

复杂服役环境下雷达吸波涂层研究进展

王彦淇¹, 邹如荣¹, 胡晓洪¹, 程明¹, 龙昌^{1*}, 李志仁¹, 肖琳²

(1. 航天科工武汉磁电有限责任公司, 武汉 430073;

2. 航天科工(长沙)新材料研究院有限公司, 长沙 410221)

摘要: **目的** 概述现有复杂环境下雷达吸波涂层的研究进展, 展望复杂环境下各类雷达吸波涂层的优势、瓶颈及发展方向。**方法** 以低频宽带、行波抑制、耐高温、耐腐蚀、厘米波-毫米波兼容等复杂电磁环境和复杂服役环境应用的雷达吸波涂层为主体, 概述了上述涂层的基本设计原理, 介绍了多频段电磁探测环境与复杂服役环境下雷达吸波涂层研究现状。**结论** 随着装备从防御为主转为攻防结合, 多频段探测、高速、高温、腐蚀等复杂战场环境对装备的作战能力提出了更高的要求。复杂环境雷达吸波涂层的研究和应用能有效提高装备的生存、突防能力和作战效能, 为实现复杂环境的雷达吸波涂层应用需求, 研制集多功能于一身的新型高性能吸波涂层是隐身材料领域的重要研究方向。

关键词: 复杂电磁环境; 复杂服役环境; 雷达吸波涂层; 电磁兼容

中图分类号: TB33

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)23-0131-14

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.23.014

Research Progress of Radar Wave-absorbing Coatings in Complex Service Environments

WANG Yanqi¹, ZOU Rurong¹, HU Xiaohong¹, CHENG Ming¹, LONG Chang^{1*}, LI Zhiren¹, XIAO Lin²

(1. Aerospace Science and Industry Wuhan Magnetoelectric Co., Ltd., Wuhan 430073, China;

2. Aerospace Science and Industry (Changsha) New Materials Research Institute Co., Ltd., Changsha 410221, China)

ABSTRACT: The work aims to review the progress of radar absorbing coatings in complex environments and have an outlook on the advantages, bottlenecks and development directions of various radar absorbing coatings in complex environments. With the focus on radar absorbing coatings for complex electromagnetic environment and complex service environment applications such as low frequency broadband, traveling wave suppression, high temperature resistance, corrosion resistance, and centimeter- millimeter wave compatibility, the basic design principles of these coatings were summarized, and the current status of radar absorbing coating research in above application environments was introduced. As the combat mode of weaponry shifts from defense-orientation to a combination of offense and defense, complex battlefield environments such as multi-spectrum detection, high speed, high temperature, and corrosion have put forward higher requirements for the combat capability of weaponry. The research and application of radar absorbing coatings in complex environments can effectively improve the survivability, penetration capabilities and combat effectiveness of weaponry. In order to meet the application requirements of radar absorbing coatings in complex environments, a new high-performance absorbing coating with multiple functions should be developed, which was a significant research direction in the field of stealth materials.

KEY WORDS: complex electromagnetic environment; complex application environment; radar absorbing coating; electromagnetic compatibility

随着新型探测系统的快速发展和广泛使用,现代装备面临着电磁波多方位、远距离、全天候、多频段协同探测的威胁^[1-5]。目前,雷达探测所使用的频率不断拓宽,探测频段已经扩展至 0.3 GHz,低频方向的长波雷达可以穿透物体而发现目标,意味着装备被发现概率大大提高^[6];大量斜掠入射的电磁波可在飞行器装备表面激发诱导形成表面行波,其不连续处将变成电磁波辐射源,当辐射方向沿着电磁波入射方向时,将会增加电磁波反射率,增加被雷达探测到的概率^[7];作为飞行器电磁特征显著的部位,进气道、排气道、尾喷管等部位的雷达散射截面积大,现有常温雷达吸波材料已经不能满足使用要求^[8];另外,新式海基隐身飞行器受到越来越多的关注,然而目前针对陆基环境设计的雷达隐身材料难以满足海洋环境下的耐久性要求^[9];在多波段兼容方面,国内多数研究以多层结构实现厘米波-毫米波宽频吸波要求,取得了较好的宽频吸收效果,但同时存在不少缺陷,极大地限制了其实际应用范围^[10]。

面对复杂的电磁环境和服役环境,设计研发兼具复杂电磁环境与服役环境耐受能力的雷达吸波材料,实现多功能集成一体化成为现代装备隐身的未来发展趋势。本文综述了现有复杂环境下雷达吸波涂层的研究进展,展望了复杂环境下各类雷达吸波涂层的优势、瓶颈及发展方向。

1 低频宽带雷达吸波涂层

雷达探测技术逐渐向低频化、远距离化方向发展,低频雷达隐身技术已成为一种发展趋势,宽带雷达吸波涂层需要同时满足 P、L、S、C、X、Ku 多个频段范围内的电磁波宽频高吸收要求。此外,为满足配套的配套应用需求,涂层还需兼顾高柔韧性和高附着力等性能。近年来,在传统低频磁性材料,如电磁软铁、电磁钢板和坡莫合金等材料的基础上,国内外研究者对新型低频吸波材料进行了研究,为低频吸波材料领域的应用研究提供了理论基础和现实意义,但仍然面临了诸多问题^[11-12]。

