

卫星隐身技术研究进展及发展趋势*

胡豪斌¹, 张翔¹, 廖文和¹, 孔祥鲲²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016)

摘要:卫星隐身技术在空间攻防系统中占有独特的地位,与在地面装甲车辆、舰船、飞机上应用的隐身技术有一定的相似之处,但由于卫星研制条件以及所处的太空环境不同,卫星隐身技术的研究及应用更具有挑战性。基于卫星工程应用,归纳了卫星隐身需求、应用环境等,重点介绍了国际前沿隐身技术,包括雷达隐身手段、红外及可见光隐身手段,同时探讨卫星隐身的技术瓶颈及未来展望,促进隐身技术在卫星上的应用。

关键词:隐身技术;卫星隐身;雷达吸波材料;超材料;红外隐身;可见光隐身

中图分类号:V418;TN973 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2021)03-107-21

Progress and prospect in satellite stealth technology

HU Haobin¹, ZHANG Xiang¹, LIAO Wenhe¹, KONG Xiangkun²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Satellite stealth technology occupies a unique position in the space attack and defense system. It has certain similarities with the stealth technology applied on ground armored vehicles, warships, and aircraft. However, due to the different satellite development conditions and the space environment, satellite stealth technology faces greater challenges in its research and application. The requirements and conditions of satellite stealth technology were summarized on the basis of satellite engineering application. The international cutting-edge stealth technology was systematically reviewed. This research focuses on radar stealth methods, and infrared and visible light stealth methods. The technical bottlenecks and future prospects of satellite stealth were discussed, in the aim to promote the application of stealth technology on satellites.

Keywords: stealth technology; satellite stealth; radar absorbing material; metamaterial; infrared stealth; visible light stealth

随着科学技术的发展,卫星技术迅猛发展,在轨卫星数量剧增,军用、民用、商业卫星繁荣发展,对于军事战略而言,太空已成为新的战场,与制海权、制空权一样,制天权已成为目前发达国家军事战略中的重要组成部分。欧美等发达国家的太空发展计划中,防御性对抗在整个攻防体系中发挥着重要作用,具有隐身功能的卫星已经成为防御性对抗的重要组成部分。随着针对太空目标的探测识别和监视技术的不断发展,卫星的安全和生存能力将面临严峻的挑战,为了降低在轨卫星的可探测性,增强对敌方探测和监视系统的抵御能力,迫切需要在卫星上应用隐身技术。

针对目标可探测特征的分类,隐身技术主要分为雷达隐身技术、可见光及红外隐身技术、射频隐身技术等。雷达隐身技术是发展最早也是最重要的隐身技术,降低雷达散射截面(Radar Cross

Section, RCS)的措施主要有:外形修形技术,也称为外形隐身;采用雷达吸波材料。可见光及红外隐身技术的核心是通过冷却、降温、涂料、涂层、遮挡和降低发射率等手段来控制或缩减自身可见光及红外特征信号,实现目标与背景融为一体,使得光学或红外成像设备难以分辨。射频隐身技术是采用主动控制辐射的技术措施,以降低被无源探测器截获的概率^[1]。

自苏美军备竞赛以来,针对日益增多的人造卫星及愈发严峻的太空形势,美国发展建立了系列太空探测系统,如太空跟踪与监视系统(space tracking and surveillance system)、天基空间监视(space based space surveillance)系统、太空篱笆(the space fence)及林肯空间监视系统(lincoln space surveillance complex)等,已经形成在没有预先提示或指派任务情况下实现对9 cm大小空间目标的随机探测,在提示情况下能够跟踪探测1 cm

* 收稿日期:2019-10-23
作者简介:胡豪斌(1993—),男,重庆人,博士研究生,E-mail:hhb2018@njust.edu.cn;
张翔(通信作者),男,教授,博士,硕士生导师,E-mail:Zhxiang2002@126.com

大小空间目标的能力。另外,俄罗斯“天窗”(Okno space-monitoring complex)系统及光学跟踪系统、法国的空间监视网雷达网等空间目标探测系统也已具备探测能力。目前,国际上空间目标探测系统的探测能力发展迅速,无论是雷达探测设备还是光学成像设备,地基探测系统或是天基探测系统都具备优越的探测识别及跟踪能力,这对卫星的隐身能力提出了极高的性能要求。

卫星是一个系统工程,其本身技术复杂,包含了很多分系统,如测控、结构、热控、电源、数据管理、姿态控制等,隐身作为一个分系统需要与各个分系统兼容。卫星在搭载于运载火箭发射升空、在运载火箭发射过程中,卫星需经历极大的过载加速度、冲击及噪声环境,卫星受到体积、质量和功耗的严格限制。因此,卫星自身的功能及设计限制作为保证卫星任务成功的首要条件,对隐身方式及其力学性能提出了特殊要求。

卫星在轨飞行过程中,暴露在紫外线辐射、原子氧、微重力以及高真空度的极端环境下,对卫星表面材料具有一定的腐蚀降解作用,要求隐身材料具备较强的耐空间环境能力。太空平均温度为 $-270.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,在太阳辐射、地球反照环境、卫星的自身功耗及热控措施下,星内温度一般控制在 $-15\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,星体表面及太阳能电池阵温度范围可达 $-90\sim+120\text{ }^{\circ}\text{C}$,对隐身材料工作温度提出了较为严苛的要求^[2]。此外,由于任务需求,要求隐身卫星具备长时间在轨潜伏的能力,且卫星上隐身材料的修补或更换等工作极难展开,因而对卫星隐身材料提出了长寿命的需求。

本文首先概述了雷达隐身技术、红外及可见光隐身技术,调研了外形隐身手段、各类雷达吸波材料、红外及可见光吸收材料等,讨论并总结了各类隐身技术的优缺点及在卫星上应用的可能性,最后展望了卫星隐身技术的发展趋势。

1 雷达隐身技术

1.1 外形隐身技术

外形隐身作为比较有效的雷达隐身手段,其通过改变目标的特征外形,可在特定角度范围内降低目标的 RCS,使目标的主要散射能量规避雷达威胁区域,达到雷达隐身的效果。如图 1 所示,美国的 F-117A 战斗机、B-2 轰炸机等就是外形隐身设计的代表作。

外形隐身技术可利用多种途径:①优化目标



图 1 美国 B-2 隐形轰炸机

Fig. 1 US B-2 stealth bomber

总体布局,减少强散射源;②通过修形消除或减弱镜面散射;③避免构成角反射器的外形布局;④改变散射回波的方向,使散射能量在雷达威胁区域外;⑤对强散射部件进行遮挡等。

美国朦胧(Misty)卫星是已公开报道过的在轨隐身卫星,其隐身性能来源于充气罩^[3],地面雷达探测电磁波通过锥形充气罩的外壁折射至其他方向,大大降低了回波能量,属于外形隐身技术的一种,朦胧卫星在轨期间隐身效果显著,其构型如图 2 所示。陈卫东等^[4]公开了一种隐身卫星构型,如图 3(a)所示,卫星构型为六棱柱体、六棱锥与隐身天线罩的结合,该设计主要通过漫反射雷达探测电磁波实现卫星隐身。秦远田等^[5]公开了一种橄榄体形隐身卫星构型,如图 3(b)所示,其暴露于外表面的天线、喷管和太阳能帆板可通过窗口收进本体内,卫星切换为隐身状态,针对全尺寸实物模装分别进行隐身状态和非隐身状态下的 RCS 测试,两组数据表明,在隐身状态切换前后的 RCS 分别缩减至原来的 $1/719$ 和 $1/350$ 。

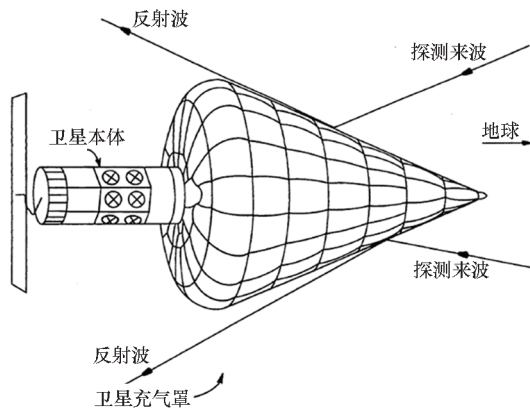


图 2 美国朦胧卫星示意

Fig. 2 US Misty satellite

综上所述,卫星采用外形隐身技术具有一定的可行性,且隐身效果较好,但上述隐身卫星构型仍存在一定的技术缺陷:①朦胧卫星可充气圆锥结构体积庞大,圆锥角需长时间对地以指向地基雷达,影响载荷的搭载,且难以兼顾对天基探测设

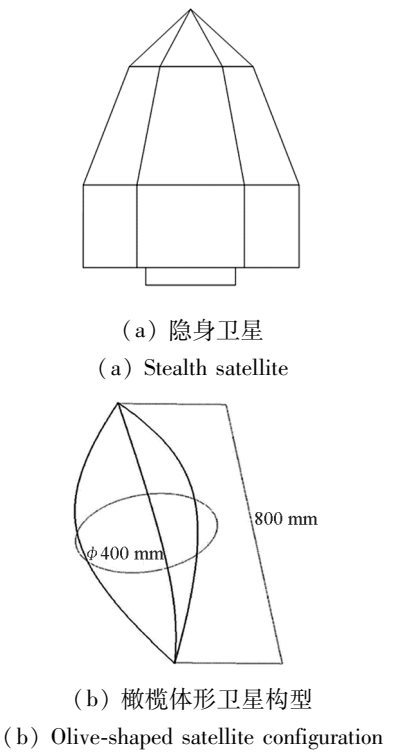


图3 典型隐身卫星构型

Fig. 3 Typical stealth satellite configuration

备、地基光学成像设备的隐身;②六棱柱与六棱锥结合隐身天线罩的构型同样需要锥角对地,无展开式电池阵,对日电池片数量少,难以为大功率载荷供电;③橄榄形构型外形不规则,在有限的运载火箭搭载空间内,此卫星构型设备安装空间会更小,空间利用率降低,不符合现代卫星小型化趋势。

1.2 涂覆型雷达吸波材料

雷达吸波材料(Radar Absorbing Material, RAM)有多种分类,如按对电磁的损耗机理可分为电吸收吸波材料和磁吸收吸波材料,按吸收带宽可分为窄带型和宽带型,按材料的使用方式可分为涂覆型和结构型吸波材料。目前涂覆型吸波材料有铁氧体涂料^[6-8]、多晶铁纤维材料^[9-11]、金属微粉材料^[12]、纳米材料^[13]、导电高聚物^[14-15]、手性材料^[16-19]、石墨烯复合材料^[20-25]、碳纤维复合材料^[26-30]、碳纳米管复合材料^[31-34]等。

Zhang等^[7]研制的Fe₃O₄/GNPs-NH-PANI复合材料与石蜡按照3:7的质量比混合涂层,在2.6 mm的厚度时,反射损耗(Reflection Loss, RL)低于-10 dB的带宽高达9.62 GHz(7.85~17.47 GHz)。Zheng等^[16]采用纳米镍对微螺旋手性碳纤维改性,如图4所示,测试结果表明涂层的反射率为-6~-8 dB的带宽为12 GHz(6~

18 GHz)。Chen等^[21]在湿化学条件下,成功制备了新型还原氧化石墨烯/赤铁矿纳米复合材料,厚度为4 mm时,RL<-10 dB的频带为11.3~18 GHz。Pan等^[22]通过在石墨烯上生长的六方钴(α-Co)和立方钴(β-Co)纳米晶的相控合成提高钴的电磁性能,如图5所示,通过调节涂层厚度,有效吸收带宽可在3~16 GHz(RL≤-10 dB)内变化。Qing等^[25]研究了宽带微波吸收的石墨烯纳米片(Graphene NanoPlatelets, GNP)和BaTiO₃颗粒填充的环氧涂层,采用双层结构和频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)设计改善此类涂层的微波吸收率后,RL<-8 dB的带宽为13.9 GHz(4.1~18 GHz)。

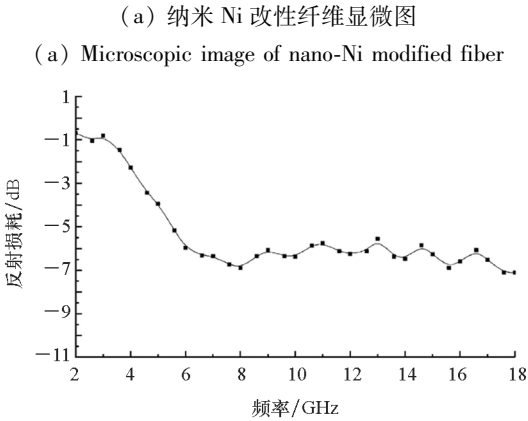
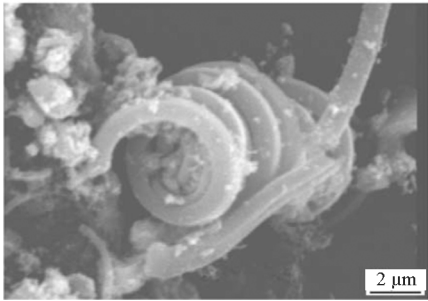
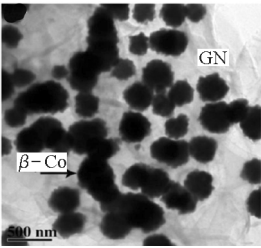


