Prat^[64]从孔道网络中不同孔的形状、气液相界面的弯月面形状、弯月面与固体接触角的大小对干燥过程更深入研究,如微观结构与微观物性对干燥速率的影响,液体粘度在孔道网络模拟中对弯月面的影响^[65]等,从而了解干燥过程的影响因素。Salin^[66]用孔道网络模型对农产品中的纤维所构成的毛细管道中自由水在干燥中的行为研究,模型可以解释不同干燥条件下的物料演变以及干燥中物料渗透率的预测。Taleghani等^[67]基于孔道网络模型考虑孔隙中液体的粘性作用模拟非等温干燥过程,模拟结果与非粘性模型对比,说明液体的粘性流动、温度对干燥速率存在相关性,同时孔道网络的空间分布也是影响干燥速率的重要因素。Attari等^[68]基于孔道级别研究多孔介质表面在干燥过程中形成的干(湿)团簇,这些团簇在物料表面形成干湿斑块,其中湿斑块对于研究干燥过程的传质规律起着重要作用,因此提出在连续模型中考虑“边缘效应”来建立更完善的连续介质模型,这也为干燥模型的发展提出了一个新方向。

三维建模相较于二维模型,更贴近于实际物料,也更有说服力。但目前的三维模型的发展受到两方面的限制:一是计算能力所面临计算量的数量级巨大,如一个1 mm大小的模型,三维与二维的网格计算量相差高达 10^{12} 的数量。其次是三维建模中相应的尺度比例,如何建立一个符合液体在毛细作用的流动规律的模型,如孔径应该按比例小于孔道长度,关于这方面的工作,有学者进行了一定研究^[69],但研究依然处于三维模型初级阶段,并不能用于实际干燥问题的研究。因此目前在农产品干燥中采用孔道网络模型依然是基于二维空间建立模型。

国内对于孔道网络模型的应用起步较晚,丁小明^[55]的工作可以说是孔道网络在国内干燥研究工作的开端,基于入侵渗流对孔道网络模型进行了模拟

与实验分析。袁越锦等^[57,70]基于“人造多孔介质”的规则孔道网络模型建模,以及分形几何学运用到模型中形成不规则孔道网络模型建模,并进行了模拟和实验的验证,结果证明孔道网络模型能较好的解释“湿斑”和干燥中出现的“不规则前沿”现象。后以谷物堆为典型代表的针对骨架颗粒堆积多孔介质在多尺度建立传热传质模型并模拟^[71],其结果可有效的判断干燥速度与系数的影响关系。杨彬彬^[54]结合分形几何学,建立了不规则分形孔道网络模型,更好的描述农产品多孔介质的干燥过程。

湿热传递过程作为最基本的干燥过程,基本上考虑了湿份水分在孔隙中的蒸发传递,数学建模中保证其质量守恒,而忽略了骨架在干燥中的质量热量的变化。实际热风干燥过程中,骨架与孔隙之间依然存在热质交换。谭礼斌^[72]借助孔道网络研究干燥过程的传热传质过程并建立了针对干燥过程中的应力应变模型模拟,并将模拟结果与连续性假设的模拟结果数据进行了对比,结果表明孔道网络模拟法能更好的反应实际干燥过程。孔道网络模型在干燥中也能用于更细微尺度,如植物中的组织细胞的间隔间隙为孔道,细胞质膜等原生质作为骨架,也符合多孔介质定义的假设。刘玲霞等^[73]将多孔介质微观结构的孔道网络模型应用于植物细胞水分跨膜运输模型的构建,克服半经验模型需要试验获得经验参数的局限性,较为准确描述热风干燥过程中的农产品物料内部水分传输过程。常剑^[74]将孔道网络干燥相关理论与植物生理学相结合,建立微米尺度下的孔道网络结构模型,并对水分跨膜传输和共质体传输传质机理进行分析,构建湿份传输数学模型,模型在一定程度上能反映真实的干燥情况。

