

超材料结构增材制造技术及其应用研究进展*

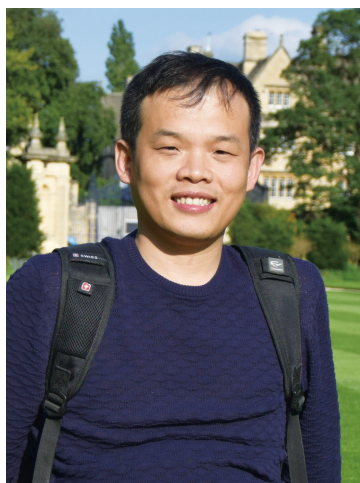
梁庆宣,杨 贞,何 锦,江子杰,陈天宁,李涤尘

(西安交通大学机械工程学院,西安 710049)

[摘要] 超材料结构因具有精确操控电磁波/声波的相位、传播模式等特性而在军事隐形及伪装、通讯、国防安全及医学成像等方面有着重要的科学研究价值和广泛的应用前景,它的研究是近年国际学术界和工程界研究的热点之一。总体来说,国内外超材料结构的研究极大地促使超材料结构器件向轻薄化、宽频带及高性能的实用化方向发展,但制造技术与电磁、声学、物理、材料等学科的交叉亟待加强,需要加速探索超材料结构研究向大规模制造跨越的实现途径,推动其快速向应用化方向发展。本文梳理了增材制造工艺在超材料结构制造中的应用现状,讨论了超材料结构功能器件方面的研究进展,并对今后超材料结构研究的发展趋势进行了探讨和展望。

关键词: 超材料结构; 亚波长; 增材制造; 功能器件; 3D 打印; 光固化

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.01/02.030



梁庆宣

博士、副教授、博士生导师,主要在增材制造与电磁学、声学、力学及材料科学交叉领域开展结构功能一体化设计制造研究,研究方向包括结构功能一体化设计与3D打印制造、电磁/声学超材料结构。近年共发表SCI论文20余篇,主持国家自然科学基金等多项科研项目研究工作。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51575431)。

超材料结构是近年国际学术界和工程界研究的热点之一,它是由亚波长结构单元构成的具有超常物理特性的人工周期结构,可以精确操控电磁波/声波的传输方向,从而实现常规材料所不具备的独特功能,例如负折射^[1]、负反射^[2]、电磁/声学黑洞^[3-5]、隐形^[6]等,在军事隐形、通信、减振降噪、医学成像等领域具有广泛的应用价值^[7]。

超材料结构提供了一种全新的设计理念,其特殊性能不是取决于构成材质本身的属性,而是源于对其单元结构的精巧设计。为了实现具有独特性能的超材料结构,必须精确设计每个结构单元,其结构参数或排列方向的微小变化都可能导致其电磁/声学性能的剧烈降低^[8-10]。因此,超材料的结构/材料/外形的多样性和复杂性,使得制造能够任意控制电磁波/声波传输路径的超材料结构^[11-15]

成为巨大的挑战。

利用增材制造技术制备超材料可以增加制造柔性,充分发挥其在复杂结构制造上的优势,实现结构与功能的一体化制造^[16]。本文首先梳理了超材料结构增材制造技术工艺的研究现状,主要讨论了熔融沉积法、光固化立体成形、激光选区烧结/熔化法、激光直写工艺和聚合物喷射技术在超材料结构制造中的应用,探讨了不同超材料功能器件的研究现状,如隐身斗篷、透镜天线、吸波结构、机械超材料、声学单向传输器件等,最后总结了当前增材制造技术在超材料研究领域的应用现状及发展趋势。

超材料结构的增材制造工艺研究现状

目前,常见的用于超材料的制造方法有熔融沉积成形、光固化立体成形、激光选区烧结/熔化法、聚合物

喷射技术等。

1 熔融沉积成形

熔融沉积成形(Fused Deposition Modeling, FDM)技术是目前最常见的3D打印技术,它是通过将丝状材料如热塑性塑料、蜡或低熔点金属的熔丝从加热的喷嘴挤出,按照零件每一层的预定轨迹,以固定的速率进行熔体沉积,最终成形三维实体结构。

2016年,牛津大学的Isakov等^[17]采用双丝熔融沉积法制造各向异性介质复合物,由两个打印头给料实现整体结构的制造,一个是低介电常数的多聚物,另一个是高介电常数的无机微粒填充物,实现了具有由两种不同性质材料组成的复杂超材料结构的快速制造。2017年,杜克大学的Xie等^[18]通过熔融沉积成形技术,在双打印头3D成型机上制造了一种生物降解聚酯与包含导电性铜颗粒的聚合物丝材复合成形的三维超材料结构样品,初步探索了金属与非金属一体化打印的三维超材料结构制造技术,如图1所示。2015年,南京大学Zhu等^[19]利用FDM打印技术首次制备了ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯)声学超材料开放单向隧道(图2),打破了声学互易定律,实现了开放通道高效的声学性能单向操控,在医学超声成像,单向噪声控制和建筑声学中具有重要的应用价值。

基于FDM的3D打印技术具有工艺简单、使用的材料种类广泛,成本低的特点;但所制备样品的力学性能不足,精度和表面质量也较差,因此通常被用于制备超材料结构样品来进行电磁或声学超材料新物理、新性能探索的试验验证研究。

2 光固化立体成形

光固化成形(Stereo Lithography Apparatus, SLA)是指用特定波长与强度的激光逐层扫描光敏聚合物使其固化,逐层堆积形成一个三维实体。SLA是目前应用最为广泛的一

