

未来功能复合超材料研究与应用*

蒲永伟^{1,2}, 张 卷², 刘若鹏^{1,2,3}, 赵治亚^{1,2,3}, 季春霖^{1,3}

(1. 光启技术股份有限公司, 深圳 518000;
2. 光启尖端技术有限责任公司, 深圳 518000;
3. 深圳光启高等理工研究院, 深圳 518000)

[摘要] 先进复合材料是目前航空航天结构主要材料之一,其用量已经成为航空航天结构最重要的先进性标志。阐述了未来功能复合超材料的定义、理论结构以及应用现状和前沿技术,解释了其对传统功能复合材料的颠覆性意义。最后总结了该材料具有的若干特点并讨论了未来的发展趋势。

关键词: 未来功能复合超材料; 定制化设计; 微结构; 功能响应单元

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.17.032



蒲永伟

研究员级高级工程师,光启技术股份有限公司副总经理、总工程师。原中航工业沈飞复合材料制造中心主任业务经理兼副主任。主持过 C919 大型客机等多项国家、工信部和航空工业重大科研项目。

随着现代航空航天技术的发展及武器装备的不断更新换代,复合材料的使用条件日趋苛刻,新的甚至一些极端的功能要求相继出现^[1],如耐高温多频谱隐身复合材料、宽频带透波雷达天线罩复合材料等,使功能复合材料的研究和开发倍受重视^[2],并逐渐成为了先进复合材料技术尖端层次发展的核心。然而,我国作为将来世界上最大的功能复合材料需求用户,却面临着严重的国外技术封锁和国内技术短缺的难题^[3]。

传统的功能复合材料,指的是用基体相与第二相功能相复合或基体相、增强相与第三相功能相复合而成的一类复合材料,比如在碳化硅增强复合材料中加入铁氧体磁性吸波剂制备的隐身复合材料以及结构吸波

蜂窝夹芯板隐身复合材料等^[4]。这类传统的功能复合材料,存在两大主要缺陷:一是功能相与基体相各自的理化特性差异,形成非有机结合形式,因此往往会出现界面失效、功能界面易损坏等问题^[5];另一方面是部分功能复合材料结构性与其功能性质互相矛盾,对于吸能功能复合材料,轻质高强是其最显著的结构属性,但它不能像金属材料那样通过大变形吸收撞击能量,因此结构性与功能性无法兼得。这两大主要缺陷是限制功能复合材料发展的最大原因。在上面所举的例子中,结构吸波蜂窝夹芯板隐身复合材料是将功能相——吸波剂分散在芳纶纸蜂窝中,并将蜂窝与外表面的复合材料蒙皮通过一定的成型工艺复合制成的。

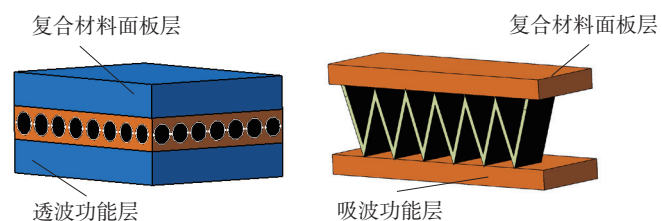


图1 传统功能复合材料结构图

Fig.1 Structure of traditional functional composite metamaterials

* 基金项目: 深圳市科技计划项目 (JSGG20160819150017627); 深圳市科技计划项目 (JSGG20160819150000459); 深圳市科技计划项目 (JCYJ20151015165114938)。

功能相吸波剂通常是铁氧体或金属微粉等磁性金属吸波材料,而芳纶纸蜂窝和复合材料蒙皮是由两种基体相——无机纤维和有机树脂组成的,当金属微粉与无机、有机体结合时,因3种组成相各自化学键类型的巨大差异,极易出现功能界面的损坏。图1为典型的传统功能复合材料结构图,由作为功能层的夹芯层和作为结构层的面板层组成。

未来功能复合材料与传统功能复合材料的区别

未来功能复合超材料,便是这样一种应运而生,能够有效解决功能复合材料现有问题的新型材料。它指的是从物理微观尺度出发^[6],运用一体化的结构、强度、功能多维度联合设计,并采用新型微纳加工技术等工艺设计和工艺处理,从而获得具有集结构-功能特性于一体的超级复合材料。其结构尺寸在微观尺度上类似常规材料中的原子结构,在宏观尺度上属于可工业化加工的尺寸,但具有微观体系的特性,使得最终产品在宏观上表现出特定的功能特性。

