

油菜籽微波预处理的干燥动力学及模型研究

杨 博,刘昌盛,李文林,王未君,曾仕林

(中国农业科学院 油料作物研究所,油料油脂加工技术国家地方联合工程实验室,农业部油料加工重点实验室,油料脂质化学与营养湖北省重点实验室,武汉 430062)

摘要:为了探明油菜籽微波预处理过程中的水分变化情况,建立油菜籽微波预处理干燥模型,对油菜籽在料层厚度 12 mm、不同微波功率(1.0、1.5、2.0 kW)以及微波功率 1.5 kW、不同料层厚度(6、12、18 mm)下预处理后的含水率、水分比和失水速率的变化情况进行了研究,并以常用的 3 种干燥模型指数模型、单项扩散模型和 Page 模型进行了数据拟合。结果表明:微波功率越高、料层越薄,油菜籽水分流失越快,微波预处理时间越短;微波预处理过程中油菜籽水分变化情况与 Page 模型拟合度最好。

关键词:油菜籽;微波预处理;水分变化;干燥动力学模型

中图分类号:TS222+.1;TS224.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)07-0088-04

Drying kinetics and model of rapeseed by microwave pretreatment

YANG Bo, LIU Changsheng, LI Wenlin, WANG Weijun, ZENG Shilin

(Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Key Laboratory of Oilseeds Processing of Ministry of Agriculture, Oil Crops and Lipids Process Technology National & Local Joint Engineering, Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)

Abstract: In order to clarify the moisture changes during rapeseed microwave pretreatment process and establish rapeseed microwave pretreatment drying model, the changes in moisture content, moisture ratio and water loss rate of rapeseed after microwave pretreatment were investigated at a layer thickness of 12 mm and different microwave powers (1.0, 1.5, 2.0 kW), and at a microwave power of 1.5 kW and different layer thicknesses (6, 12, 18 mm), and data fitting was carried out with the common drying models of exponential model, single diffusion model and Page model. The results showed that the higher the microwave power and the thinner the material layer, the faster the moisture loss of rapeseed and the shorter the pretreatment time. The changes in moisture of rapeseed during the microwave pretreatment process fitted best with the Page model.

Key words: rapeseed; microwave pretreatment; moisture change; drying kinetics model

我国油菜籽主要分布在长江中下游区域^[1],其种植面积长期占据世界第一^[2],近年来还在不断上涨,而且油菜籽是我国食用植物油的主要来源之一^[3]。油菜籽在压榨制油前会进行预处理,预处理方法主要有微波预处理、干法炒籽和高温蒸炒等^[4]。其中微波预处理是一种新型的油菜籽预处理方式。

微波是指波长范围为 1 mm ~ 1 m,频率介于 300 MHz ~ 300 GHz 的电磁波,工业上实际使用的微波频段为 915 MHz 和 2 450 MHz^[5]。微波加热物料的方式与传统加热方式不同,其通过电磁波使物料内部的极性分子发生极化,分子剧烈运动,分子间的摩擦增大,物料从内部被加热,这种特别的加热方式使得微波的热效率非常高^[6-7]。但微波技术在处理水果、蔬菜和肉类时会带来外观质量不佳、口感不好等问题,且设备投资较大,干燥成本较高^[8-10],因此大多会与其他干燥技术联用。

目前,7D 菜籽油绿色加工技术在油料调质增香过程中使用了微波预处理^[11],相比于传统预处理

收稿日期:2021-07-20;修回日期:2022-02-22

基金项目:国家自然科学基金(31772010)

