油茶果干燥应力破蒲失水特征及冷榨原油质量的变化

徐建国[1*]，谌佳君[2]，石劲松[1]，顾震[1]，徐刚[1]，张绪坤[2]

（1.江西省科学院应用化学研究所，江西南昌 330096）（2.南昌航空大学机械工程系，江西南昌 330063）

摘要：为更好地了解油茶果干燥应力破蒲技术以实现油茶籽和果蒲（壳）的高效、高品质分离，该文通过开展干燥应力破蒲试验，考察了不同干燥温度（50、60、70、80 ℃）条件下干燥应力破蒲失水动力学特征以及破蒲过程对后续冷榨原油质量的影响，建立了干燥应力破蒲失水过程模型，开发了变温干燥应力破蒲工艺。研究发现，干燥应力破蒲过程中油茶果失水速率曲线呈阶梯状下降趋势，且存在提速段及多个近似恒速段；干燥温度升高，油茶果失水曲线变陡，到达破蒲终点湿基含水率（32.00%）时所需时间显著缩短。新建的半经验模型（R^2≥0.999 7，*RMSE*≤0.428 6%）可以准确模拟油茶果干燥应力破蒲失水过程。随着温度的升高，油茶籽冷榨原油酸价数值从 0.08 mg/g 显著增加至 0.39 mg/g，总色差从 76.27 显著增加至 83.63，出油率从 23.43% 显著降低至 18.84%。低温干燥应力破蒲有利于提高油茶籽冷榨原油质量和出油率。经变温干燥应力破蒲后，油茶果破蒲率为 98.35%，碎籽率为 0%，冷榨原油酸价（以 KOH 计）、过氧化值分别为 1.00 mg/g、0.009 9 g/100 g，水分及挥发物为 0.35%，出油率为 21.08%。该研究可为优化油茶果干燥应力破蒲技术工艺及设备开发提供依据。

关键词：油茶果；干燥应力；破蒲；模型；冷榨原油；质量

文章编号：1673-9078(2025)12-147-155 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1363

Moisture Loss Characteristics and Quality Changes in Cold-pressed Oil of *Camellia oleifera* during Shell-Breaking Caused by Drying Stress

XU Jianguo[1*], CHEN Jiajun[2], SHI Jinsong[1], GU Zhen[1], XU Gang[1], ZHANG Xukun[2]

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

(2.Department of Mechanical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The shell breaking process of *Camellia oleifera* fruit relies on drying stress to separate the seeds from the shells. Shell-breaking experiments were performed to analyze the moisture loss characteristics during shell-breaking caused by drying stress at different drying temperatures (50, 60, 70, and 80 ℃) and the influence of the shell-breaking process on the quality of cold-pressed oils. A model for moisture loss characteristics during shell-breaking caused by drying stress was established, and a variable temperature shell-breaking process was developed. The moisture loss curves of *C. oleifera* fruit during shell-breaking demonstrated a decreasing trend, and the moisture loss rate showed a decreasing trend with a ladder pattern, exhibiting an initial acceleration stage, followed by several nearly constant-rate stages. With the increase in drying temperature, moisture loss curves became steeper, and the time to reach the endpoint moisture content of 32.00% (w.b.) for *C. oleifera* was significantly reduced. The newly established mathematical model with R^2 ≥0.999 7 and *RMSE* ≤0.428 6% can accurately describe the moisture loss process during the shell-breaking of *C. oleifera* fruit caused by drying stress. With increasing shell-breaking temperature, the acid value of the cold-pressing oil prepared using *C. oleifera* seeds increased from 0.08 mg/g to 0.39 mg/g. The total color difference value increased from 76.27

引文格式：

徐建国,谌佳君,石劲松,等.油茶果干燥应力破蒲失水特征及冷榨原油质量的变化[J].现代食品科技,2025,41(12):147-155.

XU Jianguo, CHEN Jiajun, SHI Jinsong, et al. Moisture loss characteristics and quality changes in cold-pressed oil of *Camellia oleifera* during shell-breaking caused by drying stress [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 147-155.

收稿日期：2024-09-12；修回日期：2024-10-30；接受日期：2024-10-31

基金项目：江西省重点研发计划项目（20212BBF63034）；江西省科学院基础研究项目（2023YJC2017）；江西省科学院包干制项目（2022YSBG22025）

作者简介：徐建国（1979-），男，研究员，研究方向：干燥技术研究，E-mail：xujian_guo@126.com

to 83.63, and the crude oil yield decreased from 23.43% to 18.84%. Shell-breaking caused by drying stress at low temperature improved the quality and crude oil yield of cold-pressed oil from *C. oleifera* seeds. After variable temperature shell-breaking caused by drying stress, the shell-breaking and seed-breaking ratios of the *C. oleifera* fruits were 98.35% and 0%, respectively. The acid (based on KOH) and peroxide values of the cold-pressing crude oil were 1.00 mg/g and 0.009 9 g/100 g, respectively. The moisture and volatile matter content was 0.35%, and the crude oil yield was 21.08%. The results of this study will provide reference data for the optimization of shell-breaking technology.

