·药剂与工艺·

甘草浸膏超声辅助真空干燥传热传质模拟与试验

王学成[1]，王晓辉[1]，伍志成[1]，张浩铭[1]，王雅琪[1]，李远辉[1]，郑　琴[1]，易　兵[2]，刘振峰[3]，伍振峰[1*]，杨　明[1*]

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. 江西赫柏康华制药设备有限公司，江西 南昌　330096
3. 宜春万申制药机械有限公司，江西 宜春　336000

摘　要：目的　以甘草浸膏为研究对象，探索浸膏超声辅助真空干燥强化传热传质机制，为新技术在中药浸膏干燥中的应用提供理论依据。**方法**　基于过程模拟软件建立“超声场-温度场-压力场”多场耦合的甘草浸膏超声辅助真空干燥传热传质模型并求解；进行了干燥温度 70、80、90 ℃，超声功率 40、80、120、160、200 W 的干燥试验，以特征点温度及干燥水分试验结果与模型计算理论值进行比较。**结果**　甘草浸膏干燥过程水分有效扩散系数（D_{eff}）和传质系数（k_c）随温度和超声功率的升高而增大，超声功率由 40 W 提高至 200 W，D_{eff} 及 k_c 分别提高 200.65%、154.46%；结果验证了建立的浸膏超声辅助真空干燥模型精度良好，在一定条件下能反映真实干燥过程。**结论**　通过建立精度良好的甘草浸膏超声辅助真空干燥过程仿真模型，直观得到了浸膏内部超声场强分布及热质传递规律，为该技术用于中药浸膏高效干燥工艺开发和装备设计提供参考。

关键词：甘草浸膏；超声辅助真空干燥；过程模拟；传热传质；干燥效率；COMSOL Multiphysics

中图分类号：R283.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2023)07 - 2056 - 10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.07.005

Simulation and experiment of heat and mass transfer in ultrasound-assisted vacuum drying of licorice extract

WANG Xue-cheng[1], WANG Xiao-hui[1], WU Zhi-cheng[1], ZHANG Hao-ming[1], WANG Ya-qi[1], LI Yuan-hui[1], ZHENG Qin[1], YI Bing[2], LIU Zhen-feng[3], WU Zhen-feng[1], YANG Ming[1]

1. Key Laboratory of Modern Preparation of Traditional Chinese Medicine, Ministry of Education, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China
2. Jiangxi Hebai Kanghua Pharmaceutical Equipment Co., Ltd., Nanchang 330096, China
3. Yichun Wanshen Pharmaceutical Machinery Co., Ltd., Yichun 336000, China

Abstract: Objective　To explore the mechanism of heat and mass transfer enhanced by ultrasound-assisted vacuum drying of licorice extract, so as to provide a theoretical basis for the application of new technology in the drying of Chinese herbal extract. **Methods**　A multi-field coupled “ultrasonic field-temperature field-pressure field” heat and mass transfer model of licorice ultrasound-assisted vacuum drying was established and solved. The drying temperature of 70, 80, 90 ℃, ultrasonic power of 40, 80, 120, 160, 200 W drying test of licorice extract was studied. The experimental results of characteristic point temperature and dry moisture were compared with the theoretical values calculated by the model. **Results**　The effective diffusivity of water (D_{eff}) and mass transfer coefficient (k_c) increased with the increase of temperature and ultrasonic power. When the ultrasonic power increased

收稿日期：2022-10-28

基金项目：国家自然科学基金资助项目（82003952）；国家自然科学基金资助项目（81960718）；江西中医药大学中药制剂技术与制药装备创新团队（CXTD22006）；中央引导地方科技发展资金项目（2022ZDD03085）

作者简介：王学成，男，博士，副教授，研究方向为中药制剂工艺与装备。Tel: 15970499523　E-mail: wangxcdd@126.com

***通信作者：**杨　明，男，教授，博士生导师，研究方向为中药新剂型与新技术。Tel/Fax: (0791)87118658　E-mail: lab215@163.com

伍振峰，男，教授，博士生导师，研究方向为中药新剂型与新技术/中药制药装备研究。

Tel/Fax: (0791)87118658　E-mail: zfwu527@163.com

from 40 W to 200 W, D_{eff} and k_c increased by 200.65% and 154.46%, respectively. The experimental results verified that the established model of ultrasound-assisted vacuum drying of licorice extract had good accuracy and reflected the real drying process under certain conditions. **Conclusion** The ultrasonic field intensity and heat and mass transfer law in the extract were obtained intuitively by establishing the simulation model of ultrasound-assisted vacuum drying process of licorice extract with good accuracy. The results provide reference for the application of this technology in the development of efficient drying process and equipment design of traditional Chinese herbal extract.

Key words: licorice extract; ultrasound-assisted vacuum drying; process simulation; heat and mass transfer; drying efficiency; COMSOL Multiphysics

浸膏干燥是中药制剂制造过程关键工艺环节，干燥时间长、能耗高是其显著特点，探索绿色新型干燥技术在浸膏干燥过程中应用适宜性是亟待解决的现实问题。超声辅助干燥技术是一种新型绿色节能技术，能有效改善干燥品质同时提高干燥效率[1-4]。超声波在液体中传播产生热效应、空化效应、机械效应，从而强化传热传质过程[5-6]。在浸膏超声辅助干燥过程中，干燥效率的提升可能与上述某种或多种效应同时发生相关。热效应是由超声引起浸膏内部或与介质之间的振动和机械摩擦产生热量，产生的热量大小及其在浸膏中的分布是影响干燥效率的关键。超声辅助干燥过程浸膏内部声压分布是评价超声波作用机制的关键参数，与浸膏密度等物性参数、超声波功率、频率及干燥装置几何尺寸相关[7-9]。Liu 等[10]研究了不同功率条件下金银花空气介导式超声干燥过程，干燥温度 50 ℃及超声功率 160 W 条件下，干燥时间相对无超声作用时缩短 41.2%，说明对于花类中药材，超声能够有效缩短干燥时间，但该研究尚未对金银花成分变化进行分析。万芳新等[11]应用超声预处理结合远红外干燥技术研究了枸杞子干燥特性和品质，结果表明，超声渗透后进行干燥所得干燥品色泽与鲜果差别最小，多糖质量分数达最大 991.27 mg/g，且干燥品表观形态最高，内部微观空隙最多。于斌等[12]利用响应面方法对茯苓浸膏超声强化干燥进行了工艺优化，结果表明，超声波对浸膏物料有降黏作用，干燥后物料蓬松多孔。然而，目前对于超声辅助干燥过程物料内部超声声压分布、温度分布、干燥水分分布难以通过试验手段直观地进行研究和分析，因此对于超声辅助干燥过程的强化机理尚不明确，是超声辅助干燥技术尚未得到有效应用的原因之一。本实验以甘草浸膏热物理性质为基础，将超声辅助真空干燥设备按 1∶1 比例模型化，基于 COMSOL Multiphysics 5.5 多物理场过程模拟仿真平台，对中药浸膏超声辅助真空干燥过程进行模拟分析，探索中药浸膏超声辅助真空干燥的强化机制，建立干燥传热传质模型，为超声辅助真空干燥技术在其他中药浸膏品种的工艺开发及相应装备创制提供新路径，为该技术推广应用提供理论依据。

