

薄膜透气性测试装置 3 层密封结构的研究

刘孝锋^{1,2}, 汪仁煌¹

(1. 泉州师范学院, 泉州 362000; 2. 广东工业大学, 广州 510006)

摘要: 基于压差法的薄膜透气性测试装置, 在压力和温度检测器的检测性能给定和环境温度相对稳定的情况下, 影响测试结果的主要因素是测试装置的密封性能。为了同时提高测试装置的密封性能和测试精度, 提出了 3 层密封结构设计的模型, 建立了相应的数学模型, 并给出了因泄漏而引起压强变化的特性和仿真结果。为 3 层密封结构薄膜透气性测试装置的实际应用提供了理论依据。

关键词: 透气性; 测试装置; 3 层密封结构; 数学模型

中图分类号: TB486⁺.03; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)17-0004-04

Research of Three Layers Sealed Structure of Film Gas Permeability Test Device

LIU Xiao-feng^{1,2}, WANG Ren-huang¹

(1. Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China; 2. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: For film gas permeability test device based on differential pressure, when the performance of pressure and temperature detector is given and the test temperature is relatively stable, the test result is decided by seal performance of test device. To improve the seal performance and test performance of test device, the model of three layers sealed structure was presented and the corresponding mathematic model was established. The feature of pressure change caused by leakage and its simulation result were given. The purpose was to provide theoretical basis for practical applications of film gas permeability test device with three layers sealed structure.

Key words: gas permeability; test device; three layers sealed structure; mathematic model

目前, 对塑料薄膜透气性测试的方法很多, 而压差法是主要方法之一^[1]。基于压差法的薄膜透气性测试装置, 其测试结果受测试装置的密封性能、测试的环境温度以及温度和压力检测仪的检测性能的影响。在环境温度相对稳定和温度和压力检测仪给定的情况下, 测试装置的密封性能是影响其测试结果的主要因素, 而测试装置密封性能与其密封结构和密封材料有关^[2-4], 对此, 笔者研究具有 3 层密封结构设计的薄膜透气性测试装置, 仿真结果表明: 该 3 层密封结构测试装置的密封性能明显优于单密封结构测试装置, 适合高阻隔性塑料薄膜透气性能测试, 并且该测试装置测试具有多功能性。

1 薄膜透气性测试装置 3 层密封结构设计

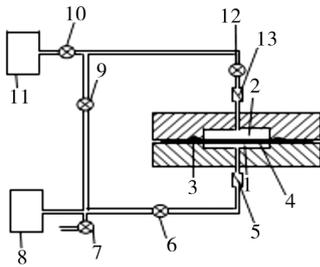
1.1 结构设计的描述

符合 GB/T 1038—2000 的薄膜透气性测试装置见图 1^[5-6]。

对于这种满足国家标准的单密封结构测试装置, 其最大特点是机械结构简单, 然而国标规定: 密封室 1 抽至 27 Pa 以下的真空, 在测试过程中, 系统因泄漏而引起的压强变化对测试结果影响很大, 因此要求透气性测试装置具有良好的密封性能。由于密封圈 3 和低压室针阀 6 的泄漏, 从而导致测试过程中因泄漏而引起的压强变化较大, 针对实际工程应用中的高阻隔性薄膜透气性测试, 这种单密封结构的透气性测试

收稿日期: 2011-06-16

作者简介: 刘孝锋(1973—), 男, 湖南人, 博士研究生, 泉州师范学院讲师, 主要从事计算机测控技术研究。

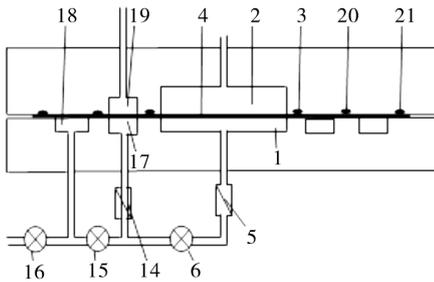


1—密封室;2—高压室;3—密封圈;4—试样;5—低压室测压仪;6—低压室针阀;7—放空阀;8—真空泵;9—隔断阀;10—气源阀;11—实验气体容器;12—高压室针阀;13—高压室测压仪

图 1 单密封结构的测试装置

Fig. 1 Single layer sealed structure of test device

装置的密封性能与实际要求还有一定的差距^[2]。为提高薄膜透气性测试装置的密封性能和相应的测试功能,同时又使其密封结构不过于复杂而便于实际应用。薄膜透气性测试装置的 3 层密封结构见图 2,即