Key words: *Camellia oleifera* fruit; drying stress; shell breaking; model; cold-pressing oil; quality

油茶是我国特有的木本食用油料树种[1]。我国油茶种类丰富，分布面积广。据统计，我国目前油茶栽培面积达 400 万 hm^2，以江西、湖南两省产量最多[2]。茶油营养丰富，富含不饱和脂肪酸[3,4]，深受消费者喜爱。油茶产业对推进山区综合开发、促进林农增收、加快国土绿化进程等具有十分重要的意义[5]。油茶果是油茶树果实，由油茶籽和果蒲（壳）组成。脱蒲是油茶果加工预处理的第一个环节。传统脱蒲方法是晒果爆蒲，即油茶果通过堆沤、晾晒实现油茶籽与果蒲分离。这种方法对天气依赖程度大，效率低，劳动强度大。诸多学者[6,7]开展了机械脱蒲技术研究，该类技术利用机械装置产生的撞击、搓擦、滚搓等机械力破坏果蒲，进而实现油茶籽与果蒲分离。从现有研究成果看，机械脱蒲存在油茶籽破损、损耗以及脱蒲不完全等问题。利用干燥应力破蒲（壳）是一种实现油茶籽、果蒲分离的重要技术[8,9]。其原理是干燥发生后，油茶果存在温度、湿度梯度，产生干燥应力，导致出现干燥裂纹。干燥裂纹通常沿油茶果皮背缝线发展，直到全部裂开。其技术优势是油茶籽无破损、无损耗。赵海瑞等[8]比较了常规热风干燥、热泵干燥和微波干燥对油茶果脱蒲效果的影响，发现常规热风在 65 ℃下干燥 6 h，油茶果的脱（破）蒲率达到 96.97%，未报道热风脱蒲对油茶籽质量的影响。Wang 等[9]在 90~130 ℃温度范围内开展了热风干燥破蒲试验，基于油茶籽总色差变化，提出最优破蒲温度为 90~110 ℃，Page 模型最适合描述油茶果失水过程；发现湿基含水率为 47% 时，果蒲开裂超过 30 mm，但未报道破蒲率数据。

为进一步研究油茶果干燥应力破蒲技术的适用性，本研究依据油茶果特性及油茶籽高品质加工要求，通过开展油茶果干燥应力破蒲小试及中试研究，确立了干燥应力破蒲终点含水率，考察了油茶果干燥应力破蒲失水特征以及破蒲过程对后续冷榨原油品质的影响，提出了适于连续生产的干燥应力破蒲工艺。相关研究可为油茶果干燥应力破蒲技术推广和设备的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

油茶果品种为江西赣无系列。油茶果（图 1）由靖安县乔园生态农庄提供。油茶果采摘期主要集中在每年的霜降节气。采摘的油茶果保存于 0~5 ℃冰箱中。试验前，选择外表光亮、无裂纹、尺寸（φ36±1 mm）相对均一的油茶果作为试验样本。采用 105 ℃烘箱法测油茶果、油茶籽及果蒲含水率[10]。测量 3 次，取平均值。新鲜油茶果湿基含水率约为 64.00%（以质量比计，下同），果蒲湿基含水率约为 73.00%，新鲜油茶籽湿基含水率约为 55.60%。

图 1 新鲜油茶果、油茶籽及果蒲

Fig.1 Fresh *Camellia oleifera* fruit, seeds and shells

注：a 为新鲜果；b 为茶籽油；c 为果蒲。

1.2 关键设备

自制小试规模热风干燥装置及连续干燥中试装置，如图 2 所示。小试干燥装置可满足约 10 kg 物料穿流干燥试验，干燥温度范围 30~90 ℃，干燥风速范围 0.5~1.5 m/s。该装置安装有计量、记录以及自动控温系统。连续干燥中试装置由多层网带式干燥机、供热

系统、控制系统等组成。多层网带式干燥机内部有上、中、下 3 层网带。网带由电机驱动，其规格为长 3.2 m× 宽 0.5 m。该干燥装置各层可单独控温，温度范围 30~100 ℃，风速范围 0.5~1 m/s，处理规模约 25 kg/h。GSL309 重力传感器，西安盖文电子科技有限公司；MIK-R200T 在线记录系统，杭州米科传感技术有限公司；ColorQuest XE 色差仪，美国 HunterLab 公司；180 型小型液压式压榨机，河南星都设备有限公司；GZX-9030MBE 鼓风干燥箱，上海博迅实业有限公司。

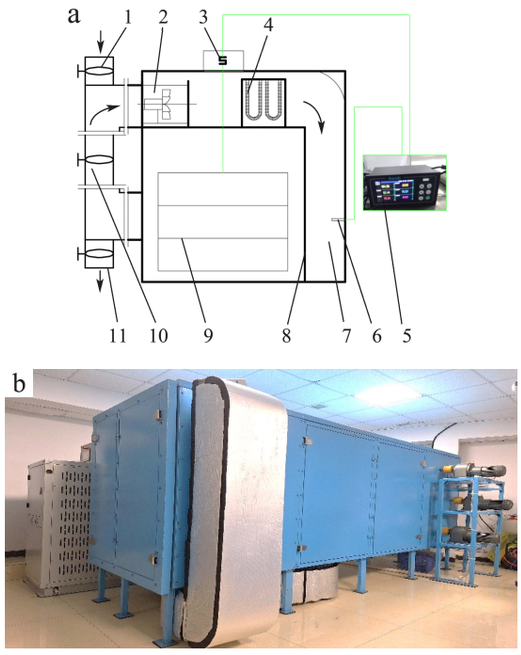


图 2 油茶果干燥应力破蒲试验装置

Fig.2 Schematics of the small-scale hot air dryer and pilot-scale continuous hot air dryer

