

直流电激励下的 IPMC 弯曲大变形力-电耦合模型^{*}

熊克¹, 刘红光²

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 江苏大学土木工程与力学学院 镇江, 212013)

摘要 为了描述离子聚合物金属复合材料(ionic polymer metal composites, 简称 IPMC)悬臂型驱动器在直流电激励下的非线性大变形行为, 采用数字图像相关法(digital image correlation, 简称 DIC)获得的 IPMC 应变梯度与激励电压间的关系, 与修正后的 IPMC 电极分布式电阻电容(resistor-capacitor, 简称 RC)电路模型相结合, 提出了一种具有解析解的 IPMC 弯曲大变形力-电耦合模型, 并采用 Pt 电极和 Ag 电极两种 IPMC 试样对该模型进行了实验验证。结果表明, 该模型能够准确地反映 IPMC 悬臂型驱动器在直流电激励下的整体弯曲变形现象, 且适用于采用沉积法制备电极的 IPMC 驱动器。

关键词 离子聚合物金属复合材料; 驱动器; 直流电; 大变形; 力-电耦合模型

中图分类号 TB333

1 问题的引出

智能软材料具有仿生特性和“活性”, 具备驱动、感知及大变形等多种功能, 在人工肌肉^[1]、软机械手^[2]、仿生机器人^[3]和医疗器具^[4]等领域具有广泛的应用前景, 是材料、力学和机械工程研究中的一个热点。IPMC 是一种典型的智能软材料, 它作为一类电致动聚合物, 在电激励作用下能够改变大小或形状^[5], 可模仿肌肉功能。IPMC 通常由含有一定量溶剂的离子交换薄膜为基体, 利用化学沉积方法在基体表面形成金属电极构成^[6-7], 具有密度小(1~2.5 g/cm³)、形变大(>100%)、响应快(ms~s)和激励方式简便(1~5 V DC/AC)等特点^[8-9]。

IPMC 用作驱动器时, 通常采用的结构形式为悬臂梁式^[10], 在电激励作用下, IPMC 可产生非线性弯曲大变形。以 Nafion 为基体的 IPMC 驱动器为例, 其驱动机理如图 1 所示。驱动过程中, 在电激励作用下, 原本均匀分布在 Nafion 膜内的水合阳离子携带溶剂分子, 通过离子交换膜中的微流道向阴极移动, 而阴离子始终固定在高分子骨架上, 从而导致 IPMC 驱动器向阳极偏转, 产生弯曲形变^[11]。驱动过程经历电能、机械能和化学能之间的相互转化,

影响因素较多。

近十几年来, 研究人员提出了多种 IPMC 驱动器的力学和力-电耦合模型, 以预测其电致动变形行为和特性。Bonomo 等^[12]建立了一种非线性动力学模型。Anton 等^[13]提出了一种描述 IPMC 悬臂驱动器非均匀大变形弯曲变形的力学模型。Alici^[14]基于 Euler-Bernoulli 等式, 提出了一种等效建模方法, 描述悬臂型聚合物驱动器的非线性弯曲大变形。Vahabi 等^[15]在 Bonomo 模型的基础上, 结合线性、非线性最小二乘方法, 提出了一种 IPMC 驱动器参数识别方法。Annabestani 等^[16]将自适应神经模糊系统(adaptive neuro-fuzzy inference system, 简称 ANFIS)与非线性自回归(nonlinear autoregressive with exogenous input, 简称 NARX)结构相结合, 提出了一种动态非线性黑盒模型描述 IPMC 驱动器位移特性。Truong 等^[17]利用通用多层感知神经网络(general multilayer perceptron neural network, 简称 GMLPNN)集成智能学习机制(smart learning mechanism, 简称 SLM), 开发了一种非线性模型来预测 IPMC 驱动器的弯曲行为。为了简化分析, 上述模型均假设 IPMC 驱动器发生的变形为等曲率弯曲变形。

为准确刻画 IPMC 悬臂型驱动器在直流电激励作用下的非线性弯曲大变形特性, 本研究利用数字

* 国家自然科学基金资助项目(11372132)

