文章编号: 1007 - 4252(2020) 05 - 0005 - 331

基于柔性薄膜的热驱动执行器弯曲性能研究

坎标[1,*], 徐旺[1], 龚柯健[1], 丁建宁[2]
(1.常州大学机械与轨道交通学院, 江苏, 常州 213164;
2.江苏大学智能柔性机械电子研究院, 江苏, 镇江 212013)

摘要: 柔性热驱动执行器在仿生、医疗和人机协作等领域具有广泛的应用前景。制作了一种柔性热驱动执行器, 将 PE、PI 薄膜作为低膨胀层, PDMS 薄膜作为高膨胀层, 在层间嵌入 Cr20Ni80 高温镍铬合金丝作为电阻丝加热层, 两膨胀层在相同温度下产生不同程度的伸长从而使执行器发生弯曲。弯曲性能测试结果显示, 在 5~9V 的电压下, PE/PDMS 和 PI/PDMS 执行器的稳态挠度分别为 2~6.9 mm 和 5.8~13 mm。随着 PDMS 薄膜厚度的增大, 两种柔性热执行器的稳态挠度先增大后减小。电压越高, 执行器弯曲响应速度越快。9V 电压下, 执行器可产生 12.2 mN 的驱动力, 由其制成的机械爪可抓取自身重量 2.2 倍的物体。

关键词: 热驱动执行器; 热膨胀; 挠度; 柔性机械爪
中图分类号: TB34　　**文献标志码**: A

Study on bending performance of flexible film based electro-thermal actuator

KAN Biao[1,*], XU Wang[1], GONG Ke-jian[1], DING Jian-ning[2]
(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Institute of Intelligent Flexible Mechatronics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Flexible thermal actuators have a wide application prospect in the fields of bionics, medicine, and human-robot collaboration. In this paper, a flexible heat-driven actuator was fabricated, in which PE and PI films were used as the low expansion layer, PDMS film as the high expansion layer, and Cr20Ni80 high-temperature Ni-Cr alloy wire was embedded between layers for heating. The two expansion layers produced different degrees of elongation at the same temperature, which resulted in the bending deformation of the actuator. The bending results showed that the steady-state deflections of the PE/PDMS and PI/PDMS actuators under a voltage of 5~9V were 2~6.9 mm and 5.8~13 mm, respectively. The steady-state deflections of the two actuators increased and then decreased with the increasing thickness of PDMS film. The higher the voltage was, the faster the actuators were bent. Under a voltage of 9V, the actuator provided a force as high as 12.2mN. A mechanical claw made of the actuator successfully

收稿日期: 2020-07-31;　　**修订日期**: 2020-11-02
基金项目: 国家自然科学基金(51105046、91648109) .
作者简介: 坎标(1982-) , 男, 硕士生导师, 博士, 副教授, 主要研究方向: 微纳制造、增材制造(E-mail: kanbiao@ cczu.edu.cn) .

grasped an object of 2.2 times the weight of the claw.

Key words: Thermally driven actuator, Thermal expansion, Deflection, Flexible claw

0 引言

柔性执行器具有重量轻、灵活性高、容差量大、负载自重比高等优点受到人工肌肉、仿生设备、医疗器械等领域研究人员的广泛关注[1-6]。在热[7]、光[8,9]和化学环境[10,11]等外界刺激下,不同结构的柔性执行器能够产生伸长、弯曲、扭转等动作响应。相比于电驱动的刚性执行器,热驱动的柔性执行器在自然界有更多潜在的驱动源,可以在无电力设备的条件下完成动作,生物兼容性方面的局限也更少。正因如此,基于不同材料设计制作具有低功率、高柔性、高能量转化率的热驱动执行器一直是该领域研究的焦点。Zhang 等人将多壁碳纳米管(MWCNT)掺入硅橡胶和水性聚氨酯中,制作成双片层执行器,在 7V 的低直流电压下产生了 28 mm 的弯曲位移,最大曲率达到了 0.29 cm^{-1}[12]。Shirasu 等人利用包覆了 MWCNT 束的热膨胀系数为负的环氧树脂与热膨胀系数为正的铝板制作成双层 U 型执行器,在 5.2-6.0 V 的直流电压下,产生了 7.6-10 mm 的大弯曲位移,输出的力最高达到了 7.8 mN[13]。Amjadi 等人采用受热膨胀的聚丙烯(PP)薄膜和吸湿可收缩的复印纸材料制作出可对电、热和湿气做出响应的双片层执行器,能够在低电压、低功率和较小温度变化下达到最大为 1.07 cm^{-1} 的曲率和 360°的弯曲[14]。

