

旋转闪蒸干燥南极磷虾的干燥特性和动力学模型

Spin-flash drying characteristics and kinetic model of antarctic krill

谈佳玉^{1,2,3}欧阳杰^{1,2,3}马田田^{1,2,3}沈建^{1,2,3}TAN Jiayu^{1,2,3}OUYANG Jie^{1,2,3}MA Tiantian^{1,2,3}SHEN Jia^{1,2,3}

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

2. 农业农村部远洋渔船与装备重点实验室, 上海 200092;

3. 大连工业大学海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁 大连 116034)

(1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Ocean Fishing Vessel and Equipment, Ministry of Agriculture; Shanghai 200092, China; 3. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

摘要:目的:实现南极磷虾旋转闪蒸干燥过程的控制。方法:对南极磷虾在 120~180 °C 范围内进行干燥试验,选取常用的 6 种干燥模型对试验数据进行拟合,进一步采用回归分析建立干燥模型常数项与温度的方程,得到干燥模型表达式并进行验证。根据 Fick 第二定律方程计算得到南极磷虾干燥水分扩散系数。结果:干燥温度对干燥热效率和干燥速率的影响显著,干燥温度为 130~180 °C 的南极磷虾干燥曲线均为降速干燥阶段。Page 模型适合用来描述和预测南极磷虾旋转闪蒸干燥过程,回归分析得到模型常数项方程为 $k = \exp(-27.5321 + 0.3018T - 8.5382 \times 10^{-4}T^2)$, $n = 14.0106 - 0.15767T + 4.7509 \times 10^{-4}T^2$ 。随着温度的升高,南极磷虾有效水分扩散系数从 $2.53935 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 升高到 $13.88964 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。结论:采用旋转闪蒸干燥方式可以有效保护南极磷虾中的热敏性成分不被破坏,提高产品品质。

关键词:南极磷虾; 旋转闪蒸干燥; 干燥速率; 动力学模型; 有效水分扩散系数

Abstract: Objective: The purpose of this study was to investigate the drying characteristics and establish the kinetic model of Antarctic krill during spin-flash drying. The drying experiments were carried out at 120 °C to 180 °C. **Methods:** Six common thin-

layer drying models were selected to fit the experimental data. Further, the equations of drying model constant and temperature were established to obtain the model expression and validate the optimal drying model. The effective moisture diffusion coefficients were calculated by Fick's second law. **Results:** The results showed the drying temperature had a significant effect on drying thermal efficiency and drying rate. The spin-flash drying of Antarctic krill was a falling rate drying process at 130 °C to 180 °C. The Page model was suitable for describing and predicting the spin-flash drying process of Antarctic krill. The constant term equations of the model were established by regression analysis, which were $k = \exp(-27.5321 + 0.3018T - 8.5382 \times 10^{-4}T^2)$ and $n = 14.0106 - 0.15767T + 4.7509 \times 10^{-4}T^2$. As the drying temperature increasing, the effective moisture diffusion coefficient increased from $2.53935 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ to $13.88964 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. **Conclusion:** The spin-flash drying method had the advantages of higher effective moisture diffusion coefficient and higher drying efficiency, which can effectively protect the thermal sensitive composition in Antarctic krill from being damaged and improve the product quality.

Keywords: Antarctic krill; spin-flash drying; drying rate; kinetic model; effective moisture diffusion coefficient

基金项目:中国水产科学研究院院级基本科研业务费专项(编号:2020XT1202);青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(编号:2022QNLMO3002-3)

作者简介:谈佳玉,女,中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所助理研究员,硕士。

通信作者:沈建(1971—),男,中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所研究员,硕士。E-mail: shenjian@fmiri.ac.cn

收稿日期:2022-12-01 **改回日期:**2023-06-14

南极磷虾(*Euphausia superba*)是一种主要分布在南极海域和南大洋,形态似虾的无脊椎动物,体长 40~60 mm,生物量可达 6.5~10.0 亿 t^[1]。虾粉是南极磷虾产业链中最主要的产品之一,获取途径包括船载加工和陆基加工^[2]。因原料新鲜,出粉率及虾粉品质高,船载加工虾粉加工比例日益加大,但目前中国主要的南极磷虾捕捞加工船如“福荣海”号、“深蓝”号的虾粉生产装备全

