



点阵材料及其 3D 打印

陶斯嘉¹, 王小锋¹, 曾 婧², 易 兵³, 彭超群¹, 王日初¹

- (1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;
2. 中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083;
3. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075)

摘 要: 点阵材料是由一种或多种结构单元, 按照特定方式(如周期、拓扑、分形等)优化组合构筑而成的具有特殊物理性能的一类新材料, 在光、电、力、热、声、磁、生物化学等领域均具有巨大的应用潜力。3D 打印技术极大地推动了点阵材料的发展, 提高了点阵材料的可设计性, 使制备具有形状复杂、尺度细小的点阵材料成为现实。本文综述了点阵材料的研究进展: 阐述了点阵材料结构单元的类型及特征; 归纳了点阵材料的制备方法; 总结了点阵材料的性能及应用; 最后探讨了点阵材料的发展方向。

关键词: 点阵材料; 3D 打印; 多孔结构; 点阵结构制备方法; 功能结构一体化

文章编号: 1004-0609(2022)-02-0416-29

中图分类号: TQ174

文献标志码: A

引文格式: 陶斯嘉, 王小锋, 曾 婧, 等. 点阵材料及其 3D 打印[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(2): 416–444.
DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42260

TAO Si-jia, WANG Xiao-feng, ZENG Jing, et al. Lattice materials and its fabrication by 3D printing: A review[J].
The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(2): 416–444. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42260

随着航空航天、生物医疗等领域的快速发展, 实际应用对材料的轻量化^[1-6]、多功能化^[2-3, 7]、设计优化^[2]、结构功能一体化^[3, 7]有着重大需求。点阵材料是一类能够满足上述需求的材料^[2-5, 7-10], 在医疗植入物^[11-13]、航天器结构件^[7, 14]、超音速飞行器蒙皮^[15]等相关方面具有广阔前景。点阵材料指由一种或多种结构单元(通常由杆、管或板组成)按照特定方式(周期、拓扑、分形等)优化组合构筑而成的具有特殊物理性能的一类新材料。实际上, 点阵材料本质上是一种有序多孔材料, 隶属于多孔材料的一大重要分支。与之相对应的, 多孔材料的另一大分支是无序多孔材料, 以泡沫材料为代表^[5, 7]。图 1 所示为多孔材料的分类^[16]。1989 年, GIBSON 等^[17]率先提出多孔结构的概念, 并将多孔材料定义为由支柱或板组成的相互连接的网络。2001 年, EVANS 等^[18]明确提出点阵材料的概念, 并将点阵

材料定义为具有周期性架构的微结构(也称点阵结构)。需指出的是, 点阵材料与点阵结构两个概念侧重的方面有所不同, 前者侧重的是材料的整体, 后者则更强调材料的架构方式, 但两者描述的是同一事物, 后文统一用点阵材料叙述。

点阵材料的总体尺寸从微米级到米级不等, 主要取决于结构单元的尺寸及其组合数量。结构单元的尺寸大多数为纳米级、微米级、或者毫米级, 以及前三者组合形成的多级结构跨尺度尺寸。这种多级结构的形式可显著提高点阵材料的强度, 并使之具有某些超常规特性。例如, ZHENG 等^[19]构筑的一些三维特征跨越了七个数量级(从纳米到厘米)的点阵材料, 其宏观性能具有高拉伸弹性(>20%)、几乎恒定的比强度。点阵材料按其宏观维度可分为一维点阵材料^[2, 20-22], 如 Isotruss 结构^[20-22]、二维点阵材料^[3, 23-32], 如蜂窝结构^[27](Honeycomb、

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4729)

收稿日期: 2021-08-31; **修订日期:** 2021-10-13

通信作者: 王小锋, 教授, 博士; 电话: 13467516329; E-mail: wangxiaofeng@csu.edu.cn; 13467516329@163.com

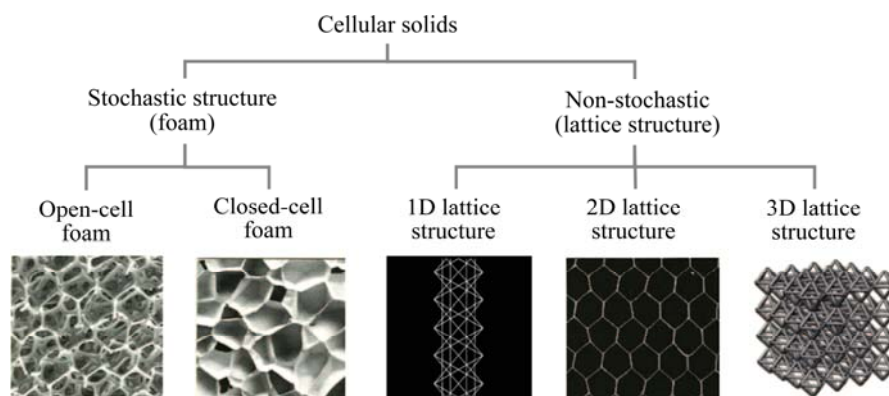


图 1 多孔材料依据结构构型特征的分类^[16]

Fig. 1 Categories of cellular solids according to structure features^[16] (Foam can be divided into open-cell foam and closed-cell foam. Lattice materials can be divided into one-dimensional lattice materials, two-dimensional lattice materials, and three-dimensional lattice materials)

cellular structure)、三维点阵材料^[3, 7, 19, 24, 26, 28, 33-54], 如八角形点阵结构^[19, 28, 39, 41, 43, 45, 47-48, 50](Oct-truss)。本文将按照此方式进行分类。因其结构特性, 点阵材料具有高孔隙率, 在合理安排下具有高比强度^[2, 5, 41]、高散热^[5, 55]等特性, 并有足够的空间实现多功能集成^[5]和结构功能一体化^[7]。此外, 某些点阵材料还具有优良的阻尼特性^[40]和吸音降噪功能^[56], 甚至具有双负折射率^[57]、负泊松比^[42, 54]、刚度可控^[54]等超材料特性。

点阵材料的传统制备方法有熔模铸造法^[24, 58](Investment casting)、扩展金属板法^[59](Expanded metal sheet, 也称为变形成形法)、金属丝编织法^[60](Metallic wire braiding)、金属丝搭接组合法^[10](Metallic wire assembly)、卡扣法^[43](Snap fit)、超塑成形法^[15](Superplastic forming)、挤压线切割法^[61](Extrusion and electrodischarge machining)等。这些方法在加工点阵结构时缺陷明显, 且耗时长, 后处理繁琐, 导致能耗高和材料利用率低^[62]。近年来, 蓬勃发展的 3D 打印采用逐层叠加方式直接从数字模型构建最终实物^[63], 在点阵材料的设计、加工等方面具有一系列优势, 极大地推动了点阵材料的发展。例如, SCHAEDEL 等^[34]将 3D 打印中的自蔓延光导聚合技术(Self-propagating photopolymer waveguide technique)与化学镀相结合制备了纳米-微米-毫米尺度的金属 Ni 点阵材料。ZHENG 等^[41]将 3D 打印中的微立体光刻结合纳米级涂层和后处理, 制备了聚合物、金属和陶瓷的点阵材料。

近年来, 国内外在点阵材料构型设计、制备方法以及性能应用方面取得了大量的研究进展。特别地, 3D 打印技术的进步极大地推动了该类材料的发展。因此, 十分有必要对点阵材料及其 3D 打印的研究进展进行系统地归纳和分析。本文主要综述点阵材料的研究进展: 回顾点阵材料的发展历程; 阐述点阵材料结构单元的类型及特征; 总结点阵材料的制备方法; 综述点阵材料的性能及应用; 最后探讨点阵材料的发展方向。

1 点阵材料的结构单元

1.1 一维点阵材料的结构单元

一维点阵材料是指一个方向的尺度远大于另外两个方向的点阵材料。典型的一维点阵结构为 Iotruss 结构^[20, 22]: 构成围绕中心轴的螺旋缠绕、连续、对角构件的, 并且由一个或多个轴向构件连接的点阵结构。简而言之, 该结构由纵向单元和螺旋单元组成, 如图 2 所示。这种结构在卸载后再加载强度、扭转时杆件之间的相互作用两方面具有独特优势。该结构在宏观尺度上应用在建筑结构体系方面, 性能较好, 与斜交系统相当^[21]。实际上, 该结构是三维点阵结构在一维宏观尺度的设计应用。

1.2 二维点阵材料的结构单元

二维点阵材料的结构单元通常为规则多边形。这种结构单元可以是单一种类多边形, 例如

三角形^[25, 27]、正方形^[27]、六边形^[25, 27]等, 周期排列并填充整个平面而成, 也可以是两种或更多类型的多边形组合排列而成。前者称为规则点阵, 后者称为半规则点阵^[64]。半规则点阵的典型代表是由三角形和六边形排列而成的 Kagome 点阵^[23, 25, 27] (Kagome lattice), 如图 3 所示。

除了上述类型之外, Kagome 点阵还有多种变体^[29]。例如, 具有同心三角形结构的 Kagome 点阵

(Kagome with concentric triangles, KT), 该结构在规则 Kagome 点阵中的每个三角形被均分成四个等边三角形; 具有同心六角形的 Kagome 点阵(Kagome with concentric hexagons, HT), 该结构在规则 Kagome 点阵中的每个六边形内都有一个额外的同心六边形; 双 Kagome 点阵(Double Kagome, DK), 该结构在 Kagome 结构中的每一条(无限长)线均变为两组平行的对齐构件, 如图 4 所示^[29]。

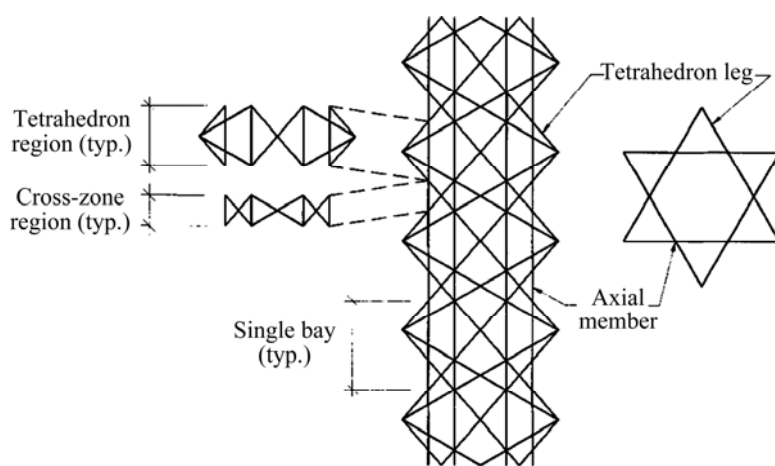


图 2 Isotruss 结构的示意图^[22]

Fig. 2 Schematic diagram of Isotruss structure^[22]

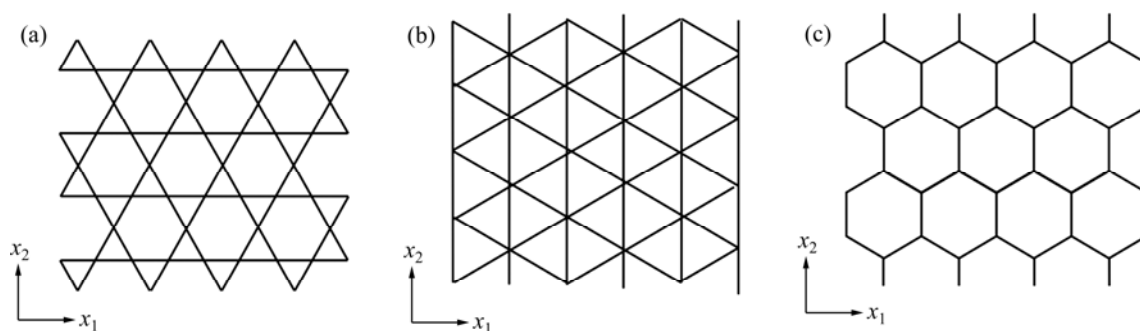


图 3 Kagome 点阵、三角形点阵和六边形点阵示意图^[64]

Fig. 3 Schematic diagrams of Kagome lattice(a), triangular lattice(b) and hexagonal lattice(c)^[64]

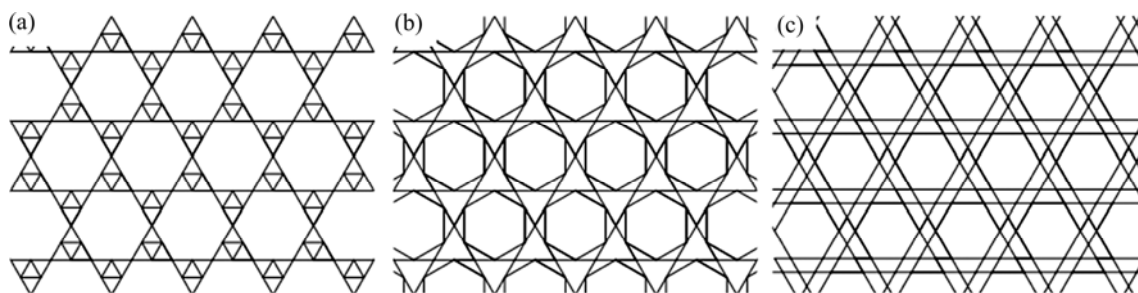


图 4 Kagome 点阵的变体^[29]

Fig. 4 Variants of Kagome lattice^[29]: (a) Kagome with concentric triangles (KT); (b) Kagome with concentric hexagons (KH); (c) Double Kagome (DK)

1.3 三维点阵材料的结构单元

三维点阵材料的结构单元一般为多面体。此类结构单元种类丰富, 按设计方法可分为: 基于几何线框的结构单元、基于数学算法的结构单元和基于拓扑优化的结构单元^[62], 如图 5 所示。

三维点阵材料的构型丰富, 其中的典型代表是八角形桁架结构^[19, 28, 39, 41, 43, 45, 47-48, 50]、十四面体结构^[41, 65-66](Tetrakaidecahedron)、三维 Kagome 结构^[46, 67-68]。此外, 三维点阵材料的结构单元设计中, 多级结构、梯度结构近年来引人注目。

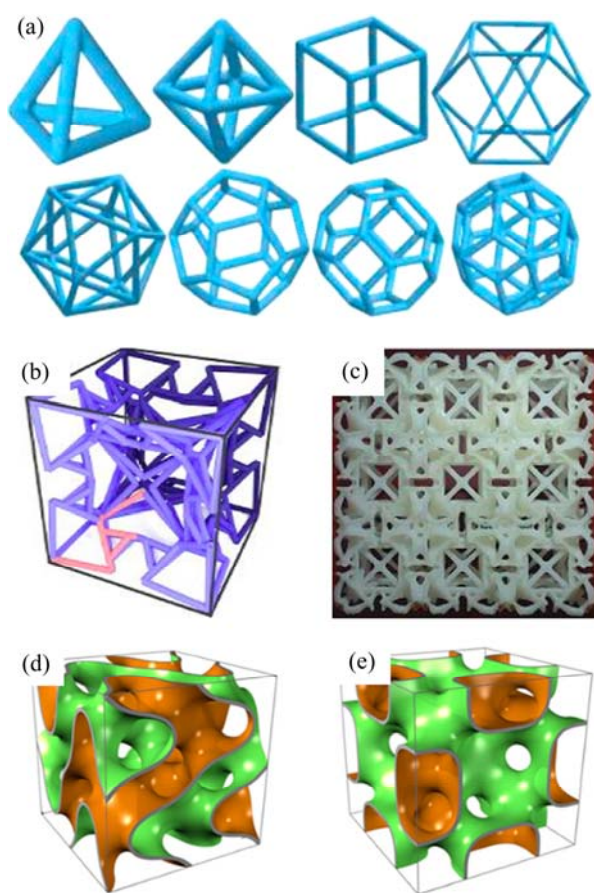


图 5 三维点阵结构单元^[69-71]

Fig. 5 Lattice unit cell: (a) Based on Geometric Wireframe^[69-71] (Tetrahedron, Octahedron, Cube, Vector (top row, from left to right)); Icosahedron, Dodecahedron, Tetrakaidecahedron, Triacanthedron (bottom row, from left to right); (b) Unit cell template skeleton based on Topology Optimization^[70]; (c) Lattice structure manufactured object based on Topology Optimization^[70]; (d) Fischer-Koch S based on Mathematical Algorithm^[71]; (e) Schoen FRD based on Mathematical Algorithm^[71]

1.3.1 八角形桁架结构

八角形桁架(Octet-truss)结构单元是以正八面体为核心, 周围分布着八个正四面体, 通常拼接为立方微点阵的形式, 如图 6(a)和(b)所示。在该结构单元中, 所有支杆元件的纵横比均相同, 每个节点连接 12 根实心杆或空心管。

八角形桁架结构是拉伸主导型结构的典型代表。所谓拉伸主导型结构是指由 b 个支杆和 j 个无摩擦接头组成, 且满足 Maxwell 准则 $M=b-3j+6>0$ 的结构。该类型结构的支柱承受的是压缩或拉伸载荷, 而不是弯曲载荷。DESHPANDE 等^[24]详细叙述了在所有加载状态下经历以拉伸为主的结构的设计准则。与弯曲主导型结构相比较, 拉伸主导型结构具有更高的机械效率, 即更高的比刚度, 且比刚度和比强度近似线性变化^[41]。

