

PPC表面沉积SiO_x工艺与其包装性能研究

宋树鑫, 刘林林, 张晓燕, 云雪艳, 梁晓红, 王羽, 呼和, 董同力嘎
(内蒙古农业大学, 呼和浩特 010018)

摘要: **目的** 提高聚碳酸亚丙酯(PPC)薄膜的阻隔性。**方法** 采用等离子体增强化学气相沉积法在PPC薄膜表面上沉积SiO_x层,并以阻氧性能为工艺评估指标。**结果** 采用等离子体增强化学气相沉积法可以在PPC薄膜表面沉积SiO_x层,最佳工艺条件为沉积功率150 W、六甲基硅氧烷流量为6 mL/min,氧化流量为12 mL/min、沉积时间60 min,通过沉积SiO_x层,PPC薄膜的阻氧性能得到了有效的提高。**结论** 采用等离子化学气相沉积法在PPC薄膜上沉积SiO_x层可明显提高对氧气、水蒸气和紫外线的阻隔性能,并保持原有韧性。

关键词: 聚碳酸亚丙酯; SiO_x层; 等离子化学气相沉积法; 阻隔性能

中图分类号: TB484.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)13-0008-07

Deposition Technique of SiO_x Layer on Poly(Propylene Carbonate) Surface and Its Packaging Characteristics

SONG Shu-xin, LIU Lin-lin, ZHANG Xiao-yan, YUN Xue-yan, LIANG Xiao-hong,
WANG Yu, HU He, DONG Tungalag
(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

ABSTRACT: This study aimed to improve the barrier property of poly (propylene carbonate) (PPC). In this study, the SiO_x layer was deposited on the PPC film surface by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) technique, and the evaluation on oxygen barrier property was used as the research target. The SiO_x layer was successfully deposited on PPC film surface by PECVD technique, and the optimum process was 150 watts of power, 6 mL/min:12 mL/min of HMDSO/O₂, and 60 min of deposition time, and the oxygen barrier of PPC was enhanced observably by deposition of SiO_x layer. The barrier property of PPC against oxygen, vapor and UV was improved by deposition of SiO_x layer on its surface by PECVD technique and its toughness was retained.

KEY WORDS: poly(propylene carbonate); SiO_x layer; plasma enhanced chemical vapor deposition; barrier property

随着白色污染日益严重,生物可降解材料的应用越来越受到人们的关注,目前在农业、包装、医学等领域已经得到应用^[1-3]。聚碳酸亚丙酯(PPC)是一种二氧化碳基生物可降解材料,其链段中固化大量的二氧化碳,可以缓解“温室效应”,是一种绿色环保材料,而且原料丰富、价格低廉、韧性强且透明度高^[4-7]。PPC薄膜的阻隔性不高,尤其是作为食品包装材料来使用时,其阻氧、阻湿性能远远达不到要求。一般认为高

阻隔性薄膜在22.8℃干燥条件下,25.4 μm厚薄膜的透氧量小于5 mL/(m²·d)^[8]。

SiO_x蒸镀膜有诸多的优良特性,在食品包装中,利用它能吸收紫外线的特点,可以用于脂肪、动物油等食品包装;利用其良好的微波适性,可用于微波食品包装;利用其耐蒸煮性,可用于蒸煮包装;利用其阻湿阻氧性,可用于高阻隔性包装;利用其优良的香味保持性,可用于包装像茶类易挥发的产品。随着其生产技

收稿日期: 2014-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(51163010)

作者简介: 宋树鑫(1992—),男,河北人,内蒙古农业大学硕士生,主攻食品包装与储运。

通讯作者: 董同力嘎(1972—),男,内蒙古人,博士,内蒙古农业大学教授,主要研究方向为高分子材料、食品包装与储运。

术的成熟、价格的下降,其应用范围必将迅速扩展⁹⁻¹⁰。

文中采用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD),在PPC薄膜表面上沉积SiO_x层。PECVD法将低气压放电形成的等离子体应用于化学气相沉积,是一项具有发展前途的新技术。PECVD技术与其他CVD技术具有不同的特点,主要在于等离子体中有大量高能电子,这些高能电子能够提供化学气相沉积过程所需的激活能。一方面,气相分子可以通过和高能电子的碰撞,发生化合、分解、激发以及电离过程,生成各种高活性中间体,因此使化学气相沉积薄膜沉积的温度范围显著降低,原来只有在高温下才能进行的反应过程可以在较低的温度下进行。另一方面,等离子体反应能在基底表面产生离子轰击,适当地调配等离子体功率能控制离子对沉积薄膜的轰击,调整薄膜的内应力。相比于其他方式,这种方法可以沉积得到更低应力的薄膜。PECVD也有缺点,比如成本高、尾气难处理、容易损伤薄膜表面等,与这些缺点相比,PECVD的优点是主流,现在越来越广泛地应用在制备二氧化硅薄膜上¹¹⁻¹³。

