

## 离子交换膜金属复合材料的特性及应用\*

樊建平<sup>1</sup>, 龚亚琦<sup>1</sup>, 邓泽贤<sup>2</sup>

(1 华中科技大学土木工程与力学学院, 武汉 430074; 2 香港理工大学工业及系统工程学系, 香港)

**摘要** 离子交换膜金属复合材料以其良好的致动性和传感性引起了广泛的关注, 结合近年来的研究成果, 介绍 IPMC 在静电电压作用下的机械特性, 在交变电压作用下挠曲变形饱和状态与驱动电压和频率的关系, 描述材料的制备方法和关键技术, 分析它的致动机理。介绍了 IPMC 作为人工智能材料在不同领域的应用情况, 并对由它制作的致动器在当前研究中存在的问题进行了分析阐述, 指出未来研究的工作重点。

**关键词** 离子交换膜 薄膜 电驱动 致动器

## Electro-mechanical Characteristics and Applications of Ionic Polymer-Metal Composites

FAN Jianping<sup>1</sup>, GONG Yaqi<sup>1</sup>, TANG Chakyin<sup>2</sup>

(1 School of Civil Engineering &amp; Mechanics, Huazhong University of Science &amp; Technology, Wuhan 430074; 2 Department of Industrial and Systems Engineering, Hongkong Polytechnic University, Hung Hom, Hongkong)

**Abstract** Research efforts on IPMC materials have increased recently for their excellent actuation and sensing behaviors. In the paper, mechanical characteristics of IPMC under a static electric field are presented. The fabrication process of IPMC with highlights on its key technique is introduced and the mechanism of electroactivation is summarized. As a kind of intelligent artificial materials, some potential engineering applications of IPMC are also illustrated. Finally, current barriers hindering further development of IPMC and the emphases of future research trend are discussed.

**Key words** IPMC, nafion membrane, electro-activation, actuator

## 0 引言

离子交换膜金属复合材料是以聚合物薄膜(如 Nafion)为基体骨架, 通过镀涂的方法将某种贵金属(如 Pt)颗粒渗透并沉积在膜表面而形成的一种复合材料<sup>[1-3]</sup>, 其英文全称为 Ionic polymer-metal composites (IPMCs)。外加较小的直流电压(如 1.5V), 镀层的表面构成一对正负极, 从而诱导膜内电荷的重新分布。水合阳离子的规则排布能够使膜产生较大的弯曲变形。该材料质量小、重量轻, 对外界激励反应速度快, 同时产生与自身重量相比大数十倍的张力, 是一种新型的人工智能材料。它的柔性好、工作电压低、安全可靠, 非常适合用于人体内作驱动材料<sup>[4]</sup>。在仿生学应用方面, 可用它制作出具有高度可操纵性、无噪音、动作灵活的人体手臂、鱼类、昆虫等仿生机器人<sup>[5]</sup>。与常规材料构成的致动机构相比, 其化学-机械能转换效率高。同时它还在软性机械致动器、人工肌肉和应力传感器等方面有很大的应用潜力<sup>[6-10]</sup>。

## 1 IPMC 的电-机械特性

IPMC 是一种电激活材料, 当给 IPMC 薄膜施加直流电压时, 薄膜向阳极弯曲, 其弯曲程度随着电压的增加而加剧, 直至达到饱和状态; 加反向电压时, 薄膜又弯向另一侧, 如图 1 所示<sup>[11]</sup>。在交流电压作用下, 薄膜产生正负交替挠曲变形, 其挠

曲幅度取决于电压幅值和频率。一般在低频时(小于 0.1Hz 或 0.01Hz)膜能够产生较大的变形, 随着频率的增大, 变形幅度逐渐减小, 当频率上升到几十赫兹时, 将不产生变形。挠曲变形达到饱和时的驱动电压值随频率而变化, 频率越低, 允许的电压值越大; 相反, 频率越高, 允许的电压值越小。薄膜的运动受控于所施加的电流, 但其响应受到 IPMC 中含水量的影响。

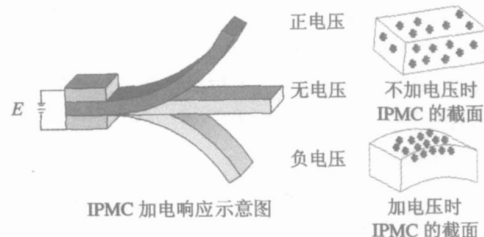


图 1 IPMC 薄膜的加电弯曲响应示意图

膜的偏转幅度与外加电场强弱以及频率有关, 这是因为膜的致动性与膜内离子的迁移有关, 膜内双边界面的形成需要离子的大量聚集或减少, 离子在驱动电压作用下的运动方向和速度取决于电场的方向和大小, 低频时离子向某一方向运动的时间较高频时长, 因此膜在低频电场作用下能产生较大的位移。

