油菜籽热风干燥传热传质与优化的研究进展

杨玲，杨明金，郭孟报，刘斌，陈建
（西南大学工程技术学院，重庆 400715）

摘要：油菜是经济价值高、发展潜力大的油料作物，也是蛋白质、饲料、蜜源和能源作物，油菜籽的干燥和储存联系油菜高产栽培和油脂深加工综合利用。本文在分析油菜籽干燥特点和主要干燥技术的基础上，综述了油菜籽热风干燥传热传质与优化的研究进展，以期为油菜籽热风干燥装置设计、干燥工艺、参数和过程优化等的研究提供依据。目前，有关油菜籽热风干燥传热传质与优化的研究多限于实验层面，不具有广泛适用性。传统干燥理论和模型大多以 Luikov 理论和 Whitaker 理论为基础，对其适当简化或修正，由于假设多孔介质为均匀分布连续介质，无法揭示局部和整体之间的本质联系。将分形理论与孔道网络模型相结合是多孔介质干燥尺度综合的有效方法。数值研究有宏观、多尺度和微观三个层面，借助 CFD 技术可以有效获悉干燥速率、能量消耗和湿分分布等信息，以优化干燥装置和过程控制。油菜籽热风干燥实验研究主要集中在干燥特性、干燥品质及其测量技术等方面，为获得良好的干燥品质，应注意干燥工艺、参数和过程优化。

关键词：传热传质；热风干燥；优化；油菜籽；综述
文章篇号：1673-9078(2014)7-306-313

Research Progress of Heat and Mass Transfer and Optimization of Rapeseed Hot-air Drying

YANG Ling, YANG Ming-jin, GUO Meng-bao, LIU Bin, CHEN Jian
(College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Rape is grown for production of vegetable oil, protein, forage, nectar, and energy with high economic value and development potential. The process of drying and storage of rapeseed is a key link between rape planting and oil comprehensive process and utilization. Based on analysis of rapeseed drying characteristics and main drying technology, research progress of heat and mass transfer and optimization of rapeseed hot-air drying was summarized for providing basis for optimization of apparatus design, drying technique, parameter, and process control. Traditional drying theories and models are mostly based on Luikov Theory and Whitaker Theory, and made some simplification or modification. Since porous media was assumed as meanly distributed continuous material, the intrinsic relationship between the local and the whole porous media is hard to be revealed. Combining Fractal Theory and Pore Networks Model is an effective method for scale integration of porous media drying. Numerical researches on hot-air drying are made from macroscopic, multiscale and microscopic perspectives. By applying CFD technology, information of drying rate, energy consumption and moisture distribution can be effectively obtained, which can be employed to optimize the drying apparatus and control the drying process. Researches on rapeseed hot-air drying are mainly focused on drying characteristics, quality of the product and their measurement technology. The drying technique, drying parameters and drying process should be optimized in order to obtain good drying quality of the product.

Key words: heat and mass transfer; hot-air drying; optimization; rapeseed; summary

油菜是经济价值高、发展潜力大的油料作物，也是蛋白质、饲料、蜜源和能源作物[1~2]。油菜籽是世界第三大植物油和第二大蛋白粉来源，2012 年全球油菜籽产量达 64.8 百万吨，是 1965 年的 12.46 倍[3]。油菜籽的干燥和储存联系油菜高产栽培和油脂深加工综合利用，新收获油菜籽的含水量一般较高（15%~30%），若不及时干燥，极易发热、酸败及霉变，从而影响种用油菜籽的生理特性，以及加工用油菜籽的加工特性和制油品质[4~5]。

国内“晒场”的传统自然干燥法“费地费时费工”，不能很好满足油菜籽的干燥需求。为保证油菜籽种用安全、制油品质及储藏要求，须对其进行人工干燥。目前，热风干燥是国内应用最广泛的油菜籽人工干燥

收稿日期：2013-11-6
基金项目：国家自然科学基金资助项目（31301575）；重庆市科委自然科学基金项目（CSTC2012 JJA80027）
作者简介：杨玲（1974-），女，副教授，研究方向：农产品储藏与保鲜
通讯作者：杨明金（1973-），男，博士，教授，研究方向：农业系统工程

方法，占总干燥量的85%以上。油菜籽热风干燥传热传质过程涉及多相多组分耦合及湿分相变，其干燥速率受控于油菜籽籽粒内部水分（湿分）迁移过程[6]。油菜籽籽粒具有复杂的多孔介质生物质结构特性，现有多孔介质传热传质模型对油菜籽热风干燥不具有很强的适用性，而且缺乏干燥工艺对油菜籽品质变化规律的实验研究。目前，油菜籽热风干燥装置设计、工艺和过程控制仍主要依赖于经验和实验[2]。本文重点综述油菜籽热风干燥传热传质与优化的研究现状和发展动态，以期为油菜籽热风干燥装置设计、工艺和过程控制优化提供参考。