1.1 低频宽带雷达吸波涂层设计原理

根据传输线原理,单层平板吸波材料的反射损耗(L_R)可按式(1)^[12]计算。

$$L_R = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1)$$

式中: Z_0 表示空气阻抗,其大小为 377 Ω ; Z_{in} 表示入射阻抗,计算公式如式(2)所示^[12]。

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \tanh \left[j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right]} \quad (2)$$

式中: ϵ_r 、 μ_r 分别表示吸波材料的介电常数与磁导率,两者均为复数形式; c 表示真空中光的传播速度; f 表示频率; d 表示材料的厚度。

为进一步阐述低频宽带雷达吸波涂层设计原理,根据式(1)和式(2),已知装备的目标在给定频点的设计反射率、设计厚度和 ϵ_r (μ_r),则可得 μ_r (ϵ_r)的分布方程,以便明确低频吸波涂层的电磁参数设计思路。

采用表1所示的电磁参数进行模拟,假定目标反射损耗 $L_R = -8$ dB,频点取 P、L、S 波段的中心频点 0.65、1.50、3.00 GHz,假定吸波涂层的厚度为 1.5、2.0、2.5 和 3.0 mm,得到如图1所示的电磁参数等高线分布图。

表 1 某吸收剂在不同频率处的电磁参数
Tab.1 Electromagnetic parameters of certain absorbent at different frequencies

频率/ GHz	介电常 数实部	介电常 数虚部	磁导率 实部	磁导率 虚部
0.65	182.84	14.06	8.88	12.73
1.50	174.23	18.86	3.28	8.33
3.00	162.84	20.44	0.21	5.01

图1a、图1b中某一频点的等高线内部的区域代表已知磁导率(介电常数),介电常数(磁导率)的解的分布情况。由图1a可知,当厚度较薄时,若要保持涂层具备较好的低频吸波性能,吸收剂介电常数的实部要尽可能大,虚部要偏小。当厚度为 1.5 mm 时,在 0.65 GHz 处不存在任何解的分布,而随着厚度的增加,0.65 GHz 处出现了解的等高线分布,1.50、3.00 GHz 处解的分布面积明显加大,这表明低频吸波涂层需要一定的厚度,但当厚度增大到 3.0 mm 时,各种解的分布面积非但没有增大,反而有减小的趋势,这可能是由于厚度过大带来的阻抗不匹配效应。而观察图1b可知,若要满足吸波涂层在较薄的条件下低频有一定的吸收性能,则需要吸收剂的磁导率实部与磁导率虚部都要尽可能高,但随着厚度增大到 2.5、3.0 mm,吸收剂需满足磁导率实部偏高,磁导率虚部偏低。

综上所述,制备强吸收的低频雷达吸波涂层须具备一定的厚度,但一味增加厚度并不能带来增益,反而会导致目标吸波性能难以实现。对于用作低频雷达吸波涂层的吸收剂,通过合适的结构提高吸收剂的磁导率是实现低频波段强吸收的必要条件,并且所制备的吸收剂介电常数实部要尽可能高,虚部要尽量低。