种快速原形制造工艺,可以制造结构复杂的零件,且成型精度和材料利用率较高^[20]。

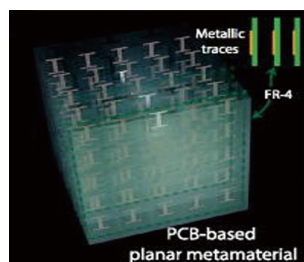
采用立体光固化3D打印工艺,西安交通大学的Li等^[21]和Zhang等^[22]利用光敏树脂制造了宽带地毯隐身斗篷、电磁黑洞等器件(见图3),试验验证了采用3D打印技术进行复杂三维超材料结构快速制造的可行性。2013年,美国HRL实验室的Gregoire等^[23]利用光固化增材制造技术对液态树脂逐层扫描固化后制备三维球壳曲面基板,然后在基板上印刷梯度金属结构,最后得到三维椭圆形全息角超表面天线。2015年,南京大学Cheng等^[24]利用光固化3D打印成形制备了具有高质量

的Mic共振单元的声学超材料结构,如图4所示,成功获得了低频声波的强反射效果,为突破传统声学小尺寸结构控制大波长低频声波的难题提供了一种新思路。2018年,美国麻省理工学院的Yu等^[25]采用光固化3D打印工艺制备可溶性树脂中空反型结构,然后填充活性磁颗粒弹性体并固化,最终得到一种磁性声学超材料。通过远程使用磁场来打开或关闭超材料的声学特性。

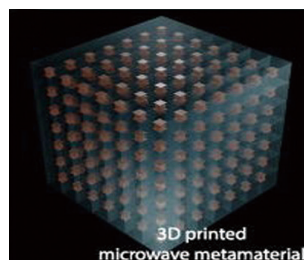
光固化成形在超材料制备中充分发挥工艺成熟度高、精度和表面质量好的优势,在微波/声波超材料结构器件制备中具有很好的应用前景。

3 激光选区烧结/熔化

激光选区烧结/熔化(Selected



(a) 传统PCB板超材料



(b) 3D打印的微波超材料

图1 传统PCB板超材料和3D打印的微波超材料

Fig.1 PCB-based planar metamaterial and 3D printed microwave metamaterial

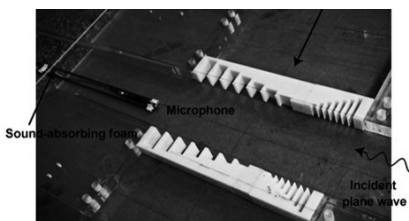


图2 ABS声学超材料单向通道
Fig.2 Acoustic one-way open tunnel with ABS

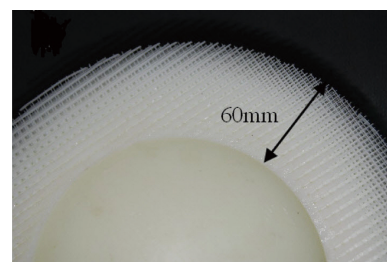


图3 光固化制备超材料电磁黑洞样品

Fig.3 Metamaterial sample of electromagnetic blackhole by stereolithography

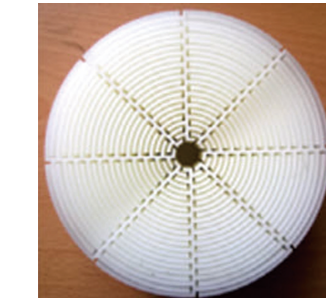


图4 光固化制备低频声学超材料结构

Fig.4 Low frequency acoustic metamaterial by stereolithography

Laser Sintering/ Selected Laser Melting, SLS/SLM) 工艺无需设计支撑结构, 材料利用率高, 但制件表面粗糙, 精细结构不易实现, 需要经过复杂的后处理工艺才能使用^[11]。激光选区熔化技术可以成形出结构复杂、性能优异、表面质量良好的金属零件。

2017年, 荷兰代尔夫特理工大学的 Hedayati 等^[26] 采用激光选区熔化技术, 利用生物兼容的钛合金制造出三维声隐身五模材料金刚石模型结构, 通过激光强度的改变实现了具有拓扑结构的多层金属结构的制造。中南大学的 Zhou 等^[27] 利用激光选区烧结碳基铁粉和尼龙粉末的混合物, 制造了一种多层宽频雷达吸波超材料, 通过 SLS 技术实现了各层相异的多层结构的制造, 如图 5 所示, 模拟和试验结构均表明该结构在 8~18GHz 频段的反射率小于 -10 dB, 表明利用 3D 打印制备的超材料结构具有较高的吸波效率。

激光选区烧结 / 熔化技术可成形金属或非金属粉末, 成形强度高, 可用于电磁 / 声学功能与承载一体化的超材料结构制造, 有利于推动超材料结构的工程化应用。

4 激光直写工艺

激光直写工艺(Direct Laser Writing, DLW) 非常适合制造周期和非周期性结构的超材料, 几乎能制造任何形状的表面^[28]。此外, 它

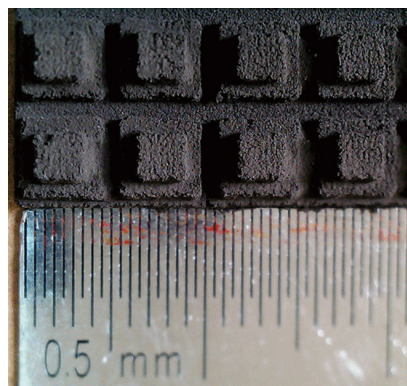


图5 雷达吸波超材料样品局部放大图
Fig.5 Partial enlarged photograph of the real radar absorbing metamaterial sample

