

基于 Pielou 指数的油茶籽平板烘干机 干燥过程中含水率均匀性优化

徐顺生^{1,2}, 沈冲¹, 于东港¹, 王京¹

(1. 湘潭大学机械工程学院, 湖南湘潭 411105; 2. 中南大学能源科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要:为改善油茶籽平板烘干机烘干效率低、烘干不均匀等问题,在计算流体力学的理论基础上,建立了多孔介质内部热湿耦合模型,编写 UDF 程序,利用 FLUENT 软件模拟并试验验证了该模型的可靠性。引入传统含水率均匀性指数(M_u),与基于 Pielou 指数的含水率均匀性指数(J_{sw})相互对照验证。通过仿真计算研究了烘干机结构、进风角度及运行参数对干燥后油茶籽含水率及其均匀性的影响。结果表明: M_u 与 J_{sw} 都可作为含湿多孔介质材料含水率均匀性评价指标;中部进风两侧出风结构的烘干机相较于原结构烘干机平均含水率下降,含水率均匀性大大提高;当进风角度向下偏转 30° 、热风风速为 5 m/s 、热风温度为 80°C 、加热平板温度为 85°C 时,油茶籽含水率相较于原结构烘干机从 7.94% 降至 4.76% , J_{sw} 由 25.5% 提高至 83.2% 。通过基于 Pielou 指数的油茶籽平板烘干机干燥过程中含水率均匀性优化,烘干效率和烘干均匀性均明显提高。

关键词:油茶籽;平板烘干机;热湿耦合;UDF;数值模拟;Pielou 指数;含水率均匀性

中图分类号:TS223;TS222.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)04-0132-08

Optimization of moisture content uniformity in the drying process of oil – tea camellia seed plate dryer based on Pielou index

XU Shunsheng^{1,2}, SHEN Chong¹, YU Donggang¹, WANG Jing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To improve the problems of low drying efficiency and uneven drying of oil – tea camellia seed plate dryer, based on the computational fluid dynamics, a heat moisture coupling model in porous media was established, UDF program was written and the reliability of the model was verified by FLUENT software simulation and experiments. The traditional moisture content evenness index M_u was introduced and compared with the moisture content evenness index J_{sw} proposed on the basis of Pielou index. Through simulation calculation, the effects of dryer structures, air inlet angles and operating parameters on the moisture content of oil – tea camellia seeds and its uniformity after drying were studied. The results showed that both M_u and J_{sw} could be used as evaluation indexes of moisture content uniformity of materials such as wet porous media. The average moisture content of the dryer with air inlet in the middle and air outlet on both sides of the air duct was lower than that of the dryer with the original structure, and the uniformity of moisture content was greatly improved. When the air inlet angle was deflected downward by 30° , the hot air speed was 5 m/s , the hot air temperature was 80°C and the heating plate temperature was 85°C , the

moisture content of oil – tea camellia seeds was reduced from 7.94% to 4.76% compared with the original structure dryer, and J_{sw} increased from 25.5% to 83.2% . Through the optimization of moisture content uniformity in the drying process of oil – tea camellia seed plate dryer based on Pielou index, the drying efficiency and uniformity are significantly improved.

收稿日期:2022-02-28;修回日期:2022-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51976054);湘潭市科技计划项目(CG-YB20201006)

作者简介:徐顺生(1963),男,副教授,硕士,研究方向为热工过程仿真与优化(E-mail)787749816@qq.com。

通信作者:沈冲,硕士(E-mail)shenchong1@outlook.com。

Key words: oil - tea camellia seed; plate dryer; heat moisture coupling; UDF; numerical simulation; Pielou index; moisture content uniformity

近年来,我国油茶产业迅速发展,油茶种植和加工产业规模不断扩大,对油茶籽油的质量要求也不断提高,因此油茶籽须进行规模化集中处理^[1]。油茶籽平板烘干机是大批量生产用的干燥设备,干燥过程中,油茶籽通过上料装置均匀地平铺在通有导热油的加热平板上,同时烘干机内通有热风,使油茶籽内水分汽化蒸发。然而油茶籽平板烘干机存在干燥不均匀的情况,从而导致干燥速率下降,甚至影响出油率和油品质量。造成干燥不均匀的因素有很多,包括烘干机结构,加热平板温度,以及风向、风温、风速等热风参数。

多年来,人们对烘干设备、烘干工艺进行了许多研究^[2-5]。早期多为各种干燥试验的研究,如:郝立群^[6]通过试验研究认为工艺结构、风速和物料层厚度是影响干燥后玉米水分不均匀性的主要因素;张仲欣等^[7]通过试验研究讨论了通风量、物料堆积厚度和物料层长度对循环式烘干机内气流分布均匀性的影响规律;Beigi等^[8]研究了干燥气体温度和流量对稻谷能量参数的影响,调整了稻谷深床干燥过程中气体温度和流量参数,改善了干燥性能。然而在烘干机工作状态下准确且全面地得到其运行参数是非常困难的,而数值计算方法可以建立热、质传递模型,对烘干机结构及运行参数进行调整,可预测不同条件下的流场及物料烘干情况。赵金红等^[9]利用FLUENT软件对多层烘干机内风速场进行了数值模拟和试验验证,结果表明,用数值模拟的方法对多层烘干机内的风速场进行研究是可行的。Rao等^[10]建立了以质量、能量守恒定律作为基本理论的谷物动态恒流干燥数学模型。李奇等^[11]运用热传导的数学理论公式对平板烘干机传热及物料脱水过程进行推导,为模拟分析提供理论指导。耿铁等^[12]运用计算流体力学软件(CFD)研究了不同热风参数对物料烘干的影响,建立了同时传热传质的数学模型,用以预测物料含水率及温度,结果表明,该模型预测数据与试验数据基本一致。

