

DOI: 10.7652/xjtuxb201808009

光驱动软体结构增材制造工艺研究

徐雪杰^{1,2}, 罗斌^{1,2}, 陈花玲^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;
2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对光驱动软体机器人结构简单、成型工序复杂、且性能稳定性差的缺点,将增材制造技术应用于光驱动材料与结构的制造,开发了一种基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)和碳纳米管(CNT)双层复合材料的增材制造工艺。工艺探索表明:注射泵流量为 0.05 mL/min、喷头移动速度为 30 mm/s、打印喷头直径为 0.3 mm 时,打印的 PDMS 平面有较好的平整度;当注射泵流量为 0.4 mL/min、喷头移动速度为 33 mm/s、打印喷头直径为 0.4 mm 时,打印出的 CNT 单道成型轨迹较为连续和均匀,且打印出的平面较为平整;并且随着打印的 PDMS、CNT 层厚度的增加,双层结构的光驱动响应速度都会逐渐减小。增材制造软体机器人在光照下能够实现模仿人手的捏、抓、握等基本动作,表明了研究的光驱动材料增材制造工艺的可行性,为该类光驱动材料在软体机器人中的进一步应用奠定了基础。

关键词: 增材制造;软体机器人;光驱动;打印工艺

中图分类号: TP24;TP331 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)08-0054-06

Additive Manufacturing Based on Light Driven Soft Structure

XU Xuejie^{1,2}, LUO Bin^{1,2}, CHEN Hualing^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For the disadvantages of light-driven materials used in soft robots, such as simple structure, complex forming process, and poor performance stability, we apply the additive manufacturing technology to the manufacture of light-driven materials and structures, and develop a method for the additive manufacturing process of polydimethylsiloxane (PDMS) and carbon nanotube (CNT) double-layer composites. The process testing shows that when the injection pump flow is 0.05 mL/min, the head moving speed is 30 mm/s and the print head diameter is 0.3 mm, the printed PDMS plane has the better flatness; when the injection pump flow is 0.4 mL/min, the nozzle moving speed is 33 mm/s and the diameter of the head is 0.4 mm, the printed CNT single-track forming track is more continuous and uniform, and the printed plane is flat; and as the printed PDMS layer thickness or the CNT layer thickness increase, the response speed of the optical drive in the two-layer structure gradually lowers. Via the additive manufacturing technology, a soft robot hand is printed. It can simulate pinching, grasping, and gripping of human hands under light, demonstrating the feasibility of the additive manufacturing process for light-driven materials.

Keywords: additive manufacturing; soft robot; light-driven; printing process

机器人在科技发展的过程中始终占据着重要地位。传统机械基本由刚性模块通过运动副连接而成,具有运动精确的优点,但传统机械的刚性结构也在某些方面存在限制,例如环境适应性较差、在狭窄空间或者复杂通道内的运动受到很大制约^[1-2]。因此,最近几年来,“软体机器人”概念的提出,引起了学术界广泛的关注。

与传统刚性机械不同,软体机器人的基体或者驱动部分主要采用软材料。不像现有的刚性机械使用复杂的电动或者气动装置驱动,软体机器人的驱动是利用温度、光照以及化学反应等方式,使软体结构发生变化,从而进行一些简单运动^[3-5]。这些能够对外部环境的刺激进行适当地判断和响应,并具备执行能力的软质材料被称为软质智能材料。与传统硬质材料相比,软质智能材料具有变形大、生物兼容性好、质量轻、功耗低等特点,且可通过爬行、蠕动、扭动等仿生运动^[6-12]完成指定动作,从而弥补了传统机械的一些缺点和不足。

显然,传统的加工刚性材料的方法很难适应于软体材料的加工。目前,应用比较广泛的软体材料加工工艺有形状沉积制造^[13]、软体平版印刷^[14]和失蜡制造^[15]等,但这些加工工艺存在工序较多,加工使用的材料较为单一且加工周期较长等不足,因而只能制造较为简单的软体结构。3D打印技术的发展为软体机器人的快速个性化制造提供了可能^[16-18],但目前利用3D打印技术打印各种智能软体材料的工艺及器件研究非常匮乏,因此很有必要对其进行深入研究。