迄今为止,孔道网络模型在干燥方向的研究已经达到了一定的水平,可以根据确定的干燥条件、孔隙结构、液体特性等提高干燥产物的质量。孔道网络模型的发展为研究包括农产品的多种多孔介质的内部湿热传递过程提供了一种有效的介观尺度方法,特别适用于毛细作用占主导地位的传输驱动力,因此孔道网络模型可以拓展到用于研究由毛细作用引起的大部分力学现象。但目前倘若接近真实物料干燥模拟还有一些工作需要做:一是如何确定建立的孔隙网络模型与真实物料的孔隙结构相符,如现有的显微观察也只能观测到大孔径孔隙;二是对于建模过程中节点形状确定对模拟干燥过程的相关影响;三是三维孔道网络模型的构建;四是孔道与固体基质的信息传输规律尚不明确,缺少对干燥中物料尺度的温、湿度耦合过程研究,忽略干燥过程中的吸附、变形等作用。

4 结论与展望

本文阐述了对于农产品干燥过程中热质传递数值模拟常用的三种方法,对这三种方法的基本原理进行了主要观点和各自优缺点总结,所得结论如下:

目前的干燥动力学研究是针对于薄层干燥过程中的干燥速率的研究,常用于实验研究与工业生产,具有快速预测干燥结果的优点。同时方程中含

有的“经验常数”,因为其物理意义并不明确,需要依靠实验获得,在农产品、食品的干燥机理研究中发展受到限制。

对于宏观多孔介质连续性模型能获得宏观尺度上的湿份迁移规律。该理论的发展对于明确农产品干燥过程中的湿热演变的物理机理做出了巨大贡献,也是目前在农产品、食品等干燥生产和研究领域适用最广泛的一种方法,但针对存在各向异性特征的自然物料,数学描述不准确,深入研究物料的微观结构对干燥过程的传热传质规律影响存在局限。

孔道网络模型在干燥理论中对于研究物料内部细微结构特征对整个过程的影响,以及探究微观尺度与宏观尺度的相关联系有重要意义,是一种具有发展潜力的模型。但目前有关孔道模型在干燥中的应用处于初级研究阶段,未来的方向是贴近实际物料描述不规则孔道,通过以微尺度孔道网络模型为基础衔接宏观模型,进而推进跨尺度方法研究。

参考文献

- [1] 麦馨允,黄斌,黄娇丽,等.白玉菇远红外干燥工艺优化及其对品质的影响[J].食品与发酵工业,2019(14):150-157.
- [2] 刘显茜,邹三全,徐桢宇,等.菠萝皮渣热风对流干燥工艺研究[J].食品与发酵科技,2020,56(1):39-43,53.
- [3] 宋树杰,张舒晴,姚谦卓,等.熟化甘薯片微波真空干燥特性及其动力学[J].真空科学与技术学报,2019,39(10):857-863.
- [4] 田华.生姜微波干燥动力学模型构建[J].保鲜与加工,2020,20(1):127-132.
- [4] 田华.生姜微波干燥动力学模型构建[J].保鲜与加工,2020,20(1):127-132.
- [5] 任广跃,张忠杰,朱文学,等.粮食干燥技术的应用及发展趋势[J].中国粮油学报,2011,26(2):124-128.
- [6] 吴海虹,朱道正,卞欢,等.农产品干燥技术发展现状[J].现代农业科技,2016(14):279-281.
- [7] 张东京,高贵珍,王敏,等.紫薯干燥的动力学模型及工艺优化[J].基因组学与应用生物学,2019,38(1):269-275.
- [8] 李长友,赵懿琨,马兴灶.荔枝干燥热湿特性模型解析与验证[J].农业工程学报,2014,30(15):289-298.
- [9] 郜坤.谷物干燥过程热质交换及能耗研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [10] 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):10-14,51.
- [11] 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.
- [12] Xu L Z, Li Y M, Ma Z, et al. Theoretical analysis and finite element simulation of a rice kernel obliquely impacted by a threshing tooth [J]. Biosystems Engineering, 2013, 114 (2): 146-156.
- [13] 王凤贺,丁冶春,陈鹏泉,等.油茶籽热风干燥动力学研究[J].农业机械学报,2018,49(S1):426-432.
- [14] 杨绮云,丁睿.土豆片微波真空干燥动力学模型的研究[J].哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2017,33(3):324-327.
- [15] 张兴盈,辛延蓉,蔡良辉,等.云当归干燥特性及动力学

