引用格式：张丽, 唐安娜, 周阳, 等. 电磁辐散射控制材料与结构研究进展 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(5): 673-691.
Zhang Li, Tang Anna, Zhou Yang, et al. Recent advances on electromagnetic radiation and scattering control materials and their structures[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(5): 673-691. (in Chinese)

电磁辐散射控制材料与结构研究进展

张 丽[1, 2, 3*]，唐安娜[1, 2, 3]，周 阳[1, 2, 3]，秦 俊[1, 2, 3]，尹良君[1, 2, 3]，张林博[1, 2, 3]，
彭 波[1, 2, 3]，陈海燕[1, 2, 3]，毕 磊[1, 2, 3]，陆海鹏[1, 2, 3]，周佩珩[1, 2, 3]，邓龙江[1, 2, 3]

（1. 电子科技大学国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心，成都 611731；2. 电子科技大学多频谱吸波材料与结构教育部重点实验室，成都 611731；3. 电子科技大学电子科学与工程学院，成都 611731）

摘要：电磁辐散射控制材料是一类实现目标电磁特征调控、复杂电磁环境适应等功能的重要功能材料。随着探测系统向宽频、多站、多谱段方向发展，以及通信感知、装备防护和极端环境服役需求的提升，传统依赖单一损耗、单一反射或单一屏蔽机制的材料体系已难以满足应用要求。近年来，在需求牵引和物理机制创新的共同推动下，电磁辐散射控制材料在新型材料体系、人工结构设计、环境稳定服役和智能化设计方法等方面取得了明显进展。该文结合国内外研究动态和国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心相关工作，围绕电磁响应自由度拓展、极端环境功能保持、低频超宽带调控和复杂结构智能设计等关键问题，综述了电磁辐散射控制材料。重点分析拓扑、非互易、多场耦合、界面防护、梯度结构、超构表面和数据驱动设计等方法对材料性能提升和应用边界拓展的作用，讨论该领域在多频谱兼容、长寿命服役、低频宽带化和工程部件集成中仍面临的主要问题，并展望其未来发展方向。

关键词：电磁辐散射控制材料；多频谱兼容；非互易调控；功能涂层；超构表面；智能设计
中图分类号：TB34 **文献标志码：**A DOI: 10.12178/1001-0548.2026124

Recent advances on electromagnetic radiation and scattering control materials and their structures

ZHANG Li[1, 2, 3*], TANG Anna[1, 2, 3], ZHOU Yang[1, 2, 3], QIN Jun[1, 2, 3], YIN Liangjun[1, 2, 3], ZHANG Linbo[1, 2, 3], PENG Bo[1, 2, 3], CHEN Haiyan[1, 2, 3], BI Lei[1, 2, 3], LU Haipeng[1, 2, 3], ZHOU Peiheng[1, 2, 3], and DENG Longjiang[1, 2, 3]

(1. National Engineering Research Center of Electromagnetic Radiation Control Materials, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Key Laboratory of Multi-Spectral Absorbing Materials and Structures of Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 3. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Electromagnetic radiation and scattering control materials are the key functional materials required for advanced systems to tailor the electromagnetic signatures of targets, adapt to complex electromagnetic environments, and integrate advanced information functionalities. With the evolution of detection systems toward broadband, multistatic, and multispectral operation, together with the increasing demands of integrated communication and sensing, equipment protection, and service under extreme environments, conventional material systems relying on a single loss, reflection, or shielding mechanism can no longer meet emerging application requirements. In recent years, driven jointly by application needs and innovations in physical mechanisms, substantial progress has been achieved in electromagnetic radiation and scattering control materials, particularly in novel material systems, artificial structural design, environmentally stable service, and intelligent design methodologies. This review summarizes recent advances in electromagnetic radiation and scattering control materials and structures by considering both international research progress and related works from the National Engineering Research Center of Electromagnetic Radiation Control Materials. The discussion focuses on key challenges, including the expansion of electromagnetic response degrees of freedom, the preservation of

收稿日期：2026−07−24
基金项目：国家自然科学基金（52472147）
作者简介：张丽，博士，教授，主要从事高温电磁辐射控制材料方面的研究。
*通信作者 E-mail: lzhang129@uestc.edu.cn

functionality under extreme environments, low-frequency and ultra-broadband regulation, and intelligent design of complex structures. Particular emphasis is placed on the roles of topology, nonreciprocity, multifield coupling, interfacial protection, gradient structures, metasurfaces, and data-driven design in enhancing material performance and extending application boundaries. The remaining challenges in multispectral compatibility, long-term durability, low-frequency broadband operation, and integration with engineering components are further discussed, followed by an outlook on future development directions in this field.

Key words: electromagnetic radiation and scattering control materials; multispectral compatibility; nonreciprocal control; functional coatings; metasurfaces; intelligent design

电磁辐散射控制材料是一类通过调节目标与电磁场之间的相互作用，实现对电磁波辐射、散射、吸收和透射等特征进行调控的功能材料，是目标特征控制防护、电磁兼容、通信感知和热辐射管理等领域的重要材料基础。本文重点讨论电磁吸收和散射抑制等相关调控问题[1-3]。电子科技大学国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心（以下简称中心）在电磁辐散射控制材料的“薄型化”和“超宽带”等方面取得重要进展并成功实现产业化，批量应用于系列重大工程，为我国电磁辐散射控制材料的发展做出了重要贡献。

早期相关材料主要面向特定频段和单一功能需求，依靠介电损耗、磁损耗、导电反射或阻抗匹配实现电磁能量衰减与特征抑制。该类材料在雷达吸波、红外低发射率和电磁屏蔽等方面形成了较为成熟的技术基础[4]，但随着探测、通信和装备应用环境的变化，其性能评价已不再局限于单一频段的反射率或发射率指标，而逐渐转向宽频、宽角、低剖面、多频谱兼容和长期服役可靠性的综合要求。

从物理机制看，传统电磁辐散射控制材料面临多重内在约束。低频吸波受波长尺度和材料磁响应极限限制，宽带设计受阻抗匹配和损耗色散制约[5]，红外低发射率与雷达吸收、可见光特征之间常存在矛盾，线性无源互易体系又难以实现传播方向和通道功能的选择性调控。与此同时，实际服役环境中的盐雾腐蚀、高温氧化、热循环冲击和界面应力会进一步改变材料微结构和电磁参数，使初始性能与长期稳定性之间出现明显差距[6-7]。因此，电磁辐射控制材料的发展不能仅依靠提高单一材料参数，而需要在材料组成、微结构、人工结构和服役行为之间建立更系统的设计关系。

近年来，拓扑光子学、磁性非互易效应、低维多场耦合、梯度结构、超构表面以及人工智能设计方法的发展，为突破上述限制提供了新的途径[8-11]。人工微结构使电磁响应不再完全受自然本构参数约束，外场耦合和非互易机制拓展了传播方向与波前调控自由度，界面和梯度结构设计提高了材料在复杂环境中的功能保持能力，智能算法则为高维结构和多目标性能优化提供了新的工具[12-13]。这些进展共同推动电磁辐散射控制材料由单一功能层向材料、结构、环境和器件协同设计方向发展。

本文以电磁辐散射控制材料的关键科学问题和应用瓶颈为主线，结合国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心近年来在相关方向的研究进展，聚焦新型电磁辐散射控制材料、极端环境电磁辐散射控制材料、低频超宽带电磁辐散射控制材料与结构以及 AI 辅助设计方法进行综述，为后续发展宽频、多功能、长寿命和环境适应性的电磁辐散射控制材料提供参考。

1 新型电磁辐散射控制材料

新型电磁辐散射控制材料的发展，关键在于突破传统材料依赖本征介电、磁损耗和互易响应的调控边界。通过引入人工能带、磁性非互易、低维多场耦合和柔性可重构结构等新机制，电磁波的传播方向、相位、极化和局域模式可获得更高自由度调控，使材料由被动吸收或透射功能层逐步发展为具备方向选择、外场响应和信息调制能力的结构化功能体系。

1.1 拓扑旋磁光子晶体

传统电磁波吸收与传输材料受限于自然本构参数极限与洛伦兹互易定理，在复杂工况下面临厚度约束与缺陷背向散射的技术瓶颈。拓扑光子学通过在动量空间分析光子能带的全局几何特性，为电磁波的抗背向散射调控提供了新机制。在满足麦克斯韦方程组的光子晶体体系中，动量空间的波函数规范势可由贝里联络（Berry connection, $A^{nn'}$）精确表征，如式 (1) 所示：

$$\vec{\boldsymbol{A}}^{nn'}(\boldsymbol{k}) \equiv \mathrm{i}\langle E_{n\boldsymbol{k}}|\nabla_{\boldsymbol{k}}|E_{n'\boldsymbol{k}}\rangle = \mathrm{i}\int \mathrm{d}^2\boldsymbol{r}\varepsilon(\boldsymbol{r})E^*_{n\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{r})\cdot\nabla_{\boldsymbol{k}}E_{n'\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{r}) \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{k}$为动量空间的波矢；$\varepsilon(\boldsymbol{r})$为晶格的介电常

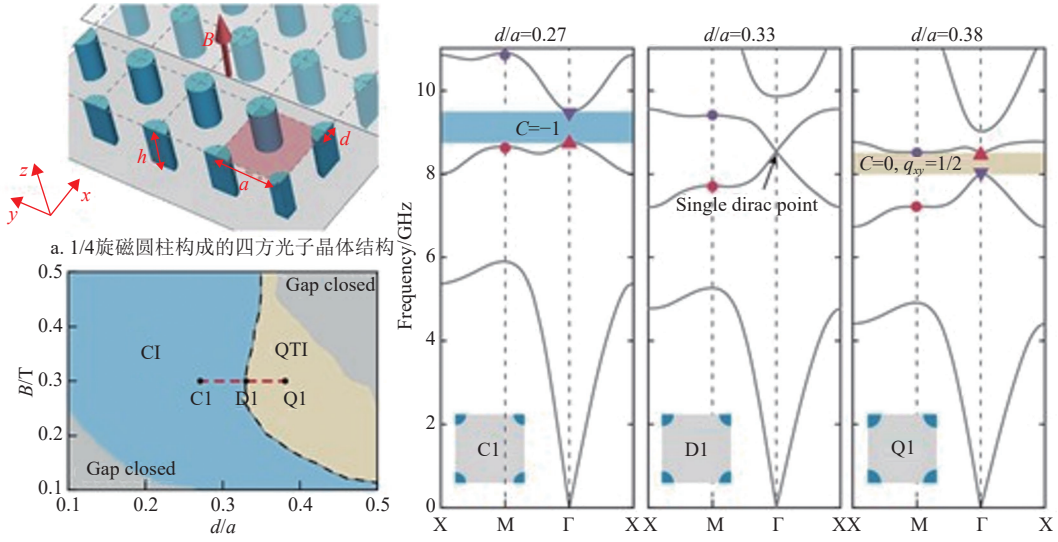
数空间分布；$E_{nk}(\boldsymbol{r})$为第n条能带的本征模式电场分布。对该局域物理量求旋度获取贝里曲率，进而在第一布里渊区（first Brillouin zone, BZ）内进行闭合积分，即可量化系统的全局拓扑不变量——陈数（Chern number, C_n），以二维体系为例可得：

$$C_n = \frac{1}{2\pi}\int_{\mathrm{BZ}} \mathrm{d}^2\boldsymbol{k}\left(\frac{\partial A_y^{nn}}{\partial k_x} - \frac{\partial A_x^{nn}}{\partial k_y}\right) \tag{2}$$

该关系式直接表征能带结构的拓扑非平庸特征。考虑在晶格中引入旋磁铁氧体材料（如钇铁石榴石）并施加静磁场，磁导率张量非对角分量将打破时间反演对称性，驱动系统转化为$C_n \neq 0$的陈绝缘体。该物理机制为设计免疫晶格缺陷、具备单向传输特性的拓扑结构奠定了基础。

在二维拓扑能带调控层面，针对表面波体系开展了相关研究[14]。在表面波光子晶体中，通过调控金属圆柱阵列亚晶格高度差引入空间对称性破缺，并与旋磁单元诱导的时间反演对称性破缺形成竞争，引发了量子霍尔绝缘体向量子能谷霍尔绝缘体的拓扑相变，在异质结界面上实现了能谷选择性边缘态的单向传播。

