北京交通大學

本科毕业设计（论文）

基于智能材料流变记忆特性的 4D 打印及软体机器人研究

Research on 4D printing and software robot based on rheological memory characteristics of intelligent materials

学　院：机械与电子控制工程学院

专　业：机械工程

学生姓名：邓成耀

学　号：18221065

指导教师：李振坤

北京交通大学

2022 年 6 月

学士论文版权使用授权书

本学士论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学士论文的规定。特授权北京交通大学可以将学士论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，提供阅览服务，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：邓成栋 指导教师签名：李振坤

签字日期：2022 年 6 月 8 日　　签字日期：2022 年 6 月 8 日

中文摘要

摘要：软体机器人是一种新型的软质机器人，主要由软质外壳与驱动材料构成。目前，软体机器人的发展受材料与加工方式局限性的影响，还存在种种问题。4D 打印技术作为 3D 打印技术的延伸，通过对智能材料的打印，可以使被打印物体的形状或性能在一定条件下发生自我变换。通过 4D 打印技术将智能材料应用于软体机器人的设计与制造中，可以突破现有软体机器人驱动材料和支撑材料难以结合设计的技术瓶颈，使其结构功能化、功能多样化，为软体机器人提供了一种具备极高灵活度的仿生运动模式。然而目前还尚未形成基于智能材料流变特性的 4D 打印及软体机器人控制方法。本毕业设计针对现有研究中存在的不足，根据一种智能流体流变特性开发相关 4D 打印工艺，同时根据其对磁场强度、方向等响应特性开发软体机器人的设计和控制策略。具体研究内容如下所述：

1）4D 打印装置及模块设计及优化

本研究通过对双头打印基本原理的分析，对研究中需要的能够进行软体机器人外壳与驱动材料打印的设备进行总体设计，重点是挤出模块的设计。再根据研究需求，自主搭建了 4D 打印设备，并在后续实验中针对存在的问题进行改进优化。

2）硅胶、智能流变材料制备及 4D 打印工艺研究

根据实验要求和 4D 打印机的性能指标，本研究使用 KH570 改性纳米二氧化硅对 0 号硅胶进行了改性，配置了多种不同比例的硅胶-SiO_2 材料，并通过对其进行流变学分析和可打印性测试，优化筛选具备最佳可打印性的硅胶与二氧化硅的配比。智能材料方面通过对磁性液体的打印实验，观察在不同磁场强度下磁性液体的可打印性，主要包括线形截面的形状及其自支撑能力。而后进行两种材料的复合打印，主要研究不同磁场强度下两种不同界面的接触角。

3）软体机器人设计及 4D 打印

本研究从结构相对简单的双联半球式软体机器人出发，设计多种填充度以及不同截面形状的软体机器人，并对其进行打印制作，观察打印过程中出现的问题以及打印完成的机器人对磁场的响应情况，观察其步态是否符合预期。在此种机器人打印过程成熟后设计多种其他不同种类、不同结构、不同运动方式的软体机器人，并对其进行打印制作，并根据打印过程中遇到的问题以及打印完成后的表现对打印参数以及软体机器人的结构进行优化，使其能够实现预设步态。

关键词：软体机器人；4D 打印；智能材料；流变记忆特性

ABSTRACT

ABSTRACT: Soft robot is a new type of soft robot, mainly composed of soft shell and drive material. At present, the development of soft robots is affected by the limitations of materials and processing methods, and there are still various problems. 4D printing technology as an extension of 3D printing technology, through the printing of smart materials, can make the shape or performance of the printed object under certain conditions of self-transformation. Through the application of smart materials to the design and manufacture of soft robots through 4D printing technology, it can break through the technical bottleneck of the existing soft robot drive materials and support materials that are difficult to combine, make its structure functional and functionally diverse, and provide a bionic motion mode with high flexibility for the soft robot. However, at present, a 4D printing and software robot control method based on the rheological properties of smart materials has not yet been formed. In view of the shortcomings in the existing research, this graduation project develops the relevant 4D printing process according to the rheological characteristics of an intelligent fluid, and develops the design and control strategy of the soft robot according to its response characteristics such as magnetic field strength and direction. The specific research content is as follows:

1) 4D printing device and module design and optimization

Through the analysis of the basic principles of double-head printing, this study conducts the overall design of the equipment required in the study that can print the soft robot housing and drive material, focusing on the design of the extrusion module. According to the research needs, the 4D printing equipment was independently built, and the existing problems were improved and optimized in subsequent experiments.

2) Silicone, intelligent rheological material preparation and 4D printing process research

According to the experimental requirements and the performance indexes of 4D printer, this study modified 0# silica gel with KH570 modified nano silica, configured a variety of silica gel SiO_2 materials with different proportions, and optimized the ratio of silica gel and silica with the best printability through rheological analysis and printability test. In terms of intelligent materials, through the printing experiment of magnetic fluid, the printability of magnetic fluid under different magnetic field intensity is observed, mainly including the shape of linear section and its self-supporting ability. Then the composite printing of the two

materials is carried out, and the contact angles of two different interfaces under different magnetic field intensities are mainly studied.3) Soft robot design and 4D printing

Starting from the relatively simple structure of the duplex hemispherical soft robot, this study designs a variety of soft robots with a variety of filling degrees and different cross-sectional shapes, and prints them, observes the problems in the printing process and the response of the printed robot to the magnetic field, and observes whether its gait is in line with expectations. After the maturity of this robot printing process, a variety of other different types, different structures, different ways of movement of the soft robot is designed, and printed, and according to the problems encountered in the printing process and the performance after the printing is completed, the printing parameters and the structure of the soft robot are optimized, so that it can achieve a preset gait.

KEYWORDS： Soft robots；4D printing；Smart materials；Rheological memory characteristics

目 录

中文摘要 I

ABSTRACT II

目 录 IV

1 绪论 6

1.1 课题背景及研究意义 6
1.2 国内外研究现状 7
1.2.1 常见几种驱动方式的软体机器人 7
1.2.2 电磁驱动软体机器人 13
1.3 研究内容 16

2 4D 打印设备搭建 17

2.1 打印机组成 17
2.2 打印机设计及搭建 17
2.2.1 框架及挤出头运动、控制装置 18
2.2.2 挤出装置 19
2.2.3 外部环境控制及监测装置 20
2.2.4 电子控制装置 21
2.3 软件控制 21
2.3.1 控制程序 21
2.3.2 切片软件 23
2.4 重要零部件校核 25
2.5 打印设备展示 27

3 材料制备表征 28

3.1 智能材料 28
3.1.1 流变性 29
3.1.2 模量 29
3.2 硅胶材料 30
3.2.1 不同比例的硅胶与 SiO_2 流变学实验 31
3.2.2 不同比例 AB 组分硅胶流变实验 33

4 打印实验 34

4.1 硅胶打印 34
4.1.1 单丝打印 34
4.1.2 栅格打印 36
4.1.3 实体打印 37
4.2 智能材料打印 39
4.2.1 单丝打印 39

4.2.2 栅格打印 40
4.2.3 实体打印 41
4.3 复合打印 42
5 软体机器人设计及驱动 44
5.1 软体机器人设计 44
5.1.1 仿生学原理 44
5.1.2 结构设计 44
5.1.3 步态设计 45
5.2 软体机器人打印制作 46
5.2.1 切片设置 46
5.2.2 软体机器人打印过程 47
5.2.3 软体机器人打印实验 48
5.3 软体机器人驱动系统 49
5.3.1 驱动系统设计 49
5.3.2 软体机器人运动展示 50
6 经济性、环保性分析 51
7 总结与展望 52
参考文献 53
致 谢 56
附 录 57

1 绪论

1.1 课题背景及研究意义

由于中国近些年的机电一体技术、人工智能等领域不断发展，传统机器人的理论体系已十分成熟。作为机器人的一个分支，软体机器人在近些年也出现了快速成长，同时更多的人也投身到了软体机器人的研发当中，是近些年机器人研发领域的热门方向。软体机器人是一种新型的高柔性机器人,是与本体运动、操控、传感等功能高度融合的新型一体化智能系统。不同于通常以刚性关节、铰链、驱动器等组合而成的超高刚度传统机器人,软体机器人一般都是以软质、高弹性、可复的有机硅橡胶、聚氨酯、水凝胶等高分子物质为本体，再以智能材料为驱动，这就导致了它具有无穷的运动自由度[1]。而软体机器人则模仿了自然界中的软体动物，由可承受巨大应力的高柔性材料所组成，具有无限多自由度并不断变化功能，可以在大范围内任意变化其外形和大小。软体机器人拥有无穷的多自由度,使得其拥有无限多种构型使其末端执行器抵达工作空气中的任何地方[2]。

伴随着智能材料的发展，越来越多具有不同特性的智能材料被运用到软体机器人的设计制作中，他们有的直接作为软体机器人的本体，有的作为软体机器人的驱动。由于驱动的材料多种多样，也催生出了一个丰富多彩的软体机器人体系。常用的驱动方法有气动、液压驱动、及记忆合金驱动器（SMA）、介电高弹体驱动（EP）、化学反应驱动等。磁致流变材料是是一类新兴的智能流体材料，通过调节磁场强度的大小，可使其电学、磁学、力学等特性产生连续且可逆的改变，由于其生长速度快、可逆性好，已经受到了许多科学家的广泛重视，并有希望在软体机器人上方面进行应用[3]。

早期的软体机器人多采用胶合、注模等方式完成本体的制作，而后加入驱动材料或装置，最后组装成一个完成的软体机器人本体。这些落后的制作方法虽然可以完成软体机器人的制作，但无疑是费时费力的。随着 3D 打印技术的发展，软体机器人的制作变得更加快速、高效、标准，常见的制作方式有两种：一是直接打印机器人本体，二是先打印好软体机器人的模具，然后浇入成型材料。这两种方式仍然采用本体与驱动材料分开制作的方式，这不利于机器人机构的整体性，更极大程度上限制了软体机器人的结构功能化和功能多样化。最重要的是，软体机器人因其本体多为空腔结构，传统的 3D 打印技术打印空腔结构时需要添加支撑，而支撑材料的存在往往会对驱动材料造成干涉，这对软体机器人的打印造成了极大的困难。

4D 打印的出现对上述问题的解决有着极大的作用。在 2013 年美国政府加州长滩市召开的 TED 2013 会议上， 麻省理工学院自组装工作室的创建者 Skylar Tibbits 将两种拥有不同吸水性和孔隙率的材质的材料结合并使用 3D 打印机， 从而生产出了一种线状的物体。 将该材料置于水面,线状的物体就彻底改变了自身形状，从而构成了麻省理工学院的字母简写"MIT"，并由此产生了 4D 打印的定义。4D 打印是指运用“可编程材料”和 3D 打印技术，生产出在设定的激发条件下(如放入水里,或是升温、加压等)可自行变更物理属性(包含形状、密度、色彩、弹力、导电性、光学特性、电磁特性等)的三维物体。其中，“可编程材料”是指能以编程方法更改形状、密度、导电性、色彩、光学特性、电磁特性等属性的物料。而 4D 打印机的第四维即是指物品在生产出来之后，其外形及特征即可自行更改。

研究意义：

（1）磁性液体在磁场环境下良好的自支撑能力，是很好的支撑材料。又因其具有流变性、记忆性等性质使得此种材料可以用 3D 打印的方式加工成型。同时磁性液体又可以对磁场进行响应，是拿来做软体机器人驱动的绝佳材料。

（2）4D 打印技术应用于软体机器人的设计与制造中，可以突破现有软体机器人驱动材料和支撑材料难以结合设计的技术瓶颈，使其结构功能化、功能多样化。

（3）基于 4D 打印技术，将磁致流变材料应用到软体机器人中作为驱动或直接作为机器人主体，研究磁致流变材料在软体机器人设计制作方面的应用以及 4D 打印软体机器人的驱动方法具有重要的理论意义和应用价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 常见几种驱动方式的软体机器人

2011 年哈佛大学 R. F. Shepherd 等人利用 3D 模具的方法，在嵌入式气动网络控制系统的基础上，设计生产了一款多步态软体自动化机器人，如图 1-1 所示。该软体机器人的设计借鉴了鱿鱼的生理结构，并拥有四个脚和一个中间部位的执行机构。它由气动驱动，它由气动系统驱动，可以在单一的低压空气阀门或整个控制系统下进行简单或者复杂的动作，并且能够通过相对狭窄的工作环境,因此具有不错的环境通过性[4]。

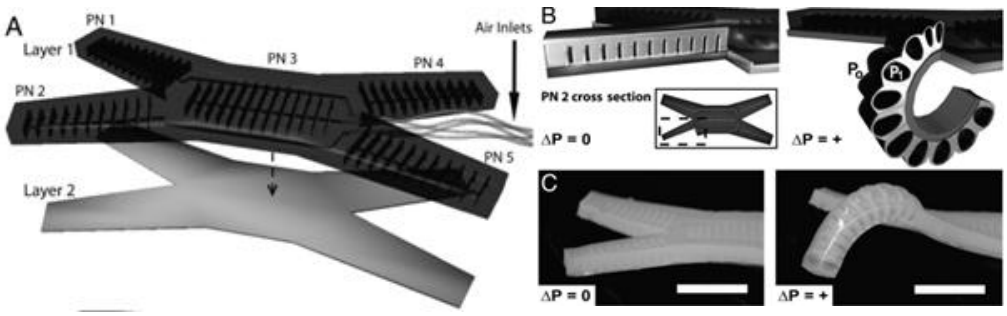

图 1-1 Multigait soft robot[4]

2014 年瑞士 EPFL 机器人实验室的研究人员设计出了一款多足软体爬行机器人。该软体爬行机器人由软体驱动器、躯干模块和软关节等三部分组成，如图 1-2 所示。该软体机器人以气体驱动，当软体驱动器充气并膨胀时，驱动器与地板之间形成摩擦力，摩擦力的反推动力则促使软体机器人往前爬行。该软体机器人拥有六条腿，可以完成软体机器人爬行步态的实现及控制[5]。

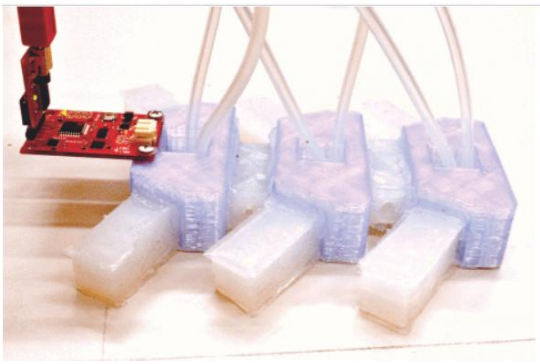

图 1-2 多足气动软体爬行机器人[5]

2017 年上海交通大学费燕琼等人在多气囊式软体驱动器的基础上，通过 3D 打印模具的方式，成功研发制作出了一个由气压驱动的软体爬行机器人。该软体机器人由几个互相连接的气囊和置于气囊之下的双层底座和前、后磨擦片所构成。由于气囊的充气膨胀,促使软体机器人发生扭转变形，同时由于安装不同的前、后磨擦片，以及由于前后摩擦力程度的差异，可以促使软体机器人进行周期性的向前爬行动作。不过由于该软体机器人仅由一个驱动器构成，因此只能实现向前爬行这样最简单的运动，而无法进行转弯、爬坡等多种操作，且其通过能力也较差。同年，该组庞武等人在以往研发的基础上，又开发出了一个可以差动运动的软体机器人。而这个软体机器人主要由两列气动的气囊(驱动机构)、一个感应器、一个脚板、以及前后脚构成。而通过利用左右传动的充气方式的差异，自动化机器人还能够实现直线爬行动作以及简易的转弯动作[6]。

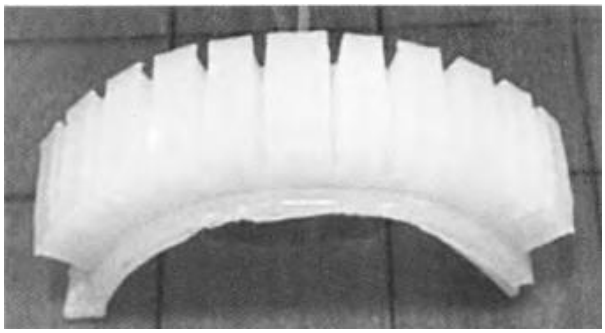

图 1-3 气压驱动软体机器人[6]

2018 年哈佛大学 Ahmad Rafsanjani 根据蛇的蠕动运动机理，设计了一个模拟蛇类的软体机器人。该软体自动化机器人的身体部分由纤维增强型软体驱动器所组成，当身体充入特定压力的气体时，软体机器人就会产生拉伸变化。软体机器人的身体表面为一个像蛇皮鳞片的剪纸构造，当软体驱动器产生延伸变化时，剪纸构造就会交替性地影响软体机器人身体与地板之间的磨擦力，从而完成前进的爬行运动[7]。

图 1-4 仿蛇类气动软体机器人[7]

2011 年塔夫茨的 Trimmer 研究组研究出了 GoQBot 软体机器人。该软体机器人根据毛毛虫的肌肉组织构造，建立了一个节状的本体框架，能够调节肌肉的功能变化，从而完成向前的爬行动作。该软体机器人采用记忆金属板材(SMA)驱动，因此可以像毛毛虫那样拥有蠕动爬行和滚动弹射的能力[8]。

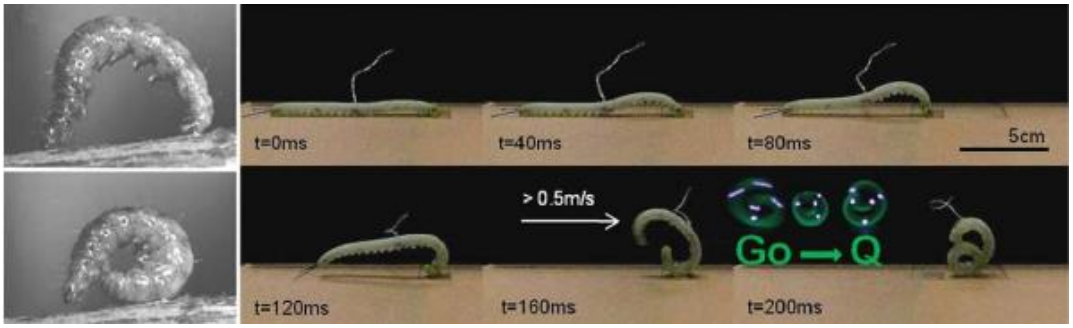

图 1-5 GoQBot 记忆金属驱动软体机器人[8]

2013 年哈佛大学 Robert J. Wood 研究组通过考察大自然中蚯蚓的生物构造与活动模式，制作出了一个利用身体伸缩变形进行向前移动的软体式机器人 Mesh worm。该软

体机器人采用了记忆合金丝为驱动，并采用了编织网构成的表皮结构，将软体机器人分成了若干个小段，并将每一部分都嵌入了记住合金弹簧的线圈，并通过控制 SMA 的伸缩，完成了模拟蛇类的蠕动爬行操作[9]。

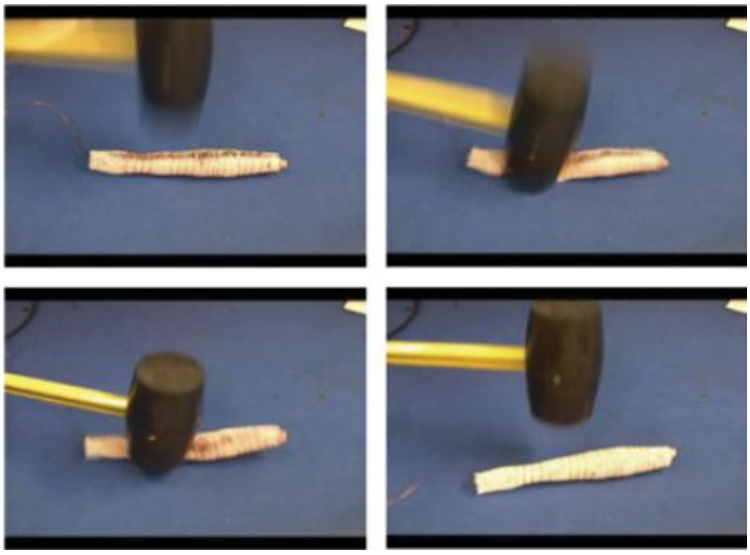

图 1-6 Mesh worm 记忆合金驱动软体机器人[9]

2014 年塔夫茨大学的 UmeDachi 与 Trimmer 等人使用基于光固化原理的 Connex 500 3D 打印机平台，成功开发了 “Tufts soft worm”仿尺蠖软体机器人。其本体用的是 Object 公司研发的 Tango Plus 和 Vero Clear 两款半透明型的弹性橡胶材料，其中 Tango Plus 材料具有优异的伸展能力，最大极限拉伸率可以高达 218％，并且通过 Connex 500 打印机系统制作而成，使用记忆金属（SMA）作为驱动器，就可以完成类似尺蠖一样的爬行、翻转等运动方式[10]。

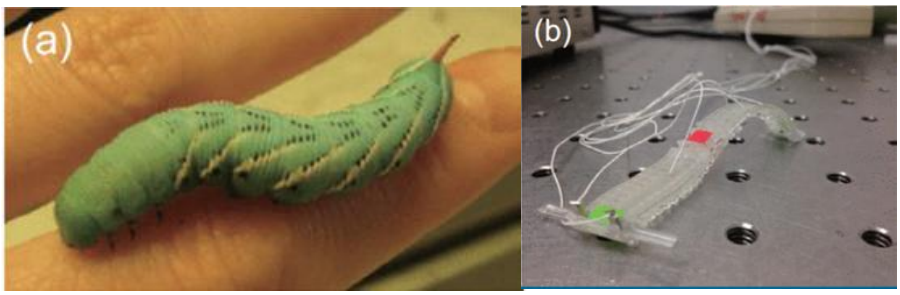

图 1-7 “Tufts soft worm”记忆合金驱动仿尺蠖软体机器人[10]