众所周知,自然界天然材料是由原子电子的规律排布组成,具有固定的性能,不可人为改变,如图2(a)所示。而未来功能复合超材料,则是可以人工调控的由材料构成的“材料”,介于宏观与微观之间的介观微结构是该材料的基本组成单元,具有超越自然界材料功能响应极限的特性^[7],如图2(b)所示。

未来功能复合超材料与传统功能复合材料最大的区别在于:在原有功能复合材料二元相次结构的基础上引入第三维度,并将三个维度融合成为一相结构,结合结构功能一体化设计技术,最终实现结构与功能的有机结合。

其设计特点反映在3个方面。(1)可定制化设计的非均匀排布:通过对具有不同要求的微观单元独立

设计,改变材料组分占比、浓度梯度等,实现材料结构与功能的非均匀排布^[8]。(2)可定制化设计的各向异性:在基体相与功能相性能差异的基础上,在不同方向上独立设计所需的结构强度与功能需求,并运用非线性耦合计算实现材料的各向异性。(3)可定制化设计的结构-功能共面结构:通过改变材料的几何结构、材料特性、功能特性单元等来改变材料的力学、光学和电磁等性质,实现结构与多种功能要求共面化。未来功能复合超材料不仅是一种新的材料形态,更是一种材料设计的理念。未来功能复合超材料结构,即根据实际结构与功能需求,在微观尺度上将材料

划分成若干个单元,进而对每个单元进行人工原子与人工分子设计,构造出能够满足特定要求的结构-功能单元,最终制备出宏观尺度上的功能复合超材料,此类功能复合超材料具多频带吸波特性的^[9]。

未来功能复合超材料,可以将不同的功能响应单元,如声谐振、磁谐振与电谐振单元与结构单元统一设计于同一平面上,相对于传统的功能复合材料对结构设计对称性较高的要求,未来功能复合超材料的对称性要求较低^[10],即使内部存在不对称性,也不会导致整个材料性能的下降,而是实现多种功能与结构的协调一致。另外,未来功能复合超材料在

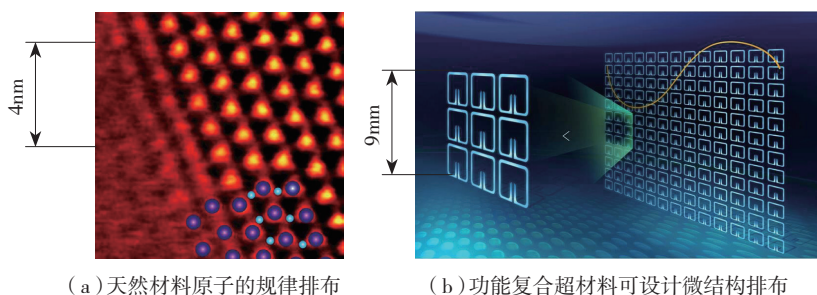


图2 天然材料与未来功能复合超材料微观尺度区别

Fig.2 Micro scale difference of natural materials and future functional composite metamaterials

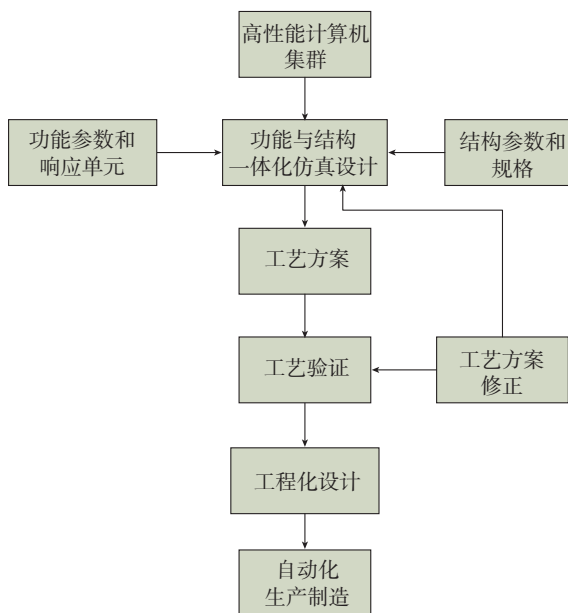


图3 未来功能复合超材料实现路径

Fig.3 Realization path of future functional composite metamaterials

经过计算机仿真分析及精确设计后,可以通过高精度的自动化设备完成工艺制备,完全摒弃了现有不可控因素较多的粗犷型传统功能复合材料设计制造方法。图3为未来功能复合超材料的实现途径,利用高性能计算机集群,通过将功能特性参数与结构特性参数统一在特定需求的材料中进行仿真设计和分析并形成工艺方案,之后对工艺方案进行试验验证和修正,当验证修正后的工艺能达到预期效果时,继续进行工程化设计,最终通过自动化设备完成未来功能复合超材料的加工制造。

