

图案化电极的离子聚合物金属复合物扭转特性研究*

赵 扬,徐 兵,郑高峰,庄明凤,黄伟伟,关明杰

(厦门大学 物理与机电工程学院,福建 厦门 361005)

摘 要: 离子聚合物金属复合物(ionic polymer metal composite, IPMC)是一种新型离子型电致动聚合物,具有在低电压驱动下产生大变形的特点而有广阔的应用前景。通过在 IPMC 表面制作图案化电极,使其在电压驱动下实现扭转运动。针对图案化电极的结构尺寸对其扭转特性的影响进行研究,得到图案化电极 IPMC 的扭转特性规律。同时针对贴合方式 IPMC 的结构尺寸变化对其扭转特性的影响进行研究,并比较两种 IPMC 的扭转运动效果,得出制备可实现扭转运动 IPMC 的影响因素。

关键词: 图案化电极;IPMC;扭转运动;结构尺寸;电极间距

中图分类号: TB34

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2014.增刊(I).008

1 引 言

离子聚合物金属复合物(ionic polymer metal composite, IPMC)是一种新型的电致动聚合物,由中间离子交换层和两侧的金属电极层组成,具有类似“三明治”结构特点,与传统智能材料相比,具有良好的柔性、质量轻、低电压驱动以及变形量大等特点,因此在仿生机械、航空航天、生物医学等工程领域具有很大的发展潜力。IPMC 电致动特性表现为,在其厚度方向施加 1~5 V 的电压,IPMC 将向其阳极发生弯曲。目前,大家普遍认为的致动机理为,IPMC 内部水合阳离子在电场力的作用下由阳极向阴极聚集,导致 IPMC 阳极部分收缩而阴极膨胀,宏观上表现为 IPMC 向阳极的弯曲运动^[1-3]。

近年来,IPMC 已应用到多自由度手钳^[4]、微泵^[5-6]、仿生鱼^[7]、仿生蜻蜓^[8]等多个领域中,但是随其在仿生领域的研究深入,为了更接近自然界生物动作特点进行仿生驱动研究,IPMC 的二维平面运动已经不能满足应用需求,因此许多学者将研究重点集中在通过 IPMC 实现更加复杂的三维运动。通过将 IPMC 电极分区图案化,并施以不同方向的驱动电压,可使 IPMC 产生摆动加扭转的复杂运动,如图 1 所示。美国内华达大学的 Riddle 和 Kim 通过微机械加工的方法制作图案化电极,实现了 IPMC 的摆动和扭转的运

动效果,而且 IPMC 的扭转角超过了 7°^[9]。韩国国立全南大学的 Jeon 等通过将 IPMC 电极进行分区图案化处理实现了 IPMC 的多级摆动和扭转,并分别测量了 0.5, 1 和 1.5 V 电压下的扭转角度^[10]。英国布里斯托尔大学的 Rossiter 使用热熔和电火花的方法将 IPMC 表面金属电极去除,从而形成分区电极,对比了两种方法对 IPMC 产生复杂运动的影响^[11]。日本学者 Nakabo 等虽然早在 2005 年即采用图案化电极的方式来制备 IPMC,但是他将其应用到多自由度 IPMC 手爪中,并未对 IPMC 的扭转运动进行探讨^[12]。在国内,针对 IPMC 图案化电极实现扭转运动的研究少有报道。以上学者主要针对制作图案化电极的方法进行研究,同时对 IPMC 所能产生的变形效果进行测试分析,但并未对图案化电极结构尺寸变化对 IPMC 致动效果的影响进行研究。在图案化电极 IPMC 的制备过程中,电极的结构尺寸变化对 IPMC 的扭转运动同样有着不可忽视的影响。

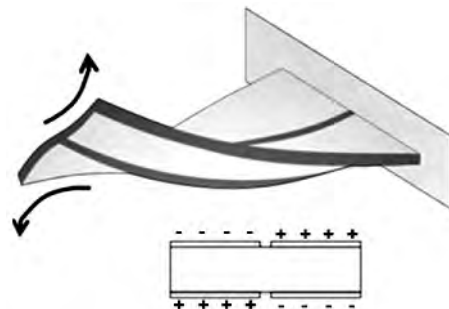


图 1 图案化电极 IPMC 扭转运动

Fig 1 Patterned IPMC twisting motion

本文通过粘贴覆膜胶带的方法来制作不同间距的图案化电极,实现 IPMC 的扭转运动,针对其扭转特性进行研究;同时还采用两片贴合的方式制作不同结构尺寸的图案化电极 IPMC,并针对其扭转特性进行研究,以得到电极间距变化和电极约束变化对 IPMC 扭转的影响规律。

