采用材料喷射技术制造的3D打印架构晶格结构

Samantha Mora[a]、Nicola M. Pugno[a]、[b]、Diego Misseroni[a]、*

[a]生物启发仿生纳米超材料与力学实验室，土木、环境与机械工程系，特伦托大学，意大利[b]工程与材料科学学院，伦敦玛丽女王大学，迈尔恩德路，伦敦 *E1 4NS*，英国

arXiv:2301.12634v1 [cs.CE] 30 Jan 2023

摘要

高精度3D打印技术为设计定制架构材料中存在的复杂形状带来了几乎无穷的可能性。本研究旨在综述有关3D打印晶格结构的最新研究，这些结构采用材料喷射（MJ）材料喷射 技术制造光聚合物，重点关注广泛应用的Polyjet和MultiJet技术。本文介绍了影响这一打印工艺的主要因素，以确定其在3D打印晶格制造过程中的作用。研究分析了已开展的实验研究、所采用的假设，以及相应数值模拟所使用的本构模型。此外，本文概述了近年来得到广泛研究的3D打印架构晶格材料，并通过阿什比图重点展示其所实现的力学性能。随后，我们强调材料喷射技术在制造面向多种工程应用的创新器件用可调谐架构材料方面的优势、局限性与挑战。最后，本文指出了未来工作的可能方向以及有待进一步研究弥补的空白，包括成本和环境相关问题。

关键词 ： 架构材料、晶格结构、材料喷射 3D打印、光聚合物、超材料 s.

目录

1 引言 1

2 材料喷射（MJ）技术概述 3

3 3D 打印架构晶格材料 4

3.1 架构晶格材料概述 4
3.2 材料喷射工艺对3D打印晶格力学性能的影响 5
3.3 单材料3D打印晶格 6
3.3.1 刚性材料架构晶格. 6
3.3.2 软晶格与失稳控制 . . . 6
3.3.3 负泊松比与形状可编程晶格 7
3.3.4 波传播控制晶格 . . . 9
3.4 多材料3D打印晶格 10
3.4.1 含刚性晶格的增强复合材料 10
3.4.2 具有不同刚度组件的晶格.10
3.4.3 功能梯度与主动晶格 . 10

4 挑战、优势和局限性 11

4.1 MJ架构晶格：打印工艺与实验工作挑战 12
4.2 MJ 架构晶格：制造限制 .4.2.1 几何限制 . 14
4.2.2 成本分析.14
4.3 MJ架构晶格：成果与潜力 15
5 结论性评述 17
6 资助 18
A MJ补充评述 21
A.1 MJ技术. 21
A.2 制造工艺对MJ打印部件力学性能的影响.22
B 3D 打印架构化晶格：常见制造工艺要点 24
B.1 3D打印技术. 24
B.2 制造工艺对晶格的影响 24
C 通过MJ进行架构晶格的成本估算 24
D 材料喷射增材制造架构晶格的本构模型 25
E 所评述材料喷射增材制造架构晶格的相关方面 27

1. 引言

增材制造（AM）技术能够制造具有复杂几何形状的三维自由形状和结构。目标设计经过切片后，再由 3D 打印机从

*通讯作者（*diego.misseroni@unitn.it)*

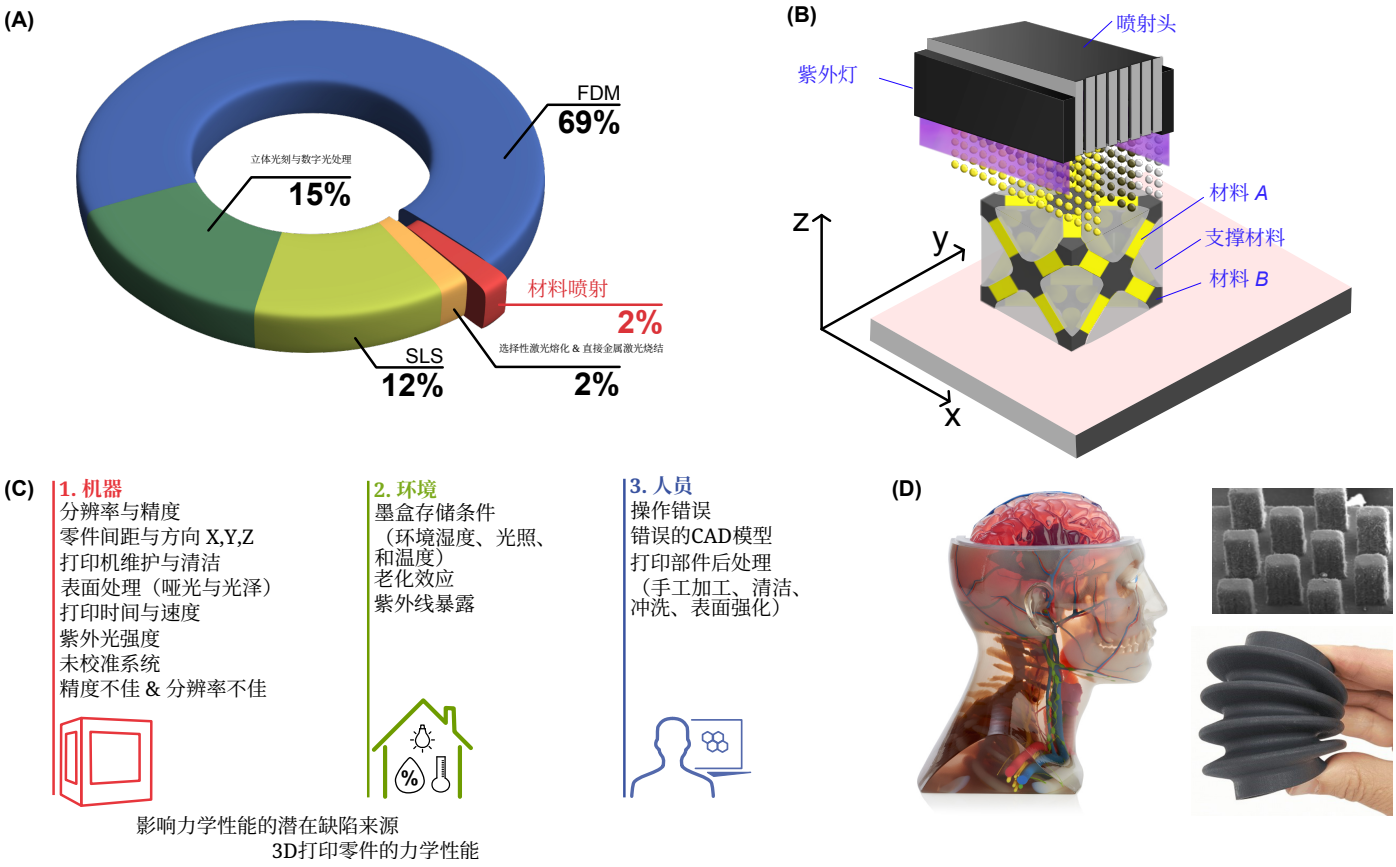

图1：（A）增材制造市场中用于产品和/或服务应用的最常用三维打印技术 [1]。（B）材料喷射的一般组件和运行示意图。（C）影响最终材料喷射打印部件力学性能的主要因素。（D）采用多种材料和颜色的三维打印材料喷射部件示例（例如解剖模型。经 [2]许可转载。版权所有 2022年，Stratasys。保留所有权利。微流控器件 [3]。橡胶状弹簧。经 [4]许可转载。版权所有 2022年，Stratasys。保留所有权利）。

一个 CAD 文件。不同材料和机器可根据当前增材制造市场中现有技术的选择而有所不同。近年来，需求量最大的 3D 打印技术包括熔融沉积成型（ FDM ）、立体光刻（SLA）、选择性激光烧结（SLS）、选择性激光熔化（SLM）和材料喷射 [1], , 如图 1（A）所示。材料喷射技术在过去二十年间不断发展，因为它允许使用光聚合物来制造高质量且用途广泛的部件，这些部件具有刚性、柔性或耐温等特性 [2–4]。总体而言，近期通过 3D 打印制造的产品主要面向航空航天、汽车、生物医学和机器人行业 [5]。仍有一些领域处于发展早期，例如建筑施工，因为大规模制造仍受到限制。尽管如此，3D打印桥梁 [6] 等前沿案例正推动增材制造不断拓展。材料开发是增材制造新兴技术促进的最显著应用之一。自然界关于仅在特定结构功能（例如骨骼、牙齿）所需之处布置能量和材料的理念，为传统刚性材料设计树立了典范。因此，人们构想出细胞结构和架构晶格材料等突破性拓扑结构，以防止断裂，同时又不失去

以尽可能低的重量实现强度和刚度 [7]。后者还意味着显著的经济和能量节约，可用于工业用途，从而大幅降低对环境的影响。如今，通过3D打印技术可以轻松制造具有新功能的复杂晶格结构、超材料和多材料。因此，常见制造技术（例如铸造成型、计算机数控）在时间、材料选择和几何复杂性方面的局限性均可得到克服。此外，人们也开始构思刺激响应材料和智能材料，以增加随时间变化的转变，即 4th 维度，并将其融入3D打印技术 [9]。随后，增材制造也为制造创新型主动部件开辟了前景广阔的研究方向。

本综述旨在讨论通过材料喷射（MJ）制造的架构晶格材料相关最新研究工作的主要结果和挑战，重点关注采用光聚合物的商业化技术，例如 Polyjet® [4]和 MultiJet® [10]（图1）。高分辨率、在一次打印中使用刚性和柔性可固化树脂、固有的变形能力以及简化的后处理操作，推动了近年来采用 MJ 制造新型晶格结构。许多实例还进一步拓展至实际应用（例如能量吸收和冲击

3D打印工艺	主要原理	材料	常用技术	打印分辨率
槽式光聚合	聚合	橡胶树脂，聚合物	SLA, DLP, CLIP	10 微米 *数字光处理:35-100
粘结剂喷射	喷墨、粘结剂	陶瓷、金属	粘结剂喷射	5–200 微米
材料喷射	**喷墨，紫外固化**	**橡胶树脂，聚合物**	**Polyjet，MultiJet**	**13–16 µm**
粉末床熔融	熔化、冻结粉末	金属、陶瓷、聚合物	选择性激光烧结、直接金属激光烧结、选择性激光熔化，EBM	80-250 µm
直接能量沉积	熔化、冻结	金属、陶瓷	直接能量沉积	250 µm
材料挤出	熔化、冻结丝材	聚合物、陶瓷	FDM	50-200 µm
薄片层压	连接	金属、聚合物、陶瓷、纸	层压实体制造、超声波增材制造、选择性层压实体制造	可变

表1：主要3D打印工艺、材料和分辨率概览。改编自 [8]。所列缩略语含义如下：SLA（立体光刻）、DLP（直接光沉积）、CLIP（连续液态界面打印）、SLS（选择性激光烧结）、DMLS（直接金属激光烧结）、SLM（选择性激光熔化）、EBM（电子束熔化）、FDM（熔融沉积成型）、LOM（层压实体制造）、UAM（超声波增材制造）、SLCOM（选择性层压实体制造）。打印分辨率指预期的层厚。

器件、支架脚手架、软体机器人学）。因此，有必要分析其已实现的力学性能，并探究可能限制设计目标的制造因素。本综述分为以下章节。第2节简要介绍影响 MJ 工艺的主要因素，以及其优势和现有缺点及潜在解决方案（例如固化速率、可持续性）。第2节从架构材料的总体概述开始。随后讨论 MJ 在晶格结构制造中的应用、所采用的本构模型，以及打印工艺对其最终力学性能的影响。接下来，以下小节根据组成材料及其相应特性和功能，将 3 D 打印结构分为两大类，并介绍相关实例，即单材料打印晶格（刚性基材、柔性与失稳控制、负泊松比与形状可编程、波传播控制）和多材料打印晶格（采用刚性晶格的增强复合材料、不同刚度组分、功能梯度和主动）。第4节从晶格制造的角度分析 MJ 打印工艺所面临的挑战和局限性，以及所需的进一步实验工作（例如各向异性评估、动态和疲劳测试）。此外，还介绍与 MJ 制造相关的几何限制以及基于实际价格的成本估算。进一步地，我们通过在阿什比图中将其已实现的力学性能与现有材料进行比较，对所述 MJ 架构晶格的实际结果进行定量评估（例如杨氏模量与密度的关系）。最后，在第5节中，我们指出研究空白和未来方向，并给出结论性评述，从而利用 MJ 的能力，推动具有功能性、高性能和创新应用的新型架构材料的发展。

2. 材料喷射（MJ）技术概览

根据ASTM-ISO标准分类的现有增材制造技术采用不同的工艺、原材料类型和打印分辨率 [8], , 如表1所总结。与槽式光聚合或直接沉积相比，材料挤出技术（如熔融沉积成型（FDM））因成本优势、可扩展性以及材料种类丰富（从聚合物和凝胶到生物基材料）而在增材制造市场中得到更广泛的应用 [1, 5, 11], , 如图1（A）所示。当需要更高质量时，材料喷射打印能够获得具有高尺寸精度的聚合物物体（层高为13–16微米，对于长度小于 ±0, 精度为0.06–0.1%，零件长度低于 ≈100 毫米），与材料挤出工艺相比，其表面粗糙度更低、阶梯缺陷更少且废料更少 [4, 12, 13]。因此，材料喷射是增材制造领域一项很有前景的技术。然而，打印物体的最大尺寸受到实际托盘尺寸的限制（目前为 < 1 米），且最小壁厚应为 >= 0 0.6毫米，因为微小零件往往较为脆弱且容易翘曲，尤其是在后处理操作过程中（详见第4.2节）。

材料喷射打印机使用多个喷嘴，同时沉积基材和支撑材料液滴。滚筒和刮刀装置将打印层整平，以避免材料过量，如图1(B) 所示。有关材料喷射技术的更多详情，请参见附录 A.1。与此同时，采用紫外光进行固化过程，使沉积层硬化，从而形成最终部件。可能涉及自由基、阳离子或混合光固化机制 [14]。较高的紫外能量会影响树脂的玻璃化转变温度（T_g），这是由于材料的聚合程度及其交联程度增加所致

密度 [15]。因此，光聚合物在低温下也可能呈现黏弹性或橡胶态行为。典型材料喷射树脂的 T_g 约为 50°C。因此，打印部件在环境温度下可能呈现黏弹性 [16]。部件在成型托盘上的方向会影响松弛模量 E(t)，该模量也会随时间变化 [17]。树脂必须以较快的速率进行光聚合，以确保其充分固化。低黏度（0.1-10 Pa.s）的光聚合物是理想材料，因为它们易于流经加热喷嘴并铺展到成型托盘上。然而，构成树脂的低聚物与单体之间的比例平衡会影响其交联程度和黏度 [18]。高性能聚酰胺树脂是兼具快速固化速率与低黏度的理想候选材料，同时提供较高的热稳定性、力学性能以及层间黏附强度 [19]。更多详情请参见附录A.1。

尽管最常用的材料喷射技术（Polyjet® [4] 和 MultiJet® [10]）工作原理相似，但主要区别在于支撑材料的类型和后处理活动。对于 Polyjet，可使用可溶性凝胶材料，并通过机械方式（水压）或化学方式（以 2% 氢氧化钠（$Na(OH)$）为基础、并添加 1% 偏硅酸钠（Na_2SiO_3）的溶液）去除。对于几何形状复杂、难以清洁，和或由非常薄且脆弱的部件组成的模型（例如晶格结构），后一种方法更为适用。在去除过程中，建议定期检查打印部件。溶液温度不应超过 30°C，打印机指南建议浸泡时间不应超过一小时，以避免不必要的变形，尤其是对于薄壁模型（小于 1 mm）。3D 打印架构化晶格的典型复杂几何形状可能需要更长的浸泡时间，才能完全去除支撑结构。不过，我们观察到，即使对于具有难以触及部位的高度精细建筑结构（在使用轻型支撑网格和清洗站的情况下），支撑材料也能在不到 4 小时内几乎完全熔化。另见附录A.1。在这种情况下，必须持续目视检查部件，以确保薄壁部件的完整性。清洗过程完成后，应将部件在水中冲洗，以去除任何残留的支撑材料。最后，建议将清洗后的部件浸入甘油基溶液中 30-60 秒，以增强表面并限制老化效应 [20, 21]。MultiJet 采用块状蜡基支撑。首先可使用 65°C 以上的热源处理 30 分钟或更长时间来去除这些支撑。要去除 3D 打印部件上的细小残留物，则需要在较短时间内（2 至 5 分钟）使用溶剂浴（EZ Rinse-C 或轻质矿物油）。建议使用温度在 30-35°C 之间的肥皂水冲洗部件 [22]。MJ 可在一次打印中同时使用多种具有不同刚度、物理性质或颜色的聚合物，如图 1（D）所示。表3总结了最商业化的光固化树脂，其断裂伸长率各不相同：类橡胶树脂接近 200%，塑料树脂为 10% [24, 25]。另见附录 A.2。因此，它们可应用于各种功能性应用。聚合物与柔性橡胶的特定组合，可以在较宽的邵氏硬度范围（A30-A95）内形成增强材料，尽管某些树脂可能表现出较差的力学性能，并且会随时间推移而降解 [26]。尽管目前可用的材料喷射树脂数量仍然有限，但已有研究开始致力于利用非光聚合物和低熔点金属（如铝）开发新的打印材料 [27]。当前光固化材料的缺点是通常不具备环保性，且不可回收 [28]。因此，人们越来越关注寻找毒性更低且更具可持续性的替代品，例如生物基单体 [29]，、由光固化低聚物制成的生物树脂 [30]，以及载细胞可交联光聚合物，如水凝胶 [31]。

3. 3D 打印架构晶格材料

3.1. 架构晶格材料概述

整体材料和传统材料一直用于满足特定的强度、刚度和韧性要求。在不损害结构完整性的前提下，通过减重和降低成本来改善力学性能，这一目标推动了架构晶格材料在多个工程领域的持续发展。根据图 2(A)所示的胞状结构分类 [32–34]，，晶格结构可分为随机型和非随机型。前者由随机材料分布构成，如今通过生成算法进行设计；后者则通过对晶胞进行镶嵌生成，晶胞由互连面、边或作为桁架的支杆/拉杆构成，通常通过铰接节点或固定节点连接 [32]。这些经过拓扑优化的复杂几何形状能够在低密度下承受较大的载荷和大变形。作为超材料，架构晶格结构可表现出负泊松比（NPR） [35–37]，、负热膨胀系数（NCTE） [38–40]，或负折射率 [41–44]。通过改变材料构型和微观结构，还可以获得波衰减、隔音和能量采集等其他新颖性能 [39, 45, 46]。还可以设想新的目标，例如同时实现承载与热性能、刚度与抗冲击性 [47–49]，，或负泊松比与负热膨胀系数[50, 51]。晶格材料的性能受相对密度、节点连通性、有效杨氏模量（EEM）、屈服和断裂强度控制 [33]。相对密度是晶格材料密度与其对应实体材料密度之比 [49]。对于 t/l << 的二维点阵，相对密度可按公式 $\rho_{rel} = At/l$计算，其中 t 为连接杆厚度，l 为连接杆长度，A 为取决于所考虑晶格拓扑结构的比例系数 [32, 52][1]。对于三维开孔泡沫材料，相对密度 ρ_{rel} 与 $(t/l)^2$, 成正比；而对于三维闭孔泡沫材料，它