1 油菜籽干燥技术的概述

1.1 油菜籽的干燥特点

油菜籽的干燥具有以下特点：

（1）干燥前需要清杂，干燥后需要清粮。油菜籽呈球形，表面光滑，粒小且轻（平均粒径 1.27 mm~2.05 mm，平均单粒重 4.2 mg），流动性好。干燥前应清杂，以防止杂质造成油菜籽在干燥机内流动不畅造成的安全隐患。干燥后需要清粮，以免干燥机内残存油菜籽长时间干燥而发生火灾[5]。

（2）干燥过程需要严格控制热风温度。油菜籽籽粒大部分由胚的子叶充满，胚为薄壁细胞，细胞内富含油滴（38%~45%），油滴对干燥过程中的热风温度敏感，需严格控制干燥过程的热风温度[7~8]。

（3）干燥过程应严格控制最高料温。油菜籽的孔隙率低（36%），热风对油菜籽的穿过性差，压降大，同时油菜籽的含油量高，不易散热，干燥过程应严格控制最高料温，以保证干燥品质和操作安全[5, 9]。

（4）干燥后需要降温冷却。油菜籽蛋白质含量较高（20%~25%），相对于水稻、玉米和小麦等更容易吸湿，且温度越高，越容易达到吸湿平衡，因而油菜籽干燥后需进行降温冷却作业，以防止油菜籽吸湿返潮[10]。

（5）应注意干燥工艺、参数和过程优化。油菜籽籽粒具有复杂的多孔介质生物质结构特性，其籽粒固体骨架间具有不同尺度及曲度的微孔道（孔道表征直径 87 nm），干燥过程复杂，涉及多相多组分耦合及湿分相变，因而应注意干燥工艺、参数和过程优化[6, 11]。

1.2 油菜籽的主要干燥技术

1.2.1 “晒场”干燥

油菜的栽培历史十分悠久，1984 年在甘肃秦安大地湾一期遗址发现了距今 8200 年前的已碳化油菜籽残骸[12]。千百年来，人们一直利用太阳辐射热能以“晒场”的方式干燥油菜籽至今。在我国具有晒场 1000 m^2 以上或相应种子干燥设施设备是申领种子生产许可证的必备条件。但是，“晒场”干燥抵御油菜籽收获期的高温多雨季节（梅雨季节）不利天气能力较差。

1.2.2 就仓干燥

就仓干燥将新收获油菜籽存放在配有机械通风系统的粮仓内，以自然空气或加热空气（热风）作为干燥介质，对仓内高水分油菜籽进行机械通风干燥并直接储藏。就仓干燥通常选择上行通风方式，热风相比自然空气，能加速干燥进程。就仓干燥属于慢速低温干燥，有利于保持油菜籽原有品质，一般干燥量大，能减少搬运环节，降低成本，在美国和加拿大等国家被广泛应用[4, 13]。

1.2.3 热风干燥

热风干燥用加热空气作为干燥介质，以加热的方式去除油菜籽籽粒内的水分。热风既是蒸发籽粒内水分所需热量的载热体，又是带走籽粒表面蒸发出来的水分的载湿体。热风干燥过程应根据不同的干燥方式和油菜籽的不同用途，严格控制热风温度和最高料温。例如，采用滚筒干燥方式的最高热风温度为 110 ℃（油菜籽原始水分>18%）；加工用油菜籽的最高料温为 70 ℃。热风干燥是国内外最常采用的干燥技术，但存在的问题是：热风对油菜籽的穿过性差，压降大，干燥过程能耗大，成本较高[4, 8]。

1.2.4 流化干燥

流化干燥通过提高热风流速或振动方式使油菜籽籽粒在流化状态下去除籽粒内的水分。流化床内油菜籽籽粒温度分布均匀，可以避免籽粒局部过热。籽粒在流化床内“沸腾”，与热风接触面积大，传热效果好，水分去除率高。籽粒在流化床内的停留时间较短，单次干燥流程降水幅度较低，新收获油菜籽一般需经多次流化干燥处理才能达到安全储藏要求[5,14]。

1.2.5 过热蒸汽干燥

过热蒸汽干燥用过热蒸汽直接与油菜籽籽粒接触而去除籽粒内的水分。干燥机排出的废气全部为温度较高蒸汽（>100 ℃），可用冷凝的方法回收其潜热，热效率高，节能效果显著。过热蒸汽比热大、传热系数高，干燥效率高，蒸汽用量少。但由于干燥料温超过 100 ℃，对油菜籽的适应性受到影响[15]。

1.2.6 微波干燥

微波干燥通过微波介电加热方式去除油菜籽籽粒内的水分。微波的波长范围在 1 m 至 1 mm 之间，频率范围在 300 MHz 至 300 GHz 之间（微波炉使用频

