

## 4D打印，塑造未来世界的智能材料

作者：Giancarlo Rizza

编辑：Meister Xia

---

### 导读：

#### 3D打印

方兴未艾，4D打印已扑面而来。随着人类社会阔步向智能化时代迈进，4D打印技术恰逢其时，它与3D打印、智能材料、可编程物质相互促进、共同发展，已经在众多领域显示出良好的应用发展前景。那么什么是4D打印？如何实现4D打印？4D打印在哪些领域有所应用？本期为“新兴材料”系列一，带您了解为何4D打印更“智能”。

#### 一览：

0. 4D打印可以理解为赋予物体额外功能的3D打印，能制造“动态”的、可对外界刺激做出反应的物体。
0. “4D打印”这一名词，以及利用该技术制造可编程物质的理念，由麻省理工大学自组装实验室创始人Skylar Tibbitts在一次TedX演讲中首次提出。
0. 利用4D打印，创造可“自我组装”的智能材料，必将开辟设计的新世界。
0. 4D打印还能用于制造假肢、或者生产发电效率更高的光伏设备。
0. 继增材制造之后，4D打印必然会引发新一轮变革，彻底改变工业产品的设计和生產方式。

35年前问世的3D打印技术，在传统制造业转型中扮演了重要角色，催生了市值约300亿欧元、年增长率高达20%的市场。然而，当一项技术走向成熟，有朝一日必会被新技术所替代。3D打印技术的继任者，就是具有突破意义的4D打印，其中第四个维度代表着时间。

4D打印可以理解为赋予物体额外功能的3D打印，能制造“动态”的、可对外界刺激做出反应的物体。利用该技术，设计者能对物体进行“编程”，让其具备智能生物般的自主性。无论是科研还是实际应用，4D打印都蕴含无限机遇和潜力。

## 第四个维度：时间

事实上，可编程物质的概念最初是在计算机领域而非材料领域提出的。1991年，麻省理工的两名学者Toffoli 和 Margolus首次使用“可编程物质”一词，描述在固定空间中排序、只能与一级邻居交换信息的一组计算节点 [1]。

新理念逐渐渗透进了其他学科。2005年，美国国防高级研究计划局 ( DARPA ) 启动了一项名为“打造可编程物质”的长期项目，聚焦模块化机器人、集成编程、纳米材料 [2]，让可编程物质的发展轨迹与智能材料实现了相逢。智能材料，指可通过物理刺激 ( 电场、磁场、光照、温度、震动 )、化学刺激 ( pH值、光化学反应 ) 或生物刺激 ( 葡萄糖、酶、生物活性分子 ) 激活或诱发改变的材料。

最终，在2013年，麻省理工大学自组装实验室创始人Skylar Tibbitts在一次TedX演讲中，提出以智能材料为3D打印原料生产可编程物体，并将这一技术命名为“4D打印”。3D打印、可编程物质、智能材料三个领域的碰撞交融，拉开了4D打印革命的序幕 [3]。