未来功能复合材料研究现状与发展趋势

美国杜克大学 Smith 团队^[11]、新加坡南洋理工大学 Singh 团队等对材料几何结构和结构单元中非均匀体系的理论机制作了探索。美国加州大学伯克利分校张翔团队、英国伦敦大学帝国理工学院 Maier 团队等对比了人工原子与人工分子设计理论设计和试验验证的差异^[12]。深圳光启高等理工研究院在国际上首先开辟了未来功能复合超材料工业化的先河,在结构功能一体化隐身结构

设计、智能通信系统、超传感等领域均有一系列产业化成果^[7]。

在未来功能复合超材料研发和工业应用方面,国内外部分高校、研究机构和企业已经进行了理论探索和试验验证,为后续的研究开发奠定了良好的基础。早在 20 世纪末,英国帝国理工学院 Pendry 教授已经对金属线阵列与金属开口谐振环阵列进行了相关的研究,在入射电场与磁场作用下,这两种结构分别能够产生负值的介电常数与负值的磁导率^[12]。到 2001 年,Shelby 与 Smith 等在平行的铝波导中对左手材料的折射波功率进行了测量,证实了负折射的传输特性,这就是著名的“棱镜折射试验”,在国际学术界引起了极大的轰动。Pendry 教授基于变换光学理论设计出微波段的隐身斗篷^[12]。图4为部分共形天线、平板天线、卫通天线的功能超材料产品图。

未来功能复合超材料的发展趋势:(1)设计-评价一体化技术。由于大量未来功能复合超材料需要服役于特殊甚至极端的外场环境,直接在外场环境进行试验不仅无法获得损伤演变过程的信息和控制因素^[13],同时风险较大且试验费用昂贵,因此

需要从设计初期即对材料微观层次损伤演化和破坏的规律进行探索,借助计算机辅助设计与仿真,实现设计-评价一体化。(2)未来功能复合超材料基因组计划。通过材料的微结构单元组成预测材料的性能,并将材料设计、产品设计和生产制造统一为一个整体。以材料数据库系统为基础,避免大量重复或无效试验^[14],以数字化模拟技术为工具,代替以往的试错技术^[15],将大大降低研制风险,提高研制效率和研制质量。(3)结构多功能一体化联合设计技术^[16]。通过多物理场耦合机制,利用微结构单元间的多物理场耦合效应实现复合超材料的一体化和智能响应,可将材料的声、光、电、热磁等功能与结构强度、外形集合于同种材料和产品上。(4)全生命周期低成本技术。居高不下的成本一直是限制功能复合超材料大量使用的重要原因。形成可靠而普适的计算设计体系,对相似功能建立模块化设计方案,可降低单独设计计算成本。此外利用高效率高精度的自动化设备进行生产制造,大力提升工艺成形技术成熟度,以及依靠未来功能复合超材料较高的稳定性、可靠性,将成为未来功能复合超材料全生命周期低成本技术的有力推动因素。

结论

综上所述,本文首先描述了传统功能复合材料的结构及其非有机结合结构容易带来的问题,接着阐述了未来功能复合超材料的定义,对比了未来功能复合超材料与传统功能复合超材料的区别,从理论和结构上解释了其具备的特点,并对其设计制造方式作了总结,此外,还对国内外研发和工业应用情况作了总结评述。在此基础上,本文给出了未来功能复合超材料可能的发展方向,以期为此领域的工作者提供一点指引。



