

食品流通与包装

全脂奶粉包装内外水分传质及其防潮包装货架期预测

蔡佳昂¹, 卢立新^{1,2}, 卢莉璟^{1,2}, 潘嘹^{1,2}

(1.江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: **目的** 综合考虑环境、包装和产品三者之间的相互影响, 预测全脂奶粉防潮包装的货架期。**方法** 应用等温吸湿模型表征全脂奶粉的吸湿特性, 考虑温度对包装材料的透湿性和产品的吸湿特性等的影响, 综合感官评定指标, 建立基于温度、湿度影响的全脂奶粉防潮包装货架期预测模型。在相对湿度(70±1)%、温度(37±1)℃下, 对不同水蒸气渗透性膜包装的全脂奶粉进行加速试验, 验证所建模型的有效性。**结果** GDW (Generalised D'Arcy and Watt) 模型可有效表征全脂奶粉的吸湿特性, 全脂奶粉的货架期临界水分含量(质量分数)为4.85%。在加速试验条件下, 聚乙烯膜、铝塑复合膜袋装奶粉的货架期预测值分别为89、249 d, 建立的全脂奶粉防潮包装货架期预测模型的准确性较高(相对偏差低于6%)。**结论** 温度对全脂奶粉的吸湿特性和包装材料的透湿性能的影响显著, 建立温度适用性更广的防潮包装货架期预测模型, 可为粉状乳制品货架期的研究及实际生产应用提供支撑。

关键词: 全脂奶粉; 等温吸湿曲线; 包装; 水分传质; 货架期; 理论模型

中图分类号: TS252.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)17-0042-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.17.006

Moisture Mass Transfer inside and outside Whole Milk Powder Packaging and Shelf Life Prediction of Moisture-proof Packaging

CAI Jia-ang¹, LU Li-xin^{1,2}, LU Li-jing^{1,2}, PAN Liao^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to predict the shelf life of moisture-proof packaging for whole milk powder considering the interaction among environment, packaging and product. The isothermal hygroscopic model was used to characterize the hygroscopic characteristics of whole milk powder. Considering the effect of temperature on the moisture permeability of packaging materials and the hygroscopic characteristics of products, the shelf life prediction model of moisture-proof packaging of whole milk powder based on the effect of temperature and humidity was established combined with sensory evaluation indexes. At (70±1)% relative humidity and (37±1)℃, the accelerated tests were carried out on the whole milk powder packaged by film with different water vapor permeability to verify the validity of the model. GDW (Generalised D'Arcy and Watt) model could effectively characterize the moisture absorption characteristics of whole milk powder. The critical moisture content of whole milk powder during shelf life was 4.85%. Under accelerated test conditions, the predicted shelf life of milk powder packaged by polyethylene film and aluminum-plastic film was 89 days and 249 days re-

收稿日期: 2022-01-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0400700)

作者简介: 蔡佳昂(1997—), 女, 硕士生, 主攻食品包装技术与安全。

通信作者: 卢立新(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品包装与安全、包装系统及装备等。

spectively, and the prediction model of moisture-proof packaging for whole milk powder had high accuracy (relative deviation was less than 6%). Temperature has a great effect on the hygroscopic characteristics of whole milk powder and the moisture permeability of packaging materials, so the establishment of moisture-proof packaging shelf life prediction model with wider applicability of temperature can provide support for the shelf life research and practical application of powdery dairy products.

