

2023年  
第21期

# 先进制造 与新材料

ADVANCED MANUFACTURING  
& NEW MATERIALS BRIEFING



上海科学技术情报研究所  
上海市前沿技术发展研究中心  
技术与创新支持中心(TISC)

## 4D 打印，创造智能制造新模式

### 编者按

3D 打印技术自 20 世纪 80 年代问世以来，在传统制造业转型中扮演了重要角色。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。无论是科学研究还是实际应用，4D 打印都蕴含着无限机遇和潜力。智能材料是 4D 打印技术的核心，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，故机遇和挑战并存。

本期《先进制造与新材料》简报聚焦 4D 打印，对国内外 4D 打印的发展综述、材料研究和推广应用等情况予以简介。

## 目 录

<b>发展综述</b> .....	<b>1</b>
4D 打印技术的原理及发展方向.....	1
<b>材料研究</b> .....	<b>5</b>
4D 打印铜基形状记忆合金.....	5
我国学者在形状记忆高分子材料研究方面取得进展.....	6
<b>推广应用</b> .....	<b>8</b>
“火箭”也能打印了.....	8
意大利开发 4D 打印、可随环境改变形状的机器人.....	9
4D 打印柔性电极可用于神经刺激.....	11

## 发展综述

### 4D 打印技术的原理及发展方向

随着科技的不断进步和社会的发展，制造业正经历着一场革命性的变革。传统的制造方式已经无法满足人们对个性化、智能化产品的需求。在这个背景下，3D 打印作为一种创新的制造技术应运而生，并取得巨大成功。然而，传统的 3D 打印技术仍然存在一些限制，如材料选择、形状变化等方面的局限性。为了克服这些限制，4D 打印技术应运而生。

4D 打印是在 3D 打印的基础上引入时间因素，通过特殊材料的设计和智能结构的控制，使得打印出来的物体可以根据环境条件发生形态变化。这种自适应性的特点使得 4D 打印技术具有广泛的应用前景，尤其在生物医学领域。例如，利用 4D 打印技术可以制造出能够自动展开的支架，帮助植入物更好地适应人体组织。

本文综述 4D 打印的研究进展，探索其在各个领域的应用，并提出未来的发展方向。通过深入研究和分析，旨在为 4D 打印技术的进一步发展和应用提供指导和启示。

#### 4D 打印技术介绍

4D 打印技术是在 3D 打印的基础上引入时间因素，通过特殊材料和智能结构的设计，实现打印出来的物体能够根据环境条件发生形态变化。与传统的 3D 打印技术相比，4D 打印技术具有更高的智能性和自适应性。其核心思想是设计和制造具有预定形状和功能材料，通过外界刺激或内部触发机制，使得这些材料可以自主地改变其形态。

在 4D 打印技术中，材料的选择是至关重要的。常见的 4D 打印材料包括形状记忆聚合物、液晶弹性体和活性水凝胶等。这些材料具有一定的形状记忆性质或响应性，可以通过外界刺激如温度、湿度、光线等来触发形态的变化。此外，智能结构的设计也是实现 4D 打印的关键。智能结构可以通过控制材料的排列方式、纤维方向和内部结构等来实现物体的形态变化。

4D 打印技术在生物医学领域有着广泛的应用前景。例如，利用 4D 打印技术可以制造出具有自动展开功能的支架，可以在植入到人体组织后适应环境并发生形态变化。此外，4D 打印还可以用于生物材料的制备，如 3D 打印人工心脏瓣膜，可以根据心脏组织的特点进行形态匹配，提高手术效果和生物相容性。

尽管 4D 打印技术在许多领域显示出巨大的潜力，但仍存在一些挑战和限制。例如，材料选择和设计需要更加精细化和智能化，制造过程中的精确控制和构建复杂结构的难度也需要解决。因此，进一步的研究和开发是必要的，以推动 4D 打印技术的应用和发展。

