



3D打印磁控柔性抓手

圣宇 欧兴成 黄嘉琪 黄丹彤 李小红 毕燃 石明 郭双壮

3D printing magnetic soft gripper

SHENG Yu, OU Xingcheng, HUANG Jiaqi, HUANG Dantong, LI Xiaohong, BI Ran, SHI Ming, GUO Shuangzhuang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220620.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁致伸缩层合悬臂梁式作动器的振动分析

Vibration analysis of magnetostrictive laminated cantilever actuator

复合材料学报. 2019, 36(5): 1319–1326 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180827.003>

4D打印复合软材料力学性能预测研究进展

Research progress on prediction of mechanical properties of 4D printing soft composite

复合材料学报. 2021, 38(6): 1651–1668 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210106.001>

Ti元素掺杂对Fe–3Si基软磁复合材料组织结构及磁特性的影响

Effects of Ti element doping on microstructure and magnetic properties of Fe–3Si based soft magnetic composites

复合材料学报. 2018, 35(9): 2495–2502 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180115.005>

3D打印制备碳纳米管/环氧树脂电磁屏蔽复合材料

3D-printed carbon nanotubes/epoxy composites for efficient electromagnetic interference shielding

复合材料学报. 2019, 36(1): 1–6 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180511.002>

三维打印碳纤维增强聚合物复合材料热残余解析解

Thermal residual solutions of carbon fiber reinforced polymer composites by 3D printing

复合材料学报. 2019, 36(5): 1151–1158 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180625.001>

磁致链化对磁流变弹性体压阻效应的影响

Effects of particle pre-orientation via application of magnetic field on the piezoresistivity of magnetorheological elastomer

复合材料学报. 2017, 34(9): 2085–2092 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161207.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.13801/j.cnki.fhclxb.20220620.001](https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220620.001)

3D 打印磁控柔性抓手



分享本文

圣宇¹, 欧兴成¹, 黄嘉琪¹, 黄丹彤¹, 李小红¹, 卞燃¹, 石明², 郭双壮^{*1}

(1. 中山大学 材料科学与工程学院, 聚合物复合材料及功能材料教育部重点实验室, 广州市柔性电子材料与可穿戴设备重点实验室, 广州 510275; 2. 中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

摘要: 柔性抓手能够在外部刺激下发生形变, 在货物运输等领域有较好的应用。然而, 目前使用的柔性抓手响应速度慢, 对货物的形态和质量都有着较高要求, 无法像人手一样适配绝大多数场景, 因此有必要开发一种响应速度快、适配各种货物的柔性抓手。本文将硬磁材料——钕铁硼粉末(NdFeB)与硅橡胶(Room temperature vulcanized rubber, RTV 橡胶)进行共混复合, 形成了一种可打印的磁响应 NdFeB-RTV 橡胶复合材料。通过对墨水直写 3D 打印技术的制造工艺参数的探索和优化, 将 NdFeB-RTV 橡胶复合材料的前驱体墨水打印成型。该材料固化后呈现出优异的力学性能—断裂伸长率接近 300%, 抗拉强度为 1.03 MPa, 拉伸杨氏模量为 1.27 MPa, 弯曲强度为 78.06 MPa, 弯曲模量为 160.96 MPa。最后, 本文采用墨水直写 3D 打印技术, 设计制造了磁响应的四臂抓手机器人。利用机器人的磁致动与柔韧性, 实现了灵活变形、快速抓取、平稳运输等功能。

关键词: 磁响应复合材料; 墨水直写 3D 打印; 柔性抓手; 弹性体; 致动器

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2023)05-2670-10

3D printing magnetic soft gripper

SHENG Yu¹, OU Xingcheng¹, HUANG Jiaqi¹, HUANG Dantong¹, LI Xiaohong¹,
BI Ran¹, SHI Ming², GUO Shuangzhuang^{*1}

(1. Guangzhou Key Laboratory of Flexible Electronic Materials and Wearable Devices, Key Laboratory for Polymeric Composite and Functional Materials of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The soft gripper can deform under external stimuli, and has a good application in the fields of cargo transportation. However, the current soft gripper has a slow response speed, and cannot adapt to most scenarios like a human hand to move the cargoes with various shapes and weights. Therefore, it is necessary to develop a soft gripper with fast response speed and adaptation for various cargoes. In this work, a hard magnetic material—Neodymium-Iron-Boron powder (NdFeB) was blended with a room temperature vulcanized rubber (RTV rubber) to form a printable magnetically responsive NdFeB-RTV rubber composite. Through the exploration and optimization of the manufacturing process-related parameters of the direct ink writing technology, the precursor ink of the NdFeB-RTV rubber composite could be accurately printed into various shapes. The material exhibits excellent mechanical properties after curing: The elongation at break is close to 300%, the tensile strength is 1.03 MPa, the tensile Young's modulus is 1.27 MPa, the flexural strength is 78.06 MPa, and the flexural modulus is 160.96 MPa. Finally, the direct ink writing technology was used to design and manufacture a magnetically responsive four-arm gripper robot. Using the magnetic actuation and flexibility characteristics of the robot, functions such as soft

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-06-09; 录用日期: 2022-06-11; 网络首发时间: 2022-06-21 15:29:57

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220620.001>

基金项目: 广东省自然科学基金(2021A1515010464); 广州市科技计划项目(202102080330); 中山大学中央高校基本科研业务费专项(22qntd0101; 2021qntd16)

Natural Science Foundation of Guangdong Province (2021A1515010464); Science and Technology Project of Guangzhou (202102080330); Fundamental Research Funds for the Central Universities of Sun Yat-sen University (22qntd0101; 2021qntd16)

通信作者: 郭双壮, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为多材料多尺度多功能增材制造 E-mail: guoshzh3@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 圣宇, 欧兴成, 黄嘉琪, 等. 3D 打印磁控柔性抓手 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(5): 2670-2679.

SHENG Yu, OU Xingcheng, HUANG Jiaqi, et al. 3D printing magnetic soft gripper[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2670-2679(in Chinese).

deformation, fast grasping, and smooth transportation are realized.

