

## 聚乳酸/肉桂醛复合纳米纤维膜的制备及表征

李林建, 刘俊渤\*, 唐珊珊, 常海波, 梁大栋

(吉林农业大学资源与环境学院, 吉林 长春 130118)

**摘 要:** 采用水溶液饱和法制备了肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物, 将其添加到聚乳酸(PLA)溶液中, 利用静电纺丝技术制备 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜。利用扫描电子显微镜(SEM)探讨了静电纺丝条件对 PLA 纳米纤维膜纤维直径及表面形貌的影响, 通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)对 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜做了特征官能团分析, 并对其热力学性能、力学性能及抗菌性能进行了表征。结果表明, 制备的 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜纤维形态良好, 平均直径为 175 nm, FT-IR 研究显示肉桂醛与 PLA 之间属于物理混合。该复合纳米纤维膜热分解温度 265.52  $^{\circ}\text{C}$ , 拉伸强度为 2.45 MPa, 对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌都具有抑菌性, 其中对金黄色葡萄球菌的抑菌性最强。

**关 键 词:** 聚乳酸; 肉桂醛; 静电纺丝; 复合纳米纤维膜; 性能

中图分类号: TQ321; O631 文献标识码: B 文章编号: 1001-9278(2014)02-0079-07

## Preparation and Characterization of Ploy(lactic acid)/Cinnamic Aldehyde Composite Nanofiber Membrane

LI Linjian, LIU Junbo\*, TANG Shanshan,  
CHANG Haibo, LIANG Dadong

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** A cinnamic aldehyde/ $\beta$ -cyclodextrin complex was prepared by saturated aqueous solution method, then the complex was added to a PLA aqueous solution. The obtained solution was electrospun to a PLA/cinnamic aldehyde composite membrane. The effects of weight ratio of acetone to N, N-Dimethyl formamide (DMF), PLA concentration, applied voltage, distance of needle to collector on the diameter of the nanofiber and morphology of membrane were investigated by scanning electron microscope (SEM). The functional groups of the composite membrane were analyzed via fourier transform infrared spectrum (FT-IR). The thermodynamic, mechanical, and antibacterial properties of the composite membrane were studied. The result showed that the average diameter of nanofiber in the composite membrane was 175 nm, thermal decomposition temperature was 265.52  $^{\circ}\text{C}$ , the tensile strength was 2.45 MPa. FT-IR showed that the interaction between cinnamic aldehyde and PLA was physical in nature. The composite membrane possessed an antibacterial ability to Escherichia coli, Staphylococcus aureus and Bacillus subtilis.

**Key words:** poly(lactic acid); cinnamic aldehyde; electrospinning; composite nanofiber membrane; performance

### 0 前言

一维纳米功能材料是国际上的研究热点之一, 其

制备方法有气相沉积法、模板法、静电纺丝法及溶剂热法等。其中静电纺丝法由于设备简单, 方便高效及制备的纤维具有较大的比表面积与较高的孔隙率, 使其不仅在实验室研究中备受关注<sup>[1-2]</sup>, 而且在药物释放及组织工程领域的应用研究更是受到了广泛的重视<sup>[3-4]</sup>。

肉桂醛是一种天然广谱抗菌剂, 且具有很好的药

收稿日期: 2013-11-01

\* 联系人, liujb@mail.ccit.edu.cn

理活性。由于肉桂醛低浓度时对黄曲霉、白地霉、黑曲霉、酵母菌等均有强烈的抑菌作用<sup>[5]</sup>,且不受 pH 值影响,因此无论对于酸碱性物质,肉桂醛都具有很强的杀菌功能,可广泛用于防腐、防霉及保鲜,近年来得到许多研究者的重视<sup>[6-7]</sup>。研究表明,肉桂醛对肉类及家禽类产品表面的沙门氏菌及大肠杆菌具有很强的抗菌作用,能有效控制食物表面有害病原体的传播<sup>[8]</sup>。但肉桂醛易挥发,使其杀菌作用不持久,经过  $\beta$ -环糊精包合后具有缓释特性,可达到气态长效杀菌效果。

PLA 是以玉米等农作物淀粉为原料,由生物发酵生成乳酸,然后经过化学合成得到的可生物吸收与降解的生物材料,因不污染环境,具有良好的生物相容性、可降解性及力学性能等优点而被广泛应用于医用材料及食品包装包材<sup>[9-10]</sup>。但研究发现单一 PLA 聚合物制备的材料存在功能上的不足或缺陷,因此有关 PLA 复合材料制备的报道<sup>[11-12]</sup> 越来越多被关注,但添加肉桂醛的 PLA 复合纳米纤维膜却少有文献报道。将广谱天然抗菌剂肉桂醛添加到生物可降解高分子聚合物 PLA 溶液中,利用静电纺丝技术制备 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜,不仅可赋予纤维膜的抗菌性能,使其拥有长效广谱抗菌、杀菌作用,同时又可降低膜材料在生产、使用及废弃后对环境的污染。

