

吸能的力学超材料设计与增材制造研究现状及趋势

张志, 宋波*, 王晓波, 张磊, 范军翔, 魏帅帅, 史玉升

华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 针对航空航天、交通运输等领域对高吸能抗冲击构件的需求, 具备超高吸能特性的力学超材料被广泛研究, 主要包括晶格、板格、三周期极小曲面和仿生超材料。吸能的力学超材料通常具有极其复杂的空间结构, 传统制造工艺难以成形。增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术基于离散切片、逐层堆积的原理对构件进行快速成形, 具有较高制造自由度, 上述技术特点使其成为制造具有复杂微结构吸能的力学超材料的有效途径。系统地综述了吸能的力学超材料设计及其不同增材制造工艺的研究现状, 并展望了吸能的力学超材料的设计与增材制造的发展趋势, 揭示了仿生智能的可回复设计将成为具备吸能效果的力学超材料设计的发展方向。

关键词 激光技术; 超材料; 力学性能; 能量吸收; 增材制造; 仿生设计

中图分类号 TB12; TB17; TH122

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1402022

1 引言

针对航空航天、交通运输等领域对轻质高强、抗冲击减震的构件需求, 开发轻量化兼具高力学性能及强能量吸收特性的新型材料或超材料成为目前的重要研究方向。开发新型材料周期长, 成本高, 导致应用受限。因此, 设计具有高比强度及强吸能特性的力学超材料成为常用方法。力学超材料是人造结构材料或复合材料, 但拥有天然材料所不具备的特殊物理性能。轻量化、高能量吸收的空间结构是力学超材料的主要特征^[1]。目前, 国内外学者已对多种吸能的力学超材料进行了广泛研究, 包括晶格、板格、三周期极小曲面(Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS)和仿生超材料^[2-6], 如图 1 所示。

晶格超材料是多条连接杆按照晶格或类晶格的排列方式进行组合而形成的空间结构, 包括常见的面心立方(Face-Centered Cubic, FCC)、体心立方(Body-Centered Cubic, BCC)和金刚石(Diamond)晶格超材料等。板格超材料是一种以板格顶点替代晶格节点并具有特殊板格排列方式的空间结构, 板格通过特定的组合方式还可产生多个空腔, 进而实现吸声降噪的功能效果^[7]。TPMS 超材料是在三个独立的方向上有连续光滑的无限周期曲面且曲面在空间中有两个不相交区域的特殊空间结构超材料^[8], 不存在尖锐的凸起和凹陷, 可避免应力集中现象。不仅如此, 研究人员还发现其空间构型与人骨组织结构相似, 因此可被用于制作骨植入体应用研究^[9-10]。用于能量吸收的仿生超

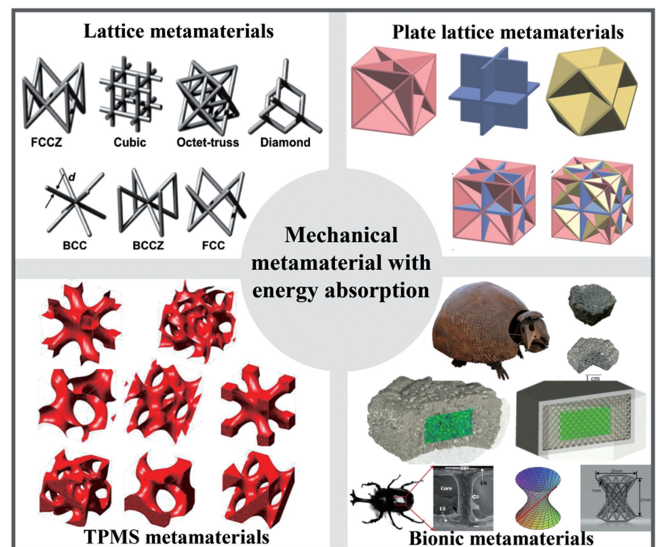


图 1 力学超材料的分类^[2-6]

Fig. 1 Classification of mechanical metamaterials^[2-6]

材料在 2000 年首次被应用^[11], 以更高的比能量吸收效率而闻名, 能以较小的质量实现高承载能力及能量吸收效果^[12-13]。为了进一步提高力学性能和能量吸收效果, 科研工作者从生物结构出发, 设计并优化超材料。在自然界中, 动物或者植物提供了许多低相对密度、高力学性能及强能量吸收效果的空间结构。如竹子的特殊宏观、微观空心结构导致其受到横向载荷时产生大幅变形以达到高能量吸收效果^[14]; 柚子皮中特殊的蜂窝结构使其承受外力挤压时内部果肉无损伤^[15-16]; 甲虫前翅的六角蜂窝结构保护后翅并抵抗与

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2021-12-20; 录用日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51922044, 51775208)、广东省重点领域研发计划(2020B090923001)

通信作者: *bosong@hust.edu.cn

对手作战过程中产生的冲击,据报道,甲虫的前翅可以承受高达 23 N 的刺穿力,这比甲虫自身的战斗力高得多,表明其良好的生物构型具有较高的力学稳定性^[17-18]。

力学超材料在近几年的发展过程中不断进步,但受制于制造方法,传统的减材或等材制造方法无法快速且廉价地成形形状复杂的超材料,导致力学超材料概念在早期提出时得到的研究较少。增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术^[19-20]是一种基于离散-堆积原理制造金属或非金属构件的成形方法,该技术首先将三维计算机辅助设计(CAD)模型离散化成二维切片,根据二维切片形貌进行逐层扫描加工,并按照特定的扫描路径及工艺参数生产构件。基于以上成形特点,AM 技术可制备形状复杂、尺寸从纳米到米级别的超材料。

本综述全面概述了近年来吸能的力学超材料设计与增材制造的研究现状及进展。着重介绍了目前具有能量吸收效果的超材料设计及研究现状,包括晶格、板格、三周期极小曲面和仿生超材料。此外,还介绍了超材料的增材制造手段及未来超材料设计的发展趋势。

2 面向超材料的增材制造技术

不同于传统的成形技术,增材制造技术通过将物体分为若干薄层,然后逐点逐层成形,理论上可以成形出任意复杂的结构。该技术自 1979 年被提出以来,经过四十余年的发展,已经有二十余种技术被提出^[21]。总体而言,根据成形材料的状态,面向超材料的增材制造技术可分为丝材基、液态基、粉末基和液-粉混合基技术。成形的材料涵盖金属、高分子和陶瓷等,且可成形从纳米到米级的各种尺度^[22-25],可以适应各种各样的应用场景。此外,增材制造技术通过自动控制软件和设备工作,大大节省了劳动力,符合未来智能制造的需求。然而,应该注意的是,不同的增材制造技术由于成形的方式不同,具有不同的特点,因此成形材料、尺寸、分辨率和表面质量都有显著差异。

在超材料制造方面,需要根据所需要材料的结构和特性选择合适的工艺。例如,激光选区熔化(SLM)技术采用激光作为热源,金属粉末作为原材料^[26]。SLM 受粉末的粒径、激光功率、激光光斑、熔池大小等因素的限制,最小的成形尺寸为 0.2 mm 左右,最大成形尺寸达到了 1.7 m 左右,成形出的样品具有良好的表面质量。光固化技术(Stereo Lithography Apparatus, SLA)利用光敏树脂作为原材料,通过紫外激光器照射树脂表面引发树脂固化,直接在液态树脂中获得三维模型,这种成形方式使得该技术的成形分辨率仅受激光光斑或像素大小的限制,理论上可以获得更高的成形精度。Fan 等^[27]总结了典型面向超材料的增材制造技术的特点(主要是指制造尺寸和分辨率)及其适用材料,揭示了增材制造技术在制造各种尺

度超材料方面的局限性。

为适应更广泛的超材料增材制造需求,多材料、高精度以及更高效的增材制造技术不断发展。Tumbleston 等^[28]提出了一种连续液面生长(Continuous Liquid Interface Production, CLIP)增材制造技术,其具有超高的成形分辨率(小于 100 μm)和成形效率(每小时数百毫米)。Oran 等^[22]提出了一种通过初始体积沉积、而后控制收缩率的方法,实现了纳米超材料的成形。Kelly 等^[23]提出了一种体积增材制造的工艺,可以极大地提高成形效率,仅需 30 s 便可成形出 1 cm 尺度的模型。Skylar-Scott 等^[29]设计了一种多材料增材制造技术,可以快速成形折纸机构和软体机器人。然而,需要明确的是,虽然增材制造技术发展迅速,但在制造超细纳米复杂结构、多材料体系、超大型结构等类型的超材料方面仍存在一定的局限性。

3 晶格超材料

晶格超材料结构是由周期性/准周期性的规则重复单胞组成的一种空间结构,如图 2(a)所示^[2]。它是一种蜂窝结构,在尺度上不同于桁架或框架等大型工程结构,晶格超材料单元具有毫米或微米尺度。这意味着,晶格单元可以用经典力学分析为空间框架,晶格超材料的力学性能和能量吸收可通过多因素调控,如单胞大小、单胞类型及优化手段。在压缩卸载过程中,晶格超材料表现出典型的由弯曲变形主导或拉伸变形主导的两类力学行为,弯曲变形主导的晶格结构产生弯矩,因此是柔软的,而拉伸变形主导的晶格结构经历轴向载荷而产生拉压变形,这意味着它们比弯曲变形主导的晶格结构更硬和更强。

