

增材制造吸能结构研究进展

王兆毅¹, 吕云卓², 陈秉智¹, 周俊先²

(1. 大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

(2. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 增材制造通常被称为 3D 打印, 它是 20 世纪 80 年代发展起来的快速成型技术(rapid prototyping, RP), 可以直接将复杂的 3D Computer Aided Design (CAD) 结构模型加工成实际物体。增材制造技术的出现为开发复杂几何图形提供了一个平台, 并在原产品的设计空间内降低了产品的成本和生产时间。吸能材料和结构, 主要依靠在碰撞中快速地吸收撞击能量, 减少撞击物的撞击加速度, 最大限度地降低被撞物的伤害。近年来, 新型吸能结构材料和功能材料层出不穷, 同时由于增材制造技术自身的低成本、生产周期短、可制造精密复杂结构的特性, 两者得到了完美的结合。由于吸能结构在众多研究领域中得到广泛的关注, 几乎所有的主要行业都在享受着吸能结构所带来的好处。因此, 本文旨在对吸能结构的各种晶格形态、设计和增材制造技术进行全面综述。此外, 还介绍了该结构的优越性能、应用和面临的挑战。

关键词: 增材制造; 吸能结构; 多胞结构; 晶格形态; 点阵结构

中图分类号: TG495

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)06-2302-14

在工业 4.0 时代, 工程与工业应用越来越注重节能性和安全性, 在保证产品的正常使用功能的前提下, 专注于产品的设计和制造, 其材料消耗更少, 制造工艺更简单, 综合力学性能更好。而近年来, 在航空航天、汽车、铁路等交通运输领域事故频发, 同时给社会和个人带来了巨大的损失和痛苦, 各种吸能材料及吸能结构逐渐进入了人们的视野^[1]。吸能结构能够在短时间内快速的吸收受外力所产生的能量, 并且可以在吸能的同时尽可能的减轻结构的质量, 其中多胞结构最具代表性, 发展最迅速, 研究最广泛。

20 世纪中期, Sosnick 采用发泡法将混合的金属粉末中低熔点的成分气化, 形成空穴结构, 由此成功制备出了金属泡沫铝材料。多胞泡沫金属材料其独特的微观结构和优异的性能, 一经生产就得到了广泛的关注。后续随着制造工艺的不断完善和发展, 熔体发泡法^[2]、粉末冶金法^[3,4]、熔模铸造法^[5]、冲压成型法、挤压线切割法等一系列方法都被运用到多胞材料的制备之中^[6-9], 使得各类性能优良的多胞材料借势而生, 同时也极大地推动了多胞材料的研究及应用。

相比于传统的整体成型制造工艺, 增材制造 (AM) 技术使许多复杂几何结构的制备变得非常迅速和高效。现如今增材制造技术的成本正在下降, 使

得增材制造技术更加具备行业竞争力, 工程师们现在能够设计先前难于制造的复杂结构, 这些结构更加坚固、质量更轻、成本更低。而增材制造可以定义为使用三维模型逐层连接材料形成复杂结构的过程^[10,11], 这种生产工艺可以使工程师们在设计中创造出无限的可能性。表 1^[12-42]总结了增材制造的分类。

参考 ASTM-F2792 标准, 增材制造技术可分为 7 种^[43-45], 包括: 光固化成型 (SLA), 用于该技术的激光可以逐层累积的方式制备光敏聚合物树脂; 选择性激光烧结 (SLS) 是利用激光作为加热源, 将激光对准粉末材料, 使加工模型变成一个个的薄层叠加的过程; 熔融沉积快速成型 (FDM) 是一种将各类热熔性的丝状材料加热并沉积在工件上的方法; 数字光处理 (DLP) 是一种用 3D 建模软件创建的设计, 通过将物体一层一层地投射到液体聚合物上并硬化它来打印 3D 物体, 它被用于嵌入式应用, 如医疗、安全和工业用途; 选择性激光熔化 (SLM) 是利用高功率密度激光来完全熔化和熔合金属粉末; 电子束熔融 (EBM) 是将粉末以薄层的形式沉淀下来, 然后对薄层进行预热和熔化以使模型熔化的过程; 叠层实体制造 (LOM) 是一种快速与廉价的方法来制备样品, 其中材料涂有一层粘合层, 在粘合层上, 送料辊加热融化粘合剂, 然后它们被切割成正确的几何形状^[46-49]。

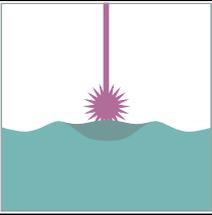
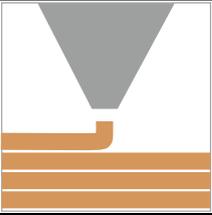
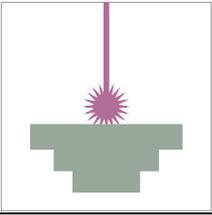
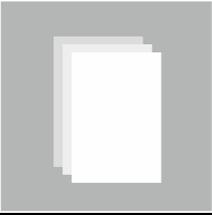
收稿日期: 2021-06-01

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划 (N2020J027); 大连市科技创新基金计划 (2019J11CY017)

作者简介: 王兆毅, 男, 1995 年生, 博士生, 大连交通大学机械工程学院, 辽宁 大连 116028, E-mail: 495477662@qq.com

表 1 增材制造分类

Table 1 Classification of additive manufacturing

Diagram	Category	Technology	Advantages/drawbacks
	Light source solidification	SLA DLP CLIP	High forming speed ^[12, 13] High parts resolution ^[14-16] High scanning linearity, overcuring ^[16, 17] High cost of supplies ^[18]
	Material extrusion	FDM FFF ADAM	Low price for equipment ^[19, 20] Multi-material printing ^[20-22] Limited parts resolution ^[23] Poor surface finish ^[24]
	Powder bed fusion	SLS SLM DMLS EBM	High precision and detail ^[25-27] High parts density ^[28] Powder recycling ^[29-31] High specific strength ^[32-35] Support and anchor structures ^[36-38]
	Sheet lamination	LOM UAM	Low material, machine and process costs ^[39, 40] High surface finish ^[39, 41] Restricted processing materials ^[42]

1 吸能结构的介绍

吸能结构的设计与分析不同于其他结构，良好的吸能结构能够承受很高的冲击载荷，这些吸能结构与材料结构的大变形、应变强化及不同变形模式的受力情况紧密相关。吸能结构通过稳定的塑性溃变吸收动能，需要结构在冲击过程中展现较高的吸能效率、载荷效率、加载稳定性及可控且规律的压溃形态，这与追求高比强度与比刚度的轻量化结构截然不同。

研究能量吸收装置主要是为了减少在撞击过程中产生的巨大动能或载荷，其中由于满足拥有良好的吸能特性，多胞结构被广泛地应用到能量吸收装置之中。在多数情况下多胞结构与多胞材料可以一起来讨论^[50]，按材料自身的定义，材料是用来制造物品、部件等其他产品的物质，而结构在工程上的定义是具备一定形状并能够承受载荷的构件。多胞结构与多胞材料并没有明显的界限，当元胞相对于整个试件的尺寸非常小时，可以称之为材料；当元胞相对整个样件的尺寸较大时，可称之为结构。

多胞材料可理解一种内部存在大量空穴且具有一

定胞结构的材料，具有质轻、孔隙率大、比强度和比刚度高、吸能优异等特点，因此得到广泛应用。多胞材料包括点阵材料和泡沫材料，其中点阵材料从空间上可分为二维点阵材料（蜂窝结构、波纹结构）和三维点阵材料（空间桁架结构），泡沫材料从封闭性上可分为开放型泡沫材料和闭合型泡沫材料；如果结构中的固体材料只构成实心边，则称之为开放型泡沫，而如果固体材料同时能够构成实心边和面，使得各孔穴间相互封闭隔离，则称之为闭合型泡沫^[51]。上述各种多胞材料如图 1 所示。

随着车辆、船舶以及航空航天领域的发展，轻量化、能量吸收、吸音隔热等一系列研究越来越受到人们的关注和重视，传统固体结构往往已经不能满足这些领域的设计需要，这时多胞结构进入了人们的视野。将低密度、比强度高、良好的物理性能等优良特性结合于一身的多胞结构，使之成为了理想的多功能结构。在人们的日常生活中，存在着许多天然的多胞结构（图 2），因为多胞结构是非常多孔的，并且通常具有较低的固体体积分数，这使得这些天然产物非常高效，如动物的骨骼^[52]、软木结构、珊瑚^[53]等。

