

中药浸膏干燥技术及干燥机制的研究进展与发展趋势

万 琴¹, 高 欢¹, 齐娅汝¹, 邱勋荣¹, 李玉珊¹, 杨 明^{1,2}, 李远辉^{1,2*}, 伍振峰^{1,2*}

1. 江西中医药大学 现代中药制剂教育部重点实验室, 江西 南昌 330004

2. 创新药物与高效节能降耗制药设备国家重点实验室, 江西 南昌 330004

摘 要: 中药浸膏是制备中药口服固体制剂的重要中间物料, 其质量直接影响后续制剂过程与制剂的临床疗效。干燥是制备中药浸膏并影响其品质的关键工艺环节之一。近年来, 为提高中药浸膏的干燥效率, 许多研究者对传统中药浸膏干燥技术进行改进、升级, 新型中药浸膏干燥技术有所突破, 干燥机制研究有一定进展。通过对中药浸膏干燥技术及干燥过程中传热传质机制研究进展进行综述, 并预测中药浸膏干燥技术未来的发展趋势, 为后续研究提供思路。

关键词: 中药浸膏; 干燥技术; 干燥机制; 发展趋势; 固体制剂

中图分类号: R283 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2023)23-7884-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.23.031

Research progress and development trend on drying technology and drying mechanism of Chinese materia medica extract

WAN Qin¹, GAO Huan¹, QI Ya-ru¹, QIU Xun-rong¹, LI Yu-shan¹, YANG Ming^{1,2}, LI Yuan-hui^{1,2}, WU Zhen-feng^{1,2}

1. Key Laboratory of Modern Preparation of Traditional Chinese Medicine, Ministry of Education, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

2. State Key Laboratory of Innovation Drug and Efficient Energy-Saving Pharmaceutical Equipment, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

Abstract: The Chinese materia medica extract (CMME) is an important intermediate material for preparing oral solid preparation of traditional Chinese medicine, and its quality directly affects the subsequent preparation process and clinical efficacy of the preparation. Drying is one of the crucial processes for preparing CMME and affecting its quality. In recent years, in order to improve the drying efficiency of CMME, many researchers have improved and upgraded the traditional drying technologies of CMME, made breakthroughs in the new drying technologies of CMME, and made certain progress in the research of drying mechanism. In this paper, the drying technologies of CMME and the mechanism of heat and mass transfer in the drying process were reviewed, and the future development trend of CMME drying technologies was predicted, providing ideas for subsequent research.

Key words: Chinese materia medica extract; drying technologies; drying mechanism; development trend; solid preparation; solid preparation

中药浸膏是制备中药片剂、胶囊剂、颗粒剂等固体制剂的重要中间体原料, 其质量直接影响后续制剂过程和制剂疗效。干燥是形成中药浸膏的关键工艺环节, 对浸膏质量具有重要影响^[1]。有关中药

浸膏干燥机制的研究逐年增多, 一些新型干燥技术如喷雾冷冻干燥、超声强化干燥等技术逐渐进入大众视野, 对传统中药浸膏干燥技术改进、升级的报道也屡见不鲜^[2-3]。本文对中药浸膏干燥技术及干燥

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (82260768); 国家自然科学基金资助项目 (81960718); 江西省主要学科科学技术带头人培养计划-青年人才项目 (20225BCJ23002); 江西中医药大学博士科研启动基金 (2021BSZR003); 省级大学生创新创业训练计划项目 (S202310412104); 江西省研究生创新专项资金项目 (YC2022-s857)

作者简介: 万 琴, 硕士研究生, 研究方向为中药药剂学。E-mail: 964693072@qq.com

***通信作者:** 伍振峰, 教授, 博士生导师, 从事中药新剂型与新技术、中药制药装备研究。E-mail: zfwu527@163.com

李远辉, 副教授, 硕士生导师, 博士, 从事中药制药新技术与新工艺研究。E-mail: 20181016@jxutcm.edu.cn

机制进行综述,并针对研究现状展望其发展趋势,为提高中药浸膏的干燥技术工艺水平提供参考。

1 中药浸膏干燥的技术研究

1.1 喷雾干燥

喷雾干燥是将提取液从雾化器喷出,先与热气流进行热交换,使雾状液滴中的溶剂迅速蒸发得到干浸膏粉体的一种干燥技术,该技术所得粉体粒度小、松散度高、压缩成型性好、有效成分损失少、自动化程度高,且可缩短前端浓缩时间、直接由浓缩液制成粉,省去了粉碎工序,大大缩短了生产周期^[4-6]。由于中药提取物中往往含有多糖、黏液质等易吸湿性成分,故其吸湿性强、黏度大,导致其流动性差,在喷雾干燥技术的实际应用中,常出现黏壁、粉末吸湿结块等问题,造成浸膏粉损失严重,为后续制粒工艺造成困难,因此在喷雾干燥时通常会加入辅料以改善粉体物理性质^[7-8]。

传统的喷雾干燥按雾化器的形式不同区分,主要有离心式、压力式、气流式等形式,其中最常用于制药的是双流体和压力旋流喷雾技术,前者可产生小分子颗粒(如适于吸入的粉末),后者则可以实现更高的喷雾液通量^[9-10]。近年来,新兴电辅助喷雾干燥技术在敏感生物活性物质的有效干燥方面取得了一定的进展,该技术主要包括通过施加高压电场,利用带电粒子在流体介质中的电相互作用而达到干燥目的的电喷雾干燥,及在流体喷嘴中施加静电荷,通入加热加压的干燥气体,使进料溶液在静电荷存在下发生雾化而提高干燥效率的静电喷雾干燥技术。该技术突出的优点是不使用高温,有利于保护干品质量。Wang 等^[11]采用静电喷雾干燥生产速溶普洱茶,并与常规喷雾、真空和冷冻等干燥技术进行比较,有效保留了感官品质和气味活性化合物。但目前电辅助喷雾干燥技术在中药领域的大规模应用较少^[12-13]。

1.2 流化床干燥

流化床是将物料置于可输送气体的孔板上,引起物料在气体分布板上运动,在气流中呈悬浮状态,产生颗粒与气体的混合底层,在此混合底层中二者间充分接触,从而进行物料与气体间的热传递与水分传递。其优点在于集混合、制粒、干燥于一体,且物料与气体接触面积大、热传递好、干燥速度快、温度分布均匀,能够有效避免物料局部过热,适用于浸膏量大、辅料相对较少的中药颗粒制备及对湿和热敏感的药物制粒^[14-15]。但流化床干燥对于

