

包装技术与工艺

包装热封微孔孔道气体交换模型的建立及验证

冯冰霞¹, 卢立新^{1,2}, 潘嘹^{1,2}

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: **目的** 建立包装袋热封微孔孔道内外气体交换模型, 并对其进行实验验证。**方法** 基于泊肃叶定律建立包装袋热封微孔孔道内外气体交换模型, 并通过改变孔道直径、孔长以及内外压差等相关参数进行实验验证。**结果** 当微孔直径为 100, 140, 180 μm 时, 气体交换的实验值与模型值误差基本维持在 5% 以内; 随着孔道直径、内外压差的增大, 微孔孔道气体交换量增加, 且变化显著; 对初始内外压差、孔径一定的微孔孔道, 改变孔长对气体交换有一定影响。**结论** 所建立的气体内外交换模型的预测值与实验值吻合度高。

关键词: 微孔; 包装袋; 气体交换; 模型; 孔道

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0088-04

Establishment and Verification of Gas Exchange Model of Heat Sealing Micropore Channel in Packaging Bags

FENG Bing-xia¹, LU Li-xin^{1,2}, PAN Liao^{1,2}

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

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

ABSTRACT: The work aims to establish the gas exchange model of heat sealing micropore channel in packaging bags and verify the model by experiments. The gas exchange model of heat sealing micropore channel in packaging bags was established based on poiseuille's law. The model was verified by changing the related parameters, such as pore channel diameter, pore length and inner and outer pressure difference. When the micropore diameter were 100, 140 and 180 μm , the error between the gas exchange experimental value and model value basically maintained within 5%. With the increase in channel diameter and inner and outer pressure difference, the micropore channel gas exchange capacity was increased and changed obviously. For the micropore channel with initial inner and outer pressure difference and certain pore diameter, changing the length of pore had certain effects on gas exchange. The predicted value of the established gas exchange model achieves high conformity with the experimental value.

KEY WORDS: micropore; packaging bags; gas exchange; model; channel

软包装由于具有品种繁多、价格便宜、质量轻、携带方便等优点, 在食品包装中的应用越来越多, 但软包装袋热封过程中产生的问题不容忽视^[1-4]。包装袋在热封过程中易出现虚封和漏封, 造成孔道泄露。在孔道处的气体交换会导致食品发生物理或化学变化, 进而加速食品腐败、缩短货架期等^[5-6]。目前对包装袋微孔气体交换的研究几乎都集中在包装原膜

上微孔气体交换。Techavises^[7]等基于 Fick 定律建立了计算 O_2 , CO_2 , N_2 和水蒸气交换的经验数学模型; Renault^[8-9]采用 Stephan-maxwell 方程建立交换模型以描述多组分气体的扩散; 胡红艳等^[10-11]基于粘性流动理论和努森扩散机理, 分别建立了微孔膜硬质盒包装、包装袋内外气体交换数学模型, 并分析了包装形式对包装内气体组分的影响; 李方^[12]基于 Fick 定

收稿日期: 2016-03-01

作者简介: 冯冰霞 (1991—), 女, 江南大学硕士生, 主攻食品包装技术与安全。

通讯作者: 卢立新 (1966—), 男, 博士, 江南大学教授、博导, 主要研究方向为食品包装技术与安全、包装材料。

律建立了微孔膜气调包装气体内外交换的数学模型以预测包装内 O_2 、 CO_2 的改变量。对于包装袋热封带处的微孔孔道气体交换的理论研究，至今仍未见报道。文中基于泊肃叶定律，建立包含热封微孔孔道相关参数的食品包装气体内外交换模型，并通过改变孔道孔径、内外压差以及孔长等相关参数进行实验验证，为该类微孔包装研究提供理论基础。

1 包装内外气体交换模型的建立

基于相关理论与实际工况，做出以下基本假设：气体交换过程为恒温过程；气体的微量泄漏不影响包装体积；包装内外气体混合均匀。气体通过微孔的扩散取决于孔径与分子平均自由程的关系，一般采用孔直径 d 与气体分子运动平均自由程 λ 的比值，即诺森数 $n_k(n_k=d/\lambda)$ 作为气体在微孔中的扩散模型的判断依据^[13-16]。当孔隙直径大于气体分子平均自由程，遵循泊肃叶定律。孔道直径太小，泄漏量不易检测出，孔道直径太大时泄漏太快，试验所用孔道直径范围为 100 ~ 220 μm ，此时 $n_k \geq 10$ ，符合泊肃叶定律。

