



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2501457

引用格式:周必成,张存瑞,李克训,等.吸波涂料的结构组成及最新研究进展[J].科学技术与工程,2026,26(26):11093-11106.

Zhou Bicheng, Zhang Cunrui, Li Kexun, et al. Structural composition and latest research progress of radar absorbing coatings[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(26): 11093-11106.

一般工业技术

吸波涂料的结构组成及最新研究进展

周必成,张存瑞,李克训*,孙丽君,康斌斌,王胜利,白伟伟,米玉洁

(中国电子科技集团公司第三十三研究所,中国-白俄罗斯电磁环境效应“一带一路”联合实验室,太原 030006)

摘 要 吸波涂料作为电磁波调控领域的核心功能材料,在降低军用装备雷达散射截面和消除民用电子产品电磁辐射危害等领域都有着非常广泛的应用。从吸波涂料多级结构组成、吸波性能、吸波涂料失效机制、可控再生技术等方面对中外研究情况进行了详细的总结分析和归纳,并对今后吸波涂料的研究趋势进行了展望,中国吸波涂料仍需在薄型化、轻量化、宽频化、强吸收及耐腐蚀性等方面加强研究。

关键词 吸波涂料;吸收剂;吸波性能;涂层修复

中图法分类号 TB341; **文献标志码** A

Structural Composition and Latest Research Progress of Radar Absorbing Coatings

ZHOU Bi-cheng, ZHANG Cun-rui, LI Ke-xun*, SUN Li-jun, KANG Bin-bin, WANG Sheng-li,
BAI Wei-wei, MI Yu-jie

(No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, China-Belarus Belt and Road Joint Laboratory on Electromagnetic Environment Effect, Taiyuan 030006, China)

[Abstract] Radar-absorbing coatings, as core functional materials in the field of electromagnetic wave control, are widely used in reducing the radar cross-section of military equipment and mitigating the hazards of electromagnetic radiation from consumer electronic products. The research situation at home and abroad was analyzed and summarized in detail from the aspects of composition, research progress of microwave absorbing properties, failure and repair of microwave absorbing coatings, and the research trend of microwave absorbing coatings in the future was prospected. Domestic absorptive coating materials still need to strengthen research in thinning, lightweighting, broadbanding, strong absorption, and corrosion resistance.

[Keywords] microwave absorbing coatings; absorbent; absorbing property; coating repair

隐身技术是当今信息化时代世界各国重点发展的国防高科技,其核心目标是降低士兵、飞机、舰船、潜艇、导弹、卫星和地面车辆等武器装备的可探测性,使其难以被敌方识别。该技术通过采用电磁防护吸波材料与优化几何形状设计来减小雷达反射截面,其中吸波涂层因制备工艺相对简单、施工便捷、可喷涂或涂刷于各类复杂异型基材表面以实现电磁波吸收功能,已成为在役武器装备隐身技术的重要组成部分^[1-5]。吸波涂料是基于特定电磁参数的吸收剂微纳粉体,经工艺合成、表面处理、配方

整体设计、树脂分散等关键流程,可喷涂、浇筑而成的雷达波吸收材料^[6-8]。

吸波涂料在隐身与民用电磁兼容领域均具有重要应用价值,在隐身领域,可有效缩减飞行器、舰艇、军用车辆和地面发射设施等军事目标的雷达散射截面,赋予其隐身性能。在电磁兼容领域,可应用于医学成像、无线通信和汽车导航等电子产品内部,抑制设备内部电磁波共振及元件间耦合杂波,消除电磁干扰^[9-10]等。然而,吸波涂料在新型吸波剂研发、涂层工艺优化、使用寿命延长及可靠性提

收稿日期:2025-03-05; 修订日期:2026-03-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3811305);山西省中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231B015)

第一作者:周必成(1983—),男,汉族,山西朔州人,硕士,高级工程师。研究方向:吸波材料。E-mail:879899493@qq.com。

*通信作者:李克训(1982—),男,汉族,山东德州人,硕士,研究员。研究方向:吸波材料。E-mail:likexuncc@126.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

升等方面仍然面临诸多亟待解决的问题。因此,设计和开发高性能吸波涂料受到中外广大科研工作者的持续广泛关注,相关研究成果不断涌现。基于此,现从吸波涂料的中外研究进展、多级结构组成、制备工艺、失效机制及可控再生技术等方面进行系统综述,并对其发展趋势予以展望。

1 吸波涂料研究进展

1.1 国外研究进展

国外在高性能吸波涂料研发和生产方面起步较早,代表性企业包括美国的洛克希德·马丁公司、波音公司、3M 公司、日本的 NEC 公司、TDK 公司、英国的 Plessey 公司及俄罗斯的 BIIAM 公司等,有公开资料报道国外研制的雷达吸波涂料可以使武器装备的雷达散射面积缩减 90% 以上^[11-12]。

在应用方面,美国 F-22 和 F-35 五代战斗机、B-2 轰炸机,俄罗斯苏 47 和苏 57 战斗机,法国阵风战斗机以及欧洲 EF2000 台风战斗机等现代隐身飞行器均不同程度地采用了各类高性能的吸波涂料^[13-15]。国外几种典型吸波涂料基本性能如表 1 所示。

表 1 国外几种吸波涂料的基本性能^[13-15]
Table 1 Basic performance of several foreign absorptive coatings^[13-15]

制造商	基本性能
Plessey	厚度 0.5 ~ 1.5 mm;雷达波频率在 6 ~ 16 GHz 时 $R < -6$ dB,其中在 10 ~ 12 GHz 时 $R < -8$ dB
APP	厚度 0.76 mm;在 6 ~ 18 GHz 时 R 介于 $-3 \sim -13$ dB
BIIAM	厚度 0.95 mm;在 3 ~ 18 GHz 时 $R < -4$ dB
3M	厚度 1 mm;面密度 1.52 kg/m ² ;在 3 ~ 18 GHz 时 $R < -5$ dB
GAMMA	在 4 ~ 8 GHz 时 $R < -5$ dB;在 8 ~ 18 GHz 时 $R < -8$ dB
NEC	厚度为 4.7 mm;在 6 ~ 13 GHz 频段时 $R < -10$ dB;在 8.5 ~ 12.2 GHz 频段时 $R < -20$ dB

注: R 为雷达波反射率。

1.2 中国研究进展

中国在吸波涂料领域的研究与应用也取得了显著成果,主要研发单位包括北京航空材料研究院、江阴市中强科技有限公司、中南大学物理科学与技术学院粉末冶金国家重点实验室、中国空空导弹研究院、中国兵器工业第 59 研究所、国防科技大学、装甲兵工程学院、佳驰科技、中国电子科技集团公司第三十三研究所等单位。

北京航空材料研究院研制的防腐蚀型双层宽频带雷达吸波涂料^[16],在涂料厚度为 1.7 mm、面密度为 4.0 kg/m²时,雷达波频率在 8 ~ 18 GHz 的反射率 $R < -11$ dB,经高低温、耐海水、耐湿热等耐环境性能试验后,涂层外观、反射率和附着力无明显变

化,展现出优良的耐环境稳定性^[17]。该院在舰船隐身涂料应用方面已开展相关实践。例如,在 052A 型导弹驱逐舰及 054 型导弹护卫舰的后桅杆上均采用了深黑色吸波涂料,以降低雷达信号反射;其研发的三层结构吸波涂料,在厚度 2.15 mm、面密度 4.5 kg/m²时,6 ~ 18 GHz 频段的反射率 $R < -10$ dB,且环境适应性良好^[18]。

江阴市中强科技有限公司制备的薄型单层吸波涂料,以超细金属粉、磁损耗吸波剂、导电高聚物为混合填料,601 环氧树脂为基体,聚酰胺树脂为固化剂,在厚度为 1.0 ~ 1.1 mm、面密度 3.5 kg/m²时,8 ~ 18 GHz 频段的反射率 $R < -8$ dB^[19]。

中南大学物理科学与技术学院粉末冶金国家重点实验室以聚氨酯为黏合剂、薄片状纳米晶 FeSiAlCr 为吸收剂制备的吸波涂料,在厚度 2 mm 时表现出优异的吸波性能,0.5 ~ 18 GHz 频段内反射率 $R < -10$ dB 的带宽达到 15.39 GHz^[20]。

中国空空导弹研究院制备的雷达吸波涂料主要成分包括改性环氧树脂黏合剂、含铁氧体铁粉类吸收剂、胺类固化剂、溶剂及其他涂料助剂。在涂层厚度为 0.50 mm ± 0.05 mm 时,该涂料对 S 波段、C 波段、X 波段、Ku 波段均具有优良的吸波性能,且涂层附着力强,可吸收表面行波、爬行波,具备优异的物化和施工工艺性能,已在多个行业实现工程化应用^[21]。

中国兵器工业第 59 研究所通过碱性化学镀技术在空心微珠表面包覆镍磷和镍钴磷合金层,制备了核壳结构的吸波剂(粒径 8 ~ 26 μm),并以此制备吸波涂层样板。测试结果表明,在涂层厚度 0.94 mm、面密度 0.6 kg/m²时,26.5 ~ 40 GHz 频段内涂层雷达波反射率平均达到 12 dB^[22]。

国防科技大学采用三层阻抗匹配设计制备的雷达吸波涂层,在厚度 1.20 mm、面密度 2.80 kg/m²时,8 ~ 18 GHz 频段内反射率 $R < -10$ dB 的带宽达 6.0 GHz,研究证实多层结构设计可有效展宽吸波频段^[23]。

装甲兵工程学院^[24]以螺旋碳纳米管/掺杂钡铁氧体复合材料作为吸波剂,环氧树脂为基体,开发了单层和双层吸波涂层,并通过数值模拟和自适应遗传算法对涂层的浓度和厚度进行优化。该吸波复合材料具有多孔网状结构,富含微观空腔和导电网络,如图 1 所示。优化后的吸波涂层散射图案均匀、雷达截面(radar cross section, RCS)最小,吸收率最高,在 16.66 GHz 时最小反射损耗达 17.22 dB,吸收带宽可达 9.16 GHz,这一优异性能得益于其多元协同电磁衰减机制与良好的阻抗匹配特性。