文中通过调节PECVD镀膜工艺的沉积时间、六甲基硅氧烷/氧气气体流量(HMDSO/O₂)和射频源功率等3个因素,评估PPC/SiO_x膜的阻氧性能,优化提高PPC薄膜阻氧性的最佳镀膜工艺,并研究SiO_x蒸镀膜的热学、力学与阻隔性能。

1 实验

1.1 材料与设备

材料:聚碳酸亚丙酯(PPC)(数均分子量为 1.17×10^5),内蒙古西新技术集团公司;氯仿,分析纯,天津枫船化学试剂有限公司;硅源(六甲基硅氧烷的质量分数为99%),J & K科技公司。

设备:等离子镀膜装置,ICP-PECVD-500,合肥飞帆等离子科技有限公司;透氧仪,8001, Illinois, US;透湿仪,Permatran-w3/61, MOCON, US;傅里叶变换红外线光谱仪, IRAffinity-1, Shimadzu Co., Japan; UV-2450紫外可见分光光度计,日本岛津公司;差示扫描量热分析仪, DSC, Q20, TA Instruments;万能拉伸试验机, Xn-8750, 东莞市星汇电子有限公司。

1.2 方法

1.2.1 PPC薄膜的制备

将3 g PPC溶解于100 mL氯仿中,充分溶解后将

溶液均匀涂覆在玻璃板上,待溶剂挥发后,将薄膜揭下真空干燥1周,得到厚度约为48 μm的薄膜。

1.2.2 PPC/SiO_x复合膜的制备

将PPC薄膜放入真空室,将真空室内的真空度抽至 8×10^{-3} Pa以下,通入氩气(99.99%)使气压稳定在20 Pa,开启射频源进行5 min预溅射,以清除薄膜表面残留的氧化物和污染物等。之后通入氧气(99.99%)和在低压下挥发的气态六甲基硅氧烷(HMDSO,纯度为99.99%),按照预定工艺条件调节设备,进行反应并沉积。整个实验过程在室温(23 °C)下进行。

1.2.3 薄膜的透氧性测试

在温度为23 °C、相对湿度为65%的条件下,用透氧仪测试复合膜的氧气透过率,每组测试2个平行样品。

1.2.4 薄膜的透湿性测试

在温度为23 °C、相对湿度为50%的条件下,用透湿仪测试复合膜的水蒸气透过率。

1.2.5 薄膜的表面红外测试

用傅里叶红外光谱仪分析SiO_x层沉积效果,测试条件:分辨率为 4 cm^{-1} ,波数范围为 $700 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$,扫描次数为120次。

1.2.6 薄膜的紫外透过性测试

用紫外可见分光光度计分析SiO_x层对紫外线的阻隔性,测试条件:扫描波长范围为 $800 \sim 190 \text{ nm}$,扫描速度为中速,采样间隔0.5 nm。

1.2.7 薄膜的热力学性能测试

在温度为 $-30 \sim 90 \text{ °C}$ 、升温速率为 10 °C/min 的条件下,测试DSC。

1.2.8 薄膜的力学性能测试

将样品剪成哑铃状(脖颈长28 mm,宽5 mm),使用拉伸机在室温下进行拉伸测试,拉伸速率为 100 mm/min ,通过仪器读出拉伸力、拉伸距离等参数,由此可计算出断裂伸长率、屈服强度和弹性模量。每组测试5个平行样品。

1.2.9 单因素试验

文中探讨SiO_x层的沉积时间、气体流量和射频源功率三因素对PPC薄膜的透氧性能的影响。

1.2.10 正交试验设计

从每个因素中筛选出薄膜透氧系数低的3个水平,即得到三因素三水平的正交实验条件,然后采用 $L_9(3^4)$ 正交表分析得到9个实验条件(见表1),把功率、气体流量和时间分别定义为A、B和C,即得到的9