收稿日期: 2020-07-29; 修回日期: 2020-08-25

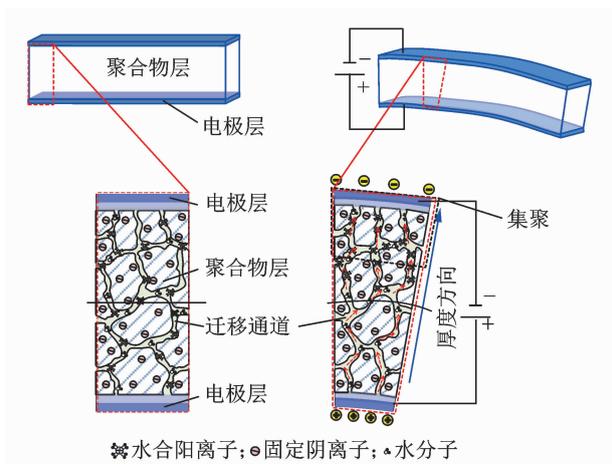


图1 IPMC的致动机理示意图

Fig. 1 Schematic of the actuation mechanism for IPMC

显微系统记录在直流电压激励下 IPMC 驱动器的微观形变,通过 DIC 方法^[18-19],分析其应变分布和变化,研究 IPMC 的应变梯度与激励电压的关系,结合激励电压沿 IPMC 的分布规律,建立力-电耦合解析模型。

2 IPMC 悬臂型驱动器电致动应变的 DIC 分析

实验表明,在直流电激励作用下,IPMC 驱动器变形达到峰值并持续一段时间后会发生松弛,原因在于 IPMC 中的水合阳离子向阴极一侧移动后形成内电场,从而造成水合阳离子的反向移动,松弛现象可以通过施加稳流激励予以避免^[20]。笔者主要针对直流激励下 IPMC 驱动器最大弯曲变形状态进行分析。

IPMC 驱动器具有柔性特征,且厚度通常为毫米级,这导致接触式测试方法不适用于 IPMC 驱动器的力学量测量。为了准确获得 IPMC 的应变大小及其变化,Punning 等^[21]利用扫描电镜,结合 Matlab 中建立的 DIC 方法,在微观尺度上计算了离子型电致动聚合物的轴向与横向应变。Liu 等^[22]将数字显微系统和 DIC 方法相结合,提出了 IPMC 在电激励作用下的表面应变场测试与分析技术。

IPMC 驱动器应变分布测试实验采用溶液浇铸法制备的加厚型 Nafion 基膜 Pt 型 IPMC 试样,其参数见表 1。测试平台主要由 Keyence VHX-100 超景深数字显微系统、Aglient E 3631 A 型稳压直流电源和商用 VIC-2D DIC 测试与分析系统构成,如图 2 所示。

表 1 IPMC 试样规格

Tab. 1 Specifications of IPMC samples

特征	描述
(长×宽×厚)/mm	39×10×0.81
夹持长度/mm	10
阳离子	Na ⁺
溶剂	水

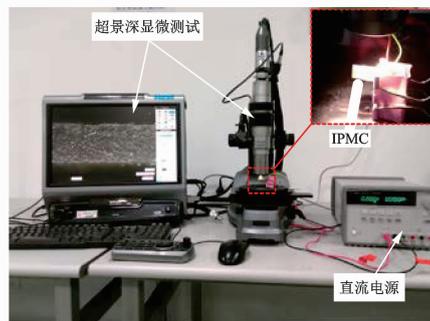


图2 用于 IPMC 应变分布测试的数字显微实验系统

Fig. 2 The microscopic digital imaging system for the strain distribution measurement of IPMC

实验选取的观测区域中心距离固定端 9 mm,以避免夹持电极对测量的影响,视场大小为 2.3 mm×1.73 mm,图像分辨率设定为 1 600×1 200 像素,放大倍数设定为 150 倍。在 DIC 分析中,子窗和步长分别设定为 41 和 20,与标定试样对比,本研究 DIC 位移测试的计算误差为±0.028 8 μm。

2 V 直流电激励下 IPMC 试样的最大位移和应变状态如图 3 所示。图 3(a)为 IPMC 实验观测区域 x 方向(轴向)位移场 DIC 分析云图,结果显现 IPMC 位移场呈线性分布,说明试样发生面内弯曲变形。图 3(b)为进一步分析所得到的观测区域 x 方向的应变场分布云图,可见应变随 y 坐标变化,且均为负,表明 IPMC 虽然发生弯曲变形,但全场均处于收缩状态。