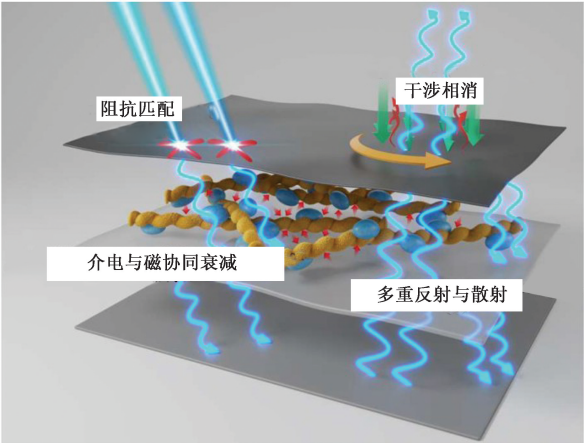


图 1 涂层的吸收机制^[24]

Fig. 1 Absorption mechanism of coatings^[24]

佳驰科技经多年研究形成 J CXB-XX 等系列吸波涂料产品,在厚度 $\leq 3\text{ mm}$ (可调)、 $1\sim 18\text{ GHz}$ 内实现吸收率 $\leq 20\text{ dB}$,使用温度范围为 $-55\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。中国电子科技集团公司第三十三研究所开展了新型低频和碳系吸波剂材料的研制,推出 J01XBCL-6S 等系列吸波涂料材料,覆盖 $2\sim 40\text{ GHz}$ 频段,厚度 $\leq 2\text{ mm}$,吸波性能可设计,但在规模化生产方面仍存在不足。

综上,国外吸波涂层材料研究起步早,已形成多家技术领先企业,其产品具有吸波频段宽、稳定性好等优势;中国吸波涂料在吸波带宽方面持续提升,但在涂层厚度、面密度及稳定性等关键性能指标上仍需进一步优化。

2 吸波涂料结构组成及工艺分析

吸波涂料的主要成分包括黏合剂、吸波剂、偶联剂、流变剂和悬浮剂。其中,黏合剂的核心功能是黏结吸波剂及其他填料,赋予涂层足够的力学性能与抗外界环境能力;吸波剂主要用于吸收投射至涂层表面及穿透到涂层内部的电磁波;偶联剂可改善涂料薄膜稳定性、均匀性与致密性;流平剂能够优化涂层的稳定性和涂装性能,提升成膜质量^[25]。

2.1 吸波涂料黏合剂

黏合剂作为吸波涂料的主要成膜物质,负责将吸收剂及其他填料牢固粘结并附着于基材表面,其性能直接决定吸波涂料的物理强度和抗外界环境能力等^[26]。

吸波涂料黏合剂的选择需遵循以下原则^[27]: ①附着力强,柔韧性及耐冲击性优良;②对吸收剂容纳量高,自身质量轻;③介电常数大。

现阶段吸波涂料常用的黏合剂体系主要包括聚烯烃类、环氧树脂类及聚氨酯类等^[28-29]。3种黏合剂体系的力学性能对比如表2所示。

在相同厚度及吸波效果条件下,采用介电常数较大的黏合剂可降低吸波涂料中的吸收剂用量;在吸收剂含量相近、反射率及带宽指标相当的情况下,高介电常数黏合剂有助于减薄吸波涂料厚度。因此在吸波涂料研制过程中,需优先考虑黏合剂的本征电磁参数,通过选择合适的吸收剂和黏合剂组合,控制吸收剂固含量,可制备出不同频带、不同吸收率的吸波涂层。各类吸波涂料黏合剂的介电常数如表3所示。

表 2 3种黏合剂体系的力学性能比较^[28-29]

Table 2 Mechanical property comparison of three adhesive systems^[28-29]

项目	聚烯烃类	聚氨酯	环氧树脂
附着力/MPa	8~10	>15	>15
柔韧性/mm	3~5	>20	10~20
耐冲击强度	50	50	50
允许填料添加能力	差	良	优

表 3 各类吸波涂料黏合剂的介电常数^[28-29]

Table 3 Dielectric constants of various absorbing coating binders^[28-29]

黏合剂类型	介电常数	损耗
环氧树脂	2.95	0.040
聚氨酯	2.87	0.032
聚烯烃类	6.86	0.042

因此,选择吸波涂料基体时,需结合实际应用环境,综合考量附着力、耐温性、柔韧性、厚度、面密度及吸波性能等指标。环氧树脂适配通用性吸波涂料,粘结强度高、耐化学性好,适合中高温、强附着力场景;聚氨酯柔性好,适合曲面基材,如雷达罩和柔性电子领域,缺点耐湿热、耐老化性能差,不适合长期户外暴晒环境;聚烯烃类适合轻量化、耐候性要求高的户外装备,但耐温性差,不适合高温工况。针对环氧基体柔韧性不足的问题,学者们通过添加液体橡胶提升吸波涂层的拉伸强度与柔韧性,使涂层在 1 mm 薄板基材上弯曲 90° 无断裂^[30];此外,采用液体端羟基丁腈橡胶增韧环氧树脂,并优化固化温度以提升增韧效果与附着力;采用聚氨酯增韧环氧树脂时,聚氨酯的 $-NCO$ 基团与环氧树脂中的一 OH 发生反应形成互穿复合体系,当聚氨酯与环氧树脂质量比为 $1/9$ 时,改性体系附着力与柔韧性最佳^[31],涂层附着力达0级。在 $8\sim 12\text{ GHz}$ 频段内最大反射损耗达 -38.6 dB ,对比纯聚氨酯基体,耐温性提升至 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$,耐老化性能失重率降低 40% 。

2.2 吸波涂料吸波剂

吸波剂是决定吸波涂料吸波性能的核心因素,

通过设计吸波剂的结构组成与含量,可实现吸波涂料宽频、轻质、高效的吸波特性,因此吸波剂设计是吸波涂料研究的关键^[32]。

吸波剂的吸波性能依赖于其化学组成和微观结构,不同类型吸波剂的电磁波吸收机理存在差异。根据电磁波损耗理论,吸波剂可分为磁损耗型、电阻损耗型及介电损耗型3类^[33]。

磁损耗型吸波剂的损耗机制主要包括磁滞损耗和铁磁共振损耗,典型材料有铁氧体^[34-35]、羰基铁^[36-37]、多晶碳纤维及合金等。铁氧体系列可分为尖晶型与六方晶型,其电磁参数可通过调控粒径、相组成及形貌实现优化^[38-39]。基于磁损耗吸波剂磁导率的频散效应,该类吸波剂在降低武器装备低频雷达散射截面领域仍具有广泛应用前景。Kumar等^[16]研究了 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 颗粒尺寸对X波段雷达吸收特性的影响,发现随着退火时间的延长, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 的平均粒径与标准偏差均增大,复介电常数、复磁导率及损耗角正切也随之增加,当平均粒径为240 nm时,9.46 GHz频段的最大反射率达-20.21 dB。

目前,铁氧体的相关研究主要集中于稀土掺杂对铁氧体磁性的影响及吸波带宽的拓展。Sun等^[40]在钡六铁氧体中进行Ce元素取代,制备了 $\text{BaCe}_{0.05}\text{Fe}_{11.95}\text{O}_{19}$,采用溶胶-凝胶柠檬酸盐法测试其在8~13 GHz频段、3.5 mm厚度下的复介电常数、磁导率及微波吸收特性,获得了更优的反射损耗性能。Liu等^[41]研究了Fe-Si合金粉末的粒度对电磁参数及2~7 GHz频段微波吸收特性的影响,结果表明,随着颗粒尺寸的减小,材料的复介电常数和磁导率均增大,微波吸收性能改善,吸收峰向低频偏移。但磁损耗型吸波剂存在成本高、密度较大及易腐蚀的缺点。Xia等^[42]以环氧树脂为基体,片状羰基铁(flaky carbonyl iron, FCI)为吸收剂,制备了FCI质量分数分别为50%、60%和70%的吸波涂层,经192 h的紫外照射-盐加速老化试验,研究不同吸收剂浓度对涂层腐蚀行为及机制的影响。通过X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscope, FE-SEM)结合能量色散X射线光谱仪(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX)分析表面形貌、化学结构演变及腐蚀扩散过程,采用电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)及电磁模拟研究腐蚀行为对吸波性能的影响。结果表明FCI含量增加会加速复合涂层的腐蚀速率,这主要归因于高FCI浓度下环氧基体保护作用减弱,且FCI腐蚀产生的缺陷促进了腐蚀介质渗透。

电阻损耗型吸波剂电磁能衰减主要源于电阻损耗^[43],当电磁波与材料相互作用时,材料内部自由电子发生定向移动形成电流,通过焦耳热耗散入射电磁能量。典型材料包括炭黑^[44-45]、碳纳米管^[46-48]、石墨烯^[49-50]、碳纤维^[51]。该类材料具有密度低、介电常数高、电导性能优异、热力学稳定性好及不易腐蚀等特点,可应用于海洋性耐盐雾服役的装备。

Chen等^[52]研究的自组装碳吸波剂,在吸波剂含量20%、涂层厚度1.1 mm时,最小反射损耗值达-25.03 dB;该试样在5%的NaCl和NaOH介质溶液中的附着力良好,腐蚀速率较低(6.53×10^{-6} mm/年)和保护效率较高(92.86%)。介电损耗型吸波剂的电磁能衰减主要依赖介电极化弛豫损耗,当极化速度与电磁场的变化相近时,缓慢建立的极化过程会产生电流损耗电磁能量。典型材料如钛酸钡陶瓷系列^[53-54]等,其突出优势在于耐高温及抗氧化性能优良,在高温环境应用中具有独特价值。

