

罗非鱼片渗透-真空微波干燥特性 及动力学模型

刘 兵¹, 李 川^{1,*}, 段振华^{1,2,*}, 刘 艳², 于 群¹, 茹世麟¹

(1.海南大学食品学院, 海南海口 570228;

2.贺州学院食品科学与工程技术研究院, 广西贺州 542899)

摘 要:为了解渗透后罗非鱼片在真空微波干燥过程中的干燥特性,以干基含水率和干燥速率为指标,研究了不同微波间歇比(R)、功率密度和真空度条件对鱼片干燥特性的影响,并建立渗透-真空微波干燥动力学模型。结果表明,微波间歇比、功率密度和真空度对罗非鱼片干燥特性均有较大影响,随着功率密度和真空度的升高,干燥速率增加,在一定范围内(R 小于 3),适当提高间歇比可加快干燥过程。不同条件下的干燥过程均分为升速和降速两个阶段,但升速期很短,主要以降速为主。根据数据建立动力学模型,发现 Midilli 方程拟合效果良好($R^2 = 0.9873$),适合于描述罗非鱼片渗透-真空微波干燥过程。该研究结果为罗非鱼的加工与生产提供新依据和新思路。

关键词:罗非鱼片,渗透-真空微波干燥,干燥特性,动力学

Characteristics of osmotic-vacuum microwave drying of tilapia fillets and its drying kinetics

LIU Bing¹, LI Chuan^{1,*}, DUAN Zhen-hua^{1,2,*}, LIU Yan², YU Qun¹, RU Shi-lin¹

(1.College of Food Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China;

2.Institute of Food Research, Hezhou University, Hezhou 542899, China)

Abstract: In order to obtain the characteristics of tilapia fillets under osmosis dehydration vacuum-microwave drying conditions, the moisture content and drying rate of fish fillet were carried out during drying process. The effect of different microwave gap ratio, power density and vacuum degree on drying characteristic of fish fillet were determined and the drying kinetics model of osmosis dehydration vacuum-microwave drying was set up. The results showed that the microwave gap ratio, power density and vacuum degree had greater influences on dry characteristics of tilapia fillets. The drying rate was increased with increasing of power density and vacuum degree, and improved the microwave gap ratio appropriately was conducive to speed up the drying process. In addition, the whole drying process was divided into two stages with different conditions, including the accelerated drying and falling rate drying. The time of accelerated drying was short and the main process was falling rate drying. The drying kinetics met Midilli model and it was suitable for describing osmosis dehydration vacuum-microwave drying process of tilapia fillet ($R^2 = 0.9873$). The results provide a new theory and technical guidance for tilapia processing and production.

Key words: tilapia fillets; osmotic-vacuum microwave drying; drying characteristics; kinetics

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)18-0030-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2017.18.006

罗非鱼,俗称“非洲鲫鱼”,因其具有食性杂,耐低氧和生长繁殖快等特点而成为世界性的养殖鱼类^[1],同时它也是我国重要的淡水鱼养殖品种,在福建、广东和海南等热带或亚热带地区被广泛养殖^[2]。罗非鱼肉质洁白少刺,味道鲜美,鱼肉中不仅含有丰富的蛋白质和必需氨基酸、不饱和脂肪酸等^[3-4],还

富含钙、磷、钾、锌、铁等矿物质^[5],营养价值高。由于罗非鱼肉中含水高达 80%,且酶系丰富,极易腐败变质造成资源的浪费与环境污染。干燥是鱼类等水产品加工保藏的方法之一^[6],对罗非鱼进行干燥处理,可有效延长保藏期和提高产品附加值。传统的单一干燥方法,如太阳能干燥、热风干燥以及冷冻干燥

收稿日期:2017-02-28

作者简介:刘兵(1992-),男,在读硕士研究生,研究方向:水产品加工技术,E-mail:liubing920901@163.com。

* 通讯作者:李川(1986-),男,博士,研究方向:热带水产品精深加工与贮藏,E-mail:lichuanbest@126.com。

段振华(1965-),男,博士,教授,研究方向:水产品加工技术,E-mail:dzh65@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(31360395;31601531)。

