

二至丸热风干燥过程温度均匀性模拟与实验

王学成, 康超超, 伍振峰*, 李远辉, 徐诗军, 杨 明*

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

摘要: 目的 以二至丸为研究对象, 探索中药丸剂热风干燥过程温度变化规律, 为提高丸剂干燥效率及干燥均匀性提供理论依据。方法 基于 COMSOL Multiphysics 建立传热传质模型模拟二至丸层在无孔底及筛孔底 2 种干燥盘不同温度干燥过程温度分布并进行求解; 研究了二至丸层在 60、80、100 °C 热风温度下干燥过程, 并通过 Fick 第 2 定律平板模型计算二至丸水分有效扩散系数 (D_{eff}); 采用探针温度传感器监测二至丸层干燥过程中间表面及内部温度变化进行干燥模型验证。结果 不同热风温度干燥过程中二至丸层表面及内部温度呈现先剧烈上升后缓慢上升的趋势, 二至丸层无孔底干燥模型及筛孔底干燥模型内部温度分别为 55.3~56.0 °C、57.5~57.7 °C, 使用筛孔底干燥盘可提高干燥温度均匀性; 2 种模型实验得到水分 D_{eff} 分别为 $0.76 \times 10^{-7} \sim 2.82 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1.15 \times 10^{-7} \sim 3.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; 实验结果验证模型在一定干燥温度范围内能够较好反映二至丸层干燥过程温度变化规律。结论 通过可靠的二至丸层热风干燥模型直观反映干燥过程温度变化情况, 该研究为二至丸干燥工艺优化提供参考。

关键词: 二至丸; 热风干燥; 数值模拟; COMSOL Multiphysics; 温度变化规律; 均匀性; 干燥效率; 干燥均匀性; 水分有效扩散系数

中图分类号: R283.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2020)05-1226-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2020.05.019

Simulation and experiment of temperature uniformity of Erzhi Pills during hot air drying process

WANG Xue-cheng, KANG Chao-chao, WU Zhen-feng, LI Yuan-hui, XU Shi-jun, YANG Ming

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

Abstract: Objective To explore the law of temperature change in hot air drying process, and provide a theoretical basis for improving the drying efficiency and uniformity of Erzhi Pills (EP). **Methods** Heat and mass transfer models were established to simulate the temperature distribution of the drying process of EP with no hole bottom and screen hole bottom based on COMSOL Multiphysics. The drying process of EP layer at 60, 80 and 100 °C was studied. The effective water diffusion coefficient (D_{eff}) of EP layer was calculated by Fick's second law plate model. A probe temperature sensor was used to monitor the temperature changes of the intermediate surface and interior of EP layer during the drying process to verify the drying model. **Results** The surface and internal temperature of EP layer showed a trend of first sharp rise and then slow rise in the drying process of different hot air temperature. The inner temperature range of the drying model with no hole bottom and screen hole bottom was 55.3—56.0 °C and 57.5—57.7 °C respectively. The uniformity of drying temperature of EP can be improved by using drying plate with screen hole. The D_{eff} range of the two model experiments were $0.76 \times 10^{-7} \sim 2.82 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ and $1.15 \times 10^{-7} \sim 3.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively. The experimental results showed that the model could well reflect the temperature variation of EP layer drying process within a certain drying temperature range. **Conclusion** The change of drying temperature was directly reflected through the reliable hot air drying model of EP layer. The study provides reference for the optimization of EP drying process.

Key words: Erzhi Pills; hot air drying; numerical simulation; COMSOL Multiphysics; temperature variation regularity; uniformity; drying efficiency; drying uniformity; effective water diffusion coefficient

收稿日期: 2019-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (81760716); 江西省自然科学基金资助项目 (20171BAB215065)

作者简介: 王学成 (1989—), 男, 博士研究生, 专业方向为中药制剂工艺与装备。Tel: 15970499523 E-mail: wangxcd@126.com

*通信作者 杨 明 (1962—), 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 (1982—), 男, 副教授, 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