为了更好地显示轴向应变 ϵ_x 沿着 y 轴的分布规律,以及 ϵ_x 随激励电压的变化情况,选取 y 轴所处的横截面,得到的不同激励电压下的应变分布如图 4 所示。由图可知,IPMC 的轴向线应变 ϵ_x 随 y 的变化呈线性关系,可表达为

$$\epsilon_x = \nabla \epsilon y + c \quad (1)$$

其中:斜率 $\nabla \epsilon = \partial \epsilon_x / \partial y$ 为应变梯度;c 为常数。

进一步研究表明,横截面上 IPMC 线应变分布的斜率随激励电压的增大而增大,应变梯度近似正

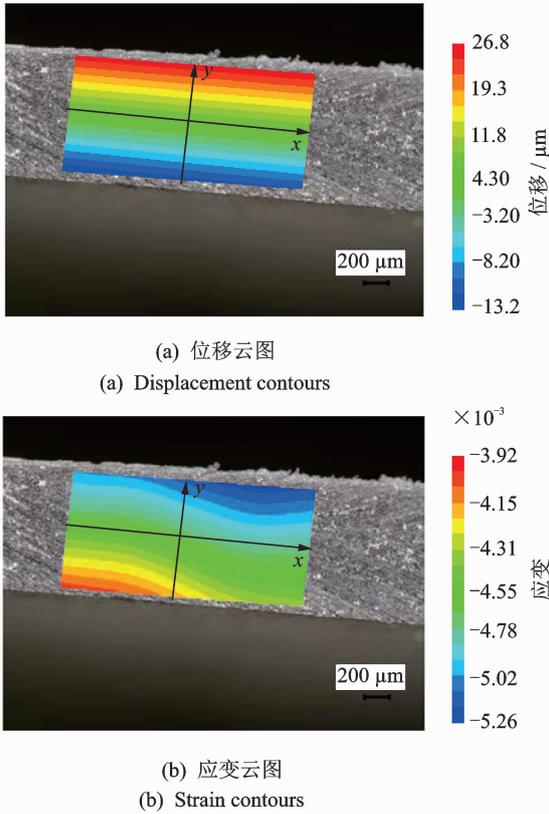


图 3 2 V 直流电压激励下 IPMC 的 x 方向位移与应变云图
Fig. 3 The displacement and strain contours of an IPMC sample in x -direction under 2 V DC applied

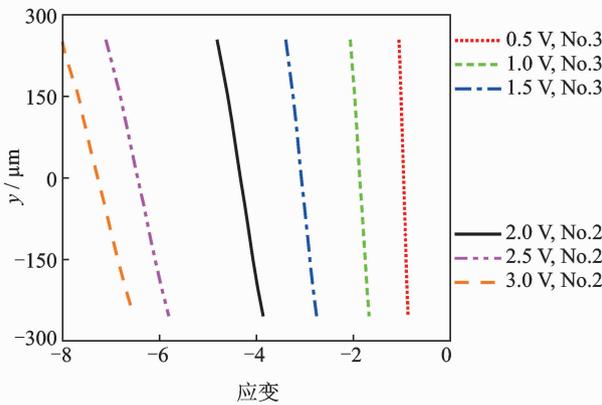


图 4 不同电压激励下 IPMC 在 $x=0$ 横截面上的应变分布
Fig. 4 The strain distributions of IPMC at $x=0$ location under different voltages applied

比于激励电压 U (电场强度 E), 如图 5^[23] 所示, 可表达为

$$\nabla \epsilon = mE = \frac{m}{d}U \quad (2)$$

其中: E , m 和 d 分别为电场强度、比例系数和试样厚度。

假设 IPMC 基膜的弹性模量不变, 则式(2)与建立在不可逆热力学基础上的 De-Gennes 模型^[24] 具有一致的形式。因此, 式(2)可作为由 DIC 方法获得的 IPMC 驱动器电致动本构关系。

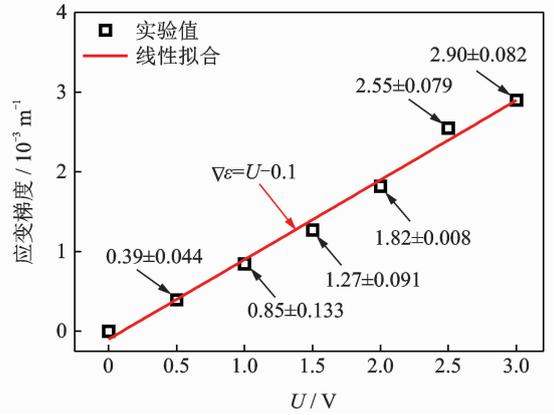


图 5 IPMC 应变梯度与激励电压的关系
Fig. 5 The relationship between IPMC strain gradient and excitation voltages applied