注：a 为小试干燥试验装置示意图，b 为连续干燥中试装置。1 为进风风阀，2 为风机，3 为 S 型重量传感器，4 为电加热，5 为记录系统，6 为温湿度传感器，7 为风道，8 为透风板，9 为料盘，10 为风管，11 为出风风阀。

1.3 油茶果干燥应力破蒲试验

本文油茶果干燥应力破蒲温度分别为 50、60、70、80 ℃，风速约为 0.50 m/s。试验时，将一定量外表光亮、无裂纹、尺寸（φ，36±1 mm）相对均一的油茶果放入小试干燥装置中的料盘上，分别在上述干燥条件下进行干燥应力破蒲试验。利用手电钻钻过果蒲，在油茶籽内部打孔，内插入电阻式热电偶（φ，2 mm）以监控破蒲过程中油茶籽温度变化。破蒲过程中的油茶果质量、温度变化等数据分别由在线记录系统记录。

为进一步验证油茶果干燥应力破蒲技术效果，在图 2b 所示的连续干燥中试装置上进行了油茶果干燥应力破蒲中试。试验时，油茶果以 25 kg/h进料速度从最上层一端的进料口进入干燥机，随网带运行至另一端时，跌落至中层网带并反向运动；依据类推，油茶果完成破蒲后，从下层网带的出料口卸出。干燥应力破蒲温度范围 60~70 ℃。试验结束后，取一定量经干燥应力破蒲后的油茶果，分别按式（1）、（2）计算破蒲率、碎籽率[6]。相同方法重复三次。

$$\eta_b=\frac{m_b}{m_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

m_b——干燥应力破蒲后，开裂油茶果干物质质量，kg；

m_0——干燥应力破蒲后，取样油茶果干物质质量，kg；

η_b——破蒲率，%。

$$\eta_s=\frac{m_s}{m_{s0}}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

m_s——干燥应力破蒲后，籽、蒲分离后破碎油茶籽质量，kg；

m_{s0}——籽、蒲分离后油茶籽总质量，kg；

η_s——碎籽率，%。

1.4 油茶籽干燥试验

根据文献[5]，油茶籽热风干燥超过 95 ℃时，油茶籽断面呈黄色或黄褐色，其感观性状与自然干燥状态差异显著。40、65 ℃时，状态差别不大。本文选择 50 ℃热风干燥破蒲分离后的油茶籽。经 1.3 不同破蒲过程处理后的开裂油茶果进行人工分拣油茶籽，将油茶籽放入干燥装置的料盘上，设置干燥温度 50 ℃，干燥至湿基含水率 10% 以下，获得干油茶籽。

1.5 油茶果干燥应力破蒲过程失水动力学特征

为更好地预测油茶果干燥应力破蒲过程中的失水过程，本文新提出了一种半经验模型以模拟油茶果干燥应力破蒲过程的失水动力学特征，并利用实验数据进行了验证。该模型如式（3）：

$$MR(a,k,n,t)=\exp(-kt^n)+at \quad (3)$$

式中：

MR——水分比，本文近似为 $MR=M_t/M_0$；

M_0——初始干基含水率，kg/kg；

M_t——某时刻干基含水率；kg/kg；

a、k、n——参数，其值取决于干燥状态；

t——干燥时间，min。

干基含水率 M 按式（4）进行计算：

$$M=\frac{G_w}{G_s} \quad (4)$$

式中：

M——物料干基含水率，kg/kg；

G_w——物料中水质量，kg；

G_s——物料中干物质质量，kg。

本文利用较大的决定系数 R^2 和较小的均方根误差 *RMSE* 作为判断模型最佳适用性标准[11,12]。决定系数 R^2、均方根误差 *RMSE* 分别通过式（5）、（6）计算：

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{pre,i}-MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(MR_{pre,i}-MR_{mean,i})^2} \quad (5)$$

$$RMSE=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(MR_{pre,i}-MR_{exp,i})^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中：

exp——实验测量值；

pre——预测值；

mean——平均值；

n——测量次数。

1.6 原油质量分析

1.6.1 冷榨原油出油率

将经过不同破蒲过程后的定量（W_0）干茶籽放入液压式压榨机中，常温压榨，液压压力范围设置为 42~52 MPa，压榨时间为 40 min。收集并称重冷榨原油（*w*），按式（7）计算出油率（*y*）。

$$y=\frac{w}{W_0}\times 100\% \quad (7)$$

式中：

W_0——干茶籽质量，g；

w——冷榨原油质量，g；

y——出油率，%。

1.6.2 冷榨原油颜色分析

冷榨原油颜色变化通过色差仪进行表征。将原油样品装入 10 mm×55 mm×57 mm 透明玻璃比色皿中，在不同位置测量 3 次，获得 *L* 值、*a* 值、*b* 值。*L* 表示亮暗值，其范围为 0~100，数值越大表示偏亮；*a* 表示红绿值，其范围为 −60~60，正值表示偏红，负值表示偏绿；*b* 表示黄蓝值，其范围为 −60~60，正值表示偏黄，负值表示偏蓝。色差变化用总色差 Δ*E* 表示[13,14]，按式（8）进行计算。

$$\Delta E=\sqrt{(\Delta L)^2+(\Delta a)^2+(\Delta b)^2} \quad (8)$$

1.6.3 冷榨原油酸价及过氧化值分析

冷榨原油的酸价参照 GB 5009.229-2016[15]，按食品中酸价的测定（第一法）进行测定，数值以氢氧化钾（KOH）用量计算。过氧化值参照 GB 5009.227-2016[16]，按第一法测定。

