

系统泄漏对薄膜透气性测试的影响

刘孝锋, 邓金, 武存江
(泉州师范学院, 泉州 362000)

摘要: **目的** 研究薄膜透气性测试系统泄漏对其测试结果的影响。**方法** 在考虑泄漏和不考虑泄漏的情况下, 通过建立基于压差法的不同塑料薄膜透气性测试的数学模型, 以该模型为基础进行 Matlab 仿真, 给出仿真结果。**结果** 系统的泄漏直接影响薄膜透气性的测试结果, 特别是针对高阻隔性薄膜透气性测试, 测试系统的微小泄漏对透气性测试结果影响较大。**结论** 在 24 h 透气性测试中, 透气性测试的客观值约等于实测值减去系统泄漏而引起的误差值, 为实际薄膜透气性提供理论依据和参考。

关键词: 食品保鲜; 真空密封; 塑料薄膜; 透气性测试; 系统泄漏

中图分类号: TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0019-04

Effect of System Leakage on Permeability Test of Films

LIU Xiao-feng, DENG Jin, WU Cun-jiang
(Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

ABSTRACT: The work aims to research the effects of system leakage for film permeability test on its test results. The mathematical model for different plastic film permeability tests based on differential pressure method was established with the leakage taken or not taken into account. Based on this model, the simulation results by Matlab were given. The simulation results showed that system leakage directly affected the permeability test results of the film, especially for the permeability test of the high barrier films. The small leakage of test system had a great influence on the permeability test results. The objective value of the permeability test is approximately equal to the measured value minus the error caused by system leakage within 24 hours. This provides theoretical basis and reference for the actual film permeability.

KEY WORDS: food preservation; vacuum sealing; plastic film; permeability test; system leakage

利用塑料薄膜对食品药品进行真空密封包装是一种常用的保鲜方法, 塑料薄膜的气体阻隔性(特别是氧气的阻隔性)直接影响食品药品的保鲜质量和保鲜效果^[1]。塑料薄膜透气性的检测是食品药品真空密封包装过程中不可缺少的重要生产环节, 目前, 对于食品药品软包装材料薄膜透气性检测, 压差法是首选方法, 对于一般工业用途薄膜的透气性检测, 压差法也是主要方法之一^[2]。影响基于压差法的薄膜透气性测试的因素很多, 如透气性测试装置系统是否泄漏、测试装置低压室结构比、压力检测装置的量程与精度、测试的环境温度和湿度、测试薄膜本身的气体阻隔性高低等^[3-9]。针对低阻隔性塑料薄膜透气性测试, 测试系统微小的泄漏带来的影响尽管可忽略不计, 然而, 随着气体阻隔性的增强, 测试系统的泄漏

对测试结果的影响变大, 尤其针对高阻隔性塑料薄膜的透气性测试, 系统的泄漏是影响测试结果的主要因素。目前, 对于高阻隔性塑料薄膜透气性测试, 测试系统的泄漏对测试产生怎样的影响特性尚不清楚。文中通过建立塑料薄膜透气性测试的数学模型和仿真, 着重分析系统泄漏对高阻隔性薄膜透气性测试的影响特性, 为食品药品的真空密封保鲜提供依据。

1 基于压差法的薄膜透气性测试

1.1 原理

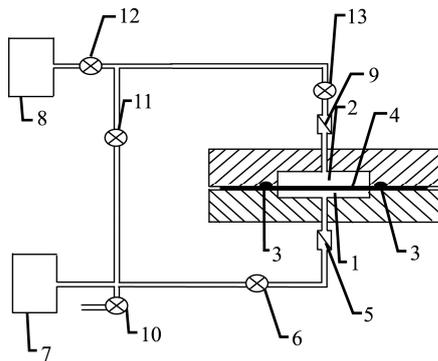
目前基于压差法的薄膜透气性测试, 我国执行 GB/T 1038—2000, 国际上执行 ASTM D1434, ISO 15105-1, ISO 2556—2001, JIS K7126 等, 其测试装

收稿日期: 2016-05-07

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2013H0042); 福建省大学生创新创业项目(201510399037)

