

可调制润湿性和力学性能的电纺纤维膜的制备与性能研究*

黄博能^{1,2} 王娇娜^{1,2} 李从举^{1,2**}

(¹北京服装学院材料科学与工程学院 ²北京市服装材料研究开发与评价重点实验室 北京 100029)

摘要 采用静电纺丝技术分别制备了无规排列和高度取向排列的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和PET/CA(柠檬酸)4种纤维膜,对它们的润湿性能和力学性能进行了研究,同时研究了纤维膜厚度对膜的力学性能的影响.研究表明,与无规排列的PET纤维膜相比,取向排列的PET纤维膜沿纤维取向方向的力学性能有了很大的提高,而断裂伸长率略有下降;加入柠檬酸(CA)后,PET/CA复合纤维膜的表面水接触角从132.3°减少到0°,且取向排列的纤维膜比无规排列的纤维膜更易润湿;无规排列的复合纤维膜的力学性能因加入CA而大幅下降,取向排列的PET/CA纤维膜沿纤维取向方向的力学性能下降较小,而无规排列的PET/CA纤维膜的断裂伸长率从284.1%增加到444.5%.无规排列纤维膜的力学性能随膜厚度的增加先提高,后来又下降,而取向排列的纤维膜沿纤维取向方向的力学性能随膜厚度增加而单调增加.

关键词 聚对苯二甲酸乙二醇酯,柠檬酸,取向排列纤维,吸湿性,力学性能

静电纺丝是目前制备纳米纤维最有效、最简单的方法.静电纺纳米纤维构成的非织造布具有高比表面、高空隙率和孔径小等特点,已经在过滤、组织工程、防护服、传感器和催化剂等领域被广泛的应用^[1-4].通常,由静电纺丝制备的无纺布力学性能较差,往往不能满足实际应用的要求^[5,6],因此,人们常通过共混、取向排列和交联等方式来增强纤维膜的力学性能^[7-9].通过纤维取向排列来提高膜的力学性能是较为理想的一种方法,它不会改变纤维本身的组成和性能,因此人们正在进行广泛的研究^[10,11].一些应用领域,例如过滤和组织工程,除了要求膜有好的力学性能,同时还要求膜具有很好的亲水性和吸附性能,往往需要对纤维膜进行改性,而改性往往会使膜的力学性能下降,因此,制备同时具有较好力学性能和吸水性的纳米纤维膜具有重要的意义.

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)是一种高熔点的热塑性聚酯,具有很好的耐热性和耐腐蚀性,同时具有较好的力学性能,广泛应用于合成纤维、液体容器及工程领域等.PET纳米纤维可用于高温气体过滤、二次电池分离以及液体过滤等方面.由于在液体过滤中,随着膜孔不断被堵塞,过滤的压

降会不断提高,需要过滤膜具有较高的力学性能,而无规排列的电纺膜力学性能较差.因此,本实验采用改进的静电纺丝法制备了4种PET基电纺膜,并通过SEM、IR、XRD、水接触角及单轴拉力测试等表征方法对纤维的形貌,结晶情况、吸湿性及力学性能进行了分析研究.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET),特性黏数约为0.88 dL/g;二氯甲烷(AR),柠檬酸(AR,简称CA),北京化工厂;三氟乙酸(AR),北京市兴津化工厂.

自行组装的静电纺丝装置;日本JSM-6360LV型扫描电子显微镜(SEM);日本SEIKO公司的DSC62000型示差扫描量热仪;日本Rigaku公司的D/MAX-III A型X射线衍射仪;美国Nicolet公司的670型红外光谱仪;德国OCA-20型视频光学接触角测量仪;深圳新三思万能试验机.

1.2 样品的制备

将2 g PET溶解在2 mL二氯甲烷和8 mL三氟乙酸混合溶剂中,在磁力搅拌下溶解3~4 h,

* 2011-12-27 收稿,2012-03-27 修稿;国家自然科学基金(基金号 51073005)、北京市自然科学基金(基金号 2112013)、北京市教委科技发展计划重点项目(项目号 KZ201010012012)、北京市属高等学校人才强教深化计划(项目号 IHLB)、国家重点基础研究发展计划(973计划,项目号 2010CB933501)、北京市科技计划项目(课题)(项目号 Z111100066611004)和纺织之光青年基金.

** 通讯联系人,E-mail:congjuli@gmail.com

doi:10.3724/SP.J.1105.2012.11405

直到形成均一、稳定的透明溶液,吸取适量溶液对其进行静电纺丝.在制备加入 CA 的 PET 纺丝液时,先加入 0.4 g CA 至混合溶剂中,待 CA 完全溶

解,再加入 PET,其他条件与以上相同.实验电纺装置如图 1 所示,共制备了 4 种电纺膜,纺丝条件列在表 1 中.

