·综述·

多频谱兼容低可探测涂层研究进展与前沿挑战

杨十嘉[1] 李耀东[2] 冯增辉[1] 陈文锐[1*] 陈嘉荟[1] 肖明明[1] 刘兰轩[1] 汪 洋[1]

([1]中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司 特种材料表面工程全国重点实验室 武汉 430030)
([2]西北机电工程研究所 咸阳 712099)

摘要：多频谱兼容低可探测涂层是应对现代多源侦察体系、提升军事装备战场生存能力的关键材料。综述从可见光、红外与雷达波段的隐身机理出发，系统总结了红外－可见光、红外－雷达以及红外－雷达－可见光全频谱兼容低可探测涂层的研究进展。重点分析了高分子基涂层中多频谱兼容的实现策略，包括微纳结构设计、光子晶体、超材料、仿生材料及多功能填料的应用，探讨了梯度复合结构与智能响应系统在解决频段间本征物理冲突方面的潜力。最后，总结了当前该领域在机理认知、环境适应性与工程化应用中所面临的挑战，并对未来发展趋势如智能自适应涂层、轻量化宽频隐身技术等方向进行了展望。

关键词：多频谱兼容；低可探测性；可见光伪装；雷达吸波；红外隐身

Advances and Challenges in Multi-spectral Compatible Low-observable Coatings

YANG Shi-jia[1], LI Yao-dong[2], FENG Zeng-hui[1], CHEN Wen-rui[1*], CHEN Jia-hui[1], XIAO Ming-ming[1], LIU Lan-xuan[1], WANG Yang[1]

([1]*China Academy of Machinery Wuhan Research Institute of Materials Protection Co., Ltd., State Key Laboratory of Special Materials Surface Engineering, Wuhan 430030*)
([2]*Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099*)

Abstract: Multispectral compatible low-observability coatings have become crucial for enhancing the survivability of military equipment against advanced multi-band detection systems. This review systematically summarizes recent research progress in coatings compatible with infrared-visible, infrared-radar, and full-spectrum infrared-radar-visible stealth capabilities. Beginning with the fundamental mechanisms of stealth across visible, infrared, and radar wavelengths, the article highlights material design strategies centered on polymer-based composite systems. Key approaches such as micro-nano structural design, photonic crystals, metamaterials, bio-inspired materials, and multi-functional fillers are discussed in detail, emphasizing their roles in achieving spectral compatibility. The potential of gradient composite architectures and stimulus-responsive smart systems in mitigating intrinsic physical conflicts between different bands is also examined. Finally, the review addresses persistent challenges including insufficient theoretical understanding, environmental adaptability, and scalability in practical applications. Future directions are proposed, focusing on intelligent adaptive coatings, lightweight wide-band stealth materials, and machine learning-assisted design for next-generation multispectral stealth platforms.

Keywords: Multispectral compatibility; Low observability; Visible light camouflage; Radar absorption; Infrared stealth

2025-10-10 收稿，2025-11-13 录用，2025-12-15 网络出版
基金项目：湖北省技术创新计划重点研发项目(项目号 2024BAB117)
* 通信联系人：陈文锐，E-mail: chenwenrui@rimp.com.cn
doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2025.25.297

引用：杨十嘉，李耀东，冯增辉，陈文锐，陈嘉荟，肖明明，刘兰轩，汪洋. 多频谱兼容低可探测涂层研究进展与前沿挑战. 高分子通报，**2026**, 39(2), 225–236.

Citation: Yang, S. J.; Li, Y. D.; Feng, Z. H.; Chen, W. R.; Chen, J. H.; Xiao, M. M.; Liu, L. X.; Wang, Y. Advances and challenges in multi-spectral compatible low-observable coatings. *Polym. Bull.* (in Chinese), **2026**, 39(2), 225–236.

低可探测涂层作为将低可探测功能材料涂覆于目标表面形成的固体薄膜，是实现装备低可探测性的关键工程载体。其核心作用机理是与入射探测信号发生可控相互作用，有效抑制目标的特征信号强度，进而显著降低其被探测系统发现和识别的概率[1]。根据作用频谱的差异，低可探测涂层主要包括可见光低可探测涂层、红外低可探测涂层和雷达低可探测涂层等类型(图1)。可见光低可探测涂层用于实现目标与背景的光学融合；红外低可探测涂层则着重抑制中远红外波段的特征辐射；而雷达低可探测涂层的主要功能是最小化目标的雷达散射截面积(RCS)[2~4]。然而，随着现代探测技术的快速发展和深度协同，战场侦察体系已逐渐演变为基于可见光、红外、雷达等多频谱探测手段融合的立体化、全天候、高精度侦察网络，对军事目标的生存构成了严峻挑战。在此背景下，传统单一功能低可探测涂层仅能在特定波段提供有效防护，在其他探测频段往往具有显著信号特征，其应用局限性日益凸显[5]。因此，研发能够同时规避多种探测系统侦察、实现多频谱兼容的低可探测性涂层，已成为应对先进探测威胁、提升装备生存能力的重点与迫切需求。

本文旨在系统梳理多频谱兼容低可探测涂层的研究进展：首先概述可见光、红外、雷达及多频谱兼容隐身的基础作用机理；继而全面评述近年来面向多频段兼容的低可探测涂层材料设计策略与性能优化研究；最后，深入探讨该领域面临的挑战并展望其未来发展趋势。

1 低可探测涂层作用机理

1.1 可见光波段低可探测机理

可见光波段(400~760 nm)低可探测技术旨在抑制目标被人眼或光学侦察设备识别的概率[2]。其核心机理在于调控涂层的光谱反射特性，使目标与背景环境的亮度对比度(L)及色度差异(α,b^*)最小化(图2(a))[6]。可见光探测识别依赖于目标的亮度、色度及运动特征，其中涂层可调控的关键参数为：(1)亮度因子：当涂层亮度值(L^*)显著偏离背景时，目标探测概率急剧升高；(2)色度特性：包含色调(hue)与饱和度(chroma)。色调失配将导致目标轮廓显化，而自然界背景普遍呈现低饱和度(<20%)及高复杂度特征，目标饱和度过高或色域不匹配将显著提升暴露风险[7]。

综上，可见光低可探测涂层的设计本质是通过光谱选择性调控，实现目标−背景反射特性的视觉融合。

1.2 雷达波段低可探测机理

雷达低可探测技术针对2~18 GHz频段，通过抑制目标雷达散射截面积降低探测概率[3]。由

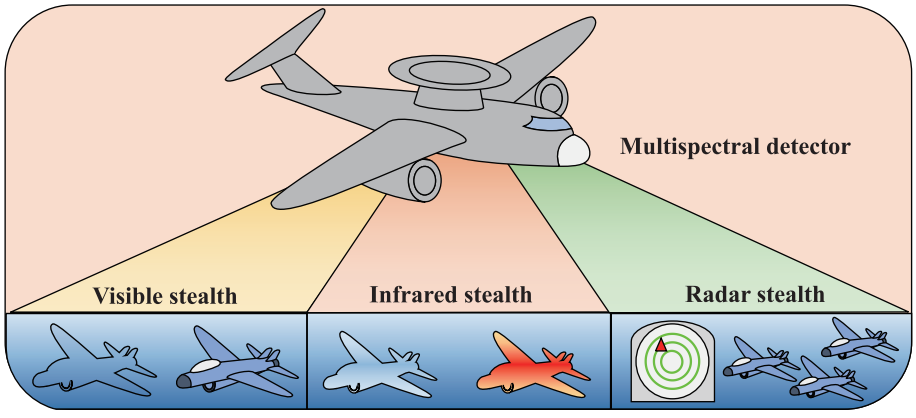


图 1 可见光–红外–雷达低可探测的应用场景

Figure 1 Diagram of application scenarios of visible stealth, infrared stealth, and visible stealth

