

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.01.004

基于微喷技术的氧化石墨烯基层层自组装电极涂层

刘宝琦^{1,2}, 孙怀远², 廖跃华², 程静², 尧婉辰^{1,2}, 林祥德²

(1. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 上海健康医学院医疗器械学院, 上海 201318)

摘要: 改变以传统浸涂法为基础的层层自组装成膜, 进一步结合规模化、可控性和均匀性超声雾化微喷技术, 在柔性聚酰亚胺基底表面成功制备以静电相互作用力为驱动力的氧化石墨烯基层层自组装 (GO-NH₂/GO-COOH)_n 电极涂层, 进而通过加热还原处理获取 (RGO-NH₂/RGO-COOH)_n, 提升电极涂层导电性。结果表明, 基于超声雾化微喷技术的层层自组装导电薄膜可被规模化均匀制备, 且随着薄膜层数的增加导电性增强。另外, 与浸涂法层层自组装成膜相比, 在 $n=20$ 时, 还原后的薄膜方阻由 $(923.3 \pm 29.3) \text{ k}\Omega/\text{sq}$ 明显降低至 $(227.7 \pm 12.1) \text{ k}\Omega/\text{sq}$ 。因此, 进一步改善还原条件后, 其未来可被潜在应用于一系列柔性电子器件。

关键词: 微喷技术; 层层自组装; 氧化石墨烯; 电极涂层; 柔性电子器件

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)01-0020-05

Layer-by-Layer Assembled Graphene Oxide Electrode Coatings Based on Micro-Jetting

Liu Baoqi^{1,2}, Sun Huaiyuan², Liao Yuehua², Cheng Jing², Yao Wanchen^{1,2}, Lin Xiangde²

(1. School of Medical Instrumentation and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Medical Instrument, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China)

Abstract: In order to modify layer-by-layer (LbL) assembled films by the conventional dipping method, the conductive graphene oxide (GO) coatings assembled by electrostatic interactions-driven LbL were successfully obtained on polyimide substrates by integrating an scalable and controlled ultrasonic atomization-based micro-jetting technique, which were briefly described as (GO-NH₂/GO-COOH)_n electrode coatings. Subsequent thermal reduction treatment for the (RGO-NH₂/RGO-COOH)_n was conducted to further enhance electrical conductivity. Some remarkable results were found that ultrasonic atomization-based micro-jetting could be well employed into a LbL process, thereby preparing scalable homogeneous electrode coatings with enhanced electroconductibility as increased layers. In addition, the sheet resistance of thermally reduced (RGO-NH₂/RGO-COOH)_n was significantly cut down from $(923.3 \pm 29.3) \text{ k}\Omega/\text{sq}$ to $(227.7 \pm 12.1) \text{ k}\Omega/\text{sq}$, compared to that of such LbL films by a conventional immersion method. Guiding with this work, well-reduced GO-based electrode coatings can be potentially used for wearable flexible electronic devices in the near future.

Keywords: micro-jetting technique; layer-by-layer assembly; graphene oxide; electrode coatings; flexible electronic devices

柔性电子技术是一种将有机或无机材料电子器件制作在柔性、可延展性的塑料或薄金属基板上的新兴电子技术。与传统的电子元器件相比, 柔性电子元器件由于具有一定的机械性、可弯曲、可折叠、延展性、轻量化等特性, 可适应更加复杂多变的工作环境。在医疗器械行业, 柔性电子器件可应用

于穿戴式医疗器械、电化学生物传感器、柔性电极、电子皮肤、光电器件等重要领域^[1-3]。

石墨烯、氧化石墨烯及还原氧化石墨烯等二维碳材料由于其优异的物理化学和光电特性, 在柔性电子器件领域展现出一定潜力和应用前景^[4]。二维石墨烯基材料可作为柔性电极主体、复合导电载体

基金项目: 国家自然科学基金项目 (22008151), 上海市青年科技英才扬帆计划 (20YF1418000)

通信作者: 孙怀远, 教授, 主要研究方向为药物微喷射技术、精密仪器及机械 E-mail: sunhy@sumhs.edu.cn

收稿日期: 2020-10-26

引用格式: 刘宝琦, 孙怀远, 廖跃华, 等. 基于微喷技术的氧化石墨烯基层层自组装电极涂层 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(1):20-24, 29.

