

## 聚 $\epsilon$ -己内酯/聚吡咯电纺膜的制备与性能\*

周建伟 赵生领 张学全 封伟 袁晓燕\*\*

(天津大学材料学院 天津市材料复合与功能化重点实验室 天津 300072)

**摘要** 以吡咯(Py)和聚  $\epsilon$ -己内酯(PCL)为原料、氯仿为溶剂,并掺杂一定量的十二烷基硫酸钠制备电纺膜,利用三氯化铁的氧化作用原位生成聚吡咯(PPy).对所得到的 PCL/PPy 电纺膜用红外光谱进行表征,在扫描电镜和透射电镜下观察纤维形貌,并测定力学性能和体积电阻率.结果表明,所生成的 PPy 以纳米粒子形式附着在电纺纤维表面,随着 Py 相对于 PCL 的质量百分含量由 0 增加到 20%,PCL/PPy 电纺膜的纤维直径从  $(730 \pm 341)$  nm 逐渐下降至  $(325 \pm 84)$  nm;膜的拉伸模量和拉伸强度由不含 Py 的  $(25.7 \pm 0.8)$  MPa 和  $(2.48 \pm 0.14)$  MPa 分别增加至含有 20% Py 的  $(48.4 \pm 7.6)$  MPa 和  $(5.05 \pm 0.59)$  MPa,断裂伸长率由  $(129 \pm 27)\%$  下降至  $(86.2 \pm 9.1)\%$ ;体积电阻率降低了 2~3 个数量级.该 PCL/PPy 电纺纤维膜以期可作为电活性材料用于功能或生物医用领域.

**关键词** 聚吡咯,聚  $\epsilon$ -己内酯,电纺膜,导电性

近年来,有关电刺激对细胞活性的影响已经得到较为广泛的研究,包括心肌细胞、神经细胞、成纤维细胞、间质干细胞等<sup>[1~4]</sup>,研究结果已表明电刺激能够有效地调节细胞在材料表面的粘附和生长<sup>[1]</sup>.Schmidt 等的研究发现,将 100 mV 电刺激作用于生长在聚吡咯(PPy)上的 PC12 类神经细胞,其神经突会明显增长<sup>[2]</sup>.此外,马赛等用 L-929 成纤维细胞进行了钛金属表面 PPy 涂层的细胞毒性和兔急性全身毒性试验,结果未见任何异常现象,表明 PPy 具有良好的生物安全性<sup>[5]</sup>.George 等的研究也表明,植入老鼠体内的 PPy 与聚四氟乙烯的生物相容性相当,可以刺激神经组织复原<sup>[6]</sup>.由此可见,作为导电聚合物的 PPy,不仅具有优良的电活性,而且还具有良好的生物相容性.

除了单独成膜或以涂层形式使用之外,PPy 等导电聚合物还可以与聚 *d,l*-乳酸(PDLLA)或聚  $\epsilon$ -己内酯(PCL)及其共聚物(PLCL)等生物降解性聚酯形成共混材料<sup>[1,7~9]</sup>.Shi 等在 PDLLA 溶液中使吡咯(Py)原位聚合得到了 PDLLA/PPy 共混物,当 PPy 含量为 3 wt% 时其表面电阻可降低至  $1 \times 10^3 \Omega/\square$ ,在该材料上培养的成纤维细胞受 100 mV 电刺激后能够沿电流方向取向生长<sup>[7]</sup>.同样,Kim 等利用原位乳液聚合制备 PCL/PPy 共混物,研究了乳液聚合体系的电流变特性<sup>[9]</sup>.

