DOI: 10.3901/JME.2020.15.026

支持 4D 打印的可控变形结构设计研究进展*

高一聪 曾思远 冯毅雄 郑浩 邱浩 谭建荣
(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 4D 打印是结合了 3D 打印技术和智能材料的一种智能结构增材制造技术。通过几何结构设计、智能材料分布设计, 4D 打印可以制备具有可调节形状、特性或功能的可控变形结构。可控变形结构通过外界的刺激, 按设计好的特定方式发生形状、性能和功能的变化, 从而使其满足不同领域的应用需求。对可控变形结构的二维结构设计方法和三维变形设计方法的技术研究进展进行综述, 总结了支持 4D 打印的可控变形结构设计的突出成果以及创新性技术。结合 4D 打印的概念和支持 4D 打印的可控变形结构设计的研究现状, 对其在机械、生物医学等领域的应用进行了展望。

关键词: 可控变形结构设计; 4D 打印; 3D 打印; 智能材料

中图分类号: TF124

Review of Design of Programmable Morphing Composite Structures by 4D Printing

GAO Yicong ZENG Siyuan FENG Yixiong ZHENG Hao QIU Hao TAN Jianrong
(State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: 4D printing is a kind of intelligent structure additive manufacturing technology that combines 3D printing technology and intelligent materials. By designing the spatial distribution of smart materials, 4D printing can produce controllable deformation structures with adjustable shapes, characteristics or functions. The shape, performance and function of the controllable deformation structure change in a specific way according to the design through external stimulation, so that it can meet the application requirements of different fields. The research progress of planar unfolding design method and 3D deformation design method of controllable deformation structure is reviewed, and the outstanding achievements and innovative technology supporting 4D printing of controllable deformation structure design are summarized. Combined with the concept of 4D printing and the research status of controllable deformation structure design technology supporting 4D printing, its application in mechanical products, biomedicine and other fields is prospected.

Key words: design of programmable morphing composite structures; 4D printing; 3D printing; smart materials

0 前言

4D 打印是在 3D 打印技术上发展的一种智能增材制造技术, 通过制备的可控变形结构可以在温度、磁场、紫外线等外界激励下发生几何结构、功能、性能等可控转变^[1-3]。针对传统的结构设计和制造技术无法满足自组装、多功能和自修复等新概念结构和先进制造的需求, 4D 打印制备的可调节形状、特性或功能的可控变形结构具有独特的优势, 对机械装备的结构智能化发展具有重大前瞻性意义。本文

对支持 4D 打印的可控变形结构设计的研究进展进行综述, 并对 4D 打印的可控变形结构的应用前景提出展望。

1 4D 打印的定义与内涵

1.1 4D 打印的定义

2013 年 Technology entertainment design 大会上, 美国麻省理工学院自动化实验室 TIBBITS 教授首次提出 4D 打印的概念, 将 4D 打印描述为“一种由于环境相互作用而随时间变化的复杂自发结构的新设计”, 即“4D 打印 = 3D 打印技术 + 时间”, 4D 打印是 3D 打印结构在形状、性质和功能方面的有针对性的演变^[4], 如图 1 所示。因此, 4D 打

* 国家自然科学基金(51675477, 51775489, 51805472)和浙江省自然科学基金(LZ18E050001)资助项目。20190804 收到初稿, 20191219 收到修改稿

印具有以下特征。

图 1 4D 打印的结构变形

(1) 基于智能材料的增材制造。

4D 打印采用智能材料作为原材料, 利用增材制造技术完成制造工艺过程。其核心在于制造工艺是增材制造, 原材料为智能材料。所用到的材料主要包括形状记忆合金、形状记忆聚合物、形状记忆陶瓷等。

(2) 制备的结构具有时间、空间功能和性能。

在 4D 打印制备的结构中至少有两个稳定状态, 并且结构可以在相应的激励下从一个状态转移到另

一个状态。利用增材制造制备的结构在时间或空间维度下具有形状、性能或功能的改变能力。4D 打印属于可编程材料实现自我构建以及重组装的新型制造技术^[5], 这种改变(编程)可以是主动的(不需外界给予能量的自发改变), 也可以是被动的(需要外界能量刺激的改变)。这种改变应该是结构的主要性能/功能变化, 而非次要扰动因素的变化(如, 增材制造承载构件在受载下的变形)。

1.2 4D 打印工艺流程

4D 打印制备的结构是在传统的 3D 打印制备的静态结构基础上, 能够在外接激励下自发转变成预定的形状, 从一种状态转移到另一种状态同时改变材料的性质和功能, 如图 2 所示, 4D 打印过程: ① 4D 打印制备结构的 3D CAD 模型利用 3D 打印切片技术转换成 3D 打印文件, 智能材料通过 3D 打印机形成二维可变形结构; ② 二维可变形结构在外界激励下, 产生激励响应, 发生形变; ③ 根据智能材料的变形机理模型, 二维可变形结构实现可控变形, 转变为预先设计的结构形状。

图 2 4D 打印流程示意图

因此, 4D 打印的实现基础包括: 3D 打印设备、外界激励、智能材料、激励响应激励模型和可控变形结构及其设计, 如图 3 所示。

(1) 3D 打印设备: 4D 打印根据设计排布方案、利用 3D 打印设备将可控变形结构一次打印成型。可控变形结构的制造材料的膨胀比和热膨胀系数等性能差异, 实现所需的结构变形行为^[6]。

(2) 变形激励: 4D 打印制造的可控变形结构在变形激励的激发下发生物理/化学变化, 实现形状、属性、功能等的改变。目前, 4D 打印常用的变形激励主要包括: 温度^[4,6-8]、化学^[9-11]、温度和光结合^[12], 以及水和温度结合^[13-14]。变形激励的选择取决于具体应用场景的需求, 也决定了可控变形结构所采用的智能材料的类型。