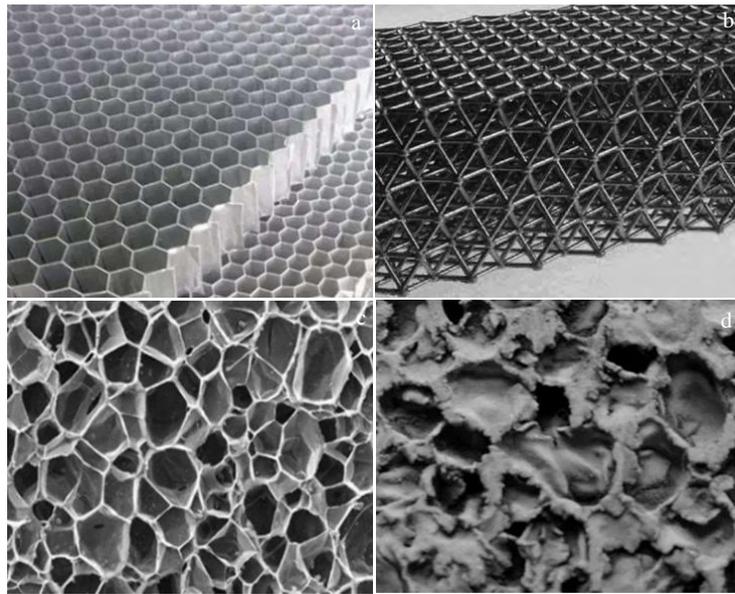


图 1 不同多胞材料类型

Fig.1 Types of cellular material: (a) 2D lattice material, (b) 3D lattice material, (c) open foam, and (d) closed foam

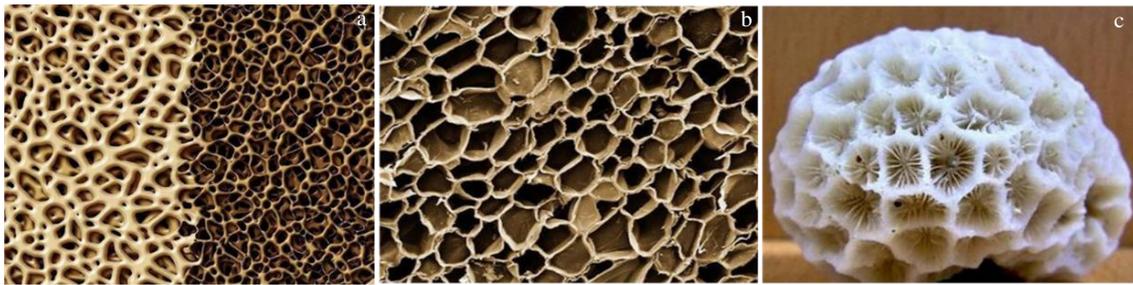


图 2 天然多胞结构

Fig.2 Natural cellular structures: (a) skeletal cell, (b) cork cellular structure, and (c) coral

受天然多胞结构优良特性的启发，人类一直渴望设计和制造具有能定制特性的多胞结构。为了设计具有独特性能的各种多胞结构，人们进行了大量的研究^[54]。在众多多胞结构中，以点阵结构的理论研究最为完善，而大多数点阵结构的构建手段均为手动计算，图 3^[55-66]总结了几种充分研究的点阵结构。通过对现有文献的深入分析，发现少数结构是独特的，而大量的多胞结构是这些独特结构的细微变化^[67-70]。例如，图 3j 和 3l 所示的结构可以通过在图 3i 和 3k 所示的结构中添加垂直支柱来创建，这些迭代结构可能具有诸如高强度质量比等独特的特性。Schwarz^[71]和 Schoen^[72]发现了 2 个优秀的结构，它们的表面具有无限周期，且平均曲率为零。这些多胞结构被称为三重周期极小螺旋面（TPMS-G 结构）（图 3r）和 TPMS-D 金刚石面（图 3s）。与手动生成的结构不同，TPMS 结构是通过使用各种算法进行数学生成的^[73,74]，并

且不需要后处理来细化和连接结构。这些结构的示例如图 3q~3t 所示。

增材制造需要一个三维 CAD 模型，然后再利用 CAM 软件进行切片后直接输出到 3D 打印机中^[75]。在这里使用 STL 文件格式，它只包含 3D 模型的表面几何形状，而并不包含它们的其他属性，如颜色、纹理等。最近的研究主要集中在对多胞材料的介观拓扑进行建模，以支持和改进使用 Solidworks、Meshmixer 等软件创建点阵结构模型的多种设计目标^[76]。构建点阵结构的另一种方法是使用点阵生成器，它是一个简单的 Matlab 程序，可以自动生成各种点阵几何图形，以达到 STL 文件的格式^[77]。虽然这些软件仍存在一些问题，比如构建相应对象与点阵结构结合过程中存在灵活性问题，有限元仿真分析集成不足及优化不充分问题，目前也正在不断探索各种新的方法来生成预期的点阵结构。

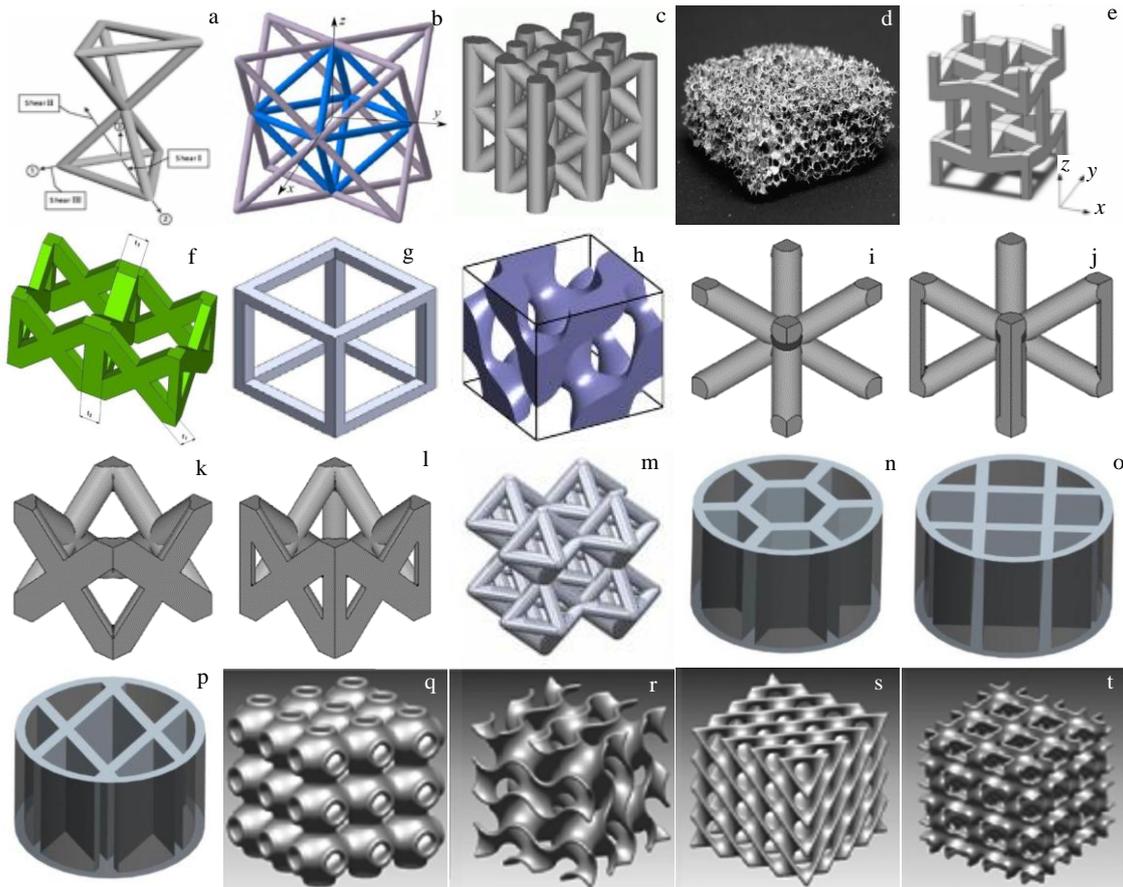


图 3 典型的点阵结构图

Fig.3 Typical lattice structure diagrams: (a) kagome^[55]; (b) octet truss^[56,57]; (c) MS1 lattice structure^[58]; (d) stochastic foam^[59]; (e) reentrant auxetic^[60]; (f) pillar textile^[61]; (g) square collinear cubic^[62]; (h) spatially variant lattices^[63]; (i) body-centered cubic (bcc); (j) bcc with vertical strut in z-axis (bccz); (k) face-centered cubic (fcc); (l) fcc with vertical strut in z-axis (fccz)^[64]; (m) octahedron; (n) honeycomb; (o) square; (p) diamond^[65]; (q) TPMS (triply periodic minimal surfaces)-P type; (r) TPMS-G type; (s) TPMS-D type; (t) TPMS-I-WP type^[66]

2 吸能结构的应用

从吸能的角度出发，多胞结构的设计和制造正致力于节省功能材料用量与建造时间及消耗能源，提供高性能、高刚度质量比以获得卓越的能量吸收特性及显著的隔音和隔热性能。多胞结构的应用正在扩展到各种新的领域，特别是在航空航天、汽车、高速铁路和生物医学工业中。因此，多胞结构是一类集成多重功能为一身的工程结构材料，应用前景极为乐观。