1 仪器与材料

ThinkStation P500 型工作站，联想集团；TN-20 型中药提取浓缩一体机，南京至成制药设备有限公司；EL303 型电子天平，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；超声辅助真空干燥设备（自制），配备 THD-600 型超声发生器 1 台、超声换能头（50 W，40 kHz）4 个，实现超声功率 0～200 W 可调、温度在实验时的室温＋5 ℃至 250 ℃可调；THM-4 型温度记录仪，余姚市腾辉温控仪表厂；Omega TJ36-CASS-040U-6 型探针式温度传感器。

甘草饮片（批号 2003002），江西樟树天齐堂中药饮片有限公司，由江西中医药大学现代中药制剂教育部重点实验室杨明教授鉴定，为豆科甘草属植物甘草 *Glycyrrhiza uralensis* Fisch.的干燥根和根茎。

2 方法

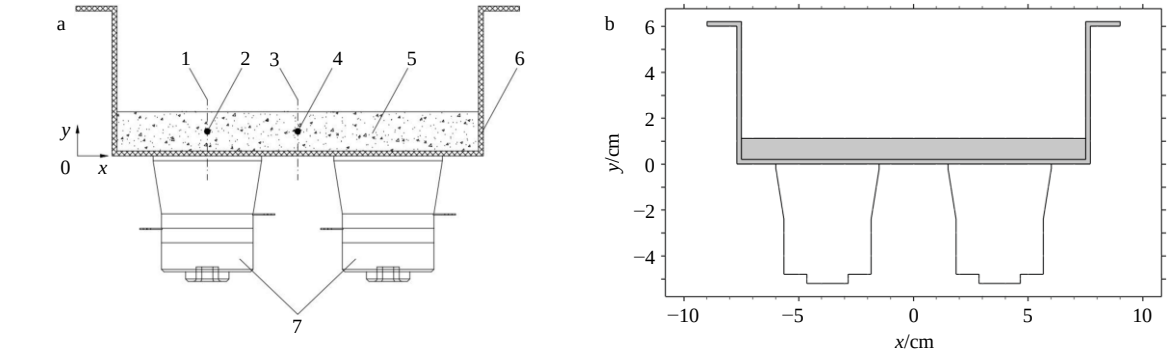
2.1 甘草浸膏干燥模型的建立

2.1.1 模型分析 COMSOL Multiphysics 是以有限元法为基础，通过求解偏微分方程（单场）或偏微分方程组（多场）来实现真实物理现象的仿真[13]。在盛装浸膏的干燥盘侧面边界和底部边界上，使用热通量边界条件来描述来自于外部加热的热量。同时，在安装超声换能器的位置添加热通量边界来描述来自超声热效应产生的热量。通过水分蒸发的量与相变潜热间的数学关系描述热量传递与质量传递之间的关系。该模型基于特定几何形状的中药浸膏中质量和能量的微分平衡，将中药浸膏视为具有恒定孔隙度但在空间和时间上变化的含水率（孔隙饱和度）和温度的静止多孔固体。为了使模型在数值计算时能有效收敛得到数值解，建模过程做如下假设[14]：浸膏干燥过程形成了固定形态的孔隙骨架结构；水分扩散系数与水分含量之间为线性关系；传

热通过导热以及超声热能，热量散失仅通过水分蒸发；浸膏局部属性（孔隙度、传输特性）在空间上是均匀的，且与尺度无关；忽略水分在固体骨架上的吸附与解吸，以及其他任何特定的液-固相互作用；所有材料的物理性质在干燥过程中是恒定的，在空间上是均匀的。

2.1.2　几何模型　超声换能头与物料盘耦合装置是中药浸膏超声辅助真空干燥工艺的关键部件，如图 1 所示。为简化计算过程，选取经过 2 个超声换能器头中心轴线的二维平面区域作为仿真研究对象。

2.1.3　网格划分　超声辅助真空干燥计算域网格划分如图 2 所示，超声场模拟区域包括了不锈钢物料盘及浸膏所在的区域，如图 2-a 所示，由于干燥盘区域不参与水分的迁移扩散，因此，在干燥传热传质模拟时，只考虑浸膏区域的网格划分，如图 2-b 所示。

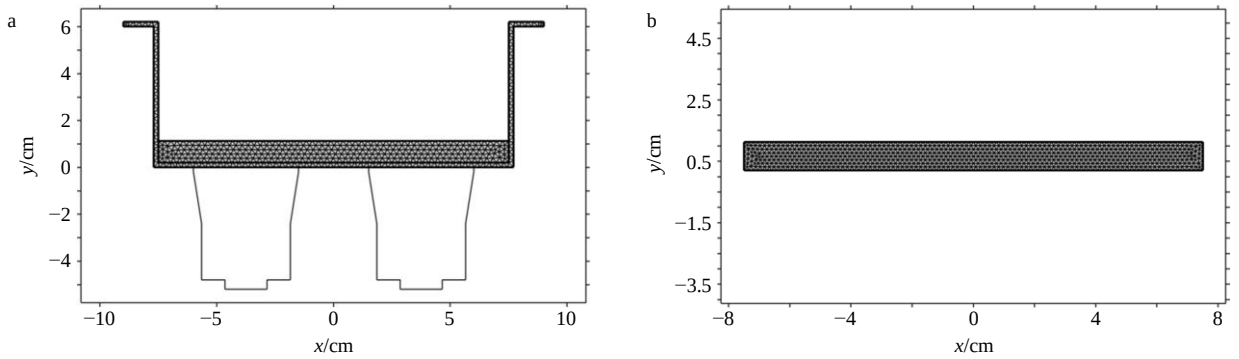


a-结构图：1-轴线 1（超声换能头中心轴）　2-测温点 1（轴线 1 上浸膏中心点）　3-轴线 2（干燥盘中心轴）　4-测温点 2（轴线 2 上浸膏中心点）　5-甘草浸膏　6-不锈钢料盘　7-超声换能头；b-模型简化图

a-structure diagram: 1-axis 1 (central axis of the ultrasonic generator)　2-temperature measurement point 1 (center point of extracts thickness on axis 1)　3-axis 2 (center axis of the drying tray)　4-temperature measurement point 2 (center point of extracts thickness on axis 2)　5-licorice extract　6-stainless steel tray　7-ultrasonic generator; b-simplified diagram of the model

