



三维超材料制造技术现状与趋势

田小永*, 尹丽仙, 李涤尘

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049

摘要: 三维超材料是具有三维空间特定排布的亚波长人工周期结构, 具有自然材料不具备的超常规物理性能。本文以三维超材料的电磁调控技术为线索, 简要论述了近年来三维超材料在基础研究和制造工艺方面的研究现状; 梳理了目前三维超材料的制造方法, 包含印刷电路板及组装的方法、机械加工方法、3D 打印技术、微纳制造工艺; 选取电磁隐身罩、透镜天线、吸波器、柔性超材料等代表性应用类别, 简述了三维超材料器件的电磁调控方法与实现手段, 所涉及的超材料种类包括左手超材料、渐变折射率超材料、智能超材料等。基于目前三维超材料研究领域待解决的问题, 对今后三维超材料的发展趋势进行了探讨。

关键词: 三维超材料; 电磁调控; 3D 打印; 超材料器件

中图分类号: TB33

文献标志码: A

Current situation and trend of fabrication technologies for three-dimensional metamaterials

Xiaoyong Tian*, Lixian Yin and Dichen Li

State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: Three dimensional (3D) metamaterials are periodic artificial microstructures arranged in three-dimensional space. They are in scale of subwavelength, thus getting extraordinary physical properties which are not found in nature. The recent developments on basic theory and manufacturing process of the 3D metamaterials are discussed in this letter. Manufacturing processes of the 3D metamaterials are sorted out, including printing circuit board and assembly, machining technology, 3D printing technology, micro/nano-manufacturing technology. As the representative devices of 3D metamaterials, the electromagnetic cloaks, lens antennas, absorbers and flexible metamaterials are discussed to show how the 3D metamaterials control the electromagnetic-wave. Devices of left-handed metamaterials, graded refractive index metamaterials, intelligent metamaterials are also discussed. Finally, the development trends of 3D metamaterials in future are discussed and predicted according to the present problems of 3D metamaterials.

Keywords: three dimensional metamaterial; electromagnetic-wave control; 3D printing; metamaterial device

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.01.006

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(1): 69–76

1 引言

超材料是一种单元结构尺度远小于工作波长的人工周期结构, 具有自然材料所不具备的超常规物理特

性, 如负折射率、逆多普勒效应、负相移等^[1-3], 核心是其电磁性质主要取决于其单元结构, 而不是取决于材料的本征属性。通过控制单元结构的形态和分布, 可灵活调控超材料的电磁响应特性, 实现人工控制电磁波传播, 在隐身技术、通信技术、光学成像、传感技术等领域都拥有广阔的应用前景^[4-5]。

收稿日期: 2016-10-13; 收到修改稿日期: 2016-12-30

*E-mail: leoxyt@mail.xjtu.edu.cn

超材料最初的研究是围绕左手材料展开的。1968年前苏联理论物理学家 Veselago 依据麦克斯韦方程,首次提出左手材料^[6],他认为电磁波在磁导率和介电常数同时为负的双负材料中传播时,其电场、相速、群速三个矢量满足左手螺旋法则,这与电磁波在自然材料中的传播情况恰恰相反,由于自然界并不存在双负材料,该假说一直未被证明。直到2001年美国加州大学 Shelby 等以铜线和开口谐振环(Split Ring Resonator)的组合图形为单元结构,制造出具有负介电常数和负磁导率的结构,首次通过实验验证了左手材料的存在^[7],该成果在美国《Science》杂志一经发表,立刻引起国际学术界的巨大轰动。随着研究的不断深入,研究人员发现通过调整亚波长单元结构的几何参数可以实现介电常数和磁导率的任意调控,实现介电常数接近于0或1,甚至介电常数/磁导率渐变的超材料(Gradient Index Medium)^[8]。由此超材料的概念被拓展,所有亚波长单元结构构成的人工结构统称为超材料。超材料作为一种材料设计新理念在学术界、商业界和军事界受到高度重视和广泛关注。

本文以超材料结构为主线,首先分析了超材料结构设计制造的基本原理,梳理近年来基于三维超材料的电磁结构和器件的研究工作;分别讨论了采用印刷电路板、机械加工、微纳制造以及3D打印等工艺方法进行三维超材料结构器件制造的研究现状;围绕不同功能的超材料器件,如隐身类、透镜天线、吸波结构、柔性超材料结构等,分析了各类型工艺成型特点以及适宜加工的结构;在此基础上总结出了超材料在功能设计与制造工艺方面面临的挑战和今后的发展趋势,为三维超材料的创新设计提供启发和帮助,推动三维超材料的进一步发展。