图4 纳米 Ni 改性纤维

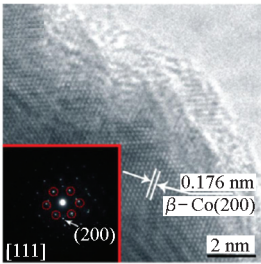
Fig. 4 Nano-Ni modified fiber

Kim等^[26]研究了两层复合层压板(碳纤维-环氧树脂复合板与炭黑浸渍橡胶板)的微波吸收特性,发现复介电常数可以通过橡胶复合板中炭黑的含量来控制,对于含10%炭黑的橡胶板,最大微波吸收为30 dB(10 GHz处)。Liu等^[28]分别使用Ni和Ni/Al₂O₃催化乙炔分解,在碳纤维的表面上选择性地生长形成双碳纳米线圈和单碳纳米线圈,如图6所示,测试结果表明单碳纳米线圈复合材料RL小于等于-10 dB的带宽达9.6 GHz。

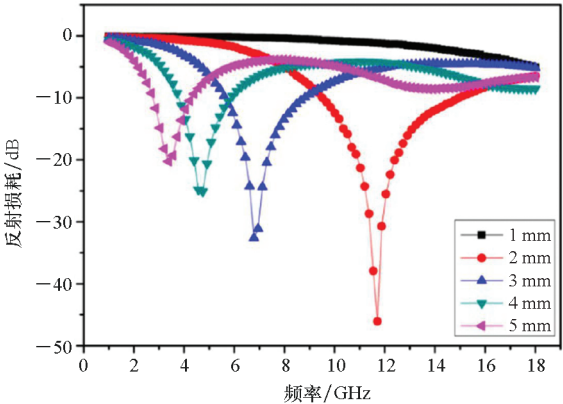
Xu等^[32]通过在两辊混合器混合硅橡胶、多



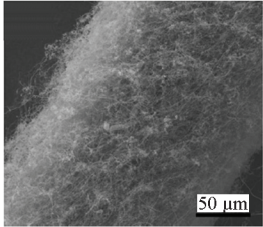
(a) β -Co 100 nm 显微图
(a) Microscopic image of β -Co in 100 nm



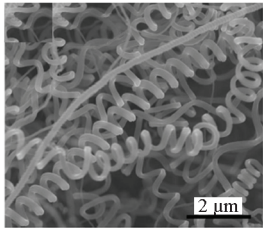
(b) β -Co 2 nm 显微图
(b) Microscopic image of β -Co in 2 nm



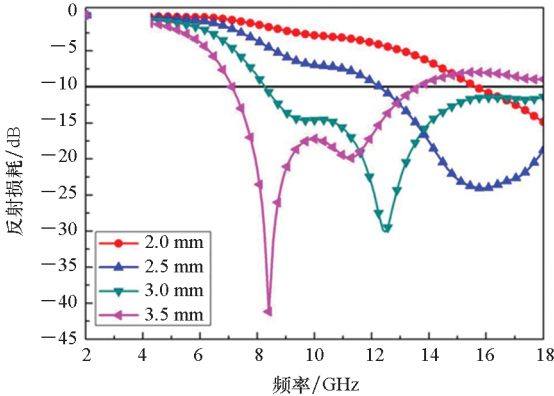
(c) 不同厚度涂层的反射损耗曲线
(c) RL of coatings of different thicknesses



(a) 单碳纳米线圈在碳纤维上生长的显微图像
(a) Microscopic image of single-carbon nanocoils growth on carbon fiber



(b) 单碳纳米线圈的高倍放大图
(b) High magnification of single-carbon nanocoils

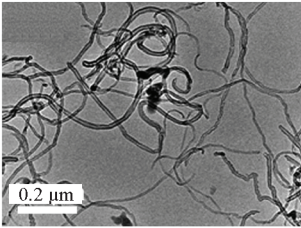


(c) 不同厚度的反射损耗曲线
(c) RL of different thickness

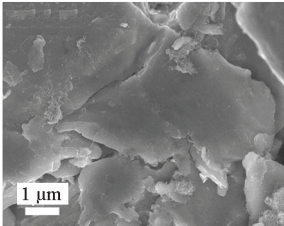
图 5 石墨烯上生长立方钴纳米晶
Fig. 5 Growing β -Co nanocrystals on graphene

壁碳纳米管 (Multi-Walled Carbon NanoTube, MWCNT) 和片状羰基铁颗粒 (Carbonyl Iron Particle, CIP) 来制备的智能吸收复合材料,厚度为 1 mm 或 1.5 mm 时,反射吸收带 ($RL < -10$ dB) 为 5.2 ~ 10.6 GHz 或 4.0 ~ 8.4 GHz。Huang 等^[33]通过球磨法制备的片状 FeSiAl 合金/MWCNT 复合材料,通过控制铣削时间及 MWCNT 含量,可调整复合材料电磁性能,如图 7 所示,测试表明 $RL < -10$ dB 时,带宽可达 4.6 GHz。De Micheli 等^[35]在立方体卫星表面覆盖了优化设计的用于吸波的多层 MWCNT,在 2 ~ 18 GHz 频带内的大部分频率范围内电磁波反射低于 -10 dB,可实现立方体卫星的隐身。

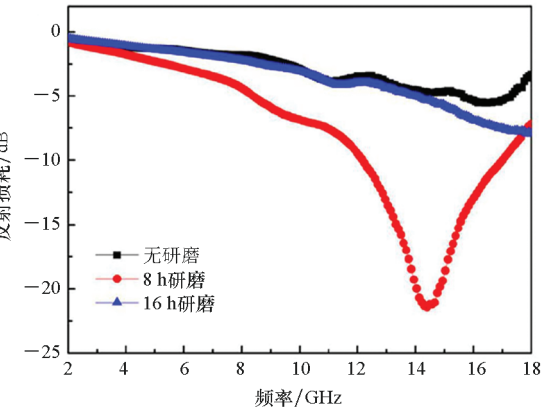
图 6 单碳纳米线圈复合材料
Fig. 6 Single-carbon nanocoils composite



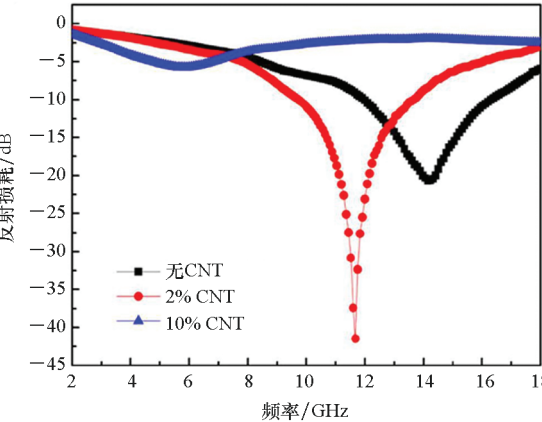
(a) 0.2 μm 高清电镜图像
(a) HD image in 0.2 μm



(b) 1 μm 高清电镜图像
(b) HD image in 1 μm



(c) 厚度为 2 mm 不同研磨时间样品的反射损耗曲线
(c) RL of the 2 mm thickness sample of different grinding time



(d) 不同 MWCNT 含量样品的反射损耗曲线
(d) RL of the sample of different MWCNT content

图7 FeSiAl / MWCNT 复合材料
Fig.7 FeSiAl / MWCNT composite material

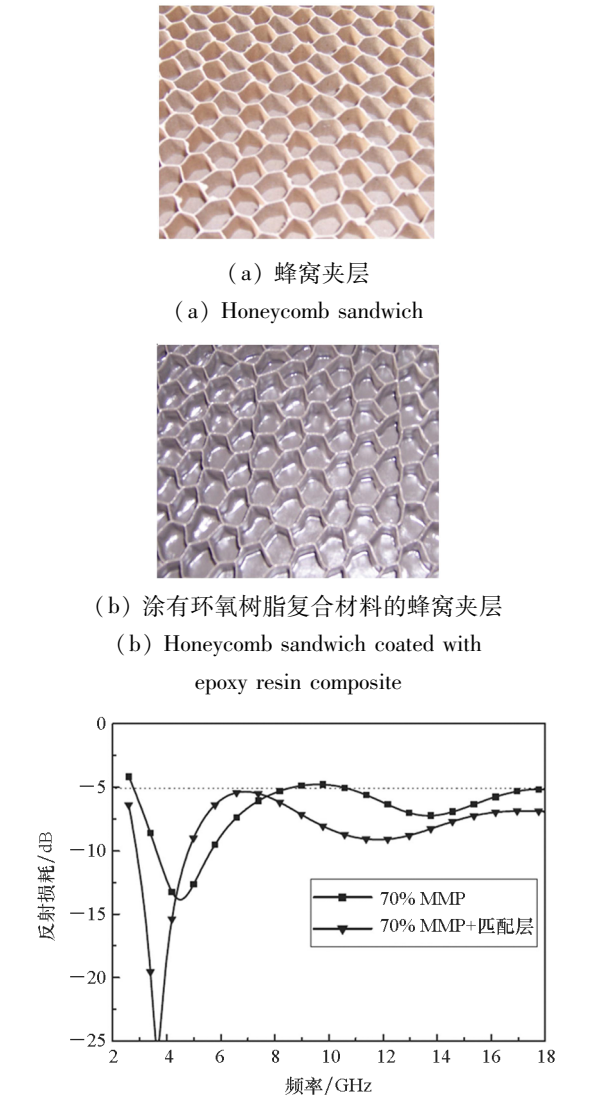
然而目前广泛研究和使用的涂覆型吸波材料,仍存在密度大、吸收频带窄(在 2 ~ 18 GHz 频带内, $RL < -10$ dB 的带宽一般低于 10 GHz)、电磁波吸收率低等缺点。吸波材料多为碳系材料,辐射吸收率高、发射率高,红外特征明显,难以适应卫星应用环境或满足隐身性能需求。此外,如碳纳米管等纳米级材料具备的非常复杂的制备工艺、高昂的制备成本会限制其应用。

1.3 结构型雷达吸波材料

结构型吸波材料,如吸波蜂窝板,通常有三种形式:①透波蒙皮,中间蜂窝夹芯中充填吸波材料(絮状、泡沫状、纤维状);②透波蒙皮,中间纸蜂窝夹芯在吸波剂中反复浸润或者喷涂吸波剂,吸波剂附着在夹芯壁上^[12,35-39];③表面蒙皮及蜂窝夹芯透波,底层为多层复合吸波材料^[40]。

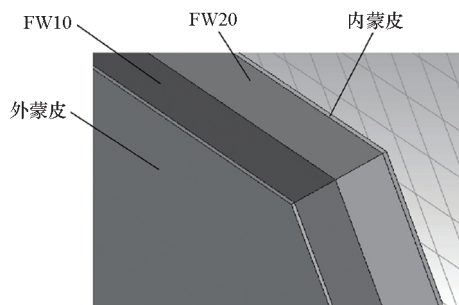
He 等^[12]通过在蜂窝状夹层结构中喷涂金属磁性微粉涂层(Metal Magnetic microPowder, MMP)

构成的微波吸收材料,如图 8 所示,在 2.6 ~ 18 GHz 的频率范围内 $RL < -5$ dB。郭雪松等^[36]对异形蜂窝的电磁参数进行仿真,优化了 15 mm 厚蜂窝,在增重 41.25%、拉伸率为 0.68 时, $RL < -10$ dB 的带宽达到 12 GHz(2 ~ 18 GHz 内)。孙鹏程等^[37]选取了两种采用不同类型吸波剂浸渍的芳纶纸蜂窝结构型吸波材料 FW10 和 FW20 作为夹层,内外侧蒙皮为铝合金板件及石英纤维板,如图 9 所示,结果表明,厚 31 mm 的最优方案 $RL < 10$ dB 的带宽为 13.1 GHz(1.7 ~ 14.8 GHz)。礼嵩明等^[38]建立了具有良好计算准确性的吸波蜂窝及其夹层吸波结构复合材料的电性能计算模型,并实现了蜂窝夹层结构吸波复合材料的宽频电性能优化设计,如图 10 所示, 30 mm 厚的蜂窝夹层结构吸波复合材料优化后在 1.5 ~ 18 GHz 宽频内实现 $RL < -10$ dB。

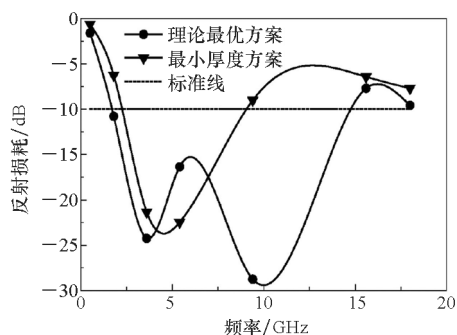


(c) 样品的反射损耗(涂层厚度为 2.5 mm)
(c) RL curve of sample (coating thickness is 2.5 mm)