传统吸收剂羰基铁、铁氧体等吸波性能优良,但存在密度大、易腐蚀等问题,难以满足装备的轻量化需求;而单一碳基材料吸收剂虽密度小、耐腐蚀性好,但吸波频带较窄。因此,现阶段中外吸收剂研究的重点是结合两类材料的优势,制备电-磁协同损耗的新型吸收剂^[55],通过磁损耗、介电损耗、多次界面反射及结构与成分,优化吸波剂的电磁参数,实现与自由空间的阻抗匹配及吸波频带拓宽。郭阳等^[56]在FeSiAl合金(iron-silicon-aluminum, FSA)表面沉积 SiO_2 和C层,制备了多壳层电-磁复合吸收剂,该复合吸收剂在微波吸收性能提升与带宽拓展的同时,耐腐蚀性显著增强,如图2所示。

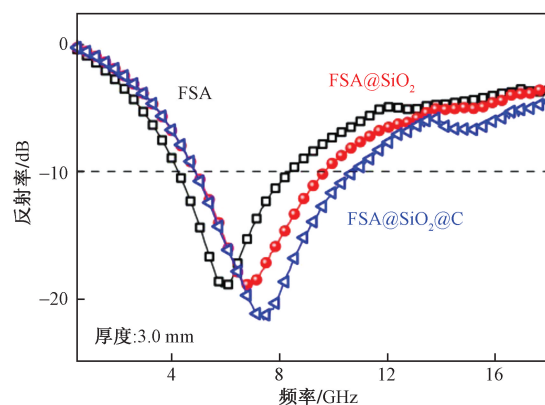


图2 FSA、FSA@ SiO_2 和FSA@ SiO_2 @C的微波吸收性能对比^[56]

Fig. 2 The microwave absorption performance comparison of FSA, FSA@ SiO_2 , and FSA@ SiO_2 @C^[56]

Wu 等^[57]为解决单一碳材料吸波频带窄的问题,将异质组分以梯度结构与碳基材料结合,制备了多组分、多尺度结构梯度弥散结构的 Air@G-Fe/C 材料(图 3),该材料在电磁波吸收性能方面表现出突出优势,在厚度 2.1 mm 时,最低反射损耗值达 -62.7 dB,为电-磁协同损耗吸波剂设计提供了新方案。

Zhang 等^[58]合成了 N 掺杂碳纳米管包覆 CoNi 合金的复合吸波剂,该吸波剂具有多种异质结构。研究证实,包覆异质微观结构与成分对微波吸收性能具有良好的调控作用,N 掺杂的碳纳米管形成的独特异质结构提升了材料的氧化稳定性;丰富的异质界面优化了材料的阻抗匹配特性,材料固有的高导电性和磁损耗能力使其在低填充下仍能实现高效电磁波吸收。在厚度 3.2 mm 时,该吸波剂的最小反射损耗达 -84.0 dB,最大有效吸波带宽为 4.3 GHz,表明纳米碳包覆策略在制备轻质、高性能电磁波吸波剂方面具有巨大潜力。

此外 MXene 复合材料和金属有机框架(metal-organic frameworks, MOF)吸收剂等新型材料也受到广泛关注^[59]。MXene 复合材料主要由过渡金属碳化物和氮化物组成,化学通式为 $M_n + 1X_nT_x$ ($n = 1 \sim 3$, M 为前过渡金属,如 Ti、Zr、V、Mo 等; X 为 C 或 N 元素; T_x 为表面基团,如—OH、—O、—F 和—Cl 等),具有优异的导电性、丰富的表面极性官能团、易调控的耗散性能与阻抗匹配特性、低密度及良好的机械性能与加工性能。Liu 等^[60]通过牺牲模板策略制备了具有纳米厚壁的 $Ti_3C_2T_x$ 空心球(图 4),该独特大孔结构空心球体通过改善阻抗匹配、增强多次反射与散射及偏振弛豫提升吸波性能,如图 5

所示。在石蜡中添加质量分数 10% 填料时,厚度 2 mm 的 $Ti_3C_2T_x$ 空心球在 10.3 GHz 频段的最小反射损耗达 -49.2 dB,且通过调控腔体尺寸与厚度,可在 3.7 ~ 16.5 GHz 频段内优化其吸波性能,该研究为设计轻质、高性能的基于 MXene 基微波吸收器提供了简便有效的方法。

MOF 材料是以金属离子或金属簇为中心,通过有机配体连接形成的具有三维多孔结构的晶体材料,具有分子结构可调控、比表面积大等特点,通过结合铁磁性金属离子可实现电耗散与磁性功能,其内部丰富的界面与偶极子能够有效吸收和散射电磁波。MOF 吸波材料可通过共纺丝技术、水热反应、氧化和碳化处理技术来制备。Guo 等^[61]通过调整静电纺丝、高温退火工艺参数,制备了含有双壳空心结构纳米立方体的纤维复合吸波剂,该吸波剂与石蜡混合(填料的质量分数为 10%)时,最小反射损耗达 -52.14 dB,吸收带宽为 6.16 GHz。电磁参数分析表明,该材料通过介电损耗和磁损耗的协同效应吸收电磁波,模拟海水环境中的电化学测试证实其具有一定的自防腐能力。

Li 等^[62]为实现相对介电常数和磁导率参数匹配,基于可控 MOF 的前驱体,通过热解双金属 MOF 制备了双金属 Fe/ M ($M = Co, Ni, Mn$) 掺杂碳吸收剂,该材料表现出优异的微波吸收性能。通过调整第二金属源和 Fe/ M 的比例,实现了自由空间和吸收体之间的阻抗匹配,优化后的 $FeCo_2@C$ 在填料的质量分数为 25% 时,最低反射损耗达 -71.4 dB,吸波带宽达 14.2 GHz。研究表明,在 Fe-MOFs 前驱体中合理掺杂第二金属源以生成双金属磁性纳米颗粒/C 材料,对提升微波吸收性具有重要作用。

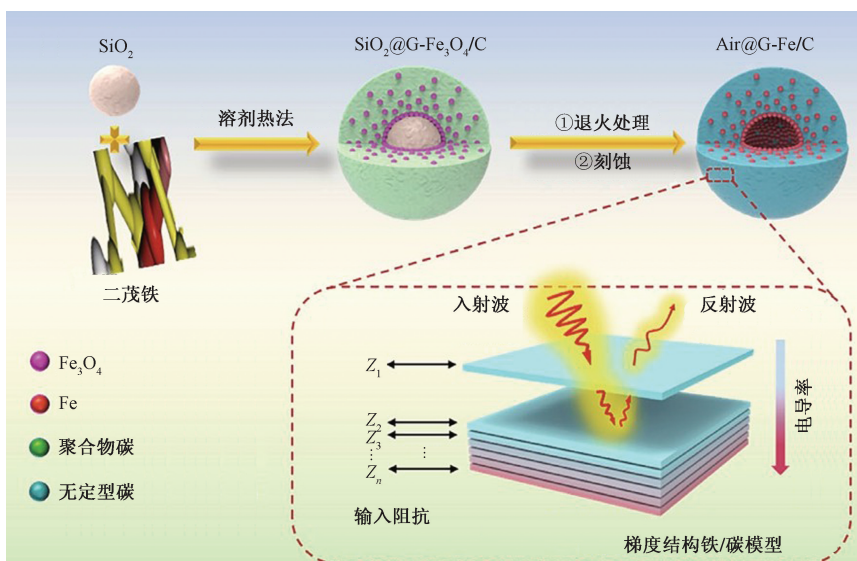
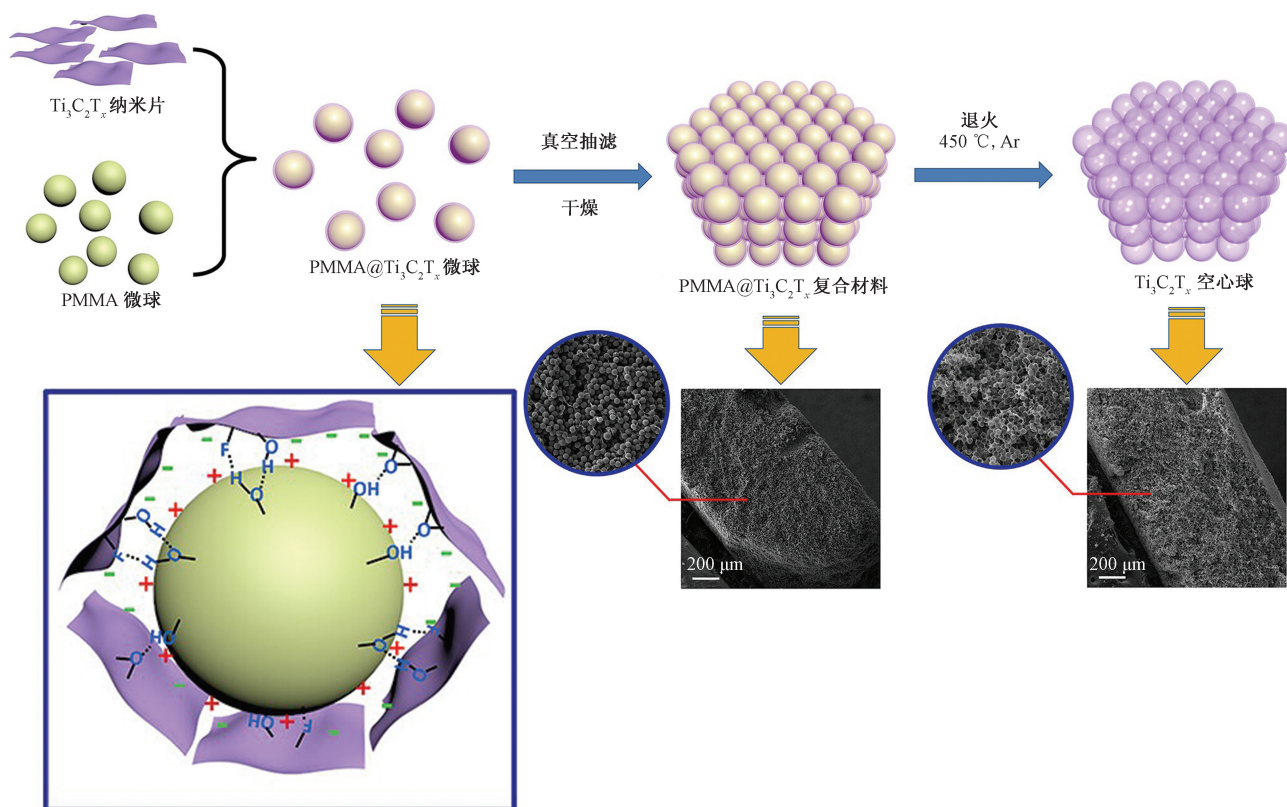
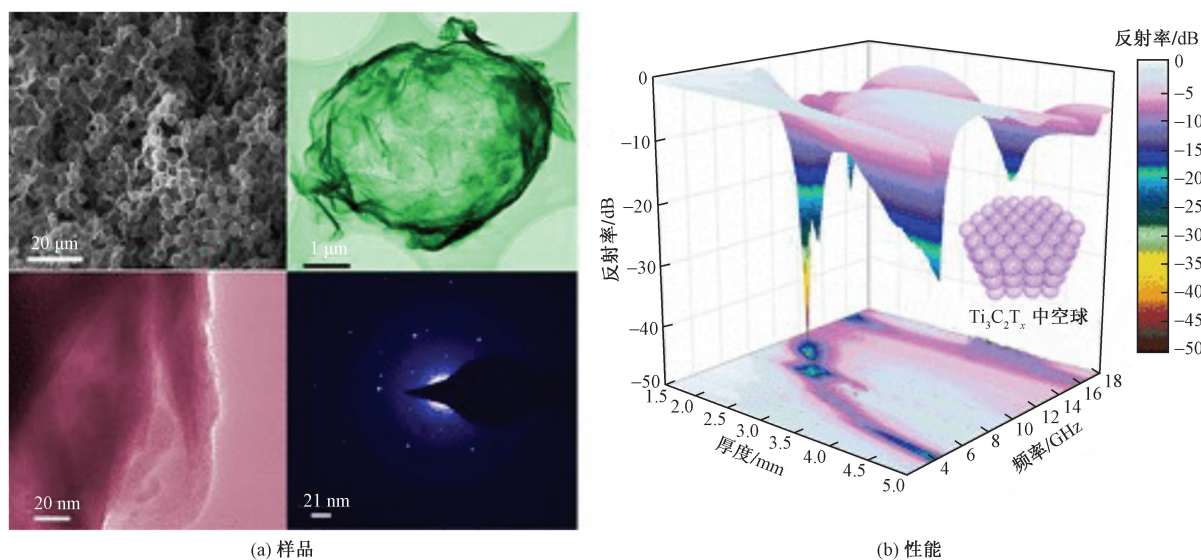