图 1　超声辅助真空干燥关键部件几何模型

Fig. 1　Geometric model of key components in ultrasound-assisted vacuum drying



a-超声场模拟网格　b-干燥传热传质模拟网格

a-simulation grid of ultrasonic field　b-simulation grid of heat and mass transfer for drying

图 2　超声辅助真空干燥计算域网格划分

Fig. 2　Meshing of calculation area for ultrasound-assisted vacuum drying

2.1.4　超声辅助真空干燥“声-热-质”传递方程

（1）超声传播方程：中药浸膏是典型的黏性流体，超声波在黏性流体中传播的波动方程[15]见公式（1）。在声场中，某坐标点的声压与该坐标对应质点的速度比值为该坐标点的声阻抗率，按公式（2）计算[16]。

$$(\partial/\partial t+\sum_i v_{0i}\partial/\partial x_i)^2 p=c^2[1+\mu(\partial/\partial t+\sum_i v_{0i}\partial/\partial x_i)/\rho_0 c^2]\nabla^2 p \quad (1)$$

$i=x$，y，z；v_{0i} 为流体的流速（m/s）；c 为声音在流体中的传播速度（m/s）；p 为压强（Pa）；ρ_0 为流体的密度（kg/m^3）；μ 为流体黏度（Pa·s）

$$Z=p/v=\rho_0 c \quad (2)$$

Z 为声阻抗率［N/(s·m^3)］，v 为质点流速（m/s）

声能密度是指单位体积里的声能量，按公式（3）计算。

$$\varepsilon=p_a^2/2\rho_0 c^2 \quad (3)$$

ε为声能密度（J/m^3），p_a为声压幅值（Pa）

单位时间内通过垂直于声传播方向截面的平均声能量就称为平均声能量流，也称为平均声功率。由于声能量是以声速 c 传播的，因此，平均声能量流应等于声场中面积为 S、高度为 h 的圆柱体内包括的平均声能量总和，即：

$$\overline{W} = \overline{\varepsilon}\, hS \tag{4}$$

$\overline{W}$为平均声功率（J/s），$\overline{\varepsilon}$为平均声能密度（J/m^3），S为截面面积（m^2）

由式（3）和式（4）可得到质点声压幅值与声功率之间的关系，即：

$$p_a = (2\overline{W}\rho_0 c/S)^{1/2} \tag{5}$$

由于常见声音声功率的范围很广泛（1×10^{-5}～1×10^{9} W），且从声音接收的角度而言，主观上对声音的强度值与强度之间并不是成正比的关系，而更接近于与强度的对数成正比，将其定义为声压级（sound pressure level，SPL），用公式（6）计算[16]。

$$\mathrm{SPL} = 20\lg(p_a/p_{ref}) \tag{6}$$

SPL 为声压级（dB）；p_{ref}为参考声压（Pa），一般取 2×10^5 Pa

（2）传热方程：中药浸膏超声辅助真空干燥过程水分蒸发需要消耗热量，能源主要来源于 2 方面：一是真空干燥箱设定温度加热能量；二是超声热效应产生的热量。真空干燥箱主要通过热传导方式传递至浸膏干燥盘，再传递至浸膏。热传导为主导的热量与温升控制方程为

$$\rho_e c_{p,e}\partial T/\partial t = \nabla\cdot(\lambda_e\nabla T) + Q_s + Q_e \tag{7}$$

ρ_e是浸膏密度（kg/m^3）；$c_{p,e}$是浸膏热容［J/(kg·K)］；λ_e是浸膏导热系数［W/(m·K)］；Q_s是超声波热效应产生热量（W）；Q_e是热源（W）

$$Q_e = -\dot{m}\Delta H \tag{8}$$

ΔH为水分蒸发潜热，$\dot{m}$为水分蒸发速率［kg/(m^3·s)］

浸膏真空干燥结束时形成多孔蓬松状态，可将湿浸膏看作由固形物、水分、孔隙中的空气 3 相成分构成的混合物。浸膏在干燥过程水分及孔隙所占比例发生动态变化，因此，浸膏在干燥过程热物理属性与 3 种相态成分比例相关，在本研究中，浸膏实时密度 ρ_e 和实时热容 $c_{p,e}$ 通过以下公式表征。

$$\rho_e = \varphi_l\rho_l + \varphi_s\rho_s + \varphi_g\rho_g \tag{9}$$

$$c_{p,e} = \varphi_l\rho_l c_{p,l} + \varphi_s\rho_s c_{p,s} + \varphi_g\rho_g c_{p,g} \tag{10}$$

φ_l、φ_s和 φ_g分别表示浸膏中水分、干浸膏和空气的体积分数；ρ_l、ρ_s 和 ρ_g 分别表示浸膏中水分、干浸膏和空气的密度（kg/m^3）；$c_{p,l}$、$c_{p,s}$和 $c_{p,g}$分别表示浸膏中水分、干浸膏和空气的热容［J/(kg·K)］

浸膏导热系数根据以下公式计算。

$$\lambda_e = \lambda_d + (\lambda_w - \lambda_d)/(1-\varphi_s) \tag{11}$$

λ_d 和 λ_w 分别是干燥后浸膏和完全饱和浸膏的导热系数［W/(m·K)］

（3）传质方程：浸膏干燥过程蒸发速率与浸膏水分体积分数的质量传递方程如式（12）所示。

$$\partial\varphi_l/\partial t = \nabla\cdot(D_l\nabla\varphi_l) - \dot{m}/\rho_l \tag{12}$$

D_l是表面扩散系数（m^2/s）

水分蒸发速率（$\dot{m}$）与浸膏中气体的平衡蒸汽压（p^*）和顶部空间蒸汽压（p_g）的压差有关，针对模拟干燥过程水分含量数值计算过程，当浸膏中水分存在，即 $\varphi_l>0$ 时：

$$\dot{m} = K_c\rho_l(p^* - p_g)/p_g \tag{13}$$

K_c是蒸发速率常数（m/s）

当浸膏干燥结束即水分体积分数 $\varphi_l\leqslant0$，或干燥条件下水分蒸发平衡蒸汽压小于干燥设定真空环境压力，即 $p^*\leqslant p_g$时：

$$\dot{m} = 0 \tag{14}$$

水分相变过程平衡蒸汽压（p^*）与温度 T 之间的关系可以用安托万方程（Antoine equation）得到：

$$\ln p^* = \mathrm{A} - \mathrm{B}/(\mathrm{C}+T) \tag{15}$$

常数 A、B、C 分别取值 16.373 79、3 876.659、−43.42[17]