率为 2.45 GHz）。微波干燥为体积加热方式，具有选择性，含水率越高，加热效果越明显。油菜籽籽粒平均粒径小于微波穿透深度，籽粒中心处温度最高，该处的自由水分首先汽化，形成籽粒内较高压力梯度，加速了籽粒内的水分迁移。通常微波干燥和热风方式配合使用，以提高干燥效率[15~16]。

2 油菜籽热风干燥传热传质的过程与特点

2.1 油菜籽热风干燥传热传质的过程

油菜籽籽粒孔道表征直径小于 10^{-7} m，具有毛细多孔介质特性[11]。热风干燥时，传热和传质同时发生，热风作为干燥介质，既是载热体，又是载湿体。

在干燥初始阶段，热风掠过油菜籽籽粒表面，将所载热量传至各籽粒，使籽粒表面自由水分蒸发，并以蒸汽（气-液两相）形式穿过水分-空气界面向周围扩散。随着干燥的进行，籽粒表面自由水分完全汽化，湿表面逐渐从籽粒表面退缩，籽粒内部水分因毛细压力迁移至表面而被蒸发，籽粒可能会收缩。当平均湿含量达到临界湿含量时，进一步干燥使籽粒表面出现干点。在此干燥阶段，油菜籽被逐渐加热至热风湿球温度，干燥速率取决于热风温度、湿度、风速、油菜籽料温和物理状态等外部条件，并保持基本恒定，为恒速干燥阶段[15,17]。在油菜籽籽粒表面没有充足自由水分时，籽粒温度升高并在其内部形成温度梯度。热量从籽粒外部传入内部，而水分则从籽粒内部向表面迁移。在临界湿含量出现至油菜籽干燥到达最终湿含量时，内部水分迁移成为控制因素，此阶段的干燥速率逐渐下降，为降速干燥阶段[15,18]。

油菜籽籽粒内的水分主要以液态形式存在，但随着干燥的进行和籽粒温度的升高，部分液态水汽化后以蒸汽形式存在。籽粒内的水分迁移机制主要包括分子扩散（气态水）、毛细扩散（液态水）和压力驱动（气态水和液态水）。分子扩散与蒸汽浓度梯度和蒸汽的分子扩散率相关，而蒸汽的分子扩散率受油菜籽籽粒的孔隙率、孔道直径和孔道迂曲度等的影响。毛细扩散由毛细压力引起，受籽粒孔道内液态水浓度梯度和籽粒内温度梯度影响，其中以液态水浓度梯度的影响更大，液态水将由高浓度区域向低浓度区域扩散。压力驱动由于籽粒孔道内存在的气相压力梯度使籽粒内气相水分和液相水分发生迁移，迁移速度与气相压力梯度和籽粒多孔介质孔道特性相关[11,15]。

油菜籽籽粒较小，成熟油菜籽收获时籽粒表面的自由水分较少，其热风干燥过程的恒速干燥阶段持续时间较短，并受油菜籽的初始水分、热风温度和湿度的影响较大。在降速干燥阶段，油菜籽的干燥速率逐渐变缓，并接近指数规律变化，其干燥速率大小主要由油菜籽籽粒内部结构决定。油菜籽种皮（上表皮）结构致密，对籽粒内水分穿过种皮向外排出有较强阻碍作用，表现为带种皮油菜籽籽粒干燥速率低于去皮籽粒[19~20]。

2.2 油菜籽热风干燥传热传质的特点

油菜籽热风干燥传热传质具有以下特点：

（1）传热和传质同时发生，传热能有效促进传质。在干燥初始阶段，油菜籽水分较高，热风所载热量传至油菜籽籽粒，使籽粒表层水分蒸发，传热和传质同时发生。水分蒸发速率受热风温度、湿度和风速等的影响较大，但蒸发速率过快会使油菜籽籽粒种皮开裂，从而影响油菜籽的干燥品质和后期储存，应通过控制热风温度等外部干燥条件以严格控制初始阶段的干燥速率。随着干燥的进行，油菜籽籽粒内部的水分迁移成为主要控制因素，传热能有效促进籽粒内部水分迁移，进而影响油菜籽的热风干燥过程[6,20]。

（2）传热传质过程复杂，涉及多相多组分耦合及湿分相变。油菜籽籽粒具有复杂的多孔介质生物质结构特性，其传热过程复杂，包括籽粒间隙间热风及籽粒微孔道内流体的对流和热传导，籽粒固体骨架间的热传导，以及籽粒与籽粒间的热传导。籽粒内水分以蒸汽和液态水形式存在，在热作用下发生传递和迁移，该传递和迁移过程涉及多相多组分耦合，并伴随有湿分相变[6,21]。

（3）通过干燥工艺和过程优化，可以提高油菜籽的干燥品质。种用油菜籽和加工用油菜籽有不同的干燥工艺标准和技术规程，由于干燥初始阶段的干燥速率受热风温度、湿度和风速等的影响较大，干燥后期籽粒内的水分迁移受籽粒的传热影响很大，因此可以通过干燥工艺、参数和过程优化以提高油菜籽的干燥品质[4~5]。