具有能加工结构微小细节 (<100nm) 的高空间分辨率, 能精确地沉积或移除材料, 使各种新型超材料的设计成为可能^[29-30]。

日本静岡大学的 Faniayeu 等^[31] 结合飞秒激光直写工艺和简单的溅镀制造了工作于红外波段完美电磁超材料吸波器, 实现了亚微米空间分辨率的三维结构的制造。2015年, 希腊电子结构与激光研究所的 Kenanakis 等^[32] 利用激光直写技术制造了红外波段超材料, 单胞由两层相互垂直的开口立方体谐振器组成, 如图 6 所示, 它们的电磁相互作用产生了非对称传输响应, 超快激光束保证了三维结构制造的分辨率在 100nm 以下。美国密歇根理工大学的 Zhang 等^[33] 利用激光直写工艺制造了双曲超材料, 这是一种衍射不受限的结构, 传统的电子束或光刻技术无法实现。2016年, 法国特鲁瓦技术大学的 Moughames 等^[34] 采用双

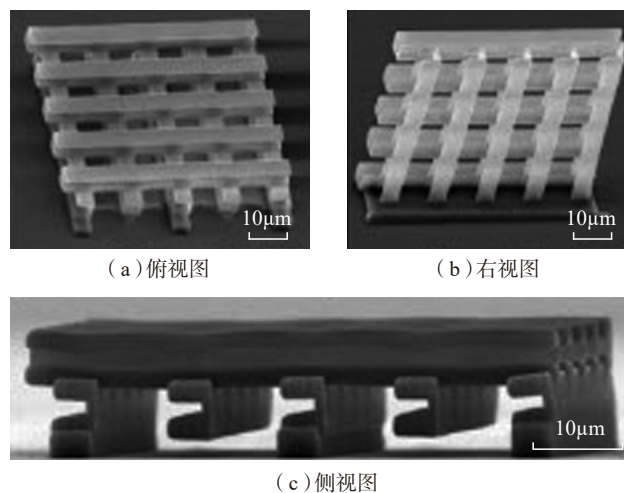


图6 三维红外超材料电子显微镜图
Fig.6 SEM images of 3D infrared metamaterial

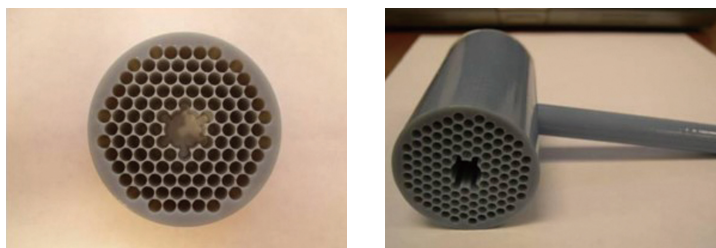


图7 聚合物喷射制备的太赫兹波导样品
Fig.7 Cross-sectional and full views of a fabricated THz waveguide

光子聚合 3D 激光直写工艺制造了红外光聚焦器, 由孔洞尺寸呈梯度变化的聚合物板构成, 最佳的梯度系数可使波长为 5.6μm 和 10.4μm 的光在超材料的菲涅尔区聚焦。

激光直写工艺非常适合微纳尺度超材料结构的加工制造, 加快推动超材料技术向太赫兹和光频段方向发展, 开拓超材料在高频范围内的应用探索。

5 聚合物喷射技术

聚合物喷射技术(Polymer Injection Technology, PIT) 是利用紫外光或可见光照射光敏树脂, 使其发生交联而实现三维制造, 打印速度较快、成本低、有更高的分辨率, 并且可同时打印多种材料, 但是它仅能打印光敏聚合物, 限制了它在介质部件的使用^[35-36]。

2011年, 亚利桑那大学的 Wu 等^[37] 利用聚合物喷射技术制造了中空电磁晶体波导, 如图 7 所示, 波

导的打印时间约为 4h, 试验测得其在 0.105THz 的传输损耗为 0.03dB/mm, 与模拟值基本一致。2012 年, 基于中空电磁晶体结构, 他们制造了全介质太赫兹喇叭天线^[38]。2015 年, Du 等^[39] 制造了伊顿透镜, 试验验证样品可在 10GHz 使电磁波发生 37° 偏折, 反射系数为 -13dB。2014 年, 科罗拉多矿业大学的 Nayeri 等^[40] 用高度可变的介质板制造了亚毫米波长的高增益太赫兹天线, 试验结果表明其在 0.1THz 具有良好的电磁波操控性能。

聚合物喷射技术具有比光固化成形更高的分辨率和成形精度, 可用于太赫兹波段超材料结构的打印制备。

由此可见, 增材制造技术可实现任意复杂结构设计向制造的直接转化, 为三维超材料结构的可控制造提供了最为快速有效的方法。

超材料结构的应用探索

1 隐身器件

隐身超材料通过吸收电磁波/声波并将其转化为其他形式的能量耗散掉, 或控制电磁波/声波绕过目标物体而不产生散射, 以此来实现对目标的隐身。当前超材料隐身器件大多处于基础研究阶段, 在部分领域已有应用探索研究。