研究[J].安徽农业科学,2017,45(5):102-106,178.

- [15] 张兴盈,辛延蓉,蔡良辉,等.云当归干燥特性及动力学研究[J].安徽农业科学,2017,45(5):102-106,178.
- [16] Osorio-Revilla G, Gallardo-Velázquez T, Cárdenas-Bailón F, et al. Shrinkage modeling, drying kinetics and quality assessment of carrot cubes dried in a two stage spouted bed drying process[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2019:654.
- [17] Maleki M, Shahidi F, Varidi M J, et al. Hot air drying kinetics of novel functional carrot snack: Impregnated using polyphenolic rich osmotic solution with ultrasound pretreatment [J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(2): e13331.
- [18] 赵学伟.稻谷薄层干燥及吸湿性研究进展[J].粮食流通技术,2002(1):24-28.
- [19] Zielinska M, Sadowski P, Błaszczak W. Combined hot air convective drying and microwave-vacuum drying of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.): Drying kinetics and quality characteristics[J]. Drying Technology, 2016, 34(6):665-684.
- [20] Chong C H, Figiel A, Law C L, et al. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(4):975-989.
- [21] 王汉羊,刘丹,于海明.山药微波热风耦合干燥特性及动力学模型[J].食品科学,2018,39(15):115-121.
- [22] 王攀.水稻种子干燥热动力学分析及损伤机理研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [23] Omolola A O, Jideani A I O, Kapila P F. Modeling of thin layer drying characteristics of banana cv. Luvhele [J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2015, 21(2):342-348.
- [24] Hee Y Y, Chong G H. Drying behaviour of *Andrographis paniculata* in vacuum drying [J]. International Food Research Journal, 2015, 22(1):393-397.
- [25] 汤尚文,孙永林,王同齐,等.山药红外干燥特性与数学模型[J].食品科技,2016,41(6):93-99.
- [26] 吴绍锋.魔芋真空干燥特性及模型研究[D].重庆:西南大学,2016.
- [27] Doymaz I. Mathematical modelling of thin-layer drying of kiwifruit slices [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2009, 33:145-160.
- [28] 黄克昌,郭刚军,邹建云.澳洲坚果果仁干燥 Page 模型的建立及品质变化[J].食品科技,2017,42(5):68-72.
- [29] 张芳,黄玉龙,汤莹,等.苹果片太阳能低温吸附干燥工艺优化与模型研究[J].现代食品科技,2019,35(8):160-167,235.
- [30] 周罗娜,王辉,刘嘉,等.马铃薯片的热泵干燥与干燥动力学拟合[J].江苏农业科学,2019,47(16):208-213.
- [31] 杜伟锋,顾超,康显杰,等.延胡索热风干燥特性及动力学行为[J].中成药,2019,41(8):1889-1893.
- [32] Ekeke I C, Nkwocha A C, Kamen F L, et al. Statistical modelling of drying characteristics of unripe plantain (*Musa paradisiaca*) slices [J]. International Journal of Engineering and Management Research, 2019, 9(4):30-39.
- [33] 李秋庭,吴建文.盐焗鸡微波干燥特性及数学模型[J].食品科学,2014,35(11):58-61.

