

DOI: 10.11918/201808099

# 电泳沉积法在 IPMC 电极制备中的应用研究

杜野<sup>1,2</sup>, 赵刚<sup>1</sup>, 隋志阳<sup>1</sup>, 梁博<sup>2</sup>, 王仲文<sup>2</sup>, 张鹏<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨理工大学 荣成校区, 山东 荣成 264300)

**摘要:** 化学镀是制备 IPMC (Ionic polymer-metal composites, 离子聚合物金属复合材料) 电极的常用方法. 传统化学镀银方法制备 Ag-IPMC (传统化学镀方法) 的周期约为 32 h, 时间较长. 为此, 本文采用电泳沉积法将多壁碳纳米管 (MCNT) 沉积在 Nafion 基膜表面作为 IPMC 电极, 以缩短电极制备周期. 由于 MCNT 与 Nafion 基膜之间的结合力较小, 所以首先进行一次化学镀得到 Ag-IPMC (1 次化学镀), 然后再利用电泳沉积法得到 MCNT-Ag 复合电极 IPMC. 同时研究了电泳电压和电泳沉积时间对 IPMC 电致动性能的影响. 电泳沉积法不仅制备周期为传统化学镀方法的一半, 并且制备的 IPMC 电致动性能也明显优于传统化学镀法. 电泳沉积法是一种非常有应用前景的 IPMC 电极制备方法.

**关键词:** 离子聚合物金属复合材料; MCNT-Ag-IPMC; 电泳沉积法; 多壁碳纳米管; IPMC 电极

中图分类号: TB381

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)01-0100-07

## Application of electrophoretic deposition method for the preparation of IPMC electrode

DU Ye<sup>1,2</sup>, ZHAO Gang<sup>1</sup>, SUI Zhiyang<sup>1</sup>, LIANG Bo<sup>2</sup>, WANG Zhongwen<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Rongcheng Campus, Harbin University of Science and Technology, Rongcheng 264300, Shangdong, China)

**Abstract:** Chemical plating method is one of the most common manufacturing techniques of IPMC (Ionic polymer-metal composites) electrode. But the preparation period of conventional chemical silver plating method is about 32 h, which is very time consuming. Thus, the electrophoretic deposition method was proposed in this paper. MCNT (multiwalled carbon nanotube) was introduced in the electrophoretic deposition method. In considering the poor combination of MCNT and Nafion membrane, an electroless silver plating reaction was first carried out before the electrophoretic deposition method. Finally, MCNT-Ag-IPMC was successfully prepared. In addition, the influences of electrophoresis voltage and deposition time, two important parameters in electrophoretic deposition method, on the actuating performance of IPMC were also studied. As a result, the preparation period of electrophoretic deposition method was half of that of the conventional chemical silver plating method. In addition, the actuating performance of prepared IPMC was fully superior to that of conventional chemical silver plating method. It could be concluded that the electrophoretic deposition method is a promising method for the preparation of IPMC electrode.

**Keywords:** ionic polymer-metal composites; MCNT-Ag-IPMC; electrophoretic deposition method; MCNT; IPMC electrode

离子聚合物金属复合材料 (Ionic Polymer-Metal Composites, IPMC), 是一种电致动人工肌肉材料<sup>[1-4]</sup>. IPMC 由离子聚合物基膜 (通常为 Nafion 膜) 和基膜两面的金属电极构成, 是一种类似于“三明治”的结构<sup>[5-8]</sup>. 当施加电压时, IPMC 将产生弯曲变形, 因此可以利用 IPMC 的运动特性研制微型致

动器, 实现电能向机械能的转化<sup>[9-11]</sup>.

提高 IPMC 电致动性能的常用方法是采用高效的离子聚合物基膜, 比如磷酸钽-聚苯胺复合亲水聚合物膜<sup>[12-14]</sup>, 磺化聚乙烯醇聚吡咯<sup>[15-16]</sup>, 纳米粒子掺杂科腾聚合物<sup>[17]</sup>等.

另一种方法是改进 IPMC 电极的制备方法. 电极制备方法主要有化学镀法、物理吸附法、化学气相沉积法等. 其中应用最广泛的是化学镀法, 它是利用还原剂将基膜 (常用 Nafion 膜) 表面和内部的金属阳离子还原而生成金属电极层<sup>[18]</sup>. 化学镀法一般包括一次主化学镀反应和两次次化学镀反应, 大约需要 32 h, 周期较长. 本文提出利用电泳沉积法缩短制备周期. 由于 MCNT 具有导电性好, 比面积大,

收稿日期: 2018-08-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51473074), 黑龙江省普通高校基本科研业务费专项资金 (LGYC2018JC052); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划 (UNPYSCT-2018205); 山东省高等学校科技计划项目 (J17KB013, J16LB51)

作者简介: 杜野 (1976—), 男, 博士研究生

通信作者: 赵刚, zhaoganghgc@163.com;

梁博, bliang0325@163.com

稳定性高等特点, 并且 MCNT 作为电极可以增大 IPMC 电容<sup>[9]</sup>, 进而增大 IPMC 电致动性能, 所以本文采用电泳沉积法将 MCNT 沉积在基膜表面作为电极材料. 由于 MCNT 与 Nafion 膜之间的结合力较小, 所以首先进行一次化学镀得到 Ag-IPMC (1 次化学镀), 然后再利用电泳沉积法将 MCNT 包覆在 Ag 电极外层, 最后制备得到 MCNT-Ag-IPMC.