个实验条件为 A1B1C1, A1B2C2, A1B3C3, A2B1C2, A2B2C3, A2B3C1, A3B1C3, A3B2C1, A3B3C2。在 9 个实验条件下制得薄膜后,对其透氧系数的测试结果进行极差分析,可以得到最佳镀膜工艺。

表1 正交试验设计

Tab.1 Orthogonal test design

功率	气体流量	时间		
		C1	C2	C3
A1	B1	A1B1C1		
	B2	A1B2C2		
	B3	A1B3C3		
A2	B1	A2B1C2		
	B2	A2B2C3		
	B3	A2B3C1		
A3	B1	A3B1C3		
	B2	A3B2C1		
	B3	A3B3C2		

1.2.11 验证试验及性能测试

最后进行验证实验,并对最佳工艺下的薄膜进行

透氧、透湿、拉伸、热学以及透明度等性能分析。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果

以蒸镀时间、气体流量和射频源功率为单因素,每个因素取 5 个水平,进行镀膜,考察各因素对薄膜透氧系数的影响。

在沉积功率为 50 W、HMDSO 流量为 5 mL/min, O₂ 流量为 10 mL/min 的镀膜工艺下,改变沉积时间,取其 5 个水平,进行镀膜,结果见图 1a。在沉积功率为 50 W,沉积时间为 60 min 的镀膜工艺下,改变气体流量 HMDSO/O₂,取其 5 个水平,水平 1, 2, 3, 4, 5 中 HMDSO 流量分别为 4, 5, 6, 7, 8 mL/min, 对应的 O₂ 流量分别为 8, 10, 12, 14, 16 mL/min, 进行镀膜,结果见图 1b。在沉积时间为 60 min, HMDSO 流量为 5 mL/min, O₂ 流量为 10 mL/min 的镀膜工艺下,改变功率,取其 5 个水平,进行镀膜,结果见图 1c。

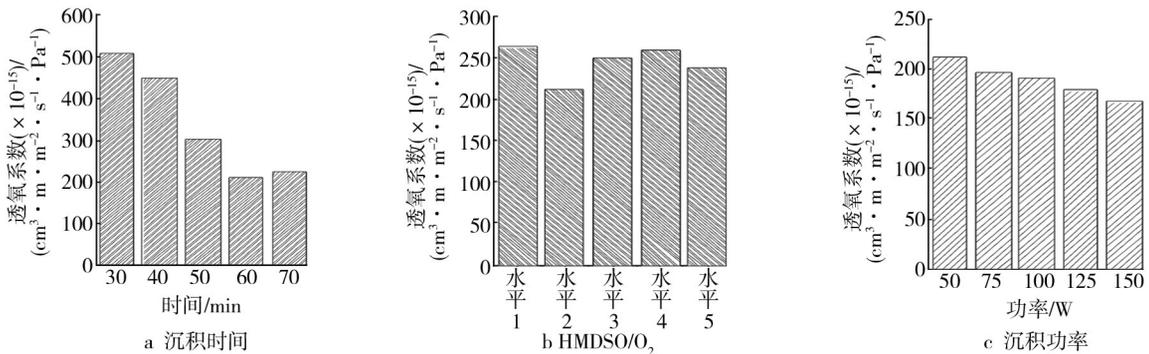


图1 不同因素对薄膜透氧系数的影响

Fig.1 The influence of deposition parameters on oxygen transmission coefficient of PPC film

从图 1a 可以看出,沉积时间的改变会明显影响到薄膜的透氧性能^[14-15]。在 30~60 min 内,薄膜的透氧系数持续下降,因为随着时间的延长,真空室内反应产生的 SiO_x (大部分为 SiO₂) 增多,覆盖在薄膜表面,形成 PPC/SiO_x 复合膜。由于 SiO_x 层对氧气的阻隔性非常好,所以 PPC/SiO_x 薄膜对氧气的阻隔性提高,相应的透氧系数减小。薄膜在沉积 70 min 时相比于 60 min 时,透氧系数小幅度增大,是因为 SiO_x 层本身很脆,容易开裂,即便使用 PECVD 这种镀层不易开裂的镀膜方法也难以避免,而且随着沉积时间的延长, SiO_x 层增厚,导致 SiO_x 层的脆性表现得更加明显,裂纹进一步增多(见图 2)。SiO_x 层厚度增加会提高薄膜阻氧性,而裂纹增多又会降低其阻氧性。另外,有研究表明等离子轰击