航空航天部件（图 4）既要坚固又质量轻，通常由高温合金和超高温陶瓷制成，这些材料非常昂贵。由于高强度质量比，多胞结构已被用于航空航天工业，旨在提高性能质量比，从而提高飞机的效率，减轻航空航天部件的质量。泡沫铝具有更高的抗屈曲性能且为各向同性材料；因此，泡沫铝和泡沫钛夹层已用于

波音飞机的尾臂。

汽车工业的主要需求包括提高车辆的安全性、低油耗、减轻质量、提高乘客的舒适性、减小汽车尺寸、高碰撞安全性和减少汽车的噪音排放^[78]。多胞结构非



图 4 吸能材料在航空航天的应用

Fig.4 Application of energy-absorbing materials in aerospace

常适用于金属部件，包括热交换器、轻量化结构、过滤器、消音器及承载部件等，这些结构相比传统固体结构能够吸收更多的能量。由于这一特性，泡沫铝被应用于防撞减震器和热交换器。Yang^[79]等人研究了一种可再进入的 auxetic 多胞结构，该结构有望呈现负泊松比，这在能量吸收方面非常有效，而这些能量吸收特性能够实现汽车轻量化、节能性及安全性的进一步提升。同时车辆在高速公路及隧道中行驶过程中均会产生极大的噪音（图 5），采用泡沫铝材料制成的噪音屏障装置能够有效地降低 10~20 dB 的声压，效果是普通噪音屏障装置的 3 倍，同时由于它的超轻特性，它们可用于制造多种规则和不规则结构。

列车安全一直是轨道交通领域重点关注和研究的问题课题，截止目前共发展出 2 项种安全保障技术：即主动安全防护和被动安全防护。而目前被动安全防护的技术思路主要就是通过结构材料的可控塑性变形过程来实现碰撞能量耗散进而达到降低乘员区损伤的目的。作为能量耗散系统的主要组成部分，吸能元件的指标性能的优劣直接决定了系统总体性能。图 6 为世界知名轨道装备制造企业设计的端部吸能方案，其吸能结构多采用薄壁结构及多胞结构元件进行模块化设计，具备良好的吸能特性。

由于高强度质量比和最大化的表面积特性，多胞结构已被用于生物医学/医疗保健领域。钴铬和钛合金由于其生物相容性，是牙科植入物和修复体最常用的材料。对比之前的多孔涂层技术，多胞结构的应用使得生物医

学植入物的骨整合和固定性能得到改善。植入物外表面的多胞结构层对于确保组织的生长至关重要，这一点显著缩短了恢复时间。随着对多胞结构各参量关系的深入了解，现如今利用 3D 打印技术可制造出所需的模量、生物相容性及孔隙率等定制参量的医疗植入物^[80, 81]。此外，这些结构已被用于生物仪器、骨架结构和生物医学植入物(图 7)^[82]。

多胞结构在数字信号处理、数字滤波、频谱估计、信号建模和自适应信号处理方面也极为关键^[83]。在分析晶格取向的热流和传热特性时，气体流动方向会影响传热效率和压降^[84]。由于晶格具有较高的热机械性能，因此可利用渐进均匀化技术生产轻型点阵注塑模具。格构梁结构可用于地震频繁地区的施工，以防止支撑失效、整体屈曲、局部屈曲和断裂等损伤^[85]。



图 5 吸能材料在公路的应用

Fig.5 Application of energy-absorbing materials in highways

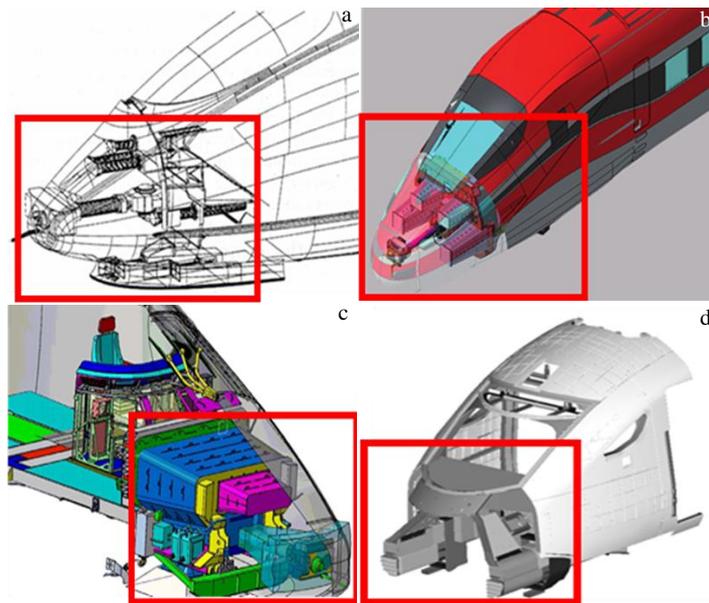


图 6 吸能材料在铁路的应用

Fig.6 Application of energy-absorbing materials in railways: (a) ICE3 (Siemens, Germany); (b) ETR1000 (Italy); (c) AGV (Alstom, France); (d) class395 (Hitachi, Japan)

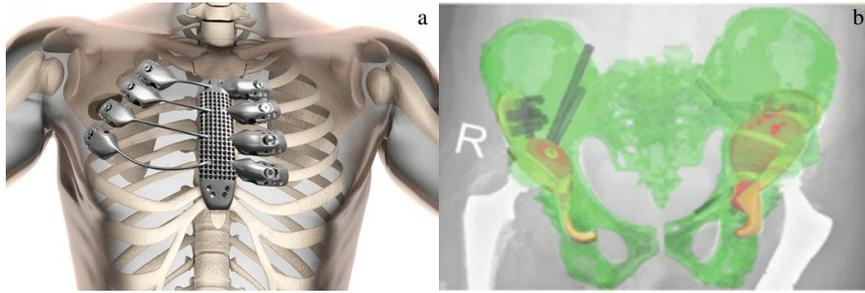


图 7 吸能材料在医疗的应用

Fig.7 Application of energy-absorbing materials in medical treatment: (a) sternum and thoracic implants and (b) hip implants^[82]

3 吸能结构的优化

发展成熟的商用计算机辅助设计和有限元建模 (CAD-FEM) 软件集成包, 如 ANSYS、CATIA、Cero 及 Solidworks 等, 已经使绝大多数多胞结构的构建与优化成为了可能^[86, 87]。Gorgularslan^[88]等人利用 Abaqus 软件对多胞结构进行建模和分析, 然后使用 Netfabb 软件进一步优化结构。ANSYS 具有强大的优化模块, 如中心复合设计 (CCD) 或 Box-Behnken 设计、神经网络法 (NN)、响应面法 (RSM) 和克里金插值法 (Kriging)。Kriging 和 NN 都被推荐用于多变量的优化设计, 而 RSM 则适用于设计变量较少的问题^[89]。Autodesk 和 Altair Optistruct 都具有蜂窝结构设计和优化功能。它们将拓扑优化集成到多胞结构生成过程中。在最新版本中, Autodesk 集成于 Netfabb^[90]内部, 转化为 Netfabb 2017.1, 它可以用于各种格构拓扑设计、变密度优化及其有限元分析。Netfabb 还

开发了选择性空间结构特性, 它有一个标准的单元库, 允许用户使用库中的单元、节点和杆来创建新单元 (图 8)。

点阵结构的常用优化方法可分为连续型的均匀化法 (homogenization approach) 和离散型的桁架拓扑优化法 (ground-truss approach) 2 大类型, 这 2 种方法能够在有限元网格上优化材料布局, 均属于拓扑优化技术, 点阵结构优化过程的流程图如图 9 所示。均匀化方法^[91]是一种基于微观力学理论的方法, 涉及结构节点位移和应变 (梁长与结构真实尺寸之比) 的幂次级数的渐近展开, 在这种方法中, 复合材料被用作根据材料密度定义物体形状的基础。在最终优化的模型中, 小孔区域被填充 (实心), 而具有大孔的区域被认为是空的 (无材料)^[92]。桁架拓扑优化^[93, 94]同时关乎尺寸优化问题, 通过确定结构单元的位置、最佳数量和连通性来实现结构的优化^[95]。通过改变结构单元的截面来支撑所施加的荷载, 然后去除接近零的截面, 得到优化的多胞结构。

