

金银花提取液喷雾干燥过程的数值模拟

崔彭帝^{1,2}, 薛启隆^{1,2}, 程宇康^{1,2}, 刘新龙^{1,2}, 于洋^{1,2*}, 李正^{1,2,3*}

1. 天津中医药大学中药制药工程学院, 天津 301617

2. 省部共建组分中药国家重点实验室, 天津 301617

3. 现代中医药海河实验室, 天津 301617

摘要: **目的** 为了研究中草药喷雾干燥过程中干燥塔内的流场特性和颗粒的干燥行为, 以金银花提取液的喷雾干燥过程为例, 针对喷雾干燥塔建立了计算流体力学仿真模拟。**方法** 采用离散相模型计算液滴的干燥和运动过程, SST $k-\omega$ 湍流模型用于计算干燥塔中的瞬态流动, 并利用分布式光纤测温系统和最终产品特性实验结果对模型的准确性进行了验证。**结果** 温度场实验结果与模拟基本一致, 金银花粉的得粉率与平均粒径相对偏差在 5% 以内。对不同初始粒径的液滴进行分析, 干燥塔中的温度分布与液滴的干燥和运动特性密切相关。**结论** 建立的数值计算模型能够模拟喷雾干燥塔内的复杂气流模式和金银花提取液的干燥特性, 该模型能够用于工艺和设计优化, 提升中药制药过程质量控制的智能化程度。

关键词: 喷雾干燥; 金银花提取液; 计算流体力学; 液滴干燥过程; 温度场实验

中图分类号: R283.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2023)15-4832-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.15.008

Numerical simulation of spray drying process of *Lonicerae Japonicae Flos* extracts

CUI Peng-di^{1,2}, XUE Qi-long^{1,2}, CHENG Yu-kang^{1,2}, LIU Xin-long^{1,2}, YU Yang^{1,2}, LI Zheng^{1,2,3}

1. College of Pharmaceutical Engineering of Traditional Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

2. State Key Laboratory of component traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

3. Haihe Laboratory of Modern Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

Abstract: Objective In order to study the flow field characteristics and the drying behavior of particles in the drying tower during the spray drying process of traditional Chinese medicine, a computational fluid dynamics simulation was established for the spray drying tower with Jinyinhua (*Lonicerae Japonicae Flos*, LJF) extract as an example. **Methods** The discrete phase model (DPM) was used to calculate the drying and motion processes of droplets, and the SST $k-\omega$ turbulence model was applied to calculate the transient flow in the drying tower, and the accuracy of the model was verified by using the distributed fiber optic temperature measurement system and the experimental results of the final product characteristics. **Results** The experimental results of the temperature field were basically consistent with the simulation, and the relative deviation of the powder yield and the average particle size of LJF powder was within 5%. The droplets with different initial particle sizes were analyzed, and the temperature distribution in the drying tower was closely related to the drying and motion characteristics of the droplets. **Conclusion** The numerical calculation model established in this paper can simulate the complex airflow patterns and drying characteristics of LJF extract in spray drying towers, and the model can be used for process and design optimization to enhance the intelligence of quality control in the pharmaceutical process of Chinese medicine.

Key words: spray drying; *Lonicerae Japonicae Flos* extracts; computational fluid dynamics; droplets drying process; temperature field experiment

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(82074276); 国家中医药管理局创新团队与人才培养计划(ZYYCXTD-D-202002); 现代中医药海河实验室科研项目(22HHZYSS00003); 现代中医药海河实验室科研项目(22HHZYSS00009)

作者简介: 崔彭帝, 博士研究生, 研究方向为中药智能制造研究。E-mail: cuipengdi@icloud.com

*通信作者: 于洋, 副研究员, 研究方向为中药智能设备开发。E-mail: yuyang@tjutc.edu.cn

李正, 研究员, 研究方向为中药制药工程技术与产业转化。E-mail: lizheng@tjutc.edu.cn

喷雾干燥作为一种灵活、高精度和高效率的技术,目前已被广泛用于食品、医药和化工领域中^[1-3]。与其他干燥过程相比,喷雾干燥过程中粉末与热空气之间的接触时间更短,可以有效防止物料因加热时间过长而变性^[4]。尤其对于中药制药过程,粉体是一种非常重要的物料形式,如中药配方颗粒的所需要的中药浸膏粉往往通过喷雾干燥获得^[5]。但是由于中药种类及来源的复杂性,目前业界对中药喷雾干燥中产品质量形成与传递的规律认识不够清楚,导致质量控制不精准,缺乏基于模型预测的前馈控制与优化方法,喷雾干燥过程的工艺调整主要依赖经验^[6-7]。研究各工艺变量对粉末特性的影响需要进行实验室和中试试验,这需要消耗大量的时间和人力成本^[8-10]。