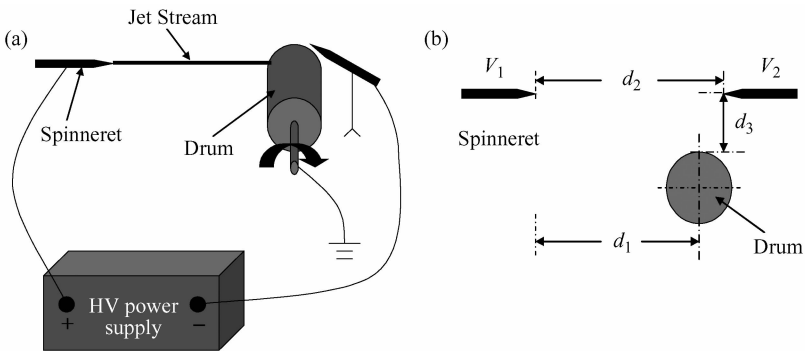


Fig. 1 (a) Electrospinning setup using two opposite electrodes; (b) Schematic diagrams to illustrate the designations of processing parameters; $d_1 = 14$ cm, $d_2 = 15$ cm and $d_3 = 1.5$ cm

Table 1 Parameters for electrospinning

Samples	Electrode voltage (kV)		Distance of collection (cm)	Speed (r/min)	Humidity (%)	Temperature (℃)
	Positive (+)	Negative (-)				
1 ^a	18	0	14	300	20	30
2 ^b	9	9	14	300	20	30
3 ^c	18	0	14	300	20	30
4 ^d	9	9	14	300	20	30

^aRandom electrospun PET; ^bOriented electrospun PET; ^cRandom electrospun PET/CA; ^dOriented electrospun PET/CA

1.3 测试与表征

采用日本电子公司的 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜观察 PET 纤维膜的微观结构.观察的样品经表面喷金处理,喷金条件 3 mA,6 min.采用 Smile View 软件测试纤维的直径.纤维直径为至少测量 50 根纤维的统计平均值.差热分析采用 DSC6200 型示差扫描量热仪测定,氮气氛围,升温速率为 20 K/min.采用 670 型红外光谱仪对纤维表面结构进行了测试,扫描范围 4000 ~ 650 cm^{-1} ,分辨率 4 cm^{-1} .采用日本的 X 射线衍射仪分析了样品的结晶性能,测试条件是 Cu 靶 $K\alpha$ 为辐射源 ($\lambda = 0.15406$ nm),管电压 40 kV,管电流 200 mA,扫描速度 5 ($^{\circ}$)/min,扫描范围 5 $^{\circ}$ ~ 50 $^{\circ}$.纤维膜的表面水接触角在室温下采用德国 OCA-20 型视频光学接触角测量仪测定,每次进液量为 1 μL .将电纺膜裁成 5 mm $\times$ 50 mm 的长条形样片,室温下在 SANS 拉伸仪上进行单轴拉伸试验,拉伸速度为 20 mm/min.取向纤维膜在进行拉伸测试时,沿着取向方向进行拉伸,因此测定的取向纤维膜的力学性能都为沿着取向方向的力学性能.

2 结果与讨论

2.1 纺丝工艺对纤维形貌的影响

图 2(a) 为无规排列的 PET 纤维膜的 SEM 图,由图可以看出,纤维表面光滑,粗细均匀,纤维平均直径(800 ± 130) nm,纤维之间有许多交叉点.图 2(b) 是高度取向排列 PET 纤维膜的 SEM 图,纤维之间平行排列,纤维平均直径(840 ± 120) nm.纤维平均直径较无序时稍大,由于电纺取向排列纤维时,在两个电极之间形成了均匀电场,纤维汇集成一束,纤维没有充分裂分成较细的纤维.图 2(c) 为无规排列 PET/CA 纤维膜的 SEM 图,柠檬酸的加入对纤维的形貌没有大的影响.纤维的平均直径(900 ± 130) nm,由于加入了柠檬酸,使得纺丝液的浓度增加,从而纤维的直径变大.图 2(d) 是取向排列 PET/CA 纤维膜的 SEM 图,纤维平均直径(1000 ± 120) nm.图 3 为依据 SEM 图测定的取向纤维膜中纤维取向的分布图,可以由图得出,纤维主要沿着一个方向取向,仅有极少量的纤维与选定的方向偏离很大,由此可以看出,纤维膜具有很好的取向.

