

可控变形复合材料结构4D打印*

田小永^{1,2},王清瑞^{1,2},李涤尘^{1,2},卢秉恒^{1,2}

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049;

2. 陕西省快速制造工程技术研究中心, 西安 710049)

[摘要] 4D打印技术是一种采用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。综述了4D打印技术的基本工艺方法,如形状记忆材料4D打印、仿生复合材料结构4D打印、外场驱动智能结构4D打印等;分析了现有4D打印技术在变形过程不连续、制备难度较大、难以实现变形过程可控等方面存在的问题;提出了连续纤维增强复合材料的4D打印策略,展示了任意可展曲面结构的设计与4D打印流程;分析了4D打印技术未来在航空航天、生物医疗及软体机器人等领域的潜在应用价值。

关键词: 4D打印; 3D打印; 增材制造; 可控变形; 复合材料; 连续纤维

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.01/02.020



田小永

博士,教授,中国机械工程学会高级会员,ISO增材制造标委会(TC 261)委员, *Progress in Additive Manufacturing* 编委。主持国家863课题1项、国家自然科学基金2项、省部级项目3项,发表论文50余篇,SCI收录30余篇。

* 基金项目: 国家自然科学基金(51575430, 51811530107); 国家重点研发计划(2017YFB1103401, 2016YFB1100902); 陕西省快速制造工程技术研究中心(2017HBGC-06); 创新人才推进计划-青年科技新星(2017KJXX-14); 中央高校基本科研业务费专项资金。

4D打印是3D打印结构在时间、空间、功能等维度的延伸^[1]。通过4D打印制备的零件可以在温度、湿度、磁场等外界刺激下发生可控的变形,与此同时,材料的性能及功能往往也会发生改变^[2-3]。4D打印技术按照其工艺原理,大概可以分为形状记忆材料4D打印、仿生复合材料4D打印、外场驱动4D打印3类。形状记忆材料具有形状记忆功能,它能够在达到转变温度时从临时形状迅速转化为永久形状,因此可利用光固化、材料喷射、材料挤出等传统3D打印的方法进行成形,实现智能结构的4D打印^[4-6];然而,形状记忆材料往往具有特定的一个或几个相变转化温度,因此难以实现结构形状的连续和可逆变化。实际上,自然界中广泛存在着可变形结构,例如松果^[7]、小麦芒^[8]、紫荆种子^[9]等植物,由于它们的细胞壁中存在沿着特定取向的刚性纤维素纤维,因此细胞壁具有各向异性的膨胀特性,于是,这种结构会在昼夜交替过程往复变形,进而产生缓慢的运动。受到自然界的启

发,研究人员开展了仿生复合材料结构4D打印的研究,制备了具有各向异性吸水膨胀性能的复合材料结构,实现了可变形结构的设计与制造^[10]。近年来,研究人员利用流变学或施加外场的手段,控制嵌入短纤维或颗粒的取向,进而控制复合材料结构的变形过程^[11-12],然而,该方法存在着控制方法复杂、颗粒取向控制精度较差等问题^[13]。相比于颗粒增强/嵌入复合材料,连续纤维作为增强/嵌入材料可以实现更容易、更准确的取向控制,由于连续纤维增强复合材料具有较强的各向异性性能,复合材料的热、力学性能往往决定于连续纤维走向与基体和纤维材料的属性差异^[14],在外界刺激下,连续纤维复合材料会由于纤维与基体的模量及热膨胀系数差异而产生变形^[15-16]。

为解决传统复合材料结构制造工艺复杂、难以实现纤维走向可控调节的问题,西安交通大学提出连续纤维增强复合材料3D打印技术^[17-19],可以进行曲线纤维复合材料结构一体化成形^[20],发现了纤维-树脂双

层复材结构具有温度响应变形能力^[21],提出了可控变形连续纤维复合材料智能结构的设计与4D打印制造策略^[22]。不同于短纤维或颗粒增强的复合材料,采用连续纤维3D打印工艺,更易于对纤维走向的精确调控,同时,高性能纤维增强复合材料具备高比强度、高比模量、可设计性强及可实现多功能融合等特性,被广泛应用于航空、航天等领域,使得可控变形复合材料智能结构不仅具有重要的科学价值,更具有重要的国防战略意义,如实现变体飞机、空间展开结构的一体化设计与制造。

本文首先对4D打印研究现状进行综述,并对各种工艺方法的优缺点进行分析;然后详细介绍了可控变形复合材料结构与4D打印制造工艺;在此基础上,对4D打印技术在未来航空航天、生物医疗等领域的潜在应用领域进行了分析与探讨。

