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

王学成，伍振峰，徐诗军，伍志成，杨　明*

（江西中医药大学，现代中药制剂教育部重点实验室，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：干燥是中药制造过程的关键环节，涉及中药材、中间体及制剂等加工过程。探索快速、高效并能保证中药品质和疗效的干燥技术及工艺，是中药干燥研究的重要方向。低频率大功率超声波强化干燥传热传质过程的优势逐渐凸显，在中药高品质干燥领域有广阔的应用前景。本研究主要介绍了超声干燥关键工艺参数对干燥过程的影响及典型设备的研究现状及发展趋势，讨论了超声干燥在中药领域应用的现状、问题并提出对策，为推动超声辅助干燥技术理论发展和工业应用提供参考。

关键词：超声强化干燥；中药；工艺参数；设备；传热传质

中图分类号：R28；TQ420.6^{+}8　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-8255(2022)04-0446-08

DOI：10.16522/j.cnki.cjph.2022.04.003

Progress of Ultrasound-enhanced Drying Technology and Equipment and Its Application in Traditional Chinese Medicine

WANG Xuecheng, WU Zhenfeng, XU Shijun, WU Zhicheng, YANG Ming*

(*State Key Lab. of Innovative Medicine and High Efficiency and Energy Saving Pharmaceutical Equipment, Key Lab. of Modern Preparation of Traditional Chinese Medicine, Ministry of Education, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004*)

ABSTRACT: Drying is one of the most important processes in the manufacture of traditional Chinese medicines, including drying of herbs, extracts and preparations. It is an important research direction of drying of traditional Chinese medicines to explore the drying technology and process that is fast, efficient and can guarantee the quality and clinical efficacy of traditional Chinese medicines. The advantages of low-frequency and high-power ultrasound in enhancing the drying heat and mass transfer process are gradually highlighted, and this technique has a broad application prospect in the field of high quality drying of traditional Chinese medicines. In this paper, the influences of key technological parameters of ultrasonic drying on the drying process and the research status and development trend of typical equipment are analyzed. Meanwhile, the application status and problems of ultrasonic drying in the field of traditional Chinese medicines are discussed and the countermeasures are put forward. It is hoped to provide some references for promoting the theoretical development and industrial application of ultrasound-assisted drying technology.

Key Words: ultrasound-enhanced drying; traditional Chinese medicine; process parameter; equipment; heat and mass transfer

干燥是中药加工生产过程常见的工业单元操作，主要目的是降低中药材、中间体及制剂的含水率，以便运输、贮存或下一步制造工序。尽管干燥技术的工业应用已非常普遍，但中药成分复杂、干燥传热传质机制不明确，导致中药干燥过程普遍

收稿日期：2021-04-28

基金项目：国家自然科学基金项目(82003952和81960718)

作者简介：王学成(1989—)，男，博士研究生，专业方向：中药制剂工艺与装备。

通信作者：杨　明(1962—)，男，教授，博士生导师，从事中药制药工程与新装备研究。

E-mail：yangming16@163.com

存在时间长、能耗密集及产品品质不稳定等共性问题[1]。提高干燥温度是一种有效提高干燥速率的方式，但在中药干燥领域，升温模式受到较大限制，易造成热敏性、挥发性活性成分损失，最终影响药物品质及疗效[2]。在传统的对流或热传导干燥方式的基础上增加另一种或多种技术而形成的组合干燥技术，能有效提高干燥效率，如微波、红外、高压电场及超声波等辅助强化技术[3—6]。由于一定条件下超声波在流体介质中能产生热、空化、声泳、雾化等有利于强化传热传质过程的内部效应，因此超声技术在有效成分提取、乳化、结晶、催化等制药过程已有较广泛应用[7—10]。超声干燥技术的报道最早见于20世纪50年代BOUCHER采用可闻声波和超声波的干燥试验[1]，该研究显示出超声对提高干燥效率的强化作用，且对于保障含热敏性成分物料的品质有独特优势，但由于噪声高及能效低等问题未能得到广泛研究和应用[11—12]。近年来，随着超声换能设备等硬件开发技术的不断提升，超声干燥技术逐渐受到人们的重视，尤其是在表观性状及内部质构改善、活性成分保留等方面的优势逐步凸显[13]。本研究对超声干燥技术与设备及其应用进行了介绍，并分析和讨论了超声干燥技术在中药制造过程中应用的问题及对策，以期为超声干燥理论发展和中药制药干燥工业应用提供参考。