## 4D打印，一门复杂的学科

智能材料是4D技术的核心。但由于相关研究仍处于早期阶段，现可投入使用的成熟材料尚少，主要以多聚物为主，故机遇挑战并存。当前的一个重点研究领域就是探

索陶瓷、金属乃至生物物质、复合材料作为打印原料的可能性

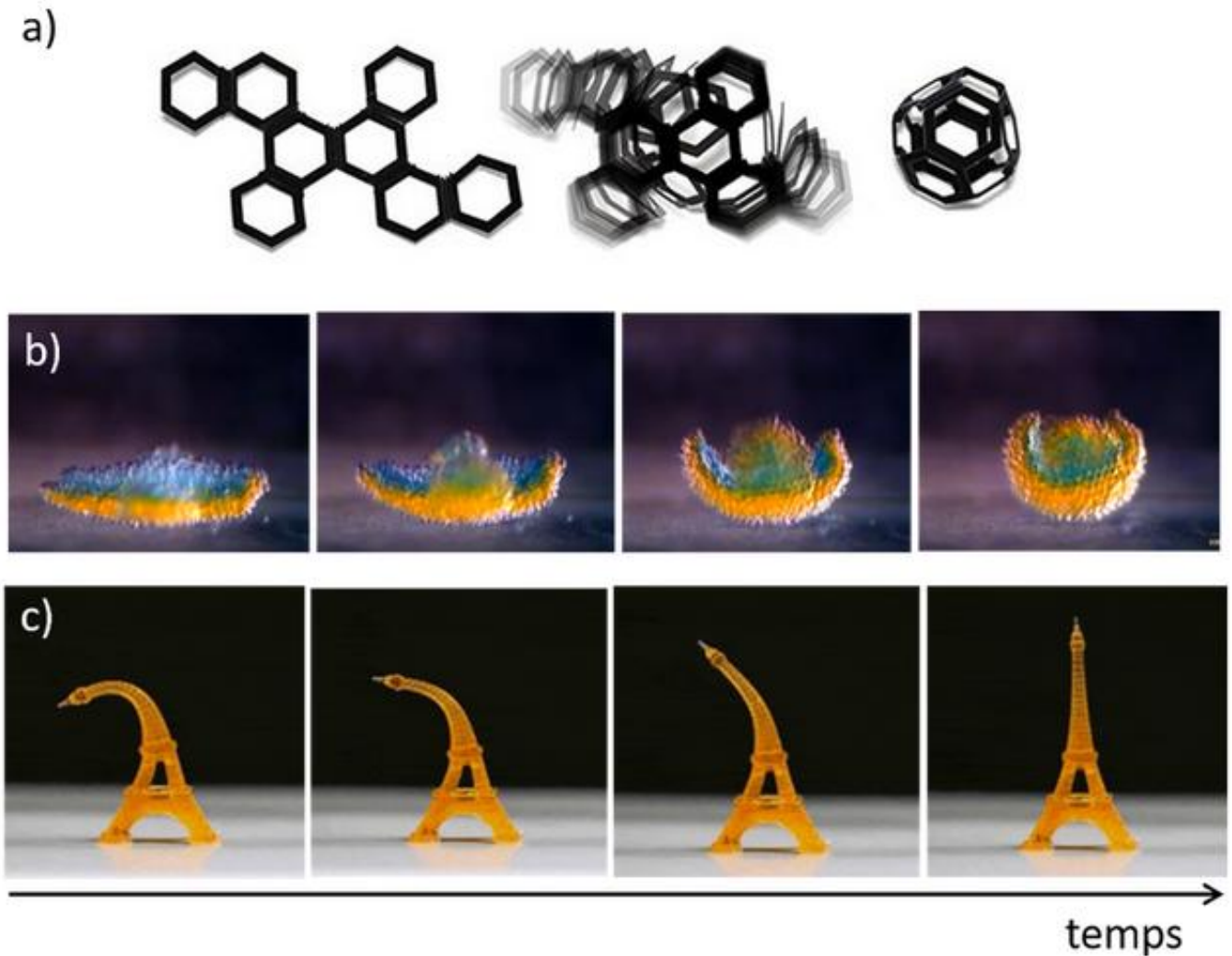
除了合适的材料，4D打印技术的进步还需要设计理念的同步发展。设计者必须能合理结合多种材料、工艺和功能，设计出具有预期功能的物体。同时，还需要以“设计-建模-模拟”三个基本步骤为基础，形成新的设计方法论，确保打印出的物体能以正确的方式响应外部刺激。

在计算机科学中，比特是编程的基本单位，而在4D打印中，对应的单位则是“体素”（voxel）。体素，指存储活性物质物理、化学、生物信息的基本体积单元。设计出拥有特定功能的4D打印成品，需要通过前期建模、模拟体素的最佳空间分布，保证最终的成品能在刺激下做出特定的反应。在这一复杂的设计过程中，期望实现的物体行为应视为输入变量，物体的实际行为（体素的空间分布）应视为输出变量，而且设计者应具有根据实际问题“随机应变”的思维。

