

食品防潮包装理论及货架期预测研究现状

郝发义<sup>1,2</sup>, 卢立新<sup>1,3</sup>

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 上海理工大学, 上海 200093; 3. 中国包装总公司食品包装技术与安全重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 对食品防潮包装的理论研究现状进行了系统研究和分析。主要阐述了吸附模型、单组分干性食品货架期预测模型、多组分食品货架期预测模型和基于多因素影响的神经网络货架期预测模型国内外的研究进展, 并分析了各个模型的优点和不足, 为进一步研究食品防潮包装货架期提供理论参考。

关键词: 防潮包装; 吸附模型; 多组分食品; 货架期预测

中图分类号: TB487; TS206 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2012)11-0045-05

Current Status of Food Moisture-proof Packaging Theory and Shelf-life Prediction

HAO Fa-yi<sup>1,2</sup>, LU Li-xin<sup>1,3</sup>

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Key Laboratory of Food Packaging Techniques and Safety of China National Packaging Corporation, Wuxi 214122, China)

Abstract: Food moisture-proof packaging theory was studied and analyzed systematically. The research progress on adsorption model, shelf-life prediction models for single component dry food and multi-component food, and neural network shelf-life prediction model were introduced. The advantages and disadvantages of each model were analyzed. The purpose was to provide theoretical reference for further research of moisture-proof packaging for food.

Key words: moisture-proof packaging; adsorption model; multi-component food; shelf-life prediction

目前市场上加工食品种类日益繁多, 各种酥脆食品(饼干或蛋卷)、干制食品(香菇)、茶叶以及多组分食品(夹心饼干)等, 更是成为人们生活中必不可少的食品。这些食品都具有很强的吸湿和易感染异味的特点。水蒸汽对各种干性食品或多组分食品会带来以下几方面的影响: ①物理变化, 例如面包失水后变硬、饼干吸水后脆性降低等; ②物理化学变化, 例如糖或盐结块或形成水合物等; ③生物变化, 当湿度超过临界值或在包装内形成小水滴时, 霉菌或细菌就要生长; ④化学变化, 如粮食的褐变等<sup>[1]</sup>。

目前, 对防潮包装货架期的研究侧重于产品临界水分的确定和等温吸湿曲线的测试。首先, 采用试验方法得到产品的等温吸湿曲线, 进而根据包装材料的透湿性, 计算食品达到临界水分含量的货架期。这种

测试方法仅适用于单组分食品, 且描述食品吸附性能的各种模型都是基于理想化的假设而建立的。真实的食品吸附性能以及水分在食品内部的传输是非常复杂的过程。食品表面质地疏松粗糙, 内部则是多孔隙的结构, 这种复杂的结构对其吸湿能力影响很大。多组分食品由于存在水分活度梯度, 相互之间也会发生水分扩散。更准确、更科学、更快速的预测防潮包装货架期的方法, 已经成为新的研究方向。

1 防潮包装基本理论研究

1.1 传统的吸附理论

食品吸湿特性的研究, 采用经典的吸附理论模型, 把食品看做是一种固态吸附剂, 而水蒸气看做是

收稿日期: 2012-03-07

作者简介: 郝发义(1978—)男, 河南人, 上海理工大学讲师, 江南大学在读博士, 主要研究方向为食品包装。

通讯作者: 卢立新(1966—), 男, 江苏宜兴人, 博士, 江南大学教授、博士生导师, 主要从事包装动力学与包装材料等的研究。

吸附质。吸附过程是吸附质在吸附剂表面形成溶液的过程。气体吸附理论主要有 Langmuir 单分子层吸附理论、BET 多层吸附理论等。这些吸附理论都从不同的物理模型出发,综合考查大量的实验结果,并给出描述吸附等温线的方程式。根据食品的吸湿等温曲线,选择相应的吸湿等温方程式,即可依据包装的条件及环境条件,对食品的防潮包装设计进行局部或全面的调整,使包装设计能满足预计环境所要求的保存期限。