于装备结构优化存在刚性约束，材料设计成为提升雷达隐身性能的主要途径。其物理基础取决于涂层的复介电常数ε (F·m^{-1})与复磁导率μ (H·m^{-1})[8]：

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'') \tag{1}$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' = \mu_0(\mu_r' - j\mu_r'') \tag{2}$$

式中，j为虚数单位，ε_0 (F·m^{-1})为自由空间介电常数，实部ε' (F·m^{-1})表征介质的极化储能能力，虚部ε'' (F·m^{-1})表征能量耗散，ε_r'为相对介电常数的实部，ε_r''为相对介电常数的虚部，μ_0 (H·m^{-1})为自由空间的磁导率，实部μ' (H·m^{-1})表征材料对磁场的存储能力，虚部μ'' (H·m^{-1})表征材料的磁损耗特性，包括涡流损耗、磁滞损耗等，μ_r'为相对磁导率的实部，μ_r''为相对磁导率的虚部。

电磁波吸收效能由两大特性协同决定(图2b)[9]。

(1)阻抗匹配特性：决定界面反射率。

$$R = (Z - Z_0)/(Z + Z_0) \tag{3}$$

$$Z = \sqrt{\mu_0\mu_r / \varepsilon_0\varepsilon_r} \tag{4}$$

$$Z_0 = \sqrt{\mu/\mu_r} \tag{5}$$

式中，R为材料反射系数，ε_r为材料的相对介电常数，μ_r为材料的相对磁导率，Z (Ω)和Z_0 (Ω)分别为材料和自由空间的波阻抗。

(2)衰减特性：表征电磁能—热能转换效率，由介电损耗角正切$\tan\delta_\varepsilon$与磁损耗角正切$\tan\delta_\mu$量化。虚部值(ε'', μ'')越大，吸波效能越显著[8]。

$$\tan\delta_\varepsilon = \varepsilon''/\varepsilon' \tag{6}$$

$$\tan\delta_\mu = \mu''/\mu' \tag{7}$$

因此，理想雷达吸波涂层需构建“阻抗渐变层−强损耗层”的梯度化结构，通过频变特性设计，在宽频带内同步优化阻抗匹配与衰减深度。未来可发展多级异质界面与人工磁电谐振单元，突破“薄层、宽频、强吸收”的极限性能，满足5G/6G毫米波隐身需求。

1.3　红外波段低可探测机理

红外探测依赖目标自身热辐射信号(图2c)，核心对抗波段为大气窗口(3~5 μm与8~14 μm)[4]。红外低可探测的核心参数为辐射对比度C，可由以下公式计算得到[10]：

$$C = \frac{M_T - M_B}{M_B} \tag{8}$$

式中，M_T (K)和M_B (K)分别为目标和背景的红外辐射量。

根据Stefan-Boltzmann定律$W = \sigma\varepsilon T^4$可知，目标总辐射功率$W$ (W·m^{-2})与发射率ε及表面温度T (K)呈正相关(σ为Stefan-Boltzmann常数)[11]。

红外低可探测性的实现需协同调控辐射特性与热传输行为，核心策略包括：

(1)低发射率主动调控。可引入纳米银线、氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)等构筑导电网络，利用自由载流子振荡增强红外反射；也可通过Ge/ZnS等多层介质膜构建光子带隙，在8~14 μm大气窗

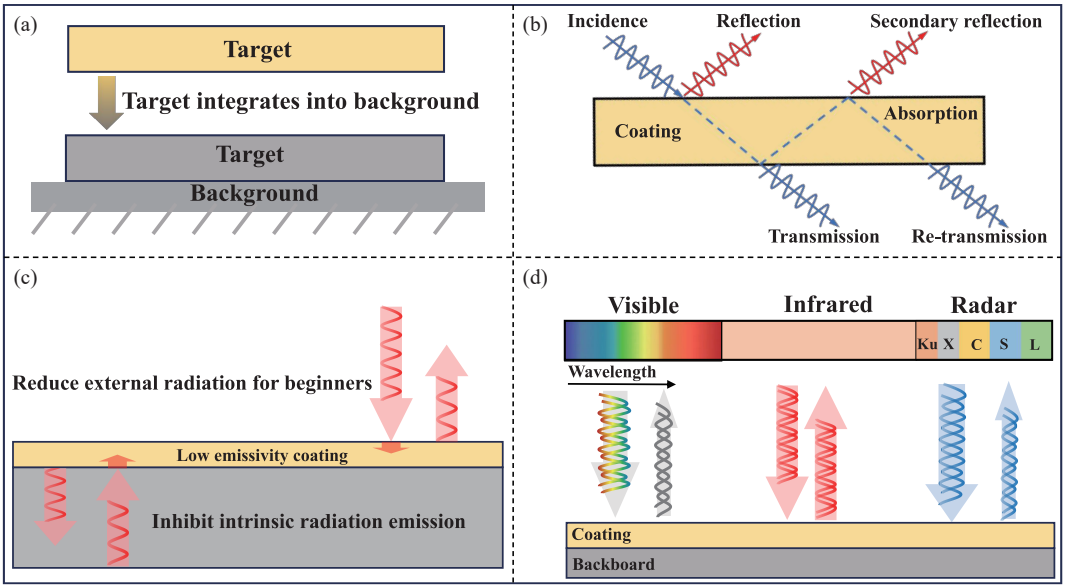


图 2　低可探测机理示意图：(a)可见光波段，(b)雷达波段，(c)红外波段，(d)多频谱兼容

Figure 2　Stealth mechanisms of (a) visible light stealth, (b) radar stealth, (c) infrared stealth, (d) multispectral stealth

口实现选择性反射，同时保持其他波段透波性。

(2) 热管理优化。采用气凝胶、多孔聚合物抑制热传导，延缓表面升温；也可嵌入石蜡/脂肪酸等固−液相变材料，通过潜热吸收缓冲瞬态热冲击，维持表面温度稳定性。

红外低可探测涂层的本质是建立辐射−热传输协同控制机制，通过低发射率材料设计与多尺度热管理策略的融合，实现目标红外特征信号的最小化。未来需发展具有宽谱带低发射、快速热响应及环境自适应特性的智能涂层体系，以应对复杂战场热侦察挑战。

1.4 多频谱兼容低可探测机制

多频谱兼容低可探测的核心挑战源于电磁响应与热物理行为的本征冲突[12]，如表1所示。具体表现为两大物理矛盾。一是雷达吸波−红外控温的矛盾。为实现雷达波段强损耗，需引入导电/磁性组分，但其高导热性会增巨目标红外辐射，破坏温控型隐身。二是红外低发射−雷达低反射的矛盾。红外隐身要求低发射率，需高红外反射率，而雷达隐身需抑制微波反射，二者在电磁频谱管理上存在根本性对立。

