引用格式:李娇敏,刘潇涵,李付山,等.雷达隐身吸波材料应用研究进展及发展趋势[J].材料工程,2026,54(5):1-21.
LI Jiaomin, LIU Xiaohan, LI Fushan, et al. Research progress and development trends in radar stealth microwave absorbing materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(5): 1-21.

雷达隐身吸波材料应用研究进展及发展趋势

李娇敏[1,2],刘潇涵[2,3],李付山[3,4],侯 瑞[4,5*],潘士兵[4,5],张子栋[1,2,3*]

(1 山东大学 国家卓越工程师学院,济南 250061;2 高端装备涂料全国重点实验室,济南 250061;
3 山东大学 材料科学与工程学院,济南 250061;4 山东省超材料与电磁调控技术重点实验室,济南 250061;
5 山东非金属材料研究所,济南 250031)

摘要:吸波材料作为雷达隐身技术的重要组成部分,能够通过吸收雷达波的方式缩减被探测目标的雷达散射截面,从而降低目标被探测发现的概率,目前已被广泛应用于各类飞行器、舰船及装甲车辆等装备的隐身设计中,能够有效提升装备的战场生存能力和作战能效,是国防领域的战略性关键材料。因此,开发高性能吸波材料是前沿材料领域的研究热点和国防安全的重大需求。本文首先对吸波材料的定义、分类及吸波原理进行了详细的论述,并结合不同种类吸波材料的实际应用背景,系统归纳总结了各类吸波材料的研究现状与最新进展,分析了各类吸波材料所具备的优势与不足之处。最后围绕吸波材料研究领域现存的关键性问题,指出深入解析损耗机理、聚焦特异电磁响应新材料以及强化工程化设计等方面是吸波材料未来研究的重点方向。

关键词:吸波材料;雷达隐身;结构功能一体化;超材料

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000594 **CSTR**: 32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000594

中图分类号: TB34 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-4381(2026)05-0001-21

Research progress and development trends in radar stealth microwave absorbing materials

LI Jiaomin[1,2], LIU Xiaohan[2,3], LI Fushan[3,4], HOU Rui[4,5*], PAN Shibing[4,5], ZHANG Zidong[1,2,3*]

(1 National Graduate School for Elite Engineers, Shandong University, Jinan 250061, China; 2 State Key Laboratory of Coatings for Advanced Equipment, Jinan 250061, China; 3 School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 4 Shandong Key Laboratory of Metamaterial and Electromagnetic Manipulation Technology, Jinan 250061, China; 5 Shandong Institute of Nonmetallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract: Microwave absorbing materials (MAM), as a crucial component of radar stealth technology, reduce the radar cross-section of detected targets by absorbing radar waves, thereby lowering the probability of detection. Currently widely applied in the stealth design of various aircraft, naval vessels, and armored vehicles, they effectively enhance equipment survivability and combat effectiveness on the battlefield, making them strategic key materials in the defense sector. Therefore, developing high-performance radar-absorbing materials represents both a research hotspot in advanced materials science and a critical requirement for national defense security. This paper first provides a detailed discussion on the definition, classification, and absorption principles of radar-absorbing materials. It then systematically summarizes the current research status and latest advancements across different types of radar-absorbing materials, analyzing their respective advantages and limitations based on practical application contexts. Finally, focusing on key challenges in the field, it identifies some primary future research directions: deepening the understanding of loss mechanisms, developing novel materials with unique electromagnetic responses, and enhancing engineering design capabilities.

Key words: microwave absorbing material; radar stealth; structure/function integration; metamaterial

伴随侦察感知技术与精确制导武器的快速发展，“发现即毁伤”已成为信息化战场的鲜明特点。雷达作为各类武器装备的主要探测及引导攻击手段，一直以来都是各类武器装备的主要威胁源。雷达隐身技术已成为对抗雷达探测，提升武器装备战场生存及作战能效不可或缺的手段。作为雷达隐身技术的重要组成部分，吸波材料能够通过吸收雷达信号缩减被探测物体的雷达散射截面（radar cross section，RCS），从而降低目标被雷达探测发现的概率，目前已被广泛应用于空/天飞行器、水面舰艇及地面装甲车辆等各类武器装备，受到世界各军事大国的高度重视。

目前吸波材料的研发主要围绕“薄厚度、轻量化、宽频强吸收”展开，为实现上述目标，众多研究者开展了大量的基础研究，通过材料组分及微观结构设计来优化材料的阻抗匹配，提升吸波材料的有效吸收带宽（effective absorption bandwidth，EAB）与最强吸收强度（maximum reflection loss，RL_{max}）。然而对于吸波材料的实际应用而言，在提升吸波材料 EAB 与 RL_{max} 的同时，还必须兼顾不同种类武器装备的服役环境与使役需求对吸波材料提出的限制性条件，例如航空飞行器对厚度的限制、水面舰艇对耐腐蚀性的要求等。

本文结合国内外研究现状，对吸波材料的定义、分类及吸波机理进行了论述。在此基础上，从吸波材料在装备上的应用形式与装备的实际需求出发，重点论述了兼具优异吸波性能与场景适配功能的材料体系，对不同种类材料的优缺点进行了归纳评述。最后，针对吸波材料研究领域目前存在的难点问题，提出了未来研究与应用的重点方向。

1 吸波材料的定义及分类

吸波材料可定义为能够通过特定的损耗机制，将入射电磁波能量转换为热能或者其他形式能量而消耗掉的一类功能材料。因此，如果从材料学的角度出发来考虑，吸波材料可以是指具有某种化学组成，能够吸收电磁波的特定材料体系，较为常见的包括碳系、铁系、导电高分子等，通常以粉体的形式进行应用（即吸收剂），典型代表如生物质衍生碳、羰基铁、铁氧体材料等；但从实际应用的角度来看，除了具体的某种材料体系之外，一些具有吸波性能的特殊结构也属于吸波材料的范畴，例如 Salisbury 屏、吸波电磁超材料以及具有吸波特性的复合材料等，这类吸波结构中通常会采用特定的材料体系作为吸波功能相，同时采用特殊结构设计来提升整体的吸波性能。

吸波材料的分类方式有很多种，较为常见的包括按照损耗机理分类、按照吸收机制分类以及按照应用形式分类三种方式[1]。

（1）按照损耗机理：电损耗型吸波材料和磁损耗型吸波材料。电损耗型吸波材料又包括电阻损耗型和介电损耗型两类，分别主要依靠材料的电导损耗和介电极化弛豫损耗机制来吸收电磁波，常见的电损耗型吸波材料有碳材料、钛酸钡、铁电陶瓷等。磁损耗型吸波材料则一般都具有较高的磁损耗正切，主要通过材料与磁场的磁相互作用来损耗电磁波，通过涡流损耗、铁磁共振以及交换共振等机制来达到衰减电磁波的效果，常见的磁损耗材料包括各种铁磁金属微粉、铁氧体、羰基铁等材料[2]。

（2）按照吸收机制：吸收型吸波材料和干涉型吸波材料[3-4]。吸收型吸波材料主要依靠材料本身的电磁损耗特性来衰减电磁波，除了材料的复介电常数、复磁导率等本征物性参数会直接影响吸波性能之外，吸收剂在基体材料中的分布、界面状态等因素也会对吸波性能产生影响。干涉型吸波材料是利用电磁波达到材料前后表面的反射，通过厚度设计使两次反射的电磁波在出射位置处相位相差 90°，形成干涉相消而达到吸波效果。由于干涉相消与电磁波波长、厚度密切相关，仅在满足半波长相干相消条件时才能发挥效果，因此吸收频段宽度通常较窄。

（3）按照应用形式：涂敷型吸波材料和结构型吸波材料。涂敷型吸波材料是将吸收剂与黏合剂按照一定比例混合后，采用特定工艺涂敷于物体表面形成吸波涂层。涂敷型所采用的吸收剂包括金属或合金微粉、铁氧体、羰基铁、导电纤维等，黏合剂通常选用透波的环氧树脂、聚氨酯、有机硅等。结构型吸波材料是指采用特定工艺技术，将吸收剂与具有良好力学性能的基体材料（玻璃纤维、芳纶纤维、陶瓷纤维、芳纶蜂窝等）进行复合所制备的板状、蜂窝状等形状的复合材料，与涂敷型吸波材料相比，结构型吸波材料往往兼具承载与吸波功能。近年来，随着超材料技术的兴起，通过特殊结构设计而具有吸波性能的电磁超材料也被纳入结构型吸波材料的范畴。

需要指出的是，吸波材料的分类方式虽多种多样，但主要目的是为了对吸波材料体系进行系统化归纳总结。在实际应用中为了提升材料的吸波性能，往往会采用多种方式对材料进行优化设计，很难将实际应用的吸波材料归为特定的某种具体类别，例如吸波涂层在设计时会同时引入吸收与干涉两种机制，并且吸收机制中所需的吸收剂又多会选用兼具电损耗吸收和磁损耗吸收的材料体系。伴随着新一代武器装备的快速发展，单一的吸波材料体系已难以满足装备

隐身性能需求，将不同材料进行复合，通过引入不同机制进行相互补充，协同提高材料的吸波性能已成为吸波材料发展的必然趋势。

2　吸波材料的吸波原理

对于吸波材料而言，在只考虑材料本征吸收、不考虑干涉相消的前提下，当电磁波到达吸波材料的表面时，部分电磁波会在材料表面反射，其余部分进入材料内部。进入材料内部的电磁波在传播过程中会与材料发生相互作用，导致部分能量被转化为热能或其他形式能量耗散，剩余部分透过材料。因此在这种情况下，提高材料的吸波性能主要从两个方面进行考虑：一方面需要降低电磁波在材料表面的反射，让尽可能多的电磁波进入材料内部；另一方面需增强材料对进入其内部的电磁波的衰减能力。

根据GJB 2038A—2011《雷达吸波材料反射率测试方法》表征材料吸波性能，该标准化测试中采用金属背板，电磁波进入吸波涂层到达金属背板时会产生二次反射，在特定频点处将满足相干相消条件，因此所测得的材料吸波性能包括材料本征吸收与相干相消的共同影响。对于绝大多数的实际应用场景而言，材料本征吸收与干涉相消机制往往同时存在，因此，以下将从本征吸波与结构诱导相干相消两个方面对吸波材料的吸收机理展开讨论。

2.1　本征吸收的阻抗匹配与衰减常数

阻抗匹配对于本征吸收而言十分重要，是电磁波能否进入吸波材料内部的关键判据。当电磁波从自由空间到达材料表面时，电磁波在材料表面的反射系数(Γ)可以用式(1)来表示：

$$\Gamma=\frac{Z_{\mathrm{in}}-Z_0}{Z_{\mathrm{in}}+Z_0} \tag{1}$$

式中：Z_0表示自由空间的阻抗；Z_{in}表示介质材料表面的阻抗。由式(1)可知，当材料表面阻抗与自由空间阻抗相等时，反射系数$\Gamma=0$，此时电磁波在材料表面无反射，全部进入材料内部，这是最理想的阻抗匹配状态，但几乎不可能实现。实际上，当$-0.09\leqslant\Gamma\leqslant 0.11$时，材料往往也会具有较好的吸波性能。

Z_{in}的表达式为

$$Z_{\mathrm{in}}=Z_0\sqrt{\frac{\mu_{\mathrm{r}}}{\varepsilon_{\mathrm{r}}}}\tanh\left(\mathrm{j}\frac{2\pi fd}{c}\sqrt{\mu_{\mathrm{r}}\varepsilon_{\mathrm{r}}}\right) \tag{2}$$

式中：Z_0的值为376.7 Ω；ε_{r}和μ_{r}分别为吸波材料的复介电常数与复磁导率；c为光速；d为吸波材料的厚度；f为电磁波的频率。由此可见，合理化设计及精确调控吸波材料的介电常数和磁导率，使其满足阻抗匹配条件，是高性能吸波材料研发所必须考虑的关键问题。

当电磁波进入吸波材料内部后，材料对电磁波的损耗衰减能力可通过衰减常数α来定义：

$$\alpha=\frac{\sqrt{2}\,\pi f}{c}\sqrt{\left(\mu''\varepsilon''-\mu'\varepsilon'\right)+\sqrt{\left(\mu''\varepsilon''-\mu'\varepsilon'\right)^2+\left(\mu'\varepsilon''+\mu''\varepsilon'\right)^2}} \tag{3}$$

式中：ε'和μ'分别为材料复介电常数和复磁导率的实部；ε''和μ''分别为材料复介电常数和复磁导率的虚部。在此基础上，依据作用机制可将材料内部的损耗机制分为电损耗和磁损耗两种，并定义介电损耗角正切值$\tan\delta_\varepsilon$和磁损耗角正切值$\tan\delta_\mu$来分别表示。材料的损耗角正切值越大，代表对电磁波的衰减能力越强，可以将更多的电磁波转化为其他形式的能量耗散掉。

$$\tan\delta_\varepsilon=\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{4}$$

$$\tan\delta_\mu=\frac{\mu''}{\mu'} \tag{5}$$

其中，$\tan\delta_\varepsilon$主要来自材料内部电流产生的导电损耗以及极化弛豫现象：导电损耗可以发生在任何频段内，没有频率选择性；极化弛豫包括电子极化、离子极化、偶极子转向极化以及在异质界面处由于电荷聚集发生的界面极化现象。电子极化的弛豫时间大约在10^{-15}～10^{-14} s，离子极化的弛豫时间在10^{-13}～10^{-12} s，即两种极化发生在微波频段以上的范围内，因此对于吸波材料而言，偶极子极化和空间电荷与界面极化是主要的极化弛豫损耗机制，如图1(a)所示。$\tan\delta_\mu$则主要源于磁滞损耗、畴壁共振、涡流损耗、自然铁磁共振和交换共振。但一般而言，畴壁共振发生的频段较低，而磁滞损耗通常只发生在强磁场下，因此吸波材料的磁损耗机制主要源于这两种损耗以外的方式[2]。