水分在浸膏中的迁移可视为毛细孔道流动，通过扩散理论对浸膏水分干燥进行描述。因此，当水分的体积分数存在梯度时，水分就从体积分数较高的区域迁移到水分体积分数较低的区域，计算公式如下。

$$D_l = D_{eff}(\varphi_l - \varphi_l^*) \tag{16}$$

φ_l^*是干燥结束时浸膏平衡含水体积分数，D_{eff}为水分有效扩散系数（m^2/s）

浸膏干燥时，水分会不断蒸发并由固体浸膏间的气体所替代。φ_l、φ_s、φ_g 3 者满足如下关系。

$$\varphi_l + \varphi_s + \varphi_g = 1 \tag{17}$$

2.2 干燥模拟过程参数

超声波在浸膏中的传播特性及干燥传热传质过程与浸膏的物性参数相关，本实验以甘草浸膏为研究对象，表 1 列出了数值计算过程所涉及的物理参数。浸膏超声辅助真空干燥模拟水分 D_{eff} 和传质系数（k_c）是重要的模型参数。因此，通过不同条件下干燥试验获取对应的水分扩散系数 D_{eff} 和 k_c。

2.3 甘草浸膏制备及干燥方法

2.3.1 甘草浸膏的制备 取甘草饮片适量，加 8 倍量水煎煮 3 次，每次 2 h，合并煎液，放置过夜使沉

表 1　甘草浸膏超声辅助真空干燥模型主要参数

Table 1　Main parameters of ultrasound-assisted vacuum drying model of licorice extract

参数名称	表达式/值	单位	来源	参数名称	表达式/值	单位	来源
超声波频率（f_0）	40	kHz	设备参数	水热容（$c_{p,l}$）	4.2	$kJ·kg^{-1}·K^{-1}$	文献[22]
水中声速（c_0）	1483	$m·s^{-1}$	文献[16]	甘草浸膏热容（$c_{p,s}$）	1980	$kJ·kg^{-1}·K^{-1}$	文献[23]
波长（λ_0）	c_0/f_0	mm	文献[16]	水汽化潜热（ΔH）	42 504.02/M_n	$J·g^{-1}$	文献[22]
甘草浸膏黏度（μ）	2.522	Pa·s	试验测定	不锈钢壁传热系数（h_q）	17	$W·m^{-2}·K^{-1}$	文献[15]
甘草浸膏密度（ρ_e）	1213	$kg·m^{-3}$	试验测定	干浸膏导热系数（λ_d）	0.158	$W·m^{-1}·K^{-1}$	文献[24]
水密度（ρ_w）	1000	$kg·m^{-3}$	文献[18]	湿浸膏导热系数（λ_w）	0.420 2	$W·m^{-1}·K^{-1}$	文献[24]
甘草浸膏中声速（c_1）	1704	$m·s^{-1}$	文献[19]	水的摩尔质量（M_n）	18	$g·mol^{-1}$	文献[22]
不锈钢密度（ρ_d）	7930	$kg·m^{-3}$	文献[18]	空气密度（ρ_g）	1	$kg·m^{-3}$	文献[22]
不锈钢中声速（c_2）	5200	$m·s^{-1}$	文献[16]	水密度（ρ_l）	1000	$kg·m^{-3}$	文献[22]
干燥盘吸声系数（α_{tr}）	0.011	m^{-1}	文献[20]	平衡体积分数（φ_l^*）	0.05	−	试验测定
甘草浸膏吸声系数（α_e）	0.325	m^{-1}	文献[21]	干浸膏体积分数（φ_s）	0.313 3	−	试验测定
空气热容（$c_{p,g}$）	1	$kJ·kg^{-1}·K^{-1}$	文献[22]	浸膏初始湿度（w_{l0}）	0.537 4	−	试验测定

淀，取上清液浓缩至相对密度为 1.2～1.3（测定温度为 25 ℃）的稠膏状浓缩液[25]。

2.3.2　甘草浸膏干燥过程参数测定　取约 100 g 稠膏装入干燥盘中，称定质量，分别进行干燥温度 70、80、90 ℃，超声功率 40、80、120、160、200 W，真空度−0.09 MPa，超声作用时间 12～8 min（代表 20 min 干燥周期中持续作用时间 12 min，无超声时间 8 min）进行干燥试验。干燥过程前 300 min 每 20 分钟取出物料称定质量，后每 60 分钟取出物料称定质量，记录数据，快速放入干燥箱中，续计干燥时间。重复上述过程，直至物料达到恒定质量。分别以各考察因素水平中间值（80 ℃、120 W）作为控制变量进行不同条件干燥试验，每组完整过程重复操作 3 次。

将 2 支探针型温度传感器分别置于超声换能头中心轴（轴 1）及干燥盘中心轴（轴 2）上浸膏中心位置，对应测温点 1 和测温点 2（图 1-a），分别在超声功率 40、80、120、160、200 W 超声条件下 60 min，通过温度记录仪记录 2 点温度变化。

2.3.3　水分比（moisture rate，MR）、D_{eff} 及 k_c 计算方法　MR 及 D_{eff} 的计算方法在干燥动力学研究中较为常见，具体方法见参考文献报道[26]。

k_c 是基于 Dincer 函数干燥动力学方程进行推导和计算，具体方法见参考文献报道[27-28]。

3　结果与分析

3.1　水分 D_{eff} 及 k_c

如表 2 所示，干燥温度 70～90 ℃时，甘草浸膏超声辅助真空干燥 D_{eff} 及 k_c 分别为 7.04×10^{-9}～1.90×10^{-8} m^2/s、3.03×10^{-5}～7.09×10^{-5} m/s，随温度的上升而增大，提高温度为水分蒸发扩散提供了更多的能量，加速干燥进行。甘草超声辅助真空干燥 D_{eff} 及 k_c 随着超声功率提高而增大，超声功率由 40 W 提高至 200 W，D_{eff} 及 k_c 分别提高 200.65%、154.46%。可能是由于随着超声功率增加，超声波产生的力学效应和空化效应变得更强，有利于增加水在材料中的湍流度和流动性，削弱水与组织之间的吸附力[29]，从而提高了传热传质速率。