- [34] 刘艳,陶胜达,唐小闲,等.马铃薯片热风干燥特性及动力学模型[J].保鲜与加工,2019,19(4):82-88.
- [35] Das I, Arora A. Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223: 208-219.
- [36] 刘志军.木材微波干燥特性的研究[D].北京:北京林业大学,2006.
- [37] Li F Z, Li Y, Liu Y X, et al. Numerical simulation of coupled heat and mass transfer in hygroscopic porous materials considering the influence of atmospheric pressure [J]. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 2004, 45(3): 249-262.
- [38] 胡众欢,杨明金,杨卓然,等.基于多物理场耦合的热风干燥模型及其验证[J].西南大学学报:自然科学版,2020,42(2):118-128.
- [39] Jayapragasam P, Le Bideau P, Loulou T. Luikov's analytical solution with complex eigenvalues in intensive drying [J]. Transport in Porous Media, 2019, 130(3): 923-946.
- [40] 潘阳.计算传热学理论及其在多孔介质中的应用[M].北京:科学出版社,2011.
- [41] 陈宝明,刘芳,云和明.多孔介质自然对流传热传质[M].北京:科学出版社,2016.
- [42] Whitaker S. Coupled transport in multiphase systems: A theory of drying [C]//Advances in Heat Transfer. Amsterdam: Elsevier, 1998: 1-104.
- [43] Perre P, Moser M, Martin M. Advances in transport phenomena during convective drying with superheated steam and moist air [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36(11): 2725-2746.
- [44] Ma H, Ruth D W. The microscopic analysis of high forchheimer number flow in porous media [J]. Transport in Porous Media, 1993, 13(2): 139-160.
- [45] Esfahani J A, Majdi H, Barati E. Analytical two-dimensional analysis of the transport phenomena occurring during convective drying: Apple slices [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 123: 87-93.
- [46] Catton I. Transport phenomena in heterogeneous media based on volume averaging theory [J]. Heat and Mass Transfer, 2006, 42(6): 537-551.
- [47] Yang C, Quintard M, Debenest G. Upscaling for adiabatic solid-fluid reactions in porous medium using a volume averaging theory [J]. Transport in Porous Media, 2015, 108(2): 497-529.
- [48] 胡爱娟,路春美,王迎亚,等.加热条件下含湿多孔介质中液体分布及机理[J].工程热物理论,2016,37(7): 1544-1548.
- [49] 李超新,张学军,朱自成,等.热风干燥中气流加热装置的数值模拟[J].农机化研究,2014,36(10):68-70,74.
- [50] 教尚民.人参烘干房中气流组织及温度场数值模拟研究[D].北京:北京石油化工学院,2019.
- [51] 张中涛,王远成,元伟,等.粮仓内水分和温度变化的数值模拟分析[J].粮油食品科技,2014,22(6):106-109.
- [52] 白忠权.吸湿性仓储粮堆内热湿耦合传递规律的研究[D].济南:山东建筑大学,2013.
- [53] Prat M. Recent advances in pore-scale models for drying of porous media [J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 86(1/2): 153-164.
- [54] 杨彬彬.多孔介质干燥分形孔道网络模拟及实验研究[D].北京:中国农业大学,2006.
- [55] 丁小明.多孔介质干燥的孔道网络模拟及试验研究[D].北京:中国农业大学,2003.
- [56] Prat M. Percolation model of drying under isothermal conditions in porous media [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1993, 19(4): 691-704.
- [57] 袁越锦,杨彬彬,焦阳,等.多孔介质干燥过程分形孔道网络模型与模拟: I. 模型建立[J].中国农业大学学报,2007,12(3):65-69.
- [58] 袁越锦,赵哲,曹博涛,等.多孔介质干燥分区域模型的孔道网络理论分析[J].食品与机械,2014,30(4):3-6,33.
- [59] Plourde F, Prat M. Pore network simulations of drying of capillary porous media. Influence of thermal gradients [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(7): 1293-1307.
- [60] Metzger T, Tsotsas E. Influence of pore size distribution on drying kinetics: A simple capillary model [J]. Drying Technology, 2005, 23(9/10/11): 1797-1809.
- [61] Zhang T, Salama A, Sun S Y, et al. Pore network modeling of drainage process in patterned porous media: A quasi-static study [J]. Journal of Computational Science, 2015, 9: 64-69.
- [62] Metzger T, Tsotsas E. Network models for capillary porous media: Application to drying technology [J]. Chemie Ingenieur Technik, 2010, 82(6): 869-879.
- [63] Surasani V K, Metzger T, Tsotsas E. Consideration of heat transfer in pore network modelling of convective drying [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(9/10): 2506-2518.
- [64] Prat M. On the influence of pore shape, contact angle and film flows on drying of capillary porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(7/8): 1455-1468.
- [65] Yiotis A G, Boudouvis A G, Stubos A K, et al. Effect of liquid films on the drying of porous media [J]. AIChE Journal, 2004, 50(11): 2721-2737.
- [66] Salin J G. Drying of liquid water in wood as influenced by the capillary fiber network [J]. Drying Technology, 2008, 26(5): 560-567.
- [67] Taleghani Taslimi S, Dadvar M. Two dimensional pore network modelling and simulation of non-isothermal drying by the inclusion of viscous effects [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 62: 37-44.
- [68] Attari Moghaddam A, Kharaghani A, Tsotsas E, et al. A pore network study of evaporation from the surface of a drying non-hygroscopic porous medium [J]. AIChE Journal, 2018, 64(4): 1435-1447.
- [69] Börnhorst M, Walzel P, Rahimi A, et al. Influence of pore structure and impregnation - drying conditions on the solid distribution in porous support materials [J]. Drying Technology, 2016, 34(16): 1964-1978.