近年来,面向超材料的增材制造技术快速发展,可以实现复杂拓扑晶格超材料的精密制造,晶格超材料的研究也受到越来越多的关注。Horn 等^[30]采用电子束熔化成形(Electron Beam Melting, EBM)制备 Ti-6Al-4V 柱棒,填充了不同尺寸和相对密度的均质菱形十二面体(Rhombic Dodecahedron, RD)晶格单元,如图 2(b)所示,并进行了四点弯曲试验,将强度作为骨植入物的力学指标。Zhao 等^[31]研究了单元形状对 EBM 制备 Ti-6Al-4V 晶格超材料压缩疲劳行为的影响,如图 2(c)所示,金属晶格超材料表现出优异的抗疲劳性能,可用于制作骨植入物。研究表明,基于晶格超材料的优化弯曲变形,采用 EBM 技术可制备出高疲劳强度、低模量的 Ti-6Al-4V 合金晶格生物超材料构件。Hedayati 等^[32]采用解析、数值和实验方法,研究了增材制造多孔八面体(Octahedron)晶格超材料的弹性模量、泊松比和屈服应力,如图 2(d)所示,发现拓扑优化可改善晶格超材料的力学性能。

基于晶格超材料除了进行均质晶格的周期性分布设计外,还可进行梯度的非均质设计,以获得多样化的力学特性及能量吸收效果,实现工程上的广泛应用。

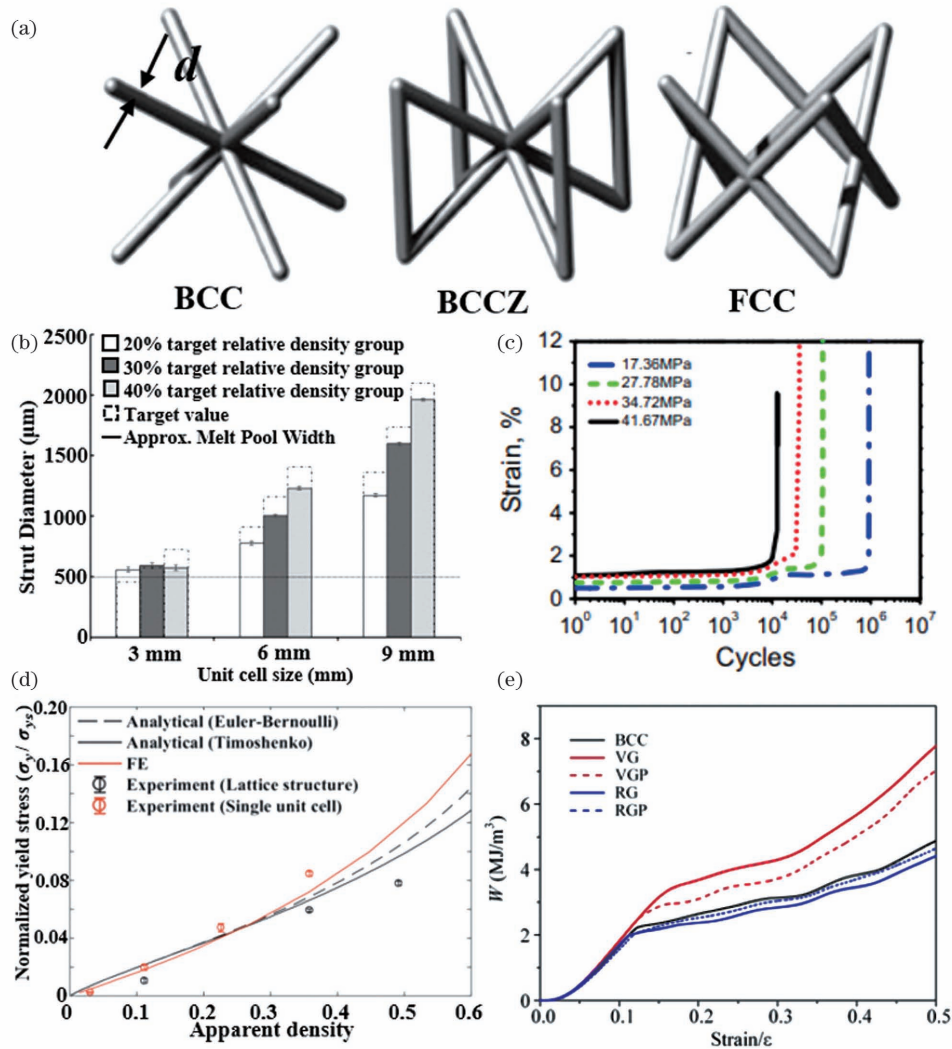


图 2 晶格超材料。(a)典型的晶格力学超材料^[2]；(b)弯曲性能^[30]；(c)疲劳性能^[31]；(d)剪切性能^[32]；(e)压缩性能^[34]
 Fig. 2 Lattice metamaterials. (a) Typical lattice mechanical metamaterials^[2] ; (b) bending properties^[30] ; (c) fatigue properties^[31] ; (d) shearing properties^[32] ; (e) compression properties^[34]

Maskery 等^[33]研究了 SLM 成形的均质和梯度 Al-Si10-Mg 晶格结构在准静态载荷下的力学行为。Bai 等^[34]研究了 SLM 制备的 Ti-6Al-4V 梯度晶格结构的准静态压缩响应和疲劳行为,结果表明,垂直梯度 (Vertical Graded, VG) 结构具有优异的力学性能和吸能效果,如图 2 (e) 所示,径向梯度 (Radial Graded, RG) 结构的压缩响应与均质结构相似,对力学性能和能量吸收的影响较小, RG 结构的疲劳性能优于 VG 结构。Zhang 等^[35]研究了相对密度变化策略对 Ti-6Al-4V 骨植入支架性能的影响,与均质晶格结构相比,梯度晶格结构表现出明显的变形行为,其能量吸收高于均质晶格结构。Nian 等^[36]研究了横向冲击载荷下填充铝管的功能梯度聚合物晶格超材料的能量吸收特性,功能梯度的晶格超材料为新型抗碰撞能量吸收器的设计提供了设计灵感。因此目前为了提升能量吸收效果,晶格结构多采用梯度结构。这是由于梯度结构将原本发生 45° 剪切断裂的倾斜断裂转变为层层断裂,即首先从相对密度较小的部分开始断裂,最终在相

对密度最高的部位断裂并由此进入致密化阶段,这个过程导致断裂阶段应力-应变曲线中的起伏峰峰值逐渐增加,最终导致梯度结构的能量吸收远高于均质结构。以上梯度晶格超材料中非梯度方向的能量吸收效果较低,因此多方向具备较高能量吸收效果的晶格超材料成为新的探索方向,Albertini 等^[37]通过实验和数值模拟的方法研究了柔性超弹性聚合物与刚性晶格结构组合的复合结构对力学性能的影响。结果表明,填充晶格可以提高晶格超材料的杨氏模量、峰值应力、平台应力和延迟致密度,从而提高基体晶格结构的能量吸收效率和比能量吸收。因此,填充晶格成为一种新型提升多方向力学性能和能量吸收的有效手段。

研究者在晶格超材料均质和梯度设计的基础上进行了功能指导拓扑优化,提升了其力学性能和能量吸收。与被动设计的经验主义相比,功能指导结构设计具有省时、优化空间大等优点。这种新型的功能超材料设计可以通过构造一个拓扑优化 (Topology Optimization, TO) 来实现。晶格超材料的性质与实

心部分在单胞内的分布模式密切相关,采用 TO 方法设计晶格超材料是通过重新分配单胞内相对密度的分布来实现晶格超材料的功能优化。Xu 等^[38]利用一种基于两步均匀化拓扑优化和反均匀化设计的方法来构建梯度晶格超材料。与构造映射函数的常规后处理相反,引入晶格拉伸设计变量,构造混合优化公式,同时优化结构柔度和映射函数,扩大微观设计空间,进一步提高性能。多层次晶格超材料的力学性能不仅取决于其整体形状和拓扑结构,还取决于其微观结构构型,Zhang 等^[39]提出了一种宏微观组合层状梯度材料和晶格结构的 TO 方法,实现了晶格材料分布的宏观设计变量和微观结构单胞拓扑的微观设计变量的同时优化。

晶格超材料具有优异可控的力学性能,但同时也面临着一些增材制造技术的固有缺陷,如制造精度、表面粗糙度等。晶格超材料形状较为复杂,而增材制造存在最小特征尺寸和特殊的分层制造方式,以上因素导致增材制造超材料易产生台阶效应^[40]。不仅如此,最小特征尺寸和制造精度可能会导致预期的晶格结构和实际制造的晶格结构之间的差异。最后,当增材制造晶格超材料时,熔池冷却过程中较大的温度梯度引起的各向异性及裂纹等缺陷对力学性能和变形行为有显著影响^[41-43]。因此,目前通过 SLM 和激光选区烧结(Selective Laser Sintering, SLS)成形晶格超材料时,可提高预热温度以降低温度梯度,从而减少结构的各向异性及裂纹等缺陷,同时,喷砂等后处理的方式可降低表面粗糙度。

4 板格超材料

近年来,板格超材料(Plate Lattice Metamaterials, PLMs)作为一种具有优异力学性能的新型结构吸引了国内外学者。传统轻量化结构(例如蜂窝结构和泡沫结构)虽然具有突出的力学性能,但其比强度与比刚度仍然与各向同性材料的理论上限(Hashin-Shtrikman 上限)存在着较大的差距,Hashin-Shtrikman 是一类典型的边界型等效介质模型,可以计算任何相对密度的复合材料力学性能的严格上限和下限^[44]。研究表明,由于板格超材料承载外力时处于平面应力状态,应力分布均匀,应力集中现象不明显,其比强度与比刚度可以接近甚至超过 Hashin-Shtrikman 上限^[45-47]。这一优异的力学性能使得板格超材料在轻量化结构设计领域具有独特的优势,其在航空航天、汽车船舶等领域有着重要的应用。

板格超材料是基于晶格超材料演化的,通过优化策略可提高板格超材料的力学性能和能量吸收的效果,将板格与晶格超材料二者结合并再次优化,可使效果更显著。在经验主义的被动设计基础上,板格超材料的结构设计已经演变为数学、物理分析设计,进而获取优化模型。Berger 等^[45]基于启发式优化策略,通过