在软体智能材料及其应用中,基于光驱动的智能材料软体机器人目前已经有了初步研究。例如,Hu Ying通过旋涂和裁剪工艺制备了一种可用于光驱动的结构,并成功设计出一种在光照下可以进行弹跳运动的软体机器人^[19]。Liu Ying等人通过在预拉伸的形状记忆聚合物薄片上喷涂与激光束宽度以后的黑色墨水,然后用激光器照射相当于连接铰链的光照区,可以看到材料发生了折叠效应^[20]。以上研究都是采用手工制造,工序较为复杂,难以标准化,且驱动性能个体差异较大。

为了解决这一问题,本文将3D打印技术应用于光驱动复合材料的打印,并在研究光驱动材料打印工艺的基础上,针对光驱动软体结构进行打印,对光驱动软体结构的性能进行测试,从而为软体机器

人的制造提供参考。

1 光驱动复合材料的组成及驱动原理

本文所研究的光驱动复合材料是由聚二甲基硅氧烷(PDMS)和单壁碳纳米管(CNT)构成的双层结构,其中PDMS是一种物理化学性能稳定的绝缘硅橡胶,具有高的热膨胀系数($325 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$),在 $-45 \sim 200^\circ\text{C}$ 的温度范围内具有较好的热稳定性。

如图1所示,该复合材料实现光驱动变形的原理是由于PDMS的热膨胀系数几乎比CNT大两个数量级,而且碳纳米管材料对热非常敏感^[21-22]。在红外光的照射下,CNT层作为纳米加热单元,在吸收热量后可以很快地传导给PDMS层。该双层结构吸收热量后,PDMS发生大幅度膨胀,CNT发生较小膨胀,结果表现为结构向CNT层方向发生弯曲;当撤去红外光照时,该双层结构又会恢复原来的形状。

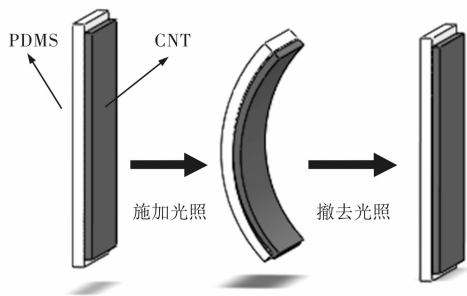


图1 双层结构光驱动原理

2 3D打印设备及打印溶液配备

光驱动材料常规制备工艺一般是通过配置溶液、涂覆、固化成型工艺。因此,要实现该类材料的打印,需要开发能够实现溶液打印的设备,在此设备上进行系统的工艺研究,才能够保证打印质量与成型精度,而这些工艺参数与材料的配置、流变性能、固化性能等有关系,因此需要进行系统的实验研究。

2.1 3D打印系统的组成

本课题组开发的3D直写设备见图2,主要由4部分组成:①计算机控制系统,通过切片软件(Slic3r)对打印模型进行切片,转化成Gcode代码语言;②三维运动平台系统,接收计算机系统发出的成型指令,精确运动;③溶液挤出系统,通过注射泵精确控制挤出流量,经过喷头挤出成型;④加热系统,通过加热板对挤出的溶液进行加热,促进打印件快速固化。