二至丸由酒女贞子和墨旱莲 2 味中药等比例组成。现代研究表明,二至丸具有保肝降酶、抗肝纤维化、抗衰老、调节免疫机能、抑制肿瘤、益智、抗炎、降血糖、抗疲劳等多种药理作用,具有广阔的应用前景^[1-2]。干燥是二至丸生产过程必需环节,且是决定其品质形成的关键,干燥方式、工艺参数选择不当等因素都可能导致干燥后丸剂出现裂丸、水分不均、结壳等问题^[3-4]。如干燥速度过快,丸剂表面水分蒸发速度大于内部扩散速度而导致表面结壳影响降速干燥速率;丸剂静态干燥、温度分布不均导致丸剂含水率不均匀造成丸剂“阴阳面”问题,而导致这些问题的根本原因是丸剂干燥过程中受温度分布影响的干燥均匀性^[5-6]。因此,研究丸剂干燥过程中温度分布特性对优化丸剂干燥工艺、提高丸剂品质具有重要意义。目前,有关丸剂干燥的研究大多局限于引入应用于其他领域的新型干燥技术的工艺验证性研究^[7-9],有关中药丸剂干燥过程温度场的研究很少。在食品干燥行业,利用数学模型研究干燥传热传质过程应用广泛,吴中华等^[10]利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟计算热风干燥过程中稻谷籽粒内部的温度和水分分布,三维适体数学模型具有较高的精度。朱代根等^[11]建立了鸡肉对流干燥传热传质耦合模型,并通过 COMSOL Multiphysics 软件对模型进行了求解,结果表明所建立的数学模型可用于预测鸡肉对流干燥过程。Daniel 等^[12]建立了数学模型,并用 COMSOL Multiphysics 求解传热传质耦合模型,准确预测了红薯红外和热风联合干燥过程水分含量和温度分布。本实验基于 COMSOL Multiphysics 仿真软件,建立 2 种类型干燥盘盛装二至丸干燥传热传质模型,模拟二至丸干燥过程温度分布及温度变化,通过二至丸干燥实验获取模型关键部分参数,并验证模型的可靠性,旨在为二至丸干燥工艺优化提供理论依据。

1 仪器与材料

ThinkStation P500 型工作站,联想集团;GZX-9070MBE 型电热鼓风干燥箱,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;EL303 型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;XMT-JK408 型智能温控仪,江苏汇邦仪表有限公司;WRNK 型探针温度传感器,上海亿佳电热器有限公司;XHW-02 型制丸机和 6202 型高速粉碎机,北京环亚天元机械技术有限公司;Φ100 无孔底干燥盘(自制);Φ100 筛网底干燥盘(自制)。

二至丸,现代中药制剂教育部重点实验室制备;酒女贞子(批号 1805004)、墨旱莲(批号 1805005),江西樟树天齐堂中药饮片有限公司,药材均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,酒女贞子为木樨科女贞属植物女贞 *Ligustrum lucidum* Ait. 的干燥成熟果实经炮制而成,墨旱莲为菊科鳢肠属植物鳢肠 *Eclipta prostrata* L. 的干燥地上部分;蜂蜜,批号 180927,江西牧蜂源生物科技有限公司。

2 方法

2.1 二至丸干燥模型的建立

2.1.1 几何模型 将制备好的二至丸在干燥托盘(Φ100 mm×45 mm)内铺至平齐盘口,建立对应几何模型见图 1。为了简化计算过程,将图 1-a 的三维模型作二维轴对称简化处理后,得到 1 个 50 mm×45 mm 的简单矩形域,即图 1-a 阴影部分,用 COMSOL Multiphysics 软件划分网格^[13],见图 1-b。

2.1.2 热质传递方程 描述二至丸干燥过程水分扩散的方程以 2 种方式与热方程耦合^[14],一是二至丸热导率(k)随温度的增大而增加且与二至丸置于干燥盘的空隙率有关,相关表达式如式(1)所示,二