美国西北大学的 Zhou 等^[41] 利用微立体光固化的方法首次制造了太赫兹频段的三维隐身斗篷, 该结构可工作在 0.3~0.6THz 宽频范围, 单元结构的矩形孔尺寸成梯度变化。俄克拉荷马州立大学的 Cao 等^[42] 采用微光固化增材制造技术使液态光固化树脂逐层固化制备了共 220 层 4.4mm 厚的空气孔柱形准三维太赫兹频段隐身衣。卡尔斯鲁厄理工大学的 Ergin 等^[43] 采用激光直写技术制造了具有积木微观结构的光波段三维隐身斗篷, 实现在 1.4~2.7μm 范围内对非偏振光的隐形, 如图 8 所

示。2015 年, 西班牙学者 Kan 等^[44] 3D 打印了宽带声学隐身地毯, 由 14 层带孔的树脂玻璃板堆叠而成, 能在波长为 10~17cm 的空气声背景下隐藏目标物体。

2 透镜天线

通过空间导波作用, 超材料能将准柱面波或球面波转换为平面波, 以此实现天线的高增益特性。超材料在透镜成像领域的研究已经取得了许多重要进展。

澳大利亚卧龙岗大学的 Squires 等^[45] 利用 3D 打印技术制备了 0.1~2THz 的太赫兹频段衍射光栅和非球面透镜, 试验测量与理论预测的性能相吻合。亚利桑那大学的 Liang 等^[46] 利用聚合物喷射快速成型法制造 X 波段的龙勃透镜天线, 如图 9 所示, 制造成本低, 加工过程快。2016 年, 英国拉夫堡大学的 Zhang 等^[47] 采用 3D 打印技术, 利用低成本的轻型介质制造了菲涅尔带平板透镜, 其由 4 个介质带组成, 如图 10 所示, 测

试表明该透镜在 8~12GHz 的频带范围可使入射电磁波获得 7.3~12.8dB 的增益。

3 吸波器件

超材料吸波器件通常由周期性排列的结构单元组成, 通过调整结构参数可实现吸波性能的优化^[48], 具有厚度薄、质量轻、吸收率高等优点。吸波器件从窄带吸收向宽带吸收、从低频段向高频段应用的方向发展, 已经取得了丰硕的研究成果。

2018 年, 中南大学熊益军等^[49] 利用激光烧结工艺制作了一种结构精细的三层宽频吸波超材料, 试验表明其在 4~18GHz 频率范围内反射损耗均小于 -10dB。空军工程大学的 Jiang 等^[50] 利用 3D 打印技术和丝网印刷术制造了超材料吸波器, 其由蜂窝结构和电阻薄膜组成, 如图 11 所示, 试验发现其在 3.53~24GHz 频率范围内的吸波效率可达 90%, 密度 254.91kg/m³ 的蜂房结构最大承受力为 10.7MPa, 获得了吸波电磁性能和

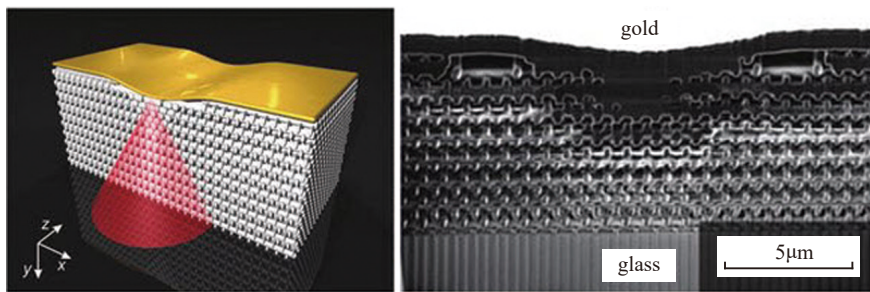


图8 激光直写工艺制造的隐身斗篷设计图和样品

Fig.8 Blueprint and sample of invisibility cloak by direct laser writing

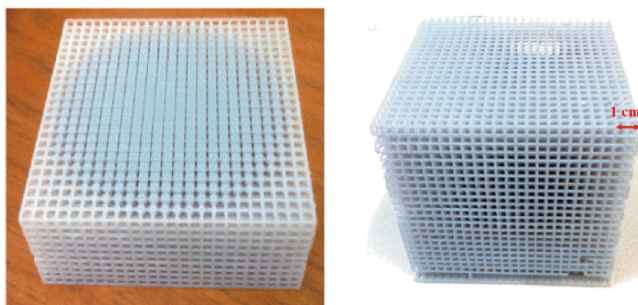


图9 聚合物喷射制备的龙勃透镜样品

Fig.9 Photo of Luneburg lens by polymer injection technology

机械性能俱佳的超材料吸波结构。2016年,美国杜克大学Li等^[51]利用FDM制备了中心频率为511Hz,带宽140Hz,最高吸声率达到99%以上的声学超材料结构,为低频声学隐身器件的设计制造提供了基础,图12所示为制造的声学超材料样品图。