2014 年中国科学技术大学杨杰课题组通过 3D 打印技术研发了一款仿海星的软体机器人。设计人员模仿了具有对称结构和柔软内部骨骼的海星，并通过 3D 打印技术制作了软体机器人的本体部分，其打印材料是硅橡胶，并采用了形状记忆合金(SMA)当作驱动材料。该型软体自动化机器人的各个角都能够经由 SMA 驱动而产成扭转变形，并能够完成爬行运动，同时还可以越过大约为其体长二倍的障碍物[11]。

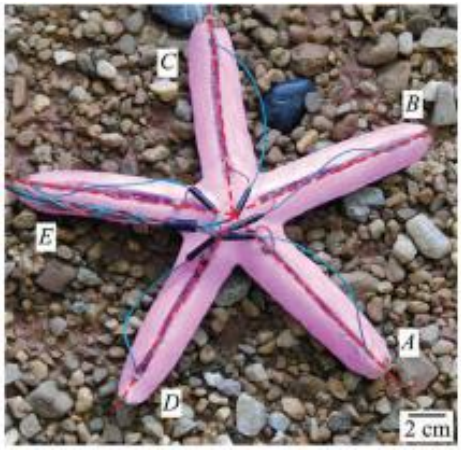

图 1-8 记忆合金驱动仿海星软体机器人[11]

2014 年韩国首尔国立大学研究人员 WANG 等人，基于尺蠖的运动方式设计出了一款模拟尺蠖的软体爬行机器人。该软体机器人以尺蠖为设计灵感，并拥有双向垂直运动与旋转的能力。按照尺蠖的结构，将软体机器人分为三部分：躯体、后足和前脚。形状记忆合金线通过纵向植入软体聚合物，可以模拟横纵肌纤维操控尺蠖在运动流程中的腹部收缩。而软体机器人的每只脚上都有三种不同的摩擦系数的节段来进行锚定和滑行运动，在 SMA 的驱使下，就可以模拟尺蠖完成爬行运动[12]。

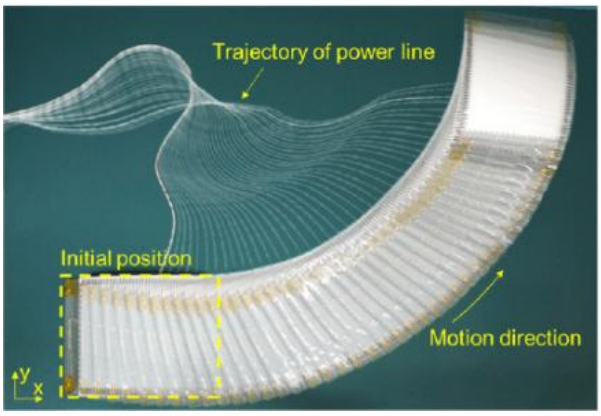

图 1-9 记忆金属驱动仿尺蠖爬行软体机器人[12]

2015 年韩国成均馆大学的 C. T. Nguyen 等人运用 3D 打印技术，设计并生产了一款单片式多自由度的六足软体机器人，如图 1-10 所示。该软体爬行机器人模拟昆虫的行进姿态，利用交替的三脚架步态构造来驱动软体机器人的六条腿的运动，使其在较为平坦的地面上具备非常好的适应性，并利用软体多自由度机构完成了机器人腿部的多自由度运动。该软体机器人主要由介电弹性体所构成，其构造简洁，具有拮抗构造。使用 3 D 打印的方式制造了软体机器人的整体架构，并把执行机构镶嵌在软体机器人的构架中，从而顺利地实现了机器人的爬行运动[13]。

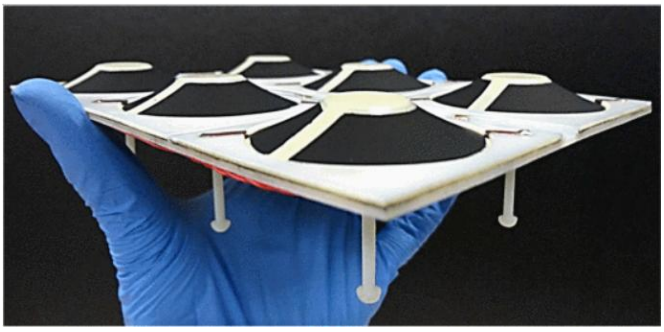

图 1-10 介电弹性体驱动单片多自由度六足软体机器人[13]

2017 年哈佛大学 Robert J. Wood 等人采用介电高弹体材料，研发了一款可以高速爬行的软体机器人。该软体机器人以多层介电高弹体材质制作而成，并可以模拟尺蠖的方式完成爬行动作。在特定的电压下能以约一个体长每秒的速率行走，为目前爬行速率最高的软体机器人。同年奥克兰大学生物工程研究所 Iain A. Anderson 等人，使用了介电高弹体薄膜材料设计并生产了一个仿毛毛虫软体机器人。该软体机器人用一种软体介电高弹体振荡器驱动，在接通外界供电时，可以自行产生驱动介电高弹体驱动器所需要的所有讯号，从而将平面内的机械振动转换为爬行运动[14]。

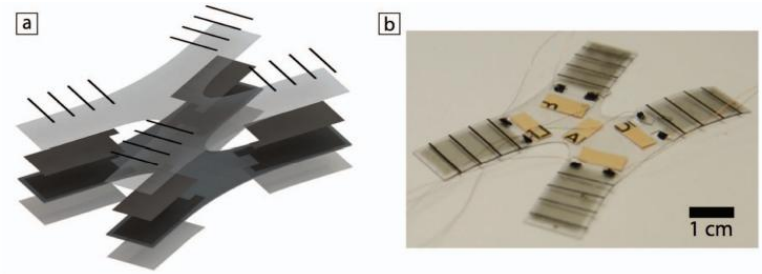

图 1-11 介电弹性体驱动快速爬行软体机器人[14]

2018 年浙江大学李铁风教授等人共同研究并发明了一款以介电弹性体为驱动的仿尺蠖软体机器人。该软体机器人由硅橡胶弹性体构成本体部分，以可伸缩的介电弹性体进行高密度的静电驱动，并能够利用两端的棘轮机构进行爬行运动。该软体机器人能够同时在陆面、水底或者真空环境工作，同时也能够攀上坡度约为三十度的陡坡，因此具备了较好的对自然环境适应性[15]。

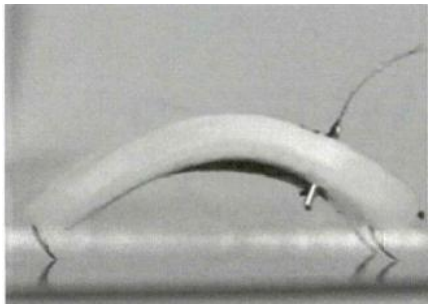

图 1-12 介电弹性体驱动仿尺蠖软体机器人[15]

2021 年，山东大学李庆中、李晓丹等人，根据青蛙推进方式与软体材料的优点，设计出了一款以介电弹性体作为执行器的蛙类仿生学软体机器人。 与两栖动物的无因次模型参数比较表明，该软体机器人的运动特性更近似真实生物，具备了优异的行动能力，从而实现了机器人的小型化和提高了对环境适应性[16]。

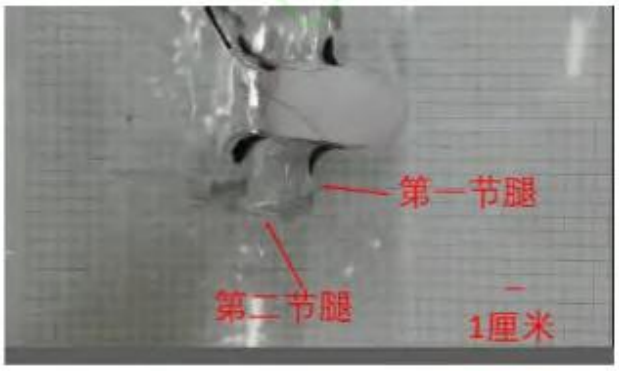

图 1-13 介电弹性体驱动蛙型仿生软体机器人[16]

2016 年哈佛大学威斯生物启发工程研究所利用 3 D 打印技术，生产出世界上首款全软体机器人 Octobot。Octobot 绝大部分是由 3D 打印技术所制作完成的，包括电池与复杂的微流控系统，其本体打印材料则是硅胶。动能主要源自于燃料过氧化氢化学反应所生成的气体，气体再经过其体内嵌入的复杂管道系统供给动能，以达成其肢体按特定方向的收缩与扩张，进而驱使软体机器人的所有触手活动[17]。

图 1-14 化学反应驱动 Octobot 仿章鱼软体机器人[17]

1.2.2 电磁驱动软体机器人

2018 年德国普朗克智能系统研究所 Wenqi Hu 等人成功研发了一款电磁驱动的毫米级软体爬行机器人。该软体机器人不但能够在液体内部和表层游动，还可以在固体表面翻滚和爬行，并能够在狭小的隧道里爬动。该毫米级软体机器人拥有多种运动模式，能够在很小的空间完成各种复杂的运动[18]。

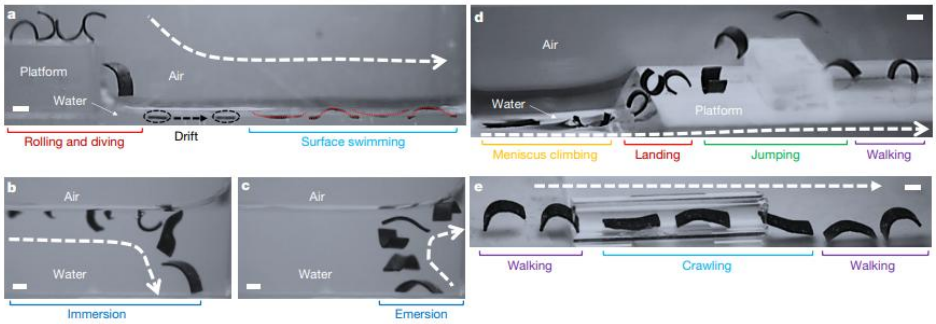

图 1-15 电磁驱动软体爬行机器人[18]

美国麻省理工学院的研究人员 Yoonho Kim 和 Hyunwoo Yuk 等人研发出了一种使用 3D 打印技术生产制作的磁性微型软体机器人。该方案基于包含铁磁微粒的弹性体复合材料的直接打印技术，通过在 3 D 打印机打印时在直接打印机打印头上施加磁场，使铁磁微粒能够沿着预设方向进行定义，进而使生产出来的机器人各部分都能够产生不同的磁化方向，其磁化方向也能够按照要求编辑[19]。

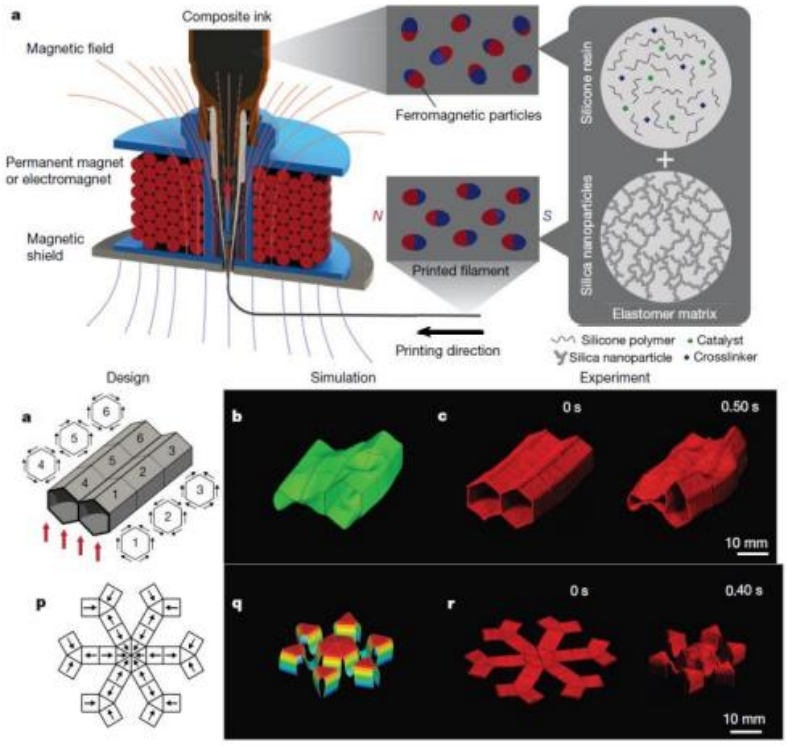

图 1-16 3D 打印磁控微型软体机器人[19]

研究人员 Tiantian Xu 和 Jiangfan Yu 等人，共同研发了一种由磁场驱动的可以在低雷诺数液体中游泳前进的螺旋微型游泳机器人。区别于其他的刚性螺旋状尾部，该机器人的尾部由柔软的可变形材料制成。这使得该螺旋微型游泳机器人可以在更为复杂多变的环境中运动。而经过试验也表明，仅依靠改变外部驱动磁场的频率就可以实现螺旋微型游泳机器人同时实现前行、动态停止以及倒退的三种状态[20]。

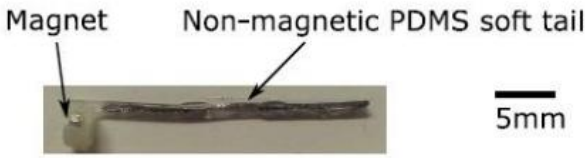

图 1-17 螺旋微型游泳机器人[20]

An Li 和 Huizeng Li 等人研发了一种新型的磁驱动机器人，用来完成液滴的可编程重复操作。这种磁驱动的机器人可以调节自身的结构，通过对自身结构的调节可以实现液体前后端阻力的重新分配，用来来实现对液滴的运输、分裂、释放以及旋转等操作。该机器人适用于多种流体，包括水、油和气体。它由磁场驱动，在有限的空间、不平的表面上，甚至在无水和厌氧条件下都能使用。该方法为液滴的可编程和自动化操作提供了一种简便的策略，在各种应用中显示出巨大的潜力[21]。

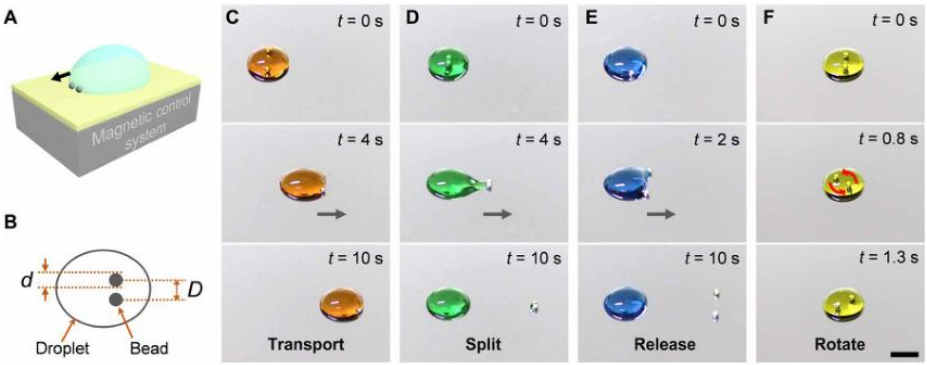

图 1-18 磁驱动液滴控制机器人[21]

1.3 研究内容

本文基于智能材料的流变记忆特性，结合自主搭建的 4D 打印设备，研究了软体机器人的 4D 打印工艺，并设计了一套与之配套的驱动系统。搭建了 4D 打印设备，并对打印模块进行升级改善，使之可以完成两种材料的复合打印，能够实现软体机器人的一体化制作分别对硅胶与智能材料进行了但材料打印实验，得到了两种材料的最佳打印参数，并在此基础上进行了复合打印实验。设计并制作了仿变形虫软体机器人，并设计了一套与之适配的驱动系统，通过软体机器人的制作验证了 4D 打印制作软体机器人的可行性。具体研究内容及章节如下：

1）详细介绍了本文的研究背景及意义，对现阶段国内外软体机器人以及磁控软体机器人研究现状进行 综述，并提出了基于智能材料的一种新型软体机器人的一体化制作方法。

2）搭建出 4D 打印设备的结构组成以及搭建，分别对框架、运动装置、挤出装置、环境控制装置以及电子控制装置进行了详细介绍，并对控制软件中需要设置的基本参数进行了详细描述。

3）对软体机器人制作需要的材料进行研究，通过控制变量的方式探索了不同比例的 KH570 改性纳米二氧化硅对硅胶粘度等参数的影响，观察了 B 组分含量对硅胶整体固化的促进作用。对硅胶与智能材料的基本流变参数进行了测试，验证其作为打印材料的可打印性。

4）分别对硅胶与智能材料进行单材料打印实验，包括单线打印、栅格打印以及实体打印。单线打印主要研究不同条件下打印出的线形；栅格打印主要研究不同条件下打印材料的搭接情况；实体打印主要观察其他参数对整个模型成型的影响。根据打印实验选定打印参数，设定好打印参数后进行复合打印实验，并根据复合打印情况对参数进行调整。

5）根据变形虫的运动原理，设计了一个仿变形虫的软体机器人。完成了其结构与步态的设计，并在前文打印实验的基础上，对软体机器人的尺寸及结构进行调整。在前文搭建的 4D 打印设备上完成软体机器人的制作，并设计了一套与之适配的驱动系统。

2 4D 打印设备搭建

2.1 打印机组成

表 2-1 4D 打印机组成

设备	型号规格
开关电源	施耐德 24V、12V
控制板	Ｌｅｒｄｇｅ－ｋ
电机驱动器	KD-2MD530
步进电机	５７、４２
非标机械零件	定制
机械限位开关	Ｅｎｄｓｔｏｐ卧式
热床	定制
线圈	定制
特斯拉计	CN61-PEX-045B

2.2 打印机设计及搭建

在本研究中，基于 4D 打印实验的需求，设计组装了可以对多种材料进行复合打印的墨水直写式（DIW）双头打印机，打印机为 I3 结构，如图 2-1 所示。该机型大致可以分为双头打印机框架及运动装置、外部环境控制及监测装置、挤出头运动及控制装置、电子控制及软件控制装置。

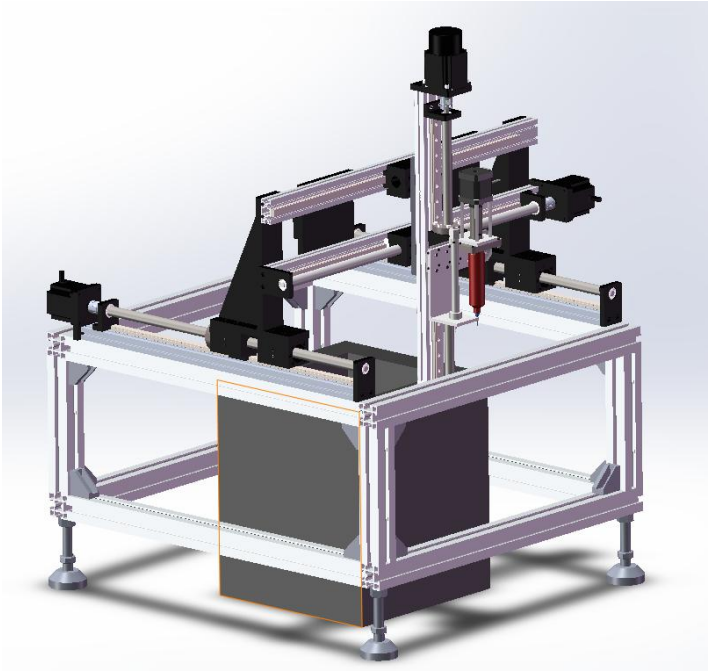

图 2-1　双头打印机结构示意图

2.2.1 框架及挤出头运动、控制装置

本文选用 I3 结构双头打印机，X、Y、Z 方向运用 57 步进电机通过滚珠丝杠结构带动滑块运动，从而实现 X、Y、Z 三个方向的直线运动，带动挤出头形成平面及垂直运动，形成三维运动轨迹。其中，X 轴、Z 轴负载较小，只需一个步进电机驱动。Y 轴负载较大，因此有两个步进电机驱动，来提供大负载运动所需的动力，同时滚珠丝杠传动方式保证了打印机的传动精度，这在一定程度上保证了打印机运动的平稳性以及运动精度。Y 轴结构如图 2-2 所示。

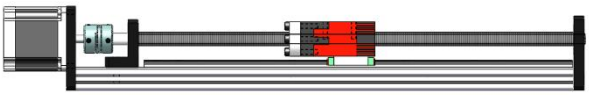

图 2-2　Y 轴结构示意图

控制装置包括机械限位开关，用于确定滑块位置以及控制滑块极限位置。电机驱动器用于接收控制信号并驱动步进电机产生可控运动。24V 开关电源用于为控制器、驱动器及电机提供电源，热床采用 12V 电源独立供电。

2.2.2 挤出装置

挤出和控制系统的主要作用是保证打印材料能够连续稳定地挤出成型。因为硅胶材料和智能材料的流变性，挤出需要较大的压力。且为了保证挤出连续稳定，选用步进电机直推的方式挤出。而打印对象硅胶用量相对较小，需要填充大量的智能材料，所以硅胶料筒较小，可以直接固定在打印机上，如图 2-3 所示。而智能材料用量较多，所以料筒设计较大，且挤出需要的力更大，因此采用分体式设计，挤出电机与料筒单独放置，通过导管连接到打印头，如图 2-4 所示。同时，导管长度需要在合适的范围内，若太长影响挤出效果，太短则影响打印范围。挤出装置通过转接板固定在打印机上。

