

日化品瓶铝箔密封性检测方法及其实验研究

陈啸¹, 杨路超¹, 邵琳², 王砚², 邱自学¹

(1.南通大学, 江苏 南通 226019; 2.淮安生物工程高等职业学校, 江苏 淮安 223200)

摘要: **目的** 提高日化品瓶铝箔密封性的检测准确率。**方法** 提出一种日化品瓶铝箔密封性检测方法。通过对铝箔密封后的日化品瓶瓶身施加压力, 使瓶身产生一定的形变, 基于采集施压过程中日化品瓶产生的反作用力, 建立空气泄漏模型对日化品瓶铝箔密封性进行判定。设计日化品瓶铝箔密封性测试实验平台, 在不同挤压行程和挤压速度下, 对日化品瓶铝箔密封性进行实验。**结果** 将实验得到的数据代入空气泄漏数学模型后得到的泄漏面积数值与实际数值的最大误差为4.5%。**结论** 日化品瓶铝箔密封性检测方法操作简单、检测精确, 为实际生产过程中对日化品瓶铝箔密封性检测提供了依据。

关键词: 日化品瓶; 密封性; 实验平台; 空气泄漏模型

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)21-0206-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.027

Detection Method and Experimental Study of Aluminum Foil Sealability of Daily Chemical Bottle

CHEN Xiao¹, YANG Lu-chao¹, SHAO Lin², WANG Fan², QIU Zi-xue¹

(1. Nantong University, Jiangsu Nantong 226019, China; 2. Huaian Higher Vocational School of Biological Engineering, Jiangsu Huaian 223200, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the detection accuracy of aluminum foil sealability of daily chemical bottle. A method for detecting aluminum foil sealability of daily chemical bottle was proposed. Pressure was applied to daily chemical bottle sealed with aluminum foil to make it deform to a certain extent. Based on the reaction force generated by the daily chemical bottle during the process of applying pressure, an air leak mathematical model was established to judge the aluminum foil sealability of daily chemical bottle. An experimental platform for detecting aluminum foil sealability of daily chemical bottle was designed, and the aluminum foil sealability of daily chemical bottle was detected under different extrusion strokes and extrusion speed. After the data obtained from the experiment were brought into the air leak mathematical model, the maximum error between the value of the leakage area obtained and the actual value was 4.5%. The method for detecting aluminum foil sealability of daily chemical bottle is simple and accurate, which provides a basis for detecting aluminum foil sealability of daily chemical bottle in the actual production.

KEY WORDS: daily chemical bottle; aluminum foil sealability; experimental platform; air leak mathematical model

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 江苏省产学研合作项目

作者简介: 陈啸(1994—), 男, 硕士生, 主攻机电一体化装备及测控技术。

通信作者: 邱自学(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为机电一体化装备及测控技术。

日化品瓶的瓶身材料主要为高密度聚乙烯, 是一种结晶度高、非极性的热塑性树脂, 具有较高的刚性和韧性^[1-2]。目前, 日化品瓶的生产工艺一般分为 4 个步骤: 首先使用灌装机将一定量的日化品注入到洁净的日化品瓶中; 然后使用塑封机将装有日化品的日化品瓶进行铝箔封口; 接下来对日化品瓶进行贴标; 最后对成品的日化品瓶进行铝箔密封性检测。在日化品瓶铝箔包装封合的过程中, 由于各种因素的影响, 可能会产生漏封、压穿, 或因材料本身存在的裂缝、微孔而形成内外连通的小孔, 这些都会对包装内的物品产生不利影响^[3]。日化品瓶铝箔包装的密封性漏气缺陷是一种有时难以直接用人眼观察到的质量缺陷, 会使包装内的物品保质效果大大降低, 特别是在食品、医药和日化等包装领域, 密封性将直接影响产品的质量, 甚至可能因为包装内产品变质影响使用者的健康^[4]。

近年来, 行业内对铝箔包装产品的密封性检测尝试和采取了多种方法。美国 SST 公司等^[5]通过将待检测的铝箔包装产品放入真空的水环境中一段时间, 由于包装内外存在压力差的原因, 如果该铝箔包装产品漏气, 则会产生连续性的气泡, 但是当泄漏面积较小时, 产生连续气泡的现象不明显, 会产生较高的误判率。王华天等^[6]根据差压式空气泄漏的检测原理研发了一款密封性检测设备, 将放有待检测铝箔包装产品的密封室中充入高压气体, 包装外的高压气体使产品产生挤压变形, 通过观察包装的变形量来判断产品的密封性, 但当泄漏面积较小时, 产品的变形量较小, 肉眼难以观察到包装的变形量, 会产生较高的误判率。这些对铝箔密封性检测的方法及设备, 主要是通过肉眼观察由于泄漏导致外部环境的变化情况或包装的变形量等参数, 其检测精度较低。