电泳沉积法不仅制备周期为传统化学镀方法的一半, 并且制备的 IPMC 电致动性能也明显优于传统化学镀法. 总之, 电泳沉积法是一种非常有应用前景的 IPMC 电极制备方法.

沉积时间和电泳电压对 MCNT 形貌和 IPMC 的电致动性能具有重要的影响, 所以本文也对这部分内容进行了讨论. 这对于 IPMC 电极形貌的设计具有重要的指导意义.

## 1 实验

### 1.1 材料

Nafion-117 膜 (厚度为 0.183 mm), 北京凤翔科技有限公司; MCNT 长为 10~30 μm, 直径为 40 nm, 比表面积为 500 m<sup>2</sup>/g, 武汉汇普化学新材料有限公司; AgNO<sub>3</sub> (≥99.8%), 氨水 (NH<sub>3</sub> 含量, 25%~28%), C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> (≥95%) 和 NaOH (≥95%), 国药集团化学试剂有限公司.

### 1.2 传统化学镀方法制备 Ag-IPMC

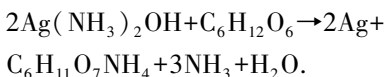
#### 1.2.1 Nafion-117 基膜预处理

将 Nafion-117 基膜剪切成 50 mm×10 mm 样条随后用 W10 金相砂纸手工打磨 5 min.

#### 1.2.2 主化学镀过程

1) 离子交换过程. 将预处理后的基膜浸入 50 ml 0.25 mol/L NaOH 溶液中 1 h, 使 Na<sup>+</sup> 充分浸入 Nafion 膜内部. 随后将基膜放入 50 mL 0.03 mol/L Ag(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>+</sup>OH 中 13 h, 使 Ag(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>+</sup> 与 Na<sup>+</sup> 充分交换.

2) 氧化还原过程. 将足量的 0.015 mol/L C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> 溶液逐滴加入 Ag(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>+</sup>OH 溶液中, 发生氧化还原反应, 化学反应方程式如下:



反应完毕, 将基膜在超声波清洗仪中超声 10 min, 以去除与电极层结合不牢的 Ag 颗粒, 整个主化学镀过程用时 3 h.

#### 1.2.3 次化学镀过程

除了将基膜浸入 0.03 mol/L Ag(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>+</sup>OH 中 5 h 外, 离子交换过程同 1.2.2(1), 氧化还原过程同 1.2.2(2), 重复两次, 即进行两次次化学镀反应, 最终得到 Ag-IPMC (传统化学镀方法).

### 1.3 电泳沉积法制备 MCNT-Ag-IPMC

电泳沉积法制备 MCNT-Ag-IPMC 流程图如图 1 所示.

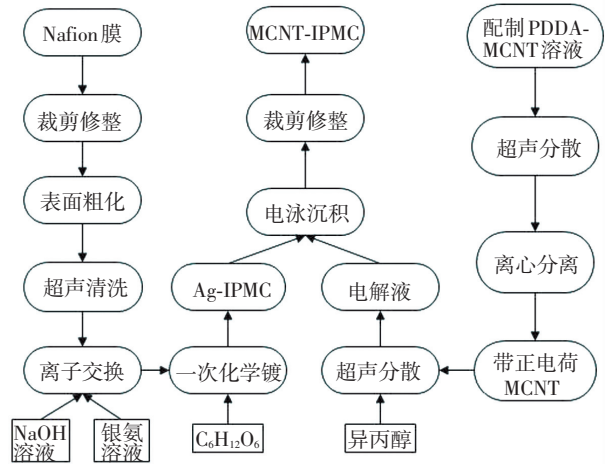


图 1 MCNT-Ag-IPMC 人工肌肉制备工艺流程图

Fig.1 Fabrication process of the MCNT-Ag-IPMC

#### 1.3.1 基膜预处理和主化学镀过程

过程同 1.2.1 和 1.2.2 部分.

#### 1.3.2 电泳沉积过程

将 0.3 g MCNT 加入到 100 mL 1% (wt) 聚二烯二甲基氯化铵 (PDDA) 中, 超声振荡 5 min, 离心, 取出表面带有正电荷的 MCNT<sup>[20]</sup>. 将其溶于异丙醇中配制成 0.6 mg/mL 的电解液. 将铜片作为阳极, 一次主化学镀的 Ag-IPMC 样品作为阴极, 两电极间距为 25 mm. 在不同电泳电压 (60 V、80 V、100 V) 和电泳沉积时间 (20 s、40 s、60 s) 下制备 MCNT-Ag-IPMC. Ag-IPMC 电极表面电泳沉积 MCNT 过程示意图如图 2 所示.

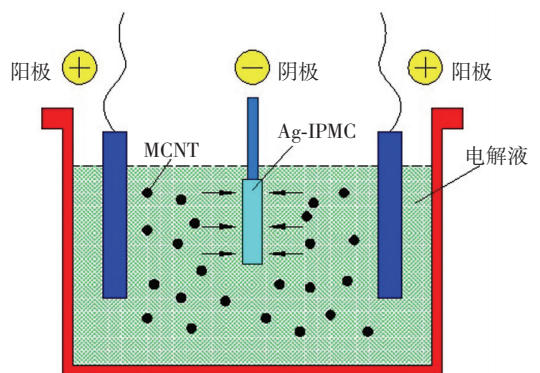


图 2 Ag-IPMC (一次主化学镀) 电极表面电泳沉积 MCNT 过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of the “growth” of MCNT on the electrode surface of Ag-IPMC

### 1.4 测试方法

#### 1.4.1 IPMC 输出力测试

输出力是人工肌肉的主要运动性能之一, 输出力越大, IPMC 性能越好. IPMC 输出力测试系统如

图 3 所示. 测试系统的输入部分采用稳压直流电源 (EM1713A, 济南万用电子有限公司), 输出力测量装置采用 mN 级的数显式推拉力计 (HF-5, 南京苏克测量仪器有限公司). 对 IPMC 人工肌肉材料分别施加 1 V、2 V、3 V 直流驱动电压, 通过推拉力计得到相应输出力数值.