3 直流激励电压沿 IPMC 的分布规律

IPMC 表面电极电阻取决于电极金属颗粒间的接触状态。化学沉积法制备的 IPMC 表面电极为非理想均匀电极, 表面电极电阻导致施加在 IPMC 试样上的电场强度沿其轴线逐渐发生变化。IPMC 驱动器在电激励作用下发生弯曲大变形, IPMC 上下表面变形大小不同, 致使正、负电极阻值产生差异。换言之, IPMC 驱动器的曲率会对表面电阻产生显著影响。Liu 等^[25] 通过搭建不同曲率下 IPMC 试样表面电极电阻测试平台, 研究了弯曲曲率对 IPMC 表面电极电阻的影响规律。结果显示: 发生弯曲变形时, IPMC 正(负)极一侧的表面电极电阻 R_{s+} (R_{s-}) 随着曲率的增加而减小(增大), 电极电阻与曲率呈近似线性关系。

图 6(a) 为考虑弯曲曲率对表面电极电阻影响的 IPMC 分布式 RC 电路模型, 其中, 采用弧坐标 s 反映 IPMC 悬臂驱动器所发生的弯曲大变形。IPMC 的表面电极起导电、分压作用, 等效为理想电阻, 施加的激励电压场强由电极夹持端传递至自由端; IPMC 基膜中水合阳离子的迁移引发溶剂重新分布, 与电容充放电的工作原理和过程相似, 等效为电容 (C); 迁移过程中, 水合阳离子受到黏滞阻力等反向作用使电流损耗, 等效为一种电阻并通过电导表示 (R_1); 激励电压超过临界值 (即发生电极反应

和溶剂水解现象对应的电压值)后,IPMC 因电极反应和溶剂水解而消耗能量,并影响电压传播,等效为电阻(R_2)。

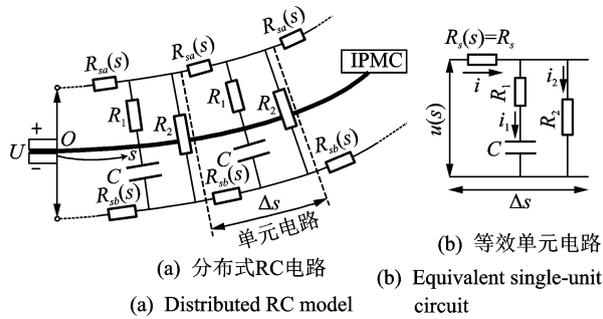


图6 含有曲率影响的IPMC分布式RC电路模型

Fig. 6 The distributed RC model of IPMC actuator with influence of curvature

实验结果显示,正、负电极电阻之和 $R_s(s)$ 近似为常值,且不随坐标变化。因此,分布式电路中的电路单元可以转化为图6(b)所示等效单元电路。根据等效单元电路,在激励电压 U 作用下,IPMC 悬臂型驱动器的弯曲形变达到最大时,基膜内离子迁移量达到最大,电容 C 所在的并联支路不再有电流通过,即电容 C 完成充电,电流只流经表面电阻 R_1 和 R_2 所在的并联支路。此时,典型单元 Δs 上的电压降为

$$\frac{d}{ds}u(s) = -R_s i(s) \quad (3)$$

将 Kirchhoff's 定律 $\frac{d}{ds}i(s) = -i_2(s)$ 和 Ohm's 定律 $i_2(s) = R_2 u(s)$ 代入式(3),等式两边对弧坐标 s 求导,可得电压分布 $u(s)$ 的微分方程为

$$\frac{d^2}{ds^2}u(s) = R_s R_2 u(s) \quad (4)$$

式(4)的通解式为 $u(s) = Ae^{\sqrt{R_s R_2}x} + Be^{-\sqrt{R_s R_2}x}$,由IPMC驱动器的边界条件 $u|_{s=0} = U$ 和 $i|_{s=l} = 0$,可得到类似与 Punning 等^[26]提出的电压分布解

$$u(s) = U \frac{\cosh(\sqrt{R_s R_2}(s-l))}{\cosh(\sqrt{R_s R_2}l)} \quad (5)$$

以 2 V 直流电激励电压为例,若取 $R_s = 100 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$, $R_2 = 1 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}$, $l = 50 \text{ mm}$,由式(5)得到的电压沿IPMC轴向分布情况如图7所示。可见,激励电压沿着IPMC轴向递减,激励电压递减的幅度取决于等效阻值与驱动器的长度。