为了提高日化品瓶铝箔密封性检测精准度, 文中提出一种日化品瓶铝箔密封性检测方法, 根据此检测方法设计一种操作简单的日化品瓶铝箔密封性测试实验平台。通过对铝箔密封后的日化品瓶瓶身施加一定压力使瓶身产生一定的变形, 建立一种空气泄漏模型, 将施压过程中采集到的日化品瓶产生的反作用力

值代入泄漏模型得到日化品瓶的泄漏面积大小, 根据泄漏面积值判定其密封性。

1 实验

1.1 测试样品准备

实际生产过程中, 在日化品瓶铝箔密封的过程中, 由于设备故障等问题会产生少量的密封性较差的产品。如图 1 所示, 根据日化品瓶的铝箔密封情况将其分为 4 类: 铝箔封合完好、铝箔气孔、铝箔漏封、铝箔封合缺陷。a 类与 c 类各选 2 件作为参照组, b 类与 d 类各选 1 件作为实验组。

1.2 日化品瓶铝箔密封性测试实验台原理与组成

日化品瓶铝箔密封性测试方法是利用圆柱形的压头按照预定的控制指令对日化品瓶瓶身进行挤压, 使日化品瓶瓶身产生一定的变形, 在压头对日化品瓶瓶身挤压的过程中采集获取日化品瓶的反作用力值。根据日化品瓶产生的反作用力, 基于建立的空气泄漏模型, 根据泄漏面积大小来判定日化品瓶铝箔密封性。根据该测试方法设计了日化品瓶密封性测试实验平台, 主要涉及控制驱动与数据实时采集, 其主要组成见图 2。

实验中, 通过触摸屏的人机界面对实验过程中的挤压速度与挤压行程参数进行设定。为了增加测试准确度以及实现多速度条件下的测试, 实验平台采用步进电动机驱动滚珠丝杆的形式。为了增加压头与日化品瓶的接触面积, 实验平台的压头采用空心钢管。通过力传感器获取日化品瓶产生的反作用力值, 在测试过程中为了避免由于电机启动时的加速过程对传感器造成冲击破坏, 压力传感器安装在压头安装板的右边。由上位机对压力数据进行采集, 并得到在挤压过程中日化品瓶所产生的反作用力。实验台上安装 3 个光电传感器来定位日化品瓶托盘的初始位置和 2 个极限位置。

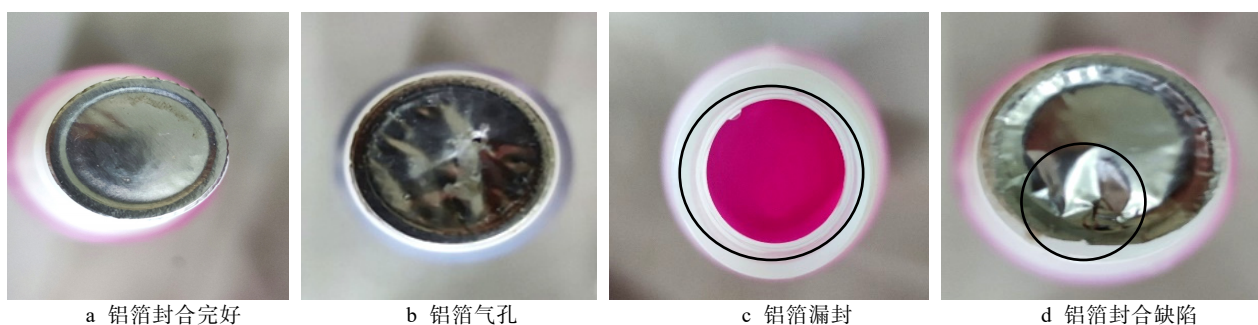
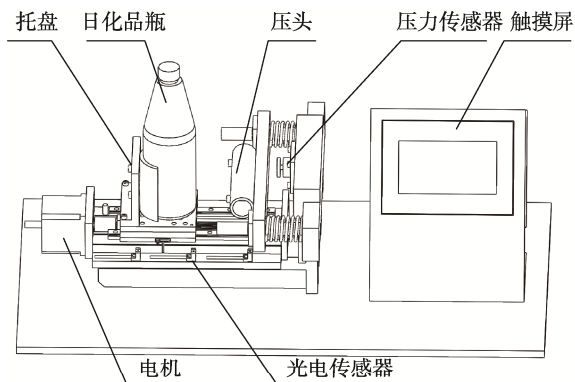
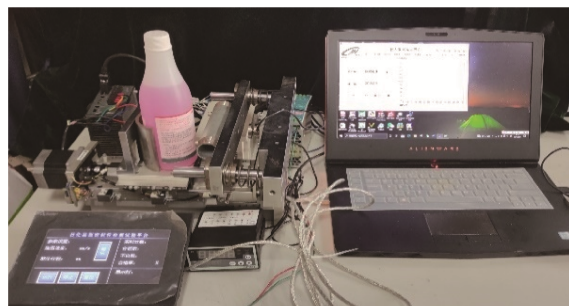