有限元模拟指导,提出了比强度与比刚度可以达到 Hashin-Shtrikman 上限的板格超材料形式,并将其力学性能与传统晶格超材料进行了对比研究,发现其杨氏模量、剪切模量和体积模量均高于传统晶格超材料。2018 年,瑞士苏黎世联邦理工的 Mohr 和美国麻省理工的 Tancogne-Dejean 等^[46]基于经典的简单立方(Simple Cubic, SC)、BCC 和 FCC 板格单胞结构进行复合设计,开发出了多种具有各向同性力学性质的复合板格超材料,并通过激光直写(Direct Laser Writing, DLW)的增材制造技术实现了微米级的板格超材料成形,同时对复合板格超材料与晶格超材料的力学性能进行了全面的对比,证明了复合板格超材料不仅拥有各向同性特点,还拥有将近三倍于晶格超材料的超高刚度,如图 3 所示。以上研究表明,通过优化晶格超材料获得的板格超材料具有更加优异的力学性能及能量吸收效果。后来,板格超材料的制造也从宏观向微观尺度方向发展。Crook 等^[48]设计了一种新型的纳米级板格超材料,并通过双光子光刻(Two-Photon Lithography, TPL)和热解(Pyrolysis)的方法成功进行了纳米碳板格超材料的制备,通过原位力学压缩、纳米计算机断层扫描和显微拉曼光谱等手段分别对纳米板格超材料的力学性能和微观形貌进行了测试与表征。Li 等^[49]在板格超材料和晶格超材料的基础上,设计了多种复合式板格超材料,并采用 SLM 技术成形了多组试件,通过计算机模拟与实验相结合的方法对板格-晶格复合结构的吸能与吸声等特性进行了全面的研究,发现板格-晶格复合式超材料兼具高吸能与高吸声的特性。Xue 等^[50]设计了多尺度混合板格超材料,并以尼龙为原材料,通过 SLS 技术进行了超材料的增材制造成形,结合压缩实验与仿真模拟等手段,对结构的力学性能与能量吸收效果进行了深入的研究,当应变为 0.5 时,面心立方+简单立方(FCC+SC)及面心立方+体心立方(FCC+BCC)混合板格超材料的比能量吸收分别为 17.37 kJ/kg 和 22.08 kJ/kg,表现出优异的能量吸收特性。Zheng 等^[51]基于板的宏微观应力-应变关系,提出了一种板格超材料的等效连续介质力学模型,分析了三维板格超材料的等效力学行为,得到了板格超材料的等效刚度矩阵、屈服准则、屈服强度和三维塑性屈服面等重要信息。可见,板格超材料的结构设计已经从原始的经验设计演变为数学、物理分析设计,进而获取优化模型。

目前国内对板格超材料的研究较少,尚处于起步阶段。由于板格超材料具有优异的力学性能,国内外学者对其关注度不断上升,近年来,多种结构形式的板格超材料被设计出来。但是,板格超材料的复杂微观结构导致其难以通过传统制造方式进行加工成形,基于逐层加工理念的增材制造技术成为具有复杂微观结构的板格超材料的有效制造途径。但是,采用 SLM、

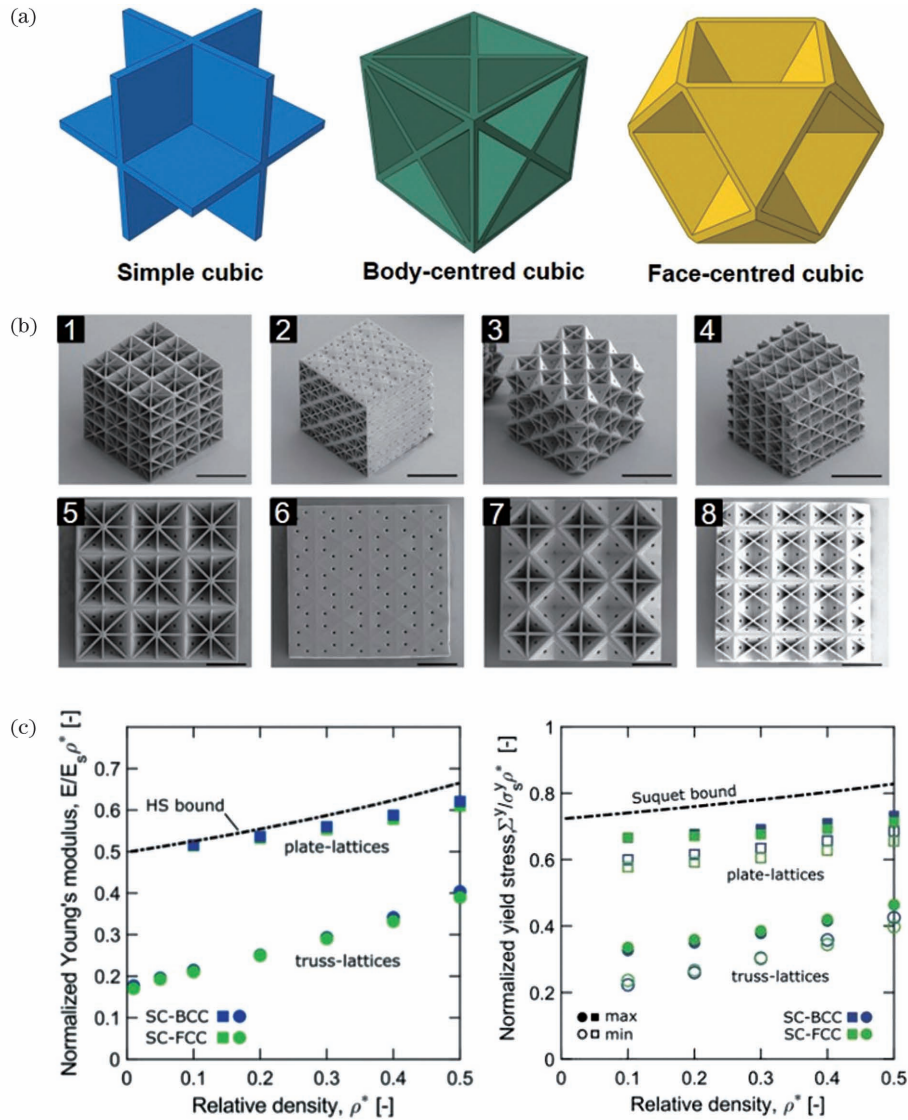


图 3 板格超材料及其力学性能^[46]。(a)典型的板格超材料的单胞结构形式;(b)增材制造成形的不同结构形式的复合板格超材料;(c)板格超材料的弹性模量、屈服强度与晶格超材料的对比

Fig. 3 Plate lattice metamaterials and their mechanical properties. (a) Typical single cell structure of plate lattice metamaterials; (b) composite plate lattice metamaterials with different structures fabricated via AM; (c) comparison of elastic modulus and yield strength between plate lattice metamaterials and lattice metamaterials

SLS、SLA 等增材制造工艺成形板格超材料时仍然存在着一些工艺约束问题,例如,板格超材料中存在大量的密闭腔体,采用 SLM、SLA 等工艺成形时,腔体内部的金属粉末或光敏树脂等原材料难以清除。对板格超材料的结构形式进行优化,使其在保持优异力学性能的同时适用于增材制造的拓扑结构是今后板格超材料设计的主要研究方向。除了优异力学性能之外,板格超材料所具有的多孔特征使其在轻量化结构、热交换、热屏蔽、吸声、生物医学等众多领域具有潜在的应用价值和广阔的应用前景。此外,高端装备对构件的功能性需求日益增长,但是目前关于板格超材料的研究多集中于力学性能方面,其功能性的研究工作较为少见,可实现可控变形回复的变性、变功能的智能板格超材料也少有研究。因此,在保持板格超材料优异力学性能的基础上,开发新型多功能的智能化板格超材

料是未来的主要发展方向。

5 TPMS 超材料

TPMS 超材料是在三个独立的方向上有连续光滑的无限周期曲面且曲面在空间中有两个不相交区域的特殊空间结构。TPMS 结构具有轻量化、高比强、优异的吸能效果等优越性能^[52-54],以及自支撑特性^[55]、设计灵活性和消除应力集中效应^[56],因此,TPMS 被予以研究。由于其可定制的密度、强度和孔隙率,TPMS 已被广泛应用于多个领域,如能量吸收装置^[57]、轻量化结构^[58]和生物医学植入体等^[9-10]。

研究者基于 TPMS 超材料的均质结构,开发出异质及梯度结构以提高能量吸收特性,后来又组合了 TPMS 超材料的定向控制力学性能和能量吸收效果。TPMS 超材料的几何因素包括表面厚度、单胞周期数

和结构尺寸,它们都会影响结构连续表面的拓扑响应^[59]。TPMS 超材料的力学性能高度依赖于结构特征,如单胞类型、宏观相对密度、单胞大小^[60-61],因此,研究具有稳定力学性能及能量吸收特性的 TPMS 超材料并进行优化设计是目前的研究方向。图 4(a)为常见的 TPMS 超材料, Yan 等^[53]阐明了 Gyroid、Diamond 和 Primitive 多孔结构的变形机制,并进一步建立了拓扑形态与力学性能之间的关系^[62]。不仅如此, Zhao 等^[63]发现, TPMS 超材料还可以减少承载外力时产生的应力集中现象,这也极大地拓展了 TPMS 超材料的应用范围。Maskery 等^[64]研究发现,热处理可以显著改善多孔点阵的变形失效问题,沉积态和热处理后的 Gyroid 结构表现出相同的能量吸收能力,且在 50% 应变处的吸能效果相较于 BCC 结构更强。疲劳性能也是超材料应用过程中的一个重要评估参数,