（4）通过外部干燥条件的扩展和延伸，可以衍生出其他干燥方式。例如，为了使油菜籽籽粒受热均匀，并提高干燥效率，可以通过提高热风流速或振动方式使籽粒处于“沸腾”状态，成为流化干燥；为了提高干燥介质的传热效率和减少干燥介质的用量，由过热蒸汽代替热风作为干燥介质，成为过热蒸汽干燥；将油菜籽籽粒置于负压条件（籽粒内水分在负压状态下的沸点随着真空度的提高而降低），成为真空干燥；通过微波的方式改变油菜籽籽粒的加热方式，成为微

波干燥[5, 15]。

3 油菜籽热风干燥传热传质与优化的发展动态

目前，有关油菜籽热风干燥传热传质与优化基础研究的报道较少，现有研究多限于实验层面，不具有广泛适用性。现分别从理论研究、数值研究和实验研究等方面介绍多孔介质（不仅限于油菜籽）热风干燥传热传质与优化的相关研究及发展动态。

3.1 理论研究

最著名的多孔介质干燥传热传质理论是 1975 年 Luikov 提出的非平衡热动力学干燥理论，即 Luikov 理论，它基于干燥过程中的一些现象，提取其主要特征，建立以温度、湿度和气体压力为主要参数的传热传质控制方程，该理论是多孔介质干燥传热传质过程的宏观描述，未能给出传热传质过程明确的物理解释。1977 年 Whitaker 提出了基于体积平均的干燥过程热质守恒 Whitaker 理论，该理论相对于基于现象的 Luikov 理论的最大优点在于给出了模型假设、参数和理论的明确物理解释。目前研究人员提出了很多基于传统干燥理论（如液态扩散理论、毛细理论、蒸发冷凝理论等）的干燥模型，这些模型大多以 Luikov 理论和 Whitaker 理论为基础，并对其适当简化或修正。Santillan Marcus E A 等在传统 Luikov 模型基础上，分析了相变对干燥过程热质耦合的影响，给出了广义 Luikov 模型局域解[22]。谢英柏等采用不可逆热力学理论，得到了由温度梯度和湿含量表达的数学模型，该模型相对于传统 Luikov 模型，减少了变量和方程的个数，对改进和优化干燥工艺参数具有一定的实用价值[23]。基于传统干燥理论的模型均假设多孔介质为在大尺度上均匀分布的连续介质，与实际多孔介质内部复杂空间结构有较大差异，无法揭示局部和整体之间的本质联系[11]。

孔道网络（Pore Networks）模型是新近发展起来的理论，它将被干燥多孔介质孔道微观结构的影响考虑其中，能够获得更多的干燥特性数据，分析孔道结构和干燥参数对干燥过程的影响[24]。Metzger T 等应用孔道网络模型建立多孔介质结构特性与干燥过程关系，结合侵入渗流理论定量研究了多孔介质物料干燥过程中的内部湿分迁移机理[25~26]。袁越锦等利用实际多孔介质特性参数构建孔道网络模型，研究了多孔介质恒温缓慢干燥过程中的湿分迁移机理，结果表明，孔道网络模型能较好地模拟多孔介质干燥过程[27~28]。孔道网络模型作为新近发展起来的干燥理论目前并不完善，还存在一些亟待解决的问题，如在建模过程中将孔道节点规则简化为二维正方或三维立方会带来一定的误差，同时多孔介质内部复杂的网络结构为孔道网络模型的求解带来一定的困难。

分形理论（Fractal Theory）是描述物体内部复杂结构空间分布的一种有效手段，将分形理论用于多孔介质物料干燥过程的研究为更深入地获悉多孔介质内部传热传质规律开辟了一条新路[29~30]。肖志峰等根据分形理论，建立了考虑液相流、温度梯度、孔道微结构特征的土豆片干燥过程的分形孔道网络模型，研究了土豆片分形孔道内的干燥动力学特性、湿分和温度分布[31]。袁越锦等运用分形几何学分析了多孔介质的孔隙特征，构建了具有不同孔隙分形维数的分形孔道网络模型，研究了液相毛细流动、气相扩散、温度梯度和孔隙微观结构特征等因素对自然多孔介质干燥过程的影响[27~28]。王唯威等基于分形理论构造了不同类型分形结构，定量分析了基质导热系数、孔隙流体导热系数等对多孔介质有效导热系数的影响[32]。目前，分形理论在多孔介质内部传热传质研究中的应用不断深入，但仍不够成熟。分形理论与孔道网络模型相结合是多孔介质干燥尺度综合的有效方法。