使用计算流体力学模拟对液滴与干燥空气之间的复杂相互作用、液滴与壁面相互作用以及液滴和干燥空气之间的传热传质过程进行研究,可以提高我们对干燥塔中喷雾干燥过程的理解^[11-12]。利用数值模拟能够得到实验中难以直接测量的数据,并预测实验过程中难以直接观察到的现象,这将有助于干燥塔的更有效的设计和的操作,并提高产品质量^[13]。目前,还没有关于中药喷雾干燥过程机理的研究,因为中药与化学药或生物药相比,不同之处在于中药材是天然来源的,受到种植条件及采收时间的影响,导致同一中药材的批次间差异性较大,从而造成生产过程中提取液的物性波动,不能通过简单的干燥动力学模型进行研究^[14-16]。本实验采用欧拉-拉格朗日框架对连续相和离散相进行模拟计算,建立了金银花提取液喷雾干燥计算流体力学模型。通过分布式光纤测温系统对干燥塔内的温度场模拟进行了验证,并分析了不同初始粒径液滴的运动和干燥特性,为解释中药提取液喷雾干燥机制和工艺参数优化提供理论参考。

1 仪器与材料

H-spray 5S 中试型喷雾干燥设备,天津市现代创新中药科技有限公司; Mastersizer 3000 型激光粒度仪,英国马尔文仪器有限公司; NKT Photonics 型分布式光纤测温系统,德国 LIOS Technology GmbH 公司。

金银花药材,河北省安国市腾跃药业有限公司,批号 211010,经天津中医药大学中药学院张丽娟教授鉴定为忍冬科忍冬属植物忍冬 *Lonicera japonica* Thunb. 的干燥花蕾或带初开的花。

2 方法

2.1 金银花提取液喷雾干燥实验

2.1.1 金银花提取液的制备 金银花药材通过冷凝回流方式进行提取,料液比 1 : 10 (金银花-水),提取 2 次。第 1 次提取时间为 2 h,第 2 次提取时间为 1.5 h。2 次提取结合使用旋转蒸发器进行浓缩,即得。

2.1.2 模型描述 金银花提取液喷雾干燥工艺流程图如图 1 所示。使用中试型喷雾干燥机进行实验,干燥空气被加热后由干燥塔顶部分风器进入塔内。金银花提取液通过蠕动泵进入双流体雾化喷嘴,被压缩气体分散小液滴喷入干燥塔。干燥热空气与液滴从塔顶并流向下流动,进行传热传质。干燥完成后,干燥空气和金银花颗粒在旋风分离器中完成气固分离。较大的颗粒将沉积在旋风分离器下的接收器中,极细的粉尘和空气被排出干燥塔。

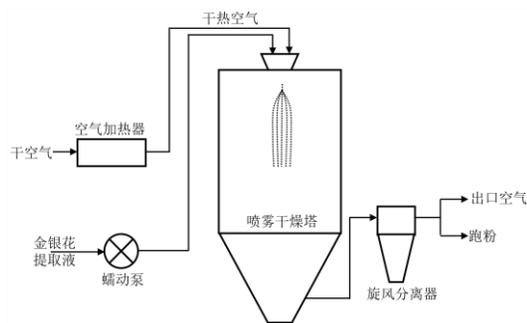


图 1 喷雾干燥工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of spray drying

2.2 喷雾干燥的计算流体力学模型

2.2.1 理论模型 在本研究中,使用欧拉-拉格朗日模型定义了相关的守恒方程^[17]。热空气和干燥的颗粒分别被视为连续相和分散相。

(1) 连续相控制方程: 在欧拉-拉格朗日框架中对连续相进行建模时,连续相的动量、能量和质量的平衡方程如下。

连续相方程表示为

$$\partial(\rho c) / \partial t + \nabla \cdot (\rho c U c) = \Gamma_{m,cd} \quad (1)$$

ρc 为连续相密度, t 为时间, $U c$ 为连续相速度矢量, $\Gamma_{m,cd}$ 为热空气与液滴相互作用产生的源项

动量方程表示为

$$\partial(\rho c u_i) / \partial t + \nabla \cdot (\rho c u_i u_j) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho c g + F_{cd} \quad (2)$$

u_i 、 u_j 为平均速度分量, p 为压力, g 为重力加速度, F_{cd} 为液滴与热空气的相互作用力, τ 是黏性应力张量

对于牛顿流体采用以下形式。

$$\tau = \mu_{eff} (\nabla u_i + \nabla u_j^T) \quad (3)$$

有效黏度 (μ_{eff}) 包括运动黏度 (μ) 和湍流黏度 (μ_t), 定义为 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ 。