1—第 3 层密封室;2—高压室;3—第 3 层密封圈;4—试样;5—低压室测压仪;6—低压室针阀;14—另一低压室测压仪;15—低压室针阀;16—低压室针阀;17—第 2 层密封室;18—第 1 层密封室;19—另一高压室;20—第 2 层密封圈;21—第 1 层密封圈

图 2 测试装置的 3 层密封结构

Fig. 2 Three layer sealed structure of the test device

在单层密封结构的基础上,密封室 1 外面依次增加 2 层密封室 17 和 18,从而具有 3 层密封结构,同时,与增加的密封室 17 相对应,增加另一高压室 19,从而形成测试装置的另一测试腔。

1.2 3 层密封结构的数学模型

对于实际的工程应用,薄膜透气性测试装置测试腔的 3 个密封室的结构见图 3,第 3 层密封室(最内层)的底面半径为 r_3 ,第 2 层密封室(中间层)的底面半径为 r_2 ,第 1 层密封室(最外层)的底面半径为 r_1 。使用同一真空泵和同样的密封材料,把 3 个密封室内的压强抽至 p (Pa),即 $p_{10} = p_{20} = p_{30} = p$ 。测试时,外

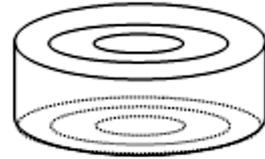


图 3 圆柱体形状的 3 层密封结构

Fig. 3 Three layers sealed structure of cylindrical shape

界压强 $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$,第 1、第 2 和第 3 个密封室的体积分别为 V_1, V_2 和 V_3 ,流阻分别 R_1, R_2 和 R_3 。经一段时间 t ,第 1、第 2 和第 3 个密封室的漏率依次为 $Q_1(t), Q_2(t)$ 和 $Q_3(t)$,而压强依次为 $p_1(t), p_2(t)$ 和 $p_3(t)$ 。

当漏率小于 $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 时,流阻与密封圈的周长成反比^[8],而在实际的薄膜透气性测试中,其漏率往往小于 $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,因此,可令 $R_1 = R$,则 $R_2 = r_1 R / r_2, R_3 = r_1 R / r_3$ 。根据流阻不变性^[7-8],可得:

$$Q_1(t) = [p_0 - p_1(t)] / R \quad (1)$$

$$Q_2(t) = [p_1(t) - p_2(t)] r_2 / (r_1 R) \quad (2)$$

$$Q_3(t) = [p_2(t) - p_3(t)] r_3 / (r_1 R) \quad (3)$$

据真空领域中的气量守恒规律^[8],得:

$$V_1 \dot{p}_1(t) = V_1 \dot{p} + \int [Q_1(t) - Q_2(t)] dt \quad (4)$$

$$V_2 \dot{p}_2(t) = V_2 \dot{p} + \int [Q_2(t) - Q_3(t)] dt \quad (5)$$

$$V_3 \dot{p}_3(t) = V_3 \dot{p} + \int Q_3(t) dt \quad (6)$$

分别对方程(4),(5)和(6)两边求导,得:

$$\dot{p}_1(t) = -\frac{r_1 + r_2}{r_1 R V_1} p_1(t) + \frac{r_1}{r_1 R V_1} p_2(t) + \frac{p_0}{R V_1} \quad (7)$$

$$\dot{p}_2(t) = \frac{r_2}{r_1 R V_2} p_1(t) - \frac{r_1 + r_3}{r_1 R V_2} p_2(t) + \frac{r_3}{r_1 R V_2} p_3(t) \quad (8)$$

$$\dot{p}_3(t) = \frac{r_3}{r_1 R V_3} p_2(t) - \frac{r_3}{r_1 R V_3} p_3(t) \quad (9)$$

2 薄膜透气性测试装置 3 层密封结构的压强变化特性分析

为了便于分析薄膜透气性测试装置 3 层密封结构各密封层的压强变化特性,取 $r_1 = 60 \text{ mm}, r_2 = 50 \text{ mm}, r_3 = 40 \text{ mm}, R = 1 \ 216 \text{ s/mm}^3, p = 100 \text{ Pa}, R = 1 \ 216 \text{ s/mm}^3, V_1 = 10 \ 000 \text{ mm}^3, V_2 = 8 \ 000 \text{ mm}^3, V_3 = 6 \ 000 \text{ mm}^3$,通过仿真,其变化过程见图 4。

