

# 莲子转筒传导干燥特征及其粉体的糊化特性

徐建国, 徐刚, 石劲松, 张森旺, 顾震, 刘云飞

(江西省科学院应用化学研究所, 江西南昌 330096)

**摘要:** 本文采用以热传导为主的旋转电加热筒干燥莲子, 考察了不同干燥温度(60、70、80、90 °C)、不同转速(0.5、1、1.5 r/min)下莲子转筒传导干燥特征和干莲子全粉糊化特性。结果表明, 莲子转筒干燥过程一直处于降速干燥段; 干燥温度显著影响莲子转筒干燥过程 ( $p \leq 0.05$ ), 试验转速对干燥过程无显著影响 ( $p > 0.05$ )。莲子转筒干燥过程可以用 Cavalcanti-Mata 模型准确模拟 ( $R^2 > 0.999$ ,  $E\% < 5.00\%$ ,  $RMSE < 0.01$ ); 干燥有效扩散系数在  $3.94 \times 10^{-10} \sim 1.00 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  之间, 并随着干燥温度的升高而增大。莲子转筒干燥过程显著影响莲子全粉糊化特性。转筒干燥温度升高, 莲子全粉峰值粘度、最终粘度均出现显著降低趋势 ( $p \leq 0.05$ )。60 °C 转筒干燥莲子全粉的峰值粘度、最终粘度分别为 1676.33、2228.00 cP; 90 °C 转筒干燥后, 其值分别为 1268.00、1909.33 cP。60 °C 转筒干燥莲子表面疏松、多孔, 90 °C 转筒干燥莲子因淀粉凝胶化, 表面结构致密, 微观结构发生改变。相比热风烘箱穿流干燥, 莲子转筒传导干燥降低了干燥不均匀度(最大值为 4.59%), 有利于均匀干燥。本研究为确定莲子高品质转筒干燥工艺以及干莲子粉后续加工过程提供了技术支持。

**关键词:** 干燥; 莲子; 转筒干燥; 热传导; 糊化特性; 凝胶化; 干燥不均匀度

文章编号: 1673-9078(2021)06-184-192

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.6.1113

## Drying Behavior of Lotus Seeds, and Adhesive Properties of the Flour Processed in a Rotary Dryer

XU Jian-guo, XU Gang, SHI Jin-song, ZHANG Sen-wang, GU Zhen, LIU Yun-fei

(Institute of Applied Chemistry, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** To determine the characteristic behaviors of lotus seeds during drying and assess the quality of the flour produced from dried lotus seeds using a rotary dryer, lotus seeds with an initial moisture content of  $\approx 63\%$  to 10% wet basis (w.b.) were dried at controlled temperatures of 60, 70, 80, and 90 °C with rotational speeds of 0.5, 1, and 1.5 r/min. The adhesive properties of the lotus seed flour were investigated using a rapid visco-analyzer (RVA). The results indicate that the drying process is prolonged by rotary drying. No constant-rate drying phase was found. Strong influences of temperature on the drying process were evident ( $p \leq 0.05$ ). By contrast, rotational speed did not significantly affect the drying process ( $p > 0.05$ ). Estimates predicted using the Cavalcanti-Mata model were in good agreement with the experimental results ( $R^2 > 0.999$ ,  $E\% < 5.00\%$ ,  $RMSE < 0.01$ ). The effective moisture diffusivity of lotus seeds was between  $3.94 \times 10^{-10}$  and  $1.00 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . This increases as drying temperature increased from 60 to 90 °C. The drying process considerably affects the adhesive properties of the flour obtained. Peak and final viscosities were significantly lower when the lotus seeds were dried at higher drying temperatures. The corresponding values at 60 °C were 1676.33 cP and 2228.00 cP, respectively. Those at 90 °C were 1268.00 cP and 1909.33 cP, respectively. The results suggest that lotus seed microstructures change with drying temperature due to starch gelatinization during rotary drying. The surfaces of lotus seeds dried at 60 °C are more porous, while more densely packed structures are noted in lotus seeds dried at 90 °C. Lotus seed surfaces are denser if they are dried at higher temperatures because of changes in their microstructures. Compared to oven drying, rotary drying produces

引文格式:

徐建国,徐刚,石劲松,等.莲子转筒传导干燥特征及其粉体的糊化特性[J].现代食品科技,2021,37(6):184-192

XU Jian-guo, XU Gang, SHI Jin-song, et al. Drying behavior of lotus seeds, and adhesive properties of the flour processed in a rotary dryer [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(6): 184-192

收稿日期: 2020-12-01

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20181BBF68011); 江西省科学院科技计划项目(2018-YZD2-19、2020-YZD-1)

作者简介: 徐建国(1979-), 男, 副研究员, 研究方向: 干燥技术与设备研究

通讯作者: 刘云飞(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工研究

lotus seeds with more uniform moisture content, and a maximum variability in moisture content of only 4.59%. This study may aid in development of high-efficiency and high-quality lotus seed drying techniques and applications of lotus seed flour within the food industry.