1 超声干燥技术的关键工艺参数

1.1 超声频率

不同频率范围的超声波应用领域不同，通常频率高于1 MHz的小功率超声波常用于医疗诊断及无损检测，而20～100 kHz的大功率超声波常被用于增强干燥过程的热质传递效率[14]。陈文敏等比较了不同频率（25、28、40、59 kHz）的超声干燥工艺对红枣干燥所需时间的影响，结果显示40 kHz超声干燥时所需时间最短，更高的超声频率可能会使红枣内部形成海绵状结构，反而导致干燥时间更长[15]。应分别考察超声频率对不同的中药原料干燥效率的影响，以优化干燥时的超声工作频率。超声频率对空化作用有增强效益，进而能提高干燥效率。白喜婷等研究了全蛋液的单频（28 kHz）和双频（有2个超声发生源，28 kHz+28 kHz）超声干燥过程[16—17]。结果显示，双频的干燥时间相对单频缩短30%，平均干燥速率提高41.6%。原因是双频超声波在传播路径中会出现振幅叠加的现象，超声强化效应得到了加强，从而能提高水分从物料内部向表面迁移的速度。

1.2 功率密度

功率密度的定义是超声波压强和粒子速度的乘积（见式①），在干燥过程中可理解为超声在传播方向上每单位表面的能量流。在使用同一超声干燥设备时，通常认为待干燥物料接收超声波的面积是一定的，因此可直接使用超声功率来表示超声能量[18]。

$$PI=P_s \cdot v \qquad ①$$

式中，PI为功率密度/W·m^{-2}；P_s为超声波压强/Pa；v为粒子速度/m·s^{-1}。

功率密度是影响超声干燥效率的重要参数，通常功率密度高于10 W/m^{2}的超声波被定义为高功率超声波，能增强干燥过程的传热传质效率[19]。LI等考察了使用不同功率密度（15.29、20.38、22.93及24.46 kW/m^2）的超声干燥山楂提取物的过程，结果显示功率密度越大则干燥周期越短，且功率密度不会对干燥产物的颜色、绿原酸含量及抗氧化活性等造成显著影响[20]。

1.3 超声作用时间

干燥过程中的含水率变化与干燥时间呈现一定的数学关系，中药材及制剂的干燥过程通常分为预热、恒速及降速3个阶段，而降速段往往在整个干燥周期中比重较大[21]。由于不同相态物质的声阻抗不同，超声强化效应与干燥过程中物料的含水率变化有关，因此整个干燥过程中超声时长和作用时段的设计将对超声波的强化作用产生影响。赵芳等研究了超声作用时间（0、1、1.5、2、2.5 h）对干燥过程的影响[22]。结果显示，随着超声作用时间的延长，干燥时间减少，但超声2 h后产生的强化效果不明显，因此超声作用时间不宜过长。超声波在液体和固体介质中的传播效率高，当干燥进入降速段后期，物料含水率显著降低，孔隙中的水分被空气替代，超声传播阻力就会增大，减弱强化效果，因此超声时间要根据中药材或制剂的性质及干燥动力学特性进行优化来确定。

2　超声干燥设备的研究现状

超声干燥设备是超声干燥技术应用的重要载体，从专利申请量的角度能在一定程度上跟踪其发展现状。基于incoPat专利数据库，在10年周期（2011年1月1日至2020年12月31日）内以“超声”“干燥”“干化”“脱水”等为必要关键词，排除“洗”“提取”等非相关关键词，分别建立检索式对数据库中有效或审核中的中国专利进行检索和统计，经人工筛选确认后，得到相关专利总数为315件，各年度数量统计结果见图1。由于发明专利从申请到公开有一定的时间周期，因此2020年的数据仅作为对比参考。从图1可见，超声干燥技术及设备相关专利申请总量总体呈现逐年上升趋势；2011—2015年每年的申请数基本在个位数，从2016年开始专利申请数量显著增加。2015年5月国务院发布《中国制造2025》，全面推进实施制造强国战略，其中重要的方针之一是坚持绿色可持续发展。超声干燥设备专利数的增长可能与其作为干燥领域的新兴绿色制造技术、逐步受到重视有关。