2 超材料结构设计制造基本原理

超材料结构根据材料构成可分为两大类:金属谐振型和电介质型。金属结构单元超材料的电磁响应机制包含电响应和磁响应,通过金属分割线、金属连续线、开口环结构等单元结构对入射电磁波的电场分量产生电谐振响应,获得负等效介电常数,利用渔网结构等单元结构对入射电磁波的磁场分量产生磁谐振响应,获得负等效磁导率,从而构造出具有负介电常数及负磁导率的超材料。利用由此产生的特殊电磁特性,如负折射现象、非线性效应、负色散特性、能量汇聚及发散等,可实现完美透镜成像、完美吸收、隐身斗篷等新型电磁功能器件^[9-10]。电介质超材料是指完全由电介质材料实现的超材料结构,具有损耗小、各向同性、构成简单等优点,典型的全介质单元结构有木堆结构、金刚石结构等,通过控制超材料单元结构的几何参数获得所需的任意介电常数与磁导率。通过结构设计使结构内部产生特定的电磁参数分布,实现电磁波的汇聚、捕获、弯曲、增强^[11-13]等,从而控制电磁波的传播,可以实现超材料隐身罩、雷达天线、电磁黑洞等功能器件。目前已取得的超材料研究成果多以二维超材料结构为主,这些结构虽然获得了负折射率、电磁隐身等超常规物理性能,但仍存在诸多不足,难以满足实际使用条件,如二维形态的超材料难以适用于复杂、多样的使用需求,难以实现三维空间内电磁波特定传播路径控制,同时二维超材料结构往往还伴随非均匀性、各向异性、极化敏感、工作频带窄等问题。为了克服二维超材料所存在的不足,拓展超材料的应用范围,越来越多的研究者将目光转向三维超材料,以寻求超材料的结构创新、工艺创新、功能创

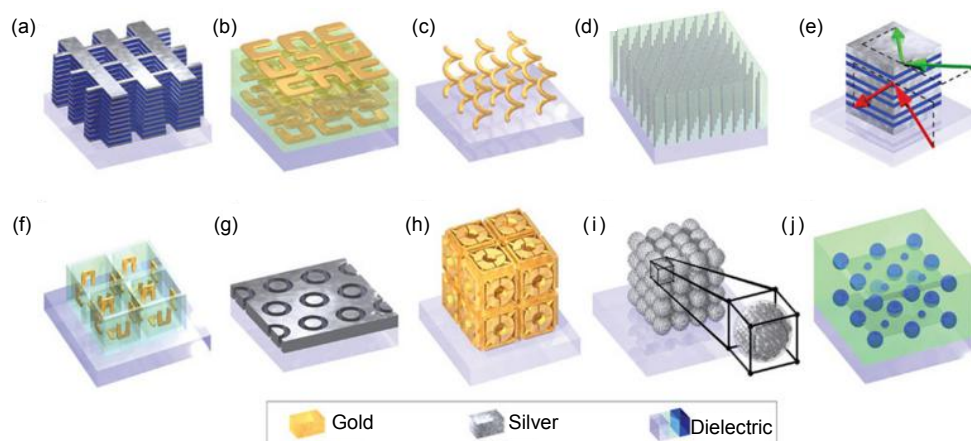


图1 多种超材料单元结构^[14]。

新。三维超材料是具有三维空间特定排布的、由亚波长单元结构构成的人工周期结构^[14]，如图 1 为一些常用的超材料单元结构。

3 三维超材料制造工艺

3.1 印刷电路板堆叠组装

印刷电路板工艺是目前最典型的金属结构超材料制造方法，由印在介质基底上的周期性排列金属图案结构单元构成，其单元结构特征尺寸的大小集中在毫米量级，主要用于微波波段二维超材料(即超表面)的制造。2001 年美国加利福尼亚大学 R. A. Shelby 等采用印刷电路板工艺制造了双开口谐振环阵列，首次实现了负折射率超材料^[15]。2008 年，美国波士顿学院的 N. I. Landy 等利用印刷电路板工艺制作了用于电磁波吸收的超表面^[16]。2012 年，复旦大学周磊教授团队利用印刷电路板工艺制作了一种结构参数渐变的超表面，实现了传播波与表面波的高效转换^[17]。此外还有谐振环的各种变形结构，例如开缝环对结构、 Ω 结构、渔网结构、树枝结构等，上述采用印刷电路板工艺制作的超材料结构大多属于二维的超表面。2006 年，美国 Duke 大学 D. R. Smith 教授团队通过组装实现较为简单的具有三维结构的超材料器件，首次实现了微波段的二维隐身罩结构^[18]，如图 2 所示。