图 1 日化品瓶铝箔密封性分类

Fig.1 Classification of sealability of aluminum foil for daily chemical bottle



a 测试平台组成



b 实验样机

图 2 日化品瓶铝箔密封性测试实验平台

Fig.2 Experimental platform for detecting the sealability of aluminum foil for daily chemical bottle

1.3 日化品瓶铝箔密封性检测工作过程

日化品瓶铝箔密封性检测的工作过程见图 3，主要包含以下 5 个步骤。

1) 将被测试件放置于日化品瓶铝箔密封性检测装置的日化品瓶托盘上；通过触摸屏原点复位按钮，将日化品瓶托盘复位，如图 3a 所示，此时压力传感器示数为 0。

2) 通过实验平台上触摸屏的人机界面设定实验参数，启动日化品瓶铝箔密封性检测实验程序；设定上位机软件采集参数，通过压力传感器进行数据采集。如图 3b 所示，利用压力传感器示数值判断接触零点，通过上位机对实验数据进行采集。

3) 如图 3c 所示，启动日化品瓶铝箔密封性检测实验程序，日化品瓶托盘按照预设的参数移动使日化品瓶受到压头的一定挤压并产生一定的变形。

4) 如图 3d 所示，日化品瓶完成挤压过程后，日化品瓶托盘返回原点。

5) 如图 3e 所示，当日化品瓶铝箔密封性检测实验过程完成后，日化品瓶脱离实验装置的压头表面回到原点位置，此时力传感器示数回 0。

步骤 1—2 主要用于对日化品瓶铝箔密封性检测实验装置的初始定位以及参数设定，完成这 2 个步骤后，若对同一被测试件进行多次测试，只需要重复步骤 3—5 即可。

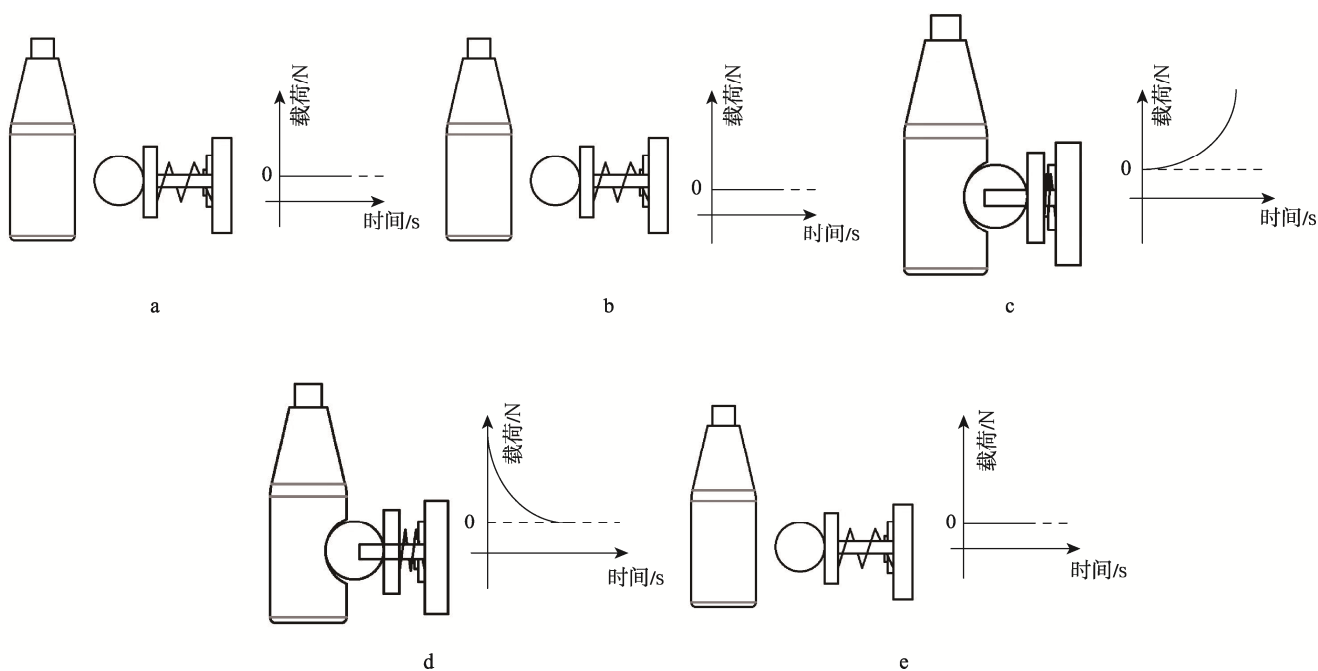


图 3 日化品瓶铝箔密封性检测工作过程

Fig.3 Process of detecting the sealability of aluminum foil for daily chemical bottle

2 方法

2.1 瓶内空气泄漏判据建立

铝箔密封的日化品瓶在受到外力挤压时, 由于气体具有可压缩性, 瓶内的气体会产生压缩^[7-8]。在计算流体力学中, 一般把气体流动过程看作理想气体的可逆、绝热过程, 遵循理想气体的状态方程和泊松方程^[9-10]。

$$p = p(\rho, T) \quad (1)$$

$$p = \rho RT \quad (2)$$

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta\tau} = \frac{dm}{d\tau} \quad (3)$$

$$d\rho = \rho B dp \quad (4)$$