部依赖进口,因技术保密,无法获取其主要工艺参数,因此,船载虾粉加工工艺和设备相对落后,生产效率低、品质差等问题直接影响了中国虾粉效益。

干燥是南极磷虾加工的关键环节^[3],蒸煮后的南极磷虾含水量较高大约为 70%^[4],干燥可去除多余水分,但其所含活性成分受热易发生降解流失^[5],最终影响虾粉品质。旋转闪蒸干燥是由气流干燥、流态化和搅拌分散相结合的一种新的干燥技术,具有干燥效率高、速度快和节能的特点^[6],适用于热敏性物料的干燥。与热风干燥、微波干燥相比,旋转闪蒸干燥能更好地保持磷虾中虾青素、脂肪和蛋白质含量,所得虾粉品质更高^[7]。旋转闪蒸干燥是一个涉及气固两相传热、传质及流体流动等的复杂过程,如何保障物料产品质量、降低能耗成本,除了依赖试验经验,还需要对干燥过程有良好的了解和控制^[8]。干燥动力学模型可以通过建立干燥各参数之间的定量关系和规律来比较准确地描述和预测干燥过程,达到优化工艺设计、控制产品质量的目的。贾敏等^[9]研究确定了用于描述鲍鱼热风干燥过程 Page 模型;Arif 等^[10]分析了不同淡水鱼类对流干燥的 Hasibuan-Daud 和 Haghi-Angiz-I 模型。

目前对南极磷虾旋转闪蒸干燥的研究还处于探索阶段,其干燥特性和机理尚不明确,干燥动力学模型也未见报道。因此,试验拟对旋转闪蒸干燥的干燥性能进行研究,并选取 6 种常见的干燥数学模型对干燥过程进行拟合,建立干燥模型,以实现南极磷虾旋转闪蒸干燥的过程控制,为旋转闪蒸干燥设备在磷虾粉加工中的应用和研发改造提供依据。

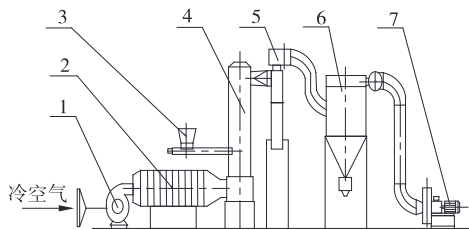
1 材料与方法

1.1 材料

南极磷虾:原料运送至实验室后于-20℃冷冻保存,辽渔集团有限公司。

1.2 仪器和设备

旋转闪蒸干燥试验装置(图 1):XSG-2 型,主要包括空气加热器、螺旋加料器、旋转闪蒸干燥机、旋风分离器、



1. 送风机 2. 空气加热器 3. 加料器 4. 旋转闪蒸干燥机
5. 旋风分离器 6. 布袋除尘器 7. 引风机

图 1 旋转闪蒸干燥装置

Figure 1 Spin-flash drying process and experimental device

布袋除尘器等,常州广博干燥设备有限公司;

精密鼓风干燥箱:BPG-96A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

水分测定仪:MA150C 型,德国赛多利斯集团;

蒸箱:BST-ZFC02 型,上海冰仕特电器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 原料预处理 冷冻南极磷虾室温下进行流水解冻,沥干后放入蒸箱蒸煮 3 min,称重待用。

1.3.2 旋转闪蒸干燥试验 固定空气速度 8.15 m/s、进料量 5.0 kg,设定不同进风温度对蒸煮后的南极磷虾进行干燥试验。干燥过程中,每隔 2 min 将物料取出,测定不同时刻的磷虾水分含量,当物料含水量≤10%时,停止干燥。

1.3.3 水分含量测定 参照 GB/T 5009.3—2016。

1.3.4 干燥热效率 按式(1)计算旋转闪蒸干燥机热效率^[11]。

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0}, \quad (1)$$

式中:

η ——总热效率,%;

t_0 ——环境大气温度,℃;

t_1 ——输入干燥器内的气体温度,℃;

t_2 ——干燥器排出的气体温度,℃。

1.3.5 水分比 按式(2)计算水分比(MR)^[12]。

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (2)$$

式中:

M_R ——水分比;

M_t —— t 时刻物料的干基水分含量,g/g;

M_0 ——初始时刻物料的干基水分含量,g/g;

M_e ——物料的干燥平衡含水量,g/g。

1.3.6 干燥速率 按式(3)计算干燥速率(DR)^[13]。

$$D_R = \frac{M_1 - M_2}{t_2 - t_1}, \quad (3)$$

式中:

D_R ——干燥速率,g/(g·min);

M_1 ——干燥 t_1 时刻南极磷虾的干基水分含量,g/g;

M_2 ——干燥 t_2 时刻南极磷虾的干基水分含量,g/g。

1.3.7 干燥模型的构建 选择 6 种常用的干燥模型^[14-19]用以研究南极磷虾旋转闪蒸干燥过程(表 1)。

基于模型拟合得出水分比随时间变化的函数关系,采用决定系数(R^2)、卡方检验值(χ^2)和均方根误差(RMSE)3 个指标来评价拟合程度, χ^2 和 RMSE 值越小, R^2 值越接近 1,表明模型拟合结果越好。分别按式(4)~式(6)计算 R^2 、 χ^2 和 RMSE^[20]。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R,pre,i} - M_{R,exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{M_{R,pre,i}} - M_{R,exp,i})^2}, \quad (4)$$