经过干燥后,物料含水率均匀性研究是提高烘干机能效、提升烘干物料品质的重要课题。国内外学者针对烘干机干燥过程含水率均匀性进行了大量的试验和模拟,但大部分都以温度场和流场作为均匀性分析的间接依据。此外针对含湿多孔介质的含水率均匀性评价指标也鲜有研究。本文在热湿耦合条件下,运用多孔介质模型结合自定义函数来模拟物料水分

迁移过程,计算出传统含水率均匀性指数与基于Pielou指数的含水率均匀性指数,通过仿真研究了烘干机结构、进风角度及运行参数对干燥后油茶籽含水率及其均匀性的影响,以期提高油茶籽烘干机干燥效率和油茶籽油质量。

1 模型与计算方法

1.1 数学模型

根据油茶籽平板烘干机的烘干过程,建立多层平板烘干机内物料的热湿传递模型,为简化建模,进行了以下的合理假设:假设流体为不可压缩流体,气体黏性系数为常数;油茶籽层采用多孔介质模型,用孔隙率和平均直径描述颗粒性质;为简化计算,忽略烘干机内部传动结构对箱内流场的影响。

1.1.1 基本控制方程

粮食等物料干燥过程模拟遵守质量、动量、能量守恒定律,其基本控制方程见公式(1)。

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + S \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³; φ 为所求变量的通用形式; u 、 v 、 w 分别为3个方向上的速度分量,m/s; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项; t 为时间,s。

油茶籽内水分的汽化、蒸发实质上是热量的转换和传递^[13],因此要研究油茶籽层中热湿耦合传递规律,则必须研究控制方程中的能量方程^[14]。结合干燥过程,油茶籽层中表示能量的控制方程见公式(2)。

$$\left[\rho_a \varepsilon c_a + \rho_s (1 - \varepsilon) \left(c_g + c_w W + \frac{\partial H_w}{\partial T}\right)\right] \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \nabla \cdot (\rho_a \mu T) = k_{\text{eff}} \nabla^2 T + S_h \quad (2)$$

式中: ρ_a 为空气密度,kg/m³; ε 为物料孔隙率; c_a 、 c_g 、 c_w 分别为空气、油茶籽和水分的比热容,kJ/(kg·K); ρ_s 为油茶籽干基密度,kg/m³; W 为油茶籽初始含水率; H_w 为物料吸湿的总热量,J/kg; ∇ 为Del算子; T 为气体温度,℃; μ 为气体动力黏度,Pa·s; k_{eff} 为物料的传热系数,W/(m·K); S_h 为油茶籽吸附或解吸附水分时产生的热源项,W/m³。

在油茶籽干燥过程中,FLUENT软件基础运算所缺少的部分为热源项 S_h ,因此需要把热源项公式编入UDF程序,在干燥运算中进行加载,热源项计算见公式(3)。

$$S_h = -h_s(1 - \varepsilon)\rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \quad (3)$$

式中： h_s 为油茶籽颗粒水分吸附热，J/kg。

1.1.2 水分迁移方程

在油茶籽干燥过程中，空气湿度和油茶籽含水率一直都是在改变的，模拟湿度的改变需要公式来进行计算，而 FLUENT 软件基础计算中无法直接求解含湿量，所以需要 UDS 增加自定义的湿度标量，并结合 FLUENT 软件中的控制方程对湿度进行求解。油茶籽干燥过程中的 UDS 方程见公式(4)。

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u} w) = \nabla \cdot (\rho_a D_{\text{eff}} \nabla \cdot w) + S_w \quad (4)$$

式中： w 为空气含湿量； \vec{u} 为空气通过颗粒的表面速度或达西速度，m/s； D_{eff} 为水蒸气通过油茶籽层的扩散系数； S_w 为油茶籽吸附或解吸附水分产生的水分源项，kg/(s·m³)。

有关研究表明，水蒸气通过油茶籽层的扩散系数(D_{eff})是0.233 D_v ，其中 D_v 是水在空气中分子扩散系数^[15]。水分源项(S_w)按公式(5)计算。

$$S_w = -(1 - \varepsilon)\rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \quad (5)$$

将上述表达式归纳总结，编写 UDF 程序，载入 FLUENT 软件中计算，即实现了干燥过程中的热量及湿度传递，使得模拟更加贴合实际。

1.1.3 多孔介质模型

将油茶籽层视为含湿多孔介质，将热风通过孔隙对物料进行干燥时看作多孔介质内的流动。通过在动量方程的后面添加动量方程源项构成多孔介质模型，动量方程源项分为黏性损失项和惯性损失项。对于各项同性的多孔介质(油茶籽层适用)，该源项(S_u)可用公式(6)表示。

$$S_u = \left(-\frac{\mu}{\alpha} u_i\right) + \left(-C \frac{1}{2} \rho |u_i| u_i\right) \quad (6)$$