KEY WORDS: whole milk powder; isothermal moisture absorption curve; packaging; water mass transfer; shelf life; theoretical model

奶粉是一种水分含量极低的干燥产品,在贮藏过程中易发生吸湿结块现象,从而加速其乳糖结晶、非酶褐变及氧化酸败等进程^[1-3]。有研究表明,奶粉的吸湿结块劣变比氧化酸败先发生^[4],因而控制奶粉的水分含量是该类产品保质的基础,也是其包装货架期首先要考虑的问题。

近年来,基于水分含量控制的奶粉包装货架期研究主要围绕 2 个方面展开。一是奶粉吸湿特性及其影响因素的研究,主要通过等温吸湿曲线表征奶粉的水分含量与环境相对湿度之间的平衡关系^[5]。有学者应用 GAB 模型(Guggenheim-Anderson-de boer model)对奶粉 S 型等温吸湿曲线进行拟合,发现模型具有较高的拟合度^[6],但该模型未表征奶粉在吸湿过程中吸附水分含量下降这一现象^[7-8]。同时,奶粉的成分和环境温度对奶粉的吸湿特性具有显著影响。Foster 等^[7]对比了不同脂肪含量奶粉的等温吸湿曲线发现,产品的吸湿性能随着乳脂含量的增加而下降。在水分活度恒定的情况下,产品的吸湿性能会随着温度的升高而下降^[9]。二是基于包装材料渗透性控制的防潮包装货架期研究,奶粉作为水分敏感性产品,基于水分控制的货架期预测应考虑 2 种传质过程,即水蒸气在包装内外的传质过程和奶粉吸附水分的过程。包装材料的阻隔性和贮藏条件对传质过程的影响显著^[10]。Phupoksakul 等^[11]测定了不同包装材料中配方奶粉的水分活度和水分含量,采用零级动力学模型预测了其货架期。陈彩锐等^[12]测定了 40、50 °C 下防潮包装的货架期,应用 Q_{10} 法则预测了常温下 PET/VMPET/PE 包装调制乳粉的货架期。上述研究均采用实验数据拟合,并对货架期进行了预测,未表征包装材料的阻隔性对货架期的影响。于华宁等^[13]综合考虑了包装的透湿性和产品的吸湿特性,建立了产品防潮包装货架期预测模型,并预测在温度 25 °C、相对湿度 50% 条件下 PET 包装初乳清粉的货架期。该模型未表征贮藏温度变化对奶粉货架期的影响,产品临界水分含量的确定未有效评估感官评分与产品水分含量之间的关系,在一定程度上影响了货架期预测的准确性。

为此,文中拟研究贮藏温度对奶粉的吸湿性能和包装材料的透湿性能的影响,建立全脂奶粉基于不同温度影响的时间-水分含量的预测模型,并通过费米

方程表征感官评分与水分活度之间的数值关系,以确定全脂奶粉的临界水分含量,在此基础上建立全脂奶粉防潮包装货架期预测模型。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:国产某著名品牌全脂甜奶粉,市售,于 2021 年 3 月生产。主要仪器设备:W3/060 水蒸气透过率测试系统,济南兰光机电技术有限公司;RQH-350 人工气候箱,上海右一仪器有限公司;AB204-N 电子分析天平,梅特勒-托利多集团;DHG-9030A 电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;AquaLab 动态水分吸附仪,美国培安公司;AquaLab 4TE 水分活度仪,美国 Decagon 公司。

1.2 全脂奶粉质量指标的测定

水分含量指食品中水的质量占食品总质量的百分比。水分活度反映食品中水分存在的状态,即水分与食品的结合程度。两者之间有一定的对应关系,可用等温吸湿曲线进行表征。研究中测量了多个指标,以期解释全脂奶粉的吸湿劣变性。水分含量的测量采用标准称量分析干燥法^[14]。先将 2.5~3.0 g 样品放入玻璃皿中,并在大气压于 $(102 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下干燥 2 h。随后每隔 1 h 测定其质量,直到质量差不超过 0.5 mg。因为大气湿度会对奶粉的质量产生影响,因而称量过程需迅速。样品的水分活度采用 AquaLab 系列 4 TE 测水仪测量。

感官评价使用 9 分满意表,对全脂奶粉的颗粒大小、结块程度和颜色进行感官评估^[15]。选择多名消费者提前进行感官评估培训(预先了解市场上可用的标准品牌产品的感官属性),通过重复测试,最终由识别能力较高且能持续完成任务的 6 名评价员组成评价小组,每次评价时提供新鲜全脂奶粉作为对照样品。