Liu Baoqi, Sun Huaiyuan, Liao Yuehua, et al. Layer-by-layer assembled graphene oxide electrode coatings based on micro-jetting[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):20-24, 29.

或活性涂层材料。特别是在柔性电极方面,石墨烯基导电薄膜被广泛用于可拉伸、图案化、复合化和透明性导电电极^[5-6]。目前,常见的柔性电极成膜工艺主要有迈耶棒法、旋涂法、喷涂法、微喷法、滴涂法、电化学沉积法、磁控溅射法、抽滤法、转印法、印刷法等^[7-8]。与其它成膜工艺相比,微喷法具有规模化、参数可控、均匀性好、精密度高、触发频率快、节约材料和非接触打印的优点。超声雾化微喷技术利用压电陶瓷片的高频振动产生的较大振幅,当液体到达雾化端面时,在表面张力波和振幅的共同作用下,液体被分裂为微小雾滴^[9]。当超声波振动加剧时,在波峰处会有小液滴飞起,飞出的液滴又被超声波振动而进一步雾化,故产生的超声雾化液滴粒径小,通常在几十微米,且分布均匀^[10]。

氧化石墨烯和还原氧化石墨烯还可以通过层层自组装方式成膜。层层自组装技术是利用逐层交替沉积的原理,通过聚电解质间静电相互作用、氢键等为代表的相互作用力为驱动力,在特定模板表面自发形成具有完整结构和功能的薄膜成型技术^[11]。具有基材广泛、膜厚度可控、适用范围广、操作简单等特点,被广泛应用于生物医学、药物递送、光电器件、环境处理等领域^[12]。

笔者选用呈负电的羧基化氧化石墨烯(GO-COOH)和呈正电的氨基化氧化石墨烯(GO-NH₂)作为自组装成膜材料,以柔性聚酰亚胺(PI)为基底,将超声雾化微喷技术与层层自组装技术相结合,成功制备了以静电相互作用力为驱动力的氧化石墨烯基层层自组装(GO-NH₂/GO-COOH)_n电极涂层,通过热还原处理后获得(RGO-NH₂/RGO-COOH)_n电极涂层,并对其进行表征及应用。

1 实验部分

1.1 原材料

PI薄膜:厚度200 μm,东莞市美鑫绝缘材料有限公司;

GO-COOH, GO-NH₂:南京先丰纳米材料科技有限公司;

十六通道丝网印刷碳电极(SPCE):浙江纳智汇生物科技有限公司;

K₃[Fe(CN)₆]溶液(5 mM)、KCl溶液(0.1 M)、甘油、去离子水、无水乙醇:分析纯,市售。

1.2 仪器及设备

数控超声波清洗器:KQ-300DE型,昆山市超声仪器有限公司;

等离子清洗机:PDC-002-HP型,迈可诺技术有限公司;

十六通道电化学工作站:HSBS16x型,浙江纳智汇生物科技有限公司;

精密鼓风干燥箱:BPG-9106A型,上海一恒科学仪器有限公司;

电化学分析仪:CHI660E型,上海辰华仪器有限公司;

RD-COATER综合喷涂系统:喷头RD-uts型,上海睿度光电科技有限公司;

手持式数字四探针测试仪:M-3型,苏州晶格电子有限公司;

超高分辨场发射扫描电子显微镜(SEM):Regulus 8100型,日立高新技术公司;

紫外-可见光分光光度计:DR6000,哈希水质分析仪器(上海)有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Spectrum two型,珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司;