本文利用热膨胀系数较高的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜以及膨胀系数较低的聚乙烯(PE)薄膜和聚酰亚胺(PI)薄膜制作了热驱动柔性执行器,研究了 PDMS 膜厚、加热电压对执行器弯曲性能的影响,分析了不同电压下的弯曲响应速度。基于该执行器制作了四指柔性机械爪,并成功抓取了 9 倍于自重的物体。

1 实验装置及原理

执行器的高膨胀层使用由杭州包尔得新材料科技有限公司提供的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜,厚度分别为 150、200、300、400 和 500 μm。低膨胀层分别采用聚乙烯(PE)或聚酰亚胺(PI)薄膜,厚度分别为 40 μm 和 50 μm。薄膜均制成 35×10 mm^2 的矩形。使用长度为 185 mm 的 $Cr_{20}Ni_{80}$ 高温镍铬合金电阻丝作为加热电阻丝,其丝径为 80 μm,电阻值为 38.7 Ω。将电阻丝沿绕线器缠绕成间距为 1mm 的 S 形作为加热层嵌入高膨胀层和低膨胀层之间。施加 10N 的平压力保持 1 分钟使薄膜之间以及薄膜与电阻丝之间紧密粘合形成柔性执行器。

电阻丝接入 5~9 V 的低直流电压后逐渐加热执行器,从而使执行器的高、低膨胀层产生不同程度的伸长。由于执行器左端固定于夹持器中,其右端作为自由端发生弯曲。通过测量执行器最右端挠度评价其弯曲程度。柔性热执行器结构及挠度测量示意图如图 1 所示。

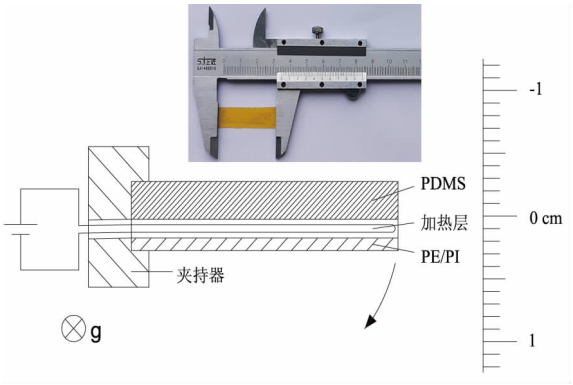


图 1 执行器结构及挠度测量示意图

Fig. 1 Structure and deflection measurement diagram of the actuator

2 结果与讨论

2.1 不同叠层材料对弯曲性能的影响

制作的 PE/PDMS 和 PI/PDMS 两种执行器中,PE 和 PI 膜厚分别为 40 μm 和 50 μm。电阻丝加热电压均为 9V。PE/PDMS 和 PI/PDMS 执行器最高温度分别在 80.0℃和 90.7℃以内。在加热 40s 后,两种执行器均发生明显弯曲(图 2),其稳态挠度分别为 6.9 mm 和 13 mm。图 2 结果还说明,执行器温度随时间单调上升,且温度上升速度逐渐减小。PI/PDMS 执行器温度上升速度略高于 PE/PDMS 执行器。