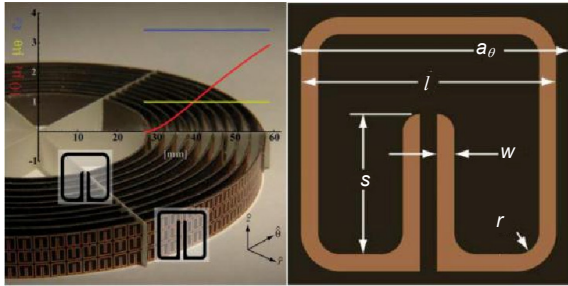


图 2 基于印刷电路板工艺的超材料三维结构^[18]。(a) 整体结构。(b) 单元结构。

3.2 机械加工及组装

通过机械加工的方式构造亚波长尺度的微单元结构，并以之组成周期性排布的宏观结构是构造全介质超材料的一种方法。东南大学崔铁军教授团队、新加坡国立大学 C. K. Ong 教授团队、加州大学圣地亚哥分校的 T. Driscoll 等在介质板上钻具有亚波长尺寸的孔，构造了全介质的渐变折射率超材料，并通过层叠组装的方式使之向宏观和三维扩展，构造出微波段的龙勃透镜、隐身罩等结构^[19-22]；南京大学冯一军教授团队，

通过切削介质板和粘接泡沫构造了各向异性的层状阵列全介质超材料^[23]。清华大学周济教授团队等通过将陶瓷材料切削加工成条状或块状，并将其阵列排布于介质基底上，实现了具有负折射效应的全介质超材料，如图 3 所示^[24-25]。采用机械加工方式可制造出诸多三维超材料器件，但是其加工能力往往难以满足微观或宏观结构较为复杂的超材料单元阵列的加工需求，此外机械加工所制造的微结构单元完成后常需进行手工组装，在一定程度上会降低加工精度。

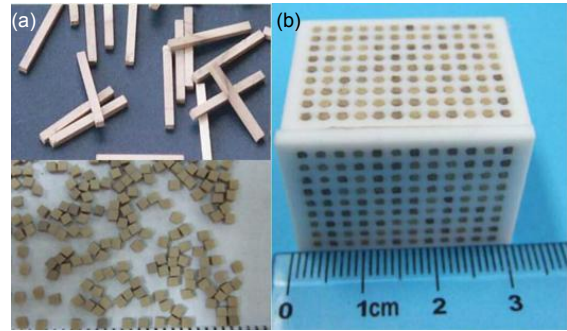


图 3 机械加工制造的陶瓷全介质超材料。(a) 切削加工成型的陶瓷超材料单元^[24-25]。(b) 嵌入基底的全介质超材料阵列结构^[25]。

3.3 微电子刻蚀工艺

微纳制造工艺是超材料应用向太赫兹波段、红外波段、乃至光波段等高频扩展的重要手段。美国康奈尔大学的 M. Lipson 教授团队、美国科罗拉多大学波德分校的 W. Park 教授团队，采用电子束刻蚀的方法在绝缘硅晶片上刻蚀出亚波长尺寸的非均匀单晶硅柱阵列，如图 4 所示，构造了 1400 nm 和 1600 nm 波段渐变折射率超材料^[26-27]，但其制造出的都是二维超材料结构。针对这一问题，研究者将目光转向光刻蚀工艺，借助这些工艺实现了高频段三维超材料结构的制备。光刻蚀工艺是将光敏高分子制成一定图形的抗蚀性膜，再用化学或电化学方法进行腐蚀或电镀的加工工艺。2012 年，美国加利福尼亚大学 Shuang Zhang 等，采用光刻蚀工艺制造了太赫兹频段的手性可变三维超材料^[28]，通过将硅板嵌入单元结构从而打破结构的对称性，可以实现在同一频段内手性的转换。外部光刺激可激发手性转换，当光照强度大于硅带隙光强度时，硅材料由绝缘体转变为导体，引发手性转变。光刻蚀工艺可成型形状和可用材料较多，可通过逐层制造形成复杂三维微结构，并可制造连续性或不连续性结构。新加坡南洋理工大学的 A. Q. Liu 教授团队利

用微机械技术(Micromachining Techniques)加工了单元尺度在微米级的金属谐振超材料,该超材料可以对负折射效应的谐振频段进行调节^[29]。然而,采用微电子器件刻蚀工艺制造成本高、周期长,难以实现复杂三维结构的制造。