多孔介质物料内部传热传质模型的定义域是物料内部区域，其传热传质过程受干燥器类型、干燥介质状态、物料所处状态等外部条件的影响，因而只针对物料内部的干燥理论还不够完整，必须同时考虑物料和干燥环境等因素的影响。典型的热风干燥模型，如固定床干燥模型、流化床干燥模型和气流干燥模型等，既关注了物料本身，又考虑了干燥环境因素的影响。然而，这些通用干燥模型存在着边界条件及物料特性难于确定的问题，现在的干燥理论多针对特定干燥对象建立与其对应的干燥模型，不具有广泛的适用性。

3.2 数值研究

数值研究是应用数学方法对特定多孔介质物料的热风干燥过程进行描述、解释、预测、优化或控制的研究方法，利用数值研究能够观察到传统方法不易获悉的一些现象和规律，获得对传统方法来说代价过大的信息，了解无法控制或机理过于复杂而无法进行理论分析的过程。多孔介质物料热风干燥传热传质的数值研究逐渐成为本领域的研究重点，建立的干燥模型包括薄层干燥模型、深床干燥模型和偏微分方程干燥模型等。关志强等在研究荔枝果肉热风干燥时，对 Page、Henderson 和 Logarithmic 等 9 种常用薄层干燥

模型进行了非线性回归分析，并比较了各模型的评价决定系数、卡方 χ^2 和标准误差[33]。Hukill W V 利用一个干燥方程和一系列无因次曲线计算干燥过程给定时间谷床内任意深度处的谷物含水量，建立了谷物深床干燥数学模型[34]。蒋淑兰等在二维规则孔道网络模型基础上，采用多相流模型中的混合物模型模拟了油菜籽干燥微尺度孔道传热传质过程及孔道内流体相变情况[6]。

目前多孔介质物料热风干燥数值研究存在宏观（Macroscopic）、多尺度（Multiscale）和微观（Microscopic）三个层面。宏观层面模拟方法在多孔介质单颗粒物料干燥过程中的热质耦合以及颗粒内部水分蒸发方面得到了广泛应用，其缺点是在建模和模拟时需要输入大量多孔介质物料及干燥介质物料特性和干燥特性参数。多尺度层面模拟方法利用均一化数学工具预测在宏观层面模拟方法中的部分多孔介质物料特性和干燥特性，该物料特性和干燥特性是对均一化多孔介质物料微观层面的描述，不同尺度之间的热质耦合，需要经过多次迭代实现[35]。微观层面模拟方法通过模拟多孔介质物料微观结构内传热传质过程以获悉干燥参数局部特征及其分布，其最常用的实现途径包括孔道网络模型、离散元模型和总体平衡模型。其中孔道网络模型可以模拟热质在孔道里的动态分布，离散元模型在模拟时可以加入颗粒间的热量交换，总体平衡模型可以模拟热风干燥过程参数动态变化和分布[24]。

随着计算机的普及、计算能力的提高、存储容量的增大以及算法的改进，计算流体动力学 CFD（Computational Fluid Dynamics）技术越来越多地应用于多孔介质热风干燥数值研究。借助 CFD 技术，可以有效获悉热风干燥过程中的干燥速率、能量消耗和湿分分布等信息，以优化干燥装置和过程控制[36]。Amanlou Y 等利用 Fluent 研究了箱式干燥器内无花果薄层干燥传热传质流场特征，数值研究结果与实验数据吻和较好，该研究同时还对箱式干燥器几何形状和结构参数等进行了优化[37]。任海伟等通过对中药材和粮食干燥装置干燥室内流场的 CFD 模拟，得到干燥室内的流场分布，为合理制定干燥工艺和优化干燥装置设计提供了理论依据[38]。但是，由于多孔介质结构及其传热传质过程的复杂性，CFD 的应用存在很多困难，特别在伴随有湿分相变时更为突出。可靠的 CFD 模型及模拟需对干燥过程中的物理问题进行有意义的描述，确定或选择传热传质方程和数学方法，确定边界条件和初始条件，并经实验验证或经验修正[36]。

3.3 实验研究

理论研究建立的模型以及数值研究得到的传热传质动力学行为及描述均需经实验验证。杨玲等实验研究了热风温度、风速和湿度等干燥参数对甘蓝型油菜籽热风干燥过程的影响，获得了甘蓝型油菜籽热风干燥特性[19]。

陈健凯等实验研究了杏鲍菇在不同热风温度、风速、物料尺寸、物料堆积层数等条件下的热风干燥特性，并建立热风干燥数学模型，并分析了热风温度、风速、物料尺寸和物料堆积层数对杏鲍菇热风干燥影响的显著性[39]。常虹等研究了菠萝粉在不同热风温度、风速和物料量等条件下的热风干燥特性及其品质变化，并与对菠萝粉真空干燥特性进行了比较，优化了菠萝粉热风干燥工艺参数[40]。Jamaleddine T J 等通过计算流体动力学研究了泥渣在大型旋风干燥器内的传热传质过程和干燥器内的流场特征，并进行了泥渣旋风干燥器设计优化及实验，为指导实际生产提供了参考[41]。