**Key words:** drying; lotus seeds; rotary drying; thermal conduction; adhesive properties; gelatinization; moisture non-uniformity

莲子是中国特有的优势农产品, 营养成分丰富, 深受大众喜爱<sup>[1,2]</sup>。干燥是干莲子生产、加工的重要手段。干燥过程中, 热量、水分耦合传递, 两者的传递过程决定着干燥过程和产品质量。莲子颗粒大, 淀粉含量高, 不适宜的干燥过程严重影响着莲子干燥时间、能耗和干燥品质。太阳晒干耗时长, 易使莲子多酚类物质氧化, 造成产品发黑; 炭火烘烤火候难控制, 易烤黄、烤焦<sup>[3]</sup>。微波干燥时间短, 但微波分布的不均匀性容易导致莲子局部过热、焦化<sup>[4-6]</sup>。通用型热风对流干燥设备以固定床为主, 干燥箱(房)内部存在的传热、传质死角易导致物料干燥不均匀<sup>[7]</sup>, 最终影响干燥效率。大颗粒莲子高品质、高效干燥成为莲子产业亟需解决的问题。传导干燥是物料与加热面直接有效接触而被干燥的过程, 传热机理以热传导、热辐射为主。相比对流干燥, 其优点是传热传质效率高、热效率高, 更适合以降速干燥为主的物料<sup>[8,9]</sup>。目前成型设备有转筒干燥机、板(盘)式干燥机等, 现已广泛应用于咖啡豆、玉米、橄榄果油渣等众多颗粒状物料的干燥领域中<sup>[10-12]</sup>。Gikuru Mwithiga 等<sup>[13]</sup>利用转筒干燥机对咖啡豆进行了干燥试验; Francisco J.等<sup>[14]</sup>利用转筒干燥机对橄榄果油渣进行了工业化干燥; 俱浪等<sup>[15]</sup>对玉米在转筒干燥器中的干燥工艺进行了优化。

为了解转筒干燥对莲子干燥过程和干燥品质的影响, 本研究依据莲子颗粒状特性, 采用热传导干燥技术, 利用旋转电加热筒(干燥筒)间接加热莲子的方式, 开展了干燥条件可控的莲子转筒传导干燥试验, 考察了莲子转筒干燥过程特征以及莲子粉体的糊化特性, 以期对莲子转筒传导干燥技术的进一步优化、推广提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

莲子品种为江西广昌白莲。莲蓬由江西省广昌白莲研究所试验基地提供。莲蓬采摘期主要集中在7、8、9月。莲蓬每周采摘, 并保存于0~5℃冰箱中, 作为一周的试验原料。试验前, 人工剥莲蓬, 并用手动莲子剥壳机剥除莲壳, 获得莲子, 选择成熟度相对均一、颗粒饱满的莲子作为试验原料。

### 1.2 关键设备及工作原理

莲子电加热转筒传导干燥装置(自制)主要由内、外2个同心筒、电加热圈、变频电机、风机、控制系统等组成, 如图1所示。装置外筒固定; 不锈钢内筒(干燥筒)两端连空心轴、轴承座架于支架上, 其一端连接电机, 另一端接设有电刷的旋转机构。内筒外壁紧贴由温度控制器控温的电加热圈; 电源线穿过空心轴, 通过电刷为电加热圈供电; 变频电机由变频器控制, 可实现干燥筒正、反转; 内筒内表面设有倾斜抄板, 正向转动满足莲子在干燥筒内长时间停留, 反向出料。整机结构及技术参数见表1。

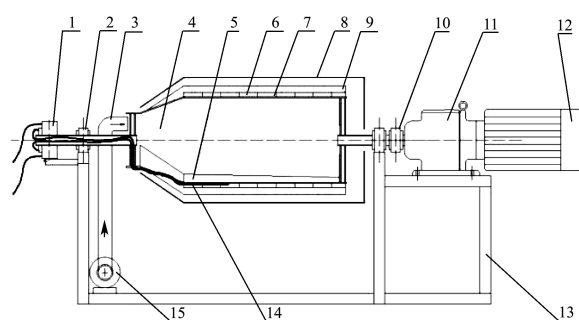


图1 电加热转筒传导干燥设备结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of electric rotary conduction-type dryer for lotus seeds

注: 1.电滑环; 2.轴承座; 3.风管; 4.进(出)料口; 5.抄板; 6.电加热圈; 7.内筒; 8.外筒; 9.保温层; 10.联轴器; 11.减速机; 12.变频电机; 13.支架; 14.传感器; 15.风机。

表1 莲子电加热转筒传导干燥装置主要技术参数

Table 1 Technical parameters of electric rotary conduction-type dryer for lotus seeds

项目	参数值
内筒尺寸/mm	φ318×600
外筒尺寸/mm	φ460×660
抄板倾角/°	10
电热圈功率/kW	1.5
回转电机功率/kW	0.75
转筒转速/(r/min)	0-15
干燥温度/°C	40-100
风量/(m <sup>3</sup> /h)	~198

电加热转筒传导干燥莲子时, 干燥所需热量由加热的内筒主要通过热传导方式提供, 莲子在干燥筒内有足够的停留时间, 并借助转筒、抄板产生的回转、轴向返混作用, 增加热接触面积, 在可控的干燥温度下均匀受热、干燥。风机通过风管向干燥设备内筒鼓

入少量空气，排出从莲子内部传递出的水分，以及时降低莲子表面空气湿度，提高干燥效率。

### 1.3 莲子电加热转筒传导干燥试验

干燥试验每批莲子质量为 400 g，确保莲子在加热的内筒壁面始终处于薄层干燥状态。干燥温度显著影响着干燥效率和干燥质量<sup>[16]</sup>，本试验干燥温度选择 60~90 °C。因试验干燥装置、测温方法的局限性，本文试验温度测量于转筒外表面，并以转筒外表面温度作为干燥温度。受转筒壁传热阻影响，转筒内壁实测温度略低于外表面温度。

将莲子从进料口旋入干燥内筒后，干燥温度分别选择 60、70、80、90 °C，温度回差设定 5 °C（即温度低于设定温度 5 °C 时，启动加热；温度高于设定温度 5 °C 时，停止加热），在不同转速 0.5、1、1.5 r/min 下进行转筒传导干燥试验，干燥至干基含水率 0.1 kg/kg 或湿基含水率 10% 以下结束干燥。每组试验过程中，间隔 30 min，将莲子全部旋出、称量。相同试验条件下，干燥试验重复 3 次。