(下转第357页)

[52] 张丁文, 刘悦, 解生旭, 等. 一测多评法测定青钱柳中异槲皮苷、槲皮素-3-O- α -L-鼠李糖苷和阿福豆苷的含量[J]. 长春中医药大学学报, 2014, 30(5): 810-812.

[53] 刘峰, 马久太, 王浩仁, 等. 一测多评法测定沙棘鲜果中槲皮素、山柰素和异鼠李素含量[J]. 中国药业, 2017, 26(13): 24-27.

[54] 陶兴宝. 基于内外结合的花椒分级及其质量评价研究[D]. 成都中医药大学, 2017.

[55] 吴文杰, 邓阳, 谭桂林, 等. 一测多评法测定葛根药材中5种异黄酮类成分[J]. 中草药, 2017, 48(4): 777-781.

[56] 木盼盼, 安琪, 张彦昭, 等. 一测多评法测定葛根药材中9个异黄酮类成分的含量[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(22): 4888-4895.

[57] 周桂芬, 姚冲, 钱晓东, 等. 一测多评法结合面积归一化法测定西红柿中西红花苷类成分[J]. 药物分析杂志, 2017, 37(8): 1524-1529.

[58] Hou J J, Guo J L, Cao C M, et al. Green quantification strategy combined with chemometric analysis for triglycerides in seeds used in traditional Chinese medicine [J]. *Planta Medica*, 2018, 84(6-7): 457-464.

[59] Zeng S L, Li S Z, Lai C J, et al. Evaluation of anti-lipase activity and bioactive flavonoids in the *Citri Reticulatae Pericarpium* from different harvest time [J]. *Phytomedicine*, 2018, 43: 103-109.

[60] 高喜梅, 王晓凤, 周冰倩, 等. HPLC 多波长条件下陈皮指纹图谱及“一测多评”法的建立[J]. 中药材, 2019(11): 2598-2602.

[61] 李文涛. 不同加工方法对干姜片及其炮制品质量影响研究[D]. 合肥, 安徽中医药大学, 2018.

[62] 李宇邦, 肖凤霞, 宋小欣, 等. 一测多评法比较毛橘红与光橘红5种黄酮类成分含量[J]. 中草药, 2018, 49(2): 444-449.