图 3 air@G-Fe/C 制备过程和电磁波吸收机理图^[57]

Fig. 3 Preparation process and electromagnetic wave absorption mechanism diagram of air@G-Fe/C^[57]

图4 中空球制备过程示意图^[60]Fig. 4 Schematic diagram of hollow sphere preparation process^[60]图5 样品和性能图^[60]Fig. 5 Sample and performance chart^[60]

此外,通过界面结构设计和多组分策略调控电磁参数,也是实现高效微波吸收的重要途径。Guo等^[61]通过静电纺丝、原位氧化聚合和浸涂工艺制备了具有异质结构的 PPTG (PAN@PPy@TiC₂T_x@GO)复合膜,实现了优异的电磁波吸收。当填料质量分数仅为 20% 时,该复合膜在厚度 2.2 mm 时的

最小反射损耗值达 -49.98 dB,最大有效吸收带宽 (effective absorption bandwidth, EAB) 达到 8.0 GHz,且可使雷达截面 (radar cross section, RCS) 降低达 25.72 dB·m²,展现出优异雷达隐身性能。其优异的性能是源于 1/4 波长理论、极化效应、多次反射与散射、阻抗匹配、导电损耗及磁损耗,如图 6 所示。

Li 等^[63]通过电纺丝和后续高温烘焙过程制备了多通道中空结构的碳纤维,其内部空间结构在优化吸波的阻抗匹配特性方面起着积极作用^[64],如图7所示。此外,通过精确控制的离子交换和高温气相硒化过程,制备了双金属有机框架衍生材料,引入的非均匀界面诱导界面极化,进一步改善了吸收性能。实验结果表明,得益于界面极化与偶极极化机制,电磁波吸收性能可以得到有效增强,通过调整

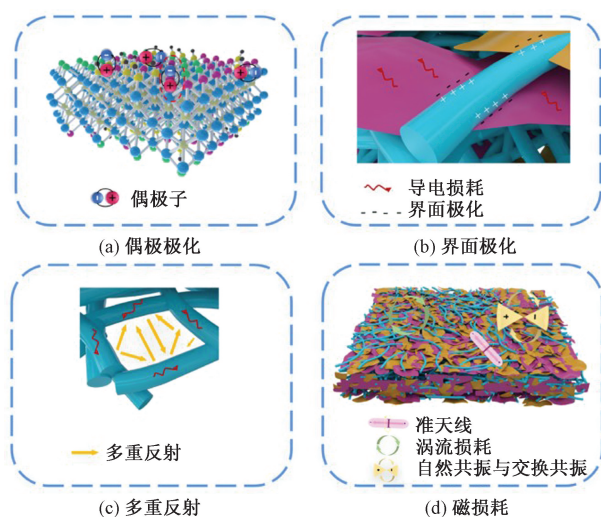


图6 微波吸收机制示意图^[62]

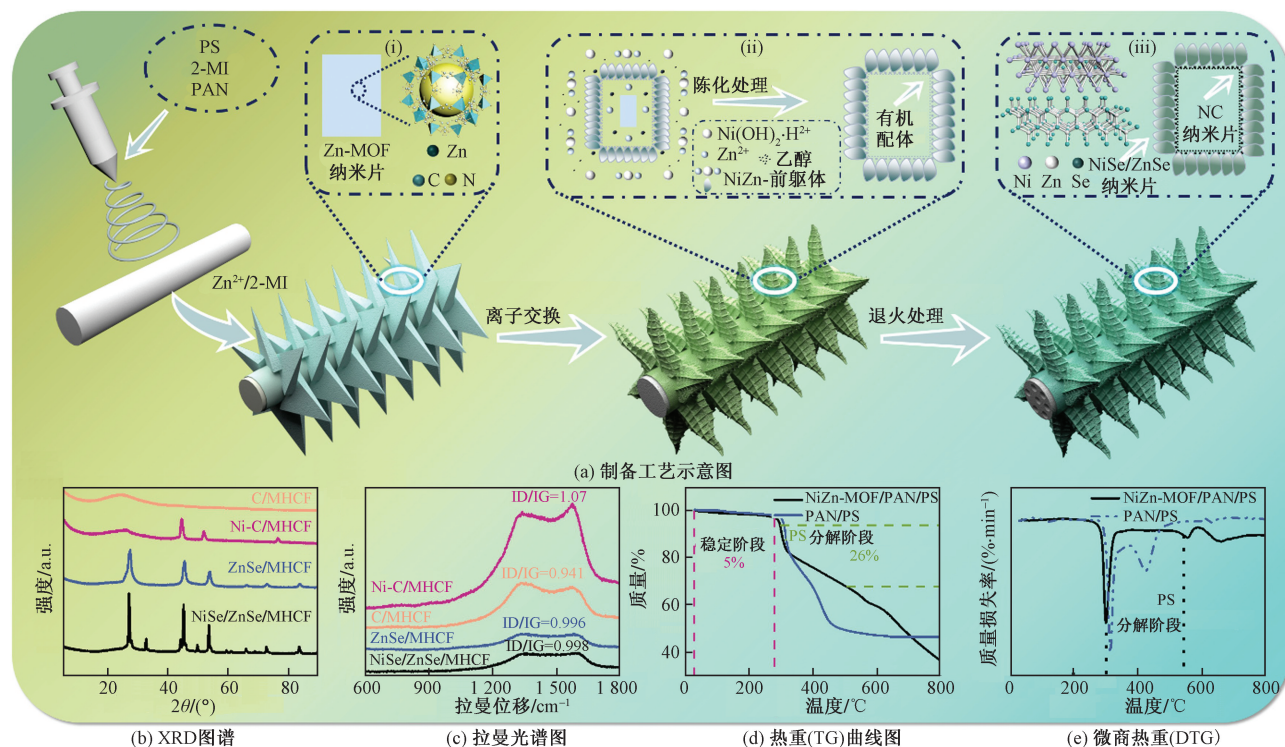
Fig. 6 Diagram of microwave absorption mechanism^[62]

厚度,制备的 NiSe/ZnSe/MCFs 复合材料在 C、X 和 Ku 波段表现出优异的吸收性能。结构设计和成分调控在实现吸波材料的吸收和宽频带上起着关键作用。雷达截面计算表明, NiSe/ZnSe/MHCFs 在实际军事隐身技术中具有巨大的潜力。且该复合涂层在复杂极端环境下,可为 Q235 钢板提供良好的耐腐蚀保护。

综上,上述新型吸收剂通过磁损耗、介电损耗、多次界面反射及结构与成分调控,显著增强了吸波涂层的吸波性能,但制备和应用仍然面临一系列的挑战,如制备成本较高、工业化批量生产及产品一致性等方面仍面临挑战,未来需进一步深入研究以满足不同领域的应用需求。

2.3 吸波涂料偶联剂^[65-67]