因此，从本征吸收的角度出发，高性能吸波材料研发的核心关键在于对材料电磁参数的调控，在保证电磁参数能够满足阻抗匹配的前提下，获得尽可能大的衰减常数。对于非磁性吸波材料体系而言，材料在微波频段的磁导率基本可视为一个接近于真空磁导率的常数，如图1(b)所示，因此对于这一类的吸波材料电磁参数的调控仅需要考虑材料介电常数的实部与虚部；但当涉及铁氧体、羰基铁、铁磁性金属等具有磁性的材料体系时，则需要综合考虑材料的介电常数与磁导率。

2.2　基于结构的相干相消机制

当吸波材料的厚度为垂直入射电磁波波长的1/4的奇数倍时，入射波和反射波振幅相等、相位差180°，

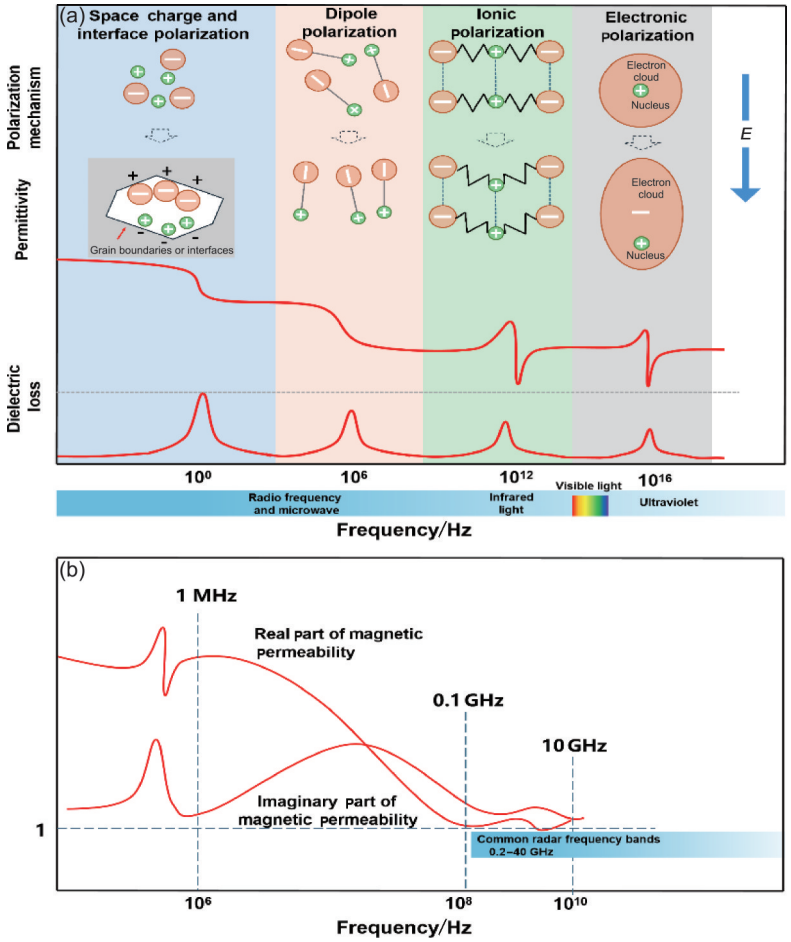


图 1　材料电磁参数频散特性

(a)介电常数频散曲线及极化机制示意图;(b)磁导率频散曲线示意图

Fig.1　Dispersion characteristics of material electromagnetic parameters

(a)dielectric constant dispersion curves and schematic diagram of polarization mechanism;

(b)schematic diagram of magnetic permeability dispersion curves

从而产生干涉相消现象,使总反射波能量大量衰减。相应的匹配厚度(t_m)有如下关系:

$$t_m=\frac{n\lambda}{4}=\frac{nc}{4f_m\sqrt{|\varepsilon_r||\mu_r|}}(n=1,3,5\cdots\cdots) \quad (6)$$

式中:λ、f_m、c分别为电磁波的波长、匹配频率和光速。因此,可以通过设置吸波材料匹配厚度以达到对特定频率电磁波的有效耗散。以单层吸波体为例,通常结构包括具有一定厚度的吸波层和金属背板。当电磁波入射到吸波体时,透射部分的电磁波会被金属背板反射,并在吸波体上表面形成出射波,当吸波层厚度d等于入射电磁波波长的1/4时,出射波和入射波的相位相差180°,相互叠加发生干涉相消,从而使反射波的强度大幅度衰减,如图2所示。

但是在实际应用过程中,仅仅运用这一原理进行吸波体的设计是不现实的,以目前吸波材料关注的L波段为例,假设入射波频率为1 GHz(波长=300 mm),

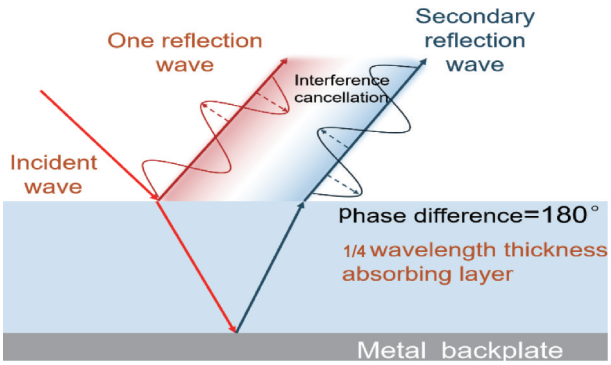


图 2　基于1/4波长厚度的相干相消机制示意图

Fig.2　Schematic diagram of coherent cancellation mechanism based on a quarter-wavelength thickness

其1/4波长为75 mm,很显然这一厚度在实际工程应用中是很难应用的。对于频率更低、波长更长的P波段则更是如此。

需要指出的是,对于电磁波在介质材料中的传播,波长受到材料介电常数与磁导率的影响,如式(7)

所示：

$$\lambda=\frac{\lambda_0}{\varepsilon_r\mu_r} \tag{7}$$

式中：λ、λ_0分别为电磁波在介质和真空中的波长。因此，可以通过调控材料的介电常数与磁导率来降低相干相消的1/4波长匹配厚度。

由以上对材料吸波机理的讨论可知，从某种意义上来讲，吸波材料研究领域的本质问题实际上就是如何实现对材料介电常数与磁导率的精确调控。

3　吸波材料的研究现状及最新进展

3.1　航空航天用吸波材料

航空航天飞行器的隐身设计需要充分考虑气动、结构、控制、动力等因素，通过外形优化来降低RCS是最重要的技术途径，吸波材料则用于金属壳体表面或其他重要部位，进一步提升隐身性能。可以依据航空航天用吸波材料的应用形式，将其划分为涂敷型与结构型两类。其中涂敷型吸波材料覆盖在金属表面部分，不参与结构受力，而结构型吸波材料同时具备力学性能和吸波性能，可用于制造飞行器前缘、腹鳍等部件。航空航天飞行器用吸波材料在设计和应用的过程中，除了宽频高强吸收等性能以外，对轻量化和耐高温性能具有严格的要求，这是航空航天类吸波材料区别于其他吸波材料的关键特征。从轻量化角度来看，为了提升续航里程与机动性，各类航空航天飞行器对于质量的要求可谓“克克计较”，因此所使用的吸波材料密度相对较小；从耐高温角度来看，飞行器在高速飞行时部分构件表面温度能达到1000 ℃以上，吸波材料在高温条件下的稳定性是制约航空航天类飞行器隐身性能的另一个关键因素。因此，开发兼具轻量化和耐高温的宽频吸波材料/结构，如图3所示，是提升航空航天飞行器隐身性能的关键所在，也是航空航天用吸波材料研究领域的重点。

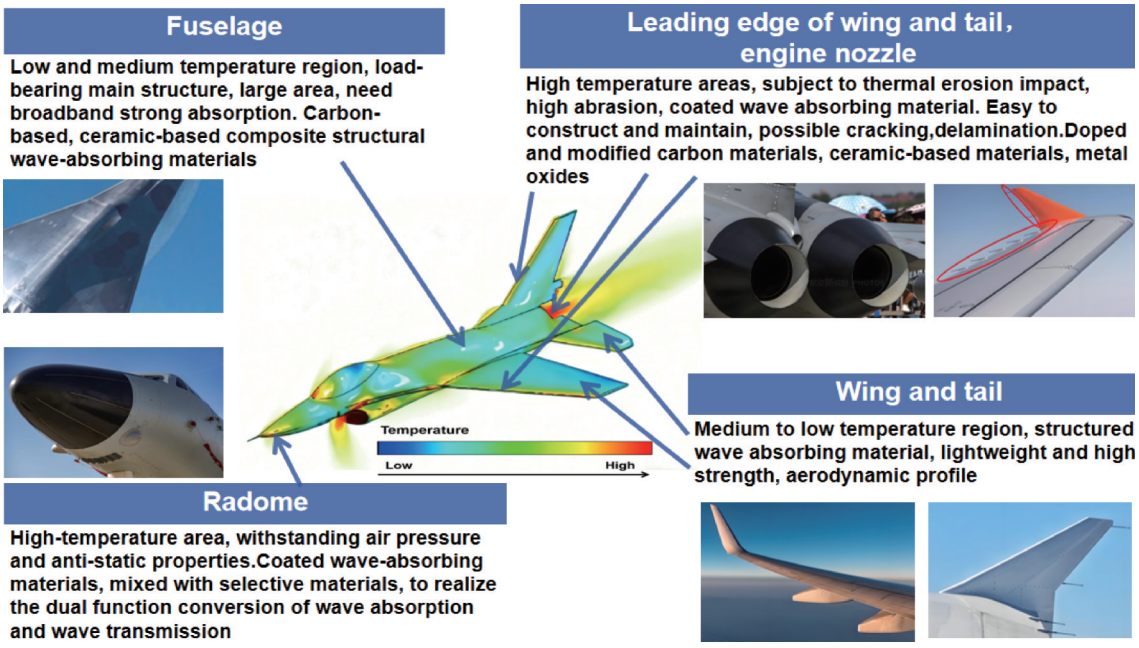


图3　航空航天器主要部件及材料需求特点示意图

Fig.3　Schematic diagram of key components and material requirements for aerospace vehicles

3.1.1　涂敷型高温吸波材料

利用涂覆型吸波材料，可以直接对现有的装备进行改装或局部处理，并且能够快速施工于飞行器尾翼等复杂曲面以及部件的缝隙边缘，与结构型吸波材料相比，应用更加灵活。涂覆型吸波材料的吸波性能主要取决于涂层的厚度、吸波剂的含量与种类等。由于居里温度限制，磁性吸波材料在高温下往往会失效，因此涂覆型高温吸波材料通常是电损耗型和介电型吸波材料（应用温度相对较低的除外），主要包括碳系材料、陶瓷基材料、金属氧化物材料等。

碳系材料在涂覆型吸波材料中被广泛使用，具有密度低、电导率高、力学性能良好，易与其他材料复合等优点。碳系材料包括炭黑（CB）、石墨、碳纤维、碳纳米管以及石墨烯等，其中石墨早在第二次世界大战期间就被填充于飞机蒙皮夹层中来吸收雷达波。近年来，以碳纳米管、石墨烯为代表的低维碳材料成为吸波材料研究领域的热点，得到了国内外的广泛关注。然而，单一的碳系吸波材料阻抗匹配性较差，吸收频

带较窄、在400 ℃以上可能出现氧化，通过与耐高温高聚物或其他材料复合，能够有效提高其高温吸波性能[1,5]。Chao等[6]在聚酰亚胺(PI)基体中加入炭黑和MXene导电填料，形成的气凝胶有效吸收带宽为8.2～12.4 GHz，在500 ℃下具有较好的热稳定性，同时具有良好的阻燃性和疏水性。Kong等[7]采用均相沉淀法和无压烧结形成了CNT-ZnO玻璃复合材料。包覆的纳米ZnO外层提高了碳纳米管耐高温性能的同时通过弛豫极化使得复合材料的介电损耗随着温度的升高而增加。在30～400 ℃下，厚度为2.72 mm，含有2%(质量分数，下同)填料的玻璃复合材料有效吸收带宽随着温度的升高而增加，而反射损耗随着温度的升高不断减小，在高温下展现出了良好的吸波性能。Liu等[8]通过热退火和化学蚀刻工艺，成功制备中空石墨球/多孔无定形碳材料(S-GA)，在10%的超低填充比下，实现了覆盖Ku波段与X波段的有效吸波，为轻量化、多频段碳基吸波材料设计提供了思路。

碳化硅材料是一种具有代表性的耐高温陶瓷，其具有高硬度、耐磨损、耐腐蚀、抗氧化等优异性能，同时还具有高温强度大、热膨胀系数小、介电常数虚部随着温度的升高而增大等特点[9]，被广泛应用于高温结构中。在高温吸波材料领域，碳化硅材料通常是以粉体和纤维两种形式存在，用于高温吸波涂层的主要是SiC粉体。需要指出的是，采用常规方式制备的SiC电导率较低，电损耗能力较弱，通常通过掺杂或表面改性来提升SiC的电导率，从而提升材料的吸波性能。Wang等[10]以硅氧烷和碳纤维为前驱体，通过热解法和化学气相反应法制备了纳米线交织的三维网络状SiC/Si_3N_4复合气凝胶。其密度仅为15 mg/cm^3，在加热到1000 ℃的过程中，质量几乎不发生变化，具有良好的高温稳定性。此外，凝胶厚度为2 mm时，在10.6～18 GHz频段内反射损耗小于－10 dB，最小反射损耗达到－48.6 dB。而无人机尺寸较小，承重能力有限，因此要求使用的涂覆型吸波材料面密度极小且具有良好的柔性来用于小尺寸的涂覆。此外，无人机多用于侦察与干扰，因此需要较宽的吸收频带与更好的环境适应性。气凝胶型材料为无人机用吸波材料提供了更多的可能与选择，如图4(a)所示。Hou等[11]在BN的外层通过聚合物衍生包覆了一层SiOC陶瓷层，形成具有核壳结构的复合吸波材料。该复合材料保留了BN的低密度以及良好的阻抗匹配性，同时外层的SiOC提供了良好的高温稳定性，在1000 ℃下质量损失小于1.3%。当吸波材料厚度为2.5 mm时，有效吸收带宽为6 GHz，最小反射损耗为－40 dB。类似的，利用Fe、Al、B、Ti等元素掺杂也可以改善SiC的高温吸波性能[12]。Liu等[13]制备的SiO_2/C@SiC/SiO复合材料，呈三明治结构，外层的SiO_2气凝胶提供了良好的隔热性能，内层的核壳结构增强了导电损耗和极化损耗，有效吸收带宽为5.2 GHz，在400 ℃下性能几乎不发生变化，解决了传统吸波材料高温氧化的问题。轻质而具有优异耐高温特性的碳化硅基材料可以被应用于机翼前沿、鼻锥、燃烧室等部位，在航空领域具有重要的应用价值。目前日本的SSM-1岸舰导弹、美国F-22战斗机的进气道表面以及机翼前缘等也采用碳纤维、石墨、复合材料等作为吸波涂层，它们在实现宽频吸收的同时具有瞬时超高温耐受性与抗冲击性等[14]。