由于 IPMC 的挠曲变形特征, 用它构成的致动器结构简单, 不需要传统的机械运动部件, 在低电压下能够产生较大的变形

\* 香港理工大学重点资助项目(G-YF06)

樊建平: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师 Tel: 027-87543538 E-mail: jpfan@public.wh.hb.cn

量和较高的力密度,其力可超过自身重量的40倍<sup>[2]</sup>。这种致动器如塑胶般柔软和坚韧,可在一定尺寸范围内很容易地分割成所需的形状。与其它智能材料相比,IPMC致动器的特点是低电压驱动、变形幅度大。表1列出了IPMC材料、电活性陶瓷和形状记忆合金的相关参数。从表中可以看出,IPMC材料质量较轻,且收缩容量高2个数量级,响应明显迅速。

表1 IPMC, SMA 和 EAC 特性比较

特性	离子交换膜金属 复合材料(IPMC)	形状记忆 合金(SMA)	电活性陶瓷 (EAC)
制动位移	> 10%	< 8%	0.1%~0.3%
应力/MPa	10~30	700	30~40
反应速度	微秒~秒	秒~分	微秒~秒
密度/g/cm <sup>3</sup>	1~2.5	5~6	6~8
驱动电压	1.0~3.0V	NA	50~800V
电源消耗	W	W	W
断裂强度	能恢复原状、有弹性	有弹性	脆性

## 2 IPMC 致动器的应用

### 2.1 人工肌肉

人工尿道括约肌是治疗尿失禁的重要手段,目前使用的括约肌均以液压传递的方式将尿道闭锁,这样须在患者腹腔上开洞,易使周围组织感染。IPMC具有质量轻、材质柔软、低电压驱动、变形大的特点,同时其机械动作与人类肌肉相似,这些优点非常适合模拟人工尿道括约肌。将IPMC与形状记忆合金一起组合使用,平时通过记忆合金将尿道闭锁住,而患者需要排尿时,以IPMC致动产生的力矩将记忆合金撑开,开启尿道<sup>[12]</sup>。

### 2.2 末端夹持器

由于IPMC薄膜在低电压驱动下能产生显著的弯曲变形,利用这一特性可制作微型低质量机器人手臂末端夹持器<sup>[13]</sup>。夹持器末端采用多根IPMC薄膜做成人手手指形状,可以自由弯曲变形,具有抓放能力。利用频率为0.1Hz的5V方波做驱动,实现打开与闭合夹持器手指。实际制作的IPMC手指自身重量为0.4g,用它可以提起10.3g的重物,约为自重的26倍<sup>[14]</sup>。将夹持器置于待收集物体的附近,尤其是在强酸、强碱,或一些险恶的环境中,闭合夹持器使手臂上举以实现夹持器举起重物,用以完成采样收集任务,如图2所示。

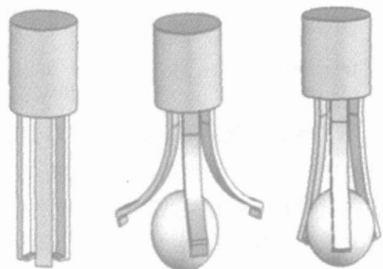


图2 IPMC薄膜末端夹持器模型

### 2.3 泳动机

鱼类在水中前进主要是靠尾部的来回摆动拍击水体而获得前进动力,而IPMC在一定频率电压作用下的往复变形正好可以模拟鱼类在水中的运动。美国Mojarad等已经研究出一种

新型的仿生鱼形推进装置。该装置由IPMC致动器、控制电路和船体3部分组成,在薄膜上用化学镀方法涂覆有一层铂,然后将薄膜切成条状物,利用IPMC薄膜的往复挠曲变形特征来模仿鱼的尾鳍实现推进<sup>[11,15]</sup>。

一般来说,IPMC作为致动器应用,因机构简单(没有传统的机械运动部件)、重量轻、相对螺旋桨推进方式效率高、噪声低,在军事应用方面独具优势。此外,由于其驱动电压低、操作安全,在生物医学应用方面也有较大潜力。如利用IPMC作为致动器植入体内作探头,与光相干断层扫描仪(OCT)配合使用,已经获得了满意的试验结果。