Langmuir 吸附等温式描述了吸附量与被吸附蒸气压力之间的定量关系。在该公式的推导过程引入了 2 个重要假设:吸附是单分子层的;固体表面是均匀的,被吸附分子之间无相互作用。由 Brunauer, Emmett 和 Teller 提出的多分子层吸附公式简称 BET 公式,接受了 Langmuir 理论中关于固体表面是均匀的观点,但认为吸附是多分子层的。当然第 1 层吸附与第 2 层吸附不同,在此基础上导出了 BET 二常数公式<sup>[2]</sup>:

$$\frac{a_w}{(1-a_w)m} = \frac{1}{m_0-1} + \frac{a_w(C-1)}{m_0 C} \quad (1)$$

式中: $m$  为食品含水量; $m_0$  为单分子层含水量; $C$  为常数。

GAB 方程是在 BET 理论的基础上,结合统计学和动力学理论发展而来的,适用于水分活性在 0.1~0.9 之间的各种食品,是目前最理想的食品吸湿等温特性方程式<sup>[3]</sup>:

$$m = \frac{Ckm_0 a_w}{(1-ka_w)(1-ka_w + Cka_w)} \quad (2)$$

式中: $m$  为食品含水量; $m_0$  为单分子层含水量; $C, k$  为常数。

吸附理论现在的发展是将吸附平衡、吸附量、微孔体积和孔结构联系起来。气体吸附理论的最新发展主要集中在几个方面:①对原有气体吸附理论的修正与补充;②不均匀固体表面的吸附;③吸附热力学和吸附动力学。

## 1.2 基于分形理论的食品吸附特性研究

传统吸附理论对人们认识吸附的性质发挥了重要作用,但这些理论或多或少都带有理想色彩和经验性。经典的多分子层吸附模型,如 BET 吸附模型和 GAB 吸附模型,在研究固体表面吸附问题时,假设吸附表面是光滑均匀的,其忽略了物料表面不规则性对吸附的影响,显然这与固体表面的实际情况相去甚

远。固体表面的复杂程度对吸附作用有极大的影响,这一点可以从吸附作用与比表面积的依赖关系看出,固体表面的形状或复杂程度是决定吸附容量的主要因素。很多食品的结构是不规则、无规律的,比如絮凝颗粒(速溶奶粉或咖啡)或多孔性食品(如面包、膨化食品和点心),每一种食品都具有复杂的几何结构,其中包含各种不规则的结构,如孔、凸点以及相似结构,并且某些食品经过放大之后仍旧保持这些特性。食品的这种不规则形态,如果采用传统的欧氏几何将是非常不准确的,而确定食品的表面结构和特征,将成为科学预测其物理性能和化学性能的重要前提<sup>[4-5]</sup>。

分形几何的引入为吸附理论的发展提供了一种更为接近实际的方法。自从分形概念提出以来,用分形理论分析吸附剂表面现象已取得显著进展,提出了各种分形吸附模型。从 Pfeifer 开始,就有不少人致力于应用分形理论来对传统的吸附模型进行修正。分形提供了一种描述食品物料复杂表面结构的方法。已有初步研究对传统吸附模型进行修正,分形理论已经被证明可以成功地用于表征复杂表面结构,并进一步理解这种几何结构对物理和化学性能的影响<sup>[6-8]</sup>。首先要充分认识食品物料复杂表面结构的数学表征方法,进而可以研究这种复杂结构对其吸附特性的影响。应用分形理论可以计算得到食品物料的分维数,从而确定食品物料的表面粗糙度和物料的结构的分形特征,进而对食品物料的一些性质进行预测,包括食品物料的吸附能力、溶解性、化学反应性等性质<sup>[9-11]</sup>。基于分形理论的多分子层吸附模型已经成为新的研究方向<sup>[12]</sup>。

## 2 国内外防潮包装货架期的研究现状

### 2.1 单组分干性食品

目前,对单组分食品的防潮包装货架寿命的研究主要基于食品的等温吸湿曲线,涉及包装材料的透湿性能、物品的吸湿等温特性以及环境的温湿度 3 个方面<sup>[13]</sup>。在一定温度和相对湿度条件下,每种食品都具有一定的含水量。食品的吸湿状况一般可通过食品的吸湿等温曲线显示。不同的食品,因其化学组成和组织结构的不同,所得到的吸湿等温线也不同,大多数食品的吸湿等温线都表现出不同程度的反“S”型<sup>[14]</sup>。研究单组分食品,如茶叶、淀粉、砂糖等湿度

敏感性食品的货架寿命,首先要确定产品的吸湿等温线,然后确定产品变质的临界含水量。通过在恒定温度下测试包装薄膜的透湿量,计算产品在允许的吸湿范围内所能保存的时间<sup>[15]</sup>。目前还没有一种模型能够完全准确地描述各种不同食品的吸湿等温线<sup>[16]</sup>。