本研究采用静电纺丝法制备了 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜,并探讨了溶剂比例、纺丝液浓度、纺丝电压、接收距离等因素对 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜的纤维直径及表面形态的影响,同时对其性能进行了表征。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PLA,薄膜级,相对分子质量为  $1.0 \times 10^5$ ,深圳光华伟业实业有限公司;

$\beta$ -环糊精,分析纯,天津市光复精细化工研究所;

肉桂醛,分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

N,N-二甲基甲酰胺(DMF),分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

丙酮,分析纯,北京化工厂;

酵母提取物,生物试剂,北京奥博星生物技术有限公司;

胰蛋白胨,生物试剂,北京奥博星生物技术有限公司;

NaCl,分析纯,天津市天新精细化工开发中心;

琼脂,分析纯,兰州市鹏程生物技术有限公司。

### 1.2 主要设备及仪器

恒温加热搅拌机,501,上海实验仪器有限公司;

高压直流电源,DW-P503-1ACCC,天津市东文高压电源厂;

热失重分析仪(TG),SEM,JSM-6510,日本电子株式会社;

FTIR,Spectrum RSIFT-IR System,德国 Perkin Elmer 公司;

微型电子拉力机,HZ(08)X-O,上海黑子仪器有限公司;

真空干燥箱,DZF-6020,上海恒科仪器有限公司;

综合型热分析仪,ZRY-ZP,北京大学仪器厂;

高压蒸汽灭菌锅,LDZX-30KBS,上海申安医疗器械厂;

恒温培养箱,BPH-9082,上海凯朗仪器设备厂;

恒温恒湿震荡培养箱,LHS-250HC-I,上海一恒科技有限公司;

电子数显卡尺,0-150 mm,哈尔滨量具刀具集团有限公司。

### 1.3 样品制备

称取一定质量的  $\beta$ -环糊精加入到 45 °C 的水中制成饱和溶液,按 1 g  $\beta$ -环糊精加入 0.1 mL 肉桂醛的比例添加肉桂醛,恒温搅拌 1 h;包合完成后,降温析出固体粉末得到包合物,用乙醚洗脱包合物直至洗脱溶液中检测不到肉桂醛为止,置于烘箱 50 °C 干燥 2 h 得到肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物;

保持环境温度为 20~22 °C,相对湿度为 40%~50%;将肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物添加到一定浓度的 PLA 纺丝溶液中,40 °C 恒温水浴加热搅拌 5 h;待溶液降温到室温,转入注射器中(用 7 号针头作为纺丝喷头),以铝箔(15 cm×15 cm)作为接收器,调节接收距离和纺丝电压制备 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜;

PLA 纤维膜的制备过程除不加肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物外,其余过程与 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜制备条件相同。

### 1.4 性能测试与结构表征

根据文献<sup>[5]</sup>报道的方法,配制肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物无水乙醇溶液测定肉桂醛含量,按照式(1)计算得到包合率 89.25 %;

$$R = M_c / M_b \times 100 \quad (1)$$

式中  $R$ ——包合率, %

$M_c$ ——包合物中肉桂醛的含量

$M_b$ ——包合前肉桂醛添加量

使用 SEM 进行纤维形貌的观察,采用 Nano Measurer 1.2 软件对纤维的直径进行测量,统计直径分布,比较不同样品纤维形貌的差异,取样品 100 根;

使用 FTIR, 利用 KBr 压片法制样, 设置扫描范围  $500\sim 2500\text{ cm}^{-1}$ , 测定真空干燥后纤维膜样品的 FTIR 吸收光谱;

采用 TG 测定纤维膜的热稳定性, 称取样品 10 mg, 氮气气氛, 以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  速度升温, 测定温度范围为  $30\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 分析复合纤维膜的分解温度;

在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 65% 湿度条件下测定纤维膜的拉伸性能, 将纤维膜样品平衡 24 h 后裁剪成  $50\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  样条, 选择 5 个点测量其厚度并计算其平均厚度, 通过拉力试验测试纤维膜的拉伸强度及断裂伸长率, 每个样品夹持长度为 10 mm, 拉伸速率为  $5\text{ mm}/\text{min}$ , 5 次测定取其平均值;