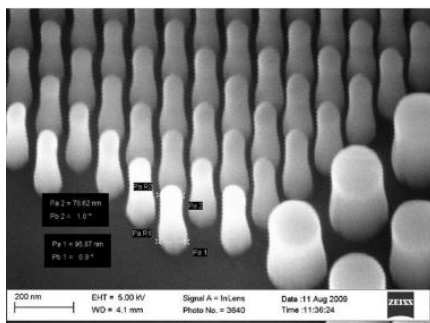


图4 采用电子束刻蚀工艺制造的超材料^[27]。

3.4 3D 打印工艺

三维超材料是在三维空间内按照特定规律排列的点阵结构体,为了实现特殊功能,不同位置上的单元结构往往不同,由此造成了超材料结构具有极高的复杂度。3D 打印技术是一种通过材料逐层累加的方法制造实体零件的技术,自下而上、逐层累加的工艺特点使得其在成型复杂结构方面具备明显优势。因此,将3D 打印技术应用于超材料制造将有效克服结构复杂度引起的加工困难。此外,超材料同时具有微结构和宏观结构,微观结构决定工作频段,宏观结构决定整体结构对电磁波的调控行为和效果,只有宏观与微观结构同时满足要求才能实现器件或结构的特定电磁功能。因此,将3D 打印技术应用于超材料结构制造有利于实现超材料器件的宏/微观结构一体化制造^[30]。2010年,德国卡尔斯鲁厄工业大学 M. Wegener 教授利用激光直写工艺(Direct laser writing),制造出了高分子树脂材料构成的木堆结构,并通过控制微纳尺度的微观单元结构的可控制造,使局部等效折射率从 1.52 到 1 呈梯度变化,实现了 1.4~2.7 μm 波段三维梯度折射率隐身罩^[31],如图 5 所示。

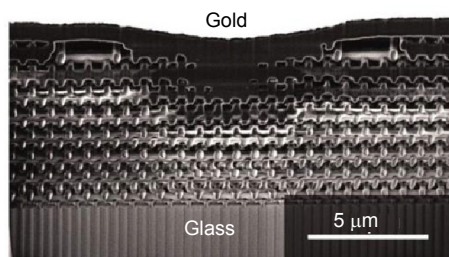


图5 激光直写工艺制造的超材料^[31]。

2011年,美国西北大学的 C. Sun 教授团队,利用微光固化工艺(Projection Microstereolithography Process),在 0.3~0.6 THz 的频段实现了由亚波长矩形孔构成的渐变折射率超材料^[32]。2012年,西安交通大学李涤尘教授团队根据微波段电磁超材料单元结构尺寸较大、工艺精度要求不高的特点,采用光固化成型工艺(Stereolithography),制造了全介质梯度折射率地毯式隐身罩^[33];2013年,该团队利用光固化成型工艺结合陶瓷凝胶注模工艺,以 BST 高介陶瓷为结构材料,制造了十字交叉柱三维全介质超材料^[34];2014年,利用光固化成型工艺结合混合液体介质的方法,制造了由树脂木堆结构和混合液体介质构成的全介质超材料结构,实现了介电常数由 1 到 40 的大范围调控,并首次制造出三维电磁黑洞结构^[35],如图 6 所示。2016年,浙江大学冉立新教授团队采用光固化成型工艺与金属溅镀工艺制造了周期性金属方块-树脂结构,在 10 GHz 实现了不反射不折射的类空气介质超材料^[36]。2013年, Urzhumov 等采用 FDM 工艺,用 ABS 树脂制造了 X 波段全介质地毯式隐身罩^[37]。然而,目前大部分 3D 打印工艺无法实现多种材料结构的同步制造,限制了三维超材料结构设计空间;同时受工艺与材料限制,所制备三维全介质结构承载等力学性能较差,尚不能满足实际应用工况条件。

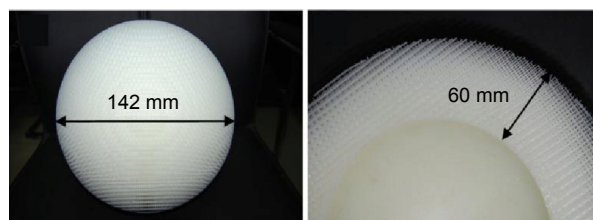


图6 光固化工艺制造的三维超材料结构^[35]。(a) 电磁黑洞内核。(b) 电磁黑洞外壳。

4 三维超材料典型电磁器件

4.1 三维隐身罩

2006年, J. B. Pendry 等人提出一种通过电磁波的绕射伪装实现目标完美隐身的方法:隐身罩采用变换光学设计可以引导电磁波绕过隐身罩所包围的空间并在后方重构为入射时的形态。对于观察者或电磁波探测器来说,这相当于隐身罩及内部区域未对电磁波的传播产生干扰,即实现了完美隐身^[38]。同年, D. R. Smith 教授团队利用金属谐振环超材料(Split-Ring Resonator, SRR)第一次在微波段实现了简化后的二维

隐身罩^[18]。另外,根据光学变换思想,采用不同的坐标变换形式,可构造形状多样的隐身罩,包括球形、圆柱形、方形、椭圆柱等简单形状,甚至可以被设计为任意形状。2007年,美国普渡大学 M. Shalaev 教授团队从实验上将隐身罩的工作频段由微波段扩展到了光波段^[39]。然而,金属谐振超材料完美隐身罩的固有带宽和损耗缺陷使得此类隐身罩只能在极窄的频段内工作,难以满足实际使用需求。2008年, J. Li 和 J. B. Pendry 提出了地毯式隐身罩^[40],其原理是将目标隐身区域伪装成平面,从而实现隐身。地毯式隐身罩所需参数不存在极值,且各向同性,可通过渐变折射率超材料实现,而不需谐振型超材料,因此结构宽频性提升,实用潜力提高。2010年,东南大学崔铁军教授团队设计的地毯式三维超材料隐身罩^[19],如图7所示。



