

中药材干燥过程中的皱缩机制、影响因素与调控策略

谢 好¹, 齐娅汝², 万 娜^{1,3}, 伍振峰^{1,4}, 王学成^{1,4}, 李远辉^{1,4*}, 杨 明^{1,4*}

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. 江西中医药大学教务处, 江西 南昌 330004

3. 江西中医药大学药学院, 江西 南昌 330004

4. 江西中医药大学 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: 干燥是中药材采收后产地加工必不可少的重要加工步骤之一, 与中药材品质形成息息相关, 是影响中药材药用价值和经济价值的重要环节。皱缩是中药材在干燥过程中发生的普遍物理现象, 不仅直接影响中药材的外观、质地与复水性, 还导致水分扩散速率降低, 干燥时间延长, 引起干燥效率下降、能耗升高, 且药材长时间受热不利于保证干品质量与疗效。通过文献调研, 探讨中药材干燥过程中的皱缩机制, 从物料特性、微观结构、机械性能和加工条件方面分析其影响因素, 总结抑制皱缩的干燥技术, 以期保障中药材品质, 为中药材干燥工艺的选择提供参考依据。

关键词: 中药材; 干燥; 皱缩; 水分; 细胞结构; 温度; 干燥空气速度; 干燥空气相对湿度; 调控策略

中图分类号: R283.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2022)09-2872-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2022.09.031

Shrinkage mechanism, influencing factors and control strategies in drying process of Chinese medicinal materials

XIE Hao¹, QI Ya-ru², WAN Na^{1,3}, WU Zhen-feng^{1,4}, WANG Xue-cheng^{1,4}, LI Yuan-hui^{1,4}, YANG Ming^{1,4}

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

2. Office of Academic Affairs, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

3. College of Pharmacy, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

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

Abstract: Drying is one of the indispensable processing steps for the processing of traditional Chinese medicine in the producing area after harvest. It is closely related to the formation of the quality of traditional Chinese medicine and an important link affecting the medicinal value and economic value of Chinese medicinal materials. Shrinkage is a common physical phenomenon in the drying process of Chinese medicinal materials. It not only directly affects the appearance, texture and rehydration of Chinese medicinal materials, but also leads to the decrease of water diffusion rate and the extension of drying time, resulting in the decrease of drying efficiency and the increase of energy consumption. Moreover, the long-term heating of Chinese medicinal materials is not conducive to ensuring the quality and curative effect of dried products. Through literature research, the shrinkage mechanism in the drying process of Chinese medicinal materials is discussed in this study, its influencing factors from the aspects of material characteristics, microstructure, mechanical properties and processing conditions are analyzed, and the drying technology to inhibit shrinkage is summarized, in order to ensure the quality of Chinese medicinal materials and provide reference basis for the selection of drying technology of Chinese medicinal materials.

收稿日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(81903929); 国家自然科学基金资助项目(81960718); 国家级大学生创新创业计划项目(202110412010); 江西省 5511 重大专项(20182ABC28009); 江西省自然科学基金青年基金项目(20212BAB216010); 江西省大学生创新创业训练计划项目(202210412542); 江西中医药大学博士科研启动基金项目(2021BSZR003)

作者简介: 谢 好(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药药剂学。E-mail: 1471639126@qq.com

***通信作者:** 李远辉, 博士, 副教授, 研究方向为中药制药新技术与新工艺研究。E-mail: 20181016@jxutcm.edu.cn

杨 明, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为中药制剂学研究。E-mail: yangming16@126.com

Key words: Chinese medicinal materials; drying; shrinkage; moisture; cell structure; temperature; drying air speed; relative humidity of drying air; control strategy

所谓“药材好，药才好”。中药材是制备中药饮片，进而直接配方或制剂的原料药，其品质直接影响中药饮片乃至中药制剂的临床与经济价值，提高中药材品质，对保证中药产业高质量发展具有重要意义。除少部分中药材鲜用以外，大部分药材采收后须趁鲜干燥，以利于贮存、便于运输。皱缩是中药材在干燥过程中发生的普遍现象。药材皱缩后表现为体积减小，表面呈凸凹不平的不规则形状，质地硬化，甚至出现“僵子”；微观上表现为细胞发生向内溃陷，形态扁平化，严重时细胞壁上还会出现细微裂纹，尤其以果实类和根茎类药材干燥皱缩较为严重^[1-2]。干燥过程中，药材皱缩后导致水分扩散阻力增大，从而引起水分扩散速率降低，干燥效率下降、能耗升高，且药材长时间受热不利于保证干品质量与疗效^[3-5]。此外，皱缩引起药材质地硬化，不利于后续炮制加工；质地硬化导致复水性降低，不利于后续煎煮或提取处理。但目前对中药材干燥皱缩不够重视，皱缩机制尚不明确、调控策略仍未确立。故本文对中药材干燥过程中皱缩机制与影响因素进行分析，总结防止皱缩的调控策略和抑制皱缩的干燥技术，以期对中药材干燥技术工艺的选择提供理论依据，从而提高中药材干燥品质。

1 皱缩机制

中药材大多在结构上高度异质，导致其干燥皱缩机制较为复杂。目前，一般认为包括中药材在内的植物性物料干燥的皱缩机制主要有 3 种。（1）含水量在干燥过程中不断降低。鲜药材普遍含水量较高，水分分布于药材各组织细胞中对其具有物理填充、支撑作用，当水分在干燥过程中被除去时，植物组织细胞失去这一部分支撑力，原来由水分占据的空间出现坍塌，导致药材体积减小，从而出现皱缩^[6-7]。（2）植物表皮塌陷。植物表皮由表皮细胞构成，排列紧密并具有细胞壁结构，机械强度较高，具有防止水分散失等作用。因此，在干燥过程中，植物表皮对水分（液态或气态）向表面扩散形成较大阻力。干燥开始后，由于植物表皮的阻碍，表皮内水分不能及时由内扩散至表面因而不断积累，形成扩散应力（传质应力）并不断增加^[8]。当该应力增加至一定值后，导致植物表皮气孔增大，结构变得疏松，机械强度降低，难以维持原形态而出现塌陷^[9]。

干燥进行一定时间后，由于植物体内含水量降低，水分扩散阻力增大（干区形成），物料内部水分的扩散速度小于表面水分蒸发速度，植物表皮因率先失水而表面积减小，皱缩加剧^[10]。（3）膨压降低。膨压指植物中的水分使细胞产生向外施加在细胞壁上的压力，可为植物细胞提供支持力，以维持形状^[11]。尤其是草本植物由于缺少木本植物所拥有的坚硬木质素，故其支持力依赖膨压^[12]。一方面，草本中药材在干燥过程中，含水量的降低可直接引起膨压降低，引起植物形态皱缩^[6]。另一方面，除微波干燥外，干燥过程中的热量由植物细胞外向细胞内传递，与膨压作用方向相反，膨压遭到抵消而减小甚至丧失，导致细胞崩溃，从而草本中药材出现皱缩^[13]。