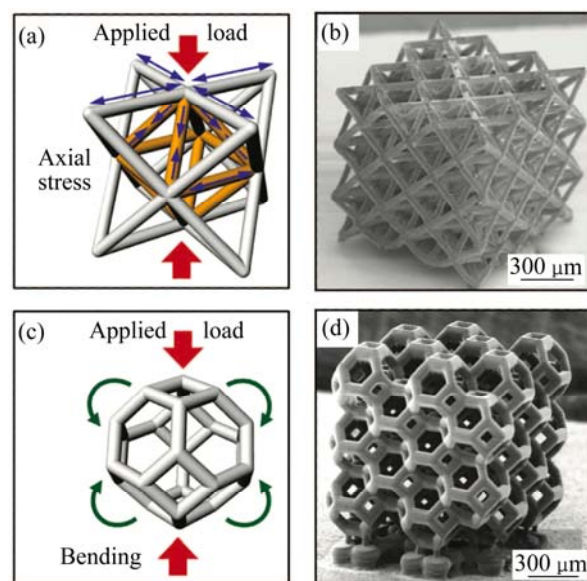


图 6 拉伸主导型和弯曲主导型的结构单元和点阵材料^[41]

Fig. 6 Architecture of stretch-dominated and bend-dominated unit cells and lattices^[41]: (a) Mechanical response to compressive loading of stretch-dominated octet-truss unit cell; (b) Octet-truss unit cells packed into cubic microlattice; (c) Mechanical response to compressive loading of bend-dominated tetrakaidecahedron unit cell; (d) Tetrakaidecahedron unit cell packed into cubic bend dominated lattice (Kelvin foam)

1.3.2 十四面体结构

十四面体结构单元是一个弹性梁网络, 即平均连接性(节点上的支杆数)为 Z 的 j 个关节连接而成

的框架,通常拼接为立方开尔文框架(Cubic Kelvin foam)^[54],如图6(c)和(d)所示。该框架中支杆 b 的总数约为 $jZ/2$ 。

十四面体结构是弯曲主导型结构的代表^[41]。该结构的六边形以弯曲为主, $b=3$,即每个节点处共享3个相邻杆的低节点连通性。此结构的刚度和强度取决于杆件的弯曲刚度,因此,称为弯曲主导型结构。与拉伸主导型结构相比较,弯曲主导型结构的力学性能恶化为 $E \sim \rho^2$ 或更差^[54]。

1.3.3 三维 Kagome 结构

三维 Kagome 结构单元为共享角四面体,如图7所示。该结构是唯一具有各向同性刚度的周期桁架结构。与泡沫材料和其他点阵材料相比,它具有优异的机械强度、导电性和导热性^[46]。因此,被认为是一种很有前途的功能材料拓扑结构。

1.3.4 多级结构

多级结构是指从简单的、尺度较小的结构单元逐级建立复杂的、尺度较大的结构单元。该结构是研究者们受天然材料的多级结构的启发而提出。天然材料如骨骼和竹子等通常由逐级排列的多级结构的硬相和软相组成,且多级结构的尺度跨越很大,从纳米级到毫米级甚至米级^[72],如图8所示^[72]。ZHENG 等^[19]展示了具有不同三维特征的多级结构的点阵材料,其尺度从纳米级到厘米级,跨越七个

数量级,如图9所示。在宏观尺度上,它们具有高拉伸弹性($>20\%$),以及几乎恒定的比强度。

1.3.5 梯度结构

梯度点阵结构(Gradient lattice structures, GLS)包含功能梯度点阵结构(Functionally Graded Lattice, FGL)和自然功能梯度点阵结构(Naturally Functionally Graded Lattice, NFGL),前者仅孔隙率存在不同,而后者孔隙率和结构单元大小均存在不同^[73]。GLS 在多种领域表现出比均匀点阵结构(Uniform lattice structures, ULS)更优异的性能,并且设计自由度更高,更能满足实际应用的需要^[62]。SEHARING 等^[74]综述了增材制造技术制备的 GLS 的设计、力学性能、可制造性和应用。通过改变点阵结构中单元单元的单元尺寸、支撑长度和支撑直径等设计参数,可以获得梯度特性,以实现不同程度的功能和优化强度重量比特性。例如,在生物医学领域,GLS 与人体骨组织相似,比 ULS 更适合骨组织的生长^[62]。

梯度点阵结构比均匀点阵结构具有更好的力学性能^[75]。二者力学行为上最显著的区别在于其塌陷结构、应力-应变曲线、第一最大抗压强度和能量吸收特性^[74]。AL-SAEEDI 等^[76]通过有限元模拟和实验测试比较了 FGL 和 ULS(BCC 结构)在压缩荷载作用下的力学行为,结果表明,FGL 的塌陷过程

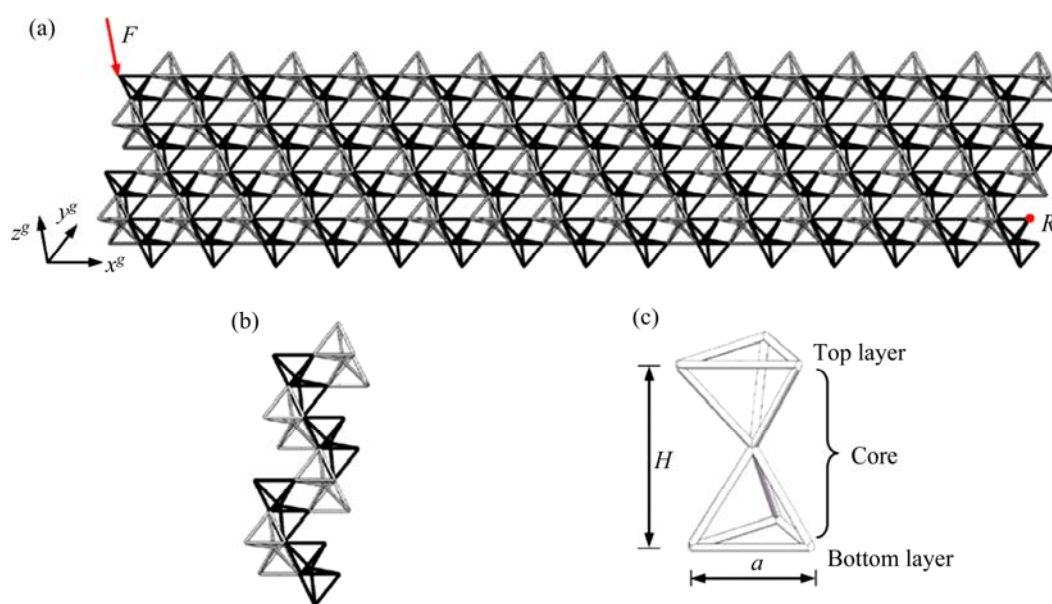
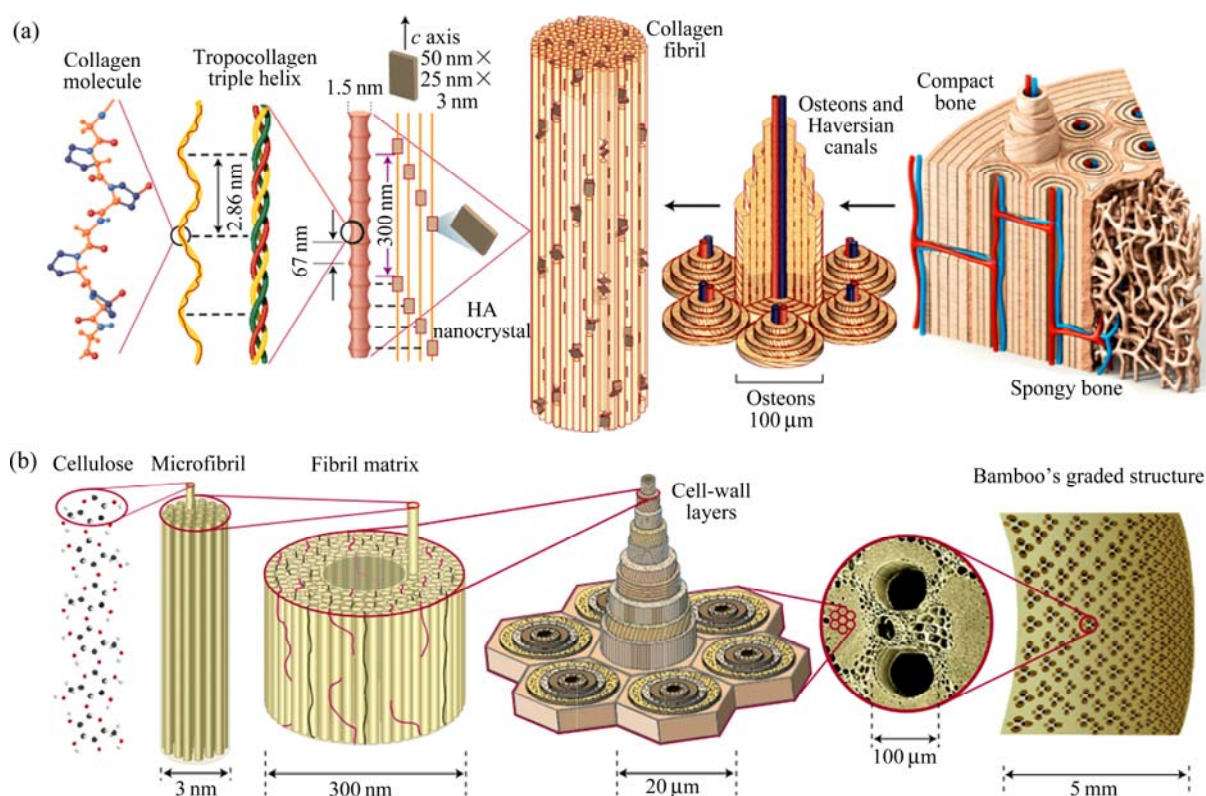


图7 具有15个子结构的3D Kagome 晶格以及子结构和结构单元^[46]

Fig. 7 3D Kagome lattice with 15 substructures(a) and one substructure(b) and (c) one unit cell^[46]

图 8 骨头和竹子的多级结构^[72]Fig. 8 Hierarchical structure of bone and bamboo^[72]: (a) Bone; (b) Bamboo

是逐层进行的, 从低密度层开始塌陷, 依次向高密度层塌陷, 从而导致所研究的力学性能(如平台塌陷应力)的增加; FGL 比 ULS 更早进入致密化应变的起始阶段, 但能够比 ULS 吸收更高的能量, 如图 10 所示。因此, FGL 相比于 ULS 更适合于需要高能量吸收能力的各种应用。ZHANG 等^[77]利用粉末床熔融成形技术(Powder bed fusion, PBF)通过改变原料配比制备 TiB/Ti6Al4V GLS, 比对应的 Ti6Al4V ULS 具有更高的刚度和强度, 并提出了一种预测和设计 GLS 力学性能的组合模型, 为多材料、高性能的复杂构件设计提供了一种新的方法。BAI 等^[75]通过改变 ULS 结构单元的单向尺寸, 形成一系列不同密度和构型的结构单元, 从而形成尺寸梯度(Size-graded, SG)点阵结构, 实验表明, 该结构比其他结构在小应变下具有更好的支撑性能, 在大应变下具有更好的吸能能力, 佐证了其应用于具有抗冲击性能的保护装置的可行性。

梯度点阵结构的设计和优化方法目前蓬勃发展。ZHANG 等^[78]提出一种 FGL 并行拓扑优化的新

方法并验证了有效性, 该方法可同时优化代表不同点阵材料分布的宏观设计变量和定义微结构单元拓扑的微观设计变量, 该优化设计模型的有限元模拟表明, 在相同材料用量下, FGL 比 ULS 具有更高的抗屈曲能力和极限承载力。LI 等^[79]提出一种新的各向异性点阵结构设计和多尺度优化方法, 可以生成共形梯度点阵结构(Conformal gradient lattice structures, CGLS)。JANSEN 等^[80]提出了一种混合密度/水平集方法, 可同时优化宏观结构形状和功能梯度点阵结构。

2 点阵材料的制备方法

2.1 点阵材料的传统制备方法

如前所述, 点阵材料有多种传统制备方法, 诸如熔模铸造法^[24, 58](Investment casting)、扩展金属板法^[59](Expanded metal sheet, 也称为变形成形法)、金属丝编织法^[60](Metallic wire braiding)、金属丝搭接组合法^[10](Metallic wire assembly)、卡扣法^[43]

(Snap fit)、超塑成形法^[15](Superplastic forming)、挤压线切割法^[61](Extrusion and electrodischarge machining)等。图 11 所示为点阵材料传统制备方法的时间线。

熔模铸造法最初由 DESHPANDE^[24, 58]提出, 并制备出由半径 $a=1\text{ mm}$ 、长 $l=14\text{ mm}$ 的实心圆柱形压杆组成的铸造铝合金(LM25)八角形桁架点阵材料。其工艺步骤为: 首先制备点阵桁架结构的蜡或聚合物的芯模, 如果制备的是夹芯点阵材料, 则还需制备面板的芯模, 然后在模的外层涂覆一层陶瓷浆料并将其放到液态金属浇口, 流道和立管系统,

随后将芯模移除(通常采用融掉的方式), 并浇入液态金属至陶瓷型壳中, 如图 12 所示。待金属固化后, 去除陶瓷型壳, 去除浇口和流道, 并检查组件, 以确保液态金属完全填充型壳, 并且铸件的孔隙率没有损害结构完整性。原则上, 熔模铸造方法可用于制备尺寸较大(1~5 m)和重量较重(几百公斤)的复杂的非平面形状的点阵材料。此方法适用于高流动性的铸造合金, 并已在铍铜合金^[81]、铝硅合金^[82]制备成功。采用熔模铸造方法可制备金字塔型、四面体型、3D Kagome 的点阵结构^[15]。因为包含非常小的直径、高长宽比(桁架)通道的模难以可靠地填

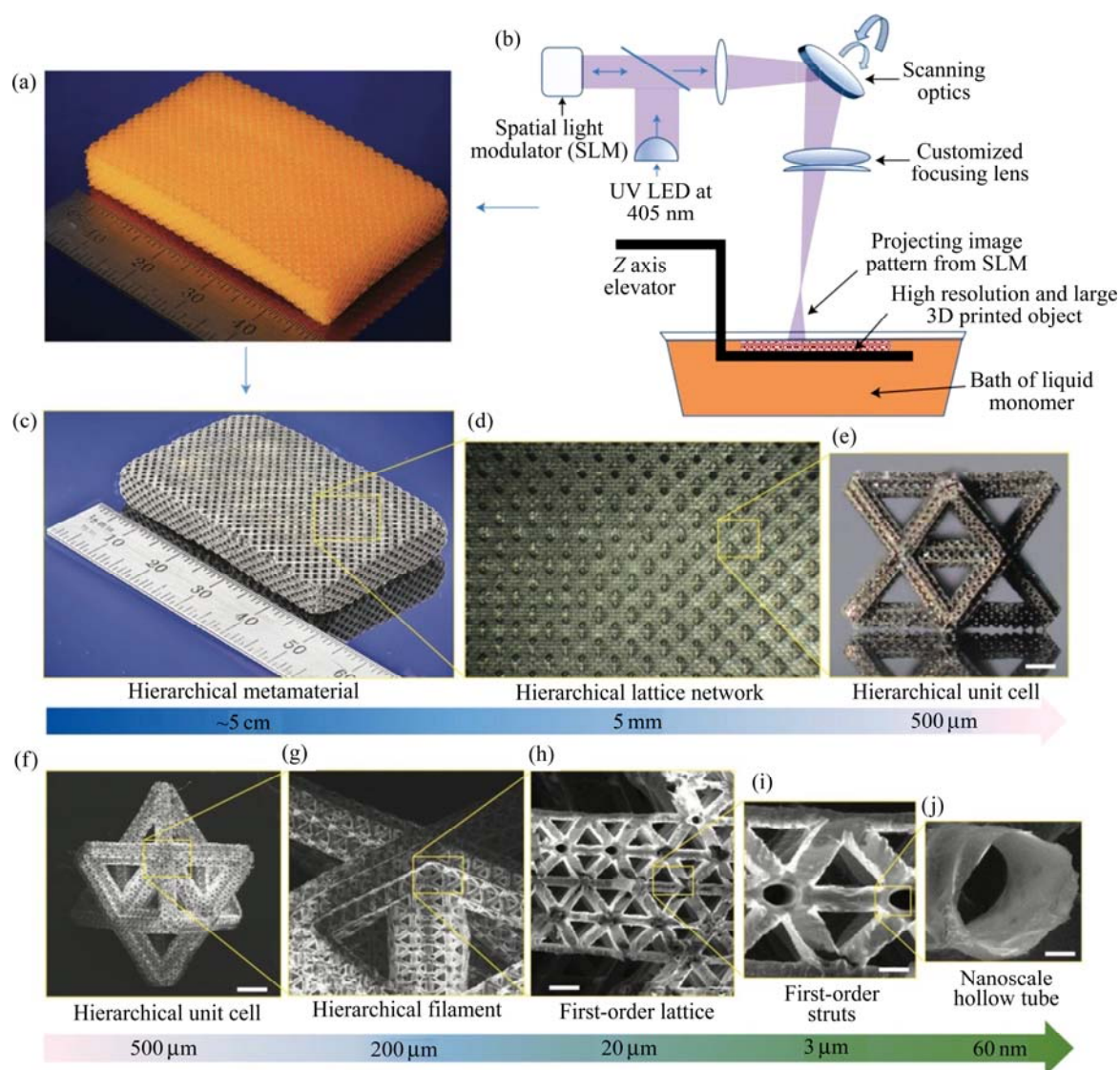


图 9 镍合金多级结构的超材料和关键特征跨越了七个数量级的长度尺度^[19]