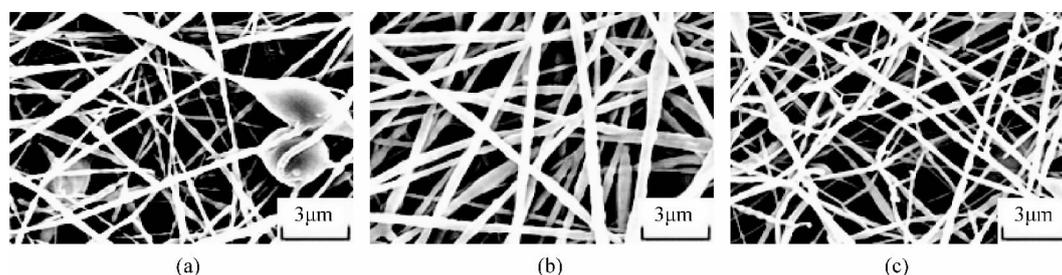
抑菌性测定: 使用 LB 培养基, 培养基在高压蒸汽灭菌锅中灭菌, 将大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌利用恒温恒湿震荡培养箱进行活化, 于  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  培养 1 d 时间, 将裁剪好的样品 (直径 12 mm 圆片) 膜覆盖在涂有大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌

的培养皿上, 进行抑菌圈实验, 每组平行 5 次试验, 培养皿置于  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  恒温培养箱培养 18 h 后取出观察抑菌圈大小。

## 2 结果与讨论

### 2.1 混合溶剂体积比例对纤维形貌的影响

静电纺丝纤维直径和形貌受许多因素的影响, 其中溶剂是主要影响因素之一。本研究使用丙酮和 DMF 混合溶液作为 PLA 的纺丝溶剂, 当 PLA 质量分数为 10%, 纺丝电压 12 kV, 接收距离 13 cm, 丙酮和 DMF 混合溶剂体积比例 1:2 时, 制备的纤维膜由于 DMF 含量较多, 纺丝过程溶剂挥发较慢, PLA 溶液部分凝胶造成纤维中出现了粘连串珠; 当混合溶剂体积比例 1:1 时, 纤维膜纤维连续性及平整性较好, 没有串珠或断丝现象。而混合溶剂体积比例 2:1 时, 此时丙酮含量较高, 溶剂挥发过快, 极易造成针孔尖端阻塞, 而使静电纺过程无法正常连续进行, 结果图 1 所示。



丙酮/DMF: (a) 1:2 (b) 1:1 (c) 2:1

图 1 丙酮和 DMF 不同体积比例纳米纤维膜的 SEM 照片

Fig. 1 SEM for nanofiber membranes with different volume ratio of acetone and DMF

### 2.2 纺丝液浓度对纤维形貌及直径的影响

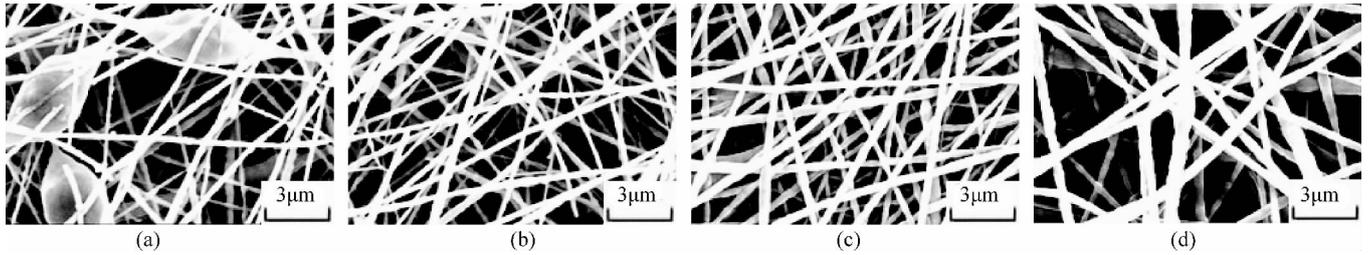
固定混合溶剂体积比例 1:1, 在纺丝电压 12 kV, 接收距离 15 cm 的条件下, 不同质量分数 PLA 纺丝液 (6%、8%、10%、12%) 制备的 PLA 纳米纤维膜 SEM 照片见图 2。由图 2 可知, PLA 质量分数为 6% 时, 纺丝溶液浓度较低, 黏度值偏低, 纤维在电场中不易拉伸且溶剂挥发不完全, 导致纤维中有断裂和串珠现象。随着溶液浓度的增加, 断裂和串珠逐渐消失, 所得纤维直径随着溶液浓度的增加呈现逐渐增大的趋势, PLA 质量分数 8%、10%、12% 时, 其纤维平均直径分别为 189、316、401 nm。静电纺丝过程中针头喷射出来的带电射流直径为影响纤维细度的重要因素, 带电射流半径与溶液的浓度成正比<sup>[13]</sup>。PLA 质量分数为 8% 时, 依然存在少许纤维断裂现象; 而 PLA 质量分数为 12% 时, 溶液浓度过高, 黏度过大, 纤维不易“分裂”, 导致所得到的纤维直径较大且分布离散度较大, 因此, 选择 PLA 质量分数 10% 的溶液作为纺