表 1 6 种干燥模型

Table 1 Six thin-layer drying models

模型名称	表达式
Newton	$M_R = \exp(-kt)$
Page	$M_R = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$M_R = \exp[-(kt)^n]$
Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + b$
Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{R,pre,i} - M_{R,exp,i})^2}{N}}, \quad (6)$$

式中:

$M_{R,pre,i}$ ——模型拟合水分比;

$M_{R,exp,i}$ ——实测水分比;

N ——试验数据个数;

n ——模型参数个数。

1.3.8 有效水分扩散系数 根据 Fick 第二定律方程计算南极磷虾干燥水分扩散系数,并按式(7)进行计算^[21]。

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L_0^2} t, \quad (7)$$

式中:

D_{eff} ——有效水分扩散系数, m^2/s ;

L_0 ——南极磷虾厚度, mm;

t ——干燥时间, s。

1.4 数据处理与分析

采用 Origin2018 软件对试验数据进行非线性拟合处理并分析拟合度,采用 SPSS24 软件对模型系数进行回归分析,建立干燥模型方程表达式。

2 结果与分析

2.1 不同温度下南极磷虾旋转闪蒸干燥的热效率

旋转闪蒸干燥属于对流干燥,设备热效率主要取决于进风温度和尾气温度的温差,温差越大热效率越高。改变干燥进风温度,对出风温度进行测定,根据测定参数按式(1)计算得到干燥热效率,结果如图 2 所示。由图 2 可知,随着干燥温度的增加,热效率显著提升,表明干燥传质的速率增大。但进风温度的升高不利于含有热敏性成分南极磷虾的干燥,其体内所含的虾青素易受热发生降解和异构化。有研究^[22]表明,当温度从 50℃ 升高至 150℃ 时,虾青素异构化比例增加,进风温度过高将影响虾粉品质。当干燥温度 > 160℃ 时,热效率增加了 3%,提升不明显,因此从保障虾粉品质角度考虑,旋转闪蒸干

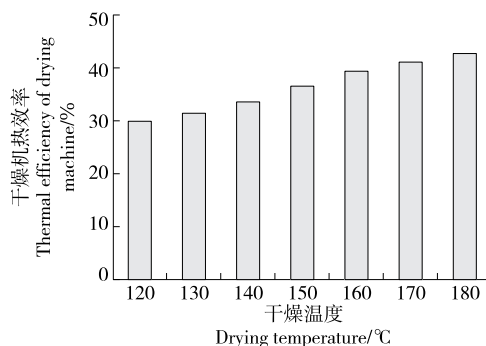


图 2 旋转闪蒸干燥热效率

Figure 2 Thermal efficiency of spin-flash drying

燥合适的温度范围为 150~160℃。研究^[23]发现,对流干燥的热效率一般为 30%~60%,传导型干燥设备的热效率为 60%~80%。当干燥温度为 120~180℃ 时,旋转闪蒸干燥设备的热效率为 30.00%~42.78%,与传导型设备相比,其热效率较低,主要原因为干燥过程中大量热量随尾气排出,造成能量浪费。在旋转闪蒸干燥设备的实际应用中,可以选择与传导型设备进行组合干燥提升热效率,降低能耗成本。

2.2 南极磷虾旋转闪蒸干燥性能

2.2.1 南极磷虾旋转闪蒸干燥曲线 由图 3 可知,随着干燥温度的升高,南极磷虾的水分比呈下降趋势,且温度越高,下降速度越快,同时干燥至相同水分比所需时间也随干燥温度的升高而缩短。当干燥至含水量 10% 时,所用时间均在 14 min 内,干燥温度 180℃ 的用时为 8 min,与 120℃ 的相比缩短了 42.86%,主要因为旋转闪蒸干燥采用的是对流干燥形式,物料在气流中呈悬浮状态并充分分散,使传热更有利,同时干燥温度越高,传热效率越高,干燥时间越短。研究发现,南极磷虾热风干燥至 10% 含水量所需时间 > 200 min^[24],微波干燥的最短时间为 30 min^[7],与其他干燥方式相比,闪蒸干燥在降低干燥时间上具有很大优势,也是闪蒸干燥能获得较优品质虾粉的主要原因之一。