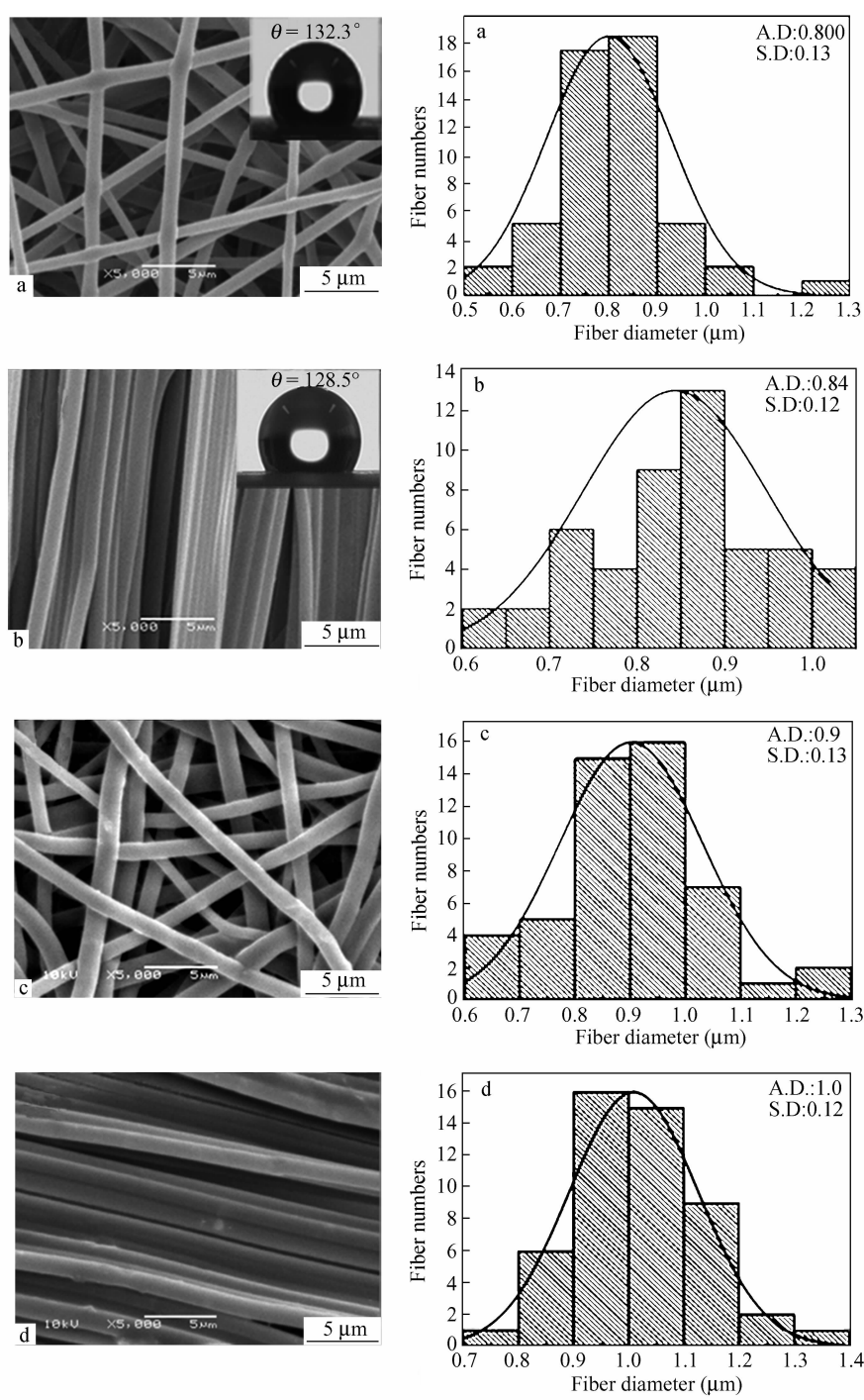


Fig. 2 SEM images and diameter distributions of electrospun fibrous membranes; (a) random electrospun PET, (b) oriented electrospun PET, (c) random electrospun PET/CA and (d) oriented electrospun PET/CA
The insets show the profile of water droplets on the fibrous membranes surface.

2.2 CA 对纤维结构的影响

图 4 为纤维膜的横截面的 SEM 图,对比图 4 (a)和 4(b),可以看出 2 种纤维膜的截面的 SEM 图相似,说明柠檬酸加入到 PET 中,柠檬酸与 PET 有很好的相容性,并与 PET 形成了良好的共混体系,在制备纺丝液时形成了均一的溶液,经过

纺丝后,对物相的相容性没有影响,即物相没有产生相分离,因此柠檬酸与 PET 均匀的混合在一起,即柠檬酸在 PET 中均匀分布.对比 PET 和 PET/CA 样品的 DSC 曲线(如图 5),发现柠檬酸的加入使 PET 的玻璃化转变温度和熔点都降低,可见加入柠檬酸后,破坏了大分子链的规整性,降

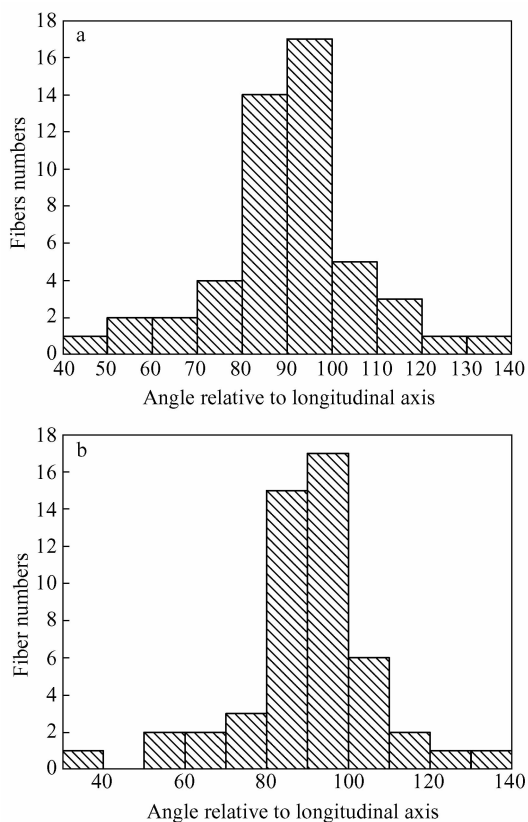


Fig. 3 Charts of the numbers of oriented fiber per angle of orientation related to the SEM images: (a) oriented electrospun PET and (b) oriented electrospun PET/CA