能量守恒方程表示为

$$\partial(\rho c h_c) / \partial t + \nabla \cdot (\rho c U c h_c) - \nabla \cdot (k \nabla T_c) = \Gamma_{m,CD} h_c + Q_C + \Gamma_{e,CD} \quad (4)$$

k_t 为热导率, T_c 为连续相温度, Q_C 为连续相传热, $\Gamma_{e,CD}$ 为热空气与液滴的能量源项, h_c 为传热系数, 该系数是从 Ranz-Marshall 相关性获得的。

$$h_{cD} / k_{\infty} = 2.0 + 0.6 \text{Re}_D^{1/2} P_r^{1/3} \quad (5)$$

d_D 为液滴直径, k_{∞} 为连续相的导热系数, Re_D 基于粒子直径和相对速度的雷诺数, P_r 为连续相的普朗特数

物质守恒方程通过以下方式获得。

$$\partial(\rho c y_c) / \partial t + \nabla \cdot (U c y_c) - \nabla \cdot [\rho c D_c (\nabla y_c)] = \Gamma_{m,CD} \quad (6)$$

y_c 为气化相质量分数, D_c 为连续相扩散系数

湍流模型选用剪切应力传输 (SST) $k-\omega$ 模型。

$$\partial(\rho k) / \partial t + \partial(\rho k u_i) / \partial x_i = \partial / \partial x_j [(\mu + \mu_t / \sigma_k) \partial k / \partial x_j] + G_k - \beta' \rho k \omega \quad (7)$$

$$\partial(\rho \omega) / \partial t + \partial(\rho \omega u_i) / \partial x_i = \partial / \partial x_j [(\mu + \mu_t / \sigma_{\omega}) \partial \omega / \partial x_j] + G_{\omega} - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} 1 / \omega \partial k / \partial x_j \partial \omega / \partial x_j \quad (8)$$

k 为湍流动能, x_{ij} 为 x 、 y 方向上的单位向量, ω 为比耗散率, β 为热膨胀系数, G_k 代表产生的湍流动能, G_{ω} 代表 ω 的生成

模型常量包括:

$$\mu_t = \alpha^* \rho k / \omega \quad (9)$$

$\sigma_{k,1} = 2.0$, $\sigma_{\omega,1} = 2.0$, $\sigma_{k,2} = 1.0$, $\sigma_{\omega,2} = 1.168$, $\beta_{i,1} = 0.075$, $\beta_{i,2} = 0.082$

(2) 离散相控制方程: 在离散相模型中, 粒子的运动行为由力平衡方程计算得出。基于牛顿第 2 定律, 单粒子运动方程构建为

$$dU_D / dt = F_{CD}^{\text{drag}} (U_c - U_D) + g[(\rho_D - \rho_c) / \rho_D] \quad (10)$$

U_D 为颗粒/液滴的速度, ρ_D 为颗粒/液滴的密度, F_{CD}^{drag} 被定义为单粒子曳力函数, 并用于确定方程 (2) 中牛顿第 3 定律上离散相和连续相的相互作用

$$F_{CD}^{\text{drag}} = \sum 3 C_{\text{drag}} \rho_c (U_c - U_D)^2 \dot{m}_D \Delta t / 4 \rho_D d_D \quad (11)$$

\dot{m}_D 为颗粒/液滴变化的质量, 曳力系数 (C_{drag}) 定律由下式给出。

$$C_{\text{drag}} = a_1 + a_2 / \text{Re}_D + a_3 / \text{Re}_D^2 \quad (12)$$

其中 a_1 、 a_2 和 a_3 是依赖于粒子雷诺数的常数, 适用于粒子雷诺数, 范围 0~50 000

(3) 液滴干燥动力学: 每个液滴/颗粒内的内部传输现象由 Methericher 等^[18-19] 先前开发和验证的 2 级干燥动力学模型描述。含固体液滴的干燥过程分为 2 个干燥阶段: 在干燥的第 1 阶段与纯液体蒸发

类似。在第 2 个干燥阶段, 干燥速率由水分从颗粒湿核通过外壳孔向颗粒外表面扩散的速率控制。这个过程中湿颗粒的核心收缩, 颗粒外壳区域的厚度增加。由于对干燥塔内的液滴进行测量难度较大, 本研究使用激光粒度仪测定, 通过单液滴干燥实验反推得到液滴的初始粒径。

本实验采用特征干燥率曲线 (characteristic drying rate curve, CDC) 模型计算液滴的蒸发速率^[20]。CDC 方法基于 2 个不同干燥期的假设, 即恒定速率周期和下降速率周期。当外壳出现在液滴表面上时, 恒定速率周期结束。此时, 临界水分 (X_{cr}) 阻碍了下降速率周期中的水分去除过程。经验无量纲函数 f 根据颗粒水分含量 X 定义,

$$f = \begin{cases} 1 & X \geq X_{cr} \\ [(X - X_{eq}) / (X_{cr} - X_{eq})]^n & X \leq X_{cr} \end{cases} \quad (13)$$