为解决以上两大矛盾，高分子基多频谱低可探测涂层聚焦两大前沿方向(图2d)：(1) 梯度化复合结构设计。通过阻抗渐变层与红外辐射调控层的空间组装，实现频谱响应解耦。(2) 刺激响应智能系统。利用相变材料、电致变色聚合物或形状记忆高分子，构建可随环境动态调节电磁参数的自适应涂层，实现多频谱隐身智能切换。

多频谱兼容本质是通过多尺度结构设计与材料创新，在电磁波−热辐射耦合场中寻求帕累托最优解(Pareto efficiency)。未来需融合超材料理论、多物理场仿真与机器学习，发展兼具宽频隐身(0.3~18 GHz和3~5 μm/8~14 μm)、环境自适应(−50~400 ℃)及轻量化(面密度<2 kg·m^{-2})的新一代智能涂层体系，以满足未来战场全域隐身需求。

2 多频谱兼容低可探测涂层的研究进展

2.1 红外−可见光兼容低可探测涂层

作为装备最外层防护体系，红外低可探测涂层亟需实现可见光波段兼容性设计。传统金属填料/树脂基涂层虽具备低红外发射率，但高光泽度导致可见光暴露风险[10]。针对这些矛盾，研究主要聚焦四大技术路线。

2.1.1 微纳结构光学调控

Peng[13]等制备了一种表面具有多尺度微纳结构的HNMS-Al@PU复合涂层(图3)，其特殊的表面结构能将入射光向各个方向均匀反射，从而实现哑光的效果。HNMS-Al@PU涂层表面光泽度和红外发射率分别为2.3(60°)和0.297，在实现红外隐身的同时对可见光隐身实现了兼容。此外，

表1 多频谱低可探测的原理对比

Table 1 Principle comparison of multi spectrum stealth technology

Stealth type	Operating band	Core principle	Key parameters/Control factors	Challenges	Ref.
Visible-light stealth	400−760 nm	Minimize reflectivity contrast between target and background by eliminating luminance and chrominance differences	Luminance contrast chromaticity parameters: hue, saturation (naturally low in environments)	High reflectivity may conflict with IR stealth (requiring low emissivity)	[6, 7]
Radar stealth	2−18 GHz	Reduce radar cross section (RCS) by suppressing radar wave reflection and enhancing absorption	Electromagnetic parameters: μ_r; ε_rLoss tangent: tanε_r, tanμ_r	High-loss materials exhibit high thermal conductivity, contradicting IR temperature control	[3, 7−9]
Infrared stealth	3−5 μm, 8−14 μm	Decrease IR radiation contrast between target and background	Emissivity; ε Surface temperature: T Total radiation: $W = \sigma\varepsilon T^4$	Low emissivity necessitates high reflectivity, amplifying radar wave reflection	[10, 11]
Multispectral compatible stealth	Cross-band coordination	Resolve conflicts between band-specific stealth mechanisms	Frequency-selective response	Fundamental conflicts:Radar: high absorption (low reflection) versus IR/visible: high reflection Radar: high thermal conductivity versus IR: thermal insulation	[12]

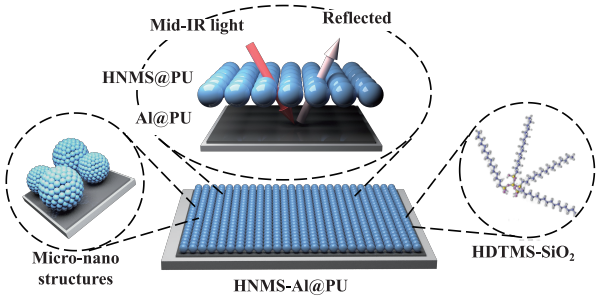


图 3　HNMS-Al@PU涂层示意[13] (2024 Elsevier 版权许可)

Figure 3　Schematic diagram of HNMS-Al@PU coating (Reprinted with permission from Ref. [13]; Copyright (2024) Elsevier)

研究人员还基于光子晶体、超材料、和仿生材料这些新兴材料设计制备了红外−可见光兼容的低可探测涂层。

2.1.2　光子晶体(PC)频域设计

光子晶体(photonic crystal, PC)是一种具有周期性介电结构的材料，这种特殊的结构使得特定频率范围内的光在光子晶体中无法传播，这种现象被称为光子带隙[14]。可以通过对周期性结构的调控使光子带隙处于合适的频率范围内以实现材料对红外波段和可见光波段的隐身[15~17]。Ren[18]等使用均匀的ZnO微球作为构建单元(图4)，通过浸渍和喷涂，成功制备了具有明亮可调结构色和低红外发射率的PC涂层。在3~5 μm波段300 ℃时，PC涂层的红外发射率为0.295。并且通过改变ZnO微球的粒径可以调控涂层的结构色，这表明该涂层具备红外−可见光隐身的功能。但光子晶体涂层对电磁波的入射角度具有极强的依赖性，其隐身效果随入射角度的变化会急剧衰减，且大面积的百纳米级周期结构难以制备并容易受到环境影响。

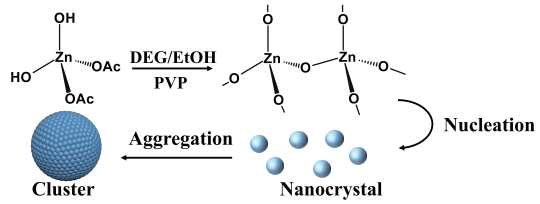


图 4　ZnO 微球的合成[17] (2024 John Wiley and Sons 版权许可)

Figure 4　Schematic illustration of the ZnO spheres synthesis (Reprinted with permission from Ref. [17]; Copyright (2024) John Wiley and Sons)

2.1.3　超材料精准设计

超材料(metamaterials)是一种人工设计的复合材料，通过对微观结构的设计使材料获得自然界中不存在的物理特性，实现传统材料无法达到的效果[19]。虽然超材料独特的光学结构能够使其具有红外−可见光兼容的隐身性能，但制备过程通常需要高成本、高精度的光刻，限制了它们的实际应用[20~22]。因此研究人员提出了一种成本更低、无需光刻的多层超表面涂层。Tan等[22]设计了一种，从上到下依次为Si、Bi、Si和Cr，总厚度仅为约355 nm的复合超材料涂层。通过调整顶层Si的厚度，可以独立调控涂层在可见光下的颜色，同时保持其在红外区域的选择性高发射率特性，从而实现红外和可见光的兼容隐身。尽管这种方法一定程度上解决了超材料涂层制备成本高的缺点，但超材料涂层与底层吸波材料集成时可能阻抗失配导致雷达隐身性能不能兼容的问题仍然存在。

2.1.4　仿生功能材料

仿生材料(biomimetic materials)是指通过模仿生物体的结构、功能或行为来设计和制造的人工材料[23]。Fu等[24]受自然界蝴蝶翅膀鳞片启发，通过微观粉末阳极氧化技术制备了多孔阳极氧化铝(porous anodic alumina, PAA)，在此基础上进一步制备了多孔阳极氧化铝(PAA)/片状铝粉(aluminum flake powder, AFP)涂层(图5)。PAA/AFP在可见光波段反射率为0.32，在3~5 μm和8~14 μm波段的红外发射率分别为0.081和0.085，具有可见光和红外隐身功能。