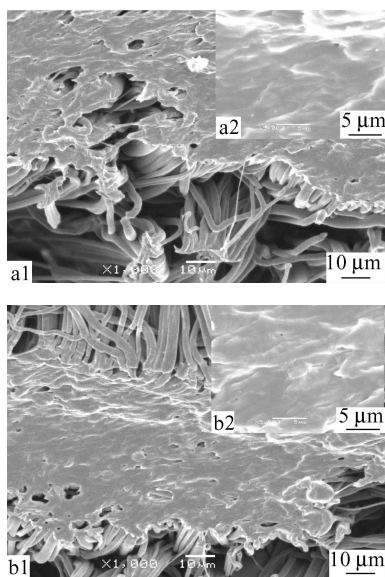


Fig. 4 SEM images of the cross-section of electrospun fibrous membranes: (a) oriented electrospun PET and (b) oriented electrospun PET/CA

The insets are the enlargement of fiber cross-section.

低了大分子间的作用力,提高了大分子的柔性,因此链段活动的能力增加,从而导致玻璃化转变温

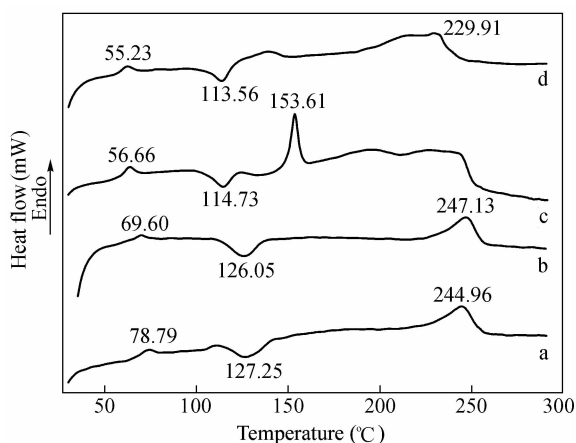


Fig. 5 DSC curves of electrospun fibrous membranes: (a) random electrospun PET, (b) oriented electrospun PET, (c) random electrospun PET/CA and (d) oriented electrospun PET/CA

度降低.

图 6 分别为无规排列的 PET、PET/CA 纤维膜和 CA 的红外谱图.从图 6 谱图 a 可知,在 1720 cm^{-1} 处出现了 $\text{C}=\text{O}$ 键的伸缩振动吸收峰, 1240 cm^{-1} 附近出现了酯基中 $\text{C}-\text{O}$ 键的伸缩振动吸收峰, 1100 cm^{-1} 附近出现了芳环上 1,4 位取代的振动吸收峰,在 730 cm^{-1} 出现了芳环上两个取代羰基的面外弯曲振动吸收峰.图 6 谱图 c 是柠檬酸的红外谱图,由图可知,由于氢键的作用,羧基通常是以双分子缔合体的形式存在,在 3290 和

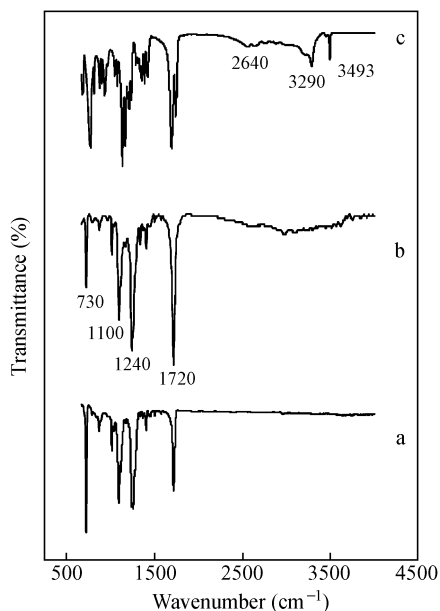


Fig. 6 IR spectra of fibrous membranes and citric acid: (a) random electrospun PET, (b) random electrospun PET/CA and (c) citric acid (CA)

3493 cm^{-1} 处的吸收峰为 OH 的伸缩振动吸收峰. 由图 6 谱图 b 可知, 在 3300 cm^{-1} 附近出现了宽的 OH 的伸缩振动吸收峰, 且 3290 和 3493 cm^{-1} 处强的吸收峰减弱, 被宽的 OH 伸缩振动吸收峰掩盖, 说明柠檬酸分子与 PET 大分子存在一定的相互作用, 在 1720, 1240 和 1100 cm^{-1} 处的吸收峰都有所增加, 由于柠檬酸产生的吸收峰与 PET 产生的吸收峰发生了重叠所致. 取向排列后纤维膜的红外谱图与无规排列的纤维膜的红外谱图基本一致(省略).