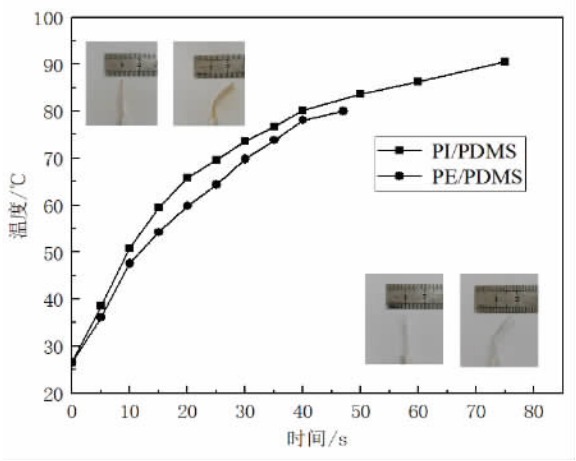


图 2　两种执行器温度随时间变化图。左上、右下插图分别为 PI/PDMS 和 PE/PDMS 执行器在 0s 和 40s 时的实物图

Fig. 2 Actuator temperature vs. time. The top left illustrations show the PI/PDMS actuator at 0s and 40s, whereas the bottom right illustrations show the PE/PDMS actuator at 0s and 40s

表 1 为两种执行器弯曲性能参数与 Zhang[12]、Shirasu[13] 和 Amjadi[14] 等人研究的对比结果。可以发现，两种执行器在输入功率、曲率等方面与先前的研究结果相近，其中 PI/PDMS 执行器在输出力方面则有明显优势。

表 1　　执行器性能对比

Table1　Performance comparison of actuators

	输入功率	输出力	稳态挠度	曲率
Zhang et al.[12]	25 mW/mm^3		28mm	0.29 cm^{-1}
Shirasu et al.[13]		7.8mN	10mm	
Amjadi et al.[14]	0.14W/cm^2			1.07 cm^{-1}
PE/PDMS (本文)	13.6mW/mm^3	7.3mN	6.9mm	0.31 cm^{-1}
PI/PDMS (本文)	13.3mW/mm^3	12.2mN	13mm	0.39 cm^{-1}

值得注意的是，PI 层材料的杨氏模量为 2500 MPa，远高于 PE 层材料的杨氏模量 172 MPa，但在其膜厚高于 PE 膜厚的条件下，PI/PDMS 执行器弯曲变形仍然比 PE/PDMS 执行器更显著。这说明对于 PE/PDMS 和 PI/PDMS 执行器，执行器的弯曲主要是由高、低膨胀层伸长量不同而引起的。两膨胀层热膨胀系数之差越大时，弯曲越显著。

2.2　薄膜厚度对弯曲性能的影响

通过改变 PDMS 膜厚研究薄膜厚度对弯曲性能的影响。如图 3 所示，随 PDMS 膜厚的增大，执行器稳态挠度呈先增大后减小的趋势。PE/PDMS 和 PI/PDMS 两种执行器在 PDMS 膜厚为 400 μm 时挠度均达到最大值，分别为 6.9 和 13 mm。

将执行器受热后的弯曲形状近似为圆弧，根据 Cao 等人的理论模型可以计算出双层薄膜柔性执行器曲率 K[15]：

$$K = \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1)(1+m)^2 ? T}{h\left[3(1+m)^2 + (1+mn)\left(m^2 + \frac{1}{mn}\right)\right]} \quad (1)$$

式中，α_1 和 α_2 分为低膨胀层和高膨胀层的热膨胀系数；m 为低膨胀层和高膨胀层的厚度比，? T 为执行器温度变化值，由 PE/PDMS 和 PI/PDMS 执行器最高温度与室温 26.5℃之差可以计算？T 分别为 53.5℃和 64.2℃；h 为双层薄膜的厚度之和；n 为低膨胀层和高膨胀层的杨氏模量比。