$$dp = \frac{1}{\rho B} d\rho \quad (5)$$

式中: ρ 为日化品瓶内的空气密度, kg/m^3 ; τ 为日化品瓶内的空气体积, m^3 ; m 为日化品瓶内的空气质量, kg ; B 称为等温压缩系数 $B = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p}$ 。

理想气体的状态方程只有在高温、低压下才能近似应用^[11-12], 当瓶内温度较低时将导致很大误差, 因此, 在理想气体状态方程中引进一个气体的压缩因子 Z , 以减少与实际气体的差别^[13], 气体的状态方程为:

$$pV = ZnRT \quad (6)$$

式中: p 为瓶内压力, MPa ; V 为气体的体积, m^3 ; n 为气体的摩尔数, mol ; R 为气体常数; T 为气体温度, K 。假定 Z 在所研究的日化品瓶内气体变化范围内为常数。

密封性差的日化品瓶在受到挤压时气体泄漏的过程见图 4。图 4 中点 1 为瓶外环境, 点 2 为泄漏点, 点 3 为瓶内气体的瞬时环境。在挤压过程中压头对日化品瓶的瞬时有效接触面积为 S_i 。

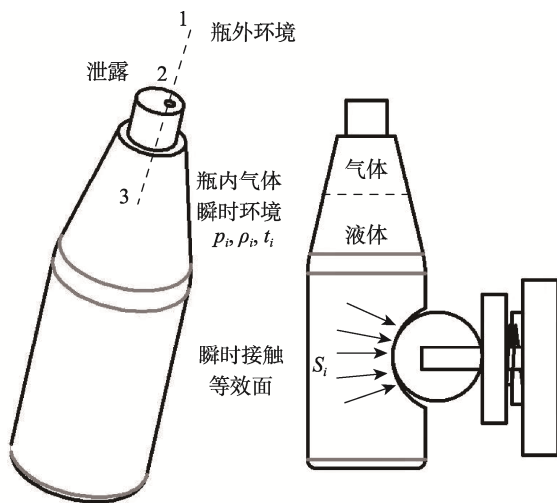


图 4 日化品瓶铝箔密封气体泄漏示意图

Fig.4 Schematic diagram for air leakage of aluminum foil of daily chemical bottle

假设条件: 日化品瓶内气体为绝热流动, 在泄漏点处为等温流动; 模型为一维流动模型。

为了描述挤压过程中瓶内气体变化过程, 对瓶身进行受力分析:

$$F_{i\text{压}} = -F_{\text{弹}} + p_{i\text{总}} \cdot S_i + F_{i\text{塑}} \quad (7)$$

$$F_{\text{弹}} = -Kx \quad (8)$$

$$p_{i\text{总}} = p_{\text{液}} + p_{i\text{气}} \quad (9)$$

式中: $F_{i\text{压}}$ 为压力传感器是在对压力检测的瞬时值, N ; $F_{i\text{塑}}$ 为日化品瓶材料产生的压力, N ; $F_{\text{弹}}$ 为弹簧的压力, N ; K 为弹簧的弹性系数, N/m ; x 为弹簧压缩的长度, m ; $p_{i\text{总}}$ 为日化品瓶在压头上产生的瞬时总压强, MPa ; $p_{\text{液}}$ 为日化品瓶中液体在压头上产生的瞬时压强, MPa ; $p_{i\text{气}}$ 为日化品瓶中气体在压头上产生的瞬时压强, MPa 。