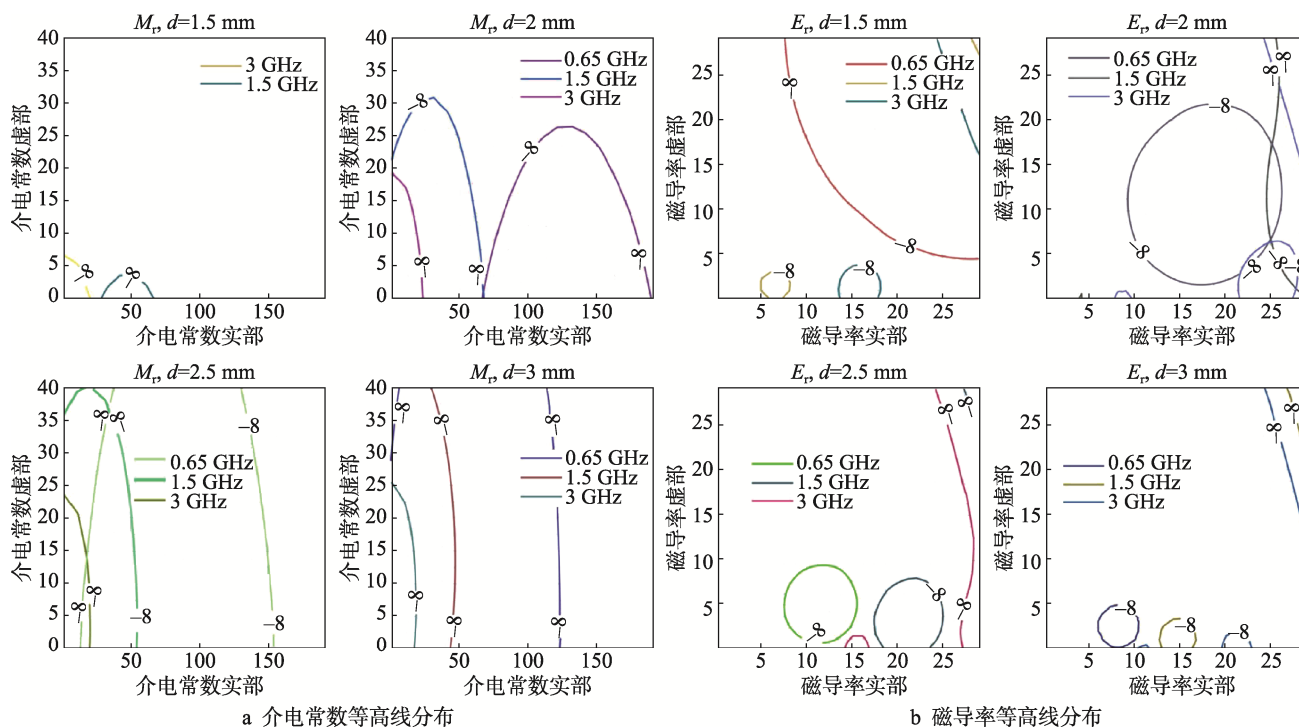


图 1 电磁参数等高线分布图

Fig.1 Contour distribution of electromagnetic parameters

1.2 低频宽带雷达吸波涂层研究现状

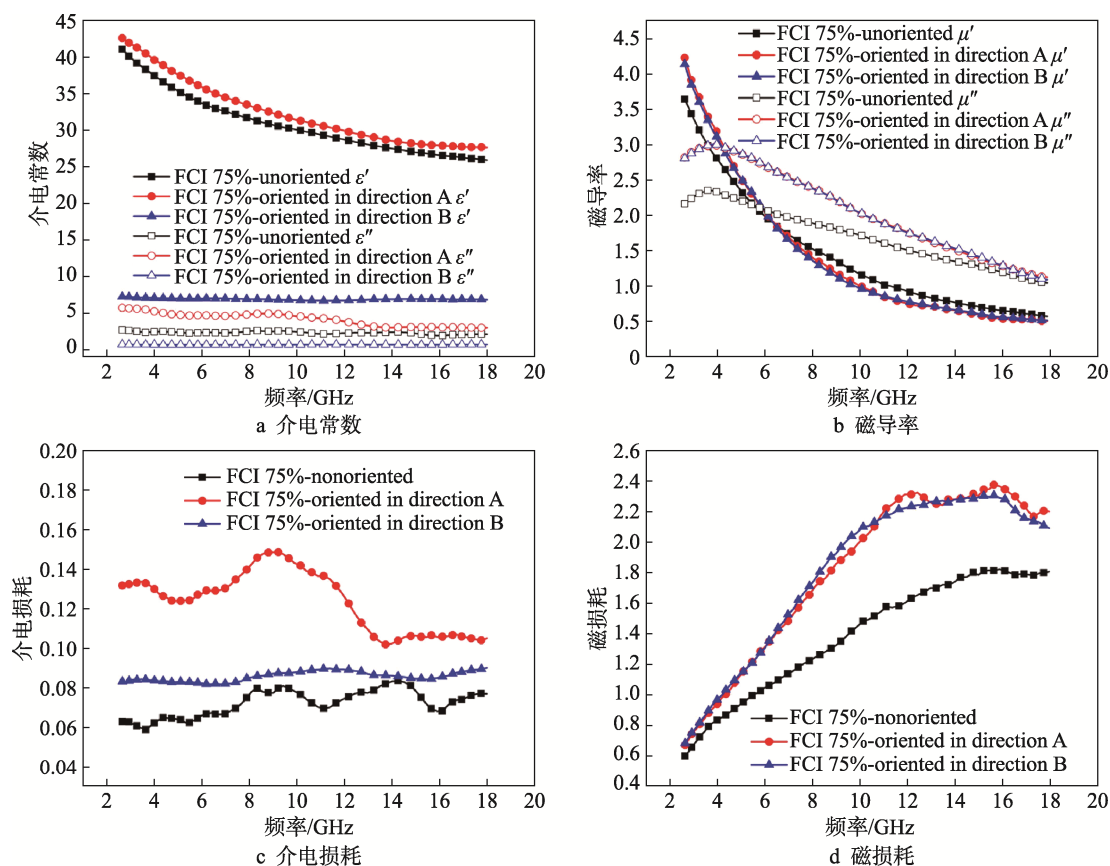
由于目标装备的隐身需求,制备低频宽带隐身材料依旧是国内外的研究重点,特别是隐身涂层吸收剂的电磁参数调控。吸收剂是决定吸波材料吸波性能的关键,吸收剂的成分和形貌对其性能有着决定性的影响。研究表明,磁损耗型吸收剂有利于实现薄层宽带吸收,吸收剂的片状化可调控磁导率和磁共振频率。铁氧体是以氧化铁(Fe_2O_3)和其他一种或多种铁族或稀土元素氧化物为主要成分的复合氧化物,具有较好的频率特性,可作为匹配层,在拓宽低频宽带吸波材料领域具有良好的应用前景^[13]。尖晶石型铁氧体的共振频率在 1 MHz~1 GHz,具有在低频波段实现强吸收的可能性^[14];六角铁氧体的共振频率非常高,通常适用于较高频率的微波吸收。但铁氧体的饱和磁化强度较低,在频率升高时难以获得高磁导率值,吸收频带较窄,同时匹配频率受厚度限制,实现低频条件良好吸收,需要匹配较大厚度^[15]。