式中： μ 为流体黏度； u_i 表示*i*方向上的速度分量； $1/\alpha$ 为黏性阻力系数； C 为惯性阻力系数。

$1/\alpha$ 和 C 分别根据公式(7)和公式(8)计算。

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150(1 - \varepsilon)^2}{D_b^2 \varepsilon^3} \quad (7)$$

$$C = \frac{3.5(1 - \varepsilon)}{D_b \varepsilon^3} \quad (8)$$

式中： D_b 为颗粒的平均直径。

1.1.4 含水率均匀性指数计算

传统含水率均匀性指数用 M_u 表示，其按公式(9)计算。

$$M_u = \sqrt{\frac{\sum (M_i - M_{\text{avg}})^2}{M_{\text{avg}}}} \quad (9)$$

式中： M_i 表示在物料层中每个测量点在同一时间下的含水率； M_{avg} 表示物料层上所有测量点的算术平均值。

M_u 越接近于0， M_i 就越接近 M_{avg} ，即每个测量点的温度和整体平均温度接近，说明烘干机内物料水分越均匀。

Pielou 指数属于生物学范畴，是指群落中生物种类增多代表群落的复杂程度增高^[13]。基于 Pielou 指数的含水率均匀性指数用 J_{sw} 表示，其数值越接近1，说明均匀性越高。 J_{sw} 按公式(10)计算。

$$J_{\text{sw}} = \frac{N}{\ln N} \quad (10)$$

式中： N 表示实测多样性值； $\ln N$ 表示最大多样性值。

N 根据公式(11)计算。

$$N = -\sum \left[\frac{P_i}{P} \ln \left(\frac{P_i}{P} \right) \right] \quad (11)$$

式中： P_i 表示含水率属于第*i*种的个体比例，这里以0.3%为间隔将含水率进行划分； P 表示以含水率进行划分的种类总数。

1.2 物理模型与网格划分

1.2.1 物理模型

本文主要研究烘干机结构及运行参数对油茶籽干燥效果的影响，基于前述对平板烘干机的假设与简化，建立的原始结构烘干机模型如图1所示。烘干机箱体为6 m×2.3 m×1.4 m；加热平板长5.7 m，宽2.2 m，厚度80 mm，每层的间距170 mm，共5层。

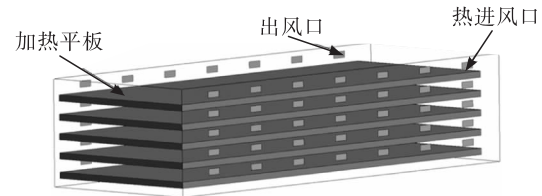


图1 原始结构烘干机模型

1.2.2 网格划分

采用 ICEM 软件划分网格，主要为结构化六面体网格单元，对物料层区域进行了加密处理，生成的网格如图2所示。经网格无关性验证，最终选取网格数量为147万的网格模型。

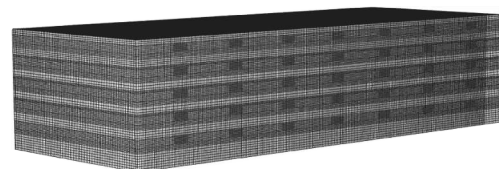


图2 烘干机网格模型

1.3 数值方法

基于平板烘干机内部结构,层间距离短,而横向距离长,必然会存在大量涡旋。考虑到计算成本与模拟精度,选用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,在近壁处理时选用标准壁面函数法;利用 UDF 宏和 C 语言函数库对多孔介质内部热湿耦合模型进行编译,然后选用编译模式加载 UDF 进行计算,获得油茶籽干燥后的含水率分布。

仿真边界条件通过测试与合理假设确定。具体如下:热风入口和出口边界条件分别设置为速度入口和压力出口,热风速度 6 m/s,热风温度 70℃,加热平板设置为定温(80℃)无滑移壁面。环境温度和油茶籽的初始温度均为 20℃,油茶籽层厚度为 60 mm,油茶籽物性参数见表 1。

采用压力求解器的 Simple 算法计算流场,相关模型参数和各项松弛系数取默认设置值,选择一阶迎风格式对基本方程进行离散。

表 1 油茶籽物性参数

物性参数	指标
油茶籽初始含水率/%	16.3
油茶籽密度/(kg/m ³)	530
油茶籽比热容/(kJ/(kg·K))	1 425
油茶籽传热系数/(W/(m·K))	0.146
孔隙率/(m ³ /m ³)	0.395

2 模拟验证及仿真结果

2.1 模型验证

为验证仿真结果的正确性,采用与模拟计算时相同的初始条件(热风风速 6 m/s,热风温度 70℃,加热平板温度 80℃)对油茶籽进行 3 次 1 h 的干燥试验。干燥结束后,对烘干机顶层 y 为 0.8 m 处油茶籽取样测定含水率,6 个测点均置于油茶籽层厚度方向 30 mm 处,即中间位置。使用卤素水分测试仪测定油茶籽含水率,取 3 次测量数据的平均值。模拟结果与试验测量结果见图 3。