基于泊肃叶定律^[17]：

$$P_i - P_o = \frac{8\eta L Q}{\pi r^4} \quad (1)$$

式中： P_i 为包装袋内部气体压强(Pa)； P_o 为包装袋外部大气压强(Pa)； η 为空气粘度(Pa·s)； L 为微孔长度(m)； Q 为体积流率(m^3/s)； r 为孔道半径(m)。

包装袋内部气体压强可表示为：

$$P_i = P_{i0} - P_{ie} = P_{i0} - \frac{n_{ie} RT}{V_0} \quad (2)$$

式中： P_{i0} 为包装袋内部初始气体压强(Pa)； P_{ie} 为气体交换产生的压强变化(Pa)； n_{ie} 为气体交换的物质的量(mol)； R 为理想气体常数； T 为体系温度(K)； V_0 为包装袋初始体积(m^3)。

通过理想气体状态方程，可得体积流率：

$$Q = \frac{dV_{ie}}{dt} = \frac{RT dn_{ie}}{P_o dt} \quad (3)$$

式中： V_{ie} 为气体交换的体积(m^3)； t 为时间(s)。

联立式(1)——(3)，可得：

$$P_{i0} - \frac{n_{ie} RT}{V_0} - P_o = \frac{8\eta L R T dn_{ie}}{\pi r^4 P_o dt} \quad (4)$$

由式(4)整理可得，单位时间包装内外气体交换量：

$$\frac{dn_{ie}}{dt} = \frac{\pi r^4 P_o}{8\eta L R T} \left(P_{i0} - \frac{n_{ie} RT}{V_0} - P_o \right) \quad (5)$$

对式(5)积分，得到基于孔径、孔长和内外压差的气体内外交换数学模型：

$$n_{ie} = \int_0^t \frac{\pi r^4 P_o}{8\eta L R T} \left(P_{i0} - \frac{n_{ie} RT}{V_0} - P_o \right) dt =$$

$$(P_{i0} - P_o) \left(1 - e^{-\frac{\pi P_o r^4 t}{8 L V_0 \eta}} \right) \frac{V_0}{RT} \quad (6)$$

2 实验验证

2.1 材料和仪器

主要材料和仪器：薄膜 CPP/VMOPP/CPP，江阴某包装材料公司；PP 硬质盒，东莞某化学有限公司；钨丝，河北某金属材料有限公司；FRM 1980 有色印字连续封口机，中国华联机械有限公司；Lippke 4500 包装测试系统，美国 MOCN 公司；CH-1-AT 薄膜测厚仪，上海六菱仪器厂。

2.2 方法

2.2.1 样品制备

利用热封机，选定直径 d 分别为 100, 140, 180, 220 μm 的钨丝，并夹在要热封的材料之间，待样品冷却后将钨丝抽出，得到相应直径通道有缺陷的热封样品^[18]。为了保证包装体积不变，每个热封包装袋内均放置了同等大小的 PP 硬质盒。每种样品规格取 5 个水平进行测试。

2.2.2 微孔孔道气体交换试验

用上述制备的样品进行气体交换试验，其具体操作为通过测试无孔密封包装的爆破强度，来选择初始不同梯度的内外压差。CPP/VMOPP/CPP 的初始内外压差分别为 5, 10, 15 kPa。热封边长度分别为 5, 10, 15, 20 mm。将包装装置于仪器 Lippke 4500 上，用针孔处有海绵胶带的针头戳包装袋，使之达到密封状态，测定压强差随时间的变化量，样品参数及测试条件见表 1。

表 1 样品参数及测试条件
Tab.1 Sample parameters and test conditions

编号	直径/ μm	孔长/mm	压差/kPa
1	100	10	5
2	140	10	5
3	180	10	5
4	220	10	5
5	180	10	5
6	180	10	10
7	180	10	15
8	180	5	5
9	180	10	5
10	180	15	5
11	180	20	5

3 结果与分析

孔长为 10 mm 时，对于具有不同孔径的微孔孔道包装的气体交换量，根据式(6)可以得到模型组的预

测量, 将其与实验值进行比较, 结果见图 1a。可以得到, 随着孔道直径的增加, 微孔孔道气体交换量增加, 且变化明显。当微孔直径为 100, 140, 180 μm 时, 气体交换的实验值与模型值的误差基本维持在 5% 以内, 模型相关度较高。对于 220 μm 的微孔孔道, 其气体交换前期不稳定, 误差值较大, 后期趋于平稳。这可能由于孔径较大, 其热封口受到压差的冲击易产生破坏, 因而其气体交换受到影响。对于孔道直径均为 180 μm , 孔长为 10 mm 的样品, 分别在 5, 10, 15 kPa 的初始压差下进行测试, 得到的结果见图 1b。可以看出, 在不同的压差下, 实验值与模型的预测值较吻合, 且随着压差的增加, 气体的交换量增加。