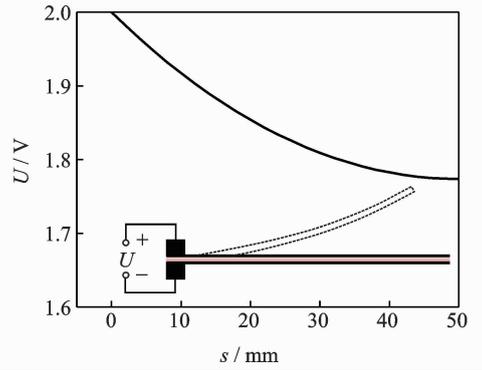


图7 激励电压沿IPMC驱动器轴向的分布

Fig. 7 The distribution of excitation voltage along the axis of an IPMC actuator

4 IPMC 弯曲大变形力电耦合模型

IPMC 悬臂式驱动器的几何构型为纵向对称,且长度方向尺寸明显大于厚度方向。因此,可选取IPMC的轴线,研究IPMC驱动器的形变。IPMC 变形挠曲线分析与几何坐标系如图8所示。其中: l 为IPMC驱动器的长度; r 和 θ 分别为弧坐标 s 处的曲率半径和转角; w 和 x 分别为IPMC弯曲变形挠度和挠度发生处的横坐标; W 和 θ_0 分别为自由端的挠度与转角(即挠度与转角的最大值); y 和 z 分别为IPMC横截面厚度和宽度方向坐标。几何形变关系为

$$\sin\theta = dw/ds \quad (6)$$

$$\cos\theta = dx/ds \quad (7)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{d\theta}{ds} \quad (8)$$

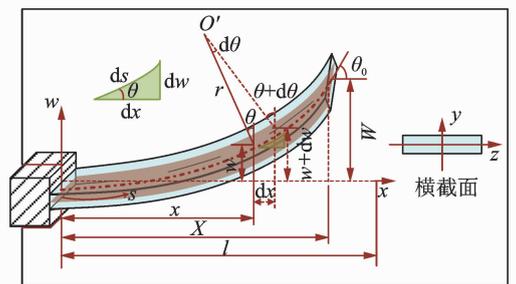


图8 IPMC弯曲变形与几何坐标

Fig. 8 Bending deformation of IPMC and geometric coordinates

根据弯曲变形中应变与曲率的关系,结合式(2)和式(8),并将式(5)代入,可得到在直流电激励下,IPMC的曲率方程为

$$\frac{1}{r(s)} = \frac{d\theta}{ds} = aU \cosh(b(s-l)) \quad (9)$$

其中: $a = \frac{m}{d \cosh(bl)}$; $b = \sqrt{R_s R_2}$ 。

对式(9)积分,并利用固定端边界条件,得到转角方程为

$$\theta = \frac{aU}{b} [\sinh(bl) + \sinh(b(s-l))] \quad s \in [0, l] \quad (10)$$

IPMC 自由端 $s=l$ 处转角为

$$\theta_0 = \frac{aU}{b} \sinh(bl) \quad (11)$$

由式(6)、式(7)和式(10)可得到 IPMC 发生弯曲变形后, x 和 w 为

$$x = \int_0^s \cos\left(\frac{aU}{b} [\sinh(bl) + \sinh(b(s-l))]\right) ds$$

$$w = \int_0^s \sin\left(\frac{aU}{b} [\sinh(bl) + \sinh(b(s-l))]\right) ds \quad (12)$$

通常情况下, IPMC 驱动器的 $b(s-l)$ 的值比较小,因此式(12)的泰勒展开式中的第 1 项 $\sinh(b(s-l))$ 可用 $b(s-l)$ 代替。根据边界条件 $x|_{s=0} = w|_{s=0} = 0$, 可得式(12)的解析解表达式为

$$\begin{cases} x = \frac{1}{aU} \sin\left[aU\left(s-l + \frac{1}{b} \sinh(bl)\right)\right] - \\ \frac{1}{aU} \sin\left[aU\left(-l + \frac{1}{b} \sinh(bl)\right)\right] \\ w = \frac{1}{aU} \cos\left[aU\left(s-l + \frac{1}{b} \sinh(bl)\right)\right] - \\ \frac{1}{aU} \cos\left[aU\left(-l + \frac{1}{b} \sinh(bl)\right)\right] \end{cases} \quad (13)$$

IPMC 弯曲变形后,自由端 $s=l$ 处坐标(X, W)为

$$\begin{cases} X = \frac{1}{aU} \left\{ \sin\left[\frac{aU}{b} \sinh(bl)\right] - \right. \\ \left. \sin\left[aU\left(-l + \frac{1}{b} \sinh(bl)\right)\right] \right\} \\ W = \frac{1}{aU} \left\{ \cos\left[\frac{aU}{b} \sinh(bl)\right] - \right. \\ \left. \cos\left[aU\left(-l + \frac{1}{b} \sinh(bl)\right)\right] \right\} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)即为 IPMC 非线性弯曲大变形挠曲线在自由端的力-电耦合模型通用表达式。