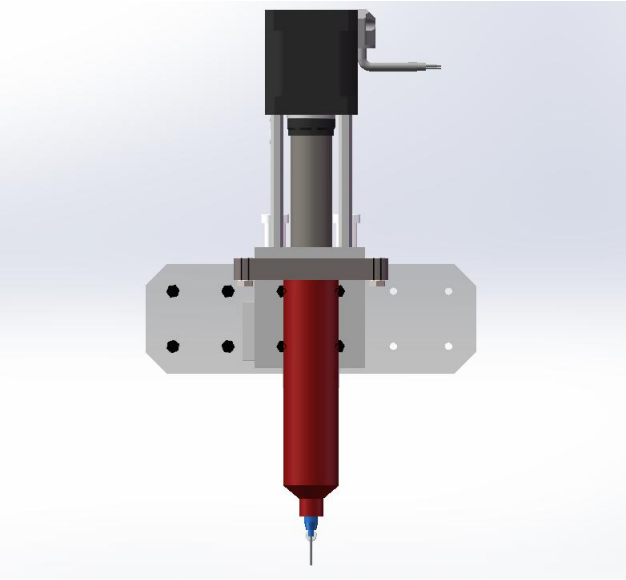

图 2-3　硅胶挤出装置

图 2-4　智能材料挤出装置

2.2.3 外部环境控制及监测装置

双头打印机集成温度控制及监测、磁场控制、场强监测装置。其中，温控装置主体为铝板，并集成加热铝块、循环水冷系统来实现打印平台温度控制，可以在 0℃~+99℃范围内自由调节。同时温度传感器可以实时监测打印平台温度，为打印物体的固化提供合适的温度，如图 2-5 所示。另外，根据智能材料的流变性等特性，打印台配备了亥姆霍兹线圈，为打印空间提供一个均匀磁场，并能通过电源供电电压以及电流调节磁场强度大小，如图 2-6 所示。磁场发生模块是智能材料打印成型的关键装置，磁场的调节对于寄出后的智能材料粘度变化和智能材料内部微观结构恢复以及形状的调节起重要作用。此外，还配备了一个独立的特斯拉计，用以检测打印空间内任意一点的磁场强度大小，以保证智能材料在合适的磁场强度范围内进行打印，确保智能材料的打印成型效果。

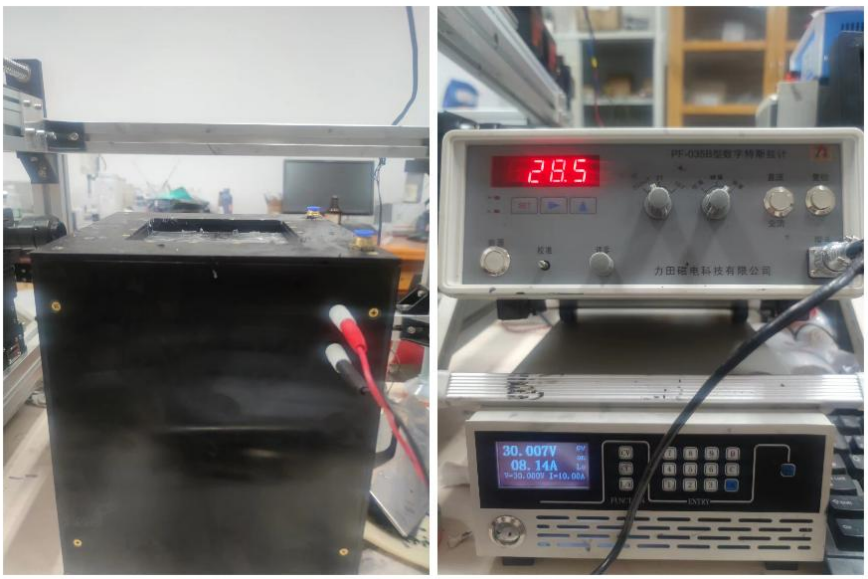

图 2-5　磁场发生及测量装置

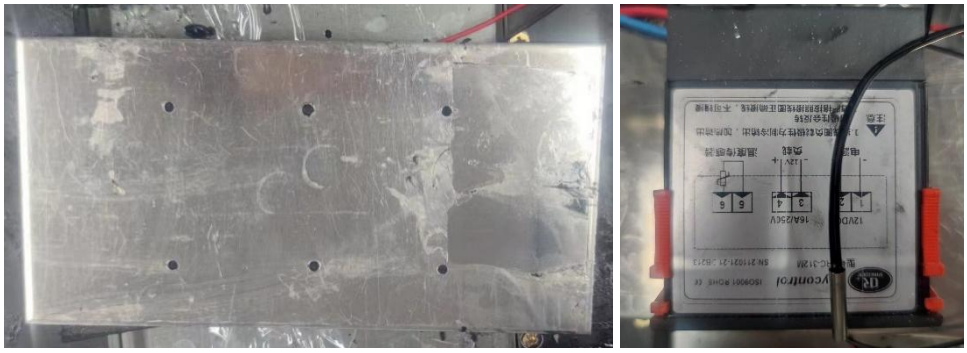

图 2-6　温度控制及监测装置

2.2.4 电子控制装置

双头打印机主板选用 Lerdge 开源控制板（图 2-7 所示），内置控制程序，最多支持 6 个轴的运动，最多 3 种材料同时打印，带有 3 个热电阻和热电偶输入接口，一路热床输出控制，支持 SD 卡输入，支持 LED 显示。控制程序用于接收切片软件输出的控制指令（G 代码），控制打印过程。

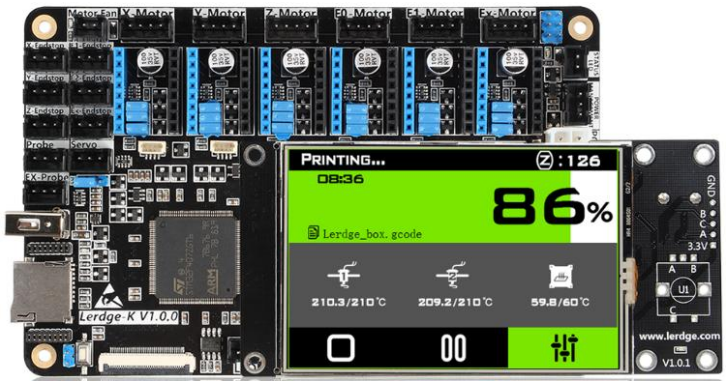

图 2-7　4D 打印机控制套件

2.3　软件控制

2.3.1 控制程序

双头打印机控制程序为乐积主板内置程序，可以通过触摸屏设置打印机参数，如原点位置、行程空间、归位开关、电机转动方向，步进值等。设置机器原点是为了使打印出来的模型与切片软件中的模型一致。原点位置设置不合适，可能导致打印的模型实物与模型图纸镜像或者相反。归位后打印头靠近初始位置，所以 X、Y 轴归位位置均为 MIN。归位后打印头靠近平台，所以 Z 轴归为位置也为 MIN，示意图及设置如图 2-8 所示。

图 2-8　归位位置及设置示意图

行程空间即为打印头可以到达的空间所有点的集合，I3 结构打印机打印空间为立方体，因此可以分解为 X、Y、Z 三个方向移动范围，即设备的行程空间。确定好打印机参数后，在触摸屏上进行设置。根据图 2-9 正确设置各轴行程空间、热床尺寸以及边缘尺寸，偏移量设置为 0。

图 2-9　行程空间设置示意图

Lerdge 主板上的归位开关仅在系统归位时有效，只用于确定设备坐标，没有限位功能，系统通过软件进行限位，所以上一步中设置的参数的准确性很重要，设置参数的误差较大可能导致撞车的危险。可以通过设置归位开关的接线模式与触发模式来兼容不同型号的开关。接线模式有常开模式与常闭模式两种，触发模式有高电平触发与低电平触发两种。打印机采用的是机械限位开关，为常开状态，此时不通电为低电平。当移动到极限位置时话跨会撞到限位开关，由低电平变为高电平，所以为高电平触发。设置如图 2-10 所示。

图 2-10　归位开关设置示意图

此外，为了保证打印机的运动精度需要准确地计算出每个电机的步进值，并将步进值与电机转向在系统中进行设置，如图 2-11。通过电动方式检查运动方向是否与电动方向匹配，不匹配则需对电机转向进行修改。

图 2-11　电机方向设置示意图

2.3.2 切片软件

本文所用切片软件 Ultimaker Cura 是一款专业的切片软件，该款软件兼容多种不同种类的打印机，支持多基础头扩展复合打印，支持打印细节的参数调整，功能比较强大，为本文软体机器人复合打印提供技术支持。软件界面如图 2-12 所示。

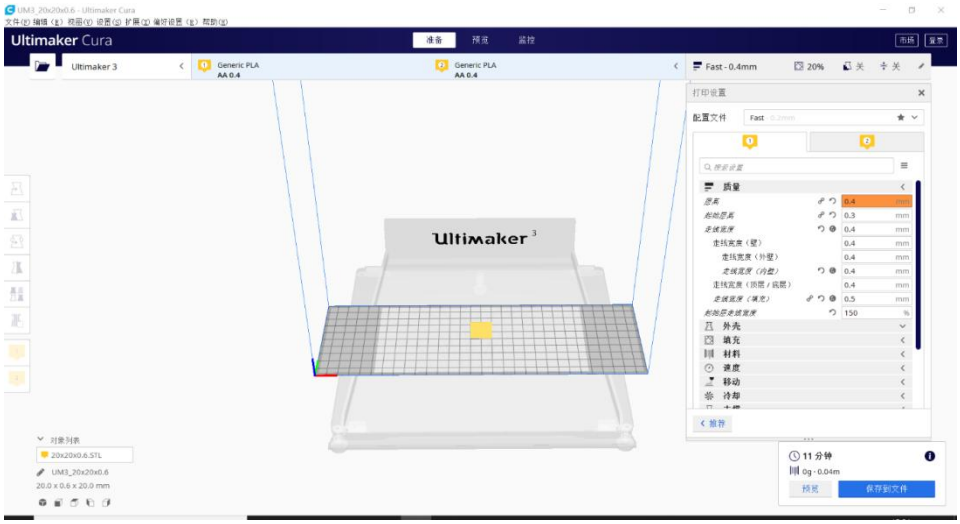

图 2-12　Ultimaker Cura 界面

本毕业设计搭建的 4D 打印机要完成复合打印，需要两个打印头，故需要在切片软件中设置支持双头打印的打印机型号，本文选用的是 Ultimaker3。如图 2-13 所示，该款打印具有 Extruder1 与 Extruder2 两个挤出头，可以实现两种不同材料的复合打印。

图 2-13 打印机选型

而后根据搭建的打印机参数，在切片软件中进行设置，主要包括打印机行程空间、打印平台的形状以及 Extruder2 相对于 Extruder1 的空间坐标偏移量。打印头偏移量务必精准，否则会造成打印位置相对偏移，影响打印精度。经测量 Extruder2 相对于 Extruder1 偏移 X 方向为-50.0mm，Y 方向为 1.0mm，设置如图 2-14。

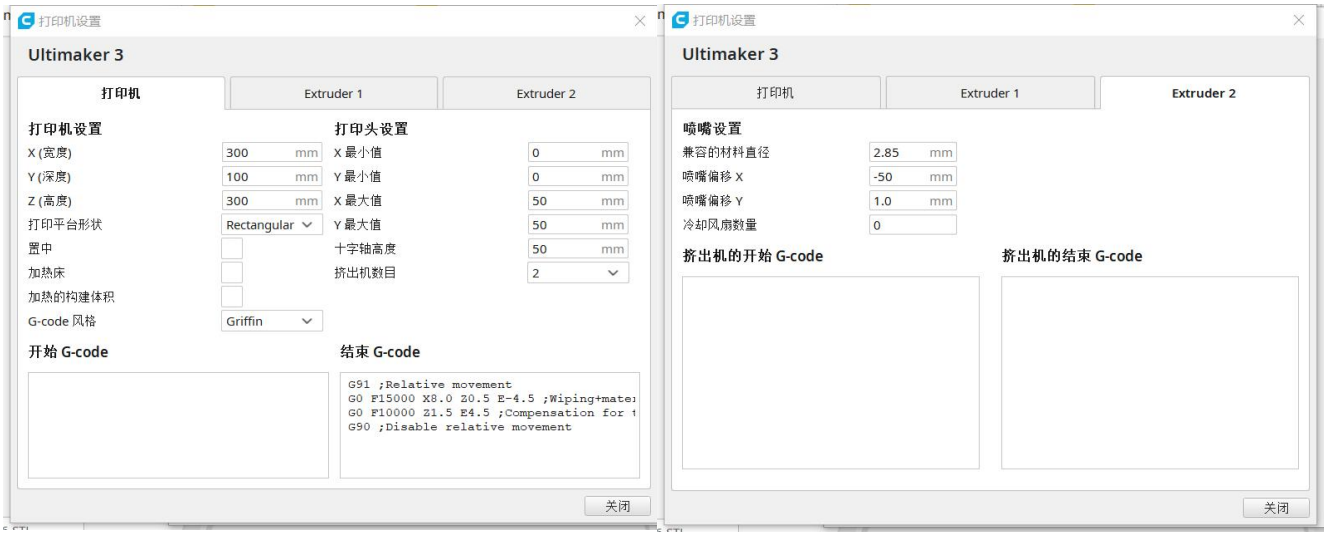

图 2-14 挤出头相对位置设置

根据挤出头直径对切片层高进行设置，打印层高需在合适范围内。由于打印机的原理是二维图形的空间堆叠，因此层高误差会随着打印层数的积累而不断增长。若打印层高过小会造成挤出头探入已打印模型中进行打印，反之打印头会悬空，影响打印精度。因打印材料受重力影响，一般打印层高设置要略小于挤出头直径。打印参数设置如图 2-15。

图 2-15　打印参数设置

上述基本设置完成后，需要将模型中两个挤出头打印的部分分开建模，并且导入到同一个页面中，调整好每部分对应的位置，设置好对应的挤出头即可自动切片，而后导出生成的 G 代码导入到 SD 卡中，插入打印机主板 SD 卡槽选取对应的 G 代码即可进行打印。

2.4　重要零部件校核

本文所搭建的双头打印机为龙门式结构，Y 轴负载最大。X、Y、Z 轴都是滚珠丝杠传动，因此只需对 Y 轴丝杠进行校核，若 Y 轴丝杠符合条件则其他轴均符合条件。下面对滚珠丝杠进行校核：

（1）　稳定性验算

一端轴向固定的长丝杠结构在正常工作时可能会产生失稳状况，所以在设计的时候应该验算他的安全系数 S，安全系数的值应大于丝杠副传动结构所允许安全系数[S]。

丝杠不会发生失稳的最大载荷称为临界载荷 Fcr(N)按下式计算：

$$F_{cr}=\frac{\pi^2 EI_a}{(\mu l)^2} \tag{2-1}$$

式中，E 为丝杠材料的弹性模量。对于钢，弹性模量 E=206GPa；l为丝杠工作长度（m）；I_a为丝杠危险截面的轴惯性矩（m^4）；μ为长度系数。

$$I_a=\frac{\pi d_1^4}{64}=\frac{3.14\times(0.013)^4}{64}=1.4\times10^{-9}m^4 \tag{2-2}$$

取 μ=2/3，则：

$$F_{cr}=\frac{\pi^2 EI_a}{(\mu l)^2}=\frac{3.14\times206\times10^9\times1.4\times10^{-9}}{(\frac{2}{3}\times0.18)^2}=6.29\times10^4N \tag{2-3}$$

安全系数：

取 F_M为丝杠可支持的最大推力为 188N

$$S=\frac{F_{cr}}{F_M}=\frac{6.29\times10^4}{188}=334.57 \tag{2-4}$$

查表可知，[S]=2.5~3.3。S>[S]，所以丝杠是安全的，不会发生失稳状况，可以满足使用的要求，因此滚珠丝杠副合格。

（2） 刚度验算

滚珠丝杠在工作负载 F(N)和转矩 T(N)共同影响下，引起每个导程的形变量ΔL_0为：

$$\Delta L_0=\pm\frac{pF}{EA}\pm\frac{p^2T}{2\pi GJ_c} \tag{2-5}$$

式中，A 为丝杠横截面积；Jc 为丝杠的极惯性矩，$J_c=\frac{1}{32}\pi d_1^4(m^4)$；G 为丝杠切变模量；对于钢，G=83.3GPa；T(N· m)为转矩。

$$T=F_M\frac{D_0}{2}tan(\lambda+\rho) \tag{2-6}$$

式中，ρ为摩擦角，其正切函数值即为摩擦系数；F_M为平均工作载荷。在该丝杠的设计中，取摩擦系数为$tan\,\rho=0.0025$，则$\rho=8'40''$

$$T=1759.3\times\frac{20}{2}\times10^{-3}\times tan(3°38'+8'40'')N\bullet m\approx0.12N\bullet m \tag{2-7}$$

按最不利的情况下取（其中 F=F_M）

$$\Delta L_0=\frac{pF}{EA}+\frac{p^2T}{2\pi GJ_c}=\frac{4pF}{\pi Ed_1^2}+\frac{16p^2T}{\pi^2Gd_1^4} \tag{2-8}$$

$$=\frac{4\times2.5\times10^{-3}\times188}{3.14\times206\times10^9\times0.013^2}+\frac{16\times(2.5\times10^{-3})^2\times0.12}{3.14^2\times83.3\times10^9\times0.013^2}\approx1.72\times10^{-8}m$$

由于丝杠在工作长度上的弹性变形而导致的导程误差为:

$$\Delta L=l\frac{\Delta L_0}{p}=0.15\times\frac{1.72\times10^{-8}}{2.5\times10^{-3}}\approx1.0\times10^{-6}\mu m \tag{2-9}$$

通常规定丝杠的导程误差ΔL，要低于其实际传动精确度的 1/2，即：

$$[\Delta L]=\frac{1}{2}\sigma=\frac{1}{2}\times0.05=0.025mm=25\mu m \tag{2-10}$$

$\Delta L < [\Delta L]$，该丝杠满足刚度需要，该滚珠丝杠副合格。

（3） 效率验算

滚珠丝杠副的传动效率η为:

$$\eta = \frac{tan\,\lambda}{tan\,(\lambda + \rho)} = \frac{tan\,3\,°38'}{tan\,(3°38' + 8'40'')} = 96\% \qquad (2-11)$$

η要求在 90%~98%之间，所以选用的丝杠传动效率相对较高，能够达到使用要求，该滚珠丝杠副合格[23]。

2.5 打印设备展示

根据前文所设计的打印机结构及各功能装置，搭建出 4D 打印设备如图 2-16 所示。

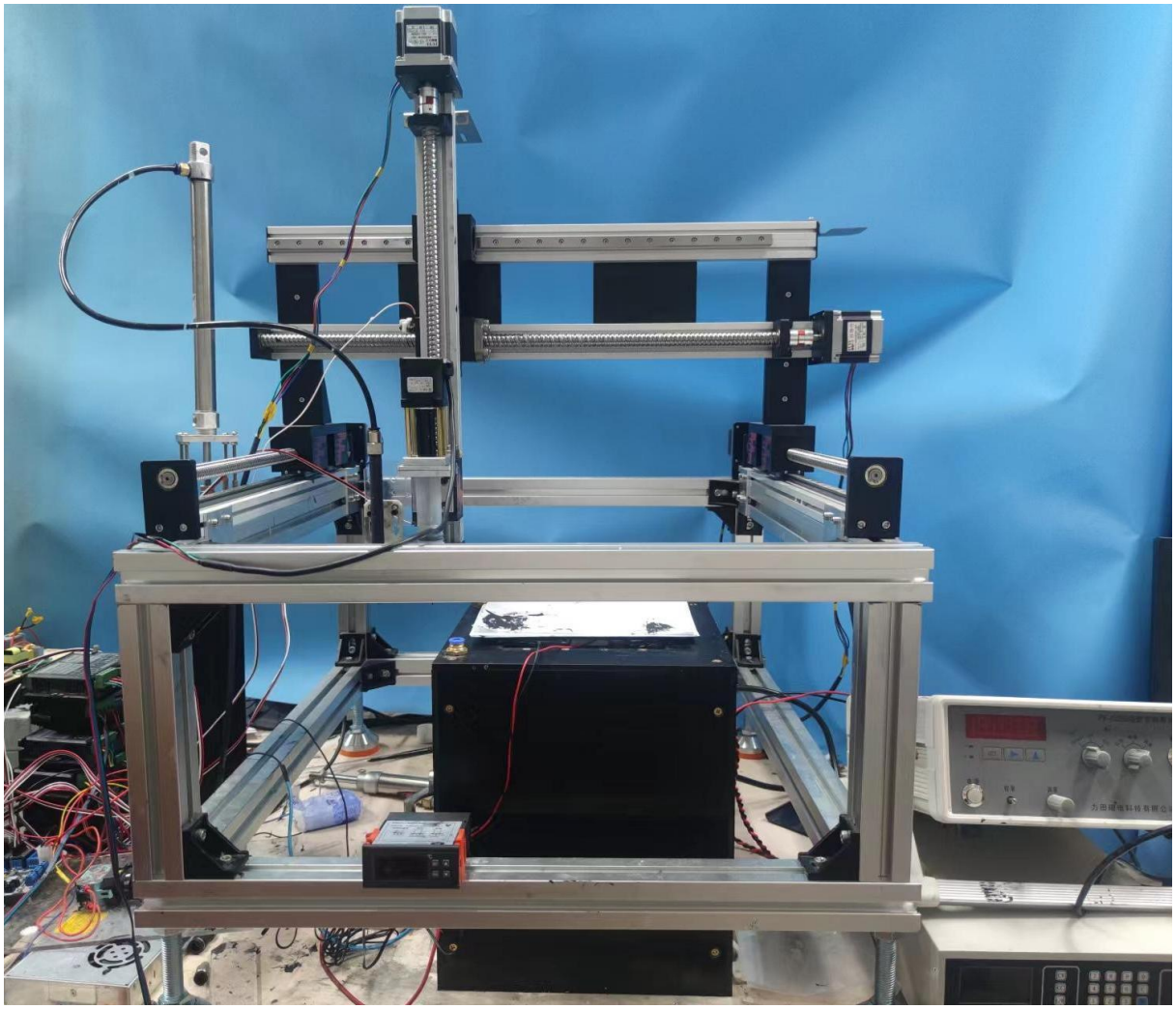

图 2-16 4D 打印设备展示

3 材料制备表征

流变特性，是指物料在外力影响下的变化和流动特性，主要指在加工过程中材料应力、变形、变化速率与黏度间的关系。流体的黏度不同，施加在流线表面上的剪切应力和剪切速度间的定量关系也有所不同。

