

陶瓷材料 4D 打印：从静态成形到智能结构的材料制造革命

■ 文 / 闫春泽, 陈安南, 史玉升
华中科技大学

摘要：陶瓷作为典型的无机非金属材料，经成型与高温烧结后展现出高硬度、耐高温、耐腐蚀的优异特性，分属结构陶瓷的承载耐磨、热冲击抗性，与功能陶瓷的电、磁、光、热特殊物理性能，使其成为贯穿民用生活与尖端科技的核心基础材料。而陶瓷材料4D打印技术，将3D打印的数字化成形优势与材料的时空变形、性能及功能动态调控深度结合，完成了陶瓷制备从“静态形状”向“智能结构”的关键跨越，成为增材制造领域的前沿研究方向。目前陶瓷4D打印相关成果的发表与引用量呈逐年增长趋势，该方向已成为材料领域研究重点，我国更是该领域的核心研究主阵地，技术发展处于世界领先水平。

一、陶瓷 4D 打印的核心基础：技术体系与分类

陶瓷 4D 打印的实现依托材料、诱导、工艺、烧结四大核心要素：材料端以非柔性陶瓷复合材料、柔性陶瓷前驱体及部分功能陶瓷为主要研究对象；诱导方式以湿度响应、热响应和电响应为常规手段；成型工艺主要沿用材料挤出、光固化和激光粉末床熔融等成熟 3D 打印技术；烧结环节则需通过常规烧结、热压烧结、微波烧结、

反应烧结等工艺实现致密化，这也是陶瓷 4D 打印区别于高分子、金属材料 4D 打印的重要特征。

现阶段陶瓷材料 4D 打印主要分为变形形状 4D 打印与变性能、变功能 4D 打印两大类，两类技术分别聚焦陶瓷材料的空间形态可编程演化与物理化学性能的外场调控切换，共同构成陶瓷 4D 打印的核心研究体系。其主要分类如表一所示。

表 1 陶瓷材料 4D 打印技术的代表性研究工作

	陶瓷种类	结构尺寸	变化机理	参考文献
变形形状	ZrO ₂	微纳尺寸	马氏体相变	Science 2013.
	SiOC	宏观尺寸	预应变驱体驱动	Sci. Adv. 2018.
	ZrO ₂	宏观尺寸	水凝胶脱水驱动	Nat. Commun. 2024.
	SiOC	宏观尺寸	热膨胀 - 收缩行为非均质性驱动	Adv. Mater. 2023.
变性能 / 变功能	铁氧体材料	宏观尺寸	电磁场驱动	Addit. Manuf. 2024.
	压电陶瓷	宏观尺寸	力 - 电转换效应驱动	Science 2022.

1.1 变形陶瓷 4D 打印: 精准调控材料的空间形态演化

变形陶瓷 4D 打印以实现陶瓷材料的可设计性、程序化形态变形为核心目标, 驱动机理多样且核心材料研究各有突破, 其中氧化锆 (ZrO_2) 因独特的形状记忆效应成为该领域的特色研究材料。氧化锆在微纳尺度下因马氏体相变具备显著的形状记忆效应, 该能力可与镍钛形状记忆合金相媲美, 但在宏观尺度下其形状记忆能力会大幅减弱; 随着双光子打印等微纳 3D 打印技术的发展, 氧化锆的形状记忆特性得以有效开发利用, 成为未来变形陶瓷 4D 打印极具前景的核心材料。