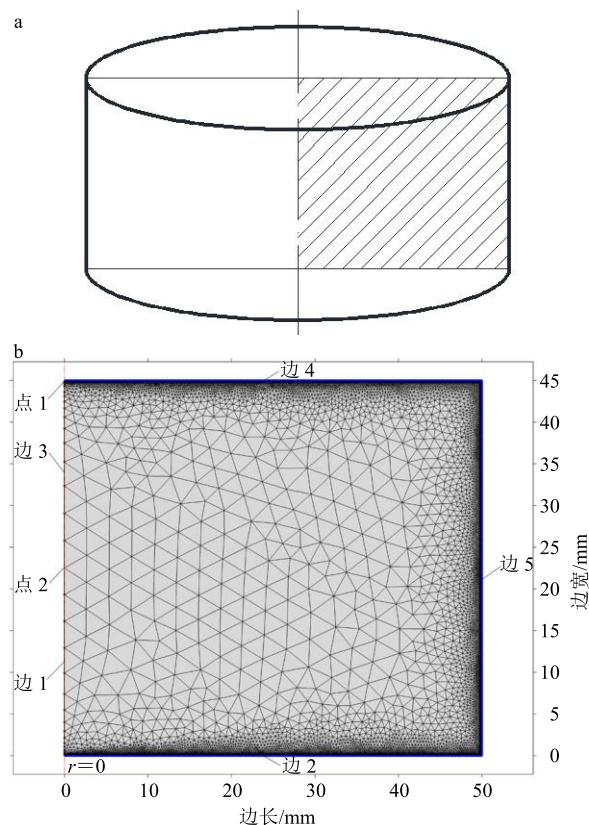


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

是二至丸干燥模型外边界上发生热通量,在边界 2、4 和 5 的边界条件中使用 $\lambda D_{\text{eff}} \nabla c$ (λ 为蒸发的摩尔潜热, J/mol; D_{eff} 为水分有效扩散系数, m^2/s ; ∇c 表示干燥过程物料水分浓度梯度) 来表示。

$$k=[b+a \times (T-273.15)] \times (1-\varphi) \quad (1)$$

b 为热导率方程截距, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; a 为热导率方程斜率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}^2)$; T 为物料温度, K ; φ 为空隙率

(1) 模型 1: 干燥盘底部为无孔板, 蒸发的水分只从干燥盘顶部蒸发, 且假设干燥盘内二至丸的传热方式为热传导, 计算使用固体传热模块, 令干燥盘壁温等于干燥箱内空气温度。因此, 传热接口的边界条件如下。

$$\text{边界 1、3: } n(-k \nabla T)=0 \quad (2)$$

$$\text{边界 2、4、5: } n(-k \nabla T)=h_T(T_{\text{air}}-T)+\lambda n(D_{\text{eff}} \nabla c) \quad (3)$$

h_T 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{air} 为干燥箱空气温度, K ; λ 为蒸发的摩尔潜热, J/mol; D_{eff} 为水分有效扩散系数, m^2/s

扩散的边界条件如下。

$$\text{边界 1、2、3、5: } n(-D_{\text{eff}} \nabla c)=0 \quad (4)$$

$$\text{边界 4: } n(D_{\text{eff}} \nabla c)=k_c(c_b-c) \quad (5)$$

k_c 是质量传递系数, m/s ; c_b 是干燥箱内空气水分浓度, mol/m^3

(2) 模型 2: 干燥盘底部为筛网板, 蒸发的水分从干燥盘顶部和底部同时蒸发, 因此, 模型 2 的

条件除扩散边界条件增加了边界 2 为扩散边界外, 其余条件和假设均和模型 1 相同。

2.2 干燥模拟过程参数

2.2.1 水分 D_{eff} 在二至丸干燥过程传热传质控制方程中, D_{eff} 是重要的模型参数, 其影响因素包括被干燥物料类型、温度、干燥方式等等, 而其精确性对数学模型精度具有重要意义。因此, 本实验通过二至丸干燥实验获取较准确的水分 D_{eff} 。

2.2.2 其他物性参数 二至丸干燥模拟过程的物理特性参数见表 1。

2.3 二至丸制备及干燥方法

2.3.1 二至丸的制备 二至丸的制备按文献工艺在中药丸剂制备室完成^[18]。

2.3.2 二至丸干燥过程参数测定 将二至丸分别在 2 种干燥盘内铺至平齐盘口, 将 WRNK 型探针温度传感器置于干燥盘二至丸层中的测温点 (点 1 位于干燥盘中间物料表面, 点 2 位于干燥盘中间深 22.5 mm 物料处), 测温装置示意图见图 2-a。通过称重法测定二至丸干燥失水过程质量变化, 装置示意图如图 2-b 所示, 为保证实验数据的准确性, 只取出筛网内包含的二至丸进行称定质量, 记录数据后迅速放回。采用不同的热风干燥温度 (60、80、100 $^{\circ}\text{C}$) 进行干燥, 记录温度时间间隔依次为 1、10、20、

表 1 二至丸层物性参数

Table 1 Physical parameters of EP layer

参数	符号	单位	表达式	参数	符号	单位	表达式
干燥箱空气温度	T_{air}	$^{\circ}\text{C}$	60、80、100	空气水分浓度 ^[15]	c_b	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$	$0.02 \rho / M_{\text{H}_2\text{O}}$
初始二至丸温度	T_0	$^{\circ}\text{C}$	12	传质系数 ^[16]	k_c	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	1.08×10^{-6}
二至丸堆密度	ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	530.3	蒸发的摩尔潜热 ^[14]	r	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$2.3 \times 10^6 M_{\text{H}_2\text{O}}$
湿基含水率	ω		0.24	空隙率	φ		0.637 8
传热系数 ^[15]	h_T	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	25	热导率 ^[17]	k_T	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	$(0.048 9+0.001 64 T)(1-\varphi)$
水相对分子质量	$M_{\text{H}_2\text{O}}$	$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	18	恒压热容 ^[15]	C_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	$(0.84+0.033 5 \omega) \times 1 000$
初始水分浓度	c_0	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$	$\omega \rho / M_{\text{H}_2\text{O}}$				