表 2　不同干燥条件甘草浸膏水分 D_{eff} 及 k_c

Table 2　D_{eff} and k_c of licorice extract under different drying conditions

干燥条件	$D_{eff}/(m^2·s^{-1})$	$k_c/(m·s^{-1})$
70 ℃，80 W，−0.09 MPa，12～8 min	7.04×10^{-9}	3.03×10^{-5}
80 ℃，80 W，−0.09 MPa，12～8 min	1.06×10^{-8}	4.71×10^{-5}
90 ℃，80 W，−0.09 MPa，12～8 min	1.90×10^{-8}	7.09×10^{-5}
40 W，80 ℃，−0.09 MPa，12～8 min	6.12×10^{-9}	3.03×10^{-5}
80 W，80 ℃，−0.09 MPa，12～8 min	8.99×10^{-9}	4.25×10^{-5}
160 W，80 ℃，−0.09 MPa，12～8 min	1.53×10^{-8}	7.65×10^{-5}
200 W，80 ℃，−0.09 MPa，12～8 min	1.84×10^{-8}	7.71×10^{-5}

3.2　超声功率对声压分布影响模拟

超声波在流体中传播时的声压及声压级分布是衡量超声波作用效果的重要参数，同时也是判断空化效应是否产生的重要依据[15]。超声频率 40 kHz，超声功率 40、80、120、160、200 W 时，浸膏内部声压场及声压级分布如图 3 所示。可以看出，40 W 超声功率时，声压幅值为−179～327 kPa，超声换能头部位声压幅值最大，超声波在不锈钢料盘及浸膏

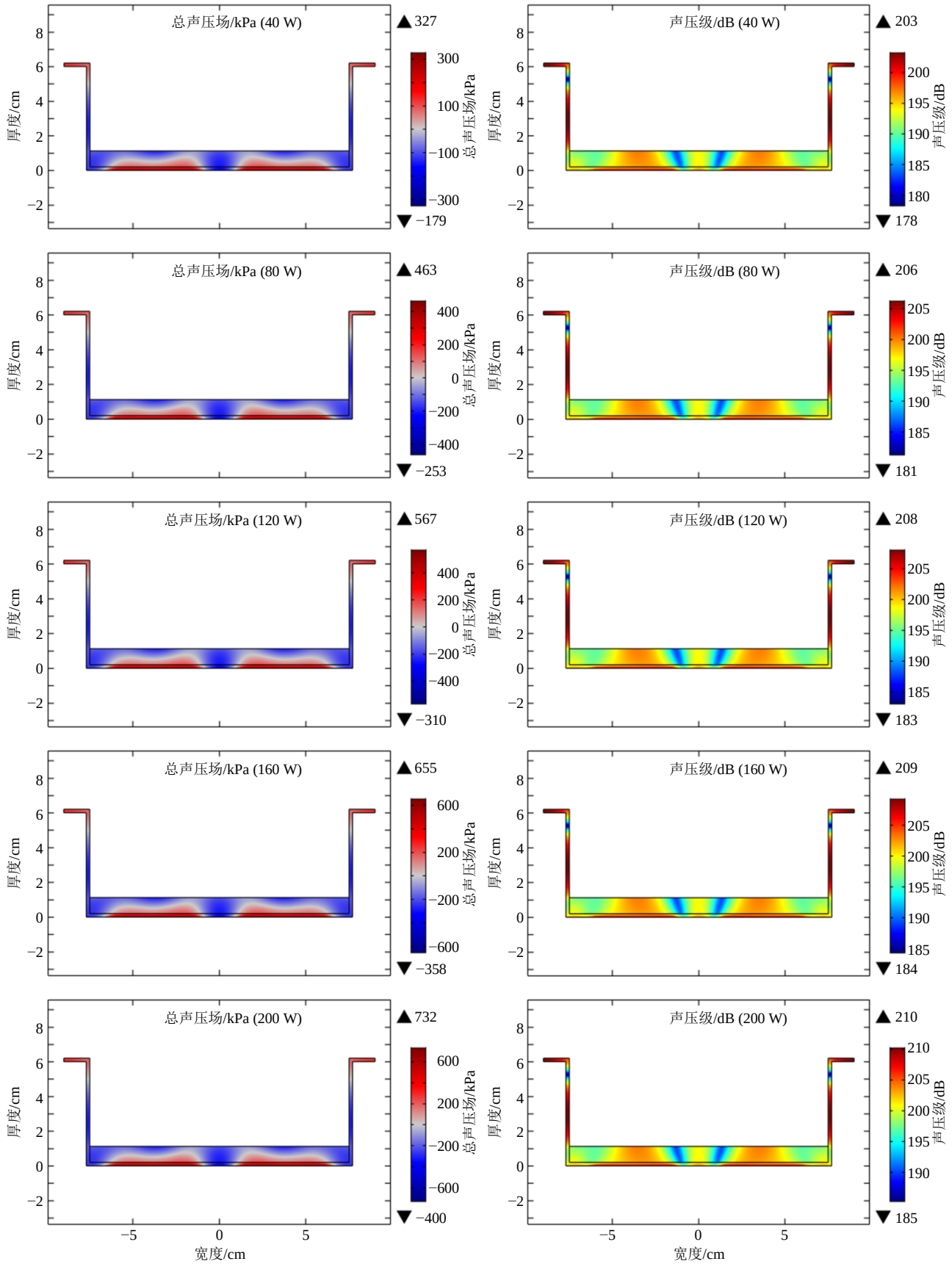


图 3 不同功率时浸膏内部声压场及声压级分布 (超声频率 40 kHz)

Fig. 3 Distribution of sound field and SPL inside extract with different ultrasonic power (ultrasonic frequency 40 kHz)

的界面颜色浓度发生变化，这是由 2 种物质不同的声阻抗导致的。模型中存在 2 个超声波发生源，超声波在浸膏中传播时发生叠加，因此每个指点的声压幅值是不同的。由于浸膏在干燥时厚度不宜过大，因此，模拟过程取值接近试验时实际干燥过程厚度为 9.2 mm 小于波长，在此厚度下未能观察到声波的周期性传播特点。

随着超声功率的提高，浸膏内部声压幅值峰值逐渐增大，80、120、160、200 W 时分别为 463、567、655、732 kPa。有研究资料表明，超声波在水中发生空化效应的声压阈值约为 0.6 MPa[30]。然而，当物料的黏度提高，超声空化阈值也将提高，在乔见鑫[31]关于重油超声改质研究中，模拟结果显示当声压幅值高于 0.7 MPa 时，在 1 个声周期内即可形成空化气泡破裂，形成较强的空化效应，对于浓缩后的甘草浸膏物理性质与重油相当，可认为超声在浸膏中的传播性质类似。因此，当超声功率达 200 W 时，在浸膏内部局部声压幅值超过了 0.7 MPa，而低功率超声波可能难以在浸膏中发生空化效应。如图 3 所示，40 W 超声功率时，模拟区域内声压级范围 178～203 dB，随着超声功率增大，声压级逐渐增大，80、120、160、200 W 时局部峰值分别为 206、208、209、210 dB。超声波在浸膏内产生声压级值较大，远高于安全生产噪声限度，但由于实际试验过程中超声装置是置于真空干燥箱内部，因此，安全风险较小。