与八面体等晶格超材料相比, TPMS 超材料表现出更高的抗疲劳性能,这是因为 TPMS 超材料可以消除节点处的应力集中,而这些节点一般是裂纹萌生的主要部位^[56]。Novak 等^[65]通过准静态压缩实验和动力冲击实验获取了四种 TPMS 超材料的力学性能及能量吸收效果,包括 Diamond、Gyroid、IWP (I-wrapped package) 和 Primitive,研究表明, Diamond 和 Gyroid 结构具备更高的力学性能及能量吸收效果,这也是多数研究工作者聚焦于优化 Diamond 和 Gyroid 结构的原因。

在均质 TPMS 超材料的基础上,研究者演变出通过改变方程模型来变换 TPMS 超材料拓扑构型的设计方法^[66]。与传统均质构型相比,异质 TPMS 超材料的强度、弹性和能量吸收效果较高^[67]。图 4(b)所示为异质 Schwarz-P 结构的设计图,可以实现相对密度

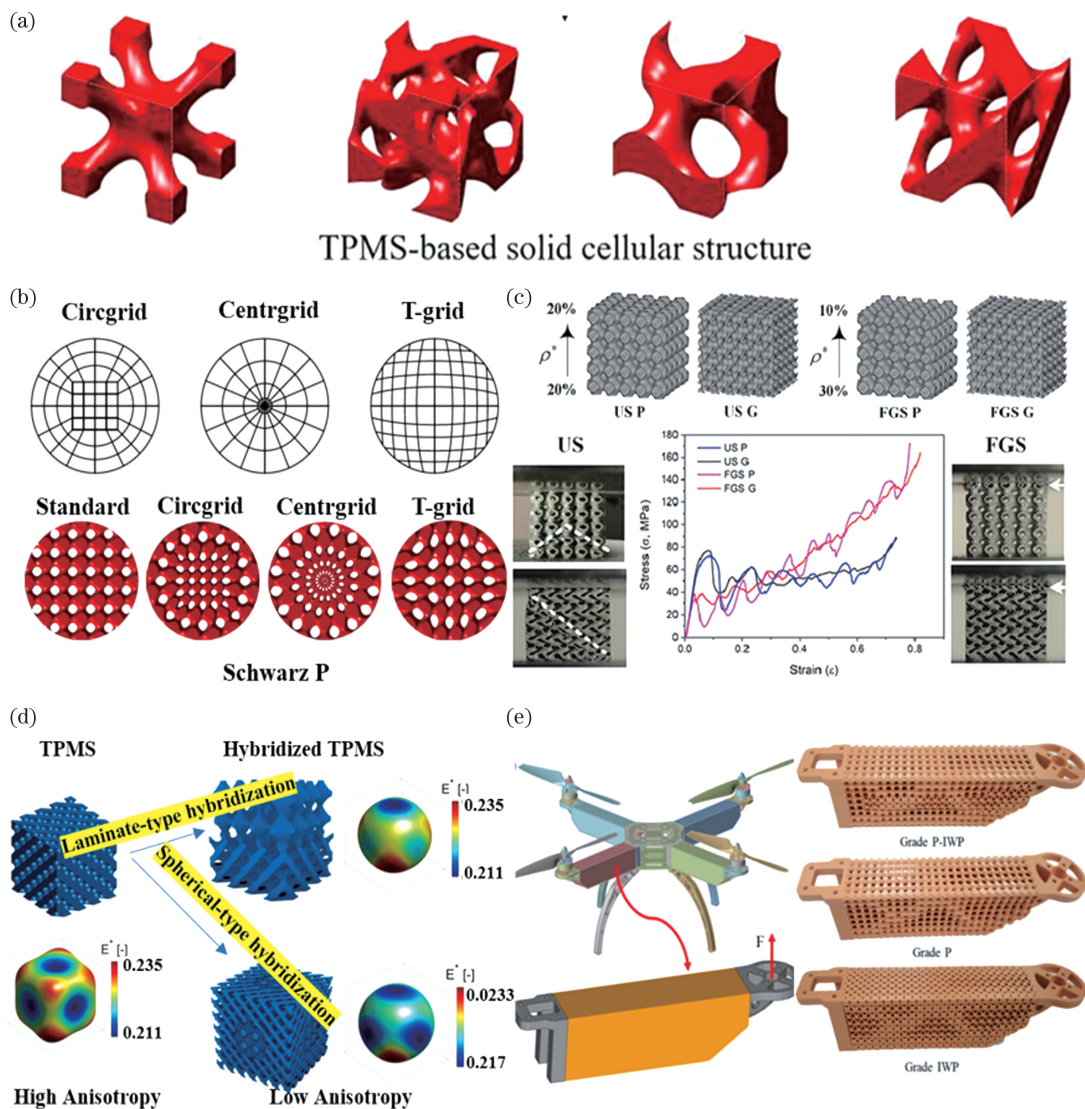


图 4 TPMS 超材料。(a)常见的 TPMS 超材料^[4]; (b)异质 TPMS 超材料^[67]; (c)梯度 TPMS 超材料及应力-应变曲线^[68]; (d)杂交可控各向异性 TPMS 超材料^[69]; (e)组合 TPMS 超材料^[70]

Fig. 4 TPMS metamaterials. (a) Common TPMS metamaterials^[4]; (b) heterogeneous TPMS metamaterials^[67]; (c) gradient TPMS metamaterials and stress-strain curves^[68]; (d) hybrid controllable anisotropic TPMS metamaterials^[69]; (e) combined TPMS metamaterials^[70]

和弹性模量的可控变化,达到模拟松质骨的效果。Zhao 等^[68]对两种常规的 TPMS 超材料进行了梯度化处理,如图 4(c)表示,TPMS 超材料经梯度化处理后其能量吸收效果大幅提升,但弊端也较为明显,其力学性能包括抗压强度和屈服强度大幅下降。Khaleghi 等^[69]提出了一种杂交控制 TPMS 超材料各向异性的方法,如图 4(d)所示,IWP、Gyroid、FKS (Fisher-Koch)和 Diamond 的强、弱刚度方向分别为对角和轴向。Schwarz-P 和 Neovius 结构则相反。采用 Schwarz-P/Neovius 与其他 5 种结构以层压或基体-球状夹杂形式设计的混合结构具有更均匀的定向弹性模量。Ren 等^[70]提出一种多 TPMS 超材料组合的刚度优化设计方案,并通过该方案成功成形了无人机翅膀构件,如图 4(e)所示。以上控制各向同性及优化刚度的思想实质上就是通过 TPMS 超材料组合实现性能控制。目前 TPMS 超材料设计已经发展为组合 TPMS 超材料,但由于多样化的 TPMS 超材料存在不同的边界分布,因此组合方式不能通过简单的拼凑手段,开发相应的数学模型以实现多结构的平滑过渡是目前亟需解决的难题之一。

目前,TPMS 超材料可通过多种增材制造手段制备,相比板格结构,不存在几乎封闭的空腔,成形过程中的粉末、液体等均可轻松去除,不仅如此,SLM 成形过程中存在的粘粉现象可通过喷砂、电解抛光或化学刻蚀等后处理进行解决,进一步提高了其表面质量。但 TPMS 超材料存在性能难调控的问题,只能通过调控超材料相对密度(体积分数)来获取各向同性结构,通过对超材料单胞施加周期性边界条件来获取各向异性因子,当各向异性因子为 1 时,超材料为各向同性,导致其在部分场景下的应用受限。因此,TPMS 超材料多性能调控的优化设计是目前研究亟需攻克的难题。

6 仿生超材料

在自然界中,植物和动物具有许多低密度、高强度和高能量吸收的优良结构,为设计具有显著能量吸收的仿生超材料提供了灵感。柚子皮中独特的海绵状蜂窝结构可以消散 80 J 的能量冲击,而不会出现可见的外部损害^[15];自然结构的壳体也表现出优异的抗冲击和穿刺能力,如椰子壳^[71]和澳洲果壳^[72];同样,带有尖刺的榴莲壳在榴莲果实落地时可产生较强的抗冲击效果^[73];绵羊的角在相撞时,可以抵抗 3400 N 的冲击力。因此,根据自然结构设计的仿生超材料具有研究价值。根据受力及能量吸收方向,仿生超材料可分为管状超材料和胞状超材料。

6.1 管状超材料

管状超材料具有较高的强度和刚度且成本低,常被用来制作吸能器件^[74],以汽车保险杠为例,研究者设计出了多种仿生保险杠,并通过轴向冲击、横向三点

弯曲验证了仿生结构的优越性^[14, 75]。管状超材料还被用于制作碰撞箱,用于保护人体内部骨组织^[76]。管结构在自然界中常有发现,如竹子、甲虫前翅、马尾草等。以上结构均具备较强的抗冲击及吸能效果,因此,常基于以上结构进行仿生设计及优化以获取高力学性能及能量吸收效果的构件。