金属微粉吸波材料是通过磁滞损耗、涡流损耗来衰减电磁波,具有较高的饱和磁化强度,国内外研究主要从金属微粉的尺寸调控、合金化、各向异性结构化来调控其吸波性能,为解决低频吸收提供了新的技术途径。金属微粉的尺寸细化和片状化、取向、表面改性等可提高其饱和磁化强度和交换耦合共振,有利于实现低频的吸收。如图 2 所示,Min 等^[16]为克服磁性金属微粉本征属性制约,对羰基铁粉/环氧树脂复合材料进行取向研究,结果表明取向可有效提高其在低频范

围的磁导率以及介电常数,在低频宽频吸波材料领域取得较好成果:通过调节吸波涂层的厚度实现 2~18 GHz 宽频吸收,特别是 $R_{2\text{ GHz}} \leq -4.0\text{ dB}$ 、 $R_{3\text{ GHz}} \leq -9.0\text{ dB}$ 、 $R_{4\text{ GHz}} \leq -9.5\text{ dB}$,突破了 S 波段强吸收的瓶颈问题。此外,采用多元助剂对羰基铁粉表面进行改性,使其表面形成致密有机绝缘薄膜,有效降低了羰基铁粉的复介电常数,提高了复磁导率虚部,进而提高材料在低频范围的有效吸收^[17-20]。与晶态传统合金相比,非晶态合金不仅具有长程无序、间隙多、均质、各向异性等特点^[21],还具有较高的强度、耐腐蚀性和高电阻率等特性,在复杂环境电磁吸收和电磁屏蔽领域具有较好的应用前景^[22-23]。纳米材料是指尺寸为纳米级的材料,其比表面积大,具有量子尺寸效应、吸波频带宽、兼容性好、质量轻等优势,已成为最具有发展前途的吸波材料之一^[24]。

1.3 小结

尽管低频吸波材料取得了一些研究成果,但还远远不能满足新一代装备在复杂雷达威胁环境下的隐身需求。例如,目前大部分低频吸波涂层采用的低频吸收剂均为磁性金属微粉,普遍存在填充体积分数高、面密度大的缺陷,并且耐高温、盐雾等极端环境性能较差。针对上述缺陷,一方面可设计合适的结构,提高吸收剂在低频的磁导率;另一方面则可对吸收剂进行表面处理或在涂层表面增加防腐、耐高温层,以确保涂层在低频具备良好的吸波性能的同时具有一定的耐环境性。

图 2 羰基铁粉/环氧树脂复合材料取向研究^[16]Fig.2 Orientation study of carbonyl iron powder/epoxy resin composite material^[16]

2 行波抑制雷达吸波涂层

随着雷达探测技术的迅猛发展,工作于 P 波段、L 波段的超远程探测雷达的出现极大地降低了隐身战机的突防能力及生存空间。超远程警戒雷达及远程警戒雷达的工作波长接近飞机整体或局部尺寸,可引起电磁谐振,形成较强散射回波,并诱发表面行波沿飞机表面进行传播,使得外形隐身设计对低频雷达波失效^[25]。因此,行波抑制雷达吸波涂层也是各国隐身材料的研究热点之一。

2.1 表面行波产生及衰减机理

雷达发射的电磁波在装备表面的散射主要包括镜面散射和非镜面散射 2 种,其中表面波散射在非镜面散射中占很大的比例。如图 3 所示,在实际设计应用中,任何装备的表面并非完全平整连续,当装备表面的电磁波遇到边缘、转角、突起、缝隙等表面突变时,会产生强烈的电磁回波(二次散射电磁波),这是产生非镜面散射的主要诱因。

早已有大量的研究表明,在雷达探测的频率范围内不存在电场与传播方向垂直的电磁波(TE 波),吸收层和自由空间内均为磁场与入射面垂直的 TM 波^[26]。TM 型表面波传输模型如图 4 所示。