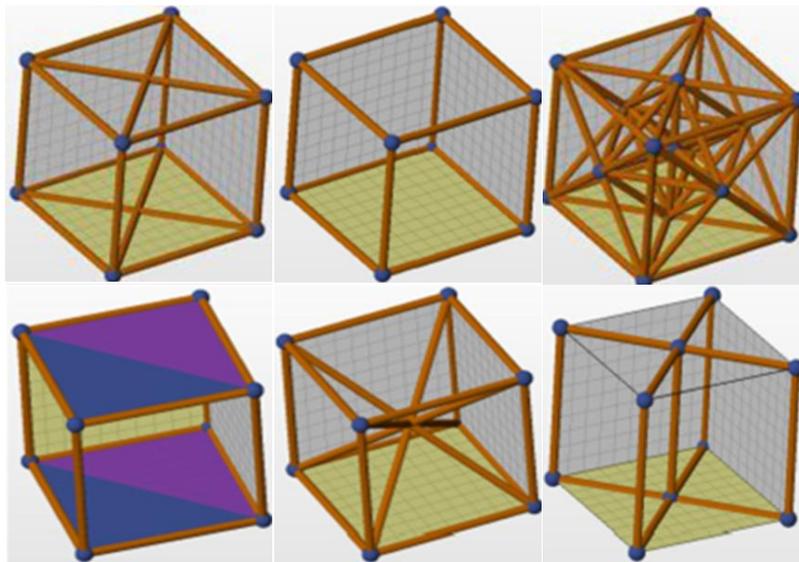


图 8 利用 Netfabb 软件进行结构优化

Fig.8 Optimization using Netfabb software

在增材制造产品的设计中，几何优化策略也同时适用于点阵结构的设计过程，它通过调节恒定元素节点的连通性，从而保持设计产品的可制造性^[96]。密度在形成点阵结构中起着重要作用，例如体积密度 $\rho=0.1$ 的点阵结构的强度大约为普通固体结构的 3 倍。优化的点阵结构是通过相对密度与晶胞尺寸梯度之间的等效变换构造的，而改进点阵结构的新方法是点阵结构轻量三角化技术(LSLT)，它是指通过布尔、插值和三角化运算符对点阵结构进行三角化剖分，以控制生成的三角形数量。通过优化格架以减轻质量，可以提高刚度比，同时减小单元尺寸也会增加结构的刚度^[97]。为了自动优化晶格厚度，可采用层裂同步扰动随机逼近算法 (SPSA)，该优化方法减少了所用材料的数量，从而降低制造成本^[98]。

4 吸能结构的力学性能

从吸能结构的设计出发，结构不仅要具有较高的能量吸收率，同时还需要有较高的强度和较为稳定的缓冲效果。与传统结构相比，多胞结构由于内部存在大面积的空腔，使其能够发生很大的塑性变形，呈现出较强的能量吸收能力，在冲击防护方面有着广泛的应用^[99]。其特点主要体现在密度较低，定制设计性较强，同时兼具隔热、减震等优异性能，是一种兼容结构性和功能性的新型结构。在研究多胞结构的力学性能时，不仅要关注基体材料的物理属性，还需要明确其结构特征对整体性能的影响^[100]。

在众多设计标准中，一般会利用吸能量 (EA)、比吸能 (SEA)、平均撞击力 (MCF)、峰值力 (PCF) 及撞击力效率 (CFE) 等一系列主要响应来评估不同吸能结构的吸能特性 (表 2)。其中 EA 为吸能结构全局变形过程所吸收的能量；SEA 对应吸能结构从初始受压到

密实时刻单位质量的吸能量；MCF 是指吸能结构受压过程中应力的平均值，主要反应结构的整体承载水平；PCF 为吸能结构压溃所需的最大应力值；CFE 是 MCF 与 PCF 的比值。而标定吸能结构性能的实验方法可分为 2 大类，一类为准静态加载，通常采用万能试验机完成；另一类侧重于冲击或加速度的动态加载，通常采用落锤试验台、水平冲击试验台及霍普金森压杆完成，以明确结构的速率敏感性。而二者的设计标准均可由 SEA 与 PCF 指数准确表示，一方面，吸能结构满足消耗每单位质量内最大可能吸收的能量，以满足轻量化设计，实现比吸能最大化；另一方面，吸能结构应尽可能吸收更高的能量，以满足极限吸能设计，实现峰值力最大化^[101]。

多胞材料兼具材料和结构的双重特性，其宏观的准静态力学响应不会因试件的尺寸发生变化，表现出材料的特征；在微观上多胞材料又存在着复杂的微结构，因此可以通过对微结构的设计来改变宏观力学性能。对于存在不同点阵结构的荷载，可能分为 3 种应力类型：弯曲应力、剪切应力和拉压应力^[44]。根据弹性模量随相对密度的标度变化的特性，结构可分为拉伸主导型和弯曲主导型^[55]。与完整固体结构的屈服强度相比，混合材料的屈服强度更大。它的弹性性质由布洛赫波理论预测，以评判周期性晶格的弹性反应^[102]，点阵结构的硬度大于固体结构，因此提高了材料的抗压屈服强度^[103]。同时研究发现，bcc 点阵结构的刚度是原始 bcc 结构的 10 倍，其相对密度比原始 bcc 结构小 2 倍^[104]。基于数值应力分析和基本梁理论，推导出点阵结构的力学性能主要取决于结构中存在的晶胞数量。

在准静态加载下 (图 10a)^[105]，多胞材料的应力-应变曲线呈现典型的 3 阶段特征，分别为 (I) 弹性载荷区、(II) 塑性坍塌区或恒定应力区与 (III) 致密化区，但是由于复杂的几何形状和空间拓扑关系，建立准确的求解模型变得十分困难^[106-108]。Rusch^[109]等从经验角度出发给出了多胞材料力学响应与弹性模量间的映射函数形式，根据实验来确定材料参数与微结构之间的关系。Gümrük^[110]等对比了具有不同单元尺寸点阵结构的压缩行为 (图 10b)，在直径 d 不变的情况下，随着单元尺寸 L 的减小，弹性刚度和坍塌应力严重增加，同时随着单元尺寸变小，致密化从较小的应变开始。动态冲击下多

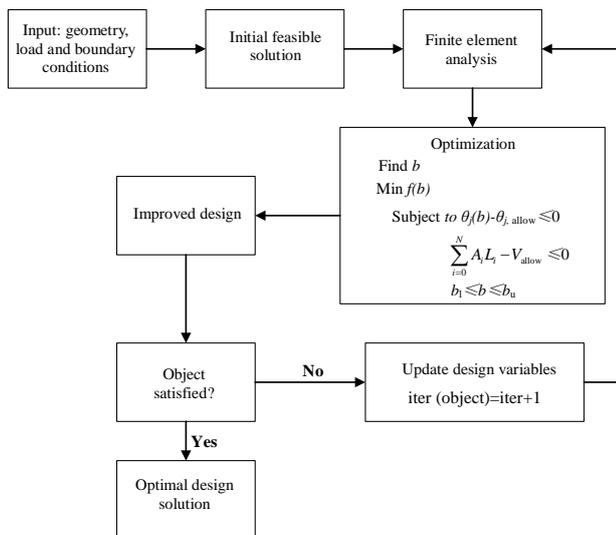


图 9 点阵结构优化流程图

Fig.9 Flowchart of the lattice structure optimization process

表 2 吸能性指标

Table 2 Energy-absorbing metrics

Metric	Equation
Energy absorption	$EA = \int_0^{\delta} F(x) dx$
Specific energy absorption	$SEA = EA/m$
Mean crush force	$MCF = EA/\delta$
Crush force efficiency	$CFE = MCF/PCF$

胞材料表现出局部应力增强的典型特征(图 11a)^[111,112], 随着冲击速度逐渐提高, 多胞材料的变形模式从剪切带随机生成的准静态模式过渡到呈现逐层压溃的冲击模式^[100], 由于微结构的惯性效应将会导致压溃的胞元局部出现动态效应, 使应力发生局部强化; 与此同时研究证明多胞材料的动态硬化效应会随着相对密度(孔隙率)的增加而显著增强(图 11b)^[113], 这是由于胞壁厚度的增加导致胞壁抵抗变形的能力增强与胞壁结构自身的硬化行为^[109-114]。

同时多胞材料以其在电学、光学和热学方面的潜力而闻名, 它们在经济上适用于时间和成本效益高的生产, 并具有高刚度质量比和良好的散热能力^[115], 由于晶格的应变能更高, 晶格变形与正常结构相比是可逆的^[116]。多胞结构的最新研究被应用在其生物相容性方面, 材料对生物流体具有抵抗力, 而合金材料的多胞结构能够与活体组织相容, 成功地替代原有的组织配合完成基体正常运转^[117]。同时, 多胞结构也被用作骨骼替代支架微结构的基本设计原则^[118]。

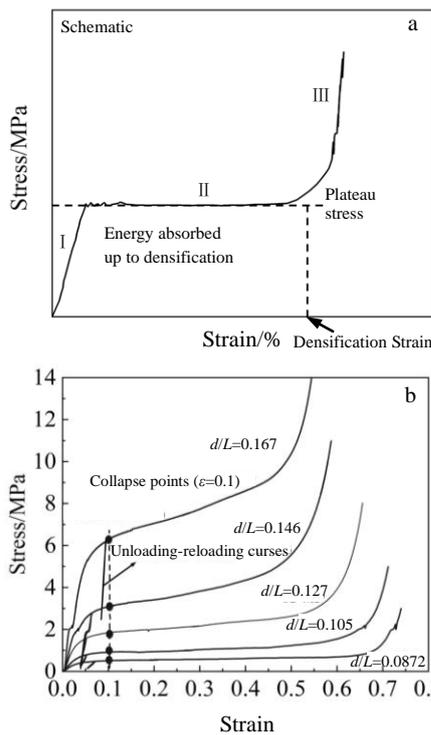


图 10 多胞材料准静态应力-应变曲线及不同单元尺寸的点阵结构应力-应变曲线对比
 Fig.10 Quasi-static nominal stress-strain curve of cellular materials^[105] (a); comparison of experimental stress-strain curves of different cell sized blocks under compression ($d=210\text{ mm}$) (b)^[110]