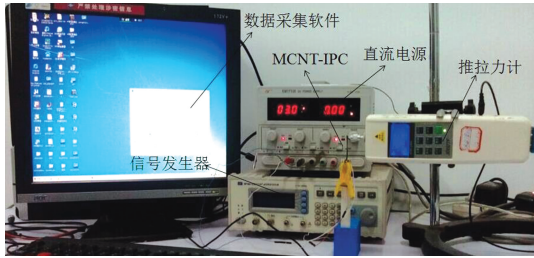


图 3 IPMC 输出力测试系统

Fig.3 Output force test system for IPMC

1.4.2 IPMC 输出位移测试

输出位移也是表征人工肌肉运动性能的主要参数, 输出位移越大, 运动性能越好. 图 4 为 IPMC 人工肌肉位移测试系统, 该系统主要由输出位移测试部分和驱动电源两部分组成. 输出位移测试部分采用激光位移传感器 (FT5070F, 长沙腾杨仪表有限公司). 驱动电源采用信号源发生器 (SP1651, 南京盛普仪器科技有限公司). 将 IPMC 人工肌肉材料固定

在夹持器上, 对其施加 1 V、2 V、3 V 的正弦交流驱动电压 (频率为 0.25 Hz), 利用激光位移传感器测试其输出位移.

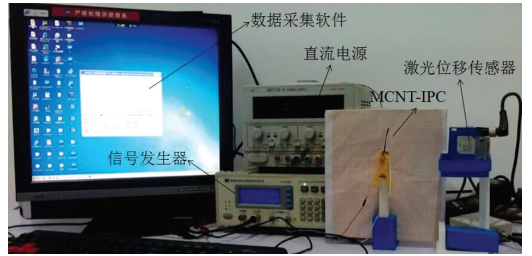


图 4 IPMC 输出位移测试系统

Fig.4 Output displacement test system for IPMC

1.4.3 形貌测试方法

用 FEIQUANTA 200 扫描电子显微镜对检材进行微观形貌观察, 比对样品间微观形貌差异. 扫描电镜工作距离为 9 mm, 加速电压为 20 kV.

2 结果与讨论

2.1 MCNT-Ag-IPMC 输出力分析

2.1.1 电泳电压对输出力的影响

一次主化学镀银的 Ag-IPMC 在沉积时间为 40 s, 电泳电压分别为 60 V、80 V、100 V 下制备的 MCNT-Ag-IPMC 的电极表面和截面形貌分别见图 5 和图 6.

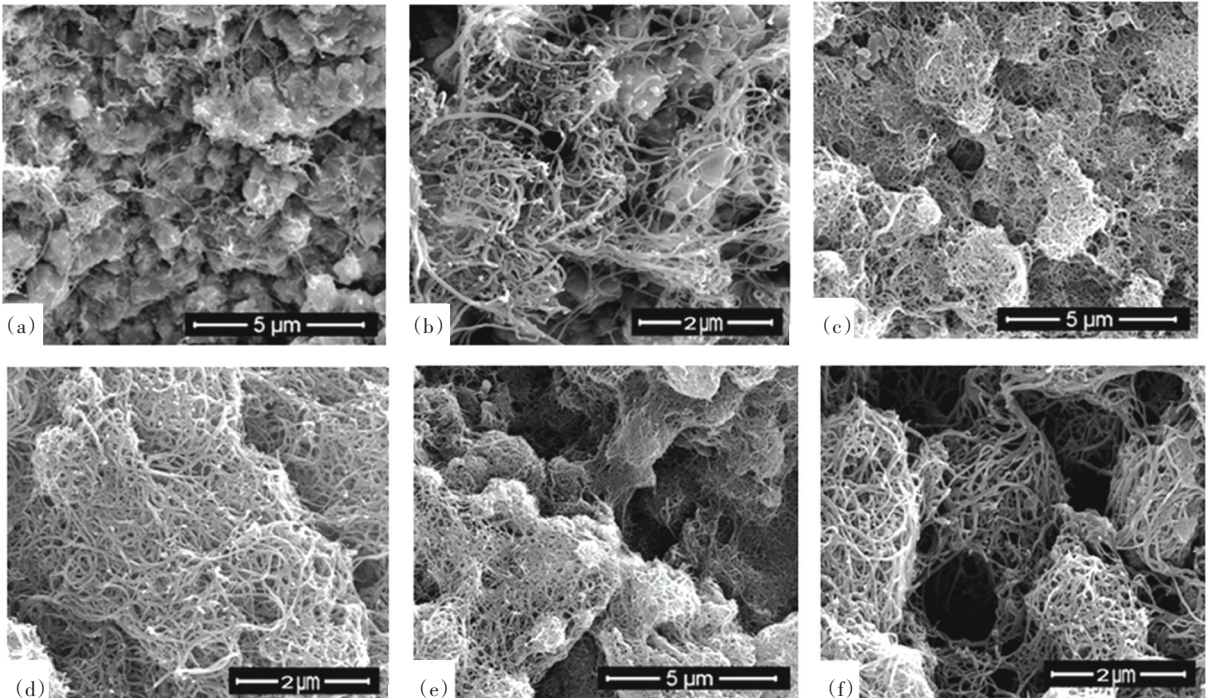


图 5 不同电泳电压下制备的 MCNT-Ag-IPMC 形貌: (20000×) (a) 60 V, (c) 80 V, (e) 100 V; (50000×) (b) 60 V, (d) 80 V, (f) 100 V