竹子是一种典型的轻质高强植物,其强度可达 350 MPa,超过部分铝合金金属材料^[77],可承受轴向自重产生的压缩载荷和外来因素等导致的横向载荷。竹子横截面存在宏观大尺寸圆孔和微观梯度圆孔,如图 5(a)所示,受到横向载荷时圆孔产生压缩变形以抵抗外力冲击,从而实现较强的能量吸收效果。研究工作者从竹子特殊宏观、微观空心结构开展研究,从以往简单地模拟其特殊形貌转变为二次优化设计,通过在仿生竹子周围引入多个肋壁或构建梯度结构来提高能量吸收效果,探索高能量吸收的仿竹子超材料。Tan 等^[78]采用纳米压痕技术研究毛竹横截面杨氏模量的局部变化,预测抗冲击曲线中的增韧现象,由此验证了竹子特殊的微观梯度结构有利于抵抗外力和提高能量吸收效果,为后面基于竹子仿生的研究提供了数学指导模型。Zou 等^[79]提出了一种模拟竹子节点和维数管特性的多层管状力学超材料,如图 5(b)所示,在空心直管部位设计多个节点,并在边缘设计多层薄壁,研究表明,基于竹子仿生的优化力学超材料提高了比能量吸收效果,从原始的 9.96 J/g 提升到 35.02 J/g。Ufodike 等^[80]根据竹壁结构设计出含有类筛管的梯度竹子仿生超材料,如图 5(c)所示,相比传统均质竹子,仿生力学超材料的能量吸收能力提升了 4 倍。Hu 等^[81]研究了仿生竹管嵌套结构,在竹子的宏、微圆管基础上引入多个脊,形成类六角结构,提高了能量吸收,并通过落锤冲击实验研究了结构抗冲击性及能量吸收,该竹子仿生超材料六角结构的破坏机制表现为环向渐进性金刚石断裂模式。

Kundanati 等^[82]发现,甲虫翅尖杨氏模量为 4.14 GPa,断裂强度为 203.5 MPa,远高于甲虫翅膀的其他部位,这是由于甲虫前翅中存在特殊蜂窝结构,如图 5(d)、(e)所示,内部有由纤维和蛋白质组成的多个小梁,90%的小梁分布在蜂窝交点处,在蜂窝壁处却较少存在,每个蜂窝单元中有 1~3 个小梁^[83]。这些特殊的空间结构保证飞行过程中减少自身能量消耗并吸收外界能量冲击,因此,甲虫前翅是一种常见的仿生对象。甲虫前翅节点为圆形通孔,圆形通孔周围存在多个肋壁,类似于仿竹子管状超材料设计过程中添加的肋壁可提高其能量吸收。为了进一步提高能量吸收,仿甲虫前翅管状超材料通过在圆形通孔壁上引入起伏结构来形成梯度维数管,压缩冲击过程中结构断裂模式演变为逐层断裂,因此,能量吸收得到提高。

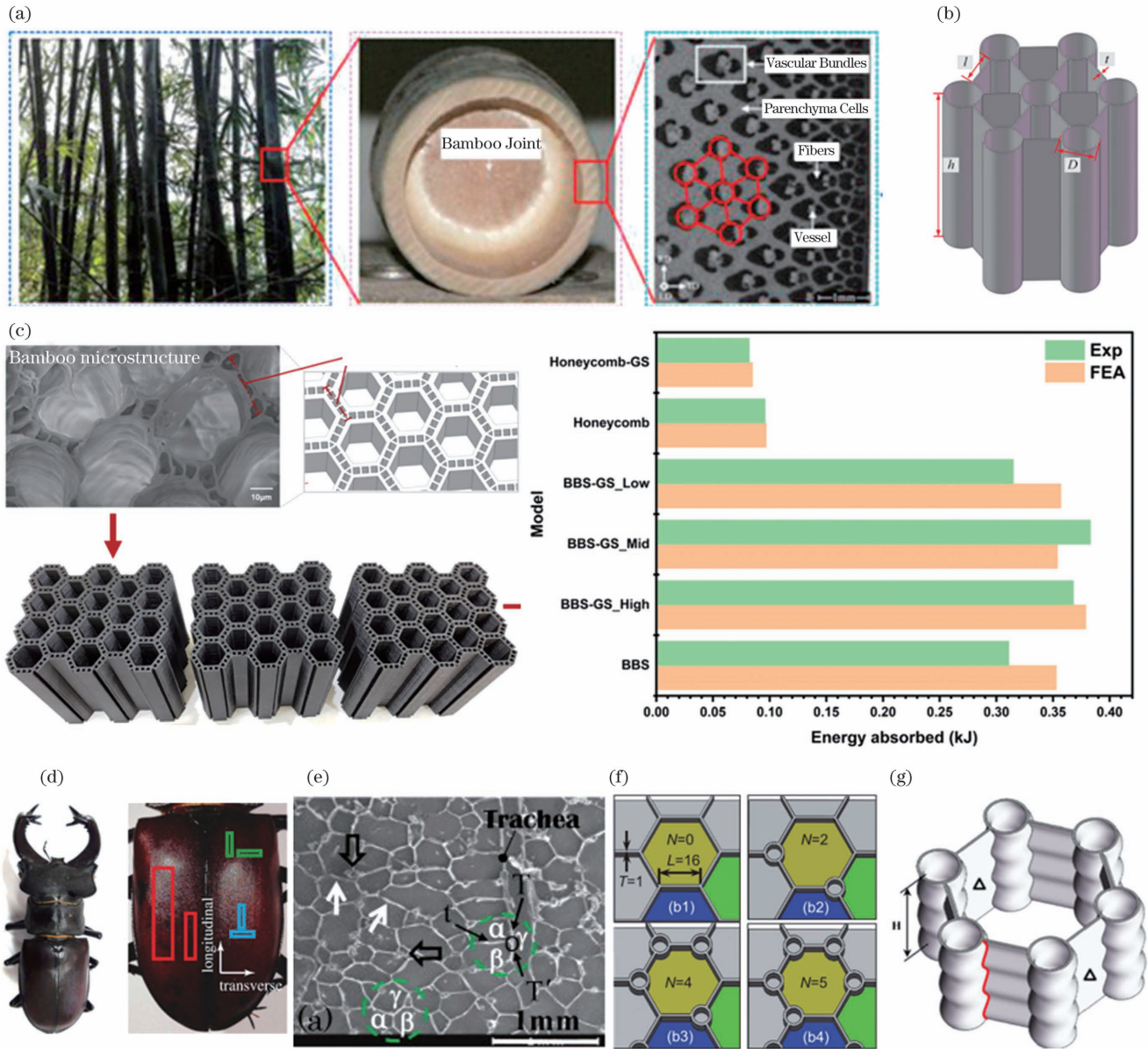


图 5 仿竹子和甲虫前翅的超材料设计。(a)竹子的宏观形貌及微观组织^[81]；(b)带肋壁的仿竹子管状超材料^[81]；(c)仿竹子的梯度超材料^[80]；(d)甲虫前翅的宏观结构^[82]；(e)甲虫前翅的微观组织^[84]；(f)仿甲虫前翅的超材料^[85]；(g)仿甲虫前翅的波纹管状超材料^[86]

Fig. 5 Design of metamaterials for bionic bamboos and beetle forewings. (a) Macroscopic morphology and microstructure of bamboo^[81]; (b) tubular metamaterial of bionic bamboo with ribs^[81]; (c) gradient metamaterial of bionic bamboo^[80]; (d) macrostructure of beetle forewing^[82]; (e) microstructure of beetle forewing^[84]; (f) metamaterial of bionic beetle forewing^[85]; (g) tubular metamaterial of bionic beetle forewing^[86]

Zhou 等^[87]设计了仿甲虫前翅的层状纤维缠绕力学超材料轻质结构,其力学性能明显高于普通结构。Chen 等^[85]在蜂窝结构基础上,分析了仿甲虫前翅蜂窝结构的变形模式和压缩强化机理,该结构是由 6 个蜂窝壁和 6 个圆形中心点组成的六边形蜂窝,研究表明,仿甲虫前翅蜂窝结构的压缩强度、变形和能量吸收分别较传统蜂窝高 15%,63%,115%,仿生结构中空小梁具有较高的扭转刚度,因此其变形行为以压缩变形为主,形成了三个半波的凸曲线,增强了该结构的强度和弹塑性变形能力,如图 5(f)所示。Yu 等^[86]提出了一种仿甲虫前翅的小梁蜂窝抗冲击超材料,如

图 5(g)所示,不同的是,壁面采用正弦弯曲设计。与传统抗冲击结构相比,该结构的力-位移曲线含有一个上升阶段和一个具有更高承载力的近似平台,其吸能能力和压缩力效率分别是传统碰撞箱的 5 倍和 2.6 倍。传统抗冲击结构存在开裂破坏,然而,仿甲虫前翅的小梁蜂窝抗冲击超材料中可产生协调一致的 S 型层压变形。Yu 等^[86]还研究了正弦波变形线幅值对小梁蜂窝抗冲击超材料峰值力和压缩力效率的影响,为根据不同工程要求调整峰值力提供了可行的方法。

管状超材料具有特殊的应用场景,其结构形状简单,且应用尺寸相比晶格超材料、板格超材料和 TPMS

超材料更大,因此在产品制造过程中多采用铸造、挤压等技术,相比增材制造技术,成本低且效率高,但增材制造技术可以为管状超材料的研究提供小尺寸模型,减少产品开发周期。

6.2 胞状超材料

吸能的力学超材料在应用过程中常面临多个方向的承载,因此仿生管状超材料存在局限性,而胞状超材料具有多方向承载的能力,且可根据构件形状的阵列单胞,获取指定形状的构件。基于以上特点,胞状超材料的应用场景与晶格超材料、板格超材料、TPMS 超材料相同,均可应用于飞机蒙皮、起落架等航空航天部件中,应用范围比管状超材料更加广阔。目前仿生胞状超材料设计已经不局限于动、植物宏微观层面上的简单模拟设计,将普通的胞状超材料转变为多阶结构及梯度结构可提高能量吸收效果,后来出现了基于仿生结构复合设计的胞状超材料,包括传统蜂窝与仿生