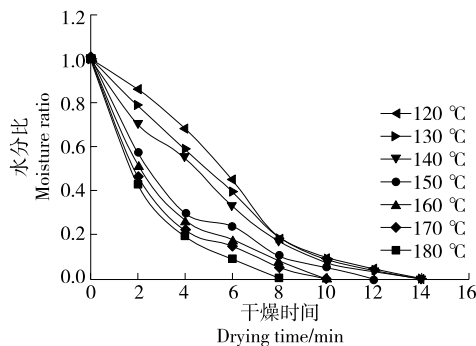


图 3 不同温度南极磷虾干燥曲线

Figure 3 Drying curve of Antarctic krill at different temperatures

2.2.2 南极磷虾旋转闪蒸干燥速率 由图 4 可知,干燥温度越高,闪蒸干燥的速率越大。除 120 ℃外,随着物料水分含量的下降,其他温度条件下的干燥速率呈下降趋势,即可将旋转闪蒸干燥过程认为只有降速干燥阶段,其中 130,140 ℃的速率曲线变化较平缓,150~180 ℃的干燥速率曲线较为陡峭,且陡降趋势基本一致。旋转闪蒸干燥过程中,物料颗粒分散于热气流中进行瞬时干燥,水分全部变成表面水分,随着温度的升高传热动力加大,加速了水分迁移,因此干燥速率增大。从曲线斜率看,干燥前期,干燥速度较快,磷虾物料表面水分蒸发,内外水分出现浓度差,内部水分迁移至表面并被热气流蒸发;干燥后期由于干燥中的物料表面逐渐发生硬化,内部水分迁移阻力变大,因此速度下降。在一定的进料量、气流速度下,高温对南极磷虾旋转闪蒸干燥的速率影响显著,为达到快速干燥的目的,闪蒸干燥温度选择高于 150 ℃为宜。

2.3 干燥动力学模型

2.3.1 干燥动力学模型的选择 由表 2 可知,6 种模型中只有 Page 和 Modified Page 模型的决定系数 R^2 在不同温度下的拟合结果均 >0.99 ,平均值为 0.994,其他模型的 R^2 值均 <0.99 ,平均值为 0.96~0.98。同时比较 χ^2 和 RMSE, Page 和 Modified Page 模型的数值分别为 0.021 21~0.036 03 和 0.000 75~0.001 73,且平均值最

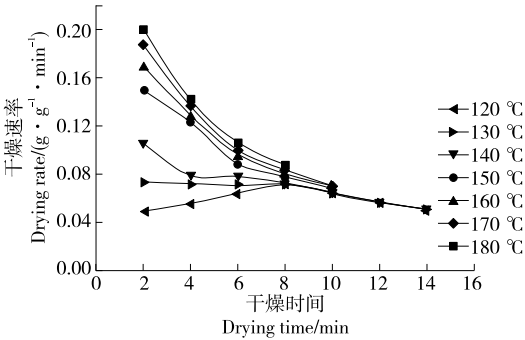


图 4 不同温度南极磷虾干燥速率曲线
Figure 4 Drying rate curve of Antarctic krill at different temperatures

小,分别为 0.001 10 和 0.027 56,表明这两种模型的拟合程度比其他 4 种模型的高,适合作为南极磷虾闪蒸干燥的动力学模型。尽管拟合后 Page 和 Modified Page 模型系数的 k 值和 n 值不同,但 R^2 、 χ^2 和 RMSE 值基本相同,主要是因为 Modified Page 模型是由 Page 模型通过修正获得,均为半经验模型^[25],由于 Page 模型的表达式更为简洁,因此选择 Page 模型作为预测南极磷虾旋转闪蒸干燥特性最优的数学模型。这与何学连^[26]、吴佰林等^[27]的研究结论一致。