Fig.5 Morphology (20000×) of MCNT-Ag-IPMC prepared with electrophoresis voltage of (a) 60 V, (c) 80 V and (e) 100 V; Morphology (50000×) of MCNT-Ag-IPMC prepared with electrophoresis voltage of (b) 60 V, (d) 80 V and (f) 100 V

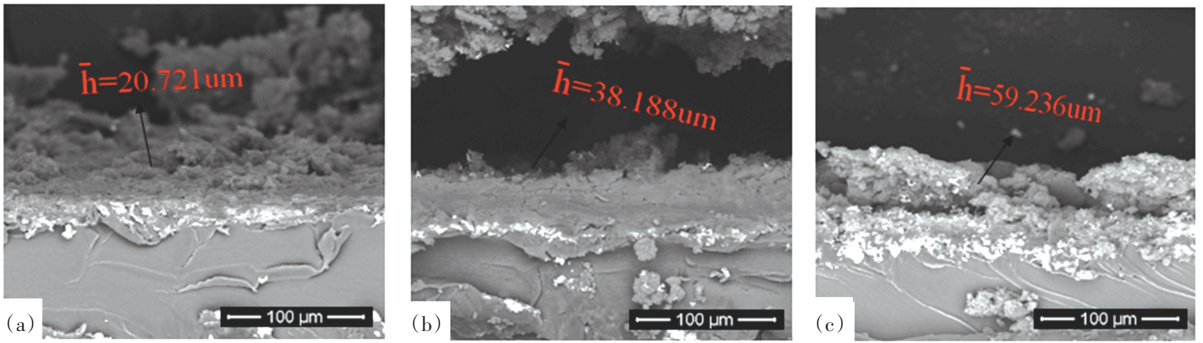


图 6 不同电泳电压下制备的 MCNT-Ag-IPMC 电极截面图:(a) 60 V, (b) 80 V 和 (c) 100 V

Fig.6 Cross-sectional view of electrode surfaces of the MCNT-Ag-IPMC prepared with electrophoresis voltage of (a) 60 V, (b) 80 V and (c) 100 V

不同电泳电压下制备的 MCNT-Ag-IPMC 在 1 V、2 V、3 V 直流驱动电压下的输出力随时间变化曲线见图 7。由图 7 可知, 总体来讲, 三个样品都是驱动电压越大, 到达最大输出力所需的时间越短。这是因为驱动电压大, 基膜内阳离子受到电场力大, 迁移速度越快。总体而言, 电泳电压为 80 V 时制备的 MCNT-IPMC 力输出性能最好, 电泳电压为 60 V 和 100 V 制备的 MCNT-IPMC 力输出性能均不佳, 且其输出力响应速度稍慢。这种现象可以从电极形貌来解释, 由图 5(a) 可知, 60 V 电泳电压下, Ag 电极层上覆盖的 MCNT 均匀度较差, 有很多区域 Ag 电极层直接裸露在外面, 从图 6(a) 也可以看出其电

极平均厚度仅为 20.721  $\mu\text{m}$ , 电极层较薄; 由图 5(c) 可知, 电泳电压为 100 V 时, MCNT 虽然完全覆盖住电极, 但是团聚现象严重, 从图 6(c) 可以看出其电极平均厚度为 59.236  $\mu\text{m}$ , MCNT 沉积层极其不均匀, 有稀疏区域也有团聚区域。电极表面 MCNT 覆盖不完全或者 MCNT 团聚现象都会阻碍离子迁移, 降低 IPMC 电致动性能, 这是两个样品输出力较小的原因。由图 5(b) 可知, 在 80 V 时, MCNT 的沉积效果良好, 银颗粒已经被完全覆盖, 其表面沉积的 MCNT 均匀, 由图 6(b) 可知, MCNT 之间没有明显的团聚现象。良好的电极形貌是电泳电压为 80 V 时 MCNT-IPMC 输出力性能最佳的原因。