### **4D 打印的应用领域**

4D 打印技术在各个领域都有着潜力和广泛的应用。其中，生物医学领域是一个受到极大关注的领域之一。通过使用 4D 打印技术，可以制造出具有形态变化能力的人工器官和组织，为个性化医疗提供新的解决方案。例如，在组织工程中，使用 4D 打印技术可以生成具有高度复杂结构和功能的组织构建物，如血管网络或骨骼结构，以促进组织再生和修复。

除了生物医学领域，4D 打印技术还可以在建筑和建造领域发挥重要作用。利用 4D 打印技术，可以制造出具有自适应能力的建筑构件，根据环境条件自动

调整形态和性能。这种能力使得建筑物能够更好地适应不同的气候和地理条件，提高建筑物的可持续性和适应性。

在航空航天领域，4D 打印技术也具有巨大的潜力。通过使用具有形状记忆性质的材料，可以制造出可以根据外界刺激来改变形态和性能的航空部件。这种能力可以提高飞机的灵活性和适应性，同时减少重量和材料的浪费。

除了以上领域，4D 打印技术还可以应用于纺织业、电子工程、智能设备等领域。通过结合不同材料 and 设计方法，可以制造出具有自主形态变化的纺织品和智能设备，为相关产业带来更多的创新和发展机会。

然而，尽管 4D 打印技术具有广泛的应用前景，但在实际应用中仍面临一些挑战和限制。其中包括材料选择、制造过程的精确控制和规模化生产等问题。未来的研究和开发将重点解决这些问题，以推动 4D 打印技术在各个领域的应用和发展。

### **4D 打印的优势与挑战**

4D 打印技术具有许多优势，使其在各个领域中表现出巨大的潜力。首先，4D 打印技术可以实现物体的自适应形态变化，根据环境条件或外界刺激来改变形状和性能。这为定制化生产和自主感知的智能系统提供了新的可能性。其次，由于使用了特殊的材料和智能结构设计，4D 打印可以制造出具有复杂结构和功能的物体，如支架、人工器官和纺织品等。这些物体具有更高的灵活性和适应性，可以满足不同领域的需求。

然而，尽管 4D 打印技术具有广泛的应用前景，但也面临一些挑战和限制。首先，材料选择是一个关键问题。目前可用于 4D 打印的材料种类有限，需要进一步研究和开发新的材料体系，以满足不同应用领域的需求。其次，制造过程

中的精确控制和复杂结构的构建也是一个挑战。4D 打印需要精准的参数调节和优化，以确保物体能够按照设计要求完成形态变化。此外，规模化生产也是一个待解决的问题。目前，4D 打印技术在实际应用中还面临着成本高、效率低等问题，需要进一步改进和优化。

解决这些挑战需要跨学科的合作和研究努力。材料科学、机械工程、计算机科学等领域的专家可以共同探索新的材料和制造方法，以提高 4D 打印技术的可行性和可持续性。此外，政府和企业的支持和投资也是推动 4D 打印技术发展的关键因素。只有通过合作与创新，才能充分发挥 4D 打印技术的优势，推动其在各个领域的广泛应用。

### **当前的研究进展**

在 4D 打印技术领域，目前已经取得一些重要的研究进展。首先，关于材料方面的研究，许多研究人员致力于开发新型的具有形状记忆性质的材料，以实现物体形态的变化。这些材料可以通过外界刺激，如温度、湿度或光线等，触发其形状变化的能力。其次，在制造过程的控制方面，研究人员提出了不同的方法和技术，以实现 4D 打印过程中形态变化的精确控制。例如，通过优化 3D 打印参数、设计智能结构和使用辅助支撑等方法，实现了更准确和可靠的形态变化。

此外，还有一些与 4D 打印技术相关的研究领域也取得一些进展。在生物医学领域，研究人员利用 4D 打印技术成功地制造出具有形态变化能力的人工器官和组织，如心脏瓣膜和血管模型。在建筑和建造领域，研究人员通过将 4D 打印技术与传统建筑方法相结合，成功地制造出具有自适应性能的建筑构件。在航