超材料的复合、晶格超材料与仿生超材料的复合等。

Du 等^[5]根据甲虫前翅设计出了双曲面形状,并将双曲面替换为连接杆,由此设计出曲面杆状圆柱体超材料。如图 6(a)所示,采用 AlSi10Mg 材料 SLM 成形该结构,该结构具备较强的抗压性和能量吸收能力,其承载外力为 2.95 kN,承载位移为 1.18 mm,超过大部分钛合金结构。Zhang 等^[88]提出一种分形自相似正六边形仿生蜂巢结构,如图 6(b)所示,其中二阶胞状蜂窝结构具备更高的能量吸收能力和初始弹性响应。Wang 等^[89]提出一种蜂窝和甲虫前翅的组合仿生结构,优化的仿生超材料具有 9.328 kJ/kg 的能量吸收和 1.865 kN 的承载外力,并且揭示了加载速率对能量吸收有显著影响,当加载应变速率从 0.005 s⁻¹ 提升到 1000 s⁻¹ 时,能量吸收提高了 90.8%。du Plessis 等^[6]对灭绝的雕齿兽进行计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)表征,获取了其表壳微

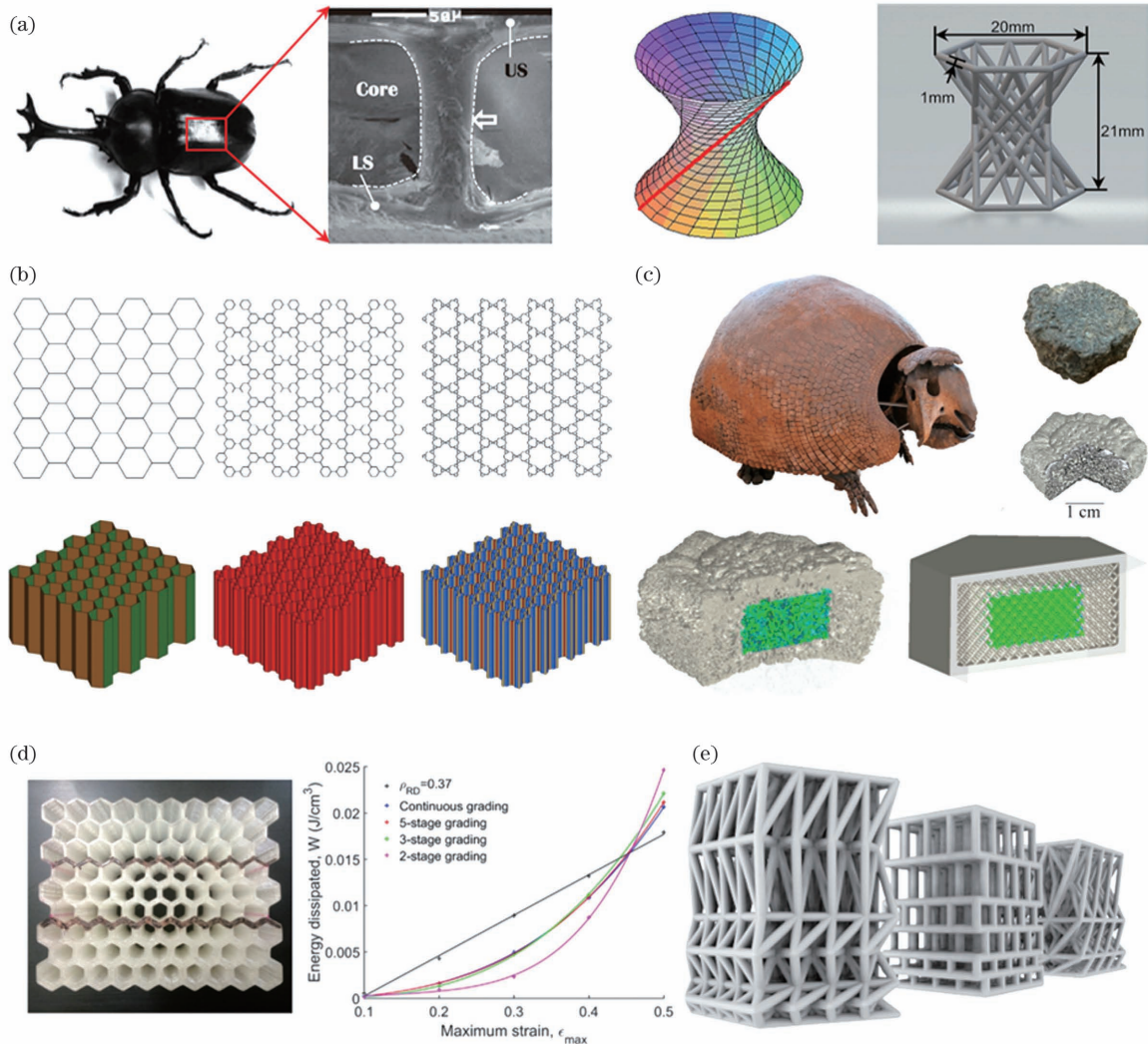


图 6 胞状超材料设计。(a)曲面杆状圆柱体超材料^[5]; (b)分形自相似正六边形仿生蜂巢超材料^[88]; (c)雕齿兽宏观结构及重构设计^[6]; (d)梯度蜂窝超材料^[90]; (e)仿生晶格超材料^[91]

Fig. 6 Design of cellular metamaterials. (a) Curved rod-shaped cylindrical metamaterial^[5]; (b) fractal self-similar regular hexagonal bionic honeycomb metamaterial^[88]; (c) macrostructure and microstructure of scuptodon and its reconstruction design^[6]; (d) gradient honeycomb metamaterial^[90]; (e) bionic lattice metamaterial^[91]

观组织,该结构由外部致密层和内部多孔结构组成,如图 6(c)所示,对该结构进行重构设计并进行抗冲击模拟,研究表明,致密层和多孔晶格芯的组合有助于提高结构的强度和避免灾难性破坏。Bates 等^[90]提出一种梯度蜂窝结构,如图 6(d)所示,并用聚氨酯增材制造该结构,获取了高能量吸收仿生超材料。

Naarttijärvi 等^[91]受自然植物启发设计出三种仿生晶格结构,分别是仿生正四面体,仿生金字塔和仿生纤维素结构,如图 6(e)所示,优化后的结构在冲击过程中可吸收更多的能量,研究表明,三种结构的能量吸收分别为 21.09, 20.94, 25.34 kJ/kg。Zhang 等^[92]将竹子的特殊宏微观空心结构与 FCC、正八面体及八重桁架结构组合,并通过变更晶格结构的空心连接杆中空心直径与实心直径的比值来获得各向同性结构,研究表明,该方式在保证结构各向同性的同时,结构依然具有较高的能量吸收。Pan 等^[93]提出了一种具有极大增强刚度、可编程性、形状可重构性和防振能力的多稳定仿生智能超材料,这种超材料是通过仿刺猪后背的刺而形成的像素智能超材料,基于能量的力学理论分析和有限元模拟证明了其具有较高的吸能效果和可再次回复性。这一概念可用于设计和制造多种用途的超材料并将其应用于可变形机械和机器人制造中。目前,随着材料设计与增材制造技术的不断进步,增材制造智能超材料成为新的研究方向,在保证抗冲击吸能过程中结构不发生断裂的前提下,仿生超材料的可设计性、可重复利用性得到大幅提高。仿生智能超材料促使仿生设计向仿形、仿性、仿功能多方面发展,然而,超高可回复变形的材料开发和仿生超材料设计是目前吸能的力学超材料的研究壁垒,也是未来设计的发展方向。

7 总结与展望

全面综述了吸能的力学超材料的研究现状,包括晶格超材料、板格超材料、TPMS 超材料及仿生超材料,介绍了超材料的设计方案及未来研究方向。对于超材料设计及发展趋势得出以下结论和相关展望。

晶格超材料设计从普通的规律性桁架排列方式转变为梯度结构设计,之后研究者通过计算模型拓扑优化的手段合理分布单胞内部固体部分的分布,最大限度地提高了力学性能和能量吸收。然而,晶格超材料的设计存在几何模型复杂和力学性能多样等问题,且是多学科交叉,因此开发高效率、性能定制化的晶格超材料设计数学模型是晶格超材料设计的主要研究方向。

板格超材料在晶格超材料的基础上演化后,研究者通过拓扑优化等优化策略实现板格超材料的力学性能和能量吸收效果的提高,将板格与晶格超材料二者结合并再次优化,可使效果更显著。然而,增材制造板格超材料存在工艺约束问题,对板格超材料的结构形

式进行优化,使其保持优异力学性能,并开发出适用于增材制造的拓扑结构是今后板格超材料设计的主要研究方向。

研究者基于 TPMS 超材料的均质结构,开发出异质及梯度结构,提高了能量吸收特性,后来出现的组合 TPMS 超材料可定向控制力学性能和能量吸收效果。然而,多样化的 TPMS 超材料存在不同的边界分布,因此组合方式不能通过简单的拼凑手段,开发相应的数学模型,实现多结构的平滑过渡是目前亟需解决的难题。

仿生超材料相比传统结构确实提升了能量吸收效果,且仿生超材料也从均质形式转变为梯度形式,具有更高的能量吸收效果。仿生超材料设计也从简单模拟其特殊的宏微观结构转变为仿生与晶格的组合设计,目前随着材料设计与增材制造技术的不断进步,增材制造智能超材料成为新的研究方向,其在抗冲击及吸能过程中构型不发生断裂,仿生超材料的可设计性、可重复利用性大幅提高。仿生智能超材料促使仿生设计向仿形、仿性、仿功能多方面发展,然而,超高可回复变形的智能材料开发和仿生超材料设计是目前吸能的力学超材料的研究壁垒,也是未来设计的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Yuan S Q, Chua C K, Zhou K. 3D-printed mechanical metamaterials with high energy absorption [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(3): 1800419.
- [2] Maconachie T, Leary M, Lozanovski B, et al. SLM lattice structures: properties, performance, applications and challenges [J]. *Materials & Design*, 2019, 183: 108137.
- [3] Weeks J S, Ravichandran G. High strain-rate compression behavior of polymeric rod and plate Kelvin lattice structures [J]. *Mechanics of Materials*, 2022, 166: 104216.
- [4] Fu J J, Sun P F, Du Y X, et al. Isotropic design and mechanical characterization of TPMS-based hollow cellular structures [J]. *Composite Structures*, 2022, 279: 114818.
- [5] Du Y X, Gu D D, Xi L X, et al. Laser additive manufacturing of bio-inspired lattice structure: forming quality, microstructure and energy absorption behavior [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 773: 138857.
- [6] du Plessis A, Broeckhoven C, Yadroitsev I, et al. Analyzing nature's protective design: the glyptodont body armor [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 82: 218-223.
- [7] Li X W, Yu X, Zhai W, Chua J W, et al. Additively manufactured deformation-recoverable and broadband sound-absorbing microlattice inspired by the concept of traditional perforated panels [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(44): 2104552.
- [8] Liu Y B. Mechanical properties of a new type of plate-lattice structures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 192: 106141.
- [9] Kapfer S C, Hyde S T, Mecke K, et al. Minimal surface scaffold designs for tissue engineering [J]. *Biomaterials*, 2011, 32(29): 6875-6882.
- [10] Bobbert F S L, Lietaert K, Eftekhari A A, et al. Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: a unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties [J]. *Acta Biomaterialia*, 2017, 53: 572-584.