电纺是通过高压电场作用由聚合物溶液或熔体制备纤维直径小、比表面大的无纺膜方法<sup>[10]</sup>,近年来,有关导电聚合物电纺膜的研究已成为热点,包括聚苯胺(PANi)<sup>[1,11]</sup>、聚(3,4-亚乙二氧基噻吩)(PEDOT)<sup>[12]</sup>、PPy<sup>[13~15]</sup>等.以六氟异丙醇为溶剂,可以得到 PANi 与 PLCL 或明胶的共混纤维膜,并具有生物电活性<sup>[1,11]</sup>.以电纺和原位聚合方法结合可以得到 PEDOT 与聚乙烯醇的共混纤维膜<sup>[12]</sup>.Srivastava 等利用微流体多喷丝电纺装置制备了含有 FeCl<sub>3</sub> 的聚乙烯吡咯烷酮(PVP)纳米纤维,将之置于 Py 蒸汽中从而得到了含有 PPy 的 PVP 超细纤维,或将 Py 直接加入到电纺溶液中也直接得到 PVP/PPy 纳米级超细纤维<sup>[13]</sup>.同样以气相聚合为基础,Nair 等使用能够同时溶解聚苯乙烯(PS)和铁盐氧化剂的四氢呋喃、丁醇和丙酮组成的混和溶剂配制电纺溶液,制得含有铁盐的 PS 电纺纤维,然后将之置于 Py 蒸汽中制得 PS/PPy 纳米纤维,具有良好力学性能的 PS 纳米纤维为 PPy 的生成提供了良好的模板和支撑作用<sup>[14]</sup>.PPy 还可以与无机物如 TiO<sub>2</sub> 一起通过电纺形成纳米复合纤维<sup>[15]</sup>.

PCL 易于合成,可溶于氯仿,生物相容性良好,广泛用于生物材料的研究<sup>[16,17]</sup>,但有关 PCL 与 PPy 共混材料的报道尚少.因此,本文选用 PCL 为主要原料,借助于 Py 的原位聚合制备 PCL/PPy

\* 2009-10-10 收稿,2009-12-30 修稿; \*\* 通讯联系人,E-mail: yuanyx@tju.edu.cn

电纺纤维膜,探索其形成过程中的影响因素,以期使之成为电活性材料而用于功能和生物医学领域.

## 1 实验部分

### 1.1 原料与试剂

PCL,由中科院长春应所化提供,以凝胶渗透色谱法测定其  $M_n = 45000$ 、 $M_w = 86000$ . Py,北京百灵威股份有限公司,纯度  $>99.9\%$ . 氯仿、氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )、十二烷基硫酸钠(SDS)均为化学试剂.

### 1.2 电纺纤维膜的制备

如表 1 所示,以氯仿为溶剂配制 PCL 溶液,恒定其浓度为  $0.16\text{ g/mL}$ ,相应添加一定比例的 Py 和 SDS 以得到电纺溶液,其中 Py 相对于 PCL 的质量百分含量分别为  $0\%$ 、 $5\%$ 、 $10\%$ 、 $15\%$  和  $20\%$ . 使用普通电纺装置<sup>[18]</sup>,在溶液流速  $0.3\text{ mL/h}$ 、电压  $11.7\text{ kV}$ 、接收距离  $20\text{ cm}$  条件下电纺形成纤维膜. 将所得电纺膜浸入到  $0.02\text{ g/mL}$   $\text{FeCl}_3$  水溶液中氧化  $24\text{ h}$ ,之后取出用蒸馏水冲洗 3 次,室温下真空干燥  $24\text{ h}$  后备用.

Table 1 Composition and properties of polymer solutions for electrospinning

| No. | Chloroform<br>(mL) | PCL<br>(g) | Py<br>(g) | Py/PCL<br>(wt%) | SDS<br>(g) | Conductivity<br>( $\mu\text{S/cm}$ ) | Surface intension<br>(mN/m) | Viscosity<br>(mPa·s) |
|-----|--------------------|------------|-----------|-----------------|------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1   | 10                 | 1.6        | 0         | 0               | 0          | 0.12                                 | $25.46 \pm 0.81$            | 91                   |
| 2   | 10                 | 1.6        | 0.08      | 5               | 0.04       | 0.10                                 | $25.72 \pm 0.91$            | 90                   |
| 3   | 10                 | 1.6        | 0.16      | 10              | 0.08       | 0.14                                 | —                           | —                    |
| 4   | 10                 | 1.6        | 0.24      | 15              | 0.12       | 0.12                                 | $26.31 \pm 0.40$            | 89                   |
| 5   | 10                 | 1.6        | 0.32      | 20              | 0.16       | 0.11                                 | —                           | —                    |