1.3 包装货架期预测模型的建立

1.3.1 全脂奶粉吸湿性能模型的建立

奶粉的吸湿性能通常采用等温吸湿曲线来表征,可使用 DVS 动态水分吸附仪测定^[16]。将样品置于相对湿度不断递增的仪器内部腔室里,连续监测样品的

质量变化情况。样品在每个相对湿度下达到吸湿平衡后再进入下一个湿度环境,记录每个相对湿度条件下的平衡含水率,并生成等温吸湿曲线。由于在后续进行货架期预测时会将这些数据作为参数输入,考虑常用的贮藏温度和加速贮藏温度,选择测试分析3个温度(25、35、45℃)下全脂奶粉的吸湿特性,并通过数据拟合选择最合适的等温吸湿模型,采用阿伦尼乌斯方程表征温度的影响。

1.3.2 包装透湿性能表征

利用 W3/060 水蒸气渗透率测试系统测试分析不同温度下包装膜的水蒸气透过率,取3个平行样,应用阿伦尼乌斯方程表征温度对包装透湿性能的影响。

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: K 为包装材料在某一特定温度下的透湿率; K_0 为阿伦尼乌斯方程前因子; E 为活化能; T 为热力学温度。

1.3.3 全脂奶粉临界水分含量的确定

将全脂奶粉放在密封容器内由饱和盐溶液(见表1)^[9]所形成的特定湿度环境中,然后把干燥器放在恒温箱里使样品在饱和盐溶液所形成的相对湿度下逐渐平衡。在平衡14 d后,取出样品,测定其水分活度和感官评分。应用费米方程确定奶粉的临界水分活度^[17],根据产品等温吸湿曲线确定临界水分含量 X_c 。

1.3.4 包装货架期预测模型的建立

在实际贮运过程中,包装内奶粉的水分吸收速率主要取决于环境条件、包装内外水蒸气渗透性及奶粉的吸湿性能。这里讨论包装外的水蒸气因水分浓度梯度通过包装材料进入包装内的情况,并假设来自外部的的水蒸气被全脂奶粉迅速吸收。

应用 Fick 和 Henry 定律描述包装膜内外的水分转移。包装内奶粉的水分含量随贮藏时间的变化率可由式(2)表示。

$$m_p \frac{dX}{dt} = KA(Up^* - a_w p^*) \quad (2)$$

式中: m_p 为产品的质量; X 为产品水分的质量分数; t 为贮藏时间; K 为包装材料的透湿系数; A 为封装包装袋的面积; p^* 为贮藏环境温度下水的饱和蒸气压; U 为环境的相对湿度; a_w 为产品的水分活度。

为此可得到产品达到水分含量临界值所需的时间,即为包装货架期。

$$t_s = \frac{m_p}{p^* KA} \int_{X_i}^{X_c} \frac{dX}{U - a_w} \quad (3)$$

式中: t_s 为包装货架期; X_i 、 X_c 分别为产品水分含量的初始值、临界值。

进一步考虑贮藏温度的影响,建立包装材料水蒸气渗透率及产品水分活度与温度的关系,得到基于温度影响的产品吸湿货架期预测模型,见式(4)。

$$t_s = \frac{m_p}{p^* K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) A} \int_{X_i}^{X_c} \frac{dX}{U - f(a_w, T, X)} \quad (4)$$

式中: $f(a_w, T, X)$ 为不同温度条件下全脂奶粉的等温吸湿模型。

1.4 货架期预测模型的验证

将100 g全脂奶粉分别装入由不同透湿性能包装膜制成的小袋中,小袋的渗透面积均为0.03 m²,并置于相对湿度(70±1)%和温度(37±1)℃的无光照环境中,每隔7 d测定全脂奶粉的水分含量和水分活度,重复测定3次。