- [11] Ha N S, Lu G X. A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 181: 107496.
- [12] Wegst U G K, Ashby M F. The mechanical efficiency of natural materials[J]. *Philosophical Magazine*, 2004, 84(21): 2167-2186.
- [13] Sun Q D, Sun J, Guo K, et al. Compressive mechanical properties and energy absorption characteristics of SLM fabricated Ti6Al4V triply periodic minimal surface cellular structures[J]. *Mechanics of Materials*, 2022, 166: 104241.
- [14] Xu T, Liu N, Yu Z L, et al. Crashworthiness design for bionic bumper structures inspired by cattail and bamboo[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2017, 2017: 5894938.
- [15] Fischer S F, Thielen M, Loprang R R, et al. Pummelos as concept generators for biomimetically inspired low weight structures with excellent damping properties [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2010, 12(12): B658-B663.
- [16] Zhang W, Yin S, Yu T X, et al. Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 163-172.
- [17] Duan Y, Zhang T, Zhou J, et al. Energy-absorbing characteristics of hollow-cylindrical hierarchical honeycomb composite tubes inspired a beetle forewing [J]. *Composite Structures*, 2021, 278: 114637.
- [18] Ha N S, Le V T, Goo N S. Investigation of punch resistance of the *Allomyrma dightoloma* beetle forewing[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15(1): 57-68.
- [19] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
- [20] 郑寅岚, 何艳丽, 陈晓晖, 等. 选区激光熔化成形 GH3536 合金的高温拉伸性能及断裂行为分析[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0802008.
Zheng Y L, He Y L, Chen X H, et al. Elevated-temperature tensile properties and fracture behavior of GH3536 alloy formed via selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0802008.
- [21] Askari M, Hutchins D A, Thomas P J, et al. Additive manufacturing of metamaterials: a review [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101562.
- [22] Oran D, Rodrigues S G, Gao R X, et al. 3D nanofabrication by volumetric deposition and controlled shrinkage of patterned scaffolds[J]. *Science*, 2018, 362(6420): 1281-1285.
- [23] Kelly B E, Bhattacharya I, Heidari H, et al. Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction [J]. *Science*, 2019, 363(6431): 1075-1079.
- [24] Regehly M, Garmshausen Y, Reuter M, et al. Xolography for linear volumetric 3D printing[J]. *Nature*, 2020, 588(7839): 620-624.
- [25] Vyatskikh A, Delalande S, Kudo A, et al. Additive manufacturing of 3D nano-architected metals [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 593.
- [26] 韦雄棉, 王迪, 杨永强, 等. 激光选区熔化钛合金多孔结构拉伸性能研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(18): 1802016.
Wei X M, Wang D, Yang Y Q, et al. Study on tensile properties of titanium alloy porous structure using selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(18): 1802016.
- [27] Fan J X, Zhang L, Wei S S, et al. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends [J]. *Materials Today*, 2021, 50: 303-328.
- [28] Tumbleston J R, Shirvanyants D, Ermoshkin N, et al. Continuous liquid interface production of 3D objects [J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1349-1352.
- [29] Skylar-Scott M A, Mueller J, Visser C W, et al. Voxlated soft matter via multimaterial multinozzle 3D printing [J]. *Nature*, 2019, 575(7782): 330-335.
- [30] Horn T J, Harrysson O L A, Marcellin-Little D J, et al. Flexural properties of Ti6Al4V rhombic dodecahedron open cellular structures fabricated with electron beam melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1/2/3/4: 2-11.
- [31] Zhao S, Li S J, Hou W T, et al. The influence of cell morphology on the compressive fatigue behavior of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 59: 251-264.
- [32] Hedayati R, Sadighi M, Mohammadi-Aghdam M, et al. Analytical relationships for the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials based on octahedral unit cells[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 46: 408-422.
- [33] Maskery I, Aboulkhair N T, Aremu A O, et al. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 670: 264-274.
- [34] Bai L, Gong C, Chen X H, et al. Quasi-Static compressive responses and fatigue behaviour of Ti-6Al-4V graded lattice structures fabricated by laser powder bed fusion [J]. *Materials & Design*, 2021, 210: 110110.
- [35] Zhang X Y, Fang G, Xing L L, et al. Effect of porosity variation strategy on the performance of functionally graded Ti-6Al-4V scaffolds for bone tissue engineering [J]. *Materials & Design*, 2018, 157: 523-538.
- [36] Nian Y Z, Wan S, Zhou P, et al. Energy absorption characteristics of functionally graded polymer-based lattice structures filled aluminum tubes under transverse impact loading [J]. *Materials & Design*, 2021, 209: 110011.
- [37] Albertini F, Dirrenberger J, Sollogoub C, et al. Experimental and computational analysis of the mechanical properties of composite auxetic lattice structures [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102351.
- [38] Xu L, Qian Z H. Topology optimization and de-homogenization of graded lattice structures based on asymptotic homogenization [J]. *Composite Structures*, 2021, 277: 114633.
- [39] Zhang H K, Wang Y G, 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.
- [40] Yang L, Mertens R, Ferrucci M, et al. Continuous graded Gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: design, manufacturing and mechanical properties [J]. *Materials & Design*, 2019, 162: 394-404.
- [41] Zhang J L, Song B, Wei Q S, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: processing, microstructure, property and developing trends [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(2): 270-284.
- [42] Zhang J L, 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.
- [43] Zhang J L, Gao J B, Song B, et al. A novel crack-free Ti-modified Al-Cu-Mg alloy designed for selective laser melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101829.
- [44] Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1963, 11(2): 127-140.
- [45] Berger J B, Wadley H N G, McMeeking R M. Mechanical metamaterials at the theoretical limit of isotropic elastic stiffness [J]. *Nature*, 2017, 543(7646): 533-537.
- [46] Tancogne-Dejean T, Diamantopoulou M, Gorji M B, et al. 3D plate-lattices: an emerging class of low-density metamaterial exhibiting optimal isotropic stiffness [J]. *Advanced Materials*,