图8 蜂窝夹层板
Fig.8 Honeycomb sandwich



(a) 仿真模型
(a) Simulation model



(b) 采用最优方案时的反射损耗曲线
(b) RL curve when using the optimal scheme

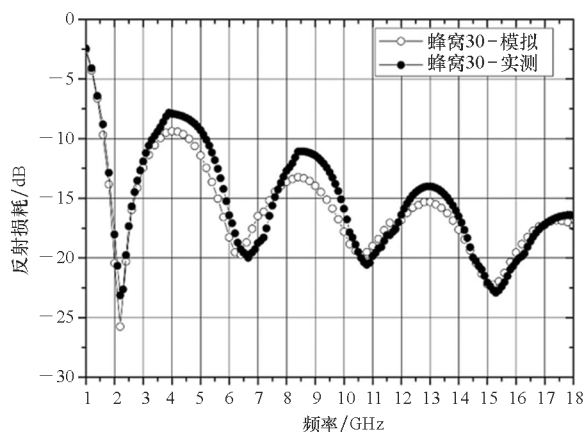
图 9 双层吸波蜂窝复合材料

Fig. 9 Double-layer absorbing honeycomb composite materials

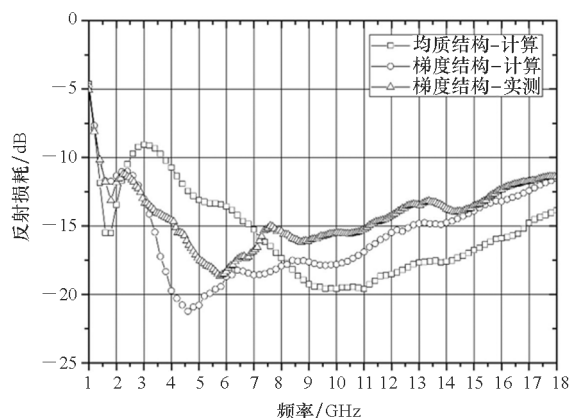
对比 1.2 小节可知,结构型吸波材料吸波频带普遍比涂覆型吸波材料宽,并且材料密度小,若能达到卫星承力要求,可以实现卫星结构隐身一体化。

1.4 电磁超材料

超材料 (metamaterials) 指的是一种特种复合材料或结构,通过对材料关键物理尺寸上进行有序结构设计,使其获得常规材料所不具备的超常



(a) 30 mm 厚吸波蜂窝芯反射损耗
(a) RL curve of a 30 mm thickness absorbing honeycomb core



(b) 不同电结构形式蜂窝夹层结构复合材料反射损耗
(b) RL curve of a honeycomb sandwich structure with different electrical structures

图 10 蜂窝夹层结构吸波复合材料

Fig. 10 Absorbing honeycomb sandwich structure

物理性质。超材料中的“左手材料”最早在 1968 年由苏联物理学家 Veselago 在理论上提出,预测其介电常数和磁导率同时为负数的特性^[41]。20 世纪 90 年代,英国 Pendry 教授提出周期性排列的金属线阵列^[42]和金属开口谐振环结构^[43]可以分别实现负介电常数和负磁导率。2001 年,美国 Smith 教授团队将上述二者复合而首次制造出了左手材料,并用实验验证了其具有负折射现象^[44]。Landy 等^[45]于 2008 年设计出了吸波超材料,数值模拟和实验表明在 11.48 GHz 处吸收率可达 99%。后续在国际上超材料吸波体的研究蓬勃发展,大量超材料相关论文相继发表。目前可用于隐身技术的超材料设计繁多,如超材料微波吸波体^[46-56]、超材料可见光吸波体^[57-61]、超材料红外吸波体^[62-65]、超材料极化转换器^[66]、超材料极化旋转反射面^[29,67-68]、超材料天线罩^[69-70]、可调谐超材料吸波体^[71-73]、光子晶体等。另外, FSS^[74]、频率选择反射器 (Frequency Selective Reflector, FSR)^[75-76]也可归类于超材料。

Li 等^[47]提出了一种多层超材料吸波体,丝网印刷的碳基电阻膜夹在两层硅橡胶与 MWCNT 复合材料之间,如图 11 所示,90% 吸收带宽为 13.5 GHz (7.1 ~ 20.6 GHz)。Tayde 等^[48]提出的宽带超材料微波吸波体,由多层电阻表面构造,每层使用电阻石墨在 FR-4 基板上印刷不同的周期性图案,90% 吸收带宽为 16.5 GHz (2 ~ 18.5 GHz),如图 12 所示。

Harsh 等^[49]提出的光学透明超材料由氧化铟锡 (Indium Tin Oxide, ITO) 电阻膜图案及 PET 介

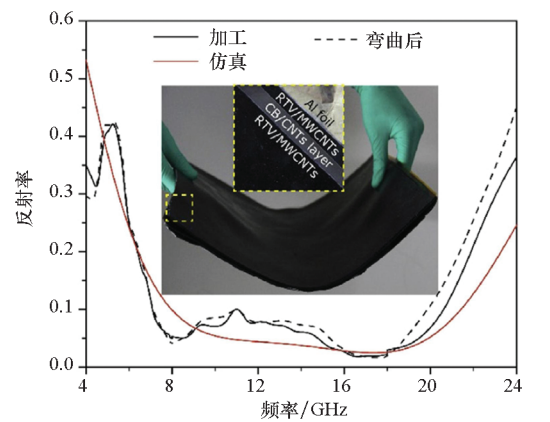


图 11 在弯曲试验前后测量的反射率曲线及仿真曲线
Fig. 11 Simulated RL curve and RL curve measured before/after the bending test

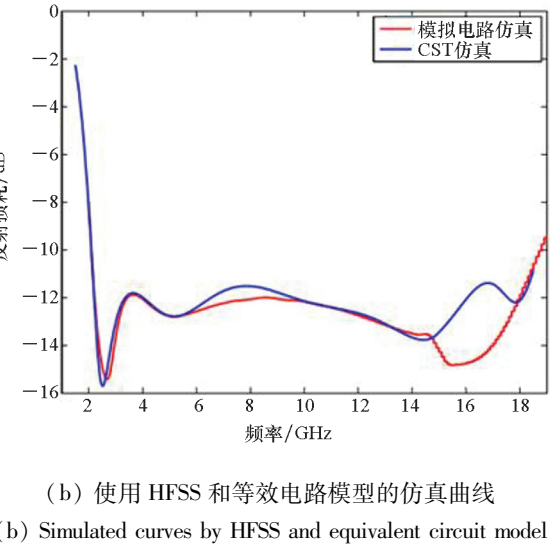
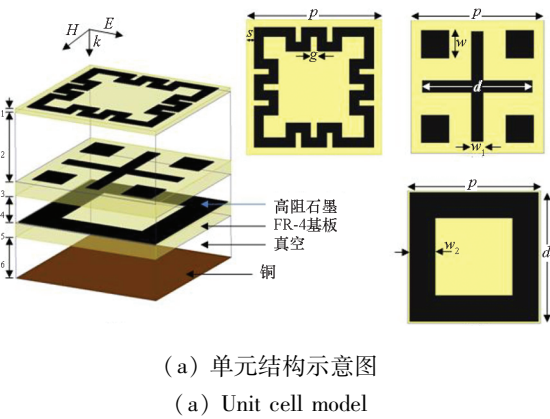


图 12 多层电阻表面超材料微波吸波体
Fig. 12 Metamaterial wave absorber based on resistance surface

质板制成,如图 13 所示,90% 吸收带宽为 8.6 GHz(6.06 ~ 14.66 GHz)。Zhang 等^[51]提出采用 ITO 的光学透明雷达吸波体,通过适当地调整结构的共振,在 8.3 ~ 17.4 GHz 宽频内实现 90% 吸收。Zhou 等^[56]提出了一种超宽带周期性

两层阶梯式雷达吸收结构(Periodic Stepped Radar Absorbing Structure, PSRAS),通过使用 αFe 增强环氧树脂复合材料构造的 PSRAS,由于微观和介观尺度相结合的多尺度效应,如图 14 所示,其在 2.64 ~ 40.0 GHz 超宽频内实现 $RL < -10$ dB。

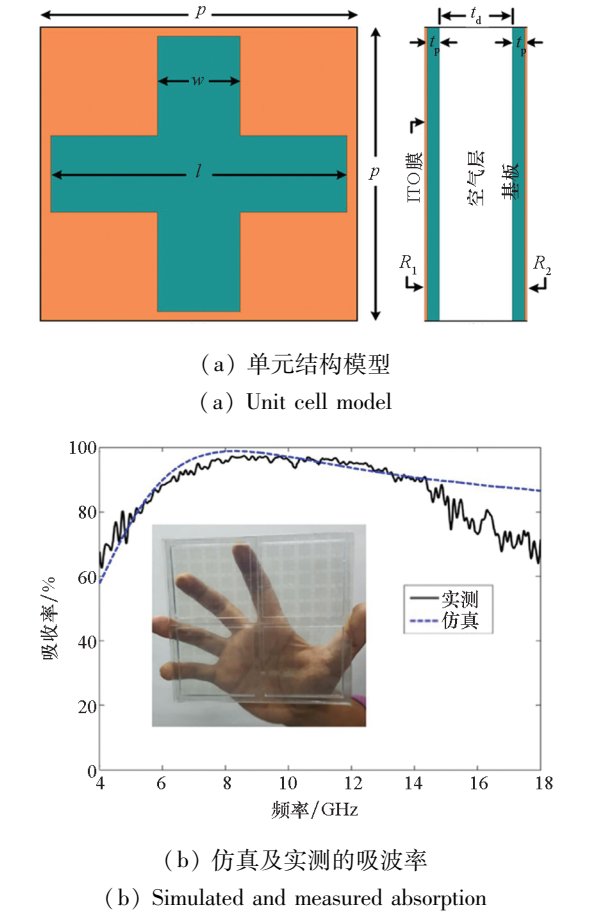
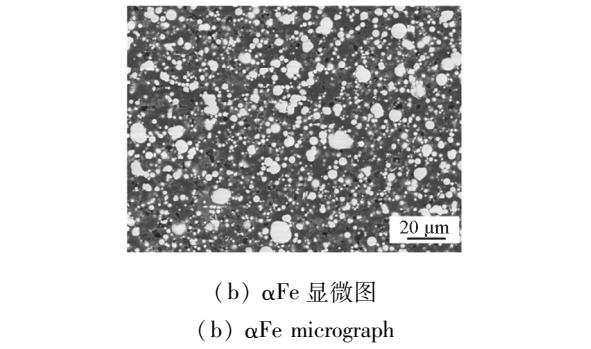
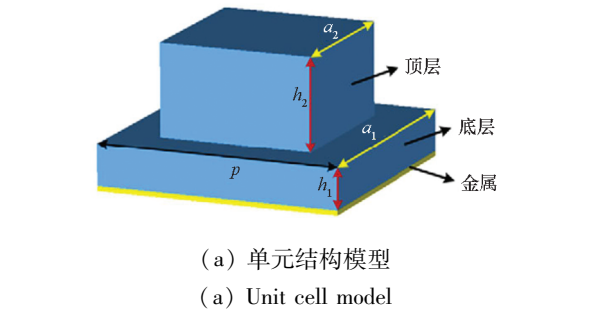
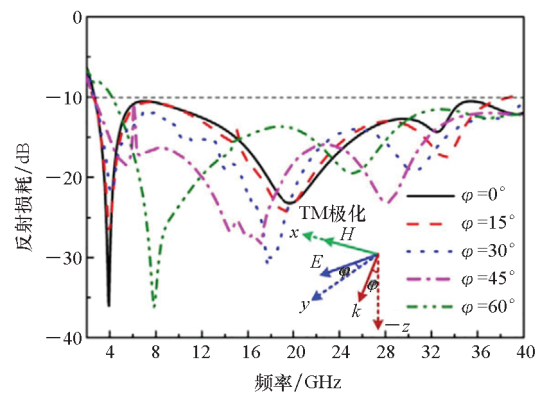


图 13 透明电磁超材料吸波体
Fig. 13 Transparent metamaterial absorber



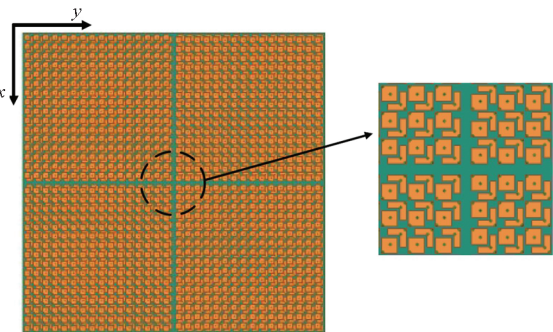


(c) TM 波不同入射角下反射损耗曲线
(c) RL curve of TM wave at different incident angles

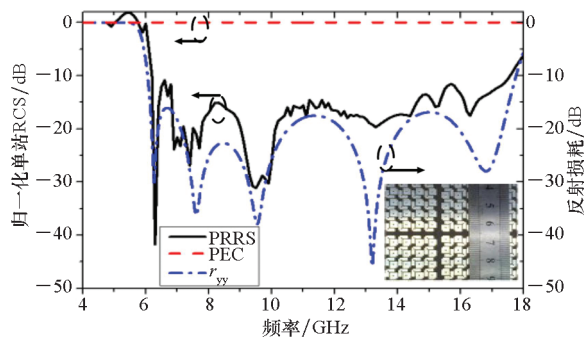
图 14 周期性两层阶梯式雷达吸收结构
Fig. 14 Periodic Stepped Radar Absorbing Structure