常见的金属氧化物具有高温稳定性和抗氧化性好，简单易得等优点，但介电损耗性较差，吸波性能有限。因此，通过与其他材料复合或掺杂改性以及构建介电渐变结构，可以增强界面极化进而改善吸波性能。Ma等[15]制备的花状Co_3O_4@rGO/SiO_2复合材料，通过在磁性氧化物Co_3O_4外层包覆rGO/SiO_2，增强了复合材料的界面极化和偶极极化，提高了高温下的传导损耗和能量转化率。当温度为353 K，材料厚度为1.78 mm时，有效吸收带宽约为4 GHz，最小反射损耗可达－52.6 dB，见图4(b)。锆基材料熔融温度高，化学稳定性好，极化弛豫显著，因此也是高温吸波涂层材料的选择之一[16]。Javid等[17]利用等离子体技术合成了具有核壳结构的Fe@ZrO_2纳米链段结构，ZrO_2外壳使内层的磁性材料在高温下能够不被氧化，显著提升了材料的抗氧化能力，在437 ℃的高温下仍保留了良好的反射损耗。当材料厚度为3 mm时，最小反射损耗低至－45.36 dB，在8～18 GHz频段内反射损耗小于－10 dB。Yang等[18]利用新型等离子喷涂技术制备了$K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$(KNN)/ZrO_2/Al_2O_3陶瓷基异质结吸波材料。随着温度升高，喷涂层晶界处电子迁移变快，进一步增强了介电损耗与弛豫极化，而ZrO_2与KNN薄膜间的界面极化与共振耦合，又协同提升了复合材料的吸波性能。当吸波材料厚度为2.2 mm时，有效吸收带宽为12 GHz，在9 GHz处的最小反射损耗为－16.25 dB。

高温吸波材料需要在高温下长期服役，虽然涂覆型吸波材料易于施工，对不同构件的适应性好，但也面临严峻的挑战。作为表面覆盖层，涂覆型吸波材料可能会因为与基体热膨胀系数的差异以及高频的振动而发生开裂、分层，甚至剥落等问题[19]，使得吸波性能严重下降，因此需要定期的检查和维护来满足隐身的需求。此外，涂层内吸波功能相(如碳材料、金属)的高温氧化也会影响涂覆层的吸波作用。因此改善

涂覆层在高温下的稳定结合力、氧化防护能力以及抗热震性是涂覆型高温吸波材料的关键问题[20]。

3.1.2　结构型高温吸波材料

结构型高温吸波材料在有效吸收电磁波的同时，还具有一定的力学性能，如刚度、强度、抗冲击性等。结构型吸波材料的使用，能够在一定程度上减轻因涂覆吸波层带来的额外质量，并减少涂层破坏隐患，是未来隐身技术升级的重要方向[21]。吴笑涵等[22]以聚碳硅烷为前驱体，通过先驱体转化法和静电纺丝技术制备了CNT/SiC微纳纤维。在2～18 GHz范围内，通过改变碳纳米管的填充含量，可以调节复合纤维的复介电常数。当材料厚度为2.5 mm时，CNT/SiC微纳纤维最低反射损耗为－16.29 dB，有效吸收带宽为4.4 GHz，并且在1350 ℃下处理一段时间，纤维的表面形貌和性能几乎不发生变化，具有较好的耐高温性能。Jiao等[23]根据自由基共聚法设计了一种碳纤维/聚甲基丙烯酰亚胺(PMI)复合多孔材料。当填充的碳纤维质量分数为4%时，复合材料的密度只有110 mg/cm^3，室温下有效吸收带宽为14 GHz，最小反射损耗小于－50 dB，当温度升高到473 K时，有效吸收带宽仍能覆盖整个X波段。在453 K下，抗压强度达到了1.05 MPa，并且能够在宽应变范围内保持较好的抗压能力。Lan等[24]通过两步碳热还原法制备了SiC/Si_3N_4双相复合陶瓷毡，在实现宽频吸波的同时具有轻质、可压缩、隔热等特点。Si_3N_4的引入增强了异质界面的阻抗匹配与极化损耗，当复合材料厚度为2.1 mm时，在11～18 GHz频段内反射损耗小于－10 dB，最大吸收率达到了99%以上。另外，复合陶瓷密度只有160 mg/cm^3，在950 ℃下具有良好的高温稳定性，10%应变下无永久形变，满足极端高温下的电磁隐身需求。例如法国的APTGD导弹尾翼就是由小块六角形陶瓷吸波材料组成的，它的抗张强度约为400～600 MPa，在8～18 GHz频段范围内反射损耗小于－10 dB[18]。B-2飞机机身和机翼蒙皮、雷达罩等使用的都是基于碳纤维的蜂窝夹芯复合结构，除了轻质耐高温以外，还能够将入射的电磁波衰减20 dB。

提升材料高温吸波性能的另一个重要方向，是引入具有周期结构的吸波材料，即超材料[25]。电磁超材料一般是指人工合成的复合结构或者复合材料，具有不同于自然材料的结构和性质[26]。结构上，通常是由微观尺寸、周期性排列的结构单元组成，通过设计结构单元不同的排列方式和尺寸可以实现对电磁波传输方式的控制以及损耗吸收。电磁超材料与传统材料相比，尺寸更小、厚度更容易控制，对电磁波的调控更加灵活，因此在航空航天领域具有较大的发展前景[21]。Wang等[27]设计了一种由频率选择表面(frequency selective surface，FSS)和梯度蜂窝结构组成的新型耐高温宽带电磁超材料吸波体，具有极化稳定性和宽角度稳定性。梯度蜂窝结构由石英纤维、聚酰亚胺(PI)、炭黑等材料组成，在2～3.12、5.62～18 GHz频段范围内反射损耗小于－10 dB。当温度为575 K时，复合超材料吸波体有效吸收频带仍然达到了11.5 GHz，具有良好的温度稳定性，见图4(c)。Li等[28]通过复制法制备了SiC/C泡沫材料，并基于超材料理念设计了一种双层全介质的雷达吸波结构。上层是周期性离散的SiC/C，下层是连续的SiC/C泡沫，SiC/C的泡沫材料既可以改善阻抗匹配性又能实现电磁波吸收。合成的SiC/C泡沫材料密度约为0.5 g/cm^3，在3.5～17.5 GHz频带内反射损耗为－10 dB。同时，材料还兼具良好的力学性能，抗压强度为5.5 MPa，在400 ℃下具有热稳定性。

结构型高温吸波材料与涂覆型相比，环境适应性更强，使用寿命更长。但作为承载部件，部分吸波结构采用的轻质多孔或者蜂窝设计在提高吸波性能的同时降低了力学性能，高温下可能会面临软化失效、抗冲击力不足等，难以满足如飞行器前缘等关键部位的载荷需求。另外，结构型吸波材料还面临整体化加工困难、成品率低而成本高，局部损伤难以更换修复等问题。应用性能和吸波性能的综合优化成为结构型高温吸波材料研究面临的最大难题[20]。

3.2　舰艇用吸波材料

舰艇作为海军战略的重要组成部分，它的隐身技术是提高舰艇隐蔽生存和突防能力的有效手段。通过整体的隐身外形设计、在舰体表面及其他组成部分涂敷或铺设吸波材料，能有效减小舰艇的雷达散射截面。俄罗斯22350型护卫舰、美国Defiant无人战舰、瑞典维斯比极护卫舰通过上述的隐身设计已经能够实现全隐身。然而，在实际应用中，舰艇在面对强紫外线辐射、高湿热，高盐雾以及微生物侵蚀等严苛的海洋环境时，传统的吸波材料易发生吸氧腐蚀、开裂等老化失稳，使得舰艇的隐身性能受到严重影响。同时，高性能的舰艇吸波材料需要满足“部位适配”，在实现宽频强吸收的同时，也要考虑各部件的功能特点。因此，近年来舰艇吸波材料的研究重心从追求单一的吸波性能，转向提升材料的固有耐候性和环境适应性，实现多维度协同优化。以下将基于水面舰艇和水下舰艇的分类方式，按照不同部件吸波材料的应用形式和特点来加以论述。

3.2.1　水面舰艇用吸波材料

水面舰艇的区域包括水线上干舷区域、水线区以

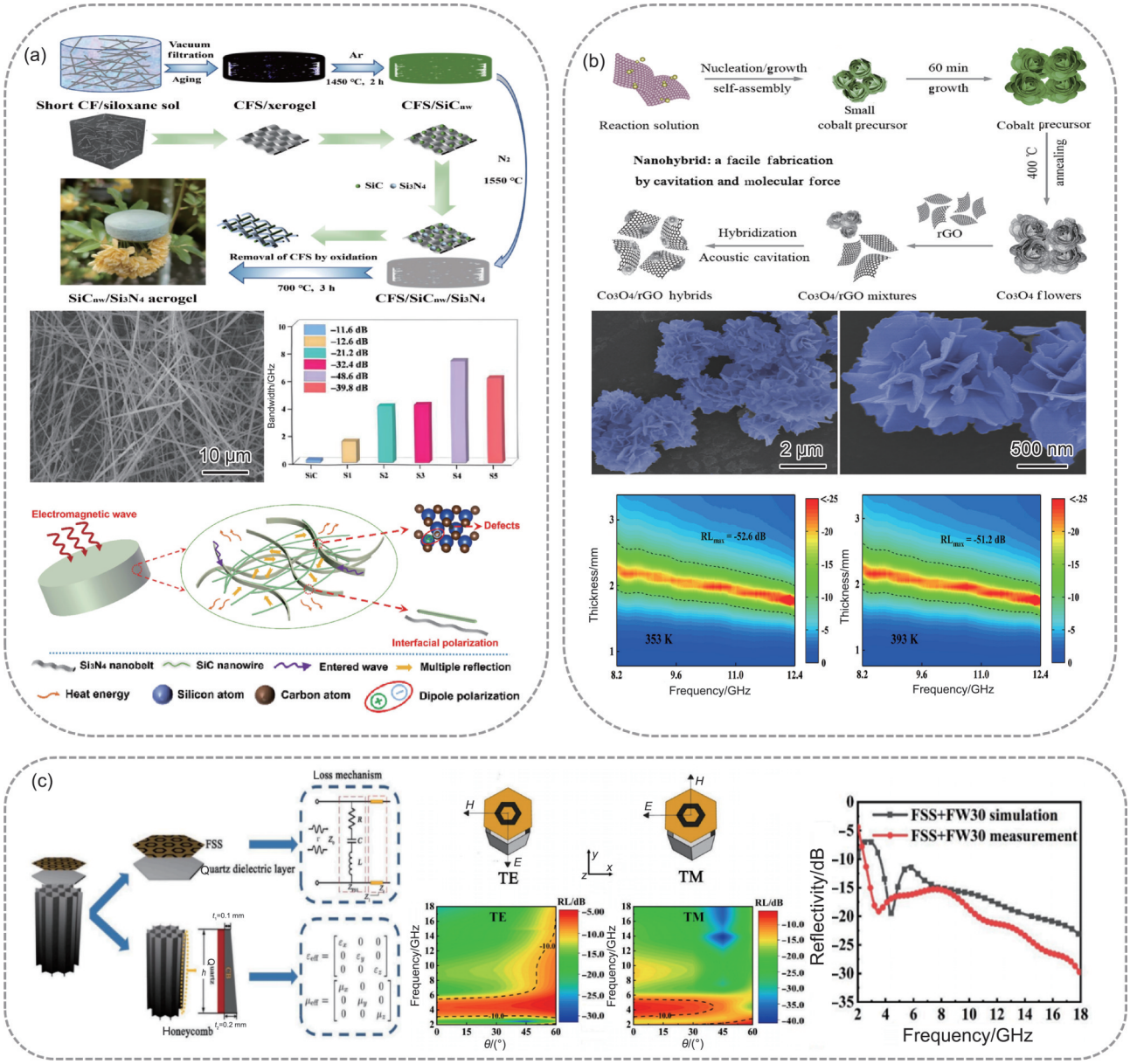


图4 SiC/Si_3N_4复合气凝胶形成机制图、SEM以及反射损耗图与损耗机理图(a)[10]、Co_3O_4@rGO/SiO_2复合材料形成机制图、SEM以及反射损耗图(b)[15]与超材料吸波体结构示意图、不同极化反射损耗图及反射损耗对比图(c)[27]

Fig.4 Schematic diagram of SiC/Si_3N_4 composite aerogel formation mechanism, SEM and reflection loss images, loss mechanism diagram(a)[10], schematic diagram of Co_3O_4@rGO/SiO_2 composite formation mechanism, SEM and reflection loss images(b)[15] and schematic diagram of metamaterial absorber structure, images of reflection loss for different polarizations, and comparison images of reflection loss(c)[27]

及船底区,不同区域所处的微环境和功能需求存在较大的差异,因此对吸波材料的性能要求也各有不同,如图5所示。

水线上干舷区域主要包括甲板、上层建筑、桅杆和烟囱等。甲板需要承受舰载机的起降、装备运输及人员活动等高频磨损和冲击,因此吸波材料需要满足耐磨、耐冲击和一定的强度要求。熊超[29]通过制备碳纤维/聚芳醚飒酮预浸料以及热压成型两步法制备了连续碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料。当碳纤维体积分数为21%时,所得复合材料吸收电磁波的同时展现出优异的力学性能:拉伸强度达281.7 MPa,断裂伸长率为2.3%,冲击强度为33.51 kJ/m^2,此外还具有一定的耐磨性,满足甲板的功能需求。用于DDG1000驱逐舰的甲板材料,是T700碳纤维/乙烯基酯表面和巴尔萨芯材的夹心结构。除了具有轻质、良好的隐身性能之外,外层的碳纤维和乙烯基酯能够提供足够的强度和刚度,成型的复合材料具有良好的表面平整度和耐磨性,而内层的巴尔萨芯材在提高强度的同时具有阻燃的效果[30]。但是碳纤维基复合吸波材料的成本通常较高,并且需要精确控制合成参数和