- 2018, 30(45): 1803334.
- [47] Duan S Y, Wen W B, Fang D N. Additively-manufactured anisotropic and isotropic 3D plate-lattice materials for enhanced mechanical performance: simulations & experiments [J]. *Acta Materialia*, 2020, 199: 397-412.
- [48] Crook C, Bauer J, Guell Izard A, et al. Plate-nanolattices at the theoretical limit of stiffness and strength [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1579.
- [49] Li X W, Yu X, Chua J W, et al. Microlattice metamaterials with simultaneous superior acoustic and mechanical energy absorption [J]. *Small*, 2021, 17(24): 2100336.
- [50] Xue R, Cui X G, Zhang P, et al. Mechanical design and energy absorption performances of novel dual scale hybrid plate-lattice mechanical metamaterials [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 40: 100918.
- [51] Zheng Q, Fan H L. Equivalent continuum method of plane-stress dominated plate-lattice materials [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 164: 107865.
- [52] Yang L, Yan C Z, Cao W C, et al. Compression-compression fatigue behaviour of gyroid-type triply periodic minimal surface porous structures fabricated by selective laser melting [J]. *Acta Materialia*, 2019, 181: 49-66.
- [53] Yan C Z, Hao L, Hussein A, et al. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 62: 32-38.
- [54] Zadpoor A A. Mechanical performance of additively manufactured meta-biomaterials [J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 85: 41-59.
- [55] Yan C Z, Hao L, Hussein A, et al. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 533-541.
- [56] Speirs M, van Hooreweder B, van Humbeeck J, et al. Fatigue behaviour of NiTi shape memory alloy scaffolds produced by SLM, a unit cell design comparison [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 70: 53-59.
- [57] Bonatti C, Mohr D. Smooth-shell metamaterials of cubic symmetry: anisotropic elasticity, yield strength and specific energy absorption [J]. *Acta Materialia*, 2019, 164: 301-321.
- [58] Jia H R, Lei H S, Wang P D, et al. An experimental and numerical investigation of compressive response of designed Schwarz Primitive triply periodic minimal surface with non-uniform shell thickness [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 37: 100671.
- [59] Yang E, Leary M, Lozanovski B, et al. Effect of geometry on the mechanical properties of Ti-6Al-4V Gyroid structures fabricated via SLM: a numerical study [J]. *Materials & Design*, 2019, 184: 108165.
- [60] Maskery I, Aremu A O, Parry L, et al. Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading [J]. *Materials & Design*, 2018, 155: 220-232.
- [61] Meza L R, Phlipot G P, Portela C M, et al. Reexamining the mechanical property space of three-dimensional lattice architectures [J]. *Acta Materialia*, 2017, 140: 424-432.
- [62] Maskery I, Sturm L, Aremu A O, et al. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing [J]. *Polymer*, 2018, 152: 62-71.
- [63] Zhao M, Liu F, Fu G, et al. Improved mechanical properties and energy absorption of BCC lattice structures with triply periodic minimal surfaces fabricated by SLM [J]. *Materials*, 2018, 11(12): 2411.
- [64] Maskery I, Aboulkhair N T, Aremu A O, et al. Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices [J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16: 24-29.
- [65] Novak N, Al-Ketan O, Krstulović-Opara L, et al. Quasi-static and dynamic compressive behaviour of sheet TPMS cellular structures [J]. *Composite Structures*, 2021, 266: 113801.
- [66] Feng J W, Fu J Z, Shang C, et al. Porous scaffold design by solid T-splines and triply periodic minimal surfaces [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, 336: 333-352.
- [67] Ma S H, Song K L, Lan J, et al. Biological and mechanical property analysis for designed heterogeneous porous scaffolds based on the refined TPMS [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, 107: 103727.
- [68] Zhao M, Zhang D Z, Liu F, et al. Mechanical and energy absorption characteristics of additively manufactured functionally graded sheet lattice structures with minimal surfaces [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 167: 105262.
- [69] Khaleghi S, Dehnavi F N, Baghani M, et al. On the directional elastic modulus of the TPMS structures and a novel hybridization method to control anisotropy [J]. *Materials & Design*, 2021, 210: 110074.
- [70] Ren F X, Zhang C D, Liao W H, et al. Transition boundaries and stiffness optimal design for multi-TPMS lattices [J]. *Materials & Design*, 2021, 210: 110062.
- [71] Seidel R, Thielen M, Schmitt C, et al. Fruit walls and nut shells as an inspiration for the design of bio-inspired impact-resistant hierarchically structured materials [J]. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2013, 8: 172-179.
- [72] Bührig-Polaczek A, Fleck C, Speck T, et al. Biomimetic cellular metals-using hierarchical structuring for energy absorption [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(4): 045002.
- [73] Ha N S, Lu G X, Shu D W, et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of tropical fruit durian (*Durio zibethinus*) [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, 104: 103603.
- [74] Lu G X, Yu T X. *Energy absorption of structures and materials* [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003.
- [75] Yin H F, Xiao Y Y, Wen G L, et al. Crushing analysis and multi-objective optimization design for bionic thin-walled structure [J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 825-834.
- [76] Wang C Y, Li Y, Zhao W Z, et al. Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 138/139: 489-501.
- [77] Li Z H, Chen C J, Mi R Y, et al. A strong, tough, and scalable structural material from fast-growing bamboo [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(10): 1906308.
- [78] Tan T, Rahbar N, Allameh S M, et al. Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures [J]. *Acta Biomaterialia*, 2011, 7(10): 3796-3803.
- [79] Zou M, Xu S C, Wei C G, et al. A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 101: 222-230.
- [80] Ufodike C O, Wang H, Ahmed M F, et al. Design and modeling of bamboo biomorphic structure for in-plane energy absorption improvement [J]. *Materials & Design*, 2021, 205: 109736.
- [81] Hu D Y, Wang Y Z, Song B, et al. Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 162: 21-32.
- [82] Kundanati L, Signetti S, Gupta H S, et al. Multilayer stag beetle elytra perform better under external loading via non-symmetric bending properties [J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2018, 15(144): 20180427.
- [83] Chen J X, Ni Q Q, Endo Y, et al. Distribution of trabeculae and elytral surface structures of the horned beetle, *allomyrina dichotoma* (Linné) (Coleoptera: Scarabaeidae) [J]. *Insect Science*, 2002, 9(1): 55-61.

- [84] Chen J X, Wu G. Beetle forewings: epitome of the optimal design for lightweight composite materials [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 91(2): 659-665.
- [85] Chen J X, Zhang X M, Okabe Y, et al. The deformation mode and strengthening mechanism of compression in the beetle elytron plate [J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 481-486.
- [86] Yu X D, Pan L C, Chen J X, et al. Experimental and numerical study on the energy absorption abilities of trabecular-honeycomb biomimetic structures inspired by beetle elytra [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(3): 2193-2204.
- [87] Zhou Y, Guo C, Zhu C, et al. Study on design and mechanics properties of beetles elytra-inspired lightweight structures with filament winding [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(16): 1969-1973.
- [88] Zhang Y, Lu M H, Wang C H, et al. Out-of-plane crashworthiness of bio-inspired self-similar regular hierarchical honeycombs [J]. *Composite Structures*, 2016, 144: 1-13.
- [89] Wang X, Qin R X, Chen B Z. Laser-based additively manufactured bio-inspired crashworthy structure: energy absorption and collapse behaviour under static and dynamic loadings [J]. *Materials & Design*, 2021, 211: 110128.
- [90] Bates S R G, Farrow I R, Trask R S. Compressive behaviour of 3D printed thermoplastic polyurethane honeycombs with graded densities [J]. *Materials & Design*, 2019, 162: 130-142.
- [91] Naarttijärvi M, Olsson A. Design optimization for 3D printed energy absorbing structures inspired by nature [D]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2017.
- [92] Zhang Z, Zhang L, Song B, et al. Bamboo-inspired, simulation-guided design and 3D printing of light-weight and high-strength mechanical metamaterials [J]. *Applied Materials Today*, 2022, 26: 101268.
- [93] Pan F, Li Y L, Li Z Y, et al. 3D pixel mechanical metamaterials [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(25): 1900548.

Research Status and Trend of Design and Additive Manufacturing for Mechanical Metamaterials with Energy Absorption

Zhang Zhi, Song Bo*, Wang Xiaobo, Zhang Lei, Fan Junxiang, Wei Shuaishuai, Shi Yusheng
School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract

Significance Aiming at the demand of high-energy-absorbing and shock-resistant components for aerospace and transportation, metamaterials with energy absorption have been extensively studied, including truss-lattices, plate-lattices, triply periodic minimal surfaces (TPMS), and bionic metamaterials.

The truss-lattice metamaterials are the spatial structures formed by the multiple connecting rods with lattice or lattice-like arrangement, which possess high mechanical properties and energy absorption. The plate lattice metamaterials are the spatial structures in which the plate vertices replace the lattice nodes and have special plate arrangements. The plates can also generate multiple cavities through specific combinations, thereby achieving the functional effects of sound absorption and noise reduction. The TPMS metamaterials are the spatial structures that possess infinite periodic, continuous, and smooth surfaces in three independent directions. The surfaces have two disjoint regions in space. There are no sharp protrusions and depressions, which can decrease stress concentration. It is the best choice for manufacturing energy-bearing structures. Besides, the researchers have also found that its spatial configuration is similar to the structure of human bone, so it can be used to fabricate bone implants. The bionic metamaterials for energy absorption were first applied in 2000. The structures that exist in living organisms are the result of natural selection and evolution. They are known for their high specific energy absorption efficiency with small mass, which can be used for fabricating energy-absorbing components with impact resistance and energy absorption.

Traditional manufacturing technologies are difficult to fabricate these metamaterials for their complex structures. The additive manufacturing (AM) technology is based on the principle of discrete slicing and layer-by-layer stacking to rapidly fabricate components, which possesses high manufacturing freedom. The above-mentioned technical characteristics make it an effective way to manufacture energy-absorbing metamaterials with complex structures. Thus, researching and developing metamaterials with energy absorption mean a lot.

Progress The design of truss-lattice metamaterials has first changed from the ordinary regular truss arrangement to the gradient arrangement, and then the solid parts inside the unit cell are reasonably distributed through topological optimization of the computational models to maximize the mechanical properties and energy absorption. However, the design of truss-lattice metamaterials has complex geometric models, diverse mechanical properties, and multidisciplinary. Therefore, the main research direction is to develop efficient and specific mathematical models for the truss-lattice metamaterial design.

The plate-lattice metamaterial evolves based on the truss-lattice metamaterials, whose mechanical properties and energy absorption can be improved through some optimization strategies such as topological optimization. The combined method can realize optimization again, and the effect is remarkable. However, there are process constraints in the AM of plate-lattice metamaterials. The research direction of plate-lattice metamaterials is to optimize the metamaterial and

develop a topology suitable for AM for maintaining excellent mechanical properties and energy absorption.

The TPMS metamaterials with heterogeneous and gradient structures are developed. The homogeneous structures is first developed to improve energy absorption, and then the combined TPMS metamaterials to efficiently control the mechanical properties and energy absorption appear. However, diversified TPMS metamaterials have various boundary distributions, so the combination method cannot be simply pieced together. Developing a corresponding mathematical model to achieve the smooth transition of multiple structures needs to be solved urgently.

Compared with the traditional metamaterials, the bionic metamaterials improve the energy absorption, and the bionic metamaterials also change from homogeneous forms to gradient forms to achieve high energy absorption. Later, the design of bionic metamaterials also changes from simply imitating their special macrostructures and microstructures to the combined design of biomimetic and lattice.

Conclusions and Prospects At present, with the continuous progress of material design and AM technologies, additive manufacturing of intelligent metamaterials has become a new research direction to ensure that the bionic metamaterials do not break during the process of impact resistance and energy absorption, and the designability and repeatability of bionic metamaterials are greatly improved. Bionic smart metamaterials are developing towards imitating shapes, imitating properties, and imitating functions. However, the development of ultra-high recoverable and deformable smart materials and the design of bionic metamaterials are the current study barriers to the metamaterials with energy absorption, and also the main development direction.

Key words laser technique; metamaterials; mechanical properties; energy absorption; additive manufacturing; bionic design