丝液。

### 2.3 操作电压和接收距离对纤维形貌及直径的影响

图 3(a)、(b)、(c) 分别是固定纺丝电压 12 kV, 接收距离分别为 13、15、17 cm 时制备 PLA 纤维膜 SEM 照片。随着接收距离的增大, 纤维平均直径逐渐减少, 但不显著, 分别为 337、316、301 nm。静电纺丝过程中, 针头喷射的带电射流半径与纺丝距离成反比<sup>[13]</sup>, 即纺丝距离的增大致使带电射流半径减小, 从而纤维直径也随之减小。接收距离 17 cm 时, PLA 纤维膜的纤维直径相对较小且粗细比较均匀, 因此采用 17 cm 作为静电纺丝的接收距离。

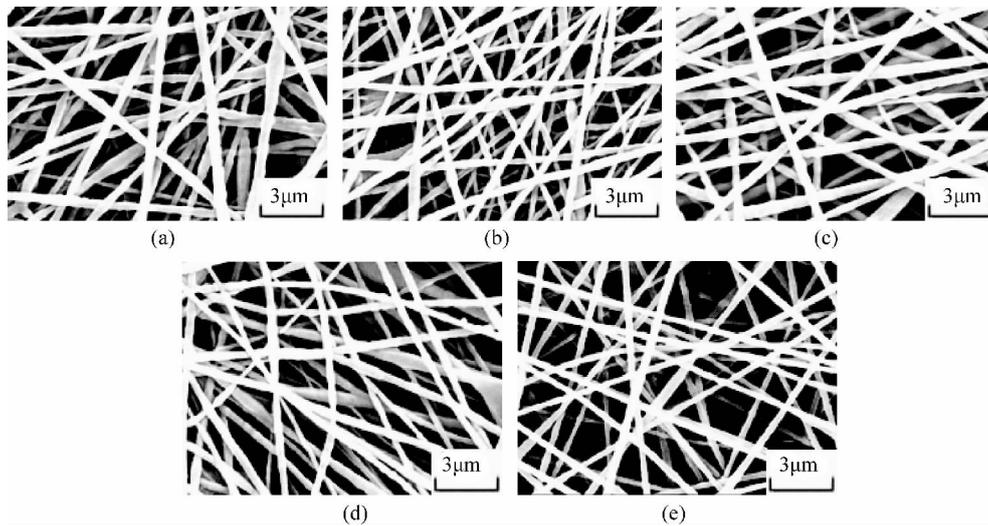
图 3(c)、(d)、(e) 是固定接收距离 17 cm, 纺丝电压分别为 12、15、18 kV 时制备 PLA 纤维膜 SEM 照片。随着纺丝电压的提升, 纤维平均直径逐渐降低, 分别为 301、259、235 nm。这是因为随着电压的增大, 电场强度增强, 纤维直径逐渐减小。操作电压增大到 18 kV 时, PLA 纤维膜的纤维直径最小且分布离



PLA 浓度/%:(a) 6 (b) 8 (c) 10 (d) 12

图 2 不同 PLA 浓度纳米纤维膜的 SEM 照片

Fig. 2 SEM for nanofiber membranes with different PLA concentrations



电压/kV,接收距离/cm:(a) 12, 13 (b) 12, 15 (c) 12, 17 (d) 15, 17 (e) 18, 17

图 3 PLA 纳米纤维膜的 SEM 照片和纤维直径分布

Fig. 3 SEM for PLA nanofiber membrane

散度较小。综合以上研究,本研究将采用 PLA 质量分数 10%,接收距离 17 cm,纺丝电压 18 kV 的纺丝工艺条件制备 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜,该条件下制备得到的 PLA 纳米纤维膜直径分布如图 4 所示。