图5　舰艇主要部件及材料需求特点示意图

Fig.5　Schematic diagram of key components and material requirements for naval vessels

高温条件，不利于大规模的生产。此外，其力学性能依赖于纤维方向，因此力学性能与吸波性能的协同优化也是其应用的关键[31]。

上层建筑是雷达波照射的主要部位，它需要在较宽的频段内实现隐身，其隐身外形设计与吸波材料应用是降低RCS的关键。而上层建筑处于高盐雾、强紫外线的环境中，盐雾颗粒的附着和潮解、强紫外线的照射都会加速吸波涂层的老化和失效，因此，吸波材料的耐候性十分重要。首先在外形设计上，上层建筑四周连接处避免直角，侧板向内倾斜适当角度，外形呈多棱面体状，均可减少雷达散射面积，在此基础上，选择合适的吸波材料能够实现高效宽频宽角的吸收。俄罗斯建造的12700型“阿法纳西·伊万尼科夫”号扫雷舰，其上层建筑采用增强环氧树脂基硅酸盐纤维复合材料，并通过非接触真空浇铸工艺成型。这种全新的建造方式不仅显著减轻了舰体质量，还同时赋予其优异的耐盐雾、耐腐蚀性能和强大的隐身能力[32]。胡悦等[33]通过水解法在羰基铁粉表面包覆了一层均匀致密的SiO_2，包覆层厚度达到500 nm。包覆后羰基铁粉在最小反射损耗以及有效带宽上都有了明显提升。另外，致密的SiO_2包覆层在经历打磨、刻划后仍具有优异的耐盐水腐蚀性能。同时，强紫外线照射到包覆层时，会发生多次散射，使其穿透强度显著降低，而特有的反射机制，又能降低因紫外线照射产生的色差，增强了吸波材料的耐候性。瑞典维斯比极护卫舰船体采用的是以碳纤维为基础的夹层吸波结构，除了具有良好的力学性能以外，还具有低雷达可探测性和磁性特征，是全隐身舰艇的开创者。

桅杆上通常安装有各种型号的雷达、通信系统和天线等设备，在桅杆吸波材料的选择中需要考虑电磁兼容与雷达隐身的问题。目前较多使用的是封闭式一体化桅杆，通过将各种电子设备内置于低雷达散射截面的封闭结构中，借助流线型、多面体的外形设计以及吸波和频选材料实现隐身和滤波特性[34]。例如DDG1000驱逐舰上的集成化桅杆，外层是具有高强度的纤维增强层压结构材料，中间则是蜂窝或者泡沫结构，同时层间覆盖了频率选择材料[30]。桅杆所处的微环境与上层建筑相似，在上层建筑吸波材料的基础上，添加滤波材料或者频率选择结构，也能够实现多频段兼容，例如在最新服役的福建舰上，在桅杆外层通过周期性排列的金属贴片结构，来实现特定频段电磁波的全透射与全反射，敌方雷达回波强度降低90%。

水面舰艇的烟囱位于舰艇的中上部位，具有较高的排气温度和明显的轮廓特征，雷达散射特性和红外目标特性也较明显，因此用于烟囱的吸波材料需要考虑雷达与红外隐身的兼容性设计[35]。雷子璇[36]制备的抗高温氧化的氮掺杂FeNi@C纳米胶囊，当厚度为3 mm时，最小反射损耗为−47.26 dB，最佳吸收带宽也达到了7.04 GHz。此外，在5~300 K温度下具有稳定的磁各向异性，它的抗氧化温度保持在719 K，具备天然的抗无机腐蚀特性，适用于烟囱部位的吸波材料。

对于水线区域，它面临着海水冲击与紫外线照射

的双重挑战，容易形成点腐蚀并迅速扩散，图 6(a)是水线区域吸波材料主要腐蚀失效机理图[37]。水线区域海水反复击打吸波涂层表面，会使涂层在交变载荷的作用下发生应力变化，导致开裂老化等。Wang 等[38]制备的 C@NiCo-LDHs@Ni 气凝胶，当厚度为 2.5 mm 时，最小反射损耗为－57.4 dB，有效带宽为 6.4 GHz，具有良好的吸波性能。由于其独特的多维层叠式结构，该气凝胶还具有优异的隔热、抗冲击和防腐等多种性能，在海水冲击时能够保持高强的环境稳定性，如图 6(b)所示。气凝胶型吸波材料的大规模合成与涂敷有一定的局限性，一般适用于具有较高综合要求的关键部位。杨亮[39]研究了舰艇雷达吸波涂层在受到冲击时受到的非机械损伤问题（如起泡、生锈、脱落），通过优化聚氨酯基体类型、多羟基组分改性、催化剂用量及羰基铁含量等关键配方参数，研制出一种具有快速固化特性的舰用雷达隐身涂料，并基于其固化特性与适配的表面处理工艺，实现了受损涂层的快速自修复。这种自修复吸波涂层为解决水线区域涂层易损问题提供了一种实用且有效的思路，适合现有舰艇的维护升级和大面积涂装。另外，海水和细菌的腐蚀作用，以及细菌及其分泌物在吸波材料表面形成的生物淤积，也会导致吸波材料的性能下降。Li 等[40]在不影响羰基铁粉（carbonyl iron powder，CIP）磁损耗性能的前提下，在其表面通过化学反应镀了一层 Co 或 Ni 的保护层，经过海水的长时间浸泡后，其最小反射损耗为－71.11 dB，有效带宽为 8.00 GHz，与浸泡前相比，有效带宽保持了 90% 以上，因此这种吸波材料在海水中具有长期稳定性，见图 6(c)。Zhou 等[41]研发的多功能锌基丙烯酸树脂（ARZn-x），它含有的可控水解羧酸基团和 ZnO 有助于新表面的形成，使得这种吸波材料能够抑制微生物和细菌的积聚，其抗菌活性大于 90%，并且减少了 92.5% 的藻类黏附和生长，在海水中浸泡 4 个月，它的抗微生物和抗海水腐蚀性能几乎保持不变。此外，随着吸波材料厚度的变化，能够实现 18～40 GHz 频段内电磁波的有效吸收，这种材料是防腐-防污-隐身一体化涂层的理想选择。

3.2.2 水下舰艇用吸波材料

雷达探测技术对于水下航行器的探测有一定的局限性，无法直接探测水下的舰艇。海水的强导电性使得其对电磁波的反射性极强，因此当电磁波照射到海面时，大部分会被立即反射，少数的电磁波即使穿透海面也会受到海水的强吸收而迅速衰减。因此应主要考虑潜艇上浮时，其升降装置与围壳、桅杆等部件的雷达可探测性[42]。德国 U212A 潜艇、美国海狼级核潜艇的升降装置以及桅杆的表面都应用了雷达吸波材料，并且还通过紧凑的传感器、天线结构设计来减少桅杆的雷达散射截面[43]。除了通过外形设计缩小散射截面，在上浮阶段，这些装置面临从高压的深海环境到高盐雾、强紫外线的海面及大气环境的迅速转变，因此所采用的吸波材料需要具备良好的耐候性和稳定性，与水线区域吸波材料具有相同的应用要求。另外，海水对长电磁波吸收和衰减作用较小，使其具有较强的穿透能力，因此长电磁波常被用于水下通信，这使得潜艇能够在不上浮的条件下实现远程通信，极大地提高了安全性[44]，这也要求潜艇一体化桅杆的吸波材料在低频段具有透波的性能。而反潜巡逻机或大型对海搜索雷达磁异探测器探头能够通过探测磁场变化来发现水下潜艇，因此在潜艇吸波材料选择时，应尽可能减少磁性材料的使用以减少其磁性特征。

舰艇用吸波材料主要通过包覆改性、新型纳米材料及高分子基复合材料等改善其耐腐蚀性、耐候性以及抗冲击性等。然而，舰船与航天及地面装备相比，目标面积更大、面临的雷达探测频段更宽，因此要求吸波材料具有更宽更低的吸收频带以及工程化的可行性[45]。

3.3 地面装备用吸波材料

地面装备包括军用车辆、装甲装备、防空与导弹系统机动地面发射平台等，在野外联合作战环境中扮演着关键角色，既是重要的主战力量，也承担着战略支援与保障任务[46-47]，其隐身性能与作战效能和战场生存能力息息相关。随着雷达、红外、激光等探测技术的发展，地面装备用吸波材料除了需要具备宽频段强吸收以及良好的环境耐受性外，也在向着多频谱电磁吸收响应、光学透明兼容以及战场环境的自适应调控等方向发展[48-50]，如图 7 所示。以下将对具有特殊性能的吸波材料分别加以论述。

3.3.1 多频谱兼容型吸波材料

与相对单一的天空和海洋背景不同，地面背景环境光学反射、红外辐射、雷达散射特征复杂多变，同时，在战场中，地面装备会受到来自直升机跟踪雷达与红外成像、机载激光搜索与测距、陆基战场厘米波监视雷达以及反坦克导弹的毫米波/红外成像制导等多方位的准确识别与打击[51]。因此，地面装备用吸波材料应具备多频谱兼容特性，实现对电磁特征的全域抑制，才能对抗日益多样的侦测技术。雷达隐身材料需要具备低反射率、高吸收率以最大程度地损耗入射电磁波，而红外隐身则要求材料具有低发射率、高反射率来降低自身的红外辐射，廉价且性能较好的金属红外低发射率材料会产生强雷达反射，二者隐身设计原理存在一定矛盾，所以目前的研究多是针对多频谱兼容中雷达与红外的兼容[52-53]。吸波材料实现雷达/

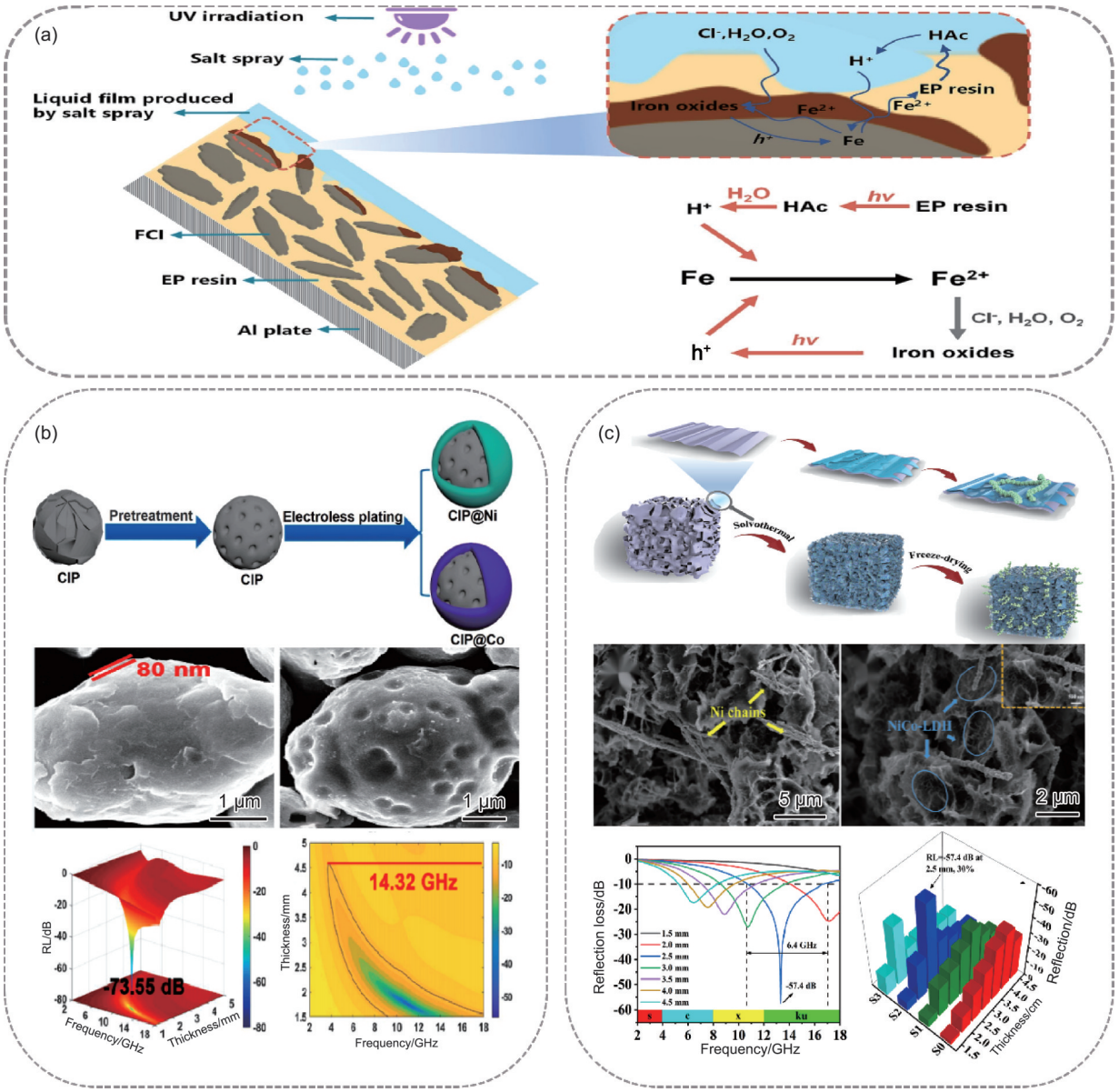


图 6　水线区域吸波材料腐蚀失效机理图(a)[37]、C@NiCo-LDHs@Ni 气凝胶形成机制图、SEM 图及不同参数下反射损耗图(b)[38]与 CIP@Co/Ni 复合材料形成机制图、SEM 图及不同参数下反射损耗图(c)[40]

Fig.6　Schematic diagram of corrosion failure mechanism in waterline region absorbing materials(a)[37], schematic diagram of the formation mechanism of C@NiCo-LDHs@Ni aerogel, SEM images, and reflection loss curves under different parameters(b)[38] and schematic diagram of CIP@Co/Ni composite formation mechanism, SEM images, and reflection loss curves under different parameters(c)[40]