5 IPMC 力-电耦合模型的验证分析

在 IPMC 力-电耦合模型的验证分析中,试样基膜采用得到广泛应用、性能较为稳定的 Nafion117 离子交换膜,制备了 Pt 型和 Ag 型两种电极的 IPMC 悬臂式驱动器试样。试样长 \times 宽 \times 厚 = 34 mm \times 4 mm \times 0.2 mm,其他信息与表 1 相同。

对 IPMC 试样施加直流激励电压,使其产生弯曲大变形,同时测得其自由端端部位移坐标(X, W)及转角 θ_0 。由式(11)和式(14)计算模型参数 a 和 b ,最终可得 IPMC 驱动器的弯曲大变形力-电耦合模型解析解。

以 Pt 型电极 IPMC 为例,根据表 2 所示参数^[25],求得 a 和 b 的值分别为 15.4 和 2.6 ($V^{-1} \cdot m^{-1}$)。由式(13)可得,在 2 V 直流电激励下,IPMC 试样的弯曲挠曲线的实测值与预测值比较如图 9 所示。可见,IPMC 试样的实测形变具有很好的重复性,力-电耦合模型预测结果与实测结果具有良好的 consistency。

表 2 IPMC 试样参数

Tab. 2 Parameters of IPMC samples

试样	U/V	$R_s/(\Omega \cdot cm^{-1})$	$R_2/(\Omega^{-1} \cdot cm)$	X/mm	W/mm	θ_0
Pt-IPMC	2.0	16.690	0.000 04	21.10	9.00	0.74
Ag-IPMC	0.6	0.194	0.000 04	20.66	11.30	1.04

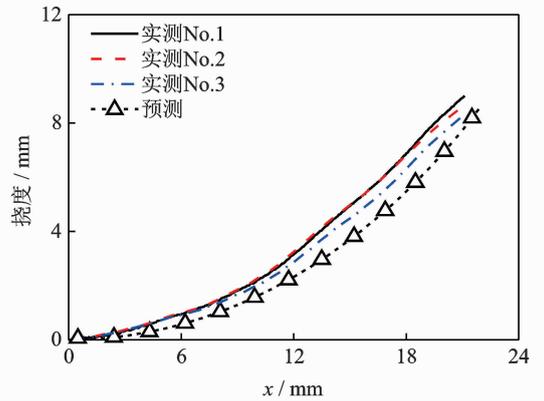


图 9 2 V 直流电激励下 Pt-IPMC 挠曲线实测值与预测值
Fig. 9 The measured and calculated deformation curves of IPMC samples under 2 V DC applied

Ag 金属电阻率小于 Pt 金属,可以降低 IPMC 的表面电极电阻,可使 IPMC 在较低的激励电压下产生大弯曲变形。在 0.6 V 直流电压激励下,利用表 2 中的参数,可求得 Ag-IPMC 的 a 和 b 的值分别为 72.2 和 0.3 ($V^{-1} \cdot m^{-1}$)。

图 10 和图 11 分别给出了 Pt 型和 Ag 型 IPMC 试样在 1.5~3.5 V 和 0.55~0.75 V 激励电压区间内,弯曲挠曲线实测结果与模型预测结果的比较。验证实验重复 3 次,测试结果表明,相同电压激励下 IPMC 的变形具有良好的重复性和一致性。不同电压激励下,挠曲线实测值和由模型计算获得的预测值吻合度较高,验证了 IPMC 弯曲大变形力-电耦合

模型的有效性 with 准确性。

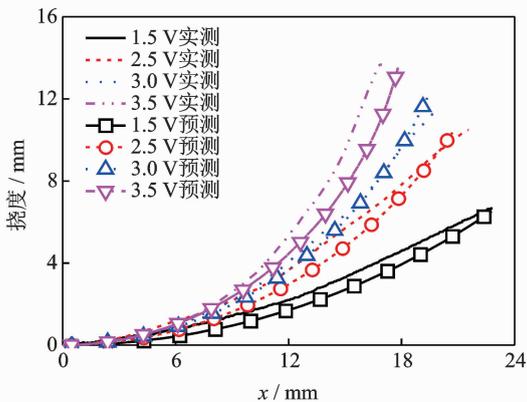


图 10 不同电压激励下 Pt-IPMC 挠曲线实测值与预测值
Fig.10 The measured and calculated deformation curves of Pt-IPMC sample under different voltages applied

