

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2013.03.014

盒式气调包装下温度对薄膜透气性能的影响

伍思良^{1,2}, 陈于陇¹, 徐玉娟¹, 吴继军¹, 张钦发²

(1. 广东省农业科学研究院 蚕业与农产品加工研究所, 广东 广州 510610;
2. 华南农业大学 食品学院, 广东 广州 510642)

摘要: 以高阻隔膜、双层膜、聚丙烯 (PP) 膜及双向拉伸聚丙烯 (BOPP) 膜为材料, 采用小袋法, 分析了盒式气调包装下, 各薄膜在 4, 10, 25, 30 °C 温度下的薄膜透气系数和透气系数比的变化规律。结果表明: 随着温度的升高, 4 种薄膜的透气系数都呈上升趋势; 同时, 高阻隔膜和双层膜的透气系数比显著降低, 而 BOPP 膜和 PP 膜的透气系数比则逐渐升高。同一温度条件下, PP 膜的透气性能最好, BOPP 膜次之, 双层膜和高阻隔膜的透气性能较低。试验中, 透气系数的自然对数与绝对温度的倒数满足阿累尼乌斯方程, 以此可求得不同薄膜材料在其他温度下的透气系数。

关键词: 盒式气调包装; 包装薄膜; 透气系数

中图分类号: TB324; TQ317.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2013)03-0063-06

Effect of Temperature on Gas Permeability of Films Under Cassette Modified Atmosphere Packaging

Wu Siliang^{1,2}, Chen Yulong¹, Xu Yujuan¹, Wu Jijun¹, Zhang Qinfa²

(1. Sericulture & Agro-Food Processing Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China; 2. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The gas permeability of high barrier film, bilayer film, polypropylene film and biaxially oriented polypropylene film at 4, 10, 25 and 30 °C were measured by small bag method. The influences of temperature on the coefficient of gas permeability and coefficient ratio of gas permeability were analyzed. The results suggested that the gas permeability coefficients of various films increased with the rising of temperature. When the temperature increased, the coefficient ratio of gas permeability of high barrier and bilayer films decreased significantly, while the coefficient ratio of gas permeability of BOPP and PP films increased slowly. At the same temperature, the gas permeability of PP film was the best of them, followed by BOPP film, the gas permeability of high barrier and bilayer films were much lower. The relationship between permeability coefficient and temperature was in accordance with Arrhenius equation, and a linear relationship between logarithmic values of gas permeability coefficients and the inverse of absolute temperatures was indicated.

Key words: cassette modified atmosphere packaging; film material; permeability coefficient

收稿日期: 2013-01-23

基金项目: 粤港招标关键领域重点突破基金资助项目(2009498D23), 广东省科技计划基金资助项目(2009B020311008), 广州市科技计划基金资助项目(2010Z1-E201)

作者简介: 伍思良(1988-), 男, 广东肇庆人, 华南农业大学硕士生, 主要研究方向为食品加工, 贮藏与包装,

E-mail: wu_siliang@yahoo.cn

0 引言

气调包装(modified atmosphere packaging, MAP)是一种贮藏保鲜的新技术,它主要通过果蔬呼吸速率及薄膜透气性能的相互作用来改变包装中的气体成分,达到延长果蔬贮藏期的目的^[1]。薄膜的透气性能是检测薄膜材料的重要指标之一,是气调包装设计的首要前提^[2]。在一定温度下,薄膜的透气性能是影响果蔬保鲜效果的主要因素之一^[3-4]。不同透气性能的薄膜在应用上有较大的差异:透气性能高的薄膜主要用于包装呼吸强度大的产品,而阻隔性能高的薄膜则主要用于包装呼吸强度小或隔氧隔水要求较高的产品^[5]。一般以气体对材料的渗透性(即气体透过系数)和气体透过量2个指标来评价薄膜材料的透气性能^[6]。