红外隐身的兼容主要有以下两种方法，第一种是在雷达隐身吸波材料的外层涂覆低反射率的涂层[54-55]或者添加超表面进而实现雷达与红外隐身材料的复合[56-58]。Wu 等[59]通过热还原法和冷冻干燥法制备了三维多孔状的还原氧化石墨烯包裹硫化铜(CuS@rGO)的复合气凝胶。当 CuS 的添加量为 6% 时，复合气凝胶的有效带宽为 8.44 GHz，在 3～14 μm 的红外波段范围内发射率为 0.7。Qiao 等[60]通过溶胶-凝胶法制备了一维核壳 Fe_3O_4@SnO_2 纳米链材料，复合材料内外层磁损耗与介电损耗协同作用，在 2～5 mm 厚度下，3.2～16.88 GHz 频段内反射损耗小于 −10 dB，最小反射损耗为 −27.38 dB。同时，SnO_2 外壳有效阻隔热辐射降低了红外特征，在 3～5、8～14 μm 范围内最小红外反射率只有 0.37。潘瑶[61]制备了结构功能一体化的雷达红外隐身兼容的气凝胶吸波材料，以高孔隙率的纤维素气凝胶为基体，内部填充 Fe_3O_4/C 复合粒子作为吸波相，并在表面涂覆 Cr_2O_3 作为反射层。复合材料厚度为 3.2 mm 时，有效吸收带宽为 7.9 GHz，最小反射损耗为 −46.2 dB，同时，热导率小于 0.0350 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$，具有优异的热红外隐身性能。但 SnO_2 通常脆性较大，柔韧性和附着力差，作为反射涂层，容易从基体上剥落，影响材料的吸波性能。

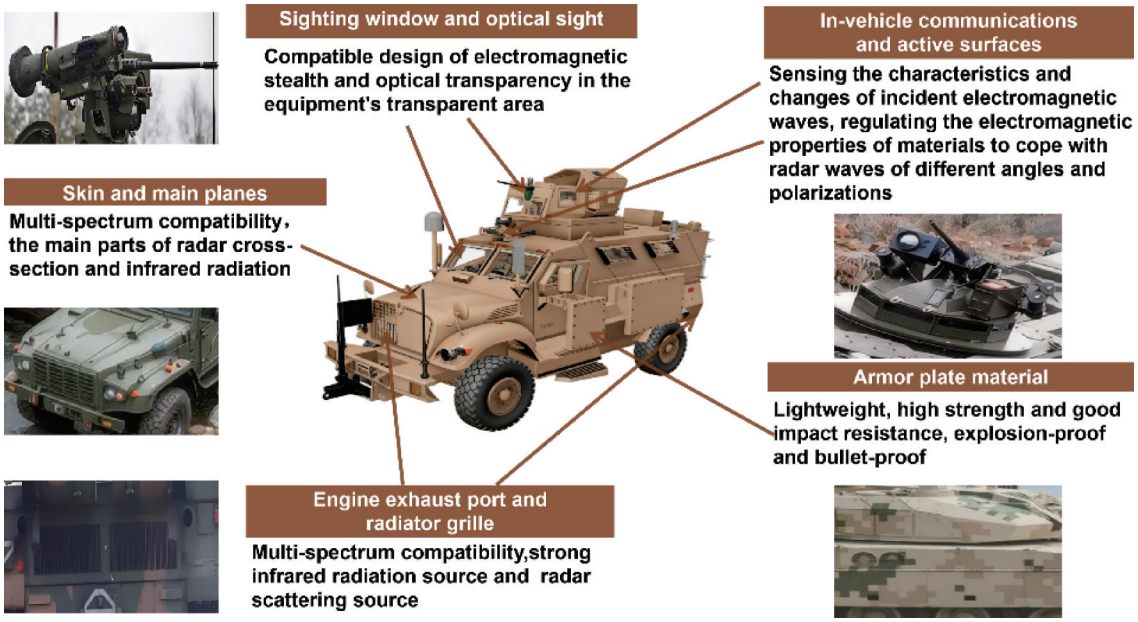


图 7 地面装备主要部件及需求示意图

Fig.7 Schematic diagram of key components and requirements for ground equipment

Gu 等[62]制备的三维碳基气凝胶，特有的多孔结构降低了其热导率、增加了极化损耗，在 3～5 μm 波段内红外发射率为 0.56，有效吸收带宽为 4.64 GHz。此外，该材料还具有环境友好、轻质等特点，为红外-雷达兼容隐身材料的发展提供了新的思路。王佳云等[63]设计并制备了一种高集成的超宽带多频谱隐身超表面，在 4.16～23.15 GHz 频率范围内吸收率大于 90%，3～14 μm 频段内红外发射率低至 0.23。该超表面通过红外屏蔽层、雷达吸收层等分层的功能设计，同时实现了雷达频段宽频隐身与红外频段低发射率特性，目前主要受限于带宽、成本和加工工艺，是未来多频谱隐身材料的重要发展趋势。俄罗斯 T-90 主战坦克、法国 AMX-10RC 装甲车、波兰 PL-01 轻型坦克等都是通过涂敷吸波材料或结构实现全频谱的隐身。

另一种是使用特殊的光子晶体、经过掺杂或者改性的半导体制备集雷达吸收与红外反射于一体的吸波材料。早在 20 世纪，半导体材料就被用于雷达与红外隐身兼容的研究中，通过掺杂或改性，能够增大半导体内部的缺陷和载流子浓度，从而提高电导率，降低材料的发射率，避开了两种隐身需求在材料本身性能上的矛盾[64-65]。汪心坤等[66]通过静电纺丝技术制备了微观结构均一的 MWCNTs/$Zn_{0.96}Co_{0.04}O$ 复合纳米纤维，多壁碳纳米管（multi-walled carbon nanotubes，MWCNTs）的掺入提高了复合材料导电性，增强了电磁波的吸收，同时降低了红外发射率。当 MWCNTs 的添加量为 6% 时，有效吸收带宽为 4 GHz，红外发射率只有 0.61。Zhang 等[67]采用水热法合成了分级 SnO_2@ZnO 纳米结构，SnO_2 纳米线以六重对称性外延生长于 ZnO 纳米棒上，SnO_2 层能够调控载流子浓度与界面极化，使得复合材料有效吸收带宽为 3.5 GHz，在中红外频段平均发射率为 0.65。Huang 等[68]制备的 3D 多孔 CuS@MoS_2/ZnO/C 气凝胶，双金属硫化物异质结构增强了其极化损耗，而负载的 ZnO 又有效降低了其红外发射率。该气凝胶有效吸收带宽为 6.62 GHz，在 8～14 μm 波段内发射率为 0.539，同时气凝胶还具有突出的隔热性和稳定性。将光子晶体、半导体等用于多频谱兼容的吸波材料，从根本上解决了多频谱的兼容性问题，具有轻质、厚度小等优点，但也面临力学性能与环境耐久性差，吸收带宽有限等不足。

3.3.2 光学透明兼容型吸波材料

地面装备与飞行器、船舰等相比，观瞄窗口占比较大，并且会搭载多种光学观测设备包括可见光摄像头、光学瞄准镜等，通过透明视窗以及这些设备能够进行战场的侦察与搜索。而这些部件使用的传统玻璃或树脂等通常是透波材料，雷达散射截面较高，很容易被机载雷达或低空雷达锁定，因此实现装备透明区域电磁隐身与光学透明的兼容设计，对于提高地面装备的作战能力十分重要[49]。

目前这一性能的实现主要依靠将传统的谐振金属以及介质材料替换为透明材料，再进行吸波设计。范鸿吉等[69]使用透明导电层氧化铟锡（indium tin oxide，ITO）以及透明介质层聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）设计并制备了一种三明治结构的透明超材料吸波体，如图 8(a)所示，当吸波体厚度为 1.8 mm 时，

有效吸收带宽为4 GHz，可见光透过率为68.1%，同时在8～14 μm波段内红外发射率只有0.249。另外，表层的ITO导电膜具有中心对称性，使得吸波体具有极化稳定性。杨午等[70]以柔性透明的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)为基底，并通过磁控溅射与激光刻蚀技术制备了图案化的ITO电阻膜功能层，所组成的超材料吸波体在5.66～22.98 GHz频段内吸收率大于90%，当入射角增大到60°时，在7～22.86 GHz频段内吸波率仍大于80%。除了具有光学透明性，吸波体还具有柔性，可以与曲面部件密切贴合，如图8(b)所示。ITO膜因兼具良好的导电性和光学透明性，在光学透明兼容型吸波材料中得到了广泛应用[71-75]。此外，石墨烯和银纳米线也被用于光学透明兼容型吸波材料的研究中。Lu等[76]以单层石墨烯频率选择表面和PET为基础，通过化学气相沉积法设计并制备了透明的宽带吸波体。实验与仿真结果表明，该吸波体在5～16 GHz频段范围内反射损耗小于－10 dB，平均透光率也达到了70%。Yang等[77]通过银纳米线(AgNWs)构建了图案化吸收层、透明介质层和AgNWs反射层的三明治构型宽频超材料吸波体，通过改变AgNWs方阻值，可以使吸波体在TE极化下于4.1～18.2 GHz频段内实现反射损耗小于－10 dB，380～780 nm内可见光的平均透射率为63%～83%。同时，吸波体还具有极化稳定性和角度稳定性。ITO虽然透光率极高，稳定性好，耐氧化等，但成本较高且脆性大，通常需要复杂的图案设计才能实现宽频段的吸收。AgNWs与传统透明导电材料相比，具有更好的柔韧性和更低的制备成本，并且吸波机制多样化，是未来光学兼容型吸波材料的主要发展方向。

3.3.3　极端冲击防护型吸波材料

地面装备的使用环境较为恶劣，在战场中可能会面临地雷等各种爆炸物的冲击和高速破片的直接威胁。爆炸产生的冲击波能够以超声速从爆炸中心向四周蔓延，具有较大的能量和破坏性[46]。如果地面装备的装甲板材料没有足够的抗冲击性，在受到冲击时可能会导致吸波层和结构的损坏，使得装备的隐身性能严重下降，同时，冲击波也可能穿过装甲板传递到作战人员造成伤害[78]。因此，制备极端冲击下的防护型吸波材料十分重要。传统的防弹防冲击材料主要是陶瓷材料和金属材料，虽然它们有一定的强度和抗冲击性，但存在密度大、韧性差等使用限制，近年来，具有轻质高强度和良好抗冲击性能的纤维增强类复合吸波材料和功能梯度类吸波材料受到了广泛应用[79]。何成[46]制备了一种由玻璃纤维复合材料、聚氨酯和多壁碳纳米管功能梯度泡沫、碳纤维等组成的三明治型轻质宽频复合吸波材料。当多壁碳纳米管的填充量为5%时，电磁波反射系数降低94.5%，冲击波透射系数降低4.35%。英国现行的QinetiQ ACAVP全塑料步兵战车，是首辆大规模使用玻璃纤维复合材料的装甲车辆，在有效阻挡冲击波的同时，几乎能够实现全面雷达隐身。张鹏[80]通过化学处理法以及纳米粒子原位负载法在碳纤维的环氧复合材料(CFC/EP)表面包覆了一层ZnO，使得复合吸波材料的有效吸收带宽为4.16 GHz，最小反射损耗为－25.3 dB，提高了冲击波的能量吸收，减小损伤面积。进一步在上述材料外层通过水热法负载了一层Fe_3O_4，最小反射损耗和有效吸收带宽都得到了改善，同时通过表面凹坑对比等发现抗冲击性能也得到进一步提高。陈虹等[81]与邵蕊[82]也通过将碳纤维与其他材料复合实现了吸波性能与防弹防冲击性能的协同。Zhang等[83]基于电磁超表面构建了一种具有抗冲击性的复合材料吸波材料。吸波体通过表面的金属谐振来控制电磁场的激发与损耗，采用芳纶织物作为基底，在实现吸波的同时提高了抗冲击性。所制备的复合材料在8～40 GHz频段内反射损耗小于－10 dB，弹体动能在53 μs内被完全吸收。碳纤维基复合吸波材料将传统的结构承载件与隐身材料结合，避免了质量与厚度大、界面结合性差等问题，能够实现结构、防护与隐身的一体化，另外，可调节的吸波性能与力学性能使其应用更加灵活。

3.3.4　环境自适应型吸波材料

地面装备需要面对战场复杂多变的电磁环境并且能够做到全天候作战，在各种频段和探测角度的雷达作用下，传统电磁吸波材料难以实现全频段和多角度的全面隐身。环境自适应型吸波材料是指能够实时感知外界入射电磁波的特性和环境变化，包括频率、极化状态以及入射角等，并调控自身材料的电磁性能，通过调整阻抗匹配或损耗机制，来实现吸波频段的拓宽或者移动，提高地面装备在动态对抗中的生存能力[49,84]。韩银涛[85]基于剪纸形变技术设计了一种具有自适应型的超构表面，主要由图案化的ITO薄膜、PET基底组成。表层的ITO图案层会随着外力的拉伸作用而发生旋转，使得结构向外展开发生适应性变化。在0°～45°的任意展开状态下，吸波体的有效吸收带宽都能维持在8 GHz左右，并且具有极化稳定性和一定的角度稳定性。此外，随着超构表面弯曲角度的增加，反射系数虽有较大的变化，但在目标频段内仍小于－10 dB，见图8(c)。这种基于剪纸形变的自适应型超构表面，稳定性与柔韧性较好，适用于共形设计，但性能的优劣与外力的方向和制备的精度密切