接触角测量仪:SDC-100型,东莞市晟鼎精密仪器有限公司。

1.3 层层自组装电极涂层制备

为使微喷涂过程中雾滴均匀分布,防止咖啡环效应,30%比例的甘油被加入聚电解质溶液,以提高沸点和降低表面张力。因此,将呈正电的GO-NH₂溶液(0.5 mg/mL, pH=6)与呈负电的GO-COOH溶液(0.5 mg/mL, pH=6)分别与甘油以7:3的体积比均匀混合,得到两种聚电解质溶液用于后续以浸涂法和微喷技术为基础的层层自组装成膜过程。

(1) 以浸涂法为基础的层层自组装电极涂层。

首先,将柔性PI薄膜切割成10 mm × 40 mm大小后在去离子水中用超声波清洗器(40 kHz)清洗10 min,再用无水乙醇浸泡清洗10 min,取出吹干。然后使用等离子清洗机处理5 min,使基底表面带负电。第二,将处理后的柔性基底浸入带正电的GO-NH₂溶液10 min。之后以同样方式浸入去离子水中清洗2 min/1 min/1 min,洗掉多余的聚电解质。第三,将沉积有GO-NH₂的基底浸入带负电的GO-COOH溶液10 min,接着同样浸入去离子水中清洗2 min/1 min/1 min。以上浸涂过程称为一个循环的层层自组装双层膜。第四,重复以上浸涂过程,进行*n*个循环层层自组装,样品记为PI/(GO-NH₂/GO-COOH)_n,分别获得*n*=4, 12,

20 的电极涂层。第五,将样品置于精密鼓风干燥箱加热 3 h,温度设定为 200 ℃。热还原后得到 PI/(RGO-NH₂/RGO-COOH)_n 样品用于测试。同样,对于以 SPCE 为基底的层层自组装成膜,样品记为 SPCE/(GO-NH₂/GO-COOH)_n, *n* 以 2 为间隔最大取至 12。考虑到基底的极限耐热温度,热还原温度设置为 130 ℃,处理 3 h 后得到 SPCE/(RGO-NH₂/RGO-COOH)_n 样品用于测试。

(2) 以微喷技术为基础的层层自组装电极涂层。

分别以柔性 PI 和玻璃载玻片为基底,经过相同的清洗和等离子处理后,将基底浸入带正电的 GO-NH₂ 溶液 10 min。之后以同样方式浸入去离子水中清洗 2 min/1 min/1 min。然后,将带负电的 GO-COOH 溶液利用超声雾化系统喷涂在 PI 表面。具体如下:将超声功率设定为 1.5 W,工作模式设定为灌注模式,灌注速率为 0.04 mL/min,加载路径代码后喷头按设定路径运动,对样品表面进行喷涂,喷涂一次时间为 30 s。喷涂完成后,浸入去离子水中清洗 2 min/1 min/1 min。以上浸涂和喷涂过程记为一个循环,重复 *n* 个循环且经过热还原 (200 ℃, 10 h) 后,得到 PI/(RGO-NH₂/RGO-COOH)_n 或玻璃 (G)/(RGO-NH₂/RGO-COOH)_n 样品用于测试, *n* 分别为 4, 12 和 20。

2 结果与讨论

2.1 基于浸涂法的石墨烯基层层自组装电极涂层

氧化石墨烯表面具有大量的功能官能团,例如羧基 (—COOH) 和羟基 (—OH),且可被可控修饰带有氨基 (—NH₂ 和 —NH—) 的功能性分子,因此为以静电相互作用为驱动力的层层自组装成膜过程提供了分子结构基础。笔者选用 Hummers 法制备的负电性 GO-COOH (片径大于 500 nm) 和以聚乙烯亚胺 (PEI) 修饰的正电性 GO-NH₂ (片径介于 190 ~ 320 nm) 为成膜材料。调节 pH 和添加甘油后,制备相应的聚电解质溶液。浸涂法是层层自组装成膜技术中应用最为广泛和经典的一种,如图 1 所示,但在拓展深入应用的过程还存在某些限制。笔者致力于以微喷技术改进传统的浸涂法层层自组装成膜,最终潜在应用于柔性医疗电极薄膜或涂层,例如代表性的可植入球囊电极和电化学生物传感器。