图4 功能超材料产品

Fig.4 Products of functional composite metamaterials

参考文献

- [1] 郭玉明. 航天功能复合材料应用与发展趋势 [C]//2005 年南京复合材料技术发展研讨会论文集. 南京, 2005.
- GUO Yuming. Application and development of functional composites for aerospace[C]// Seminar Collected Papers of Composite Materials Technology Development. Nanjing, 2005.
- [2] 徐廷献, 王树彬. 功能复合材料研究进展 [C]// 第四届中国功能材料及其应用技术会议论文集. 重庆: 重庆仪表材料研究所, 2001,10: 68-72.
- XU Tingxian, WANG Shubin. The advances in researching on the functional composite[C]// Proceeding of 9th China National Conference on Functional Materials and Applications. Chongqing: Chongqing Materials Research Institute, 2001: 68-72.
- [3] 唐见茂. 航空航天复合材料发展现状及前景 [J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4): 352-359.
- TANG Jianmao. Current status and trends of advanced composites in aerospace[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4): 352-359.
- [4] 高树理. 微波功能复合材料的应用与发展 [J]. 航空制造技术, 2004(7): 49-59.
- GAO Shuli. Application and development of microwave function composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(7): 49-59.
- [5] 周瑾, 薛克兴. 功能复合材料结构的发展 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 1994(2): 40-44.
- ZHOU Jin, XUE Kexing. Development of functional composites structure[J]. Fiber Reinforced Plastics/ Composites, 1994(2): 40-44.
- [6] 张庆乐. 新型电磁超材料在天线中的应用 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- ZHANG Qingle. Application of metamaterials in antennas[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [7] 刘若鹏, 季春霖, 赵治亚, 等. 超材料: 重新塑造与重新思考 [J]. 工程, 2015, 1(2): 179-184.
- LIU Ruopeng, JI Chunlin, ZHAO Zhiya, et al. Metamaterials: reshape and rethink[J]. Engineering, 2015, 1(2): 179-184.
- [8] KADIC M, BUCKMANN T, STENGER N, et al. On the practicability of pentamode mechanical metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(19): 191901.
- [9] 王国栋. 电磁超材料的设计及其吸波性能的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- WANG Guodong. The design of electromagnetic metamaterials and its absorption characteristic[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [10] VASILIEV V V, RAZIN A F. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications[J]. Composite Structures, 2006, 76: 182-189.
- [11] RUAN Z C, QIU M. Negative refraction and sub-wavelength imaging through surface waves on structured perfect conductor surfaces[J]. Optics Express, 2006, 14(13): 6172-6177.
- [12] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattice[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [13] 朱新宇, 卢俊文. 复合材料结构健康监测技术在飞机中的应用 [J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(6): 23-27.
- ZHU Xinyu, LU Junwen. Application of structural health monitoring on composite aircraft[J]. Aerospace Materials and Technology, 2011, 41(6): 23-27.
- [14] 益小苏, 许亚洪, 唐邦铭, 等. 复合材料结构-功能一体化技术与吸能结构的研究 [J]. 材料工程, 2004(9): 3-8.
- YI Xiaosu, XU Yahong, TANG Bangming, et al. Study on energy absorption behavior of composite tubes and integrated manufacturing of composite structure[J]. Materials Engineering, 2004(9): 3-8.
- [15] 杜善义. 先进复合材料与航空航天 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [16] 邢丽英, 包建文, 礼嵩明, 等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战 [J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1327-1338.
- XING Liying, BAO Jianwen, LI Songming, et al. Development status and facing challenge of advanced polymer matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1327-1338.

通讯作者: 刘若鹏, 高级工程师, 研究方向为超材料, E-mail: Ruopeng.liu@kuang-chi.com。

Research and Application of Future Functional Composite Metamaterials

PU Yongwei^{1,2}, ZHANG Juan², LIU Ruopeng^{1,2,3}, ZHAO Zhiya^{1,2,3}, JI Chunlin^{1,3}

(1. Kuang Chi Technology Co., LTD., Shenzhen 518000, China;

2. Kuang Chi Leading Edge Technology Co., LTD., Shenzhen 518000, China;

3. Shen Zhen Kuang Chi Institute of Advanced Technology, Shenzhen 518000, China)

[ABSTRACT] Advanced composite material is one of the main materials of aerial and aerospace structures, and the consumption has become the most typical symbol. The definition of future functional composite metamaterials is elaborated, the theoretical structure, application status, frontier technology and its subversive significance over traditional composite functional materials are expounded. Finally, several characteristics are summarized and the trends in the future are discussed.

Keywords: Future functional composite metamaterials; Customized design; Micro structure; Functional response unit

(责编 溥山)