图7 微波段三维地毯式隐身罩^[19]。

4.2 三维透镜天线

从 J. B. Pendry 教授提出著名的“完美透镜”开始,超材料逐渐被应用于透镜方面。利用超材料的负折射效应制备成的平板,可以作为超级透镜实现完美成像,其高分辨率可以突破“衍射极限”^[41]。此外,通过其内部特定的折射率分布,超材料可构造渐变折射率透镜,实现对光和电磁波的可控调控,如著名的麦克斯韦鱼眼透镜(Maxwell fisheye)^[42]、龙勃透镜(Luneburg lens)^[43]、伊顿透镜(Eaton lens)^[44]等等。在微波段,渐变折射率透镜可以作为透镜天线对微波进行传导控制。英国圣安德鲁斯大学的 U. Leonhardt 等人将 SRR 金属谐振超材料组装成三维阵列,实现了对全向入射波的回射^[45]。东南大学崔铁军教授等人设计制造了近似各向同性的三维半球龙勃透镜^[13]。西安交通大学李涤尘教授等采用渐变折射率超材料,构造了三维 90 度偏折伊顿透镜^[46](如图8所示)、三维龙勃透镜^[47]。

4.3 三维超材料吸波结构

超材料可用于构造电磁波能量吸收结构。目前绝

大多数超材料吸波结构由谐振型超材料构成,利用超材料等效介电常数和等效磁导率的虚部产生电磁损耗的能力,实现对电磁波的吸收。2008年, N. I. Landy 和 D. R. Smith 利用印刷电路板工艺制造的金属谐振超材料在微波段实现了对电磁波的高效吸收^[18]。美国俄亥俄州立大学的 C. M. Soukoulis 教授团队利用空间轴对称结构超材料,实现了对多极化电磁波的吸收,并获得相对较大的吸收角度^[48];瑞典皇家理工学院的 S. He 等人通过组合多层不同的超材料单胞阵列的结构,实现了较宽的电磁吸收频带^[49]。另外, D. R. Smith 教授课题组从能量回收和转化的角度提出另一种超材料吸波结构,将整流电路嵌入 SRR 金属谐振环超材料单胞,将吸收的电磁波能量转化为电流,通过阵列结构回收能量^[50]。

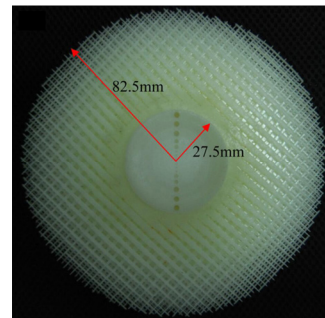


图8 微波段三维伊顿透镜^[46]。

上述研究都不同程度地扩大了超材料吸波结构的工作范围,但由于金属超材料固有的谐振特性,结构不能从根本上实现面向实际应用的全向、宽带、高效吸收。为此一部分研究者另辟蹊径,利用全介质超材料来实现电磁波的吸收。例如,通过效仿物质在“黑洞”引力场的影响下在空间中的弯曲运动轨迹,实现电磁波能量的全向宽频吸收。2010年,东南大学崔铁军教授和程强教授等人基于“电磁黑洞”的理论模型,首次在微波段制造了二维的全向宽频电磁吸收器的样品,吸收率可达 99%以上^[51]。2015年西安交通大学李涤尘、田小永课题组采用光固化 3D 打印工艺制造了全介质超材料雷达吸波结构,如图9所示。该结构由超材料梯度折射层、吸波层、反射层构成。超材料梯度折射层的单元结构介电常数服从电磁黑洞的渐变介电常数分布^[52]。电场强度分布测试结果显示,电磁波进入环形超材料吸波结构后沿弯曲路径传播,基本实现电磁黑洞对电磁波传播方向的调控。远场反射率测试结果表明结构在 12~18 GHz 频段内具有 -10 dB 的宽频高吸收能力。

4.4 可变形智能超材料

通过可变形的单元结构可以实现同一微观结构组成,而具有不同宏观形态的超材料,扩大超材料的适用范围。2012年,韩国延世大学 Dongheok Shin 等基于拟共形映射,设计了弹性智能超材料平面隐身罩,实现了力学与电磁学功能的耦合^[53]。此超材料器件未变形时为均匀单元结构,结构与隐身目标接触产生变形时,可模仿拟共形变换获得梯度折射率分布,从而使目标物体隐身。2014年,该团队又设计了电磁与力协同型智能超材料,结构泊松比为-1,具有极强的柔性,在受到外力后会产生较大变形但仍能实现其电磁功能,并据此设计了柔性波导和变形地毯隐身罩^[54],如图10所示。