[1]对于二维六边形和三角晶格$A = 2\sqrt{3}$，而对于Kagome晶格$A = \sqrt{3}$。

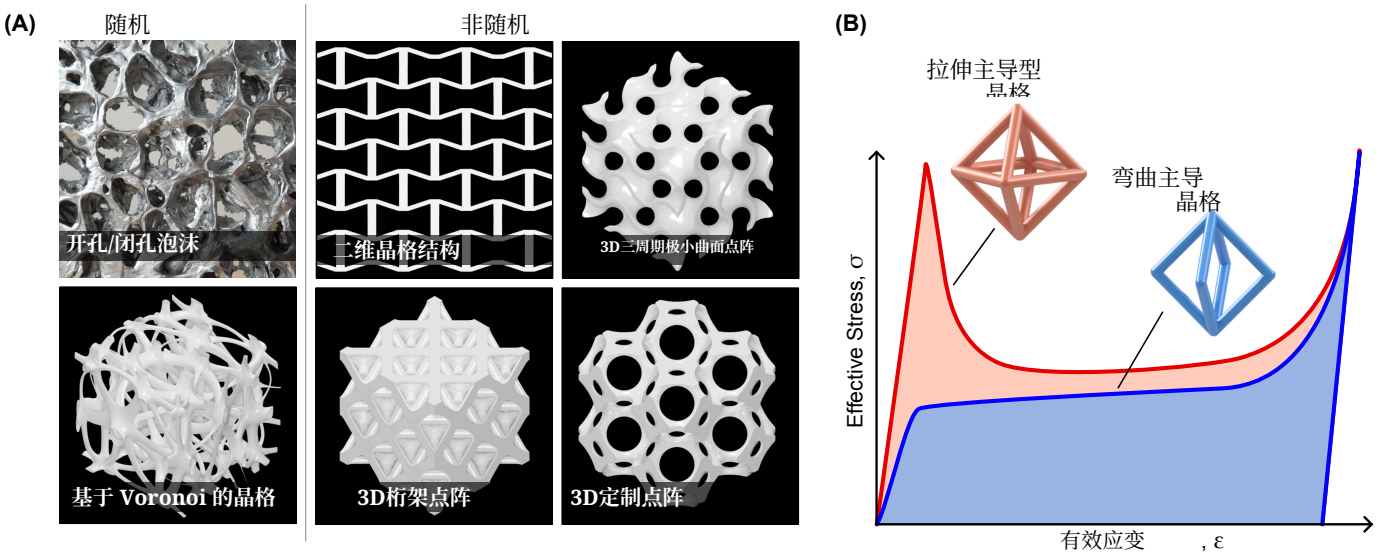

图2：（A）蜂窝结构与点阵结构的一般分类。（B）受到启发的拉伸主导型和弯曲主导型点阵的特征应力-应变曲线（$\sigma - \epsilon$），其灵感来源于 [23]。

与 t/l成正比。对于半径为 r 的点阵桁架材料，相对密度定义为 $\rho_{rel} = (6\sqrt{2} + 2)\pi(r/l)^2$ [53]。节点连通性的程度决定了晶格结构的主要行为和塌陷机制 [54,55]。拉伸主导型 晶格具有较高的连通性，并表现出较高的初始强度和刚度 [54]。其塌陷机制可能由塑性拉伸主导、屈曲主导或拉伸-断裂主导 [23]。另一方面，弯曲主导型 晶格的特点是节点连通性较低。它们的初始强度较低，但可达到较高的应变值，因此适用于能量吸收应用。此外，它们在屈服后会呈现规则且延展的应力平台，在较低应力下发生大变形。其失效机制可能由弯曲主导、屈曲主导或断裂主导 [23]。从图 2 中不同的应力 - 应变曲线可以区分拉伸主导和弯曲主导这两种晶格行为(B)。

3.2. 材料喷射工艺对*3D* 打印晶格力学性能的影响

3D打印技术的最新发展使得制造更复杂、性能更优异的架构材料成为可能，这些材料受到数学模型（例如三周期极小曲面、分形）和仿生模型（例如蜂窝结构、受玻璃海绵启发的模型）的启发，并具有出色的力学性能 [56]。由于具有高分辨率、可使用单一和/或多材料，以及所需手动后处理较少等优势，MJ似乎是一种很有前景的技术，可用于制造从毫米尺度到厘米尺度的晶格。

在每种3D打印工艺中，评估制造参数对最终打印部件几何精度和性能的影响始终是一项重要目标。对于MJ而言，构建件取向、紫外固化、支撑结构去除操作以及其他附加因素，总结于图 1（C）中，会对3D打印试样的抗拉强度和模量产生影响 [57, 58]（详见附录A.2和B.2）。

各向异性的一个常见来源是层的打印方向和层间黏附，或表面粗糙度。MJ 制造的部件各向异性约为 2%，低于其他常见商业增材制造技术；后者的各向异性甚至可达 50%（例如 FDM） [59]。（详见附录B.2和 B.2）。在光聚合物沉积过程中，上一层会受到上方树脂层的压实。此外，这些层还会经历后续多轮紫外光固化，且固化能量逐渐降低，因为紫外光必须穿透越来越多的堆叠层。这一渐进过程使各层整体充分固化并牢固黏合。因此，最终物体呈现出非常均匀的力学和热学性能。然而，必须指出的是，如图 *XY*方向所示，平行于打印托盘构建的部件（图 3（A））表现出最高的抗拉强度、拉伸模量和断裂伸长率；而垂直方向构建的部件则机械强度最低 [57, 60–64]。这一现象在图3 （B）和（C）中有所展示，相关数据来自采用柔性或刚性材料打印的试样的拉伸测试 [63]。采用柔性 Tango+ 和 RGD8625（刚性 VeroClear 与柔性 Tango 的组合+）打印的样品则是例外。在这些情况下，垂直于打印托盘构建的部件（*ZX*方向）的拉伸模量最高，如图 3 （B）和（C）所示。此外，减少构建平台上打印部件之间的间距（见图3 （A））可显著改善力学性能，这归因于紫外光固化暴露时间更长 [57]。尽管 Z 方向试样的紫外光固化时间可能更长，但其中打印层数较多，且前后相邻层之间的内聚力最低。因此，预计会产生相应的

弱化效应 [65, 66]。在晶格中也能观察到这一现象：如果打印层的方向与压缩载荷方向垂直（面内情况），晶格的杨氏模量会发生变化并趋于降低 [67–69], ，如图 3（D）和（E）所示。此外，MJ 使用的刚性光聚合物，其断裂强度会显著依赖于打印方向 [70]。Polyjet 和 MultiJet 架构晶格的数值建模需要根据所用打印光聚合物采用不同的本构模型。对其组成光聚合物进行的材料表征研究，为选择适当的本构模型提供了一些参考，汇总见附录 D 表 4。传统上，MJ 打印材料采用双线性 [71] 或黏弹性正交各向异性 [16, 70] 本构模型进行表征。因此，这些模型能够描述材料的时间相关行为和高度非线性的应力-应变关系。研究已证实，柔性材料具有超弹性性质。为准确拟合实验数据，研究人员开发了多种应变能密度模型。例如，橡胶类 [72], 材料采用四阶 Ogden 模型，而软数字材料则采用 Arruda-Boyce [73], 、 Yeoh [74] 和 Mooney-Rivlin [71], 模型。此外，针对玻璃态光聚合物晶格的横向各向同性超弹黏塑性模型，可将打印方向效应导致的各向异性与预期的非弹性变形及应变率纳入考量。该方法还结合了修正 Tsai-Wu 失效准则，以考虑各向异性材料的应变软化效应 [75]。除了打印工艺的影响，后处理阶段也会影响 MJ 制造的 3D 打印晶格的预期性能（例如支撑去除、热处理和储存条件）。例如，研究人员已开始探索简化支撑去除操作的方法。具体而言，卡扣式制造方法可减少体心立方（BCC）、面心立方（FCC）和八面体晶格所需的支撑材料用量及打印时间。支杆组分别打印，之后通过节点和聚合物黏合剂连接。与一次性整体打印的晶格相比，其机械强度和能量吸收值也显著提高，增幅约为 100% [76]。作为几何优化方法的补充，打印后进行热处理可改善晶格的力学性能。在大压缩应变下，能量耗散值最高可提高至 60% [77]。此外，随时间变化的外部暴露条件也会影响有效弹性模量，如图 3（F）所示。在室温下储存的清洁晶格样品，其模量高于置于水、支撑材料和盐溶液中的样品 [67]。

3.3. 单一材料三维打印晶格

材料喷射已实现多种 3D 打印架构晶格材料的制造，涵盖从简单到复杂的几何形状，并可获得定制的力学性能（例如强度、韧性、负泊松比特性、失稳和波控制）。以下小节将介绍由单一材料制成的晶格的典型示例，这些材料可以是刚性、柔性或 混合材料。混合材料是通过混合一定比例的刚性和柔性材料喷射光聚合物制成的复合材料，以获得不同的肖氏硬度等级或功能梯度材料。此类混合材料采用不同的商业名称，数字材料，或多材料复合物，分别用于 Polyjet 和 MultiJet 技术（另请参见附录 *A.2*）。

3.3.1. 刚性材料架构晶格

由于相较于其他材料喷射光固化树脂，玻璃态光聚合物价格更低，因此其一直以来主要被用于晶格的制造与表征。采用单一刚性材料制造3D 打印晶格时，通常会在数值模拟之外进行准静态实验测试。其主要目标是通过调整不同架构拓扑中的几何特征，获得更优异的力学性能。例如，经过定制的3D打印蜂窝结构在六边形、内凹式和手性构型中呈现出可变的胞元厚度梯度。在较低的梯度参数下，能量吸收效率达到约90%的峰值（实验中约为65%），而传统材料中观察到的数值为50% [83]。通过优化质量比的球形晶格 [84] 以及三周期极小曲面（基于Schoen的FRD和OCTO晶格的TPMS） [85], 获得了较高的抗压强度。如图4(A)所示，半板晶格作为一种替代方案，相较于基于桁架的晶格材料表现出更强的承载能力。同样，与金属泡沫相比，其断裂韧性相近、能量吸收值更高，但相对密度更低。在板材表面引入孔洞，可以控制裂纹扩展并实现均匀的应力分布，同时也便于从内部去除支撑材料 [78]。此外，图4(B)所示的五模态晶格被制造出来，用于评估改变其中点晶格连接的影响。由于该连接点接近相应晶胞的质心，弹性模量和剪切模量会降低，而泊松比基本保持不变 [79]。此外，材料喷射已开始广泛用于制造生物医学器械原型，这些原型具有足够的强度和孔隙率，尤其适用于骨或组织生长。人们设计并测试了不同的支架拓扑结构，例如基于矩形梁的 [67], 三周期极小曲面（P、D、I-WP类型的TPMS，具有均匀和梯度化孔隙率，如图4(C)所示） [80, 86], vintile [87], 立方体 [88]。晶格架构会影响变形行为，其中质量分布不均匀的连接杆会导致应力集中增加。孔隙率较高且连接杆截面较小的支架，其弹性和屈服强度均有所下降。例如，在TPMS（P型和D型）中，当相对密度从60%降至30%时，杨氏模量趋于下降约30%，屈服应力则降低约10%至20% [86]。

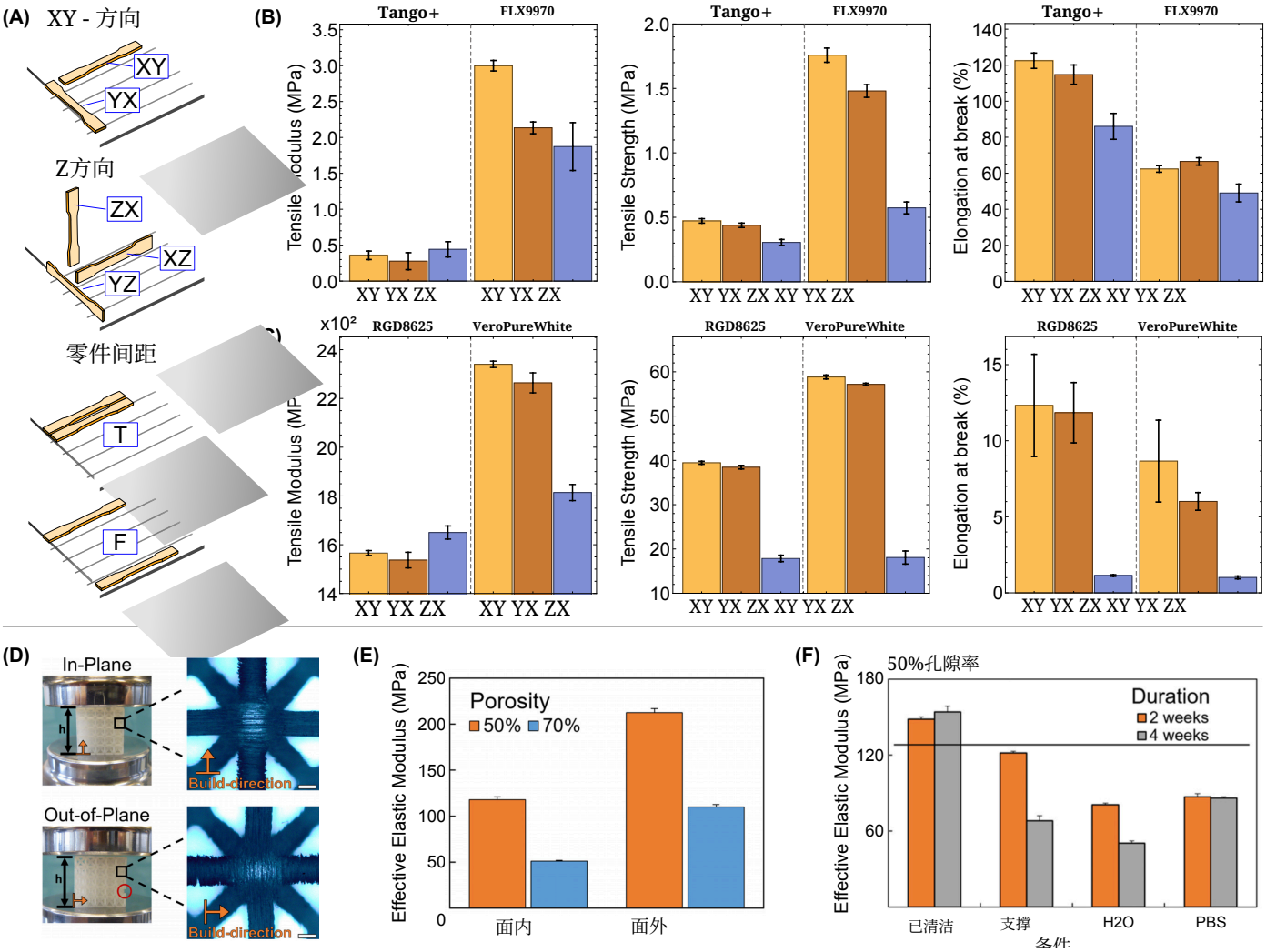

图3：（A）构建托盘上的参考样品方向和间距（紧密或远距）。由采用不同打印方向、使用（B）柔性材料（Tango+ 和 FLX9970）以及（C）刚性材料（RGD8625 和 VeroPureWhite）制成的试样所表现出的拉伸模量、抗拉强度和断裂伸长率。改编自 [63]。（D）在相对于压缩载荷施加方向的“面内”和“面外”方向上进行测试的晶格样品。通过考虑以下因素，得到晶格在压缩载荷下的有效弹性模量变化：（E）不同孔隙率和构建方向，以及（F）环境储存条件。经 [67]许可转载。版权所有 2019年 ASME。

此外，半透明支架骨在较高孔隙率下比其有色对应物表现出更高的刚度。由于表面存在张开的银纹，其失效表现也更加延性化，而不是呈现带有空洞和凹坑、会诱发更快裂纹扩展的脆性表面[88]。此外，如图4(D)所示，切割阶数为一至三阶的分形结构材料实现了约88%的形状恢复能力。尽管提高分形阶数会导致弯曲刚度降低，但其结构完整性并未受到影响 [81]。这些前沿构型还确保了能量耗散性能。由相同刚性基材制成的异质结构构型，相较于具有均匀胞元布局的构型表现出更强的能力。某种晶格的强度可以与另一种晶格所提供的恒定屈服后应力平台共同发挥作用。例如，将面心立方（FCC）晶格与体心立方（BCC）胞元 [92], 或具有双菱形（RD）拓扑结构的胞元 [82]。后一对（FCC+RD）形成了所谓的互穿晶格（IPL），其吸收能量是单独FCC或RD结构可达到值的六倍。IPL使载荷能够在突然塌陷前重新分配，因为前述每种晶格构型都在不同应变下发生失效 [82], 如图4（E）和（F）所示。

3.3.2. 软晶格与失稳控制

柔性光聚合物推动了能够承受更大变形的材料结构的制造，这是由于其预期断裂伸长率约为 200%（见表 3）。通过改变几何参数（例如减小杆件直径和增大间距），软晶格可以获得特定的弹性特征，例如人体组织的刚度和杨氏模量 [95]。除了预期的弯曲或拉伸响应外，

不同类型的柔性架构结构表现出超弹性行为，其主要受屈曲和后屈曲阶段支配 [96]。这一事实使得在不增加原有连接杆材料体积的情况下，能够制造出更具抗屈曲能力的结构（例如应变约为 6% 范围内的海绵启发式网格） [89]，，如图 5（A）所示。除几何特征的影响外，失稳的引入还带来了新的功能，例如在特定加载条件下实现可逆变形和几何非线性 [47]，，甚至能够控制或调谐弹性波吸能结构 [97]。例如，图5（B）所示的软质胞状材料可以通过激活不同于初始状态的高水平失稳机制来控制屈曲机制，同时调节力驱动和振幅的范围，而无需额外施加夹具或边界条件 [90]。此外，研究人员还提出了新的非线性方法，用于评估大变形条件下的性能，以满足实际应用需求（例如图5（C）所示的用于鞋底的数字材料晶格） [91]。

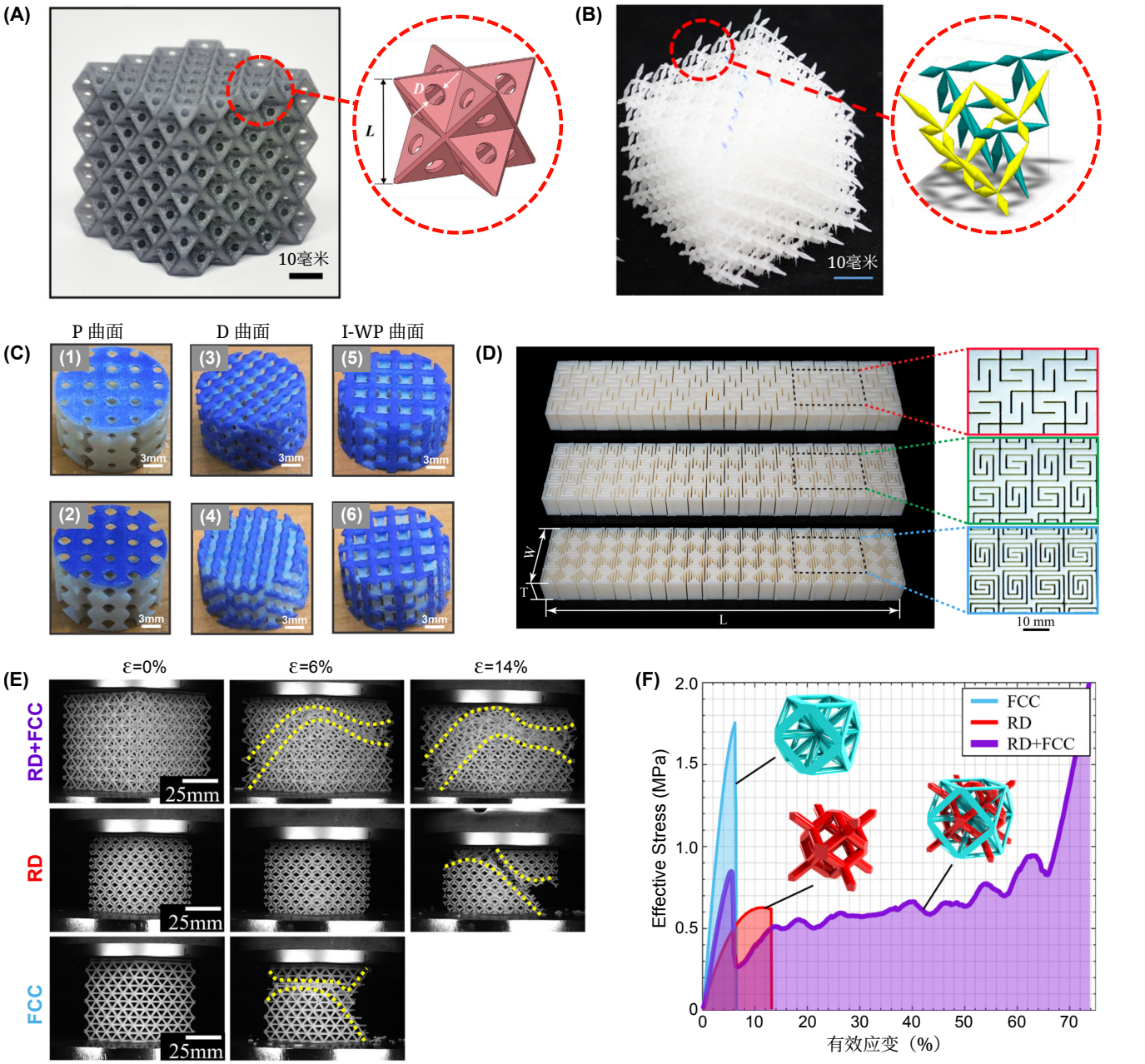

图4: （A）面心立方半板晶格。经 [78]许可转载。版权所有 2021年 Elsevier。（B）混合五模材料。经 [79]许可转载。版权所有 2020年 AIP Publishing。（C）具有径向梯度孔隙率的三周期极小曲面支架，包括 P、D、I-WP 类型。经 [80]许可转载。版权所有 2018年 Elsevier。（D）具有一阶、二阶和三阶分形切割的晶格超材料。经 [81], 许可转载。版权所有 2021年 Elsevier。（E）单个 RD、FCC 和 IPL 晶格在压缩试验过程中的失效、剪切带和应变演化，以及（F）其相应的应力-应变曲线对比。经 [82] 许可转载，遵循知识共享署名 4.0。