## 3 IPMC 工作原理

IPMC的基膜——Nafion膜是一种全氟离子交换膜,它是由憎水性的碳氟高分子主链和亲水性的烷基磺酸根侧链构成的长链聚合物。当此种聚合物被置于水溶液中时,亲水的磺酸根基团所形成的侧链伸向水中,而含有憎水基的主链则伸向远离水溶液的方向。这种主链与侧链伸展方向的不同,使得Nafion膜内部形成圆球型水通道,如图3所示。通常圆体的直径为4~5nm<sup>[16]</sup>。基膜具有较高的离子传导率,能吸收大量极性溶液。其内部结构具有固定的阴离子带电网链,可移动的阳离子能通过网链迁移或扩散。将基膜放置于含有金属离子的溶液中时,由于Nafion内外金属离子浓度不同,水溶液中的金属离子很容易扩散到Nafion膜内部,从而使在Nafion膜内部形成金属粒子成为可能。

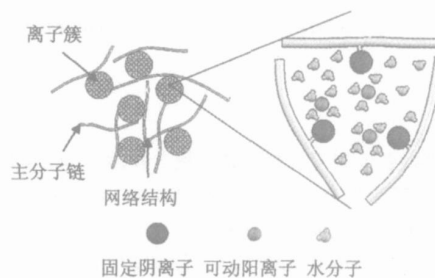


图3 Nafion膜的微观模型

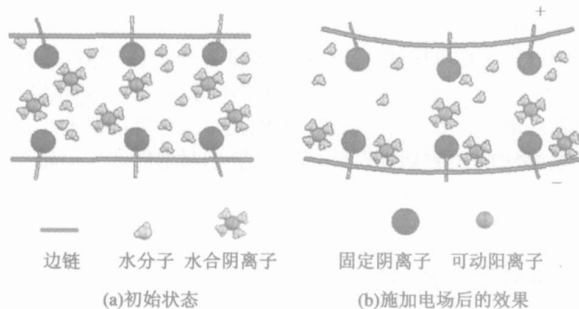


图4 IPMC网链内抗衡离子的迁移

镀层Nafion复合膜的电致动性能可以从膜内部平衡离子M<sup>+</sup>的迁移来考虑。由于Nafion膜中含有大量的-SO<sub>3</sub>M基团,在膜两侧施加一定电压后对膜内的离子进行重新排布,阳离子离开阳极向阴极聚集,阴离子离开阴极向阳极聚集,而离子交换反应又被膜表层沉积的Pt层抑制,从而在膜的两侧形成2个很

薄的边界层,并且离子的移动通常伴随着水分子的移动,基于双金属原理,膜片靠阴极的一面膨胀,靠阳极的一面收缩,产生向阳极方向的弯曲变形,如图4所示。

## 4 研究中存在的主要问题

### 4.1 电解作用

通常在IPMC膜片上施加电压为1.5V,当电压继续升高时,将产生电解作用,使薄膜内温度升高,材料性能退化,产生激活反应而释放气体。所释放的氢气累积在保护性涂层下将产生气泡,在真空环境下气泡将使涂层裂开,严重影响材料的致动效果。

### 4.2 驱动力偏低

在低电压的刺激下,IPMC能产生明显的弯曲变形,尽管此变形能够举起超过其自身40余倍的重物,但IPMC自身重量偏轻,所产生的驱动力也偏低。因此,如何提高IPMC的驱动力,尚需进一步研究。

### 4.3 永久形变

在直流电压作用下,IPMC产生弯曲变形,但这种变形不能长时间保持,会出现回缩现象,确定回缩的起始时间,在理论上有困难。一旦撤消电场,IPMC又向相反的方向产生过位移,出现永久形变。这些问题不解决就会阻碍IPMC的应用。

### 4.4 薄膜湿度

IPMC对湿度是特别敏感的,水分比的变化是产生变形的的基础。在干燥的环境中,IPMC只能响应几分钟,保持湿度是非常重要的。通常需要制作一类似皮肤作用的保护性涂层,利用蚀刻和硅涂层技术,IPMC膜可连续工作4个月。若要工作更长时间,需在封闭性和涂层方面做进一步研究。

## 5 结语

由于目前还没有标准的IPMC产品,一般都是研究者自己现场制作,其性能因工艺条件不稳定而差异很大,有些参数还无法直接测量,很难得出一个适应所有致动器样品的通用模型。因此在驱动控制方面,必须针对不同的样品,研究优化方法,使其达到最佳响应特性,从而使输出力和变形量及响应速度均满足使用要求。