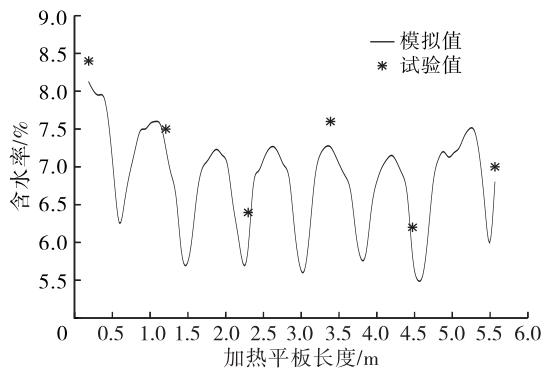


图 3 模拟结果与试验测量结果

由图 3 可知:试验值略高于模拟值,但误差皆在 10% 以内,造成误差的主要原因为忽略了烘干机内

机械结构对流场的影响以及油茶籽取样时位置存在误差。

2.2 烘干机结构优化

2.2.1 原始结构烘干机含水率分析

由于烘干机加热平板之间的间距一致,且机械结构与风口布置一致,故在本文中仅分析顶层含水率。图 4 为原始结构烘干机油茶籽含水率。由图 4 可知:越靠近热风入口处($y=0.1 \sim 0.8$ m),油茶籽含水率越低,且受气流影响较大,含水率波动较大;远离入口后,气流速度减小,故含水率逐渐升高,含水率波动减小。但 2.2 m 处含水率反而低于 1.5 m 处,这是由于 2.2 m 处靠近热风出口,气流速度较快,故油茶籽含水率较低。

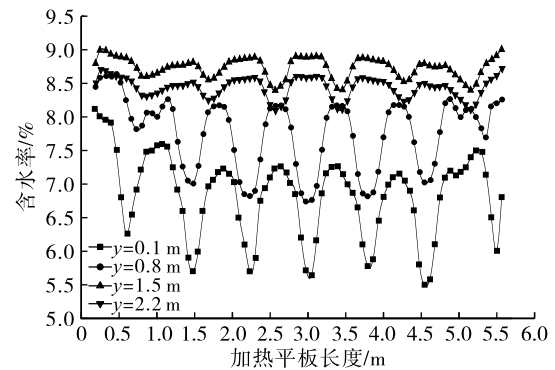


图 4 原始结构烘干机油茶籽含水率

2.2.2 中部进风两侧出风结构烘干机含水率分析

图 5 为中部进风两侧出风结构的烘干机物理模型。在烘干机每层中部布置一根长风管,悬挂在料层上方,风管两侧各开有 8 个长方形(200 mm × 60 mm)热风入口。出风口(200 mm × 80 mm)仍布置在烘干机外壁,每层两侧各 4 个。

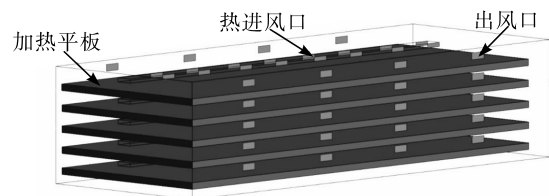


图 5 中部进风两侧出风结构的烘干机模型

由于该烘干机结构对称,故只分析其中一侧。图 6 为中部进风两侧出风结构烘干机油茶籽含水率。由图 6 可知,靠近出风口处($y=2.2$ m)含水率低于靠近热风入口处($y=1.5$ m),且与原始结构烘干机油茶籽的含水率分布不同,其原因是风管悬挂在物料层上方,热风没有吹到靠近入口处的油茶籽表面,导致越靠近入口处,油茶籽含水率越高。两端油茶籽含水率较高,这是由于两端的热风无法吹到加热平板长度方向上边缘处的油茶籽。

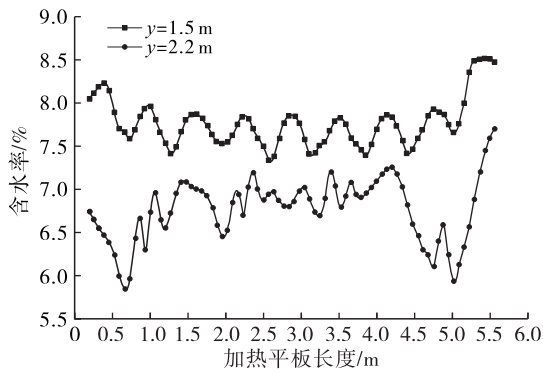


图6 中部进风两侧出风结构烘干机油茶籽含水率

图7为两种不同结构烘干机油茶籽平均含水率与含水率均匀性指数。由图7可知:中部进风两侧出风结构烘干机油茶籽的平均含水率相较于原始结构烘干机下降了0.65个百分点,基于Pielou指数的含水率均匀性指数(J_{sw})从25.5%提高到54.8%。这是因为热风在中部进风两侧出风结构的烘干机内行程较短,气流衰减速度较小,含水率沿加热平板宽度方向分布变化减小。故选择中部进风两侧出风结构的烘干机。