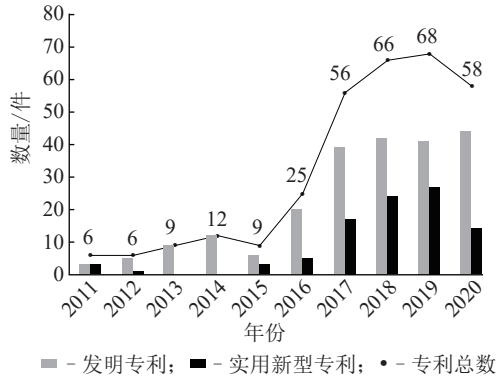
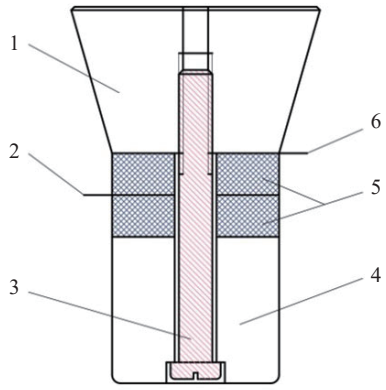


图1　超声干燥技术相关的中国专利申请态势

Fig.1　Trends of Chinese Patent Applications Related to Ultrasonic Drying

2.1　超声波发生系统

超声干燥设备的核心是超声波发生系统，从能量转化角度而言，其本质功能是将电能转化成声能与机械能。超声波发生系统主要由超声波发生器和超声换能器组成，前者是将交流电通过内置放大电路转化输出为与超声换能器相匹配的高频交流电信号以驱动其工作；后者主要采用夹心式压电换能器（基本结构如图2所示[23]）。换能器的辐射前盖是超声波发射面，与装载物料的干燥盘紧密连接时，干燥盘内的物料在干燥过程能处于超声波的声场中，提高干燥效率。



1 – 辐射前盖；2 – 正电极；3 – 紧固螺栓；4 – 后盖；5 – 压电陶瓷；6 – 负电极

图2　夹心式压电超声换能器示意图

Fig.2　A Schematic Diagram of Sandwich-type Piezoelectric Ultrasonic Transducer

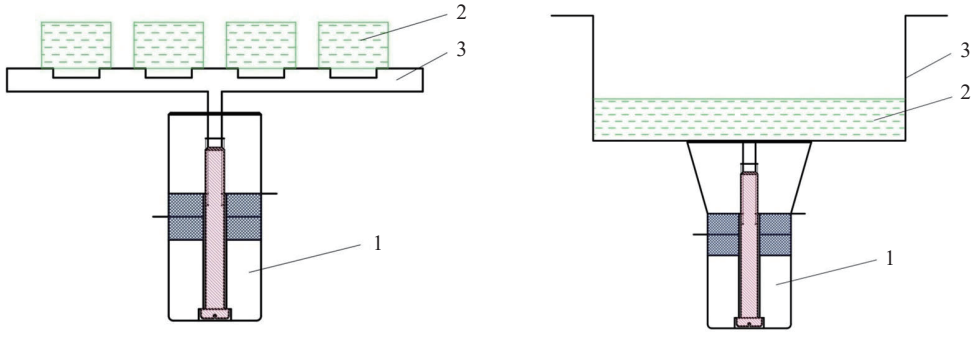
2.2　直接接触式超声干燥设备

超声需要通过介质传播，而不同介质的声阻抗是决定声能传播效率的关键参数。在0 ℃下，空气、水及钢的声阻抗分别约为400、1.48×10^6及4.6×10^7（Pa·s）/m，可见气体介质的声阻抗远低于致密介质[24]。直接接触式超声干燥设备载物装置如图3所示，将超声换能器的辐射前盖与定制化的变幅杆（图3a）或载物盘（图3b）紧密连接，使超声波发射面直接与待干燥物料接触，能使超声能量高效传递至物料。直接接触式超声干燥设备载物装置能与传统干燥设备组合使用，如直接接触式超声真空干燥[25—26]、直接接触式超声热风干燥[27]、直接接触式超声远红外干燥[28—29]。由于盛装待干燥物料的托盘是直接连接在超声换能器辐射面上的，因而产生的超声损耗较低、超声作用效率较高。