还原性氧化石墨烯膜具有电子传输性和带隙,显示出可控的导电性和电催化还原性^[13]。根据不同基底分别采用 130 ℃ 和 200 ℃ 热还原, (GO-NH₂/GO-COOH)_n 多层膜被还原为 (RGO-NH₂/RGO-

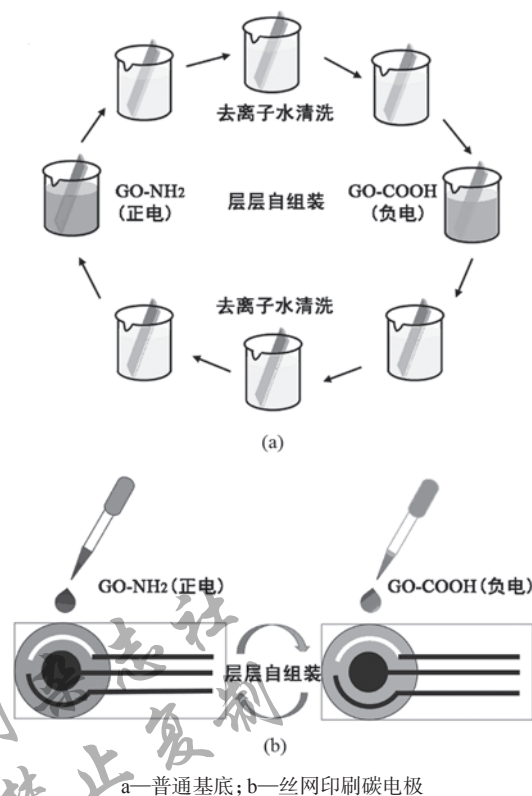
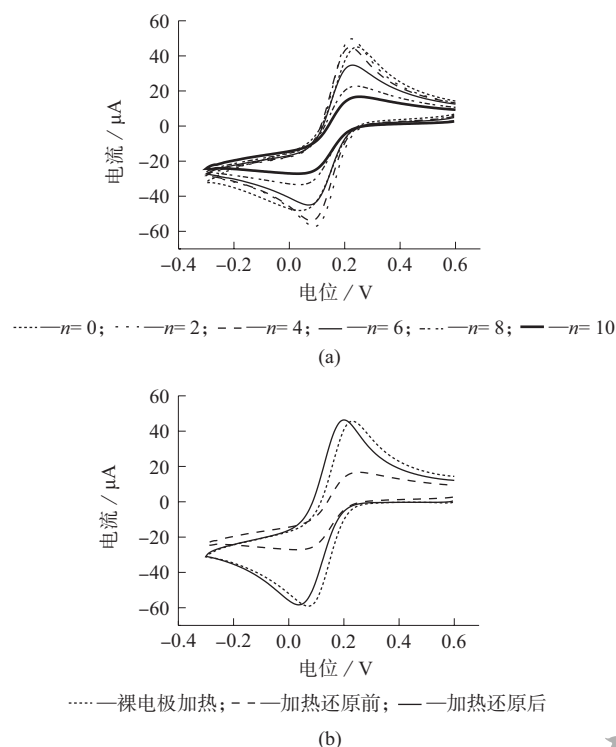