1.5 数据处理

将全脂奶粉的各个指标重复测定3次,以平均值±偏差表示。通过 Matlab 软件中的 Curve Fitting 工具箱对实验数据进行模型数据拟合,并采用相关数学理论对实验数据和模型的拟合效果进行评估,采用 Origin 进行数据的绘图处理和分析。

表1 饱和盐溶液的配置
Tab.1 Preparation of saturated salt solution

种类	试剂名称	试剂的质量(加入热水 200 mL)/g	相对湿度
氯化镁饱和溶液	六水氯化镁	150	0.328
碳酸钾饱和溶液	碳酸钾	300	0.432
硝酸镁饱和溶液	六水硝酸镁	200	0.529
氯化钠饱和溶液	氯化钠	100	0.753
氯化钾饱和溶液	氯化钾	100	0.843

2 结果与分析

2.1 基于温度影响的全脂奶粉等温吸湿特性

在 3 个温度条件下,全脂奶粉的水分活度与水分含量之间的关系见图 1。温度会影响奶粉的吸湿特性。温度越高,奶粉的吸湿能力越强。全脂奶粉在水分活度较低时,其平衡水分含量的上升趋势平稳,后期水分活度接近 0.8 时,平衡含水量大幅度提升。

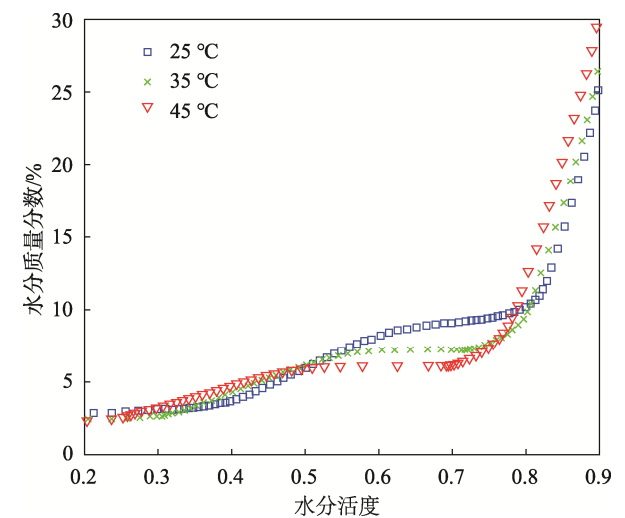


图 1 不同温度下全脂奶粉的吸湿特性
Fig.1 Hygroscopic characteristics of whole milk powder at different temperature

描述食品中水分含量与水分活度之间的关系的模型较多^[6]。选择粉状食品常使用的 GAB 模型和 GDW 模型 (Generalised D'Arcy and Watt model)^[18]进行拟合分析。

1) GAB 模型, 见式 (5)。

$$X = \frac{mnka_w}{[(1 - ka_w) + (1 - ka_w + cka_w)]}$$
 (5)

式中: m 为单分子层的吸附量; n 、 k 为常数。

2) GDW 模型, 见式 (6)。

$$X = \frac{m_0ba_w}{1+ba_w} \times \frac{1-c(1-w)a_w}{1-ca_w}$$
 (6)

式中: m_0 为第 1 层吸附的最大吸附量; b 、 c 分别为与第 1 层、第 2 层水分吸附相关的动力学常数; w 为第 1 层吸附的水分子转变成第 2 层吸附的比率。

表 2 列出了不同温度条件下全脂奶粉水分吸附模型拟合的相关参数。在 3 个温度条件下 2 种模型均具有较高的决定系数, GDW 模型比 GAB 模型的拟合指标更优, 整体确定系数 (R-square) 均高于 0.95, 因此选择 GDW 作为全脂奶粉的等温吸湿模型。

进一步考虑温度的影响, 应用阿伦尼乌斯方程表征动力学参数 b 、 c , 得到考虑温度影响的 mGDW 方程, 见式 (7)。

$$X = \frac{m_0b_0 \exp(\frac{q_k}{RT})a_w}{1+b_0 \exp(\frac{q_k}{RT})a_w} \times \frac{1-c_0 \exp(\frac{q}{RT})(1-w)a_w}{1-c_0 \exp(\frac{q}{RT})a_w}$$
 (7)