(3) 智能材料(激励响应材料): 智能材料是 4D 打印的关键组成部分, 通常智能材料具有自感知、

决策、响应、形状记忆、自适应、多功能性、自修复等性能^[15-19]。

(4) 激励响应机理模型: 4D 打印中, 可控变形结构在时间维度下进行形状、属性、功能等的改变, 需要建立激励响应机理模型, 对可控变形结构的变形进行预编程, 激励在适当的时间内按一定的顺序实施, 从而控制结构的变形。例如, 温度激励的 4D 打印中, 建立形状记忆材料热力学响应模型, 结构在高温下受到外部载荷变形; 在保持外部负载的同时降低温度; 低温卸载结构, 达到理想形状; 通过对结构进行再加热, 可以恢复原形状。

(5) 可控变形结构设计: 4D 打印通过对可控变形结构的几何尺寸、材料分布、材料特性和激励特性、激励时序等进行设计, 实现所需的形状、性能或功能的特性^[20]。

图3 4D打印的基础

1.3 4D打印的内涵

4D打印过程中,要求可控变形结构随时间发生

有针对性和可预测的演变,即4D打印的可控变形结构在外界激励下发生变形,并在材料激励响应激励模型约束下实现正确的变形。因此,要实现4D打印中制备的二维结构受控的变形成设计的三维结构,可控变形结构设计主要包括需要解决三个关键科学问题。

(1) 可控变形结构的三维结构优化设计:给定材料结构,材料属性,激励,激励机理,如何设计满足性能指标的最优三维结构。

(2) 可控变形结构的二维结构设计:如何将一个给定三维结构映射成一个可变形的二维结构。

(3) 可控变形结构的三维变形设计:如何在一定的外界激励下制备的二维可变形结构的变形行为能够得到很好的控制,并且形变后的结构实现设计的形状、性能、功能。

支持4D打印的可变形结构设计过程如图4所示。

图4 支持4D打印的可变形结构设计过程示意图

2 可控变形结构的二维结构设计

2.1 可控变形结构的分类

可控变形结构由于其可在重构机器人、生物医学设备、航空航天、微夹持器等领域的潜在应用,特别是自2013年以来4D打印概念的出现,得到了广泛的研究。根据不同的变形单元,可控变形结构可以分为三种主要类型^[9,21-24]。

(1) 基于记忆材料的可控变形结构,可控变形结构利用形状记忆合金等活性材料实现受控的变形动作,如图5a所示。

(2) 基于双层结构的可控变形结构,可控变形结构由主动材料和被动材料组成的双层结构构成,其中主动材料在一定外界激励条件下会膨胀或收缩,而被动材料不会发生太大的变形。因此,在一定外界激励条件下,可控变形结构实现受控的变形动作,基于双层结构的整体弯曲可控变形结构和基于双层结构的局部弯曲可控变形结构分别如图5b、图5c所示。

(3) 基于铰链结构的可控变形结构,可控变形结构的铰链结构使用主动材料,在一定外界激励条件下,铰链部分发生变形,实现可控变形结构的受控变形动作,如图5d所示。

2.2 记忆材料的二维结构设计

基于记忆材料的可控变形结构利用形状记忆聚合物、形状记忆合金等记忆材料实现结构变形, 记忆材料主要包括形状记忆聚合物(Shape memory polymers, SMP)和形状记忆合金(Shape memory alloys, SMA)。

SMP 是具有形状记忆效应的高分子材料, 在转变温度 T_g 之上, 通过施加外力使其发生一定程度的变形, 冷却后保持变形后的临时状态, 再次升温至转变温度 T_g 之上即可转变为原始形状^[25]。HAN 等^[26]针对缠绕聚酯纤维的形状记忆线材定义了正向针织环型和反向针织环型, 设计了 P 变形模式, G 变形模式, R 变形模式, 和 S 变形模式四种模式, 分别实现卷曲, 拉伸, 起皱, 弯曲四种基本变形, 通过不同针织环型的布局设计和组合设计, 实现了环形连接软变形结构的二维几何形状设计, 如图 6 所示。

形状记忆合金由于马氏体和奥氏体在特定温度下可以发生转化, 因此具有形状记忆特性, 也可以用于 4D 打印制备可控变形结构。PERAZA-HERNANDEZ

等^[27-28]提出了一种基于热敏 SMA 导线网格的可控变形结构设计方法, 分析了网格线厚度、网格线间距、绝缘弹性体层厚度和加热功率等设计参数对结构有效折叠变形角、折线处的曲率半径等折叠变形响应的影响, 建立了近似响应面模型。对称布置的热敏 SMA 导线网格布局方案和交错布置的热敏 SMA 导线网格布局方案分别如图 7a、7b 所示。

图 6 形状记忆线材的四种变形模式

图 7 热敏形状记忆合金导线网格设计方法

通常形状记忆材料需要“训练”记住最初的形状, 在外力作用下的结构变形, 通过应用某些激励如加热, 结构将回到原来的形状。由于形状记忆材料变形机理复杂, 变形过程多为单向不可逆, 而且需要借助外力设置预变形, 因此增加了记忆材料的可控变形结构二维结构设计的复杂性, 极大限制了该类结构的实际应用性。

2.3 双层材料的二维结构设计

基于双层结构的可控变形结构由活性材料和稳

定材料两种类型的材料叠加在一起形成双层结构, 活性材料通常选用 SMP^[29-32]、光活性聚合物^[33-36]、液晶弹性体^[37-39]、水凝胶^[40-43]等, 活性材料能够响应外界激励发生变形。