表 2 南极磷虾旋转闪蒸干燥数学模型拟合结果

Table 2 Statistical analyses results of selected mathematical models in spin-flash drying									
模型	温度/℃	R^2	RMSE	χ^2	模型	温度/℃	R^2	RMSE	χ^2
Newton	120	0.920 04	0.110 54	0.013 97	Henderson and Pabis	120	0.922 07	0.109 13	0.015 88
	130	0.956 34	0.078 10	0.006 97		130	0.956 02	0.078 36	0.008 19
	140	0.974 51	0.057 71	0.003 81		140	0.972 38	0.060 08	0.004 81
	150	0.993 40	0.028 64	0.000 96		150	0.992 09	0.031 46	0.001 39
	160	0.995 58	0.024 70	0.000 73		160	0.994 49	0.027 39	0.001 13
	170	0.996 16	0.023 02	0.000 64		170	0.995 24	0.025 69	0.000 99
	180	0.997 82	0.018 44	0.000 43		180	0.997 10	0.021 68	0.000 78
Page	120	0.995 54	0.026 08	0.000 91	Logarithmic	120	0.967 41	0.070 57	0.007 97
	130	0.994 83	0.026 83	0.000 96		130	0.987 23	0.042 19	0.002 85
	140	0.990 09	0.036 06	0.001 73		140	0.991 35	0.033 02	0.001 74
	150	0.992 09	0.031 46	0.001 39		150	0.994 07	0.033 47	0.001 96
	160	0.994 54	0.027 20	0.001 11		160	0.993 28	0.030 17	0.001 82
	170	0.995 84	0.024 08	0.000 87		170	0.993 66	0.029 66	0.001 76
	180	0.997 16	0.021 21	0.000 75		180	0.997 11	0.021 45	0.001 15
Modified Page	120	0.995 54	0.026 08	0.002 72	Wang and Singh	120	0.972 57	0.064 73	0.005 59
	130	0.994 83	0.027 02	0.002 72		130	0.993 24	0.030 82	0.001 27
	140	0.990 09	0.036 06	0.002 72		140	0.996 15	0.022 36	0.000 67
	150	0.992 09	0.031 46	0.001 39		150	0.965 92	0.065 42	0.005 99
	160	0.994 54	0.027 20	0.001 11		160	0.967 43	0.066 56	0.008 86
	170	0.995 84	0.024 08	0.000 87		170	0.955 56	0.078 61	0.012 36
	180	0.997 16	0.021 21	0.000 75		180	0.975 54	0.062 69	0.006 55

2.3.2 干燥动力学模型的建立和验证 Page 模型的常数项 k 反映了物料的水分扩散速率,待定系数 n 反映了物料本身特性对干燥的影响^[28]。由表 3 可知,随着干燥温度的升高, k 值不断增大, n 值的变化幅度较小,说明温度对 k 值起主要影响作用,而对 n 值影响不大,其大小可能还受闪蒸干燥风速、进料速度等其他因素的影响。根据文献^[29]中动力学模型相关式,利用 SPSS 24 统计软件对 $\ln k$ 和 n 与温度 T 进行曲线回归分析,得 $\ln k$ 、 n 的回归方程为:

$$\ln k = -27.532\ 1 + 0.301\ 8T - 8.538\ 2 \times 10^{-4} T^2, \quad (8)$$

$$k = \exp(-27.532\ 1 + 0.301\ 8T - 8.538\ 2 \times 10^{-4} T^2), \quad (9)$$

$$n = 14.010\ 6 - 0.157\ 67T + 4.750\ 9 \times 10^{-4} T^2. \quad (10)$$

经回归分析,自变量 T 对应的系数检验显著性均 < 0.05 ,应变量 $\ln k$ 和 n 回归方程的 P 值分别为 1.78×10^{-4} , 3.22×10^{-4} ,均 < 0.05 , R^2 均 > 0.99 ,可以认为 $\ln k$ 和 n 与干燥温度 T 的二次关系成立。从而得到南极磷虾旋转闪蒸干燥的动力学模型可以用 Page 模型 $M_R = \exp(-kt^n)$ 和式(9)、式(10)表示。为进一步验证所得干燥预测模型的准确性,将 5.0 kg 南极磷虾在 130 °C 下进行旋转闪蒸干燥,得到水分比随干燥时间的变化曲线。将试验值与模型预测值进行比较,结果如图 5 所示。由图 5 可知,南极磷虾旋转闪蒸干燥的水分比实测值曲线与 Page 模型的预测值曲线基本一致,拟合程度高,说明该模型可以较为准确地描述南极磷虾干燥过程中的水分变化规律,对旋转闪蒸干燥过程具有较好的预测作用。

2.4 干燥过程中南极磷虾有效水分扩散系数比较

由表 4 可知,随着温度的升高,南极磷虾的有效水分扩散系数从 $2.539\ 35 \times 10^{-7}\ \text{m}^2/\text{s}$ 升高到 $3.889\ 64 \times 10^{-7}\ \text{m}^2/\text{s}$,当干燥温度为 120~140 °C 时有效水分扩散系数增加较为缓慢;当干燥温度 ≥ 150 °C 时,扩散系数增加显著,与实际测得的干燥速率变化结果相吻合。一般食品原料干燥水分扩散系数为 $10^{-6} \sim 10^{-13}\ \text{m}^2/\text{s}$,系数大小取决于干燥方式、干燥条件和原料组织结构^[30]。魏彦

