

SiO_x/PET复合薄膜的力学性能及阻隔性能

贝荣华¹, 黄崇杏¹, 陈强², 李志嘉¹, 苏红霞¹, 王健¹

(1.广西大学, 南宁 530004; 2.北京印刷学院, 北京 102600)

摘要: 目的 基于氧化硅(SiO_x)镀层优异的性能, 研究不同厚度的SiO_x层对SiO_x/PET复合薄膜力学性能和阻隔性能的影响, 以期得到性能较优的SiO_x/PET复合薄膜。方法 以自制的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜为基材, 采用等离子体增强化学气相沉积法沉积得到SiO_x层厚度分别为40, 150, 230, 320 nm的SiO_x/PET复合薄膜, 并进行傅里叶变换红外线光谱分析、力学性能和阻隔性能测试, 以及薄膜表观形貌分析。结果 沉积SiO_x层后, SiO_x/PET复合薄膜拉伸强度和断裂伸长率随SiO_x层厚度的增大先增大后减小, 氧气透过率和水蒸气透过率则出现明显衰减而后逐渐平缓的趋势。SiO_x层厚度达150~230 nm时, 复合薄膜的力学性能和阻隔性能表现较优, 拉伸强度、断裂伸长率、氧气透过率以及水蒸气透过率分别提高了约25.0%, 20.9%, 79.3%, 77.3%。结论 适宜厚度的SiO_x层可以使得SiO_x/PET复合薄膜同时具备较优的力学性能和阻隔性能。

关键词: SiO_x层; 结构成分; 力学性能; 阻隔性能

中图分类号: TB484.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)19-0057-06

Mechanical Properties and Barrier Properties of SiO_x/PET Composite Films

BEI Rong-hua¹, HUANG Chong-xing¹, CHEN Qiang², LI Zhi-jia¹, SU Hong-xia¹, WANG Jian¹

(1.Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the SiO_x/PET composite film with better performance by studying the effects of SiO_x layer of different thicknesses on the mechanical properties and the barrier properties of SiO_x/PET composite films, based on the excellent properties of silicon oxide (SiO_x) layer. The SiO_x layers with thickness of 40, 150, 230 and 320 nm were obtained by plasma enhanced chemical vapor deposition, with the self-made polyethylene terephthalate (PET) film as the base material. Then, the Fourier transform infrared spectroscopy, and tests of mechanical properties and barrier properties were carried out, and the apparent morphology of the film was analyzed. After the SiO_x layer was deposited, the tensile strength and elongation at break of the SiO_x/PET composite films were increased first and then decreased with the increase in the thickness of SiO_x layer, and the oxygen permeability and water vapor transmission rate were significantly attenuated and then gradually became gentle. The mechanical properties and barrier properties of the composite film were better when the thickness of SiO_x layer was in the range of 150~230 nm. The tensile strength, elongation at break, oxygen permeability and water vapor transmission rate were improved by about 25.0%, 20.9%, 79.3% and 77.3%, respectively. The SiO_x layer with suitable thickness can provide the SiO_x/PET composite film with better mechanical properties and the barrier properties.

KEY WORDS: SiO_x layer; structural composition; mechanical properties; barrier properties

在食品行业中, PET薄膜作为最常见的热塑性工程塑料, 以其优良的耐化学性而被广泛应用于包装领

域。随着微波加热技术的出现, 高强度、高阻隔性、微波透过性等逐渐成为对PET薄膜的新要求^[1]。塑料

收稿日期: 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(2156070033); 广西自然科学基金(2015jjAA60108)

作者简介: 贝荣华(1992—), 女, 广西大学硕士生, 主攻食品包装安全。

通讯作者: 黄崇杏(1977—), 女, 广西大学教授, 主要研究方向为绿色包装材料及食品包装安全。

包装材料往往存在强度及阻隔性不足等问题，粗暴的搬运方式、一些新的加热处理方式以及薄膜与食品间的传质现象，都有可能使得塑料包装材料对内装食品的保护作用失效或引起内装食品变质。在改善PET塑料薄膜强度的同时保证其阻隔性能，对于PET薄膜在食品行业的应用意义重大。