VAN 等^[44]提出了一种支持预编辑的双层材料可控变形结构设计方法, 通过在 3D 打印过程中预先编辑形状记忆聚合物材料的结构, 实现了弯曲、卷曲、扭曲等双层材料结构可控变形, 并且基于传热学原理设计了孔隙度和结构厚度等结构参数预先编辑结构的变形时间, 实现了可控变形机构的顺序变形, 如图 8 所示。

图8 双层材料预编程设计

DING 等^[45-46]提出了一种面向弹性体和玻璃态聚合物的双层材料可控变形结构设计方法。双层的可控变形结构由玻璃状形状记忆聚合物和在光聚合过程中内置压缩应变的弹性体组成。通过设计弹性体和玻璃态聚合物分布、结构排布, 可控变形结构在加热状态下可以实现弯曲, 扭曲等多种可控变形。如图 9 所示, 弯曲、螺旋、波浪等典型变形, 浅色表示弹性体, 深色表示玻璃态聚合物。

图9 双层材料可控变形结构设计

DENG 等^[47]提出了一种基于面片划分的双层材料可控变形结构设计方法, 定义了平面, 单轴变形和双轴变形三种变形单元的变形模式, 将可控变形结构划分为一组变形单元, 变形单元根据设计目标形状选择对应的变形模式, 在温度激励下实现变形, 如图 10 所示。

图10 双层材料的变形模式和变形单元布局

TIAN 等^[48-50]提出了一种连续纤维嵌入复合材料的双层材料可控变形结构设计方法, 通过设计曲线纤维路径实现复合材料结构的可控变形, 推导了复合材料的应变能密度增量计算模型, 通过求解自由曲面的非零主曲率, 布置纤维方向, 设计纤维的轨迹线方程, 实现了环境温度变化激励下复合双层结构的不同程度弯曲变形, 如图 11 所示。GUO 等^[51]提出了一种基于软活性水凝胶与硬活性聚合物的双层可控变形结构设计方法, 建立了温度敏感水凝胶的响应模型, 通过控制双层结构中软活性水凝胶的膨胀比, 实现双层结构的变形设计。GUAN 等^[52]提出了一种液态树脂的双层材料可控变形结构设计方法, 通过设计双层材料中膜的二维形状和树脂聚合物的厚度, 三维颗粒状水凝胶可控变形结构经过液态树脂经溶剂浇铸、光固化、软光刻, 接触水变形卷曲成三维结构, 并且可以控制弯曲度得到复杂的三维微观结构。LEON 等^[53]提出了一种基于自折叠薄膜的双层材料可控变形结构设计方法, 通过变形单元的布局设计, 利用金属溅射、聚电解质的层叠组装将双层膜转移印刷到涂有牺牲层的衬底上, 在温度激发下薄膜二维结构的自折叠变形, 生成相应的三维结构。

图 11 连续纤维嵌入的双层材料可控变形设计

2.4 铰链机构的二维结构设计

基于铰链机构的可控变形结构分为结构本体部分和铰链机构部分, 结构本体部分由稳定材料制备, 铰链结构部分由记忆材料等活性材料制备, 通过温度、磁场等激励触发实现结构变形。

GE 等^[10]提出了一种基于活性复合材料与形状记忆聚合物纤维的可控变形铰链机构设计方法, 建立了铰链机构热变形近似响应模型, 为形状记忆聚合物纤维几何参数、铰链机构几何参数、铰链结构应变和激励温度等设计参数提供设计依据, 如图 12 所示。

图 12 活性复合材料的可控变形铰链机构设计

DENG 等^[54]设计了一种基于预紧聚苯乙烯薄膜的铰链结构, 由固定层和变形约束层构成, 通过限制固定层材料的变形和控制变形约束层的形变, 可以实现任意铰链折角变形。在此基础上, 提出了一种铰链结构可控变形设计方法, 建立了铰链结构的参数化模型, 推导了铰链结构的变形模型, 设计了

单向弯曲变形、双向弯曲变形、单向可控弯曲变形和双向可控弯曲变形 4 种铰链结构变形模式, 如图 13 所示。在基于收缩膜的可变形铰链机构设计基础上, KWOK 等^[55]提出了一种面向自由曲面的可变形铰链机构设计方法, 建立了三维目标结构和二维平面展开结构的映射算法, 实现了三维目标结构的二维平面展开结构快速设计和变形铰链机构布局。

图 13 可控变形结构的预紧铰链机构设计

AN 等^[56]设计了铰链变形单元, 提出了单元划分算法这类自闭片的开发提供了设计和编程指南。ROUDAUT 等^[57-58]开发了一种由 SMP、纸张和电阻电路组成的铰链机构, 建立了铰链机构的扭矩力学模型, 可以通过 SMA 驱动的折叠操作来调整形状, 提出了基于铰链机构的可控变形结构顺序折叠设计方法, 实现了复杂几何形状的可控变形生成。

3 可控变形结构的三维变形设计

4D 打印过程中, 3D 打印制备的可控变形结构能够以适当的方式响应激励发生形变, CAMPBELL 等^[59]将可控变形结构的变形机理解释为流体力学和热力学两种机制, 包括非约束流体力学、约束热力学、非约束热力学、非约束水热力学、非约束化学力学、非约束热光力学、渗透力学和溶解学。PERAZA-HERNANDEZ 等^[60]根据外界激励物理源将可控变形结构的变形机理分为热致变形、化学致变形、磁致变形、电致变形和光学致变形。本文对每种外界激励类型的可控变形结构的变形设计进行了小结。