1.6.4 冷榨原油水分及挥发物分析

冷榨原油的水分及挥发物分析参照 GB5009.236-2006[17]，按第二法进行测定。

1.7 数据处理

利用 MATLAB（R2014a）进行数据处理以及非线性回归分析。其他试验数据利用 Stata/MP（17.0）进行方差分析（Analysis of Variance, ANOVA）。不同指标均值采用 Bonferroni 多重比较检验。当 $P<0.05$ 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 油茶果干燥应力破蒲终点含水率及失水特征研究

热力干燥过程中，物料通常存在温度、湿度梯度和各向异性的收缩，产生干燥应力，导致出现变形，甚至裂纹[18,19]。干燥发生后，油茶果蒲表层因水分下降、温度升高出现湿度梯度以及温度梯度，果蒲发生收缩现象，出现干燥应力。干燥应力在果蒲表层表现为张力，在内部表现为压力。随着干燥的进行，当干燥应力进一步发展，超过果蒲的应力强度后，表层果腹线处产生裂纹，裂纹进一步发展成裂缝，最终导致果蒲开裂（破蒲）。油茶果干燥应力破蒲过程与水分变化的对应关系如图 3 所示。随着油茶果水分的降低，油茶果蒲由最初的完整“包含”状态逐渐开裂。当湿基含水率降至 32.00% 时，试验样本果蒲完全开裂，油茶籽完全暴露。根据文献[8]描述，油茶果蒲开裂露出油茶籽，油茶籽和油茶果蒲可直接在重力浮选机上通过振荡作用实现蒲、籽分离，即达到破蒲要求。试验用油茶果因个体结构差异，油茶籽可从裂缝中全部脱落时，油茶果平均湿基含水率处于 29.09%~34.57% 之间。湿基含水率越低，果蒲开裂越彻底，油茶籽、蒲分离越完全。但过度破蒲会增加热能消耗，增加干燥应力破蒲成本。本文基于综合考虑，选择湿基含水率平均值 32.00% 为干燥应力破蒲终点湿基含水率。油茶果处于干燥应力破蒲终点时，果蒲湿基含水率约为 25.70%，油茶籽湿基含水率约为 33.60%。

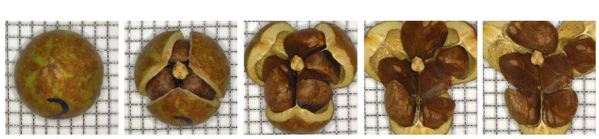
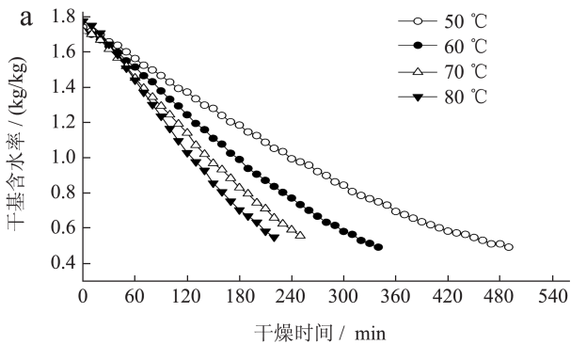


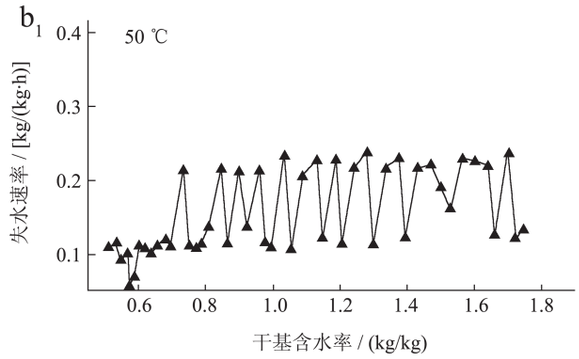
图 3 油茶果干燥应力破蒲过程中的水分变化

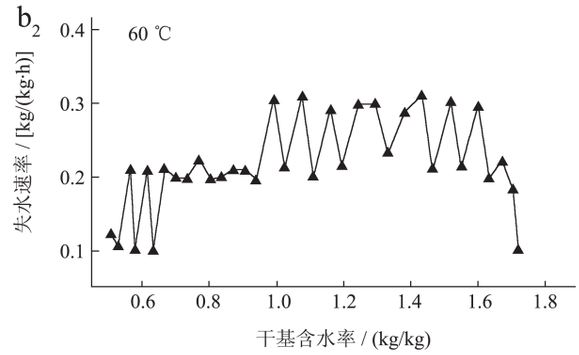
Fig.3 Moisture change during shell-breaking of *Camellia oleifera* fruit caused by drying stress