传统的塑料基阻隔性材料的阻隔层（如镀铝层），虽有较高的气体阻隔性，但仍存在不透明、不可微波加工等缺点，而 SiO_x 镀层凭借自身硬度大、阻隔性高、可微波透过性及透明度良好等优势而具备较佳的应用前景，其中北京印刷学院陈强课题组对 SiO_x 镀层的研究较为深入^[2-7]。目前，现有研究多为对带有 SiO_x 层的塑料复合包装材料阻隔性能^[8-11]的研究，也有关于通过优化制备工艺及参数以提高复合薄膜光电性能^[12]或者力学性能的研究，而关于同时改善 SiO_x/PET 复合薄膜力学性能和阻隔性能的文献鲜有报道。这里主要考察镀层厚度对复合薄膜基本性能的影响，以PET薄膜为基材，采用等离子体增强化学气相沉积（PECVD）法沉积 SiO_x 层，进而对复合薄膜的力学性能和阻隔性能进行分析，研究不同厚度的 SiO_x 层对 SiO_x/PET 复合薄膜力学性能和阻隔性能的影响，旨在得到力学性能和阻隔性能均较优的 SiO_x/PET 复合薄膜，为该复合薄膜在食品行业的应用提供科学理论依据。

1 实验

1.1 试剂与仪器

主要试剂：PET纯树脂（食品级，上海远纺CB608S），东莞市齐胜塑胶原料有限公司；增塑剂邻苯二甲酸二辛酯（DOP），广州市阳航化工有限公司；四（ β -（3,5-二叔丁基-4-羟基苯基）丙酸）季戊四醇酯（抗氧剂1010），三（2,4-二叔丁基）亚磷酸苯酯（抗氧剂168），东莞市常平显信塑化有限公司；碳化二亚胺抗水解稳定剂（WP200），广州安腾达化科技有限公司；六甲基二硅氧烷，分析纯，阿法埃莎（中国）化学有限公司。

主要仪器：小型流延试验机，广州金中机械有限公司；等离子体增强化学气相沉积装置，北京印刷学院自制；傅里叶变换红外线光谱分析仪（FTIR），NICOLET 6700，美国Thermo Scientific公司；电子万能材料试验机，美国INSTRON公司；氧气透过率测试仪，OX-TRAN Model 2/21，水蒸气透过率测试仪，PERMATRAN-W Model 3/61，美国MOCON公司；扫描电子显微镜（SEM），PHENOM WORLD Pro，PW-100-016，美国FEI公司。

1.2 PET薄膜基材的制备

PET纯树脂140 °C条件下连续烘烤2 h，烘干的

PET树脂放在烘箱中保温待用；按一定配比，将DOP、抗氧剂1010、抗氧剂168、碳化二亚胺与烘烤过的PET树脂高速混匀；待流延机加料口段、螺杆前段、螺杆后段及模头挤出段温度分别稳定在260, 260, 280, 280 °C后加入混合料进行熔融挤出，经流延、纵向拉伸、冷却并收卷制得厚度均匀的PET薄膜。PET膜厚度控制在（100±5）μm。

1.3 SiO_x/PET 薄膜的制备

采用等离子体增强化学气相沉积装置^[13]，见图1，以PET薄膜为基材沉积 SiO_x 层，制备 SiO_x/PET 薄膜。氩气作为稀释气体对基材薄膜进行预处理，时间为5 min，真空室气压保持15 Pa；氧气和六甲基二硅氧烷分别作为氧化剂和单体，控制压强比为2:1，真空室气压保持30 Pa，设置占空比为20%，并以沉积时间（1.5, 5, 7.5, 10.5 min）作为唯一变量，分别制备（40±5），（150±10），（230±10），（320±10）nm的 SiO_x 层。

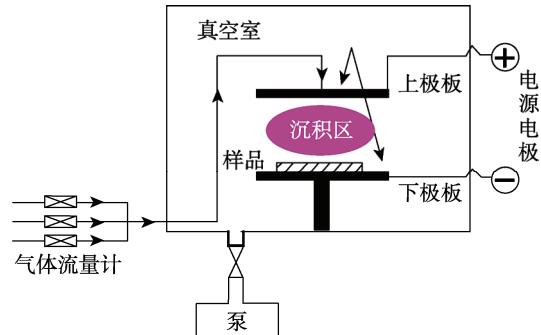


图1 等离子体增强化学气相沉积装置

Fig.1 Plasma enhanced chemical vapor deposition apparatus

1.4 SiO_x 层红外光谱分析

使用傅里叶变换红外线光谱分析仪对试样进行红外光谱测定，扫描范围为400~3000 cm⁻¹。

1.5 薄膜力学性能测试

根据GB/T 1040.3—2006，使用电子万能材料试验机测定薄膜的（纵向）拉伸强度和断裂伸长率。试样尺寸为15 mm×150 mm，设定标距为100 mm，拉伸速率为10 mm/min。