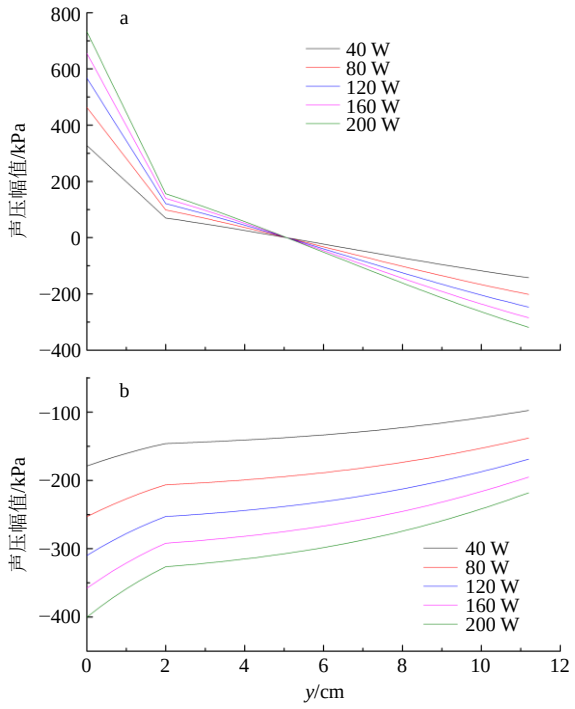
参照图 1-a 轴线标注，图 4 显示了超声换能器中心轴（轴 1）及干燥盘中心轴（轴 2）从干燥盘底部（y=0）至浸膏表面（y=1.12 cm）沿线的声压值。由图 4 可知，改变超声功率影响浸膏中声压幅值大小，不同功率条件时在同一位置点形成了声压为 0 的质点，料盘与浸膏 2 种不同材质对声压产生影响。

3.3　超声功率对干燥过程水分传质影响模拟

在干燥温度 80 ℃、超声功率 120 W、真空度 −0.09 MPa、超声时间 12～8 min 条件下，甘草浸膏真空干燥过程不同阶段水分体积分数 φ_l 在浸膏内部分布如图 5 所示。从图中可以看到，由于超声换能头与干燥盘连接处有热量输出，甘草浸膏超声干燥过程内部形成的多个浸膏“干-湿”界面形成水分浓度梯度将更有利于水分的迁移和蒸发。

3.4　模型验证

通过模型计算得到测温点 1 和测温点 2 的温度变化与试验值对比结果如图 6 所示，试验检测的温升趋势与模拟结果一致，随着超声功率提高，温升增大。超声换能头轴线区域的温度升高要略高于干燥盘中心轴区域，这是由于超声波高声压幅值区域分布在超声换能头附近，产生了更为显著的热效应。在所有测定的试验值与理论值之间的最大差值仅为 1.3 ℃，认为建立的超声热效应模型较可靠。



a-轴线 1（超声换能头中心轴）　b-轴线 2（干燥盘中心轴）
a-axis 1 (central axis of ultrasonic transducer)　b-axis 2 (central shaft of drying plate)

图 4　不同超声功率时特征轴线上声压分布

Fig. 4　Distribution of sound pressure along characteristic axis with different ultrasonic power

甘草浸膏真空干燥及超声辅助真空干燥模型在 70、80、90 ℃干燥温度下水分比随时间变化的模拟与试验结果对比如图 7 所示。模拟得到的干燥曲线与试验结果趋势是一致的，模拟结果在后期曲线骤降至接近 MR＝0 处，可能是由于模型计算前，做了必要的假设，如水分在浸膏孔隙和毛细管迁移的阻力可忽略，而实际干燥过程时存在传质阻力。通过模型拟合度分析，超声辅助真空干燥决定系数 R^2 分别为 0.985 0、0.981 2、0.953 1，均方根误差（root mean square error，RMSE）分别为 0.042 6、0.048 5、0.075 2，由此可见，试验值与理论值拟合度较好，验证了本研究所建立的干燥模型合理性。