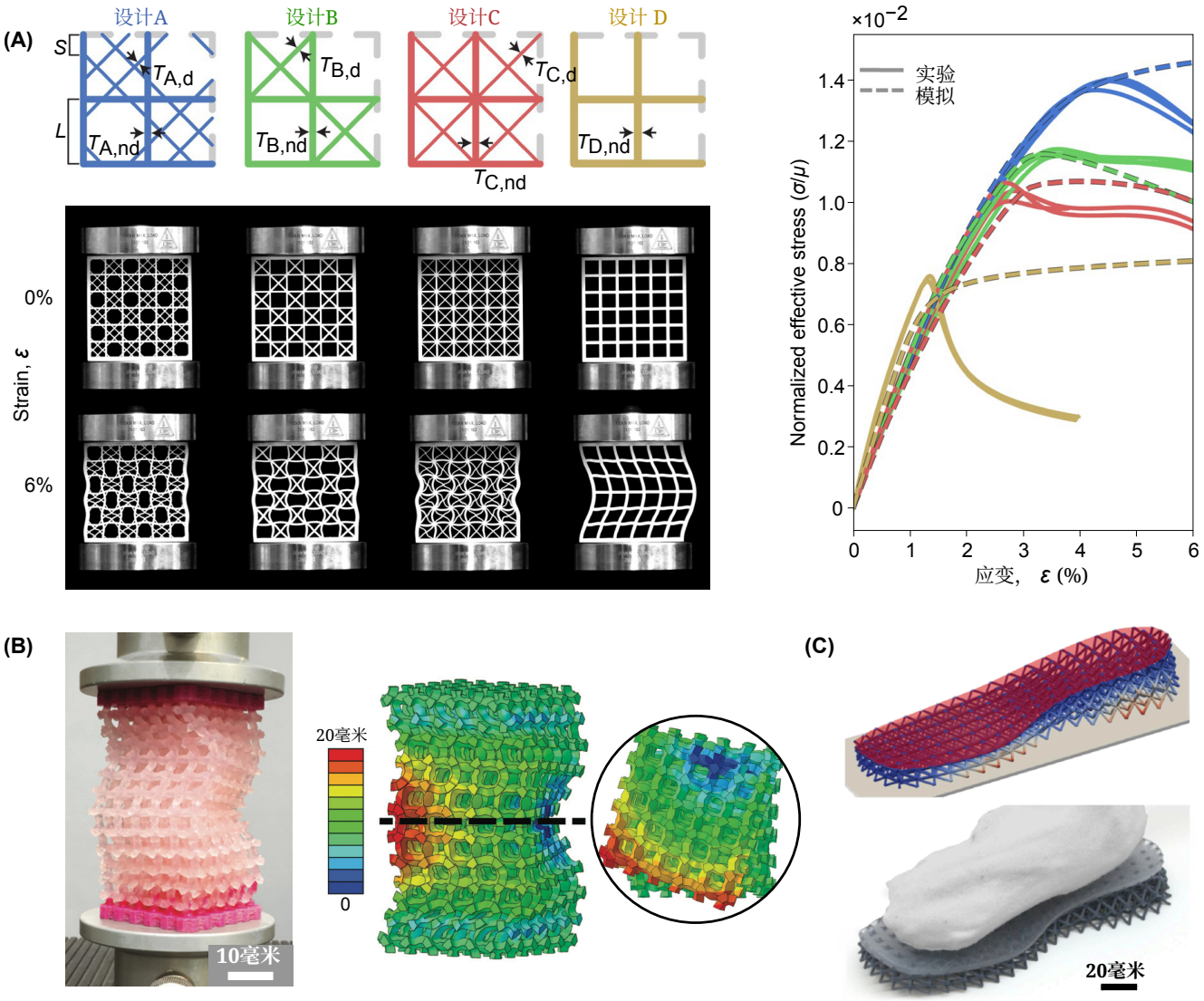

图5：（A）仿海绵骨架晶格、其优化设计以及无支撑结构的方形网格的机械变形，以及相应的应力—应变曲线。经 [89]许可转载。版权所有 2020年 Springer Nature。（B）通过 Polyjet 在宏观尺度3D打印试样中同时激活的高阶屈曲模态。经 [90] 许可转载，依据知识共享署名3.0许可协议。（C）3D 打印晶格鞋底的应用。经 [91]许可转载。版权所有 2018年 Elsevier。

3.3.3. 负泊松比与形状可编程晶格

近年来，负泊松比特性启发了响应性晶格构型的设计，使其在载荷作用下呈现特殊且反直觉的拉伸或压缩变形模式。这些人工制造的系统具有负泊松比（*NPR*） [98, 99]。多种制造出的负泊松比晶格结构，例如凸凹泡沫 [100], 分级蜂窝 [93], 或具有正弦形韧带的晶胞 [101–103], ，在大应变范围内表现出可调的负泊松比（约为–0。1 ≤ 负泊松比 ≤ –0。7）。正弦形连接杆（其特征参数包括波振幅A、跨度L、跨度比A/L、波长数k以及弯曲梁刚度B）为晶格结构提供了可调的力学性能。改变这些几何参数可以调节负泊松比的数值，以及拉伸主导与弯曲主导状态之间的转变行为 [100–103]。同样，层级结构的提高促成了泊松比的降低，进而产生了负泊松比特性 [93]，如图6（A）所示。基于光聚合物的热黏弹性响应特性，人们设想了复杂的主动晶格结构。矩形与三角形马蹄形图案[104],反四手性、内凹式和卷曲蜂窝结构 [105, 106],已表现出形状恢复能力。研究发现，一旦实现负泊松比和一定程度的大变形，这些结构在受到外部刺激（例如热）后能够恢复到原始构型。研究人员采用相演化模型来描述由几何和热机械非线性产生的形状变化。此外，形态变换过程还可以通过数据驱动方法进行控制，并输入初始参数，例如最终目标构型、预期

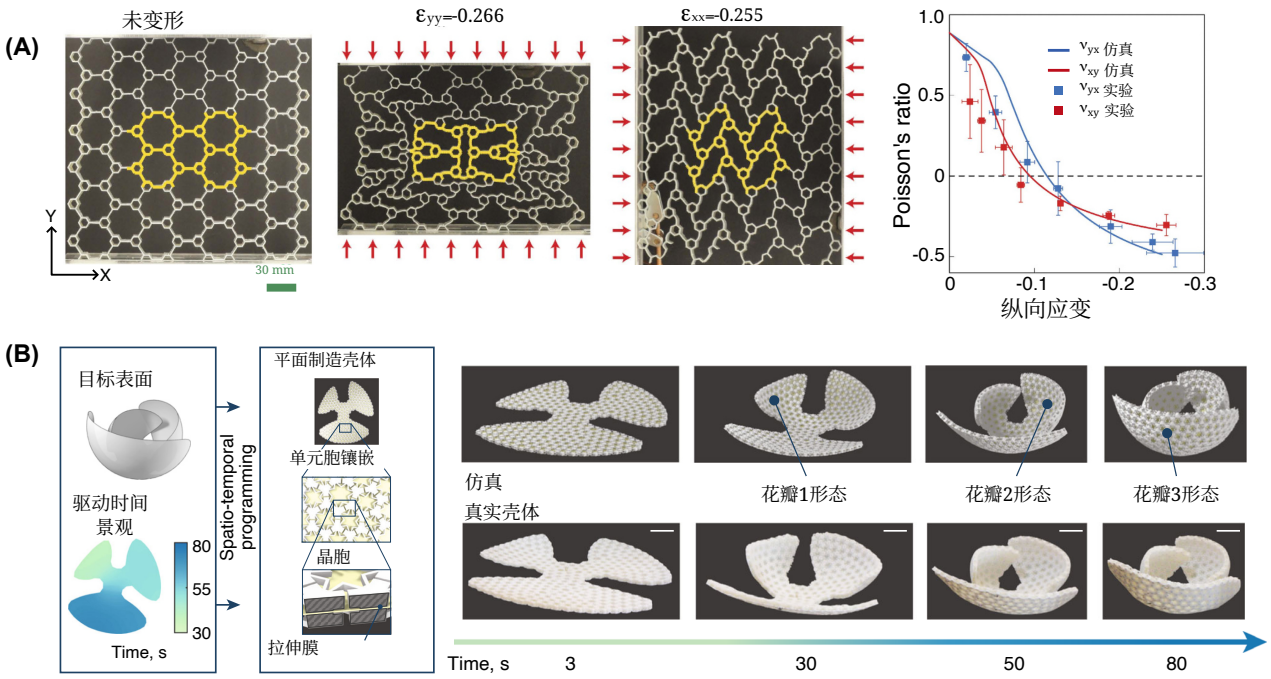

图 6: （A）层级蜂窝结构及其呈现的负泊松比范围。经 [93] 知识共享署名 4.0 国际许可协议许可转载。（B）初始变形壳体及其内部构型和随时间变化的形状变换过程。经 [94] 知识共享署名 4.0 许可转载。

变形速率（来自实验数据）以及特定的驱动时间。由此，当先前已拉伸的壳体与热源接触后，观察到其在约80秒内从平面形状转变为闭合曲面形状 [94], , 如图6（B）所示。

3.3.4. 波传播控制晶格

材料喷射已应用于声学、光学或振动控制结构设计器件的原型制作，以便后续进行实验验证。例如，由三维 Cross 形晶格形成的 40千赫 空气超声透镜 [107]（如图 7（A）所示）、声学超材料中的手性通道 [111],具有高吸声性能的薄壁胞元结构（300 - 600 Hz 范围） [112], 用于在宽频率范围（8 至 12 GHz）内改变波传播的两类全介质透镜、波束偏转和共形阵列 [108], 如图 7（B）所示。人们还探索了具有全向带隙的声子晶体替代方案，例如具有多个带隙的可调谐正弦晶格 [103, 109] 或带宽提升至 160% 的振动控制超结构 [110], 分别如图 7（C）和（D）所示。

3.4. 多材料三维打印晶格

材料喷射的一项突出能力是在单次打印阶段制造多材料部件 [4]。如今，这一工艺已扩展至晶格制造。需要指出的是，不同光聚合物之间的牢固界面，是通过将次级材料的颗粒引入基础材料中形成的。因此，所得力学性能呈现平滑过渡 [113]。由此，具有增强性能的多功能架构材料结构日益增多，正如以下小节所述。

3.4.1. 刚性晶格增强复合材料

提出了采用不同刚性材料组分增强软相的概念。这一概念受多种新型复合材料设计的启发，这些设计通过材料喷射（MJ）制造而成 [114–118]。橡胶状柔顺基体已由多种刚性聚合物晶格增强。具体而言，采用 IWP-P 曲面类型的三周期极小曲面（作为互穿相） [69, 119], 手性和内凹负泊松比蜂窝 [120] （如图8(A)所示）、Hexaround 和 Warmuth [121]。将软填充结构结合到玻璃态晶格中，与未增强的对应结构相比，可使致密化延迟发生。因此，预计能量吸收效率会更高，同时还能改善力学性能，例如提高杨氏模量或峰值应力。观察到多材料构件之间具有非常牢固的界面结合 [69]。

3.4.2. 具有不同刚度组分的晶格

刚性和柔性单元的组合为获得具有改进且可调机械性能的晶格提供了更多可能。除了几何参数的变化外，刚性相与橡胶相沿晶格构件的分布还可调节弹性模量和泊松比 [123–125], , 或控制失稳和屈曲模态 [122], , 如图8（B）所示。事实上，

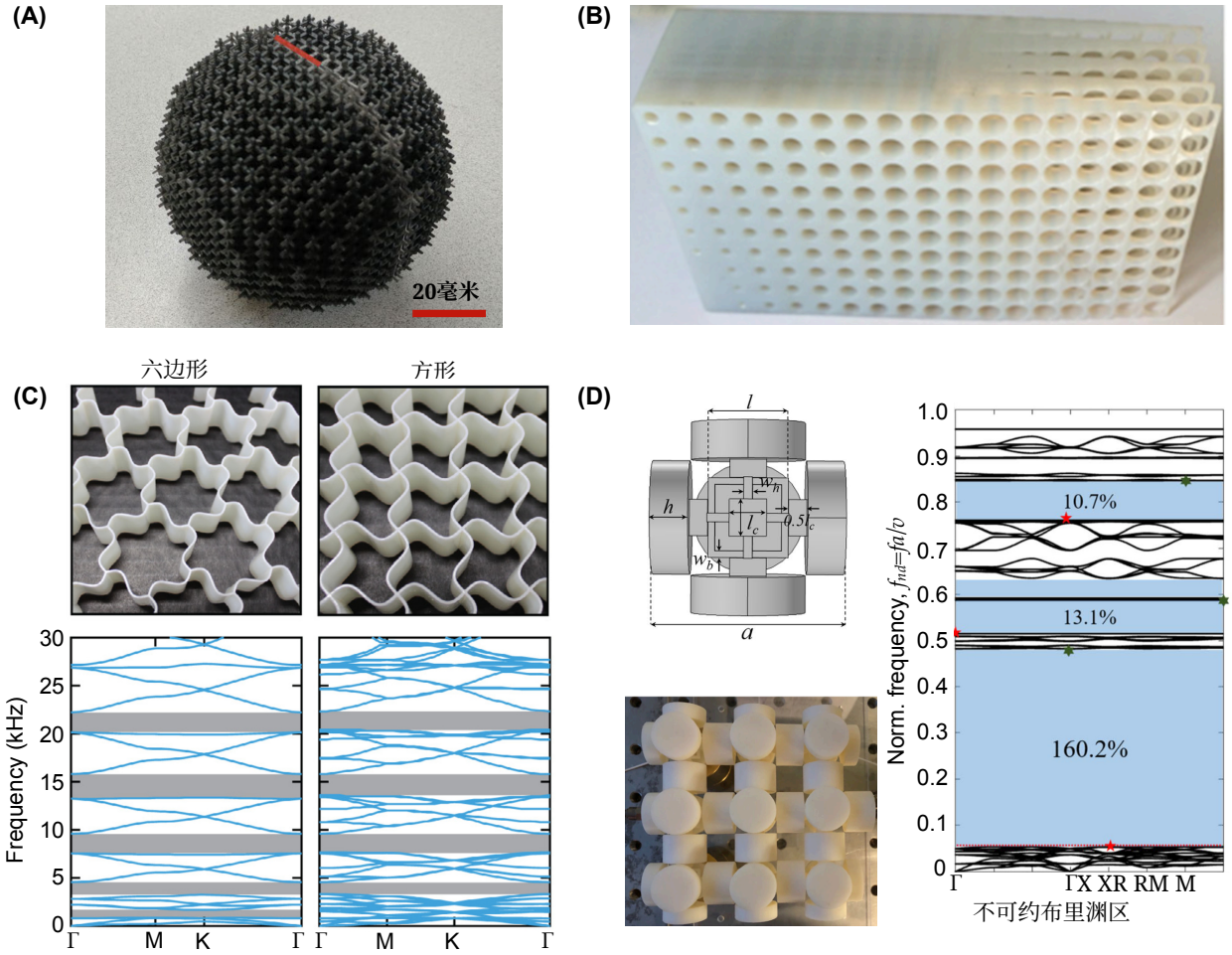

图 7: （A）用于 40千赫空气超声超材料的伦伯格透镜样品。经 [107] 知识共享署名 4.0 国际许可协议许可转载。（B）波束偏转介电透镜原型。经 [108]许可转载。版权所有 © IOP Publishing。（C）弯曲连接杆晶格拓扑结构样品及其对应的色散谱，其中灰色区域表示获得的带隙。经 [109]许可转载。版权所有 © 2017年 Elsevier。（D）晶胞示意图（方形内核）和晶格样品，以及相应的能带谱和达到的带隙。经 [110] 知识共享署名 4.0 国际许可协议许可转载

相较于软相，硬相比例的增加往往会提高承载能力。刚性材料构件与柔顺铰链的组合能够实现恒定的零能模态，而无需使用外部致动器。具体而言，通过控制接头的黏弹性，可获得两种选择性致动模式，其刚度会随应变率的增加而增大。这一特性有利于在一定应变范围（$0.3 \lesssim \epsilon \lesssim 0.45$）内控制泊松比。因此，在缓慢和快速压缩速率下，分别观察到了负值和正值 [125]。此外，受霍伯曼球® [126]启发的结构实现了多种可调的宽带隙。加入刚性或柔性的中间杆可实现可变刚度，从而调节带隙的大小 [127]。此外，类似的多材料晶胞可能表现出可变的热膨胀系数（CTE），其取决于前述晶格单元之间在几何形状、杨氏模量和CTE方面的差异 [128]。

3.4.3. 功能梯度与主动晶格

非均匀变形是通过增加较硬材料相对于柔性材料的占比而在力学超材料中产生的。因此，会产生更高的弹性模量和应力集中。另一方面，负泊松比特性等性质得以实现 [132]。因此，功能梯度材料或无角结构可用于控制高局部应力分布的影响，从而保持结构完整性，同时不限制柔韧性 [132]。例如，如图9（A）所示，具有可变硬质外壳和软芯的 Schoen 旋转极小曲面梯度晶胞遵循了这一标准 [129]。此外，由柔性外部包覆层和刚性内核组成的圆柱形优化支杆被扩展应用于 Voronoi 晶格。在这种情况下，与单一材料支杆晶格相比，吸能能力提高了最多 38 倍，但避免了刚度和强度的降低 [133]。双材料和/或梯度材料负泊松比晶格的概念也得到了应用 [131, 134, 135]。通过改变刚性材料梯度，可以调节等效杨氏模量和负泊松比