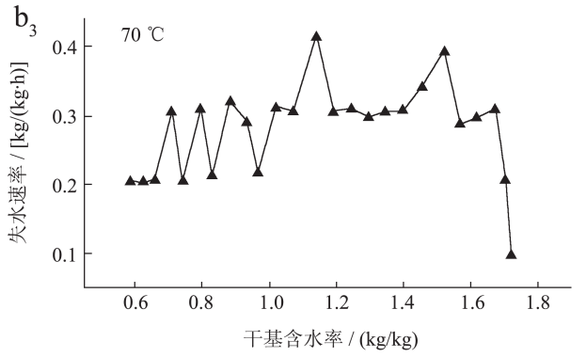
图 4a 是新鲜油茶果在 50、60、70、80 ℃热风环

境下干燥应力破蒲过程的失水曲线。不同温度下，各失水曲线均近似呈下降趋势。干燥应力破蒲初始，不同温度条件的失水曲线均出现快速下降现象。随着破蒲的进行，温度越高，失水曲线越陡，到达破蒲终点含水率时所需破蒲时间越短。当油茶果水分降至湿基含水率约 32.00% 时，50、60、70、80 ℃干燥应力破蒲时间分别约为 510、340、260、220 min。









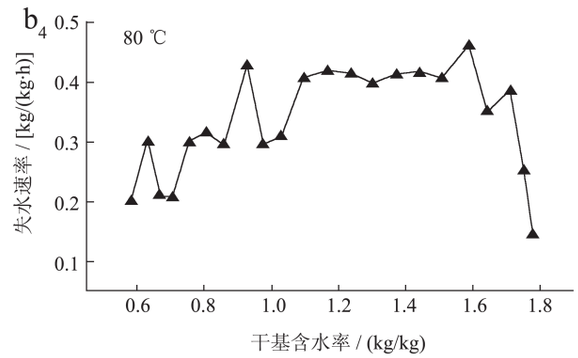


图 4 油茶果干燥应力破蒲失水特征研究

Fig.4 Moisture loss characteristics of *Camellia oleifera* fruit during shell breaking

注：a 为干燥应力破蒲失水曲线，b 为干燥应力破蒲失水速率曲线。

由图 4b 可知，油茶果不同干燥应力破蒲过程中，失水速率曲线呈阶梯状下降趋势，且存在提速段及多个近似恒速段。例如 60 ℃干燥应力破蒲时，初期失水速率逐渐增至约 0.25 kg/（kg·h），并维持近似恒速失水过程。至含水率约为 1.00 kg/kg 时，失水速率下降至约 0.20 kg/（kg·h），并再维持近似恒速干燥。失水至含水率为 0.70 kg/kg 左右时，干燥速率下降至 0.15 kg/（kg·h），并维持近似恒速失水至破蒲终点含水率。干燥温度升高，油茶果处于相同含水率状态时的失水速率越大。因此，升高温度有利于提高油茶果破蒲过程失水速率，缩短破蒲时间。

破蒲初期，油茶果整体处于升温阶段，果蒲是主要失水部位。果蒲升温使得其表层水汽分压增大，加速了水汽扩散，失水曲线出现提速段。随后果蒲进入受内部水分传质控制的降速过程。随着开裂的发展，内部的油茶籽逐渐暴露在干燥环境中，成为新增的失水部位。油茶籽水分不断在干燥环境中失去，使得失水曲线出现近似恒速段。油茶果蒲开裂越大，内部油茶籽暴露在干燥环境中越多，与干燥空气传热传质面积增大，失去水分越多，这也是油茶果干燥应力破蒲过程中出现多段近似恒速失水过程的原因。

2.2 油茶果干燥应力破蒲失水动力学模型

研究者通常在忽略物料外形收缩等假设下[20]，基于 Fick 传质定律建立扩散模型以模拟物料内部水分传递现象。由前文可知，新鲜油茶果破蒲前后形状发生显著变化。这增加了构建理论失水模型的难度。果蒲开裂、失水的同时，伴随着内部油茶籽逐渐暴露在干燥环境中，并直接参与失水过程中。这一现象区别于热风干燥过程中传统物料内部水分向物料表面传递过程。本文基于图 4a 失水曲线特征，组合传统指数模型

与线性模型优势，新建了一种半经验模型，并将新建的半经验模型与文献提供的常见半经验模型（表 1）进行了实验数据验证。

表 1 油茶果干燥应力破蒲失水动力学模型列表

Table 1 Kinetic models of moisture loss of *Camellia oleifera* fruit during shell breaking

序号	模型名称	模型	文献出处
1	Lewis	$MR=\exp(-kt)$	[21]
2	Page	$MR=\exp(-kt^n)$	[22]
3	Henderson and Pabis	$MR=a\exp(-kt)$	[14]
4	Logarithmic	$MR=a\exp(-kt)+c$	[23]
5	本文	$MR=\exp(-kt^n)+at$	—

从表 2 可知，所列模型的 R^2 值、*RMSE* 值分别在 0.967 3~0.999 9、0.239 9%~3.979% 范围内变化，这说明在一定精度范围内表中模型均可模拟油茶果干燥应力破蒲的失水过程。除 70 ℃ Page 模型的 R^2 值（0.999 7）、*RMSE* 值（0.373 2%），分别等于、稍小于本文所建模型的 R^2 值（0.999 7）、*RMSE* 值（0.374 9%）外，相比其他过程及模型，本文所建模型均具有最大的 R^2 值和最小的 *RMSE* 值（R^2 ≥0.999 7，*RMSE* ≤0.428 6%），适用性更佳。因此，本文所建的半经验模型可以应用于模拟不同油茶果干燥应力破蒲的失水过程。