在实验研究中，多孔介质内部湿分迁移的正确测量很关键。目前，用于多孔介质含水量在线检测的方法有电阻法、电容法、红外线法、微波法、核磁共振法和中子法等。后四种方法可以实现连续非接触无破坏检测，且响应迅速，便于实现动态检测；但结构复杂和价格偏高的因素限制了这些先进检测技术的推广。电阻法和电容法测量装置因结构简单、成本低而被广泛应用，但它们存在以下缺点：电容法是容积式测量方法，测量值对温度和物料容重较为敏感；电阻法是破坏性测量方法，易受温度影响，不宜测量微量水和高含水量[42~43]。围绕解决电阻法与电容法测量技术缺陷，近年来出现了许多基于电阻或电容测量原理的研究成果，如研制了新型电阻或电容湿分传感器，构建了实现电阻或电容测量向频率测量的信号转换电路，开发了基于多路传感器实时检测信息融合的含水量在线检测系统[43~44]。但是这些先进测量技术还存在适应性不强或标定困难等不足，因而性能更优、价格更廉的传感器的研制还有待相关学科的进一步发展。

由于油菜籽的干燥和储存工艺影响种用油菜籽的生理特性和作物产量以及加工用油菜籽的加工特性和制油品质，国内外学者和研究人员十分重视油菜籽干燥工艺对油菜籽品质的影响。对于油菜籽的生理特性，Corrêa P C 实验研究了经不同热风温度（30 ℃~60 ℃）和相对湿度（30%~60%）干燥并储存 120 d 后的油菜籽的发芽率与活力。研究表明：热风温度和相对湿度

对油菜籽的发芽率与活力的影响显著。其中，热风温度的显著性程度更高[45]。丁超等以热风温度、风量及初始含水量为主要影响因子，利用隶属度法将发芽率、芽长和干燥速率评价指标相结合进行响应面优化设计和热风薄层干燥实验，对油菜籽热风干燥工艺参数进行了优化[46]。随着制油工艺的改进和适应不同消费层次的需要，特别是油菜籽低温压榨工艺的实现，该工艺能保存油菜籽固有气味、滋味，口感纯正且天然营养成分保持完好，为了提高菜籽油品质（《菜籽油》（GB1536-2004）将菜籽油产品分成 4 个等级），干燥过程更应严格控制热风温度[47]。

3.4 讨论

国内外学者和研究人员对多孔介质热风干燥传热传质机理、干燥特性、干燥品质、干燥工艺及过程控制等进行了大量的研究，并取得了很多研究成果，但目前仍存在以下主要问题：

（1）现有多孔介质几何模型不能完全表达油菜籽籽粒复杂多孔介质生物质结构特性。

（2）现有孔道网络模型热质耦合、湿分迁移和湿分相变理论对油菜籽热风干燥不具有很强的适用性。

（3）没能充分发挥数值研究对于优化干燥装置设计、工艺和过程控制的强大作用。

（4）干燥工艺对油菜籽品质变化规律的实验研究不足。

同时，目前对油菜籽热风干燥传热传质和优化的研究明显滞后于对其它多孔介质物料的研究，油菜籽热风干燥装置设计、工艺和过程控制优化仍主要依赖于经验和实验。

4 结论

油菜籽籽粒具有复杂的多孔介质生物质结构特性，其热风干燥传热传质过程涉及多相多组分耦合及湿分相变，并对热风温度敏感，干燥过程应严格控制热风温度和最高料温，为获得良好的干燥品质，应注意干燥工艺、参数和过程优化。目前，有关油菜籽热风干燥传热传质与优化的研究多限于实验层面，不具有广泛适用性。传统干燥理论和模型大多以 Luikov 理论和 Whitaker 理论为基础，对其适当简化或修正，由于假设多孔介质为均匀分布连续介质，无法揭示局部和整体之间的本质联系。孔道网络模型将多孔介质孔道微观结构的影响考虑其中，能够获得更多的干燥特性数据，分析孔道结构和干燥参数对干燥过程的影响。分形理论可以描述多孔介质内部复杂结构空间分布，获悉多孔介质内部传热传质规律。数值研究应用数学方法对特定多孔介质物料的热风干燥过程进行描述、解释、预测、优化或控制，CFD 技术被越来越多地应用于多孔介质热风干燥数值研究领域。油菜籽热风干燥实验研究现主要集中在干燥特性、干燥品质及其测量技术等方面。

参考文献

[1] 张振乾,官春云.菜籽油生物柴油的生产方法研究进展[J].农业工程学报,2008,24(2):304-308
ZHANG Zhen-qian, GUAN Chun-yun. Research advances in processes for biodiesel production from rapeseed oil [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 304-308