此外，圆弧弯曲假设下柔性执行器自由端挠度为：

$$d = \frac{1}{K} - \frac{1}{K}\cos(LK) \quad (2)$$

式中，d 为挠度，L 为执行器长度。

本文实验值与由公式(1)计算获得的理论值相一致，稳态挠度随膜厚的增大先增大后减小(图 3)。但挠度实验值普遍要高于公式(1)的理论值，这是由于本文中的执行器中含有电阻丝加热层，其力学效应没有在公式(1)中考虑。相比无电阻丝加热层的结构，加入电阻丝加热层后，低膨胀层和高膨胀层的等效杨氏模量均有所增加，从而使两者杨氏模量比 n 降低。而根据公式(1)，执行器的稳态挠度随着 n 的降低而增大。因此，挠度实验值普遍要高于理论值。如图 3 所示，根据本文 PE/PDMS 和 PI/PDMS 执行器结构，分别采用等效杨氏模量比 35.4 和 501 计算理论挠度，可以获得与实验值更加一致的结果。

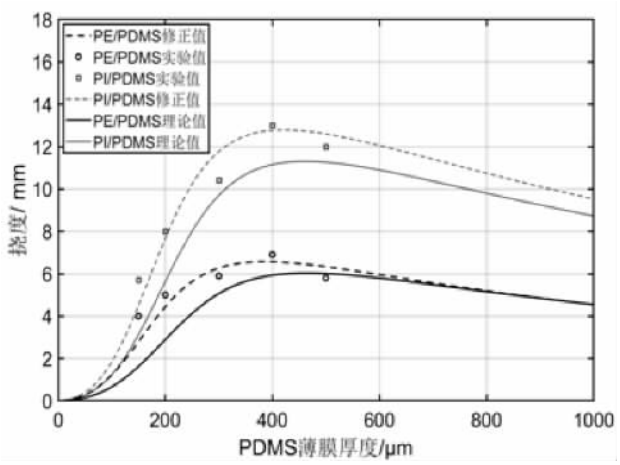


图 3 执行器稳态挠度随 PDMS 薄膜厚度的变化

Fig. 3 Steady-state deflection of actuators vs. the thickness of PDMS film

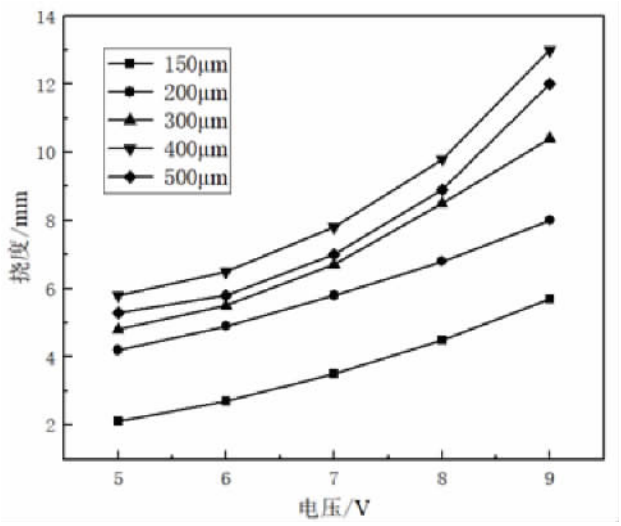


图 4 稳态挠度随电压的变化 (a) PE/PDMS 执行器; (b) PI/PDMS 执行器

Fig. 4 Steady-state deflection vs. voltage (a) PE/PDMS actuator; (b) PI/PDMS actuator