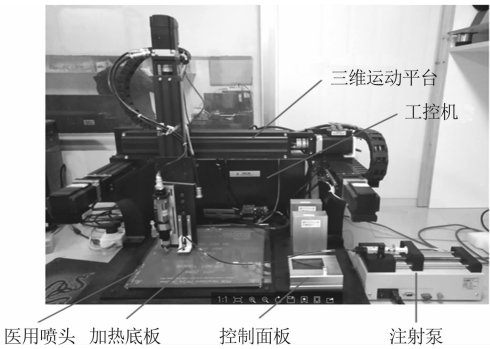


图 2 3D 直写系统组成图

2.2 打印溶液的配制

本实验中使用的 PDMS 溶液来自美国道康宁公司生产的 SYLGARD 184,由 A 组分 (silicone elastomer liquid base) 和 B 组分 (silicon elastomer curing agent) 组成。组分 A 和 B 以 10:1 的质量比充分混合,发生交联反应,该液体混合物在加热时会固化成透明的弹性体。单壁碳纳米管打印浆料来自中国科学院成都有机化学公司生产的 NMP 碳纳米管浆料,其中碳纳米管质量分数为 0.25%,碳纳米管长度为 5~30 nm。

3 光驱动材料的打印工艺研究

不同的打印材料,在相同的注射泵流量与喷头移动速度下,打印得到的线宽和线的连续性均有区别。由于单道成型轨迹的性能对最终成形件的质量起到决定性作用,本文工艺研究将单道成型轨迹宽度和单道成型轨迹的连续性作为评价打印性能的主要指标。由于使用的 PDMS 溶液有一定的黏度,相对于 CNT 浆料来讲,在打印线性轨迹时,具有较好的连续性和均匀性,CNT 浆料却容易出现断点或者串珠现象。因此,将打印出的单道轨迹的宽度作为衡量 PDMS 溶液单线打印性能的评价指标,以单道成型轨迹的连续性作为衡量 CNT 浆料打印性能的评价指标。

3.1 PDMS 溶液的打印工艺

图 3 为固定喷头孔径 $d=0.3\text{ mm}$ 时,分别在不同的喷头移动速度和注射泵流量的情况下,得到的 PDMS 溶液单道成型轨迹的宽度。

由图 3 可见,PDMS 溶液流量与单道成型宽度基本成正比关系。观察发现,在 $0.03\sim0.07\text{ mL/min}$ 范围的注射泵流量、 $24\sim36\text{ mm/s}$ 范围的喷头移动速度下,由于 PDMS 具有一定的黏度,在单道成型的过程中基本不会出现断丝和外溢的情况。但不难想象,相对较大的注射泵流量和较小喷头移动

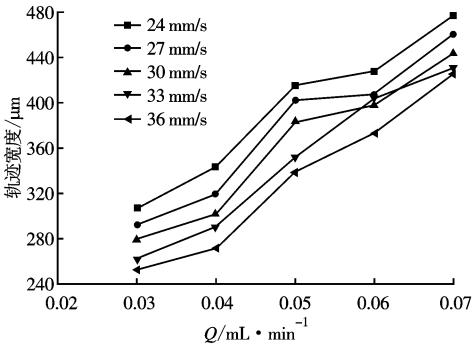


图 3 喷头移动速度、流量与单道成型宽度的关系

速度会造成 PDMS 溶液的堆积,形成积液,影响成形精度。相反,相对较小的注射泵流量和较大的喷头移动速度会使 PDMS 的单道成型轨迹的宽度不均匀、甚至可能出现断点。根据实验发现,采用注射泵流量 $Q=0.05\text{ mL/min}$ 、喷头移动速度 $v_1=30\text{ mm/s}$ 时,打印的 PDMS 平面有较好的平整度。因此,后续 PDMS 的打印均按照此工艺参数进行。

3.2 CNT 浆料打印参数的设定

由于 CNT 浆料流动性较强,不同的打印参数对 CNT 单道成型轨迹的连续性和均匀性影响很大。为此,本文设计了正交试验,探究注射泵流量 Q 、打印喷头移动速度 v_1 、喷头直径 d 这 3 个参数对 CNT 单道成型轨迹连续性和均匀性的影响。在对工艺参数初调以及以往实验的基础上,分别给注射泵流量 Q 、喷头移动速度 v_1 、喷头直径 d 设定 3 个水平,如表 1 所示。