2 皱缩规律

近年来，对干燥过程中皱缩现象的研究表明干燥过程中皱缩的普遍变化规律为在干燥初期体积皱缩程度大；在干燥中后期皱缩率整体呈现持续减小的趋势。

干燥初期体积皱缩程度大，这是由于物料表面水分快速蒸发，该阶段皱缩发生在表层，体积皱缩近乎等于失水体积，尺寸减小主要用于补偿水分损失。Karathanos 等^[14]研究表明初始水分去除率高，导致强烈皱缩。Mayor 等^[13]也表达了同样的观点。王龙等^[15]研究发现干燥初期红枣受热体积膨胀从而皱缩程度大。这可能是因为物料表层发生皱缩后，其内部水分扩散至表面的阻力不断增加，使得物料内部水分不能及时排出，从而在内部堆积、形成一定的由内向外的扩散应力（传质应力），导致出现轻微的内部膨胀。此后，内部扩散应力（传质应力）增大至一定程度后，水分受应力推动作用向外部扩散，失去水分的物料体积再一次皱缩，直至物料中水分含量较小时这种收缩与膨胀的交替作用才会结束^[15-16]。

在干燥中后期，物料开始向内皱缩，皱缩率整体呈现持续减小的趋势，该阶段物料皱缩体积远小于失水体积^[17]。如 Wang 等^[17]通过观察不同干燥阶段马铃薯切片中薄壁细胞的显微图片发现皱缩逐渐向中心移动，出现向内皱缩，且接近干燥结束时皱缩明显减缓。该现象与 3 个原因有关：一是干燥后期单位时间内去除的水分较少，皱缩空间减少；二是干燥后期，由于物料温度升高可出现玻璃态转变，

从而大大增加物料的机械强度,有助于减小皱缩率;三是干燥后期物料表面发生硬化(“表面硬化”效应),形成硬壳阻止了皱缩^[18-20]。

3 皱缩的影响因素

3.1 水分

新鲜中药材根据内部水分的空间分布,分为细胞间水、细胞内水和细胞壁水;根据水分结合形式,分为自由水和结合水。位于细胞间隙的水被称为细胞间水,因其可以自由流动被认为是自由水^[21]。细胞内的水被称为细胞内水,而细胞壁水是占据细胞壁内部细小空间的水,这种水分存在于细胞内部,具有较强的结合力被认为是结合水。众所周知,干燥能脱去大部分自由水,膨胀的细胞失去水分导致组织皱缩。相反,结合水很难去除,在干燥过程中去除能够有效地维持细胞结构防止皱缩^[22]。另外,由于植物类中药材的吸湿性,在整个干燥过程中,自由水的迁移对物料结构的影响较小,而结合水的运输对物料皱缩影响很大,可能会导致细胞皱缩、孔隙形成和细胞崩溃,甚至整个组织结构变形^[10,23]。

3 种类型水的比例和迁移是影响干燥过程中细胞皱缩和结构塌陷导致整体组织皱缩的原因。

3.2 细胞结构

细胞组织结构的完整程度、液泡的大小、细胞膜的渗透性和膜的糖蛋白种类以及细胞壁的差异都是影响皱缩的因素。细胞组织结构的完整良好、功能完备具有维持基本结构秩序的能力,当细胞组织结构完整性被破坏,打破秩序,造成组织的皱缩,变形甚至崩溃^[10]。在一个完全生长的细胞组织中,90%水存在于液泡中,液泡失水导致整个组织皱缩,液泡越大,失去的水分越多,皱缩程度越大^[10,24]。细胞膜有一定的渗透调节作用,使细胞保持膨胀状态,与维持细胞的紧张状态、抑制皱缩有直接关系^[25]。植物细胞形状的维持是基于细胞内的膨胀压力,膨压是细胞内的渗透压与其周围环境的渗透压之差^[10]。细胞膨压的增大或减小所导致的细胞膨大或皱缩是细胞膜控制盐和水相对渗透能力的结果^[10]。在干燥过程中,具有更高熔点链的糖蛋白首先受到严重损害,在细胞膜上引入缺陷,细胞膜因此失去完整性增加对水的通透性,细胞内的水分更易排除,更易引起细胞结构的皱缩从而导致干燥后产品外观形态的劣质现象^[26-27]。

细胞结构对干燥过程中皱缩的影响,可以认为是细胞壁起主要的影响作用^[10]。细胞壁中纤维素的

有序性、含有的多糖类成分和固体物质含量与维持细胞尺寸、形态稳定性、结构完整性和整个组织强度有关,决定了干燥过程中细胞的皱缩程度。植物细胞壁是主要由纤维素构成的半弹性结构,细胞壁中纤维素链的高度有序性、硬度和尺寸稳定性有关,决定了细胞在整个干燥过程中抵抗皱缩的能力^[28]。细胞壁结构骨架的微纤维之间的空隙充满了多糖,去除一些特定的多糖类成分(如半纤维素和果胶)会导致细胞显著皱缩,并改变其物理特性^[29]。此外,细胞壁固体物质含量决定细胞壁的厚度,固体含量高的物料细胞壁厚,整个组织机械强度高,维持细胞结构刚性,有效避免干燥过程中皱缩现象的发生^[22]。

3.3 干燥工艺参数

干燥温度、干燥空气速度和干燥空气的相对湿度是影响皱缩的关键干燥参数。

3.3.1 干燥温度 大量研究报道,干燥温度对干燥过程中物料的皱缩有显著影响。研究报道,大多数水果和蔬菜在低温(20℃)下进行干燥处理时,皱缩率大,体积大幅度减小。相比之下,当在高温(50~70℃)下干燥时,物料的皱缩可被抑制^[8]。同样,研究发现马铃薯组织在干燥过程中,处于较高温度(70℃)下的皱缩率远小于在低温(40℃)下的皱缩^[17]。Senadeera 等^[30]研究报道柿子在较低干燥温度(45℃)发生的皱缩率比较高干燥温度(65℃)下更大。这可能是因为干燥温度低,干燥速率慢,水分由内部向外部扩散速率与物料表面水分蒸发速率较接近,物料内部和表面含水量在干燥过程中不断降低,当水分不断被去除,原来被水占据的空间逐渐坍塌,从而使物料在长时间干燥过程中持续均匀皱缩直到干燥结束,因此皱缩率较大^[31-32]。另一方面,干燥温度高,干燥速率快,物料表面水分蒸发速率较快,导致内部水分扩散速率小于表面水分蒸发速率,表面率先失水、皱缩而形成硬壳(“表面硬化”效应)^[33-34]。表面硬壳具有较大的机械强度,从而阻碍皱缩^[35]。