4D打印可制造数种活性材料与刚性材料相互交融的异质性物体。但前提是开发出可兼容多种原料的4D打印机，以及相应的打印机控制程序，使设备适应原料的特质，制造出具有正确刺激响应性的物体。

## 4D打印的实际应用有哪些？

4D打印能塑造形态复杂、功能多变的物体，有望开辟设计的新世界，带来制造业的重大变革。如果打印出的物体能在预先设定的时间和地点实现自我组装，无需人类参与，那么必然会催生出一系列全新的技术。如果物体既有感知力，又有行动力，就意味着能自主适应环境。如果物体能自我检查并修复生产、使用中发生的损坏，则能减少对设备进行侵入性修理工作的需要。



注：

a) 在液体媒介中用4D打印出的物体，可在液体蒸发后自动组合为截角八面体，图源MIT自组装实验室[4]

b) 利用4D打印生成的微液滴，编制人造仿生布料，图源Science期刊[5]

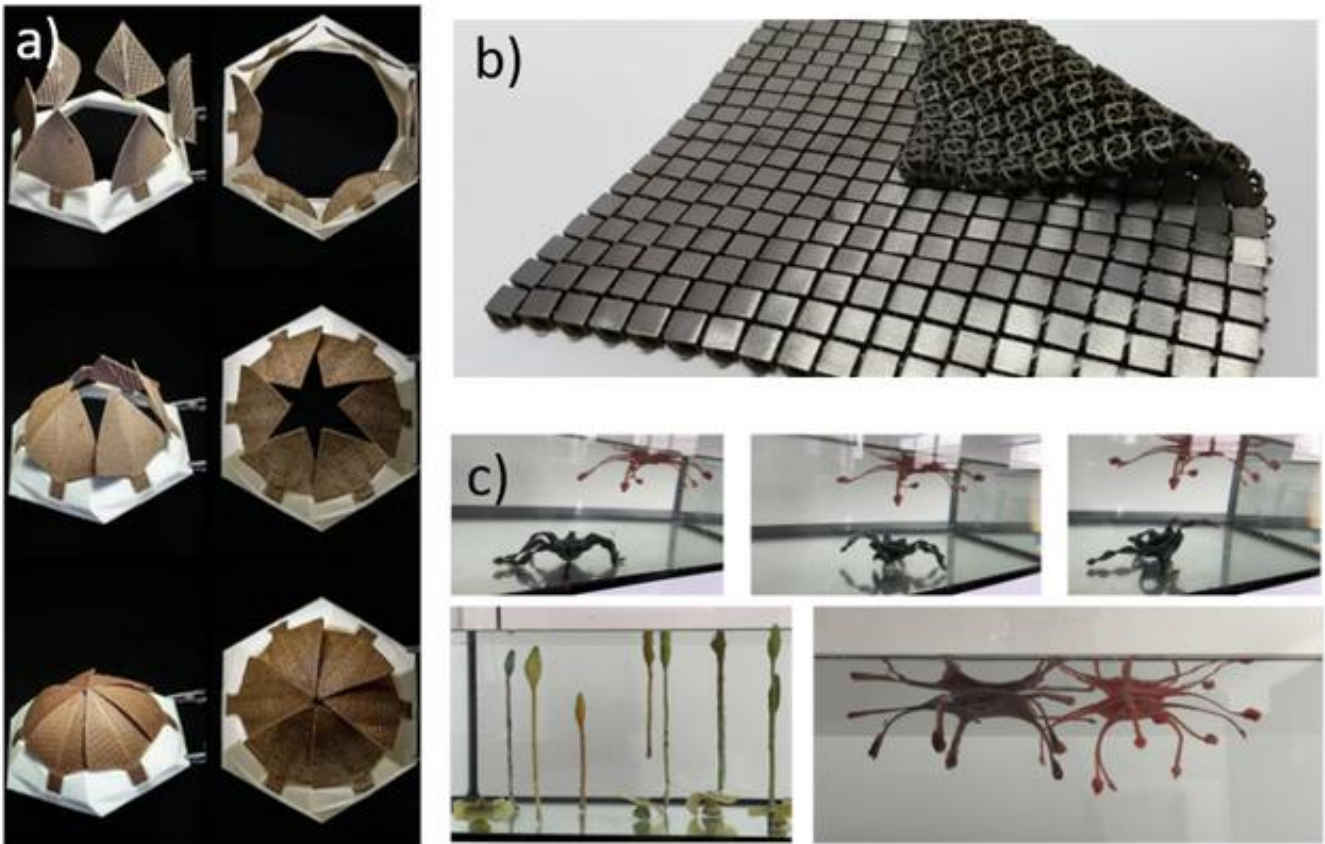
c) 利用形状记忆高分子材料和4D打印制作的“温度敏感埃菲尔塔”模型，图源Scientific Reports 期刊[6]