4D 打印研究现状

1 基于形状记忆材料的4D打印

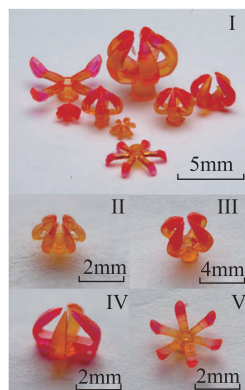
1.1 形状记忆聚合物4D打印

形状记忆聚合物指的是具有形状记忆效应的高分子材料,在转变温度之上,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之上即可转变为原始形状。因此,以形状记忆聚合物为原材料,采用3D打印工艺可实现具有复杂形状的记忆聚合物结构制备,按照上述形状记忆聚合物的转变流程,可实现3D打印结构的变形,即实现了所谓的4D打印^[4-6],通常可以采用材料挤出、光固化、材料喷射等3D打印工艺。例如,Ge等^[4,23]采用多材料喷射工艺实现了可变形成夹持器的设计与4D打印制造,其变形过程如图1所示^[4];Zhang等^[24]利用这一特性开发了在

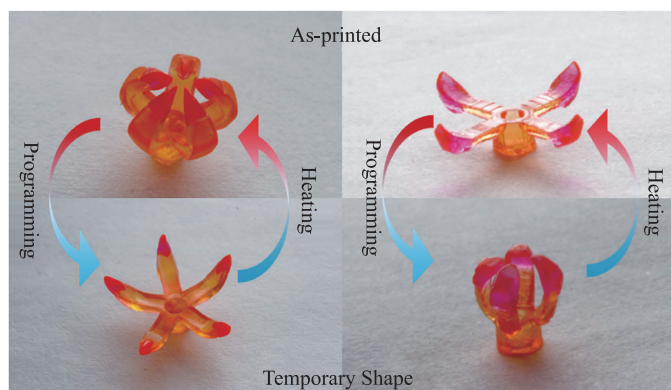
人体体温下恢复为正常形状的生物支架等;哈尔滨工业大学冷劲松教授团队对形状记忆聚合物4D打印进行了详细综述^[25]。

1.2 形状记忆合金4D打印

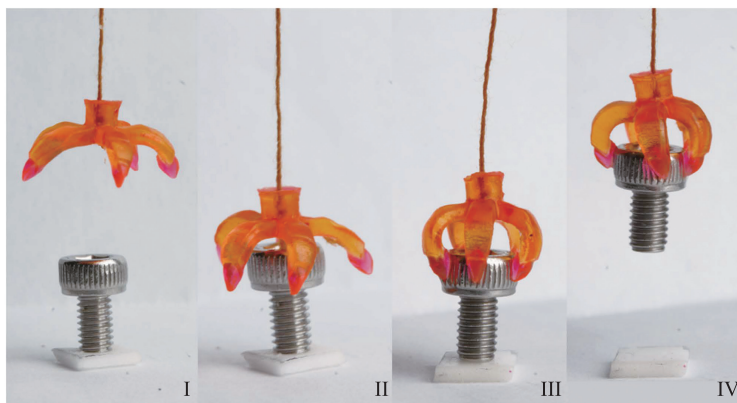
类似于形状记忆聚合物,形状记忆合金由于马氏体和奥氏体在特定温度下可以发生转化,因此也具有形状记忆特性,可用于4D打印结构的制备。Solomon等^[26]以镍锰镓合金粉末为原材料,采用黏结剂喷射工艺,进行了磁性记忆合金结构的4D打印,如图2(a)所示,经过脱脂、烧结等后处理工艺,所制备的镍锰镓零件孔隙率可达73.43%,试验结果表明零件具有马氏体到奥氏体转变的形状记忆特性,然而,这种多孔形状记忆合金除制备工艺复杂外,其力学性能及疲劳性能难以保证,直接限制了其在关键应用场合的应用;Han等^[27]则利用缠绕聚酯纤维的形



(a) 采用不同设计方案制造的多材料夹持器



(b) 多材料夹持器在打印与临时状态结构之间的转换过程



(c) 夹持器抓取零件过程

图1 形状记忆材料4D打印技术制备的可变形结构

Fig.1 Morphing structures prepared by 4D printing using shape memory polymers

状记忆合金线(图 2(b)), 编织制备了能够变形的柔性编织结构, 通过合金线通电驱动合金线的变形, 实现了三维可变形柔性花瓣的织造, 但是, 这种采用形状记忆合金线实现柔性可变形结构织造工艺复杂, 很难实现具有复杂三维功能结构的设计与制造。

利用材料形状记忆特性进行智能结构 4D 打印能够实现可变形结构的制造, 但目前可直接 4D 打印的形状记忆聚合物/合金, 其变形过程均为单向的, 且需要借助外力设置预变形, 可逆/多重变形的 4D 打印结构仍需通过结构设计和复合打印实现, 增加了结构设计与制造装备的复杂性, 限制了该类结构的实际应用性; 同时, 基于形状记忆特性的 4D 打印结构多为热驱动, 所制备的结构需置于热环境中才可发生变形, 不利于工程实际应用。

2 仿生复合材料结构 4D 打印

2.1 短纤维/颗粒嵌入复合材料结构

苏黎世理工 Studart 教授团队受松果吸水膨胀变形机理的启发, 采

用磁场控制短纤维分布方向的制造方法, 以水凝胶为基体材料, 通过控制其中短纤维分布方向来实现结构的可控变形^[11]。哈佛大学 Lewis 教授团队基于同样的变形机理提出了仿生 4D 打印技术, 以短纤维混合水凝胶为原材料, 通过水凝胶挤出剪切作用获得特定的纤维取向, 实现了可控变形结构的制造, 如图 3 所示^[12]。