2.3 干燥应力破蒲过程对油茶籽冷榨原油质量的影响

冷榨原油的品质决定了成品油后期处理工序（如水洗、碱洗、脱色等）的复杂性[24]和生产成本。冷榨原油酸价是评价其品质好坏的重要指标[25]。从表 3 可以看出，油茶籽后续冷榨原油酸价与油茶果破蒲温度有关（$P<0.05$）。随着干燥温度的升高，冷榨原油酸价数值显著升高。油茶果经 50 ℃破蒲过程后，其油茶籽冷榨原油酸价为 0.08 mg/g；经 80 ℃破蒲过程后，其原油酸价为 0.39 mg/g，升高约 387.50%。油茶果经不同干燥应力破蒲过程后，油茶籽冷榨原油酸价值均小于 1.00 mg/g，符合国家油茶籽油标准[26]。

表 2 油茶果失水模型统计分析结果表

Table 2 Result of statistical analyses on modeling of moisture loss

模型名称	温度/℃	模型参数			决定系数 R^2	均方根误差 *RMSE*/%
Lewis	50	k=0.002 405			0.987 6	2.496
	60	k=0.003 215			0.972 6	3.807
	70	k=0.003 849			0.967 3	3.979
	80	k=0.004 667			0.970 2	3.942
Page	50	k=0.000 804 1	n=1.193		0.999 6	0.456 2
	60	k=0.000 586 3	n=1.318		0.999 8	0.308 8
	70	k=0.000 626 8	n=1.358		0.999 7	0.373 2
	80	k=0.000 890 4	n=1.336		0.999 5	0.515
Henderson and Pabis	50	a=1.048	k=0.002 587		0.994 9	1.614
	60	a=1.07	k=0.003 582		0.988 4	2.515
	70	a=1.069	k=0.004 327		0.985 6	2.689
	80	a=1.07	k=0.005 218		0.987 3	2.638
Logarithmic	50	a=1.365	k=0.001 652	c=−0.341 7	0.998 6	0.845 2
	60	a=1.95	k=0.001 461	c=−0.918 1	0.997 9	1.08
	70	a=3.097	k=0.001 056	c=−2.068	0.998 1	0.999 5
	80	a=2.119	k=0.001 955	c=−1.086	0.997 1	1.297
本文模型	50	k=0.000 730 4	n=1.218	a=5.268e−05	0.999 7	0.428 6
	60	k=0.000 535 4	n=1.347	a=9.157e−05	0.999 9	0.239 9
	70	k=0.000 613 1	n=1.367	a=5.037e−05	0.999 7	0.374 9
	80	k=0.000 759 8	n=1.395	a=0.000 301 2	0.999 8	0.294 5

表 3 干燥应力破蒲过程对油茶籽冷榨原油质量的影响

Table 3 Effects of shell-breaking conditions on quality of cold-pressing oil made by *Camellia oleifera* seeds

干燥温度/℃	总色差				出油率/%	酸价 (以 KOH 计)/(mg/g)
	l	*a*	*b*	Δ*E*		
50	59.33 ± 0.03^{c}	−1.03 ± 0.02^{d}	47.91 ± 0.11^{c}	76.27 ± 0.08^{c}	23.43 ± 0.91^{a}	0.08 ± 0.01^{d}
60	61.92 ± 0.01^{a}	−0.68 ± 0.02^{c}	53.19 ± 0.05^{b}	81.63 ± 0.03^{b}	21.69 ± 1.92^{ab}	0.12 ± 0.01^{c}
70	61.92 ± 0.07^{a}	0.88 ± 0.04^{b}	56.08 ± 0.17^{a}	83.55 ± 0.16^{a}	19.01 ± 0.21^{bc}	0.25 ± 0.03^{b}
80	61.75 ± 0.02^{b}	1.58 ± 0.02^{a}	56.38 ± 0.16^{a}	83.63 ± 0.12^{a}	18.84 ± 0.48^{c}	0.39 ± 0.02^{a}

注：表中数值采用平均值 ± 标准差；每列具有相同字母均值表示无显著性差异（P＞0.05）。

油茶果干燥应力破蒲过程中，逐渐暴露在干燥环境中的油茶籽内部存在着热量、水分传递过程。从图 5 可以看出，破蒲开始阶段（64.00%~60.00%），油茶籽中心升温曲线存在快速升温段。这说明此时油茶果已经出现开裂现象（图 3），油茶籽与外部热空气发生强烈传热传质过程。随着破蒲进行，油茶籽中心温度逐渐升高，并接近干燥介质温度。干燥温度越高，油茶籽中心升温速率越快。在水分、热量以及干燥介质中氧气的作用下，油脂会发生水解、氧化反应[27]，导致压榨原油酸价升高。相比低温破蒲过程，高温破蒲会加速油脂降解，使酸价增加，不利于油脂稳定。这也是高温干燥应力破蒲后冷榨原油酸价显著升高的原因。

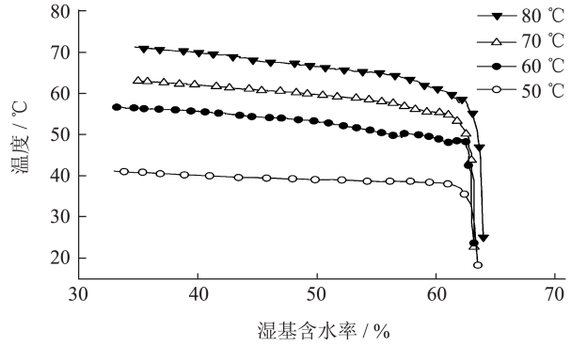


图 5 干燥应力破蒲过程中油茶籽中心升温曲线

Fig.5 Temperature change inside of *Camellia oleifera* seed during shell breaking