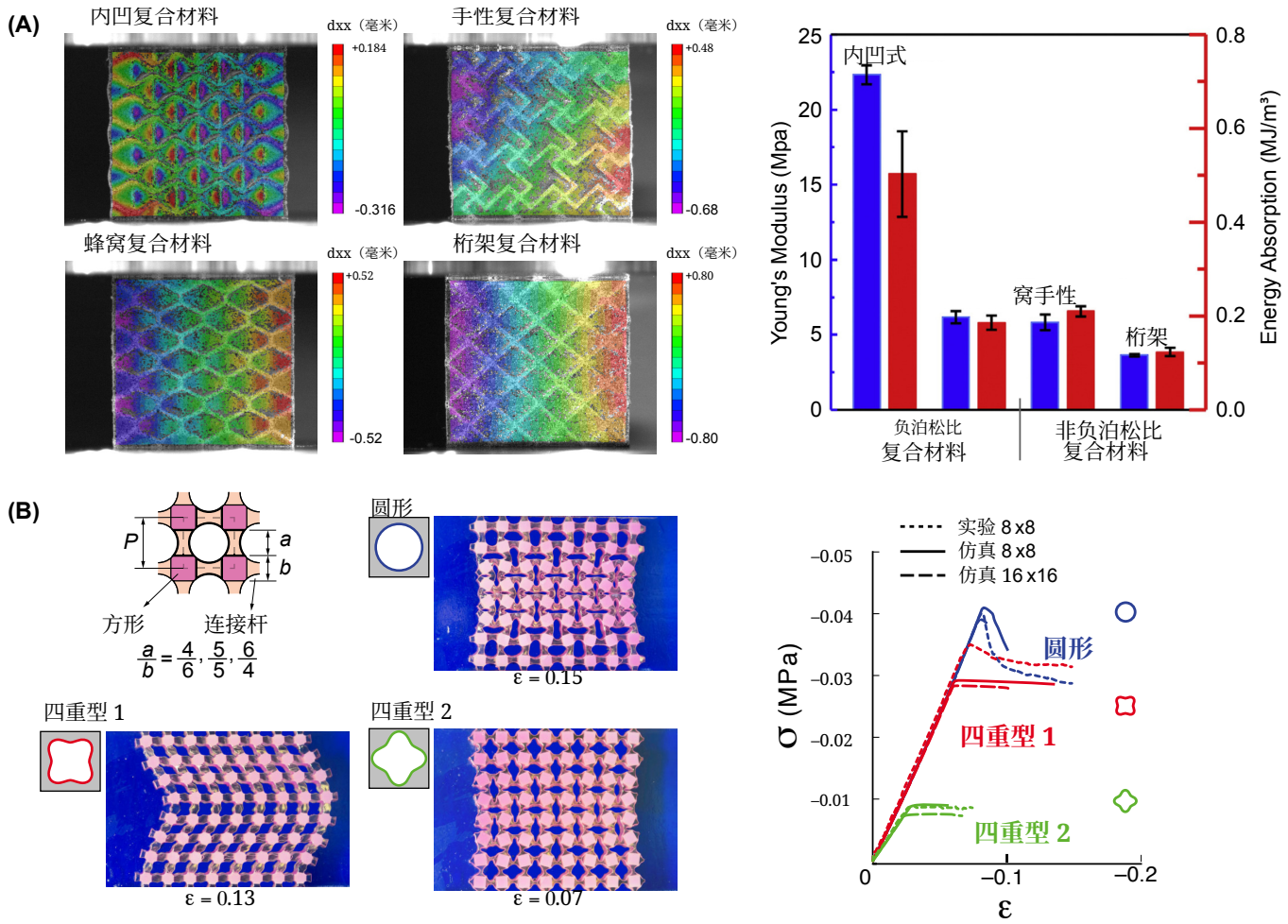

图 8：（A） $\epsilon = 0.05$ 增强复合材料（由软基体与刚性负泊松比晶格和非负泊松比晶格增强而成）的位移等值线，通过数字图像相关显示，并对其各自的力学性能进行比较。经 [120]许可转载。版权所有 2018年 Elsevier。（B）晶胞多材料构型，以及圆形和四重镶嵌中采用软连接杆时的失稳模式示例，并给出所获得的应力-应变曲线。经 [122]许可转载。版权所有 2018年 美国物理学会。

根据加载条件沿晶格杆件分布材料（例如，具有柔性接头和刚性连接杆的晶胞）。此外，通过组合在外部刺激下具有不同响应的材料，可以制造三维打印主动结构。高温引起的刚度变化，使得能够设计出经过编程以达到目标状态的变形梯度结构 [130]，，如图9（B）所示。同样，通过调节晶格几何形状，并结合使用具有不同热膨胀系数的光聚合物，实现了热膨胀系数（CTE）可调的反手性晶格系数。热膨胀以及负泊松比特性均不依赖于尺度。因此，它们可以从宏观尺度扩展到纳米尺度 [136]。受梯度晶格启发的实际应用开发已应用于服装领域。例如，通过径向梯度负泊松比图案（RNP）开发了防护铰接臂这一概念，该图案结合了负泊松比和正泊松比 [131]。当肘部弯曲时，它们可防止褶皱和横向位移（图9（C）左），这与其他图案中观察到的情况相反（例如图中的六边形图案9（C）右）。

4. 挑战、优势和局限性

材料喷射可使用具有不同力学性能的光聚合物，并为制造具有多种性能的架构晶格材料铺平了道路，其性能范围从高强度到形状变形结构，如附录E、表5所总结。随后各节将介绍材料喷射晶格制造所面临的主要挑战、未来工作和局限性的综合概述。首先讨论打印、建模和实验过程，然后概述当前成果及未来应用的潜力。

*4.1. MJ*架构晶格：打印工艺与实验工作挑战

增材制造工艺会导致3D打印晶格出现缺陷、瑕疵和各向异性。因此，数值模型的预测往往与最终物体表现出的力学性能不同。尤其是在评估杨氏模量或抗拉强度时。采用包含材料喷射制造的模型进行分析的晶格为数不多

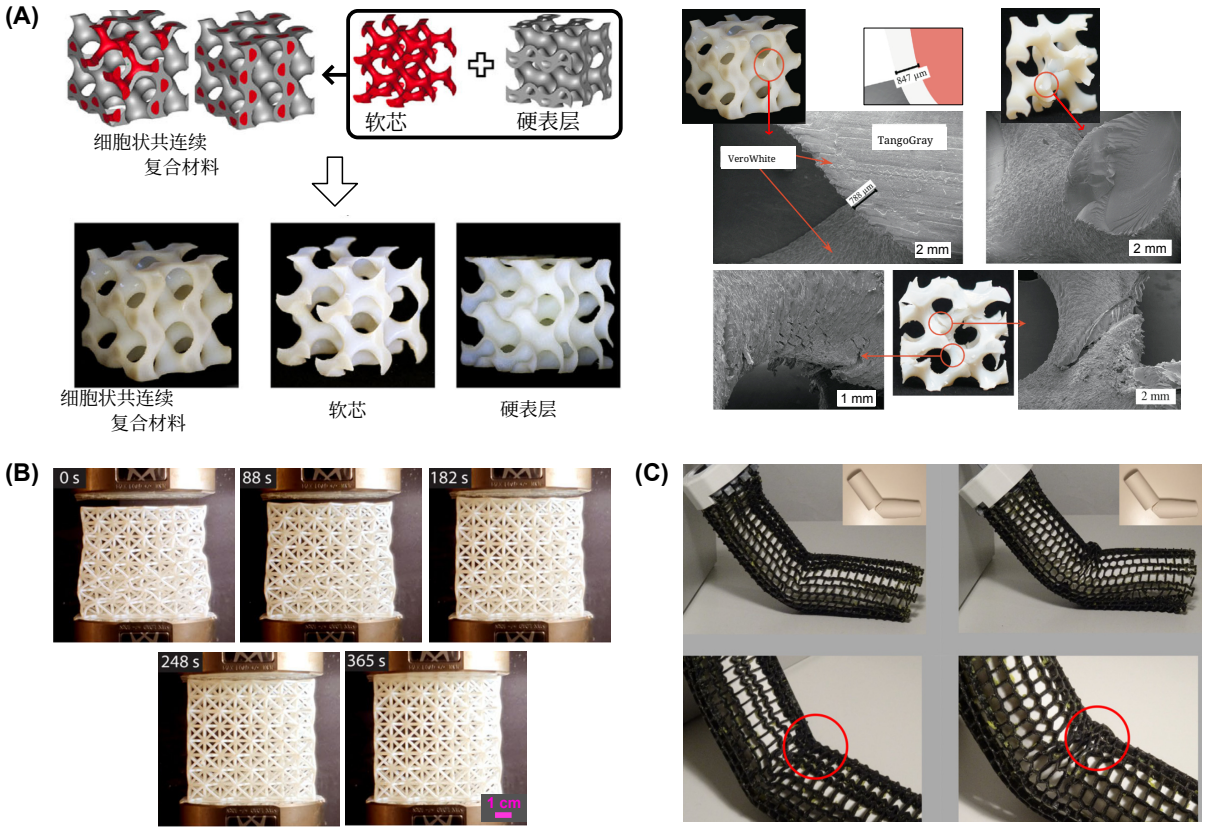

图 9：（A）由粘结的软硬材料子结构制成的梯度胞状三周期极小曲面的构型。经 [129]许可转载。版权所有 2017年 WILEY-VCH Verlag GmbH。（B）由于温度升高，梯度结构发生变形形状恢复。经 [130] 知识共享署名 4.0 国际许可协议许可转载。（C）应用于铰接臂外骨骼服的、结合负泊松比和正泊松比的3D打印径向单元格梯度分布（左侧），以及与六边形图案的对比（右侧）。经 [131]许可转载。版权所有 AIP Publishing。

约束，例如横观各向同性超弹性模型中的打印方向效应 [75]。不过，建议将这一方法扩展至剪切和/或双轴实验，并纳入单轴测试的结果。紫外线照射时间和强度的影响，以及后固化阶段，都是需要考虑并深入分析的关键因素。因此，可采用整体性的设计方法，更真实地描述晶格的力学性能。晶格单元的打印质量和尺寸精度对打印机部件的清洁状况非常敏感。要获得精确的打印部件，必须执行维护工作。在操作相应打印机之前和之后，都必须清洁打印头，以避免喷嘴堵塞。因此，确保树脂顺畅流动、减少表面粗糙度以及物体上的凹陷，有望避免打印表面不均匀。同样，必须清除灯罩玻璃上的树脂残留物，因为它们会阻碍紫外光通过。这样一来，固化过程就会受到影响：固化往往无法沿沉积层均匀进行，并会导致预期晶格几何形状出现缺陷。现有的大多数材料喷射晶格主要采用玻璃态光聚合物（例如 VeroWhite）制造，并通过拉伸、压缩和弯曲强度测试进行表征。尽管树脂的黏弹性行为增加了实验的复杂性 [70]，同样的流程仍可扩展用于探索其力学其他可用光聚合物（例如软质和刚性质复合材料/数字材料）以及新兴环保光固化树脂 [29–31] 的性能。后者代表了一种潜在替代方案，但需要开展材料表征研究，以同时确保3D打印部件具备高性能和可持续性。此外，还必须更深入地研究晶格杆件的疲劳寿命和老化效应，以及大应变变形、失效和非线性。这些方面仍然具有挑战性，尤其是对于橡胶基部件。因此，可以建立详细的本构模型，以更准确地描述3D打印软质超结构的性能，并准确评估其使用寿命。本综述中相当数量的架构晶格在实验和数值模拟阶段均已在准静态载荷下进行了评估。冲击或波传播测试等动态测试仍处于有待进一步探索的领域。尽管与梯度材料和多材料相关的初步研究及前沿工作日益增多，但目前已取得的实验结果仍需要通过数值或解析方法进行补充验证。事实上，还需要对多材料部件界面开展更广泛的评估，并将其纳入设计与失效考量之中。由此，便有可能为多个工程领域制造出具有卓越性能的新型复合材料和多材料晶格，以及更

受控损坏。

*4.2. MJ*架构晶格：制造限制

在设计阶段，需要考虑一些会影响高质量模式架构晶格结构的制造约束。以下介绍了与几何形状和成本估算局限性相关的评估。

4.2.1. 几何限制

打印机制造商指南建议，不要将壁厚小于0.5毫米的承载构件视为 [137] 或0.6毫米 [138] ，因为这些构件在后处理中可能较为脆弱并存在损坏风险。我们使用 PolyJet 技术（Stratasys J750打印机）通过玻璃态光聚合物打印了不同样品，以确定作为MJ架构晶格结构组成部分的承载杆件和悬空杆件的极限厚度值。我们制造了立方点阵（10毫米×10毫米×10毫米），其杆件直径分别为0.5毫米、0.75毫米和1毫米。所选基材和支撑材料分别为VeroBlack（刚性光聚合物）和SUP706B，并考察了不同等级的网格密度支撑（轻度、标准和高密度）。采用高密度网格支撑打印的结构如图不同等级所示（轻度、标准和高密度）。采用高密度网格支撑打印的结构如图10（A）、（B）和（C）所示，杆件直径分别为0.5毫米、0.75毫米和1毫米。尽管使用了最强的支撑网格（高密度等级），厚度小于1毫米的极薄壁悬空（水平）杆件仍倾向于在喷射过程中发生弯曲，因为材料量不足以为后续层形成坚固的基底，且形成的结合较弱。随后，在紫外光固化的硬化阶段，所得几何形状出现变形。因此，最终打印的杆件存在缺陷。还观察到，厚度为0.5毫米的杆件变得脆弱，在支撑去除操作中容易断裂。此外，我们还对打印的网格进行了轴向测试。对于直径为0.5毫米和0.75毫米的杆件，归因于上述制造缺陷的瑕疵加速了杆件的失效。因此，1毫米的直径能够提供足够的安全裕度，以保持MJ晶格几何形状并防止缺陷，尤其是对于水平排列的杆件，如图10 （C）所示。

4.2.2. 成本分析

较高的制造成本是限制材料喷射相较于其他技术在增材制造市场中应用的一个因素。这一情况也延伸到了晶格制造。除原材料和能源消耗费用外，还有其他因素会增加材料喷射打印零件的最终成本。因此，采用材料喷射技术制造3D 打印晶格的总成本（*TC*）估算也包括根据其制造所需打印时间计算的直接成本和间接成本，可通过以下公式计算：$TC = I_{cost} + L_{cost} + \omega \cdot (M \cdot M_{cost}) + (E_{total} \cdot E_{cost})$ [139]。其中，I_{cost} 指间接成本（例如设备折旧），L_{cost} 是估算的人工成本，M 是所用的数量材料及其相应成本 M_{cost}，ω 是一个用于考虑滚筒在每次经过后为使沉积层均匀而积累的废料的因素 [139], E_{total} 是工艺过程中消耗的能量，其价格为 E_{cost}。本案例研究的目标几何体为：（i）一个八面体桁架单元胞；（ii）由八面体单胞构成的相应三维 4x4x4 镶嵌结构。参考图10（D）和（E）所示的几何参数，八面体单元胞的尺寸为 W =30 mm、L = 30 mm 和 H = 30 mm，杆件直径为 d_l =4.0 mm，节点直径为 d_n =8.0 mm，节点-晶格杆连接处半径为 r_j =3.1 mm。成本估算和打印时间见表2。成本估算的更多细节见附录 C。材料喷射打印所使用的材料分别为 VeroYellow RGD-836 和 SUP-706B，用于模型和支撑结构。材料和能量成本评估分别依据意大利市场2021年末的报价和2022年3月的能源价格进行。为评估以尽可能高的分辨率制造晶格，所考虑的打印模式为高混合（层高为=27 微米）和高质量模式（层高为=14 微米）。此外，还应用了两种可用的表面处理选项：光泽和哑光。此外，我们还估算了采用增材制造市场中更广泛使用且更经济的技术（如熔融沉积成型）制造相同样品时的成本和打印时间。因此，可以将使用 Stratasys J750 PolyJet打印机获得的打印成本，与使用更便宜的熔融沉积成型 3 D打印机 Prusa i3 MK3S 打印相同结构时的预期成本进行比较。基于这一原因，案例研究几何体的设定尺寸是根据两种技术的制造可行性选定的。对于熔融沉积成型工艺而言，无法在尺寸较小的精细结构（如八面体晶胞）中实现令人满意的分辨率。在熔融沉积成型成本评估中，所使用的材料为 Prusament PC Blend Jet Black（直径为=1.75 mm 的丝材）和可溶性支撑材料 Verbatim BVOH，且未考虑废料系数 ω。打印模式为超精细（UD）和质量模式，层高分别为 0.05 mm 和 0.15 mm。在两种打印工艺中，均未考虑额外的后处理成本（例如清洁设备、碱性溶液）。目的是仅获取归因于模型和支撑材料以及机器的原始成本，包括能量消耗和按时间计算的折旧。同样，人工成本 L_{cost} 未计入表2所示的总成本（TC）估算中。该参数具有主观性，并且无论制造一个单元胞还是相应的镶嵌结构，或采用何种打印技术，均保持不变。因此，如需进一步估算，可根据技术人员的时薪（例如按 S_{hour} = 15 $/小时计算）以及用于打印作业的近似时间比例 t_{op} = 1 小时（如附录 C 所示），将 L_{cost} value 添加到 TC 中。此外，材料喷射与熔融沉积成型工艺之间的总成本差异非常显著。例如，对于 4x4x4 八面体晶格案例，材料喷射的成本为 MJ= 3.67 $/cm^3 （高混合光泽面），而熔融沉积成型为 FDM= 0.25 $/cm^3（单向层）。这一事实与预期的打印

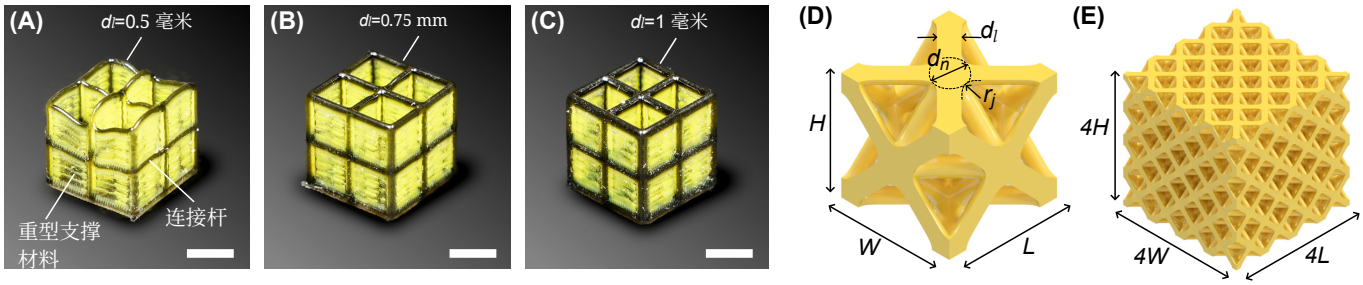

图10：MJ打印晶格结构的厚度限制。采用Stratasys J750，通过高密度网格支撑制造的打印立方晶格（10x10x10毫米），其杆件直径分别为（A）0.5毫米、（B）0.75毫米和（D）1毫米。厚度小于1毫米的超薄壁悬浮（水平）杆件在喷射过程中容易弯曲。比例尺：5毫米。（D）八面体桁架单元胞，以及（E）用于打印成本分析的相应三维4x4x4八面体单胞镶嵌。所考虑的几何参数为W =30 毫米、L = 30 毫米和H = 30 毫米，杆件直径d_l =4.0毫米，节点直径d_n =8.0毫米，以及节点-晶格杆连接处半径r_j =3.1毫米。

分辨率（以层厚表示）（材料喷射=14-27 微米，而熔融沉积成型为=0.05-0.15 mm），以及更短的制造时间有关，后者几乎达到了六到十倍的差异（材料喷射为=25.92–48.65 小时，而熔融沉积成型为=123.12–290.93 小时）。与打印单个孤立零件相比，材料喷射通过像晶格案例一样批量打印物体，能够显著提高成本效益，成本差异接近三倍。例如，在高混合光泽打印模式下，4x4x4 八面体晶格的估算成本约为 3.67 $/cm^3 ，而八面体单元胞的成本为 9.46 $/cm^3 ，如表2所示。同样，在满负荷打印时，可以观察到材料喷射的成本进一步降低。例如，16x12x4 八面体晶格几乎可以占据 Stratasys J750 材料喷射打印机成型托盘的 100%（490x390 mm）。在这种情况下，考虑高混合TC）的估算总成本（，高质量模式下，成本为2.60-2.87 $/cm^3，，这几乎比观察到的较小4x4x4八面体晶格成本低30-40%，后者约为 3.67-4.80 $/cm^3。沿托盘纵向放置的物体越多，打印头在单次水平扫描中完成制造的速度就越快。因此，可以优化总成本。

*4.3. MJ*架构晶格：成果与潜力

关于架构晶格材料的研究工作日益增多，从改进传统多孔材料，到探索优化方法，研究范围不断扩展。然而，始终致力于通过减小晶格的长度尺度来实现高延展性，从而填补阿什比

		打印模式	打印 time （小时）	模型材料 (g)	支撑材料 (g)	材料 cost ($)	能量 (MJ)	能量 cost ($)	间接 cost ($)	总计 Cost ($)	总计 Cost ($/cm^3)
Octet cell	**MJ**	多品种小批量光泽面	2.02	54	33	20.93	3.97	0.27	13.33	50.44	9.46
		多品种小批量哑光面	2.02	57	48	23.60	3.97	0.27	13.33	55.13	10.34
		高品质光泽表面	3.62	95	45	35.33	7.04	0.48	23.90	86.57	16.23
		高品质哑光表面	3.62	98	59	37.88	7.04	0.48	23.90	91.06	17.08
	FDM	0.05 mm 单向层	5.88	6.70	5.53	1.22	2.12	0.15	0.15	1.51	0.28
		0.15 mm 层	2.30	6.70	5.17	1.16	0.83	0.06	0.06	1.28	0.24
Octet lattice	**MJ**	多品种小批量光泽面	25.92	1372	1542	612.21	49.84	3.43	171.28	1252.19	3.67
		多品种小批量哑光面	27.77	1518	2005	711.51	53.39	3.67	183.51	1439.44	4.22
		高品质光泽表面	45.32	1795	1642	758.06	87.07	5.99	299.50	1639.66	4.80
		高品质哑光表面	48.65	1961	2097	862.80	93.47	6.43	321.53	1846.49	5.41
	FDM	0.05 mm 单向层	290.93	424.87	299.88	69.30	104.74	7.20	7.28	83.78	0.25
		0.15 mm 层	123.12	421.31	285.21	66.79	44.32	3.05	3.08	72.92	0.21