作者简介:杨 博(1990),男,硕士研究生,研究方向为食品加工与安全(E-mail)yangbo5155@sina.com。

通信作者:李文林,研究员(E-mail>wenlinli2005@163.com。

方式,油菜籽经微波预处理后压榨制得的菜籽油中多酚、维生素 E 和甾醇的含量显著提高,其中多酚含量更是提高近 120 倍^[12-13]。目前有少量关于油菜籽干燥特性的研究,如胡众欢等^[14]研究并建立了甘蓝型油菜籽薄层热风干燥过程中能耗模型,Due^[15]、Jukic^[16]等建立了油菜籽的薄层干燥模型,并计算了有效水分扩散系数。上述关于油菜籽干燥特性的研究主要使用传统的干燥方式,而且大多是将高水分油菜籽干燥至 8% 左右的安全储藏水分。在实际的油菜籽加工生产中,商品油菜籽本身含水率在 8% 左右,预处理之后的油菜籽含水率多为 1%~2%,然后加水调质以达到适宜压榨的含水率(2%左右)和状态。为了了解油菜籽微波预处理过程中水分变化情况,弥补油菜籽低水分段干燥特性研究的缺失,本文对商品油菜籽进行微波预处理,研究其干燥特性,建立干燥动力学模型,为实际工业生产提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

油菜籽,外购。

微波设备(工作频率 2450 MHz,功率 0~5 kW 可调),南京凯乐微波设备公司;DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱;ME104/02 电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油菜籽预处理

将 1 000 g 含水率为 7% 的油菜籽,均匀平铺在平皿中,分别在不同料层厚度、不同微波功率下处理不同时间,每隔 1 min 称量样品质量并计算其含水率,直至微波预处理的油菜籽含水率低于 1%。

1.2.2 指标测定

1.2.2.1 含水率

含水率按式(1)计算。

$$W = [7\% - (m_0 - m_t)/m_0] \times 100\% \quad (1)$$

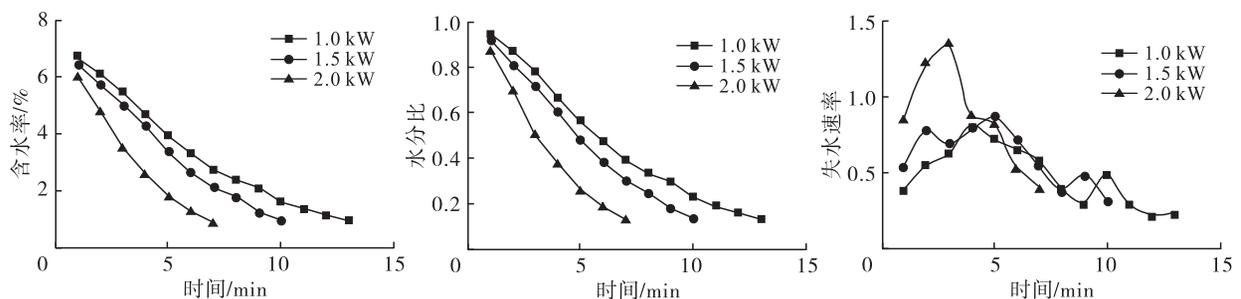


图1 微波功率对油菜籽含水率、水分比和失水速率的影响

由图1可以看出,随着微波预处理时间的延长,油菜籽的含水率和水分比不断降低,同时微波功率越大,

式中的 W 为含水率;7%为样品的初始含水率; m_t 为干燥至 t 时刻样品的质量; m_0 为初始时刻样品的质量。

1.2.2.2 水分比^[17]

水分比按式(2)计算。

$$M_t = W_t/W_0 \quad (2)$$

式中: M_t 为水分比; W_t 为微波预处理 t 时刻油菜籽的含水率; W_0 为油菜籽的初始含水率。

1.2.2.3 失水速率^[18]

失水速率按式(3)计算。

$$R_s = (W_2 - W_1) \times 100 \quad (3)$$

式中: R_s 为失水速率; $W_2 - W_1$ 为相邻时刻含水率的差值。

1.2.3 干燥模型确定

为了更好地描述油菜籽在微波预处理过程中水分变化情况,选取了3种常用的干燥模型^[19-21](见表1)进行拟合分析,并选取决定系数(R^2)作为拟合度的判定标准(即 R^2 越接近1其拟合度越好),以选择合适的模型。