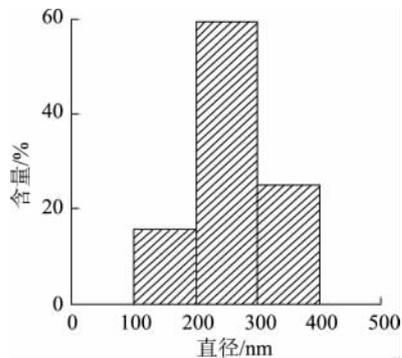
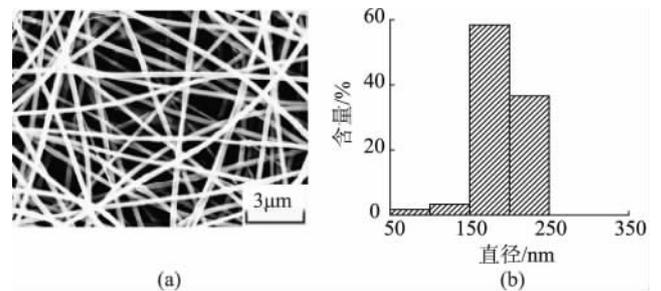


图 4 PLA 纳米纤维膜的纤维直径分布

Fig. 4 Fiber diameter distribution of PLA nanofiber membrane

#### 2.4 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜的微观结构

图 5 是 PLA 质量分数 10%,接收距离 17 cm,纺丝电压 18 kV 时,肉桂醛/β-环糊精包合物添加质量 0.



(a) SEM 照片 (b) 纤维直径分布

图 5 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜的 SEM 照片和纤维直径分布

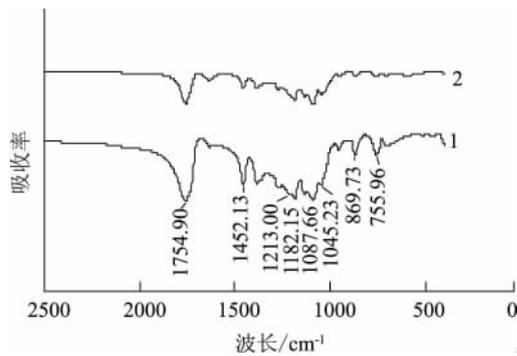
Fig. 5 SEM and fiber diameter distribution for PLA/cinnamic aldehyde composite nanofiber membrane

8 g,即在纺丝液中占质量分数 4%时制备的 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜的 SEM 照片及直径分布图。相同纺丝条件下,PLA 纤维膜的平均直径为 235 nm,PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜平均直径为 175 nm,和 PLA 纤维膜相比,肉桂醛/β-环糊精包合物的加入显著降低了复合纤维膜的纤维直径。这是由于肉桂醛/β-环糊精包合物的添加,改变了聚合物纺丝溶液的物理性质<sup>[14]</sup>(如极性、表

面张力、电导率等),致使纤维直径减少。

## 2.5 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜的 FTIR 分析

从图 6 中可以看出,PLA 纤维膜的 FTIR 对应的特征吸收峰主要是在  $755.96\text{ cm}^{-1}$ 、 $869.73\text{ cm}^{-1}$  的 C—H 振动吸收峰, $1045.23\text{ cm}^{-1}$ 、 $1087.66\text{ cm}^{-1}$  的 C—O 吸收峰, $1182.15\text{ cm}^{-1}$  的 C—O—C 伸缩振动吸收峰, $1213.00\text{ cm}^{-1}$  的 C—C, $1452.13\text{ cm}^{-1}$  的  $-\text{CH}_3$  和  $1754.90\text{ cm}^{-1}$  的 C=O 振动吸收峰。添加肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物后,其特征官能基并无明显的偏移或改变,因此该 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜肉桂醛与 PLA 之间属于物理混合。



1—PLA 膜 2—PLA/肉桂醛纳米纤维膜

图 6 PLA 和 PLA/肉桂醛纳米纤维膜的 FTIR

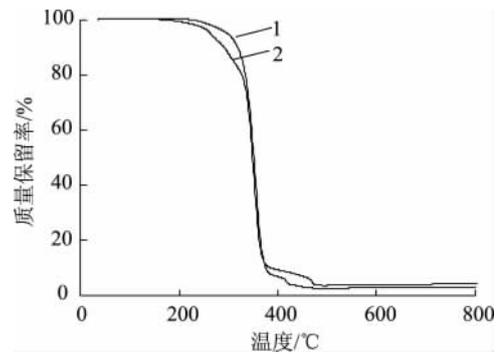
Fig. 6 FTIR spectra of PLA and PLA/cinnamic aldehyde nanofiber membranes