随着研究向高阶拓扑演进，系统能量分布不再局限于体–边对应关系的低维特征。在具备C_4对称性的四方旋磁光子晶体中[15]，通过外加磁场与晶格参数的协同调制可驱动系统在Γ点发生能带翻转。如图 1 所示，该机制实现了由手性陈绝缘体（$C=-1$）向四极子高阶拓扑绝缘体（陈数$C=0$，四极子矩$q_{xy}=1/2$）的拓扑相变，将电磁能量局域于系统的零维角落形成高阶角态。实验表明，进一步改变外加磁场强度可将该角态推入体态连续带，在体态光子能带中形成强谐振中心。



a. 1/4旋磁圆柱构成的四方光子晶体结构

b. 外场与结构参数协同调制的拓扑相图

c. 结构参数d/a调控下的能带演化及Γ点能带翻转（B=0.3 T）

图 1　旋磁光子晶体中从陈绝缘体（CI）相向四极子拓扑绝缘体（QTI）相的拓扑相变[15]

在空间维度拓展至三维时，基于旋磁光子晶体的三维光学陈绝缘体拓扑特性由陈矢量表征[16]。在两个陈矢量方向垂直的三维陈绝缘体交界面，实验观测到了等频面嵌套的纽结链环（Hopf link）现象。针对光子晶体设计思路，进一步构建了磁性外尔半金属（magnetic Weyl semimetals）的手性零模式（chiral zero mode, CZM）[17]：基于交错孔洞的 3D 蜂窝晶格，在偏置磁场下引入等效赝磁场，在 18.8～19.3 GHz 完全带隙之上的 19.6 GHz 处实现了共传播 CZM 的单向体态。如图 2 近场扫描显示，该体态约束在光子晶体内部且具备单向传输特性，克服了传统体态受 Nielsen-Ninomiya 定理制约的背向散射限制，并且有效抑制了杂质散射的影响。

在复杂媒质调控方面，将损耗作为复介电常数虚部引入拓扑旋磁系统，构建了非厄密调控维度。通过在不对称旋磁晶格中非均匀加载 303 和 804 两种不同型号的吸波泡沫，构建了非厄密陈绝缘体[18]。为表征该体系的边界局域化行为，引入了结合复频率面点带隙（point gap）特性的广义拓扑不变量，如式 (3) 所示：

$$\nu_n = (C_n; \nu_{x,n}, \nu_{y,n}) \tag{3}$$

式中，n为完全线带隙序数；C_n为带隙陈数；$\nu_{x,n}$和

$v_{y,n}$分别为系统在x和y方向开放边界条件下的复本征频率缠绕数。受空间不对称损耗分布的驱动，系统缠绕数发生突变。如图 3 所示，原本均匀分布的手性边界态发生坍缩：在第 2 个带隙（15.3 GHz）和第 3 个带隙（17.2 GHz）内，电磁能量分别局域于单一的右边界和左边界，表现出非厄密趋肤效应。

通过从二维至三维体系、厄密至非厄密维度的系统性拓展，构建了基于旋磁光子晶体的拓扑保护态，通过单元结构与层间耦合的设计，实现了由外加磁场调控的电磁波传输与局域结构，实验验证了三维光学陈绝缘体与单向传输手性零模体态等拓扑相。该系列工作将矢量陈数、纽结理论以及非厄密系统缠绕数等数学概念应用于拓扑能带分析，建立了相应的电磁非互易调控模型，为后续在波导、天线及微波集成器件等领域的辐射控制提供了结构体系与理论基础。

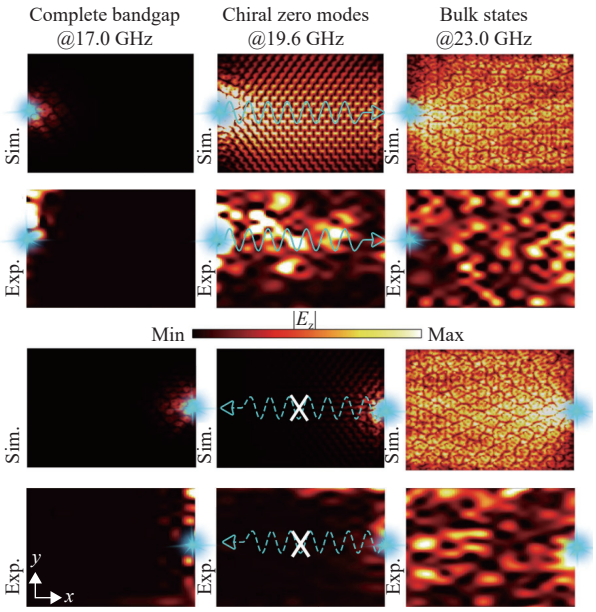


图 2 不同激励位置下的手性零模式（CZM）单向传输的仿真与实测电场分布[17]

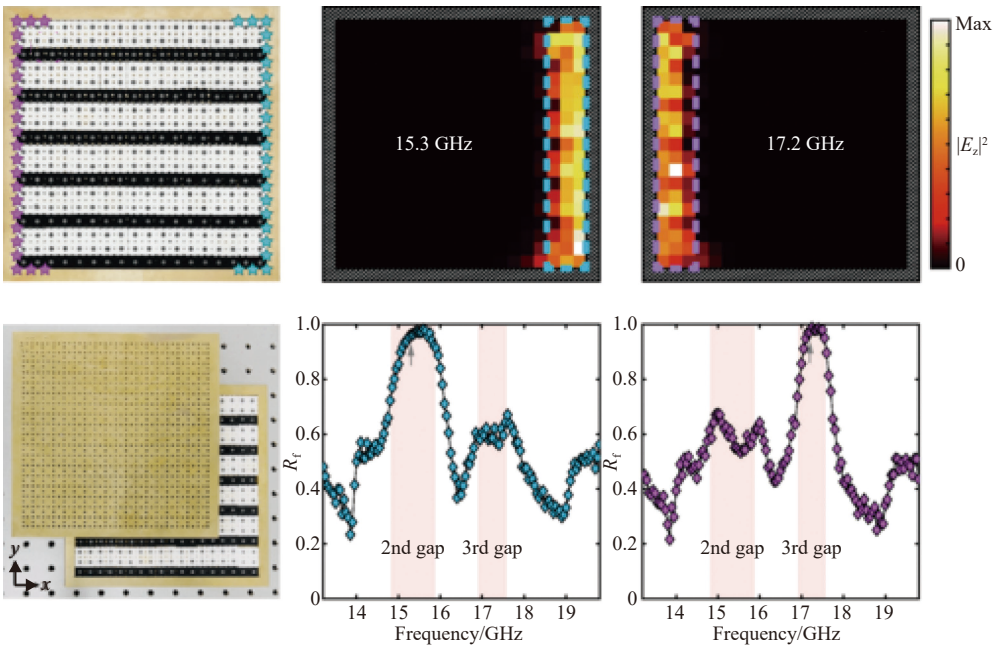


图 3 非厄密陈绝缘体样品在不同带隙频率下的手性边界态局域场扫描测试图[18]

1.2 磁性非互易超表面

在具备时间反演对称性的线性无源电磁系统中，正反向传播通常满足洛伦兹互易关系，难以实现方向选择性的传输、反射和吸收调控。引入磁性材料来打破时间反演对称性，是构建非互易超表面的重要途径之一。在面内磁化配置下，光频与微波频段磁性材料分别由介电常数张量与磁导率张量描述：

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}=\begin{bmatrix}\varepsilon_x & 0 & 0\\ 0 & \varepsilon & -\mathrm{j}\gamma\\ 0 & \mathrm{j}\gamma & \varepsilon\end{bmatrix}$$
$$\bar{\boldsymbol{\mu}}=\begin{bmatrix}\mu_x & 0 & 0\\ 0 & \mu & -\mathrm{j}\kappa\\ 0 & \mathrm{j}\kappa & \mu\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，ε_x、ε与μ_x、μ分别为介电常数张量与磁导率张量的对角元分量；γ与κ分别为表征材料旋电与旋磁特性的复数非对角元分量。不对称的非对角项使电磁波在不同传播方向、偏振状态或磁化方向

下表现出不同的等效折射率、谐振频率、相位延迟和吸收强度。对于反射式的横向磁光克尔响应，其非互易强度可通过正、负磁场下的反射率差值进行表征：

$$\delta_{s,p}=2\frac{R_{s,p}(+H)-R_{s,p}(-H)}{R_{s,p}(+H)+R_{s,p}(-H)} \tag{5}$$

式中，$R_{s,p}(+H)$与$R_{s,p}(-H)$分别表示在相同入射条件下施加正、负方向磁场时 s 或 p 偏振光的反射率。该关系为近红外磁光克尔响应和中红外非互易吸收提供了定量表征方法；对于透射式磁光法拉第效应，沿着外加磁场方向传输的线偏振光会产生偏振旋转，也称之为磁圆双折射效应。

在近红外频段，自然磁光材料的非对角张量元通常较小，磁光相互作用较弱。表面等离激元共振可显著增强局域光场，并通过人工微纳结构调控局域电场方向，从而为光频旋磁响应的构建提供了可能。基于 CeYIG/YIG 复合磁光薄膜和纳米级金开口谐振环的磁等离激元超表面[19]，在 800～1 000 nm 范围内实现了增强的横向磁光克尔效应。其中，p 偏振入射主要对应常规旋电响应，TMOKE 最大值可达约2×10^{-2}；而 s 偏振入射下仍可观测到最大约2×10^{-3}的 TMOKE。理论分析表明，p 偏振 TMOKE 主要与介电常数张量非对角元相关，而 s 偏振 TMOKE 则对应磁导率张量非对角元。因此，s 偏振 TMOKE 的出现说明该人工结构具有等效光频旋磁响应。进一步的复参数反演也表明，该超表面同时具有非零等效介电常数和磁导率非对角元，体现出旋电—旋磁双响应特征。如图 4 所示，s 偏振下的反射率和 TMOKE 测试结果直接验证了该磁等离激元超表面中的光频旋磁响应。

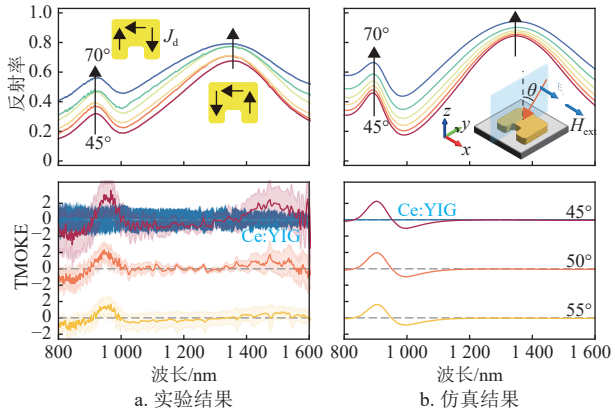


图 4　s 偏振下超材料反射率和 TMOKE 测量结果[19]

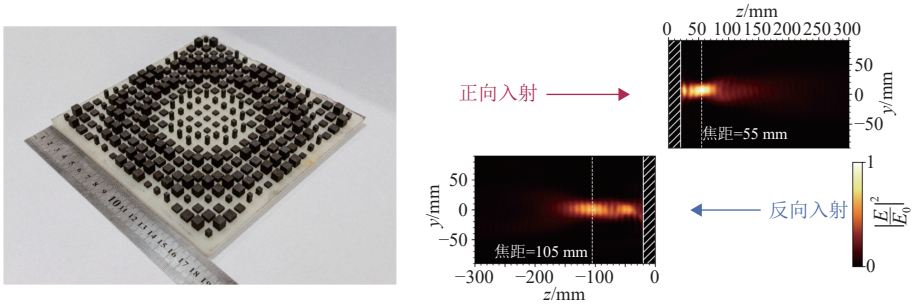
在中红外频段，非互易热吸收通常受限于磁光效应弱和谐振带宽窄等问题。砷化铟（InAs）薄膜的介电常数近零（epsilon-near-zero, ENZ）特性为增强磁光非互易响应提供了有效途径[20]。InAs 材料的载流子浓度主要决定 ENZ 频率，迁移率则影响光学损耗；当介电常数对角元接近 0 时，非对角元与对角元的相对比值显著提高，同时 ENZ 层内纵向电场增强，从而有利于获得强非互易吸收。实验结果表明，在 1.5 T 磁场、60°入射角和 TM 偏振条件下，高掺杂 InAs 薄膜随厚度增加表现出增强的非互易吸收，其中 0.9 μm 厚样品的正负磁场吸收率绝对差值Δ_{max}可达 0.63。进一步在 InAs 薄膜表面引入 Si 光栅后，光栅耦合可激发表面 ENZ 模式，使非互易吸收由单一 Berreman 模式拓展为双频点响应，并可通过光栅周期调控吸收频率。