### 1.3 表征

1.3.1 电纺溶液性质的测定 电导率由 DDS-11A 型电导仪(上海雷磁新泾有限公司)测定,表面张力的测定在 DCAT21 表面张力仪(德国 Data Physics 公司)上进行,黏度用 NDJ-79 型旋转黏度计(上海昌吉地质仪器有限公司)测定.

1.3.2 电纺膜的表征 使用 FTS3000 型红外光谱仪(美国 BIO-RAD 公司)对电纺膜直接进行全反射红外光谱分析(ATR-FTIR). 经喷金后,在 XL-30 型扫描电镜(SEM,荷兰 Philips 公司)下观察电纺膜的纤维形貌.在镀碳的铜网上直接收集电纺膜及其氧化后的样品,在 JEOL 型透射电镜(TEM,日本电子)下观察纤维的微观结构. 将电纺膜裁成  $60\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  样条,使用 M350-20KN 电子拉力机(英国 Testometric 公司)测定其拉伸性能,拉伸速率  $5\text{ mm/min}$ ,样品有效拉伸长度  $40\text{ mm}$ ,由 5 个样品取平均值. 使用 ZC43 型高阻计(上海第六电表厂)测量电纺膜的体积电阻率  $\rho$  值,计算公式为  $\rho = R_v \cdot S/L$ ,式中  $R_v$  是样品的体积电阻, $S$  是接触面积, $L$  是样品的厚度.

## 2 结果与讨论

### 2.1 电纺溶液的性质

电纺溶液的电导率、表面张力和黏度的测定结果如表 1 所示. 由表 1 可知,电纺溶液的电导率

随 Py 含量的增加略有波动,而表面张力和黏度分别只有少许上升和下降. 以上现象表明,本实验中电纺溶液的性质变化不大. 溶液中 PCL 浓度保持不变,添加了一定比例的 Py 和 SDS. Py 微溶于氯仿,与 PCL 形成透明溶液. SDS 为阴离子型表面活性剂,同时也是导电聚合物的掺杂剂,将之与 Py 以一定比例的量直接加入到电纺溶液中,主要是为了在电纺纤维膜中对 Py 定量掺杂. 由于 SDS 难溶于氯仿,以分散形式存在于电纺溶液中,肉眼可看到细小的颗粒. 因此,推测溶液性质的微小变化主要是由 Py 引起的.

### 2.2 ATR-FTIR 分析

在氧化剂  $\text{FeCl}_3$  作用下,Py 能够发生氧化还原聚合反应而转化为  $\text{PPy}$ <sup>[7]</sup>. 本文先将含有 Py 的 PCL 溶液电纺成纤维膜,之后再将其浸入到一定浓度的  $\text{FeCl}_3$  水溶液中,使 Py 发生原位聚合反应. 对含有  $20\%$  Py 的纤维膜和纯 PCL 电纺膜一起进行 ATR-FTIR 分析,结果如图 1 所示. 对比图 1 中的两条谱线可知,在纯 PCL 电纺膜(图 1a)上的  $1723\text{ cm}^{-1}$  处出现了强吸收峰,为 PCL 上的  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动吸收,相比而言,图 1(b)谱线上还在  $3400\text{ cm}^{-1}$  处出现了对应于  $\text{N}-\text{H}$  伸缩振动的强吸收峰,在  $1610$  和  $1650\text{ cm}^{-1}$  处出现了吡咯环上  $\text{C}=\text{C}$  的伸缩振动吸收峰,并在  $660\text{ cm}^{-1}$  处出现了  $\text{N}-\text{H}$  的变形振动吸收峰<sup>[19]</sup>. 因此,可以认

为图 1(b) 样品中除了含有 PCL 之外, 还含有 PPy, 说明所得到的产物为 PCL/PPy 电纺膜.