Keywords: magnetic responsive material; direct ink write 3D printing; soft gripper; elastomer; actuator

柔性机器人具备适应各种复杂环境的能力，能够代替人类完成一些高危险性、高难度的任务^[1-2]。柔性机器人一般由容易发生形变的物质组成，如弹性体^[3-5]、形状记忆聚合物^[6-7]、响应水凝胶^[8-12]、电活性聚合物^[13]等，它们在外界刺激下(声、光、电、磁、热、pH 等)能够发生可控形变，从而完成指定任务^[1, 14]。这些材料制造的柔性夹具^[15-17]在医疗、制造业和人机交互中起到了非常重要的作用。传统机器人基于坚硬的金属和半导体等刚性材料，柔性机器人则拥有它们所没有的柔软缓冲、紧密包覆等特性^[18]，因此，其对运输货物能够妥善保存与保护^[12, 19-20]。柔性夹具不仅能够对运输过程中的物体起到保护作用，还能够快速优质地递送各种复杂形状的货物，并且货物质量可在一定范围内浮动^[15, 17, 21]。与其他刺激响应材料相比，磁响应复合材料可以在远程磁场所下以多自由度(DOF)实现无束缚、快速、可逆、可精准编程的致动^[3, 6, 22]。因此，磁响应复合材料在开发远程操控机器人领域扮演着重要的角色^[4-5]。

传统的模制、自组装等制备技术加工时间长、使用材料单一，对于一些复杂三维结构的加工存在一定的局限性^[23]。墨水直写(Direct ink writing, DIW)是利用气压、活塞或螺杆挤出打印墨水的3D 打印技术。该技术将墨水挤压沉积在基材上之后，借助外界条件(例如光聚合、热固化、溶剂挥发)使其黏度变大从而固化成型^[24-26]。

本文报道了一种可打印的钕铁硼-室温固化橡胶(NdFeB-RTV)复合材料，并通过 DIW 3D 打印技术将该材料加工成一种磁控四臂柔性抓手。NdFeB-RTV 橡胶复合材料由硬磁材料 NdFeB 微米级粉末和单组分 RTV 橡胶均匀共混得到。磁性颗粒的加入可以增强材料的强度，更重要的是可以使复合材料具有磁响应特性。由此加工制得的四臂抓手结构可在外部磁场的操控下，自由变换形状，实现多类型运动抓取并运输货物，在货物运输和仿生等方面有着广阔的应用前景。

1 实验部分

1.1 原材料

RTV 橡胶(SI 595 CL)购自乐泰(汉高)中国有限公司；钕铁硼磁性粉末由厦门钨业技术研究中心赠送；二氯甲烷和乙醇购自上海阿拉丁生化科

技股份有限公司；去离子水自制。

1.2 NdFeB-RTV 橡胶复合材料前驱体墨水的制备

NdFeB-RTV 橡胶复合材料前驱体墨水的制备流程如图 1 所示。将 1 g RTV 橡胶材料通过胶枪挤入 20 mL 的样品瓶中，然后加入 0.1 g 的二氯甲烷，使用行星式混合仪(ARE-310, THINKY)分散均匀，参数设置为混合模式 30 s。然后将混合好的样品移入受氮气保护的手套箱，在手套箱中称取 3.0 g NdFeB 粉末，加入样品瓶中，密封好后从手套箱中取出，使用混合仪将其混合均匀并去除气泡，参数设置为混合模式 5 min，去气泡模式 1 min。最后将制备好的黏流态墨水从样品瓶中转移到 3 mL 的针筒中，密封好首尾段，放入混合仪中脱泡 30 s，取出即可打印。整个过程需要尽量快，避免 RTV 橡胶在空气中吸收水分固化。

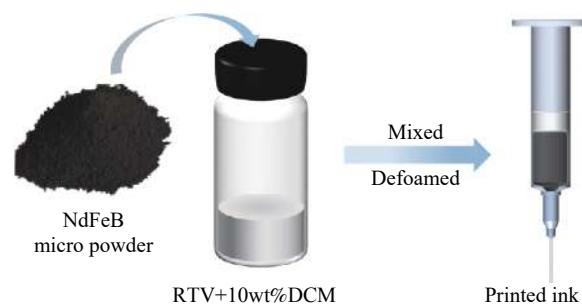


图 1 NdFeB-室温固化橡胶(NdFeB-RTV)复合材料前驱体墨水的制备流程

Fig. 1 Preparation process of precursor ink for NdFeB-room temperature vulcanized rubber (NdFeB-RTV) composite

1.3 墨水直写 3D 打印柔性四臂抓手

本文使用自主搭建的墨水直写 3D 打印系统打印柔性抓手。墨水直写 3D 打印技术打印四臂柔性抓手的流程图如图 2 所示，具体操作步骤如下：

- (1) 在三维建模软件 Solid Works (Version 2016, France) 中建立好目标抓手的三维模型，保存为 STL 格式；
- (2) 使用开源切片软件 Slic3r 将 STL 格式的模型转化为 G-Code；
- (3) 设定好切片软件内的所有参数，导出 G-Code；
- (4) 对照 A3200 软件及目标结构的要求修改 G-Code，并且在每一段打印前添加一个气体打开的指令，在每一段打印结束后添加一个气体关闭的指令；

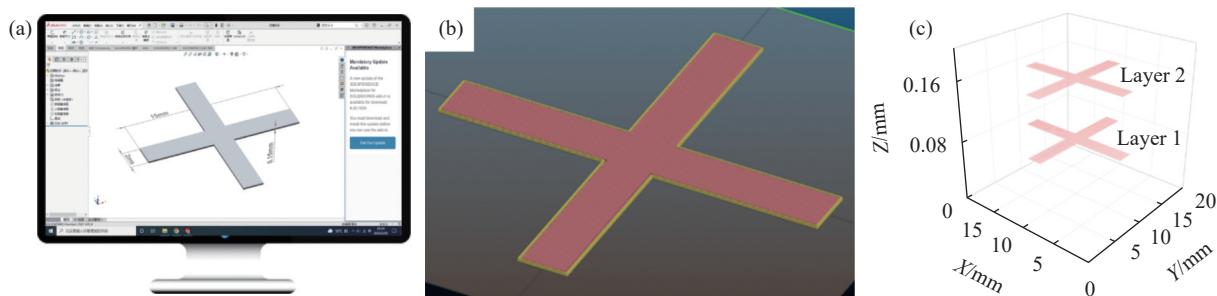


图 2 墨水直写 3D 打印技术打印四臂柔性抓手的流程图: (a) 四臂抓手的设计图; (b) 切片软件切片的示意图; (c) 打印路径

Fig. 2 Flow chart of the four-arm soft gripper printed by direct ink write 3D printing technology: (a) Design of the four-arm gripper; (b) Schematic diagram of the slicing software; (c) Printing path

(5) 将混合均匀的墨水装在 3 mL 的打印针筒里, 将针筒与 100 μm 全钢锥形针头 (HN-0.1 ND, Musashi-engineering) 连接并装入 7 倍加压工具中, 将装好的墨水装置装在打印平台 Z 轴的滑轨平台上, 并将载玻片放置于打印区域以待墨水挤出后沉积;

(6) 按照 G-Code 的路径打印;

(7) 全部打印指令结束后, 将沉积在载玻片上的打印成品移入烘箱, 在 60°C 下固化 2 h, 待固化完成后使用刀片将样品剔除下来, 得到目标制品。

1.4 表征和测试方法

通过旋转流变仪 (MCR 302, 安东帕) 表征墨水的流变特性; 利用扫描电子显微镜 (SEM, JSM-6700 F) 得到样品的形貌特征; 采用金相显微镜 (12 XB-PC, 上海光学仪器厂) 得到打印细丝的形貌特征; 使用综合物性测量系统 (PPMS-9, Quantum Design) 表征磁性能; 使用万能材料试验机 (CMT1104, 珠海三思泰捷有限公司) 进行单轴拉伸和三点弯曲力学试验, 以表征材料的力学性能; 采用尼康数码相机 (D610) 拍摄样品的照片和视频。