针对单一 ENZ 谐振带宽受限的问题，多层梯度掺杂 InAs 薄膜叠加策略进一步被提出[20]。通过在10^{17}～10^{18} cm^{-3}量级调控各薄膜层载流子浓度，不同层的 ENZ 增强频点可在频谱上连续分布，从而实现宽带非互易吸收。实验结果显示在 1.5 T 磁场、60°入射角和 TM 偏振测试条件下，3 层梯度掺杂薄膜可将$\Delta\geqslant0.3$的强非互易吸收带宽拓展至约 3 μm；进一步构筑的 14 层复合薄膜可在近 10 μm 波长范围内保持正负磁场下吸收率绝对差值大于 0.3。该策略有效缓解了单一 ENZ 谐振导致的窄带限制，为宽带非互易热辐射调控提供了可行的材料与结构设计方法。

在微波频段，剩磁态钡铁氧体（$BaFe_{12}O_{19}$）的磁圆双折射效应为自偏置非互易超表面提供了材料基础[21]。垂直磁化后的钡铁氧体对左、右旋圆极化波具有不同等效折射率，合理调节铁氧体微结构尺寸可引发正反向 Mie 谐振频率分裂，从而同时获得强度非互易和相位非互易响应。基于这一机制，周期阵列型超表面在 15.13 GHz 附近实现了单向传输，实验隔离度达到 9.7 dB，插入损耗仅为 1.4 dB。由于正反向谐振频率附近透射相位发生快速变化，该结构还可提供正反向解耦的相位响应；进一步利用磁化方向翻转可交换正反向相位的特点，可建立较少单元数量的非互易相位库。

基于π/2步长的四相位数字编码，正反向解耦的相位响应进一步被用于空间波前调控[21]。非互易波矢偏转超表面在 14.6 GHz 处实现了正反向不同出射通道，实验测得正、反向偏转角分别约为 0°和 29°。当二维相位分布被引入阵列设计后，非互易波前调控可由一维波矢偏转进一步拓展至聚焦和全息成像功能。如图 5 所示，正反向焦距不同的

非互易超透镜实验测试得到约 55 mm 和 105 mm 的焦距；基于相同的非互易相位编码方法，还实现了正向呈现希腊字母“ε”、反向呈现希腊字母“μ”的非互易全息成像。上述结果表明，磁性非互易超表面不仅能够实现单向传输，还可将正反向传播通道中的相位调制和波前功能进行空间分离。



a. 制备的非互易超透镜样品　　b. 正、反向聚焦场分布

图 5　非互易超透镜及其正反向聚焦特性[21]

围绕磁性材料中张量非对角元的增强与调控，相关工作建立了磁微纳结构非互易效应的理论模型，发现了光频旋磁现象，并进一步发展出自偏置、低功耗和宽带化的磁性非互易超表面设计方法。上述研究将非互易调控由传统波导器件拓展至自由空间传输、波前调控和热辐射管理，为全双工无线通信、非互易成像和高效率热光伏器件提供了新的材料与结构设计思路。

1.3　低维多铁材料及磁电耦合机制研究

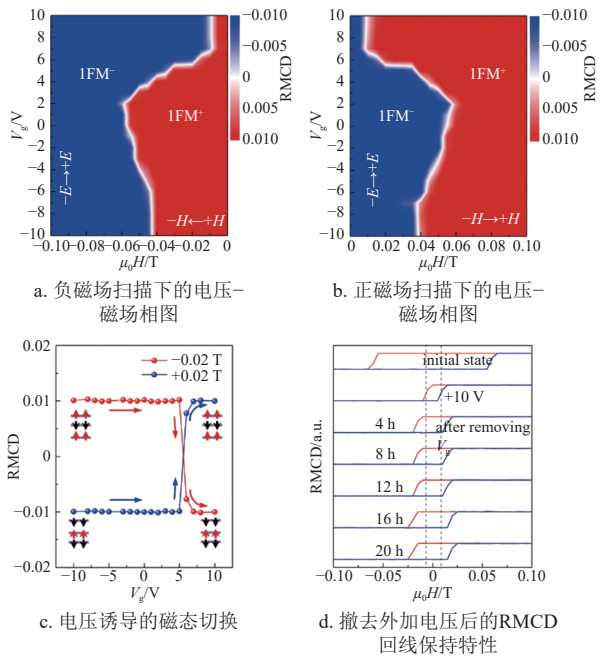
低维多铁材料因可在原子薄层尺度耦合磁有序、铁电极化和外场响应，成为发展高密度、低功耗磁电存储与调控器件的重要体系[22]。与传统块体多铁材料相比，范德华材料具有层数可控、界面洁净和异质集成灵活等优势，为构建界面型磁电耦合与本征单相多铁性提供了新的平台。对于螺旋磁序诱导的单相多铁体系，其铁电极化通常可由反 Dzyaloshinskii-Moriya（DM）机制或 Katsura-Nagaosa-Balatsky（KNB）模型描述：

$$\boldsymbol{P}=\gamma \boldsymbol{e}\times\boldsymbol{q} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{P}$为铁电极化强度；$\boldsymbol{e}$为自旋旋转面矢量；$\boldsymbol{q}$为螺旋磁结构的自旋传播矢量；γ为与自旋−轨道耦合相关的参数。该关系为分析低维多铁体系中的极化来源、界面调控和磁场响应提供了基础判据。

在界面型磁电耦合方面，基于少层 CrI_3 与铁电 α-In_2Se_3 构建的范德华多铁异质结，为电场调控层间磁耦合提供了典型平台[23]。其中，α-In_2Se_3 提供稳定的面外铁电极化，CrI_3 则具有层内铁磁、层间反铁磁耦合特征。电压调控下 CrI_3 特征拉曼峰未出现明显变化，说明磁电耦合并非主要来源于应变调制；差分电荷密度计算进一步表明，铁电极化可诱导 CrI_3 层间电荷重新分布，从而改变层间交换耦合强度并调控磁相变临界场。

如图 6 所示，在+10 V 外加电压下，3 层 CrI_3 发生反铁磁−铁磁相变所需的临界磁场绝对值由 0.056 T 降至 0.010 T，降幅约 82%；相比之下，−10 V 下临界场仅降低约 27%，体现出铁电极化对磁相变的非对称调控。进一步测试表明，在特定小磁场下，电场可实现 $1FM^+$ 与 $1FM^-$ 磁态之间的切换，说明该界面调控形成的磁态具有非易失特征。该结果表明，界面电荷重构可作为低维异质结中调控层间磁耦合的有效途径，为电写入多态自旋存储器件提供了材料基础。



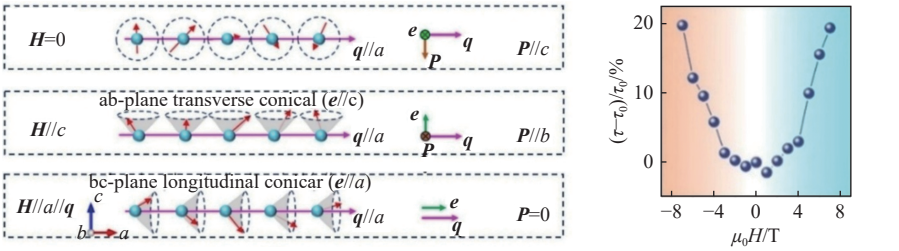
a. 负磁场扫描下的电压−磁场相图　　b. 正磁场扫描下的电压−磁场相图

c. 电压诱导的磁态切换　　d. 撤去外加电压后的RMCD回线保持特性

图 6　CrI_3/α-In_2Se_3 范德华多铁异质结的电控磁相变与非易失保持[23]

在单相低维多铁体系中，磁序本身即可作为诱导铁电极化的内禀自由度。3 层 NiI_2 的磁光和电学表征表明，该体系在低温下具有非共线反铁磁序，并表现出铁电与反铁电共存特征[24]。理论计算揭示，3 层 NiI_2 的磁基态为螺旋磁序，其传播矢量 $\boldsymbol{q}$ 在 ab 平面内具有确定取向。根据式 (6)，自旋旋转面矢量 $\boldsymbol{e}$ 与传播矢量 $\boldsymbol{q}$ 之间的几何关系可诱导面外铁电极化。原子尺度自旋动力学模拟进一步表明，螺旋磁态可形成具有相反 P_z 分量的铁电畴，并在畴过渡区域产生局域偶极子交错排列，从而解释实验中观察到的铁电−反铁电共存行为。

在磁控铁电方面，外加磁场可通过改变螺旋磁序的旋转面方向调节铁电极化。如图 7 所示，面外磁场 $\boldsymbol{H}//c$ 时诱导 c 轴磁化，自旋结构由横向螺旋演化为横向锥形构型，导致面外极化分量减小并转向面内方向。实验表明，在 24.5 Hz 和 7 T 条件下，磁控剩余铁电极化比率约为 7%；同时，随着磁场增强，位移电流峰值下降、矫顽电场增加，说明外磁场抬高了面外铁电翻转势垒。KAI 模型拟合进一步证明，铁电畴特征翻转时间随磁场增强而增加，从动力学角度验证了磁场调控螺旋磁序进而控制铁电翻转的物理图像。



a. 磁场调控螺旋自旋构型示意图　　b. 铁电畴翻转时间随磁场的变化

图 7　单相多铁 NiI_2 的磁控铁电机制与畴翻转动力学[24]

低维多铁体系的相关研究表明，磁电耦合既可通过范德华异质界面中的铁电极化诱导电荷重构实现，也可来源于单相螺旋磁体中自旋旋转面与传播矢量的几何耦合。CrI_3/α-In_2Se_3 异质结实现了非易失电控磁性；3 层 NiI_2 则揭示了磁性、铁电性与反铁电性共存的低维单相多铁机制，并实现了磁序对铁电极化及畴翻转动力学的有效调控。上述结果为低维尺度下电写磁态、磁控铁电和多态存储器件提供了重要物理基础。

2　极端环境电磁辐散射控制涂层

极端环境电磁辐散射控制涂层的核心问题，不仅是获得较强吸波能力或较低红外发射率，更在于复杂服役条件下电磁功能的长期保持。海洋腐蚀、高温氧化和热循环应力会通过界面反应、孔隙演化和裂纹扩展改变材料微结构与电磁参数。因此，多功能电磁辐散射控制涂层需要在吸收剂界面防护、涂层梯度结构和热应力释放之间建立协同设计关系，实现环境稳定性、结构可靠性和电磁辐散射控制性能的统一。

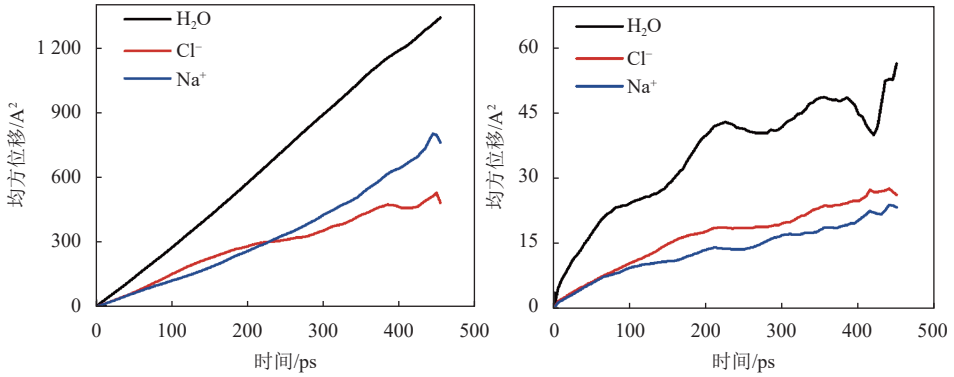
2.1　面向耐海洋环境应用的吸波涂层

面向高湿热、高盐雾等复杂海洋环境，磁损耗型吸收剂易发生电化学氧化，使电磁参数与阻抗匹配状态劣化，进而引起吸波性能衰减。针对这一工程服役瓶颈，相关研究从吸收剂颗粒界面和涂层截面结构两个尺度出发，发展了界面阻隔、缓蚀疏水、致密保护和自分层梯度涂层等方法，实现了耐腐蚀能力与微波吸收性能的协同保持。