除氧化锆的马氏体相变驱动外, 现阶段变形陶瓷 4D 打印的主流驱动方式还包含三类: 一是弹性前驱体驱动, 香港城市大学吕坚院士团队开发聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 基纳米复合材料, 经打印、变形后转化为碳化硅 (SiOC) 基复材, 首次实现复杂陶瓷折纸和 4D 打印陶瓷结构的伸展, 为航空航天、高温微机电系统领域提供了新型材料解决方案; 新加坡国立大学翟伟教授团队则将氧化铝—海藻酸钠柔性纳米陶瓷复合材料打印于预拉伸橡胶膜, 通过释放预拉伸实现陶瓷晶格的可编程折叠, 进一步丰富了该驱动路径的技术体系。二是水凝胶脱水驱动, 南方科技大学葛铮教授团队采用数字光处理 (DLP) 成形水凝胶—陶瓷层压板, 利用水凝胶失水驱动层压板演变为复杂 3D 结构, 烧结后转化为纯陶瓷, 并建立理论模型实现形变预测; 吉林大学任露泉院士团队通过光固化打印陶瓷 / 形状记忆聚合物 / 水凝胶复合材料, 通过加热调控相分离时间和水凝胶厚度, 实现陶瓷结构恢复启动时间的精准调控, 完成定制化时空变形。三是热膨胀—收缩行为非均质性驱动, 香港城市大学吕坚院士团队以传统陶瓷艺术为灵感, 制备增减材异质陶瓷前驱体, 利用烧结过程中不同材料的热膨胀—收缩差异驱动陶瓷形变; 中国科学技术大学刘果教授团队则通过增减材工艺制备异质陶瓷前驱体, 利用高温形状记忆效应实现服役温度附近的可逆变形与微调, 实现陶瓷部件的自适应成形。

1.2 变性能、变功能陶瓷 4D 打印: 赋能材料的动态性能调控

相较于变形陶瓷 4D 打印, 变性能、变功能陶瓷 4D 打印是近些年逐渐崭露头角的研究方向, 其核心是通过外场刺激实现陶瓷材料电、磁、力等物理性能的动态切换, 代表了陶瓷 4D 打印从“形态调控”向“功能调控”的高

阶发展, 其中电磁场驱动的铁氧体材料与力电转换效应驱动的压电材料是该领域的研究核心。

在铁氧体陶瓷领域, 清华大学周济院士团队提出 4D 打印铁氧体陶瓷超材料技术, 通过电偶极子和磁偶极子之间的电磁耦合模式取向激励, 实现太赫兹共振的感应和切换, 利用超材料结构突破了传统太赫兹共振的局限性, 为电磁功能陶瓷的动态调控提供了新路径。

压电陶瓷是变性能、变功能陶瓷 4D 打印的核心研究对象, 其力电转换效应可实现机械能与电能的相互转化, 是智能陶瓷材料的重要载体。美国加州大学郑晓宇教授团队提出的本体感受三维结构机器人超材料, 由压电、导电和结构元件交织成三维晶格网络, 实现了自感知和反馈控制的程序化运动, 成为压电变功能 4D 打印的里程碑工作; 中南大学张斗教授团队基于逆压电效应, 通过直写挤出制备双层 PZT 陶瓷支架并设计叉指电极, 在 1000V 电压下悬臂梁尖端振幅可达 0.7mm, 为压电陶瓷 4D 打印提供了新的技术策略。同时, 压电性广泛存在于骨骼、血管、皮肤等人体组织中, 在骨组织修复、抗肿瘤、神经调节等生物功能实现中发挥重要作用, 这也为压电陶瓷 4D 打印向生物医疗领域的延伸奠定了天然基础。

二、陶瓷 4D 打印的行业痛点: 材料、成型与调控的三重挑战

尽管陶瓷 4D 打印技术发展迅速, 但其仍面临一系列关键科学问题与技术挑战, 成为制约技术产业化与应用拓展的核心瓶颈, 主要集中在原材料、成型工艺与功能响应调控三个方面。

其一, 原材料种类较为单一。目前陶瓷 4D 打印的研究主要集中于陶瓷前驱体、氧化锆、氧化铝、铁氧体、压电陶瓷等少数材料, 而光电陶瓷、变色结构陶瓷等具有潜在应用价值的陶瓷材料, 因打印性不足尚未实现规模化研究与应用, 材料体系的单一性限制了陶瓷 4D 打印的应用场景拓展。

其二, 4D 打印成形难度大。功能陶瓷粉体普遍具有折射率高的特点, 与树脂之间的折射率差异较大, 导致在光固化打印过程中激光透射深度不足, 成形精度与致密度难以保证; 同时传统陶瓷结构多为粉体或薄膜, 复杂三维智能结构的成形工艺尚未成熟, 进一步增加了成型技术难度。