表 1 CNT 浆料单道成型轨迹影响因素

水平数	$Q/\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_1/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	d/mm
1	0.1	27	0.4
2	0.4	30	0.5
3	0.7	33	0.7

为了方便分析不同工艺参数组合下线型的连续程度和均匀性,此处用线型 1~5 来表示:1 代表线型很不连续,呈间距很大的节状分布;2 代表线型不连续,有断点出现;3 代表线型连续,但是线型的粗细很不均匀;4 代表线型连续,但是线型的边缘不均匀;5 表示线型连续且较均匀。

各种情况的 CNT 单道成型轨迹在光学显微镜下的照片如图 4 所示,正交实验结果见表 2,根据正交试验得出的极差分析见表 3。

从表 3 的结果可以得出以下结论:注射泵流量的设定对于 CNT 浆料成型轨迹的连续性和均匀性影响最大。此外,根据正交试验结果可知,当注射泵

流量为 0.4 mL/min、喷头移动速度为 33 mm/s、喷头直径为 0.4 mm 时,打印出的 CNT 单道成型轨迹较为连续和均匀,打印出的 CNT 平面较为平整。

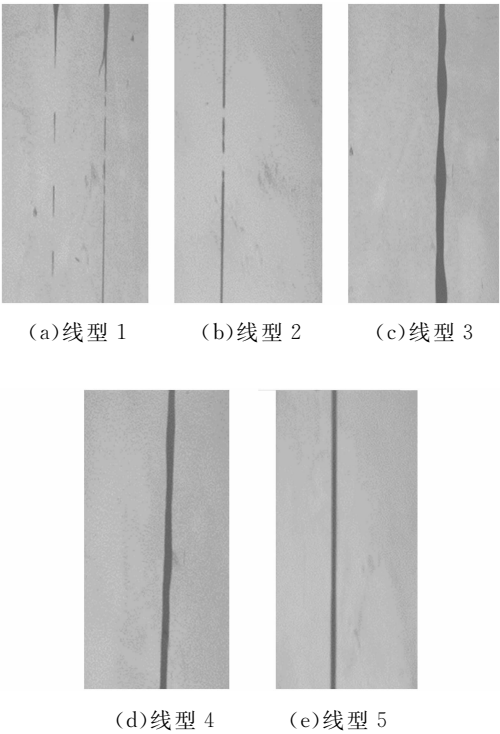


图 4 不同工艺参数下的单道轨迹形状

表 2 正交实验结果

实验方案	$Q/\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_1/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	d/mm	线型
1	0.1	27	0.4	1
2	0.1	30	0.5	1
3	0.1	33	0.7	2
4	0.4	27	0.5	4
5	0.4	30	0.7	4
6	0.4	33	0.4	5
7	0.7	27	0.7	3
8	0.7	30	0.4	4
9	0.7	33	0.5	3

表 3 极差分析表

参数	极差计算过程及结果		
	Q	v_1	d
K_1	4	8	10
K_2	13	9	8
K_3	10	10	8
k_1	1.3	2.7	3.3
k_2	4.3	3.0	2.7
k_3	3.3	3.3	2.7
R	3.0	0.6	0.6

注: K_i 代表水平数为 i 时 Q 、 v_1 、 d 对应的线型之和; $k_i = K_i/3$;
极差 $R = \max k_i - \min k_i$ 。

3.3 光驱动材料的打印及其性能

如前所述,光驱动材料是由 PDMS 和 CNT 复合而成,因此该复合材料的打印是在上述单道成型工艺基础上进行的。如图 5 所示,先在玻璃打印平台上打印一层 PDMS,然后再打印一层 CNT,实现光驱动复合材料的打印。