[2] YANG Ling, YANG Ming-jin, CHEN Jian, et al. Status and development trend of rapeseed drying for seeding purposes [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(S2): 309-315

[3] Rapeseed [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Brassica_napus, 2013-09-20

[4] 杨国峰,丁超,蔡浩飞,等.油菜籽干燥技术研究进展[J].中国粮油学报,2012,27(5):124-128
YANG Guo-feng, DING Chao, CAI Hao-fei, et al. Research and development progress on rapeseed drying technology [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(5): 124-128

[5] 谢奇珍,刘进,师建芳.我国油菜籽干燥技术的现状及发展趋势[J].中国油脂,2005,30(5):18-21
XIE Qi-zhen, LIU Jin, SHI Jian-fang. Current situation and development of domestic rapeseed drying technology [J]. China Oils and Fats, 2005, 30(5): 18-21

[6] 蒋淑兰,杨明金,唐甜,等.油菜籽干燥微尺度孔道传热传质数值模拟[J].农机化研究,2012,34(2):45-48
JIANG Shu-lan, YANG Ming-jin, TANG Tian, et al. Heat and mass transfer simulation in micro scale pores of a rape seed [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 45-48

[7] 王若兰.粮油储藏学[M].北京:中国轻工业出版社,2009
WANG Ruo-lan. Grain and oil storage [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009

[8] NY/T1087-2006,油菜籽干燥与储藏技术规程[S]
NY/T1087-2006, The technical regulations of rapeseed drying and storage [S]

[9] Canola Growers Manual [EB]. http://www.canolacouncil.org/canola_growers_manual.aspx, 2012-05-02

[10] Mingjin Yang, Wuming Xu, Tian Tang, et al. Experimental study on hygroscopicity of rapeseed (Brassica Napus) [J].

Advanced Materials Research, 2012, 479-481: 2275-2278

[11] Datta A K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes I: problem formulations [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 80-95

[12] 油菜 [EB]. http://baike.baidu.com/view/40572.htm, 2013-09-20

Rapeseed [EB]. http: //baike.baidu.com/view/40572.htm, 2013-09-20

[13] Hans Kandel, Janet J Knodel. Canola production field guide [M]. Fargo: NDSU Extension Service, 2011

[14] 肖志锋,吴南星,刘相东.过热蒸汽流化床干燥流动特性实验[J].农业机械学报,2013,44(7):183-186

XIAO Zhi-feng, WU Nan-xing, LIU Xiang-dong. Experiment on flow characteristics of fluidized bed drying with superheated steam [J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(7): 183-186

[15] Arun S Mujumdar. Handbook of industrial drying (3rd edition) [M]. New York:CRS Press, 2006

[16] Microwave [EB].http://en.wikipedia.org/wiki/Microwave, 2013-09-20

[17] Thakor N J, Sokhansanj S, Sosulski F W, et al. Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying [J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40(3): 153-160

[18] Sahni E K, Chaudhuri B. Contact drying: a review of experimental and mechanistic modeling approaches [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2012, 434(1-2): 334-348

[19] Ling Yang, Yili Yang, Wuming Xu, et al. Experimental study on hot air drying of rapeseed (Brassica Napus) [C]. Proceedings of 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011, Ningbo China: 4304-4307

[20] Thakor N J, Sokhansanj S, Sosulski F W, et al. Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying [J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40(3): 153-160

[21] 杨历,陶斌斌.多孔介质干燥过程传热传质研究[J].农业工程学报,2005,21(1):27-31

YANG Li, TAO Bin-bin. Heat and mass transfer for drying process of porous media [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 27-31

[22] Santillan Marcus E A, Natale M F. The existence of solutions for drying with coupled phase change in a porous medium [J]. Nonlinear Analysis Real World Applications, 2012, 13(5): 2063-2078

[23] 谢英柏,苏杭,刘春涛,等.含湿多孔介质对流干燥的不可逆热力学模型[J].华北电力大学学报,2009,36(2):48-53

XIE Ying-bai, SU Hang, LIU Chun-tao, et al. Irreversible thermodynamic model for hydrous porous media during convective drying [J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(2): 48-53

[24] Metzger T, Kwapinska M, Peglow M, et al. Modern modelling methods in drying [J]. Transport in Porous Media, 2007, 66(1, 2): 103-120

[25] Metzger T, Tsotsas E. Network models for capillary porous media:application to drying technology [J]. Chemie Ingenieur Technik, 2010, 82(6): 869-879

[26] Yiotis A G, Tsimpanogiannis I N, Stubos A K, et al. Pore-network study of the characteristic periods in the drying of porous materials [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 297(2): 738-748

[27] 袁越锦,杨彬彬,刘相东.多孔介质恒温缓慢干燥的孔道网络模型与模拟[J].农业机械学报,2007,38(7):62-66

YUAN Yue-jin, YANG Bin-bin, LIU Xiang-dong. Pore network simulation of slow isothermal drying of porous media [J]. Transactions of the CSAM, 2007, 38(7): 62-66