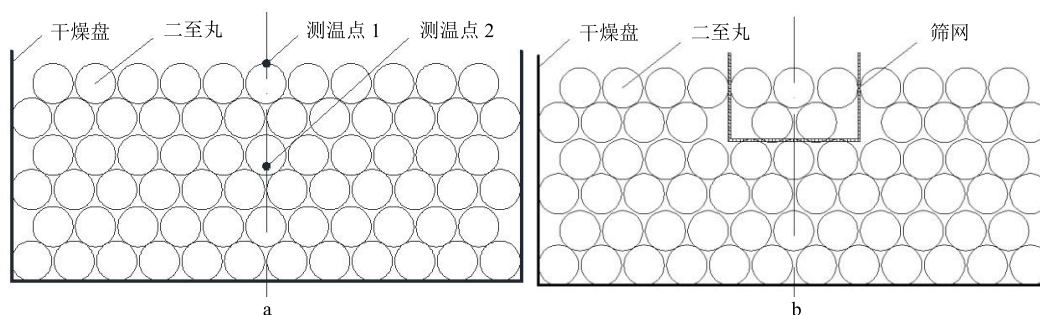


图 2 干燥参数测定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of drying parameters determination

30、60 min, 前 4 个时间间隔分别记录 10、10、8、6 次, 时间间隔 60 min 的记录次数由总干燥时间决定, 干燥终点为当二至丸的含水率小于等于 12%^[19]。

2.3.3 D_{eff} 计算方法 二至丸的初始含水率通过烘干法测定^[20-21], 二至丸干燥过程中任意时刻水分比 (moisture ratio, MR) 的计算公式为 $MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e)$, 式中 M_0 为初始干基含水率, M_e 为干燥平衡时干基含水率, M_t 为干燥 t 时刻干基含水率。由于 M_e 远小于 M_0 和 M_t , 可忽略, 故该计算公式可简化为 $MR = M_t / M_0$ 。结合实验数据可以计算出丸剂干燥过程水分的 D_{eff} , 按 Fick 第 2 定律平板模型公式 (6) 计算。

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4\delta^2}\right] \quad (6)$$

t 为实验时间, s; δ 为二至丸层的厚度, m; n 为实验采样数
将式 (6) 等号两边分别取自然对数, 可得到 $\ln MR$ 与时间 t 的线性关系表达式。

$$\ln MR = \ln(8/\pi^2) - \pi^2 t D_{\text{eff}} / 4\delta^2 \quad (7)$$

由式 (7) 可知, $\ln MR$ 与时间 t 线性关系的斜率 (k) 表达式如下。

$$k = -\pi^2 D_{\text{eff}} / 4\delta^2 \quad (8)$$

实验数据拟合得到 $\ln MR$ 与时间 t 线性关系的斜率值, 进而由式 (8) 得到水分 D_{eff} 。

3 结果与分析

3.1 水分 D_{eff}

模型 1 和模型 2 在热风干燥温度 60、80、100 °C 时, 水分 D_{eff} 值分别为 $0.76 \times 10^{-7} \sim 2.82 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1.15 \times 10^{-7} \sim 3.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 见表 2。由表 2 可以看出, 二至丸干燥过程中水分 D_{eff} 随温度的升高而增大, 升高温度可增强干燥过程传热传质, 提高干燥效率。同一干燥温度条件下, 模型 2 水分 D_{eff} 均大于对应干燥温度下模型 1 对应值, 说明二至丸

表 2 不同干燥条件二至丸层水分 D_{eff}

Table 2 Effective water diffusion coefficients of EP layer under different drying conditions

模型	温度/°C	斜率	$D_{\text{eff}} / (\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	60	-0.000 827 50	0.76
	80	-0.001 712 54	1.56
	100	-0.003 092 63	2.82
2	60	-0.001 258 68	1.15
	80	-0.002 852 23	2.60
	100	-0.004 318 11	3.94