Xiao等[25]受植物叶片的启发，使用十六烷基三甲氧基硅烷(hexadecyltrimethoxysilane, HDTMS)接枝有机颜料复合的Mg-Al水滑石(layered double hydroxide, LDH)制备聚氨酯涂层(图6)，其紫外−可见光谱曲线与植物叶片非常接近。在此基础上进一步涂覆银纳米线涂层，降低红外发射率，实现了可见光和红外兼容隐身的特性。仿生设计的涂层具有极大的发展潜力，但仍须考虑如何大面积制备以及如何在曲面上制备的问题。同时，这类低可探测涂层往往机械强度较低，耐磨性差，实际应用困难。

2.1.5　相变智能涂层

根据红外隐身原理理，降低目标表面温度也

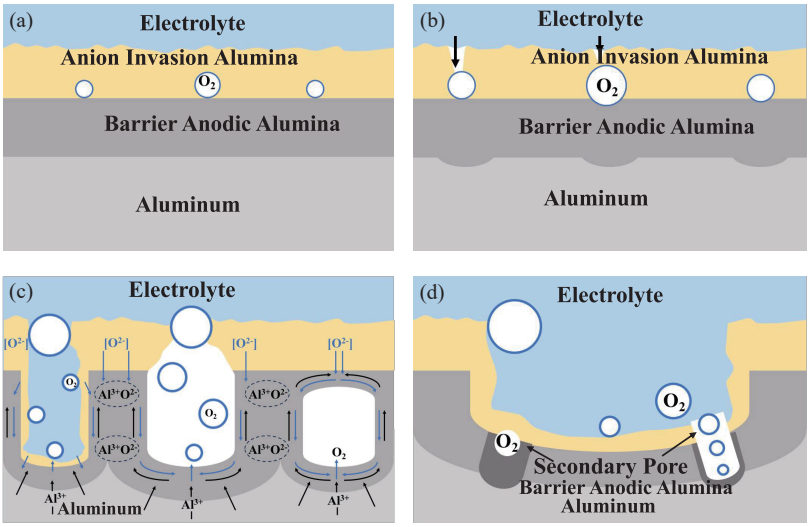


图 5 micro-PAO的生长机制及各阶段相应的表面形态[24]：(a) micro-PAO的初始阶段；(b) micro-PAO中期；(c) micro-PAO的后期；(d) micro-PAO的最后阶段(2022 American Chemical Society 版权许可)

Figure 5 Growth mechanism of micro-PAO and corresponding surface morphology at each stage: (a) initial stage of micro-PAO; (b) middle stage of micro-PAO; (c) later stage of micro-PAO; (d) final stage of micro-PAO (Reprinted with permission from Ref. [24]; Copyright (2022) American Chemical Society)

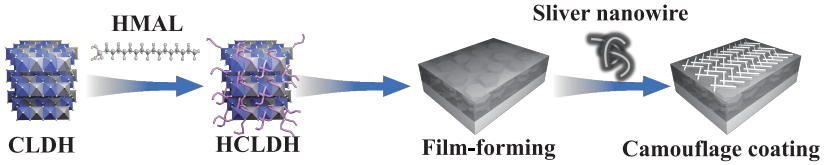


图 6 LDH仿生涂层的制备[25] (2024 Elsevier 版权许可)

Figure 6 The preparation process of LDH camouflage coating (Reprinted with permission from Ref. [25]; Copyright (2025) Elsevier)

是实现红外隐身的重要方法，相变红外低可探测涂层就是利用相变材料(phase change material, PCM)发生物相变换时的热效应维持涂层的温度稳定，减小目标与环境的温度差，以达到红外隐身目的的一种材料[26~28]。针对相变红外低可探测涂层的可见光兼容隐身也是其研究的方向之一。锗锑碲(Ge-Sb-Te, GST)是一种典型的相变材料，具有面心立方(*fcc*-GST)和六方(*hcp*-GST) 2种相态，高温处理可诱导GST从*fcc*相转变为*hcp*相[29]。由于2种相具有不同的红外发射率，已被用于热辐射调控中。Wang等[30]基于柔性聚酰亚胺(PI)基底设计了一种GST/HfO_2复合涂层，在3~5 μm和8~14 μm波段的红外发射率分别为0.10和0.08，显著降低了红外辐射信号。调节顶层HfO_2的厚度，则可以控制涂层的颜色，使其适应不同的环境背景，从而实现可见光隐身。目前，相变低可探测涂层还需解决循环寿命短和相变温度滞后的问题，需要设计寿命更长、更加灵敏的响应体系。

当前红外–可见光兼容涂层研究正从“单一功能叠加”向“光–热协同调控”演进。未来需突破两大核心挑战：(1)解耦光学伪装与热管理功能冲突，发展频谱选择性调控新材料；(2)构建服役可靠性评价体系，解决“机械强度–环境稳定性–循环寿命”协同优化难题，推动实验室成果向战场应用转化。

2.2 雷达–红外兼容低可探测涂层

雷达与红外波段的低可探测性存在本征物理冲突：低红外发射率材料通常具有高微波反射特性，难以满足雷达吸波需求。当前主流技术路线聚焦三大设计范式。

2.2.1 多层功能化结构设计

即表面层为红外隐身层，底层为雷达吸波层.通过红外透明–雷达吸收的垂直集成架构实现兼容性[12]。Wang等[31]以二氧化硅包覆的铝粉和碳纤维(carbon fiber, CF)作为填料制备了三元乙丙橡胶(ethylene propylene diene monomer, EPDM)涂

层，随SiO_2层厚度增加，涂层的介电常数和介电损耗角正切值tanδ_ε显著降低，涂层的红外发射率低于0.6，具有较低的红外发射率、较低的介电损耗以及良好的雷达波透射性。Zhou等[32]使用丙烯酸(acrylic acid, AA)作为接枝单体对EPDM做接枝改性，并添加铝粉和抗静电碳纤维制备涂层。接枝改性涂层的介电常数最大为2.29，此时介电损耗角正切值tanδ_ε为0.004。涂层的拉伸强度σ从29.31 MPa增加到36.21 MPa，接枝改性显著提高了涂层的力学性能，同时保持了良好的低介电特性和低红外发射率。Wei等[33]通过电化学置换法在片状铝颜料表面形成了一层致密的镍，这种Al/Ni核−壳结构颜料的红外发射率小于0.23，并且能够优化涂层与自由空间之间的阻抗匹配，从而增强了雷达波的穿透性。将涂层的有效吸收带宽从2.6 GHz扩展到了4.25 GHz。

2.2.2　新型基材体系创新

除了以树脂为基材的传统涂层，以超材料、MXene和高熵合金作为基材的多频谱兼容低可探测涂层也取得了一定进展。Li等[34]通过分级控制结构制备了超薄且耐高温的隐身超材料涂层，涂层由上到下分别为Ag红外隐身层、SiO_2间隔层和ITO雷达吸收层，800 ℃下仍具有11.9 GHz的有效吸收带宽和0.46的红外发射率。

MXene是一种具有混合价键的新型二维过渡金属碳/氮化物，具有良好的表面活性和优异的电化学性能，同时能够赋予涂层优异的机械性能[35~37]。Deng等[38]通过儿茶酚胺的剪切诱导取向和微交联实现了高密度和高取向的MXene涂层的大规模生产(图7)。得到的MXene/儿茶酚胺涂层在不同厚度下均表现出高于40 dB的电磁屏蔽效果，且涂层的中红外发射率低至0.179，适用于红外隐身。Li等[39]设计了一种多尺度分级结构，将皱褶MXene红外隐身层与柔性Fe_3O_4@C/PDMS雷达波吸收层复合，实现了X波段和长波红外波段的隐身，雷达截面减少20 dB·m^2，红外发射率降至0.35。但MXene在潮湿/高温环境易氧化的问题目前还没有有效的解决方法，限制了其应用。