等,均存在产品品质差或高能耗等问题而不能满足人们的需求^[7]。

渗透-真空微波干燥是一种结合渗透脱水预处理和真空微波干燥两种技术的新型干燥方法^[8]。渗透处理可利用细胞膜半透性脱除原料部分水分,条件温和、能耗低,可有效缩短后期干燥时间,较好地保持了产品的色、香、味等品质^[9-10]。真空微波干燥结合了微波加热和真空干燥两种技术的优点,具有脱水快速、节能高效、安全易控制、产品品质优良的特点而广泛地应用于食品加工领域^[11]。

目前,对于渗透-真空微波干燥技术,只运用于柑橘^[12]、草莓^[13]、木瓜^[14]等水果干燥加工中,而对鱼类等水产品的加工则未见报道。为此,本实验以罗非鱼片为对象,研究微波间歇比、功率密度和真空度对渗透脱水后鱼片干燥特性的影响并以此建立干燥动力学模型,为渗透-真空微波干燥在罗非鱼加工中的应用提供新依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜的罗非鱼 购于海口南门农贸市场,0.75~1 kg/条,30~35 cm/条;食盐(食用级)、白砂糖(食用级) 购于南国超市。

NJL07-3 型实验专用微波炉 南京杰全微波设备有限公司;EL204 型电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;HH-S26S 电热恒温水浴锅 金坛市大地自动化仪器厂;VP50 真空泵 北京莱伯泰科仪器股份有限公司;HB43-S 型红外快速水分测定仪 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;真空微波设备 自制。

1.2 实验方法

1.2.1 前处理 新鲜罗非鱼经三去处理后,清洗并从鱼脊背上方采肉切片,为保证实验准确性,鱼片统一切成大小约 500 mm²,厚度 3 mm、单片质量(1.86±0.21) g 的薄片,清水冲洗后,用滤纸吸去表面水分,放入不锈钢盘中并用保鲜膜封口。

1.2.2 干燥方法 根据前期实验结果,将切好的鱼片浸入 20% 盐 + 15% 糖溶液中 30 ℃ 水浴下进行 2 h 渗透处理^[8]。渗透后称取质量约 15 g 鱼片放入自制的真空微波装置中,如图 1 所示,以气体缓冲瓶连接干燥器与真空泵,真空泵调节干燥环境真空度,样品放入干燥器并置于微波炉中,调节微波功率与时间来进行干燥处理。根据前期实验结果,设定功率密度 20 W/g,真空度 0.08 MPa,分别在微波间歇比(即微

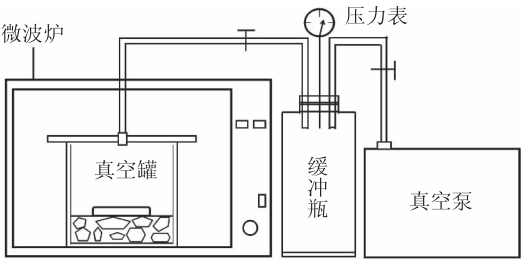


图 1 真空微波装置图

Fig.1 The schematic of microwave-vacuum devices

波开关时间之和与微波开启时间之比)为 1、2、3 的条件下真空微波干燥;设定微波间歇比为 2,真空度 0.08 MPa,分别在功率密度 15、20、25 W/g 下进行真空微波干燥;设定微波间歇比为 2,功率密度 20 W/g,真空度 0.04、0.06、0.08 MPa 下进行真空微波干燥。

在每组实验中,每隔 1 min 记录样品质量(操作不计入干燥时间),干燥总时间为 16 min,每组实验重复 5 次,结果取算术平均值。

1.2.3 指标测定方法 含水率测定:参照 GB/T5009.3-2010《食品中水分的测定》进行测定^[15]。

干基含水率计算:

$$X(\%) = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100$$

式中, m_0 表示湿物料中绝对干料的质量(g); m_t 表示 t 时刻湿物料的质量(g);X 表示干基含水率(%)。

干燥速率^[16]计算:

$$\eta = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

式中, η 为干燥速率; Δm 是物料相邻两次测量的重量差(g); Δt 是测定的时间差(min)。

水分比(MR)计算^[17]:水分比可以表示物料干燥速率的快慢。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