偶联剂分子中含有不同的化学反应基团,可分别与吸波剂填料和黏合剂发生化学作用,实现二者的有效结合并改善填料表面性质,使涂膜的物化性能更趋均匀稳定。通常,添加黏合剂质量 1% ~ 3% 的偶联剂即可显著提升涂层的物化性能,其中硅烷类偶联剂在提升吸波涂层附着力、耐化学性、填料添加量及力学性能方面效果显著。Cheng 等^[64]研究偶联剂处理吸收剂对吸波涂层性能的影响,研究结果表明黏结剂的润湿性得到改善,制备吸波涂层附着力从 7.77 MPa 提升到 8.6 MPa,柔韧性从 15 mm



ID/IG 为 D 峰强度与 G 峰强度的比值

图7 材料制备过程及性能图^[64]

Fig. 7 Process preparation and performance diagram of materials^[64]

降低到 10 mm,抗冲击强度从 35 cm 提升到 45 cm;但吸收剂的复介电常数降低,复磁导率变化不大,吸波涂层的吸波性能降低,8 ~ 18 GHz 频段的反射率增加 0.2 ~ 0.4 dB。

2.4 吸波涂料流变剂^[68-70]

流变剂是一类可改善吸波涂料流变性能的改性剂。其核心作用包括优化涂料的涂装性、维持贮存过程中稳定性、抑制吸收剂在吸波涂料中的沉降,为配方设计与施工提供技术支撑,同时提升成膜后的涂膜质量。

有机膨润土是吸波涂料中常用的流变剂,其作用机理为:在低分子质量醇活化剂作用下形成凝胶,制备涂料时将凝胶与吸波剂同时加入并搅拌,可降低树脂黏度,促进吸波剂充分分散,形成稳定的膨润土凝胶体系。通过改善分散效果优化涂料流变性,最终实现涂膜质量的提升。

2.5 吸波涂料制备^[71]

吸波涂料的制备流程如图 8 所示:首先对吸收剂进行表面处理,随后与环氧树脂混合,以丙酮为稀释剂搅拌稀释形成物料 A,将三乙烯四胺作为固化剂制备物料 B,将物料 A 和物料 B 充分混合均匀并调整至适宜浓度;采用空气压缩机作为喷涂设备,将混合液喷涂于 180 mm × 180 mm 目标平板上;每层喷涂完成后,将目标平板在室温下固化 2 ~ 6 h 或在 50 ~ 60 °C 干燥箱内固化 1 ~ 2 h,最终形成表面光滑、平正的吸波涂层,如图 9 所示。

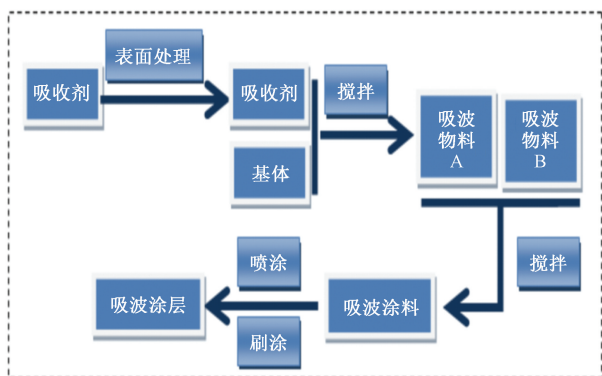


图 8 吸波涂料制备工艺

Fig. 8 Preparation process of microwave absorbing coating

2.6 吸波涂层工艺

“三分料,七分功”的行业共识,充分凸显了施工工艺在雷达波吸波涂层制备中的关键作用^[72],施工工艺是评价吸波涂料质量的重要指标。

施工工艺主要包括基底材料处理与喷涂/刷涂工艺两部分,优异的基底预处理是确保吸波涂层附着力的关键,需为喷涂提供具有一定粗糙度且清洁

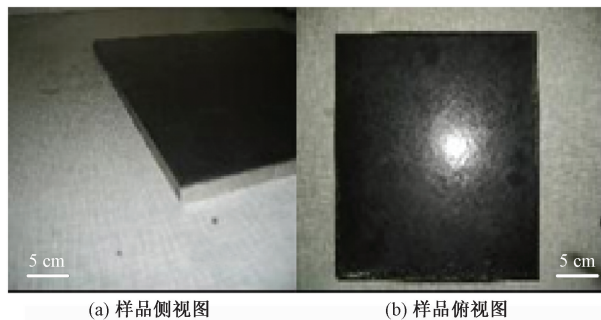


图 9 吸波涂层照片

Fig. 9 Photo of microwave absorbing coating

的表面^[73]。基底材料的处理通常采用 150 μm 的砂布横竖交叉打磨,直至基底材料表面形成明显的纹路,随后采用有机溶剂或水基清洗剂进行清洗处理,自然干燥后备用。吸波涂料施工工艺的核心在于保证涂层的均匀性与精准控制涂层厚度。

2.6.1 涂层均匀性^[74]

吸波涂料的施工常采用空气喷涂法,具体要求如下:喷涂前晃动喷枪罐体,确保吸波涂料的固液混合均匀;在喷涂过程中调整喷枪的出漆量和压力,优先选择低压力高流量状态,避免因涂料组分的密度差异导致反弹量不同,影响涂膜的均匀性;喷涂间隔 20 min 后,对罐体中的吸波涂料进行机械搅拌,防止固液分层。

值得注意的是,喷涂起始和终止阶段的涂料出料量难以精准控制,实际操作中应尽量减少起枪次数,并将起始喷涂和终止喷涂时坐标设定在目标喷涂面外侧。喷涂小尺寸工件时,每涂敷一遍后将工件旋转 90°再进行下一遍喷涂;喷涂大尺寸工件时,操作者需随工件表面均匀平稳移动,尽量实现单行程连续喷涂。

2.6.2 控制吸波涂层的厚度

吸波涂层的吸波性能与厚度紧密相关^[75],但涂层厚度的精准测量需在完全固化后进行,不利于生产过程中的实际控制。实际施工中,通常通过固化后的吸波涂层质量推算厚度,进而实现出料量的精准控制。具体方法为:喷涂工件的同时,同步喷涂 180 mm × 180 mm 标准平板,通过测量标准平板表面涂层的重量增量,类比推算工件表面涂层厚度,计算公式为:厚度 = 标准平板重量增量 / (面积 × 密度)。

固化后涂层厚度采用测厚仪进行测量,测量点选取需科学合理:平面涂层应等距均匀选取测量点,测量点距离涂层边缘应大于 2 cm;对于局部厚度不均匀的涂层,可通过砂纸磨薄或补喷增厚的方式进行修正。

研究表明,在不同配方设计中,涂层厚度对吸波性能具有关键影响;涂层厚度增加会使吸波峰值向低频偏移,厚度减小则使吸波峰值向高频偏移。采用空气喷涂法时,若吸波涂层厚度偏差超过 150 μm ,吸波性能峰值偏差可达 3 dB 以上^[76]。

综上,在吸波涂层制备过程中,需严格控制涂料稀释比例、喷涂速度及喷涂压力等工艺参数,确保涂层均匀性与目标厚度,这两项指标直接决定吸波涂层的最终性能。

3 吸波涂料的失效及修复

吸波涂层在贮存和使用过程中,受到高温、高湿、高盐雾等外界环境因素的综合作用,其化学、物理及机械性能会发生不可逆转的变化,导致武器装备隐身性能下降或丧失,此现象称为涂层失效^[77]。

3.1 吸波涂层的失效

吸波材料的失效是一个长期渐进的过程,主要表现为以下几种形式^[78-79]。

3.1.1 吸波涂层附着力下降或脱落

若喷涂前被涂物件表面未彻底清洁,残留杂质会影响涂层与基材的结合力;随着使用时间的延长,在外界外力作用或高低温循环引起的热胀冷缩效应下,涂层内部产生应力累积,导致附着力逐渐下降,严重时引起涂层脱落。

3.1.2 吸波涂层开裂^[80]

武器装备的结构过渡连接处、高温或温度波动区域及易受碰撞的部位,易出现涂层厚度不均或气孔缺陷;在使用过程中,机械振动、高低温冲击等因素会导致应力集中积累,当应力超过涂层承受极限时,会通过产生裂纹释放应力,随着裂纹的扩展与增多,最终导致吸波涂层开裂。

3.1.3 吸波涂料性能下降

吸波涂料在外界温度变化或紫外线照射下,吸收剂组成成分、微观形貌及分布状态会发生改变,黏合剂的化学键会发生氧化降解,这些因素均会导致吸波涂料性能下降,具体表现为吸波峰值偏移、吸波带宽变窄。对于轻质吸收剂,其疏松多孔、体积占比大,随时间推移黏合剂收缩会导致吸收剂间搭接量增加,进而增大介电常数,引发吸收峰偏移。

3.2 吸波涂层的修复^[81]

吸波涂层出现失效后及时进行修复,具体修复方法根据失效面积大小选择:对于小面积失效,可采用铲刀铲除失效区域,经砂纸打磨至基材表面后,通过涂覆吸波腻子或粘贴吸波贴片等方式实现快速修复;对于大面积失效,需由专业维修部门或维修基地进行处理,采用气动打磨机、抛光机等设

备清除失效部位,再通过刷涂或喷涂的方式进行修复。

4 结论

吸波涂料已获得深入研究与广泛应用,但在新型吸波剂研发与高性能吸波涂料制备方面仍然面临诸多挑战,相关技术问题亟待解决。未来吸波涂料的发展重点与难点应关注以下内容。

4.1 核心研究重点

(1)突破新型吸波剂的结构设计与协同损耗机制:聚焦电-磁协同损耗型吸波剂研发,通过多壳层、梯度结构、异质界面设计(如 MXene 空心球、MOF 衍生双金属/C 复合材料),实现 2 ~ 40 GHz 宽频段覆盖,同时攻克“轻质”(面密度 $\leq 1.5 \text{ kg/m}^2$)与“强吸收”(反射损耗 $\leq -40 \text{ dB}$)的性能极致化,解决传统单一损耗型材料频带窄、密度大的缺陷。