因莲子阴干存在易发黑、发霉等问题，为对比莲子干燥品质，本文采用低温 40 °C 热风干燥作为对照。

### 1.4 干燥模型

莲子在干燥筒内与加热的内筒壁接触，处于翻转、返混的运动状态。莲子与加热的内筒壁接触，莲子表层至内部迅速建立温度梯度、湿分梯度，意味着热传导、传质过程开始。基于对物料热力干燥过程的认识<sup>[17]</sup>，本研究以 Fick 第二定律为基础，研究莲子转筒干燥过程中内部水分传递过程。在假设等温扩散传质，莲子为各向同性、球形颗粒；忽略收缩的前提下，根据第一类边界条件，Fick 第二定律扩散传质方程的解析解可以写为式（1）形式<sup>[18]</sup>：

$$MR = \frac{(X - X_e)}{(X_0 - X_e)} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (1)$$

式中， $D_{eff}$  为有效扩散系数， $m^2/s$ ， $r$  为当量半径， $m$ ； $n$  是级数项； $MR$  为湿分比； $X_0$  为初始干基含水率， $kg/kg$ ； $X_e$  为平衡含水率； $kg/kg$ ，近似取值为 0； $X$  为某时刻干基含水率， $kg/kg$ 。

通过式（1）可以获得不同转筒干燥过程中反映莲子湿分扩散程度的有效扩散系数。针对农产品干燥过程，研究者基于式（1）提出了大量干燥模型<sup>[19,20]</sup>，本文选择应用较多的 Page、Lewis、Henderson-Pabis、Midilli、Logarithmic 以及 Cavalcanti-Mata 模型（见表 2）来模拟莲子转筒干燥过程。利用决定系数  $R^2$ 、均方根误差 RMSE 以及平均相对误差  $E\%$  作为判断模型

优劣的主要依据<sup>[21,22]</sup>。这些参数分别通过式（2）、（3）、（4）计算获得：

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp,mean})^2 - \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp,mean})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$E/\% = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{MR_{exp,i} - MR_{pre,i}}{MR_{exp,i}} \right| \quad (4)$$

式中，下标  $exp$  为试验测量值；下标  $pre$  为预测值； $N$  为测量次数； $mean$  为平均值。

表 2 干燥曲线模型

Table 2 Mathematical models for drying curves

序号	模型名称	模型方程
1	Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
2	Herderson-Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
3	Lewis	$MR = \exp(-k \cdot t)$
4	Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$
5	Cavalcanti-Mata	$MR = a1 \cdot \exp(-k \cdot t^n1) + a2 \cdot \exp(-k \cdot t^n2) + a3$
6	Midilli	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$

注： $MR$  为水分比； $a$ 、 $b$ 、 $n$ 、 $k$  为模型参数； $t$  为干燥时间， $s$ 。

对于长时间干燥过程，式（1）可取级数第一项（ $n=1$ ）<sup>[19]</sup>，获得式（5）：

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (5)$$

上式两边取自然对数后，可得：

$$\ln MR = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \quad (6)$$

有效扩散系数  $D_{eff}$ （式 7）可以通过  $\ln MR$  与  $t$  的函数关系式（6）确定。

$$Slope = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (7)$$

### 1.5 测试指标与方法

#### 1.5.1 含水率测定

采用直接干燥法测莲子含水率<sup>[23]</sup>。测量 3 次，取平均值。新鲜莲子初始湿基含水率为 63.23%。

#### 1.5.2 扫描电镜测试

将不同干燥条件的干莲子用小刀切开后，利用扫描电子显微镜（Quanta650，FEI）直接测试，观察切开面形貌，并采集图谱。

#### 1.5.3 糊化特性测定

将不同干燥条件下的干莲子去芯,粉碎,过140目标筛,制莲子全粉。取3.00 g全粉、15.00 g水混合制样,置于快速粘度分析仪(Rapid Visco-Analyser, RVA, TecMaster, Perten Instruments, Warriewood, Australia)中,采用标准程序1进行粘度分析。样品在50℃保温1 min,然后在3.5 min内升至95℃,并保温2.5 min。整个过程中转速先设定960 r/min运行10 s,然后维持160.00 r/min至结束。

#### 1.5.4 干燥不均匀度

参考国标<sup>[24]</sup>,热风烘箱穿流干燥时,将400 g莲子平均分成2份,分别置于2个 $\phi 200 \times 50$  mm的圆形网盘中。莲子在网盘上呈单层排列状态。将网盘上、下排列,放入热风干燥箱内进行穿流干燥。每隔一段时间,分别从上、下网盘的3处不同位置取样,按上述1.5.1分别进行含水率 $x$ (%)测定,并计算平均含水率 $\bar{x}$ (%)。同一层3处含水率的极差为干燥不均匀度 $\Delta x$ (%)。热风干燥温度为70℃。

转筒干燥时,每隔一段时间,取样3次,按上述1.5.1分别进行含水率测定,并计算干燥不均匀度。转筒干燥温度为70℃,转速1.5 r/min。

#### 1.6 数据处理

利用Matlab R2014a(8.3.0.532)进行数据处理。莲子粉体RVA试验数据利用SAS(9.3)进行方差分析(analysis of variance, ANOVA)。不同指标均值采用Duncan多范围检验。当 $p \leq 0.05$ 时,相同指标的不同均值被视为显著性差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 莲子转筒传导干燥特征

图2是转筒转速为1.5 r/min,不同干燥温度下的莲子转筒传导干燥曲线和速率曲线。从图2a可以看出,莲子转筒干燥曲线近似呈现指数规律下降,干燥温度显著影响干燥过程。干燥初始,干燥曲线较陡,莲子含水率快速下降;随着干燥的进行,干燥曲线渐变平缓,莲子含水率下降缓慢。随着干燥温度的升高,干燥曲线逐渐变陡,干燥时间缩短。莲子干燥至湿基含水率10%时,60℃转筒干燥时间约为720 min;70℃转筒干燥时间约为540 min;80℃转筒干燥时间约为420 min;90℃转筒干燥时间约为330 min。