高熵合金(high-entropy alloys, HEA)是一种含有多种主要元素的新型多主元合金，不同元素之间原子尺度上的相互作用使合金表现出复合效应。高熵合金组元种类、数量与元素含量的多样性以及相结构、晶粒大小、晶粒形状等因素使得高熵合金具有多样的功能性[40,41]。Duan等[42]制备了一种由低红外发射超表面和$FeCoNiMn_{0.5}Si_{0.5}Al_{0.5}$高熵合金涂层组成的双层结构HEA涂层，该涂层结合了双层六角形超表面结构，有效吸收带宽达到2.8 GHz，反射损耗可达−42 dB。在多频段兼容隐身方面有广泛的应用前景。此外，高熵合金涂层的设计也可与仿生的理念相结合，Gao等[43]设计并制备了FeCoNiCrAl/AlN金属陶瓷涂层，并通过激光熔覆技术构建了石榴仿生结构，实现了磁性和介电损耗协同吸收雷达波。涂层表现出优越的高温雷达和红外隐身性能，在14.75 GHz处反射损耗达到−15.1 dB，3~5 μm波长范围内的红外发射率为0.28，即使在500和700 ℃的高温下，涂层仍保持良好的高温稳定性，反射损耗分别为−11和−10 dB，红外发射率分别为0.33和0.328。高熵合金涂层也存在限制其自身发展的问题，首先就是其性能预测缺乏理论指导，依赖大量的实验工作优化，其次是一般金属合金的脆性大，容易产生微裂纹影响涂层的性能和使用寿命。

2.2.3　纳米填料单层突破

为克服多层界面失效问题，前沿研究聚焦单涂层多功能纳米填料[44~46]。壳−核结构(core-shell structure)是纳米材料中一种重要的复合构型，由内部的核(core)和外部的壳(shell)组成。2种材料

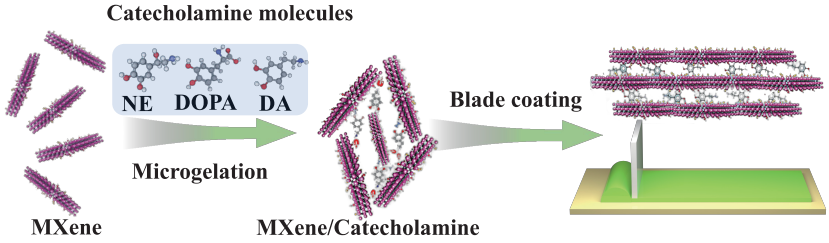


图 7　MXene/儿茶酚胺涂层的制备[39] (2025 John Wiley and Sons 版权许可)

Figure 7　Schematic of the fabrication of MXene/catecholamine coating (Reprinted with permission from Ref. [39]; Copyright (2025) John Wiley and Sons)

通过物理或化学作用紧密结合，形成具有协同功能的纳米单元[45]。Li等[47]设计了一种核–壳结构的FeCoNi@SnO_2磁性复合材料，该材料的有效吸收带宽为8.12 GHz，反射损耗为−65.55 dB，在8~14 μm波长范围内的红外发射率约为0.50，在雷达与红外兼容隐身方面具有出色的性能。纳米线(nanowire)也是一种典型的纳米材料，具有高长径比。这种独特的结构使其在电子传输、光学响应上展现出独特的性能[48]。Wei等[49]通过静电纺丝结合高温还原法成功制备了具有特殊微观结构的花状镍颗粒/碳化硅纳米线复合材料(图8)，这种材料具有独特的多层结构和电磁损耗机制，远红外波段反射率为0.113，最低反射损耗可达49.26 dB，有效吸收带宽为4.85 GHz。

此外，空心微球(hollow microspheres)也是一种结构特殊的材料，其内部具有空腔，其壳层厚度从纳米到微米级，直径通常在几百纳米至数百微米范围，这类材料因独特的中空结构而具备低密度、高比表面积、优异负载能力等特性，在多个领域展现出重要的应用价值[50]。Ma等[51]制备了外表面具有片状氧化铁的纳米尺度空心介孔碳球，以实现微波吸收和红外隐身的兼容。这种材料的最小反射损耗为−34.16 dB，有效吸收带宽达到了4.8 GHz，在3~5 μm和8~14 μm波段红外发射率分别为0.212和0.508。由此可见，纳米材料和空心微球这类结构或者尺寸特殊的材料都有作为多频谱兼容单层低可探测涂层填料的重大潜力。

雷达–红外兼容涂层正经历从“机械堆叠”向“本征融合”的范式转变。未来突破需聚焦两方面：(1)发展多尺度仿真指导的智能材料设计，破解电磁–热物理参数耦合难题；(2)构建基于机器学习的纳米填料逆向设计平台，实现“宽频吸收–低红外发射–强机械性能”的协同优化，为下一代全域隐身装备提供材料基石。

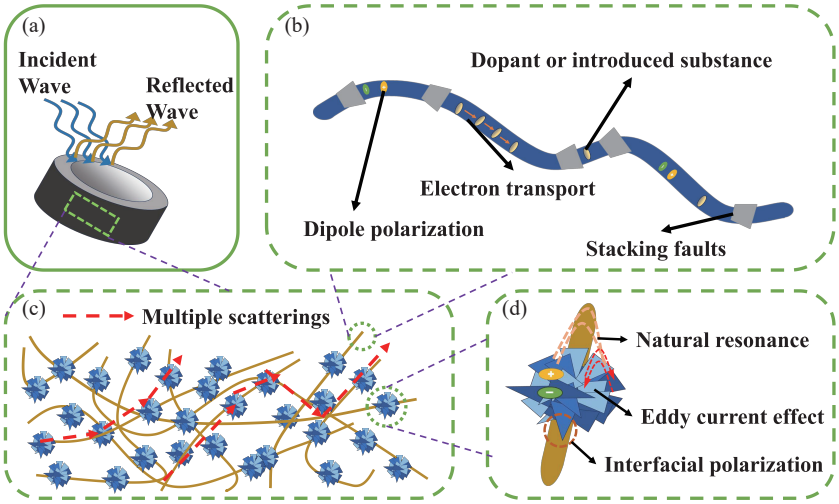


图 8 花状 Ni/SiC NW的电磁波吸收机制示意图[49]：(a)电磁波的反射；(b)电子的传输与极化；(c)多重散射；(d)电磁响应(2025 Elsevier 版权许可)

Figure 8 Schematic illustration of the EM wave absorption mechanism of flower-like Ni/SiC NWs: (a) wave reflection; (b) electron transport and polarization; (c) multiple scattering; (d) electromagnetic response (Reprinted with permission from Ref. [49]; Copyright (2023) Elsevier)

2.3 雷达–红外–可见光全频谱兼容低可探测涂层

相较于设计两两结合的兼容低可探测涂层，三频谱兼容需同步解决“低可探测性–光学伪装–热管理”的多目标优化难题，其核心矛盾在于光谱管理冲突与材料功能耦合。

针对以上矛盾，可采用以下2种方案进行设计优化。

2.3.1 多功能填料优化设计

氧化铬(Cr_2O_3)具有良好的颜色稳定性、耐磨性和耐腐蚀性，是一种用于可见光隐身的常见颜料。此外，以Cr_2O_3为填料制备的涂层有较低的介电常数，有利于雷达波的透过。但是Cr_2O_3具有较高的红外发射率，容易被红外探测器发现[52]。因此，降低Cr_2O_3的红外发射率使其有望成为复合涂层的红外隐身层填料。Chai等[53]通过无电镀