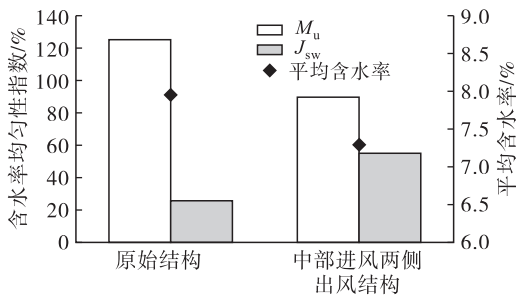
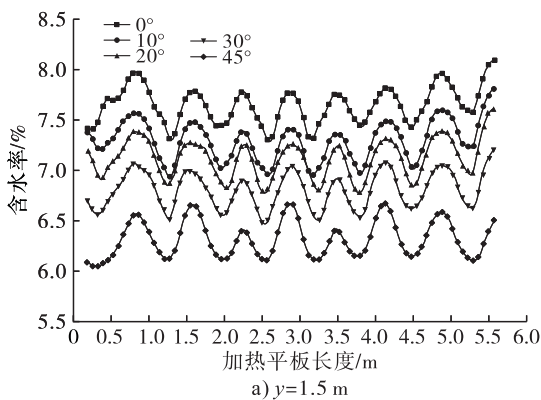


图7 不同结构烘干机平均含水率与含水率均匀性指数



2.2.3 进风角度对含水率及其均匀性的影响

烘干机进风口与偏转风向示意图见图8。改变进风角度需在进风口安装定制尺寸的井字形导风板。为降低两端油茶籽含水率,先将置于两端的4个热风出口,分别向外偏转30°,如箭头所示,然后研究热风入口向下偏转角度对含水率的影响。

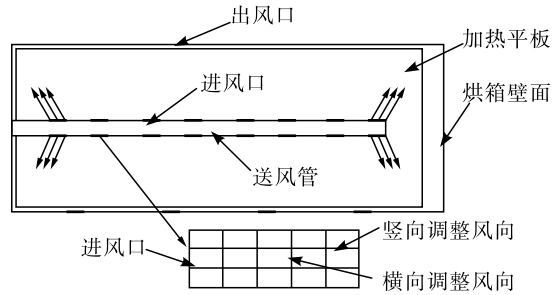


图8 进风口与偏转风向示意图

图9为不同进风角度下的油茶籽含水率。由图9可知,将两端的热风出口向外偏转后,两端油茶籽含水率明显降低。随着热风入口向下偏转角度的增加,1.5 m处油茶籽的含水率越低,而2.2 m处含水率则呈总体升高的趋势,其原因是向下偏转的角度越大,热风则越早与油茶籽层接触,但同时气流衰减速度也越快,导致靠近热风入口处的油茶籽含水率降低,而靠近出风口处的油茶籽含水率升高。由图9b可知,2.2 m处油茶籽含水率分布比较混乱,波动较大,其原因是2.2 m处靠近出风口,且出风口与热风入口数量不一致,气流分布不均匀。

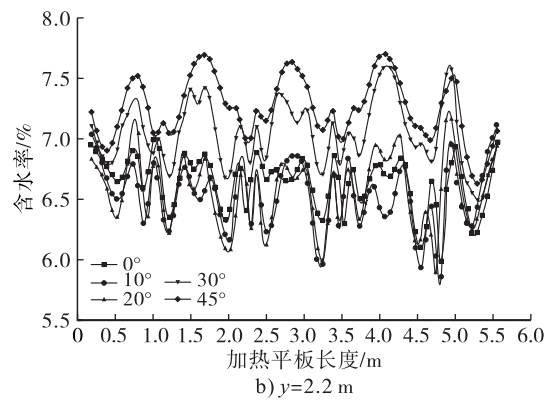


图9 不同进风角度下的油茶籽含水率

图10为不同进风角度下油茶籽平均含水率与含水率均匀性指数。由图10可知:0°~30°时随着进风角度逐渐增大,油茶籽平均含水率下降, J_{sw} 升高;进风角度45°时油茶籽平均含水率升高, J_{sw} 降

低,其原因是气流过早与油茶籽层接触,导致气流速度下降过大。综合对比后,当热风进口向下偏转30°时,油茶籽平均含水率最低且含水率均匀性最高。

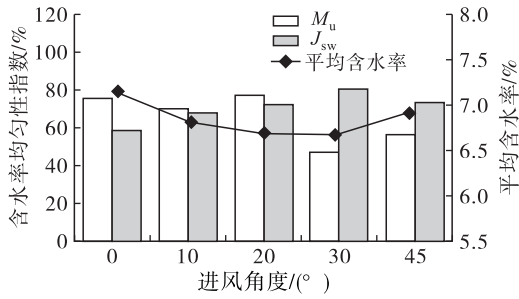


图10 不同进风角度下油茶籽平均含水率与含水率均匀性指数

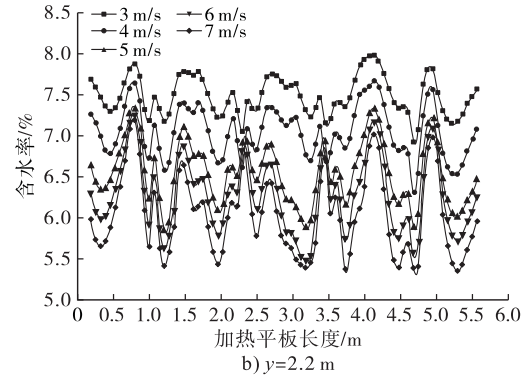
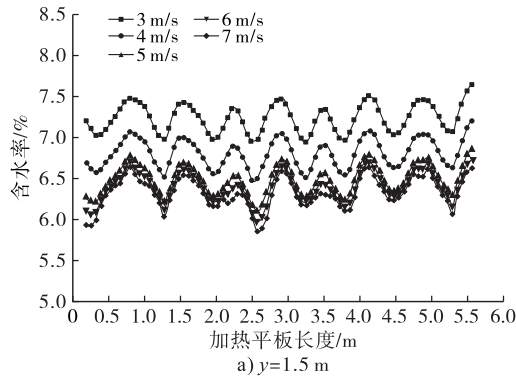