3.3.2 干燥空气速度 在干燥过程中,皱缩率随干燥空气速度的增加呈先升高后降低的趋势^[35]。娄正等^[31]研究不同风速条件下的红枣干燥实验,结果发现在干燥空气速度为 9 m/s 条件下的皱缩率最高,比 6 m/s 时的皱缩率提高了 1.12%,比 15 m/s 时的皱缩率提高了 4.02%。杜志龙等^[36]通过研究干燥空气速度对胡萝卜干燥特性的影响发现,不同干燥空气速度与皱缩率变化的关系曲线存在拐点。这可能

是因为在低干燥空气速度下,干燥介质中热空气流速较为缓慢,物料表面与周围介质进行能量交换少,表面阻力占优势,阻止水分散失,因此皱缩率小^[37]。在拐点之前的阶段,皱缩率随干燥空气速度增加而升高,这可能是因为干燥速率的增加导致物料内部的水分扩散速率增大,单位时间内去除的水分变多,皱缩率因此升高^[37-38]。当干燥空气速度升高至一定值时,皱缩率在拐点处达到最大值。在拐点之后的阶段,皱缩率呈现下降的趋势,这可能是因为干燥空气速度较大,干燥速率较高时表面水分迅速蒸发,从而表面形成硬壳,阻碍皱缩^[31,33]。

3.3.3 干燥空气的相对湿度 目前研究报道发现,皱缩率随干燥空气相对湿度的增加而增大。基于实验数据的统计分析表明,小麦和油菜的皱缩系数主要是相对湿度的函数,皱缩率随空气相对湿度的增加而增加^[39]。研究表明相对湿度越高,微观结构更多孔,山药的皱缩率增加^[40]。巨浩羽等^[41]研究表明西洋参根干燥过程中皱缩率随相对湿度的增加而增加。这可能是因为相对湿度的增加可加快物料温度的升高,从而加速物料内部水分子的迁移运动,产生孔隙网络堵塞甚至坍塌,出现更多的皱缩和变形^[41]。另一方面,在极低的相对空气湿度条件下,会出现“表面硬化”的现象,强烈阻碍了物料的皱缩。同时,在极低的相对空气湿度下,Biot数值(传热计算中使用的无量纲量)增加,限制物料的皱缩^[42]。

3.4 玻璃化转变温度

玻璃化转变理论可以用来解释干燥过程中发生皱缩的过程,研究表明干燥过程中皱缩与玻璃化转变温度存在联系^[43-45]。物料内部的游离水从橡胶态转变为玻璃态的温度(或以上)称为玻璃化转变温度,其根据物料水分含量而变化,干燥进行时玻璃化转变温度随水分含量的降低而升高^[46]。新鲜植物组织含水量极高,所以干燥前的中药材具有非常低的玻璃化转变温度^[42]。当干燥开始,物料温度高于玻璃化转变温度时,它会保持橡胶状态。橡胶态的分子运动比玻璃态高得多,橡胶状态下的皱缩率与水分损失成正比,皱缩率较高^[13]。干燥进行时,干燥过程水分含量降低,玻璃化转变温度升高,物料温度低于或处于玻璃化转变温度时,物料进行从橡胶态到玻璃态的相变,使物料具有高黏度,可防止或延缓皱缩^[47]。

4 皱缩率的表征

目前,皱缩率主要采用直接测量法、体积置换

法和图像处理技术进行测定,干燥皱缩程度可以用皱缩率(S)来表征,即鲜品的体积(V_1)和干燥后体积(V_2)之差与 V_1 之比。

4.1 直接测量法

直接测量法即利用度量工具(直尺、游标卡尺等)直接测量样品在干燥后的尺寸(直径和厚度等)变化。该方法操作简便,但有很大的局限性和弊端:测量工作容易受到测量元件的精度和操作人员主观因素的影响;干燥过程中的体积皱缩一般存在各向异性的特点,干燥后的被测样品形状不规则,表面出现裂隙,根据局部尺寸计算所得的体积值往往不等于真实值且无法考虑裂隙对皱缩体积的影响^[48]。

4.2 体积置换法

Head^[49]提出的体积置换法,即将被测样品浸没在液体中,根据阿基米德浮力原理得到被测样品的体积。此方法对被测样品的形状和大小没有明确的限制,具有广泛的适用性。Geiser^[50]在对多种体积测量方法进行对比研究后,认为体积置换法能取得最佳的实验结果。体积置换法主要是将被测样品放置于一个充满液体的带盖密封的隔间,将其上下颠倒,通过浸入样品和不浸入样品来测量液体的置换体积,水、甲苯、正庚烷和汞可用作测试液^[19,51]。基于体积置换法和阿基米德原理,Levi等^[52]提出玻璃珠置换法,是一种以固体为置换介质的体积置换法,避免了被测样品某些成分与有机溶剂发生化学反应等问题。但是,体积置换法进行测量工作时观测环境中气温、湿度等外界条件、观测者的感官鉴别能力和熟练技术程度的不同,测量结果往往容易受到主观因素的影响,不够准确^[52-53]。

4.3 图像处理技术

与体积置换法相比,图像处理技术目前已经作为一种更快、更可靠和更通用的方法^[54]。该法处理速度快、可灵活处理高难度图象、获取的数据准确,且为非侵入无损检测技术,对样品不造成破坏,具有客观性、准确性和高效率性被广泛应用于测定物料的干燥皱缩率^[55]。该法通过将采集的样品图像连入计算机系统,通过特定的程序对该图像进行分割、降噪,然后转换成二进制图像,从而评估和量化被测样品的面积、周长、直径和形状,通过对所得数据进行处理、加工、运算等过程得到皱缩率^[56]。近年来,采用图像处理技术的计算机视觉系统得到了迅速发展,它可以定量地表征物料的复杂尺寸和形状且可用于实时监测干燥过程中的皱缩率变化^[57]。