根据伯努利方程, 气体从泄漏口泄漏的瞬时流速 v_{bi} 的计算见式 (10) — (11)。

$$\Delta p_{bi} = p_{bi} - p_i = \frac{1}{2} \rho_{bi} v_{bi}^2 \quad (10)$$

$$v_{bi} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{bi}}{\rho_{bi}}} \quad (11)$$

$$v_{bi} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V_{bi}}{\Delta t \cdot S_{\text{漏}}} = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{S_{\text{漏}}} \quad (12)$$

式中: Δp_{bi} 为图 4 在采集点 i 时的铝箔泄漏点 2 处内外压强差, MPa ; ΔV_{bi} 为的日化品瓶瓶内气体在采集点 i 时单位时间的泄漏量, m^3 ; ρ_{bi} 为待检测的日化品瓶内空气在采集点 i 时的密度, kg/m^3 ; $S_{\text{漏}}$ 为铝箔泄漏点的泄漏面积, m^2 。

结合式 (11) 与式 (12) 得到的铝箔泄漏点的泄漏面积 $S_{\text{漏}}$, 其方程为:

$$S_{\text{漏}} = \frac{dV_{bi}}{dt} \sqrt{\frac{\rho_{bi}}{2\Delta p_{bi}}} \quad (13)$$

在实验过程中, 实验的外部环境保持不变, 日化品瓶的内部温度保持不变。根据 Boyle's Law, 在定量定温下, 理想气体的体积与压力成反比^[14-15], 方程为:

$$pV = p_i V_0 = p_{ai\text{气}} V_{ai} \quad (14)$$

$$\Delta F_{ai} = F_{ai\text{压}} - F_{ci\text{压}} = (p_{ai\text{气}} - p_i) \cdot S_i \quad (15)$$

$$p_i = p_{ai\text{气}} = \frac{\Delta F_{ai}}{S_i} + p_i \quad (16)$$

式中: p_{ai} 为对照组 a 类日化品瓶在采集点 i 时的瓶内气体压强, MPa ; V_{ai} 为对照组 a 类日化品瓶在采集点 i 时的瓶内气体容积, m^3 ; ΔF_{ai} 为传感器检测对照组 a 类与 c 类日化品瓶在采集点 i 时的压力差值, N ; $F_{ai\text{压}}$ 为对照组 a 类日化品瓶在采集点 i 时的压力传感器检测出的压力值, N ; $F_{ci\text{压}}$ 为对照组 c 类日化品

瓶在采集点 i 时的压力传感器检测出的压力值, N ; p_i 为空气压强, MPa 。对式 (13) 中变量进行转换求解, 得到方程为:

$$V_{ai} = \frac{p_i V_0}{p_{ai} \rho_i} = \frac{p_i V_0 S_i}{\Delta F_{ai} + p_i S_i} \quad (17)$$

$$\Delta p_{bi} = p_{bi} - p_i = \frac{\Delta F_{bi}}{S_i} \quad (18)$$

$$\rho_{bi} = \rho_0 \frac{p_{bi}}{p_{ai}} = \rho_0 \frac{p_i S_i + \Delta F_{bi}}{p_i S_i + \Delta F_{ai}} \quad (19)$$

$$\frac{dV_{bi}}{dt} = \frac{\rho_{bi+1} V_{bi+1} - \rho_{bi-1} V_{bi-1}}{2 \cdot \Delta t} \quad (20)$$

将式 (18)、(19)、(20) 代入式 (13) 中, 得到在铝箔泄漏点的泄漏面积展开式:

$$S_{漏} = \frac{dV_{bi}}{dt} \sqrt{\frac{\rho_{bi}}{2 \cdot \Delta p_{bi}}} = \frac{\rho_{bi+1} V_{bi+1} - \rho_{bi-1} V_{bi-1}}{2 \cdot \rho_{bi} \cdot \Delta t} \sqrt{\frac{\rho_0 (p_i S_i + \Delta F_{bi}) S_i}{2 \cdot (p_i S_i + \Delta F_{ai}) \Delta F_{bi}}} \quad (21)$$

所得到的 $S_{漏}$ 值为日化品铝箔泄漏面积, 此值大于零时, 表示日化品瓶铝箔密封出现气体泄漏。

2.2 信号采集与处理

通过实验的方法研究日化品瓶铝箔密封性。在日化品瓶铝箔密封性检测过程中, 通过压力传感器检测压力值, 并由上位机对压力值进行采集。

压力传感器为压电型, 最大量程为 300 N; 采用标准计量器具活塞式压力计 YU-60T 进行校准; 校准环境的温度为 22 °C、相对湿度为 47%; 压力传感器非线性度为 0.15%。