3.1 温度激励的三维变形设计

温度激励的变形是可控变形结构变形的常见形式^[61-64]。HARTL 等^[65-66]提出了一种基于 SMA 的热致可控变形结构设计, 可控变形结构由一种复合材料层压板组成, 分析了马氏体可逆相变引起的相变应变的产生和恢复, 建立了 SMA 材料的应力-温度相图, 推导了马氏体相变的三维本构模型, 用于控制被加热的层压板折叠变形方向变形大小。RUS 等^[67]提出了一种基于折纸几何的可控变形结构设计方法, 设计了 Ni-Ti 弹簧变形执行器, 通过控制执行器的变形, 驱动机构运动。LEE 等^[68]设计了一个 SMA 弹簧驱动器驱动的轮式机器人, 通过温度改变控制 SMA 弹簧驱动器, 实现轮式机器人运动。FIROUZEH 等^[69-70]开发了一种使用 SMA 执行器进行变形的四折片状机器人。该装置还显示出良好的运动特性。

光照也被用来加热基于光热转换的热致可控变形结构, 特别在小尺度结构上使用光照诱导驱动的可控变形结构^[71]。LIU 等^[72]提出了一种基于红外光谱局部吸收的可控变形结构变形控制方法, 通过设计局部的光吸收聚合物区域, 使得聚合物区域比其他区域热得更快, 并最终超过 SMP 的玻璃化转变温度控制变形。LEE 等^[73]设计了一种 Ni-Ti-Cu SMA 可控变形结构激发器, 将沉积的 SMA 薄膜作为微夹持器的外层, 驱动微夹持器实现打开和关闭功能。LAFLIN 等^[74]设计了一种铬/金聚合物组成的铰链机构可控变形结构, 通过激光加热预应力铰链机构, 使得聚合物层软化, 铰链机构发生弯曲变形。IONOV 等^[75-76]提出了一种基于聚己内酯(Polycaprolactone, PCL)-聚 N-异丙基丙烯酰胺(poly-(N-iso-propylacrylamide), PNIPAM)的可控变形结构变形设计方法, 由于 PCL 具有疏水特性, 而 PNIPAM 的溶解度可以通过高于/低于其低临界溶液温度而随温度可逆变化, 使得 PNIPAM 在水的存在下随着温度的变化而膨胀或塌陷, 通过控制温度实现结构变形。

3.2 化学激励的三维变形设计

可控变形结构的化学激励变形设计利用特定材料或 pH 值存在下某些聚合物的膨胀/分解特性^[77-78]。

SHIM 等^[79]制备了一种水凝胶双层可控变形结构, 在 pH 值大于 9 时, 双分子层平面薄膜层膨胀实现折叠变形。HE 等^[80-81]提出了一种 pH 敏感水凝胶的可控变形结构, 建立了折叠变形响应近似模型, 当 pH 值变化时混合物制备的凝胶发生显著膨胀变形, 控制结构发生变形。GRACIAS 等^[82-83]设计了一种对酶存在的敏感性触发的聚合物铰链机构可控变形结构, 聚合物铰链机构具有两种相互排斥的酶敏感

性, 当一种聚合物被其缔合酶选择性降解时, 其模量降低, 驱动铰链机构发生弯曲变形, 如图 14 所示。

图 14 酶敏感聚合物铰链机构设计^[82]

IONOV 等^[84]设计了一种 PCL/聚琥珀酰亚胺聚合物可控变形结构, 利用聚琥珀酰亚胺水解形成水胀性聚天冬氨酸, 控制可控变形结构卷曲生成管状结构。JEONG 等^[85]开发了一种双分子层复合材料, 在己烷溶剂中浸没时聚二甲硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)层发生膨胀产生折叠变形。KUMAR 等^[86]对 pH 值敏感的采用弱聚电解质作为活性聚合物设计了一种可控变形薄膜。

3.3 磁场激励的三维变形设计

磁控变形材料(Magneto-active elastomers, MAE)是一种新兴的智能材料, 兼具传统智能材料如压电和超磁致伸缩材料响应快以及温控形状记忆材料应变大的特点。

ZHAO 等^[87]开发了能够给局部区域施加指定磁场的打印头装置, 在 3D 打印过程中磁化打印材料, 使得制备的零件在外界磁场激励下产生复杂的、迅速的变形, 如图 15 所示。

图15 磁场激励结构变形设计^[87]

VON 等^[88]设计了一种以磁性弹性体为材料的激发器,将30%重量比钕铁氧体颗粒混合成硅橡胶基体,制备了磁性弹性体材料并加工成磁性弹性体贴片,在磁场激励下控制激发器变形,一个侧面有四个MAE贴片的十字形PDMS薄片在磁场激励下折叠变形形成盒形件。但目前磁场激励的3D形变主要是根据它们的磁化能力,而不是磁能到机械能的转换。

3.4 电流激励的三维变形设计

随着最近电子和微机电系统(Microelectromechanical systems, MEMS)技术的进步,跨尺度电场的产生和控制的限制取得了突破,电场活化聚合物和其他电活性聚合物也应用到了可控变形结构中^[89-91]。

WHITE 等^[92]提出了一种电场活化聚合物激发器单元的设计方法,激发器电源由两层相互分离的电场活化聚合物弹性体组成,通过设计激发器单元的几何参数和电场活化聚合物层数可以实现弯曲等变形,并应用于模块化机器人的弯曲部件。

FRECKER 等^[93-95]开发了几种基于电场活化聚合物材料的多层可控变形结构,由电场活化聚合物弹性体、被动衬底(透明胶带)和柔性电极(碳脂)叠加组成,在电流激励下,电场活化聚合物弯曲试样发生折叠变形行为。