2.2 多组分食品

由柔软、湿润的馅料类和相对较干的面包、蛋糕或是脆性的谷物类食品组成的多组分复合食品的日益增多,为防潮包装的研究带来了挑战,如夹心饼干/蛋糕/面包、派、奶油馅饼、比萨等,以及我国的传统食品如包子、饺子、馅饼等。这些食品的不同部分具有不同的结构及性质,各个组分除了会吸湿受潮或脱湿以外,其组分间的水分迁移也是这类食品贮藏过程中经常发生的现象。多组分食品水分扩散示意图见图1。多组分食品的水分迁移和货架寿命已经成为各国

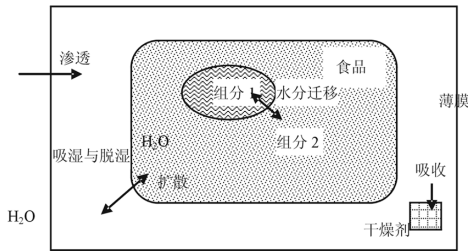


图1 多组分食品水分扩散示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of water diffusion in multi-component food

学者研究的热点,大多数研究都是通过构建数学模型,来预测食品的水分迁移情况。这些研究方法还是基于传统的吸附理论模型,没有结合产品的结构和形态以及包装系统对整个产品货架寿命的影响<sup>[17]</sup>。

预测包装食品水分迁移和货架寿命的包装模型有很多<sup>[18]</sup>。控制初始水分含量以及水分迁移对于多组分食品的质量和寿命至关重要。一种食品组分在和周围组分以及环境达到动态平衡过程中,水分总会从一种食品组分向另一组分迁移。此外,每个组分的扩散速率和平衡含水量均不相同。多组分食品货架寿命的主要研究方向分为以下几个方面。

- 1) 不同组分之间的水分扩散情况。建模时假设两组分之间有充分接触,水分扩散不受影响。Sapru采用有限差分法研究了完全封闭包装内谷物-葡萄干多组分食品中,水蒸气的迁移机理<sup>[19]</sup>。
- 2) 假定不同组分之间存在间隙,即空气会对水

分扩散有一定延缓作用,研究不同组分间未充分接触时的水分迁移情况。文献根据菲克第二定律建立数学模型,预测食品多组分之间未充分接触的实际条件下水分的单向迁移,同时还探讨了不同温度对水分迁移的影响。

3) 食品的孔隙率和脂肪含量对平衡含水率和扩散系数的影响。研究发现,食品的平衡含水率和孔隙率不存在明显的相关性,但会随着脂肪含量的增加而下降,食品的扩散系数随孔隙率的降低而大幅度降低<sup>[20-23]</sup>。

2.3 基于多因素的防潮包装货架期研究

目前,湿敏型产品的货架寿命预测模型都是基于食品水分活性和包装材料阻隔性的关系,但预测组分较为复杂的食品,则准确性稍差,并且不适用于加工处理条件、包装特性以及储存环境不同的场合。除了食品水分活性和包装材料阻隔性以外,还有其他因素也对产品货架寿命产生重要影响。

神经网络是对复杂问题进行建模、优化以及过程控制的有效工具。在研究和认识物料的基础上,BP人工神经网络将包括食品组成、包装工艺及包装材料特性、贮运环境温湿度在内的多种因素综合于一个模型中,建立了各种因素与食品货架寿命的关系。利用神经网络研究多因素影响下的防潮包装货架期,开辟了一个新的研究方向。Ubonrat Siripatrawan采用基于后向传播算法的神经网络,综合考虑了产品特性、包装特性和储存条件等多个因素,预测了湿敏性产品的货架寿命<sup>[24-25]</sup>。孙增辉等人使用BP人工神经网络模型的预测值与真实货架寿命值最接近,并且BP模型能综合反映饼干的初始含水率、初始过氧化值和饼干包装材料的透氧率、透湿率以及贮存环境温湿度对其货架寿命的影响<sup>[26]</sup>。

3 基于孔道网络模型的水分扩散系数研究

目前比较前沿的水分扩散系数研究,开始考虑食品的物理结构以及组成成分的影响。谷物类食品的有效水分扩散系数受食品物理结构的影响很大,这主要是因为有效水分扩散是食品孔隙中水分气相扩散以及食品固相中水分液相扩散共同作用的结果。由于液相扩散和气相扩散相差 $10^{-4}$ 量级,所以整体的扩散系数受多孔性的影响很大。食品多孔率对水分传输的关键作用已经从典型食品的相关研究中得到