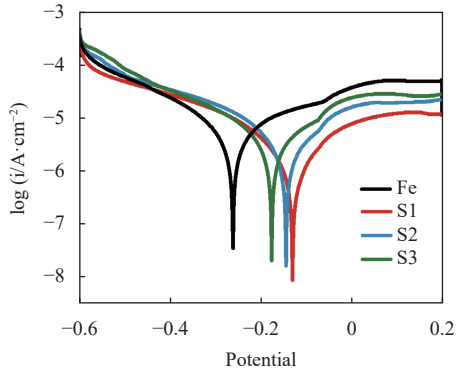
在颗粒界面层面，腐蚀介质在包覆层中的扩散行为是评价防护层有效性的关键。以 Fe@SiO_2@KH560@PDMS 片状羰基铁吸收剂为例[25]，SiO_2 无机网络提供致密阻隔，KH560 增强无机层与有机链段的界面结合，PDMS 低表面能链段降低水分子浸润概率。分子动力学计算表明，H_2O、Cl^- 和 Na^+ 在杂化包覆层中的扩散系数较空白盐溶液体系降低 1～2 个数量级；实验上，该结构使吸收剂接触角提升至约 120°，腐蚀电流降低至 10^{-7} A/cm^2 量级，并在 720 h 中性盐雾暴露后保持较完整形貌，说明颗粒表面杂化阻隔层能够有效提升磁损耗吸收剂的耐候稳定性。如图 8 所示，MSD 扩散、Tafel 曲线和盐雾后形貌结果共同验证了该界面防护机制。

在物理阻隔基础上，缓蚀分子与疏水长链的协同引入可进一步提高金属吸收剂的界面稳定性。CI@BTSA@OTMS 复合保护层[26] 利用 BTSA 中的 N、S 活性位点抑制金属界面电化学反应，并通过 OTMS 长烷基链构筑低表面能屏障，使改性吸收剂

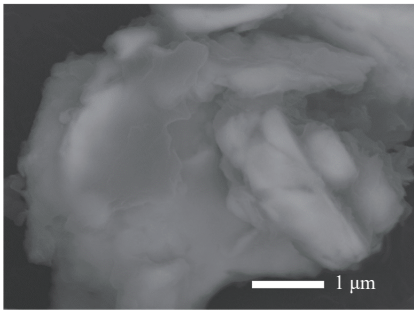
接触角提高至 138.9°，保护效率达到 99.91%，并在 480 h 盐雾后维持较完整形貌。此外，KH570 偶联与 Parylene C 化学气相沉积可在羰基铁表面形成连续致密低渗透层[27]，使保护效率达到 97.40%，尽管非磁性保护层使材料的磁损耗略有降低，但其对介电参数和阻抗匹配的调节以及界面极化和偶极极化的增强产生了补偿作用，使最低反射损耗由未改性 CI 的−48.49 dB 降至−62.36 dB，并使 1.38 mm 厚度下的有效吸收带宽由 6.475 GHz 拓宽至 7.350 GHz，实现了耐腐蚀性与吸波性能的协同改善。



a. 不同包覆层中腐蚀介质的MSD曲线



b. 杂化包覆吸收剂的Tafel极化曲线

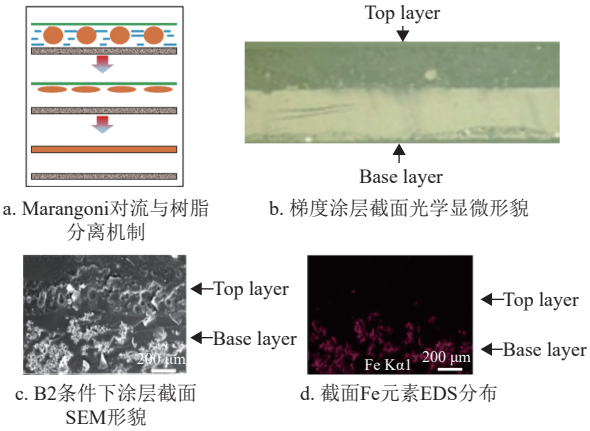


c. 720 h中性盐雾试验后的表面形貌

图 8 Fe@SiO_2@KH560@PDMS 吸收剂的微观杂化物理阻隔机制与量化响应[25]

颗粒界面防护改善了吸收剂自身的耐腐蚀性能，但在实际应用中，表层浸润、涂层孔隙和吸收剂空间分布等因素仍会影响涂层在海洋环境下的长期服役稳定性。为此，涂层截面方向的梯度结构设计成为提升可靠性的关键。在环氧/丙烯酸二元树脂体系中[28]，溶剂挥发产生的表面张力梯度可诱导 Marangoni 对流，驱动低表面能丙烯酸树脂向表层迁移，而环氧树脂向基材侧富集。如图 9 所示，该过程最终形成“表层防护—底层黏附/吸波”的梯度分层结构。

在自分层机制基础上，磁损耗型 FeSiCr 粉体被引入环氧/丙烯酸体系以构建防腐/吸波梯度涂层[28]。Marangoni 对流与重力沉降共同驱动 FeSiCr 向底层环氧相富集，而低表面能丙烯酸树脂富集于表层，使涂层形成“表层防护—底层损耗”的空间分区。自分层涂层能够在维持底层吸波剂富集和电磁耗散功能的同时提升腐蚀阻隔能力，为海洋环境下防腐/吸波协同涂层提供了可行的宏观结构设计方法。



a. Marangoni对流与树脂分离机制

b. 梯度涂层截面光学显微形貌

c. B2条件下涂层截面SEM形貌

d. 截面Fe元素EDS分布

图 9 自分层 FeSiCr 涂层的形成机制与截面结构表征[28]

围绕海洋环境中腐蚀介质渗透与吸波性能衰减之间的耦合关系，相关研究在吸收剂颗粒和涂层截

面两个尺度上建立了耐候吸波涂层的设计路径。颗粒尺度上，有机/无机杂化壳层、缓蚀—疏水协同层和致密低渗透保护层可有效抑制 H_2O、Cl^-和 Na^+向金属界面的迁移；涂层尺度上，表面张力梯度诱导的自分层机制可形成低表面能组分表层富集、磁损耗吸收剂底层富集的梯度结构。综合已有电磁性能测试结果，通过合理控制防护层的组成与厚度，并优化界面及梯度结构，可在提升腐蚀阻隔能力的同时兼顾微波吸收性能。

2.2　面向高温高能环境下的电磁辐散射控制材料

1）高温吸波材料与结构

随着高功率雷达与大功率通信等高温高能装备的发展，吸波材料在服役过程中承受的电磁功率密度和温度显著增加。持续或脉冲式高功率电磁辐射会在材料内部引发显著的热效应，导致温度骤升，要求材料同时具备耐大功率、耐高温特性。

国内外围绕高温高能装备用耐高温、耐高功率、超宽带吸波材料已开展部分研究，但仍普遍面临耐温上限、宽带吸收、耐功率能力、制备成本和大尺寸成型难以兼顾的问题，特别是在 800 ℃ 以上长期服役、2～40 GHz 超宽带覆盖和高功率微波辐照条件下仍存在挑战。

通过合理设计与优化耐高温骨料的种类、粒径和掺量，可构建传统陶瓷和胶凝材料复合的类陶瓷体，同步改善材料的高温性能、吸波效果与结构完整性。研究引入氧化铝空心球（alumina hollow sphere, AHS）作为轻质耐热骨料，可构建具有高温稳定性的改性磷酸钾镁水泥（magnesium potassium phosphate cement, MKPC）复合体系[29]。如图 10 所示，掺入 30% AHS 后，AHS 刚性骨架有效抑制体积变化，即使经 1 100 ℃ 处理，总收缩率仍低于 1%。同时，Al_2O_3 特征衍射峰在热处理前后保持稳定，说明 AHS 主要以物理复合方式提供高温支撑，是复合材料获得优异体积稳定性的关键。

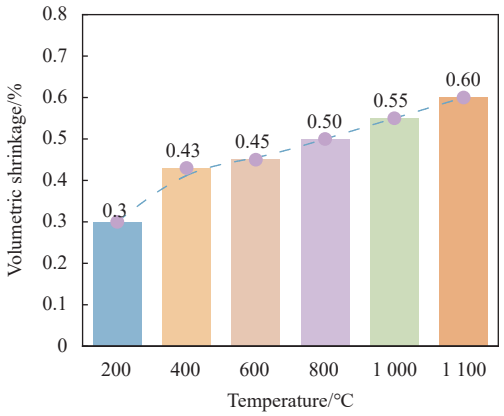


图 10　MKPC/AHS 复合材料收缩率随温度变化柱状图[29]

在此基础上，采用 MKPC 作为基体，利用其高温陶瓷化转变形成稳定陶瓷相，提高吸波体在极端热环境下的结构可靠性。尖劈形渐变结构可改善宽频阻抗匹配并延长电磁波传播路径，使材料在极低功能相含量下，于 2～40 GHz 范围内实现反射损耗低于−40 dB 的强吸收，对应带宽达 36 GHz。该结构功能一体化吸波体兼具超宽带、耐高温和低成本特性，长期使用温度可达 900 ℃。

为直观评估尖劈材料的耐高功率极限，采用高功率微波源对其进行直射聚焦测试（如图 11 所示）。在这种极端电磁环境下，材料内部会因强烈的介电损耗而迅速积聚热量。类陶瓷基尖劈吸波体在耐高功率测试中表现出了卓越的耐大功率辐照能力，在 30～1 000 kW/m² 的功率容量辐照下，结构、力学和吸波性能没有衰减，远超现有常规尖劈吸波件。

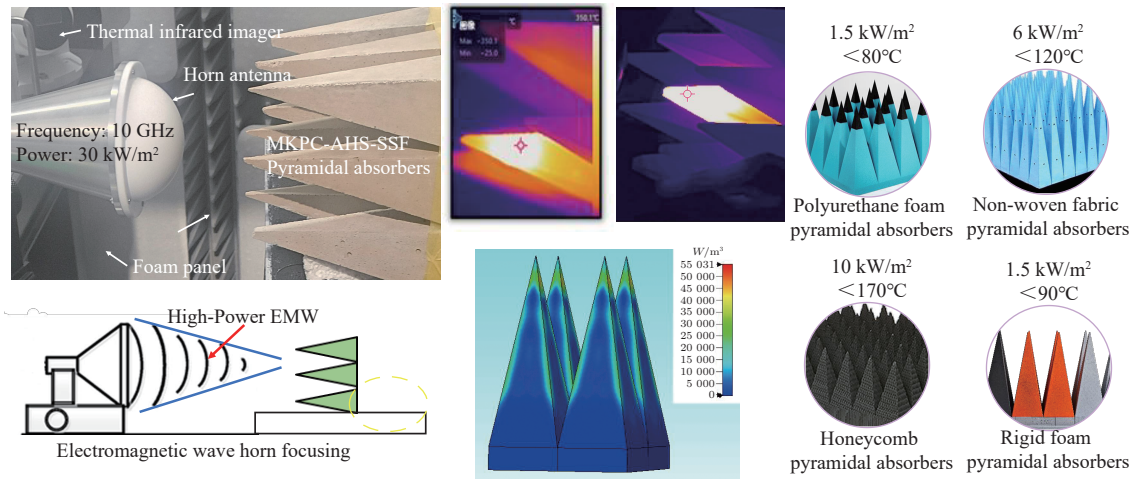


图 11　MKPC-ZSCF 尖劈材料在高功率微波聚焦下的热响应及常规尖劈功率容量对比示意图

针对飞行器高温部件在 600 ℃ 高温环境下的雷达目标特征控制薄型化需求，以 CBS 微晶玻璃为基体，通过喷雾干燥技术制备不同 FeSiAl（FSA）吸收剂含量的复合粉末，并采用大气等离子喷涂制备复合涂层[30]。

如图 12 所示，在室温条件下，1 mm 厚涂层在 7～18 GHz 的反射损耗均低于−5 dB，表现出较好的电磁波吸收能力，当温度升高至 600 ℃ 时，其有效吸收带宽明显收窄，仅在 7.0～14.3 GHz 保持反射损耗低于−5 dB 的吸收水平。尽管高温下吸收带宽有所下降，涂层在 600 ℃ 时仍可实现对整个 *X* 波段的有效覆盖，表明其在 600 ℃ 条件下仍具有较好的高温电磁波吸收性能。