式中,MR 为水分比; M_e 为物料平衡含水率;与 M_t 和 M_0 相比很小,设定为零; M_0 为初始含水率; M_t 为干燥中某时刻的含水率。

1.3 常用薄层干燥数学模型

选取常用的 6 种薄层干燥模型来描述罗非鱼片渗透-真空微波干燥过程,模型名称及表达式如表 1 所示。

表 1 常用薄层干燥数学模型

Table 1 Mathematical thin layer drying models

模型名称	表达式
Newton 模型 ^[18]	MR = exp(-kt)
Page 模型 ^[19]	MR = exp(-kt ⁿ)
Henderson and Pabis 模型 ^[20]	MR = a exp(-kt)
Logarithmic 模型 ^[21]	MR = a exp(-kt) + c
Wang-Singh 模型 ^[22]	MR = 1 + at + bt ²
Midilli 模型 ^[23]	MR = a exp(-kt ⁿ) + bt

注:上式中 t 为干燥时间,k、n、a、b、c 均为待定系数。

1.4 数据处理

应用 Excel 软件进行数据的处理,SPSS 与 Origin 软件进行拟合回归分析及图形绘制。

2 结果与分析

2.1 微波间歇比对罗非鱼片渗透-真空微波干燥特性的影响

由图 2 干燥曲线可知,在功率密度和真空度不变的条件下,鱼片干基含水率随着干燥时间的延长而持续降低。在相同干燥时间内,微波间歇比 R 为 2 和 3 的鱼片干基含水率要低于微波间歇比 R 为 1 的

鱼片。这可能是因为间歇干燥对微波能的利用率要高于连续干燥($R=1$),当微波间歇比 R 为2或3时,微波对鱼片进行间歇加热,间歇时间内鱼片中的水分从内部迁移到表面进而重新分布,微波开启时水分吸热而被脱除,从而脱水量高于微波间歇比 R 为1的连续干燥。当微波间歇比 R 为3时,鱼片在较长的间歇时间下冷却,相同时间内,在微波作用下升至相同温度所需时间延长,加热时间相对缩短,脱水量降低;此外,真空罐内水汽遇冷附着于鱼片上,使其干基含水率比微波间歇比为2的高。在间歇微波真空干燥方式上,李维新等^[24]对糖浆原料也作了研究并得到相似的结果。

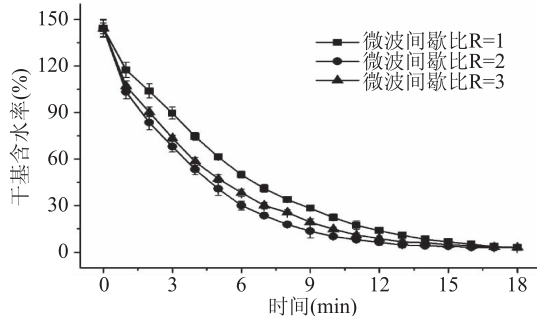


图2 不同微波间歇比下鱼片干燥曲线

Fig.2 Drying curves of tilapia fillets at different microwave gap ratio

由图3干燥速率曲线可知,鱼片的渗透-真空微波干燥速率先快速上升,这一时期水分被大量脱除从而达到最大干燥速率,随后进入降速干燥阶段,整个干燥过程无明显恒速阶段,在干燥后期,物料中的水分主要为较难去除的结合水,自由水含量的减少致使物料内部水分扩散速率小于表面水分汽化速度,因此失水速率逐渐下降^[25],段振华等^[26]在研究罗非鱼片微波干燥阶段时得到相同趋势的干燥速率曲线。另外,鱼片的干燥速率随间歇比呈先增大后减小趋势。当微波间歇比为3时,微波间歇时间较长,鱼片能较快冷却,真空罐中部分水汽遇冷而附着在鱼片上,使得单位时间内鱼片的脱水量降低,干燥速率低于微波间歇比 R 为2的条件。