空航天领域，研究人员利用 4D 打印技术制造出了具有形态变化能力的航空部件，如可伸缩的机翼和稳定器。

然而，尽管已经取得不少进展，仍然存在一些挑战和问题需要解决。例如，在材料方面，目前可用于 4D 打印的材料种类有限，并且材料的性能和稳定性也需要进一步提高。此外，在制造过程的控制和优化方面还有待改进，以实现更精确和可靠的形态变化。因此，未来的研究重点将集中在开发新的材料、改进制造技术和解决相关问题，以推动 4D 打印技术的发展和應用。

### **未来的发展方向**

在 4D 打印技术领域，还有许多潜在的发展方向可以探索和研究。首先，材料的开发是一个重要的方向。研究人员可以继续寻找具有更多功能和性能的新型材料，以满足不同应用领域的需求。例如，具有自愈合能力的材料、具有光学响应能力的材料等都有潜力改变物体的形态和性能。其次，制造技术的改进也是关键。研究人员可以继续探索更高效、精确和可靠的制造方法，以实现复杂结构和形态变化的精确控制。

另一个发展方向是将 4D 打印技术与其他技术相结合。例如，结合机器学习和人工智能的方法可以优化设计和制造过程，并提高系统的自主感知和适应性。同时，与传感器技术和数据分析相结合，可以实现对物体形态变化的实时监测和反馈控制。此外，与生物技术和纳米技术的结合也可以在医疗、环境和材料科学等领域中实现更广泛的应用。

此外，规模化生产和商业化也是未来发展的关键。研究人员和企业需要共同努力，解决 4D 打印技术在成本、效率和可持续性方面的挑战，以实现大规模

的商业化应用。政府的支持和投资也将对促进 4D 打印技术发展起到积极的推动作用。

总之，未来的发展方向包括材料的开发、制造技术的改进、与其他技术的结合以及规模化生产和商业化等。通过不断的研究和创新，我们可以期待 4D 打印技术在各个领域中得到广泛应用，并为人们的生活和工作带来更大的便利和效益。

相关链接：综述：4D 打印技术的原理及发展方向[EB/OL]. (2023-07-27) [2023-11-14].

<https://www.nanjixiong.com/thread-163891-1-1.html>.

## 材料研究

### 4D 打印铜基形状记忆合金

形状记忆合金 (Shape memory alloys, SMAs) 基于有序相的热弹性马氏体相变, 可以在外部能场 (应力场、温度场和磁场等) 激励下自发实现原始形状的可逆变形, 是一种集感知与驱动一体化的先进智能材料。受益于其独特的形状记忆效应和超弹性行为, 形状记忆合金被广泛应用于航空航天、电子通信、生物医疗、能源化工、工业制造和日常生活的诸多领域。单晶 Cu 基形状记忆合金已被证明具有优异的形状记忆性能, 但多晶组织的 Cu 基形状记忆合金往往受限于粗大的晶粒, 高弹性各向异性和薄弱的晶界, 表现出高沿晶脆性和低疲劳强度, 极大地限制其大规模推广应用。将增材制造技术和形状记忆合金相结合实现形状记忆合金的 4D 功能定制已成为相关领域的重要发展趋势。尤其是针对 Cu 基形状记忆合金, 增材制造技术中极高的冷却速度可以有效实现晶粒细化, 有望彻底改善 Cu 基形状记忆合金的高脆性并进一步提高力学性能。

天津大学徐连勇教授课题组利用激光粉末床熔化技术成功实现高性能 CuAlNi 形状记忆合金的精准控形控性和有效功能响应。

研究表明, 增材制造成形过程中熔池经历重熔激光的作用, 凝固过程涉及固相重熔, 有序-无序转变和马氏体转变多个过程, 沉积态微观组织由柱状母相内部形核的高度协调的马氏体变体群组成, 同时微观元素偏析诱导了 2H 型马氏体和板条内 2H 马氏体畴的形成。18R 马氏体板条间分布高密度超结构本征层错, 板条间互为孪晶关系。

针对沉积态 Cu 基形状记忆合金独特的微观组织和变形响应，该团队对合金在变形过程中拉压各向异性的变形机制进行了详细研究，发现孪生变形主导全部变形过程并在不同阶段表现出各异的响应方式。