其三, 功能响应调控难。变性能、变功能陶瓷 4D 打印的核心是外场刺激与材料功能的精准匹配, 而刺激场—

宏观结构—电功能之间的关联关系极为复杂。以压电陶瓷为例，超声场等外场与陶瓷三维结构的相互作用涉及表面折射、反射等多种物理过程，结构的孔隙率、曲率等参数均会影响功能响应效果，目前尚未建立完善的调控理论体系，成为制约功能陶瓷 4D 打印发展的关键问题。

三、陶瓷 4D 打印的技术突破：华中科技大学团队的研究成果

华中科技大学快速制造中心隶属于材料成形与模具技术全国重点实验室，是国内最早、实力最强的增材制造技术研究单位之一，自 1991 年起开展纸材、高分子、金属、陶瓷、复合材料及生物材料的增材制造技术与应用研究，拥有 1 个国家—地方工程实验室、4 个省部级科研平台、5 个创新团队，斩获国家科技进步二等奖 2 项、国家技术发明二等奖 1 项、中国十大科学进展 2 项、省部级一等奖 14 项，在增材制造领域积累了坚实的研究基础。该团队以压电陶瓷为核心研究对象，在变性能、变功能陶瓷 4D 打印领域取得一系列创新性成果，丰富了陶瓷材料 4D 打印的内涵。

3.1 压电陶瓷 4D 打印新范式：突破传统 3D 打印的研究局限

传统压电陶瓷 3D 打印主要聚焦于“结构—压电性能”的静态关系研究，而华中科技大学团队提出的压电陶瓷 4D 打印新范式，将研究核心拓展为“刺激场—结构—压电性能—应用功能”的动态关联，实现了压电陶瓷功能响应的可编程、可调控，建立了从外场刺激到实际应用的完整技术体系，相关成果已发表于国际顶级期刊并获得多项国家发明专利授权。

3.2 生物压电陶瓷 4D 打印：赋能生物医疗的智能材料研发

团队在生物压电陶瓷领域实现多项技术突破，首先提出超高电活性新型生物压电粉体的多组元设计与制备方法，所制备粉体的压电系数 d_{33} 达 580 pC/N，显著高于传统生物压电材料，性能比肩部分含铅压电材料；其次，提出压电晶格材料的多特征仿骨设计与高精度增材制造方法，通过几何特征相对密度—可视化无量纲高斯曲率耦合设计，实现仿骨结构与天然骨骼 88% 的高匹配度。

所制备的仿骨压电晶格材料在 70% 高孔隙率下，压电系数较传统生物压电材料提高约 2.8 倍，力学性能提升约 100%，显著优于羟基磷灰石、生物玻璃等传统生物陶

瓷。在此基础上，团队提出压电晶格材料的多模态生物功能超声调控方法，通过高频、低频超声的切换实现不同生物功能的激活：低频超声可激活体内促成骨功能，通过调控电信号打开细胞钙离子通道，促进骨组织再生；高频超声可激活体内抗肿瘤功能，通过强电信号与体液反应生成 ROS，高效杀死残留肿瘤细胞，且该功能已在大鼠、比格犬等动物体内完成实验验证，为骨肿瘤术后的骨缺损修复与肿瘤复发抑制提供了一体化解决方案（图 1a）。相关成果发表在国际高水平期刊 *Materials Science and Engineering: R: Reports* 162 (2025) 100876 上。

团队还提出利用人体牙齿咬合力激活压电牙种植体功能的自治植入物，通过宏观结构—生物机械能场的协同调控实现电功能的自主激活，可实现口腔种植体的高效抗菌、抗炎和骨整合三重功效。该种植体具有出色的功能耐用性，在超过 100 万次加载—卸载循环中和在模拟浸泡超过 30 天仍能持续保持稳定的生物电输出。此外，与机器学习结合能使其实现自适应电压响应的可靠预测与实时调节（图 1b）。上述研究为自主和适应性强的生物电子平台开发提供了新策略，相关成果已被国际顶级期刊 *Nature Communications* 接收。