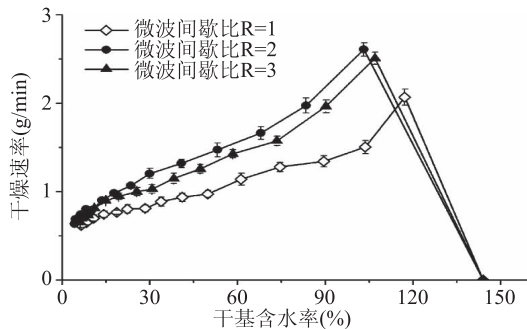


图3 不同微波间歇比下鱼片干燥速率曲线

Fig.3 Drying rate curves of tilapia fillets at different microwave gap ratio

2.2 功率密度对罗非鱼片渗透-真空微波干燥特性的影响

由图4可知,在间歇比和真空度固定条件下,鱼

片干基含水率降至平衡时所需的干燥时间随功率密度的增大而缩短。当功率密度为15、20、25 W/g时,鱼片干基含水率降至平衡所需时间分别为21、15、12 min。这是由于功率密度增大,单位质量的鱼片所受的微波能增加,使脱水量加大导致干燥时间的缩短。当功率密度达到20~25 W/g时,干燥时间缩短的幅度降低,这可能是因为当功率密度达到较高水平时,鱼片表面水分蒸发的速率要高于内部水分向外迁移的速率,致使微波能的利用率降低^[27]。

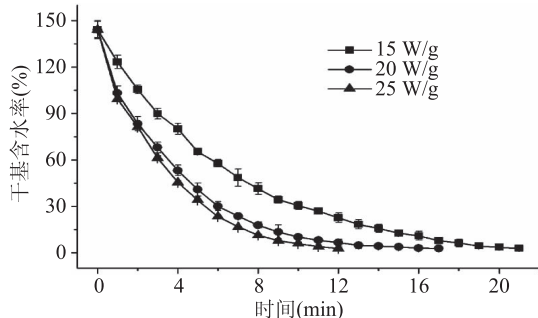


图4 不同功率密度下鱼片干燥曲线

Fig.4 Drying curves of tilapia fillets at different power density

图5可以得到,随着功率密度增大,鱼片干燥速率呈先增后降的趋势。当功率密度为15 W/g时,干燥速率较低;而在20 W/g和25 W/g处,干燥速率高且二者相差不大。这主要是由于功率密度越大,单位质量的物料在相同时间内吸收的微波能量越多,转化成热能的速率加快,失水率增大使干燥速率增加。此外,功率密度较高也会造成微波利用率和鱼片品质的下降,在水分变化相差不大的情况下,功率密度不宜太高,可选择20 W/g应用于实际生产。

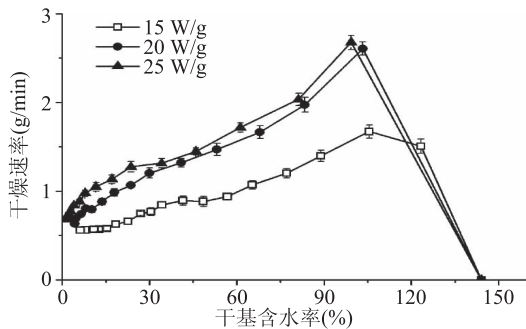


图5 不同功率密度下鱼片干燥速率曲线

Fig.5 Drying rate curves of tilapia fillets at different power density

2.3 真空度对罗非鱼片渗透-真空微波干燥特性的影响

由图6可以看出,真空度由0.04 MPa升至0.08 MPa时,鱼片中水分的饱和蒸气压(沸点)降低,在吸收相同微波能时脱除的水分增多,干燥速率加快,鱼片的干基含水率随时间延长而不断减少,达到平衡含水率时所需时间缩短,其值分别为18、16、13 min。