## 2.6 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜的热稳定性

图 7 为 PLA 纤维膜与 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜的 TG 谱图。以 TG 曲线外推基线与曲线最大斜率处切线的交点温度作为的初始热分解温度,图中可以看出,PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜和 PLA 纤维膜的初始热分解温度分别为  $265.52$ 、 $298.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,显然 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜初始热分解温度比 PLA 纤维膜低,这是由于肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物的热分解温度在  $220\sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间<sup>[15]</sup>,在热分解过程中,PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜中的包合物先分解使其复合纳米纤维膜热分解初始温度降低了。通过对比还可以看出,两种纤维膜在  $310\sim 380\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间都出现了极大的质量损失,这是由于 PLA 主链的分解引起的<sup>[16]</sup>。

## 2.7 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜的力学性能

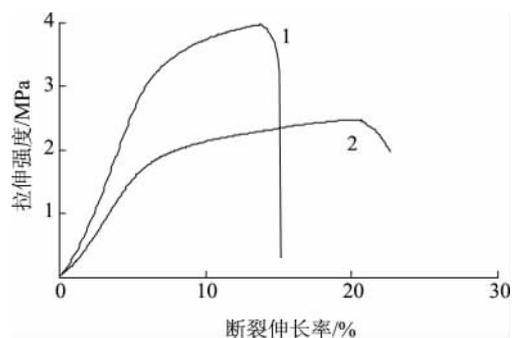
从图 8 中可以看出,PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜的拉伸强度为  $2.45\text{ MPa}$ ,断裂伸长率为  $19.94\%$ 。PLA 纤维膜的拉伸强度为  $4.02\text{ MPa}$ ,断裂伸长率为  $13.23\%$ 。相对 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜,PLA 纤维膜的拉伸强度较大,这是由于其纤维直径较大,纤维之间相互交错使其拉伸强度大,断裂伸长率小,而



1—PLA 膜 2—PLA/肉桂醛纳米纤维膜

图 7 PLA 和 PLA/肉桂醛纳米纤维膜的 TG 谱图

Fig. 7 TG of PLA and PLA/cinnamic aldehyde nanofiber membranes



1—PLA 膜 2—PLA/肉桂醛纳米纤维膜

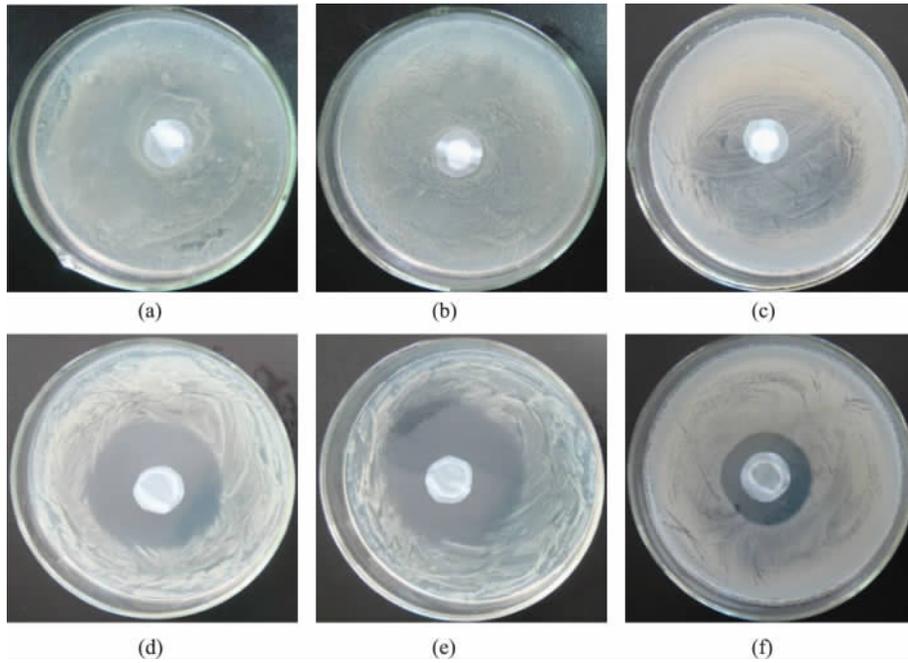
图 8 PLA 和 PLA/肉桂醛纳米纤维膜的拉伸强度曲线

Fig. 8 Tensile stress-strain curves of PLA and PLA/cinnamic aldehyde nanofiber membranes

肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物的添加,使纤维膜的纤维直径减小,从而导致 PLA/肉桂醛复合纤维膜拉伸强度降低。