表2：八面体桁架晶胞（30x30x30 mm，连接杆直径为4.0 mm）的总打印时间、材料、能量和成本估算，以及分别通过材料喷射和熔融沉积成型制造的相应三维4x4x4镶嵌结构。所有成本均以美元（$）计算，不含增值税。可在总成本（$L_{cost}$ = 15 $值中加入$TC$），以计入人工成本。计算详情请参见附录C 。

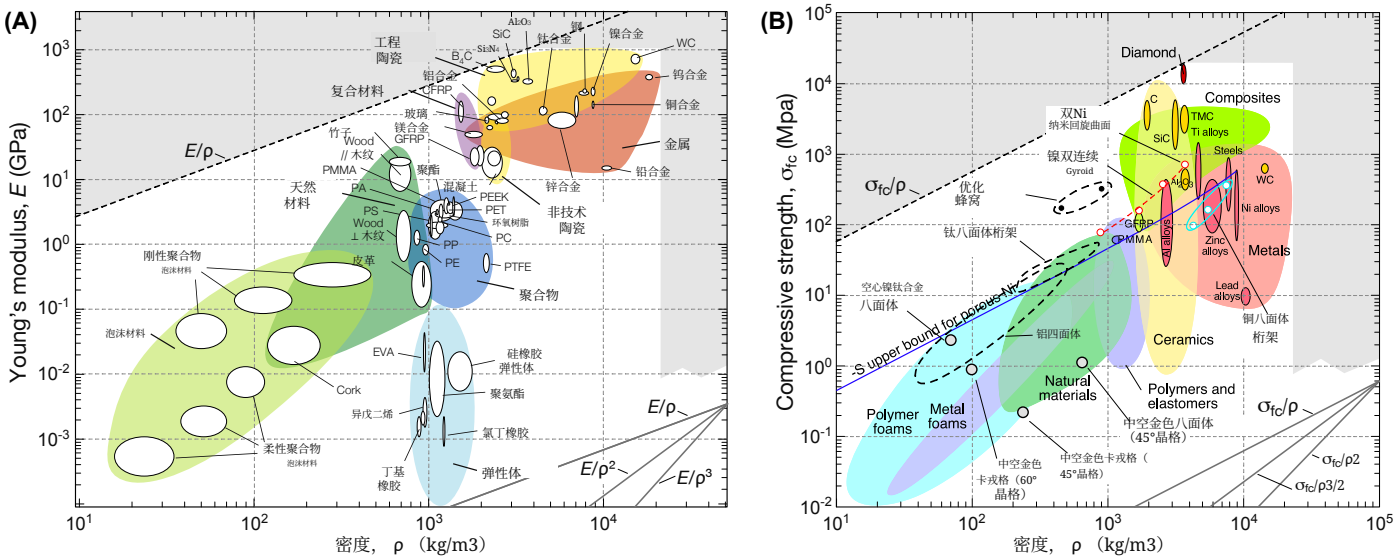

图 11：（A）在杨氏模量与密度关系图中绘制了材料开发和不可达空间区域。（使用 CES EduPack 2019、ANSYS Granta ©2020 Granta Design 创建图表）。（B）近期最强/最轻材料的强度与密度空间曲线，涵盖从纳米到微观尺度晶格的研究/ 。改编自 [140, 141]。子图中报告的理论上限分别由斜率为E/ρ 和σ^{fc}/ρ [142]的直线定义；这些直线与金刚石相切，而金刚石传统上被认为是刚度和强度最高的材料。

图表 [140, 141], 如图 11(A) 和 (B) 所示。图11(A) 和 (B) 中所示的理论上限分别由斜率为 E/ρ和 σ_{fc}/ρ [142] 的直线表示，这些直线与金刚石相切；金刚石传统上被视为刚度最高、强度最大的材料。当前的增材制造技术旨在通过制造介观尺度、微观尺度乃至纳米尺度的结构，或具有更高阶次的层级设计，来实现这一目标。得益于刚性和/或柔性光聚合物制品的高打印分辨率，材料喷射技术促成了大量可调、耐高载荷且轻质的结构，如本综述所述。研究还涵盖创新的层级材料 [77, 93] 以及应用于现实产品的实例，例如鞋底 [91] 或外骨骼服 [131]。为评估晶格力学性能，研究人员将实验研究获得的数据绘制在阿什比图上，并与 CES EduPack 2019、Granta Design [143]数据库中现有材料的数据进行比较。

如图12所示，插入了采用对数刻度绘制的杨氏模量或屈服强度与密度关系图。在本例中，图12（A）和（B）中报告的理论上限分别由斜率为E/ρ和σ_{fy}/ρ [142]的直线定义；这些直线与碳纳米管相切，而碳纳米管是现有刚度和强度最高的材料。在单材料晶格中，半板结构 [78],三周期极小曲面 [80, 86]，以及立方网格结构[88]，的多种构型，其刚度已达到接近金属泡沫和生物材料（例如松质骨）所表现出的水平。因此，它们是制造用于组织生长的支架的合适方案。与此同时，多材料三周期极小曲面 [69, 119]，或负泊松比增强复合材料 [120]，的性能已接近高性能弹性体。梯度三周期极小曲面晶格 [129]在更低密度下实现了接近泡沫材料的杨氏模量，如图12 （A）所示。还可以看出，材料喷射晶格获得了更高的弹性性能其密度低于相应的实体组分材料（例如 VeroWhite、Visijet），在某些情况下也低于非工程陶瓷组。除此之外，与相同密度下的现有金属泡沫和陶瓷泡沫相比，半板结构 [78]，具有径向梯度孔隙率的三周期极小曲面 [80] 以及立方网格结构 [88],等结构也表现出了更高的屈服强度值，如图 12（B）所示。这为利用该 3D打印技术继续开发晶格、提升传统泡沫材料的力学性能（甚至使用更轻的材料）提供了可能。因此，阿什比图中的一些空白区域有望得到填补。然而，要填补更多空白区域仍然是一项挑战，这需要在未来开展进一步研究。在前文讨论的多种材料喷射晶格中，能量吸收一直是其所实现的最具优势的力学性能之一。例如，定制蜂窝结构 [83] 或具有径向梯度孔隙率的三周期极小曲面 [80]所实现的单位质量比吸能（SEA）最高可达 S EA =30 J/g，接近钢管所呈现的 S EA = 30 J/g 至 60 J/g [146]范围。图 12（C）中基于 [144] 研究改编的图表，可用于比较所评述结构的 SEA 与一些架构材料所达到的数值。材料喷射晶格的 SEA 高于聚合物泡沫、金属泡沫和钢管。此外，还可根据 [145]研究工作，在阿什比图中突出显示多材料晶格所吸收的能量，如图 12（D）所示。三周期极小曲面 [69, 119]，梯度结构 [129, 133]，和卡扣式晶格 [76]所表现出的韧性（单位体积能量）与泡沫材料及部分陶瓷组别所达到的最高值相当。同样，已有报道的抗压强度数据也达到了胞状泡沫的最高水平。将刚性光聚合物与柔性材料结合使用，或将其作为软基体的增强体，可降低

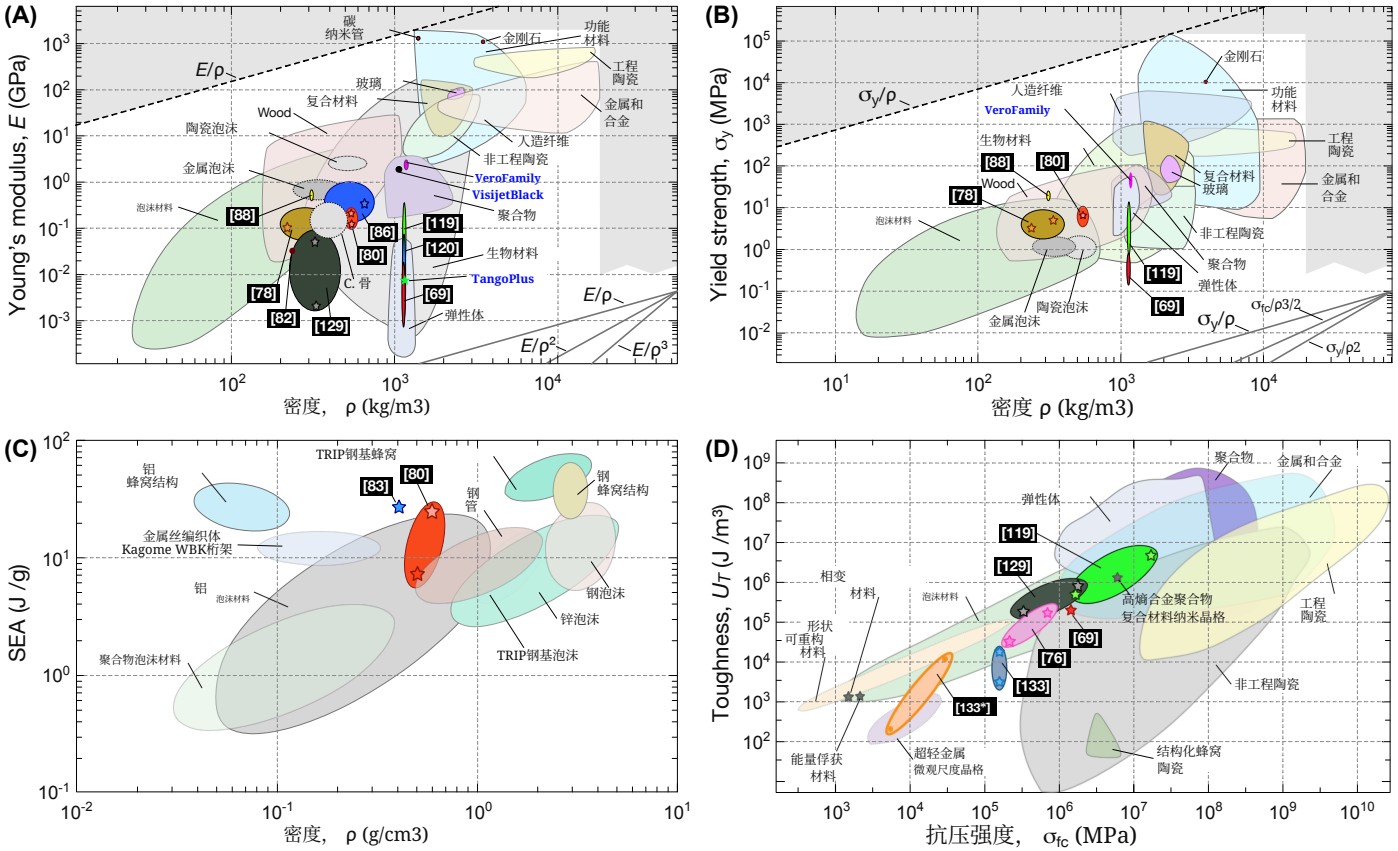

图12：阿什比图：（A）杨氏模量与密度的关系，（B）屈服强度与密度的关系，（C）比能量吸收（SEA）与密度的关系，以及（D）韧性与抗压强度的关系。所考虑的材料喷射晶格实验结果取自以下研究：具有径向梯度孔隙率的半板 [78], 三周期极小曲面[80], 立方网格结构 [88], IPL [82]。多材料三周期极小曲面 [119], 和 [69], 负泊松比增强软复合材料 [120], 梯度三周期极小曲面 [129], 定制蜂窝结构 [83] 以及具有径向梯度孔隙率的三周期极小曲面 [80], 梯度支杆 [133], [133]*（抗压强度取至失效），卡扣连接结构 [76]。其包络线的极限值以星号表示。（A）和（B）图使用 CES EduPack 2019、ANSYS Granta ©2020 Granta Design 创建。（C）图改编自 [144]。（D）图改编自 [133]和 [145]。子图（A）和（B）中所报告的理论上限分别由斜率为 E/ρ 和σ_{fy}/ρ [142]的直线定义；这些直线分别与碳纳米管、现有刚度最高和强度最高的材料相切。

发生脆性失效的可能性。橡胶材料能够在大应变下承受压缩载荷，并改善硬质对应材料所表现出的脆性行为。在超低频率下出现多个且宽的带隙 [110]等有前景的结果，为滤波或阻尼装置提供了令人振奋的替代方案。因此，振动控制和高冲击 3D 打印晶格或许可以开始进行设计与测试。然而，黏弹性介质（如材料喷射光聚合物）中的波传播仍需进一步分析。除此之外，形状可编程晶格为制造 4D打印材料提供了可能。所介绍的二维研究描述了如何利用热等外部刺激使玻璃态聚合物发生形变。这些实验和数值研究还可扩展至三维拓扑结构，而不仅限于广泛研究的二维负泊松比构型。可调泊松比是一些采用单一材料和梯度材料的相关研究所展现的另一项突出性能。具体而言，由柔性数字材料制成的三维晶格的泊松比范围为 0（拉伸状态）至 -0.4（压缩状态） [102],，而层级蜂窝结构[93]的范围为 1 至 -0.5。在管状结构中，观测到的泊松比为 -0.7 [101]。此外，负泊松比最高可达

多材料手性晶格（软质数字材料和刚性光聚合物元件）在应变为0.4时达到了-0.8 [124]。这些力学性能的提升为深入研究多材料和数字材料的潜在用途提供了更多选择，而不仅限于常用的玻璃态树脂。

5. 结论性评述

本综述分为两大部分。首先，介绍了与材料喷射技术相关的最重要特征。此外，基于现有实验研究，深入讨论了打印工艺参数对3D打印晶格力学性能的影响。尤其是，分析了由打印方向引起的各向异性所导致的抗拉强度差异。其次，概述了最新且研究最为广泛的采用材料喷射技术制造的3D打印架构晶格结构。根据单材料和多材料的使用情况，将其分为两大类。通过在阿什比图中比较材料喷射晶格与现有材料，对其所达到的力学性能进行了评估。由此，从杨氏

模量、屈服强度和密度值来看，其性能接近生物材料和高性能弹性体。类似地，研究还报告了接近泡沫材料所表现出的韧性范围。这些事实证实，生物医学和能量吸收应用是材料喷射晶格最成功实现的设计目标（附录E摘要，表5）。未来的研究可以从上述实验和数值结果中获得的成果出发，进一步尝试填补阿什比图中的现有空白，尤其是泡沫材料和生物材料附近的区域。形状可编程材料或振动控制装置是其他颇具前景、亟待进一步研究的目标。研究还分析了材料喷射技术在晶格制造方面的挑战和局限性。在固化阶段，紫外线强度对最终力学性能以及制造长期光聚合物晶格材料时老化效应的影响，都是需要开展更多实验研究的领域。此外，高昂的成本估算在很大程度上限制了材料喷射技术在增材制造市场中的应用。因此，与其他技术（例如熔融沉积成型、电子束熔化、选择性激光烧结、立体光刻）相比，涉及该技术的研究数量较少。尽管打印成本较高，材料喷射技术仍具有高分辨率、打印部件各向异性较低，以及结合不同材料以获得可变基于体素的力学性能的能力。此外，当材料喷射技术用于批量打印零件或以满托盘容量进行打印时，具有较高的成本效益。使用具有受控热响应和不同力学性能、且能够在单次打印中完成制造的材料，是材料喷射技术的另一项显著特征。这些优势为通过材料喷射技术使用多样化的光聚合物打印晶格、挖掘其潜力的新研究铺平了道路。同时，这也可能推动可固化树脂得到更广泛的应用，但不能忽视开发更可持续的替代品，例如新型生物树脂。

6. 资助

SM、NMP 和 DM 获得欧盟委员会 H2020FET Open（“Boheme”）项目第 863179 号资助，以及意大利教育、大学与研究部（MIUR）“卓越系所”项目 L. 232/2016 的资助。DM 衷心感谢 ERC-ADG-2021-101052956-BEYOND 提供的资金支持。

参考文献

[1] Statista，截至2018年7月全球最常用的三维打印技术* （2022）。[2] Stratasys，《赋能医疗创新》，Materials（2018）。[3] 3D Systems，概念建模、快速原型制造、间接制造 （2020）。[4] Stratasys，什么是 PolyJet技术? （2022）。[5] S. C. Daminabo、S. Goel、S. A. Grammatikos、H. Y. Nezhad、V. K. Thakur，基于熔融沉积成型的增材制造（三维打印）：聚合物材料体系的技术，《Materials today chemistry》16（2020）100248。[6] L. Gardner、P. Kyvelou、G. Herbert、C. Buchanan，世界首座金属3D打印桥梁的测试与初步验证，《Journal of constructional steel research》172（2020）106233。[7] S. Vogel，《弯曲胜于断裂》，Discover 16（5）（1995年）62–67。

[8] S. A. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O’Donoghue, C. Charitidis，增材制造：科学与技术挑战、市场应用及机遇，Materials Today 21 (1) (2018) 22–37。[9] M. Rafiee, R. D. Farahani, D. Therriault，多材料3D和4D打印：综述，《先进科学》7 (12) (2020) 1902307。[10] 3D Systems，MultiJet打印（2022）。[11] Statista，全球最常用的3D打印技术2021（2022）。[12] O. G¨ulcan, K. G¨unaydın, A. Tamer，材料喷射技术的最新进展——批判性综述，《聚合物》13 (16) (2021) 2829。[13] 3D Systems，MultiJet塑料打印机宣传册（2020）。[14] H. Quan, T. Zhang, H. Xu, S. Luo, J. Nie, X. Zhu，光固化3D打印技术及其挑战，《生物活性材料》5 (1) (2020) 110–115。[15] M. M. Zabti，光吸收剂对微立体光刻部件的影响，博士论文，伯明翰大学（2012）。[16] D. Blanco, P. Fernandez, A. Noriega，PolyJet制造部件松弛模量的非各向同性实验表征，《材料研究杂志》29 (17) (2014) 1876–1882。[17] P. Gay, D. Blanco, F. Pelayo, A. Noriega, P. Fern´andez，影响平面PolyJet制造部件力学性能的因素分析，《工程学学报》132 (2015) 70–77。[18] L. J. Tan, W. Zhu, K. Zhou，增材制造用聚合物材料的最新进展，《先进功能材料》30 (43) (2020) 2003062。[19]A. Wagner, I. Gouzman, N. Atar, E. Grossman, M. Pokrass, A. Fuchsbauer, L. Schranzhofer, C. Paulik，作为聚酰亚胺类墨水PolyJetTM 3D打印基础的双马来酰亚胺固化动力学，《应用高分子科学杂志》136 (12) (2019) 47244。[20] Stratasys，SUP706 / SUP706B支撑材料（2020）。[21] A. Nahum，PolyJet支撑材料：SUP705和SUP706B（2020）。[22] 3D Systems，部件后处理（2020）。[23] M. F. Ashby，泡沫材料和晶格的性质，《皇家学会哲学汇刊A辑：数学、物理与工程科学》364 (1838) (2006) 15–30。[24] Stratasys，材料数据表（2022）。[25] 3D Systems，多喷头塑料打印机Visijet® M3高级塑料（2017）。[26] A. B. Varotsis，材料喷射3D打印简介（2020）。[27] J. Edgar, S. Tint，增材制造技术：3D打印、快速原型制造和直接数字化制造，《庄信万丰技术评论》59 (3) (2015) 193–198。[28] P. Shapira, J. Youtie，下一次生产革命与技术扩散机构，《下一次生产革命：对政府和企业的影响》（2017）。[29] L. Pierau, C. Elian, J. Akimoto, Y. Ito, S. Caillol, D.-L. Versace，生物基单体和阳离子光聚合——迈向环保无毒材料的绿色组合，《高分子科学进展》127 (2022) 101517。[30] V. S. Voet, J. Guit, K. Loos，3D打印中的可持续光聚合物：关于生物基、可生物降解及可回收替代材料的综述，《大分子快速通讯》42 (3) (2021) 2000475。[31] I. Chiulan, E. B. Heggset, S. I. Voicu, G. Chinga-Carrasco，生物基聚合物的光聚合：生物医学工程视角，《生物大分子》22 (5) (2021) 1795–1814。[32] M. F. Ashby, L. J. Gibson，胞状固体：结构与性质，剑桥大学出版社，剑桥，英国（1997）175–231。[33]W. Tao, M. C. Leu，增材制造晶格结构的设计，载于：2016年国际柔性自动化研讨会（ISFA），IEEE，2016，pp. 325–332。[34] F. Tamburrino, S. Graziosi, M. Bordegoni，增材制造介观尺度点阵结构的设计过程：综述，《工程计算与信息科学杂志》18 (4) (2018)。[35] K. K. Saxena, R. Das, E. P. Calius，负泊松比材料：负泊松比材料研究三十年综述，《先进工程材料》18 (11) (2016) 1847–1870。[36] R. S. Lakes，负泊松比材料：负泊松比固体，Annual Review of Materials Research 47 (2017) 63–81。[37] H. M. Kolken, A. Zadpoor，负泊松比机械超材料，《RSC进展》7 (9) (2017) 5111–5129。