表 3 不同温度下南极磷虾干燥 Page 模型系数

Table 3 Page equation coefficients at different drying temperatures

温度/°C	k	n	具体表达式
120	0.028 45	1.908 72	$M_R = \exp(-0.028\ 45t^{1.908\ 72})$
130	0.064 05	1.549 26	$M_R = \exp(-0.064\ 05t^{1.549\ 26})$
140	0.108 12	1.331 82	$M_R = \exp(-0.108\ 12t^{1.331\ 82})$
150	0.279 64	0.997 98	$M_R = \exp(-0.279\ 64t^{0.997\ 98})$
160	0.330 63	0.890 60	$M_R = \exp(-0.330\ 63t^{0.890\ 60})$
170	0.399 15	0.981 53	$M_R = \exp(-0.399\ 15t^{0.981\ 53})$
180	0.409 43	1.021 27	$M_R = \exp(-0.409\ 43t^{1.021\ 27})$

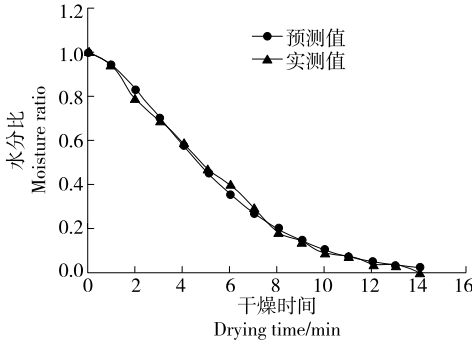


图 5 相同干燥条件下南极磷虾水分比试验值与预测值比较

Figure 5 Experimental values versus predicted values of moisture ratio under the same drying conditions

表 4 不同温度下南极磷虾的有效扩散系数

Table 4 Effective moisture diffusion coefficients at different temperatures

温度/°C	斜率	R^2	有效水分扩散系数 $D_{\text{eff}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
120	-0.264 0	0.942 1	$2.539\ 35 \times 10^{-7}$
130	-0.272 0	0.951 6	$2.621\ 62 \times 10^{-7}$
140	-0.281 2	0.960 2	$2.715\ 87 \times 10^{-7}$
150	-0.286 4	0.984 2	$2.787\ 93 \times 10^{-7}$
160	-0.303 1	0.992 5	$2.956\ 68 \times 10^{-7}$
170	-0.350 9	0.983 8	$3.424\ 60 \times 10^{-7}$
180	-0.398 3	0.999 3	$3.889\ 64 \times 10^{-7}$

君^[31]通过超声辅助热泵干燥南美白对虾获得的有效水分扩散系数为 $2.782 \times 10^{-10} \sim 7.774 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$,张建友等^[32]采用红外热风耦合干燥中国毛虾得到的有效水分扩散系数为 $4.470 \times 10^{-10} \sim 1.295 \times 10^{-9}\ \text{m}^2/\text{s}$,与上述研究结果相比,试验所得南极磷虾水分扩散系数比一般扩散系数偏大,主要原因为旋转闪蒸干燥底部设有原料粉碎区,粉碎作用使物料的受热比表面积不断更新和增大,加速了水分的迁移和扩散。

3 结论

通过建立动力学模型预测南极磷虾闪蒸干燥的水分变化规律,并对比分析 6 种数学模型,得到了 Page 模型可以用来很好地描述南极磷虾旋转闪蒸干燥过程(R^2 均 > 0.99 , χ^2 均 < 0.002 和 RMSE 均 < 0.04)。通过回归分析获得常数项 k 、 n 与变量温度 T 的方程,即 $k = \exp(-27.532\ 1 + 0.301\ 8T - 8.538\ 2 \times 10^{-4} T^2)$ 、 $n = 14.010\ 6 - 0.157\ 67T + 4.750\ 9 \times 10^{-4} T^2$,干燥动力学模型用 Page 模型 $M_R = \exp(-kt^n)$ 和常数项 k 、 n 回归方程表示,验证结果显示 Page 模型预测值与试验值基本一致。根据 Fick 第二定

律计算得到南极磷虾干燥过程的有效水分扩散系数为 $2.539\ 35 \times 10^{-7} \sim 13.889\ 64 \times 10^{-7}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。旋转闪蒸干燥传热传质效率高、水分扩散系数大,极大地缩短了南极磷虾体内活性成分受热时间,可以有效地降低活性成分破坏程度,提升产品品质。但整个干燥过程的气固液三相的变化机理、水分含量变化与虾粉品质的相关性尚不清楚。其次旋转闪蒸干燥设备的热效率较低,存在热量浪费、能耗成本高的问题,在实际应用中如何有效利用热量及采用与热效率高的设备进行组合干燥降低能耗成本还需进一步研究。