## 2.8 抗菌性能的研究

图 9 是 PLA 纤维膜和 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜对大肠杆菌[图 9(a)、(d)]、金黄色葡萄球菌[图 9(b)、(e)]和枯草芽孢杆菌[图 9(c)、(f)]的抑菌圈实验,从图中可以看出,PLA 纤维膜对大肠杆菌[图 9(a)]、金黄色葡萄球菌[图 9(b)]和枯草芽孢杆菌[图 9(c)]的生长无抑制作用。添加了肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物之后,PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜对大肠杆菌[图 9(d)]、金黄色葡萄球菌[图 9(e)]和枯草芽孢杆菌[图 9(f)]产生了明显的抑菌圈,抑菌圈直径分别为  $29$ 、 $31$ 、 $24\text{ mm}$ 。这主要是由于从膜中释放出的肉桂醛通过破坏大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌的细胞壁并渗入其细胞内,从而破坏细胞器而起到杀菌作用。由抑菌圈直径可以看出 PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌的抗菌效果最强,对枯草芽孢杆菌的抑菌性最弱。



样品:(a)、(b)、(c) PLA (d)、(e)、(f)PLA/肉桂醛  
 细菌种类:(a)、(d)大肠杆菌 (b)、(e)金黄色葡萄球菌 (c) (d)枯草芽孢杆菌

图 9 PLA 和 PLA/肉桂醛纳米纤维膜的抑菌性能

Fig. 9 Antibacterial ability of PLA and PLA/cinnamic aldehyde nanofiber membranes

### 3 结论

(1)复合纤维膜最佳制备条件为混合溶剂丙酮/DMF 体积比为 1 : 1,PLA 质量分数 10 %,接收距离 17 cm,纺丝电压 18 kV;

(2)肉桂醛与 PLA 之间属于物理混合,具有较好的热稳定性与力学性能;

(3)PLA/肉桂醛复合纳米纤维膜对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌均具有良好抑菌性,其中对金黄色葡萄球菌的抑菌性最强。

#### 参考文献:

[1] Feng C H, Ruan S P, Zhu L H, et al. Preparation and Ethanol Sensing Properties of ZnO Nanofibers[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2011, 27 (5): 720-723.

[2] Lu J, Liu J G, Song X F, et al. Sandwich Structure-like Meshes Fabricated via Electrospinning for Controllable Release of Zoledronic Acid[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2011, 27(3): 524-527.

[3] 彭 慧,陶鑫峰,凌 君. 低结晶度聚  $\epsilon$ -己内酯电纺膜的制备及其药物控释行为[J]. 高分子学报, 2011, (5): 446-451.

Peng Hui, Tao Xinfeng, Ling Jun. Controlled Release of Salicylic Acid From Electrospun Mats of Poly( $\epsilon$ -caprolac-

tone)with Low Crystallinity[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2011, (5): 446-451.

[4] 尉继征, 杨立新, 胡秀丽, 等. 应用光亲和分子进行 PEG 的光照修饰及蛋白质的光照偶联[J]. 高分子学报, 2011, (11): 1341-1348.

Wei Jizheng, Yang Lixin, Hu Xiuli, et al. PEG Modification and Protein Conjugation by Virtue of Azidobenzoic Acid as A Photoaffinity Molecule[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2011, (11): 1341-1348.

[5] 钱亮亮, 金征宇, 邓 力. 密封控温法制备控释材料肉桂醛- $\beta$ -环糊精包合物[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(12): 13-16.

Qian Liangliang, Jin Zhengyu, Deng Li. Preparation of Inclusion Complex of Cinnamaldehyde and  $\beta$ -Cyclodextrin by Sealed Thermal Control Method[J]. Food and Fermentation Industries, 2007, 33(12): 13-16.

[6] Mari P B, Gracia L C, Ramon C, et al. Antifungal Properties of Gliadin Films Incorporating Cinnamaldehyde and Application in Active Food Packaging of Bread and Cheese Spread Foodstuffs[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 166(3): 369-377

[7] Abad A M, Sanchez G, Fuster V, et al. Antibacterial Performance of Solvent Cast Polycaprolactone (PCL) Films Containing Essential Oils[J]. Food Control, 2013, 34(1): 214-220.