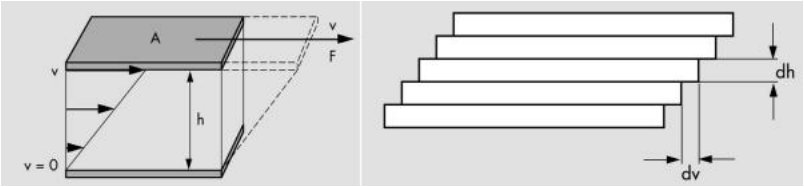

图 3-1 流体流动微观示意图

流体在流速不快时，可以把流体看作由几个彼此平行移动的小液层所构成，液层之间没有物质交流，这种流动方式又称为分层流动，如图 3-1。而因为各层次的运动速率不同，便产生了速率梯度 dv/dh，也称为剪切速率。流淌缓慢的液层阻碍了流淌较快液层的运动，使其两层间形成相对运动的力就叫剪切力。而剪切速率和剪切应力则是表征系统流变特性的两种主要基本参数。

牛顿流体的流动性取决于其粘度，而在层流状态时产生的剪切应力则和剪切速率成正比:

$$\tau = \eta \cdot F / A \tag{3-1}$$

$$\text{或}\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \tag{3-2}$$

F：A 面积上施加的力；

η：粘度（viscosity）或粘度系数（viscosity coefficient）。SI 单位中粘度一般用 Pas 表示；常用单位还有 mPas、P（泊）、cP（厘泊），其中 1P=0.1Pas，1cP=1mPas

非牛顿流体则没有这种线性关系，是一种非线性复杂变化关系。又因为智能材料具有一定的屈服应力，因此可以用 Hescel-Bulkley 模型：

$$\tau = \tau_{HB} + c \cdot \gamma^{\rho} \tag{3-3}$$

τ_{HB}是符合 HB 模型的屈服应力

c 为流动系数（或称为 HB 粘度 η_{HB}）

ρ 为 HB 指数。ρ >1，剪切增稠；ρ =1，Bingham 流体；ρ <1，剪切变稀。

3.1 智能材料

本文选取含 8%Fe8%Prt 的磁性液体作为软体机器人的驱动和支撑材料，它具有流动性，又有触变性，在磁场环境下可以进行固液转变，施加磁场后粘度升高，流动性变差；撤去磁场后粘度降低，恢复流动性。本节主要对打印软体机器人选用的智能材

料进行流变学研究，通过实验结果对该材料的打印性进行评价。本文主要通过 Anton Paar MCR302 高精度旋转流变仪与 MRD170 磁场发生模块测量其流变性，重点测量智能材料的粘度与剪切速率、剪切应力间的关联曲线，以及智能材料的储能模量、损耗模量与时间和振动频率之间的关联曲线。

3.1.1 流变性

对智能材料进行旋转测量，测得智能材料流变数据，绘制出剪切速率-剪切力曲线与剪切速率-粘度曲线，如图 3-2 所示。

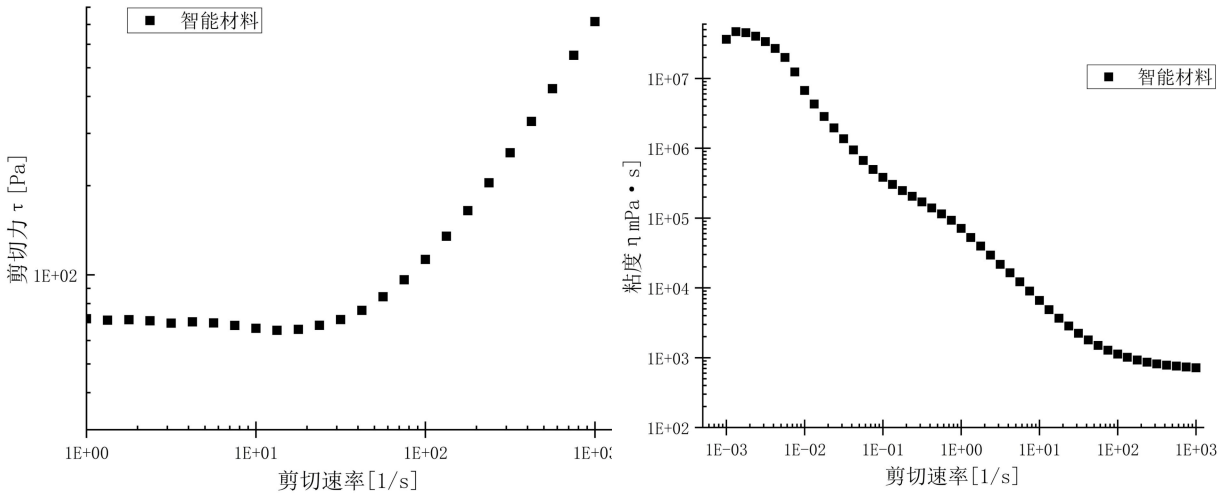

图 3-2 智能材料流变曲线与粘度－剪切速率曲线

由曲线可以观察得到随着剪切速率增大，智能材料的粘度在不断降低，也就是所谓的剪切变稀，这是智能材料可以用来作为打印材料的很重要的一点性质。智能材料在磁场环境中随着粘度的升高而变稠，在被电机推动时会通过打印头而挤出料筒，在出料的一瞬间变成流动性更强的液态状态，从而能够较好地挤出成线。当挤出后，智能材料在磁场作用下粘度继续升高，很快回复到类固态，并保持自支撑状态，最终打印成型。

3.1.2 模量

智能材料除去粘度变化，还表现出粘弹性这一性质，即智能材料既有流体的一些性质，在磁场环境中又具有类似于固体的一些性质。样品的抗变形能力称为复模量 G*，

对于完全弹性材料，导致变形的力等于剪切力（δ=0°）。对于粘弹性材料，变形需要的力不等于外加剪力（δ=90°）。因此，复模量 G*可以分解为各自的分量：

$$G' = G^* \cos(\delta) \tag{3-4}$$

$$G'' = G^* \sin(\delta) \tag{3-5}$$

G’[Pa]:储能模量，弹性部分，形变能力种储存的部分

G’’[Pa]:损耗模量，粘性部分，形变能力中损失的部分

当 G’’<G’时，弹性占主要部分，为凝胶体；当 G’’>G’时，粘性占主要部分，为流体；当 G’’=G’时，粘性和弹性相等，为溶胶-凝胶转变点。

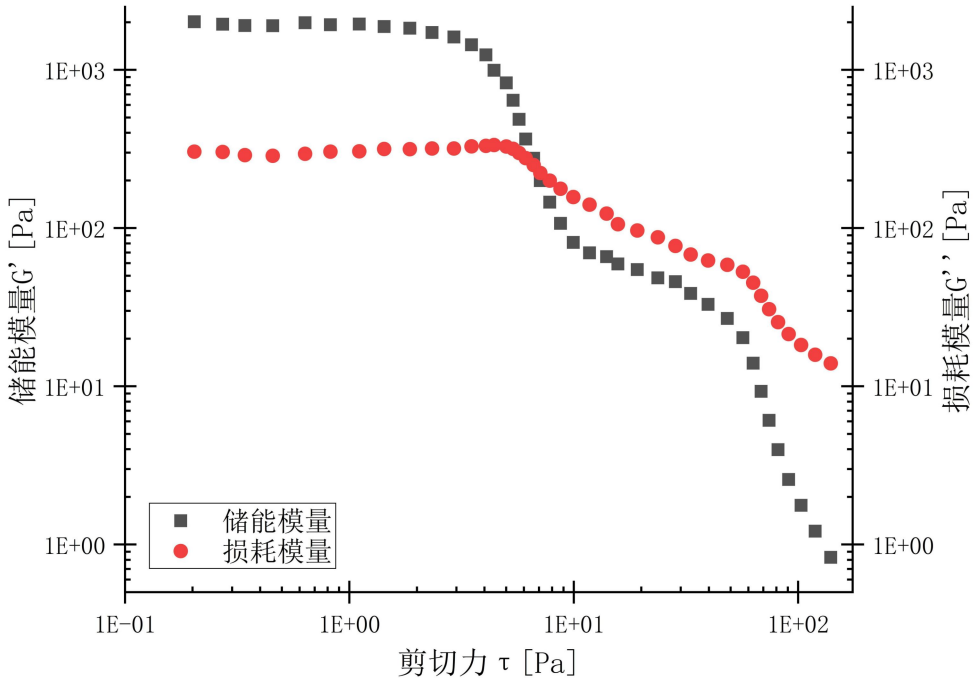

图 3-3 智能材料模量－剪切力曲线

如图 3-3 所示，当切应力超过溶胶-凝胶转变点后，储能模量便会一直低于损耗模量，物料呈液体状态，虽然在料筒内流动性较好但是不能自支撑，所以必须外加磁场。当智能材料被打印到打印平台上，进入磁场环境后材料的粘度呈指数级增加，此时的储能模量远大于损耗模量，所以智能材料呈类固态，具有较好的自支撑能力，最终打印成型。

3.2 硅胶材料

选用 0 号双组分 AB 硅胶用作打印软体机器人的外壳材料，它主要是由 AB 两种组分构成：硅胶基（A 组分）和交联剂（B 组分）。当两组分混合在一块时，发生化学反应缓慢形成硅橡胶，最终得以固化。固化的总时间取决于使用的交联剂的量和所在环

境的温度，较高的温度会适当的促进固化过程[22]。因为 AB 组分硅胶都是液体材料，在打印堆叠过程中无法成型，因此需要加入 KH570 改性纳米二氧化硅对硅胶进行改性（图 3-4），从而将他由液态转化为更适合打印的胶体，这样经过改性后的硅胶挤出后能更好的形成自身形状结构，线与线之间可以搭接在一块且可以相互粘合。硅胶的打印效果取决于所选硅胶的可打印性，本文重点关注硅胶的流变学特性，测试不同比例 SiO_2 对 AB 组分对硅胶粘度、模量的影响以及不同比例 AB 组分对硅胶固化效果的影响。实验配置了不同比例的硅胶材料，分别进行流变学测试。

本节主要研究不同比例 SiO_2 对 AB 组分硅胶流变性能的影响以及 AB 组分的比例对硅胶流变性的影响，包括剪切应力与时间的关系曲线、完全固化后的弹性模量等，并对智能材料进行流变学测试，观察其流变性质。

图 3-4　硅胶与 KH570 改性纳米二氧化硅

3.2.1 不同比例的硅胶与 SiO_2 流变学实验

黏度也可以称为粘度，是指流体对流动所表现的阻力。流体 (气体或液体) 在流动的过程中， 一部分从另一部分上面流过时， 就会受到阻力， 这就是流体之间的内摩擦力。。气相 SiO_2 可以使硅胶发生改性。当硅胶与二氧化硅的比例大于 8:1 时，材料的流动性较强，粘度明显不够，不适合拿来打印。当硅胶与二氧化硅的比例小于 6:1 时，气相 SiO_2 在硅胶中的溶解度达到饱和，且粘度过大无法挤出，对照如图 3-5。因此选取比例区间 6:1 到 8:1 进行流变学测试，并选取比例 10:1 作为对照。实验过程为了控制变量，硅胶 AB 组分的比例均为 1:1。

图 3-5　不同粘度硅胶对照图

由图 3-6 中流变仪测得的数据可以看出，在合适的比例范围内，随着硅胶中加入的 SiO_2 的比例越高，配制出来的硅胶粘度越高，且随着时间推移粘度逐步上升，直至最终固化。同时，加入 SiO_2 也可以让硅胶更快地达到固化临界粘度，缩短固化时间。同时，硅胶还有剪切变稀的特性。从图中可以看出，随着剪切速率的增加，材料的粘度在不断减小。在打印过程中材料由于被电机推动通过打印头挤出料筒，在出料的一瞬间转变为流动性更强的液态状态，从而能够较好地挤出成线。在挤出后，已沉积的物料迅速停止流动，很快回复到类固态，并保持自支撑状态，最终打印成型。

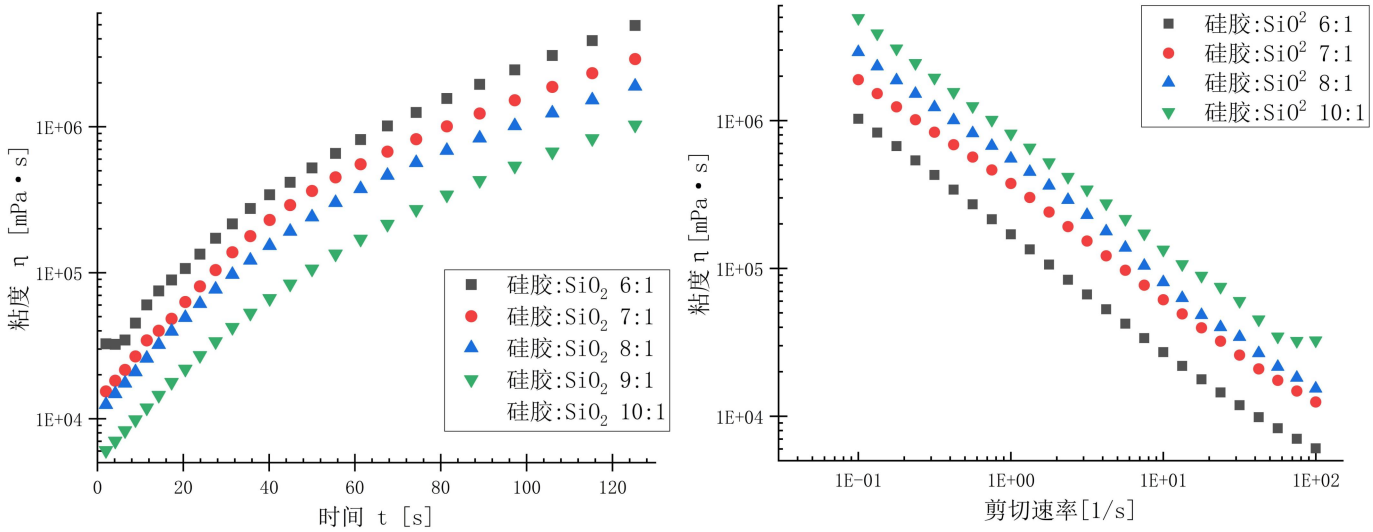

图 3-6　不同比例硅胶粘度-时间曲线与粘度-剪切速率曲线

3.2.2 不同比例 AB 组分硅胶流变实验

本实验主要针对不同比例 AB 组分的硅胶进行流变学测试，观察 B 组分对硅胶流变性的影响，以及 B 组分的含量对混合后硅胶固化的影响。因此配置了 5:1 到 1:1 五种不同比例的硅胶，为了控制变量，硅胶与 SiO_2 的比值均为 7:1。

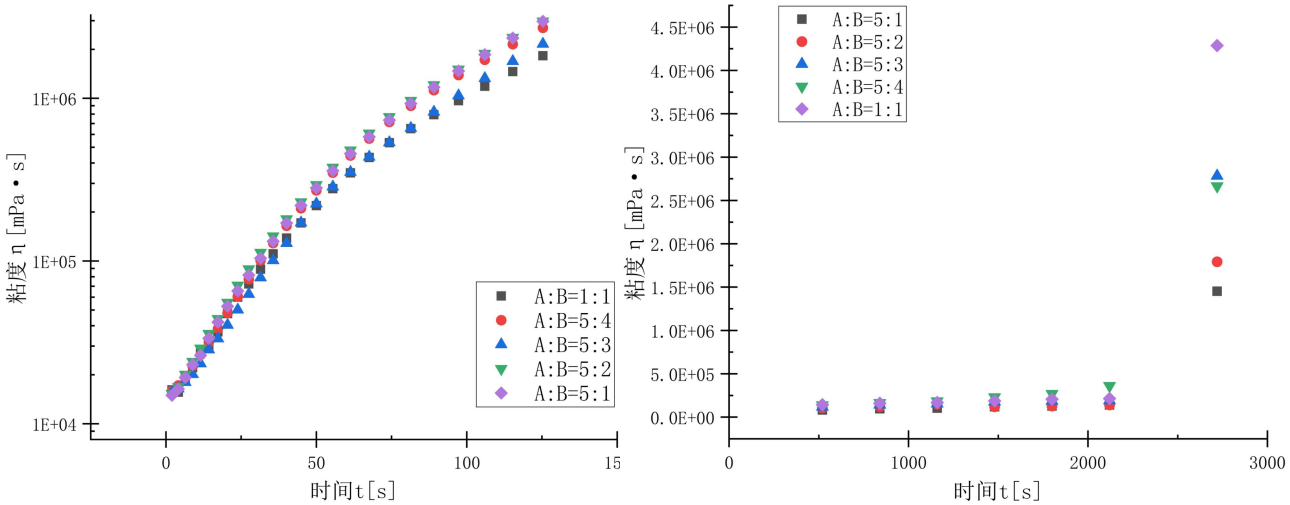

图 3-7 不同比例硅胶粘度-时间变化曲线

由图中流变曲线可以看出，随着时间推移，硅胶的粘度均在不断增加。随着加入 B 组分比例的增加，硅胶的初始粘度并无变化，因此 B 组分的比例不影响硅胶的初始粘度。但经过纵向比较可以看出，随着 B 组分比例的增加硅胶的粘度变化更快，这也印证了 B 组分对硅胶固化的促进作用。

硅胶的固化过程为一开始缓慢固化，经过一定时间后会达到临界点，此时固化速度迅速增加。由图中固化测试可以看出，在一开始缓慢固化阶段不同比例硅胶固化速度相差不大。但在最后一个测试点时，可以看出 AB 组分比例为 1:1 的硅胶粘度明显大于其他比例硅胶，且粘度是跟 B 组分硅胶所占比例成正比的，因此可以推断 B 组分硅胶可以提高硅胶固化的速度，并能够提前临界点的到来。

4 打印实验

本章主要进行打印工艺研究，包括硅胶、智能材料单材打印以及两种材料复合打印工艺，从单丝打印实验、栅格打印、立体成型打印等对打印工艺展开研究。根据打印效果及前文流变学实验结果选择硅胶材料的最佳配比。前文流变学测试的结果，验证了硅胶软材料与智能材料的流变性、自支撑能力及其作为打印材料的基本属性。本章在此基础上，利用自主搭建的双头打印机，对硅胶材料和智能材料分别进行打印实验，对硅胶与智能材料的 3D 打印工艺参数展开实验分析，确定最佳打印参数组合。在单材打印工艺研究成熟后，进行双头打印实验，对硅胶与智能材料进行一体化打印。在单材打印确定的打印参数的基础上，根据复合打印情况对打印参数进行调整，研究复合打印工艺。

4.1 硅胶打印

本节主要对硅胶单材打印工艺进行研究，通过单丝打印、栅格打印、实体打印等方式，确定硅胶打印的最佳参数。单丝打印主要对单条线的打印效果进行研究，观察在不同挤出速度下打印出的线形，研究不同挤出速度对挤出线形的影响。栅格打印主要对挤出的线进行两层堆叠，观察不同配比的硅胶挤出的线的搭接情况，从而结合上文流变学实验结果选择最佳配比的硅胶材料。实体打印主要对材料进行高度堆叠以及横向扩展，从而确定最佳的打印层高与走线宽度。

4.1.1 单丝打印

硅胶从打印头中挤出，比较理想的状态应该是走线的轨迹与打印头运动的轨迹重合，且挤出的线的截面跟打印头末端形状一样，即为圆形。因为材料受到重力，可能会发生略微塌陷变为椭圆形。在一定的打印速度下，若挤出速度过小，打印出的线的截面不规则。若挤出速度过大，截面则会变成明显的椭圆状，示意图及打印效果如图 4-1 所示。