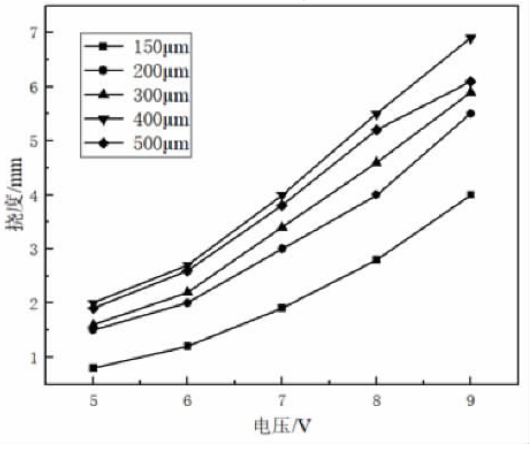
2.3 驱动电压对弯曲性能的影响

相同时间内对执行器施加 5~9V 的不同驱动电压,不同电压下的稳态挠度,结果如图 4 所示。对于不同厚度的执行器,驱动电压越大,稳态挠度也越大。假设电阻丝在执行器中均匀加热,执行器变化的温度 ΔT 满足:

$$\Delta T = \frac{U^2}{RCm}t \qquad (3)$$

式中, U 为驱动电压, C 表示执行器的比热容, m 表示执行器的质量, R 为电阻丝的电阻值, t 表示加热时间。

可见,驱动电压越大,执行器温度升高越显著。由公式(1) 可知执行器曲率与执行器温度变化值 ΔT 成正比,再由公式(2) 可知,当执行器曲率 K 在 0 ~0.39 cm^{-1}时挠度随曲率单调上升。因此,执行器挠度随着驱动电压的增大而单调上升。



2.4 响应速度随时间的变化

图 5 展示了 PDMS 膜厚 400 μm 的 PI/PDMS 执行器挠度随时间的变化。当施加电压后,执行器逐渐弯曲,实时挠度也逐渐增大。在刚施加电压时挠度变化率最大,随后逐渐变缓。驱动电压越高,执行器弯曲响应速度越快。

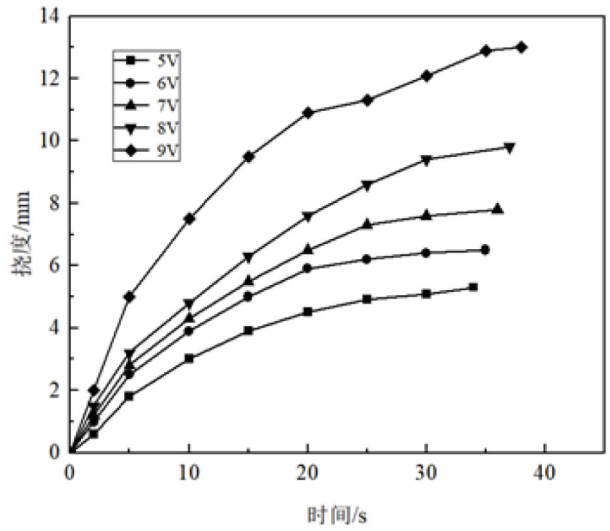


图 5 稳态挠度随时间的变化

Fig. 5 Steady-state deflection vs. time

将执行器近似为一阶惯性系统,在恒值驱动电

压下,其挠度随时间的变化规律具有典型一阶系统阶跃响应的特征,归一化处理后满足:

$$d = 1 - e^{-\frac{1}{T}t} \quad (7)$$

式中, t 为时间, T 为一阶系统时间常数,其值越小,系统响应速度越快。拟合计算可得不同电压下执行器的时间常数(图 6) 。当驱动电压从 5V 上升到 9V 时,时间常数从 13 降至 11.7s,这说明执行器的响应速度随驱动电压的升高而提高了。