2.3　空气介导式超声干燥设备

超声波由超声换能器产生、经空气传播至待干燥物料以促进干燥的方式称为空气介导超声干燥。KHMELEV等报道了一种空气介导式超声干燥

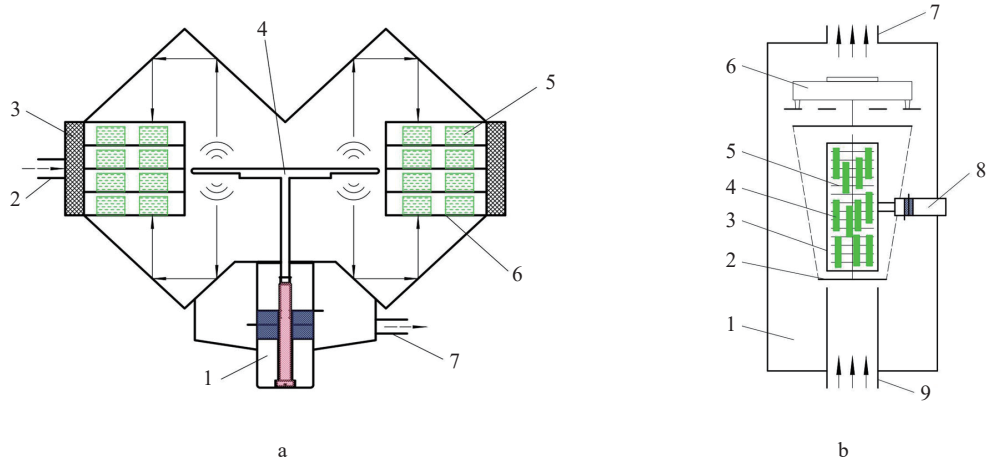
设备，如图 4a 所示，主要由超声换能器、进风口、过滤器、变幅杆、干燥盘构成，待干燥物料放置在环形干燥盘中，干燥室中央放置超声换能器，干燥室内腔声波反射面的设计能将超声波反射至物料区域[30—31]。相对于直接接触式超声干燥设备，空气介导式超声干燥设备由于无需与待干燥物料直接接触，超声发生装置能更方便地被安装在适当位置，并且不受物料形态和数量的限制，实现了超声强化干燥的批量生产。同时，变幅杆的形状发生变化，能够形成新的干燥设备。GARCIA-PEREZ 等报道了一种装有圆柱筒型超声变幅杆的超声热风干燥设备，如图 4b 所示[32]。待干燥物料被固定在支撑架上，置于空心桶内而不接触筒壁，且热风能从筒中央穿流，与物料充分接触进行干燥传热传质，电子天平则能实时监测物料的干燥失重。如前所述，空气的声阻抗远低于水及钢，因此进一步提升超声设备的效率、减少因致密介质与气体介质间声阻抗不匹配造成的能量损失是空气介导超声干燥设备研究的主



1－ 超声换能器；2－ 待干燥物料；3－ 变幅杆（a）或载物盘（b）

图 3 直接接触式超声干燥设备载物装置示意图

Fig.3 Schematic Diagrams of Carrying Devices of Direct-contact Ultrasonic Drying Equipment



a：环形干燥盘式（1－ 超声换能器；2－ 进风口；3－ 过滤器；4－ 变幅杆；5－ 待干燥物料；6－ 干燥盘；7－ 出风口），
b：圆柱筒式（1－ 干燥室；2－ 载物盘；3－ 圆柱筒型变幅杆；4－ 待干燥物料；5－ 物料支撑架；
6－ 电子天平；7－ 出风口；8－ 超声换能器；9－ 进风口）

图 4 空气介导式超声干燥设备示意图

Fig.4 Schematic Diagrams of Airborne Ultrasonic Drying Equipment

要趋势。

2.4 超声预处理联合干燥设备

对于直接接触式及空气介导式超声干燥设备而言，超声发生装置产生的超声波通过直接作用于干燥过程中的物料来提高干燥效率。诸多研究表明，干燥前将物料进行超声处理，能改变物料内部的物质结构，有效提高后续干燥效率[33—35]。超声预处理是指在干燥前将中药材等物料浸泡在水或其他调制的溶剂中进行超声浴的处理方法，一般直接使用超声波清洗设备对物料进行预处理，再选择合适的干燥设备进行干燥[36]。枸杞子表皮的蜡质层会阻碍干燥过程中的水分蒸发，在干燥前用促干剂浸泡处理有助于清除蜡质层，超声辅助则能在短时间内加快枸杞子表皮蜡质层的溶解，并减少后续干燥时间[37]。超声波在水等液体介质中的传播效率很高，因此液体介质中的中药材受到的超声波作用效果更显著。干燥前的超声预处理能一定程度增大中药材内部的细微孔道，继而促进干燥过程中水分的迁移效率，并能一定程度解决超声与其他干燥方式直接联用的技术难题。然而，由于超声预处理一般需要将物料浸入水或其他溶剂中，因此，权衡该工序对干燥效率的增益作用及物料中关键成分的溶出损失是十分必要的。