根据课题组前期研究基础^[13], 参数 n 的推导值为 1.81。在计算模型中, X_{cr} 设置为 1.42。实验表明, 所有悬浮液滴的最终湿度接近于零, 因此, 假设方程 (1) 中的平衡湿度为 $X_{eq} = 0$ 。

根据方程 (6) 和方程 (13) 中, 传质方程用于模拟热空气条件下的单颗粒蒸发速率。

$$\Gamma_{m,CD} = dm / dt = A_D y_c k_c (C_s - C_{\infty}) f \quad (14)$$

通过将 Ranz-Marshall 相关性乘以经验函数 f 来考虑饲料配方的干燥动力学^[21], 即

$$k_c d_D / D_c = f(2 + 0.6 \text{Re}_D^{1/2} \text{Sc}^{1/3}) \quad (15)$$

为了确定两相之间传热所改变的能量, 可以用方程 (16) 计算单个粒子的内部能量方程。

$$m_{D,CD} dT_D / dt = h_c A_D (T_{\infty} - T_D) + h_v \dot{m}_D / dt \quad (16)$$

2.2.2 模型设置 在温度为 448 K 和绝对湿度为 2.93 g/kg 的干燥空气的情况下, 通过干燥塔顶部的中央圆形入口以相对于垂直轴 15° 的角度向干燥室提供预热的空气。进风速度为 6 m/s, 湍流动能为 0.043 2 m²/s², 比耗散速率等于 180.69 s⁻¹。液滴的喷射是通过在位于塔顶的压力喷嘴中雾化液体进料获得的。料液的组成为 85% 的水和 15% 的可溶性固形物。通过对喷雾过程进行拍照, 确定喷雾锥角为 30°。喷嘴出口处的液滴速度被指定为 65 m/s, 进料温度设置为 293 K。相应的喷雾流量等于 2.145 L/h。通过热平衡实验确定, 从干燥塔到环境的热损失参数为 1.3 W/(m²K)。干燥室出口管中的表压设置为 -100 Pa。

最初模拟空气以使用耦合求解器实现稳态, 随后注入粒子以达到稳定状态。仿真结果采用压力-速

度耦合算法求解。对动量、体积分数、湍流动力学和湍流耗散方程应用了二阶迎风格式。压力插值由PRESTO!求解 (Fluent 2021, ANSYS, 美国), 通过有限体积法来离散化流场, 然后使用离散连续平衡方程来计算交错控制单元的交错压力。

3 模拟结果分析

3.1 实验与模拟结果对比

将喷雾干燥的实测值与数值模型的计算结果进行比较, 从而验证模型的准确性。实验中发现从旋风分离器逃逸的颗粒几乎可以忽略不计, 计算旋风分离器下端收集到的颗粒与进料量之比得到得粉率, 平均粒径通过激光粒度仪获得, 数值模型通过统计出口的颗粒质量及粒径从而计算得到得粉率和平均粒径的模拟值。

如表 1 所示, 出口温度、得粉率和颗粒平均直径均在 5% 以内, 证明模拟结果与实际的喷雾干燥现象基本一致。本研究采用分布式光纤测温系统测定了干燥塔内的温度分布, 得到干燥塔 3 个高度处的温度分布, 如图 2 所示。分布式光纤测温系统的

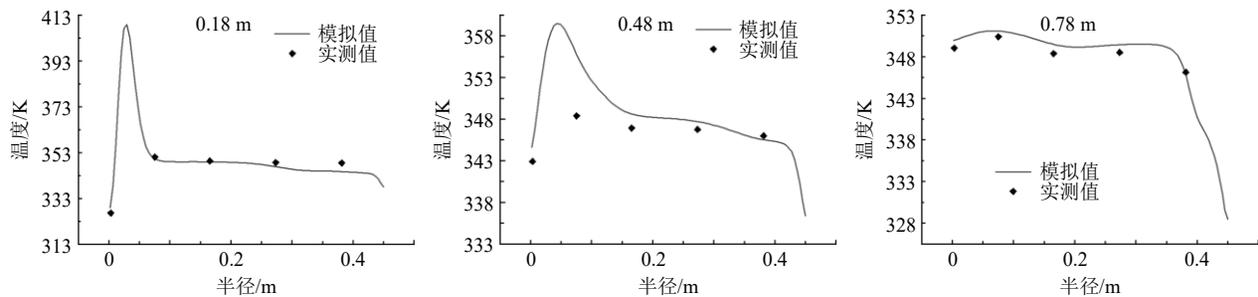


图 2 $H=0.18、0.48、0.78$ m 处模拟与实验喷雾干燥塔温度分布

Fig. 2 Simulation and experiment of temperature profile in spray drying tower at $H = 0.18, 0.48, 0.78$ m