作者简介: 刘孝锋(1973—), 男, 博士, 泉州师范学院副教授, 主要研究方向为计算机测控技术。

置见图 1^[10-11]。



1.低压室 2.高压室 3.密封圈 4.测试件 5.低压室测压装置 6.低压室截止阀 7.真空泵 8.实验气体 9.高压室测压装置 10—13.截止阀

图 1 薄膜透气性测试装置
Fig.1 Films permeability testing device

测试件把测试腔分为高压室和低压室 2 部分，测试件的试样面积为 $S(\text{cm}^2)$ 、厚度为 $d(\text{cm})$ ，低压室的容积为 $V(\text{cm}^3)$ 。测试的环境温度为 $T(\text{K})$ 。透气性测试前，先将测试件在 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的干燥器中干燥 48 h 以上，再把低压室抽至 27 Pa 以下，高压室充入 1 个标准大气压(101.325 kPa)的实验气体。在压差的作用下，测试气体从高压室向低压室渗透，待透气稳定时，24 h 之内，通过高压室测压装置和低压室测压装置，测出高压室压强 $p_1(\text{Pa})$ 和低压室压强 $p_2(\text{Pa})$ ，计算出低压室的单位时间内压力变化 $\Delta p/\Delta t$ 值。

测试件的气体透气量 $W_q(\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{Pa}))$ 的计算为：

$$W_q = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot \frac{V}{S} \cdot \frac{T_0}{p_0 T} \cdot \frac{24}{p_1 - p_2} \quad (1)$$

测试件的气体透过系数 $U_g(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}))$ 的计算为：

$$U_g = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot \frac{V}{S} \cdot \frac{T_0}{p_0 T} \cdot \frac{d}{p_1 - p_2} = 1.1574 \times 10^{-9} W_q d \quad (2)$$

式中： T_0, p_0 分别为标准状态下的温度(273.15 K)和压力(101.33 kPa)。

对于给定的测试装置，低压室的容积 V 和测试件的试样面积 S 固定不变，测试件的厚度 d 往往也事先给定，因此，若测试的环境温度 T 恒定不变，影响气体透气量 W_q 的关键因素是低压室的压力变化 $\Delta p/\Delta t$ 。测试件对气体的渗透与测试系统的泄漏直接引起 $\Delta p/\Delta t$ 的变化。对于阻隔性不同的薄膜透气性测试，随着薄膜阻隔性的增加，系统的泄漏对其测试的影响越大。按我国标准，在室温 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的环境下，氧气透气量在 $(0 \sim 5) \times 10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{Pa})$ 或 $(0 \sim 5) \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot (0.1 \text{ MPa}))$ 范围内的薄膜，水汽透过量小于 $5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot (0.1 \text{ MPa}))$ 的薄膜为高阻隔性薄膜；氧气透

气量在 $(5 \sim 200) \times 10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{Pa})$ 范围内的薄膜为中阻隔性薄膜；氧气透气量在 $200 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{Pa})$ 以上的薄膜为低阻隔性薄膜^[12-13]。对于低阻隔性薄膜透气性，可忽略测试系统泄漏，然而对于高阻隔性薄膜，测试系统的泄漏是影响其测试结果的重要因素。

1.2 数学模型

在一定温度下，气体量 G 为气体压强 p 与体积 V 的乘积 pV ，漏率(气流) Q 为单位时间内泄漏的气体体积量，或单位时间内流过物体某一截面的气体量，即 $G = \int Q dt = pV$ 。流阻 R 是物体两端的压强差 Δp 与漏率(气流) Q 的比值，即 $R = \Delta p/Q$ 。气体泄漏的流动状态一般界定为分子流状态、粘滞流状态、湍流状态和声速流状态等 4 种状态，且当漏率 Q 小于 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 时，气体泄漏属于分子流状态，在该状态下，压差 Δp 与气体漏率 Q 成正比，即流阻 R 固定不变^[14]。这也就意味着，当气体泄漏属于分子流状态时，其流阻 R 大于 $1013 \text{ s}/\text{mm}^3$ 。