使用筛孔底干燥盘进行干燥可有效增强干燥过程二至丸中水分扩散从而加速干燥。

3.2 二至丸干燥温度分布模拟

图 3 和 4 分别为热风干燥温度为 60 °C 时, 二至丸干燥模型 1 和模型 2 内部不同时刻 ($t=0$ 、10、100、600、780 min) 温度分布云图。从图 3 和 4 可以看出, 干燥时间 100 min 前, 二至丸干燥温度呈现周边高中心低的现象, 表明在干燥过程中热量是从二至丸表层传热边界逐渐向中心进行传导。干燥时间 100 min 时, 比较图 3-c 和图 4-c 可以看出, 模型 1 中心低温区域面积要大于模型 2, 这是由于模型 1 利用无孔底板干燥盘, 水分蒸发边界仅为上表面, 而模型 2 利用筛孔底板干燥盘, 水分蒸发表面为上、下表面, 干燥过程中水分蒸发的传质过程会影响二至丸内部温度分布规律。在干燥结束时刻 (模型 1 为 780 min、模型 2 为 600 min), 二至丸干燥模型 1 和模型 2 内部温度分布虽均趋于均匀, 从温度变化范围仍能看出模型 2 温度均匀性要优于模型 1。

图 5 为干燥温度 60 °C 时, 二至丸干燥模型 1 和模型 2 不同位置点的温度变化曲线。从图 5 可以看出, 二至丸干燥模型中间表面位置点 1 较中心位置点 2 温度升高快, 模型 1 和模型 2 点 1 达到 40 °C 时所需时间均约为 6 min, 而点 2 则均需要约 70 min, 这是由二至丸热风干燥过程热量由丸层表面传导至内部的传递规律引起的^[22]。模型 1 和模型 2 在干燥过程结束的时间分别为 780、600 min, 说明干燥二至丸采用筛孔底干燥盘可以有效缩短干燥时间, 可能由于筛孔底增加了二至丸干燥过程水分扩散至环境。干燥结束时, 二至丸模型 1 及模型 2 内部温度分别为 55.3~56.0、57.5~57.7 °C, 模型 2 温度值较高、温度范围区间较小, 表明二至丸干燥使用筛孔底干燥盘不仅可以提高干燥实际温度, 且能提高干燥过程温度均匀性, 有利于干燥进行。

3.3 模型理论值与实验值比较

从图 6 可以看出, 不同温度干燥模型 1 和模型 2 在不同位置点温度的实验值与模拟值拟合良好 ($r^2 > 0.900$ 8), 最大平均相对偏差绝对值为 13%, 低于一般数值模拟的 15% 精度要求^[23], 说明此传热传质模型能较好地反映二至丸干燥过程中温度与时间的关系。通过实验测得干燥丸层中间表面温度 (即点 1) 及中心温度 (即点 2) 不同干燥温度条件下随时间呈现出先急剧升高后缓慢升高的特点, 且中间内部温度升温的速度和程度均小于中间表面温度,

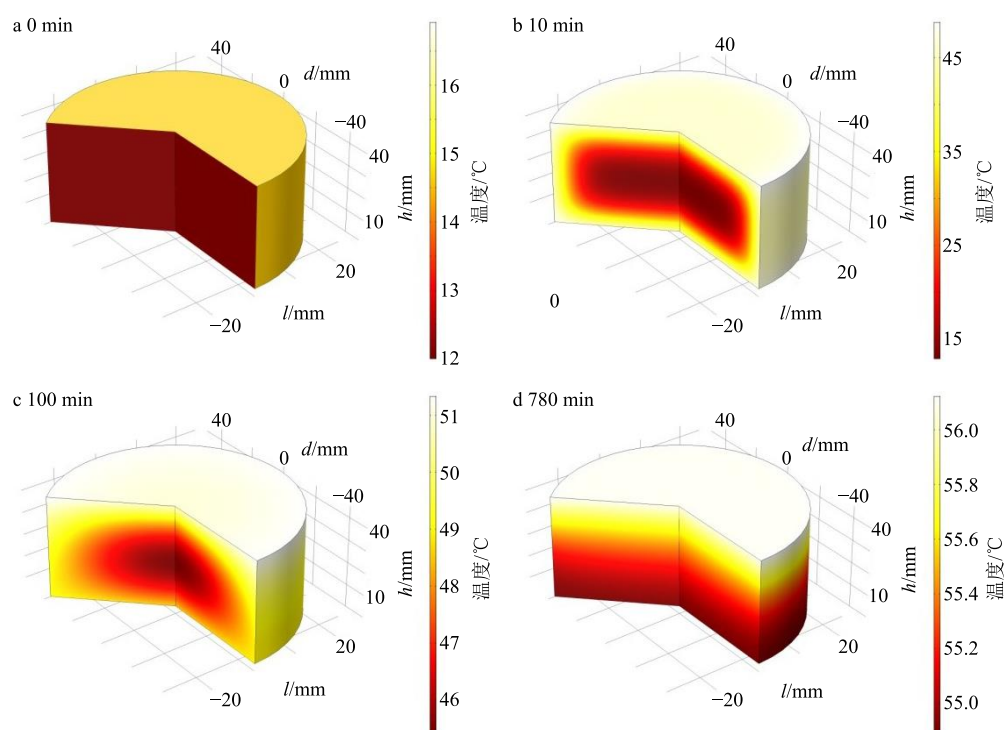


图 3 60 °C 不同时刻二至丸干燥模型 1 温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of EP drying model 1 at different time of 60 °C