图1 基于传统浸涂法的石墨烯基层层自组装成膜示意图

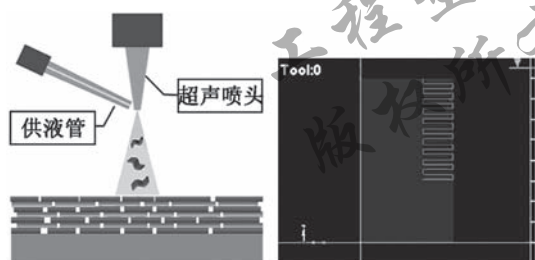
COOH)_n, 以进一步探究其导电性和电催化性。因此,如图 1b 所示,基于浸涂法在丝网印刷碳电极上制备了 PI/(RGO-NH₂/RGO-COOH)_n 电极涂层。然后利用循环伏安法 (CV), 对热还原前后不同循环数 *n* 的电极涂层进行了 CV 测试,如图 2a 所示。在热还原前,随着循环数 *n* 的增加,多层薄膜厚度增加,氧化还原电流随之逐渐降低,反映出多层膜整体低导电性 (高电阻) 和电催化活性的减弱。但对 SPCE/(RGO-NH₂/RGO-COOH)₁₀ 经过热还原处理后,图 2b 显示出了导电性和电催化活性的显著增强转变,证明了氧化石墨烯基电极涂层的可控还原的必要性以及在柔性电极和生物传感领域的潜在应用。

2.2 基于微喷技术的石墨烯基层层自组装电极涂层

由于片状 GO-NH₂ 和 GO-COOH 中带电基团位点的差异,以静电相互作用为驱动力的浸涂法层层自组装多层膜通常显示出褶皱结构,某种程度上改变了上下层间的接触面积和电子转移速率。因此,以参数可控性和成膜均匀性为特点的超声雾化微喷技术被引入层层自组装过程,以替代 GO-COOH 的浸涂过程,如图 3 所示。超声雾滴和 GO-COOH 片径均呈现微米级大小,经过微喷涂和清洗过程后,静电吸附力不足和不紧凑褶皱结构的氧化石墨烯不能



a—热还原前不同循环数 CV 曲线; b—热还原前后 10 循环数 CV 曲线
图 2 不同层层自组装循环数和热还原前后的电极 CV 曲线



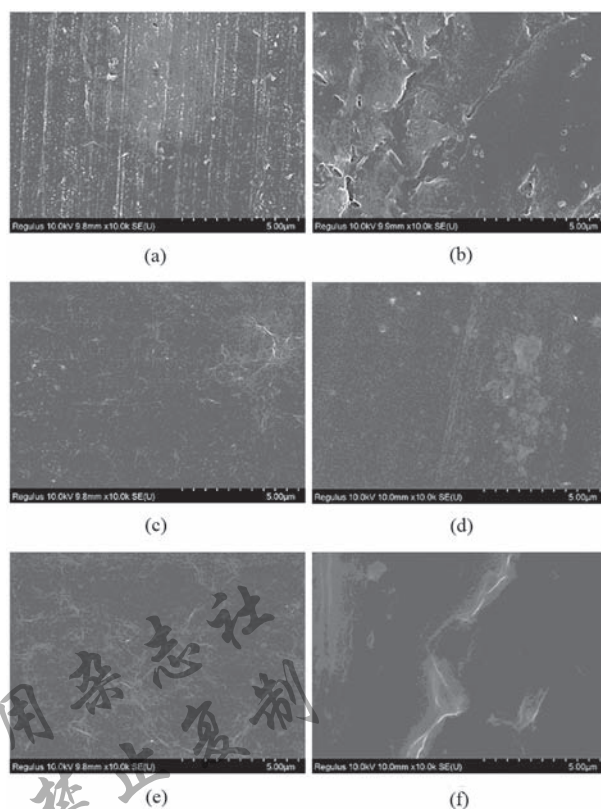
a—超声雾化微喷技术示意图; b—程序性控制微喷路径示意图
图 3 基于超声雾化微喷技术的层层自组装示意图

结合于 GO-NH_2 表面。因此,相对于传统浸涂法,基于微喷技术的 $\text{PI}/(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 多层膜展现出更均匀的成膜特性,如图 4 所示。当循环数 n 为 4, 12, 20 时, SEM 照片均显示出微喷层层自组装多层膜的低粗糙和高光滑表面。这种成膜结构将有助于提高层间电子转移速率和降低薄膜电阻,即相对改善导电薄膜的导电性能。