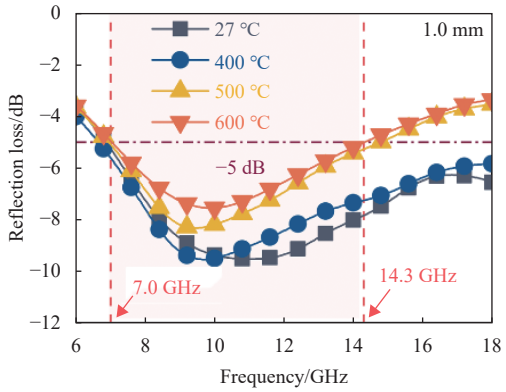


图 12 50FSA/CBS 复合涂层在 27～600 ℃ 温度范围内的垂直反射率

2）高温红外低发射率涂层

面向航空航天热端部件等极端服役环境，红外低发射率涂层既要降低 3～5 μm 大气窗口内的发射率，也要在热冲击、氧化和界面应力作用下保持长期稳定。

YSZ（yttria-stabilized zirconia）热障涂层具有低热导率和良好高温稳定性，但其红外反射、隔热能力和界面耐久性受孔隙形态、表面粗糙度、晶格缺陷及相结构等因素共同制约，因此需要建立“辐射调控—热传输抑制—界面稳定”的协同设计方法。

通过降低喷涂功率可使孔隙率由 9% 提高至 19%，并使 3～5 μm 波段发射率由 0.56 降至 0.46，说明微米孔隙可通过增强后向散射降低发射率[31]。但孔隙率并非唯一因素，孔洞形状和表面平整度同样会改变红外传播路径[32]。因此，介观结构设计应协同调控孔隙数量、孔洞形貌与表面粗糙度。

除介观结构外，晶格缺陷和电输运特性也会调节 YSZ 的本征红外响应。MgO 掺杂可降低吸收系数并提高电导率，5 mol% MgO 掺杂使 3～5 μm 平均发射率由 0.175 降至 0.150[33]；3 mol% LaF_3 掺杂通过氧空位、相结构和孔结构协同调控，使 3～5 μm 平均发射率降至约 0.127[34]。这表明 YSZ 基材料的低发射率设计需要兼顾孔结构散射与晶格缺陷调控。

然而，单纯提高孔隙率虽然有利于增强红外散射并降低热导率，但也可能削弱涂层结合强度和热冲击稳定性。因此，高温红外低发射率涂层需要在红外反射、声子热传导和界面稳定之间建立新的结构平衡。

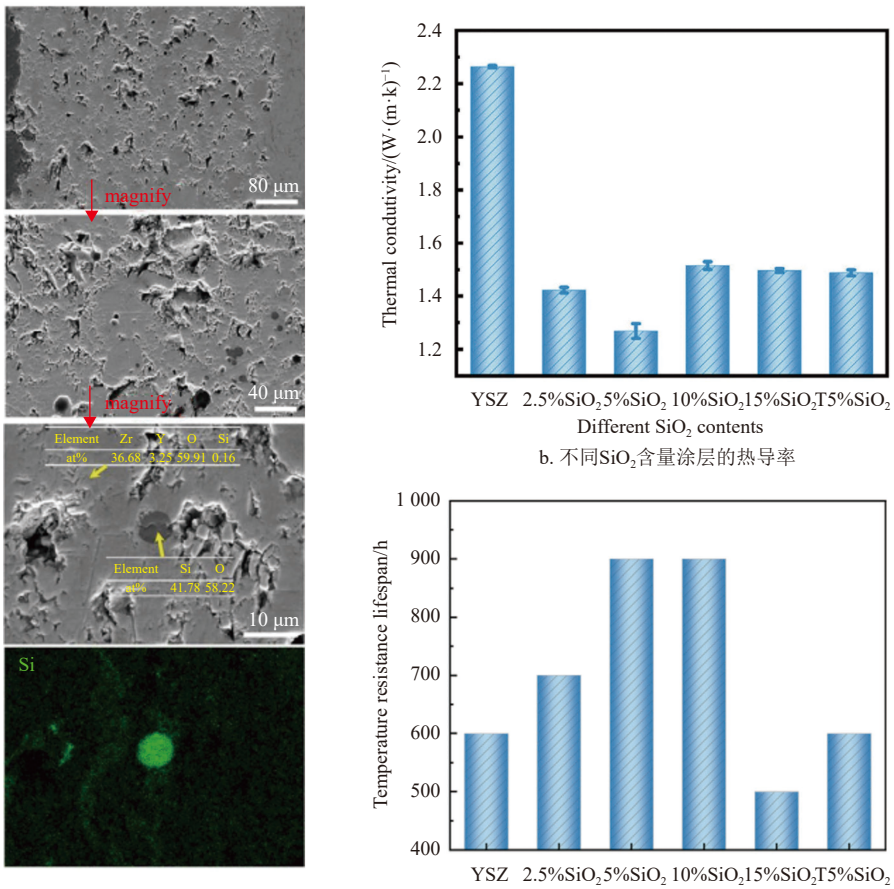
基于这一认识，在 YSZ 涂层中引入球形 SiO_2 散射体[35]。当 SiO_2 颗粒尺寸与 3～5 μm 红外波长相近时，可显著增强 Mie 散射和红外反射；其中 5 wt% SiO_2 复合涂层具有最高反射率，热导率最低降至 1.27 W/(m·K)。如图 13 所示，该结构可在不依赖过高孔隙率的条件下增强红外辐射阻隔并抑制热传导；同时通过界面反应增强结合，使涂层结合强度达到 38 MPa，1 000 ℃ 服役寿命延长至 900 h。

针对高孔隙率导致界面结合和抗裂性能下降的问题，梯度孔 YSZ 涂层采用“内层低孔隙率−外层高孔隙率”的功能分区：内层提高界面结合强度和裂纹扩展阻力，外层延长声子传输路径并提供红外散射中心[36]。如图 14 所示，当层间孔隙率差约为 10% 时，涂层热失配应力显著降低，1 000 ℃ 水冷热震寿命达到约 910 次；孔隙率差增大至约 15% 时，层间更易产生横向裂纹并降低水冷热震寿命。因此，孔隙率并非越高越有利，而应依据热传导、红外散射、界面结合和热应力释放之间的平衡关系进行梯度化设计。

上述研究形成了由孔隙与表面形貌、晶格缺陷、复合散射体到梯度孔结构的多尺度调控路径，实现了 3～5 μm 红外辐射调控、隔热降温与高温服役稳定性的协同，为兼顾低发射率与耐久性的 YSZ 涂层设计提供了基础。

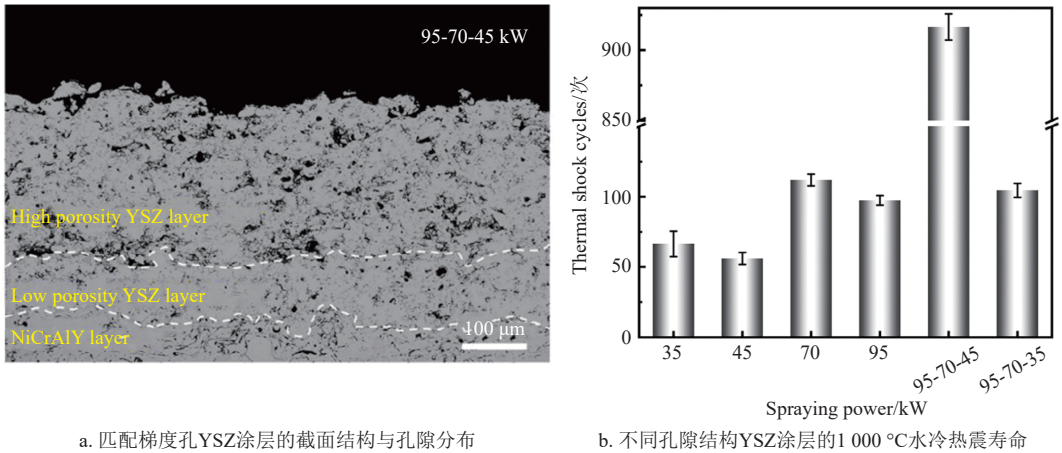
3 低频宽带电磁辐散射控制结构

低频宽带电磁辐散射控制受波长尺度、阻抗匹配、结构强散射和平台功能需求等因素的共同制约，单一吸收或弥散机制难以满足复杂装备的应用要求。该方向的发展重点在于构建材料耗散、波前重构、相位补偿的多机制电磁调控方法，以及电磁辐射/散射协同、电磁/热/力协同和部件共形集成相结合的多功能协同体系，使低频宽带电磁辐散射控制由平面材料性能优化拓展到复杂结构和系统级电磁特征控制。



a. 5 wt% SiO_2复合涂层的截面形貌　　b. 不同SiO_2含量涂层的热导率　　c. 1 000 °C长时氧化寿命

图 13　球形 SiO_2 散射体增强 YSZ 涂层隔热性能与长时稳定性[35]



a. 匹配梯度孔YSZ涂层的截面结构与孔隙分布　　b. 不同孔隙结构YSZ涂层的1 000 °C水冷热震寿命

图 14　梯度孔 YSZ 涂层的截面结构与热震寿命提升[36]

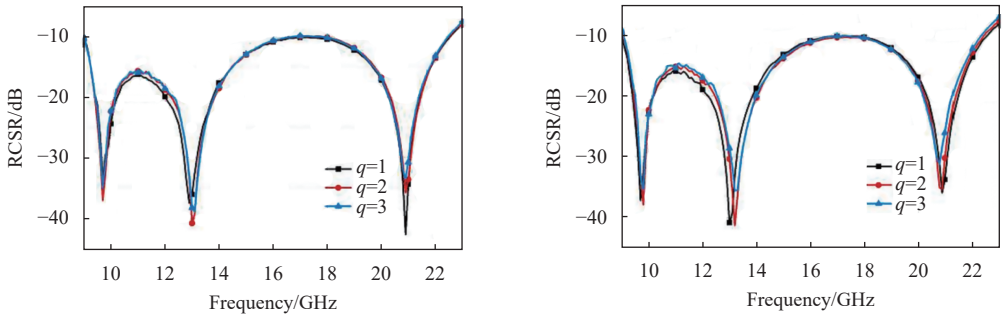
传统雷达吸波涂层受四分之一波长法则和阻抗匹配条件限制，难以同时满足低频、宽带、低剖面和大角度入射下的散射抑制需求；单一吸波机制在处理二面角多次反射、腔体谐振和天线辐射/散射耦合等问题时也明显不足。因此，面向未来飞行器“低频、宽带、全向”的目标特征控制需求，需要围绕不同散射机制建立波前重构、吸收耗散、方向图重构和多功能协同的综合调控方法。

3.1　相位重构电磁辐散射控制结构

在电磁波散射重构方面，轨道角动量（orbital angular momentum, OAM）涡旋波因中心相位奇点而具有轴向能量零点，可将镜面方向强后向散射

转化为非镜面涡旋模式。早期谐振型螺旋相位超表面验证了 OAM 相位奇点抑制单站雷达散射截面（radar cross section, RCS）的可行性，但其工作带宽受单元谐振频散限制。为突破这一限制，Pancharatnam-Berry（PB）几何相位被引入超构表面设计[37]，通过各向异性单元的空间旋转实现自旋角动量向轨道角动量的宽带转换，使交叉极化反射相位主要由几何旋转角决定，从而降低对谐振频率的依赖。

基于该机制构建的 OAM 超表面在 q=1、2、3 的不同构型下均表现出宽带 RCS 减缩能力。仿真结果显示，该类超表面在 9.0～22.5 GHz 范围内单站 RCS 减缩均优于 10 dB；实验在 9.1～18.0 GHz 范围内验证了超过 10 dB 的减缩，并在 10.1 GHz 处获得 53 dB 峰值减缩。如图 15 所示，几何相位模式转换能够有效削弱镜面方向散射，为低剖面超构表面宽带波前重构提供了可行路径。进一步结合 Floquet-Bloch 模理论和线性相位梯度[38]，该机制还可拓展至斜入射条件下的高纯度逆向反射涡旋波调控，从而提升复杂照射环境中的散射控制适应性。



a. LCP入射下q=1、2、3的RCS减缩　　b. RCP入射下q=1、2、3的RCS减缩

图 15　PB 几何相位 OAM 超表面的宽带单站 RCS 减缩性能[37]