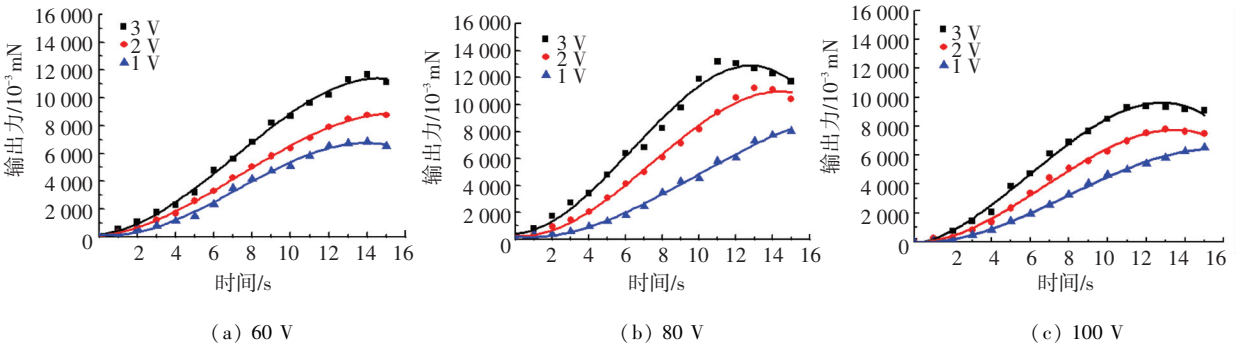


图 7 不同电泳电压下制备的 MCNT-Ag-IPMC 在直流驱动电压下的输出力随时间变化曲线

Fig.7 Output force values as a function of actuation time of the MCNT-Ag-IPMC samples prepared with electrophoresis voltage of (a) 60 V (b) 80 V and (c) 100 V when the samples were connected to the DC actuation voltage of 1 V, 2 V and 3 V

2.1.2 沉积时间对输出力的影响

一次主化学镀银的 Ag-IPMC 在电泳电压为 80 V 下, 沉积时间分别为 20 s、40 s、60 s 条件下制备的 MCNT-Ag-IPMC 的电极表面和截面形貌分别见图 8 和图 9。如图 9 所示, 电极厚度随着沉积时间的增加而增大。不同沉积时间下制备的 MCNT-Ag-IPMC 在 1 V、2 V、3 V 直流驱动电压下的输出力随时间变化曲线见图 10。从图 10 可以看出, 随着驱动电压的增加, 三种沉积时间下的样品输出力均有提高, 沉积时间为 40 s 时 MCNT-IPMC 输出力性能最

佳。这可以用扫描电镜照片来解释, 如图 8 所示, 沉积时间为 20 s, 复合电极表面存在大量裸露的银颗粒, MCNT 的含量非常少, 没有形成稳定、均匀的沉积层, 说明 MCNT 未得到充分沉积; 当沉积时间为 60 s 时, MCNT 沉积层非常厚, MCNT 已经不是以管状形态存在, 而相互堆叠在一起形成了厚厚的沉积层(见图 8(e))。当沉积时间为 40 s 时, MCNT-Ag 复合电极表面整体比较均匀, 且在沉积层中不存在明显的团聚和间隙结构, MCNT 保持着良好的形态, 所以沉积时间为 40 s 时制备的 MCNT-IPMC 输出力最佳。

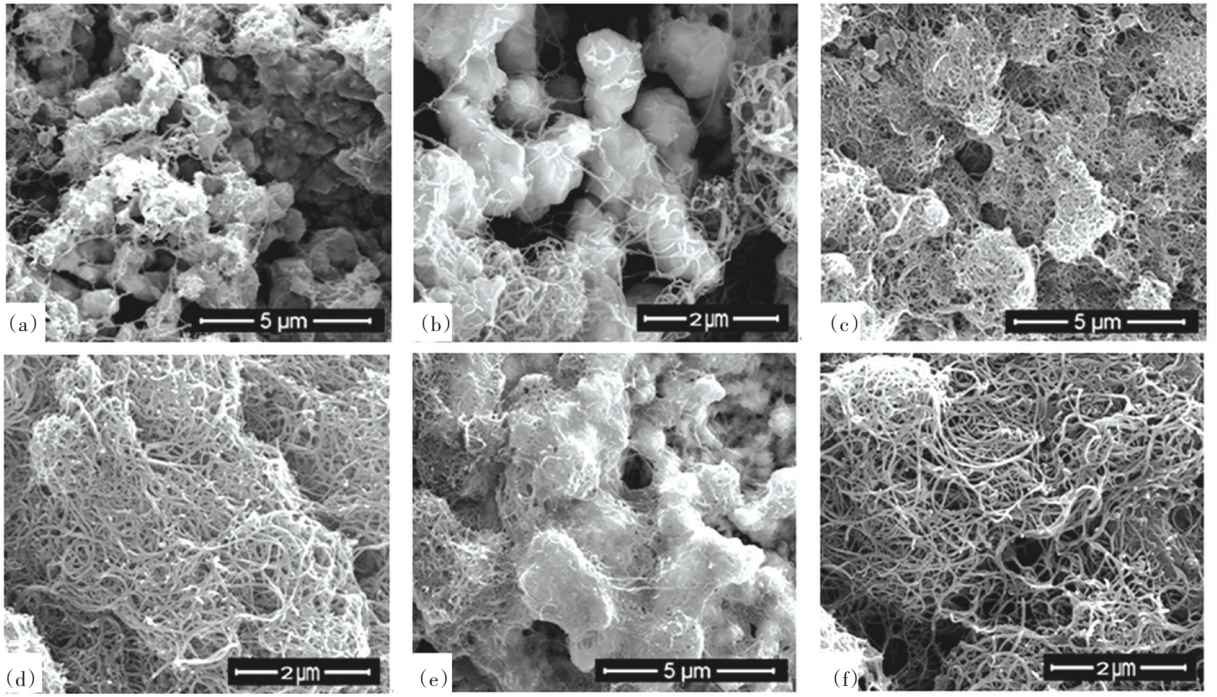


图 8 不同沉积时间下制备的 MCNT-Ag-IPMC 形貌: (20000×) (a) 20 s (c) 40 s (e) 60 s (50000×) (b) 20 s (d) 40 s (f) 60 s  
 Fig.8 Morphology(20000×) of the MCNT-Ag-IPMC prepared with deposition time of (a) 20 s, (c) 40 s and (e) 60 s; Morphology (50000×) of the MCNT-Ag-IPMC prepared with deposition time of (b) 20 s, (d) 40 s and (f) 60 s