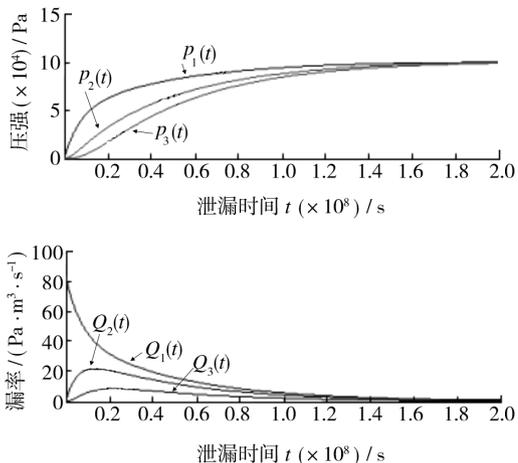


图 4 3 层密封结构的压强与漏率的变化情况

Fig. 4 Pressure and leakage rate diagram of three layer sealed structure

由式(1)–(3)和(7)–(9)及其相应仿真结果可知:

1) 随着时间 t 的增加, 测试装置的各密封室在到达时间平衡点 t_1 后不再泄漏, 此时 3 个密封室内的压强与外界压强一样。到达时间 t_1 之前, 压强 $p_1(t)$, $p_2(t)$ 与 $p_3(t)$ 随 t 的增大而单调增大, 但增幅各不相同, 随时间的变化而不断变化。在最初阶段, $p_3(t)$ 的变化最慢, 但到达 t_1 时, 3 个密封室内的压强和外界的压强一样。

2) $Q_1(t)$ 随 t 的增加而减少, 至时间平衡点 t_1 后, 其值变为零而不再变化; $Q_2(t)$ 在时间 $[0, t_2]$ 区域内, 先单调增加至极大值 $Q_2(t_2)$, 在时间 $[t_2, t_1]$ 区域内, 又逐渐减少至零; $Q_3(t)$ 在时间 $[0, t_3]$ 区域内, 先单调增加至极大值 $Q_3(t_3)$, 在时间 $[t_3, t_1]$ 区域内又逐渐减少至零, t_2 与 t_3 相比较, 满足 $t_2 < t_3$, 且 $Q_3(t)$ 变化的幅度更缓慢。由此可知, 当 $t \in [0, t_2]$ 时, $p_1(t)$ 的增幅比 $p_2(t)$, $p_3(t)$ 的增幅大, 到达 t_2 时, $p_1(t) - p_2(t)$ 达到最大值; 当 $t \in (t_2, t_3)$ 时, $p_2(t)$ 的增幅比 $p_3(t)$ 的增幅大, 到达 t_3 时, $p_2(t) - p_3(t)$ 达到最大值; 当 $t \in (t_3, t_1)$ 时, $p_1(t)$ 的增幅比 $p_2(t)$, $p_3(t)$ 的增幅小, 最后满足 $p_1(t) - p_2(t) = 0$ 和 $p_2(t) - p_3(t) = 0$, 即 $p_3(t_1) = p_2(t_1) = p_1(t_1) = p_0$ 。

薄膜透气性测试装置 3 层密封结构各密封室压强变化的特点: 在测试时间 $[0, t_2]$ 的范围之内, 测试装置第 1 个密封室的压强对第 2 和第 3 个密封室的影响小于外界压强对测试装置第 1 个密封室的影响;

在时间 (t_2, t_3) 范围内, 测试装置第 1 个密封室的压强对第 2 个密封室的影响大于外界压强对第 1 个密封室和第 2 个密封室内压强对第 3 个密封室的影响; 在 (t_3, t_1) 范围之内, 测试装置第 1 个密封室内压强对第 2 个密封室的影响小于第 2 个密封室内压强对第 3 个密封室的影响。

3 实际应用仿真

对于单密封结构的薄膜透气性测试装置^[2], 密封室的体积为 2 cm^3 , 测试装置密封室的底面半径为 4 cm , 压力检测器量程为 $0.02 \sim 200 \text{ Pa}$, 精度为 $\pm 0.1\%$ FS 的压力传感器, 检测的环境温度为 $(\pm 0.2)^\circ\text{C}$ 。通过真空泵把密封室抽至 10 Pa 的真空后, 直接测试其密封性能, 通过 24 h 的检测, 每 1 h 采集一次的数据, 见图 5, 单位为 Pa 。通过单密封结构的

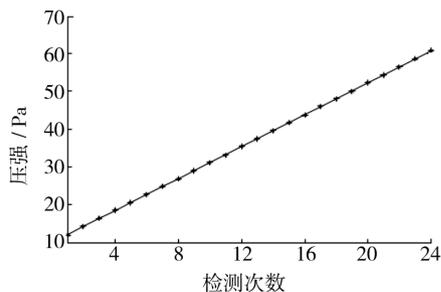


图 5 单密封结构的压强检测值

Fig. 5 Pressure detection value of single layer sealed structure

数据拟合, 可得该密封结构的流阻 $R = 89\ 144 \text{ s/mm}^3$ 。

对 3 层密封结构的透气性测试装置采用相同的密封材料和技术, 内外 3 层密封室的体积都为 2 cm^3 , 底面半径分别为 $4, 6$ 和 7 cm , 其它测试条件与单密封结构的一样, 通过仿真, 经过 24 h 的泄漏, 第 1 层密封室的压强从初始的 10 Pa 变为 59.064 Pa , 第 2 层密封室的压强从初始的 10 Pa 变为 10.010 Pa , 第 3 层密封室的压强几乎没有任何变化, 压强变化过程见图 6。