图2b表明莲子转筒干燥过程一直处于降速干燥阶段,干燥速率随含水率减少出现持续下降趋势。干燥速率受温度影响显著,其数值随干燥温度升高而变大。干燥初始阶段(0~2 h),60、70、80、90℃干燥

速率分别从0.68、0.83、0.96、1.05 kg/(kg·h)下降至0.22、0.27、0.26、0.28 kg/(kg·h)。干燥后期,当莲子湿基含水率为20%时,60、70、80、90℃干燥速率分别为0.06、0.08、0.11、0.16 kg/(kg·h)。这是因为干燥初期,莲子表层含水率较高,水分由莲子表层扩散至表面附近的干燥介质(空气)中时,莲子表面与干燥介质间存在较大的湿分压力差,对流传质速率较大。干燥发生后,莲子内部到表层出现水分梯度,干燥速率受内部扩散传质速率影响显著,呈逐渐下降趋势。这也是莲子转筒传导干燥速率一直处于降速干燥阶段的原因。干燥温度升高后,转筒内表面传热速率提高,莲子内部与表层、莲子表层与干燥空气之间建立的湿分浓度差、压力差增加,从而加速了水分在莲子内部扩散以及莲子表层水分与周围空气的对流传质。这一现象同样发生在其它农产品干燥过程中<sup>[25]</sup>。

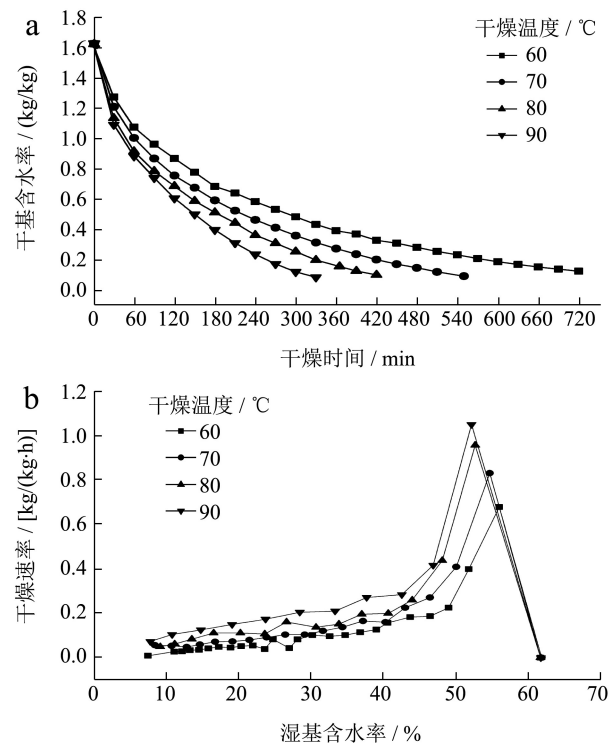


图2 莲子转筒传导干燥特征

Fig.2 Drying characteristics of lotus seeds with different rotary drum conduction-type drying conditions

注: a: 莲子转筒传导干燥曲线; b: 莲子转筒传导干燥速率曲线。

图3是莲子在干燥温度70℃、转筒转速分别为0.5、1、1.5 r/min的干燥曲线。从图中可以发现,1.5 r/min的干燥曲线位于0.5 r/min的干燥曲线下方,说明高转速可以缩短干燥时间。但不同转速下的干燥曲线近乎重叠,干燥至终点(湿基含水率10%)时,不同转速条件下的干燥时间无显著差异( $p > 0.05$ )。这一现象可能与试验莲子较少,导致莲子填充率(莲子体积

与干燥器有效容积之比) 过低有关。试验发现, 转筒转速提高会增加莲子的平均动量, 过高的转速会因莲子与内筒碰撞导致干莲子破碎率增大。

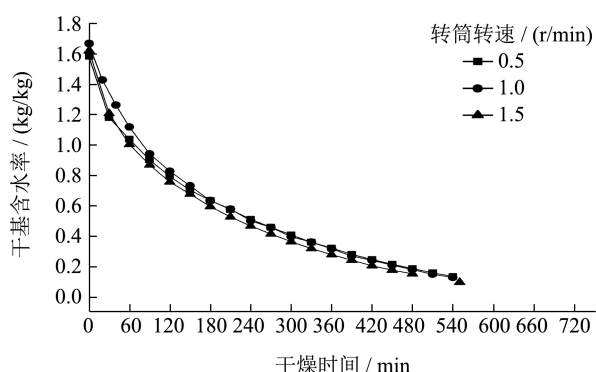


图3 不同转速下莲子 70 °C转筒传导干燥曲线

Fig.3 Drying curves of lotus seeds with different speed of rotary drum at 70 °C

## 2.2 莲子转筒传导干燥过程模拟

表3 模型统计参数表

Table 3 Values of statistical parameters for models

干燥温度/°C	统计参数	模型方程					
		1	2	3	4	5	6
60	$R^2$	0.9985	0.9826	0.9603	0.9897	0.9997	0.9997
	$E\%$	4.1221	8.7149	17.1086	7.7544	1.0273	1.0799
	RMSE	9.1395 e-03	3.1072 e-02	4.6885 e-02	2.3917 e-02	4.0270 e-03	4.0625 e-03
70	$R^2$	0.9965	0.9842	0.9689	0.9875	0.9999	0.9999
	$E\%$	8.3628	7.0374	14.1951	10.0999	0.91820	1.2201
	RMSE	1.4511 e-02	3.1050 e-02	4.3526 e-02	2.7569 e-02	2.3563 e-03	2.5078 e-03
80	$R^2$	0.9936	0.9817	0.9689	0.9838	0.9996	0.9996
	$E\%$	11.2445	6.8343	12.0295	11.4070	2.3207	2.5675
	RMSE	2.0425e-02	3.4492 e-02	4.4943e-02	3.2406e-02	5.0702e-03	5.2728e-03
90	$R^2$	0.9926	0.9874	0.9820	0.9876	0.9999	0.9995
	$E\%$	13.7742	8.3823	8.4182	10.5621	1.6876	3.6932
	RMSE	2.3371e-02	3.0397e-02	3.6393e-02	3.0145e-02	3.1352e-03	6.2554e-03