被干燥物料颗粒度一般要求介于 0.03~4.00 mm,而且当几种物料混在一起干燥,各物料相对分子量应当接近,由于流化干燥器内混合在一起的物料相互之间热传递较为激烈,所以在单级连续式流化干燥装置中,物料停留时间不均匀,可能会发生未经干燥的物料随产品一起排出床层的情况。

流化床干燥过程中物料流化状况的好坏直接影响干制品的品质。传统流化床干燥高黏性的物料在其受热时会使其易溶成分溶解,物料软化结块,出现黏筛和面积结块,导致物料流动性差,使其不易达到流化状态,发生聚集而出现塌床现象,往往难以达到干燥的效果。脉动气流辅助流化床干燥技术是在传统流化床干燥的基础上额外通入一股由压缩机产生气流,再经过电磁阀控制产生脉动的脉动气流,在脉动气流强力的扰动下,较好地改善黏性物料的流化状况^[16]。Li 等^[17]采用脉动流化床干燥大颗粒,得到与传统流化床干燥技术更均匀的气体 and 更高的干燥速率,证实经改装后的脉动流化床干燥技术在解决中药浸膏高黏性难流化的问题方面前景突出。

1.3 喷雾冷冻干燥

喷雾冷冻干燥技术是将喷雾干燥所得雾化后的微小液滴经过冷介质区域,并与冷介质充分接触,实现物料在短时间内迅速冻结到物料共晶点温度以下形成小冰粒,进而对冻结后的小冰粒进行真空冷冻干燥,其制得的粉末具有多孔性、粒径更小、颗粒形态优于喷雾干燥,粉体流动性更佳,利于后续制粒、压片环节,所需冻结和干燥时间更短,有助于提高干燥效率^[18-19]。苏小军等^[20]通过对紫淮山浆液喷雾冷冻干燥工艺及其特性研究,发现干燥过程中紫淮山细胞组织中的冰晶直接升华,形成多孔结构,利于内部水分的散发。李梦琳^[21]采用正交试验以丹参素钠的含量和干膏收率为考察指标,对丹参进行醇提水沉的提取和纯化精制,后将丹参浓缩液置于喷雾冷冻干燥机制备注射用丹参,在既不影响药物有效成分的同时,大大缩短了干燥工艺的时长。Yin 等^[22]使用超声喷雾冷冻干燥技术制备重组人上皮生长因子(recombinant human epithelial growth factor, rhEGF)脂质体干粉并与常规冷冻干燥制备的 rhEGF 脂质体干粉进行对比,结果表明前者有效地避免了脂质体干燥过程中冰晶的形成、双层结构的破坏和药物的渗漏,保持了 rhEGF 脂质体制剂在贮存过程中的稳定性。此外,喷雾冷冻

产生的多孔颗粒与其他干燥技术相比, 具有较佳的溶解行为、良好的流动性、更高的稳定性和生物利用度, 其干燥过程涉及快速冷冻过程, 能消除药物和赋形剂间的分离现象, 提供更好的分子分布, 适用于制备通过鼻腔、表皮、肺部途径递送的药物, 并在递送具有功能性和营养性的食品、药物成分方面具有广泛的应用前景^[23]。但是, 喷雾冷冻干燥的处理成本比喷雾干燥高 30~50 倍, 在液氮等冷冻剂的操作方面还需设计相关的安全预防措施, 如何制作满足不同产品范围的精确尺寸的喷雾冷冻干燥室, 分离干燥过程中产生的细粉、极细粉也是一个问题。

1.4 真空干燥

真空干燥是将物料置于负压条件下, 并适当通过加热达到负压状态下的沸点或通过降温使物料凝固的干燥方法, 具有操作简单、投入少、适用性强, 对易燃、黏性、有触变性或膏状物料一般都可适用, 干燥过程中药品不易被污染等优点^[24]。由于中药稠浸膏黏性强、所含自由水占比低, 干燥较为困难; 加之真空干燥由于其热传导工作原理, 热量消耗大, 浸膏水分由内向外迁移, 而热量由外向内传递, 传热与传质方向相反, 易出现表面结壳(假干燥)现象, 增大水分迁移阻力, 降低了干燥效率, 长时间受热不利于保证干膏质量; 且干燥后物料易结成硬块, 刮取费时且造成浸膏损失^[25]。

真空干燥技术主要分为厢式、带式、脉冲式等形式。厢式真空干燥应用最早, 但用于中药浸膏干燥效率较低, 长时间受热导致对工艺敏感的有效成分被破坏。近年来, 带式和脉冲式真空干燥技术已用于中药浸膏的干燥, 针对改善厢式真空干燥效率低、自动化程度低等不足, 取得了一定的进展^[26-27]。带式真空干燥技术是一种连续进、出料的接触式加热干燥方法, 由于干燥过程中浸膏被薄涂在真空腔内用于加热的传送带上, 降低了料层厚度、增大了浸膏的蒸发面积, 有利于提高干燥效率、缩短浸膏受热时间, 并提高了自动化生产水平^[28]。脉冲式真空干燥利用“水合作用”原理增大水分子及溶质的传质效果, 通过真空与常压循环操作, 物料的微观孔道不断地被挤压与扩张, 进而借助产生的压力差而对物料进行渗透脱水, 随着真空循环率的增加, 组织内空隙增加, 真空渗透效果显著^[29]。此外, 设备通常安装一组对射光电探头用于起泡自动检测, 当泡沫遮挡探

头会自动进热压缩空气进行破泡, 防止易起泡浸膏溢出造成物料损失^[30]。

1.5 微波干燥

微波干燥技术是采用波长 1.000~0.001 m, 频率 300~300 000 MHz 的电磁辐射, 通过极性分子的快速运动和旋转产生热能, 可在短时间使浸膏升温而除去水分, 可获得含水率较低的干膏, 具有加热快、高效节能、节约成本、易于控制(即关即停)等优点, 还具有灭菌作用。此外, 有研究表明微波干燥能改善吸湿性, 有助于后续制剂环节^[31-32]。但是, 微波干燥技术仍存在不足, 如微波干燥设备在加热时热量易向角及边处集中, 产生“尖角效应”; 微波功率过高时, 样品较快脱水干燥, 多余的微波能则无法被介质吸收, 出现放电、走火现象而烧焦物料; 微波功率过大对物料中挥发性、受热易分解等不稳定成分会造成一定的损失; 微波泄露在一定程度上对操作者的健康造成威胁^[33-34]。