由图7的干燥速率曲线可知,在相同含水率条件下,鱼片的干燥速率随真空度的升高而增大。真

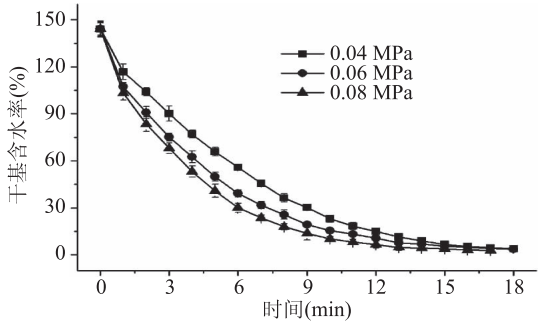


图6 不同真空度下鱼片干燥曲线
Fig.6 Drying curves of tilapia fillets at different vacuum degree

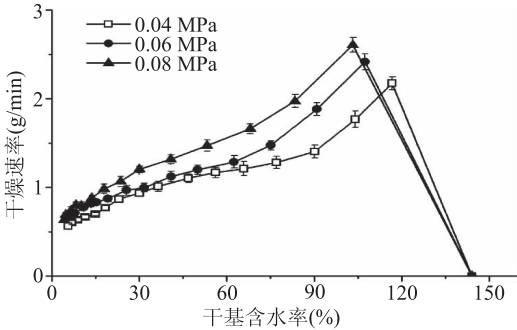


图7 不同真空度下鱼片干燥速率曲线
Fig.7 Drying rate curves of tilapia fillets at different vacuum degree

空环境下,真空度的增大会使物料中的水分可以在较低的温度下蒸发,提高了水分的扩散力,促使干燥速率的加快;在低真空度时,水的沸点较高,易引发局部干燥过度,不利于水分的扩散与蒸发^[28]。杨毅等^[2]研究单一真空微波干燥罗非鱼片也得到相同结论。因此,高真空度下脱水速率快、时间短,干燥效果好,所以宜选用 0.08 MPa 来指导生产。

2.4 罗非鱼片渗透-真空微波干燥动力学数学模型

2.4.1 干燥动力学模型的建立 为建立罗非鱼片渗透-真空微波干燥动力学模型,将实验中不同微波间歇比、功率密度和真空度条件下的 MR-t 图(图 8 所示)分别代入六个薄层干燥模型中进行拟合,得到拟合结果如表 2 所示。

一般来说,模型拟合的效果通过调整后的 R^2 和卡方 χ^2 判定, R^2 越接近于 1,卡方 χ^2 越小,说明拟合度越高,准确性越好^[29]。杨毅等^[2]得到了 Page 方程最适合描述罗非鱼片真空微波干燥的动力学模型;而本实验对罗非鱼片进行渗透预处理,鱼片初始水分减少和内部组织结构改变则会对后期真空微波干

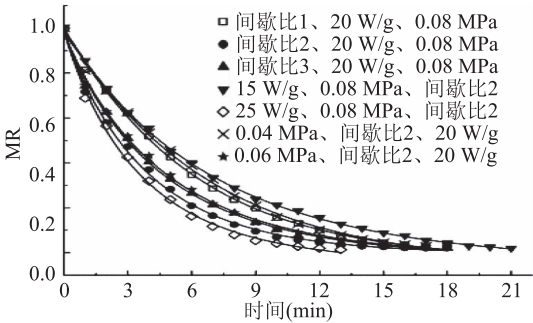


图8 不同干燥条件下罗非鱼片水分比-时间关系图
Fig.8 Relationship between moisture ratio and time of tilapia fillets under different drying conditions

燥产生影响,所以得到的模型会有所不同。由表 2 可知,鱼片在不同干燥条件下所拟合的模型中,Midilli 模型所得到的调整的 R^2 最接近于 1(均值 0.9981),且相关系数卡方 χ^2 的均值最小,说明 Midilli 模型相比于其他模型拟合效果更好,最为适合对罗非鱼片的渗透-真空微波干燥过程的预测与分析。这可能是因为 Midilli 模型可较好的描述干燥过