表4 Cavalcanti-Mata 模型参数与有效扩散系数

Table 4 Coefficients obtained by fitting the Cavalcanti-Mata model and diffusion coefficients

干燥温度/°C	模型参数						扩散系数 $D_{eff}/(m^2/s)$
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$k$	$n_1$	$n_2$	
60	0.9394	0.1094	-0.04852	0.0105	0.7981	1.3780	$3.94 \times 10^{-10}$
70	0.6997	0.531	-0.2304	0.02844	0.6247	0.6244	$5.71 \times 10^{-10}$
80	0.2829	1.2770	-0.56	0.03256	0.5537	0.5554	$7.34 \times 10^{-10}$
90	0.1539	51.38	-50.83	0.001997	1.203	0.2936	$1.00 \times 10^{-9}$

## 2.3 莲子转筒传导干燥对莲子全粉糊化特性的影响

利用表 2 中 6 种不同模型, 对不同干燥条件下莲子转筒干燥数据进行回归分析, 不同干燥模型的回归系数  $R^2$ 、均方根误差 RMSE、相对误差  $E$  列于表 3 中。

可以看出, 相比其它模型方程, 针对不同温度下莲子转筒干燥过程, Cavalcanti-Mata 模型 (方程 5) 均具有最大的  $R^2 (>0.999)$ , 最小的  $E (<5\%)$  和 RMSE ( $<0.01$ ), 表明该模型适应性最佳, 可以准确地模拟莲子转筒干燥过程。Cavalcanti-Mata 模型中各参数值见表 4。

基于 Fick 扩散传质的假设下, 根据  $\ln MR$  与干燥时间  $t$  的函数关系式 (6) 可以确定有效扩散系数  $D_{eff}$ 。式 (6) 中, 当量半径  $r$  通过阿基米德排水法计算获得 [26], 取值  $8.48 \times 10^{-3} m$ 。扩散系数  $D_{eff}$  试验结果见表 4。从表中可以发现, 莲子转筒干燥过程中的有效扩散系数在  $3.94 \times 10^{-10} \sim 1.00 \times 10^{-9} m^2/s$  之间, 并随着干燥温度的升高而增大。

莲子营养成分丰富, 其全粉是开发莲子相关产品的基础原料 [27]。淀粉、蛋白质、脂肪、游离氨基酸分别占莲子全粉的 30.65%~34.55%、15.06%~19.29%、0.35%~1.37%、29.48~41.48 mg/100 g [28]。在物料湿热

加工中,上述营养成分的物理化学变化将直接影响到全粉的属性,进而影响到后续产品品质和质量,如流变特性、感观特性、营养特性等<sup>[29]</sup>。

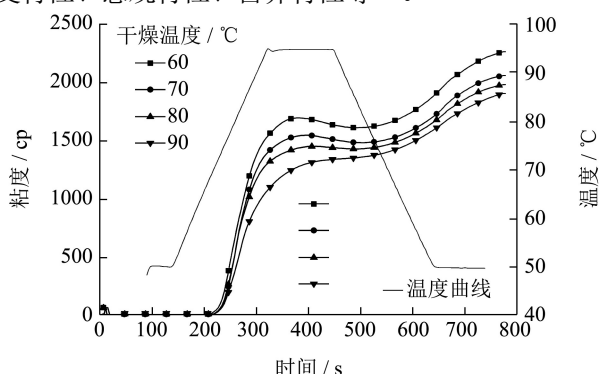


图4 不同干燥温度莲子全粉 RAV 糊化特征曲线

Fig.4 Pasting profiles of lotus seed flour tested on a rapid visco-analyser

图4、表5分别是不同转筒干燥条件下的莲子全粉RVA曲线、糊化特征参数。从上述图表中可以发现,干燥温度显著影响着莲子全粉糊化特征。高温90℃转筒干燥过程(图4)获得的莲子全粉RVA曲线不同于其它干燥过程,其粘度曲线一直呈升高趋势,未出现下降现象。

从表5可以发现,随着转筒干燥温度的升高,峰值粘度、低谷粘度、最终粘度出现显著下降( $p \leq 0.5$ )。60℃转筒干燥莲子全粉的峰值粘度、最终粘度分别为1676.33、2228.00 cP,90℃转筒干燥莲子全粉的峰值粘度、最终粘度均最低,分别为1268.00、1909.33 cP。从表5还可以发现,转筒干燥温度升高后,莲子全粉衰

表5 转筒传导干燥对莲子全粉糊化特性的影响

Table 5 Pasting properties of flour of lotus seeds dried under different drying conditions