Yan 等^[58]应用图像处理技术分别测定芒果、香蕉和菠萝在干燥过程中的体积皱缩率,并在干燥过程中监测物料的非各向同性皱缩。Nahimana 等^[59]基于离线计算机视觉系统应用图像处理技术来研究胡萝卜在干燥过程中的皱缩和尺寸变化。Madiouli 等^[60]演示了多重离线计算机视觉系统来监控香蕉干燥过程中的皱缩,研究表明可以有效地估计香蕉在干燥过程中的皱缩。原始图像可通过 X 射线微断层扫描、激光扫描、扫描电子显微镜、摄像机、带立体显微镜的数码摄像机、计算机视觉和彩色摄像机等方式拍摄,与图像处理技术相结合为物料干燥过程中的皱缩率实时在线测量提供了一种快速可靠的方法^[8]。使用 X 射线微断层扫描结合图像处理技术进行监测,这种技术允许跟踪产品表面的变化,包括裂纹,并且提供精确测量^[61]。Gulati 等^[51]测量微波干燥过程中的皱缩时将数码摄像机拍摄的样品使用图像分析处理软件 ImageJ 对侧面孔附近的情况进行分析,测量过程涉及图像分割,将彩色图像转换为灰度,然后转换为二进制图像,以便软件识别测量的表面积。May 等^[62]采用高速激光扫描跟踪干燥过程中水果长度和直径的变化,实时在线监测皱缩率。图像处理技术作为一种快速、准确和非侵入性的在线质量评估技术,用于监测表征物料在干燥过程中的皱缩和优化操作条件,其客观性和无损性方面得到认可,此法在表征皱缩率中发挥越来越重要的作用^[63]。

5 抗皱缩干燥技术

目前,部分新型干燥技术对果蔬类和少数中药材的干燥有一定的抗皱缩作用。植物性药材主要来源于根、茎、叶、皮、花、果实、种子、全草等,与果蔬来源一致,在组织结构上具有相似性,适用于果蔬类的抗皱缩干燥技术可借鉴用于中药材干燥。

5.1 预干燥处理

预干燥处理是在干制前对其进行一定的加工处理,如化学试剂浸泡、热水烫漂、渗透脱水等。在干燥前,对物料进行适当预处理,起到抑制皱缩的效果,并保证干品质量。

5.1.1 无机化合物浸泡 在物料干燥之前对其进行不同无机化合物溶液、不同浓度浸泡的预处理,有助于维持细胞膜和细胞壁的结构完整性,增加细胞壁刚性,在干燥过程中防止组织的坍塌和细胞的皱缩,达到抗皱缩的效果。Riva 等^[64]报道了苹果在偏亚硫酸氢钾溶液中分别浸泡了 5、30 min 后,都在干燥过程中维持了苹果的硬度和形状,并且直到干

燥的最后阶段才观察到体积皱缩。Jayaraman 等^[3]采用不同浓度氯化钠溶液对花椰菜进行浸泡,与未处理组对比发现预处理能够有效降低物料的皱缩。研究发现,3%氯化钠溶液是效果最好的预处理液,不影响风味,得到皱缩率降低且有显著改善的产品。Moledina 等^[65]研究表明氯化钙溶液处理后的草莓能保持更好的硬度,皱缩率降低。无机化合物浸泡的预处理方式可以抵抗干燥过程中的皱缩并改善产品品质,但该方法易造成化学残留,引发安全问题,与当前的绿色环保消费趋势背道而驰。

5.1.2 糖类渗透脱水 渗透脱水是一种非热过程,基于植物组织浸入高渗糖溶液后发生的渗透作用^[66]。在干燥前用糖类预处理物料可以抵抗干燥过程中的皱缩,具体表现为糖类为多羟基化合物最大限度地减少细胞壁中多糖的氢键,从而有助于减少干燥时细胞的皱缩;糖类预处理赋予组织结构刚性和机械强度,可以改善干燥时的皱缩;用糖类浸渍的表层可以防止正在干燥的组织过度皱缩^[67]。Kowalski 等^[68]采用蔗糖、果糖、葡萄糖渗透预处理胡萝卜,与未经预处理的样品相比,渗透预处理显著减小皱缩,提高了干燥后品质。毕金峰等^[69]研究表明糖液浸渍处理使哈密瓜加速失水,但对其色泽和外形的保持有显著作用,能够有效抵抗皱缩,且发现在麦芽糖浆、果葡糖浆、麦芽糖醇中,选用麦芽糖浆作为预处理的浸渍溶液较好。用糖类进行干燥前预处理的方式显然减少干燥过程的皱缩,得到质量显著改善的产品,其抗皱缩程度取决于渗透活性物质的种类和渗透过程的参数,但该方法会改变干燥物料的质地,也会影响干燥动力学,研究表明经过渗透脱水的物料会比未经处理的干燥速率慢^[70]。

5.2 抗皱缩干燥加工技术

中药材干燥加工技术种类繁多,目前真空冷冻干燥、真空脉冲干燥、变温压差膨化干燥以及脉动压差闪蒸干燥在中药材干燥的应用,可以抵抗皱缩,获得外观优良的干燥产品。

5.2.1 真空冷冻干燥 真空冷冻干燥技术是通过将湿物料预先进行降温冷冻成固态,然后置于低温和真空的条件下使冰以升华的方式,从而去除物料内部的水分,主要包括预冻和升华干燥 2 个阶段^[71]。在真空冷冻干燥的预冻阶段中,将物料内部的游离水固化,在这个阶段中保护了被干燥物料的主要结构和形状,预先确定随后干燥物料的性质和形态,减小物料在干燥过程中的皱缩^[72]。在升华干燥阶

段,水分是从冰晶状态下直接升华的方式排出,冰晶所占的空间仍然保留,在物料内部中形成小的空隙,形成致密的多孔结构,因此所得产品的皱缩率最小^[73]。整个真空冷冻干燥过程是处在低温和真空的条件下持续进行,物料内部的水在除去时不会拖动整个基质向中心移去,组织依然具有较高的机械强度能维持较好的细胞内秩序,抵抗皱缩,保留了大部分原始物料的特性,如体积、形状、外观和风味等^[74]。冻结速率对抵抗皱缩有很大影响,分为速冻和慢冻。冻结速率不仅影响冰晶的粒度,更重要的是影响冰晶的形成位置,直接影响冰升华后的孔径从而影响皱缩^[74]。一般来说,速冻会产生小冰晶,最后得到均匀的多孔结构皱缩率更低和质量更高的产品。相反,缓慢的冷却速度会产生大冰晶导致细胞外位置的晶体生长。因此,预冻阶段的冻结速率是真空冷冻干燥过程中减小皱缩的至关重要的一个参数。大量研究与生产实践表明,真空冷冻干燥具有维持鲜品原状、防止皱缩,获得疏松多孔产品的作用。另外,整个过程完全处于低温低氧状态,且相平衡温度低,可最大程度保留原有天然物质及营养成分,可较好的保留药材色泽、气味,通常复水性也比较好,适用于热敏性,易氧化及含有较多挥发性成分的中药材的干燥^[75]。白亚乡等^[76]研究表明海参在经过真空冷冻干燥处理后,冻干海参样品外观维持更好,皱缩率也最小,仅为 4.1%,通过真空冷冻干燥得到了质量最佳的产品。魏庆霞^[77]研究表明真空冷冻干燥的黄芪片皱缩率最低为 23%,而自然干燥中皱缩过度,皱缩率高达 40%。Ratti^[37]研究发现,浆果在真空冷冻干燥过程中的皱缩率最小,为 5%~15%,而热风干燥皱缩过度,皱缩率高达 80%。目前,真空冷冻干燥还存在设备费用高、运营成本高、能耗高、干燥时间长、干制产品易吸湿等问题,还需要进一步加深研究。