Fig. 9 Nickel alloy hierarchical metamaterial and critical features across seven orders of magnitude in length scale^[19]. (a) Polymer metamaterial template; (b) Large-area, high-resolution additive manufacturing of hierarchical metamaterials; (c)–(e) Optical microscope images of bulk hierarchical lattice material: (c) Sample; (d) Lattice network; (e) Unit cell, scale bar: 80 μm ; (f)–(j) Scanning electron micrographs: (f) Hierarchical unit cell; (g) Hierarchical filament; (h) First-order lattice, scale bar: 10 μm ; (i) First-order struts, scale bar: 3 μm ; (j) Nanoscale hollow tube

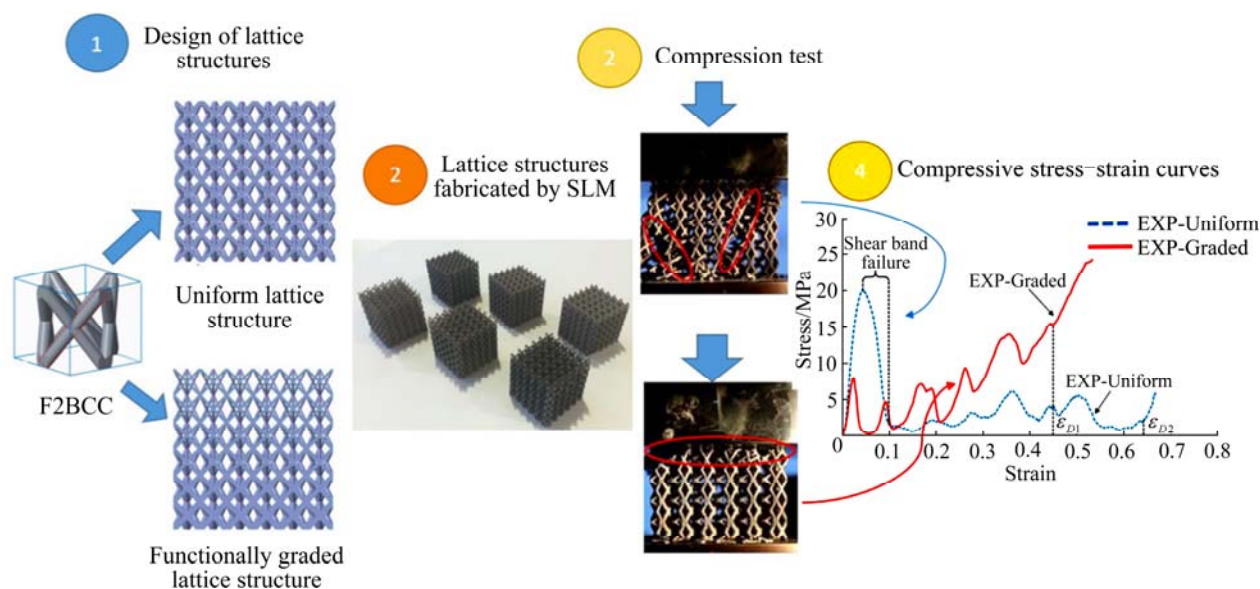
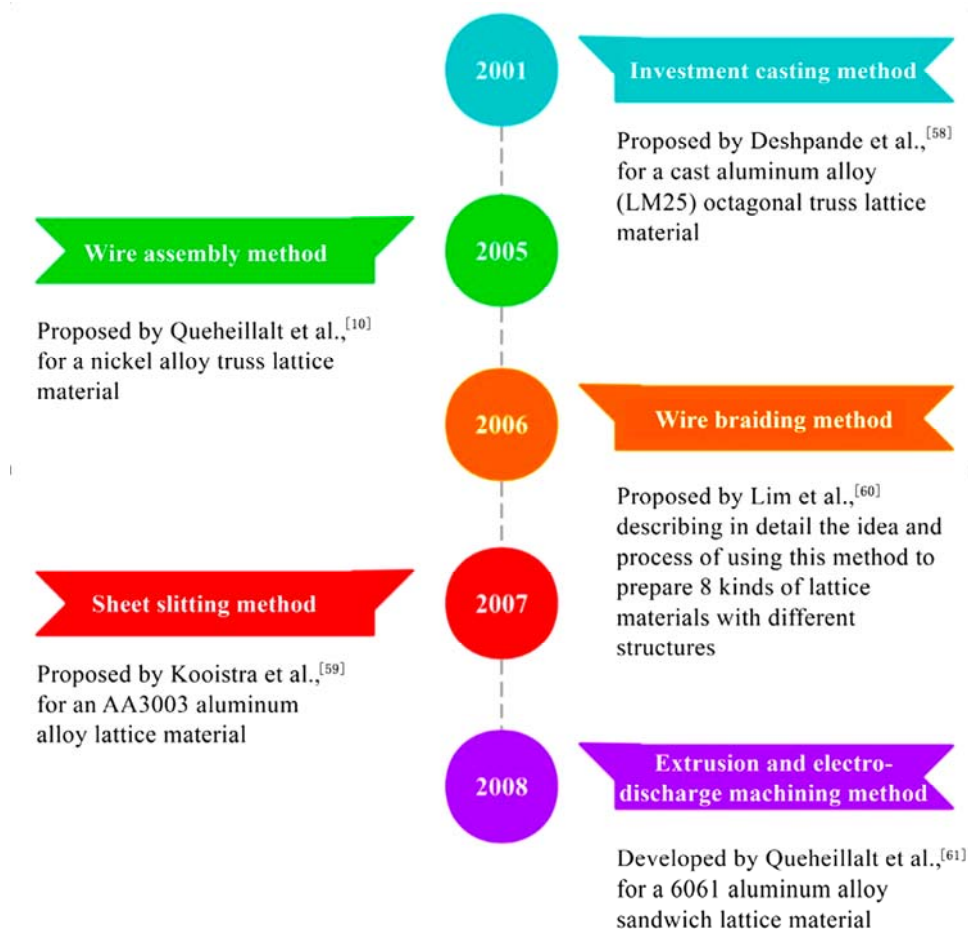
图 10 均匀点阵结构和梯度点阵结构的压缩试验^[76]Fig. 10 Experimental compression test on uniform lattice structures and graded lattice structures^[76]

图 11 点阵材料传统制备方法的时间线

Fig. 11 Time-line of traditional fabrication methods for lattice materials

充,因此该法制备的点阵材料大多数都具有相对较高的型芯相对密度(大于 5%)^[83],且该法工艺较复杂,容易产生缺陷^[15]。

扩展金属板法是在冲孔网冲压成形法基础上改进而成。两者都可用来制备金字塔结构的点阵材料。冲孔网冲压成形法通过在金属板上打孔形成周期性的菱形孔阵,然后折叠来制备点阵材料,如图 13 所示。但该法在点阵材料相对密度降低的情况下对材料的利用效率较低,从而增加制造成本。扩展金属板法对材料的利用率则接近 100%,它通过对金属板进行纵切、展平和折叠来制备点阵材料,如图 14 所示^[59]。KOOISTRA 等^[59]通过这 3 个操作制备出 Al-1.2%Mn-0.12%Cu(AA3003)合金金字塔形桁架点阵结构,经过其他辅助处理后得到夹芯点阵材料。

金属丝编织法采用金属丝编织点阵结构,并采用铅焊稳定节点,从而获得点阵材料。LEE 等^[84]采用此方法制备了 Kagome 结构的点阵材料(Wire-woven bulk Kagome, WBK),具体步骤如下:首先制作连续的螺旋线,将三根金属线缠绕在一起,直到金属丝发生塑性变形,然后解开(见图 15(a)),扭曲后的残余塑性变形形成螺旋线(见图 15(b))。然后准备一个固定螺旋线的框架。在固定框架上,螺旋线沿着三个不同的面内方向组装,构成一个 Kagome 平面(见图 15(c))。图 14(d)显示了在固定框架上组装的 Kagome 平面。根据 Kagome 点

阵材料的层数,将 Kagome 平面单独组装,并沿固定架的四根垂直杆按一定间隔逐个放置。间隔将是层之间的高度。通过缝隙,螺旋线沿着三个不同的平面外方向组装(见图 15(e))。图 15(e)显示了组装的多层 WBK。然后

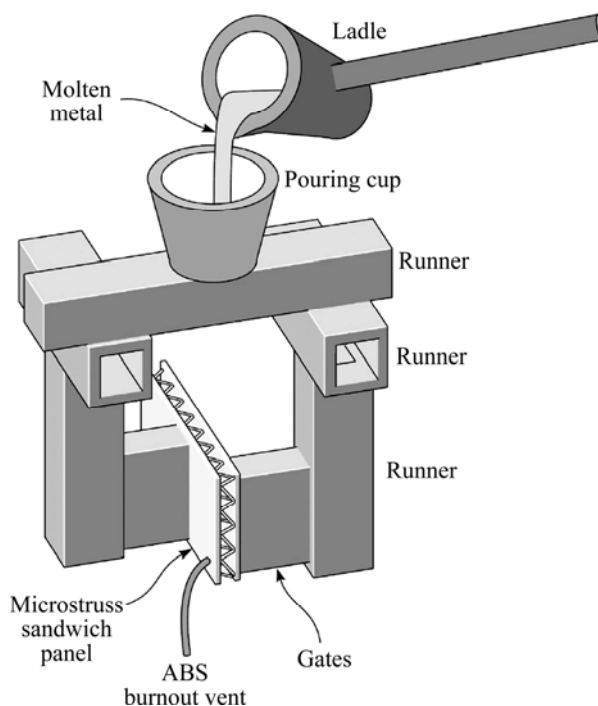


图 12 熔模铸造法制备点阵材料^[83]

Fig. 12 Investment casting fabricating lattice materials^[83] (A wax or acrylonitrile butadiene styrene (ABS) polymer pattern with gates, runners and vents attached. Pattern is coated with ceramic casting slurry and filled with metallic alloy)

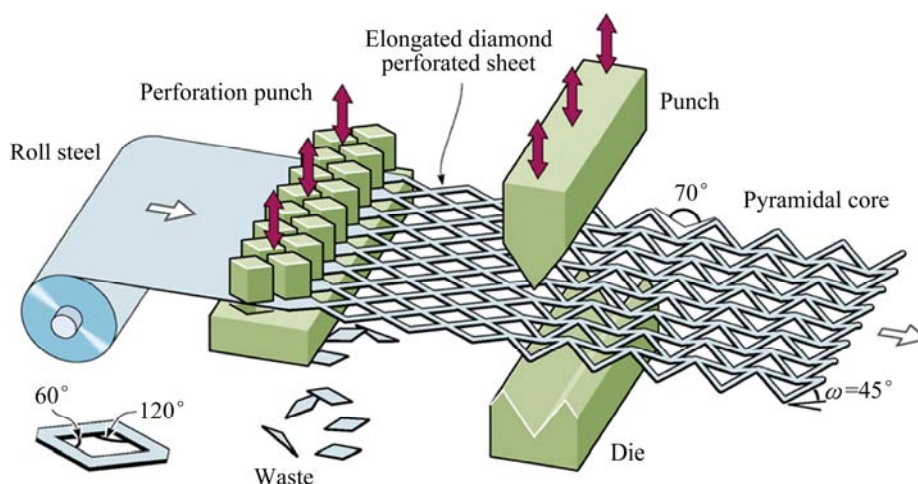


图 13 冲孔网冲压成形法制备金字塔型点阵材料芯层示意图^[59]

Fig. 13 Schematic illustration for manufacture of ideal pyramidal lattice cores^[59] (Principal operations include perforating solid sheet followed by folding)

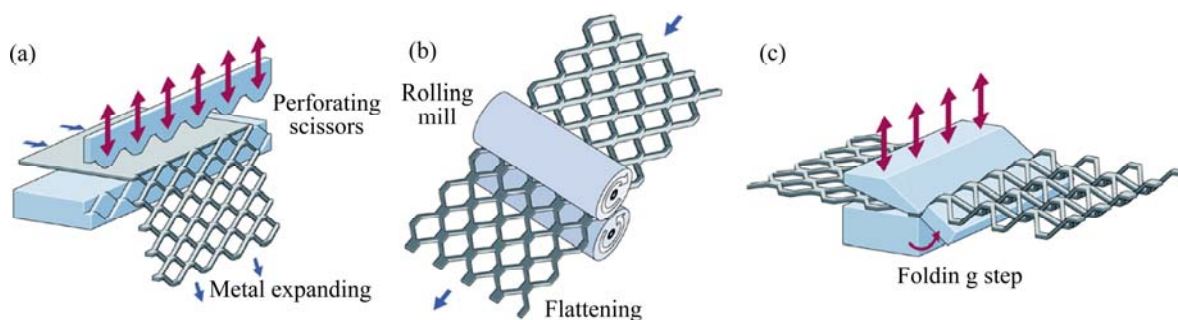


图 14 扩展金属板法制备金字塔型点阵材料芯层示意图^[59]

Fig. 14 Schematic diagrams of manufacturing process for expanded pyramidal lattice truss cores^[59]: Primary steps involve: (a) Slitting; (b) Flattening; (c) Folding metal sheet

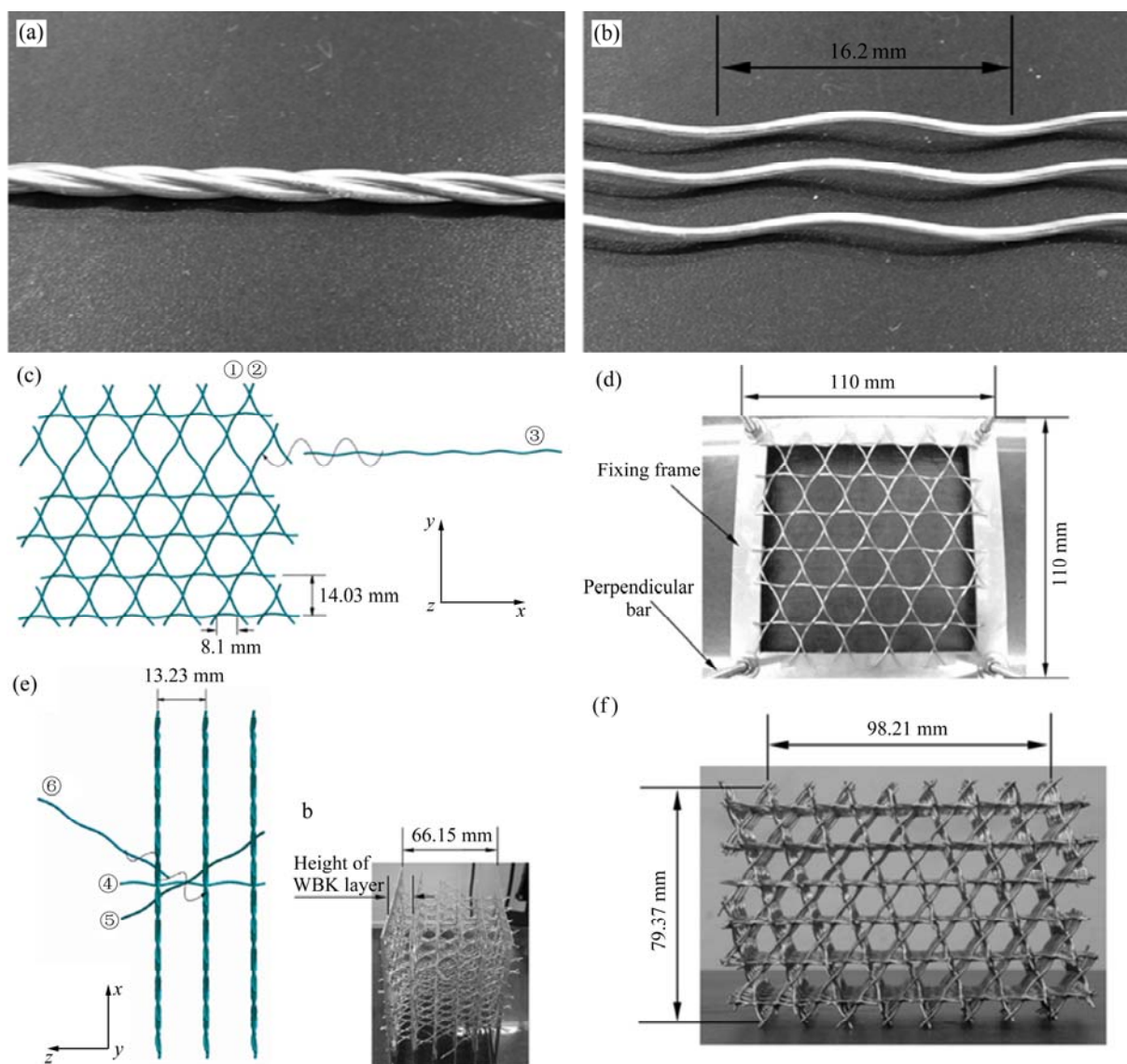


图 15 金属丝编织法制备 Kagome 点阵材料的工艺过程^[84]