1.6 薄膜阻隔性能测试

根据GB/T 19789—2005，使用氧气透过率测试仪测量薄膜的氧气透过率（cm³/(m²·d)）。根据GB/T 26253—2010，使用水蒸气透过率测试仪测量薄膜水蒸气透过率（g/(m²·d)）。

1.7 薄膜表观形貌分析

采用扫描电子显微镜观察薄膜表面形貌，对薄膜进行脆断处理以观察断面形貌。扫描电压为5 kV。

2 结果与讨论

2.1 SiO_x 层结构成分

为探究1.3节中制备的不同厚度的 SiO_x 层结构成分是否相同, 这里利用FTIR进行分析。不同厚度 SiO_x 层的FTIR分析见图2。由图2可知, 在400~3000 cm^{-1} 的波段内出现了很强的Si—O—Si特征峰(1060 cm^{-1})以及相对较弱的Si—O—Si指纹峰(810 cm^{-1})^[4], 表明 SiO_x 成分的存在。443 cm^{-1} 处波峰归因于Si—O—Si的摇摆振动^[14], 1520 cm^{-1} 处为Si—OH特征吸收峰, 2295 cm^{-1} 处波峰归因于Si—H的伸缩振动^[15], 表明 SiO_x 层仍存在少量杂质。有研究表明 SiO_x 有3种结构, 分别为线性或环状结构(1023 cm^{-1} 附近)、网状结构(1063 cm^{-1} 附近)以及笼状结构(1135 cm^{-1} 附近)^[16], 这里所制备的 SiO_x 层其特征峰位于1060 cm^{-1} 处, 可见主要为网状结构。此外, 随 SiO_x 层厚度的增加, Si—O—Si特征峰、指纹峰及其他波峰强度逐渐增大, 且位置几乎没有发生偏移, 说明在沉积工艺和参数不变的情况下, 不同厚度的 SiO_x 层的结构和成分几乎不变。

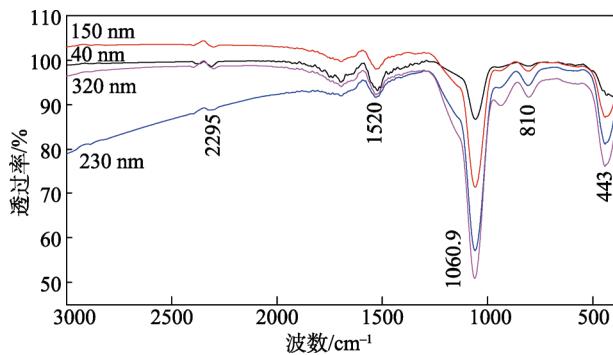


图2 不同厚度 SiO_x 层FTIR分析

Fig.2 FTIR analysis of SiO_x layers of different thicknesses

2.2 薄膜力学性能

拉伸强度和断裂伸长率是考察薄膜力学性能的重要指标, 不同厚度 SiO_x 层对薄膜拉伸强度和断裂伸长率的影响见表1。 SiO_x 层厚度为0 nm时代表未沉积的PET薄膜, SiO_x 层厚度大于0 nm时代表 SiO_x/PET 复合薄膜。

表1 沉积有不同厚度 SiO_x 层的 SiO_x/PET 复合薄膜的力学性能

Tab.1 The mechanical properties of SiO_x/PET composite films deposited with SiO_x layer of different thicknesses

SiO_x 厚度/nm	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
0	34.640	3.0
40	36.555	3.3
150	43.358	3.5
230	39.562	3.6
320	36.912	3.3