2 图案化电极 IPMC 的制备

目前 IPMC 图案化电极的制作方法主要有微机械加工、激光烧蚀、贴覆膜胶带等方法。微机械加工往往采用微铣去除电极,加工成本较高,由于电极厚度很

* 基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2011J05140)

收到初稿日期:2013-08-19

收到修改稿日期:2013-12-04

通讯作者:关明杰,E-mail:miguan@xmu.edu.cn

作者简介:赵 扬 (1980-),男,辽宁丹东人,博士,从事智能材料仿生驱动研究。

赵扬等:图案化电极的离子聚合物金属复合物扭转特性研究,一般在几微米,同时 IPMC 表面不平整,因此加工的精度很难得到保证;激光烧蚀方法的能量控制要求高,易烧坏基材材料;贴覆膜胶带的方法简单易行,同时对 IPMC 没有破坏,但是在金属电极的化学镀过程中易因胶带粘贴不牢而无法得到目标样品。本文综合比较以上方法,选择贴覆膜胶带的方法制作图案化电极的 IPMC。具体的制备流程如图 2 所示。

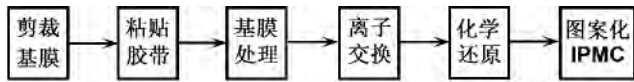


图 2 图案化电极 IPMC 的制备流程

Fig 2 Flowchart of fabricating patterned-electrode IPMC

以杜邦公司的 Nafion-117 离子交换膜作为基体膜,选用金属铂作为电极,图案化电极 IPMC 的制备工艺主要按以下步骤进行:(1) 裁剪适当大小的基膜,按设计结构在其上粘贴覆膜胶带(PI 胶带),为了便于金属电极沉积用砂纸打磨粗化;(2) 基膜的清洗。先用超声清洗 30 min,再用 0.5% 的稀硫酸加热至 80 °C 清洗 1 h,用去离子水煮沸 30 min,用 15% 的双氧水煮沸清洗 30 min,用去离子水煮沸 30 min;(3) 离子交换过程。将清洗好的基膜浸泡在稀硫酸中,使其成为 H⁺ 型的阳离子交换膜。然后将基膜放入 [Pt(NH₃)₄]Cl₂ 溶液中浸泡 14 h 左右,使得铂离子渗入到薄膜内部与 H⁺ 实现离子交换;(4) 化学还原反应。取出离子交换膜放入去离子水中,加热至 40 °C,每 30 min 升高 10 °C 并加入 0.5% 硼氢化钠,升温至 60 °C 后,再一次加入足量的硼氢化钠确保铂离子完全还原。

将还原得到的 IPMC 放入 [Pt(NH₃)₄]Cl₂ 溶液中,加热至 40 °C,每 30 min 升温 10 °C 并加入比例为 2:1 的 0.5% 氯化羟胺和 20% 水合肼,升温至 60 °C 后,再加入足量的氯化羟胺和水合肼。这样就完成了两次还原反应并形成致密的电极层;(5) 取下掩膜胶带,将得到的图案化 IPMC 样品保存在 LiCl 溶液中。