将柔性抓手放入脉冲充/退磁机 (DX-MAG-12 C20, 厦门盈德兴磁电科技有限公司) 的夹具中, 将充磁电压调至 1 900 V, 完成充磁。具有特定磁化方向的柔性抓手使用工程塑料 (ABS) 杆连接, 方便后续操作。抓手的磁致动是使用一块 N35 永磁体产生的磁场强度操作的, 通过在抓手的下方改变相对位置和改变永磁体方向来产生不同磁场大小和不同方向, 从而发生各类形变。

2 结果与讨论

2.1 NdFeB-RTV 橡胶复合材料前驱体墨水的流变性能

为了研究 NdFeB-RTV 橡胶复合材料前驱体墨

水的可打印性, 采用旋转流变仪对墨水的流变性能进行了测试。经过系列研究测试, 结果表明含有 75wt%NdFeB-RTV 橡胶复合材料前驱体墨水具有良好的可打印性, 其流变特性表征如图 3(a) 所示, 随着剪切速率从 10^{-2} s^{-1} 增加到 10^2 s^{-1} , 墨水表现出明显的剪切稀化, 其表观黏度从 $2 \times 10^7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 降低到 $10^4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。这一现象证明, NdFeB-RTV 橡胶复合材料前驱体墨水具有优异的可打印性。这有助于 3D 打印过程中墨水在精细喷嘴中的流动。此外, 从图 3(b) 中前驱体墨水 DIW 打印的多层单壁结构实物图可以看出, 从微型针头中挤出的墨水呈膏状, 在多层单壁结构的打印中可以保持单壁结构成型的完整性, 可以看出前驱体墨水具有良好的保真性。这有助于墨水在 3D 打印过程中挤出喷嘴后形状的保持, 更利于更复杂三维形状的成型。

2.2 NdFeB 粉末的粒径和 NdFeB-RTV 橡胶复合材料的磁性能

图 4(a)、图 4(b) 显示了钕铁硼磁性粉末的 SEM 图像和粒径分布图, 粉末呈现出颗粒状, 粒径集中在 5 μm 左右。均匀的微米级粉末有利于高比例的粉末混入黏流态橡胶中。此外, 5 μm 左右的磁粉也利于 NdFeB-RTV 橡胶复合材料前驱体墨水通过 100 μm 的精密喷嘴。

图 4(c) 是未充磁的磁粉和 NdFeB-RTV 橡胶复合材料的磁滞回线。可以看到磁粉最大的磁感应强度约 140 emu/g, 75wt%NdFeB-RTV 橡胶复合材料的最大磁感应强度为 117 emu/g, 约为磁性粉末的 78.5%。此外, 如表 1 所示为磁性粉末的磁学性能, 磁性粉末具有非常优异的磁性能。

总之, 硬磁性颗粒 NdFeB 具有良好的磁性能和分散性, 使以此为分散相的复合材料具有较高的磁性能, 为后续磁响应复合材料的应用奠定了

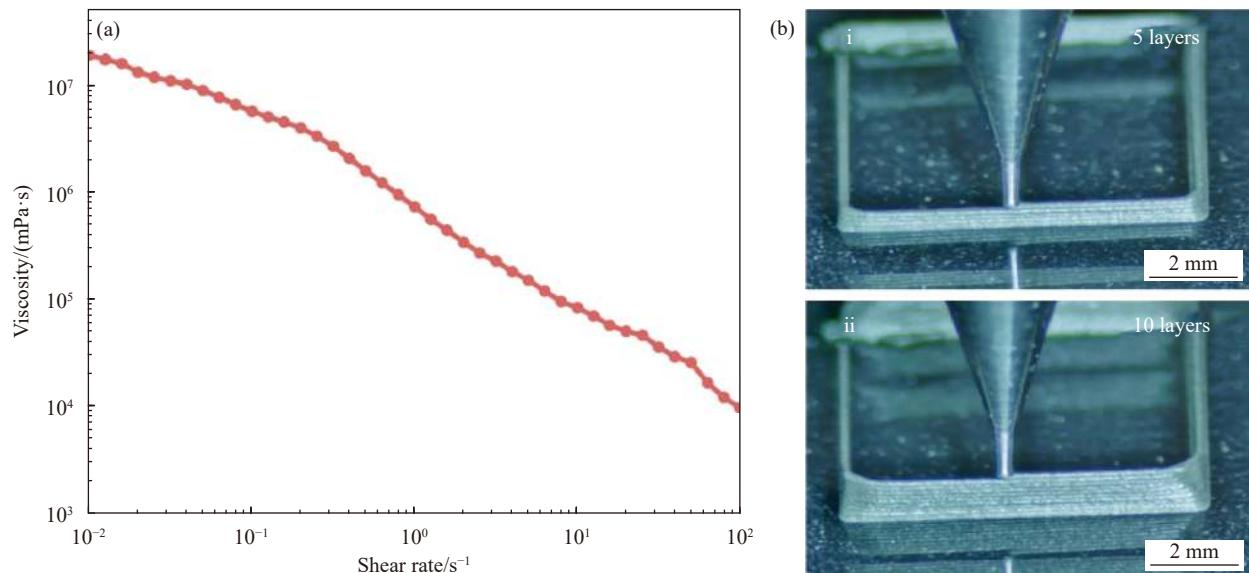


图 3 (a) NdFeB-RTV 橡胶复合材料前驱体墨水的黏度; (b) 前驱体墨水直写(DIW)打印多层单壁结构实物图

Fig. 3 (a) Viscosity of the precursor ink for NdFeB-RTV rubber composite; (b) Physical image of the multi-layer single-wall structure printed by the precursor direct ink writing (DIW)

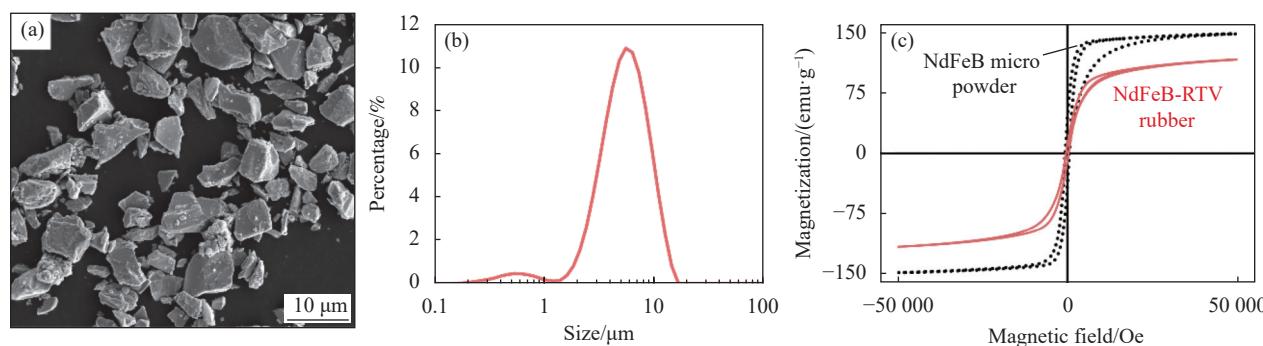


图 4 NdFeB 微型粉末的微观形貌 (a) 和粒径分布 (b); (c) 磁粉 NdFeB 和 NdFeB-RTV 橡胶复合材料的磁性能

Fig. 4 Micromorphology (a) and particle size distribution (b) of NdFeB micropowder; (c) Magnetic properties of magnetic powder NdFeB and NdFeB-RTV rubber composite

表 1 NdFeB 粉末的物理性能

Table 1 Physical properties of NdFeB powder

Particle size	B_r/kOe	H_{cj}/kOe	H_{cb}/kOe	$BH_{max}/MGOe$
~5 μm	14.43	14.70	13.40	49.50

Notes: B_r —Remanence; H_{cj} —Intrinsic coercivity; H_{cb} —Coercivity; BH_{max} —Maximum magnetic energy product.