通过控制短切纤维分布方向实现各向异性吸水膨胀, 实现了单一材料可控变形结构的制造, 避免了基于形状记忆聚合物的智能结构 4D 打印所面临的多材料工艺复杂、难以定量控制的缺点; 然而现有材料体系多以水凝胶作为基体材料, 以吸水膨胀作为变形驱动力, 变形环境要求苛刻, 且短纤维增强效果有限, 难以实现承载与变形的多功能集成。

2.2 连续纤维复合材料结构

连续纤维是一种易于控制取向的增强材料, 可以利用嵌入连续纤维的方法使复合材料产生可控变形。Cho 等^[15] 利用热压法制备了连续纤

维复合材料, 得到了双稳态变形的捕蝇器。Balazs 等^[16] 模拟了单列纤维嵌入柔性基体时, 复合材料可能发生的变形。然而, 传统工艺制备的复合材料的纤维往往只能沿直线分布, 复合结构只能实现简单的变形。如果能够纤维走向设计与 4D 打印技术相结合, 理论上具有更强的变形精度以及变形可设计性。该工艺方法也为本文提出的连续纤维嵌入复合材料结构 4D 打印提供了思路。

与此同时, 研究人员也探索了以导电金属丝作为嵌入纤维, 利用液晶高弹体具有在特定取向下具有较高膨胀系数的特点, 通过 4D 打印工艺制备嵌入银线/液晶高弹体的多层复合材料, 如图 4 所示^[28], 可以得到电流加热驱动的可控变形结构。采用该方法所制备的可变形结构具备驱动、变形一体化特点, 为智能结构设计提供了新思路。

3 外场驱动下的智能结构 4D 打印

3.1 磁场驱动智能结构 4D 打印

利用磁性颗粒的磁场相应特性,

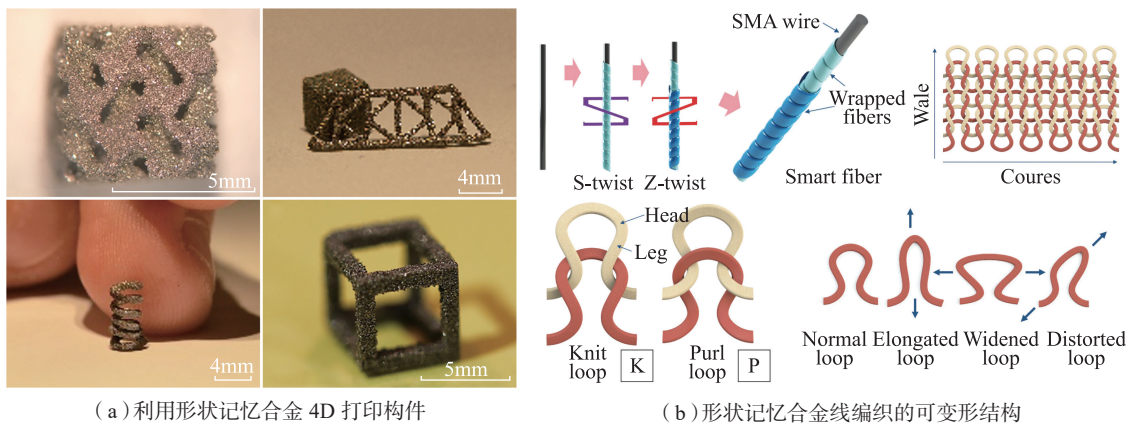


图 2 利用形状记忆合金 4D 打印构件与形状记忆合金线编织的可变形结构

Fig.2 4D printed components by using shape memory alloys, and morphing structure by knitting with shape memory alloy wires

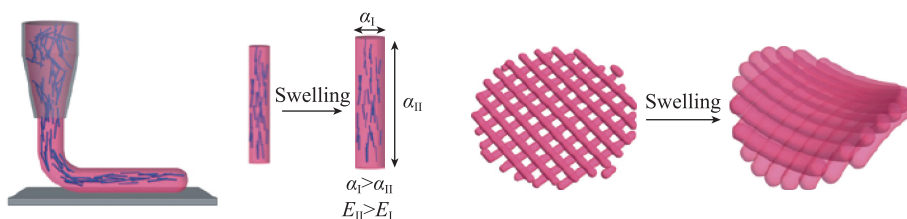


图 3 短纤维水凝胶混合物打印与吸水膨胀变形机理

Fig.3 4D printing of short-cut carbon fiber filled hydrogel and morphing mechanism by absorbing water