3.5 光照激励的三维变形设计

可控变形结构的光照激励形变通过照射直接引起的微观结构变化实现光驱动变形。

RYU 等^[96]提出了一种基于局域光诱导应力松弛机理的聚合物薄膜自折叠设计方法,通过光照将特定的光引发剂解离成自由基,与聚合物上的MDTVE功能发生反应并裂解,重新排列聚合物结构网络连接,导致应力松弛,从而产生褶皱变形。LONG 等^[97-98]分析了光活化聚合物在机械和光学刺激的作用下发生复杂的变形,揭示了自由基在弹性体网络中破坏并改造拉伸链的链内功能,建立了光致应力弛豫作用的聚合物变形的设计近似模型控制

制备的机构变形。

4 应用展望

在机械领域,可控变形结构不仅能够根据需要响应外界条件发生可控的自变形,而且变形后的结构可以满足大变形与大承载力的需求。在可展机构方面,利用可控变形结构实现展开,相比于传统的展开机构,如太阳能帆板等,不需要驱动装置,具有质量小、精度高、活动部件少的优点。在机器人机构方面,相比于传统的机器人关节机构、驱动机构,可控变形结构具有环境适应能力强、结构调整能力强的优点,同时由于可控变形结构采用智能材料制备,使得结构本身具有致动能力^[99-100]。在飞行器结构件方面,可控变形结构组成的飞行器结构件可以通过对不断改变的飞行条件做出响应,光滑而持续地改变气动构型,始终保持机翼等结构的最佳飞行性能^[101-103]。

生物医学领域也对4D打印的可控变形结构有很高需求,传统3D打印可以实现形状复杂的组织结构制备如肋骨、耳廓、关节等,但心脏跳动、胃肠蠕动等具有运动特性的组织结构,3D打印制件无法实现。而4D打印可以制备出形状复杂并且具有可控运动变形的组织结构,在生物医学领域中发挥重要的作用^[104-105]。

5 结论

4D打印是一种采用3D打印工艺方法实现具有对外界刺激响应功能、可变形状或性能的智能结构增材制造技术。可控变形结构利用材料相变特性、材料各向异性的吸水或热膨胀特征驱动结构变形,形成了记忆材料、双层结构和铰链机构等三种可控变形结构构型。变形激励多采用温度场、电磁场作为调控手段,实现结构变形。本文中综述的可控变形结构构型设计方法和可控变形结构变形设计方法都有其独特优势,但同时各自也有一些局限性,例如:4D打印制备的可控变形结构可以实现非常复杂的三维结构和特定的功能,但是对于材料类型有严格的限制;激励响应模型主要通过实验方法拟合,控制变形的精确度有待提高;由三维构型映射到二维几何设计也待进一步研究。

因此,需要综合可控变形结构的三维结构优化设计、可控变形结构的二维结构设计和可控变形结构的三维变形设计,通过设计求解满足性能指标的最优三维结构,将最优三维结构映射成可变形的二

维结构, 并且控制外界激励下可变形二维结构的弯曲、折叠、扭曲、螺旋等变形, 保证形变后的结构满足设计的形状、性能、功能, 为支持 4D 打印的可控变形结构设计提供理论依据、方法支撑和工具支持。

参 考 文 献

- [1] PEI E. 4D Printing: Dawn of an emerging technology cycle[J]. *Assembly Automation*, 2014, 34(4): 310-314.
- [2] PEI E. 4D printing-revolution or fad?[J]. *Assembly Automation*, 2014, 34(2): 123-127.
- [3] 王亚男, 王芳辉, 汪中明, 等. 4D 打印的研究进展及应用展望[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(2): 70-76.
WANG Yanan, WANG Fanghui, WANG Zhongming, et al. Research progress and application perspectives of 4d printing[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(2): 70-76.
- [4] TIBBITS S. 4D printing: Multi - material shape change[J]. *Architectural Design*, 2014, 84(1): 116-121.
- [5] 苏瑾. 4D 打印-智能材料的增材制造技术[J]. *现代制造技术与装备*, 2017(3): 143-143.
SU Jin. 4D Printing-intelligent material of the material manufacturing technology[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2017(3): 143-145.
- [6] RAVIV D, ZHAO W, MCKNELLY C, et al. Active printed materials for complex self-evolving deformations[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7422.
- [7] KOTIKIAN A, TRUBY R L, BOLEY J W, et al. 3D printing of liquid crystal elastomeric actuators with spatially programed nematic order[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(10): 1706164.
- [8] JAMAL M, KADAMS S S, XIAO R, et al. Bio - origami hydrogel scaffolds composed of photocrosslinked PEG bilayers[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2013, 2(8): 1142-1150.
- [9] GE Q, QI H J, DUNN M L. Active materials by four-dimension printing[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(13): 131901.
- [10] GE Q, DUNN C K, QI H J, et al. Active origami by 4D printing[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(9): 094007.
- [11] ZHANG Q, ZHANG K, HU G. Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3D printing technique[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22431.
- [12] KUKSENOK O, BALAZS A C. Stimuli-responsive behavior of composites integrating thermo-responsive gels with photo-responsive fibers[J]. *Materials Horizons*, 2016, 3(1): 53-62.
- [13] GLADMAN A S, MATSUMOTO E A, NUZZO R G, et al. Biomimetic 4D printing[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(4): 413.
- [14] BAKARICH S E, GORKIN III R, PANHUIS M I H, et al. 4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2015, 36(12): 1211-1217.
- [15] KHOO Z X, TEOH J E M, LIU Y, et al. 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2015, 10(3): 103-122.
- [16] ROY D, CAMBRE J N, SUMERLIN B S. Future perspectives and recent advances in stimuli-responsive materials[J]. *Progress in Polymer Science*, 2010, 35(1-2): 278-301.
- [17] STUART M A C, HUCK W T S, GENZER J, et al. Emerging applications of stimuli-responsive polymer materials[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(2): 101.
- [18] SUN L, HUANG W M, DING Z. Stimulus-responsive shape memory materials: a review[J]. *Materials & Design*, 2012, 33: 577-640.
- [19] MENG H, LI G. A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites[J]. *Polymer*, 2013, 54(9): 2199-2221.
- [20] DENG D, CHEN Y. 4D printing: Design and fabrication of 3D shell structures with curved surfaces using controlled self-folding[C]//ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2015: V001T02A070-V001T02A070.
- [21] SMELA E. Conjugated polymer actuators for biomedical applications[J]. *Advanced Materials*, 2003, 15(6): 481-494.
- [22] WANG M F, MALEKI T, ZIAIE B. Enhanced 3-D folding of silicon microstructures via thermal shrinkage of a composite organic/inorganic bilayer[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, 17(4): 882-889.
- [23] YASU K, INAMI M. Popapay: Instant paper craft made up in a microwave oven[C]//International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012: 406-420.
- [24] IONOV L. Biomimetic 3D self-assembling biomicroconstructs by spontaneous deformation of thin polymer films[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(37): 19366-19375.
- [25] 魏洪秋, 万雪, 刘彦菊, 等. 4D 打印形状记忆聚合物材料的研究现状与应用前景[J]. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(1): 2-16.
WEI Hongqiu, WAN Xue, LIU Yanju, et al. 4D printing