[63] 王妍妍, 施晓艳, 张越, 等. 一测多评法测定不同产地茯苓中4种三萜类成分的含量[J]. 中草药, 2018, 49(20): 4899-4904.

[64] 魏丽娟, 易倩, 张曲, 等. 一测多评法测定藜麦中6种酚类成分[J]. 食品工业科技, 2018, 39(19): 238-242, 248.

[65] 徐家怡, 张煜, 王娇, 等. 一测多评法测定食用玫瑰中5种

非挥发性成分的含量[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 234-239, 245.

[66] 文治瑞, 张亮, 王娇, 等. 一测多评法测定玫瑰精油中14种有效成分的含量[J]. 贵州科学, 2019, 37(4): 34-39.

[67] Li Y H, Zhang Y M, Zhang Z J, et al. Quality evaluation of *Gastrodia elata* tubers based on HPLC fingerprint analyses and quantitative analysis of multi-components by single marker [J]. *Molecules*, 2019, 24(8): 1521.

[68] Zhou Z, Li N, Zhang H F, et al. Simultaneous quantitative analysis of 11 flavonoid derivatives with a single marker in *Persimmon* leaf extraction and evaluation of their myocardium protection activity [J]. *Journal of Natural Medicines*, 2019, 73(2): 404-418.

[69] 郭立强, 李熙, 刘谦, 等. 一测多评法比较不同产地甘草中6种有效成分含量[J]. 中国现代应用药学, 2019, 36(24): 3051-3055.

[70] 黄和军, 崔小兵, 杨军辉. 一测多评法测定槐花中3种黄酮类成分的含量[J]. 安徽医药, 2019, 23(12): 2366-2370.

[71] 李小琪, 范燕豪, 陈阳, 等. 一测多评法同时测定广藿香中4种成分[J]. 中成药, 2019, 41(8): 1884-1888.

[72] 彭镰心, 张艳红, 魏丽娟, 等. 一测多评法测定甜荞芽中5种酚类成分[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 344-348.

[73] 伍彩红, 冯冲, 杨丽, 等. 一测多评法测定肉桂药材中4种挥发油类成分[J]. 中国药学杂志, 2019, 54(5): 400-406.

[74] 杨玲, 刘成浩, 韩萧茜, 等. 一测多评法测定蜂胶类保健食品中芹菜素等5种成分的含量[J]. 食品工业科技, 2019: 1-15.

[75] 杨玲, 刘齐, 刘成浩, 等. 一测多评法测定蜂胶类保健食品中咖啡酸等4种成分的含量[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 134-140.

[76] 张寒, 徐远涛, 刘杰, 等. 小蓟中芦丁、蒙花苷、木犀草素和芹菜素一测多评方法的建立[J]. 国际药学研究杂志, 2019, 46(10): 785-789.

[77] 王龙星, 肖红斌, 梁鑫森. 一种提高色谱指纹谱保留时间重现性的新方法[J]. 分析化学, 2003, 31(10): 1232-1236.

[78] 王智民, 钱忠直, 张启伟, 等. 一测多评法建立的技术指南[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(6): 657-658.

(上接第350页)

[70] 袁越锦, 杨彬彬, 焦阳, 等. 多孔介质干燥过程分形孔道网络模型与模拟: II. 数值模拟与试验验证[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(4): 55-60.

[71] 袁越锦, 谭礼斌, 徐英英, 等. 颗粒堆积多孔介质干燥多尺度多层结构传热传质模型及模拟[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(12): 2726-2729.

[72] 谭礼斌. 果蔬多孔介质干燥热质传递及应力应变研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.

[73] 刘玲霞, 刘相东, 常剑, 等. 果蔬干燥过程的水分跨膜传输模型构建[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 256-264.

[74] 常剑. 果蔬干燥过程细胞孔道网络模拟及实验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.