4　讨论

中药浸膏超声辅助真空干燥是“超声场-温度场-

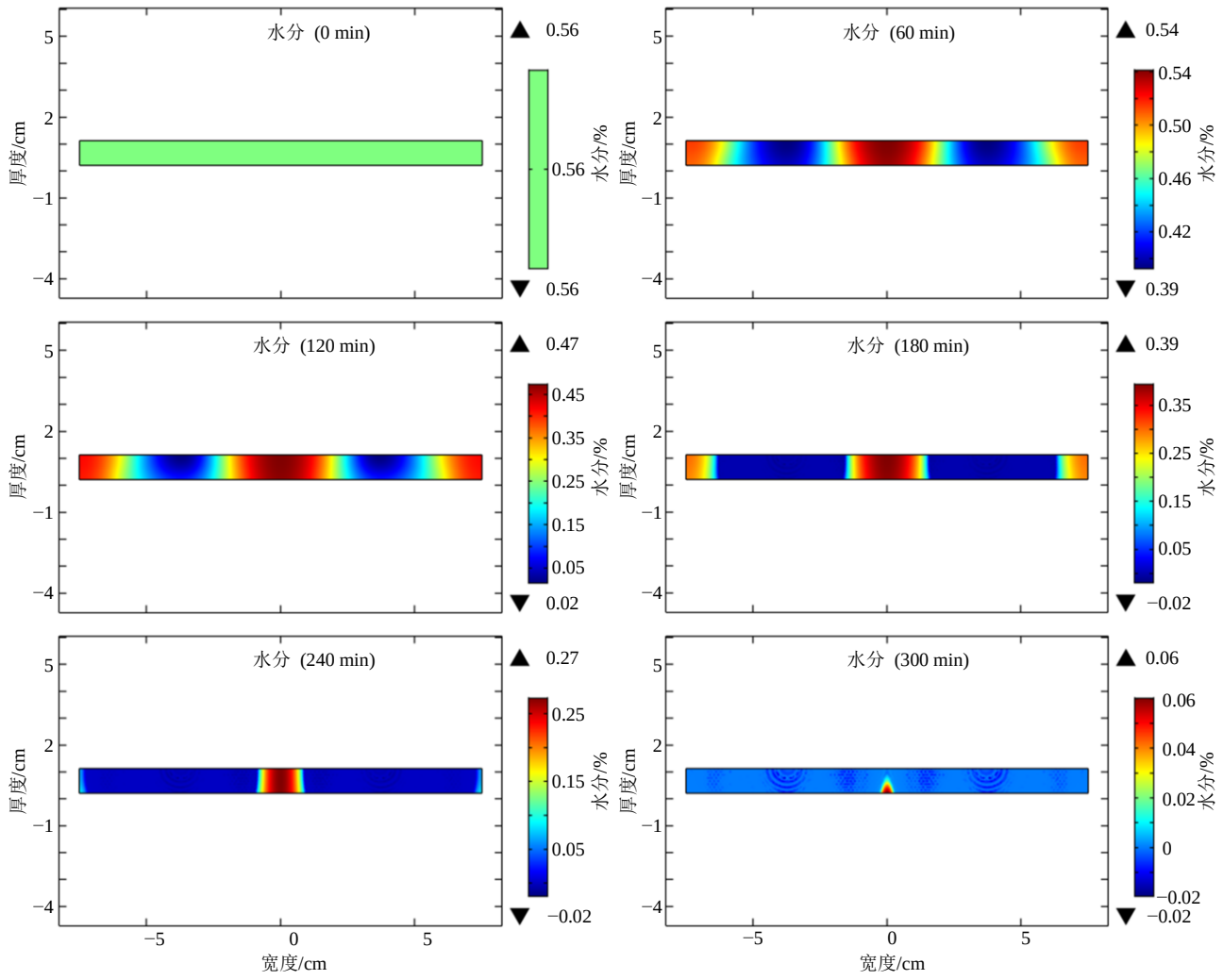
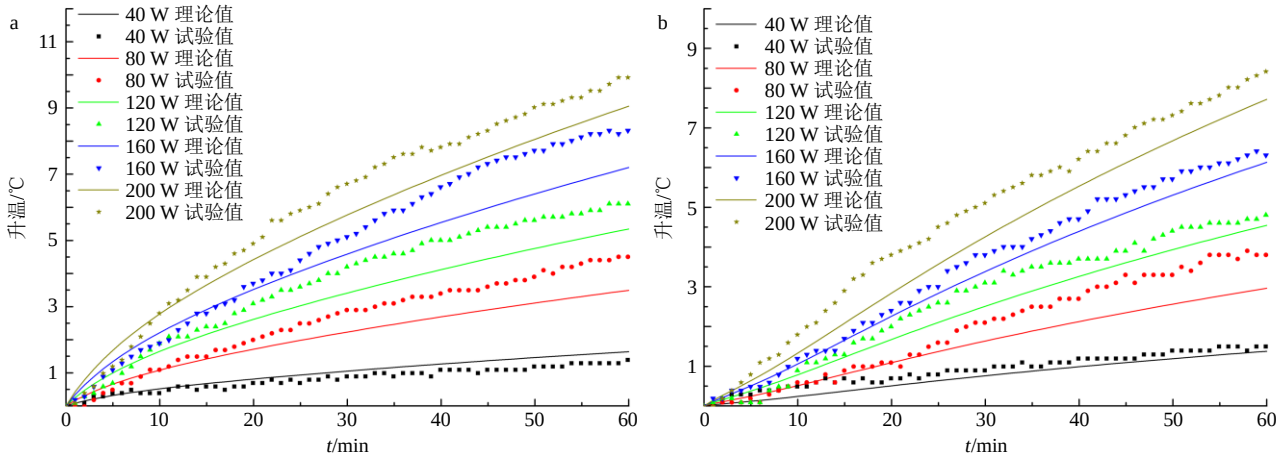


图 5 超声辅助真空干燥不同时间浸膏水分分布

Fig. 5 Moisture distribution of extract at different time of ultrasound-assisted vacuum drying



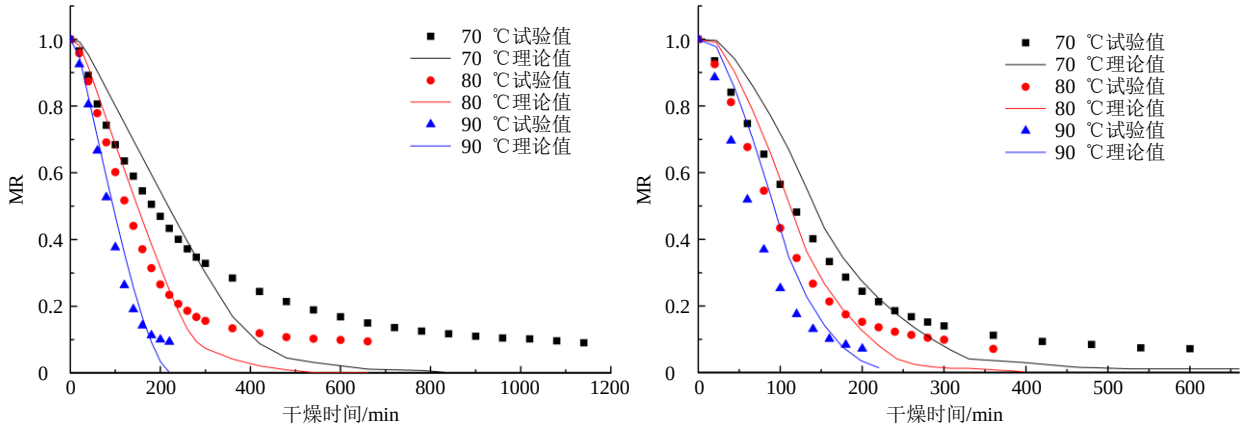
a-测温点 1（轴线 1 上浸膏中心点） b-测温点 2（轴线 2 上浸膏中心点）

a-temperature measurement point 1 (center point of the extract on axis 1) b-temperature measurement point 2 (center point of the extract on axis 2)

图 6 不同超声功率时特征点温度变化

Fig. 6 Temperature change at characteristic points with different ultrasonic power

压力场”多场耦合的复杂传热传质过程，水分在浸膏中的传递规律难以通过试验手段直接获取。过程模拟仿真技术通过对真实物理世界的数字建模，利用物理学基本理论公式，建立能够反映真实过程的



a-真空干燥　b-超声辅助真空干燥

a-vacuum drying　b-ultrasonic assisted vacuum drying

图 7　2 种干燥方式不同温度条件甘草浸膏干燥模型验证

Fig. 7　Drying model validation of licorice extract under two drying methods and different temperatures

动态模型并进行数值解析，是揭示复杂传递过程机制、优化反应过程工艺与新装备开发的新技术。本研究以甘草浸膏超声辅助真空干燥过程为研究对象，应用 COMSOL Multiphysics 建立的多场耦合的复杂传热传质模型，并得到了设定干燥条件下浸膏温度、水分变化规律，以可视化研究模式部分揭示了超声波强化干燥传热传质机制。