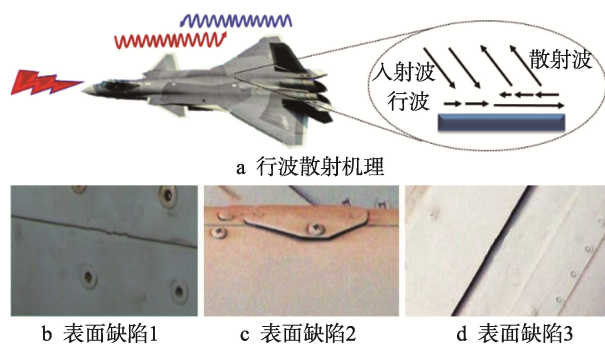
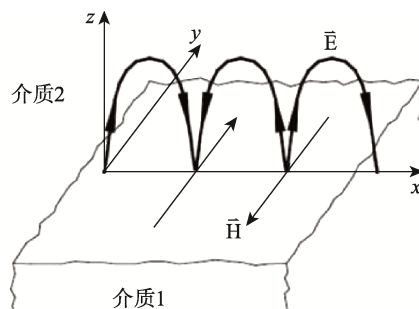


图 3 隐身飞机机身表面行波散射机理及常见的表面缺陷

Fig.3 Mechanism of traveling wave scattering on surface of stealth aircraft and its common surface defects

图 4 TM 型表面波传输模型^[26]Fig.4 Model of TM type surface wave transmission^[26]

对于处于自由空间的介质 2, 电磁场的分布主要包括 x 方向的磁场 H_x 、 y 方向与 z 方向的电场 E_y 、 E_z , 满足式 (3) ~ 式 (5) 分布^[26-27]。

$$H_x^2 = \exp[ik_2(z-a)] \exp(i\beta y) \quad (3)$$

$$E_y^2 = \frac{k_2}{k_0} Z_0 H_x \quad (4)$$

$$E_z^2 = -\frac{\beta}{k_0} Z_0 H_x \quad (5)$$

对于介质 1 吸波材料:

$$H_x^1 = \frac{\cos(k_1 z)}{\cos(k_1 a)} \exp(i\beta y) \quad (6)$$

$$E_y^1 = i \frac{k_1}{k_0 \varepsilon_0} Z_0 H_x^1 \tan(k_1 z) \quad (7)$$

$$E_z^1 = -\frac{\beta}{k_0 \varepsilon} Z_0 H_x^1 \quad (8)$$

式中: Z_0 表示自由空间的阻抗; k_0 表示自由空间的波数; k_1 、 k_2 分别表示介质 1、介质 2 的自由空间的横波数; a 表示吸波层的厚度。

根据式 (9) 和式 (10) 所示的表面电磁波相等的边界条件, 可得到式 (11) 所示的色散方程^[26-27]。

$$E_y^1(z=a) = E_y^2(z=a) \quad (9)$$

$$H_x^1(z=a) = H_x^2(z=a) \quad (10)$$

$$D(k_0, \beta) \equiv \sqrt{k_0^2 \varepsilon \mu - \beta^2} \tan(a \sqrt{k_0^2 \varepsilon \mu - \beta^2}) + i \varepsilon \sqrt{k_0^2 - \beta^2} = 0 \quad (11)$$

对于给定的厚度与频率, 通过式 (11) 可以反解衰减常数 β 。 β 通常是复数解, 其虚部 β'' 近似等于电场衰减和磁场衰减 α_1 与 α_2 的总和, 二者的求解详见式 (12) ~ 式 (16)^[26-27]。

$$\alpha_1 = \frac{P_1}{2P_y} \quad (12)$$

$$\alpha_2 = \frac{P_2}{2P_y} \quad (13)$$

$$P_1 = \frac{1}{2k_0} Z_0 \frac{\varepsilon''}{|\varepsilon|^2} \frac{1}{|\cos(k_1 a)|^2} \quad (14)$$

$$\left[|\beta|^2 \int_0^a |\cos(k_1 z)|^2 dz + |k_1|^2 \int_0^a |\sin(k_1 z)|^2 dz \right] \quad (15)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} Z_0 k_0 \mu'' \frac{1}{|\cos(k_1 a)|^2} \int_0^a |\cos(k_1 z)|^2 dz$$

$$P_y = \frac{1}{2k_0} Z_0 \frac{1}{|\cos(k_1 a)|^2} \left[\frac{\beta'}{2k_1} \int_0^a |\cos(k_1 z)|^2 dz + \operatorname{Re} \left(\frac{\beta}{\varepsilon} \right) \int_0^a |\cos(k_1 z)|^2 dz \right] \quad (16)$$

根据式 (12) ~ 式 (16), 衰减常数与材料的介电损耗 (ε'') 磁损耗 (μ'') 成正相关。换言之, 提高材料介电常数的虚部和磁导率的虚部是增强行波衰减的有效措施, 然而无限制地提高上述 2 个参数不利