Fig. 15 Process for fabricating Kagome lattice material by wire-woven^[84]: (a) Twisted three metal wires; (b) Helical wires; (c) In-plane assembly process for a Kagome plane; (d) Assembled Kagome plane; (e) Assembly process along out-of-plane directions and assembled multi-layered WBK core; (f) Accomplished WBK core: front view

将固定框架与组装的 WBK 分离, 得到 WBK(见图 15(f))。最后, 对 WBK 中每个相交节点进行钎焊来稳定结构。该方法不仅适用于普通 Kagome 结构, 也可以用来制备其他结构的点阵材料。LIM 等^[60]描述了 7 种点阵材料构型的制备方法及其性能优点, 具体为: 直八角形桁架结构(Straight bulk octet), 编织的 Kagome 结构(Bulk woven Kagome), 圆形弹簧 Kagome 结构(Circular spring Kagome), 六角形弹簧 Kagome 结构(Hexagonal spring Kagome), 双线八角形桁架结构(Dual wired octet)和双线 Kagomes 结构(Dual wired Kagome), 如图 16 所示。金属丝编织法适用于任何可以拉成线材的合金。

卡扣法采用桁架卡扣组装的方式来制备点阵材料。以 Ti-6Al-4V 八角形桁架结构为例^[43], 其具体工艺为: 首先通过水射流切割 Ti-6Al-4V 片材来制备一排排的桁架(见图 17(a))和开孔的中间面板(见图 17(c)), 然后将一部分桁架平行排列, 另一部分桁架 90 度卡入前一部分的凹槽中围成金字塔形的空隙形状, 通过控制节点区域中的狭缝公差, 可以以这种方式组装机械稳定的金字塔形桁架卡扣配合平面。然后将桁架层平面卡入中间面板的十字形中, 并重复此过程, 从而形成八角形桁架点阵材料。在节点处相遇的支柱之间的最大间隙(由水射流切割过程的公差决定)约为 90 μm 。

挤压线切割法是一种复合方法, 它由挤压和电

火花加工(Electrodischarge machining, EDM)两种方法组合而成。QUEHEILLALT 等^[61]采用该方法成功制备出 6061 铝合金夹芯点阵材料, 工艺过程为: 首先将合金经模具挤压成芯和面板一体的夹芯结构, 之后将挤压材经过固溶、水淬和热处理至 T6 状态。然后在垂直于挤压方向通过 EDM 除去交替的三角形部分, 从而形成金字塔形的夹芯点阵材料, 如图 18 所示。但传统方法制作点阵材料不仅存在各种各样的缺点^[33, 35, 45], 而且耗时长, 后处理繁琐, 能耗高, 材料利用率低^[62]。

2.2 点阵材料的增材制造方法

增材制造(Additive manufacturing, AM)是一种通过材料的逐层累加来制造实体零件的新型工艺^[63]。美国材料与实验协会(ASTM)将增材制造定义为: 依据三维 CAD 数据将材料连接来制作物体, 相对于减法制造它通常是逐层累加过程。依据 ASTM 2972 标准, 增材制造可分为粘合剂喷射成形技术(Binder jetting)、定向能量沉积技术(Directed energy deposition)、熔融沉积成形技术(Material extrusion, Fused deposition modeling, FDM)、材料喷射成形技术(Material jetting)、粉末床熔融成形技术(Powder bed fusion, PBF)、层积成形技术(Sheet lamination)和光固化成形技术(Vat photopolymerisation)。

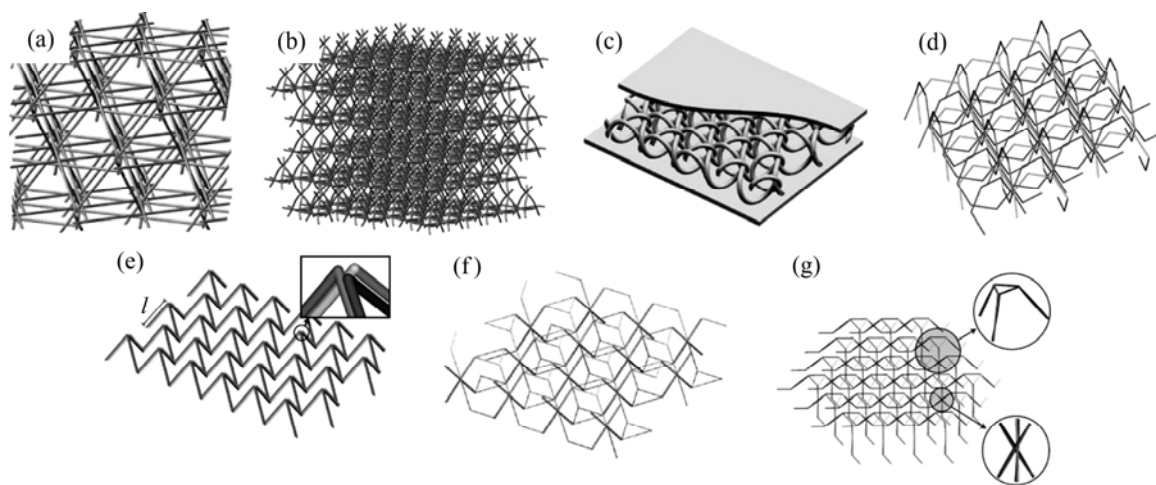


图 16 金属丝编织法制备的结构^[60]

Fig. 16 Structure fabricated with wires^[60]: (a) Straight bulk octet; (b) Bulk woven Kagome; (c) Circular spring Kagome; (d) Hexagonal spring Kagome; (e) Dual wired octet; (f) Dual wired Kagome-1; (g) Dual wired Kagome-2

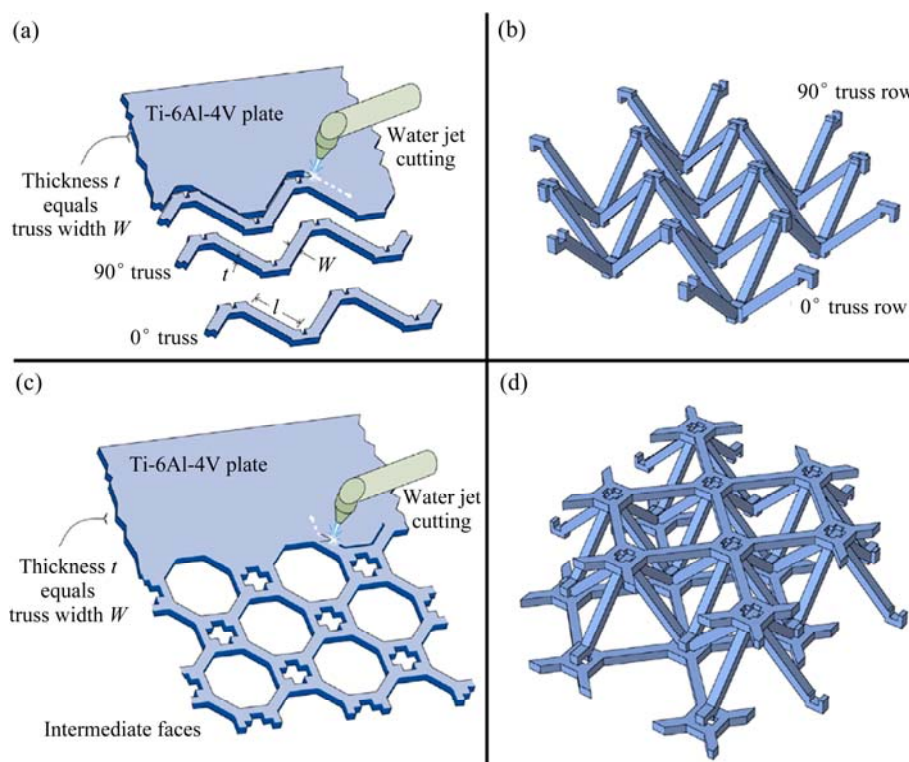


图 17 卡扣法制备桁架和组装方法的示意图以及八角形桁架 Ti-6Al-4V 点阵材料的制备^[43]

Fig. 17 Schematic illustration of “snap-fit” truss fabrication and assembly method for making Ti-6Al-4V octet-truss lattice^[43]: (a) Lattice truss fabrication; (b) Truss assembly; (c) Open face sheet fabrication; (d) Octet-truss lattice assembly

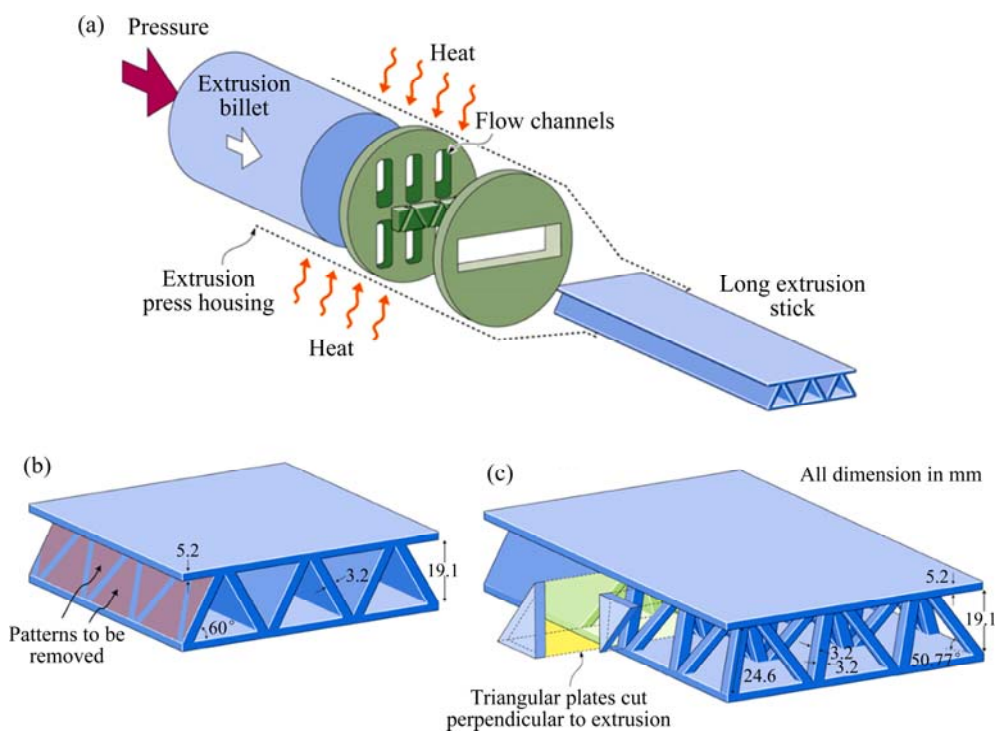


图 18 挤压线切割法示意图^[61]

Fig. 18 Schematic illustration of extrusion and electrodischarge machining (EDM) method^[61]: (a) Extrusion process used to produce 6061 aluminum corrugated sandwich structures; (b)–(c) Regions in corrugated core removed by electrodischarge machining to create pyramidal lattice core sandwich panel structure

与传统制造方法相比,增材制造更具适应性和精确性^[28,85],由于它们能够通过仅将材料放置在需要的位置来制备点阵结构,并且能够将多层点阵结构连接在一起,而不需要传统制造工艺所需的进一步的强度和灵活性的后处理。

PBF 是制备点阵材料的最常见的增材制造技术,它包括激光选区烧结技术^[86-89](Selective laser sintering, SLS)和激光选区熔化技术^[90-93](Selective laser melting, SLM)、电子束熔化技术^[94-98](Electron beam melting, EBM)。SLS 和 SLM 本质相同,前者利用粉末材料(金属粉末或非金属粉末)在激光下烧结的原理,在计算机控制下层层堆积成形,一般疏松多孔;后者利用高功率密度的激光束直接熔化金属粉末,获得冶金结合,材料致密性接近 100%。SLS 过程会导致零件内部产生空洞和不准确之处,从而可能导致过早失效^[89]。相比之下,SLM 可以将粉末加热到熔点,从而形成均匀的零件。但是 SLM 的原料局限于金属^[28]。EBSM 与 SLM 的工作流程相同,但使用的热源不是激光,而是真空下的电子束。它的原料也只能是金属粉末^[28]。

YUAN 等^[87]采用 SLS 制备了热塑性聚氨酯(Thermoplastic polyurethane, TPU)三维点阵材料,并系统研究了粉末材料的合理选择、粉末物理性能和热性能的评价、制备工艺的优化,得出降低扫描速度是提高粉末熔合性、打印柔软、柔韧超材料的有效途径。XIAO 等^[93]采用 SLM 制备了面心立方体(Face centre cube, FCC)、顶点立方体(Vertex cube, VC)和边缘中心立方体(Edge centre cube, ECC)结构的 316L 不锈钢点阵材料,并探讨了影响成品的表面质量的工艺因素。SING 等^[93]以钛钽合金为原料,DALLAGO 等^[91]以 Ti-6Al-4V 合金为原料制备出点阵材料,系统研究了 SLM 工艺参数对制备的点阵材料的尺寸精度、孔隙率、屈服强度和弹性模量等力学性能的影响。XIAO 等^[95]分别采用 EBM 和 SLM 制备了 Ti-6Al-4V 菱形十二面体点阵材料,发现 SLM 制品具有更高的强度;EBM 制品具有明显的尺寸敏感性,当试件尺寸小于 4 mm 时,力学性能明显降低,但在 SLM 制品中,尺寸效应可以忽略不计;EBM 样品的表面不规则性比 SLM 样品的表面不规则性更明显;EBM 制品具有各向异性,具有

明显的结构,而 SLM 制品趋于各向同性。

FDM 也是制备点阵材料应用较多的增材制造技术^[67-68,88,99-101]。FDM 通过将熔融的丝状材料从喷头挤出,按预定的轨迹沉积后凝固,层层堆积形成最终产品。DONG 等^[99]采用 Taguchi 方法对 FDM 制备点阵材料的工艺参数进行了优化,提高了印刷质量和材料的力学性能,并提出了“可制造单元”(The manufacturable element)的概念,将点阵材料的几何结构信息和制备过程联系起来。MISHRA 等^[101]采用 FDM 以 PLA 和 ABS 两种不同聚合物为原料制备了三周期极小曲面(Triple periodic minimal surface, TPMS)点阵材料。

值得注意的是,更小尺度的结构单元,如纳米尺度难以采用增材制造技术直接实现制备,往往需要联合其他方法来实现制备。SCHAEDLER 等^[34]采用自蔓延光导聚合技术(Self-propagating photopolymer waveguide technique)结合化学镀制备出了 Ni-P 纳米点阵材料。JANG 等^[36]采用双光子光刻(Two-photon lithography, TPL)、激光直写(Direct laser writing, DLW)工艺与原子层沉积(Atomic layer deposition, ALD)制备出了空心陶瓷纳米点阵材料,如图 19 所示。在各尺度上可控制不同的结构特征:在 mm~cm 尺度,可控制结构单元的对称性、点阵支柱的空间位置;在 μm ~mm 尺度,可控制管的直径、壁厚、节点几何;在 nm~ μm 尺度,可控制微观结构、多层、成分。MEZA 等^[39]结合 TPL、DLW、ALD、聚焦离子束铣削(Focused ion beam milling, FIB)等工艺制备出空心陶瓷纳米点阵材料。BAUER 等^[49]则在 DLW 制备的结构基础上热解制备出碳纳米点阵材料。ZHENG 等^[19]采用大面积投影微立体光刻(Large area projection microstereolithography, LAP μ SL)将可寻址空间光调制器(Addressable spatial light modulator, SLM)与协调光学扫描系统(Coordinated optical scanning system)相结合制备出 Ni 纳米点阵材料。

然而,增材制造在制备点阵材料时也有其不足与限制。AEMAN^[50]和 HELOU 等^[28]对增材制造在点阵材料制备方面的优缺点进行了综述。从加工过程角度,制备过程中需要支撑物来散热^[102]和避免悬垂表面坍塌^[62,103]、制备完成后未熔化的粉末的

