

4D 打印：增材制造技术的发展与展望

■ 文 / 史玉升

华中科技大学

摘要：制造技术分为等材、减材、增材制造三类，目前增材制造主要分为 3D 打印和 4D 打印等。3D 打印成形结构件和功能构件，是目前应用最广的增材制造技术，4D 打印在 3D 打印基础上增加了时空轴，突破了传统 3D 打印成形的局限性，让构件的形状、性能、功能具备动态可编程的特性，得到智能构件。本文结合 4D 打印技术的实际研发与应用实践，从概念与内涵、技术本质、全球研究格局、核心材料体系、工程应用、发展瓶颈及趋势等方面展开分析，明确 4D 打印是通过材料与结构的双重设计，让增材制造的智能构件在外部能场刺激下，实现形状、性能、功能随时间、空间可控变化的技术。该技术在航空航天、生物医学、柔性电子、可穿戴设备等领域展现出广阔的应用前景，但面临材料、工艺、产业化等多方面的制约，未来需依托多学科交叉、人工智能融合、绿色可持续发展等途径实现技术突破，推动增材制造技术向更高维度、更智能化方向发展。

一、4D 打印技术的概念溯源与科学定义

在增材制造技术的大家庭中，3D 打印已得到广泛应用。3D 打印现阶段主要做两类构件：一类是结构构件，比如燃气轮的喷油嘴，原本需要 20 个零件组装而成，通过 3D 打印可整体成形，并且形状、性能均保持稳定；另一类是功能构件，比如声波隐身斗篷的超材料构件，通过调控超材料结构参数，能让潜艇、船舶等被声呐探测的距离大幅缩短，甚至无法被探测；类似的还有光学隐身的超材料构件，能实现光的无反射。在 3D 打印的基础上，通过材料和结构设计，引入时空维度，4D 打印由此产生，成为增材制造的研究热点和发展趋势。

4D 打印的概念最早在 2013 年由 MIT 的 Tibbits 教授提出，他将 3D 打印的绳状物体放入水中，在水的刺激下，该绳状物体自动折叠成 MIT 的形状，但只演示了这一动态现象，关注构件的形状变化，属于简单的“3D 打印 + 时间”的技术探索。我国在 4D 打印领域开展了有组织的系统性研究，笔者作为首席科学家带领团队研究后，提出了更为全面、更严谨的 4D 打印科学定义：4D 打印是通过材料和结构的设计，使增材制造构件的形状、性能和功能在外部环境能场刺激下，随时间或者空间能够发生可控变化的技术（图 1）。

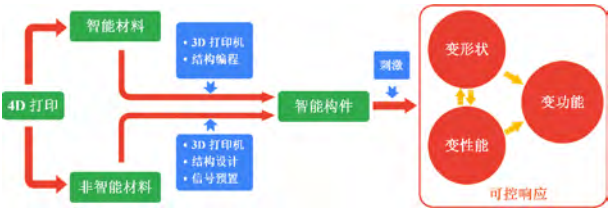


图1 4D打印的定义与内涵示意图

这一定义突破了最初仅关注形状变化的局限，同时明确了两个核心要点：第一，实现4D打印并非仅依靠智能材料，非智能材料通过合理的结构设计和信号预置，同样能成形出智能构件；第二，4D打印的可控变化不仅体现在时间维度，也包含空间维度。团队在4D打印的基础上进一步提出了5D、6D打印的概念，7D打印的含义还有待进一步挖掘和探索（图2），仅供研究者参考：5D打印是在4D打印基础上增加了生命轴，实现生命器官的形状、性能、功能以及生命特征的可控变化，如打印的心脏能自主跳动；6D打印则在5D打印基础上增加了意识轴，结合冷劲松院士提出的智慧材料，实现智慧物体的打印，物体的形状、性能、功能、生命、意识能够可控变化，如打印的物体能感知外界刺激并做出反应。