5.2.2 真空脉动干燥 真空脉动干燥技术是借助干燥室在真空和常压的交替连续循环变化作用下,实现物料快速干燥,改善干燥后物料的外观形态和微观结构的一种干燥技术^[78]。特别是对于果实类中药材,真空脉动干燥技术有利于维持外观形态、减少皱缩从而提升干燥后产品的质量。在干燥室中,一个完整的真空脉动过程如图 1 所示,包括①、②、③、④过程,分别对应真空产生阶段、真空维持阶段、进气阶段、常压保持阶段。在真空维持阶段,物料处于膨胀状态;在常压保持阶段时干燥室压力

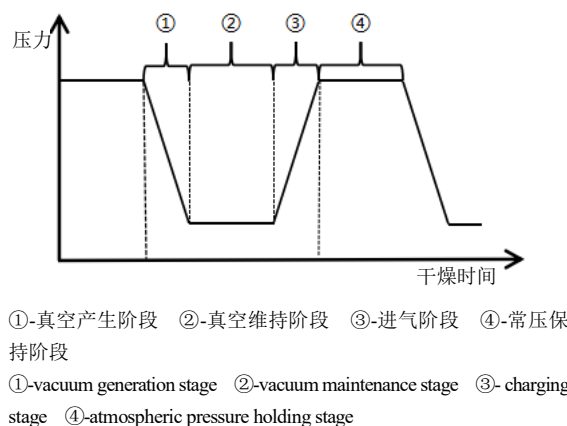


图 1 真空脉动干燥压力循环变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cyclic variation of vacuum pulsating drying pressure

增大,物料处于“瘪平”的皱缩状态^[79]。压力的循环变化使物料外观形态发生明显的皱缩或膨胀变化,从而引起微观孔道的疏通和断裂^[80-81],缓解干燥过程产生的应力集中现象,从而减小干燥过程中的皱缩并形成具有蜂窝多孔结构的物料。除此之外,真空脉动干燥技术还具有以下特点:(1)低氧环境减少物料与氧气的接触,减少氧化反应,有效抑制干燥过程中的酶促褐变及美拉德反应的产生,从而保护物料的营养成分与色泽;(2)干燥室在真空和常压交替连续循环作用下,打破干燥物料和介质之间的平衡状态,有助于水分重新分布及迁移,加速后续干燥速率;同时低压环境中物料的水蒸气分压与外界环境的蒸汽分压的压差较大,有利于水分的扩散,提高干燥速度,可以使干燥过程在温度较低的情况下进行,适用于热敏物质的干燥;(3)与恒真空干燥相比真空脉动干燥的真空泵运行时间较短,节约能源,提高经济效益^[5,82-83]。这种干燥方法一般都用于热敏性、蜡质层覆盖、易褐变、高糖分物料的干燥加工,如枸杞、肉苁蓉等。张卫鹏等^[84]研究了自然晾晒、普通热风干燥、气体射流冲击干燥、真空脉动干燥 4 种技术应用于茯苓块的干燥,结果发现真空脉动干燥的茯苓丁皱缩均匀、结构完整,研究表明真空脉动干燥有利于茯苓丁外形的维持,抵抗干燥过程的皱缩。马琴^[85]在枸杞的干燥研究中发现,与热风干燥相比,真空脉动干燥的枸杞色泽和果皮皱缩程度均较优。但现真空脉动干燥过程中在常压段有空气进入干燥箱,可引起物料的氧化。

5.2.3 变温压差膨化干燥 变温压差膨化干燥结合了热风干燥、微波真空干燥和真空冷冻干燥的优点,

生产成本低, 能耗小, 通过变温压差膨化干燥得到的产品外观形态良好, 最大程度地保留营养成分以及物料本身的香气^[82]。变温压差膨化干燥是根据相变和气体的热压效应原理, 将物料置于相对低温高压的膨化罐中, 通过不断地改变温度、压差, 物料内部水分瞬间汽化蒸发, 细胞剧烈膨胀, 然后抽真空达到干燥的目的, 得到细胞间隙大、均匀的蜂窝状多孔结构、皱缩较小的干燥产品^[5,83]。近年来, 研究者们通过进行变温压差膨化干燥减少皱缩, 改善其外观, 得到形、色、香、味俱佳, 营养物质分布均匀, 复水性等特点的干燥产品^[86]。该干燥技术设备相对简单, 操作简易; 采取循环利用冷却水和间歇式蒸汽加热等措施, 极大降低了干燥过程中的耗能, 符合节能环保要求; 适应性广, 大部分物料可用此进行干燥加工, 但有坚硬外壳的中药材如槟榔、胖大海、罗汉果等, 纤维素过高的中药材都不易用该干燥技术进行加工处理^[87]。方芳等^[88]研究表明经变温压差膨化干燥的哈密瓜外观形态较为完整均匀, 能够有效避免干燥过程中产生的皱缩。黄宗海等^[89]研究发现, 胡萝卜经过变温膨化压差干燥同样有利于形状的维持, 抵抗干燥过程中的皱缩。但不同种类中药材的膨化干燥工艺差异很大, 如一部分物料可以在低温下得到色泽好、质量佳的膨化产品, 而有些淀粉含量多的物料则需要较高的温度, 使淀粉糊化, 与此同时高温条件会破坏物料中的营养成分并导致酯类化合物的严重损失, 影响干燥产品的质量出现焦糊现象, 伴随着苦涩的味道^[90]。目前, 我国变温压差膨化干燥技术的研究处于初步阶段, 工艺和机制都需通过大量实验进一步深入研究。