干燥条件	参数					
	峰值粘度/cP	低谷粘度/cP	衰减值	最终粘度/cP	回生值/cP	峰值时间/min
40℃	1940.50±11.50 <sup>a</sup>	1820.50±10.50 <sup>a</sup>	120.00±1.00 <sup>a</sup>	2785.00±25.00 <sup>a</sup>	964.50±14.50 <sup>a</sup>	5.57±0.03 <sup>c</sup>
60℃	1676.33±54.04 <sup>b</sup>	1599.67±44.97 <sup>b</sup>	76.67±9.45 <sup>b</sup>	2228.00±111.37 <sup>b</sup>	628.33±66.52 <sup>b</sup>	6.40±0.08 <sup>b</sup>
70℃	1541.33±36.30 <sup>c</sup>	1482.00±26.66 <sup>c</sup>	59.33±9.81 <sup>c</sup>	2058.33±51.83 <sup>c</sup>	576.33±25.54 <sup>b</sup>	6.58±0.10 <sup>b</sup>
80℃	1469.00±9.85 <sup>d</sup>	1433.00±10.82 <sup>d</sup>	36.00±5.29 <sup>d</sup>	2022.67±34.24 <sup>c</sup>	589.67±24.42 <sup>b</sup>	6.78±0.17 <sup>a</sup>
90℃	1268.00±29.72 <sup>e</sup>	-	-	1909.33±5.51 <sup>d</sup>	-	-

注:表中数值采用平均值±标准差;组内每列具有的相同字母均值表示无显著性差异( $p > 0.5$ );-代表无法计算。

相比40℃低温干燥,60、70、80℃转筒干燥莲子的回生值显著降低,但三者之间无显著性差异( $p > 0.5$ )。回生值降低表明糊化淀粉在冷却过程中有较低的短期老化速率<sup>[30]</sup>。这可能与冷却过程中淀粉与脂质、氨基酸等物质的相互作用阻碍了直链淀粉重排有关<sup>[29]</sup>。淀粉老化特性直接影响淀粉基产品的硬度,进而影响口感。淀粉老化速率变慢,淀粉基产品硬度增加速率放缓,粘度下降变慢。因此,高温转筒干燥

减值显著降低( $p \leq 0.5$ ),60、70、80℃转筒干燥莲子衰减值分别为76.67、59.33、36.00。峰值粘度体现了全粉中淀粉颗粒间的作用力大小。具有较大峰值粘度的全粉其颗粒间具有较弱的粘接力,更容易溶胀、崩裂。相反,具有较小峰值粘度的全粉其颗粒间具有较强的粘接力,溶胀困难<sup>[30]</sup>。衰减值降低意味着莲子全粉耐热、抗剪切能力增强,热糊稳定性增加,由该类全粉制成的淀粉基产品有更好的加工适应性。这些变化表明转筒干燥温度显著影响全粉颗粒的水合、溶胀能力。

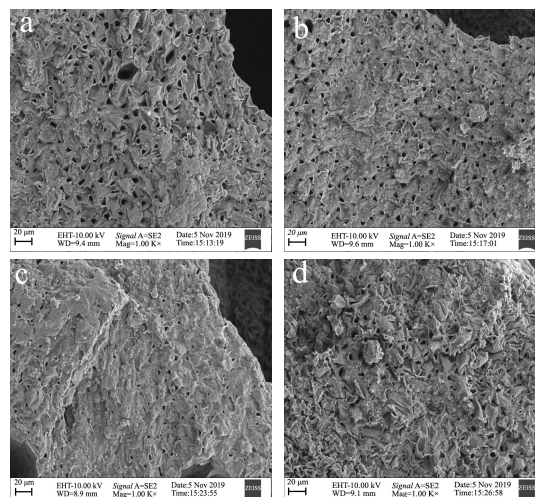


图5 不同干燥温度下转筒干燥莲子切面微观结构(×1000)

Fig.5 Microstructure observations of lotus seeds dried at different drying conditions (×1000)

注: a: 60℃转筒干燥莲子微观结构; b: 70℃转筒干燥莲子微观结构; c: 80℃转筒干燥莲子微观结构; d: 90℃转筒干燥莲子微观结构。

可以作为一种延缓淀粉短期老化的有效手段应用到莲子全粉改性过程中。

图5是不同转筒干燥条件的莲子电镜图。60℃转筒干燥下,莲子表面呈现疏松、多孔结构,颗粒细胞结构较完整,间隙清晰可见(图5a)。随着转筒干燥温度升高至70、80℃,莲子表面细胞间隙缩小、结构变致密,部分区域逐渐失去颗粒状态,出现致密结构(图5b、图5c)。这意味着淀粉颗粒发生了溶胀、未

完全凝胶化,并逐渐充满细胞内部,导致莲子颗粒结构受到破坏。转筒干燥温度升至 90 °C,莲子淀粉颗粒的外观轮廓模糊,甚至消失,表面结构变得更加致密(图 5d)。莲子干燥过程中,莲子内部的水分、转筒传导提供的热量为淀粉凝胶化提供了基础条件。当莲子温度达到淀粉凝胶化温度时,在热量、水分的耦合作用下,莲子淀粉长链纠缠状态受到破坏,淀粉颗粒发生了不同程度的糊化<sup>[31]</sup>。部分糊化的莲子淀粉与蛋白质、脂类等营养成分进一步形成具有复杂网络的复合物<sup>[32]</sup>,使得淀粉颗粒间粘接力增强,再溶胀更困难。这是高温转筒干燥莲子全粉的糊化特性显著变化的主要原因。

## 2.4 干燥不均匀度比较

表 6 干燥不均匀度比较

Table 6 Comparison of moisture nonuniformity between oven drying and rotary drum conduction-type drying

干燥时间/min	70 °C热风烘箱穿流干燥				70 °C转筒干燥	
	$\bar{x}_t$ /%	$\Delta x_t$ /%	$\bar{x}_b$ /%	$\Delta x_b$ /%	$\bar{x}_r$ /%	$\Delta x_r$ /%
60	53.75	6.63	57.48	4.28	50.14	2.48
180	40.20	7.57	44.71	7.82	36.47	4.21
300	24.56	5.82	28.90	8.65	25.35	4.59
420	15.86	4.62	17.96	6.91	15.70	3.86

注:表中  $\bar{x}$  为平均含水率;  $\Delta x$  代表干燥不均匀度; 下标 t、b 分别表示热风烘箱干燥上层、下层,下标 r 表示转筒干燥。