表1 常用的干燥数学模型

模型名称	方程表达式	线性表达式
单项扩散模型	$M_t = A \exp(-Bt)$	$\ln M_t = \ln A - Bt$
指数模型	$M_t = \exp(-kt)$	$\ln M_t = -kt$
Page 模型	$M_t = \exp(-kt^N)$	$\ln(-\ln M_t) = \ln k + N \ln t$

注: M_t 为水分比; t 为油菜籽微波干燥时间; k 为干燥速度常数; A 、 B 、 N 为各模型方程的待定系数

2 结果与分析

2.1 不同微波功率下油菜籽水分变化情况

在料层厚度 12 mm 条件下,考察微波功率对微波预处理油菜籽含水率、水分比和失水速率的影响,结果见图1。

曲线的斜率越大,达到 1% 含水率所需的微波预处理时间也越短,而且随着油菜籽含水率的降低,曲线越来越

平缓。这是由于油菜籽内部的水分子为极性分子,会吸收微波能转化为热能,使料温升高,油菜籽中的水分汽化而从油菜籽内部迁移出去^[22],在预处理初始阶段油菜籽含水率较高,吸收的微波能较快,所以水分流失也较快,随着油菜籽含水率的降低,吸收的能量越来越少,克服水分子从内部向外迁移的阻力越来越难^[23],导致水分流失较慢。

由图 1 还可以看出,随着微波预处理时间的延长,失水速率总体呈先上升后下降的趋势,且微波功

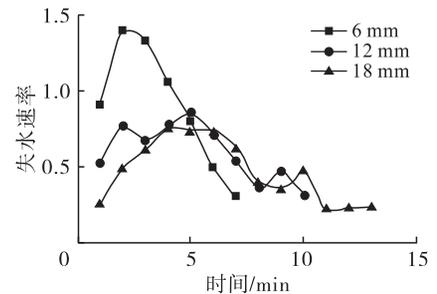
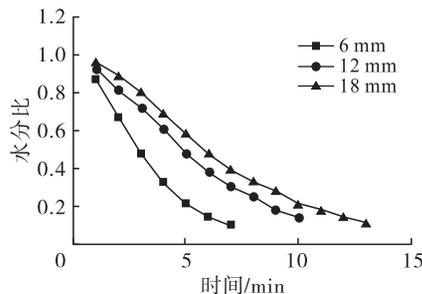
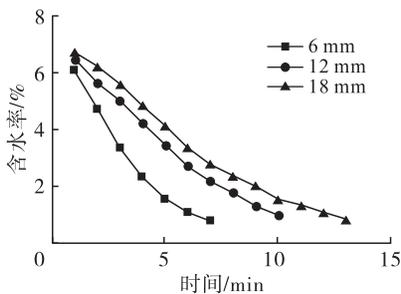


图 2 料层厚度对油菜籽含水率、水分比和失水速率的影响

由图 2 可以看出,随着微波预处理时间的延长,油菜籽含水率和水分比逐渐降低,且料层越薄,含水率和水分比变化曲线越陡峭,达到 1% 含水率所需微波预处理时间越短。这可能是因为微波预处理初期油菜籽含水率较高,料温较低,吸热后温度迅速上升,料层上部的油菜籽水分快速流失,而料层底部的油菜籽水分散失困难,料层越厚,底部油菜籽水分散失需要的时间越长,达到 1% 含水率所需微波预处理的时间就越长。

由图 2 还可以看出,油菜籽失水速率先增加后减少,且料层越厚,失水速率增加和减少得越缓慢,达到 1% 含水率所需微波预处理的时间也越长,在料层厚度为 12 mm 和 18 mm 时,微波预处理中期油菜籽失水速率相对保持稳定。可能是因为微波预处理初期,油菜籽含水率较高,吸收微波能转化为热能后,料温上升快,料层越薄,水分越容易流失,失水速率就越大,微波预处理过程短,而料层越厚,水分在层级间迁移困难,失水速率较小,需要的微波预处理时间就越长,且料层较厚时,微波预处理中期油菜籽吸收热量与水分散失需要的热量达到相对平衡,失水速率变化较小。