- of shape memory polymers : Research status and application prospect[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2018, 48: 2-16.
- [26] HAN M W, AHN S H. Blooming knit flowers: Loop - linked soft morphing structures for soft robotics[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(13): 1606580.
- [27] PERAZA-HERNANDEZ E, HARTL D, GALVAN E, et al. Design and optimization of a shape memory alloy-based self-folding sheet[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2013, 135(11): 111007.
- [28] PERAZA-HERNANDEZ E A, HARTL D J, MALAK JR R J. Design and numerical analysis of an SMA mesh-based self-folding sheet[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(9): 094008.
- [29] LENDLEIN A, LANGER R. Biodegradable, elastic shape-memory polymers for potential biomedical applications[J]. *Science*, 2002, 296(5573): 1673-1676.
- [30] XIE T. Tunable polymer multi-shape memory effect[J]. *Nature*, 2010, 464(7286): 267.
- [31] YU K, GE Q, QI H J. Reduced time as a unified parameter determining fixity and free recovery of shape memory polymers[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3066.
- [32] ZHAO Q, QI H J, XIE T. Recent progress in shape memory polymer: New behavior, enabling materials, and mechanistic understanding[J]. *Progress in Polymer Science*, 2015, 49: 79-120.
- [33] LENDLEIN A, JIANG H, JÜNGER O, et al. Light-induced shape-memory polymers[J]. *Nature*, 2005, 434(7035): 879.
- [34] SCOTT T F, SCHNEIDER A D, COOK W D, et al. Photoinduced plasticity in cross-linked polymers[J]. *Science*, 2005, 308(5728): 1615-1617.
- [35] RYU J, D'AMATO M, CUI X, et al. Photo-origami—bending and folding polymers with light[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(16): 161908.
- [36] MU X, SOWAN N, TUMBIC J A, et al. Photo-induced bending in a light-activated polymer laminated composite[J]. *Soft Matter*, 2015, 11(13): 2673-2682.
- [37] YU Y, NAKANO M, IKEDA T. Photomechanics: Directed bending of a polymer film by light[J]. *Nature*, 2003, 425(6954): 145.
- [38] VAN OOSTEN C L, BASTIAANSEN C W M, BROER D J. Printed artificial cilia from liquid-crystal network actuators modularly driven by light[J]. *Nature Materials*, 2009, 8(8): 677.
- [39] WARE T H, MCCONNEY M E, WIE J J, et al. Voxelated liquid crystal elastomers[J]. *Science*, 2015, 347(6225): 982-984.
- [40] LEE H, XIA C, FANG N X. First jump of microgel; actuation speed enhancement by elastic instability[J]. *Soft Matter*, 2010, 6(18): 4342-4345.
- [41] KIM J, HANNA J A, HAYWARD R C, et al. Thermally responsive rolling of thin gel strips with discrete variations in swelling[J]. *Soft Matter*, 2012, 8(8): 2375-2381.
- [42] SHIM T S, KIM S H, HEO C J, et al. Controlled origami folding of hydrogel bilayers with sustained reversibility for robust microcarriers[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(6): 1420-1423.
- [43] NA J H, EVANS A A, BAE J, et al. Programming reversibly self - folding origami with micropatterned photo - crosslinkable polymer trilayers[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(1): 79-85.
- [44] VAN MANEN T, JANBAZ S, ZADPOOR A A. Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers[J]. *Materials Horizons*, 2017, 4(6): 1064-1069.
- [45] DING Z, WEI P, ZIAIE B. Self-folding smart 3D microstructures using a hydrogel-Parylene bilayer[C]//2010 18th Biennial University/Government/Industry Micro/Nano Symposium. IEEE, 2010: 1-4.
- [46] DING Z, YUAN C, PENG X, et al. Direct 4D printing via active composite materials[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1602890.
- [47] DENG D, KWOK T H, CHEN Y. Four-dimensional printing: Design and fabrication of smooth curved surface using controlled self-folding[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2017, 139(8): 081702.
- [48] TIAN X, LIU T, YANG C, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 88: 198-205.
- [49] YANG C, TIAN X, LIU T, et al. 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: Mechanism and performance[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(1): 209-215.
- [50] WANG Q, TIAN X, HUANG L, et al. Programmable morphing composites with embedded continuous fibers by 4D printing[J]. *Materials & Design*, 2018, 155: 404-413.
- [51] GUO W, LI M, ZHOU J. Modeling programmable deformation of self-folding all-polymer structures with temperature-sensitive hydrogels[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(11): 115028.
- [52] GUAN J, HE H, HANSFORD D J, et al. Self-folding of three-dimensional hydrogel microstructures[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2005, 109(49): 23134-23137.