实验中, 对每件测试件进行日化品瓶铝箔密封性测试时, 实验重复 3 次取平均值。如图 5 所示, 上位机从坐标零点开始对压力数据采集的频率为 20 Hz, 每个压力测量值为日化品瓶的瞬间值。



图5 上位机数据采集界面
Fig.5 PC data acquisition interface

3 结果

3.1 不同挤压速度时日化品瓶挤压过程实验

从式 (21) 可知, 挤压速度与挤压行程对日化品瓶的反作用力有影响。分别在不同挤压速度下, 对日化品瓶进行铝箔密封性检测实验。

根据日化品瓶的铝箔密封情况, 实验分别取 2 个 a 类日化品瓶、1 个 b 类日化品瓶、2 个 c 类日化品瓶和 1 个 d 类日化品瓶进行对照实验。对日化品瓶挤压完成后, 由上位机得到日化品瓶在被挤压过程中的反作用力。为增加实验结果的精确度, 3 次测量取平均值, 通过非线性最小二乘法对离散数据进行拟合, 得到的结果见图 6—9。

对比图 6—9 可知, a 类和 c 类的日化品瓶在 4 个实验条件下所得到的实验结果基本保持一致。挤压速度的改变对 a 类和 c 类的日化品瓶产生的最大作用力的影响较小。