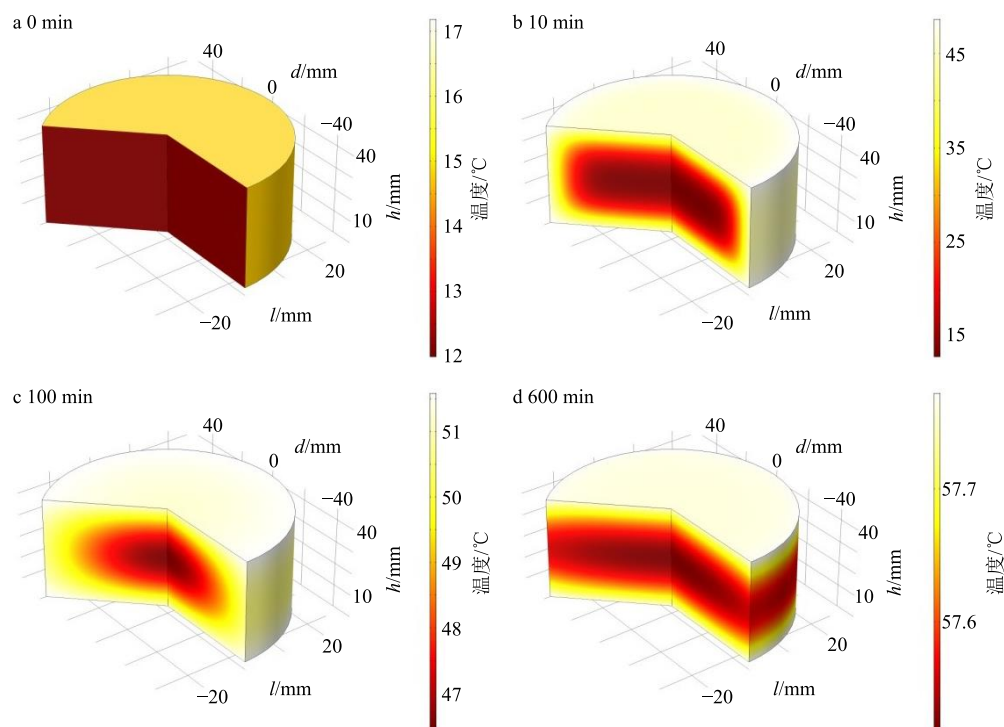


图 4 60 °C 不同时刻二至丸干燥模型 2 温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of EP drying model 2 at different time of 60 °C