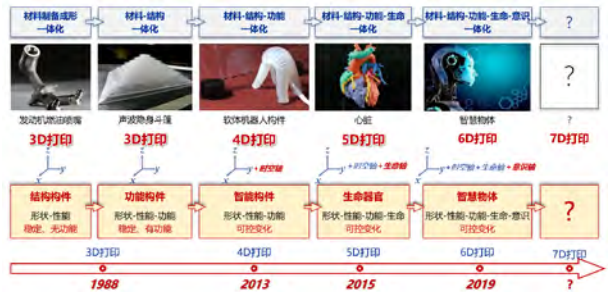


图2 增材制造技术的分类和发展趋势

二、4D打印技术的科学本质与响应机制

4D打印最核心的特征是赋予构件形状、性能、功能的动态可编程性，即通过编程让构件按要求变化。4D打印的“第四维”，本质是成形构件随时间发生的形状、性能或功能的变化，这种变化来源于材料在外部环境能场刺激下的响应行为，打印工艺则是对材料行为进行空间编程的工具，智能构件实现“智能”的关键在于材料在结构约束下的可编程响应。

材料的外场刺激响应机制，是决定4D打印技术能力的关键，主要分为三个方面：一是形状变化，由形状记忆聚合物、液晶弹性体、水凝胶等材料的相变、溶胀、各向异性所驱动，如形状记忆材料在温度刺激下，从临时形状

回复到初始形状；二是性能变化，如构件的模量、电导率、磁性、介电常数等参数，会随着外界能场刺激发生动态变化，以此实现构件性能的动态调控；三是功能变化，能实现外力转化为电信号、磁场转化为机械能等多物理场耦合的响应，这也是4D打印构件实现智能功能的核心所在。

结构设计是4D打印实现智能构件精确可控变化的重要手段，主要分为正向设计和逆向设计。正向设计依靠人类智力劳动完成，正向设计难以实现时，就需要从自然界寻找仿生的逆向设计，通过对构件拓扑优化、分层编程等手段，实现材料响应的时间序列、空间区域与多响应耦合调控。比如模仿蝴蝶口器的结构，4D打印的构件能实现大曲率卷曲折叠变形；模仿蝎子体表超敏感感受器设计的结构，4D打印的构件能实现传感与执行一体化响应。可见结构设计是连接材料特性与工程应用的关键桥梁。

三、4D打印技术的全球研究格局与材料体系进展

3.1 全球研究与市场格局

4D打印的研究和市场布局主要集中在亚太地区的中国、日本、新加坡、澳大利亚，以及美国和欧洲等发达国家和地区。从市场规模来看，全球4D打印市场规模预计从2024年的4.5亿美元增长到2029年的28.5亿美元，年均增长率达到44.75%，这样的高速增长，主要得益于生物制造技术的不断进步，以及各行各业对智能材料的需求持续增加。

在研究模式上，中美两国呈现出明显差异：美国作为4D打印概念的原创提出者，目前各大学自由研究，研究成果以发表学术论文为主；我国有组织地推进4D打印研究，除了科技部、国家自然科学基金委、工信部等国家部委的大力支持，地方政府也积极跟进，比如广东省将4D打印列入重点研发计划，相关项目已结题并取得了实质性成果。在产学研协同推动下，我国的4D打印技术已经从概念研究走向了应用验证，比如“镍钛合金构件4D打印技术及创新应用”成果获有色金属工业技术发明二等奖，标志着我国的4D打印工程化应用取得了重要进展。

3.2 核心材料体系研发进展

材料是4D打印技术的关键，现阶段4D打印的技术瓶颈，本质上是材料瓶颈。4D打印材料体系主要分为聚合物、金属、陶瓷三大类，各类材料都在不断研发突破中，

逐步向多响应、高性能、复合化的方向发展。

聚合物及其复合材料是目前 4D 打印最主要的材料，以形状记忆聚合物、热塑性弹性体、水凝胶等为核心，呈现出多样化刺激响应特征，能实现温度、水、电、光、磁、等多种外场驱动，主流的打印工艺包括光固化、激光选区烧结、熔融沉积成形等。国内的南方科技大学提出了光固化材料体系，这类材料具备极强的形变能力和抗疲劳性能，利用投影式光固化打印能实现高分辨率成形，构件在加热时能表现出明显的形状记忆效应；国外的斯坦福大学在 4D 打印的液晶弹性体中喷涂液态金属，让构件在交变电磁场下产生涡流感应加热，实现了无源可编程的快速驱动，这些成果都推动了聚合物材料在 4D 打印领域的应用。