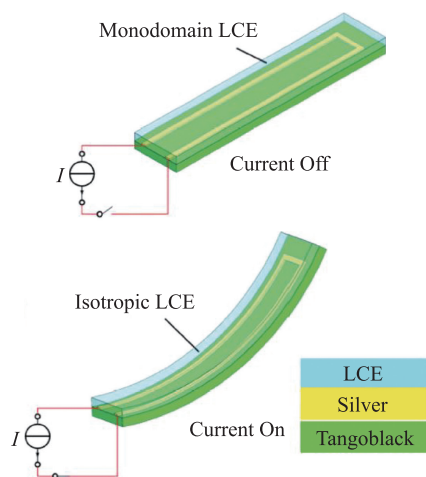


图4 4D打印制备的热致液晶复合材料
Fig.4 4D printed LCE composite structure

可制备磁性颗粒改性的复合材料结构, 实现在外部磁场作用下的变形甚至运动。Hu等^[29]制备了形状极为简单的柔性机器人, 但由于基体内部嵌入了非均质磁性材料, 因此该机器人可以通过特定的控制磁场实现爬行、游泳、登陆、跳跃等各种复杂的运动。Garstecki等^[30]利用柔性光刻技术制备了可以在流体中游泳的、磁性纳米颗粒与聚二甲基硅氧烷共混的柔性机器人。Mooney等^[31]制备了磁性颗粒嵌入的大孔隙水凝胶材料作为药物输送装置, 其中大孔隙的作用是便于输送释放药物并降低弹性模量以实现大变形。

在3D打印过程中施加外部磁

场时, 磁场可能会影响到已经打印好的区域内的磁性颗粒取向。为了解决这个问题, Kwon等^[32]基于光固化技术设计了不同区域分批固化的方式, 实现了磁性颗粒的任意取向; Zhao等^[33]则基于油墨直写技术开发了能够给局部区域施加指定磁场的打印头装置, 于是材料可以响应外界磁场产生复杂的、迅速的变形, 甚至可以完成抓取物体、翻滚等动作, 如图5所示^[32]。

3.2 温度场驱动智能结构4D打印

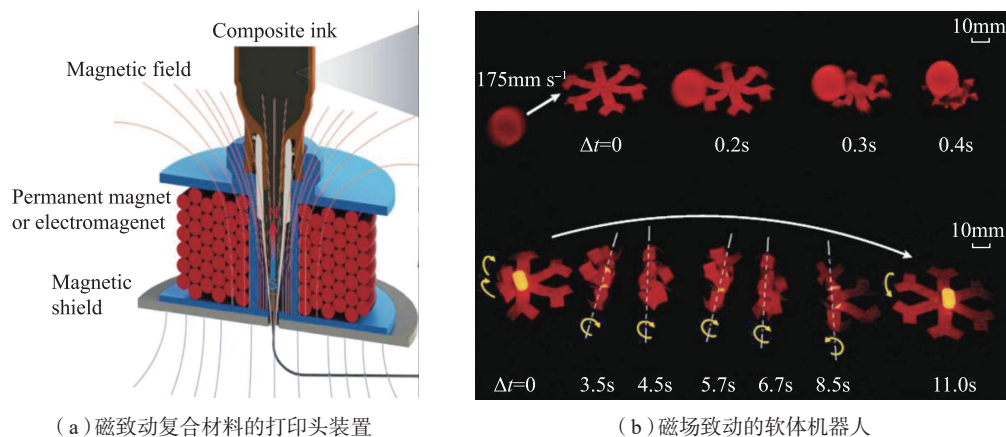
在传统的陶瓷制造工艺中, 陶瓷先驱体的烧结过程是往往伴随着收缩与翘曲变形, 如何减少甚至消除这种变形是陶瓷烧结成形工艺的难点。然而, Lu等^[34]开发了一种可进行3D打印成形的弹性体聚二甲基硅氧烷纳米复合材料, 该复合材料具有极强的拉伸变形特性, 在施加温度场使其陶瓷化的过程中, 由于预应变的存在使其结构发生了可设计变形, 实现了在外界温度场驱动条件下的可编程的结构变形, 图6所示为不同高斯曲率(K)的复杂陶瓷结构。这种由于烧结过程中导致的结构变形是一次性的、不可恢复的变形, 可实现复杂结构陶瓷制品的制造, 但其变形精度、变形过程难以精确控制, 如何开展工程应用仍需要进一步探索。

综上所述, 国内外研究人员围绕4D打印技术已经开展了大量研究, 在形状记忆聚合物4D打印、仿生复合材料4D打印、外场驱动4D打印等方面取得了阶段性进展, 然而, 现有研究成果多集中在结构变形可行性的验证, 在结构变形过程的可控性、可重复变形性能、多功能集成等方面还存在着较多问题, 仍待进一步研究。受仿生复合材料结构4D打印启发, 西安交通大学研究团队在连续纤维增强复合材料3D打印工艺的基础上, 开展了连续纤维嵌入式的智能复合材料结构4D打印的探索, 为多功能集成的智能复合材料结构设计制造提供了一个新的思路。

连续纤维嵌入复合材料结构4D打印

1 工艺方法

连续纤维增强复合材料3D打印工艺采用碳纤维干丝为增强相和热塑性高分子材料为基体材料, 可实现复杂结构复合材料构件的一体化成形^[17-18, 21], 研究中发现在所制备的单层复合材料结构中, 碳纤维与基体材料呈双层分布, 当碳纤维通电进行结构自加热时, 由于碳纤维与基体材料的热膨胀系数具有较大差异, 可实现复合材料双层结构的热致变形^[20]。基于此结构变形机理, 西安交通大学