通过前期工艺设计筛选出最优工艺参数为激光功率 300 W，线间距 100mm，曝光时间 66.7ms，辅以选区激光重熔技术，成功制备出高性能沉积态铜基形状记忆合金。试样的马氏体相变温度达到 130°C，比传统 NiTi 合金提升 60°C。极限抗压强度可到达 1593±10 Mpa，断裂应变为 23%；形状记忆效应测试显示，试样可以在小于 6%应变的条件下实现完全的形状记忆恢复，最大形状回复应变可达 3.39%。

该研究作为制备高表面质量和优良的力学/功能特性的高性能铜基形状记忆合金提供新的思路。该成果发表于 *Journal of Materials Science & Technology*。

相关链接：

[1] 材料学院徐连勇教授课题组研究进展：4D 打印铜基形状记忆合金[EB/OL]. (2023-09-06)[2023-11-14]. <http://news.tju.edu.cn/info/1012/67883.htm>.

[2] Yankun Zhang, Lianyong Xu, Lei Zhao, Danyang Lin, Minqian Liu, Wei Chen, Yongdian Han. Deformation mechanism of Cu-Al-Ni shape memory alloys fabricated via laser powder bed fusion: Tension-compression asymmetry [J/OL]. *Journal of Materials Science & Technology*. (2023-06-25)

[2023-11-14]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030223005285>.

[3] Yankun Zhang, Lianyong Xu, Lei Zhao, Danyang Lin, Minqian Liu, Xueyan Qi, Yongdian Han. Process-microstructure-properties of CuAlNi shape memory alloys fabricated by laser powder bed fusion [J/OL]. *Journal of Materials Science & Technology*. (2023-02-16)[2023-11-14]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030223001305>.

## 我国学者在形状记忆高分子材料研究方面取得进展

在国家自然科学基金项目的资助下，浙江大学化工学院谢涛教授与赵骞教授团队利用热致相分离水凝胶构建可按需自发变形的形状记忆高分子，阐明该类变形行为的机理及调控方法，并结合 4D 打印技术初步展现了该类材料用做医疗手术器件的独特潜力。相关成果以《起始回复时间可编程的形状记忆高分子》（Shape memory polymer with programmable recovery onset）为题，于 2023 年 9 月 13 日在线发表于《自然》（*Nature*）杂志。

形状记忆高分子（SMP）可在外界环境条件变化时由预设的临时形状回复到原始形状，在医疗器件、航空航天结构以及软体机器等新兴应用中展示出独特潜力。例如，利用这种变形行为可以制造各种自展开医疗器件，达到微创植入的效果。然而在现实应用场景中，激发变形所需的加热或光照等外部刺激不宜对患者施加，成为限制其应用的最大瓶颈。另一方面，学术界近期报道的自发变形高分子材料可在无外界刺激条件下完成变形，但变形可控性差，器件展开时将卡在非目标位置，导致植入失败。在同一材料体系中同时实现“按需”与“自发”变形将克服 SMP 的关键应用缺陷，但就目前的认知而言这两种变形模式相互矛盾。

研究团队发现，可发生强烈热致相分离的水凝胶可将“按需”与“自发”变形有机地融合。该水凝胶在常温且外力作用下可被变形，并在高温下发生相分离从而固定该外力编程的临时形状。回到常温环境后，随着相融合的逐渐发生，水凝胶在一段时间形状保持不变（即变形潜伏期），随后再自发变形。通过临时形状变形时不同热处理时间的控制，可以有效改变变形潜伏期（可长达 46 分

钟)，从而编程调控材料自发变形的起始时间点。这种在无需额外刺激下发生的定时变形行为有效解决了“按需”与“自发”两种变形行为的矛盾。

该研究通过磁共振成像对这种“按需自发”变形行为的内在机理进行了深入探究，证明该现象受控于材料内部的水分子扩散过程，而非普通 SMP 的热传导。同时，研究建立了材料模量与变形动力学的关联模型，预测了模量随时间自发缓慢变化的材料均有望表现出该类行为，为材料体系的拓展奠定理论基础。进一步，研究者结合 4D 打印技术制备了可按需自发变形的形状记忆器件，概念性地展示其在医学临床应用场景中可发挥的独特功能。

该研究成果来自于多学科交叉合作，论文作者来自浙江大学的多个院系。核磁共振成像表征由化学系孔学谦教授团队完成。材料变形的力学模型由航空航天学院肖锐研究员共同提出。研究的医学验证工作与浙江大学附属第二医院大肠外科李军主任团队以及眼科中心晋秀明主任团队合作完成。

相关链接：

[1] 我国学者在形状记忆高分子材料研究方面取得进展[EB/OL].(2023-09-28)[2023-11-14].