图 7 为 4 种电纺纤维膜的 X 射线衍射图. 从图可以看出, 无规排列的 PET 和 PET/CA 纤维膜在 2θ 为 18° 附近都呈一个较宽的弥散峰, 为典型的无定形态, 柠檬酸的加入对 PET 的结晶基本没有影响. 取向排列 PET 和 PET/CA 纤维膜较无规排列的纤维膜在 2θ 为 18° 附近出现了一个更强、更宽的弥散峰, 这可能是纤维之间的取向排列所致, 而取向排列的纤维膜与无规排列的纤维膜比较, 衍射图中并没有出现新的衍射峰, 因此取向排列对 PET 的结晶基本没有影响.

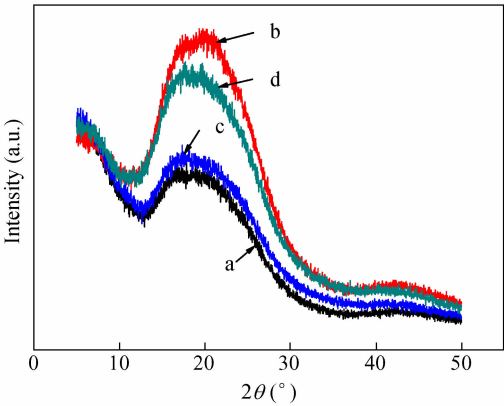


Fig. 7 The XRD patterns of electrospun fibrous membranes: (a) random electrospun PET, (b) oriented electrospun PET, (c) random electrospun PET/CA and (d) oriented electrospun PET/CA

2.3 纤维膜的组成对膜吸湿性的影响

由图 2 的内插图可以得出, 无规排列的 PET 纤维膜的表面水接触角为 132.3° , 取向排列的 PET 纤维膜的表面水接触角为 128.5° , 可见, 2 种 PET 膜都为疏水性膜. 无规排列的 PET 纤维膜的纤维之间存在大量的微孔, 微孔中存在空气, 使得水滴与纤维表面的接触面积减小^[12], 而取向排列的 PET 纤维膜纤维平行排列, 类似于固体的表面, 从而导致无规排列的 PET 纤维膜的表面水接

触角略大于取向排列 PET 纤维膜的表面水接触角.

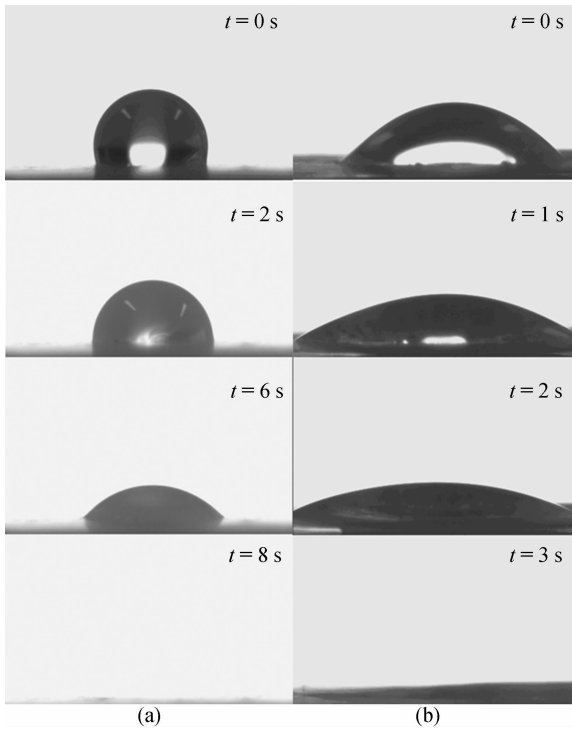


Fig. 8 The profile of water droplets on the fibrous membranes surface with different time: (a) random electrospun PET/CA and (b) oriented electrospun PET/CA

图 8 为水对无规排列和取向排列的 PET/CA 纤维膜的表面润湿图. 由图 8(a) 可知, 大约 8 s 的时间, 水能完全润湿无规排列的 PET/CA 纤维膜, 而大约 3 s 的时间(图 8(b)), 水能完全润湿取向排列 PET/CA 纤维膜. 初始时, 水滴在无规排列的 PET/CA 纤维膜上呈圆形, 逐渐向膜四周和内部渗透, 水滴变成椭圆形, 最终完全润湿纤维膜. 水滴初始时在取向排列的 PET/CA 纤维膜上呈椭圆形, 然后迅速沿着纤维取向排列方向铺展, 最终完全润湿纤维膜. 可见, 取向排列纤维膜更加容易被润湿, 主要由于无规排列的 PET/CA 纤维膜的纤维之间存在大量的微孔, 微孔中存在空气, 使得水滴与纤维表面的接触面积减小, 导致水滴在纤维表面扩散缓慢, 而取向排列的 PET/CA 纤维膜的纤维之间平行排列, 类似于固体的表面, 同时由于柠檬酸的加入, 在纤维表面存在大量的羟基, 使得水分子能迅速的沿着纤维轴向的方向扩散, 从而使得水滴能迅速润湿复合纤维膜. 因此将取向排列的复合纤维膜应用于服装和水过滤等领域, 其将有更好的透湿和水渗透等性能.