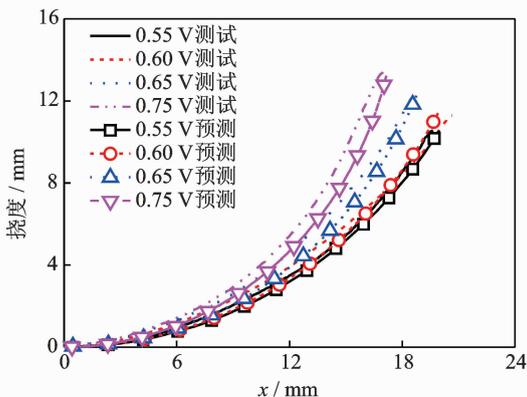


图 11 不同电压激励下 Ag-IPMC 挠曲线实测值与预测值
Fig.11 The measured and calculated deformation curves of Ag-IPMC sample under different voltages applied

表 3 和表 4 分别提供了不同电压激励下, Pt-IPMC 和 Ag-IPMC 自由端端部挠度实测值与模型预测值的量化结果比较。在 3 V 直流电压激励下, Pt-IPMC 试样端部挠度预测值与实测值误差为 4.1%; 在 0.6 V 直流电压激励下, Ag-IPMC 试样端部挠度预测值与实测值误差为 -4.6%。由此可见, 笔者提出的 IPMC 弯曲大变形力-电耦合模型可以准确地描述在直流电压激励下 IPMC 发生弯曲变形的规律, 模型适用于采用沉积法制备电极的 IPMC 驱动器。

上述 Ag-IPMC 和 Pt-IPMC 试样的区别主要在于表面电阻, 两者的表面电阻分别为 0.194 和 16.69 Ω/cm , 从实测挠曲线看, Ag-IPMC 试样的弯曲相对光滑。分析认为, 模型预测值与实测值的误差主要来源于 IPMC 试样的制备过程。由于实验室制备工艺的限制与影响, 如打磨过程的影响, 化学沉

积法制备的金属电极均匀性效果不易控制, 致使 IPMC 试样本身的平整度有差异。

表 3 Pt-IPMC 自由端位移实验值与模型预测值比较

Tab.3 The comparisons of calculated and measured deflection at free end of Pt-IPMC samples

U/V	W/mm		误差/ %	X/mm		误差/ %
	实测值	预测值		实测值	预测值	
1.5	6.48±0.24	6.50	+0.3	22.88±0.05	22.79	-0.4
2.5	10.39±0.22	10.34	-0.5	20.93±0.14	20.72	-1.0
3.0	11.55±0.31	12.02	+4.1	19.62±0.22	19.36	-1.3
3.5	13.48±0.20	13.50	+0.1	17.28±0.33	17.83	+3.2

表 4 Ag-IPMC 自由端位移实验值与模型预测值比较

Tab.4 The comparisons of calculated and measured deflection at free end of Ag-IPMC samples

U/V	W/mm		误差/ %	X/mm		误差/ %
	实测值	预测值		实测值	预测值	
0.55	10.37±0.20	10.19	-1.8	19.80±0.18	20.23	+2.1
0.60	11.08±0.20	11.40	+2.9	20.85±0.18	19.90	-4.6
0.65	12.19±0.27	12.15	-0.3	18.98±0.25	19.24	+1.4
0.75	13.48±0.15	13.04	-3.3	17.23±0.22	17.65	+2.4

6 结束语

本研究将 DIC 方法获得的 IPMC 应变分布规律(应变梯度与激励电压成正比)与改进的 IPMC 电极分布式 RC 模型(考虑了弯曲曲率对表面电极电阻的影响)相结合, 提出了一种可描述 IPMC 在直流电激励下的非线性弯曲大变形行为的力-电耦合模型, 采用以 Nafion117 为基膜、Pt 和 Ag 两种金属为电极的 IPMC 试样实验验证了模型的有效性、准确性与适用性。结果显示, 该模型应用过程简便, 具有良好的适用性, 能够准确地描述 IPMC 悬臂型驱动器在直流电激励下的整体弯曲变形现象。

参 考 文 献

- [1] MIRVAKILI S M, HUNTER I W. Artificial muscles: mechanisms, applications, and challenges[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30: 1704407.
- [2] SHINTAKE J, CACUCCILO V, FLOREANO D, et al. Soft robotic grippers[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30: 1707035.
- [3] CHANG L, LIU Y, YANG Q, et al. Ionic electroactive polymers used in bionic robots: a review[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15:765-782.
- [4] CHANG X L, CHEE P S, LIM E H, et al. Radio-frequency enabled ionic polymer metal composite (IPMC) actuator for drug release application[J].