Pang 等^[29]提出在玻璃纤维复合材料表面加载少量的碳纤维丝,形成棋盘和随机图案进行了仿真及测试,其减少 RCS 机制为相位抵消而不是吸收,在厚 2.7 mm 时,RCS 低于 -10 dB 频段为 8.7 ~ 19.2 GHz。Jia 等^[67]提出的由超宽带极化旋转反射面形成的棋盘表面,90% 吸收带宽为 11.7 GHz (6.1 ~ 17.8 GHz),如图 15 所示。Jeong 等^[69]提出了一种单元结构由扇形图案及电阻组成的超材料天线罩,如图 16 所示,其表面采用 FR-4 材料进行保护,在厚度仅 5.2 mm 情况下吸收率大于 90% 的频带为 4.6 ~ 12 GHz。Kumar 等^[70]通过使用尼龙纤维和轻木以及 E-玻璃/环氧树脂复合材料,在不影响机械性能的情况下,改善现有隐形天线罩的电磁波传输特性。

岳守晶等^[74]提出了一种基于频率选择表面的小型卫星隐身天线罩及其制备方法,如图 17 所示,天线罩为蜂窝夹层结构,包括内外层 FSS 屏、内外蒙皮及中间层,各层间采用胶膜胶接,其力学性能满足卫星应用。

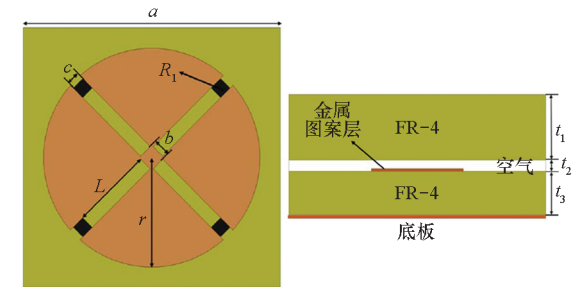


(a) 棋盘结构示意图
(a) Schematic diagram of the checkerboard structure

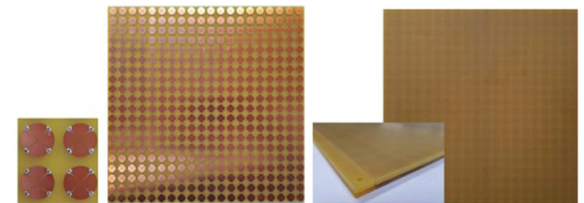


(b) 棋盘结构的单站 RCS 与极化旋转表面的反射率
(b) Monostatic RCS of the checkerboard structure and the RL curve of the polarized rotating surface

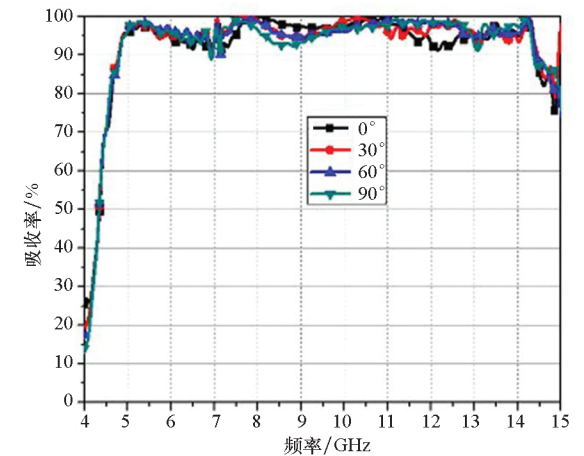
图 15 基于极化旋转表面的棋盘结构
Fig. 15 Checkerboard structure based on the polarized rotating surface



(a) 单元结构示意图
(a) Unit cell model



(b) 实物图
(b) Fabricated sample



(c) 实测吸波率
(c) Measured absorptivity

图 16 超材料天线罩
Fig. 16 Metamaterial radome

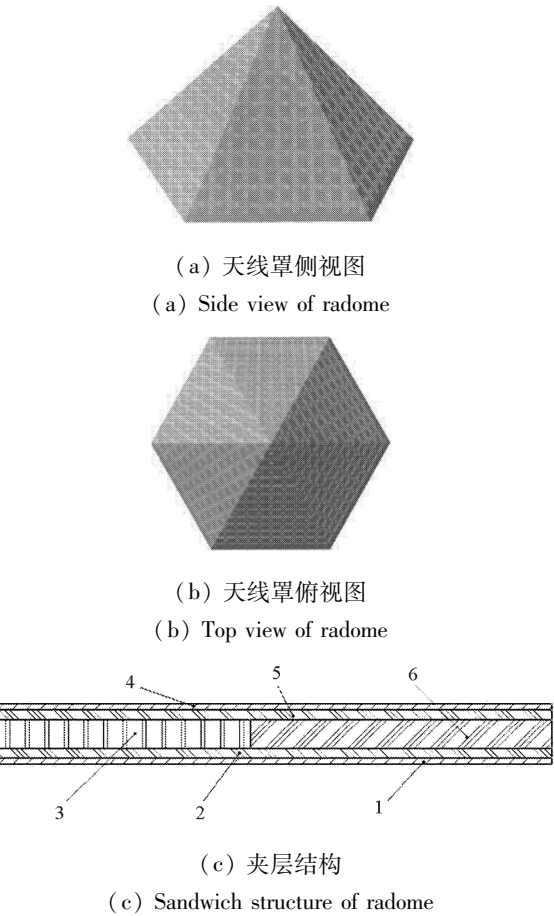


图 17 夹层结构天线罩

Fig. 17 Radome based on sandwich structure

Han 等^[72]提出的可通过 3D 打印实现的水基可调超材料吸波体,通过机械运动控制可实现吸收波段的改变,如图 18 所示。Sun 等^[76]提出了一种基于 FSR 设计的低 RCS 平面反射阵列天线,测量结果表明,所提出的天线设计与常规反射阵列天线的增益相比仅减少了 0.3 dB,而在 4 ~ 12.5 GHz 有 -10 dB RCS 缩减,如图 19 所示。

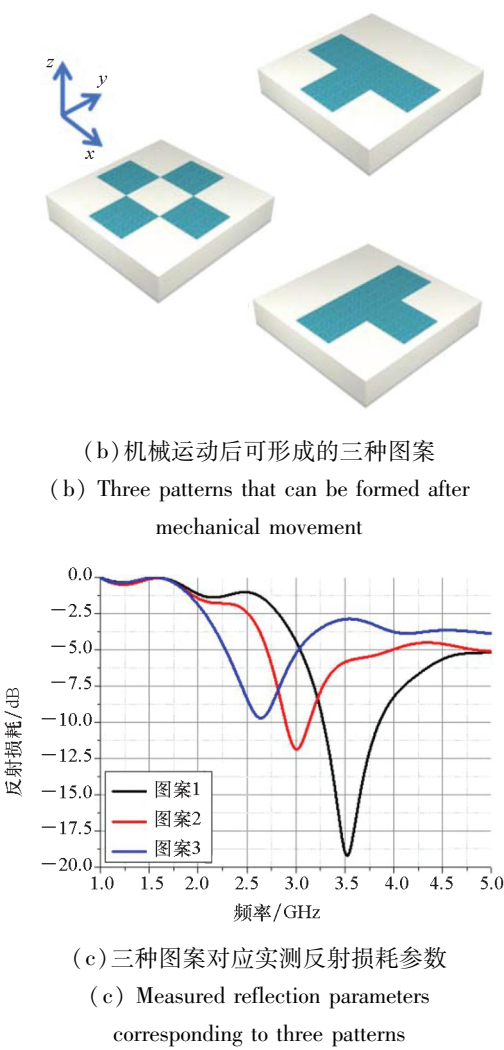
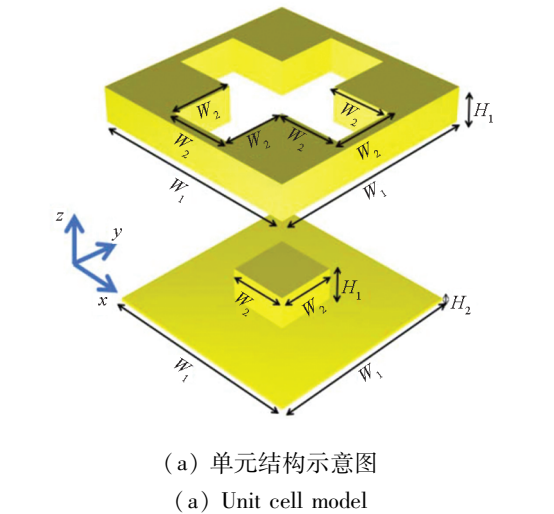
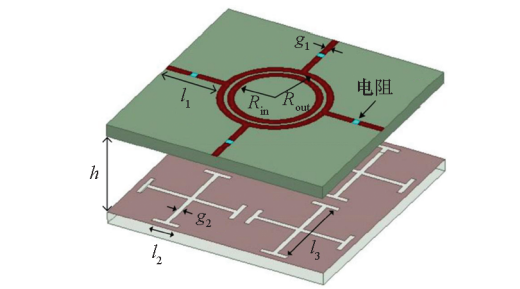


图 18 可调超材料吸波体

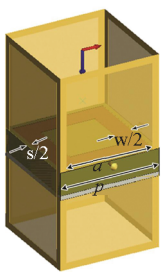
Fig. 18 Tunable metamaterial absorber

超材料在改变介质基板材质后,可实现结构隐身一体化,如礼嵩明等^[77]提出在透波蒙皮中引入超材料结构单元的新型蜂窝夹层结构吸波复合材料,相比于原吸波蜂窝,新型蜂窝夹层结构复合材料在 1 ~ 2 GHz 频率范围内的吸波性能显著提升,同时材料质量大幅降低。陈育秋等^[78]采用芳纶纸蜂窝与 FSS 复合设计,得到兼具质量轻、强度高及吸波带宽宽的蜂窝吸波复合材料,通过开槽等方法优化仿真,设计厚度为 6 mm 的蜂窝夹芯结构吸波材料,如图 20 所示,其 -10 dB 吸收带宽达 14 GHz (4 ~ 18 GHz)。Shen 等^[79]将两层电阻膜嵌入纤维柱阵列增强的泡沫夹层结构中,以实现微波宽带吸收以及良好的机械性能,结果表明,所提出的夹层结构厚度为 9.73 mm,在 2.6 ~ 21 GHz 宽频内 $RL < -10$ dB,增强的机械性能使其适合某些装载应用。

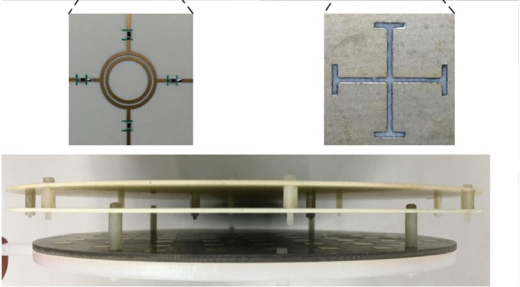
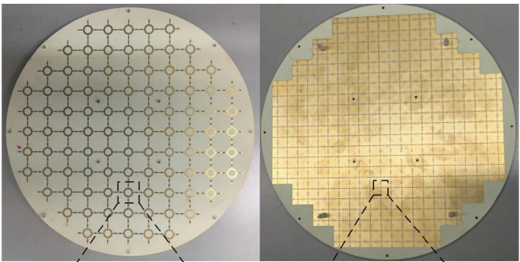
隐身衣作为变换光学应用最具代表性的范例,其通过外层包覆的方式使其内部的物体对外



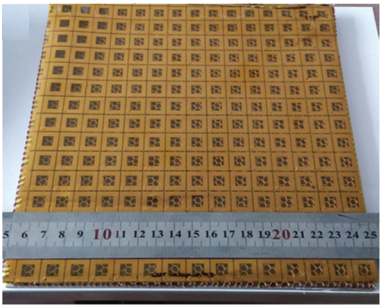
(a) 单元结构示意图
(a) Unit cell model



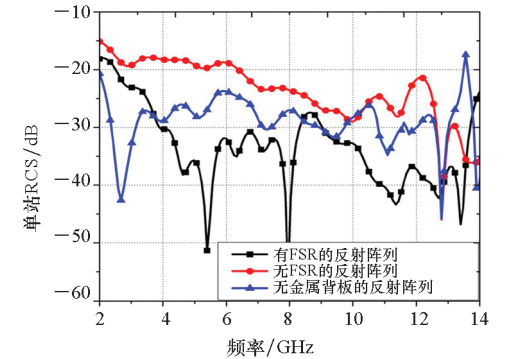
(a) 单元结构示意图
(a) Unit cell model



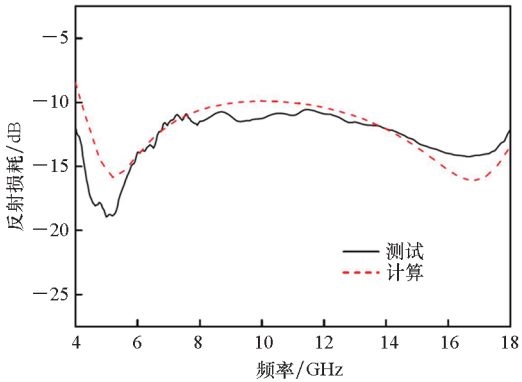
(b) 实物图
(b) Fabricated sample



(b) 实物图
(b) Fabricated sample



(c) 实测单站 RCS 对比
(c) Comparison of measured monostatic RCS



(c) 仿真及实测反射参数
(c) Simulated and measured reflectivity

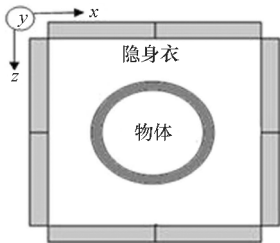
图 19 基于 FSR 设计的低 RCS 平面反射阵列天线
Fig. 19 Low-RCS reflect array antenna based on FSR