2.3 基于微喷技术的 $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 电极涂层表征

为进一步证明微喷技术可被成功用于层层自组装成膜过程,通过紫外-可见光谱图、FTIR 谱图及接触角测试进行了表征,结果见图 5~图 7。

图 5 的紫外-可见光谱图显示,随着循环层数



a—浸涂, $n=4$; b—微喷, $n=4$; c—浸涂, $n=12$; d—微喷, $n=12$;
e—浸涂, $n=20$; f—微喷, $n=20$

图 4 基于浸涂法和微喷技术的层层自组装 $\text{PI}/(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 电极涂层的 SEM 照片

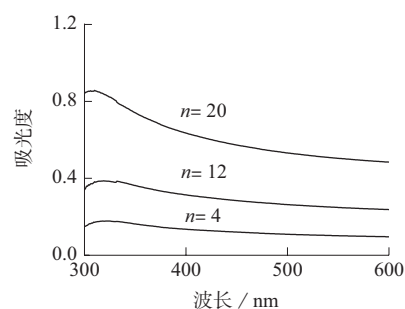


图 5 基于微喷技术的 $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 电极涂层紫外-可见光谱图

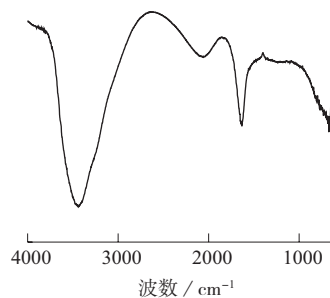


图 6 基于微喷技术的 $(\text{GO-NH}_2/\text{GO-COOH})_{20}$ 电极涂层 FTIR 谱图

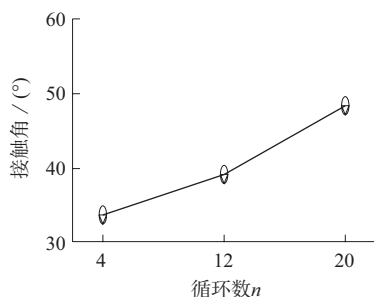


图7 基于微喷技术的 $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 电极涂层的水滴接触角

n 的逐渐增加,在 310 nm 波峰位置的吸光度显著增加,反映出基于微喷技术的石墨烯基 $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 多层薄膜可被成功制备且厚度随着 n 均匀变化。图 6 的 FTIR 谱图显示,在 $3400 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ 的位置具有羟基和氨基的特征峰, 1630 cm^{-1} 的位置具有氧化石墨烯类苯环结构上的 $\text{C}=\text{C}$ 伸缩振动峰,可进一步证明氧化石墨烯为基础的组装成膜。

前面提到,制备的 $(\text{GO-NH}_2/\text{GO-COOH})_n$ 及部分还原后的 $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 电极涂层含有大量 $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NH}-$ 等亲水性官能团。因此,根据界面浸润理论, $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 表面会呈现小于 90° 的水滴接触角^[14]。如图 7 所示,随着循环数 n 的增加(4,12 和 20), $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 表面水滴接触角分别对应为 33.8° , 39.2° 和 48.4° ,明显呈现正相关关系。这很大程度上是由于微喷涂自组装引起的表面粗糙度降低和热还原后内部亲水基团的部分损失,最终引起由石墨烯苯环骨架主导的疏水性的逐渐增加。同时,这也侧面反映层层自组装 $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 多层膜的成功制备,且随着循环数 n 的增加,厚度均匀增长。

表1 不同 $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 电极涂层的薄膜方阻

自组装方法	循环数 n	薄膜方阻 / $(\text{k}\Omega \cdot \text{sq}^{-1})$
浸涂	12	∞
微喷	12	788.7 ± 55.9
浸涂	20	923.3 ± 29.3
微喷	20	227.7 ± 12.1

作为柔性电子器件的潜在应用材料,导电性是一项重要指标。通常氧化石墨烯薄膜具有很高的电阻值,学者们通过不同还原方法对其进行还原去除不必要的官能团以实现良好导电性和电催化活性的平衡^[13]。为了证明浸涂法和微喷技术层层自组装薄膜之间的导电性差异,仅采取了温和的热还原过