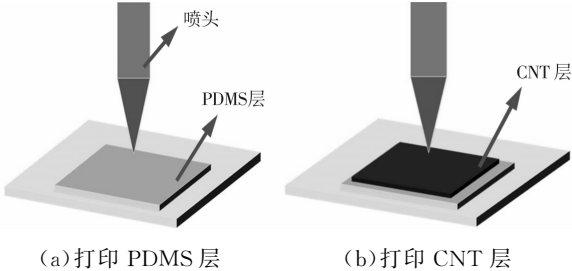


图 5 双层结构复合打印示意图

实验研究中,首先打印了一个条状驱动单元结构,条状尺寸为 70 mm×8 mm,其中 PDMS 层厚度为 100 μm,CNT 层厚度为 50 μm。

为了测试其性能,将光驱动材料条状结构的一端固定,然后对该双层结构施加红外光照。该条状结构初始状态是一个卷曲的筒状结构,在红外光照下能够快速展开,撤去光照后又能恢复成初始状态。图 6 表示了条状样本在红外灯光照下以及撤去红外光照时的反应过程。结果表明,条状样本在红外光照 7 s 内能够弯曲超过 360°的角度,而且响应速度非常快。当撤去光照后,条状双层结构样本在 10 s 内又恢复为原本的形状。

显然,PDMS 层的厚度以及 CNT 层的厚度对条状双层结构光驱动响应性能有较大的影响。为了研究层厚对响应性能的影响规律,我们分别采取固定 CNT 层厚、改变 PDMS 层的厚度,以及固定 PDMS 层厚、改变 CNT 层的厚度,记录在红外光照

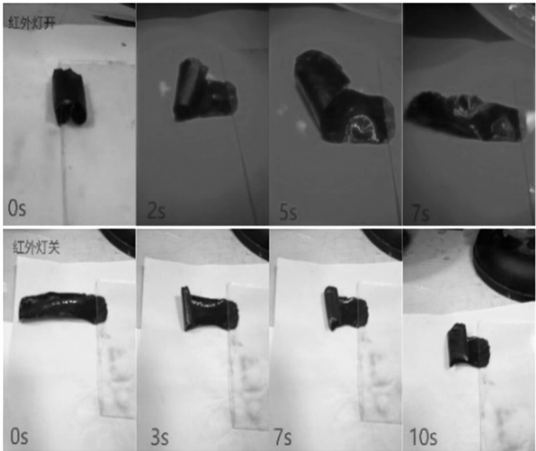


图 6 条状双层复合结构在红外光下的响应特性

下双层结构弯曲 360° 所需时间,实验结果如图 7 和图 8 所示。

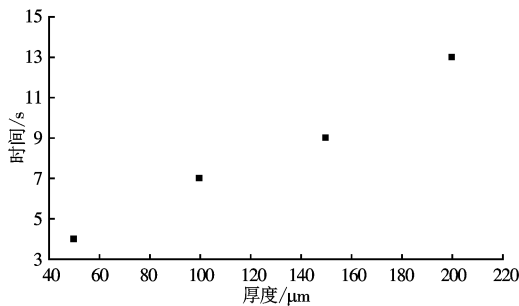


图 7 不同 PDMS 层厚下响应时间

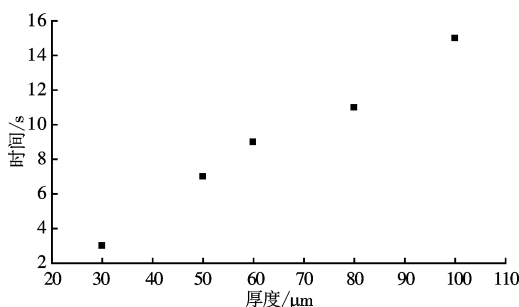


图 8 不同 CNT 层厚下的响应时间

实验结果表明:当 CNT 层厚度不变时,随着 PDMS 层厚度的增加,该双层复合结构在红外光照下的响应速度变慢;当 PDMS 层厚度不变,CNT 层厚度增加时,双层复合结构在光照下的响应速度也会随之减小。为了能使双层复合结构既有一定的厚度又能对光照刺激快速响应,打印的 PDMS/CNT 双层复合结构采用 $100\ \mu\text{m}$ 厚的 PDMS 层和 $50\ \mu\text{m}$ 厚的 CNT 层。