与点 1 和点 2 模型模拟值呈现相同的变化趋势。造成偏差的原因可能是二至丸干燥模型建立以及计算过程, 包含一些假设和简化前提, 如二至丸的体积

不变、空隙度不变等等, 而实际上随着干燥的进行, 丸剂水分的减少会引起体积收缩, 从而引起丸剂层体积和空隙度等参数的变化^[24]。

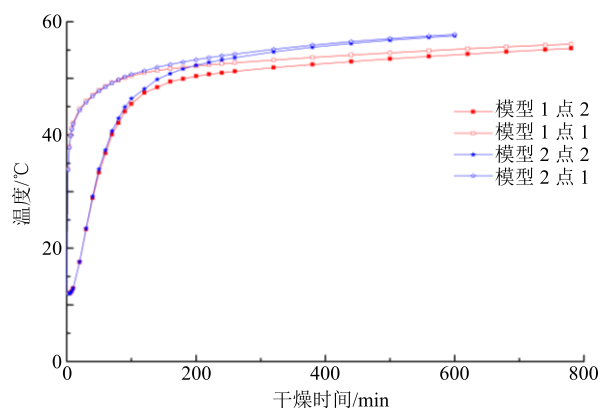


图 5 60 °C 干燥模型不同位置点温度变化

Fig. 5 Temperature changes at different positions of drying model at 60 °C

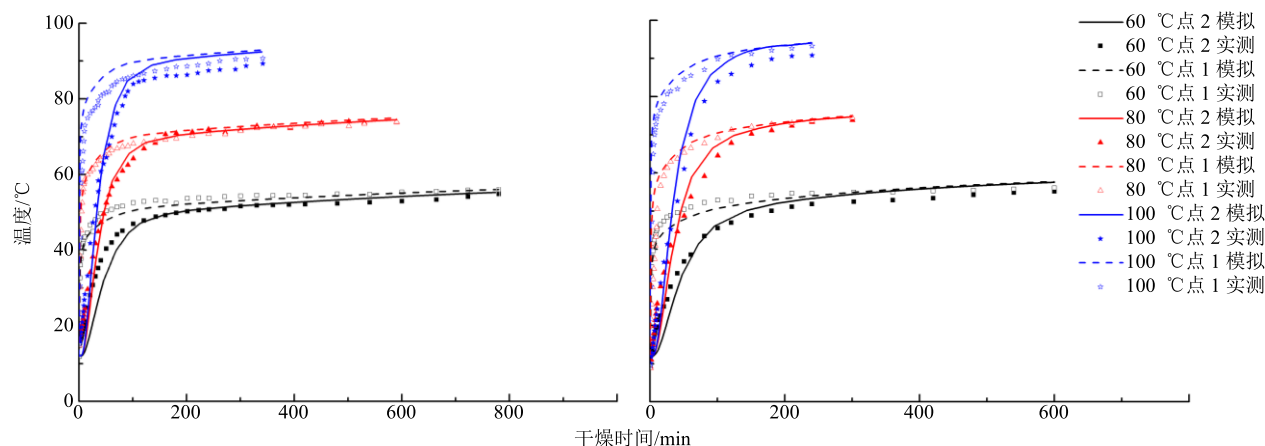


图 6 不同温度干燥模型 1、2 温度模拟与实验值对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental values of drying model 1 and 2 at different temperatures

COMSOL Multiphysics 具有高效的计算性能能力和独特的多场全耦合分析能力,用于复杂传热传质干燥过程数值仿真有较高精确度^[27]。本实验应用 COMSOL Multiphysics 建立的不同热风干燥温度下二至丸干燥数值模型,同时考虑无孔底和筛孔底 2 种盛装方式对干燥过程的影响,通过温度云图直观地得到了二至丸层干燥过程温度分布情况,筛孔底托盘盛装二至丸干燥温度分布均匀性要优于无孔底托盘盛装。

二至丸干燥过程水分 D_{eff} 可以用于表征干燥温度与干燥效率之间的关系,同时也是二至丸干燥数值模型的关键参数,通过实验获得了不同干燥条件下二至丸水分 D_{eff} 。干燥温度越高,二至丸水分 D_{eff} 越大,这是由于温度升高会降低水的黏度,进而降低流体流出的阻力,从而促进水分子在二至丸内部毛细管中的扩散,增加水分有效扩散值^[28]。干燥过程二至丸盛装方式也将影响水分 D_{eff} ,干燥温度为

4 讨论

中药丸剂热风干燥是以热空气为传热介质将热量传递到丸剂,丸剂中水分受热汽化随热空气排出系统的过程。中药丸剂干燥是传热和传质的耦合过程,干燥温度及丸剂水分扩散是干燥过程关键因素,而丸剂在干燥过程中实际温度分布规律难以用实验手段直接获取。计算机模拟技术是将干燥过程传热传质过程用方程表达,采集过程必要参数及合理假设,通过计算机进行数值求解,获得与实际干燥过程接近的信息。其优势在于提高了工程应用的经济性,缩短了将小试实验放大为大规模工业生产的周期,模拟参数可随实时调整和修正,优化的模拟条件可为实际工业生产提供有价值的参考^[25-26]。

60 °C 时,使用无孔底和筛孔底托盘盛装二至丸干燥,其 D_{eff} 分别为 0.76×10^{-7} 、 $1.15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,这是由于使用筛孔底托盘,二至丸层干燥过程增加了一个底面用于水分的扩散,强化了水分传质过程。

实验测得干燥过程丸层中间表面温度及中心温度随时间的变化,验证二至丸干燥模型的可靠性良好($r^2 > 0.9008$),最大平均相对偏差绝对值为 13%,能够较好地反映二至丸层干燥过程温度变化规律。然而,在二至丸干燥模型建立过程中,作了一些必不可少的假设,如二至丸的体积、二至丸层的孔隙度不变及只考虑二至丸干燥过程热传导等,这些假设可以简化建模及数值计算过程,但对计算结果精度造成影响。同时,在模型计算时,物性参数的准确性对模型计算结果精确性的保证有重要影响,本实验对二至丸密度、空隙率、水分 D_{eff} 进行了实验测量,而其他参数来源于文献,对模型的计算精度也有一定影响。