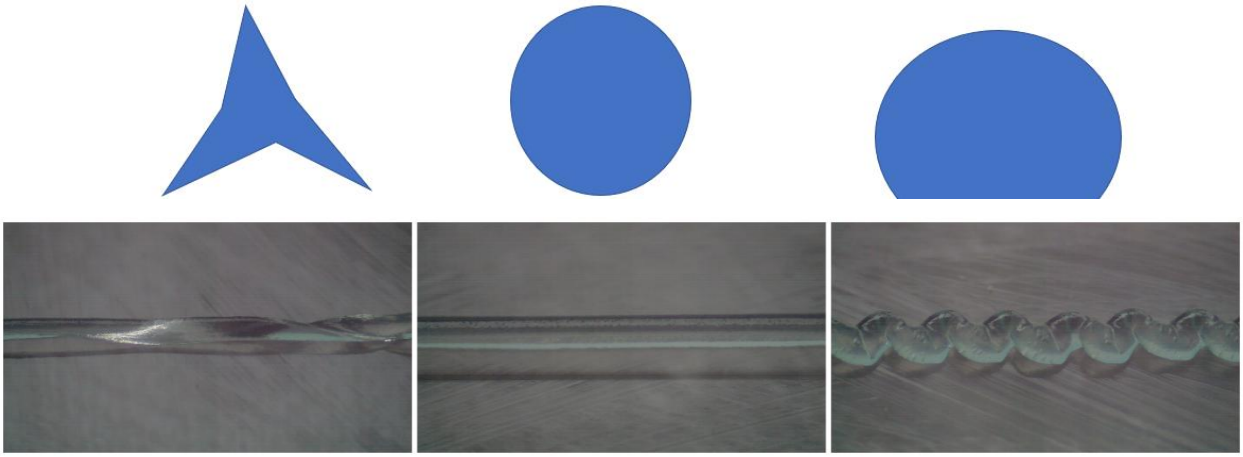

图 4-1 欠挤出、适量挤出与过挤出示意图与打印效果

如上图所示，当挤出速度过小时，打印成型的线会被拖拽拉长，甚至会出现拉断的情况；挤出速度适中时，打印出的线成型较好，且挤出连续；当挤出速度过高时，挤出的线会出现弯曲的波浪状，由此确定合适的打印速度范围。

4.1.2 栅格打印

栅格打印实验主要针对一种材料不同挤出速度以及相同挤出速度下不同材料进行打印。主要对不同挤出速度下硅胶的搭接情况，并根据前文不同挤出速度下的线形，选择最佳挤出速度。如图 4-2 所示，从 1-8 挤出速度逐渐增大，当挤出速度过小时会出现断料、拉伸变形等问题；挤出速度过大时又会出现过量挤出，导致走线弯曲、下层材料位移等现象。

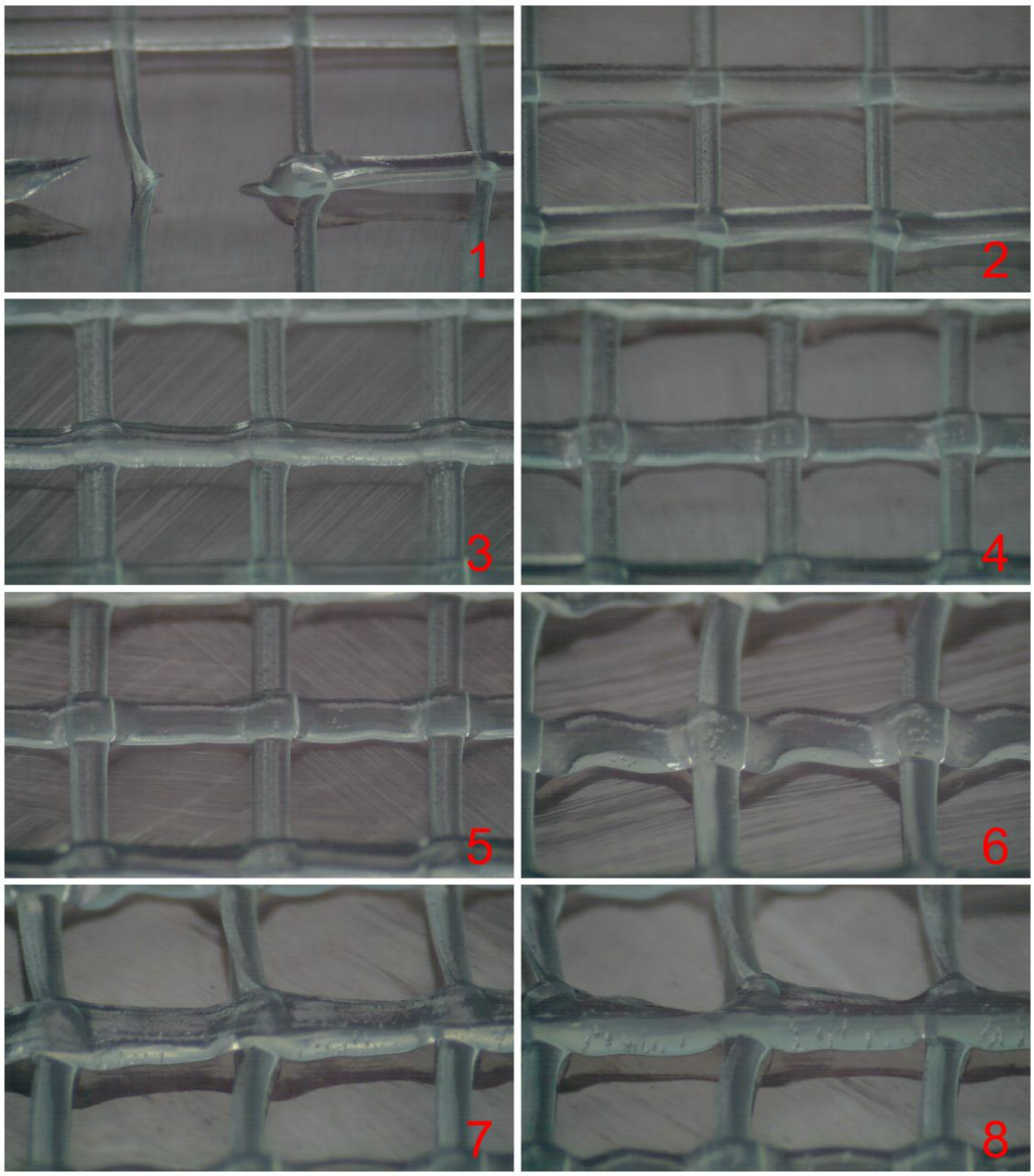

图 4-2　不同挤出速度下硅胶栅格打印对照图

在选定的挤出速度后，对不同配比的材料进行栅格打印实验，观察不同配比的材料线与线之间的搭接情况。最理想的搭接情况为两根线之间既能保持独立的线形，在交界面又有一定的融合，保证两根线能够粘合在一起。当材料粘度过高时会出现材料界

面不相容，粘合不到一块等问题；当材料粘度过低时又会出现材料融合度过高，打印线高达不到要求，如图 4-3 所示。

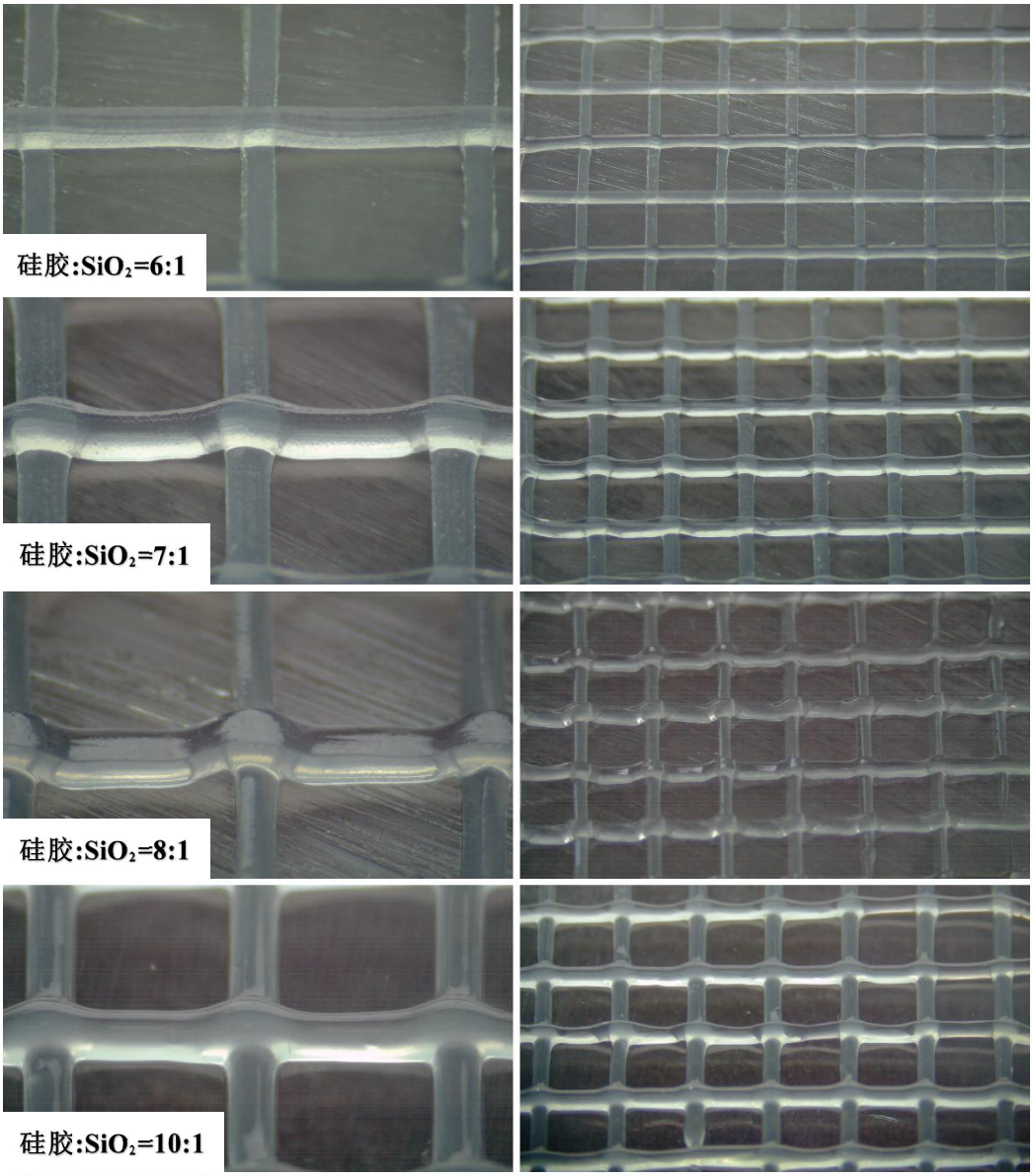

图 4-3　不同粘度硅胶栅格打印对照图

4.1.3 实体打印

实体打印部分首先对硅胶进行层高打印实验，打印层高需要设置在合适的范围内。3D 打印的原理是对二维图形的纵向堆叠，且每层实际层高与设置层高之间有相对误差，因此在进行多次堆叠后每层的误差会逐渐累积，最后对模型整体来说误差较大。若设置层高大于实际层高，在经过一定层数积累后，打印头会离模型有较高一段距离，造成挤出头悬空，打印高度过高，容易造成线形卷曲等缺陷。若设置层高小于实际层高，

在经过一定层数积累后，打印头会探入模型中进行打印，轻则影响打印精度，重则会造成模型位移甚至被破坏，如图 4-4。

图 4-4　不同打印层高示意图

图 4-5 是用所选用配比的硅胶对不同厚度半球壳的打印探究。因为硅胶中加入了 SiO_2，这在一定程度上增加了硅胶的粘度以及屈服应力，这在一定程度上关系到所配置的硅胶软材料的自支撑能力以及固化后的弹性。软体机器人设计的要求使得硅胶外壳既不能太薄，也不能太厚。太薄会造成智能材料的泄露，太厚则会影响软体机器人的弹性变形。

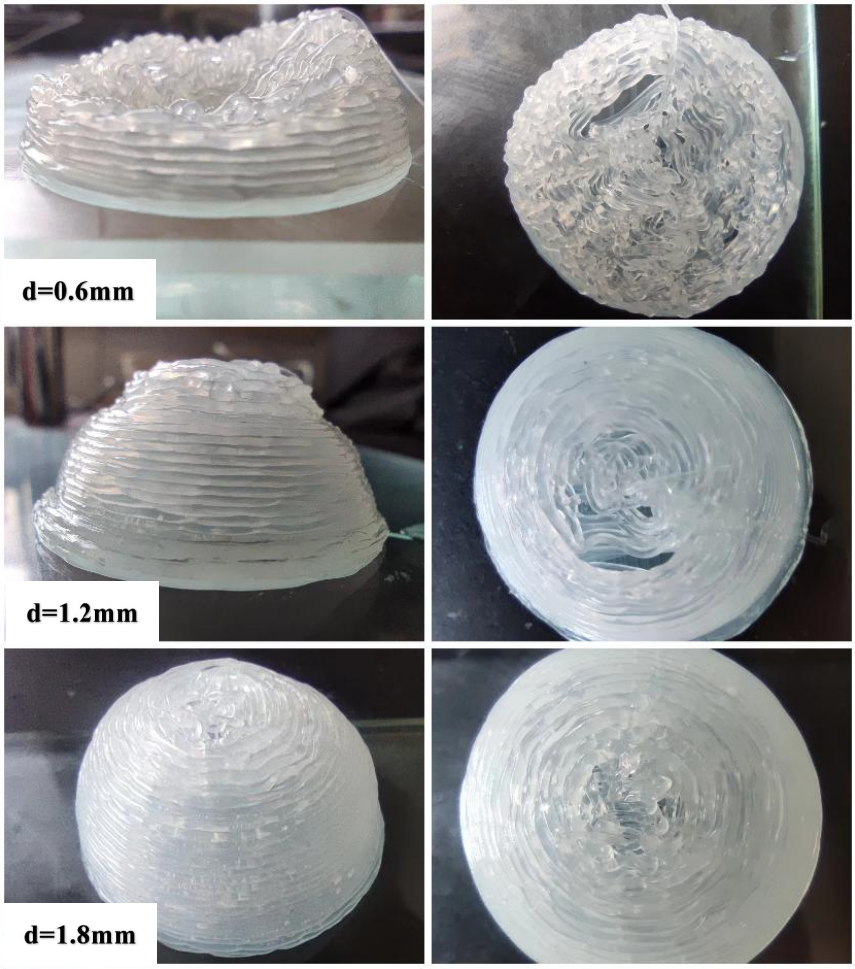

图 4-5　不同厚度 d 的半球壳打印效果对照图

4.2 智能材料打印

智能材料的打印实验与前文硅胶单材料打印实验形式上比较类似，包括单线打印、栅格打印、实体打印。由于智能材料在磁场下的表现出的一系列特性，需要研究不同的磁场强度对智能材料打印效果的影响单线打印主要探究智能材料在不同的磁场强度下打印线条的成型情况。栅格打印主要探究不同磁场强度下智能材料的搭接情况，打印的两层之间是否具有足够的高度差。实体打印主要研究选定的打印磁场强度环境下智能材料可以自支撑的高度，这对软体机器人设计的极限高度具有重要意义。

4.2.1 单丝打印

打印平台的磁场强度对线条的成型具有很大的影响，通常对挤出线条的接触角进行研究，如图 4-6 所示，从中选出接触角与高宽比在合适范围内的打印条件。

图 4-6 接触角测量示意图

图 4-7 中从左到右磁场强度依次为 0mT、10mT、20mT、30mT.由图中可以看出，当磁场强度较小时，智能材料粘度比较低，流动性较强，挤出比较容易，但自支撑能力不足，高宽比较低。磁场强度较大时，智能材料粘度比较高，流动性较差，挤出相对困难，但自支撑能力较强，高宽比较高。

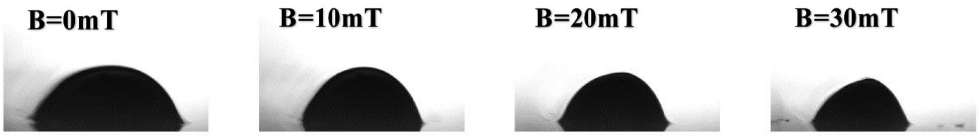

图 4-7 不同磁场强度下材料挤出截面

经测量，不同磁场强度下接触角与高宽比如下表所示：

表 4-1 接触角测量

磁场强度[mT]	0	10	20	30
接触角 θ [度]	39.11	43.67	50.3	64.06
高度 h[px]	173.14	167.19	157.2	138.23
宽度 l[px]	369.35	311.94	267.12	231.11
高宽比 h/l	0.47	0.54	0.59	0.60

其中在 20mT 与 30mT 的磁场环境下线的截面接触角在 50°-65°之间，高宽比在 0.55-0.6 之间，打印效果较好。

4.2.2 栅格打印

栅格打印实验选取了 0mT、10mT、20mT、30mT 四种磁场强度，在选定的四种磁场强度下使用智能材料打印栅格。因为智能材料在磁场环境下粘度会发生变化，具有一定的自支撑能力，因此可以形成一定的打印高度。但因为智能材料本身为液体，具有一定的流动性，因此在挤出后会在打印平面上发生一定程度的扩散。

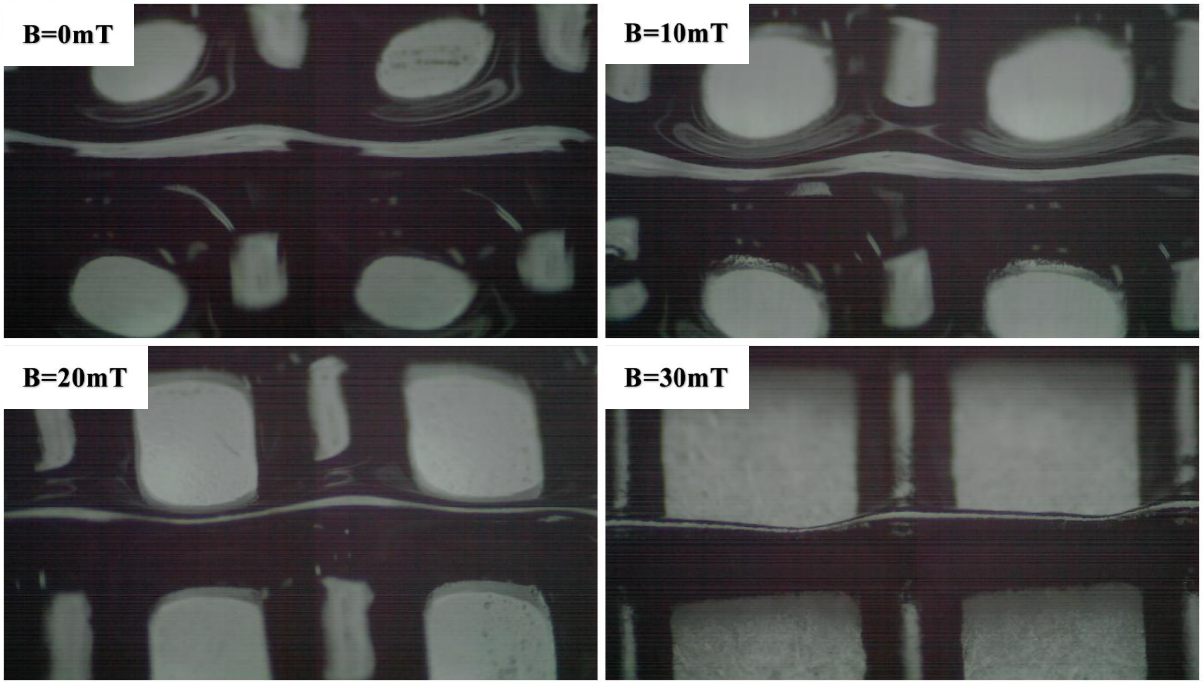

图 4-8 不同磁场强度下智能材料栅格打印实验

如图 4-8 所示，按顺序分别为 0mT 到 30mT 环境下栅格打印情况，从内部空白区域可以看出，随着磁场强度增大，智能材料的扩散会逐渐减小。并且，随着磁场强度增大，两层线之间的高度差越来越明显。因为智能材料的流动性较强，无法挤出如同硅胶那种圆形或者椭圆形截面的线，因此只要求两层线之间具有明显的高度差即可。根据上文单线打印情况以及栅格打印情况综合对比研究，磁场强度为 30mT 时智能材料挤出效果较好。

4.2.3 实体打印

如 4-9 图是在 10mT、30mT、50mT 三种磁场强度的环境下打印的正方形平面，从图中打印情况可以得知当磁场强度过小时，智能材料粘度较低，流动性较强，形态偏液态；当磁场强度过大时，仍会出现挤出不连续的情况，且打出线条的高宽比较高，挤出的线条较窄，相邻两条线之间间隙较大。

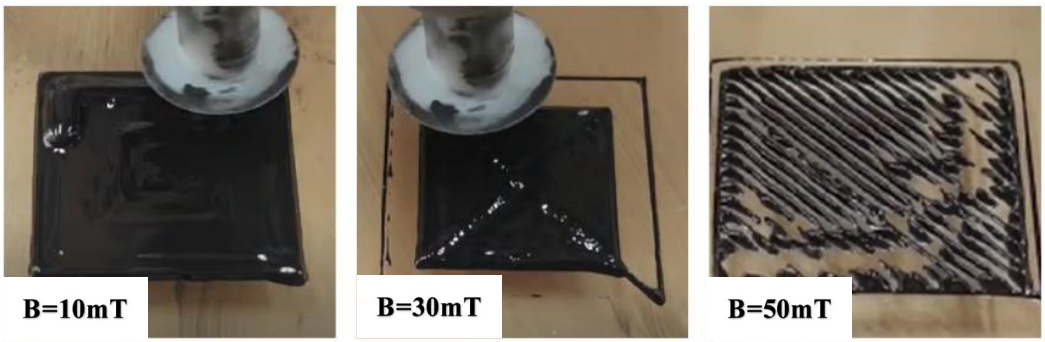

图 4-9　不同磁场强度下平面打印效果对照图

高度打印实验主要研究高度方向的堆叠情况。随着打印层数的变化挤出头所在高度的磁场强度会发生相对衰减，因此随着打印高度增加智能材料的形态会逐渐由类固态向液态转变，最后导致线条挤出不成形，影响打印效果。