2015年,日本东京大学 Tetsuo Kan 等设计了一种左右手转化螺旋超材料^[55],通过微弹性机电系统令平面螺旋形结构在气动力的作用下形成三维螺旋结构,通过控制形变方向调节材料的左右手属性,为太赫兹波段提供了一种紧凑型偏振调制器。2015年美国加利福尼亚大学 X. J. Ni 等,在80 nm厚的超表面内部植入分布式光路相位转换器,通过完全复原反射光的相位,构造了纳米波段超薄隐身罩,可用于三维任意形状物体隐身^[56]。2015年,韩国汉阳大学 Y. J. Yoo 等提出了一种基于水滴的完美超材料吸波结构^[57],研究采用控

制材料表面浸润性的方法获得特定高度和直径的水滴,并将其作为超材料单元结构吸收电磁波,并利用水滴尺寸与吸收率和吸收波段的对应关系,实现了吸收率和吸收波段的调控,将此结构应用于柔性基板或透明基板可产生柔性超材料。

5 三维超材料发展趋势

研究现状表明,印刷电路板工艺制造的金属谐振超材料,存在着高频谐振、电磁损耗较高、工作带宽较窄、难以扩展到光波段、难以实现各向同性的复杂三维结构器件制造等缺陷;机械加工仅适用于功能较为简单的二维或三维结构,难以加工微观或宏观形态复杂的超材料单元阵列;微纳制造工艺难以制造三维复杂微单元结构,成型尺寸较小,难以实现微观/宏观跨尺度制造。由此可知,三维超材料的创新应用与制造工艺能力紧密相连,制造工艺手段的缺乏已成为超材料尤其是三维超材料创新发展的瓶颈,制约着复杂结构、多材料体系、多功能超材料结构器件的实现。

因此,从材料与制造工艺创新的角度来分析三维超材料的发展趋势,可归纳出如下几点:

1) 复杂微/宏结构超材料跨尺度制造

超材料的微结构(即单元结构)是影响超材料电磁性能的核心所在,微结构的加工能力直接影响着电磁

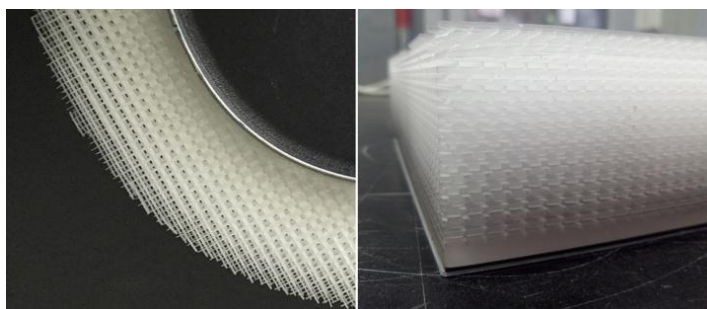


图9 平板型和圆环型三维超材料雷达吸波结构蒙皮。

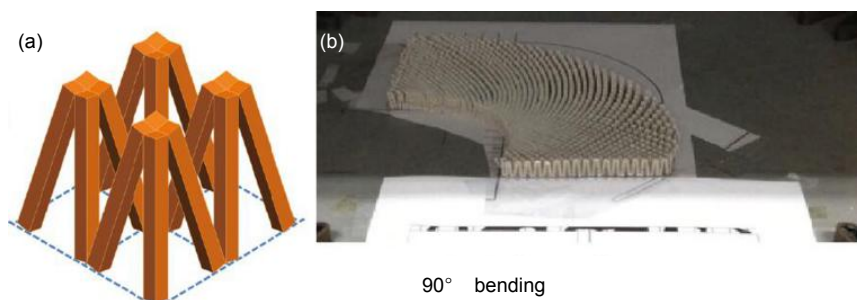


图10 变形超材料波导^[54]. (a) 单元结构示意图. (b) 弯曲后波导结构。

波可调控性, 三维宏观结构则决定了超材料的功能与应用特征, 跨尺度制造技术的发展将推动新型超材料功能器件的发展与应用。

2) 多材料超材料结构一体化制造

超材料结构的本质是多种材料的空间可控分布, 核心是如何实现具有多材料特征结构的可控制造。现有制造工艺难以实现多材料曲面或复杂结构的制造, 因此, 介电材料与金属材料同步制造工艺将有助于推动三维谐振型超材料结构的创新设计与实现, 推动谐振型超材料向工程实用化方向发展。

3) 多功能耦合超材料结构制造

目前, 超材料结构多以电磁特性调控为主要设计目标, 如采用介质板打孔、电子束刻蚀、印刷电路板以及光固化 3D 打印工艺, 所制造结构可实现所设计的电磁调控性能, 但结构设计与制造过程中普遍未考虑其力学或其它相关性能, 缺乏基本的结构承载能力, 无法满足实际应用需求。此外, 轻质超材料结构、电/电磁双功能超材料复合结构、力/电磁双功能超材料、热/电磁智能超材料等多功能耦合的新型超材料结构的实现, 需要多功能耦合设计策略与制造工艺的支撑。