于涂层表面与空气界面的阻抗匹配, 因此在实际应用中, 研究者通过对材料的表面形貌进行设计, 结合阻抗匹配的原则, 适当提高材料的介电损耗和磁损耗。

2.2 表面行波抑制吸波材料研究进展

随着隐身技术的发展, 为了减少由表面波引起的非镜面散射, 如何有效抑制表面波成为吸波涂层关注的重点。Choi 等^[28]从表面阻抗角度对其进行了分析和计算, 指出表面和边缘不连续会引起边缘绕射和后向表面行波, 由其产生的非镜面散射可利用非镜面雷达吸波材料加以抑制。美国已在 20 世纪 50 年代开始深入开展雷达隐身技术研究, 探索减少雷达反射截面的途径, 并先后在舰艇、巡航导弹、战斗机和战略轰炸机上采用吸波涂层, 以降低装备的雷达散射截面, 设计制造的 F-18、F-19、B-1B、B-2、F-117A、F-22 等高隐身性能装备, 特别是 F-22 全角域宽频段范围目标的雷达散射截面(RCS)可降至 0.01 m^2 以下。随后其传统盟国, 如德、英、法、日、意等国也相继研制了全角域宽频段范围内低 RCS 的隐身飞机与巡航导弹。

我国关于行波抑制材料的研究起步较晚, 众多研究者从理论计算出发, 提出了行波抑制材料优选原则和宽带设计方法, 通过行波抑制系数来评价吸波材料对行波散射抑制效果的差异, 并对国内外常用几种材料的抑制系数进行了计算, 得出某些介质材料存在着最佳涂覆厚度, 表明介质涂覆并不是越厚越能有效抑制行波。如图 5 所示, 黄大庆等^[29]通过实验验证了低厚度的雷达吸波涂层即可实现高频表面波的强衰减吸收, 而对低频表面波, 则需要大厚度吸波涂层, 配方上也需要有所选择, 同时验证了通过频率选择表面与雷达吸波涂层相结合, 可以在低厚度吸波涂层基础上实现低频表面波的较强衰减吸收。

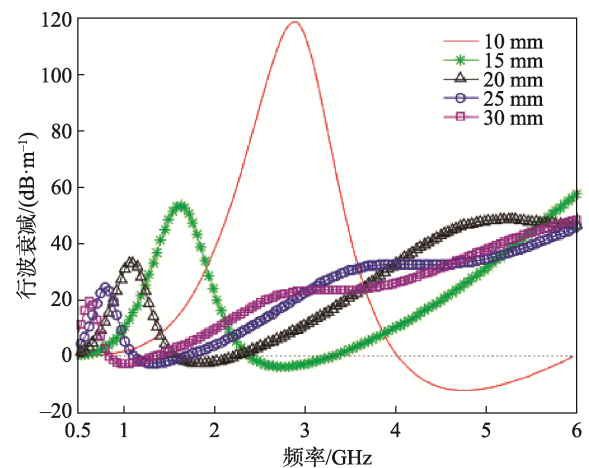


图 5 不同厚度材料的表面行波衰减曲线^[29]

Fig.5 Surface wave attenuation rate of different thickness materials^[29]

2.3 小结

面对日益复杂多变的环境,我国需要研制新的低频行波抑制涂层,得到机械力学性能、低频行波抑制性能和耐环境性能优异的行波抑制涂料,以满足飞机机身及机翼外表面对低频行波抑制涂料的需求。未来研制表面行波抑制涂层不仅要加强对表面行波传播及衰减机理的研究,还需要结合实际应用,赋予表面行波抑制涂层更多的耐环境性以及机械力学性能,通过对机理的深入研究,制备适用于现代服役装备的表面行波抑制涂层。

3 耐高温雷达吸波涂层

航空及航天系统中多个新型武器型号均具备高空、高速、远程、精确制导的特点。如图 6 所示,针对此类装备的某些特殊部位(如喷气式战斗机、无人机及巡航导弹、超声速等飞行器发动机尾喷管、进气道等部位),隐身涂层不仅需具备耐高温的特性,而且要求在 P、L、S、C、X 波段均具有较高的隐身功能。

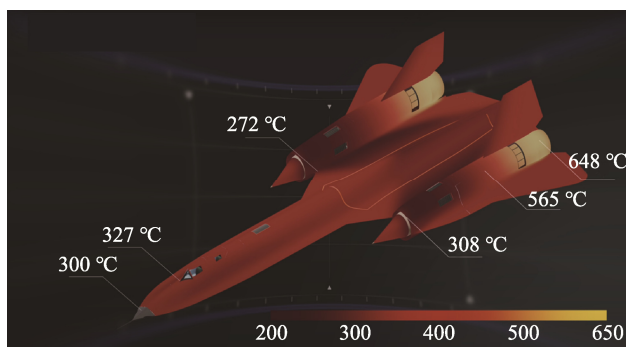


图 6 以 3 马赫速度飞行时 SR-71 表面温度分布^[30]

Fig.6 Surface temperature distribution of SR-71 flying at 3 Mach^[30]