参考文献

- [1] 刘俊超, 贾明秀, 冯卫东, 等. 基于 RF 和 GAM 模型南极磷虾资源分布与环境因子关系研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(8): 20-29.
LIU J C, JIA M X, FENG W D, et al. Spatial-temporal distribution of Antarctic krill (*Euphausia superba*) resource and its association with environment factors revealed with RF and GAM models[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(8): 20-29.
- [2] 岳冬冬, 王鲁民. 中国南极磷虾渔业发展的微观解析与对策研究: 以辽渔集团有限公司为例[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(7): 227-238.
YUE D D, WANG L M. Micro analysis and countermeasure research on the development of Antarctic krill fisheries in China: A case study of Liaoyu Group Co Ltd [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(7): 227-238.
- [3] 杨柳, 王鲁民, 周国燕, 等. 南极磷虾粉的加工工艺、品质特性与应用研究进展[J]. 海洋渔业, 2022, 44(4): 501-512.
YANG L, WANG L M, ZHOU G Y, et al. Processing technology, quality characteristics and application status of Antarctic krill powder[J]. Marine Fisheries, 2022, 44(4): 501-512.
- [4] 邵晨. 船上加工处理对南极磷虾保藏的初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 39-40.
SHAO C. Preliminary study on preservation of Antarctic krill shipboard processing [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 39-40.
- [5] 赵昕源, 欧阳杰, 马田田, 等. 南极磷虾体内主要营养活性物质在热处理过程中的流向[J]. 水产学报, 2021, 45(7): 1 172-1 180.
ZHAN X Y, OUYANG J, MA T T, et al. Flow direction of main nutrient substances in Antarctic krill (*Euphausia superba*) during heat treatment[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(7): 1 172-1 180.
- [6] 袁越锦, 荆雪松, 雷旭, 等. 旋转闪蒸干燥设备的流体动力学分析[J]. 陕西科技大学学报, 2018, 36(5): 134-140.
YUAN Y J, JING X S, LEI X, et al. Hydrodynamics analysis of spin flash drying equipment[J]. Journal of Shanxi University of Science & Technology, 2018, 36(5): 134-140.
- [7] 马田田. 南极磷虾粉干燥工艺研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 52-53.
- MA T T. Study on drying technology of Antarctic krill powder[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 52-53.
- [8] ONWUDE D I, HASHIM N, JANIUS R B, et al. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2016, 15(3): 599-618.
- [9] 贾敏, 丛海花, 薛长湖, 等. 鲍鱼热风干燥动力学及干燥过程数学模拟[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 72-76, 80.
JIA M, CONG H H, XUE C H, et al. Drying kinetics and mathematical modeling of abalone during the hot-air drying process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(3): 72-76, 80.
- [10] ARIF K M, MAHSA M, OBEIDULLAH M D, et al. Heat and mass transport analysis of the drying of freshwater fishes by a forced convective air-dryer [J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(1): 1-21.
- [11] 于华宇, 阿地里江, 龙薇运, 等. 实验型喷雾干燥机低温干燥牛初乳粉的干燥性能[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 361-366.
YU H Y, ARDIL A, LONG W Y, et al. Low-temperature spray drying performance of laboratory spray dryer for bovine colostrum powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 361-366.
- [12] KILIC A. Low temperature and high velocity (LTHV) application in drying: Characteristics and effects on the fish quality[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(1): 173-182.
- [13] LIU Y H, SUN Y, MIAO S, et al. Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of *Flos Ioniceriae*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(8): 4 955-4 964.
- [14] 桂青, 周立军, 王秀全, 等. 五指毛桃的热风干燥特性及动力学模型[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 58-63.
GUI Q, ZHOU L J, WANG X Q, et al. Hot air drying characteristics and dynamics model of *Ficus hirta* Vahl.[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 58-63.
- [15] SAHIN M, DOYMAZ I. Estimation of cauliflower mass transfer parameters during convective drying[J]. Heat and Mass Transfer, 2017, 53(2): 507-517.
- [16] SADEGHI E, MOVAGHARNEJAD K, ASL A H. Mathematical modeling of infrared radiation thin-layer drying of pumpkin samples under natural and forced convection[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(12): e14229.
- [17] DOYMAZ I. Infrared drying kinetics and quality characteristics of carrot slices[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 2 738-2 745.
- [18] 陈思奇, 顾苑婷, 王霖岚, 等. 刺梨不同干燥模型建立及综合品质分析[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 47-54.
CHEN S Q, GU Y T, WANG L L, et al. Drying modeling and comprehensive quality analysis of *rosa roxburghii* tratt fruit[J]. Food Science, 2020, 41(3): 47-54.
- [19] AREPALLY D, RADDY S R, MALIK G K, et al. Mathematical modelling, energy and energy analysis of tomato slices in a mixed