程,因此普遍显示出了较高电阻。然而,表 1 显示,微喷过程的参与在同等条件下 ($n=20$) 薄膜方阻从 $(923.3 \pm 29.3) \text{ k}\Omega/\text{sq}$ 降至 $(227.7 \pm 12.1) \text{ k}\Omega/\text{sq}$ 。另外,同样采用微喷为基础的层层自组装, $n=12$ 时薄膜方阻为 $(788.7 \pm 55.9) \text{ k}\Omega/\text{sq}$,明显高于 $n=20$ 时,表明循环数可以明显改善电极涂层导电性。因此,在未来,可以通过双通道微喷技术为基础的层层自组装,同时增加循环数,配合改善还原条件,最终制备更加适合于柔性电子器件的高导电性或良好电催化活性的石墨烯基电极薄膜或涂层。

3 结论

(1) 采用以静电相互作用为组装驱动力的浸涂法层层自组装成膜,通过热还原处理在不同柔性基底上制备了 $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 电极涂层,并展现出了一定导电性和电催化活性。

(2) 提出超声雾化微喷技术为基础的层层自组装成膜,对比同等条件下的传统浸涂法,显示出了高度成膜均匀性、参数可控性和规模化制备等优点,并进一步提升了导电性。

(3) 双通道微喷技术、循环数和还原条件可被进一步优化成膜,最终 $(\text{RGO-NH}_2/\text{RGO-COOH})_n$ 电极薄膜或涂层未来可被深入应用于柔性电子器件,如可植入性柔性电极和电化学生物传感器等。

参考文献

- [1] Gao W, Ota H, Kiriya D, et al. Flexible electronics toward wearable sensing[J]. Accounts of Chemical Research, 2019, 52(3):523-533.
- [2] Wang Xuewen, Liu Zhen, Zhang Ting. Flexible sensing electronics for wearable/attachable health monitoring[J]. Small, 2017, 13(25). doi:10.1002/sml.201602790.
- [3] Huang S, Liu Y, Zhao Y, et al. Flexible electronics:stretchable electrodes and their future[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(6).doi:10.1002/adfm.201805924.
- [4] You R, Liu Y Q, Hao Y L, et al. Laser fabrication of graphene-based flexible electronics[J]. Advanced Materials, 2020, 32(15). doi:10.1002/adma.202070112.
- [5] Becerril H A, Mao J, Liu Z, et al. Evaluation of solution-processed reduced graphene oxide films as transparent conductors[J]. ACS Nano, 2008, 2(3):463-470.
- [6] Zhu Y, Murali S, Cai W, et al. Graphene and graphene oxide:Synthesis, properties, and applications[J]. Advanced Materials, 2010, 22(35):3 906-3 924.

(下转第 29 页)