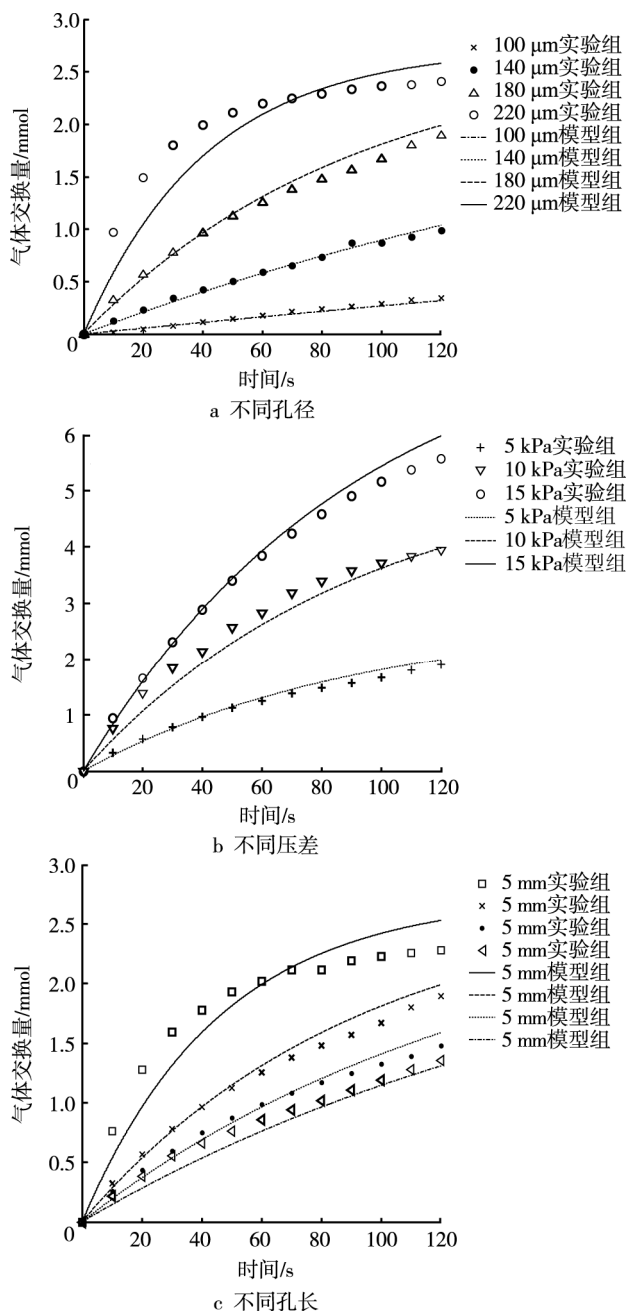


图1 实验组与模型组的气体交换

Fig.1 Gas exchange of experimental group and model group

对于初始内外压差为 5 kPa, 孔径为 180 μm 的微孔孔道, 改变其孔长对气体交换有一定影响, 且随着孔长的增大, 气体交换量逐渐减小, 见图 1c。值得注意的是, 在孔长较短时, 实验值与模型值相差较大, 其原因是孔长较短时, 孔道内侧端受内外压差影响明显, 导致出现随机误差的情况增加, 不稳定。

4 结语

通过在封口处制备微孔孔道, 基于泊肃叶定律建立了包装袋热封微孔内外气体交换模型。改变模型中的孔径、压差以及孔长, 探讨了相关参数对包装内外气体交换的影响以及验证模型的正确性。结果表明, 随着孔道直径、内外压差的增加, 微孔孔道气体交换量增加, 且变化明显; 对初始内外压差、孔径一定的微孔孔道, 随着孔长的增大, 气体交换量逐渐减小; 通过微孔孔道的气体交换符合泊肃叶定律, 基于该理论建立的包装袋热封微孔孔道内外气体交换模型可用来预测不同微孔孔道直径、内外压差以及孔长的气体交换。

参考文献:

- [1] 刘喜生. 包装材料学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2009.
LIU Xi-sheng. Packaging Materials[M]. Changchun: Jilin University Press, 2009.
- [2] 许文才. 国内软包装行业的现状与发展趋势[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 214—216.
XU Wen-cai. Current Situation and Development Trends of Flexible Packaging Industry in China[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 214—216.
- [3] 许文才, 曹国荣, 李东立, 等. 国外软包装材料的现状及研发方向[J]. 包装工程, 2007, 28(8): 1—5.
XU Wen-cai, CAO Guo-rong, LI Dong-li, et al. Current Status and Development Trends of Soft Packaging Material in Foreign Country[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8): 1—5.
- [4] 蒲靓. 软包装易撕膜浅析[J]. 广东包装, 2013(4): 14.
PU Liang. A Brief Analysis on Flexible Packaging Easy Tear Film[J]. Guangdong Packaging, 2013(4): 14.
- [5] 魏保花, 陆佳平. 微小缺陷对铝塑复合软包装材料阻隔性影响的研究[J]. 包装工程, 2009, 30(9): 13—15.
WEI Bao-hua, LU Jia-ping. Research on Effects of Small Defects on Barrier Properties of Aluminum-polymer Composite Packaging Film[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9): 13—15.
- [6] HAKOLA L, HARTMAN J, HONKAPÄÄ K, et al. New Methods for Improving Food Product Safety and Communication[J]. Nip & Digital Fabrication Conference, 2013(5): 498—502.
- [7] TECHAVISES N, HIKIDA Y. Development of a Ma-

- thematical Model for Simulating Gas and Water Vapor Exchanges in Modified Atmosphere Packaging with Macroscopic Perforations[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(1): 94—104.
- [8] RENAULT P, SOUTY M, CHAMBRAY Y. Gas Exchange in Modified Atmosphere Packaging: Micro-perforated Packs[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 1994(9): 365—378.
- [9] RENAULT P, HOUAL L, JACQUEMIN G, et al. Gas Exchange in Modified Atmosphere Packaging. 2: Experimental Results with Strawberries[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 1994(10): 379—394.
- [10] 胡红艳, 卢立新, 韩正宏. 微孔膜包装内外气体交换的理论研究[J]. *包装工程*, 2006, 27(6): 6—8.
HU Hong-yan, LU Li-xin, HAN Zheng-hong. Research on the Gas Exchange in Micro-perforated Packages[J]. *Packaging Engineering*, 2006, 27(6): 6—8.
- [11] 胡红艳, 卢立新. 微孔膜果蔬气调包装气体交换数学模型研究[C]// 第十三届全国包装工程学术会议论文集, 2010.
HU Hong-yan, LU Li-xin. The Gas Exchange Model of Modified-atmosphere Package with Micro-hole Film for Fruits and Vegetables[C]// The 13th National Packaging Engineering Academic Conference Proceedings, 2010.
- [12] 李方, 卢立新. 微孔膜气调包装内外气体交换数学模型的建立[J]. *食品科学*, 2010(4): 257—259.
LI Fang, LU Li-xin. Modeling of Gas Exchange in Modified Atmosphere Packaging with Perforated Film [J]. *Food Science*, 2010(4): 257—259.
- [13] GONZÁLEZ J, FERRER A, ORIA R, et al. Determination of O₂ and CO₂ Transmission Rates through Microperforated Films for Modified Atmosphere Packaging of Fresh Fruits and Vegetables[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 86(2): 194—201.
- [14] GONZÁLEZ J, FERRER A, ORIA R, et al. A Mathematical Model for Packaging with Microperforated Films of Fresh-cut Fruits and Vegetables[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 95(1): 158—165.
- [15] OZDEMIR I, MONNET F, GOUBLE B. Simple Determination of the O₂ and CO₂ Permeances of Microperforated Pouches for Modified Atmosphere Packaging of Respiring Foods[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 36(2): 209—213.
- [16] TECHAVISES N, HIKIDA Y. Development of a Mathematical Model for Simulating Gas and Water Vapor Exchanges in Modified Atmosphere Packaging with Macroscopic Perforations[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(1): 94—104.
- [17] CAI J C, PERFECT E, CHENG C L, et al. Generalized Modeling of Spontaneous Imbibition Based on Hagen-Poiseuille Flow in Tortuous Capillaries with Variably Shaped Apertures[J]. *Langmuir*, 2014, 30(18): 5142—5151.
- [18] RAVISHANKAR S, MAK S N D, TEO A Y L, et al. Minimum Leak Size Determination, under Laboratory and Commercial Conditions, for Bacterial Entry into Polymeric Trays Used for Shelf-stable Food Packaging[J]. *Journal of Food Protection*, 2005, 68(11): 2376—2382.