薄膜时间太长,会导致薄膜表面降解,高分子分解,内应力减小,相互之间结合松弛^[16-18],这有可能导致氧气进入薄膜的通道变宽,单位时间内透过薄膜的氧气量增加,造成透氧系数增大。SiO_x 层厚度、裂纹和 PPC 薄膜表面降解这 3 个因素共同作用,在沉积时间 60 min 时形成了最佳搭配,使薄膜透氧系数达到最低。根据图 1a,选出透氧系数较低的 3 个时间水平,即 50, 60 和 70 min,作为正交试验的时间水平。

从图 1b 可以看出,所选气体流量对薄膜透氧系数的影响没有呈现一定的规律,因为参与反应的气体比例 $V_{\text{硅烷}}:V_{\text{氧气}}=1:2$,所以实验中使通入的硅源气体和氧气流量比例始终保持在 1:2,这样一来,保证了比例不变,只有气体的流量在增加,即真空室内的气体密度

和压强在变大。一方面,在射频源功率不变的情况下,单位时间内参与反应的气体的量会随着气体密度的增大而增大。当真空室内的气体密度达到该射频功率所能诱发的反应量的上限后,再继续增加气体的量,会有未能参加反应的气体从出口排出反应体系,而单位时间内实际反应掉的气体的量不再变化,即生成SiO_x的速率保持恒定。另一方面,镀膜沉积速率随工作气压的增大而先增大后减小,是非线性的,最大沉积速率对应着一个最佳工作气压^[9]。

文中由于通入硅氧烷气体和氧气的流量设定了不同梯度,所以真空室里的气压也有相应梯度,相应的压强依次为28,31,34,38和42 Pa。但是最大沉积速率并不一定得到最低透氧系数的薄膜,而透氧系数是实验的主要测试指标,因此无法考察最大沉积速率对应的最佳工作气压的具体值。从实验结果可以得知,在参加反应的气体的量和工作气压的非线性的共同作用下,复合膜的透氧系数在HMDSO流量为5 mL/min, O₂流量为10 mL/min的气体流量下(即31 Pa时)达到最小。根据图1b选出透氧系数较低的3个流量水平,即水平2,3,5作为正交试验的气体流量水平。

使用PECVD技术时产生的等离子体中存在大量高能电子,这些高能电子能够提供化学气相沉积过程所需的激活能。气相分子通过与高能电子的碰撞,发生化合、分解、激发以及电离过程,生成各种高活性中间体,这些中间体转化后沉积在薄膜表面^[20]。从图1c可以看出,随着沉积功率的提高,薄膜的透氧系数不断减小,原因是沉积功率增大后,产生的高能电子增多,使参与反应的气体增多,产生更多的SiO_x,导致薄膜的透氧系数减小。从图1c中选出透氧系数较低的3个功率水平,即100,125和150 W,作为正交试验的功率水平。

2.2 镀膜工艺正交试验

在单因素试验基础上,蒸镀功率选择100,125和150 W等3个水平,气体流量选择水平2,3,5等3个水平,蒸镀时间选择50,60和70 min等3个水平。采用L₉(3⁴)正交表分析得到9个实验条件,在这些实验条件下进行实验,结果见表2。