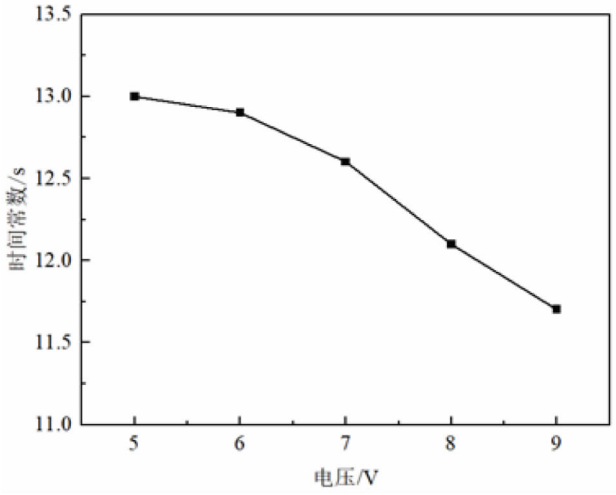


图 6　不同电压下执行器的时间常数

Fig. 6 Time constant of the actuator under different voltages

2.5　柔性热执行器在机械爪中的应用

基于本文对柔性热执行器弯曲性能的分析结果,制作了 4 个由 400 μm 厚的 PDMS 薄膜和 50 μm 厚的 PI 薄膜及电阻丝发热层构成的 PI/PDMS 柔性执行器,如图 7(a) 所示。将热膨胀系数较低的 PI 层置于内侧,采用 9V 直流电压驱动使每个执行器向内弯曲,从而实现机械爪的抓取功能。机械爪抓取和释放过程如图 7(b) ~(f) 所示。将执行器移动到待抓取物体上方,施加驱动电压使四个执行器同时向内弯曲夹紧物体; 12s 后将机械爪抬起以 0.04m/s的速度平稳地移动到距离原位置左侧 8 cm 处; 15s 后关闭驱动电压,机械爪逐渐张开,释放被抓取的物体; 20s 后机械爪完全释放被抓取物体,完成移动。

所制作的 PI/PDMS 执行器自重仅为 0.17g,但可产生最高 12.2 mN 的输出力。由其制成的四指柔性机械爪可抓取物体的最大尺寸为 $20 \times 20 \times 25$ mm^3,最大重量达到 1.49g,约为自身重量的 2.2 倍。由于结构中含有金属丝层,一方面要求高、低膨胀层之间形成的弯曲热应力要克服膜层材料中更大的弯曲阻力,但另一方面也使执行器具有更高的刚度,使机械爪能够牢固抓取更重的物体。为进一步提高机械爪的抓取能力,还可以通过改善薄膜的物理性能、金属丝材质及绕线方法、增加功率密度等方法来实现。

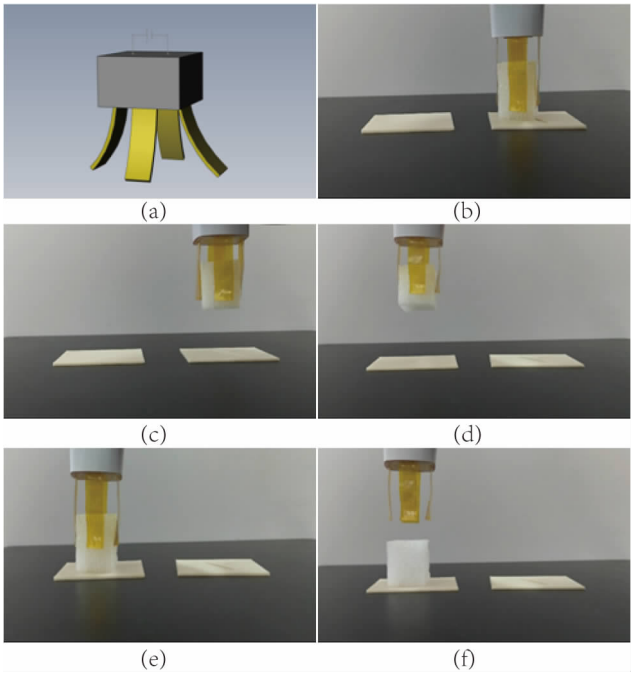


图 7　柔性机械爪结构及抓取过程。(a) 机械爪结构; (b) 0s; (c) 10s; (d) 12s; (e) 15s; (f) 20s

Fig. 7 Grasping process of the flexible mechanical claw. (a) The structure of the claw; (b) 0s; (c) 10s; (d) 12s; (e) 15s; (f) 20s