近年来, 针对微波干燥使用过程中出现的受热不均、干燥不完全的问题, 基于将微波发射的能量聚焦在不同的角度从而实现物料均匀受热, 目前已开发了反射屏蔽、旋转板和旋转圆柱形真空室等不同的方法^[35]。Cao 等^[36]开发了一种微波辅助脉冲喷射真空干燥在线温度检测辅助控制系统, 该系统可以根据对干燥和预设温度的检测, 自动连续调节温度, 这种温度检测辅助控制系统的应用可以改善产品质量和加热不均匀性, 缺点是可能造成更大的能耗和更长的干燥时间。此外, 为最大化提高微波干燥的效率, 实际应用中药浸膏使用微波干燥一般在真空环境下进行, 目前, 不同的真空微波系统按照相似性分为静态、旋转、连续流和专用设备, 与其他干燥系统相比, 真空微波干燥系统可以节省约 50% 的能耗。

1.6 超声强化干燥

超声强化干燥是在传统干燥方式的基础上增加超声波技术而形成的干燥技术, 其原理是通过超声辐射盘传入物料内部, 在介质中产生热效应、机械效应和空化效应, 引起一系列快速的压缩和膨胀, 使物料的组织结构蓬松, 微观孔道数量增多, 利于粉碎, 方便进行下一步制剂加工。超声强化还能降低物料内部的传质阻力, 有效去除结合水, 有利于水分向表面迁移, 促进干燥过程中的水分扩散, 提高干燥速率, 保证产品品质^[37-38]。但超声波的传播受介质性质影响较大, 中药浸膏在干燥初期含水率

较高,呈流体状,此时超声的传播效率高,强化作用可能更显著,但随着干燥的进行,浸膏逐渐变成具有一定孔隙的固体,超声的传播效率降低,强化作用随之减弱^[39]。

超声强化干燥技术的应用形式包括前处理和干燥过程中与传统的干燥技术结合使用以提高干燥效率和干品质量^[40]。Wodajo 等^[41]发现超声预处理后南瓜提取物粉流化床干燥的蛋白质含量显著增加,可能是由于超声波机械效应使南瓜提取粉破碎形成较小的粉末颗粒,从而增加表面积,促进蛋白质释放,并增加蛋白质产量。Wang 等^[42]采用超声波辅助真空干燥方法对五味子提取物粉末进行干燥,结果表明随着超声功率和作用时间的增加,五味子提取物达到平衡水分的干燥时间较常规真空干燥减少 25% 以上。刘雨曦等^[43]以传统佛跳墙高汤为原料,采用超声波喷雾-冷冻干燥与传统干燥技术制备高汤粉体,通过粉体理化性质和微观结构对比,结果显示超声波喷雾-冷冻干燥制备的粉体具有水分质量分数低(4.79%)、堆积密度小(102 mg/mL)、粒径小(平均粒径 23.11 μm)及溶解性好的特点。

1.7 组合干燥

除以上列举的几种干燥方式外,还有一些通过将 2 种传统干燥技术联用的新型组合干燥技术,以克服单一干燥方式的不足,起到“提质增效”的作用。Liu 等^[44]通过研究红外-冷冻干燥和传统冷冻干燥工艺对奶油蘑菇汤干燥时间、能耗的影响,发现红外-冷冻干燥的干燥时间和能耗分别减少了 23.81% 和 28.43%。李锋等^[45]对热风-真空组合干燥的紫马铃薯全粉的理化性质进行研究,发现该技术得到的紫马铃薯全粉为色泽均匀、结构均一,其总花青素含量损失率仅为 27.78%,显著低于同条件下单独使用热风干燥制备的紫马铃薯全粉。孙勤等^[46]采用微波-流化床组合干燥的方法对椰子肉磨碎得到的粗粉状物料椰蓉进行脱水干燥研究,发现微波-流化床组合干燥综合了微波干燥和流化床干燥各自的优点,提高了干燥速度、缩短了干燥时间,使流态化的物料在微波场中均匀吸收微波能量,可以有效提高微波加热均匀性和避免干燥后期产品质量下降的问题。

2 中药浸膏干燥的机制研究

2.1 传质机制

浸膏干燥的实质在于除去其中的水分,水分在浸膏中的迁移和扩散过程即为传质。经典干燥理论

根据干燥失水速率的快慢,将整个干燥进程依次分为加速、恒速及降速干燥段^[47-48]。干燥初期,浸膏为连续湿饱和介质,处于加速与恒速干燥段,含水率较高,干燥速率较快,水分的蒸发发生在其表面,又称为表面汽化控制阶段,该阶段中水分传递遵从单纯蒸发扩散理论,干燥速率主要取决于物料外部的干燥条件(温度、介质湿度与流速等),升高干燥温度、降低干燥介质的湿度,有利于增大传质速率;随着干燥的不断进行,当浸膏内部水分向表面的扩散速率小于表面气化蒸发速率时,干燥进入降速干燥阶段,为主要的干燥阶段,又称为内部扩散控制阶段,干燥速率主要受物料因素影响,如化学成分、水分状态、内部结构、导热性、黏性等,此时吸收水占比低有利于干燥^[49-50],见图 1。

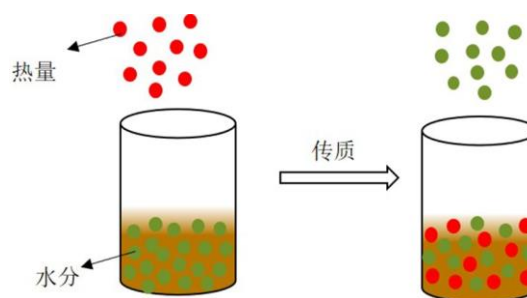


图 1 传质过程示意图

Fig. 1 Process diagram of mass transfer

浸膏干燥的传质过程,水分状态也发生显著变化,而物料在干燥过程中水分状态的变化可用物料内部水分与物料内部结合紧密程度表征,通过不同状态水分含量变化表征其迁移、转化过程,并通过宏观含水率表征水分汽化规律。根据物料中水分子与其他非水组分结合能力的强弱,可将不同状态的水依次分为结合水、不易流动水和自由水^[51]。干燥阶段前期主要散失的是自由水,即自由水含量不断减少,水分与非水组分的结合程度越来越紧密,随着干燥时间不断变长,水分的结合程度减弱,结合水向不易流动水转化,同时自由水含量显著降低,持续干燥到了一定程度,物料逐渐收缩,不易流动水与大分子结合更加紧密,导致部分不易流动水向结合水转移,又由于物料结构发生破坏,可能会使部分不易流动水束缚力作用减小,进而重新转化为自由水,直至样品中的自由水完全被脱去,只剩下少量不易流动水和较难脱去的结合水^[52-54]。