(2)强化极端环境下的性能稳定性:针对装备(舰船、战机)和户外电子设备的服役需求,重点提升涂层在高盐雾(5% NaCl 溶液, $\geq 500 \text{ h}$)、宽温域($-55 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$)、强紫外线照射下的性能保持率,确保吸波峰值偏移 $\leq 1 \text{ GHz}$ 、反射损耗衰减 $\leq 3\%$,同时兼顾耐冲击、抗开裂等力学性能(附着力 $\geq 15 \text{ MPa}$,弯曲 90° 无裂纹)。

(3)工程化量产的一致性与施工适配性:围绕规模化应用需求,开发适配复杂异型基材(如导弹发射筒、舰船桅杆)的施工技术,解决吸波剂分散均匀性、涂层厚度精准控制(偏差 $\leq \pm 50 \mu\text{m}$)等问题,推动实验室高性能材料(如 N 掺杂碳纳米管包覆 CoNi 合金)向量产转化,降低制备成本(如 MOF 衍生材料的低成本合成工艺)。

(4)多频谱兼容与多功能集成设计:突破单一雷达吸波局限,融合光学、红外隐身性能,通过超材料层、频率选择表面(frequency selective surface, FSS)技术,实现“雷达-红外-可见光”多波段兼容防护;同时集成自修复、防腐蚀、抗静电等功能,满足复杂战场环境下的一体化需求^[82]。

(5)智能化调控与精准设计技术落地:引入智能响应材料(温敏/电致变色材料)和数字孪生技术,实现涂层介电常数、磁导率的动态调控,适配复杂电磁环境变化;通过仿真模拟优化涂层厚度、结构参数(如 1/4 波长匹配),实现特定频段(如 S、X 波段)的精准吸收。

4.2 关键研究难点

上述研究重点的突破面临多重技术瓶颈,核心难点集中在“性能平衡”“机制调控”“工程转化”三大维度,且相互交织制约。

4.2.1 协同损耗机制的精准调控难题

(1) 电-磁参数匹配的矛盾平衡: 吸波性能依赖介电常数(ϵ)与磁导率(μ)的精准匹配, 但磁损耗型材料(如铁氧体、羰基铁)密度大、易腐蚀, 电阻/介电损耗型材料(碳纳米管、石墨烯)频带窄, 二者复合时易出现“电磁参数失衡”——如片状羰基铁含量超过 60% 会加速涂层腐蚀, 而碳基材料填充量不足则无法形成有效导电网络, 导致反射损耗提升。

(2) 异质界面的相容性与稳定性: 多组分复合(如 $\text{FeSiAl@SiO}_2\text{/C}$ 、 Air@G-Fe/C)时, 不同相界面易产生应力集中、团聚现象, 破坏电磁损耗路径。例如, MXene 与碳基材料复合时, 表面羟基($-\text{OH}$)易引发氢键团聚, 需通过偶联剂修饰或结构重构(如牺牲模板法)改善分散性, 但这又可能导致介电损耗能力下降, 形成“分散性-损耗性能”的二次矛盾。

(3) 微观结构与吸波性能的构效关系不明确: 吸波剂的粒径、孔径、壳层厚度等微观参数对吸波性能的影响机制缺乏精准量化模型, 导致新型吸波剂(如 MXene 空心球、MOF 衍生材料)的结构设计依赖“试错法”, 难以快速优化性能。

4.2.2 极端环境下的性能-稳定性冲突

(1) 高温/腐蚀环境下的组分失效: 高温(如航空发动机部件 $\geq 200\text{ }^\circ\text{C}$)会导致环氧树脂、聚氨酯等黏合剂氧化降解, 破坏涂层结构完整性; 高盐雾环境中, 金属基吸波剂(FeSiAl 、羰基铁)易发生电化学腐蚀, 形成蚀坑并渗透至基材, 导致涂层附着力下降(从 18 MPa 降至 8 MPa 以下), 同时吸波峰值偏移 $\geq 2\text{ GHz}$ 。

(2) 轻量化与耐环境性能的对立: 为实现“轻质”需求, 吸波剂需采用多孔、空心结构, 但这类结构的比表面积大, 易吸附水汽、腐蚀介质, 导致耐湿热性能恶化(50 $^\circ\text{C}$ 、95% 湿度下 1 000 h 后, 反射损耗衰减 $\geq 5\text{ dB}$); 而提高耐腐蚀性需增加致密涂层厚度, 又违背“薄型化”($\leq 2\text{ mm}$)要求。

4.2.3 工程化转化的规模化与一致性瓶颈

(1) 吸波剂量产的形貌与性能均一性控制: 实验室制备的高性能吸波剂(如 N 掺杂碳纳米管包覆 CoNi 合金、MOF 衍生双金属复合材料)依赖精密工艺(如溶剂热、原位聚合), 规模化生产时易出现粒径分布不均(偏差超过 30%)、异质结构缺陷(如壳层破裂、孔洞堵塞), 导致量产涂层的反射损耗波动 $\geq 4\text{ dB}$, 无法满足装备使用要求。

(2) 复杂基材的施工适配性难题: 吸波涂料需喷涂/刷涂于舰船桅杆、战机机身等复杂异型表面, 大尺寸工件(如 $\geq 10\text{ m}^2$)的涂层均匀性控制难度极

大——空气喷涂时, 起枪/停枪位置易出现厚度堆积, 工件边缘与中心的厚度差可达 200 μm , 远超允许偏差($\leq 50\text{ }\mu\text{m}$), 直接导致吸波性能峰值偏差 $\geq 3\text{ dB}$, 且薄型涂层($\leq 1\text{ mm}$)在曲面基材上易出现流挂、针孔缺陷。

(3) 成本与性能性价比失衡: 新型吸波剂(如 MXene、MOF 衍生物)的原料成本是传统铁氧体的 5~10 倍, 且制备过程能耗高(如 450 $^\circ\text{C}$ 氩气退火、多步离子交换), 导致高性能吸波涂料的单位面积成本超过 1 000 元/ m^2 , 难以在民用电子、地面装备等领域大规模推广。

4.2.4 多频谱兼容与智能化的设计冲突

(1) 多波段性能的参数相互影响: 雷达吸波要求涂层具备特定介电/磁导率以实现阻抗匹配, 而红外隐身需降低涂层发射率(≤ 0.3), 二者存在参数冲突——高导电率的碳基材料可提升雷达吸波性能, 但会增加红外发射率; 低发射率的金属涂层则会增强雷达反射, 导致“雷达-红外”兼容设计难以兼顾^[83]。

(2) 智能化技术的工程转化: 温敏、电致变色等智能材料的响应速度(当前 $\leq 10\text{ s}$)无法匹配复杂电磁环境的动态变化(毫秒级); 数字孪生技术的仿真精度依赖海量实验数据, 而实际工况中温度、湿度、应力的耦合作用难以精准模拟, 导致仿真优化的涂层性能与实测值偏差较大。

4.2.5 环保与性能的兼顾难题

水性吸波涂料因溶剂挥发量低($\text{VOC} \leq 50\text{ g/L}$)符合环保要求, 但水的表面张力大, 导致吸波剂分散性差、涂层成膜性不佳, 其反射损耗比溶剂型涂料低 5~8 dB; 生物基树脂(如聚乳酸)作为黏合剂时, 虽可降解, 但力学性能(耐冲击强度 $\leq 30\text{ kJ/m}^2$)和耐温性($\leq 80\text{ }^\circ\text{C}$)远不及环氧树脂, 无法满足军事装备的服役需求, 环保与性能的平衡成为行业痛点。

参考文献

- [1] Zhang J X, Ma M L. A review of epoxy-based composite materials: synthesis, structure and application for electromagnetic wave absorption[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 922: 166096.
- [2] Mohapatra P P, Singh H K. Advancements in electromagnetic microwave absorbers: ferrites and carbonaceous materials[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2025, 337: 103381.
- [3] Huang W, Tong Z Y. A review on electrospinning nanofibers in the field of microwave absorption[J]. Ceramics International, 2020, 46: 26441-26453.
- [4] Xie S, Ji Z J, Zhu L C. Recent progress in electromagnetic wave absorption building materials[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 27: 100963.
- [5] Lin T F, Yu H J, Wang L. A review of recent advances in the