薄膜透气性能的测定主要采用压差法和等压法。这2种方法都存在一定的缺陷:在采用压差法的测试过程中,由于材料的两侧存在着压力差,某些较为脆弱的材料结构会被破坏,产生小裂纹、针孔等空隙,还会使得材料产生形变,厚度变薄,透气面积增大,从而影响实验结果;而采用等压法的测试中,由于氮气逆渗透的存在,会使得氧气的渗透过程受到干扰^[7-8]。同时,在果蔬贮藏保鲜中,通常结合低温贮藏方法。而温度的波动能够引起聚合物阻隔性能的大幅度变化,如温度下降,则分子扩散速度减慢,扩散系数变小,材料的透气性能下降。目前,有科研工作者通过数据拟合研究,得到了特殊温度下的气体渗透量^[9],但是拟合过程的准确性与简易性有待提高。因此,利用更接近于盒式气调包装条件的方法测定薄膜的透气系数,对于MAP设计具有现实意义^[10]。本文采用小袋法,以不同温度下O₂与CO₂的体积分数变化情况为研究对象,得出了盒式气调包装中4种不同材料的薄膜透气性能,以期盒式气调包装的研究与应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用高阻隔膜为PA(polyamide)/EVOH(ethylene/vinyl alcohol copolymer)复合材料,双层膜为PET(poly(ethylene terephthalate))/CPP(cast polypropylene)复合材料,均由上海炬钢机械制造有限公司提供;

聚丙烯(polypropylene, PP)膜及双向拉伸聚丙烯(biaxially oriented polypropylene, BOPP)膜,均由广东威孚包装材料有限公司提供。

1.2 试验仪器

CHY-C2型测厚仪,适用于塑料薄膜、薄片以及纸张、金属片、布料等的厚度测试,济南兰光机电技术有限公司生产;MAP-1D400型盒式气调包装机,可将O₂, CO₂及N₂3种气体以任意比例混合,上海炬钢机械制造有限公司生产;SPX-250B-Z型生化培养箱,可精确控制温度在±0.5℃,上海佳胜实验设备有限公司生产;CheckPoint手持气体分析仪,适用于密封包装袋、瓶、罐等中空包装容器的氧气、二氧化碳气体含量、混合比例的测定,丹麦PBI Dansensor公司生产。

1.3 技术路线

本研究的主要技术路线如下:采购薄膜→测定厚度→包装机调试→混合气调→充气热封→不同温度下储藏→定时测定气调包装盒中O₂和CO₂含量变化→计算薄膜对O₂, CO₂的透气系数。

1.4 试验方法

1.4.1 薄膜厚度的测定

测定薄膜厚度时,参照GB/T 6672—2001《塑料薄膜和薄片厚度测定 机械测量法》中的要求进行。首先,在距离样品纵向端部约1m处,沿横向整个宽度截取试样,试样宽100mm,除为提交或包装而折叠样品外,试样应无折皱,也无其他缺陷。然后,将裁切好的试样在(23±2)℃条件下进行状态调节,调节时间不少于1h。最后,利用调零后的测厚仪测定试样厚度,每一样品测量10个位置点,取所有测量值的算术平均值做为薄膜的厚度,数值精确到1μm(即0.001mm)。

1.4.2 薄膜透气系数的测算

薄膜透气系数的测算参考已有文献^[11]中的方法,当环境大气压为 p_a 时,在密封的薄膜袋中注入某种气体,并使其初始体积为 V_0 、体积分数为 C_0 ,且体积分数大于或小于大气中该气体的体积分数 C_a (即 $C_0 > C_a$ 或 $C_0 < C_a$),由于薄膜袋内、外气体的分压差作用,在 Δt 时间后,薄膜袋中该气体的体积分数下降到或上升到 C_t (即 $C_t < C_0$ 或 $C_t > C_0$)。凭该气体的体积分数下降或上升的速率,可以推算出一定厚度和表面积的薄膜对该气体的透气系数。其计算式为

$$P = \frac{V_0 D}{p_a A \Delta t} \ln \frac{C_0 - C_a}{C_t - C_a}, \quad (1)$$

式中: P 为薄膜的透气系数, $m^3 \cdot m/(m^2 \cdot h \cdot Pa)$;

D 为薄膜厚度,m;

A 为透气表面积, m^2 。

本试验中,由于塑料盒的透气系数远小于薄膜的透气系数,因此忽略气体在塑料盒壁及盒底的溶

解渗透过程,只考虑气体在薄膜上的透过,由此可得 A 即是薄膜在塑料盒上的有效面积。

利用盒式气调包装机进行薄膜与塑料盒的充气热封操作,设置包装机气体腔中的气体成分及比例为:79%的 N_2 和 21%的 CO_2 ,充气热封后,将包装盒置于温度为 4, 10, 25, 30 $^{\circ}C$ 的培养箱中(温度精度为 $\pm 0.5^{\circ}C$),3 d 后用 CheckPoint 气体分析仪测定气调包装盒中 O_2 和 CO_2 的体积分数,并计算薄膜对 O_2 及 CO_2 的透气系数,且每处理进行 5 次重复操作。