式中: b_0 、 c_0 为阿伦尼乌斯方程前因子; q_k 、 q 为活化能。

依据 mGDW 吸湿模型对实验数据进行拟合, 获得了 mGDW 模型的相关参数值 (R-square 值为 0.958 7), 可知拟合性较高, 见图 2。

表 2 全脂奶粉在 3 个温度下的模型参数及效果评价指标
Tab.2 Coefficients and effect evaluation indexes of models for whole milk powder at 3 different temperature

温度/°C	模型	GAB 模型参数			GDW 模型参数				评价指标	
		m	n	k	m_0	c	b	w	确定系数	均方根
25	GAB	0.033 9	1.285	2.391					0.882 5	0.017 37
	GDW				0.060 1	1.042	4.246	0.293 1	0.961 5	0.010 09
35	GAB	0.0338 6	1.020	1.988					0.877 1	0.019 53
	GDW				0.059 8	1.056	3.588	0.293 0	0.965 9	0.010 21
45	GAB	0.0338 5	0.942 8	1.920					0.914	0.020 04
	GDW				0.060 1	1.066	3.411	0.292 8	0.956 5	0.014 19

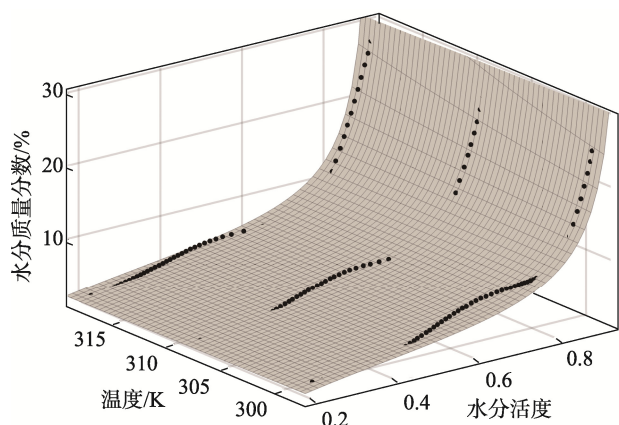


图2 mGDW 模型对全脂奶粉不同温度实验数据的拟合
Fig.2 Fitting of experimental data of whole milk powder at different temperature by mGAB model

2.2 基于温度影响的包装薄膜透湿率表征

软塑膜包装是目前市售袋装奶粉常用的包装形式,包括透明普通塑料膜包装、铝塑复合膜包装等。为此应考虑贮藏温度对软塑膜透湿率的影响。实验选用目前常用的2种市售包装膜,进一步验证包装货架期预测模型的有效性。温度对2种包装膜水蒸气渗透性能的影响见表3。

2种包装膜在温度为30、38、45℃时,随着温度的升高其水蒸气渗透率均升高。低渗透性的铝塑复合膜

受温度的影响更显著,在45℃下水蒸气渗透率相较于30℃增加了约120%,渗透性较好的聚乙烯膜的水蒸气渗透率增加了23%。由此可见,温度对包装材料透湿性能的影响不应忽略。进一步表征温度对包装材料透湿性能的影响,其结果见式(8)——(9)。

$$K_{PE} = 3.54 \times 10^{-13} \times \exp(-10\,966.17 / RT) \quad (8)$$

$$K_{PET/Al/PE} = 1.84 \times 10^{-8} \times \exp(-41\,611.57 / RT) \quad (9)$$

2.3 奶粉临界水分含量的确定

为了更好地通过数学模型分析确定试样的临界水分含量,在研究过程中使用费米方程探究实验所得的感官评分与水分活度的关系,再根据实验拟合确定的等温吸湿曲线确定临界水分含量 X_c 。

$$Y(a_w) = Y_0 / \{1 + \exp[(a_w - a_{wc}) / a]\} \quad (10)$$

式中: $Y(a_w)$ 为感官评分; Y_0 为分析参数的初始值; a_{wc} 为临界水分活度; a 为常数。

6名经过培训的消费者给出的不同水分活度条件下试样的平均感官评分见图3。试样在水分活度为0.32时的感官评分为8.1,随着水分活度的增加,感官评分下降显著。当水分活度高于0.5后,感官评分快速下降,直至不可接受水平。采用费米方程确定试样的临界水分活度为0.481,根据mGDW吸湿模型确定对应的临界水分含量(质量分数)为4.85%。