由表1可知, SiO_x 层可以增加 SiO_x/PET 复合薄膜的拉伸强度和断裂伸长率。PET基材的拉伸强度为34.640 MPa, 断裂伸长率为3.0%; 对比PET基材, SiO_x 层厚度为40 nm时, 复合薄膜拉伸强度和断裂伸长率提高了约5.5%和9.3%; SiO_x 层厚度增加到150 nm时, 拉伸强度达到最大, 提高了约25.0%; SiO_x 层厚度持续增加, 此时复合薄膜拉伸强度开始逐渐下降, 但其断裂伸长率仍处于增长状态, SiO_x 层厚度增长到230 nm时, 薄膜断裂伸长率达到最大, 提高了约20.9%, 此后断裂伸长率开始降低; 当 SiO_x 层厚度达320 nm时, 拉伸强度和断裂伸长率分别提高约5.7%和10.0%, 仍高于PET基材。原因可能在于, SiO_x 与PET基材表面存在较强的结合力, 可以对薄膜起到增强作用^[17], 使薄膜拉伸强度得到增大; 同时PET基材表面存在一定的孔洞等缺陷, 氧化硅沉积初期, 成膜粒子会先形成原子团对基材表面的孔洞和其他缺陷进行填补, 两者之间形成机械互锁状结构, 当对复合薄膜进行拉伸时, 分散在PET分子链间隙中的 SiO_x 粒子易产生滑移, 对作用在基材上的拉应力重新进行分配, 表现出一定的流延性^[18], 从而对薄膜起到增韧作用, 使得复合薄膜断裂伸长率得到增大。 SiO_x 层兼具陶瓷特性, 具有一定的脆性, 很难发生塑性变形^[19], 故 SiO_x 层达到一定厚度时, 薄膜发硬发脆, 强度和韧性降低, 其复合膜拉伸强度和断裂伸长率最终会出现逐渐减小的趋势。其中, 复合薄膜的拉伸强度和断裂伸长率的最大值不在同一厚度点下的现象有待进一步研究, 笔者猜测其原因可能在于制备工艺导致平行样品内部结构不均匀而存在一定误差。

2.3 薄膜阻隔性能

SiO_x 层作为复合塑料包装材料的功能层, 其最大的作用在于可作为内装食品与包装材料之间的阻隔层, 增强薄膜的阻隔性能。不同厚度的 SiO_x 层对薄膜氧气透过率和水蒸气透过率的影响见表2。

表2 沉积有不同厚度 SiO_x 层的 SiO_x/PET 复合薄膜的阻隔性能

Tab.2 The barrier properties of SiO_x/PET composite films deposited with SiO_x layer of different thicknesses

SiO_x 厚度/nm	氧气透过率/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	水蒸气透过率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$
0	35.563	17.221
40	32.829	9.305
150	12.405	6.967
230	8.298	6.171
320	7.359	3.915

由表2可知, PET薄膜的氧气透过率为 $35.563 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 沉积 SiO_x 层后, SiO_x/PET 复合薄膜的氧气透过率有所下降, 氧化硅层厚度达40, 150,

230, 320 nm时, 复合薄膜的氧气透过率下降程度依次为7.7%, 65.1%, 76.7%, 79.3%。不难看出, 当 SiO_x 层厚度达到150 nm时, 其氧气透过率有一个明显的衰减, 此后其衰减趋势逐渐减缓。由表2可知, PET薄膜的水蒸气透过率为 $17.221 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 沉积 SiO_x 层后, 随 SiO_x 层厚度的增加, SiO_x/PET 复合薄膜的水蒸气透过率下降程度依次为46.0%, 59.5%, 64.2%, 77.3%, 即先有一个明显衰减, 而后衰减趋势逐渐减缓。分析其原因可能在于, PET基材存在一定的孔洞等缺陷, 为氧气和水蒸气分子的渗透提供了便利^[20], 根据气体分子的渗透理论, 当PET基材表面被镀上氧化硅层时, 基材表面的缺陷得到修复, 气体分子的渗透通道被隔断, 膜厚度的增加意味着渗透距离的变长, 这在很大程度上会影响甚至阻碍气体分子的渗透, 因而沉积 SiO_x 层薄膜的阻隔性能有一个明显提高。厚度超过150 nm的 SiO_x 层已经成为致密且均匀的膜, 能完全覆盖PET薄膜表面, 对气体分子渗透通道的隔断作用已经形成并趋于稳定, 故当厚度持续增加时, 复合膜的阻隔性能不再有明显变化^[6]。

2.4 薄膜表观形貌

这里选择PET膜及力学性能和阻隔性能较佳的 SiO_x/PET 复合薄膜(SiO_x 层厚度为230 nm)进行SEM分析, PET薄膜(沉积前)和复合薄膜(沉积后)的表观形貌见图3, 复合薄膜的断面情况见图4。