通过合理的实验方法获取更接近实际值的二至丸物性参数以提高二至丸干燥过程模型精度有待进一步研究。

参考文献

- [1] 蔡秀江, 黄美艳, 丁安伟, 等. 二至丸考源及药理作用研究进展 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2011, 17(23): 272-275.
- [2] 谭乐俊, 王 萌, 任晓亮, 等. 基于 UPLC-Q/TOF-MS 的中药水蜜丸制剂二至丸多成分稳定性研究 [J]. 中草药, 2016, 47(13): 2260-2268.
- [3] 齐娅汝, 李远辉, 韩 丽, 等. 干燥对中药丸剂品质形成的影响及调控 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(11): 2208-2213.
- [4] 岳鹏飞, 许俊男, 谢元彪, 等. 论中药丸剂“类玻璃化转变”的干燥机制与品质调控对策 [J]. 中草药, 2016, 47(11): 1825-1829.
- [5] 白娜仁. 干燥温度对蒙药水丸质量指标的影响 [J]. 中国民族医药杂志, 2013, 19(10): 56-57.
- [6] 段丽颖, 刘献洋, 苏 靖. 三妙丸工艺的优化及工艺验证 [J]. 海峡药学, 2019, 31(4): 4-7.
- [7] 杨 柳, 石新华, 李 原, 等. 微波干燥生产工艺对妇宁丸质量控制的影响 [J]. 时珍国医国药, 2014, 25(4): 865-867.
- [8] 林 霞, 刘 峰. 干燥温度对中药丸剂溶散时限的影响探讨 [J]. 云南中医中药杂志, 2014, 35(10): 113.
- [9] 王学成, 康超超, 伍振峰, 等. 基于 Weibull 函数的单颗六味地黄丸干燥过程模拟及其动力学分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(12): 133-139.
- [10] 吴中华, 李 凯, 高 敏, 等. 稻谷籽粒内部热湿传递三维适体数学模型研究 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 29-34.
- [11] 朱代根, 陈君若, 刘显茜. 食品对流干燥热质耦合传递的数值模拟 [J]. 农机化研究, 2011, 33(1): 49-52.
- [12] Daniel I O, Norhashila H, Khalina A, *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.
- [13] 苏石川, 孔 为, 陈代芬, 等. 热能工程与先进能源技术仿真与设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [14] Chen H Q, Bradley P M, Rong Y M. Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties [J]. *J Food Eng*, 1999, 42(3): 139-146.
- [15] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [16] Yang H, Sakai N, Watanabe M. Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer [J]. *Dry Technol*, 2001, 22(8): 1441-1460.
- [17] 易维明, 郭 超, 姚宝刚. 生物质导热系数的测定方法 [J]. 农业工程学报, 1996, 12(3): 42-45.
- [18] 齐娅汝, 李远辉, 韩 丽, 等. 二至丸热风干燥动力学及干燥过程数学模拟研究 [J]. 中草药, 2017, 48(15): 3056-3063.
- [19] 中国药典 [S]. 四部. 2015.
- [20] 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.
- [21] 石新华, 李 原, 梁惟俊, 等. 妇宁丸微波干燥的正交试验研究 [J]. 时珍国医国药, 2013, 24(11): 2661-2663.
- [22] 王学成, 伍振峰, 王雅琪, 等. 中药丸剂干燥工艺、装备应用现状及问题分析 [J]. 中草药, 2016, 47(13): 2365-2372.
- [23] 李 赫, 张 志, 任 源, 等. 基于 FLUENT 的菊花热风干燥流场特性仿真分析 [J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 133-138.
- [24] 刘书成, 张常松, 张 良, 等. 超临界 CO₂ 干燥罗非鱼片的传质模型和数值模拟 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 236-242.
- [25] 王 亮, 周建伟, 邵澜媛, 等. 基于 COMSOL Multiphysics 的金枪鱼罐头热杀菌过程数值模拟 [J]. 中国食品学报, 2015, 15(3): 82-88.
- [26] 周建伟, 袁 剑, 王 亮, 等. 基于 COMSOL Multiphysics 模型的瓶装液态食品巴氏灭菌过程的数值模拟研究 [J]. 中国食品学报, 2015, 15(9): 158-164.
- [27] 李淑君, 王惠泉, 赵文玉, 等. 基于 COMSOL 多物理场耦合仿真建模方法研究 [J]. 机械工程与自动化, 2014(4): 19-20.
- [28] Torki-Harchegani M, Sadeghi M, Ghanbarian D, *et al.* Dehydration characteristics of whole lemons in a convective hot air dryer [J]. *Iran J Chem Chem Eng*, 2016, 35(3): 65-73.