## 3 结论

3.1 莲子转筒传导干燥一直处于降速干燥段;干燥温度显著影响莲子转筒干燥过程,试验转速对干燥过程无显著影响 ( $p>0.05$ )。干燥温度越高,干燥时间越短。莲子转筒干燥过程可以用 Cavalcanti-Mata 模型准确模拟;有效扩散系数在  $3.94 \times 10^{-10} \sim 1.00 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  之间,并随着干燥温度的升高而增大。相比热风烘箱穿流干燥,莲子转筒传导干燥降低了干燥不均匀度(最大值为 4.59%),有利于均匀干燥。

3.2 莲子转筒干燥过程显著影响莲子全粉糊化特性。随着转筒干燥温度的升高,莲子全粉峰值粘度、最终粘度均出现显著降低 ( $p \leq 0.05$ )。60 °C 转筒干燥莲子全粉的峰值粘度、最终粘度分别为 1676.33、2228.00 cP,90 °C 转筒干燥后,其值分别为 1268.00 cP、1909.33 cP。高温转筒干燥后,莲子全粉衰减显著降低,耐热、抗剪切能力增强,短期老化速率变慢。

3.3 试验条件下的转筒干燥过程中,莲子均发生了不同程度的淀粉凝胶化。60 °C 转筒干燥莲子表面呈现疏松、多孔结构;高温 90 °C 转筒干燥导致淀粉发生溶胀、凝胶化,致使表面结构致密,莲子微观结构发生了改变。本文研究为确定莲子高品质转筒干燥工艺以及干

干燥均匀性是评价干燥产品质量、干燥技术与工艺的一个重要参数。干燥不均匀会导致贮藏过程中产品质量下降、干燥过程能耗增加<sup>[33]</sup>。这一现象除与物料自身结构不均一有关外,还与物料所处干燥状态、设备结构、物料分布等因素有关<sup>[34]</sup>。从表 6 可以看出,莲子转筒干燥与烘箱穿流干燥均存在干燥不均匀现象。烘箱穿流干燥上、下层平均含水率存在差值,说明上、下层莲子干燥不均匀。上层含水率极差最大值为 7.58%,下层含水率极差最大值为 8.65%。相比烘箱穿流干燥,经过相同干燥时间后,莲子转筒干燥过程的干燥不均匀度数值均较小,含水率极差最大值为 4.59%,这意味着莲子干燥更均匀。这是因为转筒、抄板产生的回转、返混作用改变了莲子的运动状态,增加了莲子热接触面积,使之均匀受热、干燥。

莲子粉后续加工过程提供了技术支持。

## 参考文献

- [1] H Y Zeng, L H Cai, X L Cai, et al. Amino acid profiles and quality from lotus seed proteins [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(5): 1070-1075
- [2] Y T Zhao, W W Wang, J Y Xie, et al. Microwave vacuum drying of lotus seeds: effect of a single-stage tempering treatment on drying characteristics, moisture distribution, and product quality [J]. Drying Technology, 2017, 35(13): 1561-1570
- [3] 曾绍校,郑宝东,林鸳鸯,等.莲子淀粉颗粒特性的研究[J].中国粮油学报,2009,24(8):62-64  
ZENG Shao-xiao, ZHENG Bao-dong, LIN Yuan-yuan, et al. Granular characteristics of lotus-seed starch [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(8): 62-64
- [4] 梁静.莲子微波干燥特征及干燥工艺的研究[D].福州:福建农林大学,2007  
LIANG Jing. Study on the microwave drying characteristics and drying technology optimization of lotus-seed [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007
- [5] 李涛.农产品微波干燥工艺的研究[D].南昌:江西农业大学,

- 2013  
LI Tao. Study on the microwave drying technology of the agricultural products [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013
- [6] 王瑞芳,李占勇.基于加热均匀性的微波干燥研究进展[J].化工进展,2009,28(10):1707-1711  
WANG Rui-fang, LI Zhan-yong. Microwave drying based on heating uniformity [J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2009, 28(10): 1707-1711
- [7] 颜建春,谢焕雄,魏海,等.5H-1.5A 型花生换向通风干燥机研制[J].农业工程学报,2019,35(10):9-18  
YAN Jian-chun, XIE Huan-xiong, WEI Hai, et al. Development of 5H-1.5A peanut reversing ventilation dryer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(10): 9-18
- [8] 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,2007:135  
PAN Yong-kang, WANG Xi-zhong, LIU Xiang-dong. Modern Drying Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 135
- [9] 张明.蒸汽管间加热转筒干燥器 CAD 系统的设计与开发 [D].长沙:长沙理工大学,2012  
ZHANG Ming. Design and development of steam tubes heated rotary dryer CAD system [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012
- [10] 罗小燕,王德成,王光辉,等.苜蓿转筒干燥时茎叶分离出口气流场模拟与优化[J].农业机械学报,2009,40(10):71-74  
LUO Xiao-yan, WANG De-cheng, WANG Guang-hui, et al. Simulation and optimization of the wind field of the separation exit of alfalfa rotary drum dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 71-74
- [11] 姜治国,宋文荣,于国飞,等.酒精糟渣物性对盘式干燥性能影响的试验研究[J].农业工程学报,1996,12(2):195-200  
JIANG Zhi-guo, SONG Wen-rong, YU Guo-fei, et al. Experiment and study on effects of distiller's grains physical properties on disc dryer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1996, 12(2): 195-200
- [12] M A Delele, F Weigler, J Mellmann. Advances in the application of a rotary dryer for drying of agricultural products: a review [J]. Drying Technology, 2015, 33: 541-558
- [13] G Mwithiga, V K Jindal. Coffee drying in a rotary conduction-type heating unit [J]. Journal of Food Process Engineering, 2004, 27(2): 143-157
- [14] F J Gómez-de la Cruz, P J Casanova-Pelaez, J M Palomar-Carnicero. Characterization and analysis of the drying real process in an industrial olive-oil mill waste rotary dryer: a case of study in Andalusia [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 1-10
- [15] 俱浪,黄志刚,朱慧.利用含水率优化玉米在转筒干燥器中的干燥工艺研究[J].北京工商大学学报(自然科学版),2008,26(1):106-109  
JU Lang, HUANG Zhi-gang, ZHU Hui. Optimization of corn drying technology in rotary dryers by moisture content [J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2008, 26(1): 106-109
- [16] S Kaleemullah, R Kailappan. Drying kinetics of red chillies in a rotary dryer [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(1): 15-23
- [17] I L Pardeshi, S Arora, P A Borker. Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model [J]. Drying Technology, 2009, 27(2): 288-295
- [18] H G Unal, K Sacilik. Drying characteristics of hawthorn fruits in a convective hot-air dryer [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2011, 35(2): 272-279
- [19] S Kaleemullah, R Kailappan. Drying kinetics of red chillies in a rotary dryer [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(1): 15-23
- [20] R P de Gusmão, T A S Gusmão, M E Rangel, et al. Mathematical modeling and determination of effective diffusivity of mesquite during convective drying [J]. American Journal of Plant Sciences, 2016, 7(6): 814-823
- [21] S R Hassan-Beyg, M Aghbashlo, M H Kianmehr, et al. Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during convection drying [J]. International Agrophysics, 2009, 23(2): 129-135
- [22] S Khalloufi, C Almeida-Rivera, J Janssen, et al. Mathematical model for simulating the springback effect of gel matrixes during drying processes and its experimental validation [J]. Drying Technology, 2011, 29(16): 1972-1980
- [23] GB 5009.3-2016,食品中水分的测定[S]  
GB 5009.3-2016, National Food Safety Standard Determination of Moisture in Foods [S].
- [24] GB/T 6970-2007,粮食干燥机试验方法[S]  
GB/T 6970-2007, Testing Methods for Grain Driers [S]
- [25] C L Hii, C L Law, S Suzannah. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 276-282
- [26] T K Nguye, M Mondo, C Ratti. Shrinkage of cellular food