3.1 高温对吸波涂层的影响机理

相比于常温下的雷达吸波材料,高温将会极大地影响材料的微观结构,进而引起材料的吸波性能发生变化甚至恶化。高温会使得吸波材料中自由电荷的活动能力得到进一步加强,但是高温加剧了材料的晶格振动,这又会对材料自由电荷的移动产生阻力,这一现象在介电型吸波材料上更加明显,例如 SiC 材料在高温时由于自由电荷活动能力增强占主导地位,其介电常数会发生增大的现象;而某些金属粉末则因为晶格振动剧烈,反而导致介电常数下降^[30]。

高温不仅作用于材料的自由电荷,同时影响材料本征的微观结构。在高温环境下,由于材料晶界的迁移,绝大部分材料都会发生晶粒长大的现象^[31]。如图 7 所示,Wang 等^[17]对不同温度处理后的羰基铁粉

测定电磁参数,发现介电常数上升、磁导率下降,其原因为晶粒长大降低了晶粒之间的交换耦合作用,并且晶粒长大时伴随发生的晶界之间的迁移、合并以及消失等现象降低了晶粒内自由电荷的阻力。

高温不仅影响材料的晶体结构,同时会加快材料氧化。例如,磁性金属微粉化学性质非常活泼,其微米级别的粒径尺寸使得其表面能大大提高,在高温环境下极易发生氧化,形成超顺磁性相或者非磁性相,导致磁性性能下降甚至消失^[32];常用的碳纤维、SiC 纤维等吸波材料在长时间高温环境下服役,均会有氧化层出现,这些氧化层的存在降低了吸波纤维的介电损耗性,从而导致吸波性能的降低。

吸波涂层基体和吸收剂之间、基体与涂覆板材之间的热膨胀系数存在较大的差异,长期高温环境服役下,涂层积累的热应力导致的涂层起泡、开裂都会引起吸波涂层力学性能的下降,抗热震性不佳也是耐高温吸波涂层设计中急需解决的痛点之一。

3.2 耐高温雷达吸波涂层的研究现状

磁性金属吸收剂,如羰基铁、铁基微粉等的化学性质非常活泼,极易在高温环境下发生氧化,导致涂层反射率性能下降。C/C 材料是一种优良的耐高温结构型吸波复合材料,是目前美国航天材料开发的重点内容之一。它具有稳定的化学键,抗高温烧蚀性能好、强度高、韧性大,还具有优良的吸波性能,且能很好地减少红外信号和雷达信号^[33]。如图 8a 所示, SiC 纤维增强陶瓷基结构隐身材料可在 1 200 °C 下长期工作,已成功应用于美国 F117 隐身飞机的尾喷管后沿。法国 SEP 公司研究开发的由 C/SiC 复合材料组成的喷管、尾喷管调节片已成功应用于多种发动机,其突出优点是强度大、韧性好和热膨胀率低,密度与硼相当,还具有吸波特性。

我国相关机构也开展了耐高温吸波材料方面的研究工作。除了 SiC 外,可用于制备高温吸波剂的材料还有炭黑、碳纤维、碳纳米管、石墨等,它们具有良好的耐腐蚀性、密度低、导电率高等优点^[34]。虽然碳基材料和陶瓷基材料具备一定的吸波性能,却仍然难以满足宽频带尤其是低频宽带吸收的要求。磁性合金粉是一种具有软磁吸波功能且居里温度较高的吸收剂,且有较好的抗氧化性,是耐高温吸收剂优选的材料之一,如图 8b 所示, Liu^[35]等利用原位热解法制备了 FeCo 合金/碳复合粒子吸收剂,对比不同合金成分与吸收剂的吸波差异性,发现 Fe 的含量是调控其吸波性能的重要因素。日本使用的 Fe₈₅Si₁₀Al₅ 类合金、美国波音公司使用的 Fe₈₇Si₁₀Cr₃ 合金,当涂层厚度为 1.0 mm 时,1 GHz 处的平板反射率分别达到 -1.5 dB 和 -3.2 dB,经过 4 h、350 °C 高温试验后,1 GHz 处的平板反射率基本不变,具有优异的耐温性和抗氧化性。