良好的材料基础。

2.3 墨水打印工艺的探究及优化

图 5(a) 为 DIW 3D 打印过程中墨水在针头处的变化过程示意图。黏流态复合材料墨水在压力 p 的作用下向下流动，通过直径为 D_1 的喷嘴，沉积在基板上。由于单位时间内喷嘴流量并不等于沉积在基板上的流量，因此细丝的直径 D_2 和喷嘴

直径 D_1 并不一定相等，二者之间的关系取决于分配压力 p 和打印速度 V 。另外，由于墨水还是流体，细丝会受到重力的影响，因此其横截面并不是一个完整的圆，而是细丝的层高 h 一般只占直径 D_2 的 80% 左右。

为了保证成品的形状和直径，进行了打印参数的探究。影响墨水直写 3D 打印精度最重要的两个参数分别是分配压力 p 及打印速度 V 。一般而言，分配压力 p 越大，则打印细丝的直径 D_2 越大；打印速度 V 越大，则打印细丝的直径 D_2 越小。打印过程中，墨水使用的是内径为 100 μm 的锥形全钢针头。通过调节不同打印速度 (1~10 mm/s)，利用墨水直写技术打印得到不同组的细丝。每组参数打印 5 根细丝，并在显微镜下观察其形状，

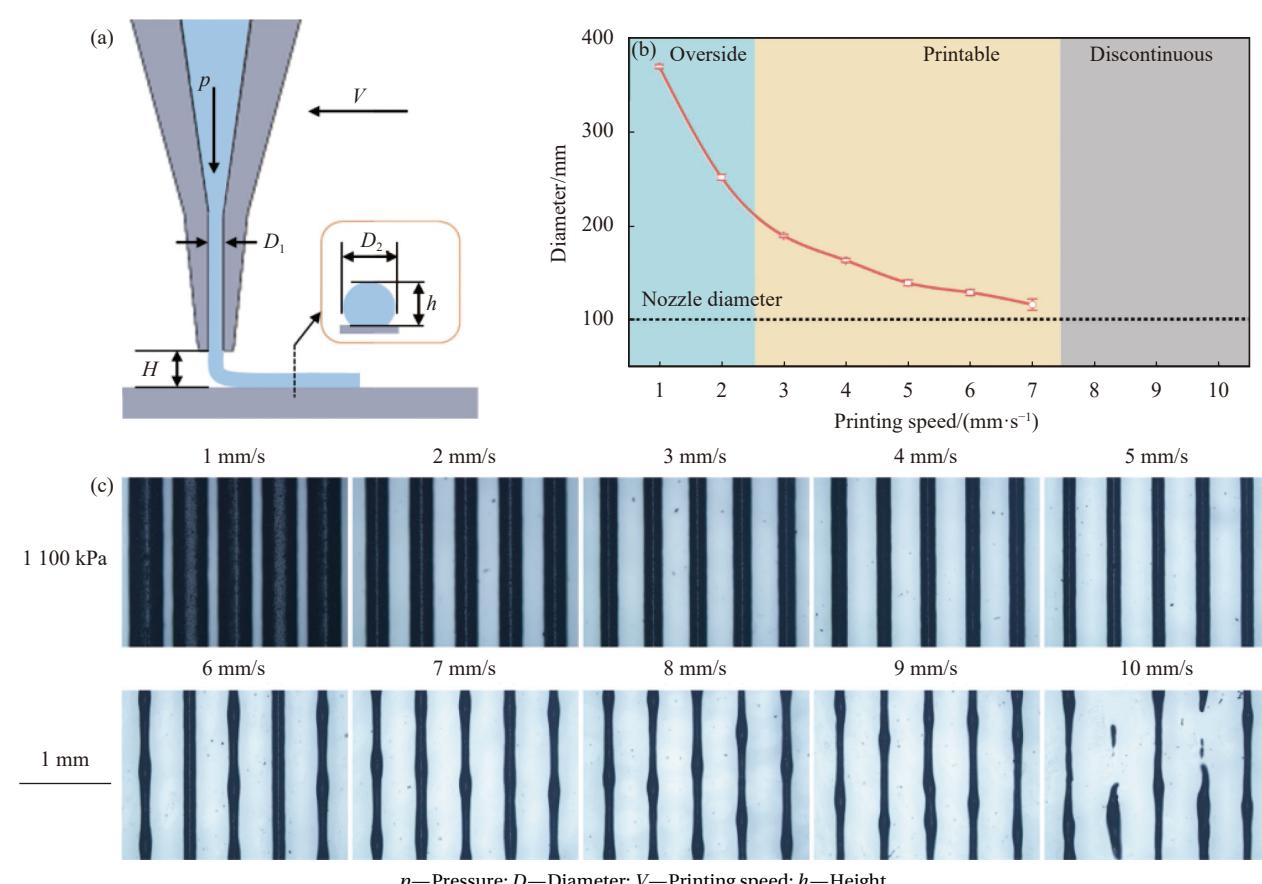


图5 (a) 墨水直写3D打印过程示意图；在1 100 kPa的分配气压下不同打印速度下打印的墨水线宽(b) 和实物图(c)

Fig. 5 (a) Schematic diagram of direct ink write 3D printing; Printing ink line width (b) and optical image (c) printed at different printing speeds with distribution pressure is 1100 kPa

测量其直径。通过判断细丝形状的完整性和细丝的直径，来表征打印质量的优劣。

当分配压力为1 100 kPa时，本文打印了10组不同速度(1~10 mm/s)下的细丝，如图5(b)、图5(c)所示，打印速度越快，细丝的直径越小。此外，当打印速度为1~2 mm/s时，细丝的直径过宽，超出了喷嘴直径的2倍；打印速度为3~7 mm/s时，细丝的直径适中；当打印速度过大(>7 mm/s)时，由于墨水中橡胶的比例只有50%左右，因此会导致细丝过度拉伸，出现不连续的现象。因此，为了打印成品的精确度保证，后续选择了最优参数进行打印，即分配压力1 100 kPa，打印速度5 mm/s。