部探测器隐身,采用具有特殊电磁响应的超材料实现^[80]。2006 年 Schurig 等^[81]等首先实现了工作于 8.5 GHz 的二维隐身衣,成功隐藏其内部一根圆形铜线。其后,Li 等^[82]采用非均匀介质材料实现了地毯隐身,Liu 等^[83]实现了覆盖 13 ~ 16 GHz 的宽带地毯隐身。Yang 等^[84]提出了一种两层超表面双波段隐身地毯,可在 6.1 GHz 和 10.2 GHz 处实现隐身。Islam 等^[85]提出了一种基

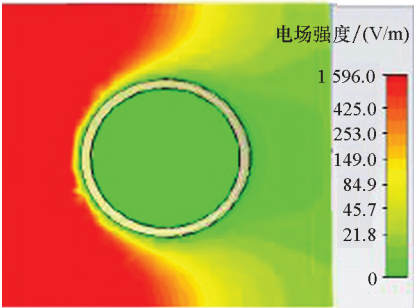
图 20 吸波蜂窝复合材料
Fig. 20 Absorbing honeycomb composite material

于双裂方形超材料的电磁隐身衣。使用提出的超材料单元设计的单层方形隐身衣,如图 21 所示,测试结果表明,在 5.94 ~ 6.95 GHz 的频率范围内,在隐身衣内放置一些大小和形状不同的物体都具有隐身效果。Chu 等^[86]实现了一种混合型隐身衣,通过超表面和双零介质构成的菱形双层隐身壳,成功隐藏其内部的菱形金属,如图 22 所示。

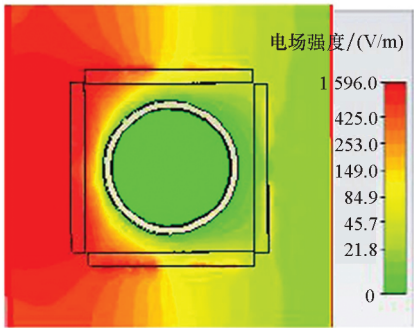
电磁超材料以多种方式及途径实现物体雷达隐身,具有很好的应用前景。对比 1.2 与 1.3 小节可知,超材料吸波体的可设计性更强,在 2 ~ 18 GHz 频带内有效吸波带宽可实现更宽,厚度相对于涂层较厚,密度主要取决于介质板(可考虑轻



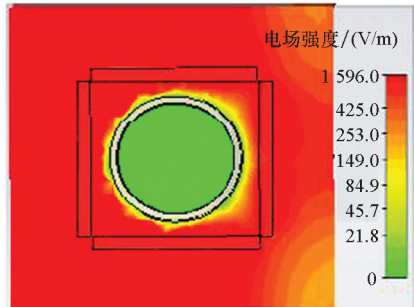
(a) 方形隐身衣内放置圆柱形物体示意
(a) Cylindrical object inside the Square-cloak



(b) 仅物体在隐身频率(6.70 GHz)时
xz 平面的电场分布
(b) Distribution of E-field in the xz-plane for uncloaked
object at cloaked frequency (6.70 GHz)

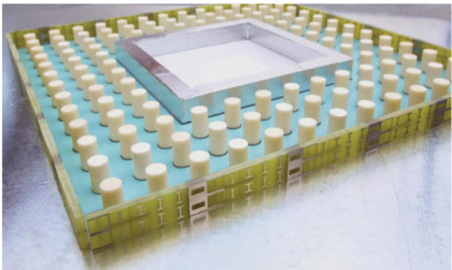


(c) 物体在隐身衣内,在不隐身的频率时
xz 平面的电场分布
(c) Distribution of E - field in the xz-plane for object
inside the cloak shell at uncloaked frequency

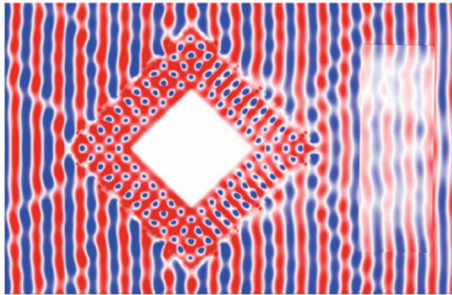


(d) 物体在隐身衣内,在隐身频率(6.70 GHz)时
xz 平面的电场分布
(d) Distribution of E - field in the xz-plane for object inside
the cloak shell at cloaked frequency (6.70 GHz)

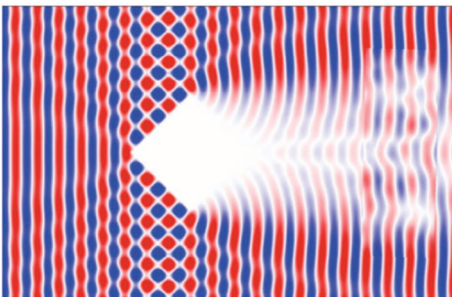
图 21 方形隐身衣对圆柱形物体隐身
Fig. 21 Cylindrical object cloaked by the square-cloak



(a) 制作的菱形隐身壳,中心部分是金属
(a) Picture of the fabricated rhombic cloaking shell and the
central part is a metallic rhombus as the hidden region



(b) 带隐身外壳情况下的电场分布
(b) Electric field distribution for the case with
the cloaking shell



(c) 没有隐身外壳的情况下的电场分布
(c) Electric field distribution for the case without
the cloaking shell

图 22 混合隐身衣
Fig. 22 Hybrid invisibility cloak

轻质材料替换)。此外,电磁超材料相比于吸波纳米材料,其加工工艺简单、成本低(单元结构多为毫米级),在介质板更换后有实现结构隐身一体化的可能性(如加载纸蜂窝等)。

2 红外及可见光隐身手段

2.1 红外隐身

卫星运行在 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的太空中,由于其自身设备的产热以及在光照区及阴影区的周期性的热量吸收与辐射,使得卫星红外特征明显,极易被探测到,需要施加红外隐身手段用以降低卫星红外特征,从而降低红外被探测的概率。

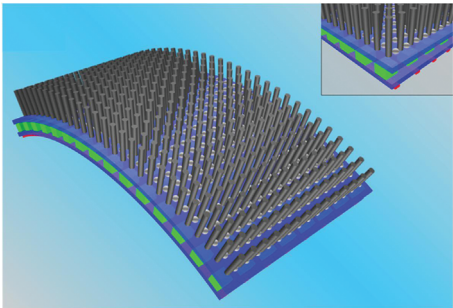
常规红外隐身技术大多针对导弹、飞机、军舰、坦克、装甲车等平台,主要手段包括:①减少自身产热,比如飞机发动机采用新型喷口,使燃油充分燃烧,从而降低红外辐射;②结构隐身,比如把发动机喷口设计成狭长形,使得喷出的热气流很快与高空中的冷空气融为一体,迅速降低了飞机的温度;③选择辐射系数(ϵ_r)低的涂料,以减少导弹因气动加热而引起的热辐射;④红外吸收涂料,涂覆于机身表面以吸收红外辐射能,可降低机体的热辐射;⑤采取屏蔽措施降低辐射透过率,比如军舰采用的烟火型红外遮蔽烟幕和水幕;⑥使目标尽量融入背景,比如飞机腹部的涂层降低与天空背景对比度,背部涂层具有自然背景光谱特性^[87-88]。

红外隐身材料按作用机理一般可分为三类:一是吸收型,可使吸收的能量在涂层内部不断被消耗而不引起明显的温升,从而减少物体的红外辐射;二是转换型,吸收红外能量之后,涂料的红外辐射向其他波段转移,使之处于红外探测系统的工作波段之外;三是反射型,材料具有低红外发射率,对红外波段电磁波具有高反射和低吸收的特性^[89]。

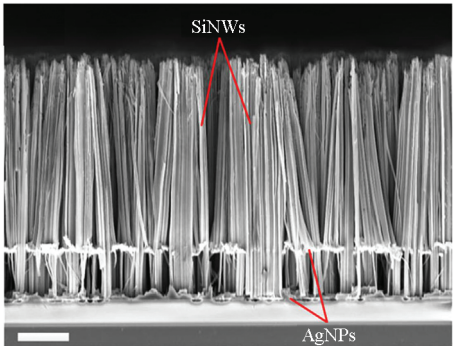
Diao 等^[90]采用嵌段共聚物胶束光刻与金纳米颗粒的化学生长相结合的方法制造的亚波长纳米结构,牛角形的纳米柱在可见光和近红外光波段具有低反射率($<0.02\%$)和高透射率($>99.8\%$)。周亦康^[91]用“掺杂—脱掺杂—再掺杂”的方法制备了樟脑磺酸掺杂的聚苯胺复合材料,结果表明,当掺杂浓度为 2:2 时, $RL < -10$ dB 的带宽达到 8.16 GHz (9.84 ~ 18 GHz),红外辐射大气窗口(3 ~ 5 μm 、8 ~ 14 μm)平均发射率仅为 0.46 和 0.29。Peng 等^[92]提出了基于 Ag/Ge 多层膜的红外隐身选择性发射器,其在大气窗口内具有低发射率($\epsilon_{3-5\mu\text{m}} = 0.18, \epsilon_{8-14\mu\text{m}} = 0.31$),而在大气窗口之外具有高发射率($\epsilon_{5-8\mu\text{m}} = 0.82$)以进行辐射冷却。Moghimi 等^[93]在柔性基板上集成介电纳米线和金属纳米粒子等,形成红外隐身薄板,如图 23 所示,在 2.5 ~ 15.5 μm 宽带内反射率和透射率皆低于 5%。

光子晶体(Photonic Crystal, PC)是由多种具有不同介电常数的介质材料在空间按一定的周期排列所形成的一种人造结构晶体,也属于一种超材料,其光子禁带对入射电磁波具有高反射率,能够有效改变目标的辐射特性^[94]。目前基于光子晶体的红外隐身材料研究发展迅猛,Wang 等^[95]提出了红外一维双异质结构复合光

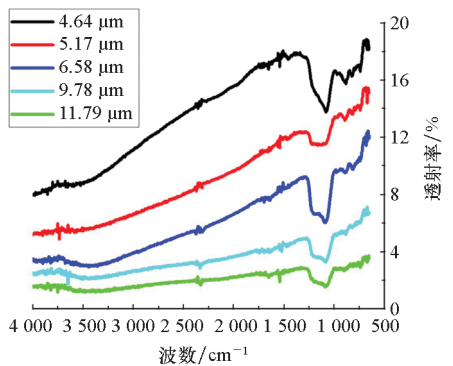
子晶体(Composite Photonic Crystal, CPC),仿真与测试结果表明其在 3 ~ 5 μm 和 8 ~ 14 μm 的波长范围红外发射率低至 0.073 和 0.042。此外,由于其在雷达波段的高透射率,可用于构造红外雷达隐身兼容材料。王航等^[96]研究了可见光、远红外与多种激光兼容隐身 PC 薄膜,8 ~ 14 μm 波段平均发射率为 0.14, 10.6 μm 及 0.93 μm 、1.06 μm 波长处的反射率在 20% 和 10% 以下,大幅降低了激光回波功率,且 PC 薄膜可为黄、绿或蓝色,可用来模拟荒漠、林地或海洋背景。Hu 等^[97]以 ZnSe 和 Te 为介电材料设计的



(a) 隐形薄板示意图
(a) Schematics of a stealth sheet



(b) SiNW 的扫描电子显微镜图
(b) Photograph of SiNW from scanning electron microscope



(c) SiNW 长度对透射光谱的影响
(c) Effect of SiNW length on transmission spectra

图 23 超薄红外隐身板
Fig. 23 Ultrathin infrared stealth sheets

PC,在 $0.4 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 波段的反射曲线类似于绿色植物的反射光谱曲线,同时,在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段发射率为 0.05 。

Tian 等^[98] 基于电阻频率选择表面 (Resistance Frequency Selective Surface, RFSS) 设计的红外吸收体,如图 24 所示,仿真结果表明,在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波长范围内吸收体的吸收率均大于 90% 。Cao 等^[62] 提出了一种基于石墨烯-银的混合超材料结构,结果表明,其在特定红外波长吸收率可达 100% ,且可以通过改变参数灵活地调节吸收峰中心波长。Zhong 等^[63] 提出了一种仅 7 mm 厚的超表面,可以同时减少雷达波反射和红外热辐射,通过两个专门设计的单元结构层 (红外吸收层 (InfraRed Shielding Layer, IRSL) 与双方环) 的微妙组合来实现,如图 25 所示,测量结果表明, 90% 吸收频带为 $3 \sim 8 \text{ GHz}$,红外发射率约为 0.2 。