数学模型是研究浸膏干燥过程中传质的常用方法,主要包括薄层和深床干燥模型。薄层干燥是指

20 mm 以下的物料层表面完全暴露在相同的环境下进行的干燥过程,其能够对一定风温、风量和湿度的条件下,物料含水率随时间变化的情况进行描述^[55]。薄层干燥模型主要包含理论、半经验和经验模型 3 种,理论模型中的薄层干燥方程是基于物料内部的水分扩散理论建立的;经验模型是通过大量实验论证从而建立物料水分与干燥时间的模型;半经验模型则是假设干燥物料的实际水分与平衡水分的差值与干燥速率是正比关系而推导^[56]。由于理论模型所建立的方程较为复杂,且不易对扩散系数进行确定,所以多数研究者在对物料薄层干燥进行模拟时通常选用半经验模型来进行分析。表 1 简要总结了文献中报道的用于干燥的各种经验或半经验的薄层数学模型。

表 1 文献中报道的薄层干燥模型

Table 1 Thin layer drying models reported in literature

模型名称	模型方程	文献
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	57
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	58
Henderson-Pabis	$MR = n \exp(-kt)$	59
Logarithmic	$MR = n \exp[-(kt)] + C$	60
Wang-Singh	$MR = 1 + nt + kt^2$	61
Midilli-Kucuk	$MR = n \exp[-(kt^n)] + Ct$	62
Weibull	$MR = \exp[-(t/\beta)^a]$	63

深床干燥也称为固定床干燥,是最常见类型的农业干燥技术之一,用于在深层(超过 20 mm)的料层厚度中对物料进行非均相干燥,其中干燥器入口端处的干燥比排气端处的干燥更快,一般用于谷物等农作物的干燥,可引入工业化生产中中药浸膏大规模的干燥^[64-66]。用于模拟干燥过程水分扩散的深床模型可分为对数方程、水分质量平衡方程及薄层干燥速率模型,见表 2。

2.2 传热机制

干燥是以热能降低物料内部含湿量为主要目标

表 2 文献中报道的深床干燥模型

Table 2 Deep bed drying models reported in literature

模型名称	模型方程	文献
对数方程	$\rho_{da} V_{a0} C_{pda} [(\partial T_a(x,t))/\partial x] = L_v \rho_{dp} [(\partial X_p(x,t))/\partial t]$	67
水分质量平衡方程	$G(\partial H/\partial x) = -\rho_p (\partial M/\partial t) - \varepsilon(\partial H/\partial t)$	68
薄层干燥速率模型	$MR = (M - M_e)/(M_0 - M_e) = \exp(-at^b)$	69

的处理过程,干燥过程中,物料内部与干燥介质之间发生热量的传递,即传热过程^[70]。湿材料从外界吸收热量,然后热量从湿材料的外部传递到内部。中药浸膏的干燥过程复杂多变,通过形成温度场,产生传热应力,该应力促进干燥不断进行,直接决定干燥效率与干品质量^[71],见图 2。

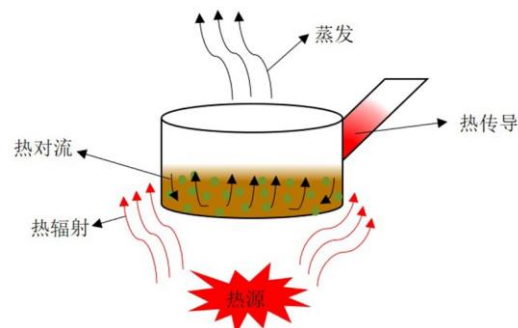


图 2 传热过程示意图

Fig. 2 Process diagram of heat transfer

热能传递主要包括热对流、热传导、热辐射和蒸发 4 种方式,而每种方式都有各自的优缺点。其中,热对流是流体各部分质点发生相对位移而引起的热量传递过程,即高温流体流过被干燥物料时,热能由流体传到湿物料表面,使被干燥的物料温度升高,优点是速度快、简单、操作方便,缺点是受限于热源、效率较低。热传导是热量从物体中温度较高的部分传递到温度较低的部分或传递到与之接触的温度较低的另一物体的过程,如物料受高温介质包围,热量从其表面逐渐传递到内部,从而使物料整体温度升高,优点是可以较快地穿透物质,迅速将热能传递到物体远端,缺点是热能的损耗较大。物体因各种原因发出辐射能,其中因热而发生辐射能的过程称为热辐射,热辐射常以电磁波的形式发射并向空间传播,当遇到干燥物料时,一部分被反射,一部分被吸收,而另一部分则穿透物体,而被吸收部分又重新转变为热能,优点是效率较高,缺点是辐射热是以波形传递,受到表面温度和距离的影响,容易出现凹凸不平的情况。蒸发传热作为一种相变过程,通过水分的气、液相变传热,液态水吸收热量后产生水蒸汽,由此实现物体的干燥,优点是效率稳定,缺点是受到外界温度和湿度等环境因素的影响,当温度和湿度改变时效率会显著降低^[72-73]。

不同干燥技术因工作机制不同,热传递的方式也有所差异。通常情况下,干燥初期浸膏含水率较高,热量主要以热传导形式从浸膏底部向表面进行

传递,与传质过程相似,主要受外界因素温度和压力的影响。随着干燥的进行,浸膏逐渐向内固化,内部形成的多孔结构使热质传递过程转变为多相流动(液态水通过固体骨架传递、液态水在孔隙内的气化蒸发扩散,气态水将固体机制润湿转为液态水传递),并且各相态水分含量随时间和空间(孔隙结构)发生变化。热量传递方式除了表面壳层与液态稠膏内部及二者界面热传导,还有液态水与气态水、气态水与固体骨架间的热对流、热辐射,而传热作用随着各相含量和孔隙结构的变化而变化。故干燥后期传热过程主要受内部因素影响,如降低厚度、适当的孔隙率(孔隙率低、湿分传递阻力大不利于干燥;若孔隙率过高,热量传递缓慢也不利于干燥)有利于传热^[74-75]。

浸膏干燥过程是包含相变、多孔结构演化不断变化的多尺度过程,物料干燥过程中表面率先干燥,且干燥表面不断内移,把物料分为干、湿区,当水分与热量由表层向内传递时,受水分与温度场产生的应力作用,内部形成多孔结构,并不断演化,含湿多孔结构物料中的热量传递过程非常复杂,而多孔介质内流体流动换热遵循 3 个守恒方程,即连续性方程、动量方程和能量方程^[76]。