2.3 油菜籽微波预处理干燥动力学模型的确定

按 1.2.3 方法选取 3 种常用的干燥模型对油菜籽微波预处理过程中的水分变化情况进行拟合,为了便于分析,对 3 种模型进行了线性变化,线性变化后只需要考虑 $\ln M_r$ 与 t 以及 $\ln(-\ln M_r)$ 与 $\ln t$ 的关系,结果如图 3 ~ 图 6 所示。

率越大,初始和最大失水速率都越大。原因可能是微波功率越大,微波预处理初期油菜籽吸收的能量越多,料温迅速升高,使油菜籽水分流失较快,随着油菜籽含水率的降低,水分流失变得困难,失水速率逐渐降低。

2.2 不同料层厚度下油菜籽水分变化情况

在微波功率 1.5 kW 时,考察料层厚度对微波预处理油菜籽含水率、水分比和失水速率的影响,结果见图 2。

拟合过程中发现本实验数据不适合用指数模型进行拟合,因此仅进行了单项扩散模型和 Page 模型拟合。由图 3 ~ 图 6 可见: $\ln M_r$ 与 t 关系曲线和 $\ln(-\ln M_r)$ 与 $\ln t$ 关系曲线都呈线性关系,说明可以用单项扩散模型和 Page 模型对实验数据进行拟合,但单项扩散模型拟合的 R^2 在 0.985 9 ~ 0.996 2 之间,而 Page 模型拟合的 R^2 在 0.998 4 ~ 0.998 7 之间,后者更接近 1,用 Excel 对拟合数据进行线性回归分析发现 $p < 0.000 1$,说明油菜籽微波预处理水分变化过程与 Page 模型呈显著相关性,Page 模型更适合作为油菜籽微波预处理的干燥动力学模型。

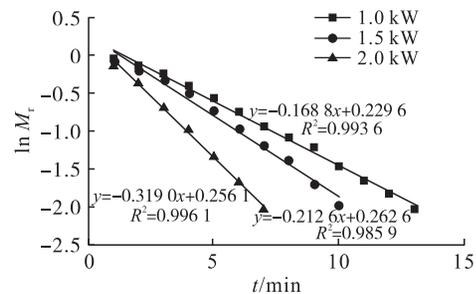


图 3 不同微波功率下 $\ln M_r$ 与 t 的关系曲线

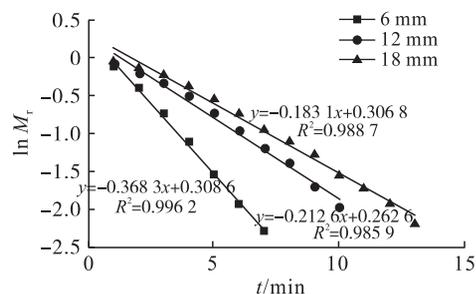
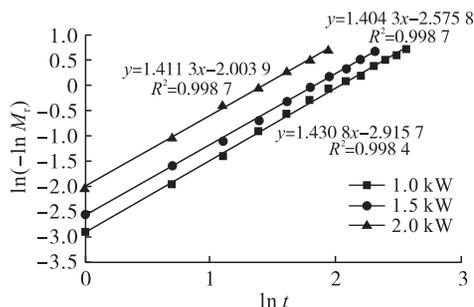
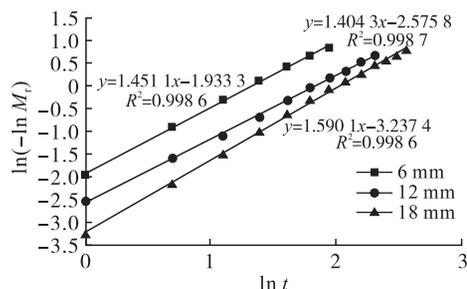


图 4 不同料层厚度下 $\ln M_r$ 与 t 的关系曲线

图5 不同微波功率下 $\ln(-\ln M_r)$ 与 $\ln t$ 的关系曲线图6 不同料层厚度下 $\ln(-\ln M_r)$ 与 $\ln t$ 的关系曲线

3 结论

将含水率7%的商品油菜籽在不同微波功率和料层厚度下进行微波预处理,结果发现,微波功率越高、料层越薄,微波预处理时间越短,料层厚度为12 mm和18 mm时,失水速率有一个相对稳定期。用常用的干燥模型进行数据拟合发现,微波预处理油菜籽水分变化情况与Page模型拟合度最好,研究结果对实际生产中将微波干燥应用于油菜籽预处理有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 吕磊. 油菜籽干燥技术研究现状与发展趋势[J]. 江西农业, 2019(2): 34, 48.