3 超声干燥应用于中药材及制剂的现状

3.1 中药材超声干燥

干燥是中药材产地加工过程的重要环节，干燥工艺直接影响产品的品相及疗效。中药材的传统干燥多采用阴干或晒干方式，依赖于气候条件，所需时间长、效率低，难以保障药材品质的稳定性。现代干燥技术通过升高干燥温度等措施来提升干燥速率，但易使中药材中含有的热敏性成分损失而造成内在品质下降。超声是一种强化干燥过程中传热传质效率的潜在有效方式，可实现中药材在较低温度条件下高效干燥[38]。LIU 等报道采用空气介导式超声干燥法在 50 ℃及超声功率 160 W 条件下干燥金银花，结果显示所需干燥时间相对于无超声干预时缩短 41.2%，说明对于花类中药材，超声能有效缩短干燥时间，但该研究未分析金银花中化学成分的变化[39]。万芳新等应用超声预处理结合远红外干燥技术干燥枸杞子，对干燥产物特性和品质的检测结果表明，超声预处理后干燥所得产品的色泽与鲜果差别最小，多糖含量最高达 991.27 mg/g，且表观形态良好、内部孔隙最多[40]。超声波的多种强化效应能有效增加中药材内部的微观孔隙结构，有利于干燥过程中水分由内向外扩散迁移，从而提升干燥效率，联合使用现代新型干燥技术，更能有效地保证药材品质。

3.2 中药提取物超声干燥

中药提取物是中药制剂生产过程中的重要中间体，在中药固体制剂制造过程中需要进行干燥，以适应后续制剂工艺环节。中药提取液成分复杂，常含有糖类、鞣质、黏液质等，这些物质经浓缩后在提取液中的相对浓度不断增大，最终形成黏稠浸膏。中药提取物的黏稠特性对其干燥造成巨大困难，例如采用喷雾干燥会造成喷枪堵塞、黏壁，采用真空干燥会造成黏盘等问题。超声波辅助干燥技术能有效克服中药提取物黏稠特性带来的技术困难。张耀雷等研究了采用超声波雾化器喷雾干燥壶瓶枣多糖的工艺，结果显示所得多糖颗粒粒度分布窄，在 2 ～ 20 μm 呈正态分布[41]。此外，超声波对黏稠物料在干燥过程中内部孔隙的形成和水分迁移有显著促进作用。于斌等利用响应面法优化了茯苓浸膏的超声强化干燥工艺，结果表明超声波对浸膏物料有降黏作用，干燥后的物料蓬松多孔[42]。JIANG 等采用直接接触式超声真空干燥器以不同的超声功率和频率干燥蜂蜜，再利用低场核磁共振及扫描电镜技术观察干燥过程的水分迁移及干燥产物中孔隙的形成情况，结果显示超声可有效去除结合水，增大超声功率时蜂蜜干燥物中的孔隙增大，有利于水分向表面迁移[43]。和大奎等对比研究了超声真空干燥和热风干燥法所得的地黄浸膏特性，从表观形态和扫描电镜结果可见，超声真空干燥法所得产物中形成了明显孔隙，从而提高了干燥效率，且干燥产物中梓醇及毛蕊花糖苷的含量高于热风干燥产物[44]。

3.3 中药制剂超声干燥

中药颗粒剂、丸剂、粉针剂等制剂制造过程通常也包含干燥操作，常用技术有烘箱干燥、真空干燥、沸腾干燥、微波真空干燥、离心振动干燥及冷冻

干燥等。目前，应用超声干燥中药制剂的研究报道较少，刘钧提出了一种新型制药用高效沸腾干燥机的专利技术方案，即在传统的药物颗粒沸腾干燥机中设置超声换能振荡板，能进一步提高干燥效率且有效防止干燥后的药物颗粒粘连在干燥机内壁[45]。超声波发生系统能较便捷地与干燥设备组合，从而实现超声干燥的增益效果，因此在中药丸剂、颗粒剂等制剂干燥中有望得到应用。

4 中药超声干燥技术及装备应用中存在的问题及对策

4.1 超声强化作用机制的基础研究较薄弱

中药干燥过程是复杂的传热传质过程，涉及热量传递、水分迁移、水分相变、成分转化等物理化学过程，将超声物理场引入干燥过程，增加了干燥热质传递机制研究的复杂性。因此，现有研究大多集中在利用超声波作用于干燥前或干燥中的物料，考察失水动力学及干燥前后物料关键物理化学性质变化方面。但关于超声波如何强化干燥过程及改变理化性质的内在机制的研究较少，如超声波在液体介质中常出现的空化效应是否会出现在以中药材半结合水为主的干燥过程以及超声波针对不同类型干燥物料的主要效应等问题尚未明确。