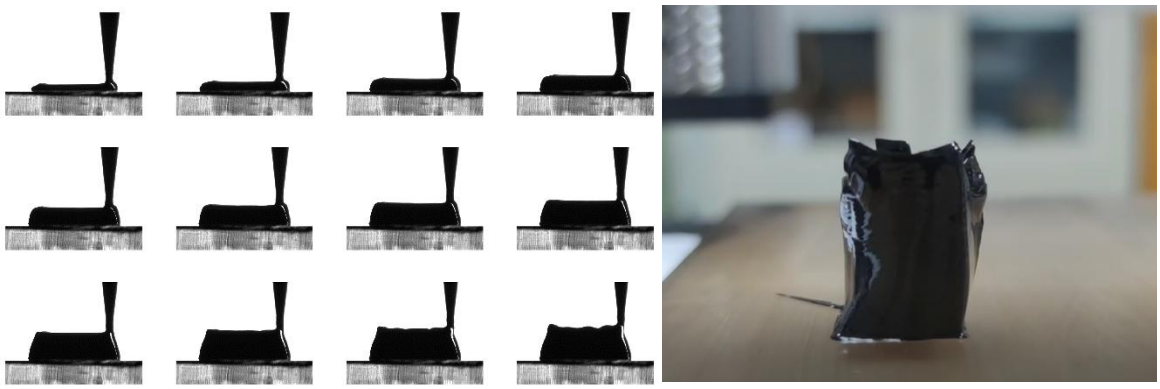

图 4-10　智能材料高度打印实验

如图 4-10 中打印效果所示，由于自重，长方形打印得到的为上窄下宽的梯形结构。并且随着打印层数增加，倾角会越来越大。并且，在达到一定高度之后，打印面会形成两边高中点低的凹陷结构，或者挤出的智能材料无法构成完整的线形，甚至发生打印实体的弯折，影响打印效果，此时的打印高度即为该磁场强度下智能材料打印的最优极限高度。

4.3 复合打印

复合打印比较重要的一点就是硅胶材料与智能材料之间的界面问题，这对复合打印效果影响时非常大的。图中复合打印实验是在硅胶板上对智能材料进行打印，如图4-11。

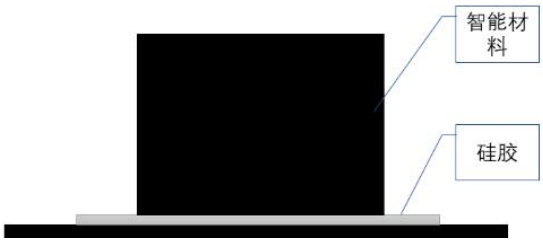

图 4-11 复合打印实验示意图

根据前文实验得到的参数直接进行打印，发现由于底面硅胶板具有打印纹理，表面非平整 的平面，智能材料打印线条难以成型。且随着层数增加，由于磁场的作用，智能材料形成了一根根站立的柱状结构。通过改变磁场强度，发现当磁场强度较小时，由于材料的流动性较强，可以在凹凸不平的硅胶板上形成完整的线条。但此时自支撑能力较弱，打印高度比较低，无法满足打印要求。当加大磁场时，又会因表面不平整影响线的成型，且磁场越大越容易出现柱状结构，如图 4-12。

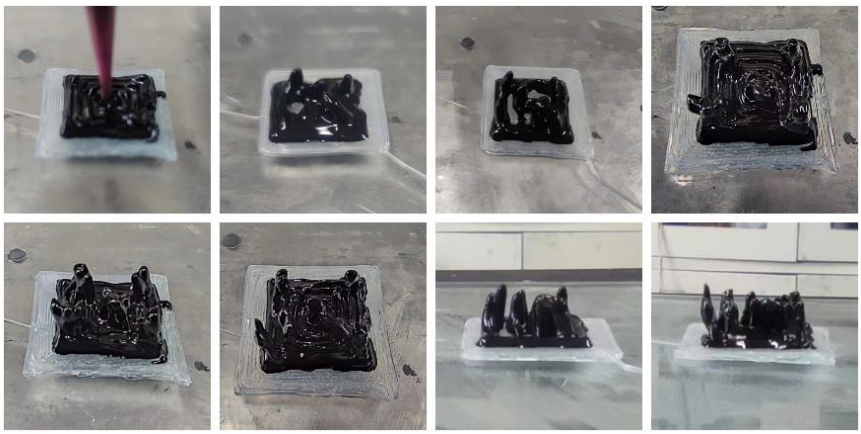

图 4-12 不同磁场强度下复合打印效果

为了改善这一状况，对打印结构进行调整，在硅胶板上进行智能材料打印时先在无磁场条件下打印一层智能材料，此时因为智能材料的流动性比较强，可以形成一个平整的打印面，而后施加磁场对后续的部分进行打印，如图 4-13。

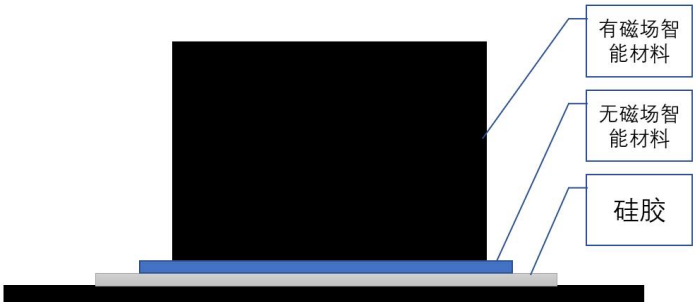

图 4-13　改进后的复合打印结构示意图

如图 4-14 所示，经过结构调整，两种材料的界面问题带来的影响得到了改善，并且打印出的线条分明，无明显的柱状结构，复合打印状况良好。

图 4-14　改进后的复合打印效果图

5 软体机器人设计及驱动

本章在完成前文对两种打印材料特性的研究、4D 打印设备搭建、打印工艺研究的基础上，根据仿生学原理设计、设计了一种仿变形虫的软体机器人，通过双头打印机一体化制作完成，并设计了仿变形虫软体机器人的驱动装置。

5.1 软体机器人设计

5.1.1 仿生学原理

变形虫的躯体只由一个细胞构成，没有特定的形状，可以自由的改变体形。随着原生质层的流动，使身体表层产生不定形的结构，称为“伪足”，而变形虫自身可以借助“伪足”来进行运动。变形虫在进食时，会先伸出“伪足”将食物包围，而后将食物吞入身体内，如图 5-1 所示。而本文所采用的两种打印材料分别为硅胶、智能材料，硅胶外壳在固化后为一层透明、有弹性的膜，而内部的智能材料为液体，打印完成撤去磁场后具有很强的流动性。上述特性非常符合变形虫结构的特点，硅胶打印的外壳可以作为细胞膜，内部的智能液体可以作为细胞内部的原生质层。

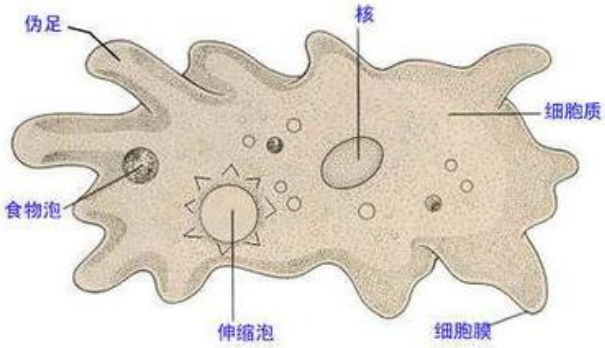

图 5-1 变形虫结构图

5.1.2 结构设计

因为仿变形虫软体机器人主要靠内部智能材料的流动来完成变形，这便要求硅胶软外壳不能具有太高的稳定性，否则会影响软体机器人的变形幅度。根据前文对硅胶单材料实体打印实验，通过减小硅胶软外壳的厚度以及调整曲线的弧度，如图 5-2 所示，可以破坏半球壳的稳定性。

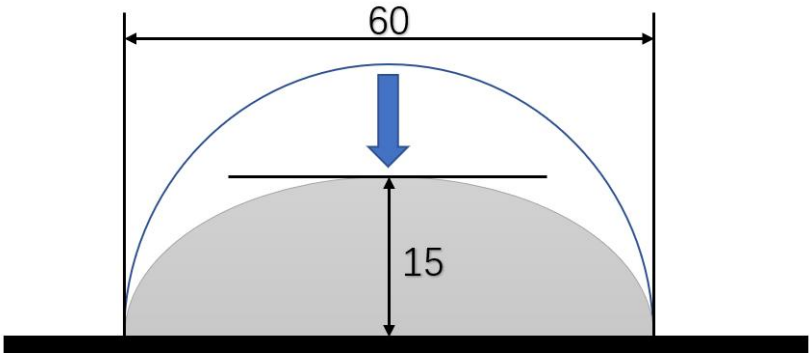

图 5-2 仿变形虫软体机器人形状尺寸示意图

因此，设计软体机器人的基本形状为半椭球体，并根据前文的实验选择合适的硅胶外壳厚度，既保证所打印出来的软体机器人具有较大的变形幅度，又要保证硅胶外壳对内部智能材料具有良好的包覆作用。同时，为了避免打印最外圈智能材料时打印头对已打印硅胶造成干涉，因此在对智能材料进行建模时，特别将智能材料最外围材料去除。软体机器人结构设计图示如图 5-3。

图 5-3 仿变形虫软体机器人结构示意图

5.1.3 步态设计

变形虫运动时会先通过原生质层的流动伸出“伪足”，然后再通过流动使整体大部分流向“伪足”，实现整体移动，然后再将后面部分缩回身体，这样一次移动就完成了。因此，仿变形虫软体机器人的运动可以分解为 4 步，如示意图所示：首先第一个电磁铁通电控制机器人大部分固定在原地，然后第二个电磁铁通电，牵引软体机器人伸出“伪足”，然后第一个磁铁断电，体内的智能材料被牵引，身体大部分流向“伪足”，然后利用硅胶自身的弹性，实现身体回收，这样一个完整的运动就完成了。

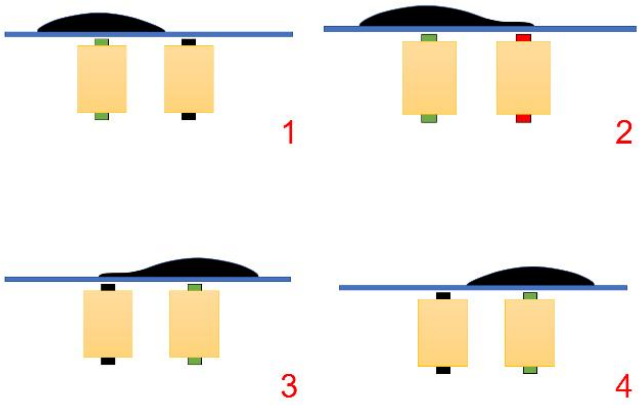

图 5-4 仿软体机器人步态设计图

5.2 软体机器人打印制作

5.2.1 切片设置

将 SolidWorks 中生成的外壳与内部驱动两部分模型存为 stl 通用格式，导入 Ultimaker Cura 软件中，调整好两部分的相对位置与方向，并设分别设置好两个打印头打印的部分。然后根据前文的单材料打印以及多材料复合打印实验确定的层高、线宽等参数，在软件中进行配置，切片如图 5-5 所示。所有配置完成后，将切片产生的 G 代码存入 SDcard 中即可。

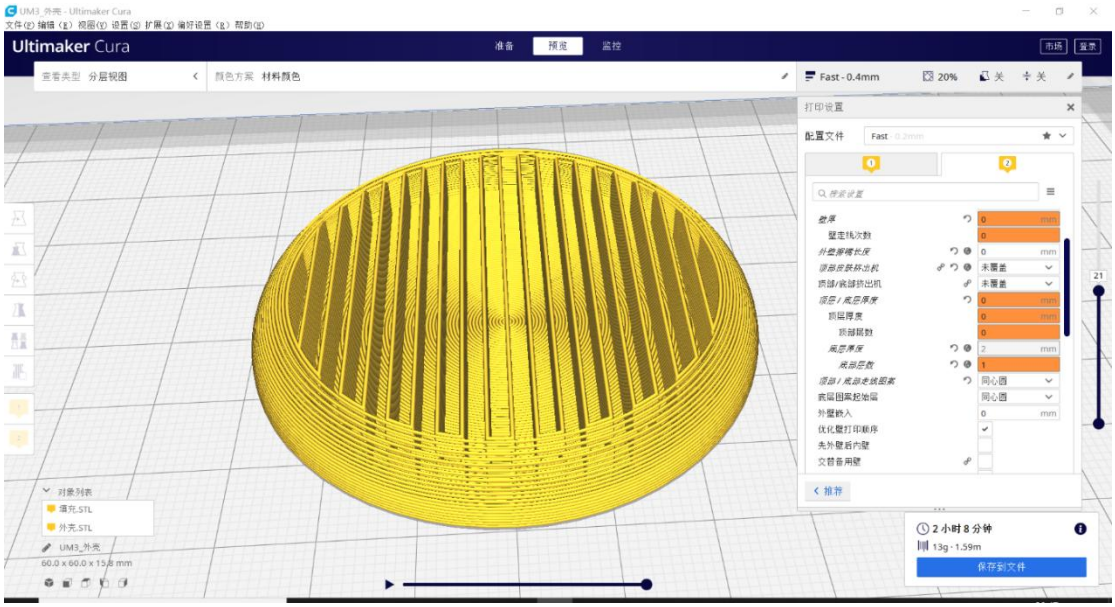

图 5-5 仿变形虫软体机器人切片图

根据前文复合打印实验，为了避免硅胶材料与智能材料之间界面的影响，在底部硅胶打印完成后，需先在无磁场环境下打印一层智能材料，而后施加磁场打印其他部分。因此，填充头设置中外壳选项的底部层数需设为 1 。

5.2.2 软体机器人打印过程

将切片软件生成的 G 代码导入到 SD 卡中，插入控制板读取即可进行仿变形虫软体机器人的打印，打印过程如图 5-6 所示。

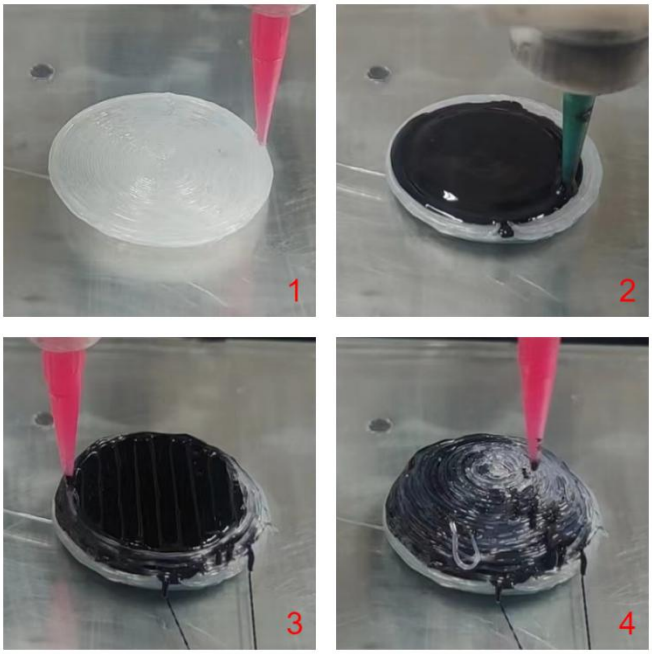

图 5-6 软体机器人打印过程

如图，先完成底层硅胶打印，而后在无磁场环境下打印一层平整的智能材料层，然后施加磁场对后续部分进行打印，封顶即打印完毕。制作完成后撤去磁场，因为磁场的消失，智能材料粘度降低，支撑作用减弱，软体机器人会出现塌陷现象，如图 5-7 所示。

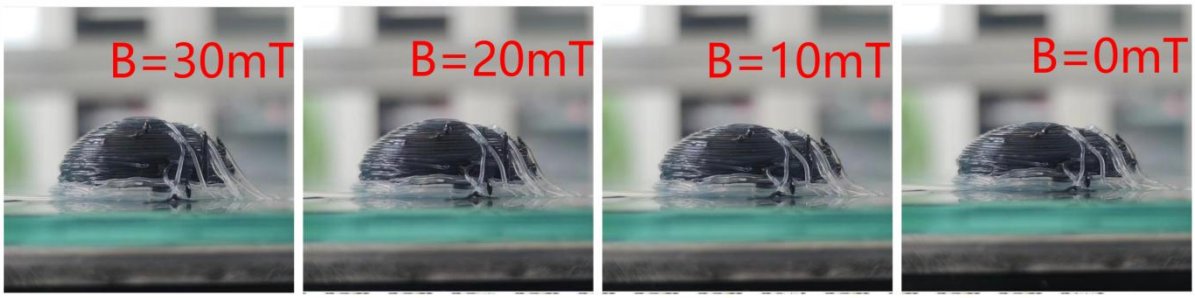

图 5-7 软体机器人高度变化图

5.2.3 软体机器人打印实验

仿变形虫软体机器人打印实现后，针对软体机器人内部智能材料的填充度 H 进行打印实验，打印效果对比如图 5-8 所示。

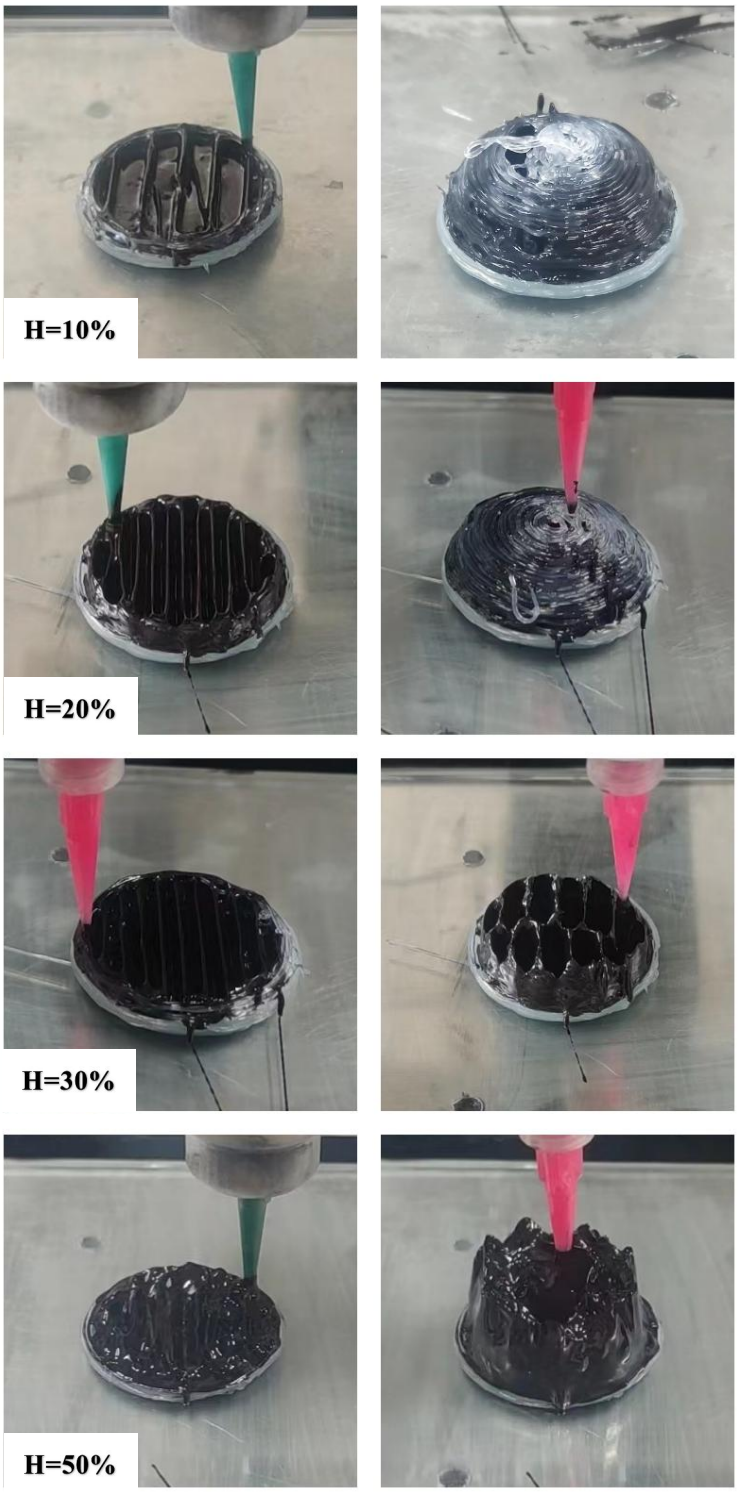

图 5-8　不同填充度复合打印实验

图中从上到下分别是填充率为 10%、20%、30%、50%的复合打印效果。当填充率比较低时，因为智能材料走线较稀疏，对硅胶的支撑作用达不到成型标准，因此出现部分塌陷、密封不全等情况；当填充率过高时，因为智能材料在磁场下的自支撑性能比较好，智能材料的支撑反而阻碍硅胶材料的打印，出现硅胶材料嵌入智能材料中、无法封顶等现象，因此需要选择合适的填充度。

5.3 软体机器人驱动系统

5.3.1 驱动系统设计

软体机器人主要通过电磁铁的吸引来完成运动，因此本章设计了一个可控的磁性阵列，用于对软体机器人进行控制，用于实现软体机器人的运动。该驱动阵列为 6×6 的电磁铁阵列，由 36 个电磁铁组成。图 5-9 中按顺序分别为触控板、电磁炮、PLC、磁性阵列。