- [53] dE LEON A, BARNES A C, THOMAS P, et al. Transfer printing of self-folding polymer-metal bilayer particles[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(24): 22695-22700.
- [54] DENG D, CHEN Y. Origami-based self-folding structure design and fabrication using projection based stereolithography[J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 137(2): 021701.
- [55] KWOK T H, WANG C C L, DENG D, et al. Four-dimensional printing for freeform surfaces: Design optimization of origami and kirigami structures[J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 137(11): 111413.
- [56] AN B, RUS D. Designing and programming self-folding sheets[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(7): 976-1001.
- [57] ROUDAUT A, KARNIK A, LÖCHTEFELD M, et al. Morphees: toward high shape resolution in self-actuated flexible mobile devices[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2013: 593-602.
- [58] GOMES A, NESBITT A, VERTEGAAL R. MorePhone: A study of actuated shape deformations for flexible thin-film smartphone notifications[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2013: 583-592.
- [59] CAMPBELL T A, TIBBITS S, GARRETT B. The programmable world[J]. Scientific American, 2014, 311(5): 60-65.
- [60] PERAZA-HERNANDEZ E A, HARTL D J, MALAK JR R J, et al. Origami-inspired active structures: A synthesis and review[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(9): 094001.
- [61] PERAZA-HERNANDEZ E A, HARTL D J, MALAK JR R J. Design and numerical analysis of an SMA mesh-based self-folding sheet[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(9): 094008.
- [62] HALBERT T, MOGHADAS P, MALAK R, et al. Control of a shape memory alloy based self-folding sheet[C]//ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2014: V05BT08A041-V05BT08A041.
- [63] PERAZA HERNANDEZ E A, HARTL D J, AKLEMAN E, et al. Connectivity of shape memory alloy-based self-folding structures[C]//22nd AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference. 2014: 1415.
- [64] HARTL D, LANE K, MALAK R. Computational design of a reconfigurable origami space structure incorporating shape memory alloy thin films[C]//ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. American Society of Mechanical Engineers, 2012: 277-285.
- [65] HARTL D, LANE K, MALAK R. Design of a massively reconfigurable origami space structure incorporating shape memory alloys[C]//ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2012: 115-122.
- [66] PERAZA-HERNANDEZ E, HARTL D, LAGOUDAS D. Modeling of shape memory alloy wire meshes using effective lamina properties for improved analysis efficiency[C]//ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. American Society of Mechanical Engineers, 2013: V001T01A009-V001T01A009.
- [67] ONAL C D, WOOD R J, RUS D. An origami-inspired approach to worm robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(2): 430-438.
- [68] LEE D Y, KIM J S, KIM S R, et al. The deformable wheel robot using magic-ball origami structure[C]//ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2013: V06BT07A040-V06BT07A040.
- [69] FIROUZEH A, SUN Y, LEE H, et al. Sensor and actuator integrated low-profile robotic origami[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 4937-4944.
- [70] FIROUZEH A, SUN Y, LEE H, et al. Sensor and actuator integrated low-profile robotic origami[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 4937-4944.
- [71] SCHWEIGER J, BEUER F, STIMMELMAYR M, et al. Histo-anatomic 3D printing of dental structures[J]. British Dental Journal, 2016, 221(9): 555.
- [72] LIU Y, BOYLES J K, GENZER J, et al. Self-folding of polymer sheets using local light absorption[J]. Soft Matter, 2012, 8(6): 1764-1769.
- [73] LEE A P, CIARLO D R, KRULEVITCH P A, et al. A practical microgripper by fine alignment, eutectic bonding and SMA actuation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1996, 54(1-3): 755-759.
- [74] LAFLIN K E, MORRIS C J, MUQEEM T, et al. Laser triggered sequential folding of microstructures[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(13): 131901.
- [75] ZAKHARCHENKO S, PURETSKIY N, STOYCHEV G, et al. Temperature controlled encapsulation and release using partially biodegradable thermo-magneto-sensitive