(a) 磁致动复合材料的打印头装置

(b) 磁场致动的软体机器人

图5 磁致动复合材料的打印头装置及磁场致动的软体机器人

Fig.5 4D printing device for magnetic driving composites and soft robot driven by magnetic field

研究团队提出了连续纤维嵌入复合材料的4D打印工艺方法,通过设计曲线纤维路径实现复合材料结构的可控变形;开发了用于复合材料结构4D打印装备(斐帛科技,中国陕西),如图7(a)所示。当环境温度发生变化时,复合双层结构可以产生不同程度的弯曲变形。在打印过程中,由于底板的限制作用,树脂在降温过程中无法充分收缩,于是复合双层结构在从底板上取下时不会产生明显的变形。因此,需要对打印得到的复合双层结构进行热处理,完整的加工流程如图7(b)所示。

2 变形机理

当两列纤维同时存在时,复合材料的应变能密度增量可由下式计算:

$$\Delta e \approx (k_a - k_1 \cos^2 \alpha)^2 + (k_b - k_1 \cos^2 \alpha (\theta - \alpha))^2 \quad (1)$$

式中, k_a 、 k_b 是当其中一列纤维单独存在时的曲面曲率; θ 是两列纤维的夹角; α 是其中一列纤维与主曲率方向的夹角。当 Δe 取到最小值时的 k_1 和 α 的值分别为实际曲面的非零主曲率大小及方向。

据此,得出了纤维取向与曲面曲率的关系:当两列纤维在复合材料同一侧时,曲面的主曲率方向为两列纤维的锐角(或直角)角平分线方向,主曲率大小与 $\sec^2(\theta/2)$ 成正比。对所得出的纤维取向与曲面曲率关系进行了试验验证,打印了两列纤维分布在同侧且夹角为 30° 、 60° 和 90° 时的复合双层结构并测定曲率大小及曲率方向。试验结果如图8所示,可以看出试验值与理论值能够很好地吻合。

进一步地,研究了不同温度下、不同的纤维分布位置下的曲率变化规律。图9^[22]为 $k_a \cdot k_b = 0$ (只有一列纤维)、 $k_a \cdot k_b > 0$ (两列纤维分布在复合材料同一侧)、 $k_a \cdot k_b < 0$ (两列纤维分布在复合材料两侧)时,复合材料在不同温度下的形状变化规律。进一步研究表明,在一定的温度范围

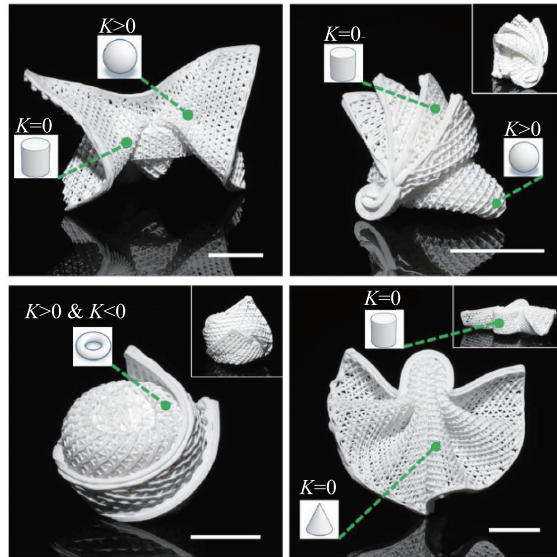
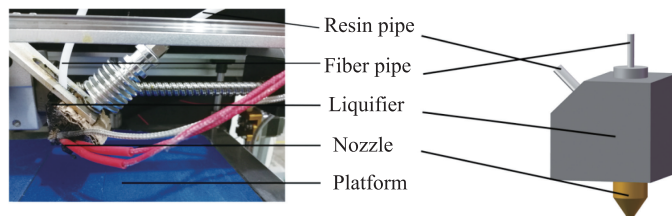
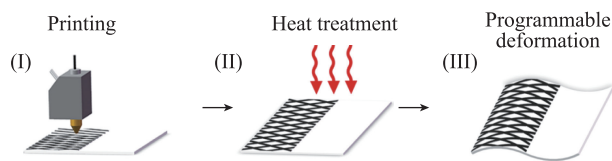