2.4 纤维膜的形貌及组成对其力学性能的影响

图 9 是 4 种电纺纤维膜的应力应变曲线图,膜厚均为 150 μm . 从图中可得出,无规排列的 PET 和 PET/CA 膜的弹性模量分别为 93.0 和 48.0 MPa,拉伸屈服应力分别为 2.4 和 1.4 MPa,拉伸强度分别为 4.5 和 3.0 MPa,断裂伸长率分别为 284.1% 和 444.5%. 取向排列的 PET 和 PET/CA 膜的弹性模量分别为 204.5 和 165.2 MPa,拉伸屈服应力分别为 4.6 和 4.0 MPa,拉伸强度分别为 5.2 和 6.1 MPa,断裂伸长率分别为 251.7% 和 372.7%. 取向排列的 PET 膜的弹性模量较无规排列的 PET 膜的弹性模量提高了 120%,拉伸屈服应力和拉伸强度分别提高了 92% 和 271%,而断裂伸长率有所降低. 主要由于无规排列的纤维膜中的纤维之间是无规分布(如图 2(a)所示),纤维膜在受到外力时,纤维直径较小,易发生形变,在较小的外力作用能发生大的形变,所以膜的弹性模量、拉伸强度和拉伸屈服应力较低;与取向排列的 PET 膜相比,无规排列的 PET 纤维膜中纤维之间形成了大量的缠结点,等长膜中纤维的长度较长,因此断裂伸长率较高. 取向排列的 PET 膜中纤维之间是紧密平行排列在一起(如图 2(b)所示),在沿着纤维轴拉伸时,纤维被同时拉伸,因此取向排列纤维膜沿纤维取向方向的力学性能较无规排列的纤维膜的力学性能要好. 比较无规排列的 PET/CA 膜和取向排列的 PET/CA 膜,也得出了同样的结果.

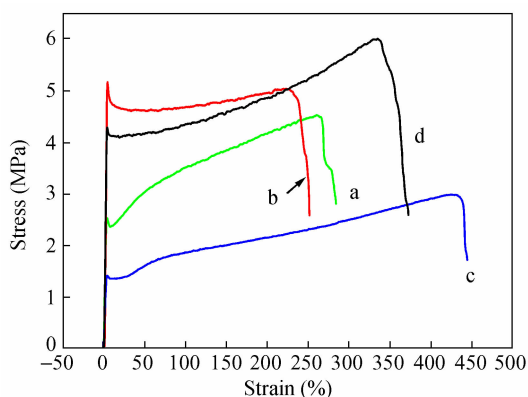


Fig. 9 Tensile stress-strain curves of electrospun fibrous membranes with the same thickness: (a) random electrospun PET, (b) oriented electrospun PET, (c) random electrospun PET/CA and (d) oriented electrospun PET/CA

无规排列的 PET/CA 膜的弹性模量、拉伸屈服应力和拉伸强度与无规排列的 PET 膜的弹性

模量、拉伸屈服应力和拉伸强度相比,都有一定程度的降低,由于柠檬酸加入后,破坏了大分子链的规整性,降低了大分子间的作用力,提高了大分子链的柔顺性,从而使得链段的活动能力增加,从而导致 PET/CA 膜的弹性模量和拉伸屈服应力下降,断裂伸长率有了很大的提高. 取向排列的 PET/CA 膜的弹性模量和拉伸屈服应力较取向排列的 PET 纤维膜的弹性模量和拉伸屈服应力降低,但比随机排列的 PET 纤维膜的力学性能好,柠檬酸的加入降低了 PET 纤维膜的力学性能,但是取向又使其力学性能提高,且取向提高的力学性能更明显,由此可见,纤维取向对纤维膜沿取向方向的力学性能有很大的提高.

2.5 纤维膜的厚度对其力学性能的影响

图 10 给出了无规排列和高度取向排列的 PET 膜的力学性能与膜厚度的关系. 无规排列的 PET 膜的厚度逐渐增加,初始拉伸模量逐渐下降,由于纤维呈无序排列,纤维直径小,使膜发生形变至屈服(形变小)所需的拉力不会因膜厚度增加而有很大的增加,根据公式拉伸模量 = $\Delta f / \Delta h$, Δf 表示单位面积两点之间的力变化, Δh 表示以上两点之间的距离变化,膜的厚度增加,拉力增加的不明显,单位面积两点之间的力减小,因此初始拉伸模量下降. 膜的拉伸强度和屈服应力随厚度的增加而先增加,后又降低. 由于当纤维膜的厚度较小时,纤维膜容易出现厚薄不均,从而导致纤维膜迅速的被破坏,此时因拉伸而表现出来的纤维膜的层次结构不明显,而当膜的厚度较大时,纤维膜厚薄不均的现象表现的不明显,此时纤维膜所具有的层次结构^[13]明显地表现出来,而层与层之间仅依靠范德华力和部分纤维之间的缠结而堆积在一起,层与层之间在受拉力时,易出现剥离,从而导致部分纤维层屈服,部分纤维层没有屈服,使得纤维膜不能同时抵抗外力的拉伸,从而膜的拉伸强度和屈服应力随膜的厚度的继续增加有所降低. 同时从图 10 曲线 a 也可以看到,在最大屈服应力以后,曲线发生转折,这是由于在拉伸过程部分纤维层已经断裂,而部分纤维层没有断裂所致. 断裂伸长率随膜的厚度增加而增加,膜的厚度增加,纤维之间缠结点增多,断裂伸长率增加,当膜厚度较厚时,由于纤维膜在拉伸过程出现层次结构,纤维之间缠结紧密程度不均匀,具有断裂不同时性,所以断裂伸长率增加不明显.