对实验结果进行极差分析,结果见表3。

鉴于实验要求透氧系数越小越好,由表3可知,各因素对薄膜透氧系数影响的主次顺序为C>B>A,即沉积时间>气体流量>沉积功率,最优组合为

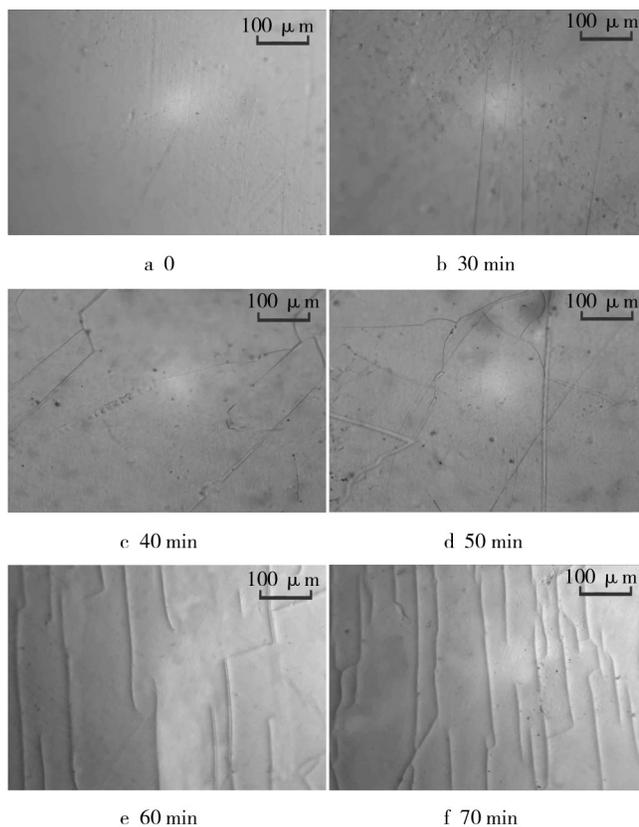


图2 不同沉积时间的PPC薄膜表面POM图

Fig.2 The POM pictures of PPC films at different deposition time

表2 正交试验结果

Tab.2 Orthogonal test results

功率/W	气体流量水平	透氧系数OP(×10 ⁻¹⁵)/(cm ³ ·m·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹)		
		蒸镀时间 50 min	蒸镀时间 60 min	蒸镀时间 70 min
100	2	198.8		
	3		154.8	
	5			185.0
125	2		173.1	
	3			174.4
	5	188.3		
150	2			180.2
	3	172.0		
	5		156.6	

A3B2C2, 即沉积功率为150 W、HMDSO流量为6 mL/min, O₂流量为12 mL/min和沉积时间为60 min。

2.3 验证实验

对最佳工艺条件下制得的PPC薄膜进行透氧性能的验证实验。

测试环境的温度为23℃,相对湿度为65%,结果

表3 正交结果的极差分析

Tab.3 The range analysis of the orthogonal results

试验号	因素			透氧系数 OP ($\times 10^{-15}$) / ($\text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)
	A	B	C	
1	1	1	1	198.8
2	1	2	2	154.8
3	1	3	3	185.0
4	2	1	2	173.1
5	2	2	3	174.4
6	2	3	1	188.3
7	3	1	3	180.2
8	3	2	1	172.0
9	3	3	2	156.6
K_1	538.6	552.1	559.1	
K_2	535.8	501.2	484.5	
K_3	508.8	529.9	539.6	
k_1	179.5	184.0	186.4	
k_2	178.6	167.1	161.5	
k_3	169.6	176.6	179.9	
极差 R	9.9	17.0	24.9	
主次顺序	C>B>A			
优水平	A3	B2	C2	
优组合	A3B2C2			

为 PPC 的氧气透过率、氧气透过系数、水蒸气透过率、水蒸气透过系数分别为 $261.9 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $1440.6 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, $94.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $2.2 \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, PPC/SiO_x 的氧气透过率、氧气透过系数、水蒸气透过率、水蒸气透过系数分别为 $26.4 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $145.1 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, $17.16 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。在 A3B2C2 工艺下 PPC/SiO_x 薄膜的透氧系数减小到 $145.1 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, 低于其他工艺下 PPC/SiO_x 薄膜的透氧系数, 说明 A3B2C2 确实为最佳工艺, 符合正交试验结果。

2.4 最佳工艺下的 PPC/SiO_x 薄膜性能

2.4.1 PPC/SiO_x 薄膜和 PPC 薄膜的红外、紫外表征

PPC/SiO_x 薄膜与 PPC 薄膜的表面红外光谱见图 3, PPC/SiO_x 与 PPC 薄膜的紫外光谱见图 4。表面红外光谱图中, $880 \sim 780 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1100 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为 Si—O—Si 对称伸缩振动和反对称伸缩振动^[21]。由图 3 可知, PPC/SiO_x 具有典型的 SiO_x 红外特征峰, 表明 PECVD 法可以成功制备 SiO_x 层, 由于受到 SiO_x 层的覆盖, PPC/SiO_x 薄膜在 1750 cm^{-1} 处的羰基峰明显减小。表面红外测试时, 红外光很难渗透到内表面的 PPC 薄