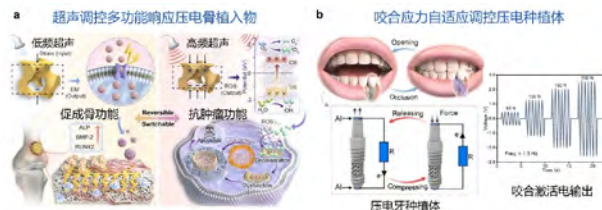


图 1 生物压电陶瓷 4D 打印。（a）超声调控多功能响应压电骨植入物；（b）咬合力自适应调控压电种植体。

3.3 压电陶瓷传感器 4D 打印：提升水下机电感知的技术性能

在压电陶瓷传感器领域，团队通过数字光处理增材制造技术制备高精度压电陶瓷 TPMS 点阵结构，封装为具有力电转换能力的压电陶瓷 / 聚合物复合材料，开发出 4D 打印压电陶瓷水下声学换能器，可高效将水下声波信号转换为电信号。团队建立了 TPMS 点阵结构压电陶瓷 / 聚合物力电响应模拟方法，发现 Gyroid 结构表面电位移强度约为 Diamond 结构的 7.5 倍，最高输出功率可达 2.43mW；所制备的水下声学换能器力电转换能力较传统多孔压电陶瓷复合材料提升约 60%，可同时点亮 12 盏 LED 灯，大幅提升了水下探测的灵敏度与信号转换效率（图 2）。

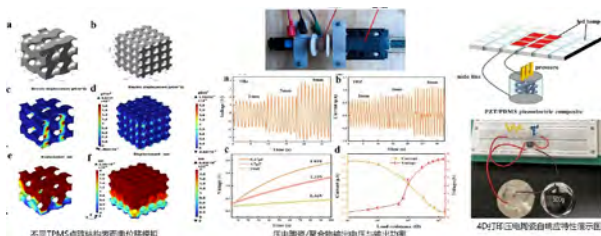


图2三周期极小曲面 Gyroid、Diamond 结构压电陶瓷传感器 4D 打印

此外，团队与香港城市大学吕坚院士团队深入合作，以海胆外骨骼为仿生原型，开发出 4D 打印仿生陶瓷生物感受器，发现海胆外骨骼中梯度细多孔结构具有超越其视觉 1-3 个数量级的机电感知能力，这源于沿^[001] 棘轴的梯度双连续多孔结构在液体流过时产生的表面电荷密度差。受此启发，通过仿生结构设计与 3D 打印技术制备的梯度陶瓷多孔结构可以完美复现这一机电感知功能。与无梯度结构相比，梯度多孔结构陶瓷样品的电压输出提升 3 倍，振幅增加 8 倍（图 3）。此外，基于梯度多孔结构制备的仿生超材料机械感受器能够实现水下时间分辨率的自我监测。该研究打破了无生命结构与生命功能间的传统界限，不仅深化了对木材、骨骼和海绵等天然负载敏感型多孔结构的跨越式理解，也推动了生物医疗、能源储存、航空航天等关键领域仿生功能器件设计的范式转变，展现出巨大的革命性潜力。该研究成果已发表在国际顶级期刊原 Nature 上（Nature 651 (2026) 371–376），一经发表就获得 Nature New & View、Science News 和 Physics Today 等知名期刊媒体的专题报道。

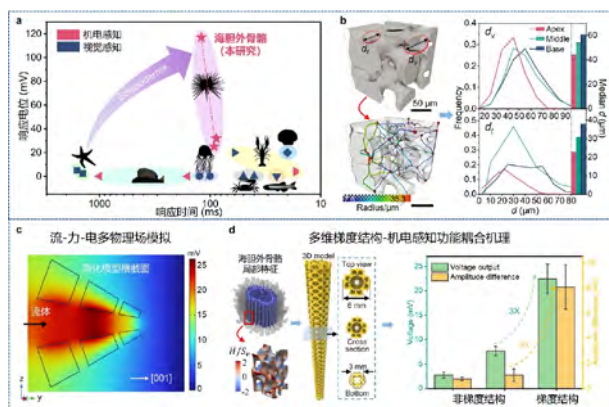


图3 4D 打印仿生陶瓷生物感受器。(a) 海胆外骨骼机电感知行为；(b) 多尺度结构拓扑特征分析；(c) 流-力-电多物理场分布模拟；(d) 梯度结构-机电功能耦合调控