3 中药浸膏干燥技术的发展趋势

3.1 研制适应性强的专用设备

干燥方式及原理的不同直接导致干燥产物理化性质的差异,影响干燥产物的品质,目前缺乏针对中药浸膏特性的专属装备,现有装备适宜性不强,亟待开发。如针对中药浸膏黏性强、易板结、黏壁、收粉率低,可往干燥设备中通入除湿的冷空气,与物料形成逆向流动,使干燥后的热物料与冷空气进行热交换,将物料的温度降低至物料软化点以下,从而避免物料出现软化、发黏的情况;针对自由水占比较低,而结合水、不易流动水占比较高的中药稠浸膏,采用超声波、微波、红外预处理等方法,降低浸膏药物成分与水分子间的亲和力以利于脱水;对于某些含有热敏性、易挥发性、高温下易氧化性等不稳定成分的浸膏,使用低温或通过电磁波的穿透力在物料内产生热效应的辐射干燥;及为改善部分中药浸膏干燥效率低的问题,可尝试采用分段干燥或联合干燥。此外,还可借鉴一些新技术,如应用纳米技术提高浸膏内部水分的渗透性。浸膏干燥的难易程度与内水分渗透性密切相关,浸膏水分渗透性提高,干燥时失水速率也会随之加快^[77]。

因此,研制适应性强且高效节能的新型干燥设备,对于解决中药浸膏粉干燥过程中产品物理稳定性方面存在的关键共性问题,优选制剂处方和工艺,丰富中药制剂理论具有重要意义。

3.2 采用新型干燥技术

干燥技术是实现浸膏干燥的手段,其水平的高低直接影响干膏的品质、干燥效率和干燥能耗,采用新型干燥技术对已有干燥技术不断升级迭代是提高中药干燥技术水平的重要支撑。热泵干燥通过冷媒在压缩机的作用下在系统内循环流动转移热量,在工农业领域是减少能源消耗和环境污染的有效方法,有研究报道,同时采用热泵干燥与对流干燥对葡萄果渣进行干燥,结果表明前者能耗降低 51%,除总花青素以外,其他生物活性的损失均无显著差异,但在中药浸膏干燥领域的规模化推广较少^[78-79]。高压电场干燥是一种新颖的技术,依赖于 2 个电极(发射器)间的高电压差而产生的气流对物料进行干燥,导致干燥温度低,已成功用于干燥中药饮片,其干燥后的有效成分也得到了很好的保留,可初步考虑用于干燥含有热敏性成分的中药浸膏^[80-81]。泡沫垫干燥通过使物料内部产生大量泡沫,增加物料的受热面积,进而提高干燥速率,其已在玻璃化转变温度较低的液态食品(如果汁、蔬菜泥)显示出良好的干燥效果,并适用于干燥热敏性、高含糖量和黏性食物,在干燥高糖、高黏的中药浸膏方面具有较好的前景^[82]。超临界二氧化碳干燥技术是一种新兴的干燥技术,其借助超临界流体的性质将水分从物体中吸收,达到干燥的目的,具有快速、干净、无污染等优点,在采用该技术对草莓切片进行干燥过程中发现原始新鲜样品的高营养价值得以保存,但目前中药浸膏干燥领域中的应用较少^[83]。

此外,还可以采用一些新型的预处理方法,Bao 等^[84]在对枣片进行热风干燥时发现枣切片在通过一种冷等离子体预处理后,其表面形貌会因被这种冷等离子体蚀刻而产生较大的空腔,从而促进水分传递,大大提高了干燥速率和有效扩散率,但由于中药浸膏干燥前一般为液体或半固体,能否被蚀刻产生空腔还待进一步验证。

3.3 确立工艺调控规律

中药浸膏干燥特性会影响品质的形成,综合考虑水分状态、内部结构、干燥效率、是否发泡等变化过程规律,采用动态的干燥技术进行最佳匹配是确立工艺调控规律的基础。根据中药浸膏的干燥行

为,按照失水速率变化规律,整个干燥过程按先后顺序分为恒速及降速干燥 2 个阶段。物料的理化性质和水分的结合方式等特性会随着干燥过程产生一定变化,为最大化提升干燥效率,可分阶段采用不同干燥工艺,或综合多种干燥技术规避单独使用一种干燥方式时出现的弊端,如上文提及的一些不同的前处理手段和组合干燥方法。

有研究报道,部分热干燥方式长时间使用,一定程度上容易导致多糖的化学特征发生变化,诱导产品在干燥过程中产生一系列有毒的糖基化合物,因此对于多糖等含量较高的中药浸膏应首先考虑低温干燥^[85]。干燥效率的影响因素主要取决于湿物料的性质及干燥介质的状态,一般来说,减小料层厚度、提高空气的温度和体积流量,降低相对湿度,会使物料表面的温度相应提高,表面气化的阻力减小,水分蒸发速度随之加快。中药浸膏多为透气性差的黏稠流体,干燥时表面的水分受热汽化后向干燥介质中扩散,物料内部与表面出现水分浓度差,水分不断从物料内部扩散到其表面,有时往物料中添加一定的发泡剂(如鸡蛋清、大豆分离蛋白等),使料液发泡膨化,形成多孔的“非饱和”物料,可增加水蒸气迁移的空间,导致传质阻力大大降低^[86-87]。于佳慧等^[88]通过研究发泡与未发泡 2 种蓝莓果浆冷冻样品微波冷冻干燥过程,并对产品质量进行评价,结果表明发泡物料相比于未发泡物料干燥时长缩短了 39.1%,有利于降低过程能耗。

3.4 完善干燥理论

干燥作为中药浸膏加工过程中广泛使用的一种工序,但由于干燥热质传递过程的复杂性,给研究带来了困难。借鉴农林、食品领域关于药食果蔬、木材、煤等物料的干燥,其研究方式主要包括吸附和水分平衡模型,在水分平衡的理论、半理论和经验建模方面已经进行了诸多尝试^[89-90]。干燥理论的基础研究与生产实际不可脱节,强化干燥理论基础研究不仅有助于理解与掌握涉及干燥的各种物理现象,而且可促进工艺应用研究共同发展^[91]。中药浸膏与植物性等物料在质地、结构上具有明显区别,带来干燥过程中热质传递的较大差异。同时,浸膏干燥过程中发生相变(液态转变为固态)、内部孔隙结构的复杂演变(不断生长、联接、合并和嵌套等),内部热质传递较为复杂。传质方式包括液态水通过固体骨架传递、固体骨架对气态水的吸附、气态水在固体骨架孔隙表面的冷凝、液态水在孔隙内的汽

化蒸发扩散,及伴随相变发生的多相流动,且各相含量随时间和空间(孔隙结构)均发生变化。传热方式除了浸膏内部的热传导,还有液态水与气态水、气态水与固体骨架间的热对流与热辐射,且传热作用能随着各相含量和孔隙结构的变化而发生变化。并且,传热与传质产生的湿度场与温度场互相干扰,存在着较强的耦合作用,如干燥过程中的“局部增湿”现象(干燥过程中物料中的某一处含水率不降反增,出现湿斑),即是二者耦合效应的结果。而有关中药浸膏干燥热质传递的相关研究鲜有报道,亟需完善其特有的干燥理论。