5.2.4 脉动压差闪蒸干燥 脉动压差闪蒸干燥是由变温压差膨化干燥改进升级的一种新型、高效、环保干燥技术, 在变温压差膨化干燥的基础上对操作温度和环境压力进行进一步的精密调控, 以脉动的形式实现从高压到低压的瞬间变化, 使物料内部水分升温后迅速汽化闪蒸引起物料发生膨化现象, 在膨胀作用力下物料形成多孔网格结构, 经过后续真空状态下的低温状态进行脱水达到干燥效果^[91-92]。闪蒸是脉动压差闪蒸干燥过程的关键环节, 闪蒸促进水分散失的同时, 引起内部结构膨胀, 减少脆片干燥皱缩现象^[92]。闪蒸过程中, 置于密闭闪蒸罐的物料首先停留在高温阶段, 高温为物料内部的水分散失提供动力, 加速水分蒸发到外部空间, 形成表面硬化现象, 形成坚硬的外壳, 被干燥物料表面硬

度增加, 阻碍了皱缩, 有利于保持物料原有的体积形状^[92]。脉动压差闪蒸干燥还能够缩短干燥时间, 提高干燥效率, 高效节能, 在一定程度上避免了物料的皱缩, 有效提高干制品品质, 且经闪蒸处理的物料形成多孔结构改善了物料的物理性质, 能有效提高有效成分如多酚、黄酮、游离氨基酸等的提取率^[93-94]。毕金峰等^[95]研究表明苹果片经过脉动压差闪蒸处理内部结构膨胀, 减少苹果脆片干燥皱缩程度。王雪媛^[96]研究脉动压差闪蒸干燥后的苹果片也得到了同样的结果。同样, 闫旭等^[97]研究表明经脉动压差闪蒸干燥的番石榴也得到了皱缩率小、有效成分含量高的干燥产品。脉动压差闪蒸干燥可以广泛应用于大部分物料的干燥加工, 但因过程中存在高温停滞阶段, 含较多还原性糖类的物质在高温条件下与氨基酸发生美拉德反应, 引起褐变, 故热敏物质或含较多还原性糖类的物料应避免使用该干燥技术。

5.3 中药材干燥技术适应性

抗皱缩干燥技术的根本作用在于通过抑制皱缩提高干燥效率、降低能耗、保证干品质量, 对于花、叶类以及切薄片等易干燥、皱缩不明显的中药材, 可选用其他干燥技术。其他类型中药材因药用部位的不同, 组织结构上具有较大差异, 同时不同中药材含有有效成分的稳定性也有所差异, 在选择抗皱缩干燥技术时需考虑其适应性。对于果实类中药材, 由于其丰富的果汁中含有大量有效成分, 若采用膨化干燥技术, 易引起果实表皮破裂, 继而果汁渗出导致有效成分损失; 在采用真空脉动干燥或脉动压差闪蒸干燥时, 需采用温和的干燥工艺, 防止压力迅速变化导致果实表皮破裂。对于所含有效成分具有热敏性的药材, 若采用膨化干燥须注意高温对有效成分的破坏, 高温段宜适当降低温度和缩短高温处理时间; 对于所含有效成分易氧化的药材, 若采用真空脉动干燥、脉动压差闪蒸干燥, 须缩短常压时间, 减少干燥室内的含氧量; 对于含有挥发油等易挥发成分, 若采用真空冷冻干燥或高真空度干燥将导致挥发油成分大量损失, 宜降低真空度。

6 结语与展望

皱缩是中药材产地加工干燥过程中普遍发生的物理现象, 不仅影响外观, 还影响干燥效率、品质和疗效, 但往往被忽视。本文从皱缩机制、规律及影响因素 3 个方面详细分析干燥过程中的皱缩现象, 同时总结抗皱缩干燥技术, 以期改善中药材干品的外在性状和内部品质。但目前, 关于干燥皱缩

的研究甚少,未来不仅需加强对中药材干燥皱缩基础理论研究、充分探索其影响机制,还要积极研究抗皱缩干燥技术,探寻新型高效抗皱缩干燥预处理方法,改进干燥设备并优化抗皱缩干燥工艺,以期减少中药材干燥皱缩、提高干燥速率、减少有效成分损失、降低能耗。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 刘勇,徐娜,陈骏飞,等.不同干燥方法对三七药材外观性状与内在结构及其品质的影响[J].中草药,2019,50(23): 5714-5723.
- [2] Khan M I H, Karim M A. Cellular water distribution, transport, and its investigation methods for plant-based food material [J]. *Food Res Int*, 2017, 99(Pt 1): 1-14.
- [3] Jayaraman K S, Das Gupta D K, Rao N B. Effect of pretreatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower [J]. *Int J Food Sci Technol*, 1990, 25(1): 47-60.
- [4] Senadeera W, Bhandari B R, Young G, et al. Modeling dimensional shrinkage of shaped foods in fluidized bed drying [J]. *J Food Process Pres*, 2005, 29(2): 109-119.
- [5] 孟建升,蒋俊春,郑志安,等.3种干燥方式对山药片干燥动力学和品质的影响[J].中草药,2019,50(11): 2575-2582.
- [6] Mahiuddin M, Khan M I H, Kumar C, et al. Shrinkage of food materials during drying: Current status and challenges [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2018, 17(5): 1113-1126.
- [7] 喻芬,万娜,李远辉,等.中药材干燥过程中的理化性质变化规律与机制分析[J].中草药,2021,52(7): 2144-2153.
- [8] Rahman M M, Joardder M U H, Khan M I H, et al. Multi-scale model of food drying: Current status and challenges [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, 58(5): 858-876.
- [9] Panyawong S, Devahastin S. Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor [J]. *J Food Eng*, 2007, 78(1): 151-161.
- [10] Prothon F, Ahmé L, Sjöholm I. Mechanisms and prevention of plant tissue collapse during dehydration: A critical review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2003, 43(4): 447-479.
- [11] Lin T T, Pitt R E. Rheology of apple and potato tissue as affected by cell turgor pressure [J]. *J Texture Stud*, 1986, 17(3): 291-313.
- [12] 王喜明,贺勤,赵喜龙.桉树人工林木材干燥皱缩特性的研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2013,34(1): 123-127.
- [13] Mayor L, Sereno A M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review [J]. *J Food Eng*, 2004, 61(3): 373-386.
- [14] Karathanos V T, Kanellopoulos N K, Belessiotis V G. Development of porous structure during air drying of agricultural plant products [J]. *J Food Eng*, 1996, 29(2): 167-183.
- [15] 王龙,胡灿,李传峰,等.红枣热风干燥过程及收缩特性的试验研究[J].中国农机化学报,2020,41(1): 79-82.
- [16] 刁海林,陈健波,罗建举,等.巨尾桉干燥特性研究[J].中国农学通报,2011,27(28): 63-68.
- [17] Wang N, Brennan J G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration [J]. *J Food Eng*, 1995, 24(1): 61-76.
- [18] 王雪媛,高琨,陈芹芹,等.苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J].农业工程学报,2015,31(12): 275-281.
- [19] Krokida M K, Maroulis Z B. Effect of drying method on shrinkage and porosity [J]. *Dry Technol*, 1997, 15(10): 2441-2458.
- [20] Schrader G W, Litchfield J B. Moisture profiles in a model food gel during drying: Measurement using magnetic resonance imaging and evaluation of the hckian model [J]. *Dry Technol*, 1992, 10(2): 295-332.
- [21] 李坤.根茎类中药材热风干燥的失水动力学模型及特性机理研究[D].昆明:云南师范大学,2020.
- [22] Joardder M U H, Brown R J, Kumar C, et al. Effect of cell wall properties on porosity and shrinkage of dried apple [J]. *Int J Food Prop*, 2015, 18(10): 2327-2337.
- [23] Joardder M U H, Karim A, Kumar C, et al. *Porosity: Establishing the Relationship between Drying Parameters and Dried Food Quality* [M]. Cham: Springer, 2016: 24.
- [24] 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.
- [25] 冯九焕,卢永根,刘向东,等.水稻花粉发育过程及其分期[J].中国水稻科学,2001,15(1): 21-28.
- [26] 王飏,田丰伟,励建荣,等.冷冻干燥对乳酸菌细胞膜通透性的影响[J].微生物学通报,2009,36(5): 684-688.
- [27] 解卫海,刘丹,孙金利,等.脱水和高氧压过程中单叶蔓荆叶片细胞膜透性分析[J].林业科学,2015,51(6): 44-49.
- [28] Chanzy H, Imada K, Mollard A, et al. Crystallographic aspects of sub-elementary cellulose fibrils occurring in the wall of rose cells cultured *in vitro* [J]. *Protoplasma*, 1979, 100(3/4): 303-316.
- [29] Lewicki P P. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review [J]. *Int J Food Prop*, 1998, 1(1): 1-22.
- [30] Senadeera W, Adiletta G, Önal B, et al. Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics,