图 5 和 6 表明: 3 层密封结构的第 1 层密封室压强变化的仿真结果与实验结果较吻合, 而其第 2 层密封室的压强变化很小, 第 3 层密封室的压强几乎没有任何变化。与单密封结构相比, 3 层密封结构的薄膜透气性测试装置尽管结构复杂一些, 但它不仅具有更

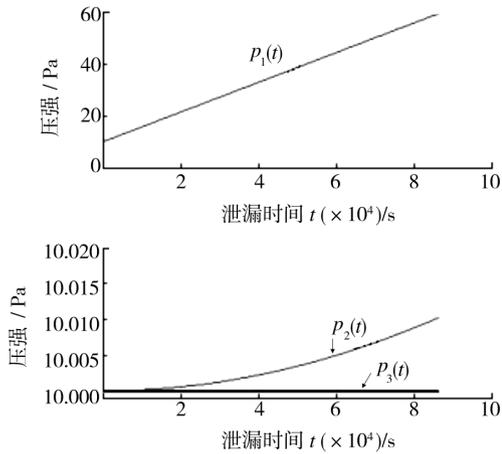


图 6 3 层密封结构的压强检测值

Fig. 6 Pressure detection value of 3 layers sealed structure

好地密封效果,而且其测试具有多功能性。

4 结语

提出了 3 层密封结构的薄膜透气性测试装置模型,给出了薄膜透气性测试装置 3 层密封结构的数学模型和压强变化的特性,并给出了相应的仿真结果,为薄膜透气性测试装置 3 层密封结构的实际应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 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]. 中国制药装备, 2008(2): 30-32.
- [2] 康亚芬, 汪仁煌. 透气性测试技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2009.
- [3] 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.
- [4] LIU Xiao-feng, WANG Ren-huang, LI Xue-cong, et al. Research on Sealed Structure for Gas Permeability Computer Test Device[C]. 2010 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application (PACIA2010), Wuhan, China, 2010: 324-328.
- [5] GB/T 1038-2000, 塑料薄膜和薄片气体透过量试验方法——压差法[S].
- [6] 越后纪康, 奥村英树, 佐谷裕司. 透气性测量方法及透气性测量装置: 日本, 200310124712. 6[P]. 2004-01-07.
- [7] 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.
- [8] 王晓东. 真空技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

(上接第 3 页)

大可以显著降低关键部件冲击谱峰值;而在高频率比附近, ζ_1 的变化对关键部件的冲击谱峰值的影响不明显。同样,增大 ζ_2 能有效降低关键部件冲击谱峰值。

当连接部刚度较小时,提高连接部阻尼或缓冲材料阻尼都可以减小关键部件的响应,从而对关键部件起到防护作用;而当连接部刚度较大时,要想降低关键部件的响应,则必须提高缓冲材料阻尼。

参考文献:

- [1] NEWTON R E. Fragility Assessment Theory and Practice[R]. Monterey Research Laboratory, Inc. Monterey, California, 1968.
- [2] 王军, 王志伟. 半正弦脉冲激励下考虑易损件的正切型包装系统冲击特性研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 167-168.
- [3] 王军, 王志伟. 考虑易损件的正切型包装系统冲击破

边界曲面研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 166-167.

- [4] 王雷, 王志伟, 王军. 三次非线性包装系统关键部件三维冲击谱研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 92-93.
- [5] 王军, 卢立新, 王志伟. 双曲正切包装系统关键部件三维冲击谱研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 99-101.
- [6] 王军, 卢立新, 王志伟. 线性包装系统关键部件三维冲击谱研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2010(2): 60-62.
- [7] 王军. 产品破损评价及其防护包装动力学理论研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [8] 王振林, 吴长富, 奚德昌. 物品包装系统位移损坏边界[J]. 振动工程学报, 1998, 11(4): 434-442.
- [9] WANG Z W, HU C Y. Shock Spectra and Damage Boundary Curves for Nonlinear Package Cushioning System[J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12(5): 207-217.
- [10] 王怀奥, 刘壮, 高德. 矩形波冲击下瓦楞纸板缓冲包装衬垫的冲击响应[J]. 包装工程, 2005, 26(3): 14-16.