- Smart Materials and Structures, 2019, 28: 015024.
- [5] YAN Y, SANTANIELLO T, BETTINI L G, et al. Electroactive ionic soft actuators with monolithically integrated gold nanocomposite electrodes [J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1606109.
- [6] SADEGHIPOUR K, SALOMON R, NEOGI S. Development of a novel electrochemically active membrane and smart material based vibration sensor damper[J]. Smart Materials and Structures, 1992, 1(2): 172-179.
- [7] SUN Z, ZHAO G, QIAO D, et al. Investigation on electromechanical properties of a muscle-like linear actuator fabricated by bi-film ionic polymer metal composites[J]. Applied Physics A, 2017, 123(12):749.
- [8] SHAHINPOOR M, KIM K J. Ionic polymer-metal composites (IV): industrial and medical applications [J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14:197-214.
- [9] LUCA V D, DIGIAMBERARDINO P, PASQUALE G D, et al. Ionic electroactive polymer metal composites: fabricating, modeling, and applications of post-silicon smart devices[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2013, 51:699-734.
- [10] MAZHAR U M, ZHAO G. Ionic polymer-metal composite applications[J]. Emerging Materials Research, 2016, 5(1):153-164.
- [11] 于甜,李树锋. IPMC 软体驱动材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(2): 6-9.
YU Tian, LI Shufeng. Research progress on the IPMC soft actuating material[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(2): 6-9. (in Chinese)
- [12] BONOMO C, FORTUNA L, GIANNONE P, et al. A nonlinear model for ionic polymer metal composites as actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16: 1-12.
- [13] ANTON M, AABLOO A, PUNNING A, et al. A mechanical model of a non-uniform ionomeric polymer metal composite actuator [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17:025004.
- [14] ALICI G. An effective modelling approach to estimate nonlinear bending behaviour of cantilever type conducting polymer actuators[J]. Sensors and Actuators B, 2009, 141: 284-292.
- [15] VAHABI M, MEHDIZADEH E, KABGANIAN M, et al. Experimental identification of IPMC actuator parameters through incorporation of linear and nonlinear least squares methods[J]. Sensors and Actuators A, 2011, 168: 140-148.
- [16] ANNABESTANI M, NAGHAVI N. Nonlinear identification of IPMC actuators based on ANFIS-NARX paradigm[J]. Sensors and Actuators A, 2014, 209:140-148.
- [17] TRUONG D Q, AHN K K. Modeling of an ionic polymer metal composite actuator based on an extended Kalman filter trained neural network[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23: 074008.
- [18] ZHANG D, LUO M, AROLA D D. Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation [J]. Optical Engineering, 2006, 45:033605.
- [19] PAN B. Thermal error analysis and compensation for digital image/volume correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 101:1-15.
- [20] SUN A B, BAJON D, MOSCHETTA J M, et al. Integrated static and dynamic modeling of an ionic polymer-metal composite actuator[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25:1-15.
- [21] PUNNING A, VUNDER V, MUST I, et al. In situ scanning electron microscopy study of strains of ionic electroactive polymer actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, 27(8): 1061-1074.
- [22] LIU H G, XIONG K, WANG M, et al. Experimental study on strain distribution of ionic polymer-metal composite actuator using digital image correlation[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26:025004.
- [23] LIU H G, BIAN K, XIONG K. Large nonlinear deflection behavior of IPMC actuators analyzed with an electromechanical model[J]. Acta Mechanica Sinica, 2019, 35(5): 992-1000.
- [24] DE-GENNES P G, OKUMURA K, SHAHINPOOR M, et al. Mechanoelectric effects in ionic gels[J]. Europhysics Letters, 2000, 50(4): 513-518.
- [25] LIU H G, XIONG K, BIAN K, et al. Experimental study and electromechanical model analysis of the nonlinear deformation behavior of IPMC actuators [J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 33(2): 382-393.
- [26] PUNNING A, JOHANSON U, AABLOO A, et al. A distributed model of ionomeric polymer metal composite[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(14): 1711-1724.



第一作者简介:熊克,男,1960年4月生,教授、博士生导师,南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室主任。主要研究方向为智能材料与结构力学、实验固体力学等。获国家技术发明三等奖1项,国家级教学成果二等奖1项,省部级科学技术奖6项。曾发表《智能材料结构》等论著70余篇。

E-mail: kxiong@nuaa.edu.cn