3　结论

本文制作了 PE/PDMS 和 PI/ PDMS 柔性热驱动执行器并进行弯曲性能测试,分析了薄膜间热膨胀系数、薄膜厚度和驱动电压对执行器弯曲性能的影响。结果显示高、低膨胀层之间热膨胀系数之差越大、施加的驱动电压越高,柔性热执行器的弯曲程度越高,且稳态挠度随驱动电压的增加而增大。执行器的弯曲程度随着 PDMS 膜厚的增加先增加后降低。执行器挠度增加速率随时间的增大而减小。驱动电压越大,执行器响应速度越快。在结构中存在金属丝加热层的条件下,执行器的刚度增大,可在 9V 电压产生 12.2 mN 的驱动力,由其制成的机械爪

可抓取自身重量 2.2 倍的物体。

参考文献:

[1] Mu J, De Andrade M J, Fang S, et al. Sheath-run artificial muscles [J]. Science, 2019, 365(6449): 150-155.

[2] Lee J, Ko S, Kwon C H, et al. Carbonnanotube yarn-based glucose sensing artificial muscle [J]. Small, 2016, 12(15): 2085-2091.

[3] Xu W, Paidi S K, Qin Z, et al. Self-folding hybrid graphene skin for 3D biosensing [J]. Nano Letters, 2019, 19(3): 1409-1417.

[4] Chen L Z, Weng M C, Zhou P D, et al. Multi-responsive actuators based on a graphene oxide composite: Intelligent robot and bioinsired applications [J]. Naoscale, 2017, 9(28): 9825-9833.

[5] Wang X D, Jiao N D, Tung S, et al. Photoresponsive graphene composite bilayer actuator for soft robots [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(33): 30290-30299.

[6] Lin H, Ma S, Yu B, et al. Simultaneoussurface covalent bonding and radical polymerization for constructing robust soft actuators with fast underwater response [J]. Chemistry of Materials, 2019, 31(22): 9504-9512.

[7] Mehmet K, Sirma O, Georgios V, et al. Strain-programmable fiber-based artificial muscle [J]. Science, 2019, 365(6449): 145-150.

[8] Deng J, Li J, Chen P, et al. Tunablephotothermal actuators based on a pre-programmed aligned nanostructure [J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(1): 225-230.

[9] Tai Y L, Gilles Lubineau, Yang Z G. Light-activated rapid-response polyvinylidene-fluoride-based flexible films [J]. Advanced Materials. 2016, 28(23), 4665-4670.

[10] Yuan P, Mccracken J M, Gross D E, et al. A programmable soft chemo-mechanical actuator exploiting a catalyzed photochemical water-oxidation reaction [J]. Soft Matter, 2017, 13(40): 7312-7317.

[11] Zhang Y L, Tian Y, Wang H, et al. Dual-3Dfemtosecond laser nanofabrication enables dynamic actuation [J]. ACS NANO. 2019, 13(4): 4041-4048.

[12] ZengZ, Jin H, Zhang L, et al. Low-voltage and high-performance electrothermal actuator based on multi-walled carbon nanotube/polymer composites [J]. Carbon, 2015, 84: 327-334.

[13] Shirasu K, Yamamoto G, Inoue Y, et al. Development of large-movements and high-force electrothermal bimorph actuators based on aligned carbon nanotube reinforced epoxy composites [J]. Sensors and Actuators A: physical, 2017, 267: 455-463.

[14] Amjadi M, Sitti M. High-performance multiresponsive paper actuators [J]. ACS Nano, 2016, 10(11): 10202-10210.

[15] Cao Y, Dong J. High-performance low-voltage soft electrothermal actuator with directly printed micro-heater [J]. Sensors and Actuators A: physical, 2019, 297, 111546.