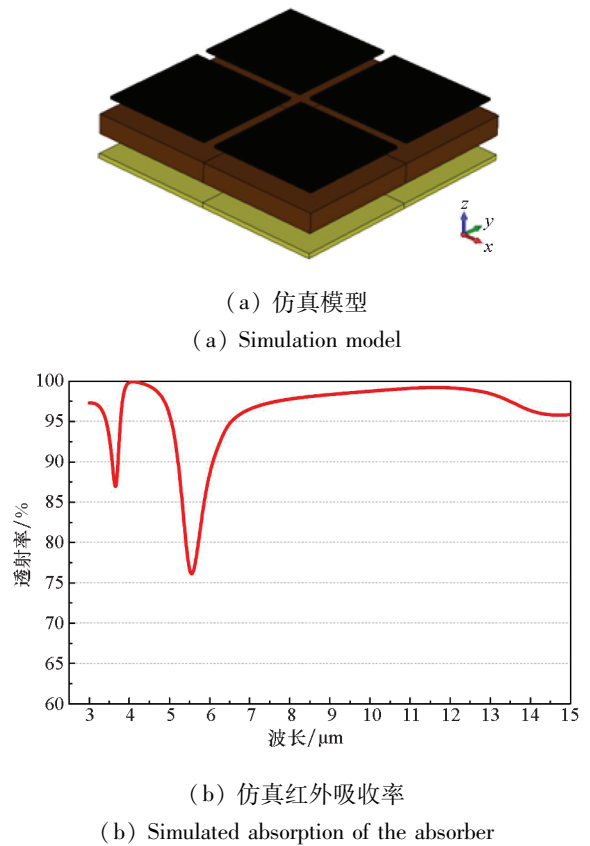


图 24 基于电阻 FSS 的红外吸收体

Fig. 24 Infrared absorber based on resistance FSS

Xu 等^[99] 提出的由金属-电介质-多层截头圆锥体组成的吸收体,在两个大气窗口 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 中具有 0.9 的高反射率,在 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 的非大气窗口中,吸收带较宽。Zhang 等^[100] 提出了一种采用 ITO 膜的柔性透明微波-红外双隐身结构,可以同时实现微波波段高吸收率、红外波段低

发射率及光学透明性,如图 26 所示, 90% 吸收频带为 $7.7 \sim 18 \text{ GHz}$,红外大气窗口热发射率约为 0.23 。

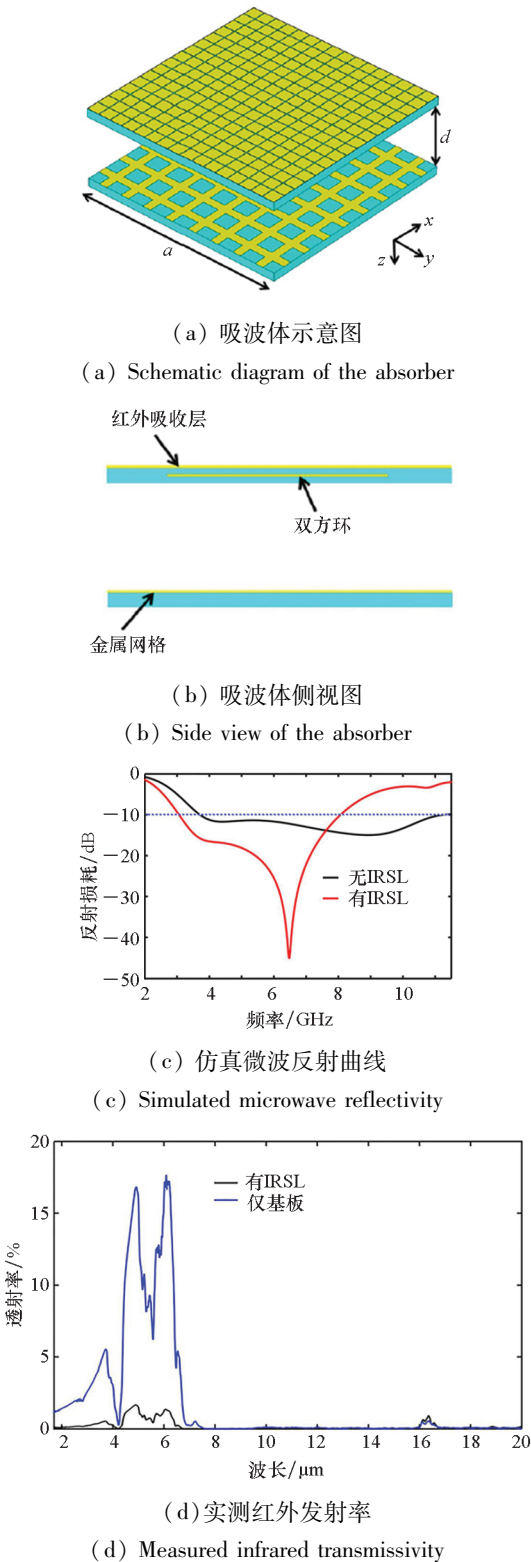
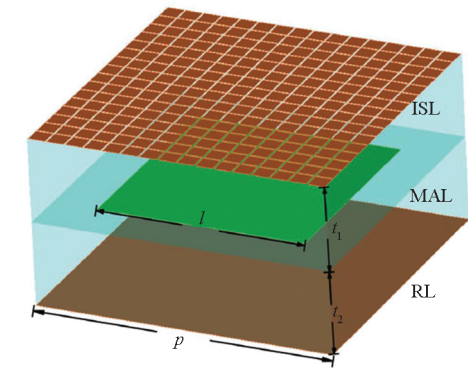


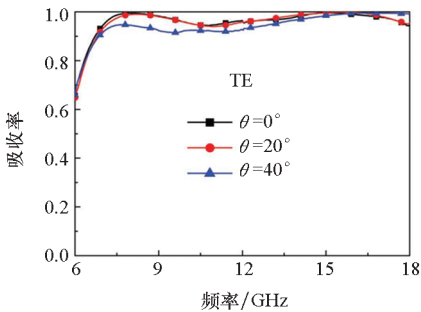
图 25 雷达红外兼容隐身结构

Fig. 25 Radar-infrared bi-stealth structure

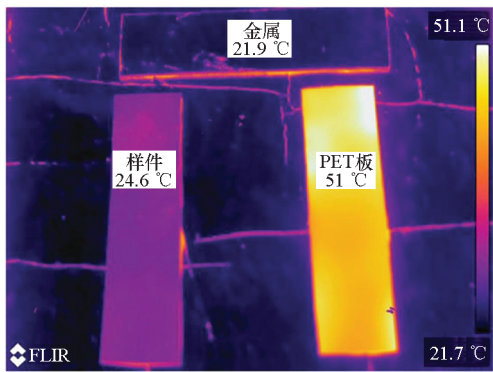
因此,应用在武器平台的红外隐身技术,卫星也可借鉴一些手段,如隐藏变轨发动机或推进器、采用红外吸收材料。此外,红外隐身性能优异的材料种类较多,其中超材料吸波体或光子晶体还



(a) 单元结构
(a) Unit cell model



(b) TE 模式下,不同入射角的吸收率
(b) Measured absorption spectrum of our structure under different incident angles at TE mode



(c)在温度为 60 °C 的加热炉中对设计的结构、金属和 PET 进行热红外成像
(c) Thermal IR images of designed structure, metal, and PET at a heating furnace with temperature of 60 °C

图 26 微波-红外双隐身结构

Fig. 26 Microwave-IR bi-stealth structure

具有雷达或可见光隐身性能,具有更好的应用前景。

2.2 可见光隐身

传统卫星星体包裹多层隔热组件,其表面层为金色或银色二次反光镜,可见光反光极强。因此,卫星总体的光学特性十分明显,极易被光学望远镜探测。卫星热控系统中不可或缺的多层隔热

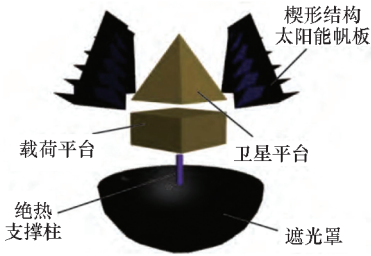
组件,让卫星的可见光隐身成为一个难以解决的问题。

与雷达隐身技术相比,可见光隐身也有相似的隐身手段:①构型隐身,减小光学横截面积 (Optical Cross Section, OCS),降低被探测的概率;②材料隐身,涂覆光学吸收涂料或安装加载光学吸收材料。

朱冬骏等^[101]提出了一种光学隐身卫星构型,如图 27 所示,分别对卫星平台构型、太阳能帆板、半球形遮光罩进行设计及整星 OCS 仿真分析,结果表明该卫星构型 OCS 峰值仅 0.082 m²。



(a) 卫星整体结构图
(a) Satellite overall structure diagram

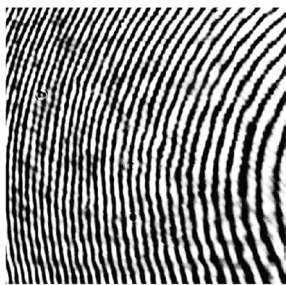


(b) 卫星布局示意
(b) Schematic of satellite layout

图 27 光学隐身卫星

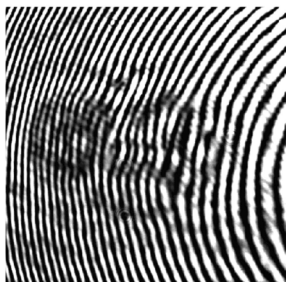
Fig. 27 Optical stealth satellite

Wang 等^[102]采用氧化石墨烯 (graphene oxide) 对铝颜料进行改性,可用于低辐射织物涂层,与未改性铝颜料织物涂层相比,其亮度降低了 49%,可见光反射率降低了 23%,光泽度降低了 58%,而红外发射率在 8 ~ 14 μm 波段仅增加了 0.12。Qi 等^[103]提出了一种顶层覆盖聚四氟乙烯 (Poly Tetra FluoroEthylene, PTFE) 的多层复合结构 PTFE / Hs / (Ge/ZnS)³,由于 PTFE 保护层的高粗糙度和界面反射,可使光泽度从 200 Gs 下降至 74.2 Gs。此外,在 8 ~ 14 μm 平均发射率为 0.196,在 2 ~ 18 GHz 微波范围内具有 96.45% 的传输率。Ding 等^[104]提出了一种无须光刻的宽带超薄可见光吸收体,由多层电介质和金属膜组成,可见波长范围吸收率均大于 90%。Zhu 等^[105]通



(c) 披风打开时的干涉图像

(c) Respective interference images when the cloak is on



(d) 披风关闭时的干涉图像

(d) Respective interference images when the cloak is off

图30 光学超表面隐身衣

Fig. 30 Optical metasurface skin cloak

综上所述,已提出的光学隐身卫星构型仍有需突破的难点,如不能搭载多样化载荷、对卫星其他分系统影响较大、通用性不足等。光学隐身材料中,碳气凝胶及多频谱兼容吸收超材料有较好的应用前景。

3 隐身卫星存在的问题及建议

3.1 隐身卫星存在的问题

根据雷达隐身技术、红外及可见光隐身技术现状分析,各类隐身技术在卫星上应用存在以下问题或要求:

1) 现有隐身卫星外形设计与卫星其他分系统兼容性较差,或难兼顾多频谱隐身。

2) 当前隐身材料难以满足应用于卫星上所具备的适应太空环境、寿命长、厚度薄、密度小、力学性能优异等条件。

3) 涂覆型和结构型隐身材料与卫星其他分系统的兼容问题。卫星表面一般包裹有热控多层隔热组件,会直接反射电磁波,按热控系统常规设置,多层隔热组件安装于承力结构外部,此时结构型吸波材料将失去吸波作用,因此,结构型吸波材料的实施方式及位置需与热控系统协调,而涂覆型吸波材料可涂覆在热控多层组件表面。此外,雷达隐身材料与卫星通信系统存在吸收电磁波与

辐射电磁波的矛盾。

4) 红外或可见光隐身技术与其他隐身技术及卫星分系统的兼容问题。红外隐身材料红外发射率低,可见光隐身材料多为黑色且可见光吸收率高,都需与卫星热控系统协调。卫星上太阳能电池片多为三结砷化镓半导体材料,其吸光能力强,导致太阳能帆板温度高,红外特征明显,且由于电池片表面加载的玻璃片,在特定角度存在可见光镜面反射。因此,应综合考虑红外、可见光隐身性能与太阳能帆板的工作效率。

5) 隐身衣或隐身地毯需将其结构或薄膜包裹于物体表面,对于卫星而言,通信天线、太阳能电池阵、展开机构及相机等载荷的存在,使得包裹措施难以实施,且无论是微波或是可见光波段,隐身频段都较窄,因此,隐身衣的工程应用还需技术突破。

3.2 隐身卫星应用建议

结合各类隐身技术及卫星总体技术,对于隐身卫星提出以下建议:

1) 对于卫星隐身技术总体,卫星构型采用隐身外形设计,卫星表面安装或涂覆各类隐身材料,实现微波、红外及可见光综合隐身,隐身构型及各类隐身材料的采用都需兼顾卫星其他分系统。