[38] Q. Wang, J. A. Jackson, Q. Ge, J. B. Hopkins, C. M. Spadaccini, N. X. Fang，具有可调负热膨胀特性的轻质力学超材料，Physical Review Letters 117 (17) (2016) 175901。[39] W. Wu, W. Hu, G. Qian, H. Liao, X. Xu, F. Berto，手性力学超材料的机械设计与多功能应用：综述，Materials & Design 180 (2019) 107950。[40] T.-C. Lim，基于互连交替双材料、具有面内正负热膨胀及热剪切特性的二维超材料，Materials Research Express 6 (11) (2019) 115804。[41] D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. Wiltshire，超材料与负折射率，Science 305 (5685) (2004) 788–792。[42] D. R. S. Willie J. Padilla, Dimitri N. Basov，负折射率超材料，Materials Today 9 (7) (2006) 28–35。[43] V. M. Shalaev，光学负折射率超材料，Nature Photonics 1 (2007) 47–48。[44] S. Zhang, Y.-S. Park, J. Li, X. Lu, W. Zhang, X. Zhang，手性超材料中的负折射率，Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 023901。[45] L. Valdevit, J. Bauer，三维微架构/纳米架构材料的制造，载于：利用双光子聚合进行三维微加工，Elsevier，2016，pp. 345–373。[46] Z. Jia, F. Liu, X. Jiang, L. Wang，面向极端性能、可编程性和多功能性的晶格超材料工程，《应用物理学杂志》127 (15) (2020) 150901。[47] L. Valdevit, K. Bertoldi, J. Guest, C. Spadaccini，架构材料：合成、表征、建模与优化设计（2018）。[48] A. Woesz, J. Stampfl, P. Fratzl，超越表观密度的胞状固体——力学性能的实验评估，《先进工程材料》6 (3) (2004) 134–138。[49] N. A. Fleck, V. S. Deshpande, M. F. Ashby，微架构材料：过去、现在与未来，Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 466 (2121) (2010) 2495–2516。[50] L. Ai, X.-L. Gao，具有负泊松比和非正热膨胀特性的超材料，Composite Structures 162 (2017) 70–84。[51] L. Ai, X.-L. Gao，具有负泊松比和非正热膨胀系数的三维超材料，International Journal of Mechanical Sciences 135 (2018) 101–113。[52] N. A. Fleck, X. Qiu，弹性脆性二维各向同性晶格的损伤容限，Journal of the Mechanics and Physics of Solids 55 (3) (2007) 562–588。[53] H. Fan, D. Fang, F. Jing，块状晶格桁架材料的屈服面与微观失效机制，Materials & Design 29 (10) (2008) 2038–2042。[54] V. Deshpande, M. Ashby, N. Fleck，泡沫拓扑结构：弯曲主导型与拉伸主导型架构，Acta Materialia 49 (6) (2001) 1035–1040。[55] A. Kudo, D. Misseroni, Y. Wei, F. Bosi，非细长八面体碳微晶格的压缩响应，Frontiers in Materials 6 (2019) 169。[56] R. S. Ambekar, B. Kushwaha, P. Sharma, F. Bosia, M. Fraldi, N. M. Pugno, C. S. Tiwary，具有优异力学强度的拓扑工程3D打印架构，Materials Today 48 (2021) 72–94。[57] M. W. Barclift, C. B. Williams，考察通过PolyJet直接3D打印制造的部件力学性能的变异性，载于：2012年国际固体自由成形制造研讨会，德克萨斯大学奥斯汀分校，2012。[58] J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr, Q. Chen, R. C. Advincula，3D打印聚合物的力学表征，Additive Manufacturing 20 (2018) 44–67。[59] D. Kazmer，塑料三维打印，载于：Applied Plastics Engineering Handbook，Elsevier，2017，pp. 617–634。[60] P. Maroti, P. Varga, H. Abraham, G. Falk, T. Zsebe, Z. Meiszterics, S. Mano, Z. Csernatony, S. Rendeki, M. Nyitrai，打印方向决定增材制造上肢假肢的各向异性力学性能，Materials Research Express 6 (3) (2018) 035403。[61] J. Bochnia, S. Blasiak，使用PolyJet技术逐层成形材料的力学性能各向异性，Engineering Mechanics 2016 (2016) 74–77。[62] E. Ulu、E. Korkmaz、K. Yay、O. Burak Ozdoganlar、L. Burak Kara，通过构建方向优化提升增材制造物体的结构性能，《机械设计学报》137 (11) (2015)。[63] M. K¨onigshofer、M. Stoiber、E. Unger、C. Grasl、F. Moscato，增材制造多材料部件的力学与尺寸研究，《物理学前沿》9 (2021) 128。[64] S. C. Das、R. Ranganathan、N. Murugan，构建方向对 PolyJet 3D打印部件强度和成本的影响，《快速成型技术学报》(2018)。[65] J. Mueller、S. E. Kim、K. Shea、C. Daraio，喷墨3D打印部件的拉伸性能：关键工艺参数及其高效分析，载于：《国际设计工程技术会议与计算机和信息工程会议》，第57045卷，美国机械工程师学会，2015年，第V01AT02A040页。[66] A. Caz´on、P. Morer、L. Matey，PolyJet技术在产品原型制作中的应用：抗拉强度与表面粗糙度特性，《机械工程师学会会刊》B辑：工程制造学报228 (12) (2014) 1664–1675。[67] P. F. Egan、I. Bauer、K. Shea、S. J. Ferguson，生物医学器械三维打印晶格的力学，《机械设计学报》141 (3) (2019)。[68] J. Mueller、K. Shea，3D打印晶格中的屈曲、构建方向与尺度效应，《今日材料通讯》17 (2018) 69–75。[69] A. S. Dalaq、D. W. Abueidda、R. K. A. Al-Rub，具有新型结构化三维实体薄片增强体的3D打印互穿相复合材料的力学性能，《复合材料A辑：应用科学与制造》84 (2016) 266–280。[70] I. Q. Vu、L. B. Bass、C. B. Williams、D. A. Dillard，表征打印方向对多材料喷射增材制造界面完整性的影响，《Additive Manufacturing》22 (2018) 447–461。[71] E. Salcedo、D. Baek、A. Berndt、J. E. Ryu，通过材料喷射仿真与验证三维功能梯度材料，《Additive Manufacturing》22 (2018) 351–359。[72] G. Berselli、R. Vertechy、M. Pellicciari、G. Vassura，增材制造工艺中橡胶状光聚合物的超弹性建模，《快速原型制造技术——原理与功能要求》(2011) 135–152。[73] Y. L. Tee、C. Peng、P. Pille、M. Leary、P. Tran，复合材料的PolyJet 3D打印：实验与建模方法，《Jom》72 (3) (2020) 1105–1117。[74] V. Slesarenko、S. Rudykh，迈向软数字材料的力学表征及其在多材料3D打印中的应用，《International Journal of Engineering Science》123 (2018) 62–72。[75] P. Zhang、A. C. To，适用于玻璃态聚合物的横向各向同性超弹黏塑性模型及其在增材制造光聚合物中的应用，《国际塑性学杂志》80 (2016) 56–74。[76] W. Liu、H. Song、C. Huang，最大化PolyJet制造3D晶格结构的力学性能并最小化支撑材料，《Additive Manufacturing》35 (2020) 101257。[77] Y. Chen、T. Li、Z. Jia、F. Scarpa、C.-W. Yao、L. Wang，具有大压缩变形下形状完整性的3D打印分级蜂窝结构，《Materials & Design》137 (2018) 226–234。[78] T. Li、F. Jarrar、R. A. Al-Rub、W. Cantwell，具有高刚度、高强度和高韧性的增材制造半板晶格材料，《国际固体与结构杂志》230 (2021) 111153。[79] K. Mohammadi、M. R. Movahhedy、I. Shishkovsky、R. Hedayati，通过增材制造技术制备的混合各向异性五模机械超材料，《Applied Physics Letters》117 (6) (2020) 061901。[80] M. Afshar、A. P. Anaraki、H. Montazerian，采用极小曲面构型化的径向梯度孔隙支架的压缩特性，《Materials Science and Engineering: C》92 (2018) 254–267。[81] Z. Zhang、F. Scarpa、B. A. Bednarcyk、Y. Chen，利用分形切割设计用于能量耗散的高强度点阵超材料，《Additive Manufacturing》46 (2021) 102126。[82] B. C. White、A. Garland、R. Alberdi、B. L. Boyce，具有增强机械功能的互穿晶格，《Additive Manufacturing》38 (2021) 101741。[83] S. Kumar、J. Ubaid、R. Abishera、A. Schiffer、V. Deshpande，借助增材制造实现的结构化蜂窝能量吸收特性可调

通过增材制造实现，《ACS Applied Materials & Interfaces》11 (45) (2019) 42549–42560。[84] C. Lancea、I. Campbell、L.-A. Chicos、S.-M. Zaharia，PolyJet技术制造的晶格结构的压缩行为，《Polymers》12 (12) (2020) 2767。[85] N. Sathishkumar、N. Vivekanandan、L. Balamurugan、N. Arunkumar、I. Ahamed，采用PolyJet打印制备的三周期极小曲面晶格的力学性能，《Materials Today: Proceedings》22 (2020) 2934–2940。[86] J. Kadkhodapour、H. Montazerian、S. Raeisi，利用仿真方法和实验流程研究内部构型对基于三周期极小曲面的支架塑性变形与失效的影响，《Materials Science and Engineering: C》43 (2014) 587–597。[87] K. M. Abate、A. Nazir、Y.-P. Yeh、J.-E. Chen、J.-Y. Jeng，用于生物医学应用的不同胞状结构力学性能的设计、优化与验证，《The International Journal of Advanced Manufacturing Technology》106 (3) (2020) 1253–1265。[88] A. S. Alaboodi、S. Sivasankaran，用于医疗应用的新型3D打印生物相容性聚碳酸酯支架力学行为的实验设计与研究，《Journal of Manufacturing Processes》35 (2018) 479–491。[89] M. C. Fernandes、J. Aizenberg、J. C. Weaver、K. Bertoldi，受深海玻璃海绵启发的高强度点阵，《Nature Materials》20 (2) (2021) 237–241。[90] S. Janbaz、F. Bobbert、M. Mirzaali、A. Zadpoor，超可编程的屈曲驱动软质胞状机构，《Materials Horizons》6 (6) (2019) 1138–1147。[91] O. Weeger、N. Boddeti、S.-K. Yeung、S. Kaijima、M. L. Dunn，面向软质点阵结构增材制造的数字化设计与非线性仿真，《Additive Manufacturing》25 (2019) 39–49。[92] R. Alberdi、R. Dingreville、J. Robbins、T. Walsh、B. C. White、B. Jared、B. L. Boyce，多形态点阵可实现更高的塑性吸能，《Materials & Design》194 (2020) 108883。[93] D. Mousanezhad、S. Babaee、H. Ebrahimi、R. Ghosh、A. S. Hamouda、K. Bertoldi、A. Vaziri，分级蜂窝负泊松比超材料，《Scientific Reports》5 (1) (2015) 1–8。[94] R. Guseinov、C. McMahan、J. P´erez、C. Daraio、B. Bickel，自驱动壳体的时序变形编程，《Nature Communications》11 (1) (2020) 1–7。[95] L. K. Johnson、C. Richburg、M. Lew、W. R. Ledoux、P. M. Aubin、E. Rombokas，用于模拟柔软生物材料的3D打印点阵微结构，《Bioinspiration & Biomimetics》14 (1) (2018) 016001。[96] M. Jamshidian、N. Boddeti、D. W. Rosen、O. Weeger，软质点阵超材料的多尺度建模：微观力学非线性屈曲分析、实验验证与宏观本构行为，《International Journal of Mechanical Sciences》188 (2020) 105956。[97] K. Bertoldi，利用失稳设计可调构型化胞状材料，《Annual Review of Materials Research》47 (1) (2017) 51–61。[98] A. Papadopoulou、J. Laucks、S. Tibbits，设计与建筑中的负泊松比材料，《Nature Reviews Materials》2 (12) (2017) 1–3。[99] M. Ashjari、S. Saadatm、S. Hashemi、A. Rasoulian，具有负泊松比的负泊松比材料，《Material Science & Engineering International Journal》1 (2) (2017)。[100] S. Cui、B. Gong、Q. Ding、Y. Sun、F. Ren、X. Liu、Q. Yan、H. Yang、X. Wang、B. Song，具有可调负泊松比、可增强能量吸收和抗损伤性的机械超材料泡沫，《Materials》11 (10) (2018) 1869。[101] H. Jiang、Z. Zhang、Y. Chen，具有设计力学性能的3D打印管状点阵超材料，《Applied Physics Letters》117 (1) (2020) 011906。[102] T. Li、X. Hu、Y. Chen、L. Wang，利用面外变形设计具有可调泊松比的三维构型化点阵超材料，《Scientific Reports》7 (1) (2017) 1–10。[103] Y. Chen、T. Li、F. Scarpa、L. Wang，力学性能可调泊松比的晶格超材料及其振动控制应用，《Physical Review Applied》7 (2) (2017) 024012。[104] D. Wang、H. Xu、J. Wang、C. Jiang、X. Zhu、Q. Ge、G. Gu，基于相位演化模型的3D打印可编程马蹄形点阵结构设计，《ACS Applied Materials & Interfaces》12 (19) (2020) 22146–22156。[105] M. Wagner、T. Chen、K. Shea，大变形4D负泊松比结构，《3D打印与增材制造》4 (3) (2017) 133–142。[106] L. Dong、C. Jiang、J. Wang、D. Wang，设计具有可调泊松比的形状可重构、高可伸展蜂窝晶格，《四维（4D）打印》（2021）。[107] Y. Xie、Y. Fu、Z. Jia、J. Li、C. Shen、Y. Xu、H. Chen、S. A. Cummer，利用超材料伦伯格透镜进行声学成像，《Scientific reports》8 (1) (2018) 1–6。[108] J. Yi、S. N. Burokur、G.-P. Piau、A. de Lustrac，基于3D打印宽带变换光学的全介质微波透镜，《Journal of Optics》18 (4) (2016) 044010。[109] Y. Chen、F. Qian、L. Zuo、F. Scarpa、L. Wang，具有正弦形杆件的晶格超材料中的宽带和多频带振动抑制，《Extreme Mechanics Letters》17 (2017) 24–32。[110] C. Lim 等，具有超宽低频三维带隙的声子超结构：宽带低频滤波器，《Scientific reports》11 (1) (2021) 1–11。[111] V. Peri、M. Serra-Garcia、R. Ilan、S. D. Huber，轴向场诱导声学外尔系统中的手性通道，《Nature Physics》15 (4) (2019) 357–361。[112] R. Vdovin、T. Tomilina、V. Smelov、M. Laktionova，将聚合喷射增材技术应用于声学超材料样品的开发与制造，《工程学学报》176 (2017) 595–599。[113] J. Mueller、D. Courty、M. Spielhofer、R. Spolenak、K. Shea，喷墨3D打印单材料和多材料部件的界面力学性能，《3D打印与增材制造》4 (4) (2017) 193–199。[114] G. X. Gu、M. Takaffoli、A. J. Hsieh、M. J. Buehler，用于提高抗冲击性的仿生增材制造聚合物复合材料，《Extreme Mechanics Letters》9 (2016) 317–323。[115] A. Zaheri、J. S. Fenner、B. P. Russell、D. Restrepo、M. Daly、D. Wang、C. Hayashi、M. A. Meyers、P. D. Zavattieri、H. D. Espinosa，通过增材制造和甲虫发育阶段分析揭示螺旋复合材料的力学机制，《《先进功能材料》》28 (33) (2018) 1803073。[116] Z. Jia、L. Wang，具有增强断裂韧性的仿生复合材料3D打印，《Acta Materialia》173 (2019) 61–73。[117] X. Yan、H. Chen、S. Lin、S. Xiao、Y. Yang，具有增强力学性能的仿生3D打印材料的最新进展，《Frontiers in Materials》8 (2021) 139。[118] T. Li、Y. Chen、L. Wang，通过3D打印增强架构化互穿相复合材料的断裂韧性，《Composites Science and Technology》167 (2018) 251–259。[119] O. Al-Ketan、M. A. Assad、R. K. A. Al-Rub，具有新型架构化微结构的周期性互穿相复合材料的力学性能，《Composite Structures》176 (2017) 9–19。[120] T. Li、Y. Chen、X. Hu、Y. Li、L. Wang，利用负泊松比设计具有增强力学性能的3D打印复合材料，《Materials & Design》142 (2018) 247–258。[121] F. Albertini、J. Dirrenberger、C. Sollogoub、T. Maconachie、M. Leary、A. Molotnikov，复合负泊松比晶格结构力学性能的实验与计算分析，《Additive Manufacturing》47 (2021) 102351。[122] S. Janbaz、M. McGuinness、A. A. Zadpoor，软机械超材料中的多材料失稳控制，《Physical Review Applied》9 (6) (2018) 064013。[123] M. Mirzaali、A. Caracciolo、H. Pahlavani、S. Janbaz、L. Vergani、A. Zadpoor，多材料3D打印机械超材料：通过硬相和软相的空间分布合理设计弹性性能，《Applied Physics Letters》113 (24) (2018) 241903。[124] Y. Jiang、Y. Li，具有手性单元和内凹核心的3D打印负泊松比机械超材料，《Scientific reports》8 (1) (2018) 1–11。[125] A. Bossart、D. M. Dykstra、J. Van der Laan、C. Coulais，具有多功能力学性能的少模态超材料，《Proceedings of the National Academy of Sciences》118 (21) (2021)。[126] C. Hoberman，可逆膨胀双曲率桁架结构，美国专利 4,942,700（1990年7月24日）。[127] Y. Li、S. Cao、Y. Shen、Y. Meng，低频下Hoberman球形超材料的声子带隙，《Materials & Design》181