图6 基于陶瓷先驱体的陶瓷结构4D打印

Fig. 6 4D printed ceramic components based on preceramic composites



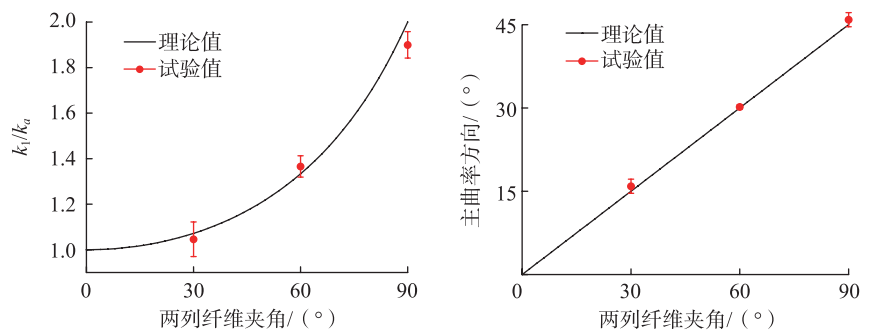
(a) 复合材料4D打印装备



(b) 复合材料4D打印热处理流程

图7 连续纤维嵌入复合材料4D打印装备及打印工艺

Fig.7 4D printing equipment and 4D printing process for composites with continuous fiber embedded



(a) 非零主曲率大小与两列纤维夹角的关系 (b) 非零主曲率方向与两列纤维夹角的关系

图8 非零主曲率大小及方向与两列纤维夹角的关系

Fig.8 Relation between value and direction of non-zero principal curvature and angle between two columns of fiber bundles

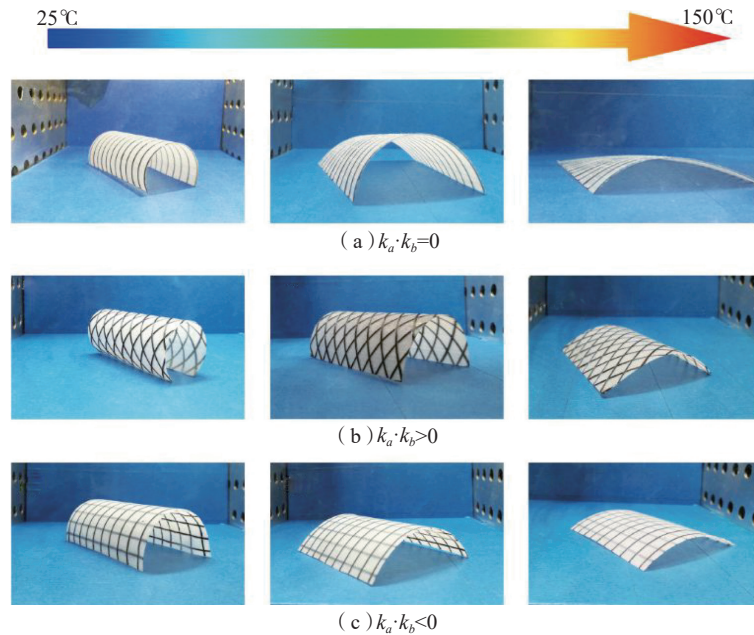


图9 复合材料在不同温度下的形状变化
Fig.9 Shapes of composites at different temperatures

内,曲率与温度总是呈线性关系。

3 可控变形结构设计试验验证

通过以上的基础理论研究,可以得到一些复杂形状的变形设计方法,以圆锥为例对曲面变形设计方法进行说明。首先,求解圆锥曲面的非零主曲率,圆锥上任意一点的非零主曲率大小与该点到顶点的距离成反比,非零主曲率方向为纬线方向;然后,通过保长变换,将圆锥面转化为平面图案,主曲率矢量也随之转化;利用前面得到的纤维取向与主曲率的关系,反求出平面上任意一点的两族纤维取向;进而求解纤维取向的微分方程,得到纤维的轨迹线方程。如图10所示,沿着所求的路径线进行打印,经热处理后,复合双层结构变成了圆锥图案。

根据以上理论规律以及微分几何原理,可以得到任意可展曲面所需

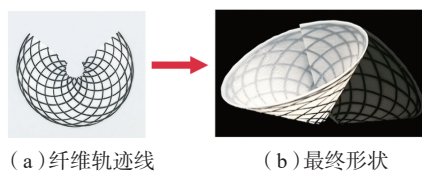


图10 圆锥曲面的变形
Fig.10 Deformation of conical surface

的纤维轨迹线方程。为此,打印了柱面(图11(a)、(b)),锥面(图11(c)、(d)),切线面(图11(e)) and 不可展的球面(图11(f))进行了验证^[22]。