- shrinkage, and colour of persimmon slices [J]. *Foods*, 2020, 9(1): 101.
- [31] 娄正, 刘清, 师建芳, 等. 红枣气体射流冲击干燥收缩特性研究 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 241-246.
- [32] Aral S, Be\u015fe A V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity [J]. *Food Chem*, 2016, 210: 577-584.
- [33] Hatamipour M S, Mowla D. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed [J]. *J Food Eng*, 2002, 55(3): 247-252.
- [34] Xu L, Fang X J, Wu W J, *et al.* Effects of high-temperature pre-drying on the quality of air-dried shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) [J]. *Food Chem*, 2019, 285: 406-413.
- [35] 王庆惠, 李忠新, 闫圣坤, 等. 杏子热风干燥收缩特性和色泽变化研究 [J]. 西南农业学报, 2017, 30(5): 1189-1193.
- [36] 杜志龙, 高振江, 温朝晖, 等. 胡萝卜的气体射流冲击烫漂与干燥试验研究 [J]. 粮食与食品工业, 2010, 17(1): 22-26.
- [37] Ratti C. Shrinkage during drying of foodstuffs [J]. *J Food Eng*, 1994, 23(1): 91-105.
- [38] Santacruz-Vázquez V, Santacruz-Vázquez C, Welti-Chanes J, *et al.* Effects of air-drying on the shrinkage, surface temperatures and structural features of apples slabs by means of fractal analysis [J]. *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, 2008, 7(1): 55-63.
- [39] Lang W, Sokhansanj S. Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola [J]. *J Food Process Eng*, 1993, 16(4): 305-314.
- [40] Ju H Y, Zhang Q, Mujumdar A S, *et al.* Hot-air drying kinetics of yam slices under step change in relative humidity [J]. *Int J Food Eng*, 2016, 12(8): 783-792.
- [41] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 干燥介质相对湿度对西洋参根干燥特性和品质的影响 [J]. 中草药, 2020, 51(3): 631-638.
- [42] Karathanos V. Collapse of structure during drying of celery [J]. *Dry Technol*, 1993, 11(5): 1005-1023.
- [43] Achanta S. Moisture transport in shrinking gels during drying [D]. West Lafayette: Purdue University, 1995.
- [44] del Valle J M, Cuadros T R M, Aguilera J M. Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmoted apple pieces [J]. *Food Res Int*, 1998, 31(3): 191-204.
- [45] Willis B, Okos M, Campanella O. *Effects of Glass Transition on Stress Development During Drying of A Shrinking Food System* [M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1999: 68.
- [46] Champion D, le Meste M, Simatos D. Towards an improved understanding of glass transition and relaxations in foods: Molecular mobility in the glass transition range [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2000, 11(2): 41-55.
- [47] Sappati P K, Nayak B, van Walsum G P. Effect of glass transition on the shrinkage of sugar kelp (*Saccharina latissima*) during hot air convective drying [J]. *J Food Eng*, 2017, 210: 50-61.
- [48] 唐朝生, 崔玉军, Anh-Minh Tang, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1271-1279.
- [49] Head K H. *Manual of Soil Laboratory Testing* [M]. London: Pentech Press, 1980: 77.
- [50] Geiser F. Comportement mécanique d'un limon non saturé: étude expérimentale et modélisation constitutive [D]. Poland: Verlag nicht ermittelbar, 1999.
- [51] Gulati T, Zhu H C, Datta A K. Coupled electromagnetics, multiphase transport and large deformation model for microwave drying [J]. *Chem Eng Sci*, 2016, 156: 206-228.
- [52] Levi G, Karel M. Volumetric shrinkage (collapse) in freeze-dried carbohydrates above their glass transition temperature [J]. *Food Res Int*, 1995, 28(2): 145-151.
- [53] 马玉莹, 雷廷武, Xiusheng Yang. 体积置换法测量土石混合物组分含量 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 85-91.
- [54] Onwude D I, Hashim N, Abdan K, *et al.* The potential of computer vision, optical backscattering parameters and artificial neural network modelling in monitoring the shrinkage of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) during drying [J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 98(4): 1310-1324.
- [55] Du C J, Sun D W. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2004, 15(5): 230-249.
- [56] Udomkun P, Nagle M, Argyropoulos D, *et al.* Multi-sensor approach to improve optical monitoring of papaya shrinkage during drying [J]. *J Food Eng*, 2016, 189: 82-89.
- [57] Sturm B, Hofacker W C, Hensel O. Optimizing the drying parameters for hot-air-dried apples [J]. *Dry Technol*, 2012, 30(14): 1570-1582.
- [58] Yan Z Y, Sousa-Gallagher M J, Oliveira F A R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying [J]. *J Food Eng*, 2008, 84(3): 430-440.
- [59] Nahimana H, Zhang M. Shrinkage and color change during microwave vacuum drying of carrot [J]. *Dry Technol*, 2011, 29(7): 836-847.
- [60] Madiouli J, Sghaier J, Orteu J J, *et al.* Non-contact measurement of the shrinkage and calculation of porosity during the drying of banana [J]. *Dry Technol*, 2011, 29(12): 1358-1364.
- [61] Madiouli J, Lecomte D, Nganya T, *et al.* A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials [J]. *Dry Technol*, 2007, 25(4): 621-628.
- [62] May B K, Perré P. The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs [J]. *J Food Eng*, 2002, 54(4): 271-282.