4 超材料的力学应用

通过增材制造技术,可以制造各向异性的几何结构,以此获得具有特

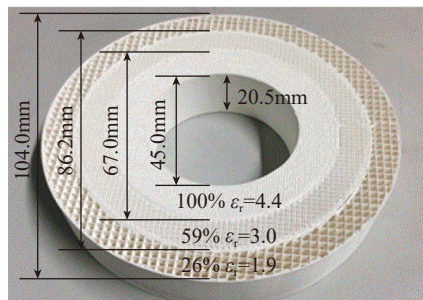


图10 菲涅尔带平板透镜

Fig.10 Photo of 3D-printed planar Fresnel zone plate lens



图11 蜂窝超材料吸波器

Fig.11 Honeycomb metamaterial absorber

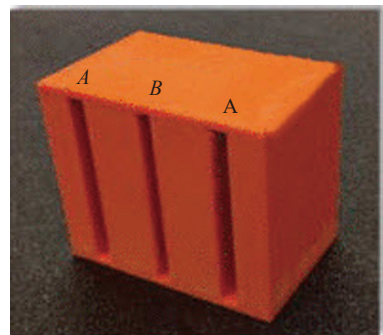


图12 FDM打印的低频声学超材料样品

Fig.12 Specimen of low frequency acoustic metamateria

殊力学性能的超材料,如负泊松比、超轻超硬、负热膨胀等^[52-54]。

拉胀超材料具有负泊松比,通过设计特殊的微观结构可获得良好的机械属性(能量吸收、断裂抵抗)和工程应用价值(智能材料、生物医学元件、抗冲击元件)^[55-59]。2015年,佐治亚理工学院的Wang等^[60]通过双材料3D打印机制作了一种拉胀超材料,如图13所示,梁臂部分选用刚性材料,梁臂铰接处选用弹性材料,其在大拉应力水平下具有更稳定的负泊松比,双材料打印便于刚性区的材料选择,避免大应力下断裂。2018年,美国新罕布什尔大学的Jiang等^[61]利用多材料3D打印机制造了混合手性机械超材料,通过设计制造单胞的几何参数可在较大范围调整超材料的有效刚度和泊松比。

航空航天和汽车业需要轻型且具有高强度、高刚度的材料,因此高比刚度和比强度超材料的研究对航

空航天材料的发展具有重大意义^[62]。美国劳伦斯利物莫国家实验室的Zheng等^[63]利用微光固化3D打印技术制作了超轻超硬超材料,其刚度比同类密度物质强400倍,可承受超自身重量16万倍的负荷,图14所示为不同材质和结构的桁架微格。

5 声学单向传输器件

经典的声学互易定理决定了声波传输具有对称模式,如果能类比电子二极管控制电流单向传输一样实现对声波的单向传输,将对声学理论的发展起到至关重要的推动作用。南京大学的程建春课题组利用FDM 3D打印技术制备了声学超材料单向传输器件,开展了系列开创性的研究工作^[64-65]。2017年同济大学的Li和美国北卡罗纳州立大学的Jing等^[66]合作,通过FDM 3D打印制造了损耗型声学超表面结构,实现了声能量的非对称传输,具有

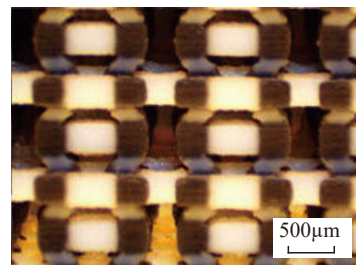
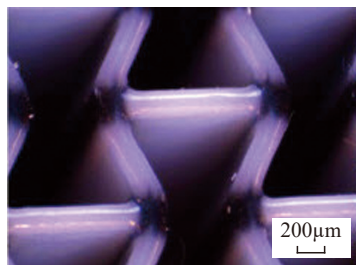
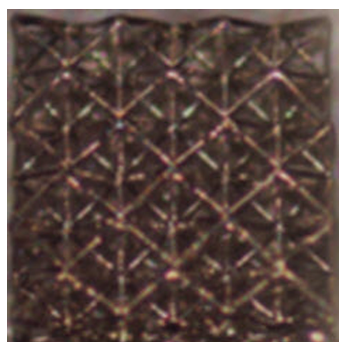
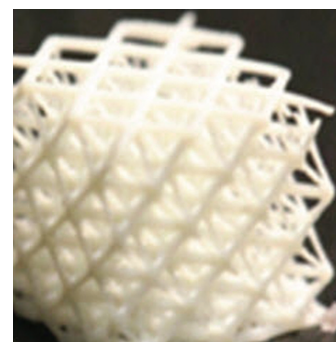


图13 双材料拉胀超材料3D打印样品

Fig.13 3D printed sample of dual-material auxetic metamaterials



(a)空心金属管



(b)实体陶瓷结构

图14 不同材质和结构的桁架微格

Fig.14 Fabrication of ultralight, ultrahigh-stiffness stretch-dominated micro lattices

结构简单、厚度薄(亚波长厚度)、可调控等特性,为声学超材料和超表面的设计制造提供了全新的自由度,有望实现更多的声学新物理和调控方式。2017年南京大学的刘晓峻课题组^[67]利用光固化成形制备了声学超材料单向传输器件,如图15所示,实现了低频范围兼具多带和宽带特性声学单向吸收器件,在中心频率371Hz左右最大吸声频率达到96.1%。声学单向器件在噪声隔离、双盲声学隐身、提高医学超声质量等方面具有重要的应用价值,声学单向传输性能的实现将对整个声学领域产生深远的影响。

近年来,超材料的基础研究已经取得了巨大的进展。在超材料技术工程应用和产业化方面,各国在竞相投入,积极探索,超材料的应用也逐渐覆盖军事和民用多个领域。国际上,美国国防巨头雷神公司研发了“可控透波人工复合超材料蒙皮”,可应用于各种先进雷达系统和下一代隐身战机的智能隐身蒙皮;英国跨国航空航天和国防公司BAE系统公司研发出一种可用于无人机通信的超材料平板天线,不仅增加了天线的带宽,还可实现优异的电磁波聚焦功能;美国海军支持企业开发了雷达罩用超材料智能结构并应用于E2“鹰眼”预警机。通过超材料