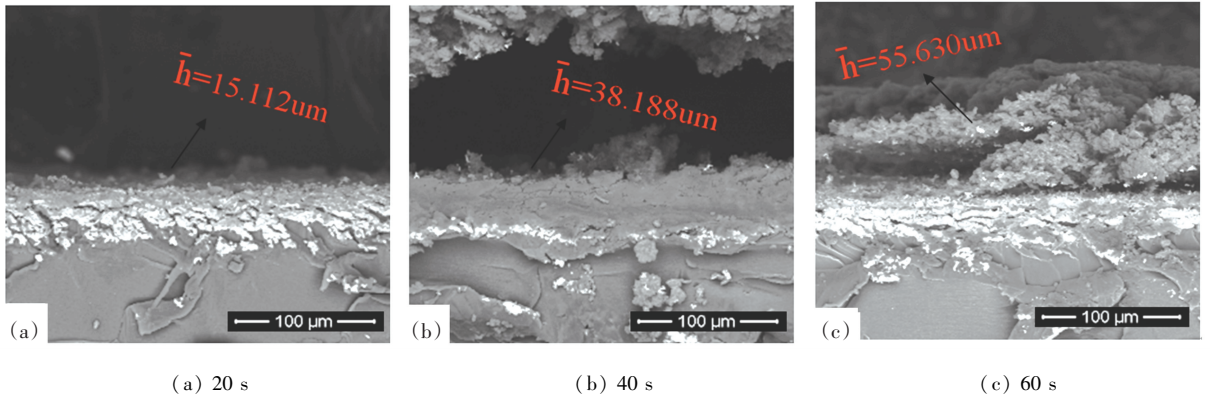


图 9 不同沉积时间下制备的 MCNT-Ag-IPMC 电极截面图

Fig.9 Cross-sectional view of electrode surfaces of the MCNT-Ag-IPMC prepared with deposition time of (a) 20 s, (b) 40 s and (c) 60 s

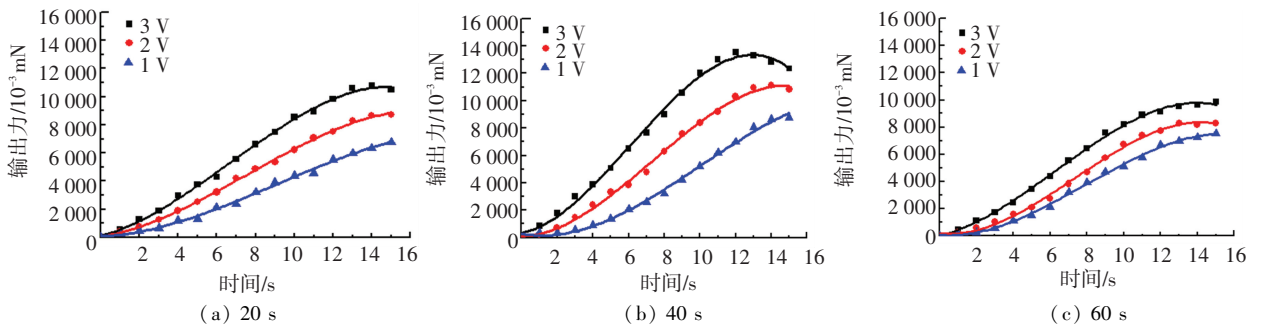


图 10 不同沉积时间下制备的 MCNT-Ag-IPMC 在直流驱动电压下的输出力随时间变化曲线

Fig.10 Output force values as a function of actuation time of the MCNT-Ag-IPMC samples prepared with electrophoresis voltage of 80 V and deposition time of (a) 20 s, (b) 40 s and (c) 60 s when the samples were connected to the DC actuation voltage

### 2.2 MCNT-Ag-IPMC 输出位移分析

#### 2.2.1 电泳电压对输出位移的影响

为了研究电泳电压对人工肌肉输出位移的影响,进行如下试验:一次化学镀银的 Ag-IPMC 在沉积时间为 40 s,电泳电压分别为 60 V、80 V、100 V 下制备 MCNT-Ag-IPMC.

不同电泳电压下制备的 MCNT-Ag-IPMC 在 1 V、2 V、3 V 的正弦交流电压(0.25 Hz)驱动下的输出位移随时间变化曲线见图 11. 由图 11 可知,在 1 V、2 V、3 V 的正弦交流电压(0.25 Hz)驱动下,电泳电压为 80 V 时制备的 MCNT-Ag-IPMC 输出位移最好,其在一个周期内的最大输出位移分别为 7.72 mm、11.04 mm、13.45 mm. 电泳电压为 100 V 时制备的样品输出位移形变量不明显,明显差于其余二者,原因可能是电泳电压过高 MCNT 沉积效果不佳,电极层不均匀,其电阻过大,通电后电极表面能

耗增大,降低了电能的转化效率.

#### 2.2.2 沉积时间对位移输出位移的影响

为了研究沉积时间对人工肌肉输出位移的影响,进行如下试验:一次化学镀银的 Ag-IPMC 在电泳电压为 80 V,沉积时间为 20 s、40 s、60 s 条件下制备 MCNT-Ag-IPMC.