1.5 数据处理与分析

每个试验重复 3 次,其结果表示为平均值 \pm 标准偏差。应用 SPSS 软件对所有试验数据进行方差分析(analysis of variance, ANOVA),用 Duncan 多重比较分析差异的显著性。计算最小显著差数(least significant difference, LSD) ($P < 0.05$) 值。

2 结果与分析

2.1 薄膜材料的厚度

试验用各薄膜材料的厚度实测值如表 1 所示。

表 1 薄膜材料厚度实测值

Table 1 Measured thickness values of films μm

材料序号	薄膜材料			
	高阻隔膜	双层膜	BOPP膜	PP膜
1	68.9	42.2	35.0	28.7
2	70.2	42.8	34.2	28.6
3	71.7	43.4	34.1	28.4
4	70.3	43.7	33.7	28.2
5	73.8	43.6	34.7	28.1
6	79.3	44.6	34.0	28.1
7	71.4	43.3	33.0	29.7
8	70.0	43.3	33.5	28.6
9	69.4	43.0	33.8	28.6
10	69.1	44.6	33.3	27.2
实测平均厚度	71.41	43.45	33.93	28.42

由表 1 可以看出,高阻隔膜的厚度值最大,平均厚度值达到了 71.41 μm ;而 PP 膜的厚度值最小,平均厚度值只有 28.42 μm ;BOPP 膜的厚度值比双层膜的约小 10 μm 。同时,从表 1 中还可以看出,选用的 4 种薄膜不同位置处的厚度值均存在一定的差异,反映出薄膜的各个部位厚度并不均匀。因此,薄膜制造厂商提供的薄膜厚度值只能作为参考,实际值则需要经测量得出。实测值对气调包装设计具有真实的指导意义。

2.2 温度对薄膜透气系数的影响

果蔬的呼吸代谢极易受温度的影响,只有在适宜的温度下,才能使果蔬取得最为理想的气调包装贮藏效果。同时,温度对包装薄膜的气体透过率也

有较大的影响。气体分子的渗透是借助薄膜密度涨落出现的自由体或空穴为通道的。温度升高,薄膜膨胀,空穴增多,透气性增大。这种性质以薄膜的热膨胀系数来表征,不同的薄膜材料具有不同的热膨胀系数。通过测量薄膜的线热膨胀系数,可以推测薄膜材料本身受温度影响程度的大小^[12]。另外,气体分子的平均动能与温度成正比。温度越高,气体分子的平均动能越大,热运动的程度越剧烈,因此也提高了气体分子的透过能力^[13]。