此外,中药浸膏干燥行为,如浸膏在干燥过程中出现的表面结壳假干燥现象(壳层严重阻碍内部水分向浸膏表面迁移,导致干燥效率降低)、玻璃化转变现象(浸膏玻璃态与橡胶态间的转变)、焦化变质现象(浸膏长时间受热导致热熔)、物料断裂现象(热质传递应力导致浸膏壳层产生不可逆变形、翘曲)及干燥器中浸膏粉受到黏度、分子运动的影响导致水分难以脱除从而产生粉体结块、黏壁现象和颗粒间反复碰撞分离时与壁摩擦产生“摩擦生电”等现象^[92-95],也有待进一步研究其机制与调控机制,促进中药浸膏干燥提质增效。

4 结语与展望

中药浸膏干燥是制备现代中药制剂的重要工序,干燥工艺的优劣直接决定干浸膏的质量,进而影响中药制剂的疗效。中药浸膏干燥存在效率低、能耗高、有效成分易破坏等问题,但已有研究主要集中于干燥对中药浸膏物理性质或指标性化学成分的影响,而浸膏干燥机制不清、干燥技术落后等问题仍十分突出,无法为生产时间提供理论与技术支撑。未来亟需完善中药浸膏干燥理论,开发新型中药浸膏干燥技术,研制适应中药浸膏理化性质的专用设备,根据浸膏的关键质量指标在干燥过程的变化探索工艺调控方法。此外,中药浸膏干燥技术形式众多,各具优缺点,应根据不同干燥技术的原理,充分考虑干燥效率、干燥品质及干燥后浸膏粉体学性质特点及对后续制药过程的影响,以选择最佳的干燥工艺。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 王玉,李希,冯建安,等.多指标测定和物理指纹图谱评价冰硼痔疮栓浸膏粉干燥工艺[J].中成药,2022,44(11):3632-3635.

- [2] 邱志芳, 陈勇, 王龙虎, 等. 中药浸膏干燥技术研究进展 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2008, 10(2): 122-126.
- [3] 李远辉. “保质、提效”的中药浸膏干燥过程的调控策略研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2018.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 中药浸膏喷雾干燥器: GB/T 32237—2015 [S]. 2016.
- [5] 高武锋, 周湘杰, 庄欣雅, 等. 基于混料设计的经典名方当归补血汤喷雾干燥工艺研究 [J]. 中草药, 2023, 54(7): 2086-2095.
- [6] 张松亮, 于天杰, 张玲昂, 等. 木香健胃颗粒喷雾干燥工艺优选 [J]. 解放军药学学报, 2016, 32(6): 529-530.
- [7] Trisopon K, Kittipongpatana N, Kittipongpatana O S. A spray-dried, co-processed rice starch as a multifunctional excipient for direct compression [J]. *Pharmaceutics*, 2020, 12(6): 518.
- [8] Berg S, Bretz M, Hubbermann E M, *et al.* Influence of different pectins on powder characteristics of microencapsulated anthocyanins and their impact on drug retention of shellac coated granulate [J]. *J Food Eng*, 2012, 108(1): 158-165.
- [9] 王星星, 张艳军, 朱秀辉, 等. 基于质量源于设计理念优化参蒲盆炎颗粒喷雾干燥工艺 [J]. 中草药, 2019, 50(6): 1334-1340.
- [10] Baumann J M, Adam M S, Wood J D. Engineering advances in spray drying for pharmaceuticals [J]. *Annu Rev Chem Biomol Eng*, 2021, 12: 217-240.
- [11] Wang C, Li J, Zhang Y, *et al.* Effects of electrostatic spray drying on the sensory qualities, aroma profile and microstructural features of instant Pu-erh tea [J]. *Food Chem*, 2022, 373(Pt B): 131546.
- [12] Jayaprakash P, Maudhuit A, Gaiani C, *et al.* Encapsulation of bioactive compounds using competitive emerging techniques: Electrospraying, nano spray drying, and electrostatic spray drying [J]. *J Food Eng*, 2023, 339: 111260.
- [13] Karimi A, Askari G, Yarmand M S, *et al.* Development, modification and characterization of ursolic acid-loaded gelatin nanoparticles through electrospraying technique [J]. *Food Bioprod Process*, 2020, 124: 329-341.
- [14] Mujaffar S, Ramsumair S. Fluidized bed drying of pumpkin (*Cucurbita* sp.) seeds [J]. *Foods*, 2019, 8(5): 147.
- [15] Falade K O, Solademi O J. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2010, 45(2): 278-288.
- [16] 高新源, 李占勇, 徐庆, 等. 脉动辅助流化床干燥黏性物料的研究 [A] // 2015 年国际包装与食品工程、农产品加工学术年会论文集 [C]. 无锡: 中国机械工程学会, 2015: 300-308.
- [17] Li Z Y, Kobayashi N, Deguchi S, *et al.* Investigation on the drying kinetics in a pulsed fluidized bed [J]. *J Chem Eng Japan*, 2004, 37(9): 1179-1182.
- [18] Mutukuri T T, Wilson N E, Taylor L S, *et al.* Effects of drying method and excipient on the structure and physical stability of protein solids: Freeze drying vs. spray freeze drying [J]. *Int J Pharm*, 2021, 594: 120169.
- [19] 杨杰, 彭润玲, 郭俊德, 等. 喷雾冷冻干燥技术与设备发展现状 [J]. 真空, 2022, 59(2): 72-80.
- [20] 苏小军, 罗振海, 李雁含, 等. 紫淮山全粉喷雾冷冻干燥工艺及其特性研究 [J]. 激光生物学报, 2018, 27(4): 373-380.
- [21] 李梦琳. 喷雾冷冻干燥制备注射用丹参 [D]. 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, 2014.
- [22] Yin F, Guo S Y, Gan Y, *et al.* Preparation of redispersible liposomal dry powder using an ultrasonic spray freeze-drying technique for transdermal delivery of human epithelial growth factor [J]. *Int J Nanomedicine*, 2014, 9: 1665-1676.
- [23] Vishali D A, Monisha J, Sivakamasundari S K, *et al.* Spray freeze drying: Emerging applications in drug delivery [J]. *J Control Release*, 2019, 300: 93-101.
- [24] 王学成. 中药浸膏超声耦合真空干燥强化传热传质机理及过程模拟研究 [D]. 南昌: 江西中医药大学, 2022.
- [25] 李远辉, 伍振峰, 杨明, 等. 制备工艺对中药浸膏物理性质影响的研究现状 [J]. 中国医药工业杂志, 2016, 47(9): 1143-1150.
- [26] 林志雄. 脉冲真空干燥在中药浸膏干燥中的应用 [J]. 亚太传统医药, 2021, 17(12): 61-65.
- [27] 王仁杰, 王凯玉, 何昕炜, 等. 乌梅浸膏真空带式干燥工艺的优化 [J]. 中成药, 2021, 43(2): 468-471.
- [28] Xue Q L, Miao K H, Yu Y, *et al.* A novel method for vacuum belt drying process optimization of licorice [J]. *J Food Eng*, 2022, 328: 111075.
- [29] 李敏, 关志强, 吴阳阳, 等. 脉冲真空渗透预处理改善热泵干燥罗非鱼片品质 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 306-314.
- [30] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 光皮木瓜真空脉动干燥特性及神经网络模型 [J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 147-153.
- [31] de Martino L, Caputo L, Amato G, *et al.* Postharvest microwave drying of basil (*Ocimum basilicum* L.): The influence of treatments on the quality of dried products [J]. *Foods*, 2022, 11(7): 1029.
- [32] Hu Q, He Y N, Wang F, *et al.* Microwave technology: A novel approach to the transformation of natural