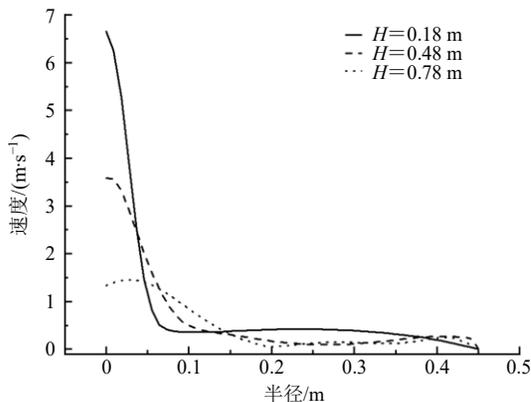


图 3 模拟喷雾干燥塔内速度分布

Fig. 3 Velocity profile in simulated spray drying tower

场补充。随着蒸发速率的变化, 空气温度和速度有明显的 irregular 分布。本课题组已经根据分布式光纤测量结果验证了数值模型的温度场, 然后可以合理

表 1 实验与模拟结果比较

Table 1 Comparison of experimental and simulation results

结果对比	出口温度/K	得粉率/%	颗粒平均直径/ μm
实验值	346.0	60.37	6.91
模拟值	349.6	58.54	7.21
相对偏差/%	1.04	3.03	4.34

测量精度为 0.15 m, 数值模型的计算精度 0.01 m, 因此测量节点之间的温度剧烈变化系统无法获得, 但是实验与模拟大部分区域的温度分布 (在 0.18、0.48、0.78 m 高度处) 趋势均较为接近。根据实验与模拟对比, 可以在一定程度上反映喷雾干燥塔内部液滴的传热传质过程。

图 3 为 YZ 平面不同高度处的空气速度分布。干燥塔中心的空气速度明显高于周围, 中心处越远离入口空气速度越低。

如图 4、5 所示, 在实验和模拟中, 动量、质量和能量传递方程之间存在相互作用关系。当热能被液滴蒸发带走时, 空气速度可以由周围的热空气流

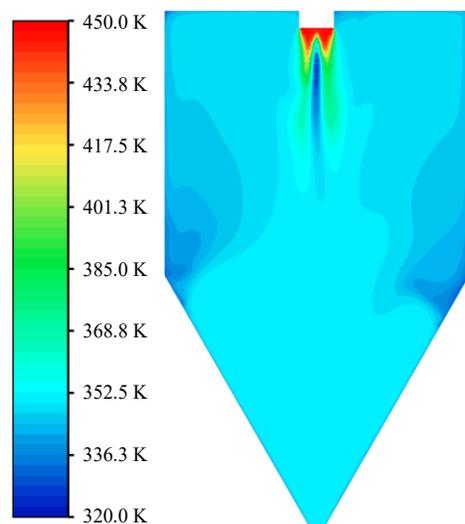


图 4 干燥塔内的温度分布云图

Fig. 4 Contours of temperature distribution in drying tower

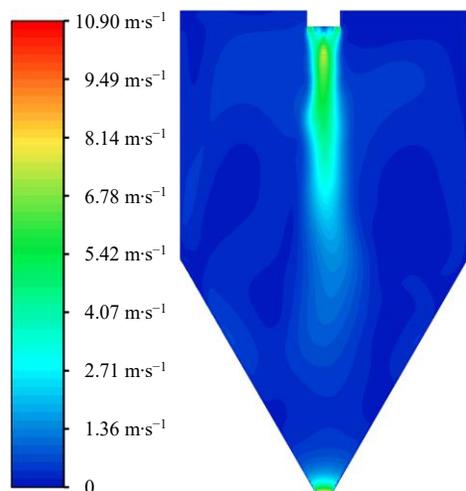


图5 干燥塔内的速度分布云图

Fig. 5 Contours of velocity distribution in drying tower

地认为模拟计算的速度场是可靠的^[22-23]。从图4和图5中可以看出,干燥塔的大部分区域具有几乎恒定的温度和速度。如图4所示,在塔的上部中心区域附近有一个低温区,周围有一个高温区,并且中心外部区域中的气流速度非常低。低温区为推断喷雾干燥过程中液滴的运动特性和相变位置提供了证据,这对于工艺优化和设备设计至关重要。

3.2 粒子干燥及运动特性分析

图6是随粒子停留时间变化的各尺寸粒子(初始粒径)的归一化速度分布图。所有注入液滴的初始速度相同。与较大的颗粒相比,较小的颗粒失去初始速度更快,因为较小的颗粒具有较小的质量,因此惯性较小,阻力的影响更大,因此较小的颗粒向下移动时减速更快。将颗粒的最小速度认定为最终下降速度,当粒子达到其最终下落速度时,它们