4, 10, 25, 30 $^{\circ}C$ 温度下,高阻隔膜、双层膜、BOPP 膜及 PP 膜的 O_2 和 CO_2 透气系数如图 1 所示。

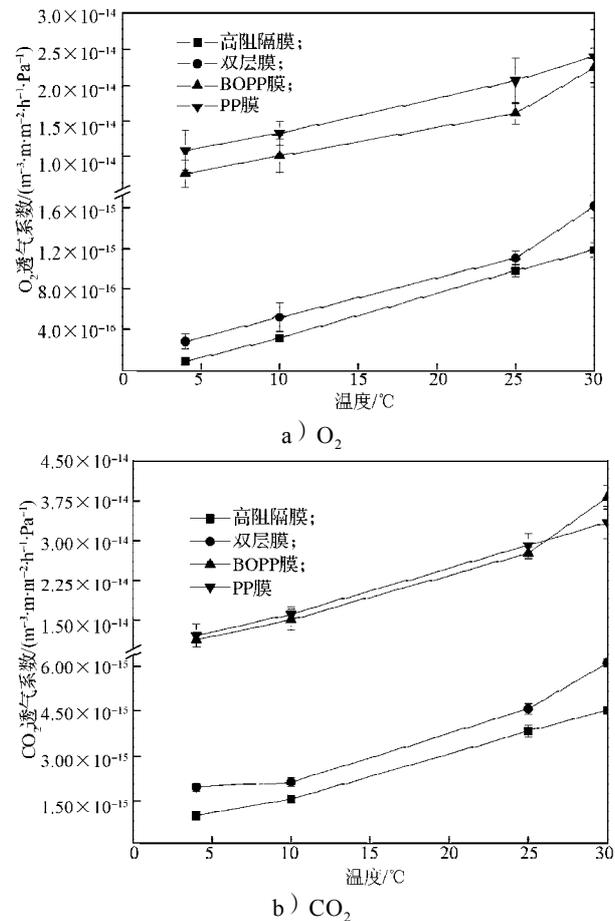


图 1 薄膜透气系数随温度的变化

Fig. 1 Permeability coefficient changes of films with temperatures

由图 1 可看出,随着温度的升高,4 种薄膜的透气系数都呈上升趋势。其中 PP 膜的透气性能最好,BOPP 膜次之。PP 膜的 O_2 透气系数在 4, 10, 25 $^{\circ}C$ 下显著高于 BOPP 膜,但两者的 CO_2 透气系数相当接近;30 $^{\circ}C$ 时,BOPP 膜的 CO_2 透气系数要高于 PP 膜。从其图线形态可看出,BOPP 膜的 O_2 透气系数在 25 ~ 30 $^{\circ}C$ 区间时有超越 PP 膜的趋势;而 CO_2 透气系数则在约 26 $^{\circ}C$ 时超越。这一结果表明,BOPP 膜的热膨胀系数较 PP 膜大,因此其材料结构变化受温度的影响较大。

另外, 双层膜的透气性能高于高阻隔膜, 但两者的 O_2 和 CO_2 透气系数相对于 BOPP 膜和 PP 膜则处于较低水平。4 种薄膜的透气系数与其厚度呈现出一定的相关性, 表现为材料越厚, 薄膜的透气系数越低。BOPP 膜和双层膜的厚度相差不大, 两者的透气性却相距较远, 这可能与双层膜的复合结构有关。复合材料的阻隔性能主要由阻隔性高的复合层决定, 其余部分只起载体作用。双层膜的结构为 PET-PP, 其中 PET 的阻隔性能非常高, 其透气性只有 BOPP 膜的 1/30 左右^[14]。

无机气体的透气性能与温度的关系符合阿累尼乌斯方程 (Arrhenius), 它反映了化学反应速率常数与温度变化的关系, 应用极为广泛。如张利平等人^[15]将 Arrhenius 方程运用于蔬菜货架期预测中, 通过数学模型讨论了蔬菜的相关品质, 如 VC 降解、叶绿素损失、颜色以及质构的变化等。本研究将透气系数取自然对数, 并与绝对温度的倒数作 Arrhenius 图, 所得结果见图 2。

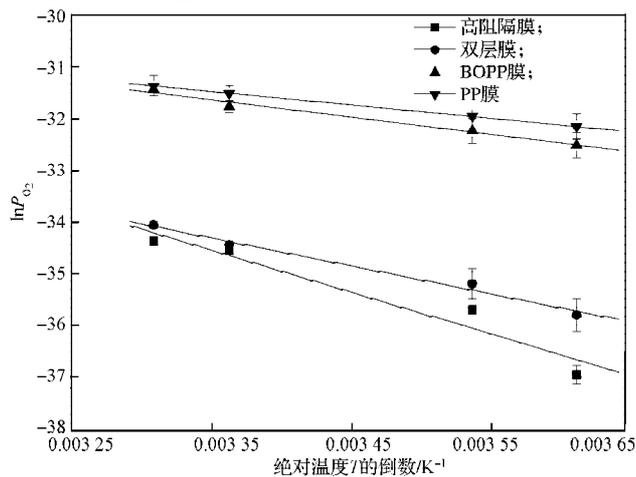
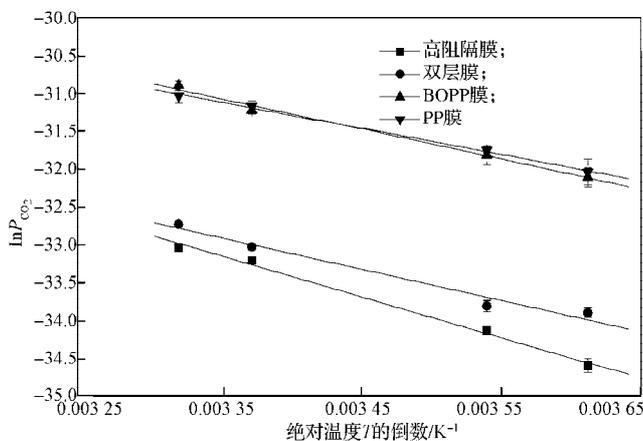
a) O_2 b) CO_2