2.4 NdFeB-RTV 橡胶复合材料的性能

为了使NdFeB-RTV橡胶复合材料满足后续致动需求，如图6(a)所示，本文设计了长方体(尺寸20 mm×2 mm×1 mm)模型，并使用DIW打印成型，用于表征NdFeB-RTV橡胶复合材料的力学性能和表面微观形貌。如图6(b)所示，DIW打

印的长条成品精度较高，尺寸准确，这说明复合材料墨水可打印性能良好。如图6(c)、图6(d)所示，NdFeB微米颗粒均匀分散在基底材料当中，橡胶依然清晰可见。值得提出的是，磁性颗粒在基底材料中的高度分散与橡胶的高黏度性能密不可分。高黏度的墨水有利于束缚住密度更高的磁性粉末，并且在挤出后能够在几分钟内实现快速固化，使分散相粉末均匀分布在基底材料中。此外，二氯甲烷(DCM)的加入使磁性颗粒与橡胶的混合更加均匀，少量的DCM会在3D打印过程中迅速挥发，并不影响整体性能。

采用单轴拉伸的方式测试了NdFeB-RTV橡胶复合材料和基底材料的柔性和断裂强度，如图7(a)、图7(c)所示。磁粉颗粒的加入，会使材料的柔性(断裂伸长率)随之下降，断裂强度则逐渐增加。这是由于在拉伸过程中，其中的刚性磁性颗粒承受了大部分载荷，吸收了形变能量，因此复合材料的强度和杨氏模量增加，断裂伸长率

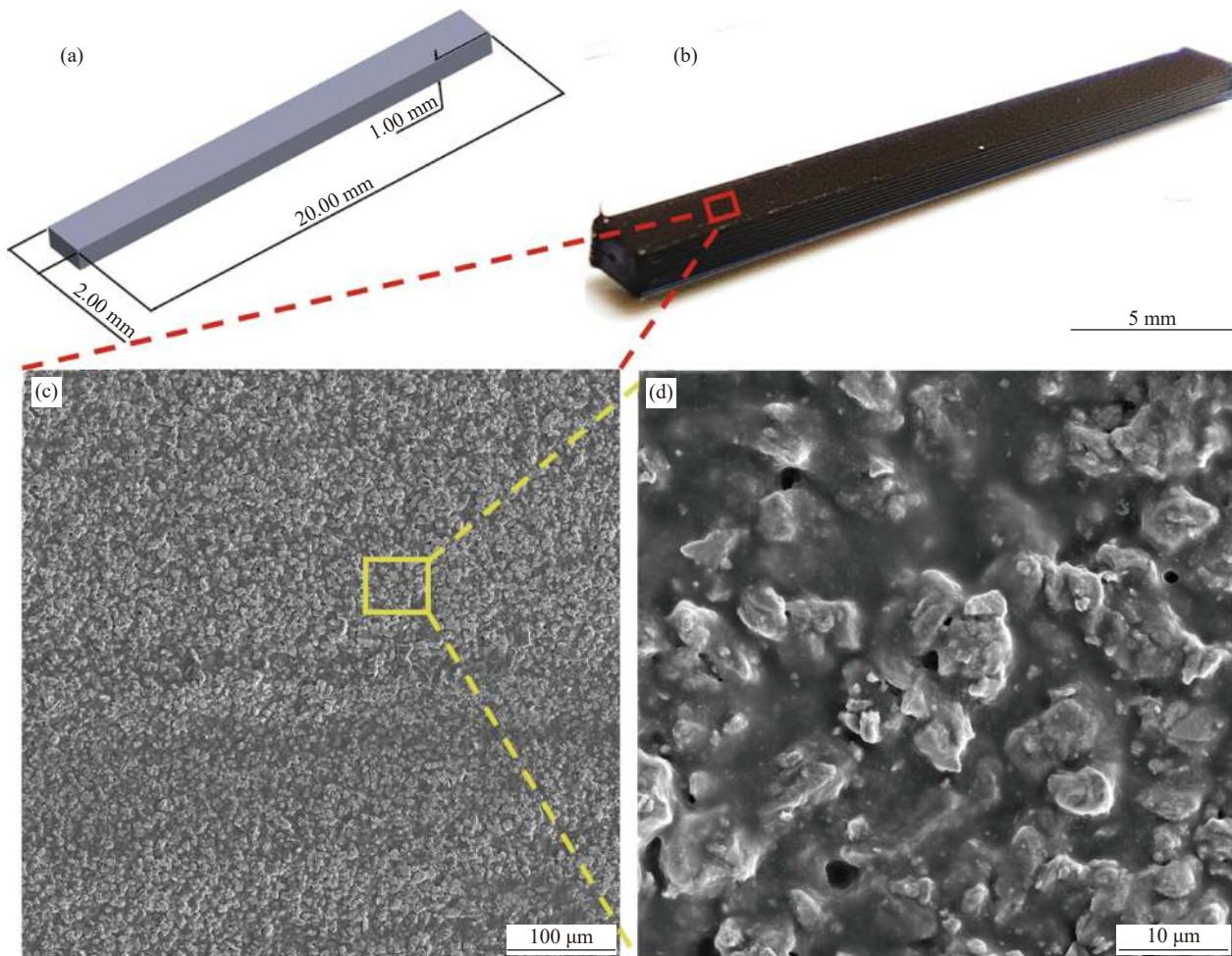


图 6 NdFeB-RTV 橡胶复合材料的拉伸测试样品的设计图 (a)、实物图 (b) 及样品的表面微观图 ((c), (d))

Fig. 6 Design drawing (a), physical drawing (b) and surface micrographs ((c), (d)) of the tensile test sample of NdFeB-RTV rubber composite

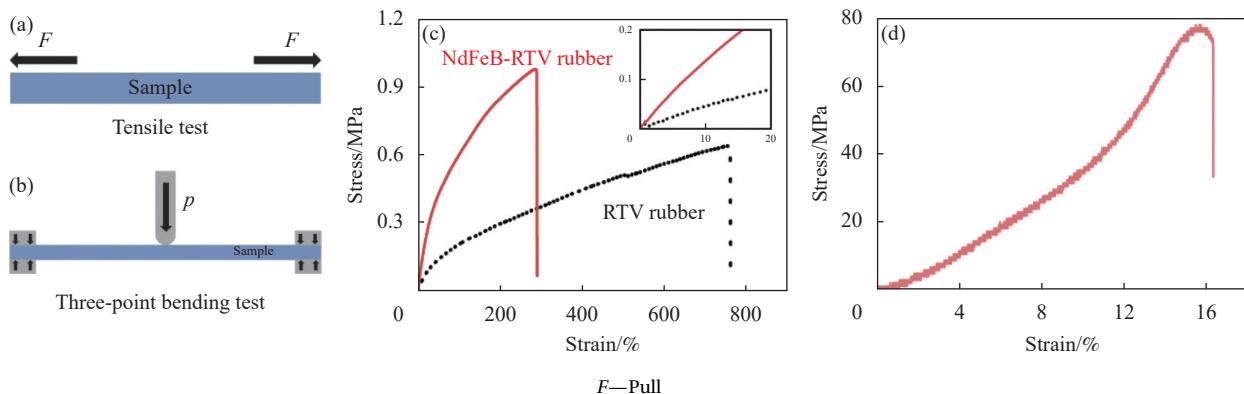


图 7 (a) 单轴拉伸测试示意图; (b) 三点弯曲测试示意图; NdFeB-RTV 橡胶复合材料的单轴拉伸测试数据图 (c) 和三点弯曲测试数据图 (d)