(2019) 107935。[128] Y. Li、Y. Chen、T. Li、S. Cao、L. Wang，受Hoberman球启发的具有可调负热膨胀的晶格超材料，《Composite Structures》189 (2018) 586–597。[129] O. Al-Ketan、A. Soliman、A. M. AlQubaisi、R. K. Abu Al-Rub，仿生轻质胞状共连续复合材料：具有架构化周期性螺旋曲面结构，《《先进工程材料》》20 (2) (2018) 1700549。[130] T. S. Lumpe、K. Shea，用于可逆形状变形的3D打印主动点阵结构的计算设计，《《材料研究杂志》》36 (18) (2021) 3642–3655。[131] R. Hedayati、A. G¨uven、S. Van Der Zwaag，采用增材制造制备的3D梯度负泊松比软体力学超材料，《Applied Physics Letters》118 (14) (2021) 141904。¨M. Mirzaali、H. Pahlavani、E. Yarali、A. Zadpoor，多材料机械超材料中的非仿射性，《Scientific reports》10 (1) (2020) 1–10。[132] J. Mueller、K. Shea，用于最大化晶格能量吸收的阶梯式梯度支杆，《Extreme Mechanics Letters》25 (2018) 7–15。[133] K. Wang、Y.-H. Chang、Y. Chen、C. Zhang、B. Wang，利用三维打印设计双材料负泊松比超材料，《Materials & Design》67 (2015) 159–164。[134] K. K. Saxena、R. Das、E. P. Calius，具有可调刚度的可3D打印多材料胞状负泊松比结构，arXiv预印本 arXiv:1707.04486 (2017)。[135] L. Wu、B. Li、J. Zhou，各向同性负热膨胀超材料，《ACS Applied Materials & Interfaces》8 (27) (2016) 17721–17727。[136] D Systems，《MultiJet打印最佳实践——使用壳体和填充材料进行设计》（2022）。[137] 3Stratasys，使用PolyJet进行面向增材制造的设计（2022）。[138] M. Baumers、R. Wildman、C. Tuck、P. Dickens、R. Hague，材料喷射式增材制造的构建时间、工艺能耗和成本建模，载于：《NIP与数字制造会议》，第2015卷，Society for Imaging Science and Technology，2015年，第311–316页。[139] N. Fleck、V. Deshpande，微结构材料的新视野，《Extreme Mechanical Letters》网络研讨会（2020）。[140] S. N. Khaderi、M. Scherer、C. Hall、U. Steiner、U. Ramamurty、N. Fleck、V. Deshpande，镍纳米双螺旋曲面点阵的压痕响应，《Extreme Mechanics Letters》10 (2017) 15–23。[141] M. F. Ashby，机械设计中的材料选择，载于：《机械设计中的材料选择》，第4卷，Elsevier，2011年。[142] Granta Design，CES EduPack 2019。[143] R. Eckner、C. Baumgart、L. Kr[144] uger，应变率、温度和增强体对CrMnNi钢强度与变形行为影响的研究，载于：《奥氏体相变诱发塑性/孪生诱发塑性钢和钢-氧化锆复合材料》，施普林格，2020年，第379–412页。[144] B. Haghpanah、L. Salari-Sharif、P. Pourrajab、J. Hopkins、L. Valdevit，多稳态形状可重构架构材料，《Advanced Materials》28 (36) (2016) 7915–7920。¨P. Mallick，聚合物基复合材料（PMCs）在汽车与交通运输应用中的失效，载于：《聚合物基复合材料的失效机制》，Elsevier，2012年，第368–392页。[145] Dassault Systemes，三维打印导论——增材工艺（2020）。[146] Stratasys，J850TM数字解剖打印机解决方案（2022）。[147] N. A. Meisel、C. B. Williams，面向增材制造的设计：多材料PolyJet 3D打印中关键制造考量的研究，载于：2014年国际固体自由成形制造研讨会，德克萨斯大学奥斯汀分校，2014年。[148] Stratasys，立体光刻与PolyJet的四大区别（2022）。[149] J. Bennett，测量增材制造中使用的商用光聚合物的紫外固化参数，《Additive Manufacturing》18 (2017) 203–212。[150] P. Jacobs，立体光刻及其他RP&M技术，Society of Manufacturing Engineers，纽约（1996）1–26。[151] R. Pandey，3D打印应用中的光聚合物（2014）。[152] M. Layani、X. Wang、S. Magdassi，通过光聚合开发用于3D打印的新型材料，《Advanced Materials》30 (41) (2018) 1706344。[153] A. Bagheri、J. Jin，3D打印中的光聚合，《ACS Applied

《聚合物材料》1 (4) (2019) 593–611。[156] Stratasys，《高温》（2022）。[157] 3D Systems，VisiJet M2S-HT250（多喷嘴打印）（2022）。[158] 3D Systems，ProJet MJP 5600 的 VisiJet 基础材料（2017）。[159] N. A. Meisel、D. A. Dillard、C. B. Williams，材料浓度和分布对通过多材料喷射成型制造的复合材料零件的影响，《快速成型技术学报》（2018）。[160] A. Khoshkhoo、A. L. Carrano、D. M. Blersch，构建方向和零件厚度对材料喷射工艺中尺寸畸变的影响，《快速成型技术学报》（2018）。[161] Y. L. Tee、P. Tran、M. Leary、P. Pille、M. Brandt，采用材料喷射成型进行聚合物复合材料的 3D 打印：力学与断口分析，Additive Manufacturing 36 (2020) 101558。[162] M. Sugavaneswaran、G. Arumaikkannu，增强型增材制造结构弹性模量的解析与实验研究，Materials & Design (1980-2015) 66 (2015) 29–36。[163] L. Bass、N. A. Meisel、C. B. Williams，多材料喷射成型零件材料性能中方向和老化效应变异性的探究，《快速成型技术学报》（2016）。[164] L. Safai、J. S. Cuellar、G. Smit、A. A. Zadpoor，3D打印聚合物疲劳行为综述，Additive manufacturing 28 (2019) 87–97。[165] Y. L. Yap、S. L. Sing、W. Y. Yeong，软体机器人学的 3D打印工艺和材料综述，《快速成型技术学报》（2020）。[166] J. P. Moore、C. B. Williams，3D打印弹性体材料的疲劳表征，载于：2012年国际固体自由成形制造研讨会，德克萨斯大学奥斯汀分校，2012年。[167] A. Pugalendhi、R. Ranganathan、M. Chandrasekaran，工艺参数对 VeroBlue材料力学性能的影响及其在 PolyJet技术中的优化选择，《国际先进制造技术杂志》108 (4) (2020) 1049–1059。[168] J. P. Moore、C. B. Williams，PolyJet材料喷射成型打印零件的疲劳性能，《快速成型技术学报》（2015）。[169] J. Suresh、G. Saravana Kumar、P. Ramu、J. Rengaswamy，增材制造的类丙烯酸聚合物喷射打印零件的疲劳寿命表征，载于：《结构完整性进展》，施普林格，2018年，第623–632页。[170] X. Zheng、H. Lee、T. H. Weisgraber、M. Shusteff、J. DeOtte、E. B. Duoss、J. D. Kuntz、M. M. Biener、Q. Ge、J. A. Jackson、等人，超轻、超刚力学超材料，Science 344 (6190) (2014) 1373–1377。[171] J. U. Surjadi、L. Gao、H. Du、X. Li、X. Xiong、N. X. Fang、Y. Lu，力学超材料及其工程应用，《先进工程材料》21 (3) (2019) 1800864。[172] C. H. P. Nguyen、Y. Kim、Y. Choi，功能梯度点阵结构的面向增材制造的设计：一种考虑工艺诱导各向异性的设计方法，《国际精密工程与制造—绿色技术杂志》8 (1) (2021) 29–45。[173] L. Boniotti、S. Foletti、S. Beretta、L. Patriarca，采用选择性激光熔化制造的微晶格结构中的应变和应力集中分析，《快速成型技术学报》（2019）。[174] X. Zhang、Y. Wang、B. Ding、X. Li，3D微/纳米点阵的设计、制造与力学性能，《Small》16 (15) (2020) 1902842。[175] Y. Li、B. S. Linke、H. Voet、B. Falk、R. Schmitt、M. Lam，成本、可持续性和表面粗糙度质量——采用个人3D打印机制成产品的综合分析，《CIRP制造科学与技术杂志》16 (2017) 1–11。[176] Prusa，Original Prusa i3 MK3S + 3D打印机（2022）。[177] Prusa，Prusament PC Blend Jet Black 970g（2022）。[178] Prusa，Verbatim BVOH可溶性支撑材料 500g（2022）。

附录 A 材料喷射补充说明

A.1 材料喷射技术

材料喷射（MJ）包括以下主要类别：按需滴落（*DOD*）、纳米颗粒喷射（*NPJ*）、*PolyJet*（*PJ*）*[147]*, *MultiJet*打印（*MJP*）。在本文中，我们重点介绍后两种涉及光聚合物的技术；这两种技术也是制造汽车、

航空航天和医疗部件时应用最广泛的技术。Polyjet® [4] 和MultiJet® [10] 相较于其他3D打印技术，在精度、均匀性和表面细节表现方面具有优势。目前的MJ 3D打印机可根据可用的打印模式，以高分辨率制造部件。例如，选择极高分辨率（XHD） [13]和高质量（HQ）模式 [148], 时，最小层高分别可达到13和14微米。此外，还可以选择打印速度几乎比上述模式快一倍的打印模式，例如高混合模式（层高为27微米） [148] 或高分辨率模式（层高为32微米） [13]。MJ工艺工作原理的示意图如图1（B）所示。在MJ工艺中，光聚合物液滴由多个喷嘴喷射并以微小体素的形式铺展、沉积到水平构建托盘上，其方式类似于喷墨打印机。沉积的材料会被紫外光瞬间固化。根据模型的尺寸、表面处理和精度要求，还会打印支撑材料网格，以便在逐层构建过程中填充悬垂结构、间隙和空隙，如图1（B）所示。在Polyjet中，可溶性凝胶支撑材料通过形成网格结构，打印在悬浮部件周围并对其进行支撑。支撑结构的强度由网格的密度以及支撑基体中是否包含刚性基材颗粒来控制。根据几何形状和所需支撑的材料，其强度可分为轻型、标准型和重型。带有倾斜表面的部件，如果其表面几乎垂直于构建托盘，或相对于构建托盘的倾角约大于72°，则无需使用支撑材料网格即可实现自支撑 [149]。通常使用水压或碱性溶液去除支撑结构，以处理难以触及的区域和脆弱模型。一般而言，使用2%的Na(OH)溶液经过一段较长时间（通常在清洗站中处理轻型支撑时少于4小时）后，支撑结构会完全熔化。使用碱性溶液时需要特别注意，因为它们可能对最终3D打印部件的力学性能产生不利影响。 [21]不过，建议将部件短暂浸泡在15%的甘油基溶液中（30—60秒），以冲洗掉残留溶液。MultiJet打印采用相同的光聚合过程 [18]。然而，其支撑材料由蜡构成，可通过加热去除。因此，可以使用对流烘箱（设定为65°C）或能够熔化蜡的蒸汽系统等设备。残留的细小蜡颗粒还可以通过超声波清洗设备进一步去除 [22]。支撑材料的使用会降低打印部件尺寸的精度。MJ技术和SLA采用相同的固化原理。二者的区别在于，后者在树脂池内部形成目标形状。随着构建托盘沿垂直轴向上移动，动态反射镜发出的紫外激光通过硬化光聚合物来构建所需图案。随着各层逐渐形成，物体会处于悬浮状态，因此还需要使用相同材料制成的额外支撑结构。由于存在多余树脂，最终部件不会完全硬化，还需要在紫外光源（例如烘箱）中进一步固化以将其去除。随后，可以通过手动方式移除支撑结构包括打磨在内的操作 [150]。紫外固化和后处理对材料喷射材料力学性能的影响十分显著，与立体光刻类似 [58]。决定光聚合的主要参数是引发该过程的临界能量（E_{cr}）和固化光的穿透深度（D_p） [151]。考虑到表面的光能（E_l），光聚合物固化后的厚度（h_c）等于 $h_c = (D\ln(EE))$ [152]。如果已知参数 E_{cr} 和 D_p ，就可以确定沿垂直轴逐步构建层所需的增量数量，以实现沉积和固化所需的最小厚度h_c ，并确定最佳紫外光特性（例如扫描速度和强度）。由此可确保较高的打印分辨率 [151]。此外，材料喷射打印机中光源（例如灯）的波长不受限制。因此，也可以选择基于混合光聚合（自由基和阳离子）的固化方式 [14]。材料喷射和立体光刻面临相似的光聚合挑战，例如确保快速且高效的固化速率，避免层内及层间的界面结合和硬化出现差异。光引发剂是树脂的重要组成部分，它们吸收紫外光能量，并将其转化为化学能。由此形成游离阳离子或自由基，它们会进一步分裂成更多粒子，与构成材料的单体和低聚物相互作用并形成键 [153]。光引发剂的性质根据紫外光源的波长和强度进行配制。通过优化这些性质，可以获得较高的打印分辨率 [154]。除了使用低黏度树脂外，人们还提出了使用可在较长波长紫外光照射下固化的光固化材料。这也有助于营造对健康危害较小的工作环境。此外，还可以提高相邻层之间的穿透深度，从而在构建过程中形成更牢固的结合 [155]。

A.2 材料喷射打印零件制造工艺对力学性能的影响

材料喷射最突出的特征之一，是能够同时打印具有不同物理和力学特性的多种材料，如表3所示。因此，材料喷射为获得多用途打印部件提供了可行方案，这些部件可以具有刚性或柔性、多色或半透明部件，以及耐热性能（例如，在约 0.45 MPa 下热变形温度为 67°C [156], 和 250°C [157] ）、生物相容性、铸造蜡和柔顺机构等特性（例如类似聚丙烯的光聚合物） [10,24]。此外，还可以通过将刚性光聚合物添加到柔软橡胶状树脂中，形成具有混合特性的复合材料，例如所谓的“数字材料”（*DM*）、“多材料复合物”（*MMC*）或“功能梯度材料”（*FGM*）。因此，它们提供了广泛的可探索性能，例如，相对于玻璃态或柔软的前述光聚合物，具有中等水平的刚度或柔韧性，以及不同等级的肖氏硬度标度（柔性材料为 A30 至 A95，玻璃态材料为 D70 至 D85），并且黏弹性会根据分布情况而变化。

	材料	抗拉强度（MPa）	断裂伸长率(%)	杨氏模量（MPa）	弯曲强度（MPa）	肖氏硬度 硬度（刻度）	密度（g/cm3）
Polyjet	*Agilus30-Black	2.4-3.1	220-270	-	-	30-35A	1.14
	Digital ABSplus	55-60	25-40	2600-3000	65-75	85-87D曲面	1.17
	Draft Gray	50-65	10-25	2000-3000	75-110	83-86D曲面	1.17
	Durus	20-30	40-50	1000-1200	30-40	74-78D曲面	1.15
	Rigur	40-65	20-35	1700-2100	52-59	80-84D曲面	1.20
	*TangoBlackPlus	0.8-1.5	170-220	-	-	26-28A	1.12
	Vero WhitePlus/Black/Magenta	50-65	10-25	2000-3000	75-110	83-86D曲面	1.17
	VeroBlue	50-60	15-25	2000-3000	60-70	83-86D	1.18
	VeroClear	50-65	10-25	2000-3000	75-110	83-86D	1.18
	VeroUltraClear	39-43	20-35	1400-2100	58-72	80-85D曲面	1.18
MultiJet	VisiJet CR-WT/ CR-CL	37-47	7-16	-	61-72	76-80D曲面	1.18
	VisiJet CR-BK	45-52	7-11	-	63-76	78-83D曲面	1.18
	*VisiJet CE-NT/BK	0.2-0.4	160-230	-	-	27-33A	1.12
	VisiJet M3-X White	49	8.3	2168	65	-	1.04
	VisiJet M3 Crystal	42.4	6.83	1463	49	-	1.02
	VisiJet M3 Black	35.2	19.7	1594	44.5	-	1.02
	VisiJet M3 Proplast	26.2	8.97	1108	26.6	-	1.02
	VisiJet M3 Navy	20.5	8	735	28.1	-	1.02
	VisiJet M3 Techplast	22.1	6.1	866	28.1	-	1.02
	VisiJet M3 Procast	32	12.3	1724	45	-	1.02

Tab常见 Polyjet [24] 和 MultiJet 打印基材的力学性能 [25, 158]。（* 类橡胶材料）

刚性颗粒与柔性颗粒的分布 [24, 25, 158, 159]。对于由 VeroWhite 等材料制成的刚性晶格，为提高强度或能量吸收值 [75]，建议选择压缩主导型晶格，而非弯曲主导型晶格。对 Polyjet 打印试样进行的材料表征实验，大多依据常用标准开展，例如用于拉伸测试的 ASTM D-638、用于弯曲测试的 ASTM D790，或用于邵氏硬度测试的 ASTM D2240。试样层相对于构建托盘的方向，会导致力学性能表现出各向异性。除构建方向外，支杆屈曲和打印晶格的尺度效应等参数，也会影响其最终力学性能 [68]。部件沿最长尺寸方向可能出现变形，但增加其厚度或许能够避免更大的变形 [160]。此外，在增强材料的体积分数达到 5% 之前，打印方向对 3D 打印复合材料的影响可能可以忽略不计 [161]。刚性颗粒的分布会影响试样的力学行为。那些垂直

从而能够承受更高的抗压能力。在抗拉强度方面，与打印头平行排列的部件获得了更高的数值。柔性颗粒可能导致所形成复合材料中裂纹的萌生 [70,73, 161–163]。此外，在玻璃态光聚合物样品中已初步观察到老化效应，其极限拉伸强度随时间增加，而断裂伸长率值降低 [163]。目前仍难以确定哪些工艺参数主要影响多材料喷射成型部件的疲劳行为 [164, 165]。表面缺陷、空洞以及剪切力的作用往往会降低弹性体和多材料界面的疲劳寿命 [166]。然而，表面处理类型也可能改善打印部件的疲劳寿命和力学强度。特别是，光面处理表面产生裂纹扩展诱因的不规则缺陷少于其哑光表面对应物 [66,167, 168]。此外，层的方向会影响打印部件内部的裂纹扩展。垂直于层方向形成的裂纹扩展速度较慢

，比平行形成的裂纹更慢 [169]。喷嘴堵塞往往会增加表面粗糙度。因此，预计应力集中会增加 [65]。较大的层厚意味着节省时间，并增强堆积基底之间的结合。尽管分辨率有所降低，但高速打印和30微米的厚度增强了层间结合，并减少了耗时（节省60.86%）；与高质量哑光模型（厚度为16微米）相比 [167]。

附录 B 3D 打印架构化晶格：常见制造工艺要点

*B.1 3D*打印技术

3D打印技术的最新发展使得制造复杂且性能更优的拓扑结构成为可能，其适用尺度范围广泛，涵盖纳米和微观结构，也包括宏观尺度的制造（例如长构件）。根据ASTM-ISO标准分类的现有增材制造技术采用不同的工艺、原材料类型和打印分辨率[8]，，如表3所示。微立体光刻是先驱技术之一，其分辨率可达微米级。例如，结构的打印分辨率可接近 5 微米 [170]。此外，在光聚合类技术中，用于打印微观尺度超材料的主要技术包括：自传播光聚合物波导（SPPW）、双光子光刻（TPL）、连续液体界面制造（CLIP） [171]。对于金属，SLS、SLM、EBM 和 DED 已得到广泛应用 [171, 172]。

B.2 晶格的制造效应

每种增材制造技术都会产生多种缺陷来源，从而影响最终打印部件的几何形状或力学性能。通常，在大多数打印工艺中需要考虑的最常见制造参数包括构建方向、层厚、填充图案、扫描角度、密度、温度、打印速度、喷嘴直径和支撑结构。对于槽式光聚合和材料喷射，还需额外考虑紫外固化参数。不同技术的后处理阶段各不相同，其中包括支撑去除，可通过手工、水射流处理或化学方法完成。最终打印部件上的几何缺陷是在增材制造工艺中产生的。由于应力和应变集中增加，瑕疵、较高程度的粗糙度或残余孔隙率往往会降低制造部件的力学性能 [173]。偏移节点、杆件波纹，甚至不完整结构（例如未打印的支杆）都是由增材制造工艺引起的微晶格结构中常见的瑕疵 [174]。打印方向会导致SLA微晶格中出现显著的节点体积以及支杆的细长比 [55]。各向异性性能的存在是增材制造过程的另一种后果，它由层的堆叠操作引起，并且会因技术而异。具体而言，FDM或SLS制造的部件具有较高程度的各向异性（分别为≈ 50%和10%。），而SLA（≈ 1%）和材料喷射（≈ 2%）的各向异性较低 [59]。尽管已有研究分析了材料挤出、SLM、EBM、SLA等广泛应用技术中的打印缺陷，但仍需进一步研究以建立准确的模型。这些关于光聚合技术的研究结果和所采用的方法，可能扩展应用于其他类似工艺，例如材料喷射。由此，可以更准确地估算打印部件的力学性能。