图 2 薄膜透气系数与绝对温度 T 的 Arrhenius 图
Fig. 2 Arrhenius plots for permeability coefficients of films with absolute temperatures

由图 2 可发现, 所选用薄膜的透气系数与绝对温度间存在明显的线性关系 (相关系数均在 0.94 以上), 方程式为 $\ln P_i = a + b/T$ 。

各种薄膜的 Arrhenius 方程系数如表 2 所示, 根据各自的系数 a , b , 即可求得本试验温度外的薄膜透气系数。

表 2 薄膜透气系数与温度的 Arrhenius 方程系数

Table 2 Coefficients of Arrhenius equations for permeability coefficients of films

薄膜材料	$\ln P_i$	a	b	R^2
高阻隔膜	$\ln P_{O_2}$	-8.10	-7 907.86	0.940 8
	$\ln P_{CO_2}$	-16.20	-5 086.93	0.994 3
双层膜	$\ln P_{O_2}$	-16.70	-5 265.46	0.985 4
	$\ln P_{CO_2}$	-19.97	-3 885.68	0.974 2
BOPP 膜	$\ln P_{O_2}$	-20.75	-3 255.00	0.981 2
	$\ln P_{CO_2}$	-18.40	-3 801.70	0.992 6
PP 膜	$\ln P_{O_2}$	-23.01	-2 531.51	0.999 8
	$\ln P_{CO_2}$	-20.11	-3 303.02	0.997 7

由于不同的果蔬产品所要求的薄膜透气性能不尽相同, 且在不同温度下又有不一样的透气需求, 因此, Arrhenius 方程可以作为果蔬气调包装设计时选择薄膜材料的参考依据。

2.3 温度对薄膜透气系数比的影响

由于分子大小和分子结构的差异, 不同气体分子在同一种薄膜中的透气系数一般不相同。果蔬气调包装主要关注的是薄膜材料对 CO_2 和 O_2 的透气系数。气调包装内 CO_2 和 O_2 体积分数的相对比例取决于两种气体的透气系数比。透气系数比 β 是薄膜的 CO_2 透气系数与 O_2 透气系数之比 ($\beta = P_{CO_2}/P_{O_2}$), 它是表征薄膜选择性透气能力的参数之一^[16]。工程应用中, 常见塑料薄膜的 CO_2 透气系数往往大于 O_2 的透气系数, 这表明两种气体在扩散过程中, CO_2 在薄膜结构中的溶解及透过能力强于 O_2 。 β 值越大, 则说明 CO_2 在该薄膜结构中的相对溶解透过性越好; 反之, 则越差。塑料薄膜的 β 值可以分布在 1~10 之间, 最常见薄膜的 β 值通常在 3~5 之间^[17]。在大多数的气调包装呼吸速率模型中, β 值的确定至关重要。由 β 值可以通过推导得出特定温度下包装袋内可能存在的气体浓度组合, 当不同的薄膜其 β 值构成的斜线与某果蔬在该温度条件下要求的适宜气体浓度区间相交时, 可以初步判断该薄膜适合该果蔬的气调包装^[18]。

温度对不同气体在薄膜中的渗透性有着不同的影响效果, 从而改变了薄膜的 CO_2 和 O_2 透气系数比。表 3 为不同温度下本研究所选用的 4 种薄膜材料的透气系数比。

表3 薄膜透气系数比随温度的变化
Table 3 Permeability coefficients ratio changes
of films with temperatures

薄膜材料	温度/℃			
	4	10	25	30
高阻隔膜	10.41	4.69	3.83	3.75
双层膜	6.63	3.95	4.07	3.74
BOPP膜	1.47	1.49	1.72	1.70
PP膜	1.11	1.21	1.41	1.39

从表3中可以看出,同一温度下,一般为高阻隔膜的 β 值最高,双层膜次之,BOPP膜和PP膜的 β 值则低于一般水平。这一结果说明,BOPP膜和PP膜两者的 CO_2 和 O_2 渗透性差异不大。