- Tu Hongyi, Zhang Yunfei, Huang Anping, et al. Preparation and properties of wollastonite filled PLA / PBAT composites[J]. Engineering Plastics Applications, 2020, 48(9):24-31.
- [9] Pan Hongwei, Li Zonglin, Yang Jia, et al. The effect of MDI on the structure and mechanical properties of poly (lactic acid) and poly (butylene adipate-co-butylene terephthalate) blends[J]. RSC Advances, 2018, 8(9):4 610-4 623.
- [10] 颜颖达, 赵珊, 阳范文, 等. PLA / PBAT 共混体系的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11):36-41.
- Yan Yingda, Zhao Shan, Yang Fanwen, et al. Preparation and properties of PLA / PBAT blend system[J]. Engineering Plastics Applications, 2019, 47(11):36-41.
- [11] 胡美华, 徐友利, 邵伟强, 等. 全生物降解地膜研发推广应用现状与对策措施[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(5):703-706.
- Hu Meihua, Xu Youli, Shao Weiqiang, et al. Current situation and countermeasures of the development and application of biodegradable plastic film[J]. Zhejiang Agricultural Science, 2019, 60(5):703-706.
- [12] 杨柳, 张雅琪, 赵亚浩, 等. 双增 PLA / PBAT / TiO₂ 复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(2):67-71.
- Yang Liu, Zhang Yaqi, Zhao Yahao, et al. Preparation and properties of dual-zeng PLA / PBAT / TiO₂ composite[J]. Plastic Science and Technology, 2020, 48(2):67-71.
- [13] 谢熙威, 翁云宣, 张彩丽, 等. 铝酸酯增容改性竹粉对 PBAT / BF 复合材料性能的影响[J]. 中国塑料, 2020, 34(4):78-83.
- Xie Xiwei, Weng Yunxuan, Zhang Caili, et al. Effect of aluminate compatibilizer modified bamboo powder on properties of PBAT / BF composites[J]. China Plastics, 2020, 34(4):78-83.
- [14] 罗容, 肖芳, 元庆, 等. PE-HD / 磷石膏晶须复合材料力学性能[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6):25-29.
- Luo Rong, Xiao Fang, Yuan Qing, et al. Mechanical properties of PE-HD / phosphogypsum whisker composites[J]. Engineering Plastics Applications, 2008, 46(6):25-29.
- [15] 钟生缘, 杨序平. 改性木质素 / PBAT 复合材料的制备及其性能[J]. 西南科技大学学报, 2019, 34(2):8-13.
- Zhong Shengyuan, Yang Xuping. Preparation and properties of modified lignin / PBAT composites[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2019, 34(2):8-13.
- [16] 杨红艳, 刘江, 周晓红, 等. 无水硫酸钙晶须对 PP 复合材料的熔融结晶和力学性能的影响[J]. 塑料工业, 2013, 41(7):87-90.
- Yang Hongyan, Liu Jiang, Zhou Xiaohong, et al. Effect of anhydrous calcium sulfate whisker on melting crystallization and mechanical properties of PP composites[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(7):87-90.
-
- (上接第 24 页)
- [7] 刘萍, 曾葆青, 王亚雄, 等. 纳米线透明导电薄膜的制备及在光电器件中的应用[J]. 材料导报, 2017, 31(7):6-18.
- Liu Ping, Zeng Baoqing, Wang Yaxiong, et al. Transparent conductive nanowires thin films: Preparation methods and applications in optoelectronic devices[J]. Materials Reports, 2017, 31(7):6-18.
- [8] Yao B, Zhang J, Kou T, et al. Paper-based electrodes for flexible energy storage devices[J]. Advanced Science, 2017, 4(7):10. doi:1002/advs.201700107.
- [9] 梁泽钦, 邱红喜, 杨明丰, 等. 超声雾化加湿系统研究与设计[J]. 武汉轻工大学学报, 2006, 25(3):24-26.
- Liang Zeqin, Qiu Hongxi, Yang Mingfeng, et al. Study and design on the ultrasonic atomization watering system[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2006, 25(3):24-26.
- [10] Rajan R, Pandit A B. Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomisation[J]. Ultrasonics, 2001, 39(4):235-255.
- [11] Decher G. Fuzzy nanoassemblies: Toward layered polymeric multicomposites[J]. Science, 1997, 277:1 232-1 237.
- [12] Richardson J J, Björnalm M, Caruso F. Technology-driven layer-by-layer assembly of nanofilms[J]. Science, 2015, 348. doi:10.1126/science.aaa2491.
- [13] 陈利萍, 杨蓉, 燕映霖, 等. 氧化石墨烯还原程度的控制[J]. 化学进展, 2018, 30(12):1 930-1 941.
- Chen Liping, Yang Rong, Yan Yinglin, et al. The control of reduction degree of graphene oxide[J]. Progress in Chemistry, 2018, 30(12):1 930-1 941.
- [14] Liu M, Wang S, Jiang L. Nature-inspired superwettability systems[J]. Nature Reviews Materials, 2017, 2(7):1-17.
- [15] 金文涛, 孙怀远, 王书平, 等. 基于微喷技术打印高分辨率的柔性电路[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(9):82-86.
- Jin Wentao, Sun Huaiyuan, Wang Shuping, et al. Printing high resolution flexible circuit based on micro-jet[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9):82-86.