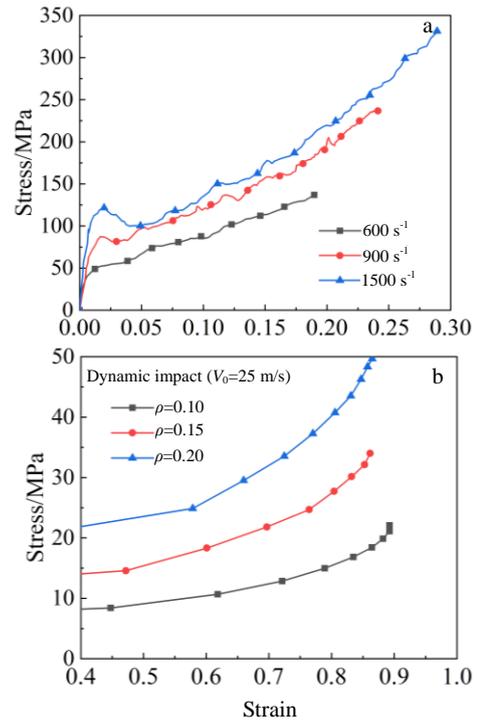


图 11 多胞材料动态冲击的应力强化效应及不同相对密度多胞材料的动态与准静态应力-应变曲线对比
 Fig.11 Stress strengthening effect of cellular material under dynamic impact (a)^[112]; comparison of dynamic stress- strain states and quasi-static behaviors of cellular materials with relative densities (b)^[113]

5 增材制造吸能结构

由于高度的复杂性, 使用传统的制造方法很难制造出精确的多胞结构, 3D 打印的发展有效解决了生产复杂多胞结构的难题。

选择性激光熔化 (SLM) 增材制造系统由自动粉末分层装置、基于计算机的过程控制系统、大功率激光器、气体保护系统和粉末床预热系统组成。打印平台由惰性气体保护, 以降低内部含氧量。激光束根据计算机的 CAD 数据, 扫描粉末床表面, 形成分层轮廓。重复上述过程, 直到完成部件。几项研究尝试使用各种材料(如钢、钛和铝)制造多胞结构。Xiao^[119]等采用 SLM 技术制备了体积分数为 30% 的钛支架。金属生物材料支架的结构和孔型得到了较为精确的再现, 最小平均孔径为 231 μm , 复杂微结构的精确制备验证了 SLM 工艺适用于金属生物材料支架的制备。Yang^[120]等研究了螳螂虾背节的微观结构, 设计了具有良好吸能性能的仿生结构, 由于该仿生结构的复杂性已经超出了传统制造技术的能力, 采用 SLM 方法使用 AlSi₁₀Mg 粉末制作了不同波数

(N) 的双向波纹 (DCP) 结构, 分析了 DCP 结构的微观结构, 并研究了关键参数波数 (N) 对 SLM 技术加工的 DCP 结构的压缩性能、变形模式及断裂机制的影响。通过压缩试验, 对比了不同厚度 DCP 结构的比吸能, 证明了该结构优秀的吸能性能。Gümrük^[110]等同样使用 SLM 技术制备了 316L 不锈钢体心立方 (bcc) 点阵试件, 通过实验与仿真的手段, 考虑了支撑杆连接节点附近的材料重叠效应, 引出了结构初始刚度与对应强度值的合理预测, 并证实了 bcc 点阵的压缩响应属于弯曲主导型。Mines^[121]等在 316L-bcc 点阵结构的基础上研究了同样由 SLM 技术制备的 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ -bcc 点阵结构, 而 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 是航空航天工业中广泛使用的钛合金, 对其进行了拉伸、压缩试验及落锤冲击试验。结果表明, SLM 制备的 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ -bcc 点阵结构的力学性能可以与蜂窝铝结构相媲美。Leary^[28]等对用 SLM 技术制造的 $\text{AlSi}_{12}\text{Mg}$ 点阵结构的力学性能进行了试验研究, 优化了工艺参数, 并对一系列的结构倾角和支撑直径下的格构杆单元的可制造性进行了试验研究。在确定可制造性极限的基础上, 制备了工程相关的晶格拓扑, 包括拉伸主导型和弯曲主导型结构。对制造的晶格形态和表面粗糙度以及相关的机械性能、变形和破坏行为进行了量化处理。

电子束熔融 (EBM) 增材制造系统已被广泛地用于制造细胞结构, 主要用于生物医学应用。在这个过程中, 高能聚焦电子束扫描薄层粉末, 以诱导金属粉末颗粒之间的熔合和再液化, 从而形成固体^[122-124]。Surmeneva^[125]等采用电子束熔融法 (EBM) 制备了应用于医疗行业的双层及三层网状 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 合金骨小梁支架, 设计并制造了 5 种不同密度分布的网格支架, 通过单轴压缩试验证明了多层支架各组分对其变形行为有一定的影响。Murr^[126]等利用 EBM 技术使用 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 粉末替代硬组织 (骨), 特别是膝关节和髌关节以及大骨 (股骨) 髓内棒, 研究了替代结构的力学性能, 并分析了 EBM 技术应用于生物医学植入物领域的发展前景。Murr^[127]团队又利用建模软件并结合计算机断层扫描 (CT) 技术, 构造了用于 EBM 技术制造开孔型多胞结构的 CAD 模型。在图 12a 中, 几何或点阵结构单元被复制以生成三维空间模型, 该三维空间模型可嵌入到 CAD 中以电子束熔化金属粉末层, 以创建具有任何期望几何结构的产品。通过扩展网格结构单元或改变相应的支撑尺寸, 可以系统地调整孔隙率或密度。图 12b 中展示的随机泡沫结构, 可以实现类似的特征, 其中泡沫单元尺寸和韧带尺寸变化也可以允许产品密度具有类似的选择性, 这可以嵌入适用于 EBM 处理的 CAD 模型中。图 12c、12d 分别为利用 EBM 技术实际加工上述 CAD 模型的开孔型多胞结构。与 SLM 工艺类似, EBM 也暂时只适用于制备金属

粉末试件。近期有报道 Terrazas^[128]等已经使用 EBM 技术加工制备出 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 与羟基磷灰石 (HA) 复合材料组成的开孔型点阵结构, 通过压缩试验证明该结构具有一定的吸能性能。这项工作不仅有望制造新型复合支架作为生物植入物来替代骨组织, 而且有望运用 EBM 技术制造各种相关的金属/陶瓷复合材料。

熔融沉积快速成型 (FDM) 增材制造系统是制造多胞材料的另一种应用较广泛的方法。FDM 的工作原理是利用喷头将丝状热塑性材料加热融化成半液态, 通过喷头将半液态的材料挤压喷出, 迅速凝固成型后形成第 1 层, 随着喷头的不断移动逐层打印, 最终完成整个结构的打印^[129, 130]。FDM 技术的主要优势在于自身的巧妙沉积模式和打印试件的高孔隙率所导致良好的机械性能, 常被应用于制造由 PCL^[131-133]、PMMA^[134, 135]及 PLA^[136, 137]构成的生物支架。Ravari^[138]等应用 FDM 技术制造和评估了不同的多胞结构的力学性能, 包括方形、菱形、三角形、圆形等结构。Dziewit 等^[139]选用 ABS、PA 及 PC 3 种材料使用 FDM 技术设计并制造不同的蜂窝结构, 基于准静态压缩实验结果证实用于结构制造的材料机械性能对结构的吸能能力影响显著, 是拓扑设计师决定结构变形过程的主导因素, 这也使根据结构的拓扑设计快速

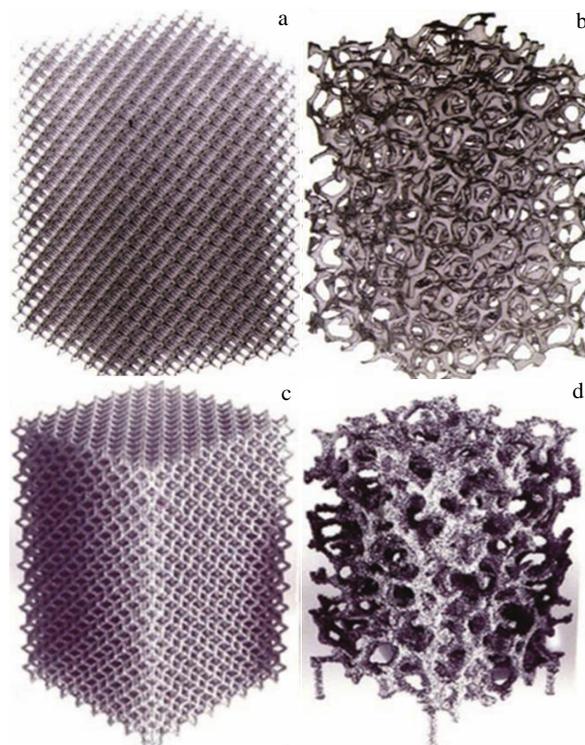


图 12 多胞结构的 CAD 模型与 EBM 加工模型

Fig.12 CAD models of cellular structures and EBM machining models^[127]: (a) 3D lattice model; (b) random foam structure; (c) EBM-3D lattice structure; (d) EBM-random foam structure