四、陶瓷 4D 打印的未来展望：面向四大方向，实现多元拓展

陶瓷 4D 打印技术的发展，正以国家“四个面向”为核心导向，架起基础研究与产品研发之间的关键纽带，向深空、深海、能源、医疗等国家战略关键领域持续延伸，推动陶瓷材料从传统静态成型向智能动态功能化发展，未来将在材料、技术、设计、应用四个维度实现全方位突破。

材料层面，陶瓷 4D 打印的材料范围将大幅拓展，除现有研究材料外，光电陶瓷、变色陶瓷、智能响应陶瓷等新型材料将逐步实现打印技术突破，形成多元化、高性能的陶瓷 4D 打印材料体系，打破当前材料种类单一的限制；技术层面，微纳 3D 打印、等离子体打印等新技术将与陶瓷 4D 打印深度融合，突破传统成型工艺的尺度与精度局限，同时新的驱动机理、成型工艺也将持续涌现，不断丰富陶瓷 4D 打印的技术体系；设计层面，AI 辅助性能预测将成为决定 4D 打印陶瓷复杂构件应用的关键，通过人工智能算法实现刺激场—宏观观结构—材料功能的精准模拟与优化设计，大幅提升研发效率与性能稳定性；应用层面，陶瓷 4D 打印技术将实现“上天、入地、下海”的全域应用，在航空航天高温智能结构件、深海探测高灵敏度水声换能器、能源领域智能陶瓷器件、医疗领域个性化功能植入物等场景实现产业化落地。

陶瓷材料 4D 打印作为增材制造与智能材料的交叉前沿，成功突破了传统陶瓷制造形状单一、功能固定的固有痛点，完成了陶瓷制备从“静态形状”到“智能结构”的跨越式发展。随着材料体系的不断丰富、成型工艺的持续优化、功能调控理论的逐步完善，陶瓷 4D 打印将成为高端制造、生物医疗、国防军工等领域的核心支撑技术，推动陶瓷材料产业的智能化转型升级，为我国在增材制造与智能材料领域保持国际领先地位提供核心动力，也为各类尖端领域的材料创新提供全新解决方案。

作者简介：

闫春泽教授，华中科技大学博士生导师，教育部长江学者特聘教授、国家重点研发计划项目首席科学家，爱思唯尔 2023-2025 中国高被引学者。现任华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室主任、增材制造教育部工程研究中心主任、湖北省增材制造技术国际科技合作基地主任，担任中国材料学会增材制造材料分会副主任委员、中国机械工程学会增材制造（3D 打印）技术分会副主任委员、先进复合材料技术湖北省国防科技（军民融合）重点学科实验室学术委员会主任，国际期刊 Journal of Materials Processing Technology、International Journal of Extreme Manufacturing 副主编。主要从事材料成形理论、成形技术与装备研究，研发的激光粉末床熔融高分子 / 陶瓷材料与装备已实现产业化，并出口美英德澳等国。以第一或通讯作者在 Nature、Nature Communications、Advanced Materials 等期刊发表 SCI 收录论文 100 余篇，他引 18000 余次；授权发明专利 84 项，包括第一发明人获美日欧德俄国际发明专利 15 项；第一作者出版专著、教材 11 部，包括 Elsevier 英文专著 2 部；牵头 / 参与制定国家标准 7 项。相关成果获国家技术发明二等奖、国家科技进步二等奖、中国十大科技进展（核心成员）、湖北省技术发明一等奖（2 项）、中国专利优秀奖（2 项）、湖北专利金奖。

陈安南，香港城市大学博士后，香港材料学会会员，2011-2015 年本科就读于南京航空航天大学，2015-2020 年于华中科技大学攻读博士学位，2020-2026 年先后在华中科技大学和香港城市大学从事博士后研究工作，始终围绕结构 - 功能一体化陶瓷增材制造及其性能调控开展研究。以第一或通讯作者在 Nature、Nature Communications、Advanced Materials 等国内外权威刊物上发表 SCI 论文 30 余篇（IF ≥ 10 论文 10 篇），授权发明专利 6 项，主持国自科青年基金项目等 5 项，出版英文专著 1 项（排 1）。担任 Science Bulletin、Advanced Powder Materials、International Journal of Extreme Manufacturing 等期刊青年编委。

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金属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。