2) 对于外形隐身技术,在保证卫星总体技术要求的前提下,通过合理的构型布局与构型设计来实现隐身效果,采用多棱面和融合外形技术,避免出现较大平面与凸状的弯曲面、尖点、边缘、棱角、缺口和垂直交叉的接面。太阳能电池片布局时减少片间缝隙。同时,在隐身构型设计过程中,需考虑运载火箭提到的卫星许用包络约束以及外形设计对卫星实际功能的影响,如卫星内部的有效容积、表面太阳能电池片的有效利用面积、卫星热控等因素。

3) 对于吸波材料的应用,涂覆型吸波材料可直接涂覆于卫星表面包裹的多层隔热组件上;结构型吸波材料可作为卫星承力结构或安装于承力结构外,多层隔热组件安装于结构型吸波材料内表面。

4) 对于电磁超材料的应用,电磁超材料可以多种方式实现隐身:①分别采用超材料微波吸收体、红外吸收体、可见光吸收体实现卫星雷达、红外、可见光隐身,电池阵表面采用专门设计的光学透明吸波体;②采用极化转换器,将入射电磁波由一种极化状态转换为与其正交的极化状态,可避免被雷达探测;③采用可调谐超材料吸波体,实现吸波特性和在不同环境、条件下具备适应性及可调

性,改变卫星 RCS 特性,扰乱敌方雷达探测;④采用 FSS 或 FSR,应用于天线罩,天线工作频段透波,其余波段吸波;⑤采用多频谱兼容吸收体,实现微波、红外或可见光多频谱吸收。因此,可按需采用各类电磁超材料,集成于卫星隐身系统。

5)对于红外隐身技术,卫星仪器设备安装于星体内部,统一导热至散热面,星体采用热控措施使得热导通,避免局部热量过高,通过卫星布局或采取姿态调整使得散热面避免被探测;太阳能帆板吸收的热量及时导出,避免温度急剧上升;采用红外隐身材料,降低卫星红外辐射。

6)对于可见光隐身技术,通过卫星布局或采取姿态调整使得可见光强反射面避免被探测;采用可见光隐身材料,降低可见光散射截面。

4 卫星隐身技术展望

4.1 提高集成化水平

卫星总体必须不断提高卫星隐身系统的集成化水平,以满足隐身卫星的高隐身性能要求,特别是加强各频谱隐身材料的集成技术研究。此外,隐身外形与卫星构型的一体化设计、雷达隐身材料与通信天线的电磁兼容设计、隐身材料与热控系统的热整合设计等,都是卫星总体应考虑到的分系统间需协调的问题。

4.2 加强关键技术研发攻关

关键技术突破是隐身技术进步的关键点,结合卫星隐身实际,需要从以下几个方面加强研发投入。

1)隐身结构一体化。已有结构型隐身材料吸波性能大多较强,应用于卫星隐身,需力学性能满足运载火箭要求,因此,在满足吸波性能强的同时,结构型隐身材料需往厚度薄、密度小、力学性能强的设计发展。

2)材料适应空间环境。对于雷达吸波材料、红外或可见光吸收材料,除了吸波性能强、密度小、厚度薄等传统发展方向,还需具备太空环境适应性。

3)多频谱兼容隐身。现有的隐身材料大多是雷达、红外、可见光中单频谱隐身,多频谱兼容隐身材料是重要研究方向,如同时实现红外和可见光吸收的材料,可节省空间、减少材料兼容性测试及涂覆步骤等。

4)卫星构型隐身。在卫星总体指导下,在目前卫星小型化、高功能密度等发展趋势下,卫星构型往隐身外形设计发展。

4.3 落地工程应用

多数隐身卫星构型和隐身材料停留在理论阶段或难以实现低成本批量生产。因此,隐身构型的设计应由卫星总体指导开展,尽快实现工程应用;隐身材料设计在追求性能指标的同时,需考虑加工成本及应用环境,尽快应用于卫星。

4.4 建立标准规范

标准规范是隐身技术的制高点,在隐身技术迅速发展之时,卫星隐身技术的相关标准规范应提前谋划,比如各频谱隐身性能指标、卫星隐身构型设计规范及标准、隐身材料的隐身、力学、热学性能要求等需尽快提出。

5 结论

卫星是空间攻防系统的重要组成部分,具有隐身功能的卫星可增强对敌方探测和监视系统的抵御能力。目前国内外卫星隐身技术发展虽已开展多年,但发展不如隐身战斗机等武器平台,目前没有公开报道正在轨运行的隐身卫星。在地面装甲车辆、舰船、飞机等平台上应用的先进雷达、红外及可见光隐身技术,对于卫星隐身技术具有一定的借鉴意义。由于卫星所处的空间环境及其自身复杂的技术,卫星隐身技术将是极具特点的,涉及多学科交叉的前沿技术,在研究过程中应从卫星应用需求出发,将隐身材料技术、隐身外形技术与卫星总体技术相结合,加强总体方案论证,注重可实现性,突破关键技术,推进卫星隐身技术的发展。

参考文献(References)

[1] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
SANG Jianhua. Low-observable technologies of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)

[2] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术: 原理及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
HOU Zengqi, HU Jingang. Spacecraft thermal control technology: principle and application[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2007. (in Chinese)

[3] ELDRIDGE M T, MCKECHNIE K H, HEFLEY R M. Satellite signature suppression shield: US5345238 [P]. 1994-09-06.

[4] 陈卫东, 周建江, 秦元田, 等. 一种基于在轨雷达全波段隐身卫星: CN105775165A[P]. 2016-03-08.
CHEN Weidong, ZHOU Jianjiang, QIN Yuan Tian, et al. Full-wave band hiding satellite based on on-orbit radar: CN105775165A[P]. 2016-03-08. (in Chinese)

[5] 秦远田, 杨宇晓, 康国华, 等. 一种卫星的构型设计: CN107451316A[P]. 2017-04-01.
QIN Yuan Tian, YANG Yuxiao, KANG Guohua, et al. A

- satellite configuration design: CN107451316A [P]. 2017 - 04 - 01. (in Chinese)
- [6] 祁亚利, 殷鹏飞, 张利民, 等. 铁氧体吸波复合材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(3): 9 - 14.
QI Yali, YIN Pengfei, ZHANG Limin, et al. Research advances of ferrite composites on microwave absorption[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(3): 9 - 14. (in Chinese)
 - [7] ZHANG W D, ZHANG X, QIAO Y L, et al. Covalently bonded GNPs-NH-PANI nanorod arrays modified by Fe_3O_4 nanoparticles as high-performance electromagnetic wave absorption materials [J]. Materials Letters, 2018, 216: 101 - 105.
 - [8] ALI N N, AL-QASSAR BANI AL-MARJEH R, ATASSI Y, et al. Design of lightweight broadband microwave absorbers in the X-band based on (polyaniline/MnNiZn ferrite) nanocomposites [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 453: 53 - 61.
 - [9] WEI S N, LI R Z, CHEN L, et al. Research of fiber radar absorbing materials [J]. Advanced Materials Research, 2012, 602/603/604: 835 - 838.
 - [10] GUO Z, HUANG H, XIE D, et al. Microwave properties of the single-layer periodic structure composites composed of ethylene-vinyl acetate and polycrystalline iron fibers [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 11331.
 - [11] ZHANG L, NIE Y, XU P Y, et al. Study of polycrystalline iron fibers/ Barium titanate nanocomposite absorbing materials[J]. Key Engineering Materials, 2003, 249: 373 - 376.
 - [12] HE Y F, GONG R Z, CAO H, et al. Preparation and microwave absorption properties of metal magnetic micropowder-coated honeycomb sandwich structures [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(5): 1501 - 1505.
 - [13] GREEN M, LIU Z Q, XIANG P, et al. Doped, conductive SiO_2 nanoparticles for large microwave absorption[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 87.
 - [14] 郑鹏轩, 张婕妤, 马勇, 等. 聚苯胺和聚吡咯导电高分子吸波材料进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2019, 17(3): 36 - 40.
ZHENG Pengxuan, ZHANG Jieyu, MA Yong, et al. Progress of polyaniline and polypyrrole conductive polymer-based wave absorbing materials [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2019, 17(3): 36 - 40. (in Chinese)
 - [15] HAI L D, QUI V D, TUNG N H, et al. Conductive polymer for ultra-broadband, wide-angle, and polarization-insensitive metamaterial perfect absorber [J]. Optics Express, 2018, 26(25): 33253 - 33262.
 - [16] ZHENG T L, WANG Y H, ZHENG K Y, et al. Electromagnetism and absorptivity of the modified micro-coiled chiral carbon fibers [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(6): 559 - 563.
 - [17] JIA X L, WANG X O, MENG Q X, et al. Tunable multi-band chiral metamaterials based on double-layered asymmetric split ring resonators [J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2016, 81: 37 - 43.
 - [18] JING L Q, WANG Z J, YANG Y H, et al. Chiral metamaterials for broadband spin-selective absorption [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(23): 231103.
 - [19] SUN G C, YAO K L, LIAO H X, et al. Microwave absorption characteristics of chiral materials with Fe_3O_4 - polyaniline composite matrix [J]. International Journal of Electronics, 2000, 87(6): 735 - 740.
 - [20] LIANGX H, LIU W, CHENG Y, et al. Review: recent process in the design of carbon-based nanostructures with optimized electromagnetic properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 887 - 899.
 - [21] CHEN D Z, WANG G S, HE S, et al. Controllable fabrication of mono-dispersed RGO-hematite nanocomposites and their enhanced wave absorption properties[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1(19): 5996.
 - [22] PAN G H, ZHU J, MA S L, et al. Enhancing the electromagnetic performance of CO through the phase-controlled synthesis of hexagonal and cubic CO nanocrystals grown on graphene[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(23): 12716 - 12724.
 - [23] 安锐, 韦红余, 何敏, 等. 碳基复合吸波材料研究进展分析[J]. 材料导报, 2017, 31(21): 46 - 53.
AN Rui, WEI Hongyu, HE Min, et al. The progress analysis of carbon-based composites used for electromagnetic wave absorption[J]. Materials Review, 2017, 31(21): 46 - 53. (in Chinese)
 - [24] LUO H, CHEN F, WANG F, et al. Preparation and microwave absorption properties of honeycomb core structures coated with composite absorber[J]. AIP Advances, 2018, 8(5): 056635.
 - [25] QING Y C, NAN H Y, MA L Y, et al. Double-layer structure combined with FSS design for the improvement of microwave absorption of BaTiO_3 particles and graphene nanoplatelets filled epoxy coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 739: 47 - 51.
 - [26] KIM S Y, KIM S S. Design of radar absorbing structures utilizing carbon-based polymer composites[J]. Polymers and Polymer Composites, 2018, 26(1): 105 - 110.
 - [27] BAN G D, LIU Z H, YE S T, et al. Microwave absorption properties of carbon fiber radar absorbing coatings prepared by water-based technologies[J]. RSC Advances, 2017, 7(43): 26658 - 26664.
 - [28] LIU L, HE P G, ZHOU K C, et al. Microwave absorption properties of carbon fibers with carbon coils of different morphologies (double microcoils and single nanocoils) grown on them[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(12): 4379 - 4386.
 - [29] PANG Y Q, LI Y F, WANG J F, et al. Carbon fiber assisted glass fabric composite materials for broadband radar cross section reduction [J]. Composites Science and Technology, 2018, 158: 19 - 25.
 - [30] LEE S E, LEE W J, OH K S, et al. Broadband all fiber-reinforced composite radar absorbing structure integrated by inductive frequency selective carbon fiber fabric and carbon-nanotube-loaded glass fabrics [J]. Carbon, 2016, 107: 564 - 572.
 - [31] MUNIR A. Microwave radar absorbing properties of multiwalled carbon nanotubes polymer composites: a review[J]. Advances in Polymer Technology, 2017, 36(3): 362 - 370.
 - [32] XU Y G, YUAN L M, CAI J, et al. Smart absorbing property of composites with MWCNTs and carbonyl iron as the filler[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013, 343: 239 - 244.
 - [33] HUANG L, LIU X, CHUAI D, et al. Flaky FeSiAl alloy-