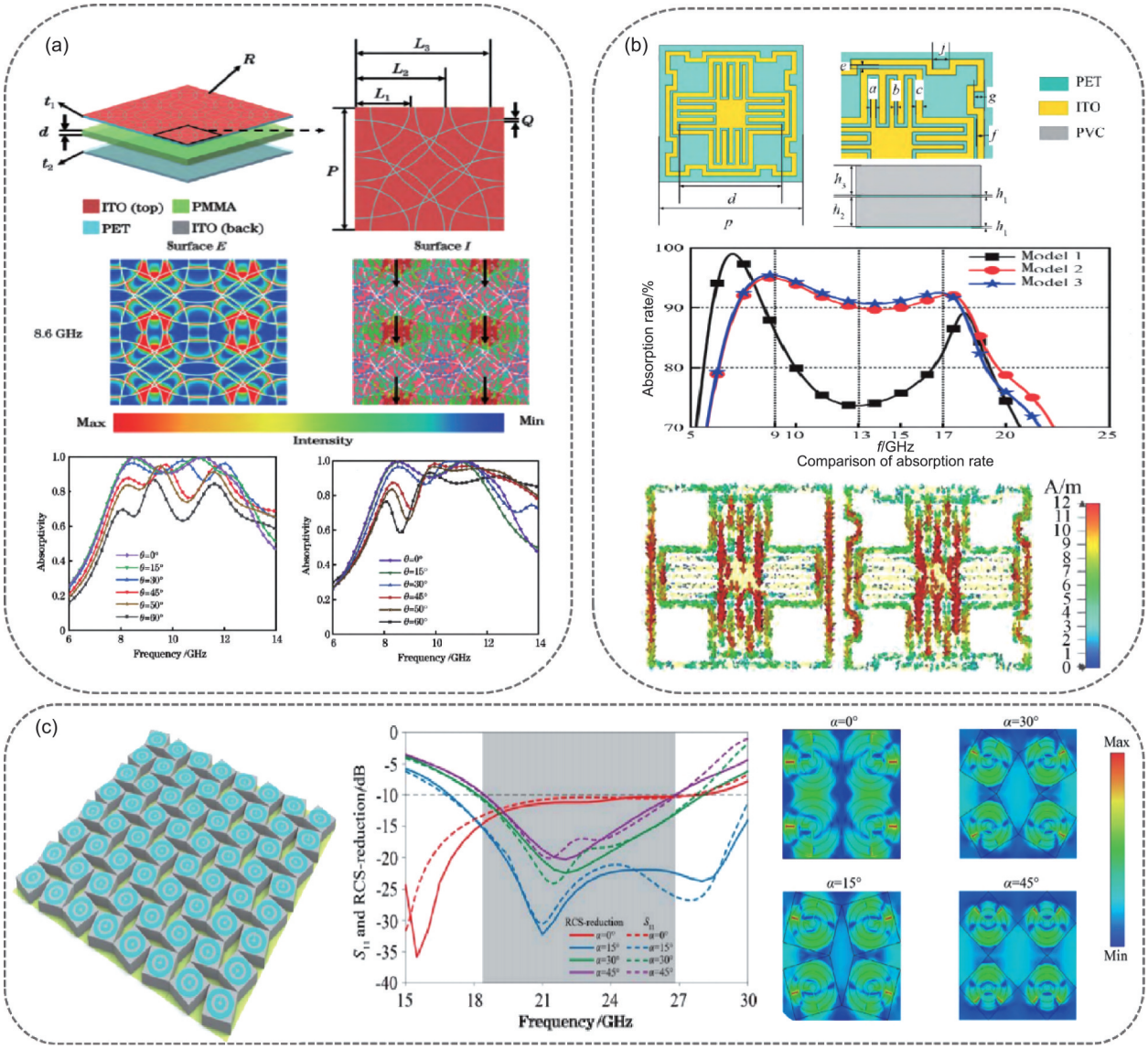


图8 兼容型超材料吸波体模型、表面电流分布图及不同极化下反射损耗曲线(a)[69]、透明超材料吸波体模型、反射损耗图及表面电流分布图(b)[70]与自适应型吸波体模型、不同弯曲角度下反射损耗图及表面电流分布图(c)[85]

Fig.8 Model of a compatible metamaterial absorber, surface current distribution diagram, and reflection loss curves under different polarizations(a)[69], model of a transparent metamaterial absorber, reflection loss diagram, and surface current distribution diagrams(b)[70] and model of an adaptive absorber, reflection loss curves at different bending angles, and surface current distribution diagrams(c)[85]

相关。单想[86]制备了一种依据功率自适应实现宽带响应的吸波体,通过研究PIN二极管在偏置状态下的电阻调控机理,实现了超表面色散特性与吸波特性的协同调控,进而在宽频域内获得可调节的吸波性能。经实验验证,当入射功率从5 dBm增至20 dBm时,吸波体在4.93~5.56 GHz频段内的吸收率从30%提升至80%,最大调控范围为19.4%~92.7%。他还设计了一种吸透波一体的超表面结构,利用集总电阻的耗散机制与PIN二极管的通断效应,在目标频段内能够实现吸波与透射性能的快速转换,并且在透射频段的两侧吸收率仍大于80%。Fang等[87]将PIN二极管与吸波蜂窝层相结合,通过调节PIN二极管的偏置电压,可以改变其电阻进而调节反射损耗幅值。所涉及的吸波体有效吸收带宽达到15 GHz,反射损耗幅值的变化范围达到10 dB。将PIN二极管与传统吸波蜂窝结合,不仅拓宽了吸收频带,还实现了承载与吸波的一体化,在工程上具有较大的应用潜力。但PIN的加入无疑会增加吸波材料的成本和精密度要求。高鑫[49]在吸波体外端施加激励,利用石墨烯电阻值的可调性以及等离子体频率的可变性,设计了一种反射损耗与吸收频带双重可调节的自适应型吸波材料。石墨烯与等离子体的复合使吸收频带拓宽的同时向低频方向移动,在1~10 GHz频段内反射损耗小于−10 dB。石墨烯自适应型吸波材料能够实现吸收频带和损耗

强度的双重调节，并且具有轻质、柔韧性好等特点，适用于新型的柔性可穿戴电子设备。赵业浩[88]利用自然界中最常见的资源水以及电阻膜设计了一款低频超材料吸波体，该吸波体不仅具有较好的极化稳定性和角度稳定性，此外，在较低温度下，随着水介质层温度的升高，吸收频点和带宽都会发生变化。水基超材料吸波体作为自适应型吸波材料具有环境友好、低密度、低成本、透明等优势，但也面临吸收频带较窄、厚度大、结构复杂等不足。

地面装备的生存与突防能力是发挥各类武器作战效能的重要保障，因此提高地面装备的伪装隐身能力，可提高其生存能力进而有效支撑作战[89]。多频谱兼容型、光学透明型、极端冲击防护型、环境自适应型吸波材料能够使地面装备在复杂苛刻的陆地战场环境中，平衡隐身性能、防护能力、环境适应性等其他功能性需求。在此基础上，针对地面装备的特点，还需要考虑这些吸波材料的效费比以及可维护性。图 9 是吸波材料在不同装备中的实际应用示意图，各装备用吸波材料研究现状及主要特点如表 1[6-8,10-11,13,15,17-18,22-24,27-30,32-33,36,38,40-41,46,49,59-62,66-70,76-77,80,83,85-88]所示。

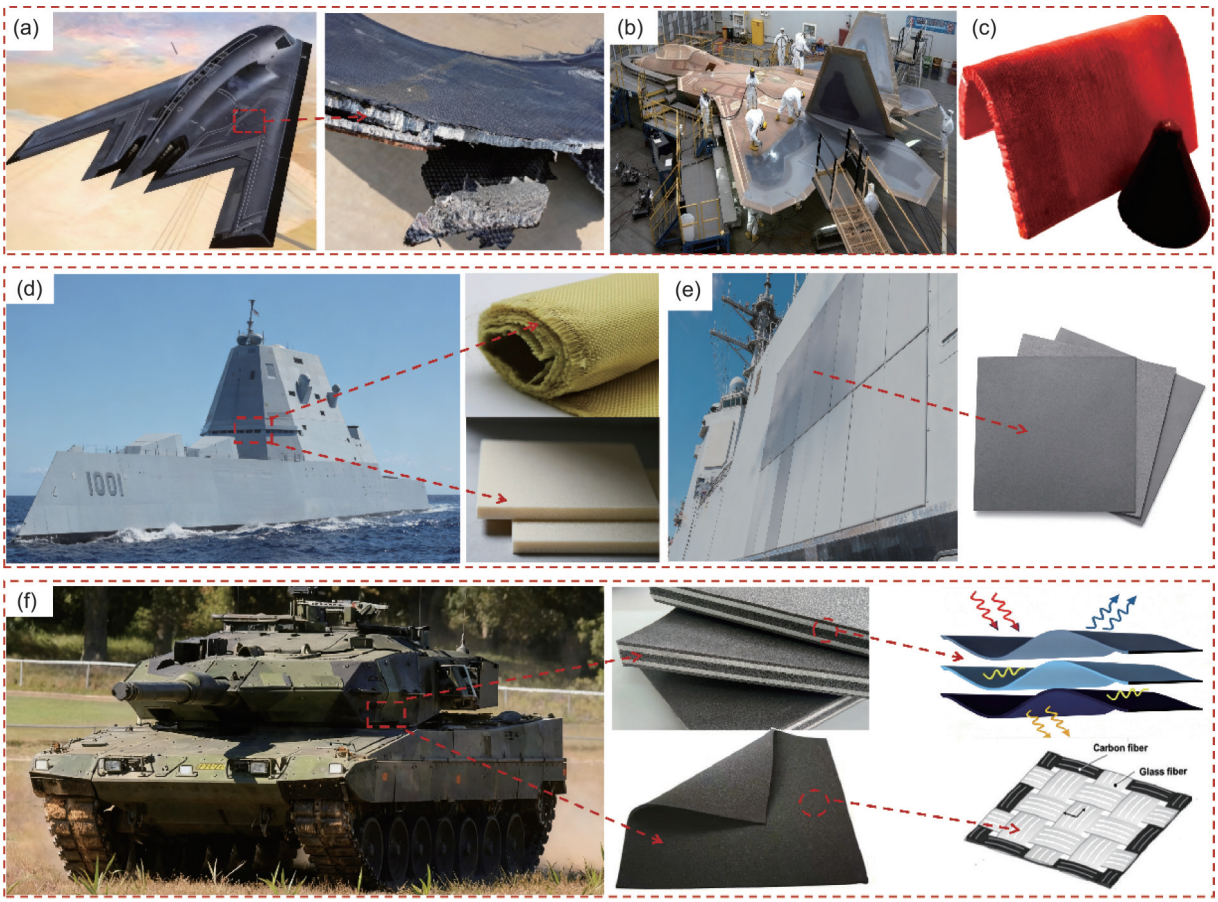


图 9　吸波材料应用示意图

(a)机身、机翼蜂窝吸波结构示意图；(b)涂敷型吸波材料示意图；(c)翼缘、雷达罩用蜂窝吸波结构示意图；(d)上层建筑及桅杆用碳纤维、泡沫吸波材料示意图；(e)舰艇局部用涂敷型吸波材料示意图；(f)地面装备多频谱兼容复合吸波材料示意图(外层可见光红外隐身层，内层为雷达隐身层)、冲击防护型吸波材料示意图(纤维编制型吸波材料)

Fig.9　Schematic diagram of applications in microwave absorbing materials

(a)schematic diagram of the honeycomb absorber structure in the fuselage and wings; (b)schematic diagram of a coating-type absorbing material; (c)schematic diagram of the honeycomb absorber structure in flange and radar dome; (d)carbon fiber and foam absorbers for superstructure and masts; (e)schematic diagram of coating-type absorbing materials for ship section; (f)schematic diagram of multi-spectrum compatible composite absorbing material for ground equipment(outer layer: visible light and infrared stealth coating, inner layer: radar stealth layer), schematic diagram of impact-resistant absorbing materials(fiber-woven absorbing materials)

4　未来发展趋势

本文对吸波材料的定义、分类及单一材料的吸波机理进行了论述，并从应用背景出发，系统归纳总结了航空航天用吸波材料、舰艇用吸波材料以及地面装备用吸波材料的主要特点和研究现状。未来，随着技

表 1 各装备用吸波材料研究现状及主要特点

Table 1 Research status and key characteristics of absorbing materials for various equipments

Equipment type	Category	Substrate type	Absorbent or structure	RL_{min}/dB	EAB/GHz	Performance/Feature	Ref.
Aerospace	Coating	Carbon-based	CB/PI/MXene	−56.3	4.2	Lightweight, excellent thermal stability, high temperature resistant	[6]
			CNT-ZnO	−70	3.4		[7]
			S-GA	−25	5.2		[8]
		Ceramic-based	SiC/Si_3N_4	−48.6	7.4		[10]
			BN@SiOC	−40	6		[11]
			SiO_2/C@SiC/SiO	−18	5.2		[13]
		Metal oxide	Co_3O_4@rGO/SiO_2	−52.6	4	Oxidation-resistant	[15]
			Fe@ZrO_2	−45.36	10		[17]
			$K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$(KNN)/ZrO_2/Al_2O_3	−16.25	12		[18] [22]
	Structural		CNT/SiC	−16.29	4.4	High-temperature resistant, excellent stability, low density, compressible, thermal insulation	[23]
			CF/PMI	−50	14		[24]
			SiC/Si_3N_4	−20	7		[27]
			FSS/SiO_2/PI/CB	−25	12.38		[28]
			SiC/C	−40	14		
Warship	Deck		CF/PEEK			Excellent mechanical properties, wear resistance	[29]
			T700CF/vinyl ester				[30] [32]
	Super-structure		Epoxy-based silicate			Lightweight, weather resistant, UV-resistant	[33]
			CIP@SiO_2	−25.6	8.3		[30]
	Mast		FSS/fiber(foam)MA			Multiband, compatibility	[36] [38]
	Chimney		FeNi@C	−47.26	7.06	Resistant to inorganic corrosion and high-temperature oxidation	[40] [41]
	Waterline area		C@NiCo-LDHs@Ni	−57.4	6.4	Impact-resistant, corrosion-resistant, inhibits bacterial adhesion	
			CIP@Co/Ni	−71.11	8		
			ARZn-x	−40.18	22		
Ground vehicle	Multi-spectrum compatibility		CuS@rGO	−25	7.2	Low infrared emissivity	[59]
			Fe_3O_4@SnO_2	−27.38	13.68		[60]
			Fiber/Fe_3O_4/C/Cr_2O_3	−46.2	7.9		[61]
			Carbon aerogel	−19.8	4.64		[62]
			MWCNTs/$Zn_{0.96}Co_{0.04}O$	−26.4	4		[66]
			SnO_2@ZnO	−23.51	3.5		[67]
			CuS@MoS_2/ZnO/C	−19	6.62		[68]
	Optical transparency compatibility		ITO/PMMA MA		4	Optical transparency, flexibility, angular and polarization stability	[69]
			ITO/PET		17.32		[70]
			Graphene-FSS/ITO		11		[76]
			AgNWs MA	−14	14.1		[77]
	Extreme impact protection		Fiberglass/PU/CNT	−25	13.1	Impact-resistant, bullet-proof, blast resistant	[46]
			CFC/EP@ZnO	−25.3	4.16		[80]
			Aramid fabric MA	−34	32		[83]
	Environment adaptive		ITO/PET MA	−31	8	High environmental adaptability	[85]
			PIN MMA	−40	1.2		[86]
			PIN/honeycomb	−28	15		[87]
			Graphene	−27.5	10		[49]
			Water, resistive film	−25	0.42		[88]