移除^[50]、后处理^[104]是采用增材制造所需考虑的限制。从成品角度, 在生产更大规模的点阵材料时, 增材制造具有尺寸限制^[47]。此外, 连通性、成形材料力学性能的各向异性、残余应力与变形等金属增材制造本身所具有的工艺约束^[105]也需予以考虑。由于技术过程的不同, 各增材制造技术可能导致的材料缺陷及其对性能的影响也有各自特点。例如, 在 SLM 中, 金属粉末通过熔化、凝固从而达到冶金结合, 而冷却速度和熔化后收缩的差异会导致残余应力, 不利于点阵材料的强度等力学性能^[106-107]。在 FDM 中, 熔融细丝层层堆积, 通常层间结合界面的缠结网络和晶体密度均低于丝材本体, 从而引入薄弱结构和空隙, 造成点阵材料的各向异性, 包括但不限于拉伸性能、压缩性能、弯曲性能、冲击性能、导热性能^[108]。

需明确的是, 传统制造方法与增材制造并不是完全对立的, 两者可互相结合起来制备点阵材料, 并且可以克服增材制造的一些缺陷。LIU 等^[68]将卡扣法引入 FDM 制备体心立方点阵材料。其具体工艺过程为: 首先使用 FDM 分别打印出材料的桁架和面板, 且确保所有挤出的纤维沿支柱的长度方向

分布, 然后将打印部件相互卡扣装配并插入带有预制缺口的面板中。根据机器的印刷精度在凹槽中预留合理的公差, 使各部件之间能够顺利匹配。最后, 用强力胶将连接的节点粘连在一起。与相对密度相同的传统整体式 FDM 结构相比, 卡扣式 FDM 结构的峰值强度、压缩模量和单位体积能量吸收率等力学性能有明显改善, 且具有良好的表面质量和较高的印刷效率。图 20 所示为整体式 FDM 法和卡扣式 FDM 法的工艺过程对比。增材制造辅助熔模铸造技术也是一种极有前景的结合方法。其工艺过程为: 首先采用熔丝制造(Fused filament fabrication, FFF)制作点阵结构芯模, 然后将该芯模用石膏渗透, 经过一定的温度周期后, 硬化石膏并烧掉芯模, 然后在真空中进行铸造, 如图 21 所示。该方法可以制造出精细的金属点阵材料, 并且没有传统 AM 路线的各向异性^[109]。因此, CARNEIRO 等^[109]认为与其它 AM 方法(如 SLM、EBM)相比, 该方法是一种很有前途的低成本的点阵材料制备方法。CARNEIRO 等^[110]通过在宏观、介观、微观尺度上的结构表征, 进一步佐证了该观点, 并提出通过改进熔丝工艺来进一步提高尺寸保真度。

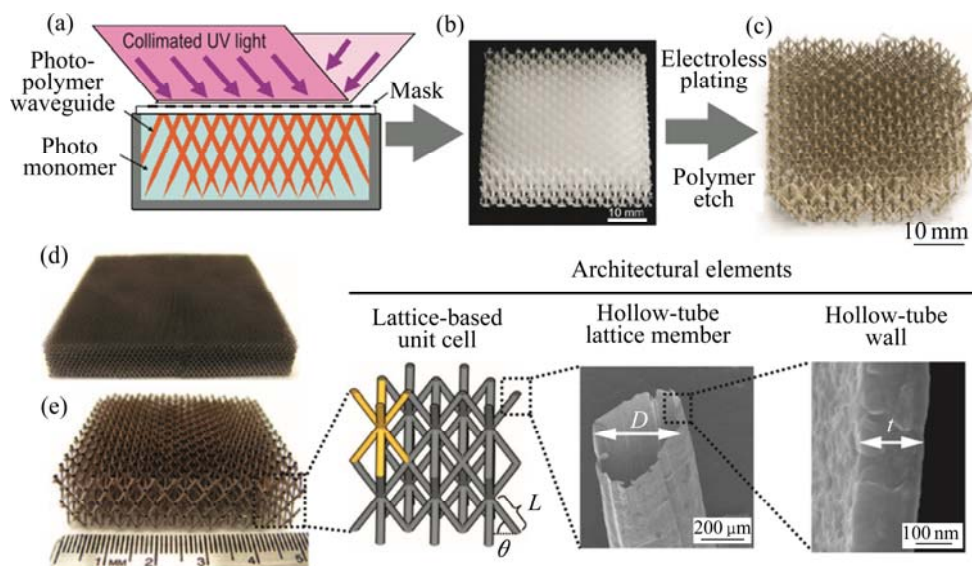


图 19 超轻点阵材料的设计、处理和结构单元^[34]

Fig. 19 Design, processing and cellular architecture of ultralight microlattices^[34]: (a) Polymer microlattice templates fabricated from three-dimensional array of self-propagating photopolymer waveguides; (b) Open-cellular templates are electroless plated with conformal Ni-P thin film followed by etch removal of template; (c) Image of lightest Ni-P microlattice fabricated with this approach: 0.9 mg/cm^3 ; (d)–(e) Images of two as-fabricated microlattices along with breakdown of relevant architectural elements

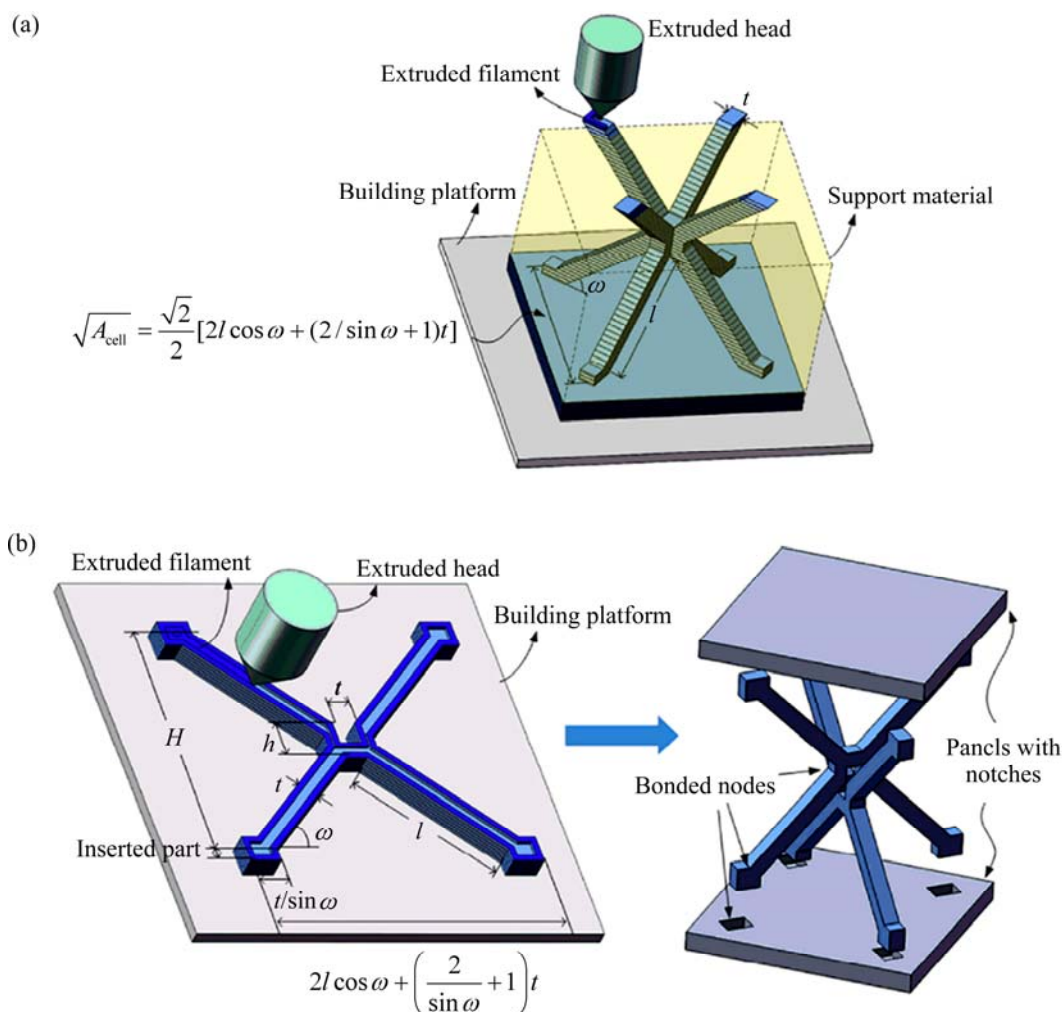


图 20 两种制作方法的原理图^[68]

Fig. 20 Schematics of two fabrication methods^[68]: (a) Integrated FDM method, whole lattice structure printed integrally layer by layer; (b) Snap-fitted FDM method, snap-fit trusses printed firstly, and then assembled and bonded together to make BCC lattice structure

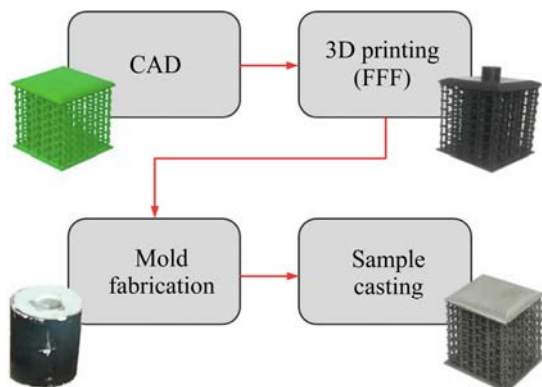


图 21 增材制造辅助熔模铸造技术的流程图^[109]

Fig. 21 Flowchart for proposed additive manufacturing assisted investment casting technique^[109]

3 点阵材料的性能与应用

目前,关于点阵材料的性能研究主要集中在力学性能方面。点阵材料具有孔隙率高^[3, 5]、相对密度低^[5, 36]、比刚度高^[2, 5-6]和比强度高^[2, 5-6]等性能特点,使其在结构轻量化设计中被广泛的应用。值得注意的是,这些力学性能均是由自身结构的几何特征而不是由化学成分所决定的。因此,点阵材料也被称之为“力学超材料”(Mechanical metamaterials)^[41]。此外,某些点阵材料还表现出一些常规材料所不具备的力学性能,例如,高压压缩弹性^[34, 39]、高拉伸弹性^[19]、超低密度下几乎恒定的比

强度和比刚度^[41]、负泊松比^[38]和接近理论值的强度^[49]等。点阵材料在功能性能方面也表现出优异和特殊的性能, 例如双负折射率^[57]、传热散热^[5]、零/负热膨胀^[48]、形状记忆^[111]、自我愈合^[111]和能量吸收^[40]等。因此, 点阵材料可实现多功能集成^[5]和结构功能一体化^[7], 在先进工业设备中具有广阔的应用前景。

3.1 力学性能

点阵材料具有高比强度和高比刚度力学性能特征, 部分点阵材料的强度和刚度表现优异。ZHENG 等^[41]报道的一类点阵材料即使在超低密度下, 也能保持单位质量密度几乎恒定的刚度, 如图 22 所示。这一性能来源于近乎各向同性的、具有高度的结构连通性和纳米级特征的微尺度单元格网络, 其结构构件被设计为在拉伸或压缩中承载载荷。并且该类点阵材料在超过三个数量级的密度范围内都表现出超高的性能, 而与组成材料无关。此外, 多种类型的点阵材料的特性与原始材料的密度成线性比例关系, 并填充了材料特性空间的某些空白区域, 如图 23 所示。PHAM 等^[112]将物理冶金学和建筑超材料结合, 提供了设计和制造具有所需强度和韧性的耐损伤的建筑材料的方法。GREGG 等^[51]采用注塑成型制备了纤维增强聚合物复合点阵材料, 达到 8.41 MPa 的刚度和 19 kPa 的强度。JIANG 等^[36]通过原位纳米力学实验和有限元分析表明, 即使在多次变形循环后, 点阵材料的抗拉强度仍可达到 1.75 GPa, 没有破坏。BAUER 等^[49]通过聚合物微晶格在热解过程中 80% 的收缩生成了生成单个支柱小于 1 μm , 直径小于 200 nm 的超强玻璃碳纳米点阵材料, 其材料强度高达 3 GPa, 大约相当于玻璃炭的理论强度。点阵材料由于重量轻、强度高, 在飞机、火箭等航空航天领域^[113]、汽车领域^[4, 9]的结构设计中逐渐得到应用。

点阵材料还表现出超弹性力学性能特征, 且不受材料成分影响。SCHAEDLER 等^[34]得到的金属微点阵材料密度 $\rho \geq 0.9 \text{ mg/cm}^3$, 压缩应变超过 50% 后完全恢复, 能量吸收类似于弹性体。MEZA 等^[39]制备出氧化铝薄壁纳米点阵材料, 该材料同时具有超轻、坚固和吸收能量的特点, 并且在超过 50% 的

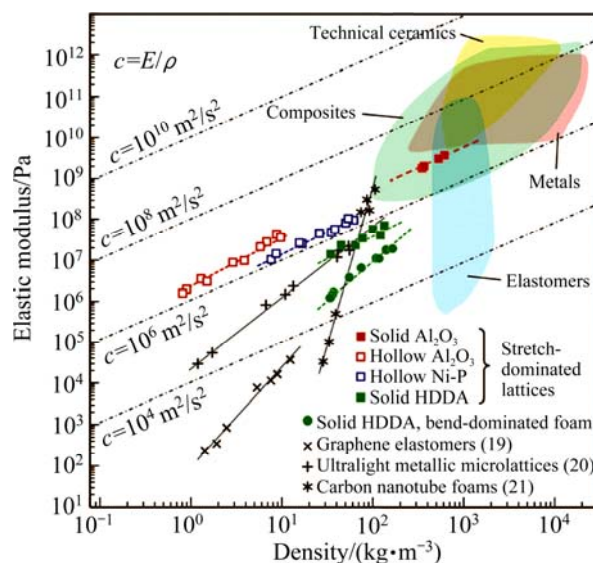


图 22 点阵材料和已报道材料的压缩刚度与密度的关系的 Ashby 图^[41]

Fig. 22 Ashby chart plotting compressive stiffness versus density for ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials and other previously reported materials^[41] (Dotted lines indicate contours of constant stiffness-density ratio $c=E/\rho(\text{m}^2/\text{s}^2)$)

应变压缩后可以恢复其原始形状, 因为这种纳米点阵材料能够通过壳体屈曲产生弹性变形, 克服了以往研究中由于陶瓷的脆性和对缺陷的敏感性使其作为结构材料使用时并不理想的情况。ZHENG 等^[19]通过多级结构获得了具有高拉伸弹性(>20%)的 Ni 合金点阵材料, 而该合金由于其成分组成之前被认为是脆性的, 这归因于混合(弯曲-拉伸为主)多级结构的组合, 最小的一级到具有纳米级厚度的节点。值得注意的是, BAUER 等^[114]设计并制备出了张拉整体结构的聚合物点阵材料, 该结构具有独特的离域变形机制, 可通过抑制受压构件不稳定性传播从而防止局部变形。该材料被称为张拉整体超材料(Tensegrity metamaterials), 它表现出前所未有的抗破坏性, 可变形能力提高了 25 倍, 能量吸收能力比同等强度的其他点阵材料提高了几个数量级, 它与拉伸主导型和弯曲主导型结构的点阵材料的变形情况对比如图 24 所示。张拉整体超材料在可重复使用的冲击防护系统、大振幅隔振装置和自适应承载结构等领域具有重大应用潜力。

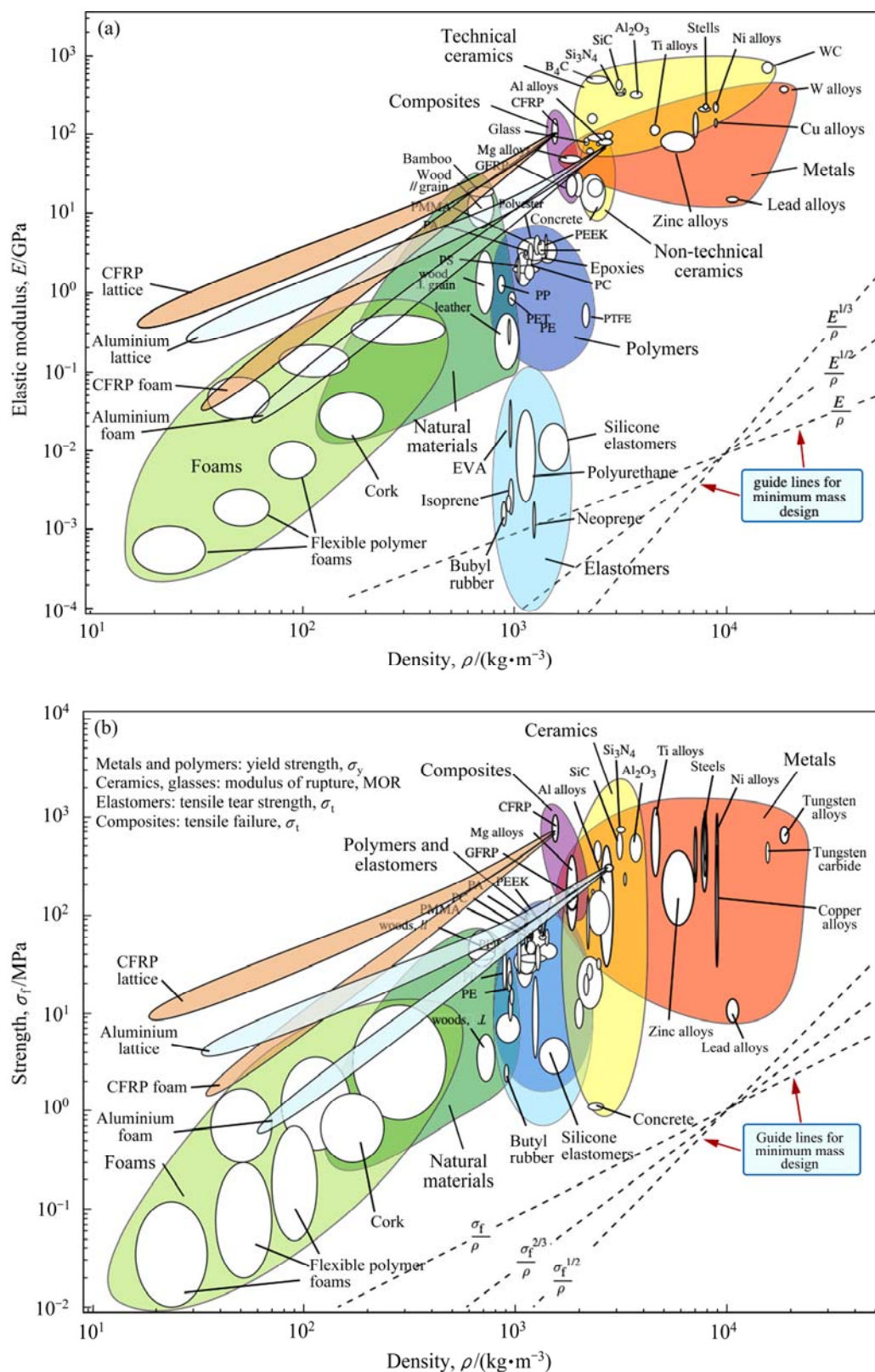


图 23 工程材料的 E 对 ρ 和 σ_f 对 ρ 的材料特性图^[64]