由图3可以看出, 未进行沉积的PET薄膜表面较为粗糙, 存在许多缺陷, 如大量的凸起和小颗粒、少量的孔洞以及划痕和沟壑, 整体来说并不光滑。这可能与PET薄膜的制备工艺有关, 这里的PET膜采

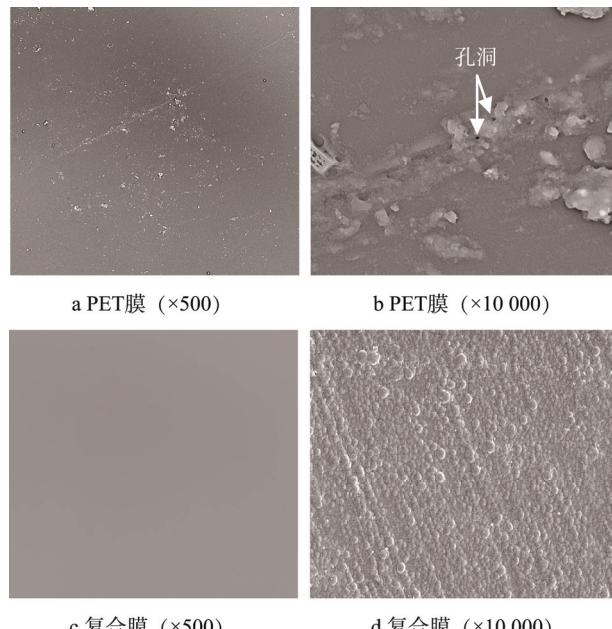


图3 沉积前后薄膜表面整体形貌分析
Fig.3 Overall morphology analysis of the un-deposited film and the deposited film

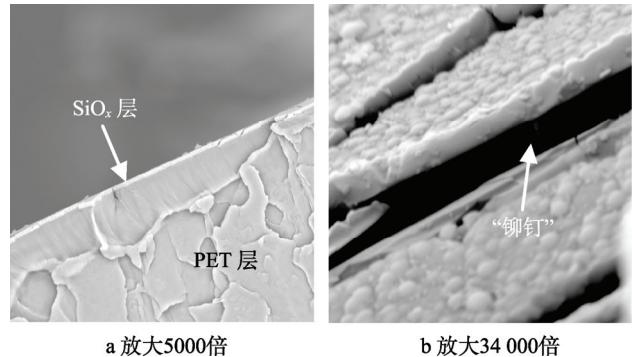


图4 SiO_x/PET 薄膜断面形貌分析
Fig.4 Section morphology analysis of SiO_x/PET film

用小型流延试验机制备, 母料熔融流延过程中因重力作用沿纵向有轻微拉伸, 但未经过横向拉伸, 在流延过程中未彻底冷却的薄膜与牵引辊直接接触, 极易受牵引辊表面形貌的影响, 因此在沿辊筒牵引方向会存在划痕和沟壑, 这些缺陷在很大程度上破坏了PET薄膜的力学性能和气体阻隔性能^[21~22]。沉积有230 nm SiO_x 层的复合薄膜表面较为平整和光滑, 表面的硅氧粒子排布紧密规则, 连接成片, 可知此时的 SiO_x 层结构致密均匀, 填补和修复了PET薄膜表面的缺陷, 气体分子的渗透通道被延长甚至切断, 薄膜的阻隔性能得到提升。

由图4a可知, SiO_x 层牢固附着在PET基材表面, 可知两者间存在一定的附着力, 从而增强薄膜强度。在脆断过程中, 复合膜受力后 SiO_x 层与PET基材分离进而暴露出“铆钉”结构(如图4b), 铆钉可嵌入PET基材的孔洞中, 两者形成“锚链”结构或机械互锁^[23], 进而实现 SiO_x 层对PET基材表面孔洞的填补作用, 加强 SiO_x 层与PET基材之间的附着程度, 提高薄膜强度。另外, 进入PET基材内的硅氧粒子在薄膜受拉应力过程中起到滑移作用, 重新分配作用在薄膜上的拉应力, 薄膜韧性增大。

3 结语

1) 以PET薄膜为基材, 采用PECVD法沉积 SiO_x 镀层, FTIR结果表明, 随 SiO_x 层厚度的增加, Si—O—Si特征峰(1060 cm^{-1})和指纹峰(810 cm^{-1})强度逐渐增大且位置没有发生改变, 表明不同厚度 SiO_x 层的结构和成分几乎不变。