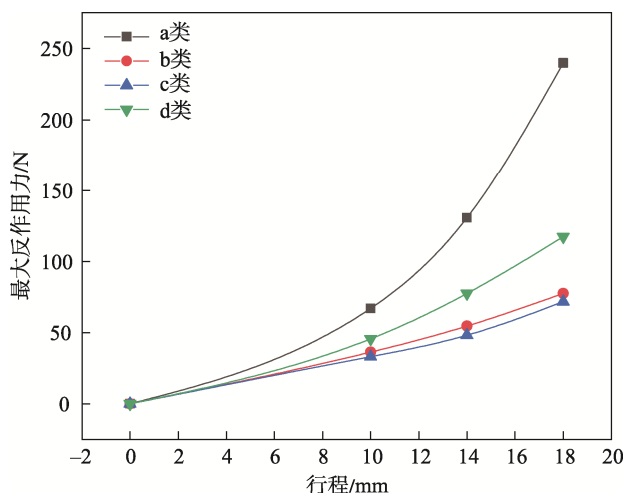


图6 挤压速度为 1 mm/s 时的实验数据
Fig.6 Experimental data at the extrusion speed 1 mm/s

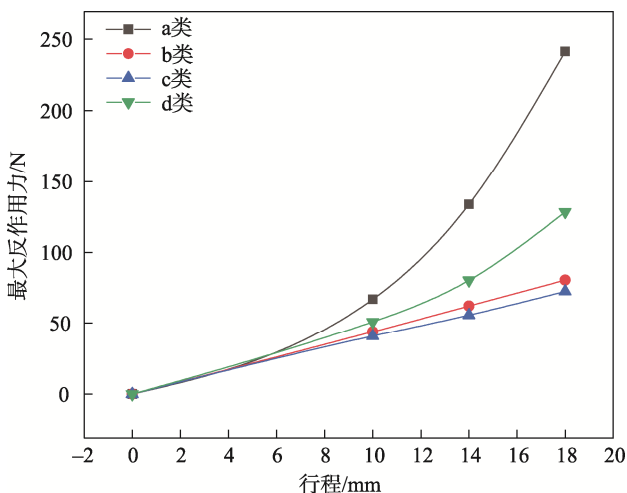


图7 挤压速度为 2 mm/s 的实验数据
Fig.7 Experimental data at the extrusion speed 2 mm/s

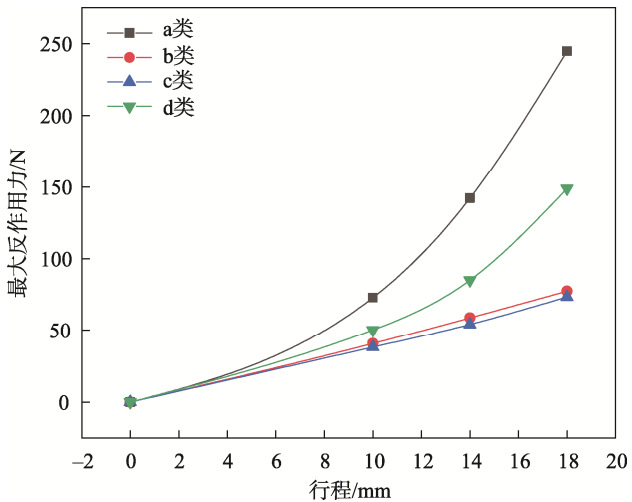


图 8 挤压速度为 3 mm/s 时的实验数据
Fig.8 Experimental data at the extrusion speed 3 mm/s

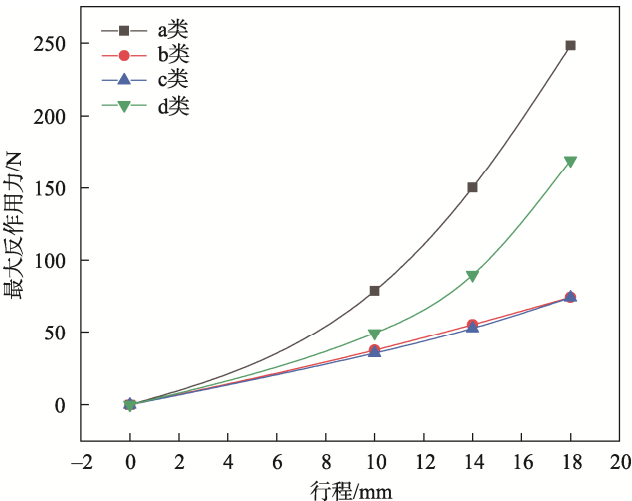


图 9 挤压速度为 4 mm/s 时的实验数据
Fig.9 Experimental data at the extrusion speed 4 mm/s

在挤压速度不变的情况下,随着挤压行程逐渐增加,日化品瓶产生的最大反作用力逐渐增加。由于日化品瓶检测实验装置在对日化品瓶挤压过程中,日化品瓶会产生相应的变形,瓶内的气体产生泄漏,从而使不同密封性的日化品瓶产生的最大反作用力不同。

在挤压行程不变的情况下,随着挤压速度逐渐增加,密封性差的日化品瓶产生的最大反作用力发生变化,具体表现为当挤压速度变大时,其行程-最大反作用力曲线斜率变大。在挤压行程不变的情况下,挤压速度的变化会导致密封性差的日化品瓶产生的最大反作用力发生改变。

3.2 实验数据分析

为了验证测试方法的可靠性以及数学模型的准确性,对实验中 b 类和 d 类的测试件的实验结果做数据分析。实验中 b 类测试件是由最大横截面为 2.00 mm² 的圆锥尖柱将密封性完好的日化品瓶的铝箔扎通,得到

实际泄漏面积为 2.00 mm² 的 b 类测试件,实验中 d 类测试件是由最大横截面为 3.50 mm² 的圆锥尖柱将密封性完好的日化品瓶部分铝箔与瓶口分离,得到实际泄漏面积为 3.50 mm² 的 d 类测试件的。在挤压速度分别为 1、2、3、4 mm/s 的条件下对测试件做不同行程的挤压实验,将采集到的日化品瓶的反作用力值代入数学模型中,把测得的泄漏面积与实际值比较来验证测试方法的可靠性以及数学模型的准确性,对比数据见表 1 和表 2。

表 1 b 类测得泄漏面积值与实际泄露面积值对比
Tab.1 Comparison between the measured leakage area value and the actual leakage area value of type b

行程/ mm	测得泄漏面积/mm ²				最大 误差/%
	1 mm/s	2 mm/s	3 mm/s	4 mm/s	
10	1.93	1.99	2.01	2.03	3.50
14	1.94	2.01	2.03	2.06	3.00
16	1.95	2.02	2.05	2.09	4.50

表 2 d 类测得泄漏面积值与实际泄露面积值对比
Tab.2 Comparison between the measured leakage area value and the actual leakage area value of type d

行程/ mm	测得泄漏面积/mm ²				最大 误差/%
	1 mm/s	2 mm/s	3 mm/s	4 mm/s	
10	3.40	3.45	3.48	3.51	3.14
14	3.44	3.49	3.51	3.54	1.71
16	3.46	3.53	3.56	3.58	2.29

由 2 表中对比实验数据可知,将实验得到的数据代入数学模型后得到的泄漏面积数值与实际数值基本一致, b 类实验的最大误差为 4.50%, d 类实验的最大误差为 3.14%。由此可见,提出测试方法和数学模型具有可靠性和准确性。