针对超声干燥技术的机制研究，数值模拟仿真技术具有一定的优势，利用 Fluent、Ansys、Comsol 等计算机数值仿真软件，基于声学、热传导、热对流、Fick 扩散相关理论建立模型并求解，能较直观地分析超声强化干燥的过程，有助于理解干燥中的传热传质过程。赵芳等建立了湿多孔介质经超声波预干燥过程的热湿耦合传递模型，探讨了超声强度对干燥过程物料温度场、含水率的动态变化过程[46]。同时，将超声干燥技术用于中药生产之前，要充分研究中药复杂成分在超声波能作用下是否会出现降解、转化等现象，以免成分发生变化，最终影响药物疗效。巩鹏飞对比研究了超声真空干燥、真空干燥及热风干燥对肉苁蓉、枸杞多糖中有效成分含量的影响，结果显示超声真空干燥工艺得到的肉苁蓉干燥品中的松果菊苷和毛蕊花糖苷含量最低，而同样方法得到的枸杞多糖干燥品中单糖含量最高，糖损失最少[47]。因此，超声对于中药成分的影响，要根据待干燥对象的种类、具体的超声干燥工艺方法进行深入研究，以达到在短时间、较低温度下完成干燥的目的。

4.2 超声干燥生产应用的技术难题有待突破

中药制药新技术与装备在生产中的应用是制药企业实现提质增效、绿色制造技术革新的关键。超声干燥技术的规模化应用进程除面临基础研究较薄弱的问题外，还存在技术和设备制造难题。超声波的传播受介质性质影响较大，而干燥过程中物料的物理形态时刻发生变化，如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；而接近干燥结束时，中药浸膏变成具有一定孔隙的固体，此时超声的传播效率较低，强化作用减弱。因此，研究超声干燥对高黏性膏状物料产生强化作用的动态变化规律，是使超声干燥能效最大化的基础。超声能量在传播过程的衰减还与传输距离有关，就现有的、成熟的功率超声换能器而言，传输距离有限，这对大规模应用是不利的。同时，目前使用的绝大多数换能器都是夹心式压电超声换能器，研究者只能在此基础上加以改造、组装成新的超声干燥设备，专门用于干燥设备的超声换能器相对缺乏。针对超声波传播特性和不同中药物料的特点，开发相应的超声换能器及干燥设备，是超声干燥法在中药领域应用的重要基础。

4.3 超声干燥设备的安全及节能属性有待明确

新型干燥技术在未来中药制造工业中的应用必须满足安全生产要求及绿色节能发展方向。超声波频率虽然超出了人类听觉范围，但超声装置在工作时会产生噪声（主要是装置本身振动及空化效应产生的），如果不采取安全措施，会使长期暴露于该环境的操作人员的听力受损。在应用较成熟而广泛的超声清洗设备中，通常可通过改进设备隔音性能来减少噪声；而空化效应产生的噪声与超声频率和声强大小有关，不能完全消除。超声通常能缩短总干燥时间，从而减少热能供应，实现能源节约，但产生超声波本身也是耗能的。GHANBARIAN 等研究了不同温度及超声功率条件对薄荷叶的干燥效果，干燥时间随温度和功率的升高而减少，但仅在 60 ℃、270 W 条件下能源效率可达到最大值[48]。

因此，干燥总能耗是否能降低，特别是对于未来工业化生产设备而言，仍需从工艺优化和设备改进等角度进行充分验证。

5 结语

干燥是中药制药过程中的关键单元操作之一，干燥方法及工艺参数的选择会直接影响中药制剂的品质及临床疗效。干燥在中药制药过程中属于能源消耗密集型工艺单元，通常存在周期长、产品品质不易控制等问题。新型干燥技术的突破是制药企业实现节能减排、绿色制造技术革新的重要举措，关系着中药现代化进程。近年来，随着《中国制造2025》等国家战略的深入实施及《促进中医药传承与创新发展的意见》等新政的出台，科研人员萌生了在中药制药新技术及装备方面创新的新动力，着力针对提取、分离、浓缩、干燥、灭菌等中药制药特色工艺单元进行技术突破。超声强化对干燥过程的传热传质效率及干燥产物的品质保障具有显著优势，在中药材及提取物的干燥方面已有相关研究，并逐步受到更多的关注和重视，是实现中药干燥生产提质增效和规模化应用的潜在技术之一。总之，在鼓励中药生产现代化创新发展的相关政策指引下，开展中药超声干燥机制的基础研究，设计开发超声干燥设备及关键部件，将有利于未来超声干燥技术在中药制造产业升级中实现价值。

参考文献：

[1] FAN K, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: a review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, **39**: 47-57.