评估能量吸收能力成为了可能。Khan 等^[140]运用 FDM 技术打印出由 ABS 材料构成的 Neovius TPMS 型多胞结构(图 13a), 针对其压缩行为进行了断裂分析, 通过控制体积分数与单元尺寸 2 个变量分析得出该多胞结构的压缩模量与强度均随着体积分数的增加而增长, 在压缩过程中单元尺寸较小的试件呈现单层断裂机制, 单元尺寸较大的试件呈现取向随机的多层同时断裂。Duraibabu 等^[141]以 FDM 技术为手段加工成型圆形、正方形等 4 种空隙形状的功能梯度多胞结构(FGCS)(图 13b), 研究了不同空隙形状与相对密度对压缩工况下 FGCS 能量吸收行为的影响, 对将来 FGCS 的制造与应用有一定的参考价值。

6 讨论与挑战

增材制造工艺为制造形状复杂、强度高、质量低的吸能结构提供了新的途径。然而, 它在制造过程中还存在局限性, 如粉末去除^[142, 143]、支撑结构摘除^[144, 145]、结构内部缺陷^[146-149]、表面粗糙度^[150-154]等问题。

几乎所有的 3D 打印机都依赖 STL 数据格式, 但是 STL 数据存在很多问题, 比如数据冗长、没有拓扑信息、没有单位、颜色或材质信息^[155]。当使用增材制造技术导入的 STL 文件时, 设计的结构越复杂, 需要的信息量越多, 生成的文件占用空间越大。例如, 一个 10 cm、单元尺寸为 10 μm 的球体在建模软件中需要约 20 000 个三角形。以同样的分辨率放大 10 cm 的球体将大大增加三角形的数量, 从而产生更大的文件。过度消耗粉末材料资源可能导致生产中期的构建失败, 从而导致灾难性的经济后果, 再加上为保证质量所消耗过长的生产时间(几十个小时), 计算时间与内存分配就显得更加关键。2009 年, 美国材料与实验学会 (ASTM) 发布了一种新的文件格式—AMF 格式, 该数据格式能够记录颜色信息、材料信息及物体的内部结构信息, 克服了 STL 文件格式精度不高、工艺信息缺失等缺点, 使得 3D 打印过程中使用起来更加方便, 模型设计过程也更加轻松, 但相对普及性不高^[156]。Paul 与 Anand^[157]将原有 STL 格式与 AMF 格式建模所需的三角形面片转换为斯坦纳曲面片 (Steiner patches), 由于斯坦纳曲面片的计算阶数更高, 这种新的文件格式将会比传统 STL 格式的精度更高, 但在文件大小以及计算处理时间上仍需要进一步优化。近期 Vaissier^[158]团队利用重复的特征编码方法开发了一种新的混合文件格式, 在同时考虑精度的前提下与传统文件格式相比, 该文件的文件大小有明显的减小。同时 STL 文件过大引发后处理阶段的模拟及优化也将面临重大的挑战, 需要非常高的计算速度, 而目前的工作站在计算方面远远不够, 这将是一个有待解决的问题。

从多胞结构中移除支撑结构是另一大挑战, 因为支撑结构可能被困在多胞之间, 在操作过程中会产生应力集中, 从而导致产品过早失效。同时支撑结构的构建会阻碍移除结构中未熔化(烧结)的粉末, 未熔化的粉末隐藏在支撑结构壁之中, 随着网格密度的增加很难去除, 这将会导致性能的下降与材料的浪费。

对于依靠粉末加工的增材制造工艺, 去除残留粉末是需要考虑的一个重要方面, 特别是对于生物医学应用中的微小多孔结构。由于结构孔隙中滞留热量, 孔隙内的温度通常较高, 从而使未经压制的粉末与多孔结构的内表面发生强烈的结合。Ameen^[159]等评估了不同支撑结构设计对未熔粉末去除的影响, 通过优化支撑结构的参数设计来实现对结构的粉末去除, 在未来支撑结构与粉末去除问题将会是 3D 打印吸能结构要解决的难关之一。

7 结果与展望

增材制造为复杂多胞结构材料的设计和建模铺平了道路。本文综述了增材制造工艺加工吸能结构的力学性能研究及在各个领域的应用及点阵结构的优化。

- 1) 由于吸能结构的复杂性, 增材制造是生成吸能结构材料的最佳方法。
- 2) 与其他固体结构相比, 多胞结构具有质量轻、刚度高、相对密度低、弹性和强度大等特点, 可以形成复杂的几何结构。
- 3) 本篇综述发现, 只有 SLM 和 EBM 在吸能结构制造方面得到了显著的研究, 但是其他增材制造技术仍有待探索。

通过查阅大量文献, 可以推断, 在吸能结构的增材制造研究中可以开展以下工作:

- 1) 具有设计和优化工具的软件包数量有限, 需要开发一种新的仿真和分析方法, 做到降低成本的同时该方法应易于使用。

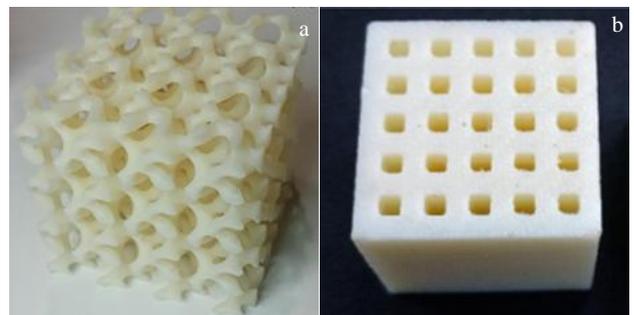


图 13 FDM 技术制造的多胞结构

Fig.13 Cellular structure used for FDM technology: (a) Neovius cellular structure^[140] and (b) fabricated with square functionally graded cellular structure (FGCS)^[141]