方法制备了Cr_2O_3包裹的Ag颗粒(Cr_2O_3@Ag)，对Cr_2O_3粉末的预处理以及银纳米粒子的沉积，随着银含量的增加，Cr_2O_3@Ag复合粉末的电导率显著提高，而红外发射率则有效降低，实现了可见光−红外隐身和雷达波透射的双重功能。同时，Chai等[54,55]还通过在红外低可探测涂层中使用铝粉和ITO改性的Cr_2O_3混合填料(M-Cr_2O_3)，实现了红外-可见光伪装性能。通过调节铝粉与M-Cr_2O_3的质量比，可以控制红外涂层的雷达波传输特性和介电特性。将Al/M-Cr_2O_3层涂覆在FeSiAl基微波吸收层上，由于两层之间的协同效应，使复合涂层的总厚度和面密度分别减少了16.0%和18.6%。进一步地，使用三氧化二锑(antimony tin oxide, ATO)替换ITO，制备了Cr_2O_3@ATO填充的树脂基涂层。具有低红外发射率和良好的热稳定性。ATO壳层降低Cr_2O_3红外发射率的同时保留了Cr_2O_3颜料的原始绿色，在X波段也具有2 GHz的有效吸收带宽。

2.3.2　多级结构协同构建

Qiao等[56]通过磁场诱导蒸馏沉淀聚合等方法，成功合成了具有不同SnO_2壳层厚度的Fe_3O_4@SnO_2纳米链(图9)。这些纳米链具有出色的微波吸收性能，最小吸收率为−39.4 dB，SnO_2壳层高红外反射率的特性也使其具有红外隐身的特性。改变SnO_2壳层厚度，样品可以呈现出深绿色、砖红色和亮橙色，表现出对可见光的选择性吸收，可用于可见光隐身。Fu等[57]通过微粉阳极氧化(micro-powder anodic oxidation, M-PAO)和物理吸附，制备了一种表面吸附多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotube, MWCNTs)的多孔阳极氧化铝/片状铝粉(CNTs@PAA/AFP)涂层。这种涂层在可见光范围内反射率低至0.29且灰度高达72%，同时红外发射率在3~5 μm和8~14 μm分别为0.15和0.18。在雷达波隐身方面，该涂层在S-Ku波段内最小吸收率为−42.46 dB，有效的吸收带宽为7.43 GHz，是一种超宽频谱材料。

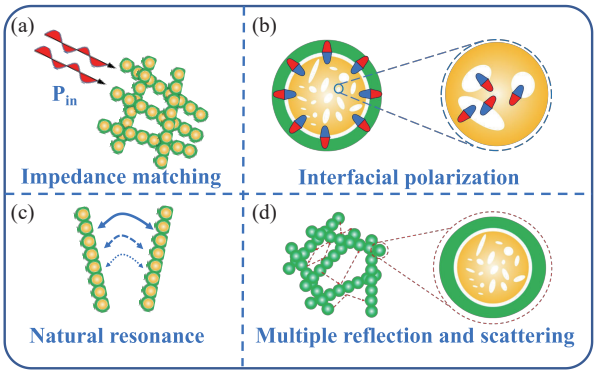


图 9　Fe_3O_4@SnO_2纳米链的微波吸收机理示意图[56]：(a)阻抗匹配；(b)界面极化；(c)固有共振；(d)多重反射和散射 (2024 American Chemical Society 版权许可)

Figure 9　Schematic illustration of microwave absorption mechanism of Fe_3O_4@SnO_2 nanochains: (a) impedance matching; (b) interfacial polarization; (c) natural resonance; (d) multiple reflection and scattering (Reprinted with permission from Ref. [56]; Copyright (2024) American Chemical Society)

多频谱兼容涂层的本质是解耦光−热−电磁的多物理场约束。当前研究通过“核−壳能带工程”和“仿生多级结构”初步实现功能集成，但仍面临三重挑战：(1)宽谱带低发射与可见光谱精确调控的兼容性设计；(2)超材料跨尺度建模；(3)极端环境服役可靠性。未来需融合机器学习辅助逆向设计，发展“频谱自适应智能涂层”，实现动态战场环境的全域隐身。

3　总结与展望

随着电子信息技术的迭代升级，传统单一波段低可探测涂层在协同化、多频谱探测体系下已难以满足现代战场低可探测性需求。开发具备多频谱兼容特性的低可探测涂层，已成为构筑国防安全体系的核心需求。此类涂层通过协同调控红外−雷达−可见光等多波段电磁响应，在复杂电磁环境中实现全域隐身效能，代表着未来隐身材料发展的战略方向。

当前，多频谱兼容低可探测涂层研究在红外−可见光及红外−雷达兼容方向已取得显著突破，但仍面临三大关键挑战：(1)机理认知深度不足。多频谱兼容的作用机制与构效关系尚不完善，理论探索滞后于实验研究，基础理论的匮乏严重制约材料理性设计；(2)环境适应性薄弱。涂层需在雨林、沙漠、极地、海洋等极端服役环境中保持稳定性，而针对其耐候性(如抗紫外、耐温变、防盐雾腐蚀)的系统研究亟待加强；(3)工程化应用瓶颈。现有制备工艺复杂度高、成本昂贵，难以满足大规模工程化应用需求。

基于上述挑战，未来研究可聚焦以下三大方向：(1)发展多功能一体化耐候涂层。设计兼具耐高温(>300 ℃)、耐低温(<−50 ℃)、抗腐蚀、抗老化等性能的环境自适应涂层体系，拓展极端环境

适用性。(2)突破低成本和规模化制备技术，开发简易工艺(如喷涂、辊涂)与低成本原料，实现涂层高效、稳定、规模化制备，打通工程应用“最后一公里”。(3)推进轻量化宽频隐身技术。基于超材料/超表面设计，开发宽频谱覆盖(如5 G毫米波、太赫兹波段)、超薄厚度(<1 mm)、超低面密度(<1 kg·m^{-2})的新一代低可探测涂层。

多频谱兼容低可探测涂层是突破现代多源探测体系的关键材料，其发展需融合机理创新、环境适应性设计及智能化技术。通过攻克基础理论瓶颈、优化工程化路径并探索超构材料等前沿方向，将推动低可探测涂层向“宽频域、轻量化、自适应”的新一代技术跨越，为国防装备的全频谱隐身防护提供变革性解决方案。

参考文献

1 Ma, H. X.; Wang, J. Q.; Wang, J. F.; Shang, K.; Yang, Y.; Fan, Z. M. Blade-coated $Ti_3C_2T_x$ MXene films for pseudocapacitive energy storage and infrared stealth. *Diam. Relat. Mater.*, **2023**, 131, 109587.

2 罗巧玲, 邵力文, 林琴, 王冬, 付少海. 原液着色生物基尼龙56纤维的制备及其可见光-近红外光谱性能. 高分子学报, **2025**, 56(2), 322–330.

3 Wang, B. X.; Xu, C. Y.; Duan, G. Y.; Xu, W.; Pi, F. W. Review of broadband metamaterial absorbers: f6rom principles, design strategies, and tunable properties to functional applications. *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(14), 2213818.