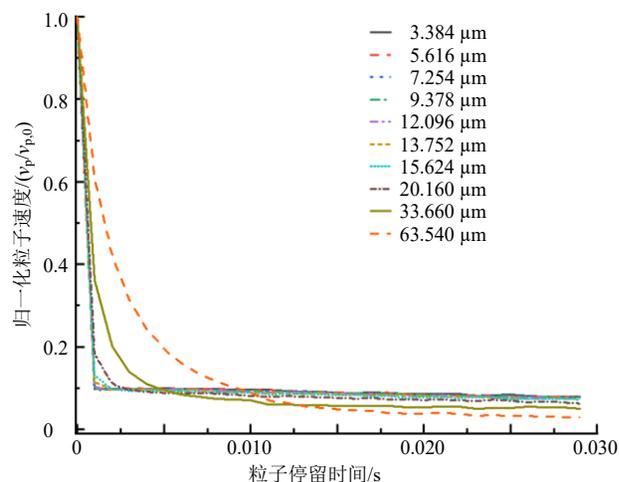


图6 不同尺寸的液滴/颗粒的速度分布

Fig. 6 Velocity profile of droplets/particles with different sizes

继续以该最终速度下落。与较大的颗粒相比,较小的颗粒具有较大的最终下落速度。考虑到粒子与壁面的碰撞和沉积作用,较小的粒子有更大的可能性在塔内壁沉积。

图7是不同颗粒尺寸随粒子停留时间的温度分布图。当液滴从雾化器喷射时,浆液液滴的初始温度达到甚至略高于湿球温度。在此阶段,较小的液滴表面发生的蒸发大于向液滴的热传递。因此较小尺寸的液滴,温度开始下降。较大尺寸的液滴初始阶段升温较慢,最终滴达到一个恒定湿球温度,随着粒子直径的增大,恒定湿球温度阶段也越长。在某一点之后,颗粒的温度开始快速上升。这是由于液滴表面形成了结壳。所有液滴尺寸都观察到这种趋势。与较大液滴尺寸相比,最小液滴的结壳形成时间要短得多。一旦结壳形成,液滴的水分损失率就会降低,导致与水分蒸发释放的热量相比,向液滴的热量传递更大。最小粒径(3.384 μm)迅速达到平衡温度,随后基本保存不变,较大的粒子达到平衡温度需要更长的时间,最终粒子保持不变证明粒子的中的水分已完全干燥。

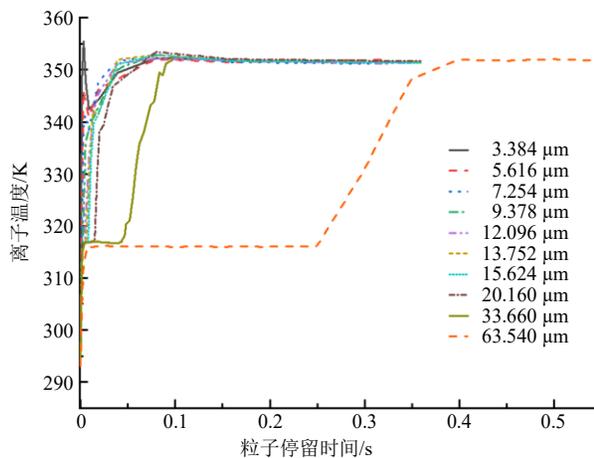


图7 不同尺寸的液滴/颗粒的温度分布

Fig. 7 Temperature profile of droplets/particles with different sizes

图8是不同尺寸粒子的传热系数图。较小尺寸的粒子(<20 μm)的传热系数在顶部最小,并随停留时间增大而减小。较大尺寸的粒子的传热系数先减小后增大,最后保持恒定。对于最小的液滴,传热系数的初始值最大,因为它与直径成反比。由于速度的快速下降,较小的粒子传热系数迅速增大,并最终随着粒子速度达到最终下降速度而变得恒定。与所有较大尺寸相比,较小粒子最终传热系数仍然是最高的,最大尺寸(63.540 μm)粒子的传热

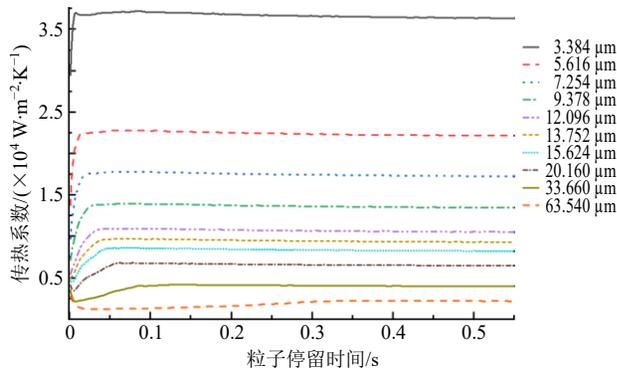


图 8 不同尺寸液滴/颗粒的传热系数分布图

Fig. 8 Heat transfer coefficient profile of droplets/particles with different sizes