[2] 韩领, 张珍, 夏晓洋, 等. 油菜籽脂质伴随物与慢性病关系的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(6): 72-75.

[3] 张洋, 杨丽华, 龚道新, 等. 油菜籽中高效氟吡甲禾灵及其代谢物的残留检测与膳食风险评估[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 326-331.

[4] 王未君, 李文林, 刘昌盛, 等. 干法炒籽对油菜籽多酚和菜籽油品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 98-103.

[5] CHANDRASEKARAD S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing: a review [J]. Food Res Int, 2013, 52(1): 243-261.

[6] TU Z C, HU Y M, WANG H, et al. Microwave heating enhances antioxidant and emulsifying activities of ovalbumin glycosylated with glucose in solid-state [J]. J Food Sci Tech,

2015, 52(3): 1453-1461.

[7] SATOSHI H, ROBERT F S, JUN F, et al. Microwave chemical and materials processing [M]. Singapore: Springer, 2018: 213-241.

[8] 张明, 马超, 张博华, 等. 低褐变度灰枣片微波热风联合干燥工艺优化研究[J]. 中国果菜, 2021, 41(6): 1-4.

[9] 徐亚元, 郎旭敏, 肖亚冬, 等. 超声渗透辅助组合干燥对胡萝卜干燥均匀性及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(9): 148-156.

[10] 刘德成, 郑霞, 肖红伟, 等. 红枣干燥技术与装备研究进展[J]. 农机化研究, 2022, 44(1): 8-18.

[11] 中国农业科学院油料作物研究所产品加工与营养学研发团队. 功能型菜籽油7D产地绿色高效加工技术[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(3): 485.

[12] 从艳霞, 郑明明, 郑畅, 等. 微波技术对油菜籽品质影响研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(1): 151-156.

[13] 周琦, 杨涓, 黄凤洪, 等. 微波和脱皮处理菜籽对油中活性成分的影响[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(5): 507-512.

[14] 胡众欢, 李守太, 杨亮, 等. 甘蓝型油菜籽薄层热风干燥的能耗分析与研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 40-44.

[15] DUE L A, HAN J W, KEUM D H. Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. J Stored Prod Res, 2011, 47(1): 32-38.

[16] JUKIC Z, FONAL J, OSTASZYK A, et al. Convective drying of rapeseed hybrids seeds [J]. Agric Consp Sci, 2009, 74(3): 191-196.

[17] 许晴晴, 陈杭君, 郜海燕, 等. 真空冷冻和热风干燥对蓝莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 64-68.

[18] 诸爱士, 夏凯. 瓠瓜薄层热风干燥动力学研究[J]. 农业工程学报, 2011, 17(1): 365-369.

[19] MENGES H O, EREKIN C. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples [J]. J Food Eng, 2005, 77(1): 141-145.

[20] ABALONE R, GASTON A, CASSINERA A, et al. Thin layer drying of amaranth seeds [J]. Biosyst Eng, 2005, 93(2): 421-424.

[21] BIRCH D A, YOUNG W R, FRANKS P J S. Thin layers of plankton: formation by shear and death by diffusion [J]. Deep-Sea Res Pt I, 2008, 55(3): 277-295.

[22] 程丽君, 蔡敬民, 胡勇, 等. 蓝莓微波干燥动力学模型的研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(5): 78-82.

[23] 卜召辉, 胡庆国, 陆宁. 真空微波干燥金针菇的工艺研究[J]. 包装与食品机械, 2010, 28(6): 13-16.