膜, 因此 PPC 的吸收峰减弱, 从而主要表现出 SiO_x 层的红外光谱图特征。

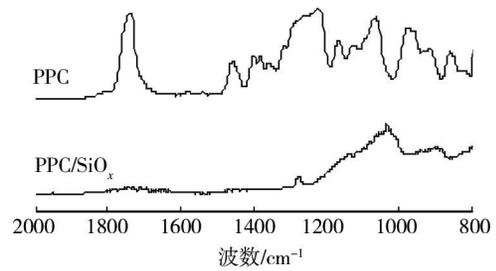


图3 PPC/SiO_x 薄膜与 PPC 薄膜的表面红外光谱
Fig.3 ATR-FTIR of PPC/SiO_x film and PPC film

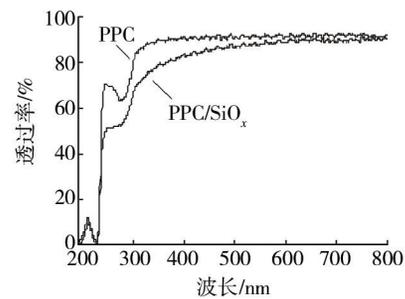


图4 PPC/SiO_x 与 PPC 薄膜的紫外光谱

Fig.4 Ultraviolet spectrograms of PPC/SiO_x film and PPC film

由图 4 可知, PPC 和 PPC/SiO_x 薄膜对光的透过率, 在 $800 \sim 400 \text{ nm}$ 范围内基本不变, 始终保持在 $80\% \sim 90\%$, 说明 PPC 薄膜蒸镀 SiO_x 后透明度变化不明显。PPC/SiO_x 比 PPC 薄膜的透过率稍低一些, 是由于 SiO_x 层对复合膜的透明度有一定影响。在 $400 \sim 250 \text{ nm}$ 的范围内, PPC 对光的透过率缓慢下降, 而 PPC/SiO_x 的透过率下降幅度比 PPC 薄膜大, 说明 SiO_x 层对紫外线的阻隔较强, 提高了复合膜对紫外线的阻隔性; PPC 和 PPC/SiO_x 对小于 250 nm 的光的透过率都急剧下降, 说明对于此波段紫外线的阻隔性, 两者都具优势。

2.4.2 PPC 和 PPC/SiO_x 薄膜的氧气和水蒸气透过性测试

由 2.3 节可知, PPC/SiO_x 薄膜的透氧系数和透湿系数分别为 $145.1 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 和 $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, 较 PPC 薄膜的 $1440.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 和 $2.2 \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, 分别降低了 9.9 倍和 6.0 倍。复合薄膜的阻氧性能比阻湿性能改善幅度大, 是因为 PPC 薄膜本身的阻氧性能较差, 与阻氧性能好的 SiO_x 层复合后, 阻氧性能提高幅度较大; PPC 薄膜本身的阻湿性能较好, 与阻湿性能好的 SiO_x 层复合后, 阻湿性能提高幅度较小, 故阻湿性能的改善幅度没有阻氧性能大。

2.4.3 PPC和PPC/SiO_x的热力学和力学性能测试

由图5可知,PPC/SiO_x和PPC的玻璃化转变温度(T_g)分别为31.3,28.5℃,PPC/SiO_x薄膜相对于PPC薄膜的 T_g 稍微增大,说明复合SiO_x后材料对温度的尺寸稳定性有所提高。文中的测试温度均在薄膜 T_g 以下温度范围内进行,因此以上测试结果均为玻璃态时的物理性能。

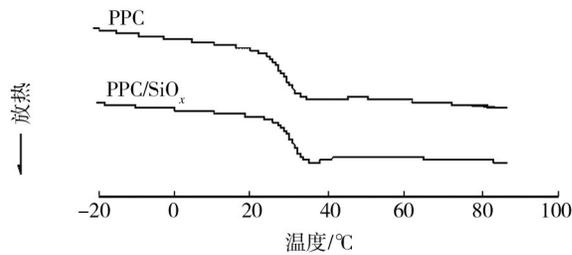


图5 PPC和PPC/SiO_x薄膜的DSC测试曲线

Fig.5 DSC test curves of PPC/SiO_x film and PPC film

PPC薄膜和PPC/SiO_x薄膜用万能拉伸机进行力学性能测试,PPC的断裂伸长率、屈服强度、弹性模量分别为1146.9%,5.5 MPa,365.9 MPa,PPC/SiO_x的分别为712.8%,14.7 MPa,551.6 MPa。PPC/SiO_x薄膜相对于PPC薄膜,断裂伸长率减小,但仍达到了712.8%,保持了较好的韧性,屈服强度提高了将近3倍,弹性模量明显增大,说明薄膜变得更硬。