系数最小。

图 9 是不同尺寸的液滴/颗粒的归一化含水率分布图。较小的颗粒比较大的颗粒损失水分更快，这是由于较小尺寸的较大的比面积。颗粒经历水分蒸发曲线的 3 个不同斜率，代表 2 个干燥阶段。这些在较大尺寸颗粒 (>20 μm) 的含水率变化中更明显。在第一阶段，含水率变化曲线的斜率几乎是线性的，对应于第 1 个阶段的恒速干燥阶段。含水率下降的速度随后变慢，这对应于液滴的第 2 个阶段的限速干燥阶段。最后当水分蒸发率随着颗粒水分含量接近零和温度接近气体温度而降低，因为该阶段颗粒和气体之间的温差作为蒸发的驱动力变小了。最终所有直径的颗粒在离开塔之前会失去所有水分。由于粒子表面有水分形成的水膜，水分快速蒸发，导致粒子直径在前期出现了明显降低，而干燥后期水分降低较慢，粒子直径变化较不明显，这与干燥的 2 个阶段的过程是类似的 (图 10)。

通过对干燥塔温度分布、速度分布与粒子速度、

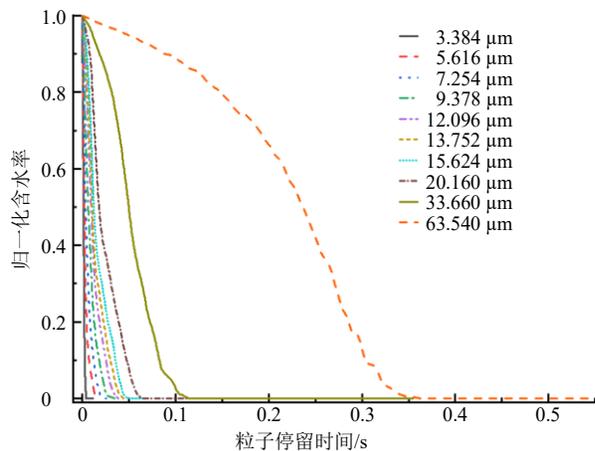


图 9 不同尺寸的液滴/颗粒含水率变化

Fig. 9 Moisture content change of droplets/particles with different sizes

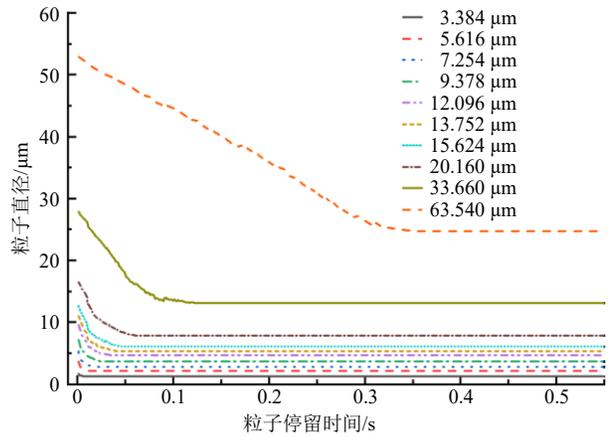


图 10 不同尺寸的液滴/颗粒直径变化

Fig. 10 Diameter change of droplets/particles with different sizes

温度、传热系数、含水率和直径的分析，发现干燥塔内的温度分布与液滴的干燥和运动特性密切相关。干燥塔中测得的温度与模拟一致，可以很好地解释干燥过程中液滴的变化。干燥塔中有 3 个不同的温度变化区，第 1 个是雾化区，由于蒸发去除水分，液滴尺寸也强烈收缩。水相变吸收大量热量，并且该区域的液滴温度上升得更慢。第 2 个区域处于液滴的第 2 个干燥干燥阶段，干燥速率由于液滴的表面结膜而降低，伴随着液滴表面温度的快速升高。最后当液滴完全干燥时，观察到温度和湿度水平稳定在干燥塔出口上方。粒子的初始粒径不同，其运动和干燥速度也不同，但是基本遵循相似的变化规律。