表3 包装材料的特性参数值

Tab.3 Characteristic parameters of packaging material

包装膜材料	膜厚/ μm	水蒸气渗透率/ $(10^{-15} \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$		
		30℃	38℃	45℃
聚乙烯膜(PE)	100	4.52	5.17	5.55
铝塑复合膜(PET/Al/PE)	100	1.27	1.81	2.79

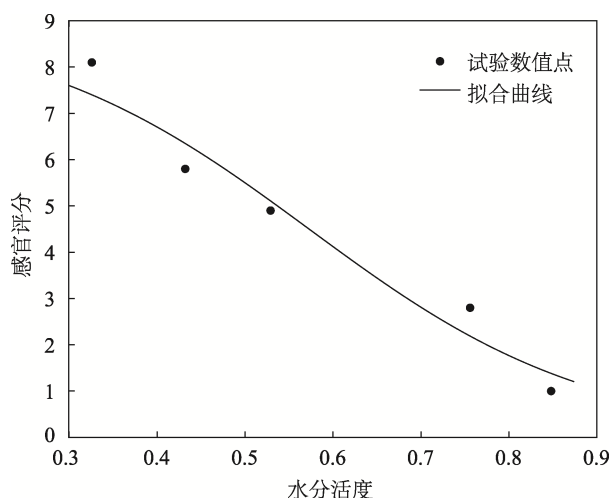


图3 不同水分活度全脂奶粉的感官评分
Fig.3 Sensory evaluation value of whole milk powder with different water activity

2.4 全脂奶粉防潮包装货架期的预测与验证

由于进入包装的水分受到贮存温度和相对湿度的影响,常采用基于高温和高湿的加速货架期测试进行评估^[19]。为此分别进行了聚乙烯膜、铝塑复合膜袋装产品的高温、高湿加速实验。加速试验参数:贮藏环境温度37℃、相对湿度70%、包装袋的表面积0.0308 m²、试样质量0.1 kg。

聚乙烯袋装试样加速实验的水分活度和水分含量如图4和图5所示。随着贮藏时间的延长,试样的水分指标值逐渐增大。当贮藏时间达到84 d时,其水分含量和水分活度均超过临界值,试样结块严重且失去了商用价值。采用货架期预测模型进行分析可知,试样的水分含量从初始值(2.18%)增至临界值(4.85%)所需防潮货架期的预测值为89 d。理论预测值与实验值的相对误差约为5.95%。

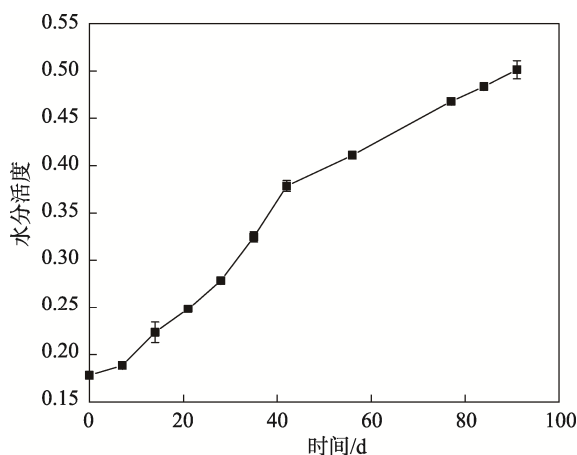


图 4 聚乙烯袋装全脂奶粉水分活度的变化
Fig.4 Change of water activity of whole milk powder in PE bag