图 1 中低压室内的初始压强为 $p_{10}(\text{Pa})$ (接近真空)，体积为 $V(\text{cm}^3)$ 。高压室内的压强和外部压强都为 1 个标准大气压 p_0 ，即 $p_0 = 101.33 \text{ kPa}$ 。假设图 1 中测试件是高阻性薄膜，根据文献[3]和式(1)可知，高阻隔性薄膜的漏率在 $(0 \sim 2.45) \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，因此，高阻性薄膜对气体的渗透相当于分子流状态，其流阻设为 R_1 。影响测试结果的系统泄漏主要是密封圈和低压室截止阀的泄漏，在实际的透气性测试中，该部分泄漏少于测试件对气体的渗透^[3]，因此，其泄漏也相当于分子流状态，流阻可设为 R_2 。

由以上分析可知，测试高阻隔性薄膜透气性系统的泄漏和薄膜本身的泄漏为分子流状态，即它们的流阻 R_1 和 R_2 都大于 $1013 \text{ s}/\text{mm}^3$ 。令 $p(t)$ 为 t 时刻低压室内的压强， $Q_1(t)$ 为 t 时刻测试件的漏率， $Q_2(t)$ 为 t 时刻密封圈和低压室截止阀的漏率。

据流阻不变性^[15]，有：

$$Q_1(t) = (p_0 - p(t)) / R_1 \quad (3)$$

$$Q_2(t) = (p_0 - p(t)) / R_2 \quad (4)$$

再根据守恒定律，可得：

$$V \dot{p}(t) = V p_{10} + \int (Q_1(t) + Q_2(t)) dt \quad (5)$$

由式(3)—(5)，可得系统泄漏情况下的薄膜透气性测试数学模型：

$$\begin{cases} \dot{p}(t) = -\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 V} p(t) + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 V} p_0 \\ Q_1(t) = \frac{p_0 - p(t)}{R_1} \\ Q_2(t) = \frac{p_0 - p(t)}{R_2} \end{cases} \quad (6)$$

若忽略系统泄漏，则薄膜透气性测试数学模型可

简化为：

$$\begin{cases} \dot{p}(t) = -\frac{1}{R_1 V} p(t) + \frac{1}{R_1 V} p_0 \\ Q_1(t) = \frac{p_0 - p(t)}{R_1} \end{cases} \quad (7)$$

若不进行透气性测试，只考虑系统的泄漏，则系统泄漏过程的数学模型为：

$$\begin{cases} \dot{p}(t) = -\frac{1}{R_2 V} p(t) + \frac{1}{R_2 V} p_0 \\ Q_2(t) = \frac{p_0 - p(t)}{R_2} \end{cases} \quad (8)$$

2 薄膜透气性测试

2.1 仿真平台

为更好地分析系统泄漏对薄膜透气性测试的影响，建立基于 Matlab 的薄膜透气性测试的仿真平台。在该仿真平台上，流阻按钮（流阻大于 1013 s/mm³）和体积按钮可以随意拖动，以改变其相应的流阻数据。为直观反映长时间系统泄漏对测试腔压强变化的影响，从而进一步分析长时间系统泄漏对测试件透气性的影响，不妨取低压室初始压强 $p_{10}=10$ Pa，低压室体积 $V=7140$ cm³。测试件的流阻 $R_1=2143$ s/mm³，密封圈和低压室截止阀的流阻 $R_2=3521$ s/mm³，通过仿真可得长时间的压强变化，见图 2。可知，测试系统的泄漏对低压室压强变化的影响程度随时间的改变而改变，即系统的泄漏对透气性测试的影响程度随时间的改变而呈非线性改变，以下着重讨论和分析满足国标测试的 24 h 内，系统的泄漏对透气性测试的影响。