甘草浸膏超声辅助干燥模拟结果显示，超声功率 200 W 时，在浸膏内局部声压幅值超过了空化声压阈值 0.7 MPa，可能在浸膏中形成了空化效应，促进了干燥过程浸膏内部水分迁移，提高干燥速率。超声波作用于液体产生空化效应是强化固-液传热传质过程的关键因素，因此常用于加速中药有效成分的萃取[32]。但超声波作用在干燥过程中，由于水分在被干燥物料中通常存在于固态物质的间隙或毛细结构中，空化效应发生的压强阈值较高，空化现象不易产生[33]。超声热效应随超声功率的增大而加强，超声功率 40～200 W，超声 60 min 后温度升高 2～10 ℃，超声热效应为浸膏中水分蒸发提供了除干燥箱加热板提供的额外能量。Kowalski 等[34]的研究结果表明尽管树莓超声干燥温度上升了 6 ℃，但其颜色变化比对流干燥有所改善，对树莓品质未造成显著影响。因此，对于大部分超声干燥过程而言，超声热效应引起的物料温度上升对干燥进行是有利的，对物料颜色、形状及活性成分等品质特征产生的不利影响较小。由于超声热效应主要集中在超声换能头附近区域，形成多个“干-湿”边界层，有利于干燥过程水分分布均匀，促进了水分的迁移蒸发。模型预测值与试验结果进行对比，传热模型试验值与理论值之间的最大差值为 1.3 ℃，水分传质模型决定系数 R^2 均大于 0.953 1，均方根误差 RMSE 均小于 0.075 2，表明建立的干燥过程模型合理、可靠。

本研究重点研究了超声辅助真空干燥甘草浸膏内部声场、温度、水分分布变化并与常规真空干燥进行比较，探究超声辅助作用强化干燥过程的机制。然而，超声辅助真空干燥技术作为具有生产应用前景的中药浸膏干燥技术，未来重点开展以下工作：（1）建立的甘草浸膏超声辅助真空干燥传热传质模型涉及的水分蒸发扩散理论较为单一，不能完全代表干燥过程复杂的水分扩散过程，需结合浸膏干燥后的孔隙结构特点，分析干燥过程水分迁移孔道特征，基于多孔介质干燥、微孔隙流等理论进一步完善超声辅助真空干燥传热传质模型；（2）由于超声波在化学合成中已有相关研究报道，因此，需深入研究超声辅助干燥过程中药浸膏化学成分的变化规律，建立浸膏理化性质与超声辅助干燥条件间的量化关系，使过程模拟仿真结果对新技术的应用及设备设计提供更精确的技术支持；（3）搭建中试规模的中药浸膏超声辅助真空干燥装置，与目前常用的真空干燥、脉冲真空干燥、喷雾干燥等技术进行比较研究，从理化性质、能耗、效率、成本等多维度进行评价，为超声辅助真空干燥技术大生产应用转化提供依据。

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Zhang Y W, Abatzoglou N. Review: Fundamentals, applications and potentials of ultrasound-assisted drying [J]. *Chem Eng Res Des*, 2020, 154: 21-46.

[2] 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 Energ*, 2020, 153: 67-73.

[3] 马怡童, 朱文学, 白喜婷, 等. 超声强化真空干燥全蛋液的干燥特性与动力学模型 [J]. 食品科学, 2018, 39(3): 142-149.

[4] 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.

[5] 黄志恒, 宋延秋, 闫东升. 布渣叶总黄酮离子液体协同超声辅助提取工艺考察及其调血脂活性研究 [J]. 中草药, 2019, 50(24): 5995-6001.

[6] 董波, 刘爱贤, 张家辉, 等. 空化技术在重油改质降黏领域的研究进展 [J]. 现代化工, 2021, 41(1): 53-56.

[7] Onwude D I, Hashim N, Janius R, *et al*. Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2017, 43: 223-238.

[8] 邱爽, 李学鹏, 王金厢, 等. 超声波辅助冷冻技术及其在食品中的应用 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(1): 190-195.

[9] 赵帅南, 尧超群, 刘志凯, 等. 声驱动微气泡强化微反应器内高黏体系萃取过程 [J]. 化工学报, 2020, 71(9): 4152-4160.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 中仿科技公司. COMSOL Multiphysics 有限元法多物理建模与分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 1-4.

[14] Murru M, Giorgio G, Montomoli S, *et al*. Model-based scale-up of vacuum contact drying of pharmaceutical compounds [J]. *Chem Eng Sci*, 2011, 66(21): 5045-5054.

[15] 李珂昕. 逆流超声波辅助提取过程的计算机仿真模拟研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017.

[16] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础 [M]. 第 2 版. 南京: 南京大学出版社, 2001: 189-192.

[17] 刘晖, 张洪涛, 肖红. 水饱和蒸汽压的 Antoine 方程常数的比较 [J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(13): 32-34.

[18] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术 [M]. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 1507-1508.

[19] Huang J L, Holt R G, Cleveland R O, *et al*. Experimental validation of a tractable numerical model for focused ultrasound heating in flow-through tissue phantoms [J]. *J Acoust Soc Am*, 2004, 116(4 Pt 1): 2451-2458.

[20] Xu Z, Yasuda K, Koda S. Numerical simulation of liquid velocity distribution in a sonochemical reactor [J]. *Ultrason Sonochem*, 2013, 20(1): 452-459.

[21] 田红. 超声波在城市剩余活性污泥中的传输特性的模拟及实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[22] 中国石化集团上海工程有限公司. 石油化工设备设计选用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 35-128.

[23] 曾艳. 丹参浸膏真空带式干燥过程模型化及工艺优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[24] 马庆芳, 方荣生. 实用热物理性质手册 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986: 928-932.

[25] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 418.

[26] 王学成, 康超超, 伍振峰, 等. 二至丸热风干燥过程温度均匀性模拟与实验 [J]. 中草药, 2020, 51(5): 1226-1232.

[27] Dincer I, Hussain M M. Development of a new Biot number and lag factor correlation for drying applications [J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2004, 47(4): 653-658.

[28] Mrkić V, Ukrainczyk M, Tripalo B. Applicability of moisture transfer *Bi-Di* correlation for convective drying of broccoli [J]. *J Food Eng*, 2007, 79(2): 640-646.

[29] 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.

[30] Zhai W, Liu H M, Hong Z Y, *et al*. A numerical simulation of acoustic field within liquids subject to three orthogonal ultrasounds [J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, 34: 130-135.

[31] 乔健鑫. 基于功率超声的重油改质技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

[32] 叶陈丽, 贺帅, 曹伟灵, 等. 中药提取分离新技术的研究进展 [J]. 中草药, 2015, 46(3): 457-464.

[33] Lafond M, Watanabe A, Yoshizawa S, *et al*. Cavitation-threshold determination and rheological-parameters estimation of albumin-stabilized nanobubbles [J]. *Sci Rep*, 2018, 8: 7472.

[责任编辑 郑礼胜]