从表3中还可以看出,温度变化对薄膜透气系数比的影响因薄膜材料的不同而有所差异:随着温度的升高,高阻隔膜和双层膜的 β 值逐渐降低,表明温度对这2种薄膜的 O_2 渗透性影响更为明显,表现为透氧性相对增强;而BOPP膜和PP膜的 β 值则先升高后下降,在25℃时达到最大值,但影响效果没有前2种薄膜显著,这说明低温和高温都不利于 CO_2 在这2种薄膜材料中的相对渗透。

3 结论

本研究中,用小袋法测定了高阻隔膜、双层膜、BOPP膜及PP膜的薄膜透气性能,模拟了盒式气调包装的实际条件,研究了不同温度下、不同薄膜材料的 O_2 和 CO_2 透气系数及其变化规律,可以得到如下结论:

1) 随着温度的升高,所选用4种薄膜的透气系数均呈上升趋势。

2) 所选用的4种薄膜包装材料中,PP膜的透气性能最好,BOPP膜次之,双层膜和高阻隔膜的透气性能处于较低水平。

3) 4种薄膜的透气系数与其厚度呈现出一定的相关性,表现为薄膜材料越厚,其透气系数越低。

4) BOPP膜和双层膜的透气性能差异可能与双层膜的复合结构有关。

5) 4种薄膜的透气系数与绝对温度之间均满足Arrhenius方程,根据所得的线性方程可以求得这4种薄膜材料在其他温度下的透气系数,以此作为果蔬气调包装设计时选择薄膜材料的参考依据。

6) 随着温度的升高,高阻隔膜和双层膜的透气系数比均逐渐降低,透氧性相对增强;BOPP膜和PP膜的透气系数比则先升高后下降,且在25℃时达到最大值。

以上结论对盒式气调包装设计具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Mangaraj S, Goswami T K, Mahajan P V. Applications of Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables: A Review[J]. Food Engineering Reviews, 2009, 1(2): 133-158.
- [2] Cameron A C, Talasila P C, Joles D W. Predicting Film Permeability Needs for Modified Atmosphere Packaging of Lightly Processed Fruits and Vegetables[J]. Hort Science, 1995, 30(1): 25-34.
- [3] Kader A A, Zagory D, Kerbel E L, et al. Modified Atmosphere Packing of Fruits and Vegetables[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1989, 28(1): 1-30.
- [4] Newton K G, Rigg W J. The Effect of Film Permeability on the Storage Life and Microbiology of Vacuum-Packed Meat [J]. Journal of Applied Microbiology, 1979, 47(3): 433-441.
- [5] 张敏.不同阻隔性的包装材料对气调包装鲜肉品质的影响[J].食品工业科技, 2008, 29(1): 238-240.
Zhang Min. Effect of Packaging Materials with Different Barrier Property on Fresh Meat Under MAP[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(1): 238-240.
- [6] 王兴东, 赵江.材料阻隔性指标详解[J].塑料科技, 2007, 35(6): 84-86.
Wang Xingdong, Zhao Jiang. Elaboration of Barrier Properties of Material[J]. Plastics Science and Technology, 2007, 35(6): 84-86.
- [7] 苏远, 赵德坚.压差对塑料薄膜透气性能的影响[J].包装工程, 2003, 24(3): 49, 53.
Su Yuan, Zhao Dejian. The Effect of Partial Pressure Difference on Gas Permeability of Plastic Film[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(3): 49, 53.
- [8] 王微山, 赵江.薄膜透气性测试的两种方法比较:压差法与等压法[J].食品工业科技, 2008, 29(8): 283-284.
Wang Weishan, Zhao Jiang. Comparison of Two Methods for Determine of Membrane Gas-Permeability: Differential Pressure Method and Equal-Pressure Method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(8): 283-284.
- [9] 庞然, 汪仁煌, 龚雄文, 等.薄膜材料透气量系数拟合的研究与实现[J].广东工业大学学报, 2007, 24(2): 47-50.
Pang Ran, Wang Renhuang, Gong Xiongwen, et al. The Research and Application of Data Fitting in the Test of Gas Permeability of Film Material[J]. Journal of Guangdong