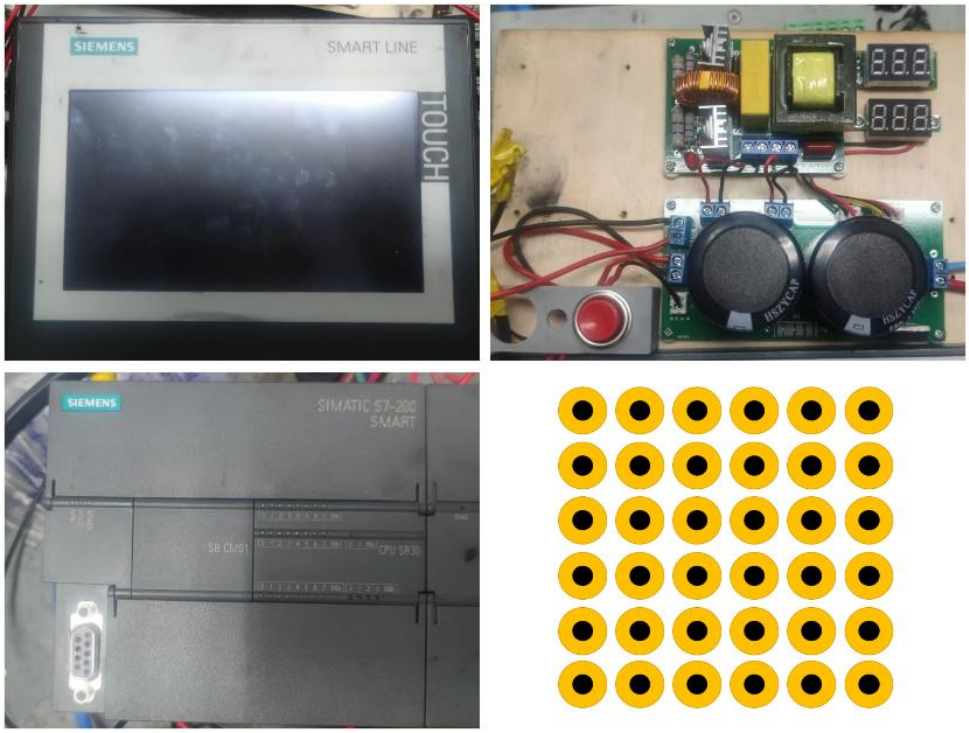

图 5-9 软体机器人控制系统

由于电磁铁恒压状态下能提供的磁场比较小，因此加装电磁炮硬件电路，通过电容充放电提供更强的电压，来提高电磁铁驱动的磁场强度。触控板通过 PLC 负责对整个驱动系统进行控制。

5.3.2 软体机器人运动展示

通过磁性阵列施加磁场，吸引仿变形虫软体机器人伸出两条“伪足”，第一条伪足伸出过程如图 5-10 所示，第二条伪足伸出过程如图 5-11 所示：

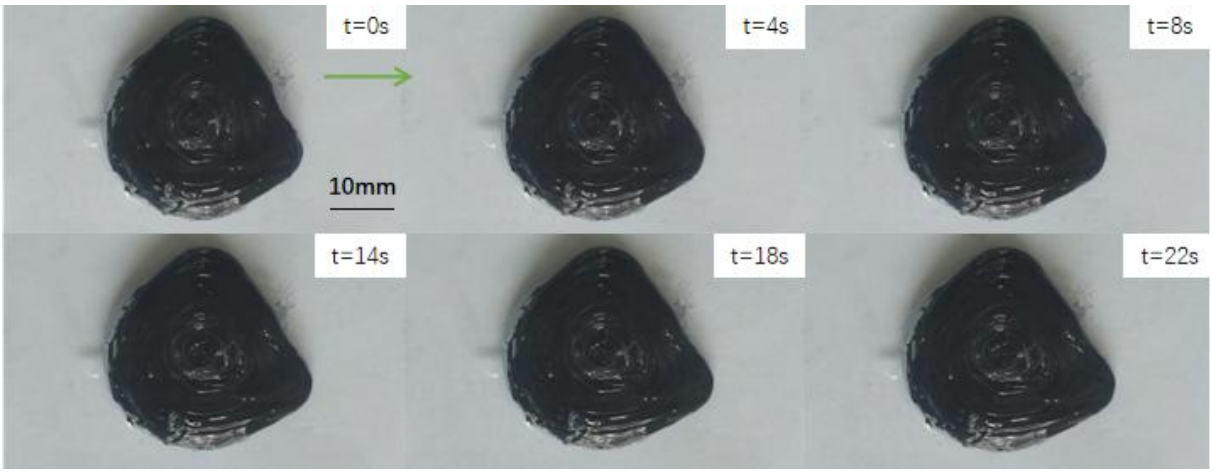

图 5-10 仿变形虫软体机器人伸出第一条“伪足”

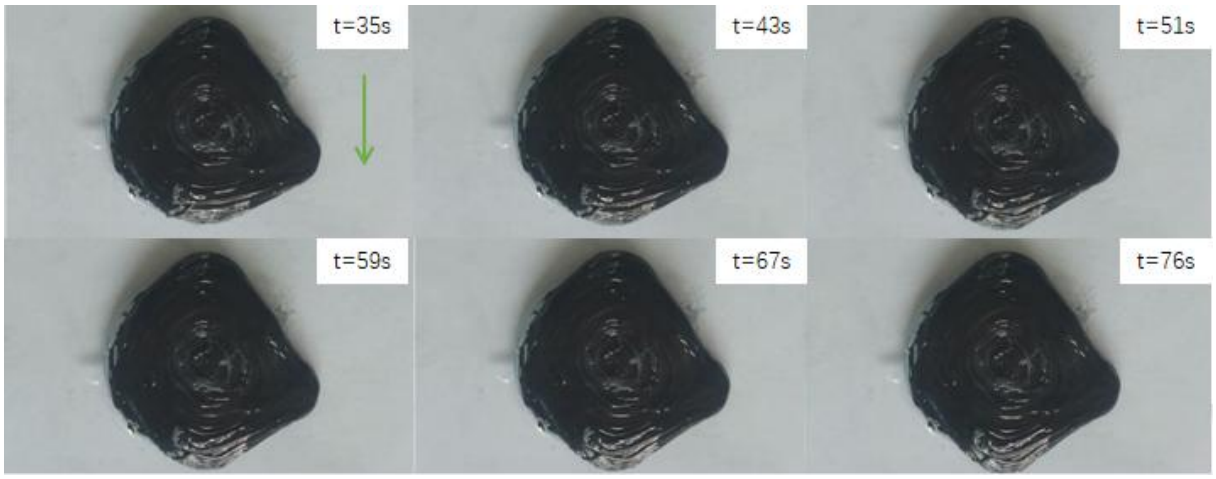

图 5-11 仿变形虫软体机器人伸出第二条“伪足”

6 经济性、环保性分析

（1）本文的研究遵循经济性、环保性原则。

（2）研究用到的材料为硅胶、二氧化硅等，均对环境无污染，且实验过程中不会出现有毒有害物质，对环境无破坏。

（3）且文中软体机器人的制作方法为 4D 打印，4D 打印可以实现对材料的精细化控制，避免了传统制作方法中筑模等过程中造成的大量材料浪费。

（4）4D 打印机构建用到的大部分材料为铝型材，在保证可靠性的情况下实现了结构轻量化，并极大的降低了成本。

（5）除必须更换的挤出头外，打印用的其他耗材均反复使用，避免浪费。

7 总结与展望

本研究完成了从设备搭建、材料制备表征、打印实验、到软体机器人设计制作以及驱动的整个流程：

（1）针对本课题要研究的4D打印工艺，本文自主搭建了一种可以对硅胶与智能材料进行复合打印的双头打印机，实现了硅胶与智能材料的打印。

（2）针对制作软体机器人用到的硅胶与智能材料，本文通过流变仪对其进行了扫描，研究了不同比例 SiO_2 对硅胶粘度及粘度随时间变化的影响，验证了硅胶与智能材料剪切变稀的特性，证明了两种材料作为打印原材料的可打印性。

（3）分别对硅胶与智能材料进行打印实验，系统的研究了挤出速度对硅胶线形的影响、硅胶粘度对线与线之间搭接的影响、层高对打印效果的影响等，通过测量接触角探究了磁场强度对智能材料挤出成型的影响，探究了磁场环境下智能材料的自支撑效果。通过对两种材料的复合打印解决了界面问题带来的影响。

（4）根据变形虫的运动原理设计制作了仿变形虫软体机器人，完成了结构设计、步态设计，并通过双头打印机一体化打印制作而成，验证了4D打印在软体机器人制作中的可行性。通过对两种材料的打印经验实现了软体机器人打印的细节调整、精细化控制，对软体机器人打印工艺进行了优化。并设计了一套与之配套的驱动系统。

本研究通过无数次打印实验，完善了硅胶与智能材料的4D打印工艺。将磁性材料通过4D打印技术运用到软体机器人设计制作中，突破了现有软体机器人驱动材料和支撑材料难以结合设计的技术瓶颈，并开发出一种新型磁控软体机器人。

未来继续深入研究软外壳材料的固化成型，使整个打印过程更加可控，并继续优化打印工艺，提高打印精度以及打印质量，为软体机器人的设计制作提供技术保证。软体机器人的仿生对象由变形虫、尺蠖等简单生物逐步向复杂生物转变，结构上、运动方式上更加复杂，种类更加繁多。优化对软体机器人的控制，让软体机器人向智能化方向发展。

参考文献

[1] 王永青,邓建辉,李特,刘阔,刘海波,马书根.软体机器人 3D 打印制造技术研究综述[J].机械工程学报，2021，57(15):186-198.

[2] 曹玉君,尚建忠,梁科山,范大鹏,马东玺,唐力.软体机器人研究现状综述[J].机械工程学报，2012，48(03):25-33.

[3] ZHAO Xianfeng, TANG Pengfei, SHI Hongyan, et al. Research and Application Progress of 4D Printing Technology[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(3): 34-46.

[4] Shepherd RF, Ilievski F, Choi W, Morin SA, Stokes AA, Mazzeo AD, Chen X, Wang M, Whitesides GM. Multigait soft robot. Proc Natl Acad Sci U S A. 2011 Dec 20;108(51):20400-3. doi: 10.1073/pnas.1116564108. Epub 2011 Nov 28. PMID: 22123978; PMCID: PMC3251082.

[5] FLOREZ, JUAN MANUEL, SHIH, BENJAMIN, YIXIN BAI, et al. Soft pneumatic actuators for legged locomotion[C]. //2014 IEEE international conference on robotics and biomimetics: ROBIO 2014, Bali, Indonesia, 5-10 December 2014, pages 1-872, [v.1]. 2014:27-34.

[6] 费燕琼,庞武,于文博.气压驱动软体机器人运动研究[J].机械工程学报,2017,53(13):14-18.

[7] Rafsanjani A, Zhang Y, Liu B, Rubinstein SM, Bertoldi K. Kirigami skins make a simple soft actuator crawl. Sci Robot. 2018 Feb 21;3(15):eaar7555. doi: 10.1126/scirobotics.aar7555. Epub 2018 Feb 21. PMID: 33141681. [27] TIEFENG, ZHANAN, ZOU, et al. Agile and Resilient Insect-Scale Robot [J]. Soft robotics, 2018.

[8] Lin HT, Leisk GG, Trimmer B. GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot. Bioinspir Biomim. 2011 Jun;6(2):026007. doi: 10.1088/1748-3182/6/2/026007. Epub 2011 Apr 26. PMID: 21521905.

[9] SEOK, S., ONAL, et al. Meshworm: A Peristaltic Soft Robot With Antagonistic Nickel Titanium Coil Actuators[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics: A joint publication of the IEEE Industrial Electronics Society and the ASME Dynamic Systems and Control Division,2013,18(5):1485-1497.

[10] UMEDACHI, TAKUYA, TRIMMER, BARRY A.. Design of a 3D-printed soft robot with posture and steering control[C]. //2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation: 2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), May 31 - June 7 2014, Hong Kong. 2014:2874-2879.

[11] Gait Study and Pattern Generation of a Starfish-Like Soft Robot with Flexible Rays Actuated by SMAs[J]. 仿生工程学报（英文版）,2014,11(3):400-411. DOI:10.1016/S1672-6529(14)60053-6.

[12] WANG, WEI, LEE, JANG-YEOB, RODRIGUE, HUGO, et al. Locomotion of inchworm-inspired robot made of smart soft composite (SSC)[J]. Bioinspiration & biomimetics,2014,9(4). DOI:10.1088/1748-3182/9/4/046006.

[13] C. T. Nguyen et al., "Printable monolithic hexapod robot driven by soft actuator," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015, pp. 4484-4489, doi: 10.1109/ICRA.2015.7139820.

[14] M. Duduta, D. R. Clarke and R. J. Wood, "A high speed soft robot based on dielectric elastomer actuators," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017, pp. 4346-4351, doi: 10.1109/ICRA.2017.7989501.

[15] Rafsanjani A, Zhang Y, Liu B, Rubinstein SM, Bertoldi K. Kirigami skins make a simple soft

actuator crawl. Sci Robot. 2018 Feb 21;3(15):eaar7555. doi: 10.1126/scirobotics.aar7555. Epub 2018 Feb 21. PMID: 33141681. [27] TIEFENG, ZHANAN, ZOU, et al. Agile and Resilient Insect-Scale Robot [J]. Soft robotics, 2018.

[16] 李庆中,李晓丹,于福杰,陈原.介电弹性体式蛙型仿生软体机器人[J/OL].兵工学报:1-10[2022-01-14].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20211129.1002.002.html.

[17] Shen, Helen. (2016). Beyond Terminator: squishy 'octobot' heralds new era of soft robotics. Nature. 10.1038/nature.2016.20487.

[18] Hu W, Lum GZ, Mastrangeli M, Sitti M. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion. Nature. 2018 Feb 1;554(7690):81-85. doi: 10.1038/nature25443. Epub 2018 Jan 24. PMID: 29364873.

[19] BLACKERY J, MITSOULIS E. Creeping motion of a sphere in tubes filled with a bingham plastic material[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1997, 70(1/2):59-77.

[20] 苏梦. 磁控软体微型机器人的优化设计与控制[D].中国科学院大学(中国科学院深圳先进技术研究院),2020.DOI:10.27822/d.cnki.gszxj.2020.000119.7.

[21] Li, An & Li, Huizeng & Zheng, li & Zhao, Zhipeng & Kaixuan, Li & Li, Mingzhu & Song, Yanlin. (2020). Programmable droplet manipulation by a magnetic-actuated robot. Science Advances. 6. eaay5808. 10.1126/sciadv.aay5808.

[22] 胡兵兵. 基于 3D 打印技术的软体机器人的设计与实验研究[D]. 苏州大学,2019.DOI:10.27351/d.cnki.gszhu.2019.001807.

[23] 武永利.滚珠丝杠的选用与校核[J].机械制造与自动化,2003(05):41-43.

[24] BOBAK MOSADEGH, PANAGIOTIS POLYGERINOS, CHRISTOPH KEPLINGER, et al. Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly[J]. Advanced functional materials,2014,24(15):2163-2170.

[25] 党智敏,王岚,王海燕.新型智能材料:电活性聚合物的研究状况[J].功能材料,2005(07):13-19.

[26] Wehner, M., Truby, R., Fitzgerald, D., Mosadegh, B., Whitesides, G., Lewis, J., & Wood, R. (2016). An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. Nature, 536(7617), 451-455. http://dx.doi.org/10.1038/nature19100 Retrieved from https://escholarship.org/uc/item/1182x4zm

[27] Joshi, Siddharth & Rawat, Krishna & C, KARUNAKARAN & Rajamohan, Vasudevan & Mathew, Arun & Koziol, Krzysztof & Thakur, Vijay Kumar & Balan, A S S. (2019). 4D printing of materials for the future: Opportunities and challenges. Materials Today. 100490. 10.1016/j.apmt.2019.100490.

[28] CHUA C K, LEONG K F. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications: Fourth Edition of Rapid Prototyping [M]. 3D Printing and additive manufacturing: Principles and applications (with companion media pack) - fourth edition of rapid prototyping, 2014.

[29] Singh, Rupinder & Singh, Varinderjit & Saini, Manohar. (2010). Experimental Investigations for Rapid Moulding Solution of Plastics Using Polyjet Printing. Materials Science Forum. 701. 10.1115/IMECE2010-37047.

[30] LISEN, DONG, LONGTENG, et al. A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators [J]. Sensors and Actuators, A Physical, 2018, 273: 285-92.

[31] Lewis, J. (2006), Direct Ink Writing of 3D Functional Materials. Adv. Funct. Mater., 16: 2193-2204. https://doi.org/10.1002/adfm.200600434

[32] OLAKANMI, E. O., COCHRANE, R. F., DALGARNO, K. W.. A review on selective laser

sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties[J]. Progress in materials science,2015,74(Oct.):401-477. DOI:10.1016/j.pmatsci.2015.03.002.

[33] LIU, YANG, YANG, YONGQIANG, WANG, DI. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,87(1/4):647-656. DOI:10.1007/s00170-016-8466-y.

[34] 王瑞晨,刘秀军,张静,等. 刺激响应形状记忆材料的 4D 打印及其研究进展[J]. 功能材料,2021,52(10):10069-10074. DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2021.10.009.

[35 张禹,王宁,赵文川,陆登宇.蠕动式软体管道机器人设计及测试[J].食品与机械,2020,36(07):82-86.DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2020.07.017.

[36] 邵城,滕燕.环纵肌复合的气动仿蠕虫机器人研究[J].机械设计与制造工程,2019,48(05):40-45.

[37] 张忠强,邹娇,丁建宁,宋振玲,程广贵,王晓东,郭立强.软体机器人驱动研究现状[J].机器人,2018,40(05):648-659.DOI:10.13973/j.cnki.robot.180272.

致 谢

光阴荏苒，转眼间大学四年的生活即将画上句号。对这个生活了四年的地方，更多的是不舍。校园见证了我从一个懵懂的高中生逐步成长为一个合格的本科毕业生的整个过程，是我在这遥远的异地城市的另一个家。从选题到现在，经过半年多的打磨，毕业论文最终完稿。回首大半年来由生疏到逐渐轻车熟路，一次次尝试，一次次失败，一次次总结，一次次提高，其间种种离不开大家的关怀与帮助，此刻向他们表达最真挚的感谢。

首先，我要感谢我的导师李振坤老师，李老师为人谦逊，平易近人。从开始选题到论文完成，每次与李老师交流的过程中，我都能有所收获。李老师提出的一些指引性的建议不仅有助于我科研能力的提升，更给我人生未来的发展规划拨开了迷雾。无论是生活中还是学习中，每当遇到困难，李老师总会竭尽所能为我提供帮助。尤其是考研调剂那段时间里，李老师为我四处奔走，并在下半年复习为我提供住处等等，李老师为我费了很多心思。每当我有一些好的想法，他也从来不吝啬自己的夸奖。与李老师相处的这大半年里，李老师的肯定极大的增长了我的自信心。面对比较紧张的科研条件时，李老师竭尽所能为我们创造条件，让我们能够全身心的投入到实验中。李老师对科研的追求以及对人生的规划将影响我的一生，他对我的关心和教诲我更将永远铭记。借此机会，我谨向李老师致以深深的谢意。

其次，我还要感谢实验室的崔红超老师，在中期答辩准备期间对我准备的材料提出了宝贵的修改意见，并在考研调剂期间向我提供了很多帮助。我还要感谢我的班主任何新智老师，从大一工图、机械制图课开始带了我四年，当我有困难向何老师求助时他总会尽力帮助我。

同时也感谢实验室的学长、其他老师，他们以极大的热情，帮助我完成了相关资料的收集、专业知识的补充以及给予我实验指导等，感谢他们对我的大力帮助与支持。感谢国家、党、学校的培养，感谢父母二十几年的养育之恩，以及他们给予的鼓励与帮助。

最后，我要感谢参与我论文评审和答辩的各位老师，他们给了我一个审视几年来学习成果的机会，让我能够明确今后的发展，他们对我的帮助是一笔无价的财富。我将在今后的工作、学习中加倍努力，以期能够取得更多成果回报他们、回报社会。再次感谢他们，祝他们一生幸福、安康！

附 录

附录 A 文献翻译

4D 打印和机器人技术

Carmela de Marco, Salvador Pané, Bradley J. Nelson

形状记忆材料和 2D 或 3D 打印技术相结合，形成了一种将会推动机器人技术发展的新范例。

如果我们后退一步，想想十年前机器人学家如何将所有的机构标准化，以及我们如何主要局限于工厂、钻头、车床和通过互联网订购零件，那么三维（3D）打印在机器人领域的巨大影响就变得显而易见了。这种“新”的制造工艺（花了 30 多年的时间才实现）已经变得如此普遍，以至于我们经常担心年轻的机械工程师不再擅长许多我们认为很基础的技能。随着 3D 打印不断深入社会，甚至进入超市，这项技术的下一阶段已经显而易见了。通过将形状记忆材料（SMM）等一些新型材料引入 3D 打印，这项技术就可以与折纸机器人等自组织概念相结合，创造出一种新的范例。这通常被称为“4D 打印”，“4D 打印”是 Skylar Tibbits 在其 2013 年 TED 演讲（www.youtube.com/watch？v=0gMCZFHv9v8）中提到的一个术语，他在演讲中提到了具有嵌入式时空转换能力的 3D 打印结构。我们现在开始看到各种关于这些类型结构的报告，这些结构在印刷后会经历形状变换。该领域正在迅速崛起，许多新的类别的设备正在被提出。