从表 3 可以看出，油茶籽后续冷榨原油颜色变化与油茶果破蒲温度有关（P＜0.05）。相比低温 50 ℃破蒲过程，60、70、80 ℃干燥应力破蒲后，冷榨原油总色差 Δ*E* 显著增加，分别增加约 7.02%、9.54%、9.65%。*L* 值分别增加 4.36%、4.36%、4.07%，*a* 值分别增加 33.98%、185.43%、253.39%，*b* 值分别增加 11.02%、17.05%、17.67%。油茶多酚是油茶籽中最重要的次生代谢产物之一[28,29]。干燥应力破蒲过程中多酚物质发生的褐变反应是导致后续冷榨原油颜色变化的主要原因。随着干燥应力破蒲温度的升高，本研究压榨原油实际颜色由微暗绿色逐渐向红黄色变化。

从表 3 可知，随着干燥应力破蒲温度的升高，冷榨原油出油率呈降低趋势。50 ℃干燥应力破蒲后冷榨原油出油率为 23.43%，80 ℃破蒲后冷榨原油出油率为 18.84%。与前者相比，后者出油率降低了 19.59%。油茶籽富含有油脂、淀粉等营养物质。其中的淀粉在湿热环境下易发生凝胶化，凝胶化的淀粉与油脂体、油脂会发生相互作用，成为结构复杂的复合物[30,31]。这种复合物可能不利于油脂的低温榨出。这是试验条件下高温干燥应力破蒲后油茶籽冷榨原油出油率降低的原因。

2.4 破蒲率及碎籽率比较

综合油茶果干燥应力破蒲失水特征以及冷榨原油品质，该研究提出变温干燥应力破蒲工艺：初期采用温度 70 ℃破蒲 2 h（最上层），再采用 60 ℃破蒲约 4 h 至湿基含水率 32.00%（中、下层）。从油茶果干燥应力破蒲中试效果看（图 6），在干燥应力的作用下，油茶果皮背缝线呈完全开裂状态，部分油茶籽已从果蒲中脱落。表 4 比较了本文油茶果干燥应力破蒲技术和文献报道的机械破蒲技术的破蒲率、碎籽率指标。可以看出，本文破蒲方式碎籽率为 0%，无碎籽产生，破蒲率为 98.35%，优于机械破蒲方式。破蒲分离后的油茶籽经前述 1.4 处理后。冷榨原油颜色呈金黄色，具有油茶籽原油固有的气味和滋味，酸价（以 KOH 计）、过氧化值分别为 1.00 mg/g，0.009 9 g/100 g，水分及挥发物为 0.35%，出油率为 21.08%。油茶果的品种、成熟程度、大小差异可能影响到破蒲率、碎籽率。相比机械破蒲，干燥应力破蒲因避免了机械力与油茶果、油茶籽的直接作用，降低了碎籽率。但本文破蒲方式缺点是降低油茶果蒲水分需要消耗额外能源。在科学利用废弃油茶果蒲作为燃料或采用其他节能干燥方式情况下，利用干燥应力破蒲可以作为一种油茶果破蒲方式进行推广应用。

图 6 油茶果干燥应力破蒲中试后的状态

Fig.6 *Camellia oleifera* after shell-breaking caused by drying stress

表 4 油茶果干燥应力破蒲后破蒲率、碎籽率比较

Table 4 The results of shell-breaking ratio and seed-breaking ratio of *Camellia oleifera*

项目	本文	文献[6]	文献[32]	文献[8]
破蒲方式	干燥应力破蒲	机械破蒲	机械破蒲	热风干燥
破蒲率/%	98.35	96.91	95.37	96.97
碎籽率/%	0	3.38	4.27	—

注：—代表无文献数据。

3 结论

油茶果干燥应力破蒲过程伴随着油茶果蒲失水以及油茶籽干燥过程。干燥温度升高，油茶果干燥应力破蒲失水曲线变陡，破蒲时间显著缩短；失水速率曲线呈阶梯状下降趋势，且存在提速段及多个近似恒速段。破蒲终点为湿基含水率 32.00% 时，果蒲湿基含水率从 73.00% 降至 25.70%，油茶籽湿基含水率从 55.60% 降至 33.60%。新建的半经验失水模型［$MR(a,k,n,t)=\exp(-kt^n)+at$］可以准确模拟不同温度下油茶果干燥应力破蒲失水过程（$R^2\geqslant 0.999\ 7$，$RMSE\leqslant 0.428\ 6\%$）。低温干燥应力破蒲有利于提高油茶籽冷榨原油质量和出油率。随着干燥应力破蒲温度升高，油茶籽冷榨原油酸价数值从 0.08 mg/g 显著增加至 0.39 mg/g，总色差从 76.27 显著增加至 83.63，出油率从 23.43% 显著降低至 18.84%。采用 70 ℃破蒲 2 h、60 ℃破蒲约 4 h 的变温干燥应力破蒲工艺，油茶果破蒲率为 98.35%，油茶籽无破碎，冷榨原油酸价（以 KOH 计）、过氧化值分别为 1.00 mg/g、0.009 9 g/100 g，水分及挥发物为 0.35%，出油率为 21.08%。该研究可为优化油茶果干燥应力破蒲技术工艺和设备开发提供依据。

参考文献

[1] QUAN W X, WANG A P, GAO C, et al. Applications of chinese *Camellia oleifera* and its by-products: a review [J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10: 921246.