4 马创, 王振, 王新宇, 冯增辉, 王新礼, 刘兰轩. 制备工艺参数对氟碳树脂/铝粉涂层红外发射率的影响. 材料保护, **2024**, 57(6), 121–130.

5 Cheng, Y. J.; Sun, X. X.; Yang, S.; Wang, D.; Liang, L.; Wang, S. S.; Ning, Y. H.; Yin, W. L.; Li, Y. B. Multifunctional elastic rGO hybrid aerogels for microwave absorption, infrared stealth and heat insulation. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 452, 139376.

6 范锡宇, 赵珍, 马剑平, 周雪琴. 多层结构绿色植被高光谱伪装材料的设计与制备. 材料导报, **2025**, 39(7), 219–226.

7 李佳坤, 李彦彬, 张海瑞. 防空导弹装备光学伪装效果评估. 激光与红外, **2019**, 49(5), 605–610.

8 周影影. 耐温树脂基吸波材料的制备及性能研究. 西北工业大学博士学位论文, **2016**.

9 柴哲元, 王子成. 阻抗渐变型丙烯酸复合涂层的可控构筑及其5G高频波段低反射高效电磁屏蔽研究. 高分子学报, **2024**, 55(1), 58–66.

10 齐伦. 耐高温红外低发射率涂层材料设计研究. 电子科技大学博士学位论文, **2022**.

11 Huang, Q. Q.; Zhao, Y.; Wu, Y.; Zhou, M.; Tan, S. J.; Tang, S. L.; Ji, G. B. A dual-band transceiver with excellent heat insulation property for microwave absorption and low infrared emissivity compatibility. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 446, 137279.

12 Wu, Y.; Tan, S. J.; Zhao, Y.; Liang, L. L.; Zhou, M.; Ji, G. B. Broadband multispectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application. *Prog. Mater. Sci.*, **2023**, 135, 101088.

13 Peng, H.; Tan, S. J.; Zhao, Y.; Guan, X. M.; Li, M. Y.; Xiao, Y.; Ji, G. B. A multi-scale hierarchically omnidirectional strategy to elevate crossband camouflage and anti-icing properties. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 500, 157515.

14 Liu, C. C.; Zhang, W. L.; Zhao, Y.; Lin, C. X.; Zhou, K.; Li, Y. M.; Li, G. T. Urea-functionalized poly(ionic liquid) photonic spheres for visual identification of explosives with a smartphone. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2019**, 11(23), 21078–21085.

15 Liu, Y. M.; Yang, X.; Xuan, L. X.; Men, W. W.; Wu, X.; Duan, Y. P. Performance and electromagnetic mechanism of radar- and infrared-compatible stealth materials based on photonic crystals. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **2025**, 32(3), 710–717.

16 Wang, Z. Y.; Wang, C. D.; Hou, H. B.; Liu, W. S.; Nian, R.; Sun, H. G.; Chen, X.; Cui, G. L. A facile fabrication of stimulus-responsive amorphous photonic crystals in the near-infrared region. *Appl. Surf. Sci.*, **2019**, 479, 1014–1020.

17 闫丹, 邱丽莉, 孟子晖, 薛敏, 董晓. 微米级胶体晶体可控制备与红外波段光学特征研究. 高分子学报, **2018**, (6), 733–740.

18 Ren, J.; Xie, C. W.; Zong, H.; Zhang, S. F.; Wu, S. L. Infrared stealth coating with tunable structural color based on ZnO spheres. *Small*, **2024**, 20(49), 2403549.

19 Mizukami, K.; Kumamoto, Y. 3D printing of fiber composite sandwich metamaterial with spiral resonators for attenuation of low-frequency structural vibration. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2023**, 172, 107594.

20 Xie, Y. D.; Liu, Z. M.; Zhou, F. Q.; Luo, X.; Cheng, Z. Q.; Yang, R. H.; Cheng, J.; Yang, G. X. A multifrequency narrow-band perfect absorber based on graphene metamaterial. *Diam. Relat. Mater.*, **2023**, 137, 110100.

21 Narjabadifam, A.; Fakhrabadi, M. M. S. Graphyne-type nano-metamaterials: a comprehensive molecular dynamics simulation. *Diam. Relat. Mater.*, **2023**, 131, 109572.

22 Tan, C.; Wen, Z. J.; Zhang, J. G.; Zhou, D. J.; Qiu, Q. L.; Han, M. K.; Sun, Y.; Dai, N.; Hao, J. M. Deep-

subwavelength multilayered meta-coatings for visible-infrared compatible camouflage. *Nanophotonics*, **2024**, 13(13), 2391–2400.

23 Zhang, J. J.; Dong, H.; Liu, B.; Yang, D. L. Biomimetic materials for antibacterial applications. *Small*, **2025**, 21(3), 2408543.

24 Fu, S. Q.; Zhang, W.; Wu, Y.; Tian, J. L.; Liu, Q. L.; Gu, J. J.; Song, F.; Osotsi, M. I.; Zhang, D. Bioinspired porous anodic alumina/aluminum flake powder for multiband compatible low detectability. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2022**, 14(6), 8464–8472.

25 Xiao, Y.; Tan, S. J.; Qu, L. J.; Guan, X. M.; Wu, Q. F.; Ji, G. B. Highly water-resistant coating for vegetation mimicry with sunlight spectrum and infrared compatibility. *Appl. Surf. Sci*., **2025**, 686, 162218.

26 Wang, D. N.; Li, S. B.; Li, Y. K.; Huang, H. H.; Bai, C. H.; Tao, S. P.; Ma, L.; Qiao, Z. N.; Hu, C. Q.; Zheng, W. T. Designing infrared phase change materials for colorful infrared transmittance modulators. *Appl. Surf. Sci*., **2022**, 600, 154104.

27 Han, X.; Yuan, L.; Li, Y.; Zhang, H.; Xiao, L. M.; Zhang, G. Q. Experimental studies on phase change and temperature-adjusting performance of phase change fabric clothing. *Adv. Mech. Eng*., **2017**, 9(6), 168781401770390.

28 Elmore, D. L.; Dluhy, R. A. Application of 2D IR correlation analysis to phase transitions in Langmuir monolayer films. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, **2000**, 171(1-3), 225–239.

29 Sbeah, Z. A.; Sorathiya, V.; Alwabli, A.; Jaffar, A. Y.; Aldosari, F. M.; Faragallah, O. S. High-sensitive MXene and GST-based tunable refractive index sensor for the infrared and visible spectrum from multipurpose sensing applications. *Phys. Scr*., **2025**, 100(3), 035511.

30 Wang, J.; Wu, Z. X.; Sun, X. Y.; Tang, Z. Q.; Wang, C.; Yu, F. Y.; Zhao, Z. R.; Mao, J.; Zhang, Q.; Cao, F. Multi-band compatible camouflage enabled by phase transition modulation of flexible GST films. *Chem. Eng. J*., **2024**, 499, 156128.

31 Wang, Y. J.; Zhou, H. P.; Gao, Y. X.; Zhang, Z.; Liu, S. Y.; Zhong, S. J.; Yu, M. J.; Liu, J. J.; Wang, C. G. Low-infrared-emissivity Al@SiO_2/EPDM composite coating compatible with low dielectric loss and antistatic property. *Infrared Phys. Technol*., **2022**, 121, 104025.