与机器人的许多领域一样，4D 打印从对材料的关注开始（1）。虽然打印 3D 结构然后将其自身转换为新形状的过程可以清楚地归类为 4D 打印，但我们不一定需要从 3D 结构开始。正如最近报道的二维水凝胶形状变形结构（2，3）和二维自折叠弹性体（4），如果我们打印出二维结构，然后发生了平面外的构造变化，那么我们还是创造出了一个 4D 打印结构。我们还可以将打印出来的折纸机器人分类为 4D 打印机器人的一个子集（5）。更广泛地说，不考虑其预转换状态是 2D 打印还是 3D 打印，4D 打印机器人就是对刺激有响应的 3D 结构。4D 打印机器人有两种主要方法。我们可以 2D 打印一个智能材料和传统材料的结合体，来实现非均匀的应力。或者，我们可以 3D 打印形状记忆材料。目前的研究主要集中在 4D 打印带驱动的智能机器人组件上。

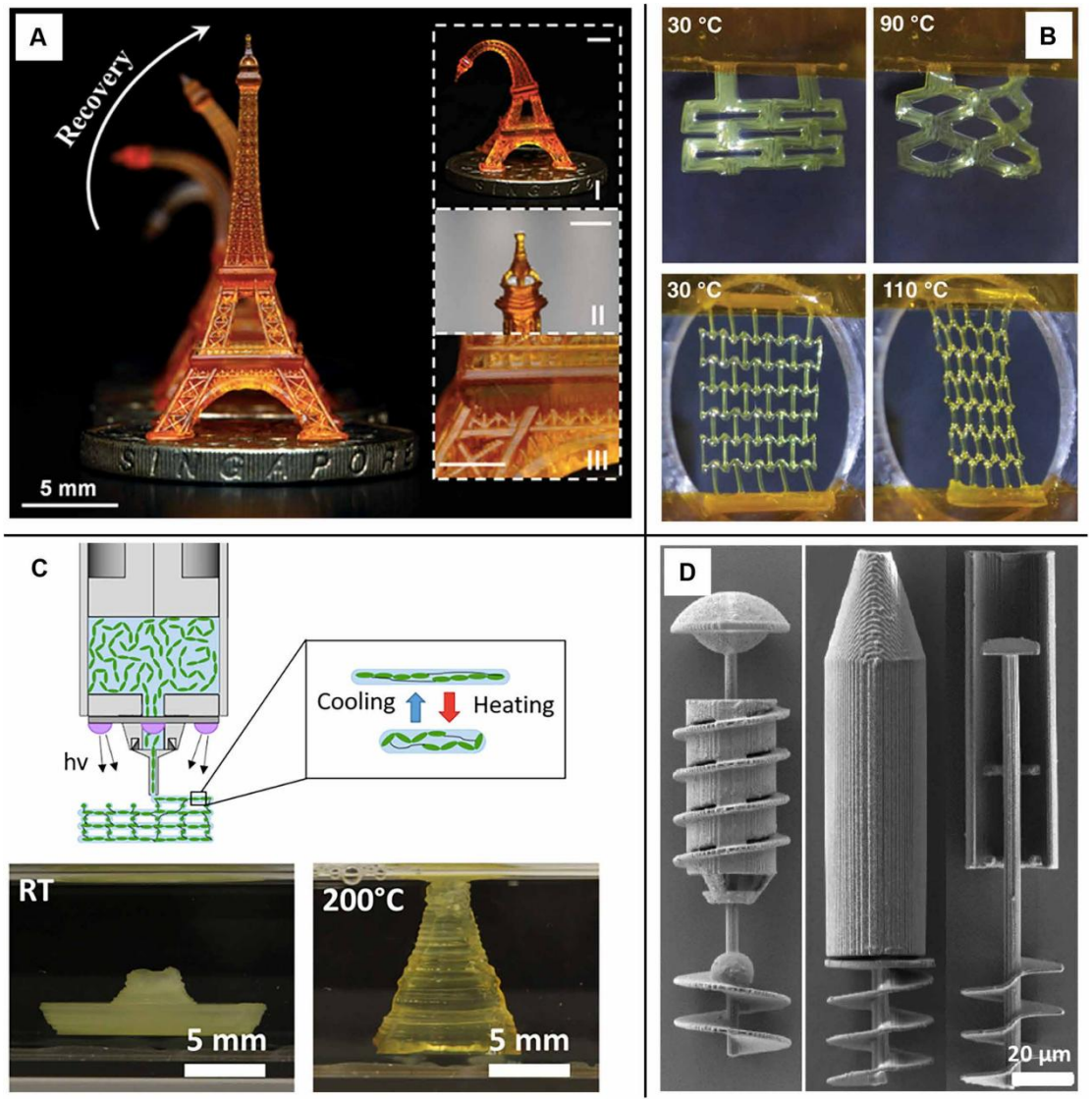

图 1 四个不同的实例。单项 SMM 的 4D 打印(A)(6)，基于 LCEs 的双向 SMM 的 4D 打印[(B)(8)和(C)(9)]，以及通过 2PP 获得的无线控制阿基米德螺旋泵的 3D 打印(D)(10)。RT，室温。

1 4D 打印双向执行器

SMM 是设计下一代智能机器人 4D 打印执行器的关键材料。依据形态变换，SMM 有两种类型：单向和双向。单向 SMM 是可以编程为特定形状的 SMM。当受到外部刺激（如温度）时，它们会经历一种形状变换，这种变换在刺激被移除后仍然存在。相反，双向 SMM 可以通过切换刺激在两个不同形状之间可逆变形，本质上是一种复杂的双晶片机构。迄今为止，大多数 4D 打印的 SMM 都是单向的（图 1A）（6）。Qi 等人（7）报告了首批具有双向驱动的 4D 打印组件之一。他们的方法创造了两种不同聚合物成分的复合结构，一种是响应性水凝胶，另一种是单向形状记忆聚合物。在这个结

合体中，两种不同构型之间的切换是由水凝胶的膨胀或收缩引起的，而形状记忆聚合物作为一种调节形态转变发生的时间的组分。双向变形显示为多个 2D 和 3D 构造，如条带、环、周期结构和折纸结构。其他研究人员最近开发了 4D 打印液晶弹性体（LCE），能够快速、可逆的执行机器人的功能（图 1、B 和 C）（8、9）。LCE 会在温度或光线等外部刺激下发生较大且可逆的形状变化。

2 用于未来医疗设备的 4D 打印软机器人组件

随着机器人技术在医疗领域的日益普及，4D 打印机器人驱动器，尤其是由软组件制成的驱动器，将在未来医疗机器人技术的发展中发挥关键作用。大量研究集中在了用于医疗机器人应用的软材料的开发上，因为这些材料具有生物相容性、生物降解性和适应性等特征，这些特征对于医疗介入工具至关重要。虽然我们已经看到了 3D 打印软机器人组件的巨大发展，但实现 3D 软智能材料小型化的方法尚未开发出来。4D 打印的小规模软结构将使我们能够创造出微创手术工具、智能微型支架和微型扩张器，以及小型自适应药物输送胶囊。然而，3D 打印技术还不能生产具有 3D 亚微米细节的微型智能材料；在某些极端情况下，只有最小尺寸约为 200 微米才可以实现。一种很有前途的技术是双光子聚合（2PP），也称为 3D 激光光刻技术，它能够制造高度从几百纳米到几毫米，层厚低于 1 微米的高分辨率的 3D 微结构。已经报道了使用这种制造方法的高度复杂的小型机器人设备。例如，Huang 等人（10）使用 2PP 制造具有无线控制阿基米德螺旋泵送机制的磁性微转运体（图 1D）。然而，使用 2PP 进行软质微结构的 4D 打印尚未广泛报道。

3 看法

无论机器人系统是由一组带有末端执行器的手臂组成，还是由微型和纳米级组件组成，在这些设备中加入 4D 打印材料将实现目前尚未实现的新功能。尽管大量研究致力于生产 3D 打印微型机器人工具，但这些工具通常由无反应、坚硬的材料制成。由于现有 3D 打印技术在智能材料小型化方面的挑战，4D 打印在小型机器人领域的应用仍未得到探索。制造由双向响应材料制成的任意形状对未来机器人驱动动器的成功开发也至关重要。集成其他材料，如磁或光响应微纳结构，形成 4D 打印复合组件，也将为智能机器人驱动器带来新的机遇。我们鼓励机器人界从探索全新的材料和制造方法，使 4D 打印与 3D 打印一样无处不在。

4 引用

[1] P. Fischer, B. Nelson, G.-Z. Yang, New materials for next-generation robots. Sci. Robot. 3, eaau0448 (2018).

[2] A. Kirillova, R. Maxson, G. Stoychev, C. T. Gomillion, L. Ionov, 4D biofabrication using shape-morphing hydrogels. Adv. Mater. 29, 1703443 (2017).

[3] S. Naficy, R. Gately, R. Gorkin III, H. Xin, G. M. Spinks, 4D printing of reversible shape morphing hydrogel structures. Macromol. Mater. Eng. 302,1600212 (2017).

[4] Z. Ding, C. Yuan, X. Peng, T. Wang, H. J. Qi, M. L. Dunn, Direct 4D printing via active composite materials. Sci. Adv. 3, e1602890 (2017).

[5] D. Rus, C. Sung, Spotlight on origami robots. Sci. Robot. 3, eaat0938 (2018).

[6] Q. Ge, A. H. Sakhaei, H. Lee, C. K. Dunn, N. X. Fang, M. L. Dunn, Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. Sci. Rep. 6,31110 (2016).

[7] Y. Mao, Z. Ding, C. Yuan, S. Ai, M. Isakov, J. Wu, T. Wang, M. L. Dunn, H. J. Qi, 3D printed reversible shape changing components with stimuli responsive materials. Sci. Rep. 6, 24761 (2016).

[8] M. López-Valdeolivas, D. Liu, D. J. Broer, C. Sánchez-Somolinos, 4D printed actuators with soft-robotic functions. Macromol. Rapid Commun. 39, 1700710 (2017).

[9] C. P. Ambulo, J. J. Burroughs, J. M. Boothby, H. Kim, M. R. Shankar, T. H. Ware,Four-dimensional printing of liquid crystal elastomers. ACS Appl. Mater. Interfaces 9, 37332－37339 (2017).

[10] T.－Y. Huang, M. S. Sakar, A. Mao, A. J. Petruska, F. Qiu, X.－B. Chen, S. Kennedy, D. Mooney, B. J. Nelson, 3D printed microtransporters: compound micromachines for spatiotemporally controlled delivery of therapeutic agents. Adv. Mater. 27, 6644－6650 (2015)

5 致谢

C.d.M.感谢玛丽·斯科多斯卡·居里个人研究金（Micromagnetofludics，编号702128）。

附录 B 外文文献

SCIENCE ROBOTICS | FOCUS

MANUFACTURING

4D printing and robotics

Carmela de Marco, Salvador Pané, Bradley J. Nelson*

Copyright © 2018 The Authors, some rights reserved; exclusive licensee American Association for the Advancement of Science. No claim to original U.S. Government Works

Shape-memory materials and two- or three-dimensional printing techniques combine to form a new paradigm that will advance robotics.

If one takes a step back and considers how roboticists prototyped nearly all robotic mechanisms a decade ago and how we were primarily limited to mills, drills, lathes, and ordering parts over the internet, the dramatic impact of three-dimensional (3D) printing on the field of robotics becomes obvious. This "new" manufacturing process (that took over three decades to come to fruition) has become so ubiquitous that we often worry that young mechanical engineers are no longer adept at many of the manufacturing skills we consider to be fundamental. As 3D printing continues to penetrate into society, even into supermarkets, the next phase of this technology has become apparent. By bringing new classes of materials into 3D printing such as shape-memory materials (SMMs), this technology can be integrated with self-organizing concepts such as origami robots to create a new paradigm. This is often referred to as "4D printing," a term credited to Skylar Tibbits in his 2013 TED talk (www.youtube.com/watch?v=0gMCZFHv9v8) in which he referred to 3D-printed structures with an embedded capability of spatiotemporal transformation. We are now beginning to see reports on a variety of these types of structures that undergo shape transformations after being printed. The field is rapidly emerging, and many new classes of devices are being proposed.

As with many areas of robotics, 4D printing begins with a focus on materials (*1*). While a process that prints a 3D structure that then transforms itself into a new shape can be clearly categorized as 4D printing, we do not necessarily need to start with 3D structures. If we print 2D structures that then undergo an out-of-plane conformation change, we have also created a 4D-printed structure, as recently reported for 2D hydrogel shape-morphing structures (*2*, *3*) and for 2D self-folding elastomers (*4*). We can also categorize printed origami robots as a subset of 4D-printed robotics (*5*). More broadly, 4D-printed robots are stimuli-responsive 3D structures, regardless of whether their pretransformation state was 2D- or 3D-printed. There are two main approaches for 4D-printing robots. We can 2D-print a combination of smart and conventional materials to achieve anisotropic stresses. Alternatively, we can 3D-print shape-memory materials. Current research is focused primarily on 4D printing smart robotic components with actuation.

4D-PRINTED TWO-WAY ACTUATORS

SMMs are key materials for engineering the next generation of smart robotic 4D-printed actuators. There are two types of SMMs in terms of their morphological transformations: one-way and two-way. One-way SMMs are those that can be programmed into a specific shape. Upon an external stimulus, such as temperature, they undergo a shape transformation that remains once the stimulus is removed. Conversely, two-way SMMs can reversibly morph between two different shapes by a switching stimulus, essentially a complex bimorph mechanism. To date, most 4D-printed SMMs are one-way (Fig. 1A) (*6*). One of the first 4D-printed components with two-way actuation was reported by Qi *et al.* (*7*). Their approach created a composite structure of two different polymer components, a responsive hydrogel and a one-way shape-memory polymer. In this combination, switching between two different configurations is caused by swelling or shrinking of the hydrogel, while the shape-memory polymer acts as a component for regulating the time in which the morphological transformation occurs. Two-way morphing was shown with several 2D and 3D constructs, such as strips, rings, periodic structures, and origami architectures. Other researchers have recently 4D-printed liquid crystal elastomers (LCEs) capable of performing rapid and reversible robotic functions (Fig. 1, B and C) (*8*, *9*). LCEs undergo large and reversible shape transformations in response to external stimuli such as temperature or light.

4D-PRINTED SOFT ROBOTIC COMPONENTS FOR FUTURE MEDICAL DEVICES

With the increasing adoption of robotics in health care, 4D-printed robotic actuators, especially those made of soft components, will play a crucial role in the development of future medical robotic technologies. Considerable research has focused on the development of soft materials for medical robotic applications because these materials exhibit characteristics—such as biocompatibility, biodegradability, and adaptability—that are essential for medical interventional tools. Although we have seen a tremendous development of 3D-printed soft robotic components, approaches that will enable the miniaturization of 3D soft, smart materials have not yet been developed. 4D-printed small-scale soft structures will enable us to create minimally invasive surgical tools, smart microscaffolds and microstents, and miniaturized adaptive drug delivery reservoirs. However, 3D printing techniques are not yet able to produce miniaturized smart materials with 3D submicrometer details; in some extreme cases, only features with minimum sizes of ~200 μm can be attained. A promising technique is two-photon polymerization (2PP), also known as 3D laser lithography, which enables the fabrication of high-resolution 3D microarchitectures with heights from a few hundred nanometers up to several millimeters and layer thicknesses below 1 μm. Using this fabrication approach, highly complex small-scale robotic devices have been reported. For example, Huang *et al.* (*10*) used 2PP for the fabrication of magnetic microtransporters with a wirelessly controlled Archimedes screw pumping mechanism (Fig. 1D). However, 4D printing of soft microstructures using 2PP has not been widely reported.

PERSPECTIVES

Whether a robotic system consists of a set of arms with end effectors or an assembly of micro- and nanoscale components, the incorporation of 4D-printed materials in these devices will enable new capabilities not currently

Multi-Scale Robotics Lab, Department of Mechanical and Process Engineering, ETH Zürich, Zürich, Switzerland.
*Corresponding author. Email: bnelson@ethz.ch

Downloaded from http://robotics.sciencemag.org/ at Tsinghua University on October 18, 2019

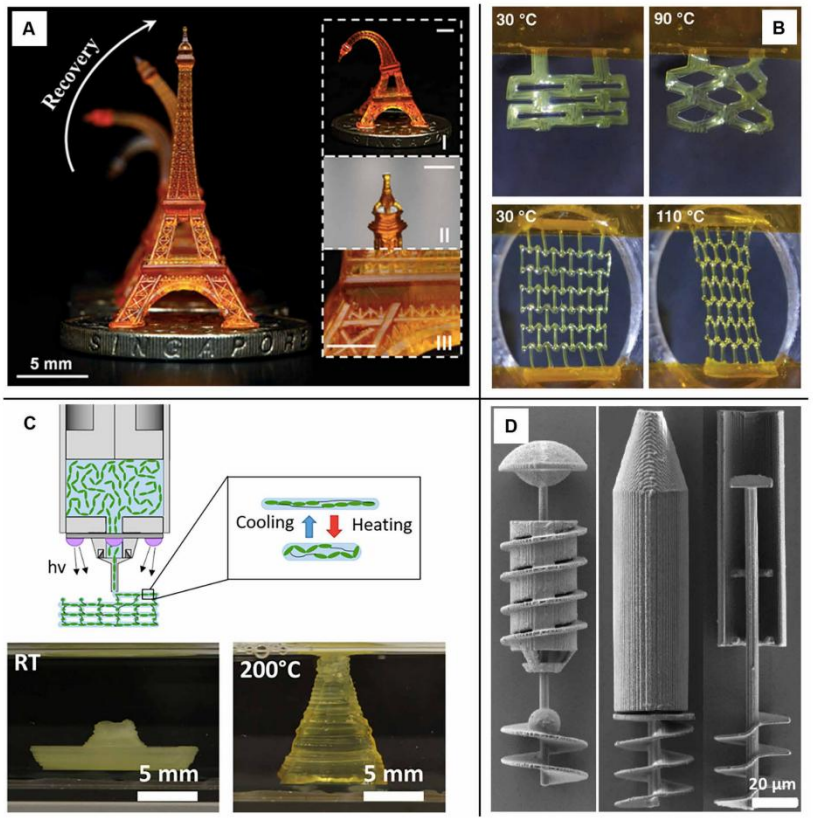

Fig. 1. Four different examples. 4D printing of a one-way SMM (**A**) (*6*), 4D printing of a two-way SMM based on LCEs [(**B**) (*8*) and (**C**) (*9*)], and 3D printing of a wirelessly controlled Archimedes screw pump obtained by 2PP (**D**) (*10*). RT, room temperature. [Credit for (C): Reprinted with permission from (*9*). Copyright 2017 American Chemical Society.]

available. Although substantial research has been devoted to producing 3D-printed microscale robotic tools, the tools are typically made of nonresponsive, stiff materials. The use of 4D printing in the field of small-scale robots remains unexplored because of challenges in miniaturizing smart materials with available 3D printing techniques. Producing arbitrary shapes made of two-way responsive materials is also crucial for the successful development of tomorrow's robotic actuators. The integration of other materials, such as magnetic or light-responsive micro- and nanostructures, to form 4D-printed composite components will also bring new opportunities in smart robotic actuators. We encourage the robotics community to explore radically new material and fabrication approaches to make 4D printing as ubiquitous as 3D printing.

REFERENCES

1. P. Fischer, B. Nelson, G.-Z. Yang, New materials for next-generation robots. *Sci. Robot.* **3**, eaau0448 (2018).
2. A. Kirillova, R. Maxson, G. Stoychev, C. T. Gomillion, L. Ionov, 4D biofabrication using shape-morphing hydrogels. *Adv. Mater.* **29**, 1703443 (2017).
3. S. Naficy, R. Gately, R. Gorkin III, H. Xin, G. M. Spinks, 4D printing of reversible shape morphing hydrogel structures. *Macromol. Mater. Eng.* **302**, 1600212 (2017).
4. Z. Ding, C. Yuan, X. Peng, T. Wang, H. J. Qi, M. L. Dunn, Direct 4D printing via active composite materials. *Sci. Adv.* **3**, e1602890 (2017).
5. D. Rus, C. Sung, Spotlight on origami robots. *Sci. Robot.* **3**, eaat0938 (2018).
6. Q. Ge, A. H. Sakhaei, H. Lee, C. K. Dunn, N. X. Fang, M. L. Dunn, Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. *Sci. Rep.* **6**, 31110 (2016).
7. Y. Mao, Z. Ding, C. Yuan, S. Ai, M. Isakov, J. Wu, T. Wang, M. L. Dunn, H. J. Qi, 3D printed reversible shape changing components with stimuli responsive materials. *Sci. Rep.* **6**, 24761 (2016).
8. M. López-Valdeolivas, D. Liu, D. J. Broer, C. Sánchez-Somolinos, 4D printed actuators with soft-robotic functions. *Macromol. Rapid Commun.* **39**, 1700710 (2017).
9. C. P. Ambulo, J. J. Burroughs, J. M. Boothby, H. Kim, M. R. Shankar, T. H. Ware, Four-dimensional printing of liquid crystal elastomers. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 37332–37339 (2017).
10. T.-Y. Huang, M. S. Sakar, A. Mao, A. J. Petruska, F. Qiu, X.-B. Chen, S. Kennedy, D. Mooney, B. J. Nelson, 3D printed microtransporters: compound micromachines for spatiotemporally controlled delivery of therapeutic agents. *Adv. Mater.* **27**, 6644–6650 (2015).

Acknowledgments: C.d.M. acknowledges the Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowships (microMAGNETOFLUIDICS, No. 702128).

10.1126/scirobotics.aau0449

Citation: C. de Marco, S. Pané, B. J. Nelson, 4D printing and robotics. *Sci. Robot.* **3**, eaau0449 (2018).

Downloaded from http://robotics.sciencemag.org/ at Tsinghua University on October 18, 2019

附录 C 工程图纸