图15 亥姆霍兹共振器

Fig.15 Helmholtz resonator fabricated by Stereolithography

的独特性能解决了传统雷达罩图像畸变和轻量化难题,大幅提高了预警机的整体性能^[68]。国内的深圳光启高等理工研究院在超材料产业化方面取得了一定成果,在推进超材料产业化方面走在世界前列,该研究院的超材料平板式卫星天线已经在个别地区得到了应用。同时超材料吸波器件、超材料高性能天线罩、红外隐身衣、金属水、声学超材料、超材料动力外骨骼等超材料产品也陆续推向市场^[69]。但目前3D打印技术与超材料结合的应用产品还未见公开报道。

超材料结构的发展趋势

从以上的研究发展可以看出,超材料结构的研究应主要关注以下方向:

(1) 制造技术与电磁、声学、物理等学科交叉研究亟待加强。目前超材料结构主要工作集中在理论研究和新颖物理性能的探索上,3D打印技术大多用来验证理论研究的正确性。只有加强制造技术,尤其是3D打印技术与相关理论学科的交叉与融合,探索结构与功能一体化设计制造方法,才能推动超材料结构研究快速发展。制造技术与超材料结构理论研究的结合是国际上超材料结构研究发展的必然趋势。

(2) 功能承载一体化是超材料结构发展的重要方向。目前制备的超材料结构器件大多关注新颖物理性能或功能器件的试验验证,较少关注超材料结构的力学性能等影响其实用性的性能。只有制造出电磁/声学性能与力学性能兼具的超材料结构,实现其电磁/声学功能与承载的一体化制造,才能使其具有更广泛的实用性。因此,必须通过在制造技术和介质材料上有所创新,来解决超材料结构实用化难题。

(3) 超材料结构向轻薄化、可调

频、低损耗、高性能的实用化、器件化方向发展。超材料结构的亚波长单元尺寸远小于其工作波长,使其具有极薄的外形结构,有利于其轻薄化设计;同时超材料结构只有具有实时可调的电磁性能才能真正地具备实用价值,快速地向应用化方向发展。

结论

现有的研究成果表明,增材制造技术能充分发挥其在任意复杂结构制造方面的优势,制造出许多所设计的复杂超材料结构,实现超材料的结构功能一体化制造,为基于功能需求的超材料结构器件设计制造提供了新方法。因此,超材料设计与增材制造技术的结合将推动超材料更好地向应用化方向发展。

总体来说,国内外的研究极大地促使超材料器件向轻薄化、宽频带及高性能的实用化方向发展,但目前的研究还主要集中在理论试验验证和功能器件应用的探索上,学科交叉与融合亟待加强,需要制造技术与电磁、物理、材料等学科结合,加速探索超材料结构研究规模制造的实现途径。

参考文献

- [1] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE M C. Metamaterials and negative refractive index[J]. Science, 2004, 305(5685): 788-792.
- [2] LIU B, ZHAO W, JIANG Y. Apparent negative reflection with the gradient acoustic metasurface by integrating supercell periodicity into the generalized law of reflection[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 38314.
- [3] ODABASI H, TEIXEIRA F L, CHEW W C. Analysis of metamaterial absorber blueprints for optical 'black holes'[C]//URST Assembly and Scientific Symposium. Montreal, 2011.
- [4] CHENG Q, CUI T J, JIANG W X, et al. An Omnidirectional electromagnetic absorber

made of metamaterials[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(6): 063006.

[5] LANDY N, SMITH D R. A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(1): 25–28.

[6] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977–980.

[7] ZHELUDEV N I, KIVSHAR Y S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 917–924.

[8] CUI T J, SMITH D R, LIU R. *Metamaterials: Theory, design and applications*[M]. Berlin: Springer, 2010.

[9] ISHIKAWA A, KATO T, TAKEYASU N, et al. Selective electroless plating of 3D-printed plastic structures for three-dimensional microwave metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(18): 183102.

[10] YOON G, KIM I, RHO J. Challenges in fabrication towards realization of practical metamaterials[J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, 163: 7–20.

[11] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. *航空制造技术*, 2013, 56(13): 66–71.

GONG Shuli, SUO Hongbo, LI Huaixue. Development and application of metal additive manufacturing technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(13): 66–71.

[12] EHRENBERG I M, SARMA S E, WU B I. A three-dimensional self-supporting low loss microwave lens with a negative refractive index[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(7): 073114.

[13] LIER E, WERNER D H, SCARBOROUGH C P, et al. An octave-bandwidth negligible-loss radiofrequency metamaterial[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(3): 216.

[14] PARK H S, KIM T T, KIM H D, et al. Nondispersive optical activity of meshed helical metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(5): 5435.

[15] WONG K V, HERNANDEZ A. A review of additive manufacturing[J]. *Isrn Mechanical Engineering*, 2012, 2012(2): 30–38.

[16] 张磊, 卓林蓉, 汤桂平, 等. 增材制造超材料及其隐身功能调控的研究进展[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(3): 10–19.

ZHANG Lei, ZHUO Linrong, TANG Guiping, et al. Additive manufacture of metamaterials: a review[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(3): 10–19.

[17] ISAKOV D V, LEI Q, CASTLES F, et al. 3D printed anisotropic dielectric composite with meta-material features[J]. *Materials & Design*, 2016, 93: 423–430.

[18] XIE Y, YE S, REYES C, et al. Microwave metamaterials made by fused deposition 3D printing of a highly conductive copper-based filament[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(18): 788–792.

[19] ZHU Y F, ZOU X Y, LIANG B, et al. Acoustic one-way open tunnel by using metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(11): 104301.

[20] ZHANG X, JIANG X N, SUN C. Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 1999, 77(2): 149–156.