- preparation of polyaniline-based composites and their electromagnetic absorption properties[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56: 5449-5478.
- [6] 刘旭, 刘永豪, 齐建涛. 基于机器学习的隐身涂料设计方法与研究进展[J]. *涂料工业*, 2025, 55(3): 13-18.
Liu Xu, Liu Yonghao, Qi Jiantao. Research progress and design methods of stealth coatings based on machine learning[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2025, 55(3): 13-18.
- [7] Shirke N, Ghase V. Recent advances in stealth coating[J]. *Polymer Bulletin*, 2024, 81: 9389-9418.
- [8] Danesh M. Optimal design of broadband radar-absorbing composite structures based on different compositions, processing, and geometric parameters[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2023, 42(9): 430-445.
- [9] Bae G S, Kim C Y. Broadband multilayer radar absorbing coating for RCS reduction[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, 56(8): 1907-1910.
- [10] Zhang R, Cao X B, Chen X. Active low frequency band expansion mechanism of electromagnetic wave absorber composite structure[J]. *Physica Scripta*, 2024, 99: 45520.
- [11] Li W Y, Gao M Y. Recent progress in increasing the electromagnetic wave absorption of carbon-based materials[J]. *New Carbon Materials*, 2023, 38(1): 111-129.
- [12] Rezende M C, Martin I M. Radar cross section measurements (8-12 GHz) of flat plates painted with microwave absorbing materials[C]//SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. São Paulo: IEEE, 2001: 453-456.
- [13] 周海洋, 倪长安, 李金轩, 等. 四氧化三铁颗粒大尺度空中动态吸波[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(19): 8187-8193.
Zhou Haiyang, Ni Chang'an, Li Jinxuan, et al. Large scale airborne dynamic absorption of iron oxide particles [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(19): 8187-8193.
- [14] 武恒洲. 耐海洋环境雷达吸波涂层研究及应用[J]. *飞机设计*, 2018, 38(3): 69-72.
Wu Hengzhou. Research and application of radar absorbing coating for marine environment [J]. *Aircraft Design*, 2018, 38(3): 69-72.
- [15] Mao S C, Wei L S, Zhi L H. The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave absorption of short carbon fiber/silica composites[J]. *Carbon*, 2010, 48: 788-796.
- [16] Kumar A, Singh S. Development of coatings for radar absorbing materials at X-band [J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, 330: 012006.
- [17] 齐宇, 何山, 史有强. 防腐蚀型宽频带雷达吸波涂料研究[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(5): 75-80.
Qi Yu, He Shan, Shi Youqiang. Anti-corrosion type radar absorbing coating[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(5): 75-80.
- [18] 张铁夫, 曹茂盛, 袁杰, 等. 多薄层涂覆雷达吸波涂料计算方法研究[J]. *航空材料学报*, 2001, 21(4): 46-49.
Zhang Tiefu, Cao Maosheng, Yuan Jie, et al. Calculation and design method research on multi-layer coated radar absorbing coatings [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2001, 21(4): 46-49.
- [19] 齐宇, 黄大庆, 何山. 多层复合吸波涂料设计与试验研究[J]. *涂料与应用*, 2014, 44(4): 1-5.
- Qi Yu, Huang Daqing, He Shan. Design and experimental research on multilayer composite radar absorbing coatings[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2014, 44(4): 1-5.
- [20] 承湘舸, 李洪亮. 薄型单层结构雷达吸波涂料的制备[J]. *广东化工*, 2011, 38(12): 27-28.
Cheng Xiangge, Li Hongliang. Preparation of thin single-layer structure radar absorbing coatings [J]. *Guangdong Chemistry*, 2011, 38(12): 27-28.
- [21] 安维, 邓联文, 胡照文. 基于铁基纳米晶薄片状吸收剂的吸波涂料制备[J]. *世界科技研究与发展*, 2009, 31(5): 784-786.
An Wei, Deng Lianwen, Hu Zhao wen. Preparation of radar absorbing coating based on iron-based nanocrystalline flaky absorbent [J]. *World Science and Technology R&D*, 2009, 31(5): 784-786.
- [22] 周学梅, 唐继海, 曹红锦, 等. 磁性空心微珠吸收剂及轻质雷达吸波涂料研究[J]. *涂料工业*, 2009, 39(11): 6-9.
Zhou Xuemei, Tang Jihai, Cao Hongjin, et al. Research on magnetic hollow microspheres absorbent and lightweight radar absorbing coating [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2009, 39(11): 6-9.
- [23] 马成勇, 程海峰, 唐耿平. 三层雷达吸波涂层的吸波性能研究[J]. *材料工程*, 2008(1): 11-13.
Ma Chengyong, Cheng Haifeng, Tang Gengping. Study on absorption properties of three-layer radar absorbing coatings [J]. *Materials Engineering*, 2008(1): 11-13.
- [24] Wei S C, Wang X Y. Constructing and optimizing epoxy resin-based carbon Nanotube/Barium ferrite microwave absorbing coating system[J]. *Materials Research Bulletin*, 2024, 179: 112928.
- [25] 高焕方. “田口方法”在吸波涂料中的应用[J]. *表面技术*, 2005, 34(4): 67-69.
Gao Huanfang. Application of “Taguchi method” in absorbing coatings [J]. *Surface Technology*, 2005, 34(4): 67-69.
- [26] 汪世平. 隐身吸波涂料概述[J]. *上海涂料*, 2006, 44(5): 16-18.
Wang Shiping. Overview of stealth absorbing coatings [J]. *Shanghai Coatings*, 2006, 44(5): 16-18.
- [27] 逢剑峰, 李淑华. 隐身飞行器雷达吸波涂料基料老化机理分析及防护[J]. *合成材料老化与应用*, 2010, 39(1): 39-47.
Pang Jianfeng, Li Shuhua. Analysis and protection of aging mechanism of base material for radar absorbing coating of stealth aircraft [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2010, 39(1): 39-47.
- [28] 周金向, 黄慧萍, 龚荣洲. 雷达吸波涂料用环氧树脂改性的研究[J]. *涂料与应用*, 2020, 50(2): 39-47.
Zhou Jinxiang, Huang Huiping, Gong Rongzhou. Study on epoxy resin modified for radar absorbing coatings [J]. *Coatings and Application*, 2020, 50(2): 39-47.
- [29] 刘浩翔, 王选仓. 表面纹理对水泥吸波路面微波除冰性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(14): 6003-6012.
Liu Haoxiang, Wang Xuancang. Effect of surface texture on microwave deicing performance of cement absorbing pavement [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(14): 6003-6012.
- [30] 高焕方, 全学军. 吸波涂料用环氧粘接剂改性研究[J]. *兵工学报*, 2007, 28(8): 993-996.
Gao Huanfang, Quan Xuejun. Modification research on epoxy ad-

- hesive for radar absorbing coatings[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(8): 993-996.
- [31] 张凌. 雷达吸波涂料粘结剂增韧研究[M]. 北京: 中国地质大学, 2003.
Zhang Ling. Research on toughening of binders for radar absorbing coatings[M]. Beijing: China University of Geosciences, 2003.
- [32] 李新, 陆萍, 张德磊. 雷达波吸收涂料的研究进展[J]. *广东化工*, 2018, 45(5): 148-149.
Li Xin, Lu Ping, Zhang Delei. Research progress on radar wave absorbing coatings[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(5): 148-149.
- [33] 李永波, 孙芳兵, 万晓霞. 吸波涂料用磁性吸收剂研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(S2): 71-73.
Li Yongbo, Sun Fangbing, Wan Xiaoxia. Research progress on magnetic absorbers for radar absorbing coatings[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(S2): 71-73.
- [34] 张家瑞, 田晓霞. 钴铁氧体/聚吡咯复合材料的制备及电磁性能[J]. *材料科学与工艺*, 2020, 28(5): 22-28.
Zhang Jiarui, Tian Xiaoxia. Preparation and electromagnetic properties of cobalt ferrite/polypyrrole composite materials[J]. *Materials Science & Technology*, 2020, 28(5): 22-28.
- [35] Sasria N, Ardhyana H, Fajarin R et al. Synthesis and characterization of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ /poly(aniline, pyrrole, ethylene terephthalate) composites coatings as radar absorbing material (RAM) [J]. *Journal of Physics*, 2017, 877(1): 12057.
- [36] 秦颖, 张建英. 吸波涂料研究进展[J]. *中国涂料*, 2020, 35(3): 26-30.
Qin Ying, Zhang Jianying. Research progress on absorbent coatings[J]. *China Coatings*, 2020, 35(3): 26-30.
- [37] Xia L, Chen J X. Paradox effects of flake carbonyl iron on the photo degradation behaviors of epoxy-based wave-absorbing coatings photo-catalytic and UV blocking [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 163(C): 106642.
- [38] 阙涛, 姜明连. 天然尖晶石型铁氧体(铁砂)基复合吸波涂料特性研究[J]. *功能材料*, 1998, 29(5): 474-476.
Que Tao, Lou Minglian. Characteristics of natural spinel-type ferrite (iron sand)-based composite microwave absorbing coatings [J]. *Journal of Functional Materials*, 1998, 29(5): 474-476.
- [39] 高海涛, 王建江, 赵志宁, 等. 铁氧体吸波材料吸波性能影响因素研究进展[J]. *磁性材料及器件*, 2014, 45(1): 68-73.
Gao Haitao, Wang Jianjiang, Zhao Zhining, et al. Research progress on influencing factors of microwave absorbing properties of ferrite absorbers[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2014, 45(1): 68-73.
- [40] Sun C, Sun K N, Chui P F. Microwave absorption properties of Ce-substituted M-type barium ferrite [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324: 802-805.
- [41] Liu L D, Duan Y P, Guo J B. Influence of particle size on the electromagnetic and microwave absorption properties of FeSi /paraffin composites [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2011, 406(11): 2261-2265.
- [42] Xia L, Lu T Y, Kong M Q, et al. Corrosion behaviors of electromagnetic wave absorbing coatings with varying absorber content under combined UV and salt spray exposure[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2025, 198: 108938.
- [43] Ruiz-Perez F. Carbon-based radar absorbing materials: a critical review[J]. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2022, 7: 100454.
- [44] Liu X, Zhang Z, Wu Y. Absorption properties of carbon black/silicon carbide microwave absorbers[J]. *Composites Part B Engineering*, 2011, 42(2): 326-329.
- [45] Zuo Y, Yao Z, Lin H, et al. Synthesis and characterization of carbonyl iron@epoxy core-shell microspheres for enhanced microwave absorption performance[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(18): 11827-11840.
- [46] 张楠, 陈海路, 胡书春, 等. 化学镀镍碳纳米管的制备及其电磁学和吸波性能研究[J]. *化工新型材料*, 2012(5): 81-83.
Zhang Nan, Chen Hailu, Hu Shuchun, et al. Preparation of chemical nickel plating on carbon nanotubes and its electromagnetic and microwave absorption properties[J]. *New Chemical Materials*, 2012(5): 81-83.
- [47] 张钊, 王瑞华, 赵薇, 等. 雷达探测原理及吸波涂料研究近况[J]. *中国涂料*, 2020, 35(12): 10-14.
Zhang Zhao, Wang Ruihua, Zhao Wei, et al. Research status on radar detection principles and absorbing coatings[J]. *China Coatings*, 2020, 35(12): 10-14.
- [48] 燕佳欣, 吴建华, 时君友, 等. 雷达吸波涂层材料的研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(5): 155-169.
Yan Jiaxin, Wu Jianhua, Shi Junyou, et al. Research progress on radar absorbing coating materials[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(5): 155-169.
- [49] 陈润华, 张笑梅, 李想, 等. 石墨烯/ Fe_3O_4 /乙烯基树脂复合材料的制备及电磁性能研究[J]. *材料开发与应用*, 2018(5): 96-103.
Chen Runhua, Zhang Xiaomei, Li Xiang, et al. Preparation and electromagnetic properties of graphene/ Fe_3O_4 /vinyl resin composite materials[J]. *Materials Development and Application*, 2018(5): 96-103.
- [50] 汤进, 林斌, 王勇, 等. 轻质CB/RGO复合涂层的制备及其吸波性能研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 100-108.
Tang Jin, Lin Bin, Wang Yong, et al. Preparation and absorption performance of lightweight CB/RGO composite coatings[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(2): 100-108.
- [51] 徐文玉, 孙佳文, 朱曜峰. 自组装碳/环氧树脂复合吸波涂料的制备及性能[J]. *材料研究学报*, 2023, 37(12): 952-960.
Xu Wenyu, Sun Jiawen, Zhu Yaofeng. Preparation and performance of self-assembled carbon/epoxy resin composite absorbing coatings[J]. *Materials Research Bulletin*, 2023, 37(12): 952-960.
- [52] Chen J B, Zheng J, Huang Q Q, et al. Enhanced microwave absorbing ability of carbon fibers with embedded $\text{FeCo}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ nanoparticles[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(30): 36548-36557.
- [53] 张振英, 王斌. 军用隐身涂料技术的研究进展[J]. *现代涂料与涂装*, 2006(2): 29-31.
Zhang Zhenying, Wang Bin. Research progress on military stealth coating technology[J]. *Modern Coatings and Painting*, 2006(2): 29-31.
- [54] Ban G D, Liu Z H, Ye S T. Research progress of new coated radar absorbing materials[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(6): 140-146.
- [55] Li H S. The absorption mechanism for magnetic waves and re-