4 基于光驱动软体结构的 3D 打印

在上述关于光驱动材料 3D 打印工艺研究的基础上,本文还初步探索了其在软体机器人中的应用。

本文设计了一个光驱动材料软体机器手,并按上述工艺进行增材制造,该软体机器手尺寸大约为成年人手掌尺寸的 $1/2$ 。软体机器手结构如图 9a 所示,4 根手指相互平行,大拇指与食指成 30° 角度。当对该软体机器手施加红外光照的时候,可以实现软体机器手 5 根手指的弯曲,类似于人手的抓握动作,撤去光照后,手指又会恢复原状。给软体机器手不同部分分别施加光照时,可以实现单个手指的运动或者多个手指的复合运动。

图 9 中 a 是打印出来的初始状态的软体机器手,在没有光照的情况下,软体机器手保持平面伸展的状态。图 9 中 b、c、d 显示控制红外光分别照在不

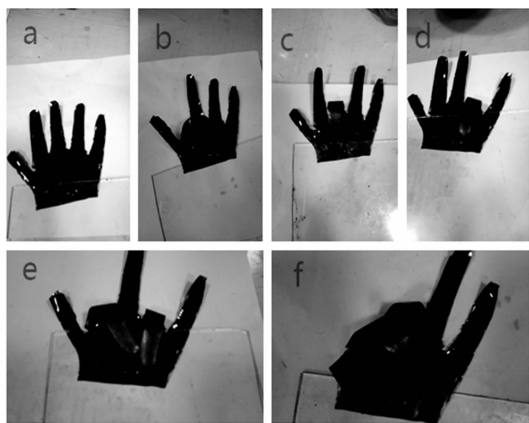


图 9 光驱动软体机器手

同的单个手指上,能够分别控制各个手指的单独运动,而且通过控制红外灯与手指的距离可以控制手指的最大弯曲角度。图 9 中 e、f 表示控制光源照射在 2 根或者 3 根手指上,能够同时控制多根手指的共同运动。通过控制光照位置的不同,该软体机器手基本上能够实现模仿人手的捏、抓、握等基本动作。

该实验再次证明了采用 3D 打印技术打印光驱动材料,完全可以实现预期的变形目标,表明了该工艺的可行性。

5 结 论

本文通过对光驱动材料的打印工艺及驱动结构设计与研究,得出以下结论。

(1) 采用注射泵流量 $Q=0.05\ \text{mL/min}$ 、喷头移动速度 $v_1=30\ \text{mm/s}$ 、打印喷头直径 $d=0.3\ \text{mm}$ 时,打印的 PDMS 平面有较好的平整度;当打印参数设定注射泵流量 $Q=0.4\ \text{mL/min}$ 、喷头移动速度 $v_1=33\ \text{mm/s}$ 、喷头直径 $d=0.4\ \text{mm}$ 时,打印的 CNT 单道成型轨迹较为连续和均匀,打印的 CNT 平面较为平整。

(2) PDMS 层厚与 CNT 层厚对光驱动材料的驱动性能有重要影响。实验结果证明,随着 PDMS 层厚度的增加或者 CNT 层厚度的增加,双层结构的光驱动响应速度都会逐渐减小。

(3) 利用直写 3D 打印技术打印出的软体机器手,在光照控制下能够模拟人手完成不同的动作形态,证明本文提出的 3D 打印光驱动材料的打印工艺是可行的。

参考文献:

- [1] TRIVEDI D, RAHN C, KIER W, et al. Soft robotics: biological inspiration, state of the art, and future