- metabolites [J]. *Chin Med*, 2021, 16(1): 87.
- [33] 商涛, 袁越锦, 赵哲, 等. 黄芩微波热风联合干燥动力学及品质研究 [J]. 中草药, 2023, 54(14): 4501-4510.
- [34] Michalak J, Czarnowska-Kujawska M, Klepacka J, *et al*. Effect of microwave heating on the acrylamide formation in foods [J]. *Molecules*, 2020, 25(18): 4140.
- [35] González-Cavieres L, Pérez-Won M, Tabilo-Munizaga G, *et al*. Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 116: 626-638.
- [36] Cao X H, Zhang M, Qian H, *et al*. Drying based on temperature-detection-assisted control in microwave-assisted pulse-spouted vacuum drying [J]. *J Sci Food Agric*, 2017, 97(8): 2307-2315.
- [37] Qi Y R, Yu F, Wang X C, *et al*. Drying of wolfberry fruit juice using low-intensity pulsed ultrasound [J]. *LWT*, 2021, 141: 110953.
- [38] 薛扬, 刘云宏, 刘恩宠, 等. 超声功率对铁棍山药超声强化热泵干燥水分迁移的影响 [J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 213-222.
- [39] 王学成, 伍振峰, 徐诗军, 等. 超声强化干燥技术与设备及其在中药领域应用的研究进展 [J]. 中国医药工业杂志, 2022, 53(4): 446-453.
- [40] Radojčin M, Pavkov I, Bursać Kovačević D, *et al*. Effect of selected drying methods and emerging drying intensification technologies on the quality of dried fruit: A review [J]. *Processes*, 2021, 9(1): 132.
- [41] Wodajo Bekele D, Admassu S. Pumpkin flour qualities as affected by ultrasound and microwave pre-drying treatment [J]. *Int J Food Prop*, 2022, 25(1): 2409-2424.
- [42] Wang X C, Xu S J, Wu Z C, *et al*. A novel ultrasound-assisted vacuum drying technique for improving drying efficiency and physicochemical properties of *Schisandra chinensis* extract powder [J]. *Food Sci Nutr*, 2022, 10(1): 49-59.
- [43] 刘雨曦, 薛佳, 傅宝尚, 等. 超声波喷雾-冷冻干燥与传统干燥技术制备高汤粉体的比较 [J]. 食品科学, 2020, 41(11): 128-134.
- [44] Liu W C, Zhang M, Adhikari B, *et al*. A novel strategy for improving drying efficiency and quality of cream mushroom soup based on microwave pre-gelatinization and infrared freeze-drying [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2020, 66: 102516.
- [45] 李锋, 林怡, 宁恩创. 紫马铃薯热风真空组合干燥全粉理化性质研究 [J]. 现代食品, 2018(20): 72-74.
- [46] 孙勤, 徐世安, 杨阿三, 等. 椰蓉微波流化床组合干燥动力学 [J]. 浙江工业大学学报, 2018, 46(4): 453-457.
- [47] Welsh Z G, Simpson M J, Khan M I H, *et al*. Generalized moisture diffusivity for food drying through multiscale modeling [J]. *J Food Eng*, 2023, 340: 111309.
- [48] 汪小莉, 李嫒, 秦昆明, 等. 近红外光谱学与化学计量学在中成药液体制剂过程分析中的应用 [J]. 中草药, 2013, 44(15): 2165-2171.
- [49] Ameri B, Hanini S, Boumahdi M. Influence of drying methods on the thermodynamic parameters, effective moisture diffusion and drying rate of wastewater sewage sludge [J]. *Renew Energy*, 2020, 147: 1107-1119.
- [50] Tao Y, Li D D, Chai W S, *et al*. Comparison between airborne ultrasound and contact ultrasound to intensify air drying of blackberry: Heat and mass transfer simulation, energy consumption and quality evaluation [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 72: 105410.
- [51] Babu A K, Kumaresan G, Raj V A A, *et al*. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 90: 536-556.
- [52] Yu X L, Wang Z H, Zhang Y Q, *et al*. Study on the water state and distribution of Chinese dried noodles during the drying process [J]. *J Food Eng*, 2018, 233: 81-87.
- [53] Zhu Y Y, Ju R H, Ma F F, *et al*. Moisture variation analysis of the green plum during the drying process based on low-field nuclear magnetic resonance [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(12): 5137-5147.
- [54] 陈衍男, 赵恒强, 卢丙, 等. 基于低场核磁共振技术的不同干燥过程中光皮木瓜水分迁移规律研究 [J]. 中草药, 2018, 49(17): 4022-4028.
- [55] 孔令波, 杨兴, 董继先, 等. 造纸污泥薄层干燥模型的研究进展 [J]. 中国造纸, 2019, 38(11): 70-75.
- [56] Ertekin C, Firat M Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2017, 57(4): 701-717.
- [57] Roy M, Bulbul M A I, Hossain M A, *et al*. Study on the drying kinetics and quality parameters of osmotic pre-treated dried Satkara (*Citrus macroptera*) fruits [J]. *J Food Meas Charact*, 2022, 16(1): 471-485.
- [58] EL-Mesery H S, Sarpong F, Xu W X, *et al*. Design of low-energy consumption hybrid dryer: A case study of garlic (*Allium sativum*) drying process [J]. *Case Stud Therm Eng*, 2022, 33: 101929.
- [59] Aykın-Dinçer E, Erbaş M. Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents [J]. *Meat Sci*, 2018, 145: 114-120.
- [60] Afolabi T J, Tunde-Akintunde T Y, Adeyanju J A. Mathematical modeling of drying kinetics of untreated