表 2 不同干燥条件下 6 个模型拟合的 R^2 及卡方 χ^2 值

Table 2 R^2 and chi-square values of six models under different drying conditions

参数	微波 间歇比	功率密度 (W/g)	真空度 (MPa)	Newton	Page	Henderson and Pabis	Logaritimic	Wang- Singh	Midilli
R^2	1	20	0.08	0.9958	0.9979	0.9958	0.9985	0.9888	0.9987
	2	20	0.08	0.9972	0.9978	0.9976	0.9972	0.9279	0.9978
	3	20	0.08	0.9975	0.9981	0.9980	0.9978	0.9506	0.9985
	2	15	0.08	0.9986	0.9989	0.9986	0.9991	0.9800	0.9995
	2	25	0.08	0.9963	0.9960	0.9962	0.9966	0.9644	0.9969
	2	20	0.04	0.9929	0.9955	0.9927	0.9972	0.9919	0.9971
	2	20	0.06	0.9969	0.9974	0.9975	0.9970	0.9562	0.9979
		平均值		0.9965	0.9974	0.9966	0.9976	0.9657	0.9981
	1	20	0.08	3.7446	1.8722	3.7157	1.3013	9.9176	1.2916
	2	20	0.08	2.2000	1.7054	1.8466	1.9334	56.5000	1.8123
卡方 $\chi^2 (\times 10^{-4})$	3	20	0.08	1.9876	1.5389	1.5663	1.6537	39.4000	1.3242
	2	15	0.08	1.1496	0.9097	1.1640	0.4315	16.7000	0.3925
	2	25	0.08	3.3484	3.5997	3.4208	3.0612	32.3000	2.9751
	2	20	0.04	6.3356	4.0351	6.5334	2.3875	7.1921	2.6388
	2	20	0.06	2.4768	2.0923	2.0075	2.1185	34.9000	1.9439
		平均值		3.0346	2.2505	2.8935	1.8410	28.1300	1.7683

表3 不同干燥条件下 Midilli 模型中各个参数
Table 3 Parameters of Midilli model under different drying conditions

微波间歇比	功率密度(W/g)	真空度(MPa)	a	k	n	b
1	20	0.08	0.9626	0.1139	1.0712	-0.0013
2	20	0.08	1.0084	0.2688	0.9679	-0.0010
3	20	0.08	1.0896	0.3787	0.9015	-0.0009
2	15	0.08	1.1020	0.1668	0.9997	-0.0012
2	25	0.08	0.9411	0.3061	0.9460	-0.0012
2	20	0.04	0.9109	0.1423	1.0466	-0.0027
2	20	0.06	0.9687	0.2073	1.0087	-0.0017

程中的不同阶段。

图8为不同干燥条件下鱼片水分比与时间在 Midilli 模型下动力学曲线拟合图,从图8中可以看出, Midilli 模型的拟合效果良好。

由鱼片干燥特性的分析可知,渗透-真空微波干燥的间歇比、功率密度和真空度均会对干燥过程产生影响。由表3可知,三个因素均影响 Midilli 模型的各参数,参数 a 随微波间歇比和真空度增大而增大,随功率密度上升而减小;参数 k 随间歇比、功率密度和真空度的上升而增大,而参数 n 则相反。因此,上述结果可进一步通过函数关系式建立间歇比(P)、功率密度(Q)、真空度(V)与各参数之间的等式,如下:

$$a = 6.353 \times 10^{-2} P - 1.6097 \times 10^{-2} Q + 2.7241 V + 9.979 \times 10^{-1} \quad (R^2 = 0.9866)$$

$$k = 1.3237 \times 10^{-1} P + 1.3928 \times 10^{-2} Q + 2.5160 V - 4.9675 \times 10^{-1} \quad (R^2 = 0.9699)$$

$$n = -8.482 \times 10^{-2} P - 5.373 \times 10^{-3} Q - 1.7101 V + 1.3909 \quad (R^2 = 0.9708)$$

$$b = 2.07 \times 10^{-4} P + 6.0 \times 10^{-6} Q + 3.7844 \times 10^{-2} V - 4.670 \times 10^{-3} \quad (R^2 = 0.9638)$$