Fig. 7 (a) Schematic diagram of uniaxial tensile test; (b) Schematic diagram of three-point bending test; Uniaxial tensile test data diagram (c) and three-point bending test data diagram (d) of NdFeB-RTV rubber composite

减小。此外，柔性抓手在执行任务时，会执行抓取和释放过程，即柔性臂会发生弯曲和回复动作。如图 7(b) 所示，通过采用三点弯曲试验测试 NdFeB-RTV 橡胶复合材料的弯曲性能，从图 7(d) 中可以

得到复合材料的弯曲强度达到了 78.06 MPa，足以承受所抓取的货物质量，使货物预期运输到指定位置。通过计算，NdFeB-RTV 橡胶复合材料的弯曲模量达到了 160.96 MPa，表现出较好的稳定性，

说明复合材料具有良好的弯曲性能，可以使抓手在工作中稳定实现弯曲和回复动作。

打印的 NdFeB-RTV 橡胶复合材料有着接近 300% 的断裂伸长率，1.03 MPa 的抗拉强度，1.27 MPa 的杨氏模量，78.06 MPa 的弯曲强度和 160.96 MPa 的弯曲模量，这些良好的力学性能能够满足后续柔性致动器的应用要求，为其奠定了材料方面的基础。

2.5 磁响应柔性抓手的应用

为了实现货物运输，本文将打印制得的四臂抓手 (23.4 mg)(图 8(a)) 置于磁场内进行磁驱动能

力测试。如图 8(b) 所示，在不受磁场作用时，抓手的四臂由于受到重力影响，处于轻微向下收缩的状态。而在磁场的调控下，抓手的四臂发生不同程度的收缩、舒张，实现如同人类手臂一样的抓、提等功能(图 8(c))，进而完成不同种类货物的运输任务。磁场由一块 N35 圆柱磁体产生，磁场大小通过控制磁体与抓手之间的距离来进行控制。

四臂抓手机器人的第一个任务是将作为模拟货物的四方物体 (8.9 mg) 进行抓取、运输，最后放置在指定的位置。从图 9(a) 中可以看到，磁响应四臂抓手逐渐靠近模拟货物。当快要接触到货

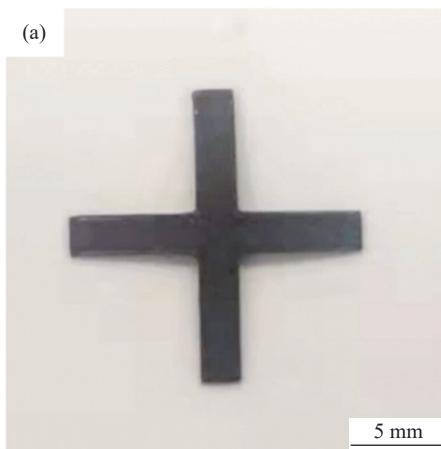
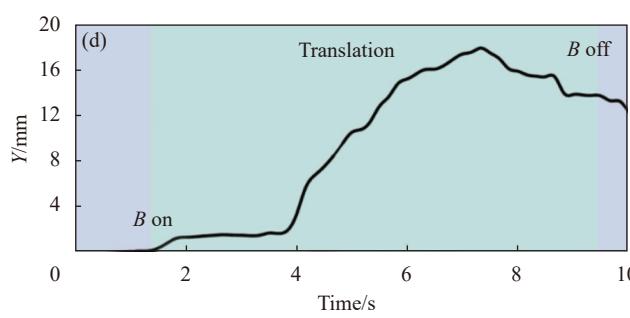
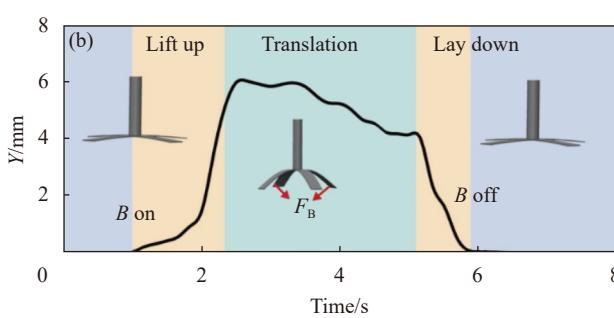
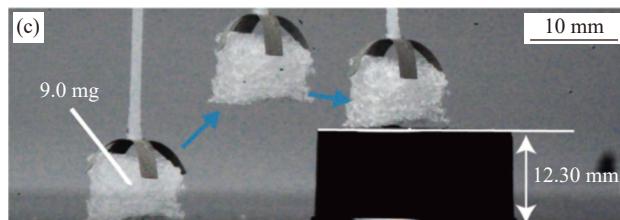
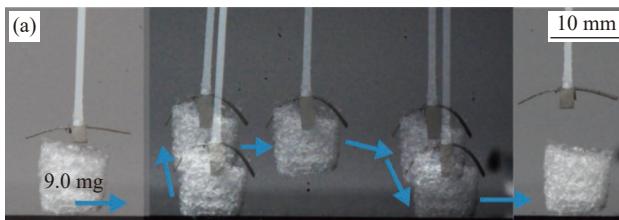


图 8 ((a), (b)) 四臂抓手实物图；(c) 四臂抓手致动原理

Fig. 8 ((a), (b)) Pictures of the gripper; (c) Actuation principle of the gripper



B—Magnetic field; F_B —Magnetic force

图 9 四臂抓手机器人完成任务 1 的过程及运动轨迹分析：(a) 泡沫货物平地转移过程；(b) 泡沫货物平地转移的运动轨迹分析；(c) 泡沫货物抬高转移过程；(d) 泡沫货物抬高转移的运动轨迹分析

Fig. 9 Process and motion trajectory analysis of the four-arm gripper robot completing task 1: (a) Process of transferring the foam cargo to the ground; (b) Trajectory analysis of the transfer of the foam cargo on the ground; (c) Lifting transfer process of the foam cargo; (d) Movement trajectory analysis of foam cargo lift and transfer

物时, 抓手在匀强磁场的作用下收缩四臂, 并保持收缩状态, 从而将货物一直夹持在四臂之中, 并抓取货物离开水平面。抓手在磁场作用下始终处于收缩状态以牢牢地抓取货物, 最后携带货物运输到同一水平面的指定位置。磁场撤去, 四臂恢复舒张状态, 货物被平稳放置在该位置。至此, 四臂抓手完成运输货物的任务。此外, 如图 9(c)所示, 抓手还能够将货物运输至不同水平面上的指定位置(高 12.30 mm)。这说明四臂抓手能够在磁场的调控下精准运送货物到不同位置。与此同时, 本文通过 Track 软件对货物的运动轨迹进行分析, 并与抓手其中一臂的状态进行对比, 如图 9(b)、图 9(d) 所示, 货物的运动分为提起、运输、放下 3 个过程, 分别对应抓手的收缩、保持、舒张。显而易见, 抓手的收缩是四臂外端下降的结果, 而抓手的舒张对应着四臂外端的抬高回复。因此, 两者的运动轨迹相反。