<https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab1217/info90414.htm>.

[2] Chujun Ni, Di Chen, Yu Yin et al. Shape memory polymer with programmable recovery onset

[J/OL]. Nature. (2023-09-13)[2023-11-14]. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06520-8>.

## 推广应用

### “火箭”也能打印了

据外媒报道，国外一家民营航空公司宣布推出第4代3D打印机。这种打印机“克服了传统的打印限制”，能够水平打印30多米长的大型零部件，且打印速度更快。目前该公司使用这种新型3D打印机生产运载火箭的大型零部件。

自20世纪80年代诞生以来，3D打印技术经过数十年发展，在国防与军工领域发挥着重要作用。3D打印技术方兴未艾，4D打印技术已经出现。这两种打印技术的发展，将改变传统武器装备制造与维修模式。

#### 3D打印走向成熟

3D打印是一种借助计算机辅助设计、将专用材料加工成型的技术。它以数字模型文件为基础，通过软件与数控技术，将金属材料、非金属材料或医用生物材料按照挤压、烧结、熔融、光固化、喷射等方式逐层堆积，制造出实体物品。从技术原理看，3D打印就是采用分层加工、叠加成形、逐层堆积等方式生成三维实体的技术。

3D打印产品精度更高、完整性更好。数年前，英国《经济学人》杂志称3D打印技术“将推动新一轮工业革命的到来”。因其先进的“数字化复刻”能力，3D打印技术在制造业、医疗、航空航天等领域取得深入发展和应用，并成为国防与军工领域备受欢迎的技术“新贵”。波音公司曾利用3D打印技术制造出300多种不同的飞机零部件，包括将冷空气导入电子设备的复杂形状导管等。英国皇

家空军多年前已在飞机上装配 3D 打印部件，包括飞行员的无线电防护罩、起落架防护装置和进气口支架等。

3D 打印技术降低了国防工业成本。相关数据表明，近年来全球军费开支总体呈上涨趋势，这在很大程度上与武器装备迭代导致的生产成本增加有关。随着各国在国防领域所需弹药、工具和机器零件数量增加，以及零件的复杂度与精密性不断提升，传统国防制造业愈加乏力。与此同时，3D 打印技术的使用，大幅缩短从零件设计到实物制作所需的时间，既节约了研制费用，又加快了装备生产速度。

3D 打印技术有效提升了军队战备水平，不仅包括武器装备的战备水平，还涵盖从军事设施到军事物流、卫勤保障、医疗保障等综合保障能力建设的所有方面。阿富汗战争期间，美国陆军曾向驻阿富汗部队提供移动式 3D 打印设备，用于打印维修备件，提高装备保障能力。近年来，美国海军水下作战中心及空军基地已经广泛利用 3D 打印技术进行老旧零件的更换，以及高价值部件的修复工作。

#### **4D 打印正在发展**

随着 3D 打印技术的发展，人们对打印耗材的研究亦不断深入。2007 年美国国防高级研究计划局开展“可编程物质”项目研究，旨在开发一种可在软件控制或外界刺激条件下，转变成理想或有用形态的智能材料，它能够在一定时间内，根据需要改变形态。这一创新性技术，就是 4D 打印技术的雏形。

相比 3D 打印，4D 打印多出的一个“D”，是在 3D 打印基础上引入的时空维度。4D 打印是通过对材料或结构进行设计，使构件的形状、性能和功能实现可

控式变化，满足变形、变性和变功能的应用需求。借助这种技术，可实现按需打印装备，并使装备能够根据指令改变形态。

2017年，美国国家航空航天局采用4D打印技术制造出一种“太空织物”。这种织物具备两种不同特性：光滑的块状金属表层可以反射阳光，内部结构则能有效吸收热量。织物中的复合材料在温度的影响下膨胀或收缩，使得金属表层展开或关闭，从而使织物具备自适应温度调控能力。