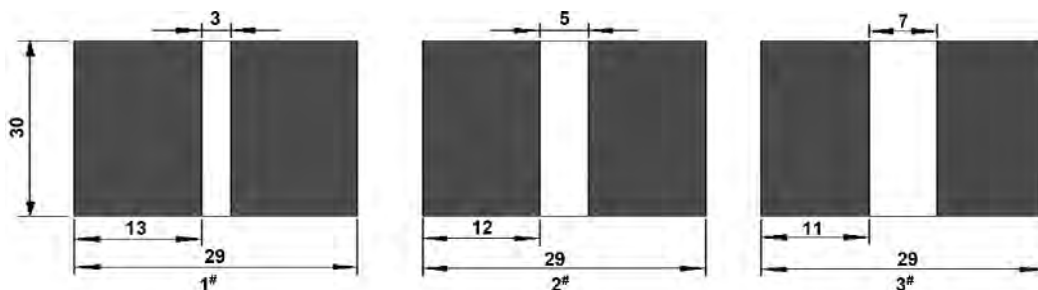


图 4 IPMC 的设计尺寸图

Fig 4 The picture of IPMC's design size

为了测试电极间约束对扭转性能的影响,还将单片 IPMC 用胶带进行两片贴合,形成可实现扭转的 IPMC 来进行测试,实物如图 6 所示。

对图案化电极 IPMC 进行交流电压和直流电压的驱动测试,由于 IPMC 材料的响应速度不是特别快,过

3 IPMC 扭转特性测试系统

本文通过采集 IPMC 的弯曲变形图像对其扭转进行测试分析。IPMC 扭转特性测试系统主要由高清数字 CCD 摄像机(MC-D800u)、双通道任意波形发生器(Agilent 33522A)、功率放大模块、IPMC、夹持器及计算机组成,如图 3 所示。系统的测试原理为波形发生器发出测试所需的波形信号,经功率放大模块进行功率放大之后,驱动夹持器所夹持的 IPMC 产生扭转变形,同时,通过高清数字 CCD 摄像机将 IPMC 的扭转变形图像采集到计算机中,然后通过图像处理软件 ImageJ 对扭转变形角度进行测算分析。

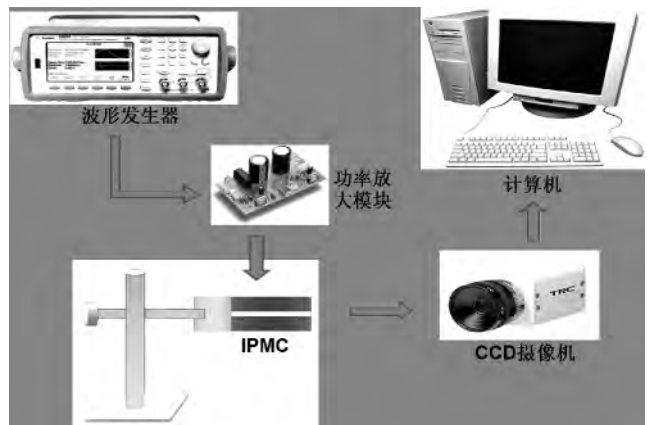


图 3 IPMC 扭转特性测试系统

Fig 3 Measurement system of IPMC twisting characteristics

4 扭转特性测试与结果分析

根据前文所述方法,按照图 4 所设计的结构尺寸制备图案化电极 IPMC,图 4 中 1-3# 样品的整体尺寸都是 30 mm×29 mm,其中 1# 样品电极间距为 3 mm,2# 为 5 mm,3# 为 7 mm,制得的实物如图 5 所示。

高的频率有可能使 IPMC 来不及响应而导致其扭转角度变化不大,所以交流电压选用频率为 0.2 Hz,幅值分别为 3 和 5 V 的正弦波,直流电压选用 0~5 V。交流电压驱动下的图案化电极扭转角度的测试结果如图 7 所示。