[21] LI D C, WU L L, YIN M, et al. A broadband and omnidirectional electromagnetic wave concentrator with gradient woodpile structure[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 19082–19090.

[22] YIN M, TIAN X Y, XUE HAN H, ET AL. Free-space carpet-cloak based on gradient index photonic crystals in metamaterial regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(12): 124101.

[23] GREGOIRE D J. 3-D conformal metasurfaces[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(3): 233–236.

[24] CHENG Y, ZHOU C, YUAN B G, et al. Ultra-sparse metasurface for high reflection of low-frequency sound based on artificial Mie resonances[J]. *Nature Materials*, 2015, 14: 1013–1019.

[25] YU K, FANG N X, HUANG G, et al. Magnetoactive acoustic metamaterials[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(21): 1706348.

[26] HEDAYATI R, LEEFLANG A M, ZADPOOR A A. Additively manufactured metallic pentamode meta-materials[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(9): 4782–

4810.

[27] ZHOU D, HUANG X, DU Z. Analysis and design of multilayered broadband radar absorbing metamaterial using the 3-D printing technology-based method[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 133–136.

[28] RILL M S, KRIEGLER C E, HIEL M, et al. Photonic metamaterials by direct laser writing and silver chemical vapour deposition[J]. *Nature Materials*, 2008, 7: 543–546.

[29] PIQUE A, CHARIPAR N, KIM H, et al. Development of metamaterial structures by laser direct-write[C]//*American Physical Society*, Baltimore, 2013.

[30] BÜCKMANN T, STENGER N, KADIC M, et al. Tailored 3D mechanical metamaterials made by dip-in direct-laser-writing optical lithography[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(20): 2710–2714.

[31] FANIAYEU I, MIZEIKIS V. Vertical split-ring resonator perfect absorber metamaterial for IR frequencies realized via femtosecond direct laser writing[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(6): 062001.

[32] KENANAKIS G, XOMALIS A, SELIMIS A, et al. Three-dimensional infrared metamaterial with asymmetric transmission[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(2): 287.

[33] ZHANG X, DEBNATH S, GÜNEY D Ö. Hyperbolic metamaterial feasible for fabrication with direct laser writing processes[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(6): 1013–1021.

[34] MOUGHAMES J, JRADI S, CHAN T M, et al. Wavelength-scale light concentrator made by direct 3D laser writing of polymer metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33627.

[35] XIN H, LIANG M. 3D printed microwave and THz devices using polymer jetting techniques[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(4): 737–755.

[36] CRIVELLO J V, REICHMANIS E. Photopolymer materials and processes for advanced technologies[J]. *Chemistry of Materials*, 2014, 26(1): 533–548.

[37] WU Z, NG W R, GEHM M E, et al. Terahertz electromagnetic crystal waveguide fabricated by polymer jetting rapid