4 结语

针对日化品生产过程中的铝箔密封性检测工序,提出了一种日化品瓶铝箔密封性检测方法。在此检测方法基础上,设计研制开发了一套日化品瓶铝箔密封性检测实验平台,并在该实验平台上进行一系列的铝箔密封性检测实验。将实验数据代入建立的空气泄漏模型,得到的测量值与实际值对比来验证该模型的准确性。理论和实验对比分析结果表明,文中提出的日化品瓶铝箔密封性检测方法具有操作简单、检测精确等优点。

参考文献:

- [1] ZHANG Yi, BEN P Y. Phenomenological Modelling of Tensile Fracture in PE Pipe by Considering Damage Evolution[J]. Materials and Design, 2015, 77: 72-82.
- [2] 张永军, 王小平, 厚苏伟. 高密度聚乙烯复合材料性能改进的研究进展[J]. 塑料科技, 2021, 49(5): 103-107.
- ZHANG Yong-jun, WANG Xiao-ping, HOU Su-wei. Progress on Performance Improvement in the Recent of High Density Polyethylene Composites[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(5): 103-107.
- [3] 刘善有. 包装优化方法浅谈[J]. 中国包装工业, 2004(4): 61-63.
- LIU Shan-you. On Packaging Optimization Methods[J]. China Packaging Industry, 2004(4): 61-63.
- [4] 张为胜. 软塑包装质量检测与控制技术应用与研究[J]. 塑料包装, 2003(2): 29-37.
- ZHANG Wei-sheng. Application and Research on Quality Inspection and Control Technology of Soft Plastic Packaging[J]. Plastics Packaging, 2003(2): 29-37.
- [5] 李思畅. 基于图像处理的铝箔泡罩包装密封性检测技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017: 2-6.
- LI Si-chang. Research on Sealing Inspection Technology of Aluminum Foil Blister Packaging Based on Image Processing[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017: 2-6.
- [6] 王华天, 卢立新. 包装密封性检测技术方法[J]. 中国包装, 2009, 29(7): 63-65.
- WANG Hua-tian, LU Li-xin. Technical Method of Package Tightness Detection[J]. China Packaging, 2009, 29(7): 63-65.
- [7] FAHMY M M, NABIH H I, NOUR M A. Impact of Thermal Models on the Performance of Natural Gas Pipelines[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2019, 10(3): 04019021.
- [8] 胡文成, 张宝华, 沈忱, 等. 气体压缩性对流量系数的影响[J]. 航空动力学报, 2021, 36(4): 776-782.
- HU Wen-cheng, ZHANG Bao-hua, SHEN Chen, et al. Effect of Gas Compressibility on Flow Coefficient[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(4): 776-782.
- [9] 戴伟, 徐嘉靖, 王朝阳, 等. 体积法测量储氢量的状态方程研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(10): 1734-1738.
- DAI Wei, XU Jia-jing, WANG Chao-yang, et al. Study on State Equation for Hydrogen Storage Measurement by Volumetric Method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(10): 1734-1738.
- [10] WANG Ya-rong, WANG Pei-rong. Analysis of the Application of Ideal Gas Equation of State[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 252: 03019.
- [11] 赵芳, 王海峰, 任泽斌, 等. 高压气体定容积定流量放气特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(4): 1261-1267.
- ZHAO Fang, WANG Hai-feng, REN Ze-bin, et al. Characteristics of Constant Volume and Flow Releasing of High-Pressure Gas[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(4): 1261-1267.
- [12] 秦文瑾, 卢登标, 刘浩. 气体状态方程对正十二烷射流燃烧的影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(1): 66-74.
- QIN Wen-jin, LU Deng-biao, LIU Hao. Effects of Gas State Equation on N-Dodecane Jet Combustion[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 66-74.
- [13] 霍春勇, 董玉华, 余大涛, 等. 长输管线气体泄漏率的计算方法研究[J]. 石油学报, 2004(1): 101-105.
- HUO Chun-yong, DONG Yu-hua, YU Da-tao, et al. Estimation of Accidental Gas Release Flow Rate in Long Transmission Pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004(1): 101-105.
- [14] 连玉倩, 何江涛, 梁雨, 等. 纳米乳化油强化硝酸盐反硝化产气变化研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2105-2115.
- LIAN Yu-qian, HE Jiang-tao, LIANG Yu, et al. Simulation Experiments on Gas Change in Enhanced Denitri-fication of Nitrate Process by Nano Emulsified Oil[J]. China Environmental Science, 2018, 38(6): 2105-2115.
- [15] KATHERINE K, DAVID A. Investigating the Use of Boyle's Law to Relate Pore Air Pressures and Volume Changes in Unsaturated Triaxial Samples[J]. E3S Web of Conferences, 2019, 92: 07001.

责任编辑: 曾钰婵