金属材料的 4D 打印目前应用也逐渐增多，主要是形状记忆合金、磁响应金属和超弹性金属等，采用的工艺主要有激光选区熔化（SLM）、激光直接能量沉积（DED）和电子束熔化（EBM）等，其中镍钛形状记忆合金是目前研究最多的金属材料。江南大学采用 SLM 成形的镍钛形状记忆合金，在最佳能量密度下，展现出优异的超弹性和较高的形状回复率，回复率能达到 97.78%，即使经过多次循环变形，回复率仍能保持在 90% 以上；广东省科学院用 SLM 成形镍钛合金，获得致密的微观结构，仅有微米级的孔隙，构件兼具高强度与韧性，在 75℃ 以上的环境中具备优异的形状回复能力，这些研究成果为金属材料 4D 打印在航空航天等领域的应用奠定了坚实基础。

陶瓷材料的 4D 打印是当前的研究前沿，主要材料包括陶瓷基形状记忆材料、热响应陶瓷、磁响应陶瓷等，采用的工艺主要以光固化为主，同时还有粘结剂喷射和激光选区烧结等工艺。由于陶瓷有熔点高的特性，现有打印的陶瓷前驱体通常难以变形，阻碍了一些形状复杂陶瓷的打印。为此，香港城市大学研发了一种聚合物和陶瓷纳米颗粒混合的陶瓷墨水，采用其打印的陶瓷前驱体，既柔软且富弹性，可以拉伸至超过原来材料长度的三倍，当拉伸的陶瓷前驱体弹性能量被释放时会进行自我变形，经过热处理后，前驱体转化成陶瓷，这种由弹性体衍生的 4D 打印陶瓷具有很高的抗压强度，可达 547 MPa。深圳大学提出了基于紫外固化聚合物前驱体的 4D 打印策略，通过两步折叠辅助热解的方式，实现了可编程形变的 SiOC 陶瓷打印，目前该工艺的陶瓷转化率和收缩率还存在优化空间，但成功获得了致密无裂纹的复杂陶瓷构件，为聚合物衍生

陶瓷的可控 4D 打印提供了新的方法和思路。

四、4D 打印技术的工程化应用成果

4D 打印技术凭借其动态可编程的核心优势，在航空航天、生物医学、软体机器人、可穿戴设备等领域展现出广阔的应用前景，并且已有多项技术成果实现了应用验证，从实验室研究走向了实际应用。

在航空航天领域，4D 打印技术有效解决了传统制造工艺难以攻克的诸多难题。美国航空航天局（NASA）提出了未来智能变体飞机的概念（图 3），4D 打印的机翼能实现展长、弦长、厚度、后掠角、弯度的动态调控，飞机能根据外界环境的变化，柔顺、平滑、自主地改变外形，以此保持整个飞行过程中的性能最优，比如变展长能提高飞机的航程和航时，变后掠角能提升机翼效率、降低波阻；用镍钛形状记忆合金打印的人造卫星天线，发射前可折叠起来装进卫星体内，大大节省空间，火箭将卫星送至预定轨道后，天线在太阳辐照下升温，借助材料的记忆功能自动展开，回复至抛物面形状；采用形状记忆合金打印的智能宇航服，能自动收缩包裹宇航员的皮肤，形成安全的加压环境，同时还赋予宇航员在行星探索过程中更大的活动自由度。



图 3 美国航空航天局提出的未来智能变体飞机概念图

在生物医学领域，4D 打印技术推动了医疗器件的个性化、微创化发展，大幅提升了治疗效果。个性化血管支架在植入人体前，可被压缩成较小的体积，通过微创手术植入体内指定位置后，在人体温度作用下伸展成预定的形状，实现对血管的有效支撑（图 4）；多点注射器可通过微创方式介入人体，到达靶区后展开，实现药物的精准释放，为肿瘤等疾病的治疗提供新的手段；华中科技大学研