- during air drying [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 230: 8-17
- [27] 薛军.莲子粉加工工艺与应用研究[D].无锡:江南大学,2007  
XUE Jun. Study on the processing technology of the lotus seed powder and its application [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007
- [28] 马芝丽,马亚洁,黄文.不同产区干莲子营养成分及加工特性分析[J].食品工业科技,2019,1:96-100  
MA Zhi-li, MA Ya-jie, HUANG Wen. Analysis of nutritional components and processing characteristics of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds from different regions [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 1: 96-100
- [29] A H Ramos, B A Rockenbach, C D Ferreira, et al. Characteristics of flour and starch isolated from red rice subjected to different drying conditions [J]. Starch, 2019, 71: 1800257
- [30] K O Falade, C A Okafor. Physicochemical properties of five cocoyam (*Colocasia esculenta* and *Xanthosoma sagittifolium*) starches [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30: 173-181
- [31] M Zielinska, P Zapotoczny, O Alves-Filho, et al. A multi-stage combined heat pump and microwave vacuum drying of green peas [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(3): 347-356
- [32] T Truong, V Truong, S Fukai, et al. Changes in physicochemical properties of rice in response to high-temperature fluidized bed drying and tempering [J]. Drying Technology, 2019, 37(3): 331-340
- [33] Xu ZHOU, H Ramaswamy, Ying-tao QU, et al. Combined radio frequency-vacuum and hot air drying of kiwifruits: effect on drying uniformity, energy efficiency and product quality [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 56: 102182
- [34] ZHANG Rui-chao, LONG Ji-bo. Study on drying uniformity of static small-sized drying box for fruits and vegetables [J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 2615-2622

## (上接第 88 页)

- [18] 刘光,胡松青,沈兴,等.脂肪酶菌株筛选、产酶条件优化及粗酶性质研究[J].四川大学学报(自然科学版),2013, 50(5): 1124-1130  
LIU Guang, HU Song-qing, SHEN Xing, et al. Screening of lipase strains, optimization of enzyme production conditions and properties of crude enzyme [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2013, 50(5): 1124-1130
- [19] 吕梅,陈茂彬,镇达.浓香型大曲产酯酶菌株 HSM 的分离及产酶营养条件研究[J].酿酒科技, 2014,(1):12-15,20  
LYU Mei, CHEN Mao-bin, ZHEN Da. Isolation of the esterase-producing strain HSM from Luzhou-flavor Daqu and the study on its nutrient conditions for enzyme production [J]. Liquor-making Science and Technology, 2014, (1): 12-15,20
- [20] 王春雨,迟乃玉,张庆芳,等.低温脂肪酶的分离纯化及酶学性质[J].食品与生物技术学报,2013,8:809-813  
WANG Chun-yu, CHI Nai-yu, ZHANG Qing-fang, et al. Purification and enzymatic properties of cryogenic lipase [J]. Journal of Food and Biotechnology, 2013, 8: 809-813

## (上接第 210 页)

- [23] 陆晨,张士康,朱科学,等.碱提酸沉法提取茶叶蛋白质的研究[J].现代食品科技,2011,27(6):673-677  
LU Chen, ZHANG Shi-kang, ZHU Ke-xue, et al. Study on the extraction of tea protein by alkaline extraction and acid precipitation [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(6): 673-677
- [24] 韩飞,于婷婷,周孟良.酶法生产大豆蛋白 ACE 抑制肽的研究[J].食品科学,2008,29(11):369-374  
HAN Fei, YU Ting-ting, ZHOU Meng-liang. Study on the production of soybean protein ACE inhibitory peptide by enzymatic method [J]. Food Science, 2008, 29(11): 369-374