- search progress on carbon-coated magnetic nanoparticles[J]. New Carbon Materials, 2022, 37(4): 695-706.
- [56] 郭阳, 张丽, 陆海鹏, 等. 多层壳 FeSiAl@SiO₂@C 的制备与耐蚀电磁性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(9): 2281-2287.
- Guo Yang, Zhang Li, Lu Haipeng, et al. Preparation and corrosion-resistant electromagnetic properties of multi-shell FeSiAl@SiO₂@C[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(9): 2281-2287.
- [57] Wu C, Wang J. Hollow gradient-structured iron-anchored carbon nanospheres for enhanced electromagnetic wave absorption[J]. Nano-Micro Letters, 2023, 15(1): 7-10.
- [58] Zhang X, Tian X L, Qiao J, et al. *In-situ* fabrication of sustainable N-doped-carbon-nanotube-encapsulated CoNi heterogenous nanocomposites for high-efficiency electromagnetic wave absorption[J]. Small, 2023, 19(40): 2303305.
- [59] Jin Y, Yu H J. Recent progress in electromagnetic wave absorption coatings: from design principles to applications[J]. Coatings, 2024, 14: 607.
- [60] Liu W, Wang D H, Li K X. Hollow spheres of Ti₃C₂T_x with a nanometer-thick wall for high-performance microwave absorption[J]. ACS Applied Nano Material, 2022, 5: 18488-18499.
- [61] Guo Z Q, Lan D, Zhang C H, et al. "Two birds one stone" strategy to integrate electromagnetic wave absorption and self-anticorrosion in magnetic nanocomposites with double-shell hollow structure[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 188: 302-315.
- [62] Yang X, Li B H. Dielectric synergistic gradient metamaterials enable exceptional ultra-wideband microwave absorption and antibacterial properties[J]. Carbon, 2025, 232: 119813.
- [63] Li L, Li G L, Ouyang W J, et al. Bimetallic MOFs derived FeM(II)-alloy@C composites with high-performance electromagnetic wave absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420: 127691.
- [64] Cheng Y H, Lan D, Jia Z R, et al. MOF derivatives anchored to multichannel hollow carbon fibers with gradient structures for corrosion resistance and efficient electromagnetic wave absorption[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 216: 150-164.
- [65] 王结良, 黄英, 梁国正, 等. 雷达吸波涂层用材料的研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2003(2): 28-31.
- Wang Jieliang, Huang Ying, Liang Guozheng, et al. Research progress on materials for radar absorbing coatings[J]. Modern Paint & Coatings, 2003(2): 28-31.
- [66] 邢欣, 杨永峰, 周永江. 偶联剂对吸收剂的作用及吸波涂层性能的影响[J]. 安全与电磁兼容, 2012(2): 83-86.
- Xing Xin, Yang Yongfeng, Zhou Yongjiang. The effects of coupling agent treatment on absorbent and radar absorbing coating[J]. Safety & EMC, 2012(2): 83-86.
- [67] 张瑜. Ni-Zn 铁氧体复合吸波涂料制备及性能的研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 123-127.
- Zhang Yu. Preparation and properties research of Ni-Zn ferrite composite absorbing coating[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(8): 123-127.
- [68] 卓长平, 张雄. 纳米级钡铁氧体的原子力显微镜分析及微波性能的研究[J]. 分析测试学报, 2005, 24(3): 23-26.
- Zhuo Changping, Zhang Xiong. Atomicforce microscopy analysis and microwave properties of nano-sized barium ferrite. [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2005, 24(3): 23-26.
- [69] 汪多仁. 膨润土的开发应用[J]. 现代涂料与涂装, 2002, 5(4): 44-48.
- Wang Duoren. Development and application of bentonite[J]. Modern Paint & Coatings, 2002, 5(4): 44-48.
- [70] 徐峰. 流变剂的使用及发展[J]. 现代涂料与涂装, 2000, 3(2): 42-45.
- Xu Feng. Use and development of rheological agents[J]. Modern Paint & Coatings, 2000, 3(2): 42-45.
- [71] 杨军华, 张天才, 贾雪, 等. 某机载雷达吸波涂料的选择与应用[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(24): 1775-1778.
- Yang Junhua, Zhang Tiancai, Jia Xue, et al. Selection and application of an aboard radar absorbing coating[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(24): 1775-1778.
- [72] 周光华, 谭延江, 彭菲菲, 等. 浅谈吸波涂料工程化应用中的常见问题[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 83-85.
- Zhou Guanghua, Tan Yanjiang, Peng Feifei, et al. On common issues in the engineering application of radar absorbing coatings[J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 83-85.
- [73] 杨婧, 苏楠. 新型雷达吸波涂料分析及其涂装技术应用[J]. 数字化用户, 2017(31): 120.
- Yang Jing, Su Nan. Analysis of anovel radar absorbing coating and its application in coating technology[J]. Digital User, 2017(31): 120.
- [74] 赵欣, 郭一伟. 雷达吸波涂层的质量控制[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(7): 35-37.
- Zhao Xin, Guo Yiwei. Quality control of radar absorbing coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2012, 34(7): 35-37.
- [75] Hosseini S H, Mohseni S H, Asadnia A. Synthesis and microwave absorbing properties of polyaniline / MnFe₂O₄ nanocomposite[J]. Journal of Alloys Compounds, 2011, 509: 4682-4687.
- [76] 王俊芳, 周学梅, 魏文政. 吸波涂层精准厚度涂装工艺研究[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 178-183.
- Wang Junfang, Zhou Xuemei, Wei Wenzheng. Research onprecision thickness coating process of radar absorbing coatings[J]. Surface Technology, 2016, 45(7): 178-183.
- [77] 张国海, 李步云, 平静. 雷达红外兼容吸波涂层失效分析与预防研究[J]. 涂层与防护, 2018, 39(9): 27-31.
- Zhang Guohai, Li Buyun, Ping Jing. Failure analysis and prevention research on radar-infrared compatible absorbing coatings[J]. Coatings & Protection, 2018, 39(9): 27-31.
- [78] 刘斌, 李瑛, 林海潮, 等. 防腐蚀涂层失效行为研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(5): 305-307.
- Liu Bin, Li Ying, Lin Haichao, et al. Research progress on the failure behavior of corrosion-protective coatings[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13(5): 305-307.
- [79] 赫丽华, 刘平桂, 王晓红. 雷达吸波涂层的失效行为[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(3): 182-187.
- He Lihua, Liu Pinggui, Wang Xiaohong. Failure behavior of radar absorbing coatings[J]. Failure Analysis and Prevention, 2009, 4(3): 182-187.
- [80] 林平, 辛全友, 朱洪立, 等. 隐身涂料喷涂缺陷及质量控制[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(4): 47-50.
- Lin Ping, Xin Quanyou, Zhu Hongli, et al. Spraying defects and quality control of stealth coatings[J]. Engineering Plastics Appli-

- cation, 2013, 41(4): 47-50.
- [81] 郑国禹, 陈亮, 刘彬. 浅谈隐身涂料及涂层维修技术[J]. 四川兵工学报, 2006(6): 21-24.
- Zheng Guoyu, Chen Liang, Liu Bin. Onstealth coatings and coating maintenance technology[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2006(6): 21-24.
- [82] 刘战合, 罗明强. 外形隐身改进对坦克目标电磁散射特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(5): 1865-1871.
- Liu Zhanhe, Luo Mingqiang. Influence of shape stealth improvement on electromagnetic scattering characteristics of tanks[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(5): 1865-1871.
- [83] 李京涛, 李宗翰. 宽频雷达吸波和低红外发射率复合材料结构设计[J]. 塑料工业, 2025, 53(9): 96-102.
- Li Jingtao, Li Zonghan. Design of broadband radar absorbing and low infrared emissivity composite structures[J]. Plastics Industry, 2025, 53(9): 96-102.