了验证。Kurt M Waananen<sup>[27]</sup>研究得出,孔隙率 6% 的通心粉的有效水分扩散系数为  $1.06 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , 而孔隙率为 26% 的通心粉有效水分扩散系数为  $2.21 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。E. Roca<sup>[21]</sup>研究得出,孔隙率 52% 松糕的有效扩散系数为  $3.05 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ , 而孔隙率为 67% 的有效扩散系数为  $1.01 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。干性食品大多属于多孔性材料,科学表征多孔材料的宏微观结构及其对材料性能的影响,是研究多孔材料的水分吸附和扩散的基础,所以对多孔性食品水分迁移的模型研究,引起了国内外学者的广泛关注。

在多孔介质领域的研究中,描述能量与物质迁移的物理模型可以归纳为“连续介质模型”和“非连续介质模型”2 类<sup>[28]</sup>。现在对多孔介质的研究大都基于连续体假设,即将多孔介质假想为虚拟的连续体,用时间和空间的连续函数描述其几何、物理以及热质传递等特性。而实际上,多孔食品内部的湿分不能在任意方向上迁移,孔隙才是传质的优势通道。连续介质模型的局限性就表现在这个方面,很难讨论有效孔隙率、孔隙大小分布对传输的影响。现在更接近产品实际的模型是孔道网络模型,这种模型充分考虑多孔介质内部的复杂结构,把孔径分布和孔结构充分考虑到了模型中。孔道网络模型把多孔介质的孔隙表示成二维或三维的相互连通的网络,内部的大小孔随意排列。这方面的模型在食品干燥和吸附领域已有应用<sup>[29]</sup>。

## 4 结语

防潮包装过程极其复杂,包含食品结构及组成特性、温度、湿度、包装条件等多个因素,所以对防潮包装货架寿命的研究比较复杂,要建立具有通用性的货架寿命预测模型十分困难。由上述防潮包装基础理论和货架寿命预测模型分析可知:(1)经典吸附考虑因素不全面,对食品表面复杂结构对吸附的影响未充分考虑,分形理论的出现提供了一种描述不规则特征的方法;(2)多组分食品复杂的水分迁移过程为货架寿命预测带来了挑战,食品的组成和内部结构影响水分的扩散,并最终影响多组分食品货架寿命,采用神经网络模型预测多因素对货架期的影响,将提高预测的精确度;(3)采用孔道网络模型模拟多孔性食品内部孔隙结构,可更准确地计算水分在多孔性食品内部的扩散系数。

## 参考文献:

- [1] 孙蓉芳. 防潮包装的机理与应用[J]. 包装工程, 1994, 15(4): 157-162.  
SUN Rong-fang. Principle and Application of Moisture-proof Packaging [J]. Packaging Engineering, 1994, 15(4): 157-162.
- [2] AZANHA A B, FARIA J A F. Use of Mathematical Models for Estimating the Shelf-life of Cornflakes in flexible Packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18: 171-178.
- [3] 冯梅, 王京海. 低水分食品防潮包装后货架寿命的预测模型[J]. 包装工程, 1999, 20(6): 17-19.  
FENG Mei, WANG Jing-hai. Predicative Model for the Shelf-life of Dry Food in Moisture-proof Packaging[J]. Packaging Engineering, 1999, 20(6): 17-19.
- [4] BARRETT A H, PELEG M. Applications of Fractal Analysis to Food Structure[J]. Lebensm-Wissu-Technol, 1995, 28: 553-563.
- [5] MAHNKE M, MOGEL H J. Fractal Analysis of Physical Adsorption on Material Surfaces [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Engineering Aspects, 2003, 216: 215-228.
- [6] 赵萌. 分形吸附理论及其对粘土性质的表征方法[J]. 云南化工, 2007, 34(2): 50-54.  
ZHAO Meng. Fractal Adsorption Theory and Its Applications in Characterization of Clays[J]. Yunnan Chemical Technology, 2007, 34(2): 50-54.
- [7] 马正飞, 金叶玲. 分形 BET 模型[J]. 高校化学工程学报, 1994, 3(8): 288-291.  
MA Zheng-fei, JIN Ye-ling. The Fractal BET Model of Absorption [J]. Journal of Huaiyin Industry College, 1994, 3(8): 288-291.
- [8] AGUERRE R J, CONSTANTINO P V. A Fractal Isotherm for Multilayer Adsorption in Foods[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 30: 227-238.
- [9] 徐龙君, 顾乐观. 分形吸附模型[J]. 煤炭转化, 2000, 23(1): 91-90.  
XU Long-jun, GU Le-guan. Fractal Adsorption Model [J]. Coal Conversion, 2000, 23(1): 91-90.
- [10] PELEG M, NORMAND M D. Characterization of the Ruggedness of Instant Coffee Particles by Natural Fractals[J]. Journal of Food Science, 1985, 50(3): 829-831.
- [11] MARC-OLIVIER COPPENS. Characterization of Fractal Surface Roughness and Its Influence on Diffusion and Reaction[J]. Colloids and Surfaces: Physicochemical and