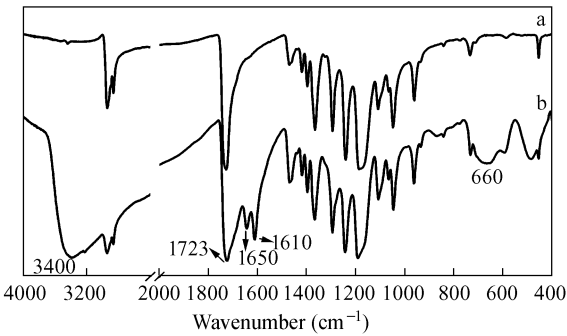


Fig. 1 ATR-FTIR spectra of electrospun membranes of PCL (a) and PCL/PPy with 20% Py (b)

2.3 微观形貌分析

图 2 为 PCL/PPy 电纺膜的 SEM 照片及其电纺纤维直径分布的柱状图. 由图 2(a~e) 可知, 随 Py 含量的增加, 所得到的 PCL/PPy 电纺纤维更为均匀, 纤维平均直径呈下降趋势, 直径分布范围也逐渐变窄. 不含有 Py 的纯 PCL 电纺纤维直径较粗, 平均直径为  $(730 \pm 341)$  nm, 而当 Py 含量增加至 20% 时, PCL/PPy 电纺纤维的平均直径下降至  $(325 \pm 84)$  nm. 由 2.1 节的分析可知, 加入 Py 和一定比例的 SDS 后, 电纺溶液的电导率、表面张力和黏度均未发生显著变化, 所以, 推测电纺纤维形貌的改善可能是由于 Py 的加入相对削弱了溶剂的挥发能力所导致的. 氯仿的沸点为  $61^{\circ}\text{C}$ , 是易挥发性溶剂, 这会使得电纺过程中的喷射细流具有较短的停留时间和受牵伸的可能, 从而得到直径较粗的电纺纤维. 当体系中加入 Py 后, 由于其沸点为  $131^{\circ}\text{C}$ , 较氯仿高很多, 使得电纺溶液的挥发能力相对下降, 所以喷射细流在电纺过程中受牵伸的程度增强, 因此得到的电纺纤维较细. 这种由于溶剂挥发程度下降而使得电纺纤维直径减小的现象也曾发生于 *N,N*-二甲基乙酰胺与丙酮的混和溶剂电纺体系<sup>[18]</sup>.

在图 2(e) 中, 可以看到纤维表面上有细小粒子, 并以无规形式附着在纤维表面. 考虑到图 2(e) 体系中 Py 和 SDS 的含量均较多, 其中 SDS 溶于水, 而 PPy 不溶于水, 因此可以推测, 这些细小的粒子可能是在氧化作用后所形成的 PPy 依附在纤维表面形成的.

图 3 分别是含有 20% Py 的 PCL 电纺纤维氧化前后的 TEM 照片. 从图 3(a) 可以看出, 纤维在氧化前表面平整、结构均匀, 没有出现明显的两相

结构. 纤维中隐约能够看到少许细小的粒子包载于纤维内部, 这可能是残留在电纺纤维内部的 SDS. 从图 3(b) 中可以明显看到, 氧化后纤维表面上形成了一层由纳米粒子组成的附着物. 由文献报道可知, 在  $\text{FeCl}_3$  作用下, 经原位聚合生成的 PPy 为直径  $50 \sim 200$  nm 的纳米粒子, 并相互聚集成分散相存在于 PDLLA/PPy 的共混体系中<sup>[7]</sup>. 本文观察到的结果与此相近. 综上分析可知, 原位生成的 PPy 以纳米粒子形式附着在电纺纤维表面而形成了 PCL/PPy 电纺纤维膜, 没有破坏 PCL 纤维本身的微观结构.