不同沉积时间下制备的 MCNT-Ag-IPMC 在 1 V、2 V、3 V 的正弦交流电压(0.25 Hz)驱动下的输出位移随时间变化曲线见图 12. 从图 12 中可以看出,沉积时间为 20 s 和 40 s 的样品输出位移相近,在 1 V、2 V、3 V 电压下尖端最大位移分别为 4.18 mm、8.58 mm、12.32 mm 和 6.32 mm、10.20 mm、14.02 mm;沉积时间为 60 s 的样品输出位移较小. 这可能是由于沉积时间过长,MCNT 沉积层过厚,它与 Ag 层的结合效果不好,影响了材料的刚度所导致的.

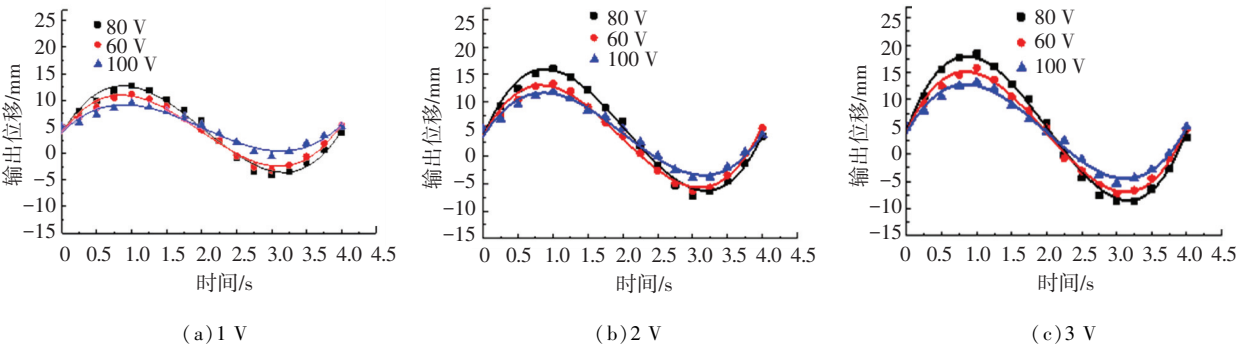


图 11 不同电泳电压下制备的 MCNT-Ag-IPMC 在 0.25 Hz 交流电下的输出位移随时间变化曲线

Fig.11 Output displacement values as a function of actuation time of the MCNT-Ag-IPMC samples prepared with different electrophoresis voltage when the samples were connected to the sinusoidal AC actuation voltage (0.25 Hz) of (a) 1 V, (b) 2 V and (c) 3 V

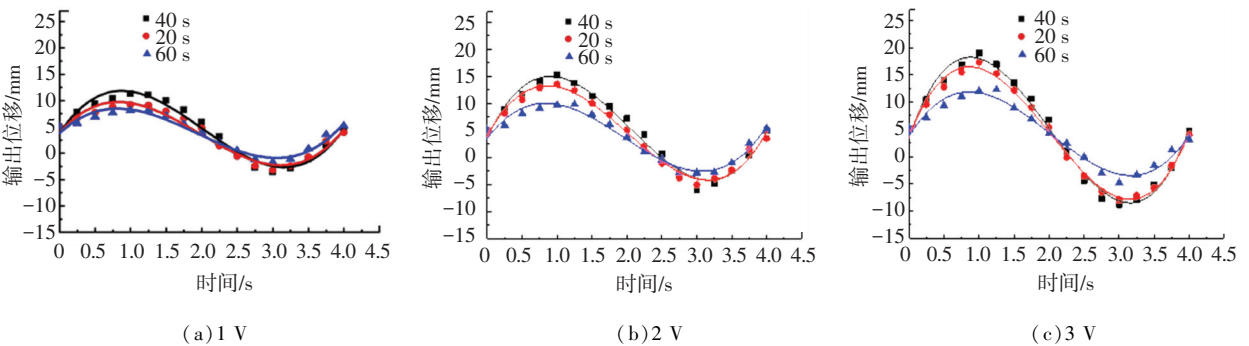


图 12 不同沉积时间下制备的 MCNT-Ag-IPMC 在 0.25 Hz 交流电下的输出位移随时间变化曲线

Fig.12 Output displacement values as a function of actuation time of the MCNT-Ag-IPMC samples prepared with different deposition time when the samples were connected to the sinusoidal AC actuation voltage (0.25 Hz) of (a) 1 V, (b) 2 V and (c) 3 V

### 2.3 MCNT-Ag-IPMC 和 Ag-IPMC (传统化学镀方法) 性能对比分析

在电泳电压为 80 V,沉积时间为 40 s 下制备的 MCNT-Ag-IPMC 和常规条件下制备的 Ag-IPMC(传统化学镀方法)的制备周期、最大输出力和最大输

出位移数据分别见表 1、图 13 和图 14.