对于二面角、开端腔体和凹面进气道等典型结构强散射源，仅依靠波前扩散或材料吸收难以完全抑制多次反射和腔体谐振。二面角结构中，两正交金属面之间的二次反射会引入固定几何波程差，导致远场强相干叠加。针对这一问题，相位梯度超表面（phase-gradient metasurface, PGM）波程差精确补偿模型被用于将二面角 RCS 减缩转化为确定性相位补偿问题[39]，通过构造线性反射相位梯度抵消几何路径差，在 5 GHz 附近实现明显 RCS 减缩。该方法的特点不是简单吸收散射能量，而是针对二面角这一特定强散射源进行定向相位相消。

为拓展工作带宽和入射角范围，棋盘极化转换超表面（checkerboard polarization conversion metasurface, CPCM）被进一步用于二面角、开端腔体和复杂凹面结构的宽带散射重构。CPCM 通过“0/1”单元的交叉极化相位差和棋盘阵列的空间干涉，将单站方向散射能量转移至斜向波瓣。双面加载 CPCM 的二面角结构在 10 GHz 频点将−10 dB RCS 减缩角域拓展至 0°～90°[40]；对开端腔体，内外壁协同加载可破坏腔内角反射器效应和谐振路径，在 TE 和 TM 极化下实现宽带 RCS 减缩[41]。对于凹面复杂曲面，“曲面等效—分区补偿—棋盘集成”的共形蒙皮设计进一步实现了不同局部入射角下的相位补偿和能量再分配。

仿真结果表明，共形 CPCM 蒙皮在 8.80～35.75 GHz 范围内实现超过 10 dB 法向 RCS 减缩，相对带宽达到 120.99%，并在多个频点实现超过 30 dB 的深度减缩[42]。受实验条件限制，实测仅覆盖 8～18 GHz，图 16 展示了该频段内加载 CPCM 前后的仿真与实测 RCS 曲线。

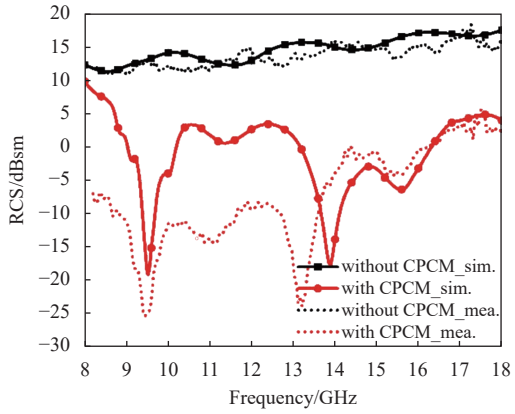


图 16　共形 CPCM 蒙皮在凹面结构上的超宽带 RCS 减缩性能：正入射下加载 CPCM 前后凹面结构的单站 RCS 仿真与测试曲线[42]

该结果表明，超构表面不仅能够处理平面镜面散射，也可以通过局部分区和柔性共形方式扩展至凹面进气道等复杂结构源，为飞行器前向强散射部位的宽带电磁辐散射控制提供了结构化调控思路。

3.2　多机制多功能协同电磁辐散射控制结构

在系统级应用中，电磁辐散射控制材料与结构不仅需要降低 RCS，还可能需要兼顾透波、通信和天线辐射性能。为此，吸收−传输−散射多功能集成超表面被用于在频域上分配不同电磁功能[43]：低频段依靠电阻加载谐振实现吸收，中频段维持低损耗传输，高频段通过极化转换和棋盘相位对消实现散射扩散。实验结果表明，该多功能超表面在 2.5～17.0 GHz 范围内实现超过 10 dB 的 RCS 减缩，相对带宽达到 151.2%，同时在 5.66～10.85 GHz 范围内保持−3 dB 传输通带，为电磁辐散射控制与通信一体化提供了可行架构。

由于天线平台中的电磁辐散射控制层可能直接影响辐射效率和方向图，辐散射一体化调控成为前向目标特征控制中的关键问题。波前转换器（wavefront converter, WFC）利用透射超表面对天线近场相位进行补偿，可将球面波前整形为近似平面波，从而提升辐射增益；当外部电磁波入射时，同一空间相位分布又会扭曲反射波前，使后向散射能量扩散到其他方向，实现 RCS 减缩[44]。该思路揭示了同一超构表面对“辐射过程”和“散射过程”进行协同相位调控的物理基础。

进一步基于偏振选择性通道解耦理论，偏振选择性波前转换器（polarization-selective wavefront converter, PS-WFC）与偏振选择性棋盘超表面（polarization-selective chessboard metasurface, PSCM）被集成为复合天线罩[45]。其中，PS-WFC 主要承担辐射波前整形与增益提升，PSCM 则通过反射相位对消和能量扩散降低外来入射波的单站 RCS。如图 17 所示，该复合天线罩在 8～12 GHz 工作频带内使天线平均增益提升 7.3 dBi，10.5 GHz 处峰值增益提升 11.9 dBi，同时对 x 和 y 极化法向入射波的单站 RCS 平均降低超过 10 dB，验证了宽带辐射增强与散射减缩同步实现的可行性。

对于低频宽带吸波材料而言，在更低频段，单纯依靠相位梯度结构也会受到物理厚度限制。为实现低剖面条件下的宽带能量耗散，必须引入多吸收机制协同方法。基于特征模分析（characteristic mode analysis, CMA）开展了超材料吸收器设计[46]，将金属结构表面电流分解为一组正交特征模式，通过模态显著性识别可被法向入射有效激发的主导模式，并在特征电流波腹位置加载集总电阻，吸波材料的欧姆损耗机制得到提升。

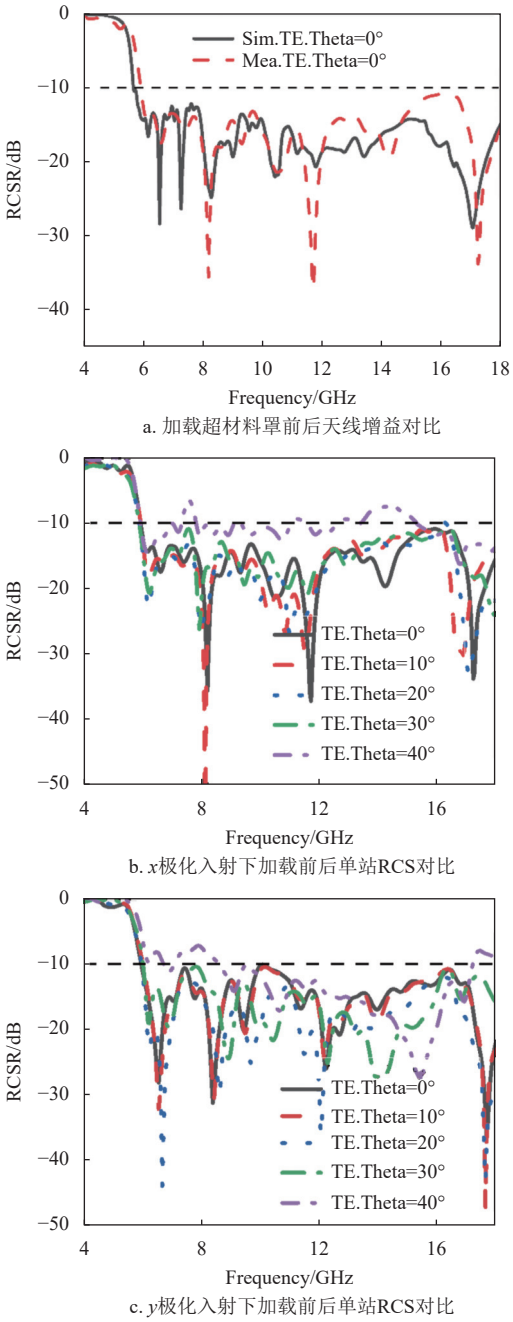
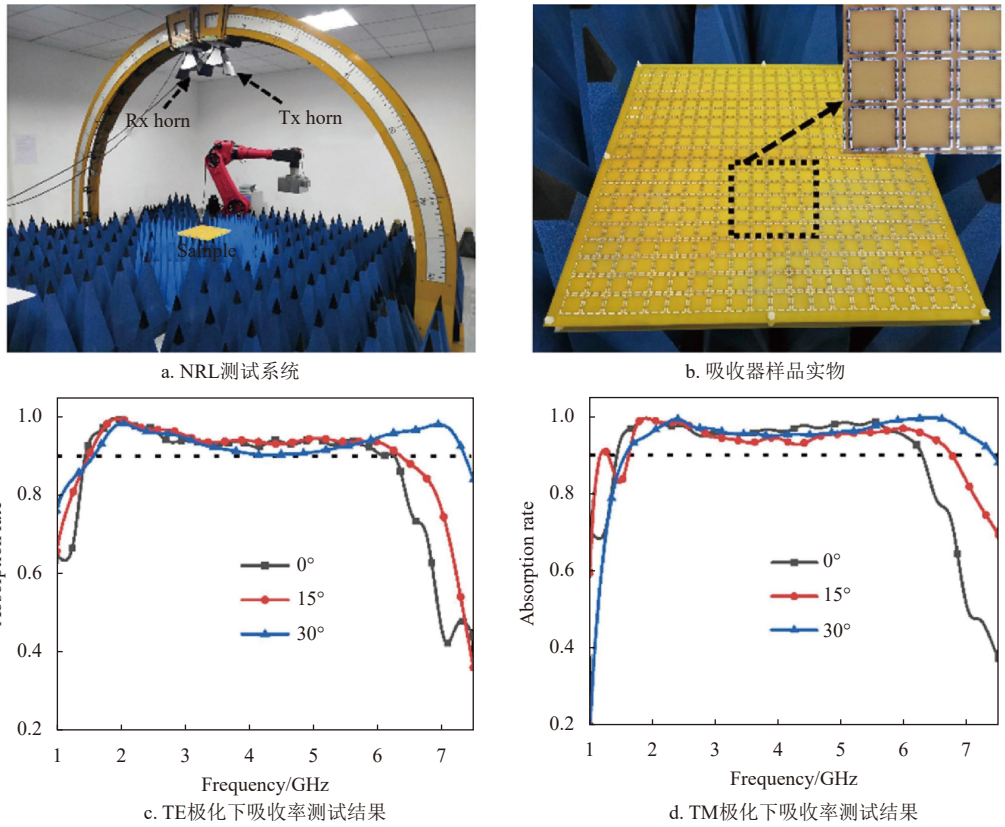


图 17　偏振选择性超材料罩的辐射增强与散射减缩性能[45]

基于该机制设计的特征模主导低剖面吸收器，在厚度仅为最低工作频率波长 0.084 倍的条件下，于 1.44～6.32 GHz 范围内对 TE 和 TM 极化波均实现超过 90% 的吸收，相对吸收带宽达到 127.3%[46]。如图 18 所示，测试系统、样品实物与双极化吸收率结果共同验证了 CMA 指导低频宽带吸收器设计的有效性。针对大角度斜入射下 TE 和 TM 极化波自由空间阻抗变化趋势相反的问题，三维各向异性阻抗匹配结构进一步通过非对称电阻膜调控等效电磁参数，在 3.84～18.00 GHz 范围内实现 0°～65°入射角下双极化稳定吸收[47]。由此可见，低频宽带吸收结

构的设计不应停留于多谐振峰叠加，而应从主导电流模式、阻抗路径和极化响应出发构建可控耗散通道。



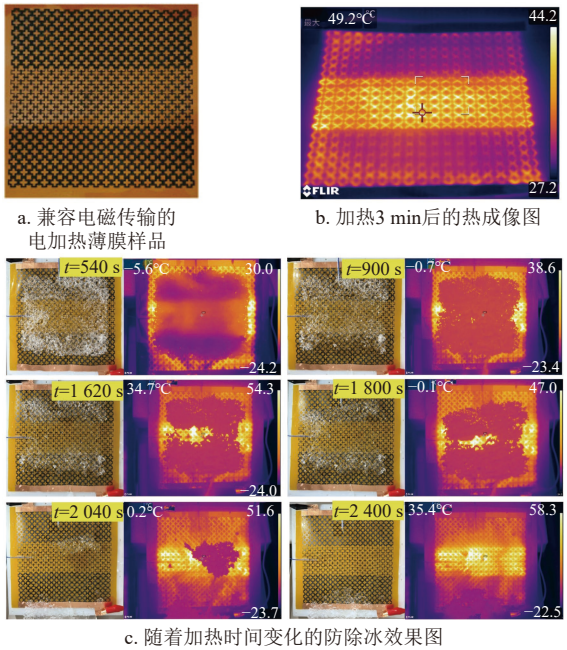
a. NRL测试系统　b. 吸收器样品实物

c. TE极化下吸收率测试结果　d. TM极化下吸收率测试结果

图 18　基于特征模分析的低剖面宽带超材料吸收器及其吸收性能[46]