2) 对比PET薄膜, 随 SiO_x 层厚度的增大, SiO_x/PET 复合薄膜的拉伸强度和断裂伸长率均表现出先增大后减小的趋势, 氧气透过率和水蒸气透过率则出现明显衰减而后逐渐平缓的趋势, 但整体优于PET薄膜。其中 SiO_x 层厚度为150~230 nm时, 复合薄膜表现出较优的力学性能和阻隔性能, 拉伸强度和断裂伸长率分别提高了25.0%和20.9%, 氧气透过率和水蒸气透过率

分别降低了79.3%和77.3%。

综上所述, SiO_x 层并不是越厚越好, 当其厚度超过一定值后, 复合薄膜的性能逐渐趋于稳定甚至有可能降低, 故实际生产应用过程需要根据产品需求来选择合适的 SiO_x 层厚度, 以保证 SiO_x/PET 复合薄膜同时具备较优的力学性能和阻隔性能。

参考文献:

- [1] 孔凡真. 塑料软包装材料的发展现状[J]. 中国包装, 2012(1): 18—21.
KONG Fan-zhen. The Development of Plastic Flexible Packaging Materials[J]. China Packaging, 2012(1): 18—21.
- [2] FEI F, WANG Z D, CHEN Q, et al. Study of Functional Barrier Layer on PVC by PECVD for Migrations Resistant[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 228: 61—66.
- [3] FEI F, WANG Z D, YANG L Z, et al. Structural Control of SiO_x Coatings and Their Migration-resistance Properties[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 200: 207—215.
- [4] 陈强, 孙运金, 周美丽, 等. 等离子体技术制备氧化硅阻隔层薄膜的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 8—11.
CHEN Qiang, SUN Yun-jin, ZHOU Mei-li, et al. Preparation of Silica Barrier Layer Films by Plasma Technology[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 8—11.
- [5] 齐凤阳, 陈强, 刘福平. Roll-to-roll MPECVD 中氧气浓度对氧化硅薄膜性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2012(9): 841—844.
QI Feng-yang, CHEN Qiang, LIU Fu-ping. Effect of Oxygen Concentration on Properties of Silica Films in Roll-to-roll MPECVD[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2012(9): 841—844.
- [6] 王正铎, 张跃飞, 葛袁静, 等. 氧化硅阻隔膜的制备及对水蒸气的阻隔特性研究[J]. 包装工程, 2004, 25(5): 156—158.
WANG Zheng-duo, ZHANG Yue-fei, GE Yuan-jing, et al. The Preparation of Silicon Oxide Barrier Film and Its Barrier Properties to Water Vapor[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(5): 156—158.
- [7] 张改梅, 陈强, 何存富, 等. 塑料薄膜基上镀纳米 SiO_x 涂层的表征及性能研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2010(1): 422.
ZHANG Gai-mei, CHEN Qiang, HE Cun-fu, et al. Research on Characterization and Properties of Nano- SiO_x Coating on Plastic Film[J]. China Journal of Printing and Packaging, 2010(1): 422.
- [8] 刘玉兰, 汪建华, 熊礼威, 等. PET 材料表面制备氧化硅薄膜的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32 (5): 70—73.
LIU Yu-lan, WANG Jian-hua, XIONG Li-wei, et al. Preparation of Silicon Oxide Film on PET Surface[J]. Journal of Wuhan University of Engineering, 2010, 32(5): 70—73.
- [9] PLOG S, SCHNEIDER J, WALKER M, et al. Investigations of Plasma Polymerized SiO_x Barrier Films for Polymer Food Packaging[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205: 165—170.
- [10] BANG S H, HWANG N M, KIM H L. Permeation Barrier Properties of Silicon Oxide Films Deposited on Polyethylene Terephthalate (PET) Substrate Using Roll-to-roll Reactive Magnetron Sputtering System[J]. Microelectronic Engineering, 2016, 166: 39—44.
- [11] 刘壮, 林晶, 孙智慧, 等. 缠绕式射频磁控溅射聚酯表面沉积氧化硅薄膜的研究[C]// 中国真空学会2008学术年会论文集, 2008: 94—97.
LIU Zhuang, LIN Jing, SUN Zhi-hui, et al. Deposition of Silicon Oxide Film on the Surface of Polyester by Wound RF Magnetron Sputtering[C]// Proceedings of the 2008 Annual Conference of China Vacuum Society, 2008: 94—97.
- [12] 张文龙, 蒋耿杰, 穆娟, 等. LDPE/ SiO_x 纳米复合材料的制备及电性能研究[J]. 塑料助剂, 2011(3): 31—34.
ZHANG Wen-Long, JIANG Geng-Jie, MU Juan, et al. Preparation and Electrical Properties of LDPE/ SiO_x Nanocomposites[J]. Plastics Additives, 2011(3): 31—34.
- [13] FEI F, LIU Z, CHEN Q, et al. Kinetic Migration of Diethylhexyl Phthalate in Functional PVC Films[J]. Plasma Science and Technology, 2012, 14(2): 152—156.
- [14] AY F, AYDINLI A. Comparative Investigation of Hydrogen Bonding in Silicon Based PECVD Grown Dielectrics for Optical Waveguides[J]. Optical Materials, 2004, 26(1): 33—46.
- [15] 韩尔立, 陈强, 葛袁静. 射频等离子体聚合 SiO_x 薄膜的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2006, 26(6): 482—486.
HAN Er-li, CHEN Qiang, GE Yuan-jing. Study on RF Plasma Polymerization of SiO_x Films[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2006, 26(6): 482—486.
- [16] GRILL A, NEUMAYER D A. Structure of Low Dielectric Constant to Extreme Low Dielectric Constant SiCOH Films: Fourier Transform Infrared Spectroscopy Characterization[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(10): 6697—6707.
- [17] 丁燕鸿. 微/纳米二氧化硅形貌结构调控及其复合材料研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
DING Yan-hong. Structural Regulation of Micro/Nano-Silica Morphology and Its Composite Materials[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [18] 杜阳. 基于有机硅溶胶制备 LDPE/ SiO_x 纳米复合材料的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.