3 结语

文中通过PECVD法在PPC薄膜表面成功制备了SiO_x层,提高PPC薄膜阻氧性能的最佳工艺是:沉积功率为150 W、HMDSO流量为6 mL/min、O₂流量为12 mL/min、沉积时间为60 min。在此工艺下蒸镀的PPC薄膜的阻氧性能和阻湿性能明显提高。此外,蒸镀后的PPC薄膜的屈服强度和弹性模量明显提高,对紫外线的阻隔性和玻璃化转变温度也有所提高,同时保持了良好的韧性和透明性。

参考文献:

- [1] 张新林,许文才,王正铎,等.聚乳酸薄膜表面SiO_x层的制备与阻隔性研究[J].中国印刷与包装研究,2010,5(2):61—64.
ZHANG Xin-lin, XU Wen-cai, WANG Zheng-duo, et al. Preparation and Barrier Property of SiO_x Layer on Poly(lactic Acid) Film[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 5(2):61—64.
- [2] KRICHELDORF H R. Synthesis and Application of Polyac-
- [3] 涂志刚,吴增青,麦堪成.阻隔性塑料包装的发展[J].包装工程,2003,24(6):1—3.
TU Zhi-gang, WU Zeng-qing, MAI Kan-cheng. Development of Barrier Plastics Film for Packaging[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(6):1—3.
- [4] DARENSBOURG D J. Making Plastics from Carbon Dioxide: Salen Metal Complexes as Catalysts for the Production of Polycarbonates from Epoxides and CO₂[J]. Chem Rev, 2007, 107(6):2388—2410.
- [5] PADDOCK R L, NGUYEN S T. Alternating Copolymerization of CO₂ and Propylene Oxide Catalyzed by Co-III (Salen)/Lewis Base[J]. Macromolecules, 2005, 38(15):6251—6253.
- [6] 张亚男,刘庆.聚碳酸亚丙酯可降解复合材料的制备与性能[J].泰山学院学报,2010,32(3):99—105.
ZHANG Ya-nan, LIU Qing. Preparation and Properties of Polypropylene Carbonate Degradable Composite Materials[J]. Journal of Taishan University, 2010, 32(3):99—105.
- [7] 刘小文,潘莉莎,卢凌彬,等.聚碳酸亚丙酯(PPC)共混改性研究进展[J].化工进展,2010,29(5):328—331.
LIU Xiao-wen, PAN Li-sha, LU Ling-bin, et al. Advances in Blending of Poly(Propylene Carbonate)[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(5):328—331.
- [8] 周祥兴.高阻隔性薄膜的生产与性能[J].中国包装工业,2001(8):29—36.
ZHOU Xiang-xing. Production & Function of High-resistant film[J]. China Packaging Industry, 2001(8):29—36.
- [9] 杨维刚.真空蒸镀SiO_x膜的特性及加工应用[J].包装工程,1999,20(5):14—16.
YANG Wei-gang. Vacuum SiO_x-coated Film: Speciality, Processing and Application[J]. Packaging Engineering, 1999, 20(5):14—16.
- [10] GOUJON M, BELMOTTE T, HENRION G. OES and FTIR Diagnostics of HMDSO/O₂ Gas Mixtures for SiO_x Deposition Assisted by RF Plasma[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188/189:756—761.
- [11] 刘壮,林晶,孙智慧,等.磁控溅射陶瓷薄膜(SiO_x)阻隔性机理的研究[J].包装工程,2008,29(10):12—14.
LIU Zhuang, LIN Jing, SUN Zhi-hui, et al. Study of the Barrier Mechanism of Ceramic Thin Film by Magnetron Sputtering [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10):12—14.
- [12] 邱丽萍.阻隔型包装材料的开发趋势[J].包装工程,1998,19(3):4—7.
QIU Li-ping. The Development Trend of Barrier Plastics Film for Packaging[J]. Packaging Engineering, 1998, 19(3):4—7.
- [13] 李家值.半导体化学原理[M].北京:科学出版社,1980.
LI Jia-zhi. The Chemical Principle of Semiconductor[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [14] JIANG Z, DATTATRAY S W, ELLEN R F. Mechanisms of