由表 1 可知,MCNT-Ag-IPMC 的制备周期约为 16 h,与 Ag-IPMC(传统化学镀方法)相比,制备周期缩短了一半. 由图 13 可知,在 1 V、2 V、3 V 直流电下,MCNT-Ag-IPMC 最大输出力较 Ag-IPMC 分别提

高了 12.5%、6.0% 和 17.1%。由图 14 可知,在 1 V、2 V、3 V 交流电下,MCNT-Ag-IPMC 最大输出位移较 Ag-IPMC 分别提高了 18.6%、16.5% 和 8.7%。MCNT-Ag-IPMC 的电致动性能明显优于 Ag-IPMC

表 1 MCNT-Ag-IPMC 和 Ag-IPMC(传统化学镀方法)的制备周期

Tab.1 Preparation period of MCNT-Ag-IPMC and Ag-IPMC (conventional chemical silver plating method)

样品	制备周期/h			总制备周期/h
	离子交换过程	氧化还原过程	电泳沉积过程	
MCNT-Ag-IPMC	13	3	0.02	≈ 16
Ag-IPMC(传统化学镀方法)	13+5+5	3+3+3	0	32

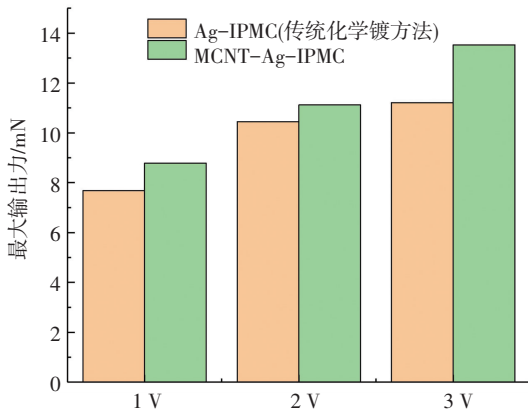


图 13 Ag-IPMC(传统化学镀方法)和 MCNT-Ag-IPMC 的最大输出力

Fig. 13 Maximum output force values of Ag-IPMC (conventional chemical silver plating method) and MCNT-Ag-IPMC

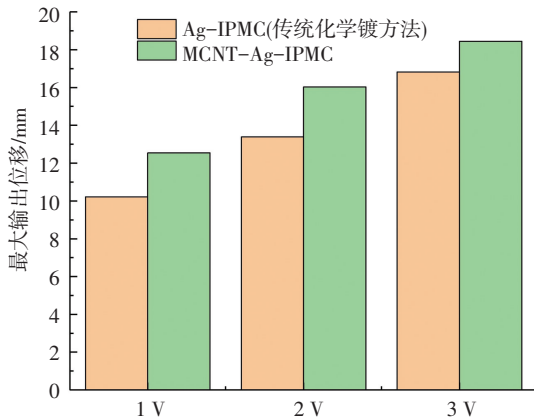


图 14 Ag-IPMC(传统化学镀方法)和 MCNT-Ag-IPMC 的最大输出位移

Fig. 14 Maximum output displacement values of Ag-IPMC (conventional chemical silver plating method) and MCNT-Ag-IPMC

### 3 结 论

本文首先进行一次化学镀得到 Ag-IPMC(1 次化学镀),然后再通过电泳沉积法成功制备了

(传统化学镀方法)。总之,电泳沉积法不仅制备周期短并且性能也优于传统化学镀方法,具有很好的应用前景。

MCNT-Ag-IPMC。MCNT-Ag-IPMC 的制备周期约为 16 h,与 Ag-IPMC(传统化学镀方法)相比,制备周期缩短了一半。电泳电压和沉积时间对 MCNT 的形貌和 IPMC 的电致动性能具有重要影响。当电泳电压为 80 V,沉积时间为 40 s 时,Ag 电极表面均匀覆盖 MCNT,电极表面电阻最小,具有最佳的电致动性能。在 1 V、2 V、3 V 直流电下,MCNT-Ag-IPMC 最大输出力较 Ag-IPMC 分别提高了 12.5%、6.0% 和 17.1%。在 1 V、2 V、3 V 交流电下,MCNT-Ag-IPMC 最大输出位移较 Ag-IPMC 分别提高了 18.6%、16.5% 和 8.7%。以上数据表明电泳沉积法不仅制备周期短并且性能要优于传统化学镀方法,具有很好的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] PARK I S, KIM K J. Multi-fields responsive ionic polymer-metal composite[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135(1): 220. DOI: 10.1016/j.sna.2006.07.014
- [2] SHAHINPOOR M, KIM K J. Ionic polymer-metal composites: iii. modeling and simulation as biomimetic sensors, actuators, transducers, and artificial muscles [J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(6): 1362. DOI: 10.1088/0964-1726/13/6/009
- [3] JAIN R K, MAJUMDER S, DUTTA A. Microassembly by an IPMC-based flexible 4-bar mechanism[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(7): 075004. DOI: 10.1088/0964-1726/21/7/075004
- [4] HE Q S, YU M, DING Y, et al. Fabrication and characteristics of a multilayered ionic polymer metal composite based on nafion/tetraethyl orthosilicate and nafion/mcnt nanocomposites [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, 14(10): 7445. DOI: 10.1166/jnn.2014.9550
- [5] SHAHINPOOR M, KIM K J. Ionic polymer-metal composites: I. fundamentals[J]. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10(4): 819. DOI: 10.1088/0964-1726/10/4/327
- [6] JUNG K, NAM J, CHOI H. Investigations on actuation characteristics of IPMC artificial muscle actuator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 107(2): 183. DOI: 10.1016/s0924-4247(03)00346-7
- [7] YANG W, CHOI H, CHOI S, et al. Carbon nanotube-graphene composite for ionic polymer actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(5): 055012. DOI: 10.1088/0964-1726/21/5/055012

(下转第 125 页)