- DU Yang. Study on Preparation of LDPE/SiO_x Nano-composites Based on Silicone Sol[D]. Harbin: Harbin Polytechnic University, 2012.
- [19] 张际亮, 孙学鹏, 郎剑, 等. 铝表面改性 SiO_x 薄膜力学性能研究[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(8): 275—278.
- ZHANG Ji-liang, SUN Xue-peng, LI Jian, et al. Mechanical Properties of SiO_x Films Modified by Aluminim[J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2007, 28(8): 275—278.
- [20] 刘玉兰. 采用 MPCVD 法在 PET 上制备介质阻隔材料的研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2011.
- LIU Yu-lan. Study on Preparation of Dielectric Barrier Materials on PET by MPCVD[D]. Wuhan: Wuhan University of Engineering, 2011.
- [21] FEI F, CHEN Q, LIU Z, et al. The Application of Na-
- no-SiO_x Coatings as Migration Resistance Layer by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2012, 32 (4): 755—766.
- [22] YASUHARA S, CHUNG J, TAJIMA K, et al. Structure-Designable Formation-Method of Super Low-k SiOC Film by Neutral-Beam-Enhanced-CVD[C]// International Interconnect Technology Conference, 2008: 73—75.
- [23] 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, 2(5): 61—64.
- ZHANG Xin-lin, XU Wen-cai, WANG Zheng-duo, et al. Preparation and Barrier Properties of SiO_x Layer on Polylactic Acid Film[J]. China Journal of Printing and Packaging, 2010, 2(5): 61—64.

《绿色印刷》特色栏目征稿函

绿色是世界各国普遍认同的,不仅体现可持续发展理念、以人为本、先进科技水平,也是实现节能减排与低碳经济的重要手段。绿色印刷的产业链主要包括绿色印刷材料、印刷图文设计、绿色制版工艺、绿色印刷工艺、绿色印后加工工艺、环保型印刷设备、印刷品废弃物回收与再生等。通过绿色印刷的实施,可使包括材料、加工、应用和消费在内的整个供应链系统步入良性循环状态。大力发展绿色印刷、绿色包装,是发展循环经济的本质要求,是建立资源节约型社会、促进人与自然和谐发展的有力举措。

鉴于此,本刊拟围绕“绿色印刷”这一主线,作系列的专项报道。编辑部特邀请绿色印刷领域的专家为本栏目撰写稿件,以期进一步提升本刊的学术质量和影响力。稿件以研究论文为主,也可为综述性研究,请通过网站投稿,编辑部将快速处理并优先发表。

编辑部电话: 023-68792294 网址: www.packjour.com

《包装工程》编辑部