4) 智能超材料结构的 4D 打印制造

具有变形、调频等新型功能的超材料器件对结构性能提出了新的要求, 即智能结构的制造, 其基本原理是结构在制造完成后, 在外界条件刺激下, 随时间能够进行可控变形, 实现超材料功能的可控调节, 实现智能超材料。而这些对智能结构制造技术的需求, 正好与增材制造领域的 4D 打印技术不谋而合, 将成为超材料结构制造技术的最前沿发展方向。

6 结论与展望

超材料的优势在于突破传统材料的束缚, 构造出功能新颖、现有技术更容易制备的电磁功能结构。纵观其发展历程, 超材料一直在向着高应用性的方向发展: 应用范围从微波到红外, 到光波段, 不断扩展适用频段; 制造工艺从印刷电路板工艺、机械加工工艺到 3D 打印、微纳制造, 既可以加工毫米级大尺寸超材料, 亦可以加工纳米级高精度超材料; 结构功能涉及电磁波调控、传输、吸收、能量转化等诸多方面, 展现出了强大的电磁调控能力。展望未来, 跨尺度、多材料、智能超材料结构的制造技术将引领未来超材料的发展方向, 而具有复杂结构一体化制造能力的 3D/4D 打印技术将成为超材料结构制造的核心技术。

基金项目

国家自然科学基金项目(51105300)、教育部博士点基金(20110201120075)、教育部留学回国人员启动经费(2013 回国基金 11)以及中央高校基本科研业务费资助的项目。

参考文献

- Cui Tiejun, Smith D R, Liu Ruopeng. *Metamaterials: theory, design and applications*[M]. New York: Springer, 2010.
- Cui Wanzhao, Ma Wei, Qiu Ledu, et al. *Electromagnetic metamaterials and its applications*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
崔万照, 马伟, 邱乐德, 等. *电磁超介质及其应用*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- Zhang Mingxi. *Introduction to metamaterials*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
张明习. *超材料概论*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- Tang Wenxuan, Mei Zhonglei, Cui Tiejun. Theory, experiment and applications of metamaterials[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(12): 127001.
- Yoon G, Kim I, Rho J. Challenges in fabrication towards realization of practical metamaterials[J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, **163**: 7–20.
- Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**(4): 509–514.
- Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77–79.
- Smith D R, Mock J J, Starr A F, et al. Gradient index metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005, **71**(3): 036609.
- Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, et al. Left-handed metamaterials: the fishnet structure and its variations[J]. *Physical Review B*, 2007, **75**(23): 235114.
- Zhou Jiangfeng, Economou E N, Koschny T, et al. Unifying approach to left-handed material design[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(24): 3620–3622.
- Erfani E, Niroo-Jazi M, Tatu S. A high-gain broadband gradient refractive index metasurface lens antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, **64**(5): 1968–1973.
- Smith D R, Mock J J, Starr A F, et al. Gradient index metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005, **71**(3): 036609.
- Ma Huifeng, Cai Bengeng, Zhang Tengxiang, et al. Three-dimensional gradient-index materials and their applications in microwave lens antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, **61**(5): 2561–2569.
- Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(9): 523–530.
- Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77–79.
- Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(20): 207402.
- Sun Shulin, He Qiong, Xiao Shiyi, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, **11**(5): 426–431.