发的聚电解质磁性复合生物墨水，可通过胃镜精确定位到胃肠道的缺陷部位，在胃液中完成固化，并借助外部磁场的引导实现缺陷的无缝修补，避免了传统外科手术带来的大面积创伤。

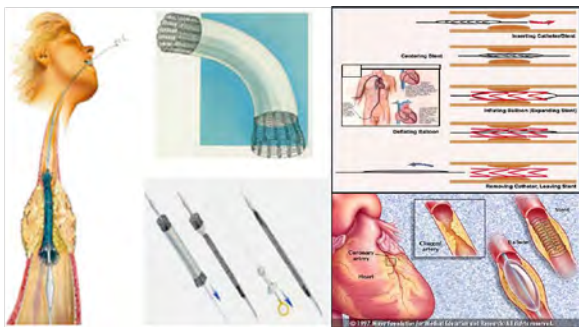


图4 可变形撑开的个性化血管支架

在软体机器人领域，4D 打印技术突破了传统机器人刚性结构的局限，实现了柔性化、智能化发展。4D 打印的软体机器人无需齿轮、电机等传统驱动机构，依靠材料本身在外场刺激下的响应实现运动，同时还具备传感、自修复、自组装等多重功能属性，比如能模拟蛇的运动方式，完成管道内阀门的自动关闭，触觉机械手能实现对西红柿等易碎物品的柔性抓取，避免抓取过程中的损伤；在可穿戴设备领域，华中科技大学研发的 4D 打印电磁组合力电传感器，可将其打印成发电鞋，人体行走时的踩踏力会让传感器发生变形，变形过程中磁通量发生改变从而产生电能，为鞋上的 LED 灯、蓝牙传感器等设备供电，无需外部电池，大幅提升了可穿戴设备的便携性和续航能力。

五、4D 打印技术的发展瓶颈与未来趋势

5.1 现阶段的发展瓶颈

尽管 4D 打印技术取得了应用进展，但从实验室研究向规模化、产业化迈进的过程中，仍面临着诸多挑战，主要体现在材料、工艺、评测、产业化四个方面：一是材料种类有限，无论是智能材料还是非智能材料，在 4D 打印中的应用都存在局限，同时材料存在响应速度不足、刺激类型单一、难以实现多场耦合等问题，并且响应稳定性和环境适应性较差，多次变形后形状记忆效应会明显衰减，多材料复合打印的技术难度也较大；二是成形工艺存在明显短板，微纳级加工难度大，打印精度受到限制，构件的变形控制精度低、预测性差，目前的成形方式仍以点成形为主，面成形、体成形的技术尚未成熟，成形效率较低；三是评测体系处于空白状态，4D 打印构件是动态变化的，而传统的评测方法和仪器都是针对静态构件设计的，目前

尚无适配动态构件的评测手段，也缺乏统一的行业评测标准；四是产业化成本居高不下，高性能打印材料和专用打印设备价格昂贵，并且行业内缺乏统一标准，规模化生产难度大，产学研之间的技术转化效率有待进一步提升。

增材制造技术（包括 3D-6D 打印）的发展也给人类社会带来了一系列新的挑战：一是知识产权保护的难题，数字化设计文件可在网络上随意下载、传播，给知识产权的保护带来了极大困难；二是人类安全的挑战，可轻易打印出无编号的手枪等危险器具，对公共安全造成潜在威胁；三是伦理道德的挑战，生命器官、智慧物体的打印技术如果被滥用，将会引发器官移植、仿生体法律界定等一系列伦理问题。

5.2 未来技术发展趋势

结合当前 4D 打印的技术现状与产业应用需求，该技术的发展趋势已十分明确，其概念将逐步被各行各业所认可和接受，而技术发展将围绕材料、工艺、设计、评测、应用等核心环节展开，同时融合人工智能、绿色可持续发展等先进理念，具体可概括为六大方向：