2.4 力学性能

对 PCL/PPy 电纺膜进行拉伸力学性能测试, 所得到的拉伸模量、拉伸强度和断裂伸长率列于表 2 中, 典型的应力-应变拉伸曲线如图 4 所示. 由结果可知, 随着 Py 含量的增加, PCL/PPy 电纺膜的拉伸模量和拉伸强度显现了增加的趋势. 不含 Py 的 PCL 电纺膜的拉伸模量和拉伸强度分别为  $(25.7 \pm 0.8)$  MPa 和  $(2.48 \pm 0.14)$  MPa, 含有 10% Py 时其分别增加至  $(51.1 \pm 3.0)$  MPa 和  $(5.30 \pm 0.62)$  MPa. 而后随着 Py 含量进一步增加, 其变化不再明显, 含有 20% Py 的 PCL/PPy 电纺膜的拉伸模量和拉伸强度分别为  $(48.4 \pm 7.6)$  MPa 和  $(5.05 \pm 0.59)$  MPa. 另一方面, 随 Py 含量的增加, 与 PCL 相比, 电纺膜的断裂伸长率逐渐下降, 从 PCL 电纺膜的  $(129 \pm 27)\%$  降至含有 20% Py 的  $(86.2 \pm 9.1)\%$ . PCL/PPy 电纺膜力学性能主要是由 PPy 与 PCL 的微观结构决定的, 随着 Py 含量的增加, 纤维表面附着更多的 PPy, 对 PCL/PPy 电纺膜拉伸模量、拉伸强度和断裂伸长率产生影响. 图 3(b) 显示, PPy 粒子之间是紧密堆积的, 未对 PCL 纤维本身微观结构造成影响, 而 PPy 粒子与 PCL 纤维之间部分镶嵌会使得两者较好地结合, 而起到增强的作用. 这与棉花纤维表面原位聚合 PPy 后的力学性能变化趋势相一致<sup>[20]</sup>.

Table 2 Mechanical properties of electrospun PCL/PPy membranes with different Py amounts

| No. | Py/PCL<br>(wt %) | Tensile modulus<br>(MPa) | Tensile strength<br>(MPa) | Elongation at<br>break (%) |
|-----|------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1   | 0                | $25.7 \pm 0.8$           | $2.48 \pm 0.14$           | $129 \pm 27$               |
| 2   | 5                | $36.7 \pm 6.2$           | $5.19 \pm 0.37$           | $127 \pm 9$                |
| 3   | 10               | $51.1 \pm 3.0$           | $5.30 \pm 0.62$           | $122 \pm 27$               |
| 4   | 15               | $41.1 \pm 3.7$           | $4.56 \pm 0.31$           | $82.3 \pm 13.8$            |
| 5   | 20               | $48.4 \pm 7.6$           | $5.05 \pm 0.59$           | $86.2 \pm 9.1$             |