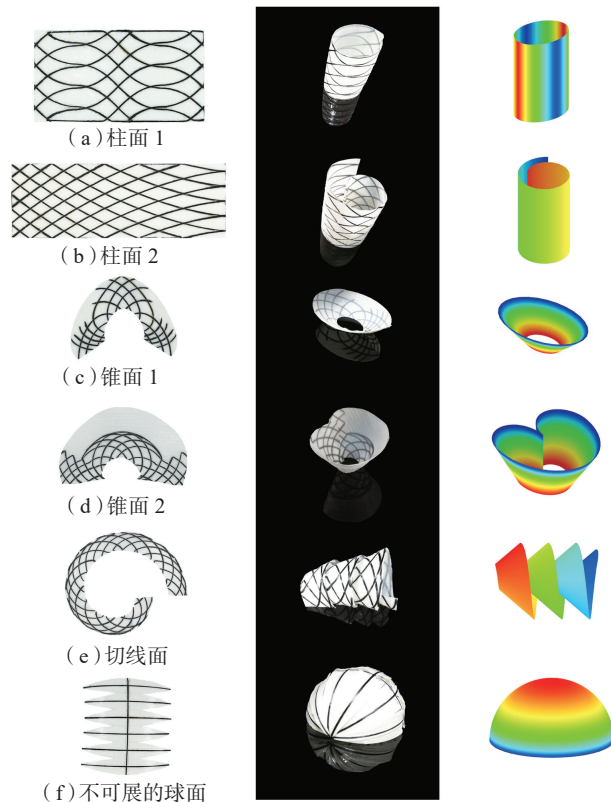


图11 几个典型曲面的变形设计
Fig.11 Deformation design of several typical surfaces

4D 打印技术的应用前景

1 航天领域

在航天领域,往往需要空间设备

能够响应外界条件发生可控的自变形。形状记忆材料虽然只有有限几个稳态形状,但由于其能够同时满足大变形与大承载力的需求^[35],有极大的潜力应用于航天领域中,如空间可展开结构等^[36]。

2 生物领域

人体器官的形状较为复杂且个体化差异较大,而3D打印的无模具加工特点正适合于个体化差异较大的样品成型,因此,生物领域内对3D打印的需求非常高。如肋骨^[37]、耳廓^[38]、关节^[39]等。而大多数生物组织不但具有复杂的形状,而且可以发生组织构象变化,如心脏跳动、胃肠蠕动。4D打印技术可以制备出形状具有可控变化的增材制造技术,有望在器官打印中发挥重要的作用^[23]。

3 软体机器人领域

相比于传统的刚性机器人,软体机器人虽然不具有变形精度高、响应速度快、承载力大的特点,但其具有环境适应能力强、结构调整能力强的优点^[40]。软体机器人的驱动方式有两大类,一类是使材料本身具有致动能力,即直接采用智能材料进行制造;另一类是气动驱动,利用3D打印技术制备具有内部流道的软体机器人^[41]。由于智能材料与4D打印的结合尚未被充分开发,因此具有更快的致动速度及更高的变形精度的气动驱动软体机器人往往更广泛地应用于实际需求中。

结论

4D打印技术是一种采用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。形状记忆材料4D打印是利用材料相变特性驱动结构变形,而仿生复合结构4D打印多利用复合材料各向异性的吸水或热膨胀特征促使结构变形,外场驱动4D打印多采用温度场、电磁场作为调控

手段,获得非均匀材料形变实现结构变形;连续纤维嵌入复合材料4D打印工艺具有纤维取向精确调控的优点,可实现复合材料结构的可控变形,更易于实现多功能复合材料结构一体化设计与制造。随着4D打印技术的不断发展与成熟,可以预见其在航天、生物、软体机器人等领域将有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] TIBBITS S. 4D printing: multi-material shape change[J]. *Architectural Design*, 2014, 84: 116–121.
- [2] PEI E. 4D printing: dawn of an emerging technology cycle[J]. *Assembly Automation*, 2014, 34: 310–314.
- [3] PEI E. 4D printing—revolution or fad?[J]. *Assembly Automation*, 2014, 34: 123–127.
- [4] GE Q, HOSEIN S A, HOWON L, et al. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 1–11.
- [5] DING Z, YUAN C, PENG X, et al. Direct 4D printing via active composite materials[J]. *Science Advance*, 2017, 3: 1–6.
- [6] BEHL M, ANDREAS L. Shape-memory polymers[J]. *Materials Today*, 2007, 10: 20–28.
- [7] REYSSAT E, MAHADEVAN L. Hygromorphs: from pine cones to biomimetic bilayers[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2009, 6(39): 951–957.
- [8] ELBAUM R, ZALTZMAN L, BURGERT I, et al. The role of wheat awns in the seed dispersal unit[J]. *Science*, 2007, 316: 884–886.
- [9] ARMON S, EFRATI E, KUPFERMAN R, et al. Geometry and mechanics in the opening of chiral seed pods[J]. *Science*, 2011, 333(6050): 1726–1730.
- [10] IONOV L. Bioinspired microorigami by self-folding polymer films[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2013, 214: 1178–1183.
- [11] SCHMIED J U, LE FERRAND H, ERMANNI P, et al. Programmable snapping composites with bio-inspired architecture[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12: 1–11.
- [12] GLADMAN A S, MATSUMOTO

E A, NUZZO R G, ET AL. Biomimetic 4D printing[J]. *Nature Materials*, 2016, 15: 413–419.

[13] ERBRM, LIBANORI R, ROTHFUCHS N, et al. Composites reinforced in three dimensions by using low magnetic fields[J]. *Science*, 2012, 335: 199–204.

[14] LOPES C S, CAMANHO P P, GÜRDAL Z, et al. Progressive failure analysis of tow-placed, variable-stiffness composite panels[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44: 8493–8516.

[15] KIM S W, KOH J S, LEE J G, et al. Flytrap-inspired robot using structurally integrated actuation based on bistability and a developable surface[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9: 1–14.