将上述关系等式代入 Midilli 模型方程中可以得到如下关系式:

$$MR = (6.353 \times 10^{-2} P - 1.6097 \times 10^{-2} Q + 2.7241 V + 9.979 \times 10^{-1}) \exp[-(1.3237 \times 10^{-1} P + 1.3928 \times 10^{-2} Q + 2.5160 V - 4.9675 \times 10^{-1}) t^{-0.08482 P - 0.005373 Q - 1.7101 V + 1.3909}] + (2.07 \times 10^{-4} P + 6.0 \times 10^{-6} Q + 3.7844 \times 10^{-2} V - 4.670 \times 10^{-3}) t$$

上式即为渗透-真空微波干燥鱼片水分比关于微波间歇比(P)、功率密度(Q)、真空度(V)和干燥时间 t 之间的模型关系式。

2.4.2 干燥动力学模型的验证 为检验 Midilli 模型对罗非鱼片渗透-真空微波干燥过程预测的准确性,在微波间歇比为1、功率密度20 W/g、真空度0.06 MPa条件下进行验证实验,得到水分比(MR)和干燥时间(t)的关系曲线。实验值与预测值之间的关系如图9所示。

由图9可知,实验值与 Midilli 模型等式中的预测值能基本拟合($R^2 = 0.9873$),说明 Midilli 方程能够较准确地描述此干燥过程中的水分变化情况,对罗非鱼片干燥过程起到很好的预测作用。

3 结论

真空微波干燥时,微波间歇比(R)、功率密度和

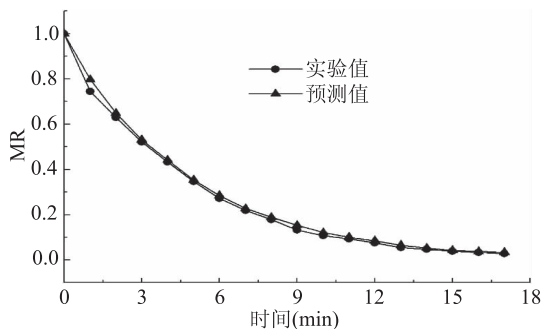


图9 相同条件下水分比实验值与预测值的比较
Fig.9 Comparison between experimental and predicted of MR values under same conditions

真空度对渗透后罗非鱼片干燥特性影响较大,渗透-真空微波干燥速率随功率密度和真空度的增大而加快;在一定范围内(R 小于3),增加间歇比可加快干燥的过程。渗透-真空微波干燥过程只有开始的升速及其后的降速阶段,没有明显的恒速阶段,其中升速期很短,过程以降速干燥为主,这可能与实验所用方法和设备有关。罗非鱼片在间歇比为2、功率密度20 W/g 和0.08 MPa 真空度下速率快、干燥效果好。

在动力学方面,渗透处理使鱼片水分和结构改变;且以间歇式真空微波干燥鱼片,从而影响鱼片干燥特性,所以 Midilli 模型比 Page 模型更能准确地表达和预测罗非鱼片渗透-真空微波干燥过程中不同条件下各个时间的水分比。在实际生产中,可以利用该模型预测并控制罗非鱼片渗透-真空微波干燥过程的水分变化规律,为降低能耗、优化工艺和提高干制品质量提供技术依据。

参考文献

- [1] Duan Z H, Jiang L N, Wang J L, et al. Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 89(4): 472-476.
- [2] 杨毅,段振华,徐成发. 罗非鱼片真空微波干燥特性及其动力学研究[J]. 食品科技, 2010, 35(11): 101-104.
- [3] 陈文治,郭忠宝,单丹,等. 6种不同罗非鱼品种的肌肉营养成分分析[J]. 南方农业学报, 2015, 46(7): 1303-1309.
- [4] Mario G, Juan R H, Jesús O A, et al. Nutrient composition and sensory evaluation of fillets from wild-type Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus) and a red hybrid (Florida red tilapia × red *O. niloticus*) [J]. Aquaculture Research, 2007, 38(10): 1074-1081.