- University of Technology, 2007, 24(2): 47-50.
- [10] 张长峰, 徐步前, 吴光旭. 更接近于气调包装条件下薄膜透气系数的测算方法[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 15-18.
- Zhang Changfeng, Xu Buqian, Wu Guangxu. Method for Computation of Film Permeability Coefficient Under the Condition Closer to Modified Atmosphere Packaging (MAP)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(1): 15-18.
- [11] 张长峰. MA包装中薄膜透气性与香蕉呼吸强度的测算[D]. 广州: 华南农业大学, 2002.
- Zhang Changfeng. Study on Determination of Film Permeability and Banana Respiration in Modified Atmosphere Packaging[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2002.
- [12] 朱梦冰, 王晓东, 黄培. 薄膜线膨胀系数的一种精确测量方法[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2007, 29(2): 58-61.
- Zhu Mengbing, Wang Xiaodong, Huang Pei. Accurate Measuring Approach to High-Poly Resin Films[J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 29(2): 58-61.
- [13] Brecht J K. Maintaining Optimal Atmosphere Conditions for Fruits and Vegetable Throughout the Postharvest Handling Chain[J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 27(4): 87-101.
- [14] 陈黎敏, 蔡惠平. 包装复合薄膜渗透性的模拟分析[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 31-32.
- Chen Limin, Cai Huiping. Research on Gases Permeability of Laminated Packaging Films[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 31-32.
- [15] 张利平, 谢晶. Arrhenius方程结合特征指标在蔬菜货架期预测中的应用[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 168-173.
- Zhang Liping, Xie Jing. Arrhenius Equation Binding Characteristics of Indicators in the Prediction of the Shelf Life of Vegetables[J]. Food and Machinery, 2012, 28(5): 168-173.
- [16] Beaudry R M, Cameron A C, Shirazi A, et al. Modified Atmosphere Packaging of Blueberry Fruit: Effect of Temperature on Package O₂ and CO₂[J]. Hort Science, 1992, 117(7): 436-441.
- [17] 段华伟. 鲜果气调包装的理论与试验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- Duan Huawei. The Experimental and Theoretical Study of the Fresh Fruit Modified Atmosphere Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [18] 曹菲. 果蔬自发气调包装薄膜透气性能的研究与应用[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(4): 99-101.
- Cao Fei. Studies and Applications of MAP Films Permeability for Fruits and Vegetables[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(4): 99-101.
- (责任编辑: 廖友媛)

.....

(上接第54页)

- [3] Kaully T, Siegmann A, Shacham D. Rheology of Highly Filled Natural CaCO₃ Composites II, Effects of Solid Loading and Particle Size Distribution on Rotational Rheometry[J]. Polymer Composites, 2007, 10: 524-533.
- [4] Pitt Supaphol, Wipasiri Harnsiri. Rheological and Isothermal Crystallization Characteristics of Neet and Calcium Carbonate-Filled Syndiotactic Polypropylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100: 4515-4525.
- [5] Jiang Guo, Huang Hanxiong. Microstructure and Rheologic Development of Polypropylene/Nano-CaCO₃ Composites Along Twin-Screw Extruder[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 114: 1687-1693.
- [6] Attila Kiss, Erika Fekete, Bela Pukansky. Aggregation of CaCO₃ Particles in PP Composites: Effect of Surface Coating[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67: 1574-1583.
- [7] 王权, 瞿金平. 动态成型过程中PP/CaCO₃填充体系的流变行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(1): 176-179.
- Wang Quan, Qu Jinping. Study on Rheological Behaviors of Calcium Carbonate-Filled Polypropylene in Dynamic Processing[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2007, 23(1): 176-179.
- [8] 廖芹, 瞿金平, 任鸿烈, 等. 振动力场作用及其CaCO₃填充体系下聚合物挤出的信息控制与优化[J]. 塑料工业, 2002, 30(2): 28-31.
- Liao Qin, Qu Jinping, Ren Honglie, et al. Information Control and Optimization of Extrusion Process of Polymer in CaCO₃ Filled System Under Vibration Force Field[J]. China Plastics Industry, 2002, 30(2): 28-31.
- [9] 瞿金平. 振动力场作用下聚合物熔体输送和挤出过程及其行为与响应研究[D]. 成都: 四川大学, 1999.
- Qu Jinping. Study on Polymer Melts Transporting and Extruding Process, Its Behavior and Response Under Vibration Force Field[D]. Chengdu: Sichuan University, 1999.
- (责任编辑: 徐海燕)