- mode natural convection solar dryer [J]. Chemical Science International Journal, 2017, 20(4): 1-11.
- [20] 陈计远, 王粮局, 王红英, 等. 鱼膨化饲料热风干燥动力学模型及湿热特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 317-322.
- CHEN J Y, WANG L J, WANG H Y, et al. Drying kinetic model and hygrothermal characteristics of fish extruded feed during hot air drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 317-322.
- [21] 张倩, 李世榆, 李秀辰, 等. 裙带菜微波真空干燥质热传递特性与品质优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 166-173.
- ZHAN Q, LI S Y, LI X C, et al. Mass and heat transfer characteristics and quality optimization of microwave vacuum drying for wakame[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 166-173.
- [22] MARTINEZ-DELGADO A A, KHANDUAL S, VILLANUEVA-RODRIGUEZ S J. Chemical stability of astaxanthin integrated into a food matrix: Effects of food processing and methods for preservation[J]. Food Chemistry, 2017, 255: 23-30.
- [23] 龚秀娟. 物料干燥系统热湿传递及其交叉作用的热力学分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017: 5-6.
- GONG X J. Thermodynamic analysis of heat and moisture transfer and crossing of material drying system [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017: 5-6.
- [24] 马田田, 欧阳杰, 赵昕源, 等. 不同干燥方式下南极磷虾干燥特性与主要营养物质变化[J]. 渔业现代化, 2022, 49(2): 94-101.
- MA T T, OUYANG J, ZHAN X Y, et al. Changes in drying characteristics and major nutrients of Antarctic krill under different drying methods[J]. Fishery Modernization, 2022, 49(2): 94-101.
- [25] 王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备, 2009, 7(1): 51-56.
- WANG B H. Review of drying kinetics[J]. Drying Technology and Equipment, 2009, 7(1): 51-56.
- [26] 何学连. 白对虾干燥工艺的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 37-38.
- HE X L. Study on drying technology of white shrimps[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008: 37-38.
- [27] 吴伯林, 薛勇, 王玉, 等. 鲢鱼热风干燥动力学及品质变化研究[J]. 食品科技, 2018, 43(10): 174-180.
- WU B L, XUE Y, WANG Y, et al. Study on the kinetics and quality changes of hot air drying of *Scomberomorus niphonius*[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(10): 174-180.
- [28] 刘海波, 王佳倩, 李耀, 等. 马铃薯片热泵干燥动力学研究及其干燥工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 106-115.
- LIU H B, WANG J Q, LI Y, et al. Study on drying kinetics of potato chips by heat pump and optimization of drying process[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 106-115.
- [29] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 150-155.
- CHU W J, SHENG D M, ZHANG N, et al. Hot-air drying of red-fleshed pitaya: Kinetic modelling and quality changes[J]. Food Science, 2019, 40(17): 150-155.
- [30] 张雪波, 刘显茜, 邹三全, 等. 哈密瓜切片热风干燥特性及数学模型[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 130-136, 142.
- ZHANG X B, LIU X Q, ZHOU S Q, et al. Hot-air drying characteristics and mathematical model of cantaloupe slices[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 130-136, 142.
- [31] 魏彦君. 南美白对虾超声波辅助热泵干燥动力学及品质特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014: 36.
- WEI Y J. Research on drying kinetics and quality properties of *Penaeus vannamei* dried by ultrasound-assisted heat pump dehumidifier [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014: 36.
- [32] 张建友, 宋新苗, 陈志明, 等. 中国毛虾红外热风耦合干燥特性及动力学模型研究[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 555-564.
- ZHANG J Y, SONG X M, CHEN Z M, et al. Drying characteristics and kinetics of *Acetes chinensis* by infrared radiation hot air coupled drying[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(3): 555-564.

欢迎订阅 2024 年《粮食与油脂》杂志

《粮食与油脂》是由上海良友(集团)有限公司主管、上海市粮食科学研究所有限公司主办的科技期刊,是北大中文核心期刊,主要刊载粮食、油脂及食品领域的前沿科研成果。

◇中国核心期刊数据库

◇中国期刊全文数据库(CJFD)

◇万方数据——数字化期刊群及中文科技期刊数据库

◇日本科学技术振兴机构数据库(JST)

主要栏目:

专题综述、谷物科学、油脂工程、贮藏与保鲜、食品工艺、功能与营养、食品安全与检测等。

订阅信息:

本刊为月刊,每月 10 日出版

每期定价 15.00 元,全年 180.00 元;公开发售,邮发代码:4-675

国内统一连续出版物号:CN 31-1235/TS 国际标准连续出版物号:ISSN 1008-9578



欢迎关注官方公众号

联系方式:

地址:上海市普陀区府村路 445 号 1 号楼

邮编:200333

电话:021-62058191

E-mail:SLYZHS@163.com