图11 不同热风风速下的油茶籽含水率

由图11可知:随着热风风速增加,油茶籽含水率降低,当热风风速达到5 m/s后,继续增加热风风速油茶籽含水率下降幅度减小,其原因是在中部进风的烘干机内部热风行程较短,当热风风速过快时,反而会带走经过平板加热后油茶籽内的热量,不利于油茶籽升温,进而导致烘干效率降低。由图11b可知,随着热风风速增加,靠近出风口处的油茶籽含水率波动也越来越大,含水率分布不均匀。

图12为不同热风风速下油茶籽平均含水率与含水率均匀性指数。由图12可知,随着热风风速的增加,油茶籽平均含水率逐渐下降,当热风风速达到5 m/s后,平均含水率下降速度变缓。热风风速为3~6 m/s时, J_{sw} 逐渐提高,但当热风风速为7 m/s时, J_{sw} 下降,其原因是热风风速过高时会导致靠近出风口处的气流分布不均匀。当热风风速分别为5 m/s与6 m/s时,

由图7与图10可知: J_{sw} 与 M_u 相差越大,干燥后的油茶籽含水率均匀性则越高;且 J_{sw} 与 M_u 的变化趋势基本相反,即 J_{sw} 越高, M_u 越低,可以证明 J_{sw} 与 M_u 都可作为多孔介质材料含水率均匀性评价指标。

2.3 烘干机主要运行参数优化

2.3.1 热风风速对油茶籽含水率及其均匀性的影响

在加热平板温度80℃,热风温度70℃,热风风速分别为3、4、5、6、7 m/s,其他初始条件相同的条件下,考察热风风速对油茶籽含水率的影响,结果见图11。

平均含水率仅相差0.12个百分点,且 J_{sw} 基本一致,为满足低能耗的要求,选择热风风速5 m/s时为最佳工况。

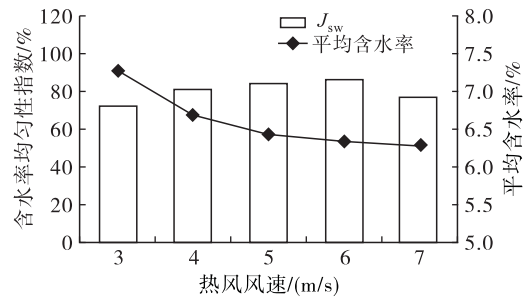


图12 不同热风风速下油茶籽平均含水率与含水率均匀性指数

2.3.2 热风温度对油茶籽含水率及其均匀性的影响

在加热平板温度80℃,热风风速5 m/s,热风温度分别为60、65、70、75、80℃,其他初始条件相同的条件下,考察热风温度对油茶籽含水率的影响,结果见图13。

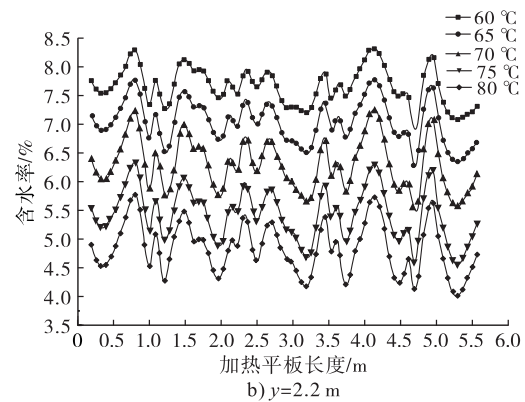
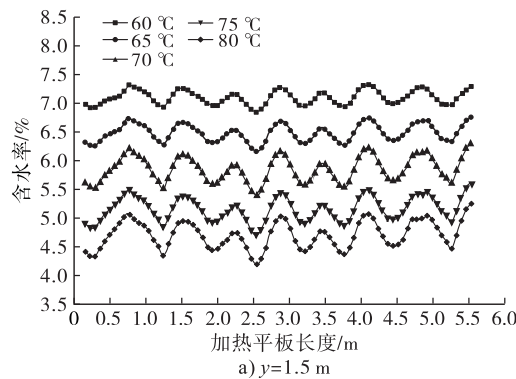


图13 不同热风温度下的油茶籽含水率

由图 13 可知,随着热风温度升高,油茶籽含水率均匀下降,且含水率波动几乎一致。

图 14 为不同热风温度下油茶籽平均含水率与含水率均匀性指数。由图 14 可知,随着热风温度升高,油茶籽平均含水率均匀降低,且 J_{sw} 基本一致。当油茶籽平均含水率降低至 5% 时,可满足油茶籽“蒸香”的榨油标准,故选取热风温度 80 °C 为最佳工况。