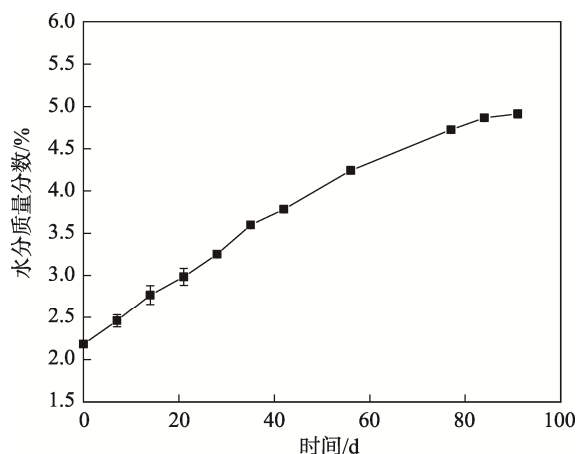


图 5 聚乙烯袋装全脂奶粉水分含量的变化
Fig.5 Change of moisture content of whole milk powder in PE bag

铝塑复合袋装试样水分含量随贮藏时间变化的实测值和模型预测值见图 6。结果表明, 试样的实际含水量与预测含水量之间的最高相对偏差为 4.74%, 防潮货架期预测时间为 249 d。

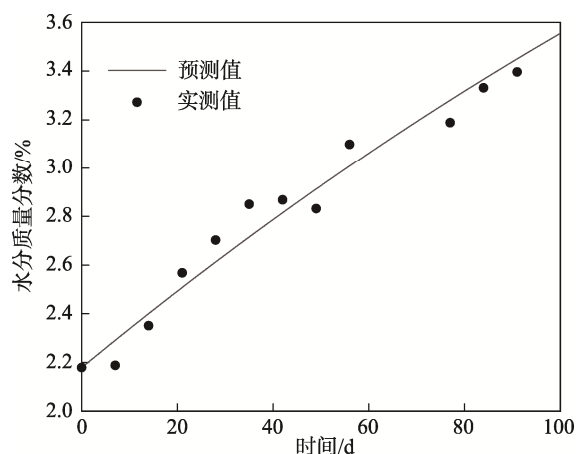


图 6 铝塑复合袋装全脂奶粉水分含量随贮藏时间的变化
Fig.6 Change of water content of whole milk powder in aluminum-plastic composite bag with storage time

3 结语

通过测试分析了全脂奶粉在不同温度下的等温吸湿特性, 建立了以 GDW 模型为基础、基于温度影响的产品等温吸湿模型。全脂奶粉的感官指标随着其水分含量的升高而逐渐降低, 应用费米方程较好地拟合了两者的关系, 确定全脂奶粉的临界含水量为 4.85%。综合贮藏温度对奶粉吸湿性能及包装内外水分传质过程的影响, 建立了全脂奶粉防潮包装货架期预测模型, 并在温度 37 °C 和相对湿度 70% 下的加速货架寿命测试实验中验证了模型预测的有效性。结果表明, 理论预测与实验的防潮货架期相对偏差低于 6%。

参考文献:

- [1] CHENG H, ERICHSEN H, SOERENSEN J, et al. Optimising Water Activity for Storage of High Lipid and High Protein Infant Formula Milk Powder Using Multivariate Analysis[J]. International Dairy Journal, 2019(93): 92-98.
- [2] 吴昊霞. 罐装奶粉顶空气体对其稳定性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019: 9-10.
WU Hao-xia. Effect of Top Air Body in Milk Powder Packaging on Its Stability[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019: 9-10.
- [3] PHOSANAM A, CHANDRAPALA J, HUPPERTZ T, et al. Changes in Physicochemical and Surface Characteristics in Model Infant Milk Formula Powder (IMF) during Storage[J]. Drying Technology, 2021, 39(15): 2119-2129.
- [4] JENA S, DAS H. Shelf Life Prediction of Aluminum Foil Laminated Polyethylene Packed Vacuum Dried Coconut Milk Powder[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 135-142.
- [5] ZHANG L, GRACE P M, SUN DW. A New Theoretical Model for Moisture Sorption Isotherms and Its Application in Deriving a Hygroscopicity Index for Food Products[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 315: 110817.
- [6] SETH D, DASH K K, MISHRA H N, et al. Thermodynamics of Sorption Isotherms and Storage Stability of Spray Dried Sweetened Yoghurt Powder[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(10): 4139-4147.
- [7] FOSTER K D, BRONLUND J E, PATERSON A H J. The Prediction of Moisture Sorption Isotherms for Dairy Powders[J]. International Dairy Journal, 2005, 15(4): 411-418.
- [8] WANG HJ, LEE DS. Packaging and the Shelf Life of Milk Powder Products[M]. Amsterdam: Reference

- Module in Food Science, 2019: 1-17 .
- [9] DESHWAL G K, SINGH A K, KUMAR D, et al. Effect of Spray and Freeze Drying on Physico-Chemical, Functional, Moisture Sorption and Morphological Characteristics of Camel Milk Powder[J]. LWT, 2020, 134: 110117.
- [10] AGUDELO-RODRÍGUEZ G, MONCAYO-MARTÍNEZ D, CASTELLANOS D A. Evaluation of a Predictive Model to Configure an Active Packaging with Moisture Adsorption for Fresh Tomato[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 23: 100458.
- [11] PHUPOKSAKUL T, LEUANGSUKRERK M, SOMWANGTHANAROJ A, et al. Storage Stability of Packaged Baby Formula in Poly (Lactide)-Whey Protein Isolate Laminated Pouch[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(10): 3365-3373.
- [12] 陈彩锐, 于文花, 王晓, 等. DHA 固态调制乳粉保质期实验研究及理论预测[J]. 食品与营养科学, 2019(3): 208-212.
- CHEN Cai-rui, YU Wen-hua, WANG Xiao, et al. Experimental Study and Theoretical Prediction of the Shelf-Life of DHA Solid Milk Powder[J]. Hans Journal of Food and Nutrition Science, 2019(3): 208-212.
- [13] 于华宁, 郭本恒, 刘振民, 等. 初乳清粉的货架期预测和贮藏稳定性[J]. 乳业科学与技术, 2013, 36(4): 14-18.
- YU Hua-ning, GUO Ben-heng, LIU Zhen-min, et al. Shelf Life Prediction and Storage Stability of Bovine Colostrum Whey Powder[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2013, 36(4): 14-18.
- [14] CHEN Q, YIN Q, XIE Q, et al. Elucidating the Physicochemical Properties and Surface Composition of Goat Milk-Based Infant Formula Powders[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131936.
- [15] RASANE P, JHA A, SHARMA N. Predictive Modelling for Shelf Life Determination of Nutricereal Based Fermented Baby Food[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(8): 5003-5011.
- [16] 郝发义, 卢立新. 食品水分吸附等温线实验方法研究进展[J]. 包装工程, 2013, 34(7): 118-122.
- HAO Fa-yi, LU Li-xin. Research Progress of Experimental Methods of Food Moisture Adsorption Isotherm[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 118-122.
- [17] GONDEK E, LEWICKI P P, RANACHOWSKI Z. Influence of Water Activity on the Acoustic Properties of Breakfast Cereals[J]. Journal of Texture Studies, 2006, 37(5): 497-515.
- [18] FURMANIAK S, TERZYK A P, GAUDEN P A, et al. Applicability of the Generalised D'Arcy and Watt Model to Description of Water Sorption on Pineapple and other Food-stuffs[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(2): 718-723.
- [19] CALLIGARIS S, MANZOCCO L, ANESE M, et al. Accelerated shelf life testing[J]. Food quality and shelf life, 2019(12): 359-392.

责任编辑: 彭颀