附录 C 通过材料喷射进行架构晶格的成本估算

本案例研究旨在评估通过材料喷射制造八面体桁架单元胞（30x30x30 mm，连接杆直径为4.0 mm，实际体积为5.33 cm^3）以及相应三维4x4x4晶格排列（实际体积为341.30 cm^3）的近似成本。计算所采用的货币为美元（$），且价格不含增值税。采用Polyjet打印机Stratasys J750，并通过配套的GrabCAD Print软件，根据待制造几何形状的体积、打印模式和表面处理类型，估算打印时间（t_{print}）。同样，也获得了模型材料和支撑材料的近似重量，如表2所示。参考材料价格取自2021年末的意大利市场报价。例如，VeroYellow RGD 836的价格为M_{cost} = 317.80 $/kg，SUP706B的价格为$M_{cost}$ = 114.30 $/kg。此外，还引入了材料损耗系数$\omega$=1.76 [139]，以计入每次打印头通过后可能积聚在刮平辊上的树脂。通常很难预测打印作业期间所使用的能量，并且其在最终市场成本中并不占主导地位 [28]。在使用Stratasys J750打印机进行成本估算时，打印阶段（准备阶段和构建过程）的总能源消耗E_{total} 按照表达式$E_{total} = E_{start} + (E_{process} \cdot t_{print})$计算。其中，与通电、预热和打印前阶段（$E_{start}$ = 0.10 MJ）以及打印工艺本身（$E_{process}$ = 533.1 J/s）相关的取值，基于同一Polyjet系列中类似前代打印机型号的参考数据（例如Objet Connex 260 [139]，Eden 260v [59]）。能源价格参考2022年3月的建议值（E_{price} = 0.0687$ /MJ）。建议的间接成本I_{cost}包括与Stratasys J750打印机相关的设备折旧，其表达式为$I_{cost} = (MC \div t_{dep} \cdot u_{annual}) \cdot t_{print}$ [175]。其中，估算的设备成本（MC）为MC = 264k$，参考2021年末的意大利市场报价。所考虑的折旧年限和年利用率分别为t_{dep} =8 年和u_{annual} = 57% [175]。人工成本（L_{cost}）可通过$L_{cost} = (S_{hour} \cdot t_{op})$计算。例如，根据特伦托大学技术人员的每小时工资（2022年的工资为S_{hour} = 15 $/hour）以及打印作业的近似时间比例$t_{op}$ = 1 hour。

因此，可以将 L_{cost} = 15 $ 加入表*TC*2中的总成本（），该总成本由所有案例（包括单个八面体单胞、晶格，以及材料喷射或熔融沉积成型两种打印工艺）的材料和设备原始价格构成。此外，通过采用相同的案例研究样本和评估标准，还提供了熔融沉积成型成本估算。所采用的参数如下：3D打印机为Prusa i3 MK3S，打印设置为普通模式下的超精细（UD）模式，层厚为0.05 mm，适用于层厚和质量模式：层厚为0.15 mm，平均工艺能耗为（$E_{process}$ =100 J/s），设备成本为MC = 999 $ [176]。试样制造的估算打印时间以及材料重量消耗，均由软件Prusa Slicer计算得出。所选丝材为Prusament PC Blend Jet Black（直径=1.75 mm），价格为M_{cost} = 51.11 $/kg [177]，；可溶性支撑材料Verbatim BVOH的价格为M_{cost} = 158.68 $/kg [178]。

附录D 材料喷射增材制造架构晶格的本构模型

表4：用于有限元分析、以模拟不同打印材料的MJ架构晶格力学响应的本构模型。

研究工作	基材	描述	本构模型
Mohammadi , M.R 等人.（2020年） [79]	VisiJet M3 Crystal	刚性	双线性理想塑性
Kumar, S. 等（2019年） [83]	VeroWhite	刚性	Drucker-Praguer准则与Rankine表面
Li, T. 等（2021年） [78]	VisiJet M3 Black	刚性	线性理想塑性
Zhang, Z. 等人（2021年） [81]	VeroWhitePlus	刚性	Maxwell黏弹性
Cui, S. 等（2018年） [100]	VeroWhitePlus	刚性	Desayi 和 Krishnan 塑性损伤
Wagner, M. 等（2017年） [105]	VeroWhitePlus RGD835	刚性	黏弹性-Prony级数 + Williams-Landel-Ferry位移因子
Li, T. 等（2018年） [120]	VeroWhite	刚性	弹性黏塑性
Albertini , F. 等人.（2021年） [121]	VeroWhite	刚性	Piobert-Luders弹塑性具有各向同性非线性硬化
Zhang, P. 等人 (2016) [75]	VeroWhitePlus	刚性	横向各向同性采用超弹-黏塑性 Tsai-Wu失效准则
Chen, Y. 等人（2018年） [77]	VeroWhite	刚性	弹塑性
Bossart , A. 等人. (2021年) [125]	VeroWhitePlus	刚性	线弹性
Fernandes , M.C.等人（2021年） [89]	FLX9795-DM	柔性	Neo-Hookean模型
Jamshidian , M. 等人 (2020年) [96]	Tango+	柔性	Hyperfoam
Weeger, O. 等人 (2019年) [91]	TangoBlack+, Tango+	柔性	Weeger 等人的模型 - 非线性超弹性
Jiang, H. et al. (2020年) [101]	FLX95595-DM	柔性	Arruda-Boyce

续下页

续前页

研究工作	基材	描述	数值模型
Chen, Y. 等人 (2017年) [103]	FLX9795-DM	柔性	Arruda-Boyce
Janbaz , S. 等 (2018年) [122]	数字材料：Vero 和 Tango+ A =60、Agilus, Tango+	柔性	Arruda-Boyce
Li, T. 等（2018年） [120]	Tango+	柔性	Arruda-Boyce模型
Bossart, A. 等 （2021年） [125]	Agilus30	柔性	Arruda-Boyce *黏弹性：三项Prony级数
Albertini , F. 等人. (2021年) [121]	TangoBlack	柔性	Arruda-Boyce模型
Mirzali、M.J.等 (2020年) [132]	Agilus30 Black (FLX985)	柔性	Neo-Hookean模型

表格结束

附录 E：所评述的材料喷射增材制造架构晶格的相关方面

表 5：本综述所讨论的材料喷射增材制造架构晶格相关特征汇总，包括：(i) 所使用的3D打印机，(ii) 所选用的打印材料，(iii) 所考虑的晶胞类型，以及 (iv) 各作者指出的研究成果潜在应用。

研究 work	3D打印机	材料	晶胞类型	结果	应用
Lancea, C. 等人（2020年） [84]	Connex 500	VeroClear (RGD810)	基于球体的有/无圆柱形加劲构件	高抗压强度质量比	航空航天，汽车，机械
Sathishkumar, N. 等人。（2019年） [85]	Objet Eden 260V	VeroWhitePlus, SUP 705	Schoen TPMS：FRD、Octo	TPMS抗压强度评估	3D打印，填充结构，阻尼器，医疗植入物/支架
Mohammadi，M.R 等人（2020年） [79]	ProJet 3500 HD Max	VisiJet M3 Crystal, VisiJet S300	五模态	不同的力学性能，这是由于五模态中点变体优化力学性能	超材料流体：高一个方向上的刚度以及其他方向上的高柔顺性
Abate, K.M. 等人。（2020年） [87]	Projet 3510 HDMax	VisiJet M3 Crystal	Vintiles	高孔隙率晶格，高能量吸收效率通过调节壁厚梯度	医疗植入物/支架
Kumar, S. 等（2019年） [83]	Objet260	VeroWhite, SUP705	蜂窝：不规则六边形，内凹式，手性	更高的强度和储能水平高于桁架拓扑结构，超越 Hashin-Shtrikman 界限	储能，可重构器件，绝缘体，阻尼器
Li, T. 等（2021年） [78]	Projet MJP 3600	VisiJet M3 Black，Visijet S300	半板结构晶格：简单立方（SC）、面心立方（FCC）	孔隙率对TMPS支架的塑性变形和能量吸收的影响。	金属的替代品泡沫材料
Afshar等（2018年） [80]	Objet Eden	VeroGray Fullcure 850, SUP 705	具有梯度化的三周期极小曲面孔隙率：P曲面、D曲面、IW-P	三周期极小曲面的大变形三周期极小曲面的响应用于支架评估	细胞支架生长
Kadkhodapour, J. 等人。（2014） [86]	Objet Eden260	VeroBlue FullCure 840	三周期极小曲面：P曲面和D曲面	机械性能和断裂行为有色和半透明多孔晶格	细胞支架生长
Alaboodi，A.S 等人。（2018年） [88]	ProJet 3500 3D	VisiJet M3 Crystal, VisiJet M3 White	立方网格结构		骨支架细胞生长
Alberdi, R. 等人（2020年） [78]	Objet 30	VeroWhite	组合：面心立方（FCC）和体心立方（BCC）	带有可调晶格的改进的能量吸收	冲击与碰撞装置（通过能量吸收实现塑性耗散）

续见下页

接上一页

研究 work	3D打印机	材料	晶胞类型	结果	应用
White, B.C. 等人（2021年） [82]	Objet J286	VeroWhite	IPL 组合：面心立方（FCC）和双菱形十二面体（RD）	能量吸收六倍于单一分离晶格	能量耗散，损伤感知，振动隔离
Zhang, Z. 等人（2021年） [81]	Objet260 Connex3	VeroWhitePlus	方形分形图案，具有三种阶次	低弯曲刚度但具有较高的结构完整性，并且形状恢复能力得到改善	能量耗散
Johnson, L.K. 等人 (2019年) [95]	Objet500 Connex3	Tango+（FLX930），SUP706	带有圆柱形支杆的立方晶格	形状恢复刚度值接近适用于柔软生物材料通过改变几何特征	软组织
Fernandes, M.C.等人。(2021年) [89]	Objet500 Connex3	FLX9795-DM	方形网格，带有对角支撑（深海海绵仿生）	非线性响应和大变形晶格	能量吸收，声波的衰减和热波
Janbaz, S. 等（2019年） [90]	Object 350 Connex3	数字材料：Agilus + VeroMagenta, SUP706	四重、圆形	柔性晶格由一个屈曲模态控制机制。高失稳模式激活	生物医学假肢、软体机器人执行器（外骨骼）
Jamshidian , M. 等人（2020年） [96]	Stratasys J750	Tango+	体心立方（BCC）	初始模型朝向进一步非线性本构模型（针对晶格在大变形下）	软晶格建模
Weeger, O. 等等（2019年） [91]	Stratasys J750	TangoBlack+, Tango+，SUP 706。鞋底：数字材料 2160 晶格+VeroPlus 表面	Vintiles、Cross、Octet	新型非线性方法，适用于软晶格在大具有实际应用	软体机器人学、能量吸收、时尚和个人防护
Cui, S. 等（2018年） [100]	-	VeroWhitePlus	立方体，带有正弦形支杆	可变负泊松比。改进的刚度和断裂韧性优于开孔泡沫材料。高抗压痕性	航空航天、聚合物座椅垫
Jiang, H. 等人 2020年 [101]	Objet260	FLX95595-DM	正弦梁	评估力学性能超弹性三维管状晶格	生物医学组织，可拉伸电子学

下页继续

接上一页

研究 work	3D打印机	材料	晶胞类型	结果	应用
Mousanezhad，D曲面等人。（2015年）[93]	Objet Eden260V	TangoGray	二维层级蜂窝	评估力学性能层级结构的蜂窝结构	能量吸收，可调谐膜滤波器、声学阻尼器
Li, T. 等 (2017年) [102]	Objet Connex260	FLX9795-DM	正弦梁	可调负泊松比以上各个方向的大应变方向	能量吸收，可调声学特性，振动控制，可拉伸电子学，Soft机器人技术
Wagner，M. 等 al.（2017年）[105]	Objet500 Connex3	VeroWhitePlus RGD835	蜂窝结构：内凹式，反四手性	主动可编程负泊松比蜂窝结构具有面积变化接近 200%	生物医学器械，航空航天，可展开结构，自组装器件
Wang, D. 等人（2020年）[104]	Objet J750	VeroWhite	马蹄形三维晶格	可调泊松比比率，可编程形状变化/变形	软体机器人学，能量吸收，生物医学器械
Dong, L. 等人（2021年）[106]	Objet J750	VeroWhite	蜂窝结构卷曲支杆	可控形状通过几何形状和温度。可变泊松比	变形结构，生物医学器械，软体机器人学，吸震材料
Guseinov, R. 等人。（2020年）[94]	Stratasys J750	Vero Pure White	带有拉伸边缘膜	变形可编程壳体考虑形状随时间的演化	自驱动壳体，形状编程机器人材料
Xie, Y. 等人.（2018年）[107]	Stratasys J750	-	三维十字形	2.5D伦伯格透镜用于40千赫空气传播的超声。	对空气传播的控制声波。超声波传感器
Peri, V. 等人。（2019年）[111]	Connex Objet500	VeroWhitePlus。	手性	声子具有一个.....的超材料诱导轴向场的以及非局域韦尔轨道存在。手性朗道能级已观测到	声学与电磁超材料
Vdovin，R. 等 al.（2017年）[112]	Objet Eden 350	VeroWhite 830	通过管道耦合的薄壁单元 通过管道耦合的薄壁单元	高吸声吸收效率（在300至600赫兹范围内）	吸声体
Yi, J. 等（2016）[108]	Objet Eden260VS	-	非线性阵列波束转向	波传播控制，覆盖宽广的频率范围（8至12 GHz）	天线，微波透镜，机载及车载设备通信系统

下一页继续

接上一页

研究 work	3D打印机	材料	晶胞类型	结果	应用
Chen, Y. 等 (2017年) [109]	Objet260 Connex3	VeroWhite	正弦形韧带在六边形、方形、卡戈梅、三角形拓扑结构	多种且全向的通过定制的带隙支杆曲率	波滤波，振动隔离，可拉伸电子器件，可编程声学材料
Chen, Y. 等 (2017年) [103]	Objet Connex260	FLX9795-DM	正弦支杆位于若干晶格上。对于负泊松比：六边形、方形、卡戈梅、三角形。对于声子带隙：方形	可调泊松比比率和波传播控制	能量吸收，软体机器人学，振动控制，可调声学材料
Lim, C.W. 等 al. （2021年） [110]	Objet30	VeroWhite	外部框架连接于中心球形/立方体质量	与刻度无关具有弹性波控制功能的超结构弹性波控制在超宽频区域（带隙得到改善宽度最高提升160%）	振动吸收和衰减在宽频率范围内所有方向 . 水下声学设备
多材料					
Mirzali, M.J. 等 al. （2018年） [123]	Objet500 Connex3	VeroCyan （RGD841）和 Agilus30 Black （FLX985）	蜂窝结构：蝴蝶结形（60°）、矩形（90°）、六边形（120°）	弹性刚度和泊松比（可在不同方向上调节），考虑到硬相和软相	长期生物医学应用（植入物）。软体机器人学
Janbaz, S. 等 （2018年） [122]	Objet 350 Connex3	DM Vero 和 Tango+ (A =60)、Agilus、Tango+	正方形元件相互连接杆件。* 正方形形状内核：圆形 ，四重	失稳与后屈曲行为由空洞控制分布	可拉伸电子学，生物医学植入物，软体机器人学
Jiang, Y. 等人 （2018年） [124]	Objet Connex 260	DM9760 和 VeroWhite	开放孔胞元与内凹角手性芯部	可调刚度 , and 泊松比通过几何特征。负泊松比晶格制成刚性肋条和橡胶状胞元芯	智能复合材料，能量吸收泡沫材料、传感器，执行器 ，生物医学器械
Li, Y. 等人 （2019年） [127]	-	Tango+ 和 VeroWhite	霍伯曼球带有/不带软或硬杆	多个且可调的低频率范围内的宽带隙频率范围在 Floquet–Bloch 条件下边界条件	隔声，导波，噪声以及振动控制

续见下页

接上页

研究 work	3D打印机	材料	晶胞类型	结果	应用
Bossart，A. et al.（2021年）[125]	Objet 500 Connex3	VeroWhitePlus 和 Agilus30	带软方形方形铰链	受控且恒定的零能变形模式。可调泊松比比率，在低压缩下为负，且在高加载中	软体机器人学。能量吸收
Al Ketan，O. 等 al.（2017年）[119]	Stratasys J750	VeroWhite 以及 Tango+	三周期极小曲面：金刚石，I-WP（P曲面和S曲面），Gyroid、Fischer-Koch C(Y)	机械评估基于三周期极小曲面的互穿复合材料（IPC）及其体积分数	振动阻尼。损伤减小
Dalaq, A.S. 等人（2017年）[69]	Objet260 Connex	Tango+（FLX930），和 Vero-Plus（RGD875）	三周期极小曲面：Schwarz（P曲面、D曲面、CLP）、Schoen（I-WP）、Neovious、Gyroid、Fischer-Koch S，桁架-IPC	力学性能IPC的改进采用橡胶态基体由刚性增强三重周期极小曲面晶格	损伤容限器件。振动控制
Li, T. 等（2018年）[120]	Objet Connex260	VeroWhite 和 Tango+	增强晶格：负泊松比(内凹式蜂窝、手性桁架）。无负泊松比：（蜂窝、桁架）	增强橡胶态基体与刚性负泊松比晶格。增强强度和能量吸收由于NPR效应	能量吸收，抗冲击器件
Albertini, F. 等 al.（2021年）[121]	Objet Connex350	VeroWhite and TangoBlack +	Hexaround 和 Warmuth	增强的力学性能和能量吸收性能复合材料刚性晶格与超弹性材料填充材料	能量吸收
Mirzali, M.J. 等 al.（2020年）[132]	Objet500 Connex3	VeroCyan (RGD841) 和 Agilus30 Black (FLX985)	蜂窝结构：蝴蝶结形 (60°)，矩形 (90°)，六边形 (120°)	非.....的评估亲和性负泊松比具有两相的晶格两相	关于多材料中的结构完整性多材料设计
Al Ketan，O. 等 al.（2018年）[129]	Objet Connex 260	VeroWhite and TangoGray	TMPS：Gyroid	改进的能量吸收性能（胞状复合材料，由梯度三周期极小曲面，采用可变体积分数	能量吸收

接下页

接上一页

研究 work	3D打印机	材料	晶胞类型	结果	应用
Mueller, J. 等 al. （2018年） [133]	Objet500 Connex3	RGD525 和 FLX9695-DM	Voronoi芯	改进能量吸收梯度化弯曲主导晶格最高可达38倍相较于单一材料对应物	冲击防护装置，从头盔到车辆
Wang, K. 等人 （2015年） [134]	Connex350	VeroWhitePlus and TangoBlack+	三维内凹式蜂窝	评估力学性能负泊松比晶格采用柔性接头和刚性梁	抗冲击器件，生物医学组件，智能材料
Saxena , K. 等 al. (2017年) [135]	Connex 260	VeroWhite 和 Tango+	二维内凹结构蜂窝	评估杨氏模量和泊松比多材料负泊松比晶格。抗压痕性	冲击防护器件。
Hedayati, R. 等 al. （2021年） [131]	Object500 Connex3	Agilus 30 （60%）和 VeroBlack+ （40%）	六边形，内凹式（融入沿着圆柱形）	解析公式用于确定泊松比比率和刚度评估	智能材料，软体机器人技术，外骨骼服，重型服装，能量阻尼，软体执行器
Lumpe, T.S. 等 al. （2021年） [130]	Objet500 Connex3	VeroWhitePlus 和“高温度”(HT)	方波和正弦结构（二维和三维）	优化的多材料变形形状受热作用下的晶格刺激	变形组件（例如主动翼型，或汽车面板）
Wu, L. 等 （2016） [136]	Objet350 Connex2	VeroWhitePlus (RGD835) 以及 Tango+ (FLX930)	三维反手性	可调负热膨胀系数，可扩展至任何晶格尺度集成设计方法与制造考量	耐受组件热疲劳和开裂（在一些领域例如航空航天，建筑）
Egan, P.F. 等人。 （2019年） [67]	Objet500 Connex3	MED610 生物相容聚合物，SUP706	体心立方笼	（建筑朝向，后处理及环境的暴露）。评估的力学性能	支架。生物医学应用

下页继续

接上页

研究 work	3D打印机	材料	晶胞类型	结果	应用
Liu, W. 等（2020年） [76]	Objet30pro	VeroWhitePlus（RGD835），SUP706	体心立方、体心立方-Z、FCC 八面体桁架	卡扣装配减少的方法支撑材料在晶格制造过程中。评估抗压强度、弹性与非弹性屈曲评估	制造流程
Mueller, J. 等人等人（2018年） [68]	Objet500 Connex3	VeroWhitePlus（RGD835），SUP705	FCC、开尔文胞	屈曲、方向和缩放对.....具有显著影响力学性能	关于安全性和高三维的效率打印部件
Zhang, P. 等人 (2016) [75]	Objet260 Connex	VeroWhitePlus	方形网格，金刚石	晶格的考虑了打印效应，如各向异性用于机械性能评估	精确的变形和失效预测聚合物3D打印部件
Chen, Y. 等 (2018年) [77]	Objet Connex260	VeroWhite	分层的六边形蜂窝结构	高能量耗散和形状保持完整性在大变形下变形，通过分级层次和热处理	能量吸收，损伤容限器件，阻尼

表格结束