- SiO₂ Film Deposition from Tetramethyl Cyclotetra Siloxane, Dimethyl Dimethoxy Silane, and Trimethylsilane Plasmas[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2004, 22(1): 201—213.
- [15] 董峰,高德,林晶,等. 射频磁控溅射 SiO₂ 薄膜的制备与阻隔性能研究[J]. 包装工程, 2009, 30(6): 21—23.
DONG Feng, GAO De, LIN Jing, et al. Preparation of Silicon Dioxide Film by RF Magnetron Sputtering and Study of Its Barrier Performance[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(6): 21—23.
- [16] 宋雪萍,黄飞,吕建国,等. 射频磁控溅射 SiO₂ 薄膜及性能表征[J]. 安徽大学学报, 2010, 34(6): 37—42.
SONG Xue-ping, HUANG Fei, LYU Jian-guo, et al. Preparation and Characterization of SiO₂ Thin Films by RF Magnetron Sputtering[J]. Journal of Anhui University, 2010, 34(6): 37—42.
- [17] ZHANG Jing. The Characterization of Structure-tailored Plasma Film Deposited from the Pulsed RF Discharge[J]. Thin Solid Films, 2003, 435: 108—115.
- [18] ZANINI S, RICCARDI C, ORLANDI M, et al. Analysis of the SiO₂ Film Microstructure on Al Substrate by a PCVD Process [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200: 953—957.
- [19] 周美丽,陈强,岳蕾,等. 聚合单体对制备 SiO₂ 高阻隔性薄膜性能的影响[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 37—39.
ZHOU Mei-li, CHEN Qiang, YUE Lei, et al. Influence of SiO₂ Polymerization on the Obstructing Performance[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 37—39.
- [20] 王璘,余欧明,杭凌侠,等. 磁控溅射镀膜中工作气压对沉积速率的影响[J]. 真空, 2004, 41(1): 9—12.
WANG Lin, YU Ou-ming, HANG Ling-xia, et al. Influence of the Working Gas Pressure on the Deposition Rate in Magnetron Sputtering for Thin Coating[J]. Vacuum, 2004, 41(1): 9—12.
- [21] JIANG Z, DATTATRAY S W, ELLEN R F. Mechanisms of SiO₂ Film Deposition from Tetramethyl Cyclotetra Siloxane, Dimethyl Dimethoxy Silane, and Trimethyl Silane plasmas[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2004, 22(1): 201—213.

欢迎订阅《包装工程》杂志

邮发代号: 78-30(半月刊)

《包装工程》杂志 1980 年创刊, 是国内外公开发行的全国印刷包装技术领域权威性科技期刊, 连续六版全国中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)源刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、《中国期刊网》用刊、《中国学术期刊(光盘版)》用刊、“万方数据——数字化期刊群”入编刊物、“中文科技期刊数据库”收录期刊。

办刊宗旨: 以科技进步推动产业发展。

《包装工程》杂志立足于为本行业全面服务, 是印刷包装高水平学术理论研究、先进工程技术应用研究、高新科技成果展示以及国内外印刷包装行业科技发展动态的一个理想传播渠道和交流中心。

《包装工程》杂志内容主要分为专论和信息两大部分。包含包装技术与工程、技术专论、研究进展、工业设计、视觉传达设计、论坛与资讯等栏目。专论部

分着重报道包装及印刷领域学术理论探讨, 工程应用技术研究成果和项目进展, 以及设计新潮和管理创新等内容; 信息版块主要报道国内外包装科技动态、科研生产实践经验总结等内容。报道内容涵盖了与包装、印刷行业相关的机械、材料、化工、电子、自动化、物流、设计艺术和管理等专业方向, 年载文量近 900 篇。

本刊信息量大, 内容丰富翔实, 是包装印刷及相关行业从事经营管理、制造生产、科研、设计、信息和教育等工作人员的必备读物。

《包装工程》杂志为大 16 开, 半月刊, 每期定价 45.00 元, 全年定价 1080.00 元。连续出版物号 ISSN 1001-3563, CN 50-1094/TB。邮发代号: 78-30, 全国各地邮局(所)均可订阅。逾期可随时与编辑部以及杂志在外分支机构联系补订。