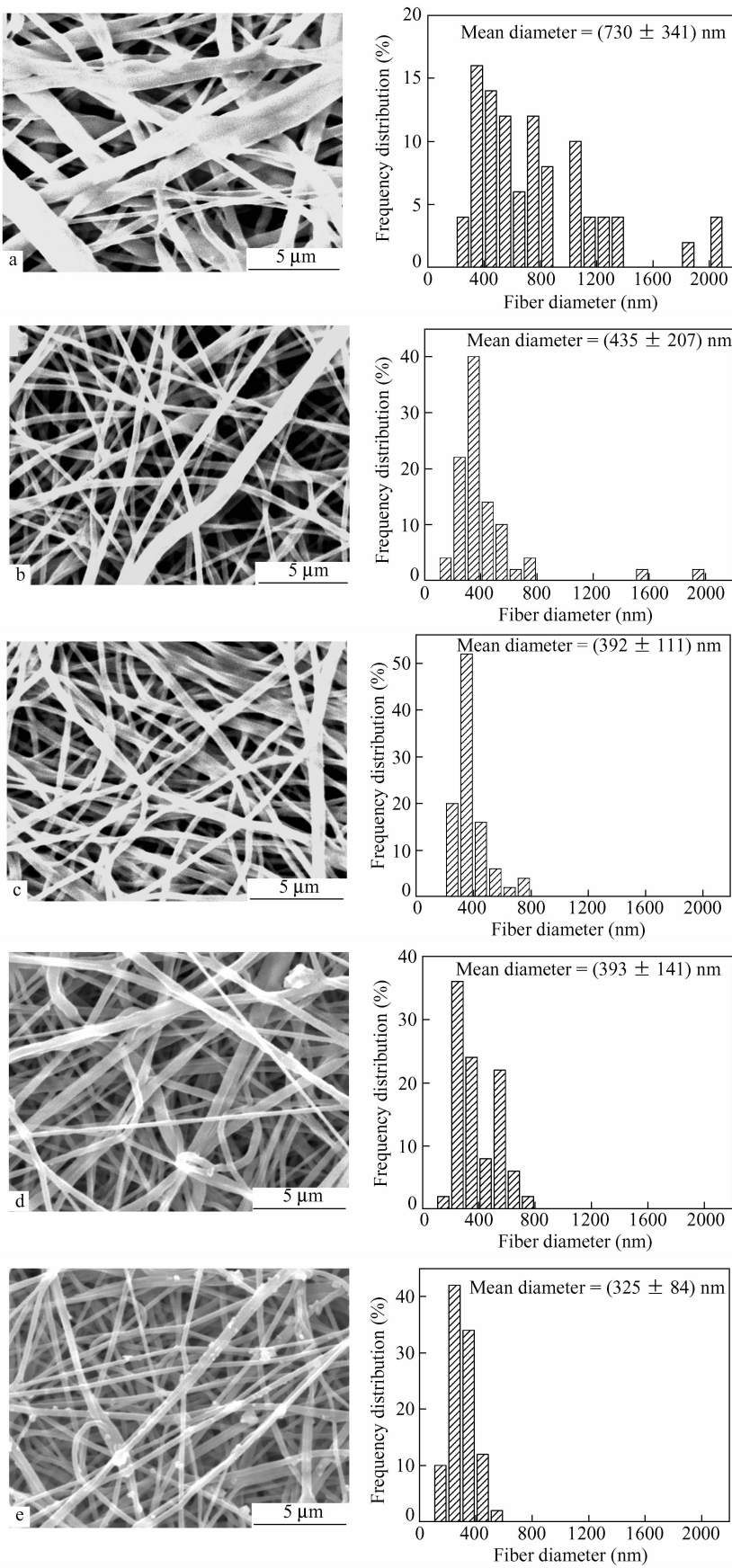


Fig. 2 SEM micrographs of electrospun PCL/PPy membranes and histograms of fiber diameters Py amount; a) 0% ; b) 5% ; c) 10% ; d) 15% ; e) 20%

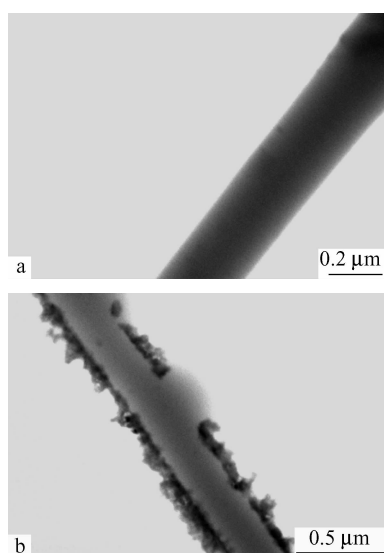


Fig. 3 TEM images of electrospun PCL/PPy fibers with 20% Py before (a) and after oxidation (b)

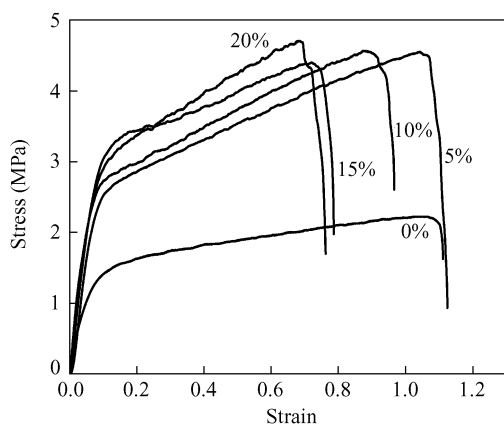


Fig. 4 Typical tensile stress-strain curves of electrospun PCL/PPy membranes with different Py amounts