- Engineering Aspects, 2001; 257—265.
- [12] QUEVEDO R, LÓPEZ G R, AGUILERA J M, et al. Description of Food Surfaces and Microstructural Changes Using Fractal Image Texture Analysis [J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 53: 361—371.
- [13] ROBERTSON. *Food Packaging: Principles and Practice* [M]. New York: Marcel Dekker, 1993.
- [14] PIEGLOVANNI L, FAVA P, SICILIANO. A Mathematical Model for the Prediction of Water Vapor Transmission Rate at Different Temperature and Relative Humidity [J]. *Packaging Technology and Science*, 1995, 19: 73—78.
- [15] GUILLARD V, BROYART B, GUILBERT S, et al. Moisture Diusivity and Transfer Modeling in a Dry Biscuit [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 64: 81—87.
- [16] 原琳, 卢立新. 酥性饼干防潮包装保质期预测模型的研究 [J]. *食品工业科技*, 2008(10): 206—208.
- YUAN Lin, LU Li-xin. Study on Shelf-life Predicting Model of Moisture-proof Packaging for Cookies [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2008(10): 206—208.
- [17] GUILLARD V, BROYART B, BONAZZI C, et al. Evolution of Moisture Distribution during Storage in a Composite Food. Modeling and Simulation [J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68: 958—966.
- [18] LABUZA T P, HYMAN C R. Moisture Migration and Control in Multi-domain Foods [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1998(9): 47—55.
- [19] SAPRU V, LABUZA T P. Moisture Transfer Simulation in Packaged Cereal-Fruit System [J]. *Journal of Food Engineering*, 1996, 27: 45—61.
- [20] ROCA E, BROYART B, GUILLARD V. Predicting Moisture Transfer and Shelf-life of Multi-Domain Food Products [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 86: 74—83.
- [21] ELISABETH ROCA. Controlling Moisture Transport in a Cereal Porous Product by Modiflcation of Structural or Formulation Parameters [J]. *Food Research International*, 2007, 40: 461—469.
- [22] ROCA E, GUILLARD V, GUILBERT S, et al. Moisture Migration in a Cereal Composite Food at High Water Activity: Effects of Initial Porosity and Fat Content [J]. *Journal of Cereal Science*, 2006, 43: 144—151.
- [23] ELISABETH R. Effective Moisture Diusivity Modeling Versus Food Structure and Hygroscopicity [J]. *Food Chemistry*, 2008, 106: 1428—1437.
- [24] SIRIPATRAWAN U, JANTAWAT P. Artificial Neural Network Approach to Simultaneously Predict Shelf Life of Two Varieties of Packaged Rice Snacks [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2009, 44: 42—49.
- [25] SIRIPATRAWAN U, JANTAWAT P. A Novel Method for Shelf Life Prediction of a Packaged Moisture Sensitive Snack Using Multilayer Perception Neural Network [J]. *Science Direct Expert Systems with Applications*, 2008, 34(2): 1562—1567.
- [26] 孙增辉, 张蕾. BP 人工神经网络在酥性饼干货架寿命预测中的应用 [J]. *包装工程*, 2011, 32(3): 16—20.
- SUN Zeng-hui, ZHANG Lei. Application of BP Artificial Neural Network in Shelf Life Prediction of Packaged Cookie [J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(3): 16—20.
- [27] WAANANEN K M. Effect of Porosity on Moisture Diffusion during Drying of Pasta [J]. *Journal of Food Engineering*, 1996, 28: 121—137.
- [28] PRAKOTMAK P. Modeling of Moisture Diffusion in Pores of Banana Foam Mat Using A 2-D Stochastic Pore Network: Determination of Moisture Diffusion Coefficient During Adsorption Process [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010(96): 119—126.
- [29] 丁小明. 多孔介质干燥的孔道网络模拟及试验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- DING Xiao-ming. Pore Network Simulation and Experimental Study on Porous Media during Drying Process [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003.