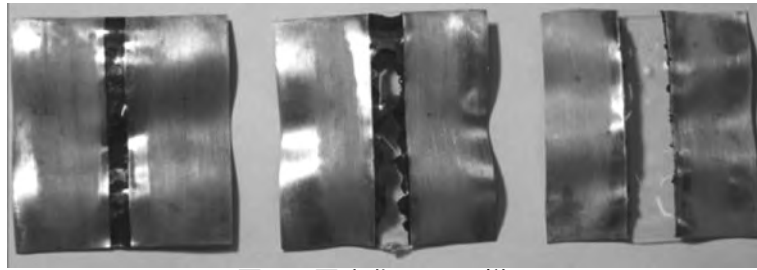


图 5 图案化 IPMC 样品

Fig 5 The patterned IPMC samples

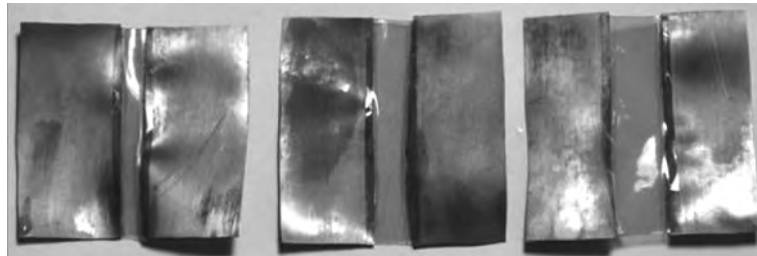


图 6 两片贴合的图案化 IPMC

Fig 6 The patterned IPMC pasted by two IPMCs

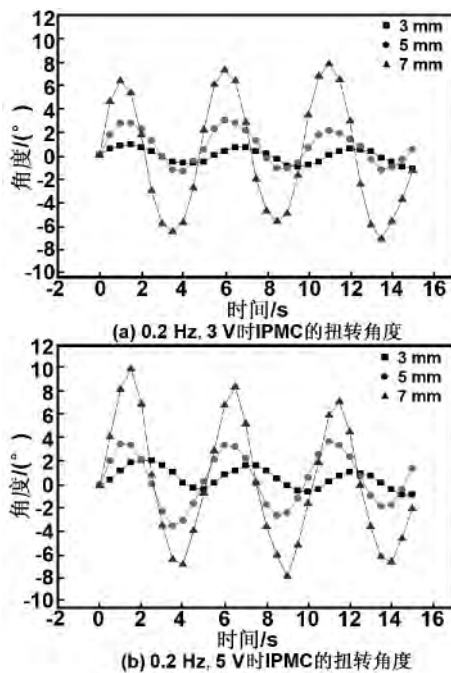


图 7 图案化电极 IPMC 的扭转测试结果

Fig 7 The twisting angle result of patterned electrode IPMC

从测试结果可以得出,图案化电极 IPMC 的扭转运动的往复周期与交流驱动电压正弦波的周期变化规律基本保持一致;在 0.2 Hz 正弦交流信号的驱动下,随着图案化电极间距的增大,IPMC 的扭转角度也随之增大;同时随着电压幅值的增大,IPMC 扭转的最大角度也逐渐增大。幅值为 3 V 时,电极间距为 7 mm 的 IPMC 的最大扭转角度约为 8°,而幅值为 5 V 时,电极间距为 7 mm 的扭转角度约为 10°。图 8 为两片贴合的图案化电极 IPMC 的扭转角度测试结果,从图 8 可以看出,其扭转特性规律与图案化电极 IPMC 基本相同。

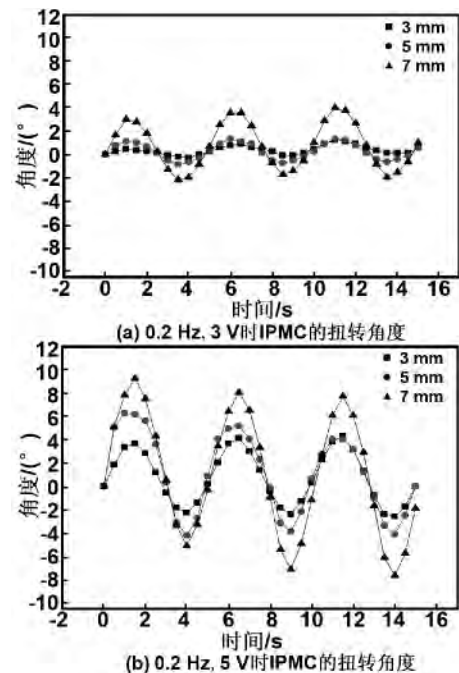


图 8 两片贴合电极 IPMC 的扭转测试结果

Fig 8 The twisting angle result of patterned electrode IPMC pasted by two IPMCs

图 9 为图案化电极和两片贴合电极在直流电压驱动下的测试结果,在直流电压驱动下,两种图案化电极 IPMC 所能达到的最大角度有着明显的差别,两片贴合的 IPMC 的最大角度为 35°要远大于图案化电极 IPMC 的 20°,这主要是因为贴合电极之间的约束力要小于图案化电极 IPMC 之间的约束力,但是两种图案化电极 IPMC 的扭转角度因其自身电极间距的变化影响却不大,说明在充分变形的条件下,图案化电极结构尺寸对其扭转特性影响不大。