2) 目前还没有一种增材制造工艺可以制造大批量的多胞结构。由于某些增材制造技术的固有特性, 网格结构的后处理是一个需要解决的难题。

3) 90%以上的点阵结构都是人工设计的, 需要大量的后处理, 但目前还没有系统的方法可以帮助近似人工生成的多胞结构, 以减少后处理的工作量和时间。

参考文献 References

- [1] Huang Chunman(黄春曼), Li Huimin(李慧敏). *Equipment Manufacturing Technology*(装备制造技术)[J], 2012(1): 112
- [2] Yu Limin(于利民), Wang Lucai(王录才), Wang Fang(王芳). *Materials Review*(材料导报)[J], 2003, 17(6): 28
- [3] Ryan G E, Pandit A S, Apatidis D P. *Biomaterials*[J], 2008, 29(27): 3625
- [4] Xiao Jian(肖建), Qiu Guibao(邱贵宝), Liao Yilong(廖益龙) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(7): 1724
- [5] Pattnaik S, Karunakar D B, Jha P K. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212(11): 2332
- [6] Xu Qingyan(许庆彦), Xiong Shoumei(熊守美). *Foundry*(铸造)[J], 2005, 54(9): 840
- [7] Yu Zhihang(于志航). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018
- [8] Zhao Bing(赵冰), Li Zhiqiang(李志强), Hou Hongliang(侯红亮) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(8): 2189
- [9] Tian Qinghua(田庆华), Li Jun(李钧), Guo Xueyi(郭学益). *Chinese Journal of Power Sources*(电源技术)[J], 2008(6): 417
- [10] Campbell T A, Ivanova O S. *Technology & Innovation*[J], 2013, 15(1): 67
- [11] Liu Yingjie(刘英杰), Hu Qiang(胡强), Zhao Xinming(赵新明) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(5): 1767
- [12] Pritchard Z D, Beer M P, Whelan R J *et al. Advanced Materials Technologies*[J], 2019, 4(12): 1 900 700
- [13] You S, Miller K, Chen S. *Chapter 1: Microstereolithography* [M]. London: RSC publishing, 2019: 1
- [14] Muralidharan A, Uzcategui A C, Mcleod R R *et al. Advanced Materials Technologies*[J], 2019, 4(11): 1 900 592
- [15] Wu H Z, Chen P, Yan C Z *et al. Materials & Design*[J], 2019: 171
- [16] O'Neill P F, Kent N, Brabazon D. *Mitigation and Control of the Overcuring Effect in Mask Projection Micro-Stereolithography*[C]. America: American Institute of Physics Conference Series, 2017: 200 012
- [17] Pham D T, Ji C. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part C*[J], 2005, 214(5): 635
- [18] Khaledi A A, Farzin M, Akhlaghian M *et al. Journal of Prosthetic Dentistry*[J], 2019, 124(1): 81
- [19] Lin Zhiwei(林志伟), Shang Ce(商策), Wu Senyang(吴森洋). *Research and Exploration in Laboratory*(实验室研究与探索)[J], 2019, 38(10): 75
- [20] Wu Y Z, Hou H P, Liu S H *et al. China Academic Conference on Printing and Packaging*[M]. Singapore: Springer, 2020: 517
- [21] Tzounis L, Bangeas P I, Exadaktylos A *et al. Nanomaterials*[J], 2020, 10(5): 1
- [22] Song Z Y, Ren L Q, Liu Q P. *FDM-Based Polymer Composites Multi-Material 3D Printing*[C]. Ningbo: ICBE, 2016: 121 14
- [23] Zhang S U. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*[J], 2017, 2(6): 157
- [24] Taufik M, Jain P K. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2017, 30: 161
- [25] Kaserer L, Simon B, Braun J *et al. On the Role of Process Pressure in Laser Powder Bed Fusion: Mechanisms and Effects*[C]. Lisbon: EuroPM 2020, 2020
- [26] Gu Dongdong. *Laser Additive Manufacturing of High Performance Materials*[M]. Heidelberg: Springer, 2015: 15
- [27] Pham M T, Teo T J, Song H Y *et al. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*[J], 2017, 22(5): 2359
- [28] Leary M, Mazur M, Elambasseril J *et al. Materials & Design*[J], 2016, 98: 344
- [29] Yu C, Delin M, Kullenberg F *et al. Surface and Interface Analysis*[J], 2020, 52(12): 1066
- [30] Wang Wei(王维), Liu Baoyuan(柳宝元), Li Changfu(李长富) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(1): 279
- [31] Wu Dongjiang(吴东江), Yuan Shijun(元世军), Yu Chao(余超) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(1): 78
- [32] Challis V J, Xu X, Lai C Z *et al. Materials & Design*[J], 2014, 63(2): 783
- [33] Kim E H, Choi H H, Jung Y G. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 53: 43
- [34] Hossain M S, Gonzalez J A, Hernandez R M *et al. Additive Manufacturing*[J], 2016, 10: 58
- [35] Guercio G D, Galati M, Saboori A *et al. Acta Metallurgica Sinica* [J], 2020, 33(2): 183
- [36] Bobbio L D, Qin S, Dunbar A *et al. Additive Manufacturing*[J], 2017, 14: 60
- [37] Kar B, Jo B, Cea B. *Procedia CIRP*[J], 2020, 94: 254
- [38] Mishurova T, Cabeza S, Thiede T *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2018, 49: 3038
- [39] Mekonnen B G, Bright G, Walker A. *CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future*[M]. New Delhi: Springer, 2016: 20

- [40] Gibson I, Rosen D W, Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*[M]. New York: Springer, 2015: 219
- [41] Cheng R, Wu X Y, Luo W H. *Advanced Materials Research*[J], 2013, 681: 298
- [42] Chiu Y Y, Liao Y S, Hou C C. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 140(1-3): 179
- [43] Furumoto T, Koizumi A, Alkahari M R et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 219: 10
- [44] Nagesha B K, Dhinakaran V, Shree M V et al. *Materials Today: Proceedings*[J], 2020, 21: 916
- [45] Ren Yongming(任永明), Lin Xin(林鑫), Huang Weidong(黄卫东) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(10): 3160
- [46] Tang Y L, Dong G Y, Zhou Q X et al. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*[J], 2018, 15(4): 1546
- [47] Zhu Yanqing(朱艳青), Shi Jifu(史继富), Wang Leilei(王雷雷) et al. *Manufacturing Technology & Machine Tool*(制造技术与机床)[J], 2015, 642(12): 50
- [48] Li Xin(李昕). *Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools*(凿岩机械气动工具)[J], 2014, 157(4): 36
- [49] Zhang Xuejun(张学军), Tang Siyi(唐思熠), Zhao Hengyue(肇恒跃) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2016, 44(2): 122
- [50] Yu Tongxi(余同希). *Mechanics in Engineering*(力学与实践)[J], 2005, 27: 90
- [51] Chen Zhen(陈振), Zhang Zengzhi(张增志), Cong Zhonghui(丛中卉) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2020, 48(3): 1
- [52] Launey M E, Buehler M J, Ritchie R O. *Annual Review of Materials Research*[J], 2010, 40(1): 25
- [53] Azir M Z, Harun W, Kadrigama K. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*[J], 2020, 788: 0 120 100
- [54] Wang A J, McDowell D L. *International Journal of Plasticity*[J], 2005, 21(2): 285
- [55] Wang J, Evans A G, Dharmasena K et al. *International Journal of Solids & Structures*[J], 2003, 40(25): 6981
- [56] Zhang Jiarui(张甲瑞), Zhai Guangtao(翟光涛), Li Wenli(李文礼). *Acta Materialia Sinica*(复合材料学报)[J], 2021, 38: 1
- [57] Zhao W M, Wang C, Xing B H et al. *Materials Research Express*[J], 2020, 7(8): 085 201
- [58] Winter R E, Cotton M, Harris E J et al. *Journal of Physics Conference Series*[J], 2014, 500(14): 142 034
- [59] Douglas T, Queheillalt, Yasushi et al. *Scripta Materialia*[J], 2004, 50(3): 313
- [60] Yang L, Harrysson O, West H et al. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2015, 69-70: 475
- [61] Campanelli S L, Contuzzi N, Ludovico A D et al. *Materials*[J], 2014, 7(6): 4803
- [62] Yu X L, Zhou J, Liang H et al. *Progress in Materials Science*[J], 2018, 94: 114
- [63] Rumpf R C, Pazos J. *Optics Express*[J], 2012, 20(14): 15 263
- [64] Ngo T D, Kashani A, Imbalzano G et al. *Composites Part B: Engineering*[J], 2018, 143: 172
- [65] Iyibilgin O, Yigit C, Leu M C. *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium* [C]. Austin: University of Texas at Austin, 2013: 895
- [66] Dong J Y. *Biomaterials*[J], 2011, 32(31): 7741
- [67] Chu C, Graf G, Rosen D W. *Computer-Aided Design and Applications*[J], 2008, 5(5): 686
- [68] Winter R E, Cotton M, Harris E J et al. *Modelling Simulation in Materials Science Engineering*[J], 2014, 22(2): 025 021
- [69] Dirk L, Matej V, Sven S et al. *Materials*[J], 2017, 10(8): 922
- [70] Nicola, Contuzzi, Sabina et al. *Materials*[J], 2013, 6(8): 3451
- [71] Schwarz H A. *Monatshefte Für Mathematik Und Physik*[J], 1923, 32(1): A3
- [72] Schoen A H. *NASA Technical Report*, No.D-5541[R]. Washington DC: NASA, 1970
- [73] Gandy P J F, Bardhan S, Mackay A L et al. *Chemical Physics Letters*[J], 2001, 336(3): 187
- [74] Wang Y. *Computer-Aided Design*[J], 2007, 39(3): 179
- [75] Deng Huaibo(邓怀波), Chen Yuhua(陈玉华), Li Shuhan(李树寒) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(12): 4119
- [76] Cheng L, Bai J X, To A C et al. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*[J], 2019, 244(1): 334
- [77] Mcmillan M, Jurg M, Leary M et al. *Procedia Technology*[J], 2015, 20: 178
- [78] Banhart J. *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(6): 559
- [79] Yang L, Harrysson O, West H et al. *Acta Materialia*[J], 2012, 60(8): 3370
- [80] Egan P F, Gonella V C, Max E et al. *PLoS One*[J], 2017, 12(8): e0182902
- [81] Shi Zhiliang(石志良), Lu Xiaolong(卢小龙), Huang Chen(黄琛) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(6): 693
- [82] Hao Y Q, Wang L, Jiang W B et al. *Engineering*[J], 2020, 6(11): 1285
- [83] Singh S, Talwar R. *Sadhana*[J], 2014, 39(6): 1311
- [84] Kumar V, Manogharan G, Cormier D R. *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*[C]. Austin: University of Texas at Austin, 2009: 738
- [85] Kong D, Feng F, Zhi X. *International Journal of Steel Structures* [J], 2014, 14(4): 901