[8] Sadhaha R, Zhu L B, Carl W O, et al. Edible Apple Film

- Wraps Containing Plant Antimicrobials Inactivate Food-borne Pathogens on Meat and Poultry Products[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(8): M440-M445.
- [9] Sansone L, Aldi A, Musto P, et al. Assessing the Suitability of Polylactic Acid Flexible Films for High Pressure Pasteurization and Sterilization of Packaged Foodstuff[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(1): 34-45.
- [10] Chih F K, Tsao N, Chou H H, et al. Release of FITC-BSA From Poly (L-lactic acid) Microspheres Analysis Using Flow Cytometry[J]. Colloids Surf B, 2012, 89(1): 271-276.
- [11] 沈斌, 刘亮, 林水兴, 等. 聚乳酸/蒙脱土纳米复合材料的制备及其性能研究[J]. 中国塑料, 2010, 24(9): 17-21.
- Shen Bin, Liu Liang, Lin Shuixing, et al. Preparation and Properties of Poly(lactic acid)/Montmorillonite Anocomposites[J]. China Plastics, 2010, 24(9): 17-21.
- [12] 邓长勇, 张秀成. 聚乳酸/酯化纤维复合材料的制备与表征[J]. 中国塑料, 2009, 23(7): 18-22.
- Deng Changyong, Zhang Xiucheng. Preparation and Characterization of PLA/Esterified Cellulose Composites [J]. China Plastics, 2009, 23(7): 18-22.
- [13] Fong H, Chun I, Reneker D H. Beaded Nanofibers Formed During Electrospinning [J]. Polymer, 1999, 40: 4585-4592.
- [14] Park S W, Bae H S, Xing Z C, et al. Preparation and Properties of Silver-containing Nylon6 Nanofibers Formed by Electrospinning[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112(4): 2320-2326.
- [15] 李光水, 夏文水.  $\beta$ -环糊精与肉桂醛包合物的制备及热分解动力学研究[J]. 食品科学, 2005, 26(2): 142-145.
- Li Guangshui, Xia Wenshui. Kinetics of Thermal Decomposition of the Inclusion Complex of Cinnamaldehyde and  $\beta$ -cyclodextrin[J]. Food Science, 2005, 26(2): 142-145.
- [16] 闰明涛, 胡晓敏, 高俊刚. 聚乳酸/羧基化聚丙烯共混物的形态与热性能研究[J]. 高分子学报, 2007, (12): 1121-1127.
- Run Mingtao, Hu Xiaomin, Gao Jungang. Morphology and Thermal Properties of The Poly(lactic acid)/Carboxylated Polypropylene Blends[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2007, (12): 1121-1127.

## 内循环四缸直锁二板式注塑机为塑料装备行业技术创新注入新活力

随着各行业对注塑制品性能要求的不断提高,以及全球节能减排的迫切需求和国家“科学发展观”的号召,传统主流的三板肘杆式注塑机在成型精度、节能降耗等方面的技术局限性凸显。目前,国内生产的注塑机90%以上都属于三板曲肘液压式,特别对于大型注塑机,钢材的消耗量十分惊人。一种“节能、精密、高效”的注射成型设备的出现已成为市场发展的迫切需求。

以国内著名注塑机专家王兴天教授的两项专利(专利号:ZL 00238617.8, ZL 200520145200.2)为核心,北京化工大学成功推出了具有中国自主知识产权的新一代精密节能注塑机。本产品具有“二板调模、四缸直锁、内循环”的显著技术特点,是在总结、分析国内外合模机构的50余种形式和30余种结构的基础上,按照“两节、四高”(节省资源、节省能源、高精度、高效率、高静音、高性价比)目标进行量化而创新研发的,是性能优异的新型注塑机机型,产品符合当前形势下国家科学发展的宏观方向。设备工作性能稳定可靠,成型制品精密度高、效率高,具有明显的节省资源、能源和空间的优势。机器外形美观,机械结构布局合理,控制系统先进,整机性价比极高,代表了注塑机产业的发展方向,势必成为我国注塑机战略转型的新一代产品。

内循环四缸直锁二板式注塑机经过长时间可靠性试验和试运转,各项性能指标均达到商业化要求,可转入国内外商业化市场参与竞争。本技术一经推出就受到装备制造和塑料制品生产企业的热烈追捧,包括海天塑机集团有限公司、浙江申达机器制造股份有限公司等在内的国内注塑机龙头企业均已引入本机型,并进入市场推广和产业化阶段。此技术将为企业进行产品结构调整、增强国际市场竞争力提供契机;在产品转型的过程中,将显著降低企业的管理成本和制造成本,有利于企业树立科技创新的崭新形象,使企业产生巨大的社会效益和利润空间。

现在,塑料成型装备行业正以“十二·五”规划纲要为指导,以节能减排为目标,突出企业主体地位,走创新发展模式之路。内循环四缸直锁二板式注塑机作为新一代精密节能注塑机的代表机型,将为注塑机生产企业的技术创新注入新活力,加快我国塑料装备行业的技术升级和注塑机产品结构调整的步伐,为提升国产注塑成型装备的国际竞争力作出重要贡献。