- carbon nanotube composite with tunable electromagnetic properties for microwave absorption[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35377.
- [34] JAFARIAN M, AFGHAHI S S S, ATASSI Y, et al. Enhanced microwave absorption characteristics of nanocomposite based on hollow carbonyl iron microspheres and polyaniline decorated with MWCNTs [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, 462: 153–159.
- [35] DE MICHELI D, PASTORE R, GRADONI G, et al. Reduction of satellite electromagnetic scattering by carbon nanostructured multilayers[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 88: 61–73.
- [36] 郭雪松, 陈乐, 孙惠敏, 等. 异形蜂窝吸波材料的设计与研制[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(12): 67–71.
GUO Xuesong, CHEN Le, SUN Huimin, et al. Design and development of irregular hexagonal honeycomb absorbing materials [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018(12): 67–71. (in Chinese)
- [37] 孙鹏程, 王良模, 王陶, 等. 双层吸波蜂窝复合材料结构优化设计[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(4): 58–64.
SUN Pengcheng, WANG Liangmo, WANG Tao, et al. Structural optimization of the design of a double-layer absorbing honeycomb composite [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 46(4): 58–64. (in Chinese)
- [38] 礼嵩明, 吴思保, 阮伟, 等. 宽频蜂窝夹层结构吸波复合材料设计方法研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(7): 92–97.
LI Songming, WU Sibao, YUAN Wei, et al. Study on design method of wide-band wave-absorbing honeycomb sandwich composites [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2019(7): 92–97. (in Chinese)
- [39] ZHAO Y C, REN F, HE L, et al. Design of graded honeycomb radar absorbing structure with wide-band and wide-angle properties[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2019, 11(2): 143–150.
- [40] 赵东林, 周万城. 结构吸波材料及其结构型式设计[J]. *兵器材料科学与工程*, 1997, 20(6): 53–57.
ZHAO Donglin, ZHOU Wancheng. Structural radar absorbing materials and their structural model design [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1997, 20(6): 53–57. (in Chinese)
- [41] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4): 509–514.
- [42] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(25): 4773–4776.
- [43] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075–2084.
- [44] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77–79.
- [45] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [46] LIU R, JI C, MOCK J J, et al. Broadband ground-plane cloak [J]. *Science*, 2009, 323(5912): 366–369.
- [47] LI W W, JIN H, ZENG Z H, et al. Flexible and easy-to-tune broadband electromagnetic wave absorber based on carbon resistive film sandwiched by silicon rubber/multi-walled carbon nanotube composites [J]. *Carbon*, 2017, 121: 544–551.
- [48] TAYDE Y, SAIKIA M, SRIVASTAVA K V, et al. Polarization-insensitive broadband multilayered absorber using screen printed patterns of resistive ink [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(12): 2489–2493.
- [49] HARSH S, SAPTARSHI G, GAGANPREET S, et al. Transparent broadband metamaterial absorber based on resistive films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(10): 105105–1–105105–7.
- [50] SHEN Y, ZHANG J Q, PANG Y Q, et al. Transparent broadband metamaterial absorber enhanced by water-substrate incorporation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15665–15674.
- [51] ZHANG C, CHENG Q, YANG J, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(14): 143511.
- [52] KIM Y J, HWANG J S, KHUYEN B X, et al. Flexible ultrathin metamaterial absorber for wide frequency band, based on conductive fibers [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2018, 19(1): 711–717.
- [53] LI W H, YANG S, ZHANG J Q, et al. The RCS reduction of microstrip antenna design based on multi-band metamaterial absorber [C]// *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, 2015.
- [54] ZUO W Q, YANG Y, HE X X, et al. An ultrawideband miniaturized metamaterial absorber in the ultrahigh-frequency range [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 928–931.
- [55] JEONG H, NGUYEN T T, LIM S. Subwavelength metamaterial unit cell for low-frequency electromagnetic absorber applications [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16774.
- [56] ZHOU Q, YIN X W, YE F, et al. A novel two-layer periodic stepped structure for effective broadband radar electromagnetic absorption [J]. *Materials & Design*, 2017, 123: 46–53.
- [57] RANA A S, MEHMOOD M Q, JEONG H, et al. Tungsten-based ultrathin absorber for visible regime [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2443.
- [58] XU F F, MA L, GAN M Y, et al. Preparation and characterization of chiral polyaniline/Barium hexaferrite composite with enhanced microwave absorbing properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 593: 24–29.
- [59] YILDIRIM D U, GHOBADI A, OZBAY E. Publisher correction: near-absolute polarization insensitivity in graphene based ultra-narrowband perfect visible light absorber [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17647.
- [60] AALIZADEH M, KHAVASI A, BUTUN B, et al. Large-area, cost-effective, ultra-broadband perfect absorber utilizing manganese in metal-insulator-metal structure [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 9162.

- [61] ZHANG N, JI Z, CHENEY A R, et al. Ultra-broadband enhancement of nonlinear optical processes from randomly patterned super absorbing metasurfaces [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 4346.
- [62] CAO S, WANG T S, SUN Q, et al. Graphene-silver hybrid metamaterial for tunable and high absorption at mid-infrared waveband[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(5): 475–478.
- [63] ZHONG S M, JIANG W, XU P P, et al. A radar-infrared bi-stealth structure based on metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(6): 063502.
- [64] LEE D, HAN S Y, JEONG Y, et al. Polarization-sensitive tunable absorber in visible and near-infrared regimes [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12393.
- [65] HUANG H, XIA H, XIE W, et al. Design of broadband graphene-metamaterial absorbers for permittivity sensing at mid-infrared regions [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4183.
- [66] YU X Y, GAO X, QIAO W, et al. Broadband tunable polarization converter realized by graphene-based metamaterial[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(21): 2399–2402.
- [67] JIA Y T, LIU Y, GUO Y J, et al. A dual-patch polarization rotation reflective surface and its application to ultra-wideband RCS reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(6): 3291–3295.
- [68] ZHAO J C, CHENG Y Z. A high-efficiency and broadband reflective 90° linear polarization rotator based on anisotropic metamaterial[J]. Applied Physics B, 2016, 122(10): 1–7.
- [69] JEONG H, NGUYEN T T, LIM S. Meta-dome for broadband radar absorbing structure [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 17893.
- [70] KUMAR T A, INAYATHULLAH J, NAGARAJAN V A, et al. Development of hybrid composite radar wave absorbing structure for stealth applications [J]. Bulletin of Materials Science, 2016, 39(1): 279–284.
- [71] DENG G S, XIA T, JING S C, et al. A tunable metamaterial absorber based on liquid crystal intended for F frequency band[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2062–2065.
- [72] HAN Z X, ZHAO J M, FENG Y J. A tunable water-based metamaterial microwa absorber [C]// Proceedings of Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). IEEE, 2017.
- [73] LING K Y, YOO M, LIM S. Frequency tunable metamaterial absorber using hygroscopicity of nature cork [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1598–1601.
- [74] 岳守晶, 刘晓春, 陈卫东, 等. 基于频率选择表面的小型卫星隐身天线罩及其制备方法: CN107221749A [P]. 2017–09–29.
YUE Shoujing, LIU Xiaochun, CHEN Weidong, et al. Frequency selective surface-based miniature satellite invisible antenna cover and fabrication method thereof: CN107221749A [P]. 2017–09–29. (in Chinese)
- [75] CHEN Q, SANG D, GUO M, et al. Frequency-selective rasorber with interabsorption band transparent window and interdigital resonator[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(8): 4105–4114.
- [76] SUN Z S, CHEN Q, GUO M, et al. Low-RCS reflect array antenna based on frequency selective rasorber [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(4): 693–697.
- [77] 礼嵩明, 吴思保, 王甲富, 等. 含超材料的新型蜂窝夹层结构吸波复合材料[J]. 航空材料学报, 2019, 39(3): 94–99.
LI Songming, WU Sibao, WANG Jiafu, et al. Novel honeycomb sandwich structure absorbing composite material containing metamaterials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(3): 94–99. (in Chinese)
- [78] 陈育秋, 祖亚培, 宫骏, 等. 有耗频率选择表面蜂窝吸波复合材料的电磁性能[J]. 材料研究学报, 2018, 32(8): 567–574.
CHEN Yuqiu, ZU Yapei, GONG Jun, et al. Electromagnetic property of honeycomb absorbing composites with lossy frequency selective surface[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2018, 32(8): 567–574. (in Chinese)
- [79] SHEN L H, PANG Y Q, YAN L L, et al. Broadband radar absorbing sandwich structures with enhanced mechanical properties[J]. Results in Physics, 2018, 11: 253–258.
- [80] 张永亮, 董贤子, 段宣明, 等. 变换光学的物理原理和前沿进展[J]. 量子电子学报, 2014, 31(4): 385–393.
ZHANG Yongliang, DONG Xianzi, DUAN Xuanming, et al. Fundamental and frontiers of transformation optics [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2014, 31(4): 385–393. (in Chinese)
- [81] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801): 977–980.
- [82] LI J, PENDRY J B. Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20): 203901.
- [83] LIU R, JI C, MOCK J J, et al. Broadband ground-plane cloak[J]. Science, 2009, 323(5912): 366–369.
- [84] YANG J N, HUANG C, WU X Y, et al. Dual-wavelength carpet cloak using ultrathin metasurface [J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(14): 1800073.
- [85] ISLAM S S, FARUQUE M R, ISLAM M T. An object-independent ENZ metamaterial-based wideband electromagnetic cloak [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33624.
- [86] CHU H C, LI Q, LIU B B, et al. A hybrid invisibility cloak based on integration of transparent metasurfaces and zero-index materials[J]. Light, Science & Applications, 2018, 7: 50.
- [87] 蒋耀庭, 潘丽娜. 红外物理与红外隐身技术[J]. 激光与红外, 2000, 30(4): 232–233.
JIANG Yaoting, PAN Lina. Infrared physics and infrared stealth technology [J]. Laser & Infrared, 2000, 30(4): 232–233. (in Chinese)
- [88] 谭显裕. 飞行器红外隐身的技术途径[J]. 红外与激光工程, 1997, 26(3): 62–63.
TAN Xianyu. Technical approach to infrared stealth of aircraft[J]. Infrared and Laser Engineering, 1997, 26(3): 62–63. (in Chinese)
- [89] 沐磊, 王丽熙, 黄芸, 等. 红外隐身涂料的研究与发展趋势[J]. 材料导报, 2007, 21(1): 122–125.
MU Lei, WANG Lixi, HUANG Yun, et al. Research and development tendency of infrared stealthy coatings [J].

Materials Review, 2007, 21(1): 122 – 125. (in Chinese)

[90] DIAO Z, KRAUS M, BRUNNER R, et al. Nanostructured stealth surfaces for visible and near-infrared light [J]. Nano Letters, 2016, 16(10): 6610 – 6616.

[91] 周亦康. 聚苯胺、聚吡咯及其复合物的红外辐射及微波性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.

ZHOU Yikang. Investigation on infrared radiation and microwave properties of polyaniline, polypyrrole and their composites[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

[92] PENG L, LIU D Q, CHENG H F, et al. A multilayer film based selective thermal emitter for infrared stealth technology[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(23): 1801006.

[93] MOGHIMI M J, LIN G Y, JIANG H R. Broadband and ultrathin infrared stealth sheets [J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(11): 1800038.

[94] 卢仪, 卜小海, 李栋先, 等. 基于光子晶体的红外隐身材料研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 080003.

LU Yi, BU Xiaohai, LI Dongxian, et al. Research progress of infrared stealth materials based on photonic crystals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080003. (in Chinese)

[95] WANG Z X, CHENG Y Z, NIE Y, et al. Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(5): 054905.

[96] 王航, 赵大鹏, 刘瑞煌, 等. 可见光、远红外与多种激光兼容的隐身光子晶体[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 214 – 219.

WANG Hang, ZHAO Dapeng, LIU Ruihuang, et al. Compatible stealth photonic crystal for visible-light, far-infrared, and multi-wavelength lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 214 – 219. (in Chinese)

[97] HU H T, SHI J M, LIU R H. Study on a new type of green infrared stealth film material [C]// Proceedings of Optical Sensing and Imaging Technologies and Applications. SPIE, 2018.

[98] TIAN C H, CHE Z X, WANG B K, et al. Design of an infrared absorber based on resistance frequency selective surface [C]// Proceedings of Applied Computational Electromagnetics Society, 2017.

[99] XU C L, QU S B, YAN M B, et al. Design of the infrared selective thermal radiation based on metamaterials [C]// Proceedings of Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). IEEE, 2016: 2735 – 2738.

[100] ZHANG C L, WU X Y, HUANG C, et al. Flexible and transparent microwave-infrared bstealth structure [J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(8): 1900063.

[101] 朱冬骏, 张占月, 赵程亮, 等. 一种实现光学隐身的卫星构型设计 [J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(1): 61 – 66.

ZHU Dongjun, ZHANG Zhanyue, ZHAO Chengliang, et al. A satellite configuration design for optical stealth [J]. Aerospace Control and Application, 2017, 43(1): 61 – 66. (in Chinese)

[102] WANG K Z, WANG C X, YIN Y J, et al. Modification of Al pigment with graphene for infrared/visual stealth compatible fabric coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 690: 741 – 748.

[103] QI D, CHENG Y Z, WANG X, et al. Multi-layer composite structure covered polytetrafluoroethylene for visible-infrared-radar spectral compatibility [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(50): 505108.

[104] DING F, MO L, ZHU J F, et al. Lithography-free, broadband, omnidirectional, and polarization-insensitive thin optical absorber [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(6): 061108.

[105] ZHU J Y, YANG X, FU Z B, et al. Facile fabrication of ultra-low density, high-surface-area, broadband antireflective carbon aerogels as ultra-black materials[J]. Journal of Porous Materials, 2016, 23(5): 1217 – 1225.

[106] WU D, LIU C, LIU Y, et al. Numerical study of an ultra-broadband near-perfect solar absorber in the visible and near-infrared region [J]. Optics Letters, 2017, 42(3): 450 – 453.

[107] GHOBADI A, HAJIAN H, GOKBAYRAK M, et al. Visible light nearly perfect absorber; an optimum unit cell arrangement for near absolute polarization insensitivity [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27624 – 27634.

[108] NI X J, WONG Z J, MREJEN M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light [J]. Science, 2015, 349(6254): 1310 – 1314.

[109] HSU L, NDAO A, KANTÉ B. Broadband and linear polarization metasurface carpet cloak in the visible[J]. Optics Letters, 2019, 44(12): 2978 – 2981.