- prototyping[J]. *Optics Express*, 2015, 19(5): 3962–3972.
- [38] WU Z, LIANG M, NG W R, et al. Terahertz horn antenna based on hollow-core electromagnetic crystal (EMXT) structure[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2012, 60(12): 5557–5563.
- [39] DU G, LIAN M G, SABORY-GARCIA R A, et al. 3-D printing implementation of an x-band eaton lens for beam deflection[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1487–1490.
- [40] NAYERI P, LIANG M, TUO M, et al. 3D printed dielectric reflectarrays: low-cost high-gain antennas at sub-millimeter waves[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2014, 62(4): 2000–2008.
- [41] HOU F Z, BAO Y, CAO W, et al. Hiding a realistic object using a broadband terahertz invisibility cloak[J]. *Scientific Reports*, 2011, 1(4): 78.
- [42] CAO W, ZHOU F, LIANG D C, et al. Three-dimensional invisibility cloaks functioning at terahertz frequencies[C]// *Proceedings of SPIE—The International Society for Optics and Photonics*. Baltimore: SPIE, 2014.
- [43] ERGIN T, STENGER N, BRENNER P, et al. Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths[J]. *Science*, 2010, 328(5976): 337–339.
- [44] KAN W, GARCÍA-CHOCANO V M, CERVERA F, et al. Broadband acoustic cloaking within an arbitrary hard cavity[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 3(6): 064019.
- [45] SQUIRES A D, CONSTABLE E, LEWIS R A. 3D printed terahertz diffraction gratings and lenses[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2015, 36(1): 72–80.
- [46] LIANG M, NG W R, CHANG K, et al. A 3-D luneburg lens antenna fabricated by polymer jetting rapid prototyping[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2014, 62(4): 1799–1807.
- [47] ZHANG S. Design and fabrication of 3D-printed planar Fresnel zone plate lens[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(10): 833–835.
- [48] HAN W, PENG K, CHENG W, et al. Broadband tunability of polarization-insensitive absorber based on frequency selective surface[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23081.
- [49] 熊益军, 周丁. 一种基于 3D 打印技术的结构型宽频吸波超材料[J]. *物理学报*, 2018, 67(8): 20172262.
- XIONG Yijun, ZHOU Ding. Structural broadband absorbing metamaterial based on three-dimensional printing technology[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(8): 20172262.
- [50] JIANG W, YAN L, MA H, et al. Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a three-dimensional metamaterial absorber based on 3D printed honeycomb[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4817.
- [51] LI J F, WANG W Q, XIE Y B, et al. A sound absorbing metasurface with coupled resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(9): 091908.
- [52] LI X, GAO H. Mechanical metamaterials: Smaller and stronger[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(4): 373–374.
- [53] KEIVAN D, ZHAO L, LU E, et al. Ultralight shape-recovering plate mechanical metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 10019.
- [54] BÜCKMANN T, STENGER N, KADIC M, et al. Tailored 3D mechanical metamaterials made by dip-in direct-laser-writing optical lithography[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(20): 2710–2714.
- [55] MARK A G, PALAGI S, QIU T, et al. Auxetic metamaterial simplifies soft robot design[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Stockholm, 2016.
- [56] CRITCHLEY R, CORNI I, WHARTON J A, et al. The preparation of auxetic foams by three-dimensional printing and their characteristics[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2013, 15(10): 980–985.
- [57] UNDERHILL R S. Defense applications of auxetic materials[J]. *DSIAC Journal*, 2014, 1(1): 7–13.
- [58] GATT R, MIZZI L, AZZOPARDI J I, et al. Hierarchical auxetic mechanical metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8395.
- [59] KOLKEN H M A, ZADPOOR A A. Auxetic mechanical metamaterials[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(9): 5111–5129.
- [60] WANG K, CHANG Y H, CHEN Y W, et al. Designable dual-material auxetic metamaterials using three-dimensional printing[J]. *Materials & Design*, 2015, 67: 159–164.
- [61] JIANG Y, LI Y. 3D printed auxetic mechanical metamaterial with chiral cells and re-entrant cores[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2397.
- [62] PALUCKA T. Mechanical metamaterials produce ultralight, ultrastiff lattices[J]. *MRS Bulletin*, 2014, 39(9): 759–760.
- [63] ZHENG X, LEE H, WEISGRABER T H, et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials[J]. *Science*, 2014, 6190(344): 1373–1377.
- [64] ZHU Y F, ZOU X Y, LIANG B, et al. Acoustic one-way open tunnel by using metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(11): 104301.
- [65] ZHU Y F, GU Z M, LIANG B, et al. Asymmetric sound transmission in a passive non-blocking structure with multiple ports[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(10): 104301.
- [66] LI Y, SHEN C, XIE Y B, et al. Tunable asymmetric transmission via lossy acoustic metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(3): 035501.
- [67] LONG H Y, CHENG Y, LIU X J. Asymmetric absorber with multiband and broadband for low-frequency sound[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(14): 143502.
- [68] 吴勤. 颠覆未来作战的前沿技术系列之超材料[J]. *军事文摘*, 2015(13): 35–38.
- WU Qin. Metamaterials: The frontier technology of subverting the future war[J]. *Military Abstract*, 2015(13): 35–38.
- [69] 祝叶华. 未来世界由超材料建构[J]. *科技导报*, 2016, 34(18): 14–26.
- ZHU Yehua. Metamaterials to build the future[J]. *Science and Technology Review*, 2016, 34(18): 14–26.

通讯作者: 梁庆宣, E-mail: liangqx728@xjtu.edu.cn.

(下转第63页)

Microstructure Characteristic of 4043 Aluminum Alloy Produced by Arc Additive Manufacturing Process With Forced Water Cooling Constraint

LIU Yibo^{1,2}, JIN Peng^{1,2}, WANG Jianfeng^{1,2}, LI Junzhao^{1,2}, LI Changguang³,
LI Ziyang², SUN Qingjie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai,
Weihai 264209, China;

3. Beijing Remote Sensing Equipment Research Institute, Beijing 110000, China)

[ABSTRACT] The 4043 aluminum alloy thin-wall was manufactured by arc additive manufacturing (AM) process with forced water cooling constraint, and the macro-appearance and microstructure of AM specimens were studied. The results revealed that the verticality of the sample and the surface forming precision were improved. The average grain size decreased from 25 μm to 12 μm when the water cooling constraint was used, and the grain size was obviously refined. When the water cooling constraint device was applied, the 4043 aluminum alloy lateral wall was directly in contact with the restraint device, and the heat quickly dissipated. Therefore, the columnar grain grew in a certain angle. The hardness decreased from the bottom to the top of the AM specimen, and the average value of hardness increased from 48HV without restriction to 58HV. The horizontal grain distribution was cellular grain on both sides, central region was columnar grain, and the hardness of central region was lower than that of both sides.

Keywords: Forced water cooling constraint; Arc additive manufacturing; Cold metal transfer; Microstructure;
Aluminum alloy

(责编 铃兰)

(上接第37页)

Research Progress of Additive Manufacturing Technology and Its Applications for Metamaterial Structure

LIANG Qingxuan, YANG Zhen, HE Jin, JIANG Zijie, CHEN Tianning, LI Dichen
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[ABSTRACT] Metamaterial structure has important scientific research value and extensive application prospect in military stealth and camouflage, communication, security and medical imaging owing to the ability of manipulating the phase and propagation mode of electromagnetic wave and acoustic wave precisely. The research is one of the hotspots in the field of international academic and engineering. Generally speaking, the research on metamaterial structure in the world has greatly promoted its development of lightness, broadband, high performance and practicality. However, the interdisciplinary research of manufacturing technology and electromagnetics, acoustics, physics, materials and other disciplines should be further focused. It is necessary to accelerate the exploration of the way of manufacturing metamaterial structure in a large scale, and promote its rapid development towards application. In this paper, the application status of additive manufacturing technology in manufacturing metamaterial structure is summarized, and the research progress of metamaterial structure functional devices is discussed. We also discuss and prospect the future development trend about metamaterial structure.

Keywords: Metamaterial structure; Sub wavelength; Additive manufacturing; Functional device; 3D Printeing;
Sterelithography

(责编 铃兰)