术的发展和应用需求的提高，无论是军事领域还是民用层面，研发具有多功能兼容的新型高性能吸波材料是应对现代化国防与高新产业严峻挑战的必然选择。重点关注以下方面的发展，能够在改善传统吸波材料性能的基础上进一步发展新材料新技术：

（1）进一步探究吸波材料的损耗机理。与传统吸波材料不同，新一代宽频多功能吸波材料通常为多元、多相复合材料，依靠多种不同损耗机制的协同作用，而传统的阻抗匹配分析、电磁衰减机制分析仍停留在宏观电磁参数层面，需要进一步优化材料或结构等效电磁参数的提取方式，为发展更为准确、智能的反演算法与多模态分析提供数据基础[90]；进一步研究材料性能的本征机理，通过材料模拟计算或者多尺度、多物理场的表征分析，重点分析微纳米尺度材料与界面特性对吸波性能的影响，才能开发出更多的多功能型复合吸波材料[5,12]。

（2）聚焦具有独特电磁响应特性的新材料方向，推动吸波材料体系的迭代升级。一是重点研究低维纳米材料（如石墨烯、MXene、碳纳米管）、金属有机框架（metal-organic frameworks，MOFs）衍生碳基材料、磁性-介电异质结材料等，利用其微观结构与组分优势实现高效吸波；二是探索“超材料/超表面吸波结构”的设计与应用，通过人工调控电磁参数实现对特定频段电磁波的精准吸收，突破传统材料的吸波频段限制，满足现代化国防对宽频、可调谐吸波的需求。

（3）多功能化、兼容化吸波材料是未来新型吸波材料的主要发展趋势。在进一步拓宽频段、提升吸收强度、降低密度的同时，需要重点开发兼具优异吸波性能（宽频带、高吸收强度）与场景适配功能的材料体系。例如，针对航空航天领域研发“高耐候-行波衰减材料[91]”、“高吸波-抗烧蚀/耐高温-轻量化”一体化材料；针对舰艇领域开发“宽频吸波-抗海洋腐蚀”复合材料；针对地面装备领域设计“吸波-抗冲击-易维护”集成材料，以满足不同应用场景的多维度需求。同时，需要结合低成本规模化合成技术，提升传统材料的工程化应用潜力，实现“低成本-高性能”的平衡。

（4）强化吸波材料面向工程化落地的设计理念。针对航空航天、舰艇、地面装备等细分领域的差异化需求，强化“材料设计-性能测试-工程应用”的闭环设计理念：一方面，完善针对特定需求的吸波材料性能评价体系，如模拟高温烧蚀、高空低温、海洋高湿、地面复杂电磁环境的测试平台，确保材料性能与实际应用场景匹配；另一方面，从用户端出发，针对性设计开发适用于装备一体化成型的吸波材料制备技术，提高工程化成型能力，推动实验室成果向实际装备应用转化。

（5）打破“重军事、轻民用”的研发局限，推动吸波材料在民用领域的创新应用。民用防护需求与军用防护需求存在波段、振幅等方面的区别，除了军事需求，还可以关注开发用于电子设备、5G 基站的特定频段吸波屏蔽材料，解决电磁干扰问题；在新能源领域，探索用于动力电池、储能设备的吸波-导热一体化材料，提升设备安全性。通过军民技术互通、资源共享，进一步拓展吸波材料的产业边界，推动其向高新民用产业渗透，形成军民融合良性循环。

参考文献

[1] 王一帆，朱琳，韩露，等. 电磁吸波材料的研究现状与发展趋势[J]. 复合材料学报，2023，40(1)：1-12.
WANG Y F，ZHU L，HAN L，et al. Research status and development trend of electromagnetic absorbing materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2023，40(1)：1-12.

[2] 姜雨良. 静电纺丝技术制备聚丙烯腈基碳纳米纤维及其吸波性能研究[D]. 济南：山东大学，2020.
JIANG Y L. Preparation of polyacrylonitrile-based carbon nanofibers by electrospinning and their microwave absorbing properties[D]. Jinan：Shandong University，2020.

[3] 李天天，夏龙，黄小萧，等. 介电损耗型微波吸收材料的研究进展[J]. 材料工程，2021，49(6)：1-13.
LI T T，XIA L，HUANG X X，et al. Progress in dielectric loss microwave absorbing materials[J]. Journal of Materials Engineering，2021，49(6)：1-13.

[4] QIN M，ZHANG L M，WU H J. Dielectric loss mechanism in electromagnetic wave absorbing materials[J]. Advanced Science，2022，9(10)：2105553.

[5] 陈政伟，范晓孟，黄小萧，等. 高温吸波陶瓷材料研究进展[J]. 现代技术陶瓷，2020，41(增刊1)：1-98.
CHEN Z W，FAN X M，HUANG X X，et al. Research progress and prospection on high-temperature wave-absorbing ceramic materials[J]. Advanced Ceramics，2020，41(Suppl 1)：1-98.

[6] CHAO M，ZHANG B，YANG J H，et al. MXene/carbon black/polyimide aerogels：integrating microwave absorption，thermal stability，flame retardancy，and hydrophobicity[J]. Carbon，2025，245：120842.

[7] KONG L，YIN X W，HAN M K，et al. Carbon nanotubes modified with ZnO nanoparticles：high-efficiency electromagnetic wave absorption at high-temperatures[J]. Ceramics International，2015，41(3)：4906-4915.

[8] LIU W，TAN S J，YANG Z H，et al. Hollow graphite spheres embedded in porous amorphous carbon matrices as lightweight and low-frequency microwave absorbing material through modulating dielectric loss[J]. Carbon，2018，138：143-153.

[9] YANG H J，YUAN J，LI Y，et al. Silicon carbide powders：temperature-dependent dielectric properties and enhanced microwave absorption at gigahertz range[J]. Solid State Communications，2013，163：1-6.

[10] WANG L, CAI Z X, SU L, et al. Bifunctional SiC/Si_3N_4 aerogel for highly efficient electromagnetic wave absorption and thermal insulation [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2023, 12(2): 309-320.

[11] HOU Y Z, YANG W, ZHONG C, et al. Thermostable SiCO@BN sheets with enhanced electromagnetic wave absorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 378: 122239.

[12] 徐俊杰,王岭,王晓猛,等.耐高温吸波材料的研究进展[J].现代技术陶瓷,2024,45(3):189-205.
XU J J, WANG L, WANG X M, et al. Research progress of high temperature absorbing materials [J]. Advanced Ceramics, 2024, 45(3): 189-205.

[13] LIU C Y, HE T A, HU C C, et al. The optimized design of sandwich structured SiO_2/C@SiC/SiO_2 composites through numerical simulation for temperature-resistant radar and infrared compatible stealth [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(9): 2416108.

[14] 王龙,许可俊,汪刘应,等.装备隐身技术的智能化发展[J].现代防御技术,2020,48(6):96-102.
WANG L, XU K J, WANG L Y, et al. Intelligent development of equipment stealth technology [J]. Modern Defence Technology, 2020, 48(6): 96-102.

[15] MA J R, SHU J C, CAO W Q, et al. A green fabrication and variable temperature electromagnetic properties for thermal stable microwave absorption towards flower-like Co_3O_4@rGO/SiO_2 composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 166: 187-195.

[16] 柏吉兴,曹祺,姜淼,等.锆基复合高温吸波材料的研究进展[J].航空科学技术,2024,35(9):1-18.
BAI J X, CAO Q, JIANG M, et al. Research progress of zirconium-based composite high temperature microwave absorbing materials [J]. Aeronautical Science and Technology, 2024, 35(9): 1-18.

[17] JAVID M, ZHOU Y L, ZHOU T H, et al. *In-situ* fabrication of Fe@ZrO_2 nanochains for the heat-resistant electromagnetic wave absorber [J]. Materials Letters, 2019, 242: 199-202.

[18] YANG Z N, SUN M, LI J W, et al. Microwave-absorbing performance of a radar-absorbing structure composed of $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$/ZrO_2/Al_2O_3 heterojunction [J]. Ceramics International, 2021, 47(22): 31811-31816.

[19] 王彦淇,邹如荣,胡晓洪,等.复杂服役环境下雷达吸波涂层研究进展[J].包装工程,2024,45(23):131-144.
WANG Y Q, ZOU R R, HU X H, et al. Research progress of radar wave-absorbing coatings in complex service environments [J]. Packaging Engineering, 2024, 45(23): 131-144.

[20] 刘海韬,程海峰,王军,等.高温结构吸波材料综述[J].材料导报,2009,23(19):24-27.
LIU H T, CHENG H F, WANG J, et al. Review on high-temperature structural radar absorbing materials [J]. Materials Review, 2009, 23(19): 24-27.

[21] 王江涛,陈帅,沈承,等.吸波材料/结构及吸波-承载功能一体化结构研究进展[J].复合材料学报,2024,41(8):3866-3882.
WANG J T, CHEN S, SHEN C, et al. Progress of wave-absorbing materials/structures and wave absorbing-load bearing multifunctional structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 3866-3882.

[22] 吴笑涵,张晓山,张松鹤,等.CNT/SiC微纳纤维电磁吸波性能[J].陶瓷学报,2025,46(3):580-587.
WU X H, ZHANG X S, ZHANG S H, et al. Microwave absorption properties of CNT/SiC micro/nanofibers [J]. Journal of Ceramics, 2025, 46(3): 580-587.

[23] JIAO Z B, HUYAN W, YANG F, et al. Achieving ultra-wideband and elevated temperature electromagnetic wave absorption *via* constructing lightweight porous rigid structure [J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14(1): 173.

[24] LAN X L, ZHAO H R, ZHANG B X, et al. Ultralight, compressible, and high-temperature-resistant dual-phase SiC/Si_3N_4 felt for efficient electromagnetic wave attenuation [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 425: 130727.

[25] 周万城,王婕,罗发,等.高温吸波材料研究面临的问题[J].中国材料进展,2013,32(8):463-472.
ZHOU W C, WANG J, LUO F, et al. Problems faced with high-temperature microwave absorbing materials [J]. Materials China, 2013, 32(8): 463-472.

[26] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.

[27] WANG Y, YI S H, SUN X, et al. Electromagnetic wave absorbing metastructure for high-temperature resistant and broadband application [J]. Materials Today Nano, 2025, 29: 100572.

[28] LI W C, LI C S, LIN L H, et al. All-dielectric radar absorbing array metamaterial based on silicon carbide/carbon foam material [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781: 883-891.

[29] 熊超.连续碳纤维/聚醚醚酮复合材料制备及其性能研究[D].南昌:南昌大学,2018.
XIONG C. Preparation and properties of CCF/PEEK composites [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.

[30] 钱江,李楠,史文强.复合材料在国外海军舰船上层建筑上的应用与发展[J].舰船科学技术,2015,37(1):233-237.
QIAN J, LI N, SHI W Q. The application and development of composites for foreign naval warships' superstructure [J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(1): 233-237.

[31] 方源,王华侨,杨鑫,等.碳纤维基复合吸波材料的研究进展[J].复合材料学报,2025,42(11):6111-6129.
FANG Y, WANG H Q, YANG X, et al. Research progress of carbon fiber-based composite microwave absorbing materials [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(11): 6111-6129.

[32] 宋心荣.俄罗斯海军12700型扫雷舰[J].兵器知识,2017(12):34-38.
SONG X R. Russian navy 12700 minesweeper [J]. Ordnance Knowledge, 2017(12): 34-38.

[33] 胡悦,张桐,官明君,等.SiO_2包覆羰基铁粉及其涂层的耐腐蚀性能[J].陶瓷学报,2021,42(5):842-848.
HU Y, ZHANG T, GUAN M J, et al. Carbonyl iron powders with silica coating and long-time corrosion resistance [J]. Journal of Ceramics, 2021, 42(5): 842-848.

[34] FENG B, FENG C, ZHONG J T, et al. Revolutionizing naval stealth: advanced composite mast design unveiled [J]. Ships and

Offshore Structures,2025:1-16.

[35] CHEN Z W, YAO G Y. Analysis of radar and infrared stealth compatibility design for surface ships[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2019,252:052132.

[36] 雷子璇.Fe基磁性纳米胶囊电磁波吸收与抗腐蚀性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2023.
LEI Z X. Electromagnetic wave absorption and corrosion resistance of iron-based magnetic nanocapsules[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2023.

[37] XIA L, WANG K, XU W Q, et al. Synergistic acceleration effects of ultraviolet and salt spray on the degradation and failure of electromagnetic wave-absorbing coatings [J]. Progress in Organic Coatings,2023,182:107686.

[38] WANG Y, DI X C, CHEN J, et al. Multi-dimensional C@NiCo-LDHs@Ni aerogel: structural and componential engineering towards efficient microwave absorption, anti-corrosion and thermal-insulation[J]. Carbon,2022,191:625-635.

[39] 杨亮.舰艇雷达隐身快速修复涂料及其界面行为研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008.
YANG L. Study on quick-solidified warship radar absorbing coatings and interface behavior of coatings [D]. Changsha: National University of Defense Technology,2008.

[40] LI Y, LI X A, JIN K X, et al. Enduring effect mechanism of Co (Ni) layers on excellent microwave absorption performance of carbonyl iron in seawater[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2022,564:170202.