[2] 王学成, 伍振峰, 李远辉, 等. 低温干燥技术在中药领域的应用现状与展望[J]. 中国医药工业杂志, 2019, **50**(1): 42-47.

[3] 龚行楚, 瞿海斌. 微波干燥在中药制药中的应用进展[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2011, **13**(2): 374-378.

[4] 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.

[5] 王 航, 刘 寅, 高 龙, 等. 高压电场对香蕉片热风干燥特性影响及数学模型[J]. 食品科技, 2020, **45**(7): 69-75.

[6] 罗登林, 徐宝成, 朱文学, 等. 功率超声在热风干燥领域中的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2013, **28**(3): 123-128.

[7] 董翠英, 陈 娟. 超声提取植物药有效成分的研究进展[J]. 中成药, 2017, **39**(7): 1473-1477.

[8] 宫春爱, 夏清明, 胡楚玲, 等. 还原性多肽共载基因和化学治疗药载体的构建与体外评价[J]. 第二军医大学学报, 2018, **39**(2): 144-151.

[9] 龚俊波, 王 琦, 董伟兵, 等. 药物晶型转化与控制的研究进展[J]. 化工学报, 2013, **64**(2): 385-392.

[10] 褚朝森, 王晓丽, 胡玉涛, 等. 超声波相转移催化合成苜蓿素[J]. 中国医药工业杂志, 2019, **50**(4): 403-405.

[11] BOUCHER R M G. Drying by airborne ultrasonics [J]. *Ultrason News*, 1959, **111**: 8-16

[12] GALLEGO-JUÁREZ J A, RIERA E, DE LA FUENTE BLANCO S, *et al*. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices [J]. *Dry Technol*, 2007, **25**(11): 1893-1901.

[13] 罗登林, 苏孟开, 杨日福, 等. 超声在食品干燥领域中的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2020, **35**(5): 188-196.

[14] LEGAY M, GONDREXON N, PERSON S L, *et al*. Enhancement of heat transfer by ultrasound: review and recent advances [J]. *Int J Chem Eng*, 2011, **2011**: 1-17.

[15] 陈文敏, 彭星星, 马 婷, 等. 超声处理对中短波红外干燥红枣时间及品质的影响[J]. 食品科学, 2015, **36**(8): 74-80.

[16] 白喜婷, 侯亚玲, 朱文学, 等. 全蛋液双频超声真空干燥与水分迁移规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, **51**(1): 322-330.

[17] 白喜婷, 侯亚玲, 朱文学, 等. 全蛋液双频超声真空干燥的干燥特性及数学模型分析[J]. 食品科学, 2020, **41**(11): 157-164.

[18] ZHANG Y W, ABATZOGLOU N. Review: fundamentals, applications and potentials of ultrasound-assisted drying [J]. *Chem Eng Res Des*, 2020, **514**: 21-46.

[19] MUSIELAK G, MIERZWA D, KROEHNKE J. Food drying enhancement by ultrasound – a review [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2016, **56**: 126-141.

[20] LI Y H, WANG X C, WU Z F, *et al*. Dehydration of hawthorn fruit juices using ultrasound-assisted vacuum drying [J]. *Ultrason Sonochem*, 2020, **68**: 1-7.

[21] 韦迎春, 闫 明, 孙永城, 等. Box-Behnken法优化调压颗粒醇提浸膏真空带式干燥工艺[J]. 中国医药工业杂志, 2017, **48**(2): 187-190.

[22] 赵 芳, 程道来, 陈振乾. 超声波处理对污泥热风干燥过程的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(4): 272-276.

[23] 黄志超, 涂林鹏, 刘举平, 等. 超声波清洗技术及设备研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2020, **37**(3): 1-9.

[24] 杨志远. 水下超声无线携能通信系统的设计和搭建[J]. 南京: 南京邮电大学硕士学位论文, 2020.

[25] BAŞLAR M, KILIÇLI M, YALINKILIÇ B. Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique [J]. *Ultrason Sonochem*, 2015, **27**: 495-502.

[26] CHEN Y, LI M, DHARMASIRI T S K, *et al*. Novel ultrasonic-assisted vacuum drying technique for dehydrating garlic slices and predicting the quality properties by low field nuclear magnetic resonance [J]. *Food Chem*, 2020, **306**: 125625.