Fig. 23 Material property charts of E versus (a) ρ and σ_f versus ρ (b) for engineering materials^[64] (PMMA: Polymethyl methacrylate; PA: Polyamide; PEEK: Poly ether ether ketone; PS: Polystyrene; PP: Polypropylene; PET: Polyethylene terephthalate; PE: Polyethylene; PC: Polycarbonate; PTFE: Polytetrafluoroethylene; CFRP: Carbon fibre reinforced polymer; EVA: Ethylene vinyl acetate)

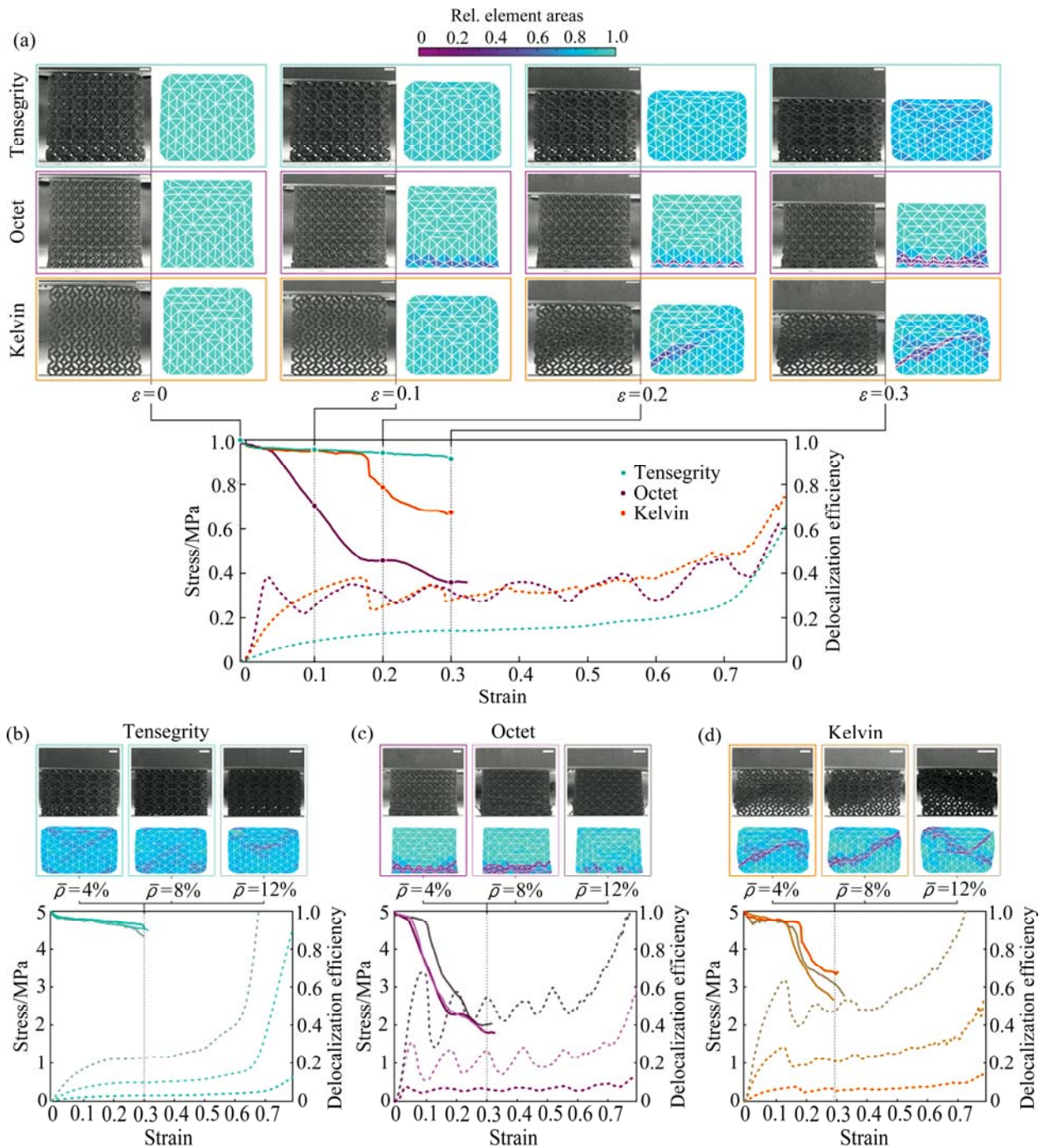


图 24 相对密度为 4% 的张拉整体、八角形桁架和十四面体开尔文结构的点阵材料的单轴压缩变形情况^[114]

Fig. 24 Uniaxial compression of 4%-relative density tensegrity, octet, and Kelvin specimens^[114] (Stress-strain responses and delocalization efficiency curves derived from deformation maps, showing failure from system-level instability directly correlated to localized deformation)

点阵材料的疲劳性能近来受到关注。DALLAGO 等^[115]对 Ti-6Al-4V 立方点阵材料的疲劳性能进行研究, 结果表明, 在节点处对支撑圆角进行平滑处理可以显著改善 S-N 曲线, 采用 PBF 时的

印刷方向对疲劳强度和破坏行为也有影响。HOOREWEDER 等^[116]提出了一种新的局部应力法用于点阵结构的疲劳分析, 成功应用于 SLM 制备的 Ti6Al4V 和 CoCr 金刚石点阵结构的疲劳性能评

估, 并对 SLM 后的热处理和表面处理对疲劳性能的影响进行了研究。ZARGARIAN 等^[117]采用数值模拟的方法, 研究了不同因素对增材制造的点阵结构高周疲劳破坏的影响, 并提出了预测其疲劳强度的幂律表达式。

点阵材料在断裂方面的分析与应用也在增多。GENG 等^[118]采用有限元方法模拟了菱形十二面体和 2 种不同堆积方向的体心立方点阵材料的断裂模式, 研究了 3 种点阵结构断裂模式的差异以及损伤变量的演化过程。GU 等^[119]研究表明八角桁架点阵结构的断裂韧性几乎是各向同性的, 但其裂纹路径强烈地依赖于点阵取向, 且在裂纹扩展过程中其断裂载荷增加, 并表明线弹性断裂力学(Linear elastic fracture mechanics, LEFM)可以很好地应用于具有线性裂纹前缘的结构。DAYNES 等^[120]提出了一种自动尺寸优化方法, 使点阵结构向易受潜在损伤的区域增韧, 从而提高初始断裂韧性。GAO 等^[121]提出一种通过数字光处理(Digital light processing, DLP)的光学编程方法来人工设计点阵材料中的裂纹路径, 研究了一种受生物启发的垂直裂纹偏转模式, 可以定量地控制点阵结构的断裂能, 显著提高了点阵结构的断裂抗力。

点阵材料的其他力学性能也表现突出。ERIK 等^[38]制造出了泊松比($\nu=-0.5$)、体积模量为固体基体材料体积模量的 0.2% 的各向同性点阵材料。CLAUSEN 等^[42]通过对结构单元进行优化, 研制出泊松比在 $-0.8\sim 0.8$ 之间可调的均匀点阵材料, 甚至在 20% 以上的大变形情况下, 该点阵材料的泊松比几乎是恒定的。张弥等^[122]通过理论、实验、数值模拟研究了钛合金点阵夹芯结构的弯曲性能, 表明其列数越多, 结构承载能力越强。XU 等^[53]提出了两种增强抗屈曲性能的复合点阵材料, 并对其力学性能进行了测试和理论分析。刘培生等^[123]将多孔材料简化为八面体杆点阵材料模型, 通过数理关系解析出该模型承受不同载荷形式时的破坏模式, 并得出不同受力状态下的强度设计判据, 为点阵材料在相应承载模式下的应用提供参考。此外, 基于拓扑优化可实现各种奇特但可行的力学性能, 如超轻、超刚度、刚度可控、剪切模量趋近于 0(剪切模量远小于体积模量, $G \ll K$)、负压缩性和负泊松比^[54]。

3.2 热学性能

点阵材料由于其有序结构, 较之无序的多孔材料具有更好的热性能。KAUR 等^[55]通过实验和数值模拟得出: 在相似的孔隙率下, 与无序多孔材料相比, 特定的复杂单胞拓扑可以提供显著的传热强化, 并且点阵材料可能会有更高的间隙换热系数。此外, 点阵材料设计的自由度允许不同的孔隙率, 从而实现更高的有效导热系数。在质量流速约为 0.27 kg/s 时, 点阵管式换热器的传热效率比同等体积的翅片管式换热器高出约 60%, 这是由于特定的拓扑结构具有更高的封装密度。ZHAO 等^[124]也证明了点阵材料具有良好的承载和传热性能, 可用于航空航天、动力工程等领域的板翅式换热器。应用点阵材料作为管式换热器中热管的芯子、并利用沸腾换热的强化传热特性和涡轮叶片的发汗冷却机理来替代传统技术是很有前途的^[55]。

XU 等^[48]利用八角型点阵结构单元中的四面体中出现的两种不同的热膨胀机制得到可在正负间调控的、范围较大的热膨胀系数值, 并且不会损失结构效率。这种双材料结构设计新颖、简单, 易于制造, 非常适合广泛的应用, 如卫星天线、空间光学系统、天基反射镜、精密仪器、热执行器和机械系统。

3.3 其他性能

点阵材料可吸收电磁波。QIAO 等^[125]制备出了一种由中空短碳纤维(SCF)/ Fe_3O_4 /环氧球填料和环氧树脂基体组成的新型吸波点阵结构复合材料, 该复合材料在 2~18 GHz 范围内的有效吸收带宽为 1.8 GHz, 且抗压强度较高, 密度较低。这种具有优异力学性能的轻质吸波材料在军事隐身和电磁防护方面具有潜在应用。

点阵材料可减弱声波。WU 等^[46]利用谱元法(Spectral element method, SEM)研究三维 Kagome 点阵的振动带隙特性并验证了其适用性。结果表明由于其禁带特性, 周期三维 Kagome 点阵具有良好的隔振性能。在讨论了结构参数和材料参数对振动带隙的影响的基础上, 设计了一种新型的三维 Kagome 点阵结构, 以获得更好的隔振性能。MUHAMMAD 等^[56]研究了一种具有宽带和多带隙

特性的点阵超材料, 通过对规则的点阵结构进行了轻微的结构修改, 成功地显著放大了这些轻质周期点阵结构的减振能力, 所提出的轻质点阵超材料可以有效地应用于任何长度尺度的声波/弹性波传播控制。点阵材料在不同工程应用的微尺度和宏观尺度的轻质声振控制装置方面具有潜在应用。

点阵材料在磁学和光学领域也有潜在应用。ARWOOD 等^[23]指出 Kagome 结构是几何上最受挫的磁性系统。此后, 点阵材料在磁性的、手性的、导电的、光学的方面的研究增多, DANIEL^[126]对它们进行了系统归纳。近年来, ZARE 等^[127]利用紧束缚模型中的实空间格林函数方法研究了准一维硼三角 Kagome 点阵(1D-BTKL)模型中的电子性质和交换磁相互作用。KWAK 等^[32]利用 Wang-Landau 抽样算法, 研究了外磁场中基于焓涨落的 Kagome 点阵结构 Ising 模型比热反常的未知性质。CHEN 等^[57]提出了星形结构的点阵材料, 该材料在 8760~9574 Hz 的频带中表现出双负折射率特性, 且通过本征频率轮廓和负折射模拟进一步证实, 星形结构的折射率在 9380 Hz 时约为-1, 表明透镜能够在此频率下聚焦声波。且其固体性质使其更适合在水环境中使用, 可以开辟基于超材料的超透镜的新的实际应用。

点阵材料也可用于形状记忆领域。YU 等^[111]提出了一类通过断裂和形状记忆辅助愈合实现的可变形点阵材料。该点阵材料由分子设计的光聚合物通过增材制造而成, 有愈合骨折、记忆形状等功能。由于它可以恢复与骨折相关的变形, 然后愈合断裂界面, 从而能够愈合格子翼损伤、I 型断裂、凹痕诱导的碰撞和异物撞击。这种耐用、易记忆、可变形的点阵材料可能会在下一代飞机壁板、汽车骨架、防弹衣、冲击减震器、减振器和声学调节器中得到广泛的应用。

点阵材料还具有阻尼特性。SCHAEDLER 等^[40]对点阵材料的能量吸收性能进行了定量实验与理论分析, 点阵材料在压缩时, 由于其吸收能量的能力和通过延长冲击持续时间来降低冲击强度的能力, 可以减轻冲击载荷, 如图 25 所示。虽然泡沫塑料是当今使用的最常见的能量吸收材料, 但定义明确、结构有序的点阵材料有机会创造具有新性能

的能量吸收材料。

王向明等^[7]系统分析出点阵材料是实现结构功能一体化的优良载体, 由于其结构特性所具有的富余空间, 可实现光、电、力、热、声、磁的有效融合。按其融合于结构的功能要素的种类, 可分为二元一体化、三元一体化和多元一体化, 如图 26 所示。TAO 等^[128]也论述了可在点阵材料中实现多功能集成和结构功能一体化。虽然基于拓扑优化的结构蓬勃发展且有相关算法^[129], 但由于考虑了多种功能的物理场分析求解困难, 目前三元一体化和多元一体化技术成熟度相对较低^[7]。LI 等^[128]提出了一种功能-结构一体化点阵材料的设计方法, 包括点阵结构拓扑优化和变密度点阵填充、点阵材料的多功能特性、仿真和实验验证三个部分。卢天健^[130]将无序多孔材料和点阵材料复合, 设计出微穿孔混杂多孔三明治结构, 该结构集成了超轻、承载、吸能、吸声等多种功能。周强等^[131]建立航天器结构功能系统分析技术(Function system analysis technology, FAST)模型, 分析了多层点阵结构实现航天器舱壁结构承载、隔热、防护空间碎片和微流星撞击、辐射防护功能的多功能性的可行性。VENUGOPAL 等^[132]提出一种基于密度的拓扑优化模型生成多材料点阵结构的方法, 优化后的点阵结构具有较高的机械刚度、较低的热膨胀系数和较低的导热系数, 可用于承受机械和热载荷的航空航天部件。但目前尚未有文献报道实现了三元一体化和多元一体化的实物。

此外, 点阵材料在生物医用和能源化学领域也有应用。ZHANG 等^[133]制备了多通道点阵结构的三维 Zn 金属阳极, 并通过模拟和原位微观观察表明该阳极可以有效改善电场分布并诱导 Zn 均匀沉积, 而没有 Zn 枝晶的生长。具有可调的三维多通道结构的导电金属点阵材料制备简单、成本较低, 为开发其他高性能金属(如 Li、Na、K、Mg、Al)电池提供了新的机遇。点阵材料除了具有高强度等优异的力学性能, 还具有很好的生物相容性, 可以被设计成人体组织和骨骼的形状, 以取代患病的器官, 因此能够满足特定的要求, 在医学领域也得到了广泛的应用^[134-135]。点阵材料的部分应用如图 27 所示。