高度取向排列 PET 膜随厚度的增加,初始拉

伸模量、拉伸强度和屈服应力都增加,由于纤维之间紧密平行排列,拉伸时纤维同时受力,不易出现像无规排列的纤维膜那样的分层现象,因此膜的厚度增加,纤维的数量增加,从而膜的力学性能增加.同时由图 9 曲线 b 可见,在最大屈服应力后,没有出现明显的转折,纤维几乎同时断裂.当纤维

膜的厚度较薄时,断裂伸长率较低,由于纤维膜的厚度不均,造成纤维膜易被破坏.随着纤维膜的厚度增加,纤维分布比较均匀,断裂伸长率提高;纤维膜的厚度进一步增加,断裂伸长率基本不变,由于达到了纤维断裂的极限.

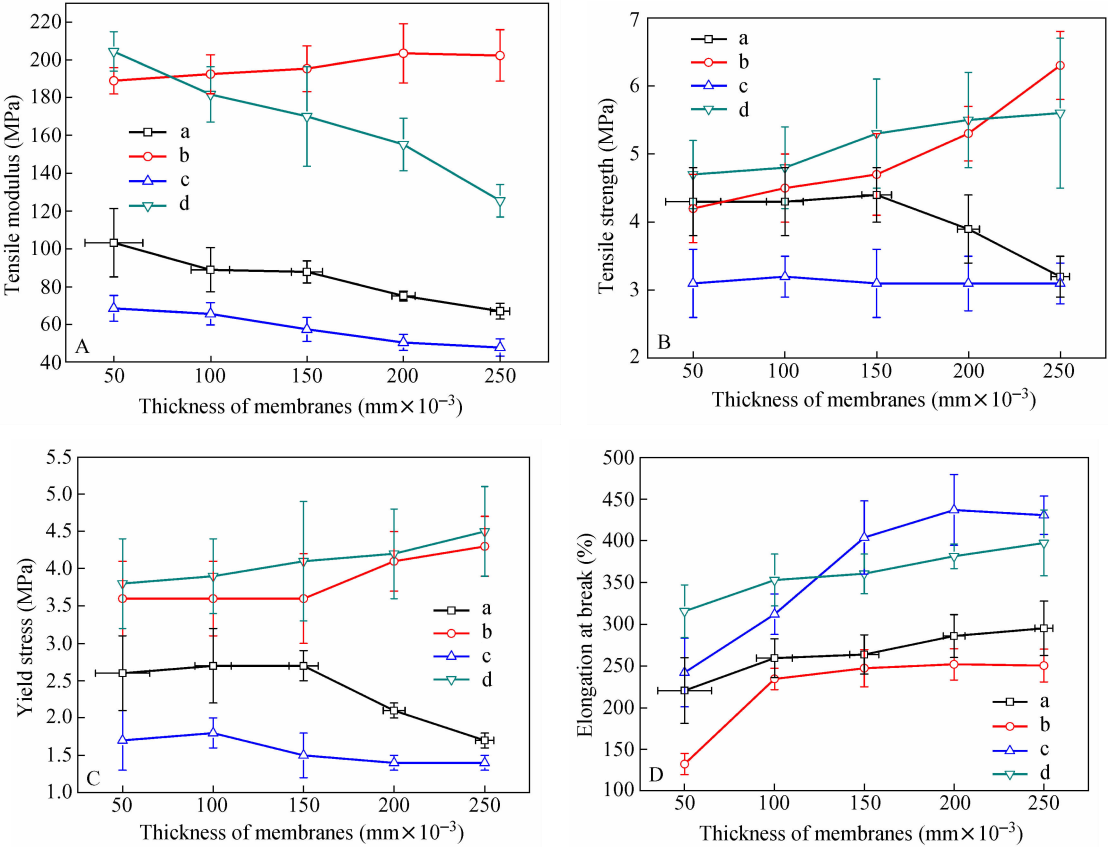


Fig. 10 Tensile properties of random and oriented electrospun fibrous membranes with different thickness: (A) random electrospun PET, (B) oriented electrospun PET, (C) random electrospun PET/CA and (D) oriented electrospun PET/CA

同样,无规排列的 PET/CA 纤维膜的初始拉伸模量随膜的厚度的增加而下降(如图 10),拉伸强度和屈服应力随膜的厚度的增加先有小的增加然后下降,断裂伸长率随膜的厚度的增加而增加.取向排列的 PET/CA 膜的初始拉伸模量随膜的厚度的增加而下降,拉伸强度和屈服应力随膜的厚度的增加而增加,断裂伸长率随膜的厚度的增加而增加.