为了保障飞行器全天候能力，防除冰是其核心需求之一，因此，防除冰与目标特征控制的协同是电磁辐散射控制材料发展的重要方向。以典型飞机机翼前缘的高效电热防除冰和低电磁散射为研究目标，以 NACA0012 机翼翼型为研究对象[48]，基于频率选择表面和电路基本原理，设计实现均匀电加热阻抗薄膜。在 2.0～16.7 GHz 范围内，阻抗膜传输损耗不超过 1 dB，相对带宽为 157.22%，反射率极低，并且对极化不敏感。如图 19 所示，通过对 18×18 阵列的该结构进行电加热除冰实验，加载 120 V 电压的情况下，在室温环境下可以上升到 50℃ 的稳定温度，并呈现集中加热的特点。能够在模拟的 −10℃ 的低温环境中在 5 min 内达到除冰效果。

上述研究围绕低频宽带电磁辐散射控制这一核心问题，突破了传统单一吸波材料受厚度、带宽和阻抗匹配条件制约的设计局限，形成了多机制协同、多尺度调控和部件级集成的系统设计思路。通过将阻抗渐变、相位调控、结构共形和多功能耦合等机制引入电磁辐散射控制材料与结构设计，实现了从材料参数优化向结构功能协同的转变；通过发展阻抗渐变薄膜、三维梯度蜂窝及大尺寸共形吸波部件的设计与制备技术，推动了低频宽带电磁辐散射控制材料从机理验证走向工程应用。相关成果为复杂平台宽频、宽角、低剖面电磁辐散射控制提供了重要的理论基础和技术支撑。



a. 兼容电磁传输的电加热薄膜样品　b. 加热3 min后的热成像图

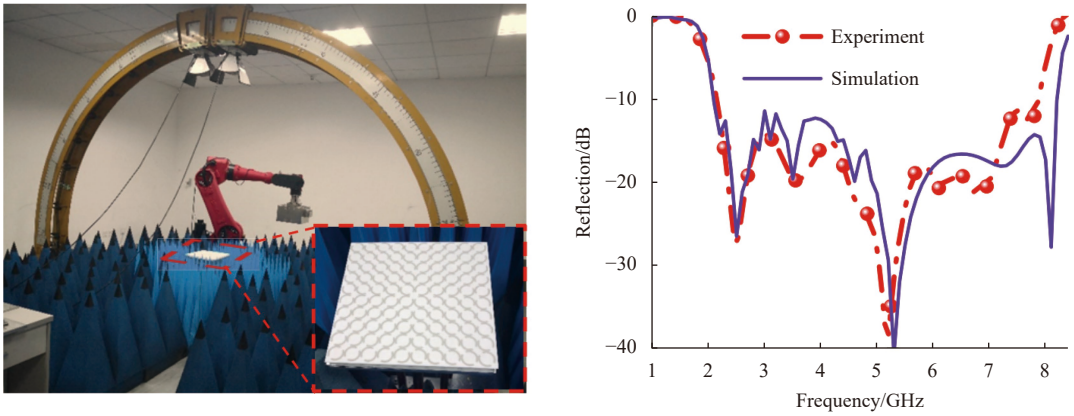
c. 随着加热时间变化的防除冰效果图

图 19　电磁辐散射控制与电加热防除冰的协同设计[48]

4　AI 辅助电磁辐散射材料与结构设计

面向多频谱与多物理场电磁调控器件的高维参数设计需求，经验试错法面临全波计算高耗时与局部最优问题。为此，中心构建了包含“自动化仿真–数据获取–模型训练”闭环的电磁结构智能设计体系，引入深度学习与优化算法处理高维映射关系。

在微波频段宽带散射控制中，极化转换超表面的设计亟需摆脱全波参数扫描对计算资源的过度依赖。文献 [49] 提出了一种基于深度学习的宽带雷达反射减缩超表面智能设计方法。为缓解逆向设计中的不适定问题（多维结构参数与目标光谱非唯一映射），构建了串联型神经网络：逆向网络生成候选结构，正向网络重构其光谱响应，并以重构偏差为优化依据。该网络不依赖唯一参数标签，而是在设计域内搜索满足目标响应的可行解。如图 20 所示，将该网络设计出的宽带极化转换单元按照“0/1”相位特征进行棋盘式布局，通过漫散射实现了宽频段的镜面反射抑制。实验结果表明，该超表面在 2.1～7.9 GHz 频段内实现了高效的电磁散射抑制，其反射损耗低于−10 dB 和−15 dB 的相对带宽分别高达 116% 和 107.4%，在相对带宽这一核心指标上较传统设计展现出优势。



a. 实验场景与样件实物　　b. 宽频带实测与仿真反射曲线

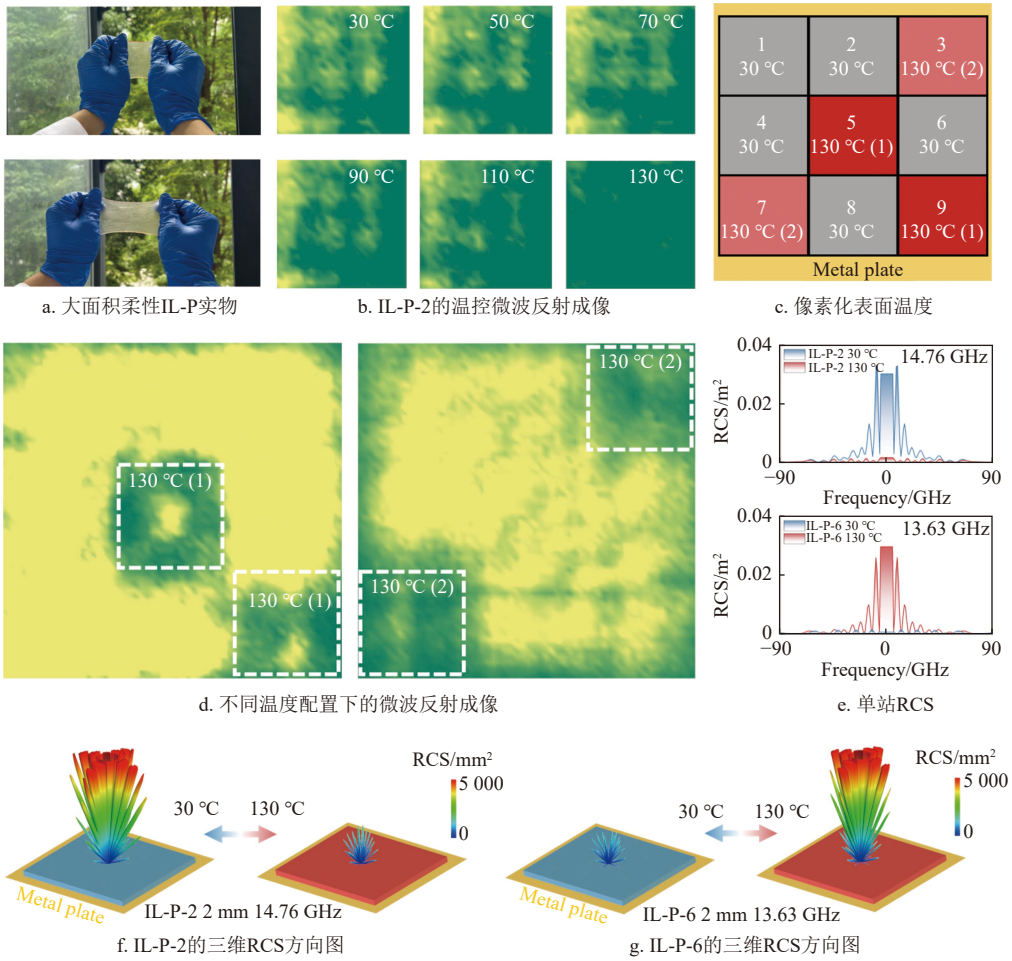
图 20　基于深度学习设计的宽带雷达反射减缩超表面及其测试结果[49]

针对三维多层介质中结构非线性引起的预测偏差与误差累积，在“特征–响应”预测网络中引入动态自校准机制[50]。逆向网络输出的结构参数经全波仿真验证后，根据误差进行二次微调。在所设定的结构拓扑、材料体系和参数范围内，多层结构正、反向映射平均合格率分别达到 98.64% 和 95.56%。在预定义的 2～12 GHz 频段及参数边界内，应用该策略仅耗时 109 min 即可完成高维解空间寻优，最优蜂窝结构在全频段内的最大反射损耗小于 −14.67 dB。上述结果反映了模型在既定设计域内的预测与寻优能力，并不等同于其对训练数据覆盖范围之外参数组合的可靠外推能力。

为解决光谱选择性设计中面临的高维解空间寻优与多物理场制约的问题，构建了深度前馈网络与多目标双退火算法协同的优化框架[51]，以快速预测替代迭代式全波求解，并在解空间内进行全局反向搜索。所得多层吸收器的太阳光谱吸收率计算值和实测值分别为 98% 和 94%，中红外热发射率分别为 8% 和 19%，验证了该方法在多频段兼容设计中的可行性。

为解决主动微波调控表面中电磁参数受温度、离子液体含量和频率等多因素耦合影响、传统实验枚举优化效率较低的问题，文献 [52] 提出了一种机器学习驱动的可重编程介电设计策略。以离子液体聚合物（IL-P）为主动介质，通过实验获得不同离子液体浓度、温度和频率条件下的介电常数、磁导率及反射损耗数据，建立“材料组成—外界刺激—电磁参数—吸波性能”非线性映射。采用精确高斯过程回归模型（exact gaussian process regression, EGPR）对介电常数进行预测，采用梯度提升决策树模型（gradient boosted decision trees, GBDT）对磁导率进行预测，进而计算反射损耗 RL 并设计吸波状态。经机器学习辅助，厚度为 2 mm 的 IL-P 表面可实现两种典型调控模式：IL-P-2 体系在升温过程中由“关闭”状态转变为“开启”吸波状态，反射损耗由−6.04 dB 降低至−46.21 dB，有效调控带宽

达到 5.69 GHz；IL-P-6 体系则由“开启”状态转变为“关闭”状态，反射损耗由−50.48 dB 升高至−6.47 dB，有效调控带宽达到 5.34 GHz，如图 21 所示。此外，研究进一步将 IL-P 表面的自感知信号与 CNN–Transformer 混合模型结合，用于识别表面受力位置和冲击强度，实现了主动微波调控表面的智能感知与结构健康监测。



a. 大面积柔性IL-P实物　b. IL-P-2的温控微波反射成像　c. 像素化表面温度

d. 不同温度配置下的微波反射成像　e. 单站RCS

f. IL-P-2的三维RCS方向图　g. IL-P-6的三维RCS方向图

图 21　可重编程 IL-P 微波调控表面及其性能[52]

需要指出的是，数据驱动模型的预测精度和寻优效率通常仅适用于训练集覆盖的设计域。当结构拓扑、材料体系和主导物理机制不变时，可通过参数无量纲化、迁移学习或少量新增样本校准；若频段、尺寸或材料参数的量级变化导致色散特性、谐振模式或边界条件改变，则需扩充或重新构建训练集。AI 设计的可信度则应综合考虑适用域、预测不确定度、物理一致性和实验验证。模型的可解释性可通过参数敏感度分析，并结合等效电路、表面电流、电磁场分布和谐振模态进行评估，从而形成“模型设计、物理校核、制造筛选、实验验证”的闭环。

5　结束语

电磁辐散射控制材料的发展表明，单一损耗材料、单一低发射率涂层或单一表面散射结构已难以满足复杂电磁环境下的应用需求。材料性能的提升正在由单一参数优化转向多因素协同：既要考虑材料本征电磁响应，也要考虑人工结构的相位与波前调控；既要关注初始性能，也要关注海洋、高温和热循环环境中的长期稳定；既要追求单元结构性能，也要满足工程部件的尺寸、形状和功能约束。