2018年，美国陆军纳米技术研究所采用含有磁性微粒的弹性复合材料，打印出一种具备在复杂地形条件下或狭窄空间内灵活爬行、翻滚、跳跃、抓取物体的柔性机器人。美国陆军研究工程中心也积极开展4D打印技术研究，将毒气防护服、可随周围环境改变颜色的伪装设备，以及能实现自组装功能的武器等新型装备的研发制造寄希望于4D打印技术。

相关链接：“火箭”也能打印了——3D/4D打印技术在军事领域的应用[EB/OL]. (2023-02-28) [2023-11-14]. [http://www.81.cn/gfbmap/content/2023-02/28/content\\_334589.htm](http://www.81.cn/gfbmap/content/2023-02/28/content_334589.htm).

## 意大利开发4D打印、可随环境改变形状的机器人

意大利研究人员创造了一种新颖的4D打印的可生物降解的软体机器人，其形状像一颗种子，能随着湿度的变化而改变形状，并能在土壤中航行。该设备作为监测环境的一种新方式具有很大的潜力。

4D打印是使用3D打印技术来创造能够对环境因素（如光线和温度）做出反应而改变其形状或属性的物体的过程。此前，该技术已被用于创建自组装、可编程的材料技术。

现在，4D 技术已被用于创建一个能够分析土壤的软体机器人。从南非天竺葵（*Pelargonium appendiculatum*）的种子结构中获得灵感，其形状随环境湿度的变化而变化，热那亚意大利技术研究院的研究人员制造了第一个仿生物的、可生物降解的种子机器人。

该研究的通讯作者 Barbara Mazzolai 说：“我们的研究从观察自然开始，目的是模仿生物或其结构的策略，并将其复制到机器人技术中，在能源和污染方面对环境影响较小。”

对于该研究团队而言，植物一直是灵感的源泉。在模仿了根部和攀缘植物的生长和运动策略后，该团队重点研究了天竺葵科植物典型的种子携带结构的运动和扩散特征。

当合适的环境条件出现时，这些种子从植物中分离出来，并利用构成它们的材料的吸湿特性，改变形状并独立移动以探索和渗透土壤，从而增加发芽的机会。研究人员发现有趣的是，这些种子利用缺乏新陈代谢且能够变形的死纤维素基组织，仅利用环境湿度的变化。

在彻底调查了天然种子的结构和生物力学之后，研究人员使用 4D 打印技术和静电纺丝的组合来复制它。

研究人员使用熔融沉积模型（FDM）打印一个由聚己内酯（PCL）组成的基底层。PCL 是一种可生物降解的热塑性聚酯，使用氧等离子体激活，使其更具水的吸引力（亲水性）。然后，他们在基底上添加由聚氧化乙烯外壳和纤维素纳米晶体核心组成的静电纺丝吸湿纤维。

在测试中，该软体机器人探索了土壤样本，调整其形状以与土壤的粗糙度和裂缝互动。它非常节能，可以举起其重量的 100 倍左右。

研究人员说，这种新颖的设备提供一种不引人注意地监测地球的新方法。他们认为，该设备的低成本、简单设计和数据收集能力在偏远地区将特别有用。该研究的第一作者 Luca Cecchini 说：“这些可生物降解和能源自主的机器人将作为无线、无电池的工具用于地表土壤的勘探和监测。这种生物启发的方法使我们能够创造出低成本的仪器，可用于收集具有高空间和时间分辨率的原位数据，特别是在没有监测数据的偏远地区。”

该研究成果发表在《先进科学》（*Advanced Science*）杂志。

相关链接：

[1] 首个 4D 打印、可改变形状的“种子机器人”可用于监测环境[EB/OL]. (2023-04-25)

[2023-11-14]. <https://www.victorlamp.com/article/7389952451>.