IPMC材料具有能构成仿生致动机构的独特用途,使其具有巨大的发展潜力。但由于存在上述关键性问题,高强度、有效的IPMC材料尚无法付诸于商业用途。为了克服这些限制,人们需要在计算化学、复合材料、电机械分析、致动特性、材料加工技术等众多学科领域进行开发,努力掌握控制电机械相互作用的参数,提高合成、制作、电镀、成形和处理水平,以最大限度地提高该材料的致动性能和强度。

IPMC的研究主要集中在国外,对仿生机器人、人工肌肉和应力传感器等都研制了实验样品;而国内在这一领域的研究起步比较晚,在制备工艺的水平、基础理论研究方面与国外还有很大的差距。2004年王海霞等<sup>[16]</sup>采用渗透还原法制备了Pt-Ni/Nafion离子交换膜复合材料,在Pt颗粒膜外表面化学镀沉积Ni作为电极层,在交变电场作用下,离子交换膜复合材料的偏转角为25°。谭湘强等对IPMC泳动机器人的设计和推进机理进行了相关研究<sup>[17]</sup>。

目前,研究者还不能给出IPMC致动过程中的关键因素和核心参数,相对于压电材料,IPMC还没有得到一个广泛认可的

通用模型,这严重阻碍了IPMC的应用,将是下一步研究的重点。同时,研发标准化的商业产品,扩大其应用范围,也是一个重要的研究方向。

## 参考文献

- 1 Shahinpoor M, Kwang J K. The effect of surface electrode resistance on the performance of ionic polymer-metal composite artificial muscles. *Smart Material and Structures* J, 2000, 9(4): 544
- 2 Kwang J K, Shahinpoor M. A novel method of manufacturing three-dimensional ionic polymer-metal composites biomimetic sensors, actuators and artificial muscles. *Polymer*, 2002, 43: 797
- 3 Nemat-Nasser S. Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites. *J Appl Phys*, 2002, 92(5): 1
- 4 罗玉元, 李朝东, 张国贤. 基于离子聚合物金属复合结构(IPMC)的柔性致动器研究. *中国机械工程*, 2006, 17(4): 410
- 5 Zhang W, Guo S X, Asaka K. Developments of two novel types of underwater crawling microbots. *Proceeding of the IEEE, International Conference on Mechatronics Automation*, Niagara Falls, Canada, 2005: 1884
- 6 Choi H R et al. Biomimetic soft actuator; design, modeling control and applications. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*, 2005, 10(5): 581
- 7 Shahinpoor M, Kwang J K. Novel ionic polymer-metal composites equipped with physically loaded particulate electrodes as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles. *Sensor and Actuators*, 2002, 96: 125
- 8 Nemat-Nasser S, Li J Y. Electromechanical response of ionic polymer metal composites. *J Appl Phys*, 2000, 87(7): 3321
- 9 余海湖, 赵愚, 姜德生. 智能材料与结构的研究及应用. *武汉理工大学学报*, 2001, 23(11): 37
- 10 Mudigonda A, Zhu J J. Characterization and dynamic modeling of ionic polymer-metal composites (IPMC): artificial muscles. *Proceedings of the SPIE*, 2006, 6168: 310
- 11 Paquette J W, Kim K J. Ionomeric electroactive polymer artificial muscle for naval applications. *J Oceanic Eng*, 2004, 29(3): 729
- 12 许敦皓, 朱铭祥, 林宙晴. 应用离子性聚合物-金属复合材料开发尿道人工括约肌之研究: [硕士论文]. 中国台湾省台南: 国立成功大学机械系人机系统实验室, 2005
- 13 Shahinpoor M, Kim K J. Ionic polymer-metal composites: IV. industrial and medical applications. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14: 197
- 14 Bar-Cohen Y. Electroactive polymers as artificial muscles-capabilities potentials and challenges. *Robotics 2000 and Space 2000*, Albuquerque, NM, USA, 2000, 1
- 15 Guo S X, Fukuda T, Asaka K. A new type of fish-like underwater microbot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, 8(1): 738
- 16 王海霞, 余海湖, 李小甫, 等. Pt-Ni/Nafion膜电致动材料的制备及性能研究. *武汉理工大学学报*, 2004, 26(12): 5
- 17 谭湘强, 钟映春, 杨宜民. 泳动机器人推进机理研究. *机械工程师*, 2002, 10: 3

(责任编辑 文华)