- research [J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2008, 5(3): 99-117.
- [2] WANG L, IIDA F. Deformation in soft-matter robotics: a categorization and quantitative characterization [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2015, 22(3): 125-139.
- [3] JONES B A, WALKER I D. Kinematics for multisection continuum robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(1): 43-55.
- [4] PFEIFER R, LUNGARELLA M, IIDA F. The challenges ahead for bio-inspired 'soft' robotics [J]. *Communications of the ACM*, 2012, 55(11): 76-87.
- [5] JONES B A, WALKER I D. Practical kinematics for real-time implementation of continuum robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(6): 1087-1099.
- [6] TRIMMER B A, ISSBERNER J I. Kinematics of soft-bodied, legged locomotion in *Manduca sexta* larvae [J]. *Biological Bulletin*, 2007, 212(2): 130-142.
- [7] GE Q, SAKHAEI A H, LEE H, et al. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers [J]. *Science Report*, 2016, 6: 31110.
- [8] YANG Y, CHEN Y, WEI W, et al. 3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, 84(9): 2079-2095.
- [9] LENG J S, LAN X, LIU Y J, et al. Electrically conductive shape-memory polymer filled with Ni powder chains [J]. *Applied Physical Letters*, 2008, 92(1): 879.
- [10] GE Q, SAKHAEI A H, LEE H, et al. Active origami by 4D printing [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23: 094007.
- [11] CLARE A T, CHALKER P R, DAVIES S, et al. Selective laser melting of high aspect ratio 3D nickel-titanium structures two way trained for MEMS applications [J]. *Int J Mech Mater Des*, 2008, 4(2): 181-187.
- [12] BAUGHMAN R H. Conducting polymer artificial muscles [J]. *Synthetic Metals*, 1996, 78(3): 339-353.
- [13] GAFFORD J, DING Ye, HARRIS A, et al. Shape deposition manufacturing of a soft, atraumatic, deployable surgical grasper1 [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015, 7(2): 021006.
- [14] XIA Younan, WHITESIDES G M. Soft lithography [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 1998, 37(5): 550-575.
- [15] HOMBERG B S, KATZSCHMANN RK, DOGAR M R, et al. Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper [C]// *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1698-1705.
- [16] 陈花玲, 罗斌, 朱子才. 4D打印: 智能材料与结构增材制造技术的研究进展[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(2): 1-12.
- CHEN Hualing, LUO Bin, ZHU Zicai, et al. 4D printing: progress in additive manufacturing technology of smart materials and structure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(2): 1-12.
- [17] 张帆, 谭跃刚, 马国锋. 基于正交试验的FDM 3D打印工艺方法研究[J]. *机床与液压*, 2017, 45(23): 78-81.
- ZHANG Fan, TAN Yuegang, MA Guofeng. Research of FDM 3D printing technology method based on orthogonal experiment [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2017, 45(23): 78-81.
- [18] 罗斌, 朱子才, 陈花玲, 等. 离子液体型离子聚合物金属复合材料的封装及变形性能[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(8): 122-127.
- LUO Bin, ZHU Zicai, CHEN Hualing, et al. A packaging technology and drive stability of ionic polymer-metal composite materials based on ionic liquid type electrolyte layer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(8): 122-127.
- [19] HU Ying, LIU Jiaqin, CHANG Longfei, et al. Electrically and sunlight-driven actuator with versatile biomimetic motions based on rolled carbon nanotube bilayer composite [EB/OL]. [2018-01-05]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.201704388/full>.
- [20] LIU Ying, MATTHEW M, MICHAEL J, et al. Self-folding of polymer sheets using local light absorption [J]. *Soft Matter*, 2012, 8(6): 1764-1769.
- [21] LI Qingwei, LIU Changhong, LIN Yuanhua, et al. Large-strain, multi-form movements from designable electrothermal actuators based on large highly anisotropic carbon nanotube sheets [J]. *ASC Nano*, 2015, 9(1): 409-418.
- [22] 李涤尘, 刘佳煜, 王延杰, 等. 4D打印-智能材料的增材制造技术[J]. *机电工程技术*, 2014, 43(5): 1-9.
- LI Dichen, LIU Jiayu, WANG Yanjie, et al. 4D printing-additive manufacturing technology of smart materials [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2014, 43(5): 1-9.

(编辑 杜秀杰)