[2] 王凤贺,丁冶春,陈鹏枭,等. 油茶籽热风干燥动力学研究[J].农业机械学报,2018,49(s1):426-432.

[3] MA J L, YE H, RUI Y K, et al. Fatty acid composition of *Camellia oleifera* oil [J]. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2011, 6(1): 9-12.

[4] ZHANG F H, LI Z, ZHOU J Q, et al. Comparative study on fruit development and oil synthesis in two cultivars of *Camellia oleifera* [J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 348.

[5] 刘增革.油茶籽热风干燥试验研究[D].北京:中国农业机械化科学研究,2013.

[6] 朱广飞,任嘉嘉,王振,等.油茶果脱壳机的设计与工作参数优化[J].农业工程学报,2016,32(7):19-27.

[7] 袁超哲.油茶果机械化脱蒲分离关键技术与装备研究[D].杭州:浙江农林大学,2023.

[8] 赵海瑞,滕兆丽,杨浩勇,等.油茶果干燥特性及烘干脱蒲技术[J].农业工程,2021,11(10):61-67.

[9] WANG F H, LIU Z X, DING Y C, et al. Study on the splitting by hot-air drying of *Camellia oleifera* fruit [J]. International Journal of Food Engineering, 2022, 18(2): 143-151.

[10] GB 5009.3-2016,食品中水分的测定[S].

[11] KALAYANAMITRA K, ASSAWARACHAN R. Modeling the drying of coconut residue in fluidized bed dryer [J]. Journal of Culinary Science & Technology, 2024, 22(2): 197-211.

[12] İLTER I, AKYIL S, DEVSEREN E, et al. Microwave and hot air drying of garlic puree: drying kinetics and quality characteristics [J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54(7): 2101-2112.

[13] CHONG C H, LAW C L, CLOKE M, et al. Drying kinetics and product quality of dried chempedak [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(4): 522-527.

[14] MUGODO K, WORKNEH T S. The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality [J]. Heliyon, 2021, 7(6): e07182.

[15] GB5009.229-2016,食品中酸价的测定[S].

[16] GB5009.227-2016,食品中过氧化值的测定[S].

[17] GB5009.236-2016,动植物油脂水分及挥发物的测定[S].

[18] FU Z Y, CHEN J X, ZHANG Y Y, et al. Review on wood deformation and cracking during moisture loss [J]. Polymers, 2023, 15(15): 3295.

[19] TOMAD J, LEELATANON S, JANTAWEE S, et al. Internal stress development within wood during drying: regime and kinetics [J]. Drying Technology, 2023, 41(1): 77-88.

[20] TORRES S S, SANTIAGO A P, BAUTISTA E H. Drying model for softwood and moisture patterns measured by magnetic resonance imaging [J]. Drying Technology, 2019, 37(4): 458-467.

[21] RAZOLA-DÍAZ M D C, GUERRA-HERNÁNDEZ E J, GÓMEZ-CARAVACA A M, et al. Mathematical modelling of drying

kinetics of avocado peels and its influence on flavan-3-ols codntent and antioxidant activity [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 176: 114552.

[22] ZHAO T X, DONG Q Y, ZHOU H B, et al. Drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant activity and antidiabetic potential of sargassum fusiforme processed under four drying techniques [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 163: 113578.

[23] XU H H, WU M, WANG Y, et al. Effect of combined infrared and hot air drying strategies on the quality of chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) cakes: drying behavior, aroma profiles and phenolic compounds [J]. Foods, 2022, 11(15): 2240.

[24] 罗凡,费学谦,李康雄,等.加工工艺对油茶籽油氧化稳定性及酚类物质含量的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):293-299.

[25] 朱广飞,刘海,李卫,等.油茶籽储藏品质变化规律及条件优化[J].农业工程学报,2020,36(2):301-311.

[26] 国家市场监督管理总局.GB/T 11765-2018,油茶籽油[S].北京:中国标准出版社,2018.

[27] LÓPEZ A, PIQUÉ M T, BOATELLA J, et al. Influence of drying conditions on the hazelnut quality. I. lipid oxidation [J]. Drying Technology, 1997, 15(3-4): 965-977.

[28] 魏征,郭咪咪,王雅朦,等.油茶籽油多酚化合物研究进展[J].食品科学,2021,42(3):311-320.

[29] 周晴芬,徐洲,魏岚,等.4种油茶籽油中多酚类物质的抗氧化活性比较研究[J].中国油脂,2014,39:35-38.

[30] ZHOU J Y, GUO J Y, GLADDEN I, et al. Complexation ability and physicochemical properties of starch inclusion complexes with C18 fatty acids [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107175.

[31] PANYOO A E, EMMAMBUX M N. Amylose-lipid complex production and potential health benefits: a mini-review [J]. Starch, 2017, 69(7-8): 1600203.

[32] 廖配,全腊珍,肖旭,等.撞击式油茶果破壳装置的设计及试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(1):108-112.