第二个任务是利用抓手的半舒张行为, 抓取作为模拟货物的圆筒形物体(51.9 mg)并且运输至目标位置。如图 10(a) 所示, 在磁响应抓手逐渐靠近货物时, 施加与任务 1 相同方向的匀强磁场使其四臂做出全收缩行为, 抓手整体体积减小伸入货物内壁。撤掉磁场之后, 抓手维持半舒张状态, 通过抓手四臂尖端与货物内壁的摩擦将货物抬起离开水平面, 并携带货物运输至指定位置。

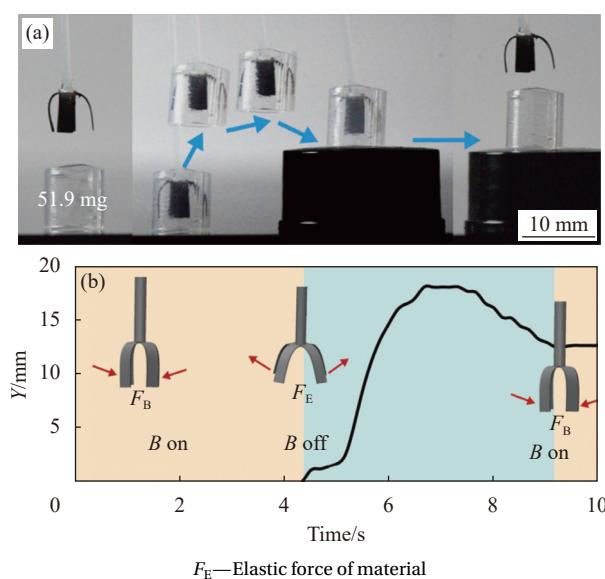


图 10 四臂抓手机器人完成任务 2(圆筒形物体)的过程(a)及运动轨迹分析(b)

Fig. 10 Process (a) and motion trajectory analysis (b) of the four-arm gripper robot completing task 2 (Cylindrical object)

从图 10(b) 中可以看到, 货物的提起、运输、放下 3 个过程分别对抓手的半舒张、保持、收缩 3 种状态, 再从货物内壁移出, 最后完成任务。从轨迹分析可以看到, 在这个任务中, 抓手四臂的运动路径(指 Y 轴方向的抬高与下降)与货物大致相同。因此, 依靠抓手的收缩与舒张都能成功进行货物运输。

第 3 个任务是利用抓手单臂的收缩弯曲行为, 运输圆环状的模拟货物(180.5 mg)至目标位置, 如图 11 所示。在匀强磁场的作用下, 抓手的四臂在靠近货物时逐渐收缩弯曲成类似于“钩子”状形态, 其中一臂的尖端穿过圆环将其提起, 并保持住该状态。最后到达指定位置后撤掉磁场, 则抓手恢复舒张状态, 离开货物。从轨迹可以看出, 两者的运动过程与任务 1 大体一致。值得提出的是, 抓手单臂就可提起超过自身质量 30 倍的重物。这表明四臂抓手机器人不仅体型微小可控, 并且能够承受可观的货物。当然, 货物的承重量还与相对于固定点的悬挂位置有关。通过简单的受力分析可知, 悬挂位置距离固定点越远, 由于杠杆效应则承重越小, 而靠近固定点时承重量最大。

通过对比分析 3 个任务的完成度及运动轨迹, 得出结论: 可根据货物的不同复杂形状来调节磁场各类参数, 进而调控抓手的不同状态, 最后完成运输不同形状、大小货物的任务, 证明了该抓手具有较强的适应能力。

3 结论

(1) 本文优化制备了一种 NdFeB-硅橡胶(Room temperature vulcanized rubber, RTV)复合材料, 并且使用墨水直写 3D 打印技术将其打印成四臂柔性抓手结构。NdFeB-RTV 橡胶复合材料具有接近 300% 的拉伸率、1.03 MPa 的抗拉强度、1.27 MPa 的杨氏模量, 弯曲强度为 78.06 MPa, 弯曲模量为 160.96 MPa, 这表明该复合材料具备良好的力学性能。

(2) 本文进一步分析了 NdFeB-RTV 橡胶复合材料的磁性能, 并探究了合适的 3D 打印过程参数, 使精确打印抓手结构成为可能。

(3) 在磁场的大小及开关的控制下实现了柔性四臂抓手抓取不同质量和形状(方形(9.0 mg)、圆筒状(51.9 mg))的物体及单臂可以提起自身质量 30 倍的圆环。柔性抓手较强的货物运输能力, 有望在柔性机器人或仿生手臂等领域发挥更重要的作用。