- [63] Timmermans A J M, Hulzebosch A A. Computer vision system for on-line sorting of pot plants using an artificial neural network classifier [J]. *Comput Electron Agric*, 1996, 15(1): 41-55.
- [64] Riva M, Masi P. The influence of the blanching procedure on the quality and shelf life of dried apples [A] // Progress in food preservation processes [C]. Belgium: International Symposium, Brussels, 1988: 12-14.
- [65] Moledina K H, Haydar M, Ooraikul B, et al. Pectin changes in the pre-cooking step of dehydrated mashed potato production [J]. *J Sci Food Agric*, 1981, 32(11): 1091-1102.
- [66] 欧阳梦云, 王燕, 罗凤莲, 等. 预处理及干燥方法对果蔬干制品 Vc 含量影响的研究进展 [J]. *食品与机械*, 2018, 34(7): 179-182.
- [67] Neumann H J. Dehydrated celery: Effects of predrying treatments and rehydration procedures on reconstitution [J]. *J Food Sci*, 1972, 37(3): 437-441.
- [68] Kowalski S, Mierzwa D. Influence of preliminary osmotic dehydration on drying kinetics and final quality of carrot (*Daucus carota* L.) [J]. *Chem Process Eng*, 2011, 32(3): 185-194.
- [69] 毕金峰, 方芳, 丁媛媛, 等. 预处理对哈密瓜变温压差膨化干燥产品品质的影响 [J]. *食品与机械*, 2010, 26(2): 15-18.
- [70] 安可婧, 魏来, 唐道邦, 等. 果蔬干燥前处理技术的应用及研究进展 [J]. *现代食品科技*, 2019, 35(6): 314-321.
- [71] 郭树国. 人参真空冷冻干燥工艺参数试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [72] Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review [J]. *J Food Eng*, 2001, 49(4): 311-319.
- [73] Geidobler R, Winter G. Controlled ice nucleation in the field of freeze-drying: Fundamentals and technology review [J]. *Eur J Pharm Biopharm*, 2013, 85(2): 214-222.
- [74] Ceballos A M, Giraldo G I, Orrego C E. Effect of freezing rate on quality parameters of freeze dried soursop fruit pulp [J]. *J Food Eng*, 2012, 111(2): 360-365.
- [75] 张丽文, 罗瑞明, 李亚蕾, 等. 食品真空冷冻联合干燥技术研究进展 [J]. *中国调味品*, 2017, 42(3): 152-156.
- [76] 白亚乡, 胡玉才. 高压电场与真空冷冻联合干燥海参方法及其效用分析 [J]. *高电压技术*, 2014, 40(7): 2191-2196.
- [77] 魏庆霞. 黄芪真空冷冻干燥试验研究 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2015.
- [78] Li L L, Zhang M, Song X N, et al. Changes in unfrozen water content and dielectric properties during pulse vacuum osmotic dehydration to improve microwave freeze-drying characteristics of Chinese yam [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(14): 6572-6581.
- [79] 王栋. 基于多参数监控的真空脉动干燥过程研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [80] Chua K J, Chou S K. On the experimental study of a pressure regulatory system for bioproducts dehydration [J]. *J Food Eng*, 2004, 62(2): 151-158.
- [81] Maache-Rezzoug Z, Rezzoug S A, Allaf K. Development of a new drying process - dehydration by cyclical pressure drops (D.D.S.): Application to the collagen gel [J]. *Dry Technol*, 2002, 20(1): 109-129.
- [82] 高明珠. 工夫红茶真空脉动干燥工艺研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [83] 高明珠, 董春旺, 叶阳, 等. 工夫红茶真空脉动干燥特性及数学模型研究 [J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(3): 96-101.
- [84] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 317-324.
- [85] 马琴. 枸杞干燥及对多糖含量影响的试验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
- [86] 毕金峰, 魏益民. 果蔬变温压差膨化干燥技术研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 308-312.
- [87] 毕金峰. 果蔬变温压差膨化干燥技术 [J]. *农产品加工*, 2007(7): 26-27.
- [88] 方芳, 毕金峰, 李宝玉, 等. 不同干燥方式对哈密瓜干燥产品品质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(5): 68-72.
- [89] 黄宗海, 何新益, 王佳蕊, 等. 预处理方式对胡萝卜变温压差膨化干燥品质的影响 [J]. *食品与机械*, 2011, 27(1): 124-126.
- [90] 王沛. 苹果变温压差膨化脆片品质评价体系的建立及应用 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [91] 贾亭亭, 牛广财, 朱丹, 等. 变温压差膨化干燥技术研究进展 [J]. *包装与食品机械*, 2014, 32(4): 58-62.
- [92] 黄寿恩, 李忠海, 何新益. 果蔬变温压差膨化干燥技术研究现状及发展趋势 [J]. *食品与机械*, 2013, 29(2): 242-245.
- [93] 高琨. 压差闪蒸干燥苹果脆片褐变机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [94] 彭健. 压差闪蒸干燥胡萝卜脆条质构品质形成机制研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [95] 毕金峰, 王雪媛, 周林燕, 等. 脉动压差闪蒸处理对苹果片水分散失特性及品质影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 376-382.
- [96] 王雪媛. 不同干燥方式对苹果片水分扩散特性影响研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [97] 闫旭, 刘璇, 毕金峰, 等. 番石榴脉动压差闪蒸联合干燥工艺优化及品质评价 [J]. *中国食品学报*, 2018, 18(4): 112-123.

[责任编辑 崔艳丽]