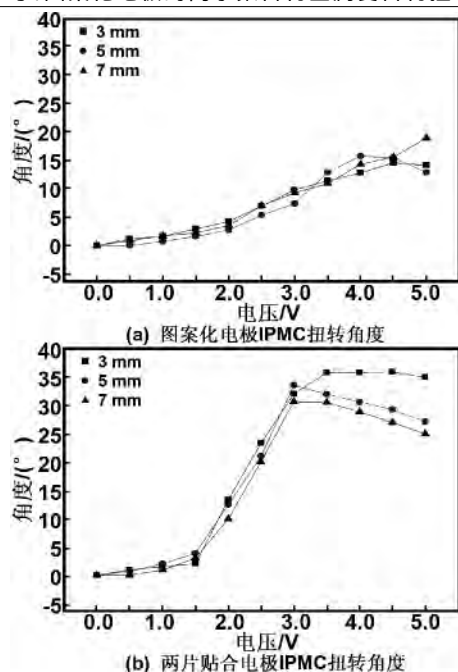


图9 直流电压0~5 V扭转测试结果

Fig 9 The result of twisting angle under DC 0-5 V

5 结 论

通过粘贴覆膜胶带的方法制作图案化电极实现铂电极 IPMC 的扭转运动,通过改变电极间距,对其扭转变形进行测试,分析了电极的结构尺寸变化对其扭转特性的影响规律,在 0.2 Hz 交流电压驱动下,图案化电极的扭转角度随其电极间距增大而逐渐增大,在 3 V 下,7 mm 间距 IPMC 扭转角度最大可达 8°,在 5 V 下,最大可达 10°。采用贴合方式制作的 IPMC 和图案化电极 IPMC 的扭转特性随电极间距的变化规律基本相同。在直流电压驱动下,两片贴合 IPMC 所达最大扭转角度远大于图案化电极 IPMC,说明电极间约束对扭转变形具有影响,而且在足够的变形时间下,电极间距对扭转变形效果影响不大。因此,为获得更大的扭转角度,在合适的交流电压驱动下,可以通过增大电极间距来实现,在直流电压驱动下,可以通过减小电极之间的约束来实现。

参考文献:

[1] Kikuchi K, Sakamoto T, Tsuchitani S, et al. Comparative

study of bending characteristics of ionic polymer actuators containing ionic liquids for modeling actuation[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(7): 073505-073505-11.

- [2] Pugal D, Jung K, Aabloo A, et al. Ionic polymer-metal composite mechano-electrical transduction: review and perspectives[J]. Polymer International, 2010, 59(3): 279-289.
- [3] Abdelnour K, Stinchcombe A, Porfiri M, et al. Bio-inspired hovering and locomotion via wirelessly powered ionic polymer metal composites[C]// San Diego: Proceedings of SPIE 7975, Bioinspiration, Biomimetics and Bioreplication, 2011. 296-308.
- [4] Feng G H, Tsai J W. Three-dimensional multielectrode-controlled two orthogonal direction bendable IPMC actuator with an active clasp[J]. Polymer Engineering & Science, 2013, 53(9): 1-14.
- [5] Santos J, Lopes B, Costa Branco P J. Ionic polymer - metal composite material as a diaphragm for micropump devices[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 161(1): 225-233.
- [6] Nam D N C, Ahn K K. Design of an IPMC diaphragm for micropump application [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 187: 174-182.
- [7] Palmre V, Hubbard J J, Fleming M, et al. An IPMC-enabled bio-inspired bending/twisting fin for underwater applications[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(1): 014003: 1-11.
- [8] Cheng Taihong, Xuan Dongji, Li Zhenzhe, et al. Development of IPMC actuator for flapping motion of dragonfly[J]. Advanced Materials Research, 2010, 150-151: 1301-1304.
- [9] Riddle R O, Jung Y S, Kim S M, et al. Sectorized-electrode IPMC actuator for bending and twisting motion [C]// San Diego: Proceedings of SPIE 7642, Electroactive Polymer Actuators and Devices, 2010.
- [10] Jeon J H, Yeom S W, Oh I K. Fabrication and actuation of ionic polymer metal composites patterned by combining electroplating with electroless plating [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39: 588-596.
- [11] Rossiter J, Mukai T. Electrostatic and thermal segmentation of multi-segment IPMC sensor-actuators[C]// San Diego: Proceedings of SPIE 7976, Electroactive Polymer Actuators and Devices, 2011.
- [12] Nakabo Y, Mukai T, Asaka K. Kinematic modeling and visual sensing of multi-DOF robot manipulator with patterned artificial muscle[C]// Barcelona: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005. 4315-4320.

Research on twisting of patterned ionic polymer metal composite

ZHAO Yang, XU Bing, ZHENG Gao-feng, ZHUANG Ming-feng, HUANG Wei-wei, GUAN Ming-jie

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Ionic polymer metal composite (IPMC) was a kind of ionic electroactive polymer, which can generate large deformation when applied low driving voltage. It will be widely used in bionic, medical biological and other fields. In this paper, the patterned IPMC was fabricated to accomplish twist motion. To get the twisting characteristic of patterned IPMC, the variation of structural dimension of patterned IPMC was studied. Meanwhile, the structural dimension of patterned IPMC which was pasted two IPMC together was also researched in this paper. The result of two kind of patterned IPMC was compared, which indicate the influencing factors of fabricating of patterned IPMC to realize twist motion.

Key words: patterned electrode; IPMC; twisting motion; structural dimension; electrode spacing