[27] LIU Y H, SUN Y, YU H C, *et al*. Hot air drying of purple-fleshed sweet potato with contact ultrasound assistance [J]. *Dry Technol*, 2017, **35**(5): 564-576.

[28] XI H, LIU Y, GUO L, *et al*. Effect of ultrasonic power on drying process and quality properties of far-infrared radiation drying on potato slices [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2019, **29**(1): 93-101.

[29] GUO Y T, WU B G, GUO X Y, *et al*. Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: Moisture migration and quality characterizations [J]. *LWT*, 2020, **126**: 109312.

[30] KHMELEV V N, CHOO K M, SHALUNOV A V, *et al*. The compact ultrasonic dryer for capillary-porous and loose materials [C]// Novosibirsk: 2008 9th International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials, 2008.

[31] KHMELEV V N, SHALUNOV A V, BARSUKOV R V, *et al*. Studies of ultrasonic dehydration efficiency [J]. *J Zhejiang Univ-Sci A* (*Appl Phys & Eng*), 2011, **12**(4): 247-254.

[32] GARCIA-PEREZ J V, ORTUÑO C, PUIG A, *et al*. Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying [J]. *Food Bioprocess Tech*, 2012, **5**: 2256-2265.

[33] WANG H, ZHAO Q S, WANG X D, *et al*. Pretreatment of ultrasound combined vacuum enhances the convective drying efficiency and physicochemical properties of okra (*Abelmoschus esculentus*) [J]. *LWT*, 2019, **112**: 108201.

[34] LA FUENTE C I A, ZABALAGA R F, TADINI C C. Combined effects of ultrasound and pulsed-vacuum on air-drying to obtain unripe banana flour [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2017, **44**: 123-130.

[35] PIRCE F, VIEIRA T M F S, AUGUSTO-OBARA T R, *et al*. Effects of convective drying assisted by ultrasound and osmotic solution on polyphenol, antioxidant and microstructure of murtilla (*Ugni molinae* Turcz) fruit [J]. *J Food Sci Technol*, 2021, **58**(1): 138-146.

[36] 张莉会, 汪 超, 廖 李, 等. 超高压和超声对果蔬色泽和组织结构的影响及其在干燥中的应用[J]. 保鲜与加工, 2020, **20**(6): 212-219.

[37] 蒋 兰, 杨 毅. 超声对枸杞表皮蜡质的影响[J]. 食品工业, 2018, **39**(12): 201-203.

[38] 田伏锦, 刘云宏, 黄隽妍, 等. 马铃薯超声强化冷风干燥及品质特性[J]. 食品科学, 2019, **40**(5): 85-94.

[39] LIU Y H, SUN Y, MIAO S, *et al*. Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of *Flos Lonicerae* [J]. *J Food Sci Technol*, 2015, **52**(8): 4955-4964.

[40] 万芳新, 李武强, 罗 燕, 等. 超声预处理对枸杞远红外真空干燥特性及品质的影响[J]. 中草药, 2020, **51**(18): 4654-4663.

[41] 张耀雷, 黄立新, 张彩虹, 等. 超声波喷雾干燥壶瓶枣多糖及其对产品品质的影响[J]. 林产化学与工业, 2016, **36**(2): 64-70.

[42] 于 斌, 朱文学, 白喜婷, 等. 茯苓浸膏超声强化干燥工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2018, **39**(19): 74-79.

[43] JIANG M M, BAI X T, SUN J, *et al*. Implication of ultrasonic power and frequency for the ultrasonic vacuum drying of honey [J]. *Dry Technol*, 2021, **39**(10): 1389-1400.

[44] 和大奎, 朱文学, 于 斌, 等. 地黄浸膏超声真空干燥特性和动力学研究[J]. 江苏农业科学, 2017, **45**(13): 157-164.

[45] 刘 钧. 一种新型制药用高效沸腾干燥机: 中国, 212057949U [P]. 2020-12-01.

[46] 赵 芳, 陈振乾, 施明恒. 苹果片超声波预干燥传质过程试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, **41**(1): 124-128.

[47] 巩鹏飞. 超声真空干燥及应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所)硕士学位论文, 2017: 43.

[48] GHANBARIAN D, TORKI-HARCHEGANI M, SADEGHI M, *et al*. Ultrasonically improved convective drying of peppermint leaves: influence on the process time and energetic indices[J]. *Renew Ener*, 2020, **153**: 67-73.