从目前研究进展看，新物理机制的引入显著拓展了电磁辐散射控制材料的设计空间。拓扑、非互易、多铁耦合和可重构结构为突破传统互易响应和自然本构参数限制提供了可能；界面防护、梯度涂层和多尺度孔结构为解决极端环境中的功能衰减问题提供了路径；低频超宽带超构表面和共形部件则推动电磁散射控制从材料层面走向平台结构层面。与此同时，AI 辅助设计正在提高复杂结构设计效

率，但其进一步发展仍需依赖明确的物理约束、可靠的实验数据和可制造的结构方案。

综合前述研究进展，电磁辐散射控制材料与结构仍面临两个核心问题：一是材料、结构与外场多自由度耦合下电磁功能的跨尺度构效关系及多目标协同机制尚不清晰；二是复杂服役环境下微结构与界面演化对电磁功能的影响规律及长期稳定保持机制仍有待深入揭示。

围绕上述科学问题和技术瓶颈，后续研究可重点关注以下方面：一是面向低频宽带、宽角度和多频谱兼容需求，揭示不同频段电磁响应机制之间的竞争与协同关系，发展跨尺度、多机制协同调控方法；二是针对非互易、拓扑和多场耦合体系在偏置条件、响应强度、工作带宽及集成应用方面的制约，探索低功耗、可重构的材料与结构体系；三是面向海洋、高温和热循环等复杂环境以及复杂曲面和大尺寸构件，研究环境作用下材料结构、界面状态与电磁性能的演化规律，提升材料的长期稳定性、共形适应性和规模化制备能力；四是推动物理模型与智能算法融合，将物理约束、实验数据、制造误差和不确定性纳入设计过程，提高复杂结构逆向设计的泛化能力、可信度和可制造性。上述研究有望推动电磁辐散射控制由单一性能优化向多目标协同调控发展，并促进相关材料与结构由实验室性能验证向复杂环境下的长期应用拓展。

参 考 文 献

[1] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. Science, 2013, 339(6125): 1232009.

[2] Zhu Huanzheng, Li Qiang, Tao Chenning, et al. Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1805.

[3] Baranov D G, Xiao Yuzhe, Nechepurenko I A, et al. Nanophotonic engineering of far-field thermal emitters[J]. Nature Materials, 2019, 18(9): 920-930.

[4] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.

[5] Rozanov K N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(8): 1230-1234.

[6] Cui Ruopeng, Duan Zewen, Li Yi, et al. High-temperature oxide ceramic microwave absorber enabled by thermionic migration mediated by electron delocalization[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 9179.

[7] Ren Bin, Jia Yujun, Qi Lehua, et al. Broadband electromagnetic absorption up to 1473 K enabled by dielectric frequency-dispersion engineering in ceramic composites[J]. Nature Communications, 2026, 17(1): 318.

[8] Wang Zheng, Chong Yidong, Joannopoulos J D, et al. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states[J]. Nature, 2009, 461(7265): 772-775.

[9] Lu Ling, Joannopoulos J D, Soljačić M. Topological photonics[J]. Nature Photonics, 2014, 8(11): 821-829.

[10] Sounas D L, Alù A. Non-reciprocal photonics based on time modulation[J]. Nature Photonics, 2017, 11(12): 774-783.

[11] Huang B, Clark G, Klein D R, et al. Electrical control of 2D magnetism in bilayer CrI_3[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(7): 544-548.

[12] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, et al. Inverse design in nanophotonics[J]. Nature Photonics, 2018, 12(11): 659-670.

[13] Jiang Jiaqi, Chen Mingkun, Fan J A. Deep neural networks for the evaluation and design of photonic devices[J]. Nature Reviews Materials, 2021, 6(8): 679-700.

[14] Li Shuwei, Hu Yuanhang, Zhang Yunpeng, et al. Observation of valley-polarized topological phase transition in surface wave photonic crystals[J]. Optical Materials Express, 2024, 14(6): 1563-1571.

[15] Zhou Peiheng, Liu Guigeng, Wang Zihao, et al. Realization of a quadrupole topological insulator phase in a gyromagnetic photonic crystal[J]. National Science Review, 2024, 11(11): nwae121.

[16] Liu Guigeng, Gao Zhen, Wang Qiang, et al. Topological Chern vectors in three-dimensional photonic crystals[J]. Nature, 2022, 609(7929): 925-930.

[17] Li Zhongfu, Ma Shaojie, Li Shuwei, et al. Observation of copropagating chiral zero modes in magnetic photonic crystals[J]. Physical Review Letters, 2025, 134(3): 033802.

[18] Liu Guigeng, Mandal S, Zhou Peiheng, et al. Localization of chiral edge states by the non-Hermitian skin effect[J]. Physical Review Letters, 2024, 132(11): 113802.

[19] Yang Weihao, Liu Qing, Wang Hanbin, et al. Observation of optical gyromagnetic properties in a magneto-plasmonic metamaterial[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1719.

[20] Liu Mengqi, Xia Shuang, Wan Wenjian, et al. Broadband mid-infrared non-reciprocal absorption using magnetized gradient epsilon-near-zero thin films[J]. Nature Materials,

2023, 22(10): 1196-1202.

[21] Yang Weihao, Qin Jun, Long Jiawei, et al. A self-biased non-reciprocal magnetic metasurface for bidirectional phase modulation[J]. Nature Electronics, 2023, 6(3): 225-234.

[22] Liu Zhen, Deng Longjiang, Peng Bo. Ferromagnetic and ferroelectric two-dimensional materials for memory application[J]. Nano Research, 2021, 14(6): 1802-1813.

[23] Wu Yangliu, Zhang Deju, Zhang Yanning, et al. Nonreciprocal and nonvolatile electric-field switching of magnetism in van der Waals heterostructure multiferroics[J]. Nano Letters, 2024, 24(20): 5929-5936.

[24] Wu Yangliu, Zeng Zhaozhuo, Lu Haipeng, et al. Coexistence of ferroelectricity and antiferroelectricity in 2D van der Waals multiferroic[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 8616.

[25] Zhang Linbo, Wan Weihong, Jiang Xianyu, et al. Enhancement of oxidation and corrosion resistance of flaky carbonyl-iron powder via SiO_2/KH560/PDMS coating applied with sol-gel[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 437: 128346.

[26] Jiang Xianyu, Xie Jianliang, Yin Liangjun, et al. In-depth insight into the inhibition mechanism in iron-based composites with bifunction of anti-corrosion and electromagnetic wave absorption based on experiments and theoretical calculations[J]. Applied Surface Science, 2024, 665: 160362.

[27] Jiang Xianyu, Zhang Peng, Zhang Min, et al. Hierarchically engineered CI@KH570@PC composites with dual-functionality for exceptional corrosion resistance and microwave absorption[J]. Surface and Coatings Technology, 2025, 498: 131864.

[28] Zhang Linbo, Hong Munaijin, Yang Ruoyu, et al. Method for preparing a self-stratifying epoxy/acrylic resin coating with micron-sized FeSiCr[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2025, 22(6): 2227-2241.

[29] Sun Bin, Wang Xiangxiang, Yang Yuanyi, et al. Cost-effective ultra-broadband pyramidal electromagnetic wave absorbers for extreme high temperature applications using Zr-doped SiC fibers[J]. Ceramics International, 2025, 51(26): 49964-49975.

[30] Zhang Chen, Wang Xin. A novel high-temperature FeSiAl/CaO-B_2O_3-SiO_2 microwave absorption coating prepared via atmospheric plasma spraying[J]. Ceramics International, 2024, 50(17): 29044-29055.

[31] Yin Juhang, Wang Chao, Zheng Hanyu, et al. Power controlled microstructure and infrared properties of air plasma spraying based on YSZ coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 426: 127768.

[32] Yin Juhang, Zhang Li, Ma Wenzhuang, et al. Research on reducing infrared emissivity of 8YSZ coating by regulating microstructure[J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 130: 104587.

[33] Yin Juhang, Zhang Min, Zhou Tong, et al. Investigating the mechanism of infrared emissivity control in MgO doped YSZ based ceramics[J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 138: 105235.

[34] Xiang Yang, Zhou Tong, Yin Juhang, et al. Effect of YSZ composite ceramics with different LaF_3 doping content on microstructure evolution and infrared emissivity[J]. Ceramics International, 2024, 50(22): 46973-46981.

[35] Xiang Yang, Tan Nengmao, Ma Wenzhuang, et al. YSZ/SiO_2 composite coatings with spherical SiO_2 microstructure for enhanced thermal insulation and long-term durability[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2026, 109(1): e70500.

[36] Xiang Yang, Tan Nengmao, Ma Wenzhuang, et al. Optimizing the gradient pore distribution of YSZ coatings to achieve excellent thermal shock resistance[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2025, 108(9): e20609.

[37] Liu Qian, Liang Difei, Yao Xin, et al. Broadband RCS reduction metasurface based on vortex singularities generated by Spin-to-Orbital angular momentum conversion[J]. Results in Physics, 2024, 59: 107530.

[38] Liu Qian, Chen Haiyan, Yao Xin, et al. Design of retroreflective metasurface for high-purity vortex waves under oblique incidence[J]. Journal of Applied Physics, 2025, 138(2): 023102.

[39] He Qingting, Xie Jianliang, Liu Qian, et al. A novel method for the low-detectable dihedral corner utilizing phase gradient metasurface based on phase cancellation mechanism[J]. ACES Journal, 2023, 38(4): 269-276.

[40] Peng Jian, He Qingting, Chen Haiyan, et al. Broadband and wide-angle radar cross-section reduction of dihedral corner reflectors based on the chessboard metasurfaces[J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27(15): 2500471.

[41] He Qingting, Chen Haiyan, Liu Qian, et al. Design of broadband and ultra-wide-angle low-RCS open-ended cavity based on phase cancellation[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2023, 2023(1): 9958074.

[42] He Qingting, Chen Haiyan, Liu Qian, et al. Ultra-wideband and wide-angle RCS reduction of a concave structure based on a chessboard polarization conversion metasurfaces[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57(3): 035104.

[43] Li Jianxiao, Tian Jiawei, Qiu Riquan, et al. Absorption-transmission-diffusion-type radar cross section reduction metasurfaces based on frequency selective absorber and polarization conversion chessboard structure[J]. Journal of

Physics D: Applied Physics, 2024, 57(22): 225101.

[44] Yao Xin, Chen Haiyan, Liu Qian, et al. Wavefront converter-based antenna for synchronous modulation of radiation and scattering characteristics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(2): 1125-1134.

[45] Yao Xin, Chen Haiyan, Chen Fang, et al. Transmission-reflection phase modulation for antenna gain enhancement and RCS reduction based on polarization-selective metamaterials[J]. Optics Express, 2025, 33(10): 21761-21775.

[46] Chen Haiyan, Huang Yunqiang, Li Guangya, et al. Design and experimental validation of a low-profile wideband metamaterial absorber by characteristic modes analysis[J]. Results in Physics, 2021, 28: 104684.

[47] Pan Tingyan, Chen Haiyan, Tian Jiawei, et al. Dual-polarized wide-oblique-incidence-angle wideband radar absorbing structure based on anisotropic impedance matching theory[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2025, 58(25): 255403.

[48] Chen Fang, Chen Haiyan, Yao Xin, et al. An impedance-partitioned electro-thermal film for wideband microwave transmission and electric heating deicing of wing leading edges[J]. Aerospace Science and Technology, 2026, 178: 112484.

[49] Xie Haiyan, Yue Xiuli, Wen Kaihuai, et al. Deep-learning based broadband reflection reduction metasurface[J]. Optics Express, 2023, 31(9): 14593-14603.

[50] 电子科技大学. 一种基于神经网络的多层蜂窝吸波材料自校准设计方法: CN117037971A[P]. 2023-11-10.
University of Electronic Science and Technology of China. Self-calibration design method for multilayer honeycomb wave-absorbing material based on neural network: CN117037971A[P]. 2023-11-10. (in Chinese)

[51] Ma Wenzhuang, Chen Wei, Li Degui, et al. Deep learning empowering design for selective solar absorber[J]. Nanophotonics, 2023, 12(18): 3589-3601.

[52] Dong Qichao, Wang Zhehui, Qiu Hanyu, et al. Adaptive ionic liquid polymer microwave modulation surface with reprogrammable dielectric properties[J]. Nature Communications, 2026, 17(1): 230.

责任编辑　刘飞阳