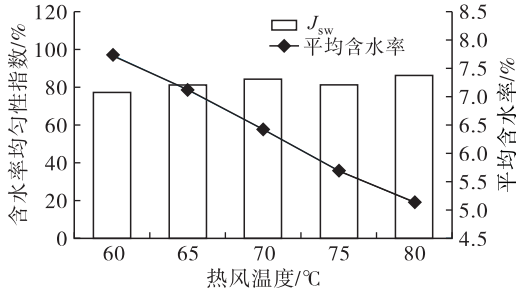
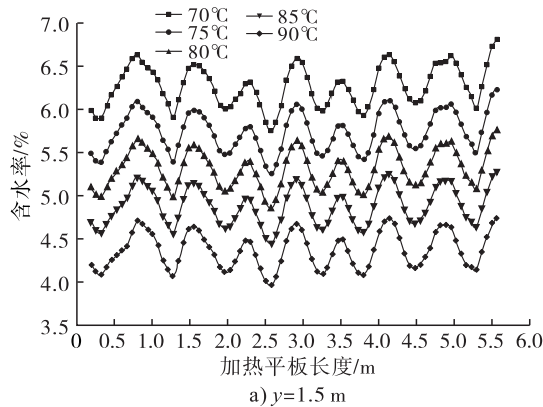


图 14 不同热风温度下油茶籽平均含水率与含水率均匀性指数

2.3.3 加热平板温度对油茶籽含水率及其均匀性的影响

在热风风速 5 m/s,热风温度 80 °C,加热平板温



度分别为 70、75、80、85、90 °C,其他初始条件相同的条件下,考察加热平板温度对油茶籽含水率的影响,结果见图 15。由图 15 可知,随着加热平板温度的升高,油茶籽含水率均匀下降,且含水率波动几乎一致,这与改变热风温度时的现象相同。

图 16 为不同加热平板温度下油茶籽平均含水率与含水率均匀性指数。由图 16 可知,随着加热平板温度升高,油茶籽平均含水率逐渐降低, J_{sw} 基本一致。对比图 14 可以看出,热风温度升高时含水率降低速率相较于加热平板温度升高时更快,即热风温度升高对油茶籽含水率影响更大,其原因一是热风不仅能够将油茶籽蒸发出的水蒸气带出,还对油茶籽起到了加热的作用,二是对于油茶籽这类含湿多孔介质,导热的效率比对流换热的效率低。当加热平板温度为 90 °C 时,紧贴平板的油茶籽平均含水率降至 3% 左右,会出现烤焦现象,这会严重影响出油品质,故选取加热平板温度 85 °C 为最佳工况。

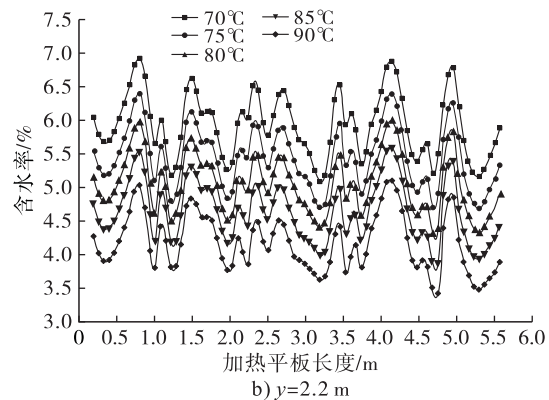


图 15 不同加热平板温度下的油茶籽含水率

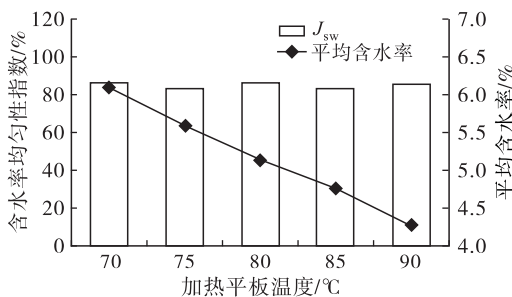


图 16 不同加热平板温度下油茶籽平均含水率与含水率均匀性指数

综上所述,选取运行参数热风风速 5 m/s、热风温度 80 °C、加热平板温度 85 °C 为最佳工况,对比原始结构烘干机可知,油茶籽平均含水率从 7.94% 降至 4.76%, J_{sw} 由 25.5% 提高至 83.2%。油茶籽平均含水率下降了 40%,且含水率均匀性大幅提高。

3 结论

(1) 以计算流体力学为理论基础,编写了湿度初始化宏与热、湿源项宏,建立了多孔介质内部的热湿耦合模型,并通过试验验证了模型的可靠性。

(2) 对烘干机内部结构进行改造,中部进风两侧出风结构相较于原始结构,油茶籽平均含水率下降了 0.65 百分点, J_{sw} 从 25.5% 提高到 54.8%。但含水率分布仍然不够均匀,且存在两端的油茶籽含水率较高的现象。进一步对进风角度进行优化,经计算得出:当进风角度向下偏转 30° 时,平均含水率最低,含水率均匀性最高。

(3) J_{sw} 与 M_u 都可作为含湿多孔介质材料的含水率均匀性评价指标。

(4) 随着热风风速的增大,油茶籽平均含水率降低, J_{sw} 升高,但热风风速达到 7 m/s 时, J_{sw} 降低;