一是理论研究依托多学科交叉融合，4D 打印技术的发展需要材料、控制、力学、信息、机械等多个学科的交叉融合与理论积累，通过建立材料—结构—工艺—响应的耦合理论模型，为后续的技术研发提供坚实的理论支撑。

二是材料体系向多元化、高性能方向发展，材料研发从高分子逐步拓展至金属、陶瓷、复合材料，重点研发多响应复合材料、高性能纳米材料、生物相容材料，实现多材料、多尺度的构件打印。

三是工艺与装备持续升级优化，切片技术从平面向曲面、编织演进，消除传统平面切片的台阶效应，实现构件各方向性能的均一化；成形方式从点、线向面、体跨越，大幅提升成形效率，同时实现材料从单一均质向多材料复合转变，构件性能从整体均一向区域性能可控转变。

四是设计方法向仿生化、智能化发展，当正向设计难以实现复杂构件设计时，就从自然界寻找灵感进行仿生设计，同时开发自主可控的智能设计软件，突破人工设计的局限。

五是建立全新的评测体系，研发适配动态构件的专业评测设备，制定统一的行业评测标准，实现评测体系从 0 到 1 的突破。

六是应用场景逐步拓展延伸，遵循问题驱动的原则，从小型构件向大型构件、从地面应用向深海、深空应用拓展，同时与人工智能深度融合，利用 AI 辅助材料开发、性能预测、打印过程实时监控、仿真优化，推动技术的规模化、产业化发展，此外，还需坚持可持续发展与环境友好的理念，开发可回收的 4D 打印材料，优化制造流程的能源利用，打造绿色环保的增材制造体系。

六、结语

增材制造技术目前正在从 3D 打印走向 4D 打印，实现了从“打印静态结构件和功能构件”到“打印动态智能构件”的根本性变革，4D 打印技术通过对材料和结构的协同设计，赋予构件形状、性能、功能的动态可编程性，成为未来增材制造技术的重要发展方向。当前全球 4D 打印领域形成了中美双核心的研究格局，我国在有组织的研究模式下，汇聚高校、科研院所、企业的力量，取得了一系

列研发成果，在材料研发、工艺优化、工程应用等方面均实现了重要突破，成功推动技术从概念研究走向实际应用。

我们也应同时认识到 4D 打印技术现阶段仍面临材料、工艺、评测、产业化等方面的核心瓶颈，也带来了知识产权、公共安全、伦理道德等社会层面的新挑战。未来，4D 打印技术的发展需牢牢依托多学科交叉融合，以新型刺激响应材料的研发为核心，以工艺装备的智能化升级为手段，以评测体系的标准化构建为保障，以产学研的深度协同融合为路径，推动技术向规模化、产业化、绿色化方向跨越。从 3D 打印到 4D 打印，再到未来的 5D、6D 打印，增材制造技术的发展始终围绕材料创新与打印智能化的核心主线，这不仅是制造技术本身的升级，更是制造业理念的深刻革新，未来必将推动制造业向个性化、动态化、智能化方向转型，为人类社会的长期发展带来深远影响。

作者简介：

史玉升教授，华中科技大学华中学者卓越岗首席教授，亚太材料科学院院士，曾任中央军委国防科技创新特区主题专家组首席科学家。现任空间新材料与在轨制造专家组成员、中国材料学会增材制造材料分会和中国有色学会增材制造分会的主任委员、中国航天科技集团有限公司增材制造工艺技术中心专家委员会主任、数字化材料加工技术与装备国家地方联合工程实验室（湖北）主任，中国机械工程学会增材制造分会副主任委员等职务。获国家科技进步二等奖 2 项、国家技术发明二等奖 1 项、中国十大科技进展 1 项、中国智能制造十大科技进展 1 项、省部级一等奖 13 项、发明创业奖特等奖暨当代发明家、全国创新争先奖状、十佳全国优秀科技工作者提名奖、国务院政府特殊津贴、武汉市科技重大贡献奖个人奖、湖北省五一劳动奖章等称号。领导的团队入选湖北省和教育部创新团队。