[41] ZHOU W J, ZHOU Y, NI C H, et al. Research on electromagnetic wave absorption properties of zinc-based acrylate resins for marine antifouling coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022,900:163285.

[42] 岳扬.潜艇雷达散射特征分析与控制方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2024.
YUE Y. Analysis of radar scattering characteristics of submarine and research on control method [D]. Xi' an: Xidian University, 2024.

[43] 王志宇,苏赫,瞿宏升.潜艇桅杆通信天线隐身技术发展研究[J].舰船电子工程,2025,45(2):13-16.
WANG Z Y, SU H, QU H S. Research on stealth technology for submarine mast communication antennas[J]. Ship Electronic Engineering,2025,45(2):13-16

[44] 王峰,崔健禄,王源农.中长波通信技术发展分析与展望[J].船舶标准化与质量,2024(6): 23-24.
WANG F, CUI J L, WANG Y N. Analysis and prospect of the development of medium to long wave communication technology [J]. Shipbuilding Standardization and Quality, 2024(6): 23-24.

[45] 侯瑞,张子栋,刘峣.舰船用电磁吸波材料的研究现状及展望[J].材料开发与应用,2025,41(2):64-77.
HOU R, ZHANG Z D, LIU Y. Research status and perspectives of electromagnetic wave absorption materials used in ship[J]. Development and Application of Materials,2025,41(2):64-77.

[46] 何成.复合材料三明治结构装甲板的电磁和冲击性能研究[D].长沙:湖南大学,2016.
HE C. On the study of electromagnetic and shock wave property of a sandwich vehicular armour plate with composites[D]. Changsha: Hunan University,2016.

[47] 方涛,赵琴,张官亮.装甲战车隐身技术的研究现状及应用[J].兵器装备工程学报,2023,44(12):133-140.
FANG T, ZHAO Q, ZHANG G L. Research status and application of stealth technology for armored fighting vehicle[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2023,44(12):133-140.

[48] 陈天航,何磊明,袁宏皓,等.电磁超材料及智能超材料隐身技术发展现状及趋势[J].空军工程大学学报,2023,24(3):26-33.
CHEN T H, HE L M, YUAN H H, et al. Current development and future of electromagnetic meta-materials and intelligent cloaking technology based on smart meta-materials[J]. Journal of Air Force Engineering University,2023,24(3):26-33.

[49] 高鑫.三种伪装隐身材料电磁散射机理及特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.
GAO X. Electromagnetic scattering mechanism and characteristics of three camouflage stealth materials [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2024.

[50] 杨建明,李洒,巩超.军用特种车辆工业设计研究综述[J].包装工程,2021,42(20):29-48.
YANG J M, LI S, GONG C. Review on industrial design of military special vehicles [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(20): 29-48.

[51] 周光华,周学梅.坦克装甲车辆的多频谱隐身技术分析[J].四川兵工学报,2010(9):45-47.
ZHOU G H, ZHOU X M. Analysis of multi-spectrum stealth technology for tank armored vehicles[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010(9):45-47.

[52] 周鹏飞,朱洪立,李明俊,等.超材料在军用隐身中的应用研究[J].材料工程,2024,52(2):112-121.
ZHOU P F, ZHU H L, LI M J, et al. Application research in metamaterials for military stealth[J]. Journal of Materials Engineering, 2024,52(2):112-121.

[53] ZHAO Y, JI G B. Multi-spectrum bands compatibility: new trends in stealth materials research[J]. Science China Materials,2022,65(11):2936-2941.

[54] 梁娟,徐国跃,郭腾超,等.影响低发射率涂层与超材料吸波体兼容的关键因素探究[J].红外技术,2018,40(1):14-19.
LIANG J, XU G Y, GUO T C, et al. Study on key factor influencing compatible property of low-emissivity coating with metamaterials[J]. Infrared Technology,2018,40(1):14-19.

[55] 梁娟.基于超材料的红外低发射率涂层制备及其兼容性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
LIANG J. Research on preparation and compatible property of coating with low emissivity based on metamaterial [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2018.

[56] 张琤.基于超材料的隐身技术研究[D].南京:东南大学,2019.
ZHANG C. Research of stealth technology based on metamaterial [D]. Nanjing: Southeast University,2019.

[57] 李君哲,田浩,刘海韬,等.一种基于超材料的雷达红外兼容隐身材料设计与验证[J].功能材料,2017,48(5):5137-5143.
LI J Z, TIAN H, LIU H T, et al. Design and verification of a radar-infrared stealth-compatible material based on metamaterial

[J].Journal of Functional Materials,2017,48(5):5137-5143.

[58] 徐翠莲,孟跃宇,王甲富,等.光学透明红外与雷达兼容隐身复合超表面[J].光子学报,2021,50(4):153-162.
XU C L,MENG Y Y,WANG J F,et al.Optically transparent hybrid metasurfaces for low infrared emission and wideband microwave absorption[J].Acta Photonica Sinica,2021,50(4):153-162.

[59] WU Y,ZHAO Y,ZHOU M,et al.Ultrabroad microwave absorption ability and infrared stealth property of nano-micro CuS@rGO lightweight aerogels[J].Nano-Micro Letters,2022,14(1):171.

[60] QIAO M T,TIAN Y R,LI J X,et al.Core-shell Fe_3O_4@SnO_2 nanochains toward the application of radar-infrared-visible compatible stealth[J].Journal of Colloid and Interface Science,2022,609:330-340.

[61] 潘瑶.纤维素基多波段隐身材料的制备及其性能研究[D].上海:东华大学,2025.
PAN Y.Preparation of cellulose-based multi-band stealth materials and its performance research[D].Shanghai:Donghua University,2025.

[62] GU W H,XIA A L,JIN C G,et al.An ultralight,eco-friendly 3D porous carbon aerogel derived from cotton nano-cellulose for infrared stealth and microwave absorption[J].Carbon,2024,229:119565.

[63] 王佳云,康晋峰,屈增,等.多光谱雷达-红外兼容超宽带隐身超表面[J].光学学报,2024,44(20):2024003.
WANG J Y,KANG J F,QU Z,et al.Multispectral radar-infrared compatible ultra-wideband stealth metasurface[J].Acta Optica Sinica,2024,44(20):2024003.

[64] 徐国跃,钱淇,方罡,等.多频段隐身材料的研究现状与进展[J].航空科学技术,2022,33(1):1-9.
XU G Y,QIAN Q,FANG G,et al.Research status and progress of multi-spectrum stealth materials[J].Aeronautical Science and Technology,2022,33(1):1-9.

[65] WU Y,TAN S J,ZHAO Y,et al.Broadband multispectral compatible absorbers for radar,infrared and visible stealth application[J].Progress in Materials Science,2023,135:101088.

[66] 汪心坤,程兆刚,赵芳,等.MWCNTs/$Zn_{0.96}Co_{0.04}O$复合纳米纤维的电纺制备及其红外/雷达兼容隐身性能[J].稀有金属材料与工程,2020,49(12):4262-4270.
WANG X K,CHENG Z G,ZHAO F,et al.Electrospinning fabrication and infrared-radar compatible stealth properties of MWCNTs/$Zn_{0.96}Co_{0.04}O$ composite nanofibers[J].Rare Metal Materials and Engineering,2020,49(12):4262-4270.

[67] ZHANG Z Y,XU M Z,RUAN X F,et al.Enhanced radar and infrared compatible stealth properties in hierarchical SnO_2@ZnO nanostructures[J].Ceramics International,2017,43(3):3443-3447.

[68] HUANG Q Q,ZHANG Y Q,TAN S J,et al.Multi-interfacial engineering in the hierarchical self-assembled micro-nano dielectric aerogel for wide-band absorption and low infrared emissivity[J].Journal of Colloid and Interface Science,2023,649:76-85.

[69] 范鸿吉,徐明,苏莹,等.雷达与红外波段兼容隐身的透明超材料吸波体[J].光学学报,2025,45(8):285-296.
FAN H J,XU M,SU Y,et al.Transparent metamaterial absorber for radar and infrared compatible stealth[J].Acta Optica Sinica,2025,45(8):285-296.

[70] 杨午,罗隽,周艳萍,等.高角度稳定的柔性透明频率选择表面吸波体[J].太赫兹科学与电子信息学报,2025,23(4):366-375.
YANG W,LUO J,ZHOU Y P,et al.Flexible and optically transparent FSS absorber with high angular stability[J].Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology,2025,23(4):366-375.

[71] 凌慧敏.一种基于蜂窝式的光学透明宽带超材料吸波器[J].无线通信技术,2025,34(1):27-30.
LING H M.An optical transparent broadband metamaterial absorber based on honeycomb structure[J].Wireless Communication Technology,2025,34(1):27-30.

[72] 张崇唤,王成蓉,尹星锐,等.一种光学透明的宽带薄型FSS吸波体[C]//中国电子学会电磁兼容分会.第30届全国电磁兼容学术会议论文集.成都:四川大学电子信息学院,2024:312-315.
ZHANG C H,WANG C R,YIN X R,et al.An optically transparent broadband thin FSS absorber[C]//Electromagnetic Compatibility Branch of the Chinese Institute of Electronics.Proceedings of the 30th National Conference on Electromagnetic Compatibility.Chengdu:College of Electronics and Information Engineering of Sichuan University,2024:312-315.

[73] 黄晓俊,高丽娜,曹苗,等.宽带柔性透明超材料吸波体设计[J].光子学报,2024,53(8):0823002.
HUANG X J,GAO L N,CAO M,et al.Design of flexible and transparent metamaterial absorber with broadband[J].Acta Photonica Sinica,2024,53(8):0823002.

[74] MENG Z,LIU D Q,XU C L,et al.Multifunctional integrated metamaterials for radar-infrared-visible compatible multispectral stealth[J].Optics Express,2024,32(10):17869-17878.

[75] XIONG Y,CHEN F,CHENG Y Z,et al.Rational design and fabrication of optically transparent broadband microwave absorber with multilayer structure based on indium tin oxide[J].Journal of Alloys and Compounds,2022,920:166008.

[76] LU W B,WANG J W,ZHANG J,et al.Flexible and optically transparent microwave absorber with wide bandwidth based on graphene[J].Carbon,2019,152:70-76.

[77] YANG C,CHANG H C,XIAO L,et al.Visible and NIR transparent broadband microwave absorption metamaterial based on silver nanowires[J].Optical Materials,2022,131:112464.

[78] RAGEL B T,ALLRED C D,BREVARD S,et al.Fractures of the thoracolumbar spine sustained by soldiers in vehicles attacked by improvised explosive devices[J].Spine,2009,34(22):2400-2405.

[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] 张鹏.碳纤维布表面原位改性对其环氧复合材料吸波与抗冲击性能影响的研究[D].太原:中北大学,2024.
ZHANG P.Study on the effect of *in-situ* surface modification of carbon fiber cloth on the wave-absorbing and impact-resistant properties of its epoxy composite materials[D].Taiyuan:North University of China,2024.

[81] 陈虹，李年华，许冬梅，等．吸波/防弹复合材料的研发[J]．合成纤维，2024，53(3)：16-19.
CHEN H，LI N H，XU D M，et al. Research and development on absorbent/bulletproof composites [J]. Synthetic Fiber in China，2024，53(3)：16-19.

[82] 邵蕊．吸波防弹复合材料的制备以及性能研究[D]．上海：东华大学，2023.
SHAO R. Preparation of microwave absorption & bulletproof composites and the study of their performance[D]. Shanghai：Donghua University，2023.

[83] ZHANG H，ZHANG Z K，LI B Y. Design of stealth bulletproof material based on sub-wavelength absorbing structure [J]. IOP Conference Series：Materials Science and Engineering，2020，774(1)：012097.

[84] 王向伟．自适应伪装技术及材料研究需求[J]．功能材料信息，2007(5)：53.
WANG X W. Research requirements of adaptive camouflage technology and materials [J]. Functional Materials Information，2007(5)：53.

[85] 韩银涛．基于剪纸形变的自适应超构表面结构和器件设计[D]．杭州：浙江大学，2024.
HAN Y T. A design of kirigami-based adaptable metasurface structures and devices[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2024.

[86] 单想．基于超表面的动态可调吸波器设计[D]．南京：东南大学，2023.
SHAN X. Tunable absorber design based on metasurface [D]. Nanjing：Southeast University，2023.

[87] FANG J F，HUANG J G，GOU Y C，et al. Research on broadband tunable metamaterial absorber based on PIN diode [J]. Optik，2020，200：163171.

[88] 赵业浩．超材料宽频吸波体的设计及优化[D]．济南：山东大学，2023.
ZHAO Y H. Design and optimization of metamaterial broadband absorber[D]. Jinan：Shandong University，2023.

[89] 戴全辉．巡航导弹武器系统伪装生存与隐身突防研究[J]．战术导弹技术，2020(4)：41-46.
DAI Q H. Research on camouflage survival and stealth penetration on cruise missile weapon system[J]. Tactical Missile Technology，2020(4)：41-46.

[90] 覃维．非均质雷达吸波材料等效电磁参数提取及其应用特性研究[D]．武汉：华中科技大学，2022.
QIN W. Extraction and application research of equivalent electromagnetic parameters of heterogeneous radar absorbers [D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2022.

[91] 刘文俭，熊家军，何松，等．石墨烯泡沫吸波材料的表面波衰减特性研究[J]．兵器装备工程学报，2022，43(3)：293-299.
LIU W J，XIONG J J，HE S，et al. Research of surface wave attenuation characteristic for graphene foam absorbent material[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering，2022，43(3)：293-299.

基金项目：国家自然科学基金(52272117，52572135)；航空科学基金(202400470Q3001)

收稿日期：2025-10-24；**录用日期**：2025-11-07

通讯作者：张子栋(1986—)，男，教授，博士，研究方向为电磁超材料、拓扑超材料以及负介电常数复合材料，联系地址：山东省济南市历下区经十路 17923 号山东大学千佛山校区材料科学与工程学院(250061)，E-mail：zhangzidong@sdu.edu.cn；侯瑞(1989—)，男，副研究员，硕士，研究方向为超材料隐身结构设计，联系地址：山东省济南市天桥区田家庄东路3号山东非金属材料研究所(250031)，E-mail：13656407707@139.com

（本文责编：寇凤梅）