32 Zhou, H. P.; Wang, Y. J.; Gao, Y. X.; Zhang, Z.; Liu, S. Y.; Wang, Y. Y.; Yu, M. J.; Wang, X. M.; Wang, C. G. Low dielectric loss and infrared emissivity coating with enhanced mechanical property by grafting modification of EPDM. *Infrared Phys. Technol*., **2022**, 125, 104296.

33 Wei, B.; Weng, X. L.; Yuan, L.; Hu, J. W.; Wang, Y. Q.; Qi, L.; Bi, M. Fabrication of Al/Ni core-shell pigments *via* galvanic displacement and their application in radar-infrared compatible stealth coatings. *J. Mater. Res. Technol*., **2024**, 32, 3246–3257.

34 Li, Y. P.; Ding, S. Z.; An, Z. M.; Xu, T. T.; Zhang, R. B. Ultra-thin compatible stealth metacoating: graded control of radar and infrared waves under long-term high temperatures. *Compos. Part B Eng*., **2025**, 297, 112295.

35 Solangi, N. H.; Lingamdinne, L. P.; Karri, R. R.; Mubarak, N. M.; Mazari, S. A.; Koduru, J. R. Emerging 2D MXene quantum dots for catalytic conversion of CO_2. *Carbon*, **2025**, 232, 119758.

36 王皓, 刘子义, 周青青, 何朋. Fe_3O_4-MXene的电磁波吸收性能. *磁性材料及器件*, **2025**, 56(2), 31–36.

37 赵梓文, 黄佳, 唐秀之. MXene负载柔性碳布及其电化学性能. *材料工程*, **2025**, 53(2), 167–174.

38 Deng, Z. M.; Jiang, P. Z.; Wang, Z. G.; Xu, L.; Yu, Z. Z.; Zhang, H. B. Scalable production of catecholamine-densified MXene coatings for electromagnetic shielding and infrared stealth. *Small*, **2023**, 19(46), 2304278.

39 Li, C.; Liang, L. L.; Zhang, B. S.; Yang, Y.; Ji, G. B. Magneto-dielectric synergy and multiscale hierarchical structure design enable flexible multipurpose microwave absorption and infrared stealth compatibility. *Nanomicro Lett*., **2024**, 17(1), 40.

40 高茂国, 刘睿, 郭岩松, 耿恒恒, 陈鹏万. HfZrTiTaAl系高熵合金动态变形、损伤及破坏行为. *兵工学报*, **2025**, 46(1), 290–300.

41 笪强, 马国政, 康嘉杰, 黄艳斐, 周永宽, 王海斗. 耐磨耐蚀高熵合金涂层性能研究进展. *材料导报*, **2024**, 38(24), 196–205.

42 Duan, Y. P.; Chen, W.; Pang, H. F.; Sun, X. Y.; Wang, M.; Gong, J.; Wang, J. G. Radar infrared-compatible camouflage performance of high-entropy alloy coating enhanced by double-layer hexagonal metasurface. *Adv. Eng. Mater*., **2023**, 25(14), 2201861.

43 Gao, S. Y.; Pang, X. M.; Mu, S.; Pu, J. B.; Chen, C. Design and fabrication of laser cladding pomegranate bionic structure FeCoNiCrAl high entropy alloy/AlN ceramic high temperature radar-infrared compatible hidden composite coating. *J. Alloys Compd*., **2025**, 1018, 179166.

44 张凯, 李菁, 冯凯, 陈毅, 杨刚, 吴杨, 周峰. 超亲水防雨自清洁纳米溶胶涂层的制备及其应用研究. *涂料工业*, **2025**, 55(4), 81–88.

45 鲍艳, 谢梦爽, 郭茹月, 张婧. VO_2智能调温涂层的研究进展. *材料导报*, **2025**, 39(7), 58–64.

46 刘佳鑫. 微-宏观协同构筑碳化硅基耐高温电磁吸波材料及性能研究. 青岛理工大学硕士学位论文, **2024**.

47 Li, C.; Liang, L. L.; Yang, Y.; Zhang, B. S.; Ji, G.

B. Interfacial engineering of core-shell structured FeCoNi@SnO_2 magnetic composites for tunable radar-infrared compatible stealth. *Chem. Eng. J*., **2024**, 481, 148354.

48 Dou, Q.; Zhang, X. H.; Wang, Y.; You, J.; Jiang, W.; Yang, J.; Li, Q.; Alexandrov, I. V. Structure control and growth mechanism of beaded SiC nanowires with microwave absorption properties. *Mater. Sci. Eng. B*, **2023**, 296, 116657.

49 Wei, J.; Zhang, Y. B.; Li, X. T.; Hui, J. W.; Zhang, H.; Lei, W. W. Multifunctional flower-like Ni particles/silicon carbide nanowires for infrared radar compatible stealth performance. *J. Colloid Interface Sci*., **2023**, 641, 414–427.

50 张晓民, 党小来, 高红洁, 陈天星, 刘佳博, 李嘉晨, 刘晨曦, 李修身. 粉煤灰空心微珠@碳纳米管的吸波性能研究. *化工矿物与加工*, **2025**, 54(2), 52–58.

51 Ma, W. J.; Tang, C. H.; He, P.; Wu, X. H.; Cui, Z. K.; Lin, S. L.; Liu, X. Y.; Zhuang, Q. X. Morphology-controlled fabrication strategy of hollow mesoporous carbon spheres@f-Fe_2O_3 for microwave absorption and infrared stealth. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2022**, 14(30), 34985–34996.

52 卢轲轲. Co_3O_4微结构调控与吸波性能研究. 郑州大学硕士学位论文, **2024**.

53 Chai, X.; Zhu, D. M.; Liu, Y.; Qing, Y. C.; Ren, Z. W.; Luo, F.; Zhou, W. C.; Huang, Z. B.; Li, P. Silver-modified chromium(III) oxide as multi-band compatible stealth materials for visual/infrared stealth and radar wave transmission. *Compos. Sci. Technol*., **2021**, 216, 109038.

54 Chai, X.; Zhu, D. M.; Liu, Y.; Qing, Y. C.; Luo, F.; Huang, Z. B.; Li, P.; Chen, Q. *In-situ* construction of Cr_2O_3@ATO hybrid pigment towards synergetic enhancement of visible light-infrared-radar compatible stealth. *J. Colloid Interface Sci*., **2023**, 645, 570–579.

55 Chai, X.; Zhu, D. M.; Chen, Q.; Qing, Y. C.; Cao, K.; Luo, F.; Huang, Z. B.; Li, P.; Liu, X. H. Tailored composition of low emissivity top layer for lightweight visible light-infrared-radar multiband compatible stealth coating. *Adv. Compos. Hybrid Mater*., **2022**, 5(4), 3094–3103.

56 Qiao, M. T.; Tian, Y. R.; Li, J. X.; He, X. W.; Lei, X. F.; Zhang, Q. Y.; Ma, M. L.; Meng, X. R. Core-shell Fe_3O_4@SnO_2 nanochains toward the application of radar-infrared-visible compatible stealth. *J. Colloid Interface Sci*., **2022**, 609, 330–340.

57 Fu, S. Q.; Liang, Z. D.; Qian, X.; Zhang, W.; Qiu, Y. L.; Ling, X.; Liu, Q. L.; Zhang, D. Ultrawide spectra camouflage coatings from metallic flake powder. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(21), 27627–27639.