[2] Luca Cecchini, Stefano Mariani, Marilena Ronzan, Alessio Mondini, Nicola M. Pugno, Barbara Mazzolai. 4D Printing of Humidity-Driven Seed Inspired Soft Robots [J/OL]. *Advanced Science*. (2023-02-01)[2023-11-14]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.202205146>.

## 4D 打印柔性电极可用于神经刺激

周围神经接口（PNI）是一种很有前途的医学工具，可以通过刺激神经来引起身体的特定反应。例如，刺激周围神经可用于治疗慢性疼痛或睡眠呼吸暂停；刺激迷走神经可用于治疗抑郁症和癫痫症。同时，PNI 可以通过记录电位来读取感觉或运动信号，在治疗肥胖、糖尿病等各种疾病方面具有极高的临床应用潜力。但目前临床应用针对的是较大的神经，通常在毫米范围内。这种神经由许多轴突组成，要将特定的纤维与其他纤维隔离是一个挑战。另一方面，小神经在目标组织附近通常包含较少的轴突。因此，通过连接小神经，可以增加刺

激和记录的选择性。然而，小神经的直径通常只有十分之几到数百微米，这些细如发丝的神经需要制作精细且精准的电极。同时，小电极的发展增加对其设计和植入的挑战。针对 PNI 已经开发不同的电极设计，比如神经内电极被插入到神经中，获得良好的刺激和记录的空间选择性，但它们在插入期间穿透神经组织，会造成神经损伤。

为提高电极的处理和植入程度，德国慕尼黑工业大学 Bernhard Wolfrum 教授领导的研究团队开发出一种用于小神经连接的 4D 打印的柔性电极。该电极可以在插入过程中由身体的水分触发，将其自身折叠到小神经周围的袖带上。这种折叠是通过光聚合打印双层的柔性聚氨酯印刷树脂和高膨胀丙烯酸钠水凝胶来实现的。当浸入水性液体中时，水凝胶会膨胀并将电极轻轻地折叠在神经周围。此外，由于使用柔软且可拉伸的印刷树脂作为基材和微裂纹金膜作为导电层，电极坚固耐用，可以拉伸并弯曲以方便植入。一旦接触到水分，它们就会自动折叠并包裹在细小的神经周围。该研究发表在《先进材料》(Advanced Materials) 杂志。

4D 打印技术能以有针对性的方式重塑 3D 打印物体。研究人员此次新开发出的 4D 打印电极，在插入潮湿组织时，电极会折叠并包裹在超薄神经纤维周围。该电极最初是使用 3D 打印技术制造的，可灵活调整形状、直径和其他特征。电极内部的结构化钛金涂层可在电极和神经纤维之间“沟通”，研究人员既可刺激神经，又可用电极测量神经信号。

这种新型电极既坚固又易于管理，在生物医学领域具有广泛应用。研究团队已在蝗虫身上进行了验证，结果显示，直径 100 微米的细神经纤维被包裹，

却完全不会损伤神经，这一优点将使它成为未来医学界部署周围神经刺激的重要手段。

相关链接：

[1] 4D 打印柔性电极可用于神经刺激，遇水自动折叠并包裹在细小神经周围[EB/OL]. (2023-07-19)[2023-11-14]. <http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/202307/00f99706473941dfa3171892ec821547.shtml>.

[2] 最新 Adv. Mater.：4D 打印柔软和可伸缩电极用于神经接口[EB/OL]. (2023-02-14)[2023-11-14]. <http://www.cailiaoniu.com/247052.html>.

[3] Lukas Hiendlmeier, Francisco Zurita, Jonas Vogel, Fulvia Del Duca, George Al Boustani, Hu Peng, Inola Kopic, Marta Nikić, Tetsuhiko F. Teshima, Bernhard Wolfrum. 4D-Printed Soft and Stretchable Self-Folding Cuff Electrodes for Small-Nerve Interfacing [J/OL]. Advanced Materials. (2023-01-02)[2023-11-15]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202210206>.



地址：上海市永福路 265 号

邮编：200031

编辑：吴春莹

责编：崔晓文

编审：林鹤

电话：021-64455555

邮件：istis@libnet.sh.cn

网址：www.istis.sh.cn