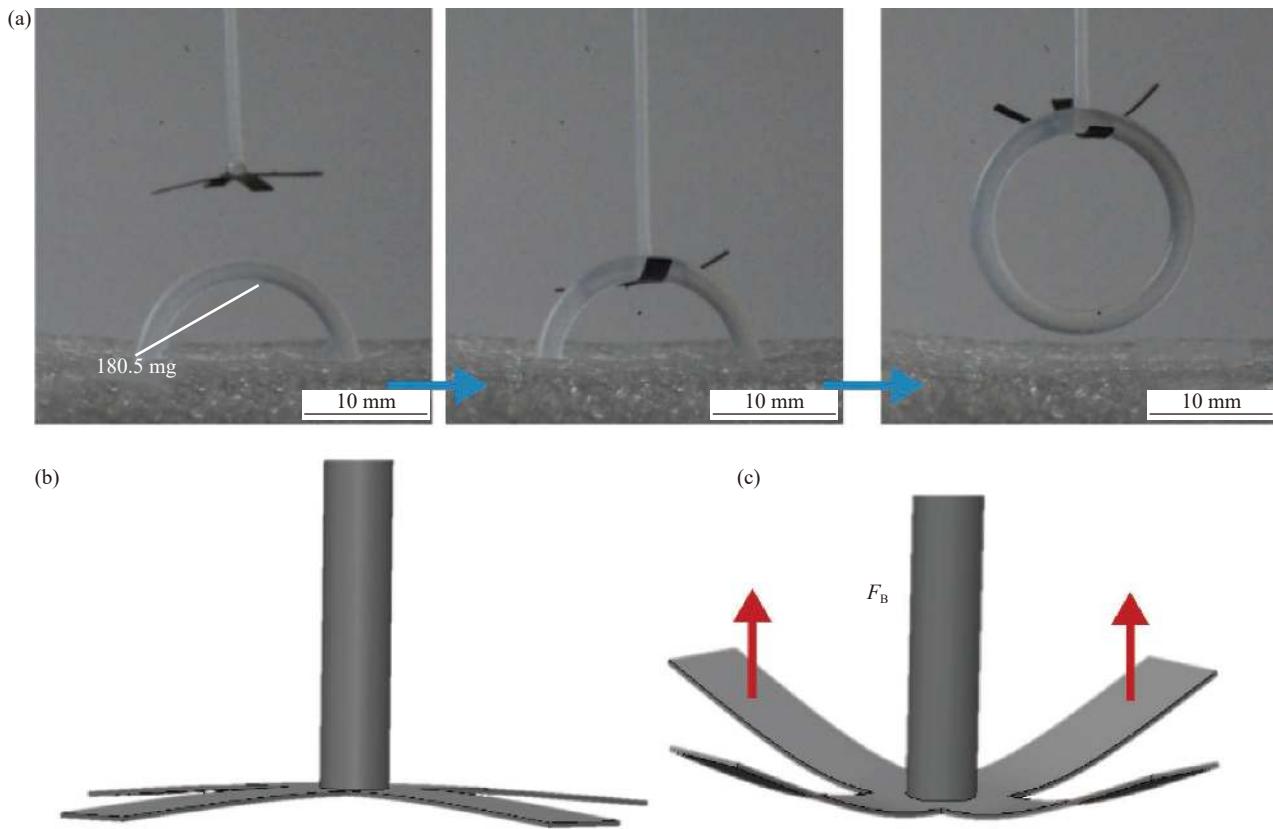


图 11 四臂抓手机器人完成任务 3 的过程

Fig. 11 Process of the four-arm gripper robot completing task 3

参考文献：

- [1] HINES L, PETERSEN K, LUM G Z, et al. Soft actuators for small-scale robotics[J]. *Advanced Materials*, 2016, 29(13): 1603483.
- [2] 汪培义, 郭盛, 王向阳, 等. 基于柔性并联连续体的灵巧操作手的设计及分析[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(19): 122-131.
WANG Peiyi, GUO Sheng, WANG Xiangyang, et al. Design and analysis of a dexterous gripper based on soft parallel continuum manipulator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(19): 122-131(in Chinese).
- [3] MONTGOMERY S M, WU S, KUANG X, et al. Magneto-mechanical metamaterials with widely tunable mechanical properties and acoustic bandgaps[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 31(3): 2005319.
- [4] REN Z, HU W, DONG X, et al. Multi-functional soft-bodied jellyfish-like swimming[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2703.
- [5] WANG T, REN Z, HU W, et al. Effect of body stiffness distribution on larval fish-like efficient undulatory swimming[J]. *Science Advances*, 2021, 7(19): eabf7364.
- [6] MA C, WU S, ZE Q, et al. Magnetic multimaterial printing for multimodal shape transformation with tunable properties and shiftable mechanical behaviors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(11): 12639-12648.
- [7] LIU J A C, GILLEN J H, MISHRA S R, et al. Photothermally and magnetically controlled reconfiguration of polymer composites for soft robotics[J]. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaaw2897.
- [8] CEYLAN H, YASA I C, YASA O, et al. 3D-printed biodegradable microswimmer for theranostic cargo delivery and release[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(3): 3353-3362.
- [9] BOZUYUK U, YASA O, YASA I C, et al. Light-triggered drug release from 3D-printed magnetic chitosan microswimmers[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(9): 9617-9625.
- [10] YASA I C, TABAK A F, YASA O, et al. 3D-printed microrobotic transporters with recapitulated stem cell niche for programmable and active cell delivery[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(17): 1808992.
- [11] DONG Y, WANG J, GUO X, et al. Multi-stimuli-responsive programmable biomimetic actuator[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4087.
- [12] GOUDU S R, YASA I C, HU X, et al. Biodegradable untethered magnetic hydrogel milli-grippers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(50): 2004975.
- [13] LI G, CHEN X, ZHOU F, et al. Self-powered soft robot in the mariana trench[J]. *Nature*, 2021, 591(7848): 66-71.
- [14] 顾莉莉, 熊克, 卞侃, 等. 制备温度对 Ag-IPMC 拉伸及致动性能

- 的影响[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(5): 34-40.
- GU Lili, XIONG Ke, BIAN Kan, et al. Performance of tensile and actuating of IPMC with silver as electrodes under different manufacturing temperatures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(5): 34-40(in Chinese).
- [15] ZHANG Y, ZHANG N, HINGORANI H, et al. Fast-response, stiffness-tunable soft actuator by hybrid multimaterial 3D printing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(15): 1806698.
- [16] SAED M O, AMBULO C P, KIM H, et al. Molecularly-engineered, 4D-printed liquid crystal elastomer actuators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(3): 1806412.
- [17] TRUBY R L, WEHNER M, GROSSKOPF A K, et al. Soft somatosensitive actuators via embedded 3D printing[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(15): 1706383.
- [18] KENETH E S, KAMYSHNY A, TOTARO M, et al. 3D printing materials for soft robotics[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(19): 2003387.
- [19] 罗斌, 李小兰, 徐雪杰, 等. PVC凝胶驱动及CNT/PDMS传感一体化柔性抓手的研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 30-36.
- LUO Bin, LI Xiaolan, XU Xuejie, et al. Integrated polyvinyl chloride (PVC) gel actuating and CNT/PDMS sensing structure for soft gripper[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(12): 30-36(in Chinese).
- [20] 朱德举, 张超慧, 刘鹏. 天然和仿生柔性生物结构的设计[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(6): 1636-1645.
- ZHU Deju, ZHANG Chaohui, LIU Peng. Study on the design of natural and biomimetic soft biological structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(6): 1636-1645(in Chinese).
- [21] TANG Y, CHI Y, SUN J, et al. Leveraging elastic instabilities for amplified performance: Spine-inspired high-speed and high-force soft robots[J]. *Science Advances*, 2020, 6(19): eaaz6912.
- [22] BAKER R D, MONTENEGRO-JOHNSON T, SEDIAKO A D, et al. Shape-programmed 3D printed swimming microtorsi for the transport of passive and active agents[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4932.
- [23] WALLIN T J, PIKUL J, SHEPHERD R F. 3D printing of soft robotic systems[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3(6): 84-100.
- [24] GUL J Z, SAJID M, REHMAN M M, et al. 3D printing for soft robotics—A review[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2018, 19(1): 243-262.
- [25] 齐田宇, 杨建军, 赵佳伟, 等. 基于多材料3D打印和约束牺牲层连续功能梯度材料-结构一体化制造与性能[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(3): 1055-1067.
- QI Tianyu, YANG Jianjun, ZHAO Jiawei, et al. Integrated manufacturing and performance study of continuous functionally graded materials-structures based on multi-material 3D printing and constraint sacrifice layer[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(3): 1055-1067(in Chinese).
- [26] 李西敏, 杨韬, 彭必友, 等. 二氧化钛陶瓷浆料的制备及其直写成型3D打印[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(7): 3510-3517.
- LI Ximin, YANG Tao, PENG Biyou, et al. Preparation of titanium dioxide ceramic slurry and its 3D printing for direct-ink-writing[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(7): 3510-3517(in Chinese).