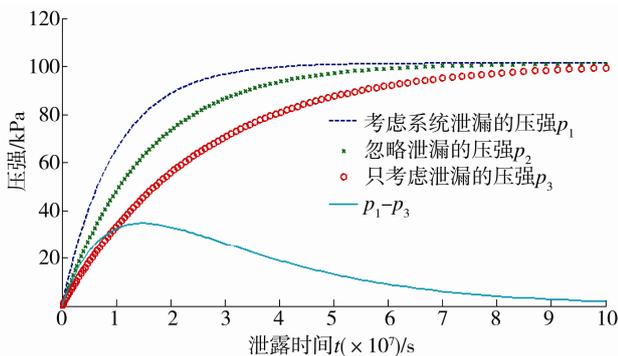


图 2 不同情况下长时间的压强变化

Fig.2 Long-time change of pressure in different situations

2.2 系统泄漏的影响分析

对于给定的测试装置，低压室的容积 V 和测试件的试样面积 S 已固定，测试的环境温度和相对湿度满足国标要求，测试系统的泄漏成为影响透气性测试的最主要因素，这里流阻 R_2 要求大于 1013 s/mm³。假

设低压室体积 $V=7140$ cm³，不妨取测试件的流阻 $R_1=2073$ s/mm³，系统泄漏所对应的流阻 R_2 分别取 1550, 4230 s/mm³。若流阻 R_2 取 1550 s/mm³，表示系统的泄漏大于薄膜对于气体的渗透；若流阻 R_2 取 4230 s/mm³，表示系统的泄漏小于薄膜对于气体的渗透。通过以上仿真平台的仿真，经过 24 h 透气性测试，低压室压强变化仿真见图 3。

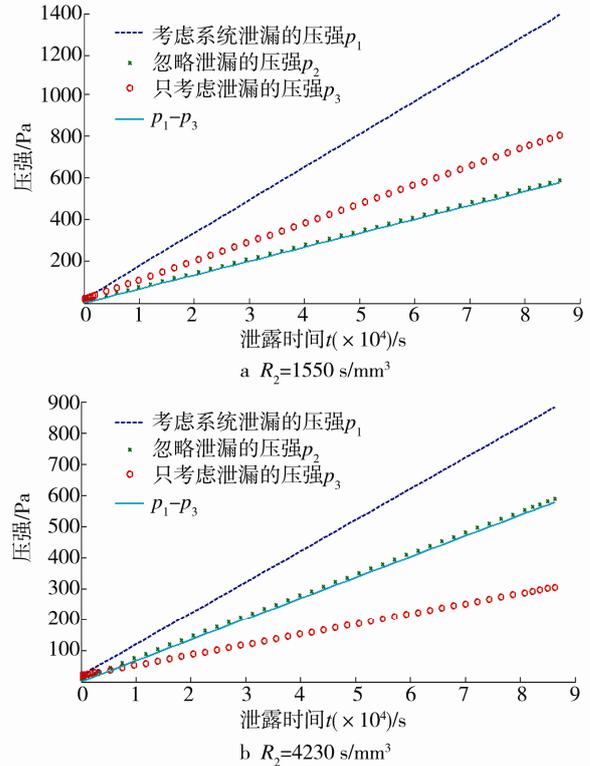


图 3 流阻 R_2 不同时低压室压强变化

Fig.3 The pressure change of low pressure chamber at different value of R_2

由图 3 可知，在 24 h 测试时间内，低压室里的压强变化有以下特性：在考虑泄漏的情况下，透气性测试低压室实测压强变化 p_1 随时间呈线性变化；在忽略泄漏的情况下，透气性测试低压室客观压强变化 p_2 随时间呈线性变化；只考虑泄漏的情况下，低压室因泄漏本身而引起的压强变化 p_3 （误差值）随时间呈线性变化；压强变化 p_3 （误差值）随系统的泄漏增大而增大，低压室客观压强 p_2 与实测压强变化 p_1 和因泄漏而引起的压强变化 p_3 的差 p_1-p_3 相等。该实验表明，尽管系统的泄漏是影响透气性测试的重要因素，通过分别测出实测压强变化 p_1 和因泄漏而引起的压强变化 p_3 ，再用这两者的差值 p_1-p_3 替代客观压强变化 p_2 ，从而得到客观的薄膜气体透气流 W_q 。

3 结语

针对高阻隔性薄膜透气性测试受测试系统泄漏影响较大的特点，建立了薄膜透气性测试的数学模型，仿

真结果表明,高阻隔性薄膜的客观气体透气量,可以通过测出透气性测试低压室实测压强变化 p_1 ,以及低压室因泄漏本身而引起的压强变化 p_3 而间接获得。

参考文献:

- [1] 王蓉佳,赵江,张为胜.阻隔性检测设备发展现状[J].塑料包装,2010(1):23—26.
WANG Rong-jia, ZHAO Jiang, ZHANG Wei-sheng. Development Status of Barrier Detection Equipment[J]. Plastic Packaging, 2010(1): 23—26.
- [2] 赵江.压差法是药品用软包装材料透气性测试的首选方法[J].全球软包装工业,2007(9):111—112.
ZHAO Jiang. Pressure Difference Method is the First Choice for the Testing of the Permeability of Soft Packaging Materials for Drugs[J]. Global Flexible Packaging Industry, 2007(9): 111—112.
- [3] 刘孝锋.基于压差法的薄膜透气性测试装置关键技术研究[D].广州:广东工业大学,2012.
LIU Xiao-feng. Research on the Key Technology of Permeability Test Device Based on Differential Pressure[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012.
- [4] LIU Xiao-feng, WANG Ren-huang. Research on Sealed Structure for Gas Permeability Computer Test Device[C]//Wuhan: The 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application, 2010.
- [5] 刘孝锋,汪仁煌.透气性测试装置密封结构的优化[J].机械工程学报,2011,47(23):130—134.
LIU Xiao-feng, WANG Ren-huang. The Optimization of Gas Permeability Test Device Sealed Structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 130—134.
- [6] 刘孝锋,汪仁煌.薄膜透气性测试装置双层密封结构设计及实验研究[J].制造业自动化,2012,24(4):54—57.
LIU Xiao-feng, WANG Ren-huang. Design and Experimental Study on the Double Layer Seal Structure of Permeability Test Device[J]. Manufacturing Automation, 2012, 24(4): 54—57.
- [7] 刘孝锋,汪仁煌.基于压差法的薄膜透气性测试装置研究现状[J].包装工程,2011,32(9):115—118.
LIU Xiao-feng, WANG Ren-huang. Research Status of Film Permeability Test Device Based on Pressure Difference Method[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(9): 115—118.
- [8] 刘孝锋,汪仁煌.薄膜透气性测试装置三层密封结构的研究[J].包装工程,2011,32(17):100—103.
LIU Xiao-feng, WANG Ren-huang. The Research for Film Gas Permeability Test Device Three Sealed Structure[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(17): 100—103.
- [9] 刘孝锋,汪仁煌.一种测试高阻隔性薄膜透气性的测试装置[P].中国:201010179887.7,2010-05-24.
LIU Xiao-feng, WANG Ren-huang. Test Device for Testing Permeability of High Barrier Film[P]. China: 201010179887.7, 2010-05-24.
- [10] GB/T 1038—2000,塑料薄膜和薄片气体透过量试验方法——压差法[S].
GB/T 1038—2000, Plastics Film and Sheeting Determination of Gas Transmission: Differential Pressure Method[S].
- [11] ASTM D 1434-82(2015), Standard Test Method for Determining Gas Permeability Characteristics of Plastic Film and Sheeting[S].
- [12] 王元明,赵江.合理选择阻隔性设备的量程[J].中国包装,2008(5):54—55.
WANG Yuan-ming, ZHAO Jiang. Reasonable Selection of the Range of Barrier Equipment[J]. China Packaging, 2008(5): 54—55.
- [13] 周加彦,赵江.正确认识材料的阻隔性[J].包装工程,2007,28(8):238—239.
ZHOU Jia-yan, ZHAO Jiang. Correct Understanding the Barrier Property of Materials[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8): 238—239.
- [14] 刘阳,于建平.多极串联密封系统泄漏仿真与实验研究[J].真空科学与技术学报,2005(2):127—133.
LIU Yang, YU Jian-ping. Evaluation and Simulation of Leakage of Multi-level Series Seal[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2005(2): 127—133.
- [15] 王晓东.真空技术[M].北京:冶金工业出版社,2006.
WANG Xiao-dong. Vacuum Technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.