4 讨论

本实验建立了金银花提取液喷雾干燥数值模型，将干燥动力学纳入欧拉-拉格朗日模型，以计算干燥塔中的瞬态气流、传热和传质以及颗粒运动。模拟所得结果与实验数据基本一致，最大相对误差为 4.34%，证明了数值模型的准确性。在实验中使用分布式光纤测温系统测量了干燥塔的温度场，干燥塔内温度分布的模拟和实验证明了干燥塔上部存在一个低温区，粒子在此区域发生剧烈的传质传热反应。通过对不同初始粒径的速度、温度、传热系数、含水率和直径的分析，分析了液滴的蒸发和运动特性。本实验建立的数值计算模型模拟了喷雾干燥塔内的复杂气流模式和中药提取物喷雾的干燥历史，与普通建模方法相比，数值计算模型可以基于产品质量和投料物性快速优化生产工艺，减低试错成本，未来可以用于中药生产设备和工艺的优化。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Lang E, Sant'Ana A S. Microbial contaminants in powdered infant formula: What is the impact of spray-drying on microbial inactivation? [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2021, 42: 195-202.
- [2] Pinto J T, Faulhammer E, Dieplinger J, et al. Progress in spray-drying of protein pharmaceuticals: Literature analysis of trends in formulation and process attributes [J]. *Dry Technol*, 2021, 39(11): 1415-1446.
- [3] Schappo H, Giry K, Damia C, et al. Screening method for producing suitable spray-dried HA powder for SLS application [J]. *Powder Technol*, 2021, 384: 62-69.
- [4] Zbicinski I. Modeling and scaling up of industrial spray dryers: A review [J]. *J Chem Eng Japan*, 2017, 50(10): 757-767.
- [5] 戴胜云, 杨茂蕊, 李文静, 等. 喷雾干燥在中药粉体研究中的应用进展 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2022, 28(14): 200-208.
- [6] 于洋, 苗坤宏, 李正. 基于数字孪生的中药智能制造关键技术 [J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(9): 2350-2355.
- [7] 司梦兰, 王璧璇, 缪培琪, 等. 基于数据驱动的过程智能优化技术研究现状及其在中药先进制药中的应用展望 [J]. *天津中医药大学学报*, 2020, 39(5): 485-492.
- [8] 陈江平, 梁志毅, 施文婷, 等. 基于质量源于设计理念的麦门冬汤提取液喷雾干燥工艺研究 [J]. *广东药科大学学报*, 2021, 37(2): 11-17.
- [9] 韩星星, 孟治平, 陈轩宇, 等. 基于水动力学尺寸调控中药多组分喷干粉的表面组成: 以多糖和蛋白二元体系为例 [J]. *中草药*, 2021, 52(4): 962-975.
- [10] 徐梦豪, 王丽, 秦磊, 等. 阿胶速溶粉喷雾干燥制备工艺优化 [J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(2): 94-101.
- [11] Poozesh S, Karam M, Akafuah N, et al. Integrating a model predictive control into a spray dryer simulator for a closed-loop control strategy [J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2021, 170: 121010.
- [12] Hussain F, Jaskulski M, Piatkowski M, et al. CFD simulation of agglomeration and coalescence in spray dryer [J]. *Chem Eng Sci*, 2022, 247: 117064.
- [13] Cui P D, Yu Y, Xue Q L, et al. Numerical simulation and optimization of *Lonicerae Japonicae Flos* extract spray drying process based on temperature field verification and deep reinforcement learning [J]. *J Food Eng*, 2023, 345: 111425.
- [14] 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.
- [15] 苗坤宏, 崔彭帝, 薛启隆, 等. 金银花颗粒在旋风分离器中的流场数值模拟分析 [J]. *中草药*, 2023, 54(4): 1087-1097.
- [16] Cui P D, Yu Y, Zhao J et al. Hyperspectral imaging combined with artificial intelligence techniques to explore the drying behavior of natural *Lonicerae Japonicae Flos* extracts [J]. *Measurement*, 2023, 218: 113246.
- [17] Jamil Ur Rahman U, Pozarlik A K. Numerical study and experimental validation of skim milk drying in a process intensified counter flow spray dryer [J]. *Energies*, 2021, 14(16): 4974.
- [18] Mezhericher M, Levy A, Borde I. Theoretical drying model of single droplets containing insoluble or dissolved solids [J]. *Dry Technol*, 2007, 25(6): 1025-1032.
- [19] Mezhericher M, Levy A, Borde I. Modelling of particle breakage during drying [J]. *Chem Eng Process*, 2008, 47(8): 1404-1411.
- [20] Che L M, Wu Y F, Wang Y, et al. Experimental determination and mathematical modeling of the drying kinetics of a single droplet of colloidal silica [J]. *Dry Technol*, 2017, 35(11): 1337-1346.
- [21] Benavides-Morán A, Cubillos A, Gómez A. Spray drying experiments and CFD simulation of guava juice formulation [J]. *Dry Technol*, 2021, 39(4): 450-465.
- [22] Polanczyk A, Wawrzyniak P, Zbicinski I. CFD analysis of dust explosion relief system in the counter-current industrial spray drying tower [J]. *Dry Technol*, 2013, 31(8): 881-890.
- [23] Mezhericher M, Levy A, Borde I. Three-dimensional spray-drying model based on comprehensive formulation of drying kinetics [J]. *Dry Technol*, 2012, 30(11/12): 1256-1273.

[责任编辑 郑礼胜]