随着热风温度与加热平板温度的升高,平均含水率均匀下降, J_{sw} 基本保持不变;热风风速5 m/s、热风温度80℃、加热平板温度85℃为最佳运行参数。经过优化,对比原始结构烘干机,油茶籽平均含水率从7.94%降至4.76%, J_{sw} 由25.5%提高至83.2%。

参考文献:

- [1] 刘增革,相海,胡淑珍,等.油茶籽干燥工艺与设备研究[J].中国油脂,2014,39(2):74-77.
- [2] 李长友.粮食干燥传递和转换特征及其理论表达[J].农业工程学报,2018,34(19):1-8.
- [3] 张建友,洪灿东,戚雅楠,等.小麦胚芽红外干燥工艺优化及其对贮藏品质的影响[J].核农学报,2018,32(6):1144-1152.
- [4] 杨潇,相海,胡淑珍,等.湿花生热风干燥工艺研究[J].食品科技,2017,42(6):111-115.
- [5] 刘品,刘寅,张艳,等.干燥介质相对湿度对红枣热风干燥特性的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(11):185-190.
- [6] 郝立群.干燥后玉米水分不均匀度影响因素的分析与建议[J].中国粮油学报,2005,20(4):110-114,121.
- [7] 张仲欣,赵永玲,张玉先.横流循环式烘干机气流分布均匀性的试验研究[J].农业工程学报,2001,17(6):

17-21.

- [8] BEIGI M, TOHIDI M, TORKI - HARCHEGANI M. Exergetic analysis of deep - bed drying of rough rice in a convective dryer[J]. Energy, 2017, 140:374 - 382.
- [9] 赵金红,岳晓禹,施娥娟,等.多层带式干燥机风速场CFD模拟及检验[J].干燥技术与设备,2007,5(1):15-21.
- [10] RAO P S, BAL S, GOSWAMI T K. Modelling and optimization of drying variables in thin layer drying of parboiled paddy[J]. J Food Eng, 2007, 78(2):480-487.
- [11] 李奇,何仁财,邱璐.基于CFD烘干平板传热模拟分析[J].中国农机化学报,2013,34(6):129-123.
- [12] 耿铁,王仕琪,段二亚,等.小麦热风干燥过程的数值模拟及试验研究[J].河南农业科学,2020,49(11):166-171.
- [13] 王晶,焦燕,任一平,等. Shannon - Wiener 多样性指数两种计算方法的比较研究[J].水产学报,2015,39(8):1257-1263.
- [14] 李长友,马兴灶,方壮东,等.粮食热风干燥热能结构与解析法[J].农业工程学报,2014,30(9):220-228.
- [15] SOUZA G F M V, MIRANDA R F, LOBATO F S, et al. Simultaneous heat and mass transfer in a fixed bed dryer [J]. Appl Therm Eng, 2015, 90: 38 - 44.

(上接第123页)

- [4] XIE J H, JIN M L, MORRIS G A, et al. Advances on bioactive polysaccharides from medicinal plants [J]. CRC Crit Rev Food Sci Nutr, 2016, 56:S60 - S84.
- [5] YU Y, SHEN M Y, SONG Q Q, et al. Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: a review [J]. Carbohydr Polym, 2018, 183:91 - 101.
- [6] 沈建福,康海权,陈亚琪,等.油茶果壳多糖的提取及抗氧化作用研究[J].中国粮油学报,2010,25(8):51-54.
- [7] 尹丽敏.油茶籽工艺水中多糖及油茶皂素的分离纯化研究[D].长沙:湖南农业大学,2013.
- [8] 汤慧民,周丽菊.超声波辅助纤维素酶提取核桃壳多糖及其抗氧化活性研究[J].中国油脂,2020,45(2):101-105.
- [9] 刘晓涵,陈永刚,林励,等.蒽酮硫酸法与苯酚硫酸法测定枸杞子中多糖含量的比较[J].食品科技,2009,34(9):270-272.
- [10] 曾俊.西洋参多糖的提取分离、结构表征及抗氧化活性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [11] 朱芳坤,范文秀,祝勇,等.南瓜多糖的性质及光谱分

析[J].光谱实验室,2009,26(3):609-612.

- [12] 李军.蛋白质的二维紫外光谱模拟[D].合肥:中国科学技术大学,2017.
- [13] 冯丽琴,杨芙莲,董文宾.富硒茶多糖的分离纯化及抗氧化性研究[J].陕西科技大学学报(自然科学版),2016,34(5):133-136.
- [14] 樊海燕,刘江英,陈贵林.红外光谱结合有效成分分析在锁阳多糖提取分离中的应用[J].光谱学与光谱分析,2018,38(S1):75-76.
- [15] 姚月华,唐宁,应熙锐,等.红萍多糖结构特征、流变特性及抗氧化活性[J].食品与机械,2022,38(3):154-159,172.
- [16] 夏朝红,戴奇,房韦,等.几种多糖的红外光谱研究[J].武汉理工大学学报,2007(1):45-47.
- [17] 张琪琳.香菇多糖的结构鉴定及抗肿瘤作用机制研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [18] 魏达凤,朱瑜瑜,王杨,等.大孔树脂分离纯化枸杞多糖的研究[J].山东化工,2019,48(2):25-27,32.
- [19] LIU Y H. Identification of polysaccharides from (*Dioscoreae oppositifolia* "Qi") by infrared spectroscopy [J]. Agric Sci Technol, 2016,17(8):1941-1943,1951.