具体的应用还有很多。在柔性机器人领域，4D打印助推了小型机器人的研发，使其朝着毫米级、微米级、甚至纳米级前进。这种机器人可在高危、狭小环境中完成任

务，比如可以进入人体递送药物或实施微入侵式手术。在生物医药领域，有学者在研究如何利用4D打印技术制造支架、器官和智能组织。4D打印还能促进柔性嵌入型电子设备的发展，以及智慧城市所需的智能传感器的研发。

### 太阳能板

的发电效率。在消费者应用方面，可以想象4D打印用于设计未来的时尚服装，制造具有自适应特质的仿生布料或智能自折叠鞋。在建筑领域，4D打印能助推新型可持续设计理念。Hygroskin气候响应式建筑项目就是一个很好的例子，其建材充分发挥了木材吸湿性特质，让墙体上的模块能根据空气湿度自动展开或闭合，不需要人类操作或额外能量输入。最后，在艺术和更广义的科学领域，4D打印可用于多种类型的创作和研究，探索物质行为的本质，以及生命与人造物体之间的关系。



注：



a) 巧妙借助木质材料的天然吸湿性，可使建筑元素根据环境变化自主展开或闭合，图源美国材料研究学会 [7]

b)  
4D打印制造的太空铠甲，可保护宇航员不受陨石碎片撞击，图源美国航空航天局 [8]

c) 活性材料在科研和艺术创作中的实际应用，图源法国国立高等装饰艺术学院Carasso 基金会 [9]

## 4D打印的未来

法国哲学家伯纳德·德·沙特爾曾说：“我们是坐在巨人肩膀上的侏儒。”继增材制造之后，4D打印必然会引发新一轮变革，彻底改变工业产品的设计和生产方式。与3D打印相比，4D打印的市场规模尚小，前者高达300亿欧元/年，后者只有3000-5000万欧元/年。这并不足为奇，毕竟新技术仍在起步期，但其颠覆行业的潜力已充分显现。未来，4D打印技术需要与可行的商业模式结合，并实现规模化、有成本竞争力的量产，还要有明确的发展路线图，并激发消费者的购买欲望，获得投资人和实业家的支持，才有希望实现产业化，走向市场成熟。

由Giancarlo Rizza采访

参考资料：

1.T. Toffoli and N. Margolus, Programmable matter: concepts and realisation, Physica D 47 (1991) 263–272

2.<https://cognitivemedium.com/assets/matter/DARPA2006.pdf>

3.Active Matter, Edited by Skylar Tibbits, The MIT Press (2017)

4.<https://selfassemblylab.mit.edu/4d-printing>

5.G. Villar et al, A Tissue-Like Printed Material, Science, 5 Apr 2013, Vol 340, Issue 6128, pp. 48–52

6.Q Ge et al, Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers, Scientific reports, 2016, 6(1): 1–11

7.Correa Zuluaga et al, 3D Printed Hygroscopic Programmable Material Systems, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1800 ? 2015 Materials Research Society

8.<https://www.nasa.gov/feature/jpl/space-fabric-links-fashion-and-engineering>

9.Antoine Desjardins and Giancarlo Rizza, The use of active matter in research-creation practices: Using an artistic vocabulary for 4D printing of magneto-active polymers deployed in experimental and observation devices. <https://roboticart.org/icra2021>

---



Giancarlo Rizza

法国原子能和替代能源委员会4D增材制造专家

//

End