- self-rolling tubes[J]. *Soft Matter*, 2010, 6(12): 2633-2636.
- [76] STOYCHEV G, PURETSKIY N, IONOV L. Self-folding all-polymer thermoresponsive microcapsules[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(7): 3277-3279.
- [77] LUCHNIKOV V, LONOV L, STAMM M. Self - rolled polymer tubes : Novel tools for microfluidics , microbiology , and drug - delivery systems[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2011, 32(24): 1943-1952.
- [78] IONOV L. Nature - inspired stimuli - responsive self - folding materials[J]. *Intelligent Stimuli - Responsive Materials : From Well - Defined Nanostructures to Applications*, 2013: 1-16.
- [79] SHIM T S, KIM S H, HEO C J, et al. Controlled origami folding of hydrogel bilayers with sustained reversibility for robust microcarriers[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(6): 1420-1423.
- [80] HE H, GUAN J, LEE J L. An oral delivery device based on self-folding hydrogels[J]. *Journal of Controlled Release*, 2006, 110(2): 339-346.
- [81] GUAN J, HE H, HANSFORD D J, et al. Self-folding of three-dimensional hydrogel microstructures[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2005, 109(49): 23134-23137.
- [82] BASSIK N, BRAFMAN A, ZARAFSHAR A M, et al. Enzymatically triggered actuation of miniaturized tools[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(46): 16314-16317.
- [83] RANDHAWA J S, LEONG T G, BASSIK N, et al. Pick-and-place using chemically actuated microgrippers[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(51): 17238-17239.
- [84] ZAKHARCHENKO S, SPERLING E, IONOV L. Fully biodegradable self-rolled polymer tubes: A candidate for tissue engineering scaffolds[J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(6): 2211-2215.
- [85] JEONG K U, JANG J H, KIM D Y, et al. Three-dimensional actuators transformed from the programmed two-dimensional structures via bending, twisting and folding mechanisms[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(19): 6824-6830.
- [86] KUMAR K, NANDAN B, LUCHNIKOV V, et al. A novel approach for the fabrication of silica and silica/metal hybrid microtubes[J]. *Chemistry of Materials*, 2009, 21(18): 4282-4287.
- [87] KIM Y, YUK H, ZHAO R, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials[J]. *Nature*, 2018, 558(7709): 274.
- [88] VON LOCKETTE P, SHERIDAN R. Folding actuation and locomotion of novel magneto-active elastomer (MAE) composites[C]//ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. American Society of Mechanical Engineers, 2013: V001T01A020-V001T01A020.
- [89] SUO Z. Theory of dielectric elastomers[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 23(6): 549-578.
- [90] SHANKAR R, GHOSH T K, SPONTAK R J. Dielectric elastomers as next-generation polymeric actuators[J]. *Soft Matter*, 2007, 3(9): 1116-1129.
- [91] BAR-COHEN Y, ZHANG Q. Electroactive polymer actuators and sensors[J]. *MRS Bulletin*, 2008, 33(3): 173-181.
- [92] WHITE P J, LATSCHA S, SCHLAEFER S, et al. Dielectric elastomer bender actuator applied to modular robotics[C]//2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2011: 408-413.
- [93] AHMED S, LAUFF C, CRIVARO A, et al. Multi-field responsive origami structures: Preliminary modeling and experiments[C]//ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2013: V06BT07A028-V06BT07A028.
- [94] MCGOUGH K, AHMED S, FRECKER M, et al. Finite element analysis and validation of dielectric elastomer actuators used for active origami[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(9): 094002.
- [95] AHMED S, OUNAIES Z, FRECKER M. Investigating the performance and properties of dielectric elastomer actuators as a potential means to actuate origami structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(9): 094003.
- [96] RYU J, D'AMATO M, CUI X, et al. Photo-origami—bending and folding polymers with light[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(16): 161908.
- [97] LONG K N, SCOTT T F, QI H J, et al. Photomechanics of light-activated polymers[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, 57(7): 1103-1121.
- [98] LONG K N, SCOTT T F, DUNN M L, et al. Photo-induced deformation of active polymer films: Single spot irradiation[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(14-15): 2089-2101.
- [99] 王敬轩. 电控热变形 4D 打印技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- WANG Jingxuan. Research on electronically controlled thermal deformation 4D printing technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [100] 郑志超. 聚乳酸基形状记忆聚合物的性能研究及其

- 4D 打印[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- ZHENG Zhichao. Study on polylactic acid based shape memory polymer and 4D printing[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [101] 范智超, 张帆, 张一慧. 三维细微观结构的折叠和组装方法[J]. 科学通报, 2018, 63(23): 2335-2347.
- FAN Zhichao, ZHANG Fan, ZHANG Yihui. Folding and assembly methods for forming three-dimensional mesostructures [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(23): 2335-2347.
- [102] 苏亚东, 王向明, 吴斌, 等. 4D 打印技术在航空飞行器研制中的应用潜力[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 59-69.
- SU Yadong, WANG Xiangming, WU Bin, et al. Application potential of 4D printing technology in development of aircraft[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(2): 59-69.
- [103] 施虎, 何彬, 汪政, 等. 磁控形状记忆合金驱动特性及其在液压阀驱动器中的应用分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 235-244.
- SHI Hu, HE Bin, WANG Zheng, et al. Magneto-mechanical behavior of magnetic shape memory alloy and its application in hydraulic valve actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 235-244.
- [104] 田小永, 王清瑞, 李涤尘, 等. 可控变形复合材料结构 4D 打印[J]. 航空制造技术, 2019, 62(Z1): 20-27.
- TIAN Xiaoyong, WANG Qingrui, LI Dichen, et al. Programmable morphing composite structures by 4D printing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(Z1): 20-27.
- [105] 张力谨. 基于形状记忆聚合物的 4D 打印血管支架的力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- ZHANG Lijin. The study on mechanical properties of 4D printed vascular stents based on shape memory polymer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
-
- 作者简介: 高一聪, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为产品设计方法学。
E-mail: gaoyicong@zju.edu.cn
- 曾思远, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为可控变形结构设计。
E-mail: zsyuandy@foxmail.com
- 冯毅雄(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代产品设计理论。
E-mail: fyx@zju.edu.cn
- 郑浩, 男, 1988 年出生, 博士后。主要研究方向为产品设计方法学。
E-mail: haozhengdoc@163.com
- 邱皓, 女, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为产品优化设计。
E-mail: 11725066@zju.edu.cn
- 谭建荣, 男, 1954 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品设计方法学。
E-mail: egi@zju.edu.cn