[28] 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

YUAN Yue-jin, YANG Bin-bin, JIAO Yang, et al. Fractal pore network simulation on drying of porous media: I Model building [J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(3): 65-69

[29] Peng Xu, Mujumdar Arun S, Boming Yu. Fractal theory on drying: a review [J]. Drying Technology, 2008, 26(6): 640-650

[30] Yiotis A G. Fractal characteristics and scaling of the drying front in porous media:a pore network study [J]. Drying Technology, 2010, 28(8): 981-990

[31] Zhifeng Xiao, Deyong Yang. Fractal pore network simulation on the drying of porous media [J]. Drying Technology, 2008, 26(6): 651-665

[32] 王唯威,淮秀兰.分形多孔介质导热数值模拟分析[J].工程热物理学报,2007,28(5):835-837

WANG Wei-wei, HUAI Xiu-lan. Numerical study of heat conduction in fractal porous media [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(5): 835-837

[33] 关志强,王秀芝,李敏,等.荔枝果肉热风干燥薄层模型[J].农业机械学报,2012,43(2):151-158,191

GUAN Zhi-qiang, WANG Xiu-zhi, LI Min, et al.

Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh [J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(2): 151-158, 191

[34] 潘永康,王喜忠,刘相东.现代干燥技术(2 版)[M].北京:化学工业出版社,2006
PAN Yong-kang, WANG Xi-Zhong, LIU Xiang-dong. Modern Drying Technology (2nd edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006

[35] Patrick P. Multiscale aspects of heat and mass transfer during drying [J]. Transport in Porous Media, 2007, 66(1): 59-76

[36] Tarek J Jamaleddine, Madhumita B Ray. Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: A review [J]. Drying Technology, 2010, 28(2): 120-154

[37] Amanlou Y, Zomorodian A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 101(1): 8-15

[38] 任海伟,李金平,刘增光,等.太阳能干燥室内部气流场分布 CFD 数值模拟[J].农业机械学报,2012,43(S1):235-238
REN Hai-wei, LI Jin-ping, LIU Zeng-guang, et al. Numerical simulation of airflow fields in solar drying chamber by CFD [J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(S1): 235-238

[39] 陈健凯,林河通,李辉,等.杏鲍菇的热风干燥特性与动力学模型[J].现代食品科技,2013,29(11):2692-2699,2579
CHEN Jian-kai, LIN He-tong, LI Hui, et al. Hot-air drying characteristics and kinetics model of Pleurotus eryngii [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(11): 2692-2699, 2579

[40] 常虹,李远志,杨璇璇.菠萝粉干燥特性的研究[J].现代食品科技,2018,24(1):5-7
CHANG Hong, LI Yuan-zhi, YANG Xuan-xuan. Investigation of the drying characteristics of pineapple powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 24(1): 5-7

[41] Jamaleddine T J, Ray M B. The drying of sludge in a cyclone dryer using computational fluid dynamics [J]. Drying Technology, 2011, 29(12): 1365-1377

[42] 陈有庆,胡志超,王海鸥,等.谷物水分在线检测技术及发展趋势[J].农业机械,2009,4:85-87
CHEN You-qing, HU Zhi-Chao, WANG Hai-ou, et al. On-line measuring technology for moisture content and its development progress [J]. Farm Machinery, 2009, 4: 85-87

[43] 张永林,王往平,郑长征,等.谷物干燥实时在线智能水分测量系统[J].农业工程学报,2007,23(9):137-140
ZHANG Yong-lin, WANG Wang-ping, ZHENG Chang-zheng, et al. Intelligent real-time on-line measuring system for moisture content during grain drying [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 137-140

[44] 李长友.稻谷干燥含水率在线检测装置设计与试验[J].农业机械学报,2008,39(3):56-59
LI Chang-you. Design and experiment of on-line moisture content metering device for paddy drying process [J]. Transactions of the CSAM, 2008, 39(3): 56-59

[45] Corrêa P C, Martins J H, Christ D. Thin layer drying rate and loss of viability modelling for rapeseed (Canola) [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74(1): 33-39

[46] 丁超,屠康,杨国峰,等.响应面法优化油菜籽热风薄层干燥工艺[C].中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011, 重庆
DING Chao, TU Kang, YANG Guo-feng, et al. Optimization of hot-air drying technology for rapeseeds by response surface methodology [C]. Proceedings of 2011 CSAE, 2011, Chongqing China

[47] 刘大川,刘晔.油菜籽加工新技术及深度开发[J].中国油脂,2010,35(9):6-9
LIU Da-chuan, LIU Ye. New technologies of rapeseed processing and comprehensive utilization of rapeseed resources [J]. China Oils and Fats, 2010, 35(9): 6-9