3 结论

采用静电纺丝制备了无规排列与高度取向排列的 PET 和 PET/CA 纤维膜.同样的纤维膜厚度下,取向排列纤维膜沿纤维取向方向的弹性模量

是无规排列的纤维膜的一倍多,拉伸强度和屈服应力也有很大的提高,断裂伸长率略有降低.柠檬酸的加入,增加了 PET 大分子链的柔顺性,使得无规排列的纤维膜的力学性能有所下降,而取向排列的 PET/CA 纤维膜由于纤维的取向排列,使得膜的力学性能依然较好;同时,加入柠檬酸, PET 纤维膜的表面水接触角从 132.3° 减少到 0° ,水滴在取向排列的 PET/CA 膜上能沿轴向铺展,迅速浸湿纤维膜,将其应用于服装和水过滤等领域,其将有更好的透湿和水渗透等性能.无规排列的纤维膜的力学性能随膜厚度的增加先增加,后又有所下降.取向排列的纤维膜沿纤维取向方向的力学性能随膜厚度增加而增加.

REFERENCES

1 Veleirinho B,Lopes-da-Silva J A. Process Biochem,2009,44;353 ~ 356
2 Yoon K, Kim K, Wang X, Fang D, Hsiao B S, Chu B. Polymer,2006,47;2434 ~ 2441
3 Lu P, Ding B. Recent Pat Nanotech,2008,2;169 ~ 182
4 Feng C, Khulbe K. C, Matsuura T. J Appl Polym Sci,2010,115;756 ~ 776
5 Chen Z, Wei B, Mo X, Lim C T, Ramakrishna S, Cui F. Mater Sci Eng C,2009,29;2428 ~ 2435
6 Baji A, Mai Y, Wong S, Abtahi M, Chen P. Compos Sci Technol,2010,70;703 ~ 718
7 Jose M, Steinert B, Thomas V, Dean D, Abdalla M, Price G, Janowski G. Polymer,2007,48;1096 ~ 1104
8 Kim K, Lee K, Lee B, Ho Y, Oh S, Kim H. Fibers and Polymers,2005,6;121 ~ 126
9 Ahn B W, Chi YS, Kang T J. J Appl Polym Sci,2008,110;4055 ~ 4063
10 Mathew G, Hong JP, Rhee JM, Leo DJ, Nah C. J Appl Polym Sci,2006,101;2017 ~ 2021
11 Zhou Z, Lai C, Zhang L, Qian Y, Hou H, Reneker D, Fong H. Polymer,2009,50;2999 ~ 3006
12 Sun M, Li X, Ding B, Yu J, Sun G. J Colloid Interf Sci,2010,247;147 ~ 152
13 Dai Hongqin(戴宏钦), Xu Ming(徐明), Pan Zhijuan(潘志娟), Wang Jianmin(王建国). Journal of Textile Research(纺织学报),2006,27;56 ~ 59

PREPARATION AND PROPERTIES OF ELECTROSPUN FIBROUS MEMBRANCE
WITH ADJUSTABLE MECHANICAL PROPERTIES AND WETTING BEHAVIOR

Bo-neng Huang^{1,2}, Jiao-na Wang^{1,2}, Cong-ju Li^{1,2}

(¹ College of Material Science and Engineering, ² Beijing Key Laboratory of Clothing Materials R&D and Assessment,
Beijing Institute of Fashion Technology, Beijing 100029)

Abstract Four kinds of electrospun fibrous membranes, random and highly aligned poly (ethylene terephthalate) (PET) fibrous membranes, and random and highly aligned PET/CA (citric acid) fibrous membranes, were prepared by electrospinning technology. The mechanical properties and wetting behavior of the four kinds of electrospun fibrous membranes were studied. Meanwhile, the influence of the thickness of electrospun fibrous membranes on mechanical properties was discussed. Studies have shown that the mechanical properties of aligned PET fibrous membranes are much better than those of random PET fibrous membranes, yet the elongation of aligned PET fibrous membranes are slightly less than that of random PET fibrous membranes. The water contact angle of PET fibrous membranes was decreased from 132.3° to 0° with the addition of citric acid. The wetting behavior of aligned PET/CA fibrous membranes is better than that of random PET/CA fibrous membranes. Meanwhile, the mechanical properties of random PET/CA fibrous membranes dramatically decreased due to the addition of citric acid, yet the mechanical properties of aligned PET/CA fibrous membranes slightly decreased. The elongation of random PET/CA fibrous membranes increased from 284.1% to 444.5%. The mechanical properties of random fibrous membranes improved with increasing the thickness of membranes first and then little decreased. The mechanical properties of aligned fibrous membranes improved with increasing the thickness of membranes.

Keywords Poly(ethylene terephthalate), Citric acid, Aligned fibers, Wetting behavior, Mechanical properties