## 2.5 体积电阻率分析

对所得到的 PCL/PPy 电纺膜进行体积电阻率的测定,结果如图 5 所示.随着 Py 含量的增加,PCL/PPy 电纺膜的体积电阻率呈下降趋势,当 Py 含量增加至 10% ~ 20% 时,电阻率下降幅度达

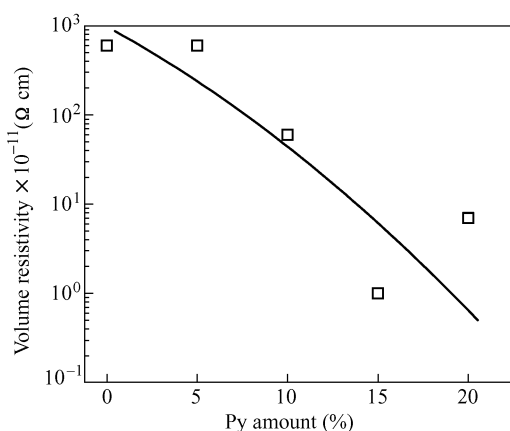


Fig. 5 Volume resistivity changes of electrospun PCL/PPy membranes with increasing the Py amount

2 ~ 3 个数量级. PCL/PPy 电纺膜体积电阻率逐步降低,说明随着 Py 增加,经过 SDS 掺杂的 PPy 具有一定的导电性.从图 2(e)和图 3(b)可知,PPy 在纤维表面没有形成连续相,而 PCL/PPy 电纺膜是两相体系,PPy 粒子分散在连续的 PCL 纤维表面.只有在 PPy 含量足够高的情况下,PPy 粒子相互连接,才能使其导电性显著提高.这有待于进一步开展研究工作,通过调节 PCL 与 PPy 的两相结构来提高 PCL/PPy 电纺膜的导电性.

## 3 结论

将 Py 与 PCL 一起电纺成纤维,再使 Py 原位聚合形成 PCL/PPy 电纺膜,考察 PPy 的引入对纤维形貌、力学性能和导电性的影响.研究发现,所形成的 PPy 以纳米粒子的形式附着在纤维表面,随着 Py 含量的增加,所得到的 PCL/PPy 电纺纤维直径有所下降,且分布变窄. PCL/PPy 电纺膜的拉伸模量、拉伸强度呈上升趋势,但断裂伸长率逐渐下降.随着 Py 含量的增加,PCL/PPy 电纺膜中 PPy 的含量也相应增加,使其体积电阻率明显降低.

## REFERENCES

- 1 Chan K C, Jeong S I, Jun I D, Choi M J, Nho Y C, Lee Y M, Shin H. *Macromol Biosci*, 2008, 8: 627 ~ 637
- 2 Schmidt C E, Shastri V R, Vacanti J P, Langer R. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1997, 94: 8948 ~ 8953
- 3 Radisic M, Park H, Shing H, Consi T, Schoen F J, Langer R, Freed L E, Vunjak-Novakovic G. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 18129 ~ 18134
- 4 Sun S, Titushkin I, Cho M. *Bioelectrochemistry*, 2006, 69: 133 ~ 141
- 5 Ma Sai (马赛), Jia Jun (贾骏), Duan Yuanyuan (段媛媛), Zhang Shaofeng (张少锋), Wang Zhongyi (王忠义). *J Fourth Mil Med Univ (第四军医大学学报)*, 2006, 27: 1833 ~ 1836
- 6 George P M, Lyckman A W, Lavan D A, Hegde A, Leung Y, Avasare R, Testa C, Alexander P M, Langer R, Sur M. *Biomaterials*, 2005, 26:

3511 ~ 3519

7 Shi G X,Rouabhia M,Wang Z X,Dao L H,Zhang Z. Biomaterials,2004,25:2477 ~ 2488

8 Shi G X,Zhang Z,Rouabhia M. Biomaterials,2008,29:3792 ~ 3798

9 Kim Y D,Kim J H. Colloid Polym Sci,2008,26:631 ~ 637

10 Fang Zhuangxi(方壮熙),Zhang Lu(张璐),Han Tao(韩涛),Hu Ping(胡平). Acta Polymerica Sinica(高分子学报),2004,(4):500 ~ 505

11 Li M Y,Guo Y,Wei Y,MacDiarmid A G,Lelkes P I. Biomaterials,2006,27:2705 ~ 2715

12 Xu Q L,Li Y,Wei F,Yuan X Y. Synthetic Met,2010,160:88 ~ 93

13 Srivastava Y,Marquez M,Thorsen T. J Appl Polym Sci,2007,106:3171 ~ 3178

14 Nair S,Hsiao E,Kim S H. J Mater Chem,2008,18:5155 ~ 5161

15 Lu X F,Zhao Q D,Liu X C,Wang D J,Zhang W J,Wang C,Wei Y. Macromol Rapid Commun,2006,27:430 ~ 434

16 Kim G,Park J H,Park S. J Polym Sci-Polym Phys,2007,45:2038 ~ 2045

17 Hu W W,Elkasabi Y,Chen H Y,Zhang Y,Lahann J,Hollister S J,Krebsbach P H. Biomaterials,2009,30:5785 ~ 5792

18 Yuan X Y,Zhang Y Y,Dong C H,Sheng J. Polym Int,2004,53:1704 ~ 1710

19 Munstedt H. Polymer,1986,27:899 ~ 904

20 Onar N,Aksit A C,Ebeoglugil M F,Birlik I,Celik E,Ozdemir I. J Appl Polym Sci,2009,114:2003 ~ 2010

PREPARATION AND PROPERTIES OF ELECTROSPUN  
POLY( $\epsilon$ -CAPROLACTONE)/POLYPYRROLE MEMBRANES

ZHOU Jianwei, ZHAO Shengling, ZHANG Xuequan, FENG Wei, YUAN Xiaoyan  
(School of Materials Science and Engineering, Tianjin Key Laboratory of Composite and Functional Materials,  
Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** Electrospun poly( $\epsilon$ -caprolactone) (PCL)/polypyrrole (PPy) membranes were prepared by *in situ* polymerization of pyrrole (Py) *via* oxidization with ferric chloride from PCL/chloroform solutions containing Py. Sodium dodecyl sulfate was also added in the electrospinning solution for doping PPy. The composition of the obtained PCL/PPy membranes was verified by Fourier transform infrared spectroscopy, and the fiber morphology was observed under a scanning electron microscope and a transmission electron microscope. Tensile mechanical properties and the volume resistivity of the PCL/PPy membranes were also tested. Results exhibited that the prepared PPy nanoparticles were attached on the electrospun fiber surface. The fiber diameter decreased gradually from (730  $\pm$  341) nm to (325  $\pm$  84) nm and showed narrower distribution with increasing the Py amount (mass percentage with respect to PCL) from 0 to 20%. The tensile modulus and tensile strength gave rise to an increase tendency, and their values increased from (25.7  $\pm$  0.8) MPa and (2.48  $\pm$  0.14) MPa of the PCL membrane to (48.4  $\pm$  7.6) MPa and (5.05  $\pm$  0.59) MPa of the PCL/PPy membrane with 20% Py, respectively. The elongation at break declined from (129  $\pm$  27)% to (86.2  $\pm$  9.1)% and the volume resistivity reduced by 2 ~ 3 orders. The electrospun PCL/PPy fibrous membranes would be possibly applied as electroactive materials in biomedical or functional area.

**Keywords** Polypyrrole, Poly( $\epsilon$ -caprolactone), Electrospun memberane, Electrical conductivity