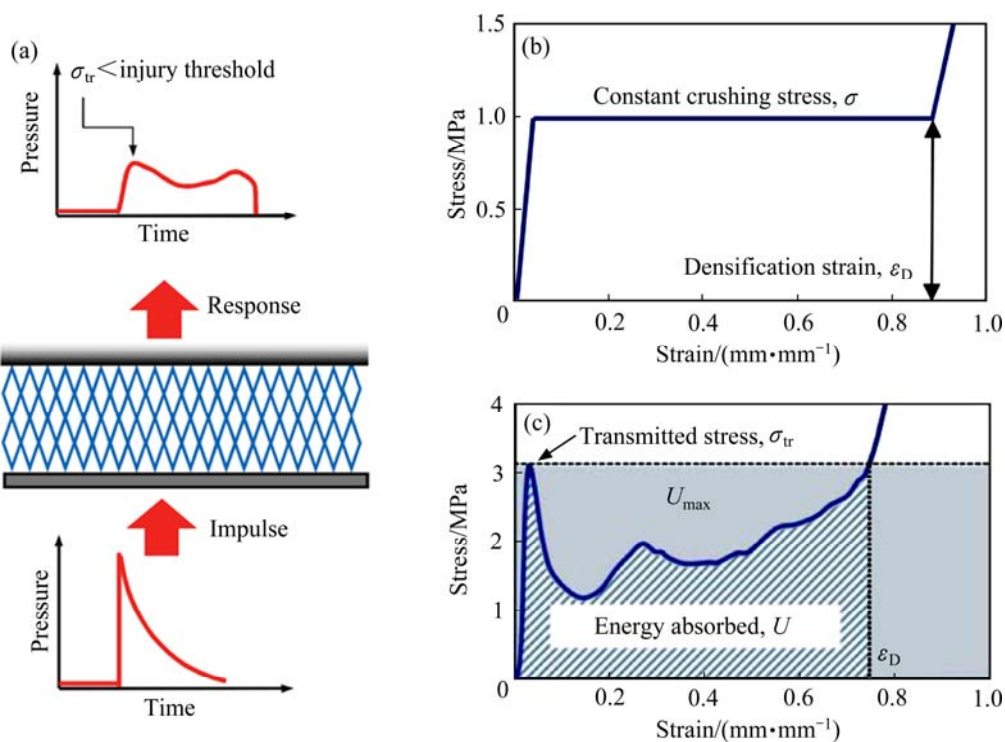


图 25 点阵材料的能量吸收性能^[40]

Fig. 25 Energy absorption properties of lattice materials^[40]: (a) Schematic diagram showing how impulsive load mitigated by cellular material; (b) Ideal response of cellular energy absorbing material; (c) Actual behavior of cellular lattice structure

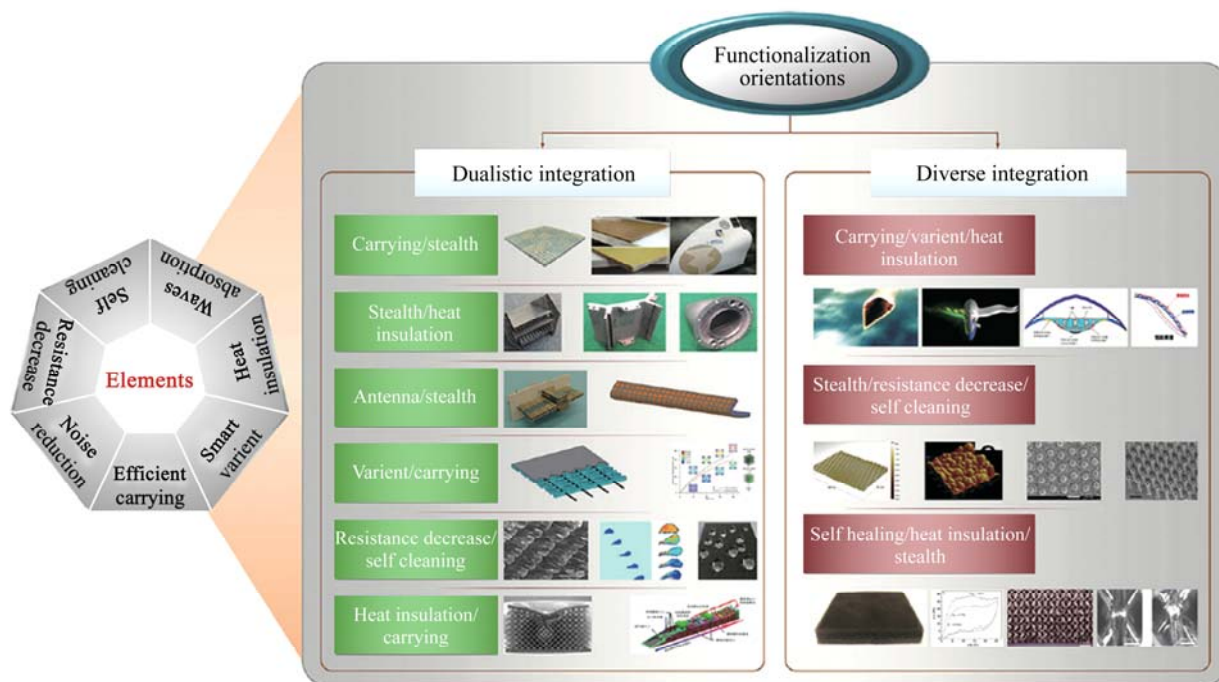


图 26 飞机的主要多功能需求^[7]

Fig. 26 Main multi-functional requirements of aircraft^[7]

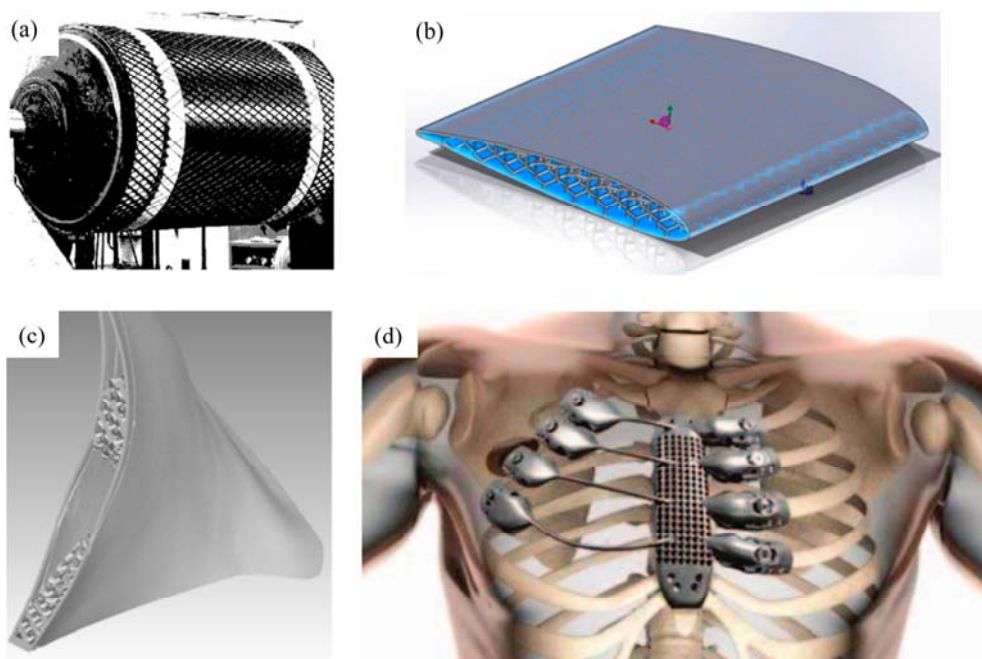


图 27 点阵材料的应用^[62]: (a)螺旋肋的缠绕^[136]; (b)航空器机翼结构^[137]; (c)风扇叶片^[138]; (d)生物医学植入物^[16, 139]
Fig. 27 Applications of lattice structures^[62]: (a) Winding of helical rib^[136]; (b) Aerial vehicle wing structure^[137]; (c) Fan blade^[138]; (d) Biomedical implant^[16, 139]

4 结束语

点阵材料是一类结构设计性强、力学与物理性能优异的新型材料,在光、电、力、热、声、磁、生物化学等领域均具有巨大的应用潜力。点阵材料有以下几个发展方向。

1) 丰富点阵材料的构型种类。点阵材料的众多优异的性能主要来源于其构型。基于数学算法的构型潜力巨大,可尝试将数学领域空间几何方面的研究进展借鉴到点阵材料的构型设计中,且在拓扑优化背景下的结构设计与优化方法方面进一步创新。

2) 改进点阵材料的制备方法。制备方法的精度与效率的兼顾有待提高,制造成本需进一步降低,从而为大范围推广应用提供保障,且需进一步研究多材料点阵结构制备技术。

3) 推进点阵材料多领域大规模的应用。点阵材料的功能多样且在相关应用场景优于部分现用材料,在众多领域均有应用潜力。点阵材料的大范围应用可以起到节约材料、降低能耗等作用,且能推动点阵结构设计制造技术的进一步发展,具有巨大的经济和社会效益。

REFERENCES

- [1] BEYER C. Strategic implications of current trends in additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(6): 064701.
- [2] 范华林, 杨卫. 轻质高弱点阵材料及其力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2007, 37(1): 99-112.
FAN Hua-lin, YANG Wei. Development of lattice materials with high specific stiffness and strength[J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(1): 99-112.
- [3] 曾嵩, 朱荣, 姜炜, 等. 金属点阵材料的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(3): 18-23, 35.
ZENG Song, ZHU Rong, JIANG Wei, et al. Research progress of metal lattice materials[J]. Materials Reports, 2012, 26(3): 18-23, 35.
- [4] 戴贵鑫, 吴士平. 超轻质微点阵结构金属材料的研究进展[J]. 铸造, 2020, 69(1): 1-10.
DAI Gui-xin, WU Shi-ping. Research progress of light and ultralight porous metal materials[J]. Foundry, 2020, 69(1): 1-10.
- [5] 卢天健, 何德坪, 陈常青, 等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 517-535.

- LU Tian-jian, HE De-ping, CHEN Chang-qing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2006, 36(4): 517–535.
- [6] TANCOCNE-DEJEAN T, DIAMANTOPOULOU M, GORJI M B, et al. 3D plate-lattices: An emerging class of low-density metamaterial exhibiting optimal isotropic stiffness[J]. *Advance Materials*, 2018, 30(45): 1803334.
- [7] 王向明, 苏亚东, 吴 斌, 等. 微桁架点阵结构在飞机结构/功能一体化中的应用[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(10): 16–25.
- WANG Xiang-ming, SU Ya-dong, WU Bin, et al. Application for additive manufacturing of lattice materials on integrated aircraft structures and functions[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(10): 16–25.
- [8] WONG K V, HERNANDEZ A. A review of additive manufacturing[J]. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 2012: 1–10.
- [9] 任晓雨, 肖丽英, 郝智秀. 类桁架点阵多孔材料的研究进展[J]. *机械设计与制造*, 2020(8): 288–291, 295.
- REN Xiao-yu, XIAO Li-ying, HAO Zhi-xiu. A review of lattice structure[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(8): 288–291, 295.
- [10] QUEHEILLALT D T, WADLEY H N G. Cellular metal lattices with hollow trusses[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(2): 303–313.
- [11] RAHMANI R, ANTONOV M, KOLLO L, et al. Mechanical behavior of $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ scaffolds filled with CaSiO_3 for implant applications[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(18): 3844.
- [12] SORO N, ATTAR H, BRODIE E, et al. Evaluation of the mechanical compatibility of additively manufactured porous Ti-25Ta alloy for load-bearing implant applications[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2019, 97: 149–158.
- [13] DUMAS M, TERRIAULT P, BRAILOVSKI V. Modelling and characterization of a porosity graded lattice structure for additively manufactured biomaterials[J]. *Materials & Design*, 2017, 121: 383–392.
- [14] VASILIEV V V, BARYNIN V A, RAZIN A F. Anisogrid composite lattice structures—Development and aerospace applications[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(3): 1117–1127.
- [15] 赵 冰, 李志强, 侯红亮, 等. 金属三维点阵结构制备技术的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(8): 2189–2200.
- ZHAO Bing, LI Zhi-qiang, HOU Hong-liang, et al. Research progress on fabrication methods of metal three dimensional lattice structure[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(8): 2189–2200.
- [16] TAO W J, LEU M C. Design of lattice structure for additive manufacturing[C]// 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA). Cleveland: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016: 325–332.
- [17] GIBSON L J. Modelling the mechanical behavior of cellular materials[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1989, 110: 1–36.
- [18] EVANS A G, HUTCHINSON J W, FLECK N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46(3/4): 309–327.
- [19] ZHENG X Y, SMITH W, JACKSON J, et al. Multiscale metallic metamaterials[J]. *Nat Mater*, 2016, 15(10): 1100–1106.
- [20] RACKLIFFE M E, JENSEN D W, LUCAS W K. Local and global buckling of ultra-lightweight IsoTruss® structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(2): 283–288.
- [21] KIM T H, LEE H U, KIM Y C. Development of a building structural system using an IsoTruss® grid[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 171: 1077–1084.
- [22] T.J. WEAVER D W J. Mechanical characterization of a graphite/epoxy IsoTruss[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2002, 13(1): 23–35.
- [23] ATWOOD J L. A molecular toolkit for magnetism[J]. *Nature Materials*, 2002, 1(2): 91–92.
- [24] DESHPANDE V S, ASHBY M F, FLECK N A. Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(6): 1035–1040.
- [25] HYUN S, TORQUATO S. Optimal and manufacturable two-dimensional, Kagomé-like cellular solids[J]. *Journal of Materials Research*, 2002, 17(1): 137–144.
- [26] WANG H, ROSEN D W. Parametric modeling method for truss structures[C]// LEE D E. Proceedings of ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Montreal: American Society of Mechanical Engineers. 2002, 36215: 759–767.
- [27] WANG A J, MCDOWELL D L. In-plane stiffness and yield

- strength of periodic metal honeycombs[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2004, 126(2): 137–156.
- [28] HELOU M, KARA S. Design, analysis and manufacturing of lattice structures: An overview[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2018, 31(3): 243–261.
- [29] NELISSEN W E D, AYAS C, TEKOGU C. 2D lattice material architectures for actuation[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 124: 83–101.
- [30] [30] SELLAMI K, KETATA H, BEN GHOLEN M H. Locally resonant phononic crystals band-gap analysis on a two dimensional phononic crystal with a square and a triangular lattice[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51(9): 311.
- [31] XUE H, YANG Y, GAO F, et al. Acoustic higher-order topological insulator on a Kagomé lattice[J]. *Nat Mater*, 2019, 18(2): 108–112.
- [32] KIM S Y, KWAK W. Specific-heat anomaly of the Kagomé-Lattice Ising model in a magnetic field[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2020, 77(8): 630–634.
- [33] WANG J, EVANS A G, DHARMASENA K, et al. On the performance of truss panels with Kagomé cores[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(25): 6981–6988.
- [34] SCHAEGLER T A, JACOBSEN A J, TORRENTS A, et al. Ultralight metallic microlattices[J]. *Science*, 2011, 334(6058): 962–965.
- [35] WADLEY H N G, FLECK N A, EVANS A G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(16): 2331–2343.
- [36] JANG D, MEZA L R, GREER F, et al. Fabrication and deformation of three-dimensional hollow ceramic nanostructures[J]. *Nat Mater*, 2013, 12(10): 893–898.
- [37] MANFREDI D, AMBROSIO E, CALIGNANO F, et al. Direct metal laser sintering: An additive manufacturing technology ready to produce lightweight structural parts for robotic applications[J]. *La Metallurgia Italiana*, 2013, 105: 15–24.
- [38] ANDREASSEN E, LAZAROV B S, SIGMUND O. Design of manufacturable 3D extremal elastic microstructure[J]. *Mechanics of Materials*, 2014, 69(1): 1–10.
- [39] MEZA L R, DAS S, GREER J R. Strong, lightweight, and recoverable three-dimensional ceramic nanolattices[J]. *Science*, 2014, 345(6202): 1322–1326.
- [40] SCHAEGLER T A, RO C J, SORESENSEN A E, et al. Designing metallic microlattices for energy absorber applications[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2014, 16(3): 276–283.
- [41] ZHENG X, LEE H, WEISGRABER T H, et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials[J]. *Science*, 2014, 344(6190): 1373–1377.
- [42] CLAUSEN A, WANG F, JENSEN J S, et al. Topology optimized architectures with programmable Poisson's ratio over large deformations[J]. *Adv Mater*, 2015, 27(37): 5523–5527.
- [43] DONG L, DESHPANDE V, WADLEY H. Mechanical response of Ti-6Al-4V octet-truss lattice structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 60/61: 107–124.
- [44] MUN J, YUN B G, JU J, et al. Indirect additive manufacturing based casting of a periodic 3D cellular metal — Flow simulation of molten aluminum alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 17: 28–40.
- [45] SUARD M. Characterization and optimization of lattice structures made by Electron Beam Melting[D]. Grenoble: Université Grenoble Alpes, 2015.
- [46] WU Z J, LI F M, ZHANG C Z. Vibration band-gap properties of three-dimensional Kagome lattices using the spectral element method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 341: 162–173.
- [47] MESSNER M C. Optimal lattice-structured materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2016, 96: 162–183.
- [48] XU H, PASINI D. Structurally efficient three-dimensional metamaterials with controllable thermal expansion[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34924.
- [49] BAUER J, SCHROER A, SCHWAIGER R, et al. Approaching theoretical strength in glassy carbon nanolattices[J]. *Nat Mater*, 2016, 15(4): 438–443.
- [50] AZMAN A H. Method for integration of lattice structures in design for additive manufacturing[D]. Grenoble: Université Grenoble Alpes, 2017.
- [51] GREGG C E, KIM J H, CHEUNG K C. Ultra-light and scalable composite lattice materials[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(9): 1800213.