- and pretreated cocoyam slices [J]. *J Food Sci Technol*, 2015, 52(5): 2731-2740.
- [61] Kishk S S, ElGamal R A, ElMasry G M. Effectiveness of recyclable aluminum cans in fabricating an efficient solar collector for drying agricultural products [J]. *Renew Energy*, 2019, 133: 307-316.
- [62] Tagnamas Z, Bahammou Y, Kouhila M, et al. Conservation of Moroccan truffle (*Terfezia boudieri*) using solar drying method [J]. *Renew Energy*, 2020, 146: 16-24.
- [63] Yang X H, Deng L Z, Mujumdar A S, et al. Evolution and modeling of colour changes of red pepper (*Capsicum annum* L.) during hot air drying [J]. *J Food Eng*, 2018, 231: 101-108.
- [64] López A, Piqué M T, Romero A. Simulation of deep bed drying of hazelnuts [J]. *Dry Technol*, 1998, 16(3/4/5): 651-665.
- [65] Tang Z, Cenkowski S, Muir W E. Modelling the superheated-steam drying of a fixed bed of brewers' spent grain [J]. *Biosyst Eng*, 2004, 87(1): 67-77.
- [66] Parry J L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review [J]. *J Agric Eng Res*, 1985, 32(1): 1-29.
- [67] Aregba A W, Sebastian P, Nadeau J P. Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model [J]. *J Food Eng*, 2006, 77(1): 27-40.
- [68] Zare D, Chen G N. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying [J]. *Comput Electron Agric*, 2009, 68(1): 78-87.
- [69] 宋琦. 基于稻谷干燥过程评价模型的稻谷干燥过程智能控制技术研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [70] 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]. *J Food Eng*, 2018, 228: 12-24.
- [71] Singh P, Talukdar P. Drying characteristics of elephant foot yam and performance evaluation of convective dryer in kinetically and equilibrium controlled regime under varying conditions [J]. *J Therm Sci Eng Appl*, 2020, 12(5): 051005.
- [72] 孙宇飞. 颗粒型非饱和含湿多孔介质热湿传递机理研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [73] 张佳. 保温材料多孔介质热湿耦合传递机理研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- [74] Hamidi S, Heinze T, Galvan B, et al. Critical review of the local thermal equilibrium assumption in heterogeneous porous media: Dependence on permeability and porosity contrasts [J]. *Appl Therm Eng*, 2019, 147: 962-971.
- [75] 宋明启, 王志国. 多孔介质热质传递国外研究进展 [J]. 低温建筑技术, 2015, 37(7): 1-2.
- [76] 杨伟, 郭东升, 张树光. 煤岩体接触面不同倾角的传热影响 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1257-1261.
- [77] Jafari S M, Arpagaus C, Cerqueira M A, et al. Nano spray drying of food ingredients; materials, processing and applications [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 109: 632-646.
- [78] Liu G B, Xu K X, Yang Q C, et al. Flow field and drying process analysis of double-layer drying chamber in heat pump dryer [J]. *Appl Therm Eng*, 2022, 209: 118261.
- [79] Taşeri L, Aktaş M, Şevik S, et al. Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer [J]. *Food Chem*, 2018, 260: 152-159.
- [80] Onwude D I, Iranshahi K, Martynenko A, et al. Electrohydrodynamic drying: Can we scale-up the technology to make dried fruits and vegetables more nutritious and appealing? [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2021, 20(5): 5283-5313.
- [81] 丁昌江, 卢静莉, 梁运章. 高压电场干燥中药饮片的试验研究 [J]. 内蒙古工业大学学报: 自然科学版, 2008, 27(2): 95-99.
- [82] Qadri O S, Srivastava A K, Yousuf B. Trends in foam mat drying of foods: Special emphasis on hybrid foam mat drying technology [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(10): 1667-1676.
- [83] Zambon A, Facco P, Morbiato G, et al. Promoting the preservation of strawberry by supercritical CO₂ drying [J]. *Food Chem*, 2022, 397: 133789.
- [84] Bao T, Hao X, Shishir M R I, et al. Cold plasma: An emerging pretreatment technology for the drying of jujube slices [J]. *Food Chem*, 2021, 337: 127783.
- [85] Tang X M, Zhang Y Q, Li F Y, et al. Effects of traditional and advanced drying techniques on the physicochemical properties of *Lycium barbarum* L. polysaccharides and the formation of Maillard reaction products in its dried berries [J]. *Food Chem*, 2023, 409: 135268.
- [86] Wang W, Chen G H. Heat and mass transfer model of dielectric-material-assisted microwave freeze-drying of skim milk with hygroscopic effect [J]. *Chem Eng Sci*, 2005, 60(23): 6542-6550.
- [87] Andrieu J, Vessot S. A review on experimental determination and optimization of physical quality factors during pharmaceuticals freeze-drying cycles [J]. *Dry Technol*, 2018, 36(2): 129-145.

- [88] 于佳慧, 王维, 唐宇佳, 等. 吸波材料辅助发泡蓝莓果浆微波冷冻干燥的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 284-292.
- [89] 马新辉, 侯宏波, 王宁, 等. 型煤干燥理论探讨 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2020(10): 89-90.
- [90] Ekechukwu O V. Review of solar-energy drying systems I: An overview of drying principles and theory [J]. *Energy Convers Manag*, 1999, 40(6): 593-613.
- [91] 张璧光, 周永东, 伊松林, 等. 我国木材干燥理论与技术研究的现状与建议 [J]. 林产工业, 2016, 43(1): 12-14.
- [92] 唐欣, 李远辉, 谢好, 等. 中药浸膏真空干燥过程中表面结壳行为的成因、影响因素与研究策略 [J]. 中草药, 2022, 53(2): 619-626.
- [93] 刘巧丽, 罗晓健, 梁红波, 等. 中药浸膏粉与辅料共混物的玻璃化转变温度对巨安神制剂干法制粒的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(13): 13-17.
- [94] Tran Q A, Stanger R, Xie W, *et al*. Thermoplastic development of coking and non-coking maceral concentrates and molecular weight distribution of their pyrolysis products [J]. *J Anal Appl Pyrolysis*, 2018, 129: 72-85.
- [95] Taghavivand M, Choi K, Zhang L F. Investigation on drying kinetics and tribocharging behaviour of pharmaceutical granules in a fluidized bed dryer [J]. *Powder Technol*, 2017, 316: 171-180.

[责任编辑 赵慧亮]