[16] KUKSENOK O, BALAZS A C. Stimuli-responsive behavior of composites integrating thermo-responsive gels with photo-responsive fibers[J]. *Materials Horizons*, 2016, 3: 53–62.

[17] TIAN X, LIU T, YANG C, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. *Composites: Part A*, 2016, 88: 198–205.

[18] 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: 209–215.

[19] RYOSUKE M, MASAHITO U, MASAKI N, et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 1–7.

[20] YANG C, WANG B, LI D, et al. Modelling and characterisation for the responsive performance of CF/PLA and CF/PEEK smart materials fabricated by 4D printing[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12: 69–76.

[21] 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.

[22] HOU Z, TIAN X, ZHANG J, et al. 3D printed continuous fibre reinforced composite corrugated structure[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 1005–1010.

- [23] WU J, YUAN C, DING Z, et al. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 1–11.
- [24] LI Y C, ZHANG Y S, AKPEK A, et al. 4D bioprinting: the next-generation technology for biofabrication enabled by stimuli-responsive materials[J]. Biofabrication, 2016, 9(1): 012001.
- [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 prospects[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(1): 2–16
- [26] CAPUTOA M P, BERKOWITZ B A E, ARMSTRONG C A, et al. Virgil 4D printing of net shape parts made from Ni-Mn-Ga magnetic shape-memory alloys[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 579–588.
- [27] HAN M, AHN S. Blooming knit flowers: loop-linked soft morphing structures for soft robotics[J]. Advanced Materials, 2017, 29(13): 1606580.
- [28] YUAN C, ROACH J, DUNN C K, et al. 3D printed reversible shape changing soft actuators assisted by liquid crystal elastomers[J]. Soft Matter, 2017, 13(33): 5558–5568.
- [29] HU W, LUM G Z, MASTRANGELI M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion[J]. Nature, 2018, 554(7690): 81–85.
- [30] GARSTECKI P, TIerno P, WEIBEL D B, et al. Propulsion of flexible polymer structures in a rotating magnetic field[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2009, 21(20): 204110.
- [31] ZHAO X, KIM J, CEZAR C A, et al. Active scaffolds for on-demand drug and cell delivery[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108: 67–72.
- [32] KIM J, CHUNG S E, CHOI S, et al. Programming magnetic anisotropy in polymeric microactuators[J]. Nature Materials, 2011, 10(10): 747–752.
- [33] KIM Y, YUK H, ZHAO R, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials[J]. Nature, 2018, 558: 274–279.
- [34] LIU G, ZHAO Y, WU G, et al. Origami and 4D printing of elastomer-derived ceramic structures[J]. Science Advances, 2018, 4: 1–10.
- [35] AKBARI S, SAKHAEI A H, KOWSARI K, et al. Enhanced multimaterial 4D printing with active hinges[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(6): 65027.
- [35] LIU Y, DU H, LIU L, et al. Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23: 1–22.
- [36] KANG J, WANG L, YANG C, et al. Custom design and biomechanical analysis of 3D-printed PEEK rib prostheses[J]. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 2018, 17(4): 1083–1092.
- [37] REIGHARD C L, HOLLISTER S J, ZOPF D A. Auricular reconstruction from rib to 3D printing[J]. Journal of 3D Printing in Medicine, 2018, 2(1): 35–41.
- [38] SHI W, SUN M, HU X, et al. Structurally and functionally optimized silk-fibroin-gelatin scaffold using 3D printing to repair cartilage injury in vitro and in vivo[J]. Advanced Materials, 2017, 29(29): 1701089.
- [39] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015, 521(7553): 467–475.
- [40] SCHAFFNER M, FABER J A, PIANEGONDA L, et al. 3D printing of robotic soft actuators with programmable bioinspired architectures[J]. Nature Communications, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-03216-w.
- [41] WEHNER M, TRUBY R L, FITZGERALD D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots[J]. Nature, 2016, 536(7617): 451–455.

通讯作者: 田小永, E-mail: leoxyt@mail.xjtu.edu.cn。

Programmable Morphing Composite Structures by 4D Printing

TIAN Xiaoyong^{1,2}, WANG Qingrui^{1,2}, LI Dichen^{1,2}, LU Bingheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Rapid Manufacturing Engineering Technology Research Center, Xi'an 710049, China)

[ABSTRACT] 4D printing is a kind of additive manufacturing which uses 3D printing to make the printed structure have the function of responding to external stimulus, shape changing or performance changing. The processes of 4D printing technology, such as 4D printing based on shape memory materials, 4D printing based on biomimetic composite structures and 4D printing based on field-driven smart structures, are summarized. The problems of existing 4D printing technology, such as discontinuous deformation process, difficult to prepare and difficult to realize controllable deformation, are analyzed. The 4D printing strategy for composites with continuous fibers reinforced is proposed, and the 4D printing of arbitrary deployable surface structure is realized by controlling the deformation of composites. Finally, the potential applications of 4D printing technology in aerospace, bio-medicine and soft robots are analyzed.

Keywords: 4D printing; 3D printing; Additive manufacturing; Controllable deformation; Composites; Continuous fiber

(责编 海山)