- 18 Schurig D, Mock J J, Justice B J, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977–980.
- 19 Ma Huifeng, Cui Tiejun. Three-dimensional broadband ground-plane cloak made of metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2010, **1**: 21.
- 20 Ma Huifeng, Cui Tiejun. Three-dimensional broadband and broad-angle transformation-optics lens[J]. *Nature Communications*, 2010, **1**: 124.
- 21 Mei Zhonglei, Bai Jing, Cui Tiejun. Gradient index metamaterials realized by drilling hole arrays[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, **43**(5): 055404.
- 22 Driscoll T, Lipworth G, Hunt J, *et al.* Performance of a three dimensional transformation-optical-flattened Luneburg lens[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(12): 13262–13273.
- 23 Xu Xiaofei, Feng Yijun, Xiong Shuai, *et al.* Broad band invisibility cloak made of normal dielectric multilayer[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(15): 154104.
- 24 Peng Liang, Ran Lixin, Chen Hongsheng, *et al.* Experimental observation of left-handed behavior in an array of standard dielectric resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **98**(15): 157403.
- 25 Zhao Qian, Kang Lei, Du B, *et al.* Experimental demonstration of isotropic negative permeability in a three-dimensional dielectric composite[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **101**(2): 027402.
- 26 Lee J H, Blair J, Tamma V A, *et al.* Direct visualization of optical frequency invisibility cloak based on silicon nanorod array[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 12922–12928.
- 27 Blair J, Brown D, Tamma V A, *et al.* Challenges in the fabrication of an optical frequency ground plane cloak consisting of silicon nanorod arrays[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2010, **28**(6): 1222–1230.
- 28 Zhang Shuang, Zhou Jiangfeng, Park Y S, *et al.* Photoinduced handedness switching in terahertz chiral metamolecules [J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 942.
- 29 Zhu Weiming, Liu Aiqun, Zhang Xuming, *et al.* Switchable magnetic metamaterials using micromachining processes[J]. *Advanced Materials*, 2011, **23**(15): 1792–1796.
- 30 Tian Xiaoyong, Yin Ming, Li Dichen. 3D printing: a useful tool for the fabrication of artificial electromagnetic (EM) medium[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, **22**(2): 251–257.
- 31 Ergin T, Stenger N, Brenner P, *et al.* Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths[J]. *Science*, 2010, **328**(5976): 337–339.
- 32 Zhou Fan, Bao Yongjun, Cao Wei, *et al.* Hiding a realistic object using a broadband terahertz invisibility cloak[J]. *Scientific Reports*, 2011, **1**: 78.
- 33 Yin Ming, Tian Xiaoyong, Han Haoxue, *et al.* Free-space carpet-cloak based on gradient index photonic crystals in metamaterial regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(12): 124101.
- 34 Li Dichen, He Jiankang, Tian Xiaoyong, *et al.* Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, **49**(6): 129–135. 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. *机械工程学报*, 2013, **49**(6): 129–135.
- 35 Yin Ming, Tian Xiaoyong, Wu Lingling, *et al.* A broadband and omnidirectional electromagnetic wave concentrator with gradient woodpile structure[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(16): 19082.
- 36 Ye Dexin, Lu Ling, Joannopoulos J D, *et al.* Invisible metallic mesh[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(10): 2568–2572.
- 37 Urzhumov Y, Landy N, Driscoll T, *et al.* Thin low-loss dielectric coatings for free-space cloaking[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(10): 1606–1608.
- 38 Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1780–1782.
- 39 Cai Wenshan, Chettiar U K, Kildishev A V, *et al.* Optical cloaking with metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(4): 224–227.
- 40 Li J, Pendry J B. Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(20): 203901.
- 41 Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(18): 3966–3969.
- 42 Leonhardt U. Notes on conformal invisibility devices[J]. *New Journal of Physics*, 2006, **8**(7): 118.
- 43 Luneburg R K. Mathematical theory of optics[M]. Berkeley, California: University of California Press, 1964.
- 44 Danner A J, Tyc T, Leonhardt U. Controlling birefringence in dielectrics[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(6): 357–359.
- 45 Ma Yungui, Ong C K, Tyc T, *et al.* An omnidirectional retroreflector based on the transmutation of dielectric singularities[J]. *Nature Materials*, 2009, **8**(8): 639–642.
- 46 Yin Ming, Tian Xiaoyong, Wu Lingling, *et al.* All-dielectric three-dimensional broadband Eaton lens with large refractive index range[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(9): 094101.
- 47 Wu Lingling, Tian Xiaoyong, Yin Ming, *et al.* Three-dimensional liquid flattened Luneburg lens with ultra-wide viewing angle and frequency band[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(8): 084102.
- 48 Wang Bingnan, Koschny T, Soukoulis C M. Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber[J]. *Physical Review B*, 2009, **80**(3): 033108.
- 49 Ding Fei, Cui Yanxia, Ge Xiaochen, *et al.* Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(10): 103506.
- 50 Hawkes A M, Katko A R, Cummer S A. A microwave metamaterial with integrated power harvesting functionality[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(16): 163901.
- 51 Cheng Qiang, Cui Tiejun, Jiang Weixiang, *et al.* An omnidirectional electromagnetic absorber made of metamaterials[J]. *New Journal of Physics*, 2010, **12**(6): 063006.
- 52 Narimanov E E, Kildishev A V. Optical black hole: broadband omnidirectional light absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(4): 041106.
- 53 Shin D, Urzhumov Y, Jung Y, *et al.* Broadband electromagnetic cloaking with smart metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 1213.
- 54 Shin D, Urzhumov Y, Lim D, *et al.* A versatile smart transformation optics device with auxetic elasto-electromagnetic metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 4084.
- 55 Kan T, Isozaki A, Kanda N, *et al.* Enantiomeric switching of chiral metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals[J]. *Nature Communication*, 2015, **6**: 8422.
- 56 Ni Xingjie, Wong Z J, Mrejen M, *et al.* An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, **349**(6254): 1310–1314.
- 57 Yoo Y J, Ju S, Park S Y, *et al.* Metamaterial absorber for electromagnetic waves in periodic water droplets[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 14018.