- [86] Xu G, Cheng G D. *Acta Mechanica Sinica*[J], 2010, 26(6): 807
- [87] Hu J Q, Li M, Yang X T *et al.* *Computer-Aided Design*[J], 2020, 127: 102 854
- [88] Gorguluarslan R M, Gandhi U N, Mandapati R *et al.* *Computer-Aided Design Applications*[J], 2016, 13(1): 1
- [89] Sakata S, Ashida F, Zako M. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*[J], 2003, 192(7-8): 923
- [90] Cohn D. *Desktop Engineering*[J], 2018, 23(8): 38
- [91] Pu Z, Toman J, Yu Y *et al.* *Journal of Manufacturing & Engineering*[J], 2015, 137(2): 021 004
- [92] Bendsøe M P, Kikuchi N. *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*[J], 1988, 71(2): 197
- [93] Guanchun L, Chumyi L. *Structural and Multidisciplinary Optimization*[J], 2007, 36(4): 365
- [94] Farmarzi A, Afshar M H. *Scientia Iranica*[J], 2012, 19(3): 373
- [95] Song G H, Jing S K, Zhao F L *et al.* *Chinese Journal of Mechanical Engineering*[J], 2017, 30(5): 1184
- [96] Mark K M, Daniel T, Marshall J *et al.* *International Journal of Rapid Manufacturing*[J], 2018, 7(2-3): 120
- [97] Savio G, Meneghello R, Concheri G. *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*[M]. Cham: Springer, 2017: 213
- [98] Gao W, Zhang Y, Ramanujan D *et al.* *Computer-Aided Design*[J], 2015, 69: 65
- [99] Gao Hongfei(高鸿飞). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Changsha: Hunan University, 2019
- [100] Ozdemir Z, Hernandez-Nava E, Tyas A *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 2016, 89: 49
- [101] Zhang Wanbo(张万波), Yan Leilei(闫雷雷), Zhao Xue(赵雪) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(12): 3911
- [102] Hawreliak J A, Lind J, Maddox B *et al.* *Scientific Reports*[J], 2016, 6: 28 094
- [103] Yaroslav, Lauri K, Mart S *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2019, 86: 105 087
- [104] Feng Q X, Tang Q, Liu Z M *et al.* *Journal of Engineering Manufacture*[J], 2018, 232(10): 1719
- [105] Ding Yuanyuan(丁圆圆). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016
- [106] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A *et al.* *Chapter 2-Making metal foams*[M]. New York: Elsevier Inc., 2000
- [107] Ryu K M, An J Y, Cho W S *et al.* *Materials Transactions*[J], 2005, 46(3): 622
- [108] Gong L, Kyriakides S. *International Journal of Solids & Structures* [J], 2005, 42(5-6): 1381
- [109] Rusch K C. *Journal of Applied Polymer Science*[J], 1970, 14(5): 1263
- [110] Gümrük R, Mines R A W. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2013, 68: 125
- [111] Zhang Yue(张越). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015
- [112] Wang Shilong(王士龙). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017
- [113] Wu Hexiang(吴鹤翔). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015
- [114] Zhang Xinchun(张新春). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011
- [115] Al-Ketan O, Abu Al-Rub, Rowshan R. *Advanced Materials Technologies*[J], 2017, 2(2): 1 600 235
- [116] Merkt S, Hinke C, Bülmann J *et al.* *Journal of Laser Applications*[J], 2014, 27(S1): 70 006
- [117] Darling E M, Carlo D D. *Annual Review of Biomedical Engineering*[J], 2015, 17: 35
- [118] Michael D W, Chafik G, Simon Z *et al.* *3D Printing & Additive Manufacturing*[J], 2019, 6(1): 40
- [119] Xiao Z F, Yang Y Q, Xiao R *et al.* *Materials & Design*[J], 2018, 143: 27
- [120] Yang J, Gu D, Lin K *et al.* *Virtual and Physical Prototyping*[J], 2019, 15(1): 75
- [121] Mines R A W, Tsopanos S, Shen Y *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 2013, 60: 120
- [122] Gibson I, Rosen D, Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*[M]. Berlin: Springer, 2010
- [123] Burkhardt C, Wagner R, Baumgart C *et al.* *Advanced Engineering Materials*[J], 2020, 22(7): 2 000 037
- [124] Ren Dechun(任德春), Zhang Huibo(张惠博), Li Shujun(李述军) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(9): 3218
- [125] Surmeneva M A, Surmenev R, Chudinova E A *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 133: 195
- [126] Murr L E, Gaytan S M, Medina F *et al.* *Philosophical Transactions*[J], 2010, 368(1917): 1999
- [127] Lawrence E, Murr L E, Sara M *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2012, 28(1): 1
- [128] Terrazas C A, Murr L E, Bermudez D *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35(2): 309
- [129] Chia H N, Wu B M. *Journal of Biological Engineering*[J], 2015, 9: 4
- [130] Maconachie T, Tino R, Lozanovski B *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2020, 107(11-12): 4449
- [131] Zein I, Teoh S H, Huttmacher D W *et al.* *Biomaterials*[J], 2002, 23(4): 1169
- [132] Kang S W, Bae J H, Park S A *et al.* *Biotechnology Letters*[J],

- 2012, 34(7): 1375
- [133] Haq R H A, Rahman M N A, Ariffin A M T *et al.* *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*[J], 2017, 226: 012 038
- [134] Bourell D, Espalin D, Arcaute K *et al.* *Rapid Prototyping Journal*[J], 2010, 16(3): 164
- [135] Hossain M S. *Thesis for Master*[D]. Texas: University of Texas, 2014
- [136] Korpela J, Kokkari A, Korhonen H *et al.* *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials*[J], 2013, 101(4): 610
- [137] Yu Yandong(于彦东), Meng Chenli(孟陈力). *Journal of Harbin University of Science and Technology*(哈尔滨理工大学学报)[J], 2018(3): 60
- [138] Ravari M R K, Kadkhodaei M, Badrossamay M *et al.* *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2014, 88: 154
- [139] Dziejewit P, Janiszewski J. *Mechanik*[J], 2018, 91(3): 250
- [140] Khan S Z, Masood S H, Ibrahim E *et al.* *Virtual & Physical Prototyping*[J], 2019, 14(4): 360
- [141] Duraibabu R V, Prithvirajan R, Sugavaneswaran M *et al.* *Materials Today: Proceedings*[J], 2020, 24: 1035
- [142] Hasib H, Harrysson O L A, West H A. *JOM*[J], 2015, 67(3): 639
- [143] Hussein A Y. *Thesis for Master*[D]. Devon: University of Exeter, 2013
- [144] Samant R, Rajit R, Mhapsekar K *et al.* *Additive Manufacturing* [J], 2018, 22: 618
- [145] Hintze W, Wenserski R V, Junghans S *et al.* *Procedia Manufacturing*[J], 2020, 48: 485
- [146] Zheng X, Liu Y, Zhang J *et al.* *Journal of Wuhan University of Technology, Mater Sci Ed*[J], 2019, 34(6): 1371
- [147] Raghavendra S, Molinari A, Fontanari V *et al.* *Material Design & Processing Communications*[J], 2019, 2(5): 118
- [148] Gordon J V, Narra S P, Cunningham R W *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 36: 101 552
- [149] Lozanovski B, Leary M, Tran P *et al.* *Materials & Design*[J], 2019, 171: 107 671
- [150] Han X S, Zhu H H, Nie X J *et al.* *Materials*[J], 2018, 11(3): 392
- [151] Turner B N, Gold S A. *Rapid Prototyping Journal*[J], 2015, 21(3): 250
- [152] Wang Yu(王玉), Chen Ziqian(陈子谦), Li Houqi(李后起) *et al.* *Journal of Tongji University, Natural Science*(同济大学学报, 自然科学版)[J], 2019, 47(8): 1180
- [153] Jiang P, Rifat M, Basu S. *Procedia Manufacturing*[J], 2020, 48: 781
- [154] Khairallah S A, Anderson A T, Rubenchik A *et al.* *Acta Materialia*[J], 2016, 108: 36
- [155] Nasr E A. *Comprehensive Materials Processing*[J], 2014, 10: 375
- [156] Hiller J D, Lipson H. *Thesis for Master*[D]. New York: Cornell University, 2009
- [157] Paul R, Anand S. *Computer-Aided Design*[J], 2015, 63: 86
- [158] Vaissier B, Pernot J P, Chougrani L *et al.* *Computer-Aided Design*[J], 2020, 129: 102 914
- [159] Ameen W, Al-Ahmari A, Alkhalefah H. *International Journal of Advanced Science and Technology*[J], 2020, 29(2): 1847

Research Progress of Additively Manufactured Energy-Absorbing Structures

Wang Zhaoyi¹, Lv Yunzhuo², Chen Bingzhi¹, Zhou Junxian²

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Additive manufacturing (AM), i.e. 3D printing technology, is a rapid prototyping method (RP) developed in the 1980 s, by which some complex structures can be efficiently manufactured. It also provides a platform for the development of complex geometries, and is instrumental in cost-savings and time-savings of the production. Energy-absorbing materials and structures are used to absorb energy in collisions and to minimize the damage of the impact target, and their geometries are becoming increasingly complicated in order to achieve higher performances. Therefore, novel energy absorbers usually need the AM technology to produce. Meanwhile, their developments have received extensive attention in many research fields, as nearly all major industries are enjoying the benefits of them. This paper aims to provide a comprehensive overview of new energy absorbers characterized by cellular structures, which includes introductions of various lattice morphologies, design methods and the additive manufacturing technologies they used, supplemented by the summarization of advantages, challenges and the application prospect of the structure.

Key words: laser additive manufacturing; energy-absorbing structure; cellular structure; lattice morphology; lattice structure

Corresponding author: Chen Bingzhi, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, P. R. China, E-mail: chenbingzhi06@126.com