- [52] IBRAHIM Y, LI Z, DAVIES C M, et al. Acoustic resonance testing of additive manufactured lattice structures[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 24: 566–576.
- [53] XU J, WU Y, GAO X, et al. Design of composite lattice materials combined with fabrication approaches[J]. *Journal of Composite Materials*, 2019, 53(3): 393–404.
- [54] YU X, ZHOU J, LIANG H, et al. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 94: 114–173.
- [55] KAUR I, SINGH P. Critical evaluation of additively manufactured metal lattices for viability in advanced heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 168: 120858.
- [56] MUHAMMAD, LIM C W, LI J T H, et al. Lightweight architected lattice phononic crystals with broadband and multiband vibration mitigation characteristics[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 41: 100994.
- [57] CHEN M, JIANG H, ZHANG H, et al. Design of an acoustic superlens using single-phase metamaterials with a star-shaped lattice structure[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1861.
- [58] DESHPANDE V S, FLECK N A, ASHBY M F. Effective properties of the octet-truss lattice material[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2001, 49(8): 1747–1769.
- [59] KOOISTRA G W, WADLEY H N G. Lattice truss structures from expanded metal sheet[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(2): 507–514.
- [60] LIM J H, KANG K J. Wire formed cellular metals[J]. *Materials Transactions*, 2006, 47(9): 2154–2160.
- [61] QUEHEILLALT D T, MURTY Y, WADLEY H N G. Mechanical properties of an extruded pyramidal lattice truss sandwich structure[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58(1): 76–79.
- [62] PAN C, HAN Y, LU J. Design and optimization of lattice structures: A review[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6374.
- [63] GIBSON I, ROSEN D, STUCKER B, et al. *Additive manufacturing technologies*[M]. New York: Springer, 2014.
- [64] FLECK N A, DESHPANDE V S, ASHBY M F. Micro-architected materials: Past, present and future[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2010, 466(2121): 2495–2516.
- [65] DUAN Y, DU B, SHI X, et al. Quasi-static and dynamic compressive properties and deformation mechanisms of 3D printed polymeric cellular structures with Kelvin cells[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103303.
- [66] GE C, PRIYADARSHINI L, CORMIER D, et al. A preliminary study of cushion properties of a 3D printed thermoplastic polyurethane Kelvin foam[J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(5): 361–368.
- [67] GAUTAM R, IDAPALAPATI S, FEIH S. Printing and characterisation of Kagome lattice structures by fused deposition modelling[J]. *Materials & Design*, 2018, 137: 266–275.
- [68] LIU W, SONG H, WANG Z, et al. Improving mechanical performance of fused deposition modeling lattice structures by a snap-fitting method[J]. *Materials & Design*, 2019, 181: 108065.
- [69] CHEN Y. 3D texture mapping for rapid manufacturing[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2007, 4(6): 761–771.
- [70] CHEN D, SKOURAS M, ZHU B, et al. Computational discovery of extremal microstructure families[J]. *Science Advances*, 2018, 4(1): eaao7005.
- [71] KAPFER S C, HYDE S T, MECKE K, et al. Minimal surface scaffold designs for tissue engineering[J]. *Biomaterials*, 2011, 32(29): 6875–6882.
- [72] WEGST U G, BAI H, SAIZ E, et al. Bioinspired structural materials[J]. *Nat Mater*, 2015, 14(1): 23–36.
- [73] ALZAHIRANI M. Framework for the generation and design of naturally functionally graded lattice structures[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2020.
- [74] SEHARING A, AZMAN A H, ABDULLAH S. A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, 12(6): 1687814020916951.
- [75] BAI L, GONG C, CHEN X, et al. Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 182: 105735.
- [76] AL-SAEDI D S J, MASOOD S H, FAIZAN-UR-RAB M, et al. Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM[J]. *Materials & Design*, 2018, 144: 32–44.
- [77] ZHANG J, SONG B, YANG L, et al. Microstructure

- evolution and mechanical properties of TiB/Ti6Al4V gradient-material lattice structure fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 202: 108417.
- [78] ZHANG H, WANG Y, KANG Z. Topology optimization for concurrent design of layer-wise graded lattice materials and structures[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2019, 138: 26–49.
- [79] LI D, LIAO W, DAI N, et al. Anisotropic design and optimization of conformal gradient lattice structures[J]. *Computer-Aided Design*, 2020, 119: 102787.
- [80] JANSEN M, PIERARD O. A hybrid density/level set formulation for topology optimization of functionally graded lattice structures[J]. *Computers & Structures*, 2020, 231: 106205.
- [81] CHIRAS S, MUMM D R, EVANS A G, et al. The structural performance of near-optimized truss core panels[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(15): 4093–4115.
- [82] DESHPANDE V S, FLECK N A. Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38(36-37): 6275–6305.
- [83] WADLEY H N G. Multifunctional periodic cellular metals[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2006, 364(1838): 31–68.
- [84] LEE Y H, LEE B K, JEON I, et al. Wire-woven bulk Kagome truss cores[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(18): 6084–6094.
- [85] 许 德, 高华兵, 董 涛, 等. 增材制造用金属粉末研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 245–257.
- XU De, GAO Hua-bing, DONG Tao, et al. Research progress of metal powder for additive manufacturing[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(2): 245–257.
- [86] DUAN S, XI L, WEN W, et al. Mechanical performance of topology-optimized 3D lattice materials manufactured via selective laser sintering[J]. *Composite Structures*, 2020, 238: 111985.
- [87] YUAN S, SHEN F, BAI J, et al. 3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization[J]. *Materials & Design*, 2017, 120: 317–327.
- [88] GORGULUARSLAN R M, GANDHI U N, MANDAPATI R, et al. Design and fabrication of periodic lattice-based cellular structures[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2016, 13(1): 50–62.
- [89] HELOU M, VONGBUNYONG S, KARA S. Finite element analysis and validation of cellular structures[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 50: 94–99.
- [90] XIAO Z, YANG Y, XIAO R, et al. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2018, 143: 27–37.
- [91] DALLAGO M, RAGHAVENDRA S, LUCHIN V, et al. Geometric assessment of lattice materials built via selective laser melting[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 7: 353–361.
- [92] LEARY M, MAZUR M, ELAMBASSERIL J, et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures[J]. *Materials & Design*, 2016, 98: 344–357.
- [93] SING S L, WIRIA F E, YEONG W Y. Selective laser melting of lattice structures: A statistical approach to manufacturability and mechanical behavior[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 49: 170–180.
- [94] LI S J, MURR L E, CHENG X Y, et al. Compression fatigue behavior of Ti-6Al-4V mesh arrays fabricated by electron beam melting[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(3): 793–802.
- [95] XIAO L, SONG W, HU M, et al. Compressive properties and micro-structural characteristics of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam melting and selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 764: 138204.
- [96] WARMUTH F, OSMANLIC F, ADLER L, et al. Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(2): 025013.
- [97] TAKEZAWA A, YONEKURA K, KOIZUMI Y, et al. Isotropic Ti-6Al-4V lattice via topology optimization and electron-beam melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 634–642.
- [98] SUARD M, MARTIN G, LHUISSIER P, et al. Mechanical equivalent diameter of single struts for the stiffness prediction of lattice structures produced by Electron Beam Melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 8: 124–131.
- [99] DONG G, WIJAYA G, TANG Y, et al. Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method

- for the fabrication of lattice structures[J]. Additive Manufacturing, 2018, 19: 62–72.
- [100] KUMAR A, VERMA S, JENG J-Y. Supportless lattice structures for energy absorption fabricated by fused deposition modeling[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2020, 7(2): 85–96.
- [101] MISHRA A K, CHAVAN H, KUMAR A. Effect of material variation on the uniaxial compression behavior of FDM manufactured polymeric TPMS lattice materials[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 7752–7759.
- [102] VAYRE B, VIGNAT F, VILLENEUVE F. Designing for additive manufacturing[J]. Procedia CIRP, 2012, 3: 632–637.
- [103] VAYRE B, VIGNAT F, VILLENEUVE F. Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects[J]. Mechanics & Industry, 2012, 13(2): 89–96.
- [104] COOPER D E, STANFORD M, KIBBLE K A, et al. Additive manufacturing for product improvement at Red Bull Technology[J]. Materials & Design, 2012, 41: 226–230.
- [105] 廉艳平, 王潘丁, 高杰, 等. 金属增材制造若干关键力学问题研究进展[J]. 力学进展, 2021, 51(3): 684–701.
- LIAN Yan-ping, WANG Pan-ding, GAO Jie, et al. Fundamental mechanics problems in metal additive manufacturing: A state-of-art review[J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(3): 684–701.
- [106] MACONACHIE T, LEARY M, LOZANOVSKI B, et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges[J]. Materials & Design, 2019, 183: 108137.
- [107] VAN BAEL S, KERCKHOFS G, MOESEN M, et al. Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(24): 7423–7431.
- [108] 高霞, 戚顺新, 苏允兰, 等. 熔融沉积成型加工的结晶性聚合物结构与性能[J]. 高分子学报, 2020, 51(11): 1214–1226.
- GAO Xia, QI Shun-xin, SU Yun-lan, et al. Hierarchical structures and mechanical performances of semicrystalline polymer parts fabricated by means of fused deposition modeling[J]. Acta Polymerica Sinica, 2020, 51(11): 1214–1226.
- [109] CARNEIRO V H, RAWSON S D, PUGA H, et al. Additive manufacturing assisted investment casting: A low-cost method to fabricate periodic metallic cellular lattices[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101085.
- [110] CARNEIRO V H, RAWSON S, PUGA H, et al. Macro-, meso- and microstructural characterization of metallic lattice structures manufactured by additive manufacturing assisted investment casting[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 4974.
- [111] YU K, DU H, XIN A, et al. Healable, memorizable, and transformable lattice structures made of stiff polymers[J]. NPG Asia Materials, 2020, 12(1): 26.
- [112] PHAM M S, LIU C, TODD I, et al. Damage-tolerant architected materials inspired by crystal microstructure[J]. Nature, 2019, 565(7739): 305–311.
- [113] HOU A, GRAMOLL K. Design and fabrication of CFRP interstage attach fitting for launch vehicles[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1999, 12(3): 83–91.
- [114] BAUER J, KRAUS J A, CROOK C, et al. Tensegrity metamaterials: Toward failure-resistant engineering systems through delocalized deformation[J]. Adv Mater, 2021, 33(10): 2005647.
- [115] DALLAGO M, RAGHAVENDRA S, LUCHIN V, et al. The role of node fillet, unit-cell size and strut orientation on the fatigue strength of Ti-6Al-4V lattice materials additively manufactured via laser powder bed fusion[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 142: 105946.
- [116] VAN HOOREWEDER B, KRUTH J P. Advanced fatigue analysis of metal lattice structures produced by Selective Laser Melting[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 221–224.
- [117] ZARGARIAN A, ESFAHANIAN M, KADKHODAPOUR J, et al. On the fatigue behavior of additive manufactured lattice structures[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 100: 225–232.
- [118] GENG X, LU Y, LIU C, et al. Fracture characteristic analysis of cellular lattice structures under tensile load[J]. International Journal of Solids and Structures, 2019, 163: 170–177.
- [119] GU H, SHTERENLIKHT A, PAVIER M. Brittle fracture of three-dimensional lattice structure[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 219: 106598.
- [120] DAYNES S, LIFTON J, LU W F, et al. Fracture toughness characteristics of additively manufactured Ti-6Al-4V lattices[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2021, 86: 104170.
- [121] GAO Z, LI D, DONG G, et al. Crack path-engineered 2D octet-truss lattice with bio-inspired crack deflection[J].

- Additive Manufacturing, 2020, 36: 101539.
- [122] 张 弥, 王晓东, 苏亚东, 等. 钛合金点阵夹芯结构弯曲性能[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(3): 457–464.
- ZHANG Mi, WANG Xiao-dong, SU Ya-dong, et al. Bending behavior of titanium truss core sandwich structure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(3): 457–464.
- [123] 刘培生, 周茂奇. 多孔金属材料失效模式的数理分析[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 384–400.
- LIU Pei-sheng, ZHOU Mao-qi. Mathematical analysis of failure mode for porous metallic materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 384–400.
- [124] ZHAO J, SUN M, ZHANG L, et al. Forced convection heat transfer in porous structure: Effect of morphology on pressure drop and heat transfer coefficient[J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30(2): 363–393.
- [125] QIAO Y, YAO Z, WANG X, et al. Lattice composites with embedded short carbon fiber/Fe₃O₄/epoxy hollow spheres for structural performance and microwave absorption[J]. Materials & Design, 2020, 188: 108427.
- [126] MASPOCH D, RUIZ-MOLINA D, VECIANA J. Old materials with new tricks: multifunctional open-framework materials[J]. Chem Soc Rev, 2007, 36(5): 770–818.
- [127] ZARE M. Observation of flat band, RKKY plateau, and magnetization jump in quasi-one-dimensional triangular kagome lattice model[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 128(16): 163903.
- [128] LI G X, ZHANG M, ZHAO C, et al. Design method of function-structure integrated lattice structure[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 686(1): 012009.
- [129] REINTJES C, LORENZ U. Bridging mixed integer linear programming for truss topology optimization and additive manufacturing[J]. Optimization and Engineering, 2021, 22(2): 849–893.
- [130] 卢天健. 兼具承载、吸能、吸声等多功能特性的超轻多孔材料创新构型设计[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(S1): 13.
- LU Tian-jian. Multifunctional ultralight porous materials with simultaneous load-bearing, energy absorbing and sound absorbing capabilities[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(S1): 13.
- [131] 周 强, 姚丽坤, 范志瑞, 等. 基于功能系统分析技术的航天器结构功能融合设计方法[J]. 载人航天, 2021, 27(2): 221–226.
- ZHOU Qiang, YAO Li-kun, FAN Zhi-rui, et al. Function integration method in spacecraft design based on function system analysis technology[J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(2): 221–226.
- [132] VENUGOPAL V, MCCONAHA M, ANAND S. Integration of design for additive manufacturing constraints with multimaterial topology optimization of lattice structures for optimized thermal and mechanical properties[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2022, 144(4): 041003.
- [133] ZHANG G, ZHANG X, LIU H, et al. 3D-printed multi-channel metal lattices enabling localized electric-field redistribution for dendrite-free aqueous Zn ion batteries[J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11(19): 2003927.
- [134] ZHANG B, PEI X, ZHOU C, et al. The biomimetic design and 3D printing of customized mechanical properties porous Ti6Al4V scaffold for load-bearing bone reconstruction[J]. Materials & Design, 2018, 152: 30–39.
- [135] ZADPOOR A A. Meta-biomaterials[J]. Biomater Sci, 2020, 8(1): 18–38.
- [136] BARYNIN V A, BUNAKOV V A, RASIN A F, et al. Aerospace composite lattice structures[EB/OL]. [2021–08–18]. <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap679.pdf>.
- [137] MOON S K, TAN Y E, HWANG J, et al. Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2014, 1(3): 223–228.
- [138] MAGERRAMOVA L, VOLKOV M, AFONIN A, et al. Application of light lattice structures for gas turbine engine fan blades[EB/OL]. [2021-8-18]. https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0173_paper.pdf.
- [139] CRYSTAL LADIGES. Cancer patient receives 3D printed ribs in world-first surgery[EB/OL]. [2021–08–18]. <https://blog.csiro.au/cancer-patient-receives-3d-printed-ribs-in-world-first-surgery/>.

Lattice materials and its fabrication by 3D printing: A review

TAO Si-jia¹, WANG Xiao-feng¹, ZENG Jing², YI Bing³, PENG Chao-qun¹, WANG Ri-chu¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;

3. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The lattice materials are a new type of materials with special physical properties, which are constructed by one or more structural units optimized and combined in a specific way (such as period, topology, fractal, etc.), which has huge application potential in optics, electricity, mechanics, heat, acoustics, magnetism, biology, chemistry and other fields. 3D printing technology has greatly promoted the development of lattice materials, improved the design ability of lattice materials, and made it possible to fabricate lattice materials with complex internal structures and smaller geometric dimensions. The research progress of lattice material was reviewed in this paper. The types and characteristics of its structural units were introduced, and the fabrication methods of lattice materials were concluded. The properties and applications of lattice materials were summarized. Finally, the research tendency of lattice materials was discussed.

Key words: lattice material; 3D printing; porous structure; fabrication method of lattice structure; integration of structure and function

Foundation item: Project(2020JJ4729) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province, China

Received date: 2021-08-31; **Accepted date:** 2021-10-13

Corresponding author: WANG Xiao-feng; Tel: +86-13467516329; E-mail: wangxiaofeng@csu.edu.cn; 13467516329@163.com

(编辑 李艳红)