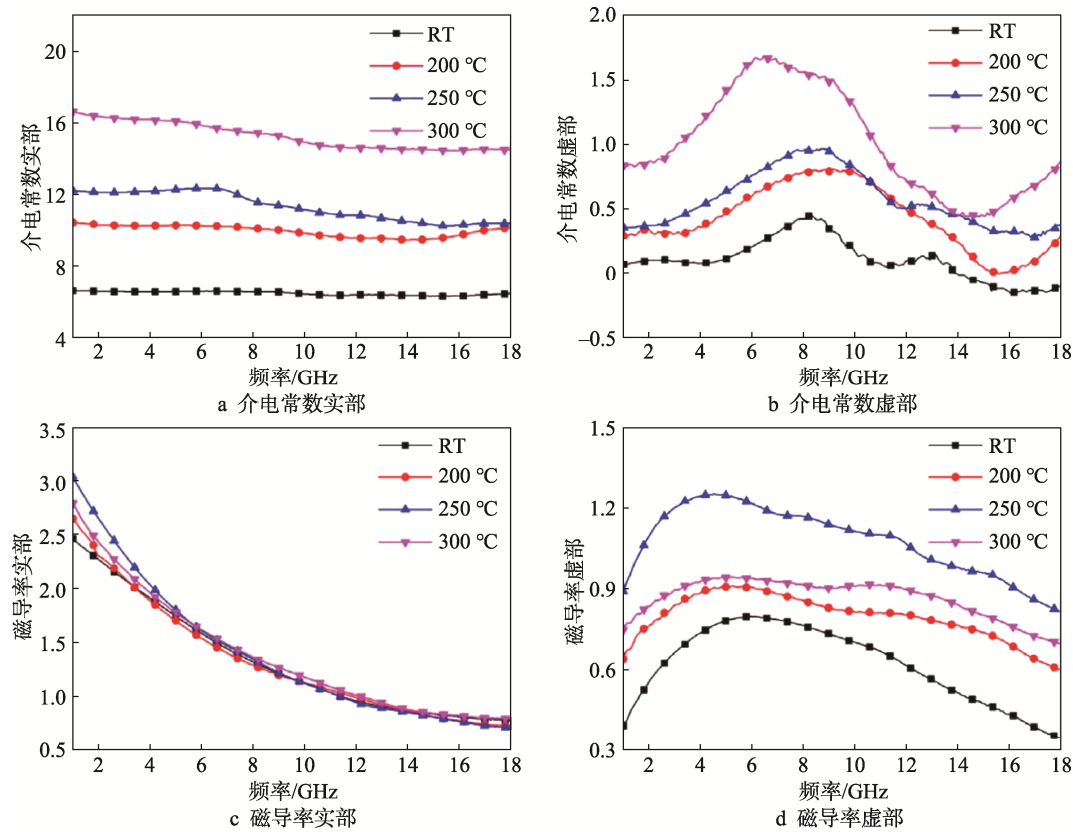
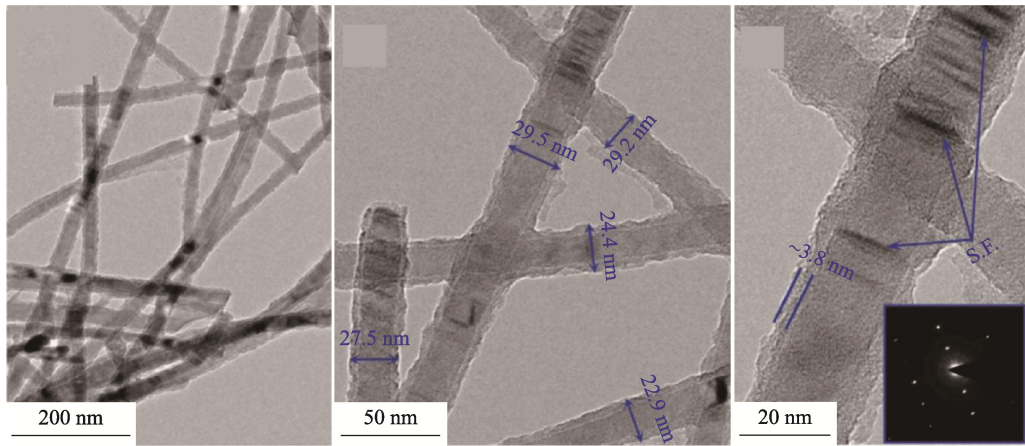
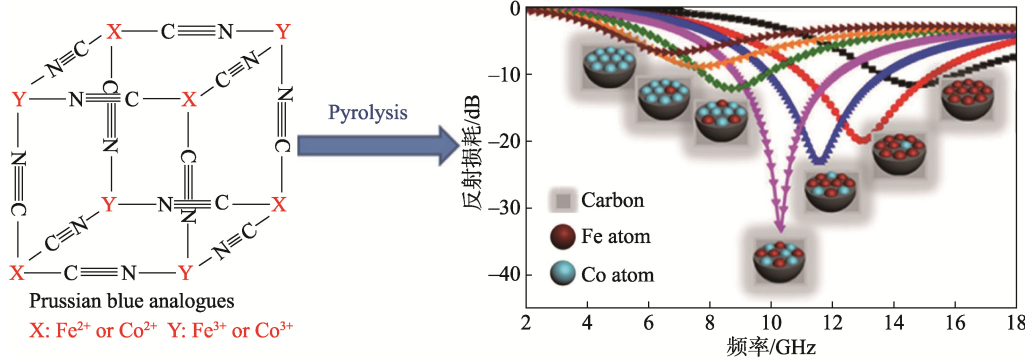


图 7 不同温度热处理后的羰基铁粉电磁参数^[17]
Fig.7 Electromagnetic parameters of carbonyl iron after heat treatment at different temperatures^[17]



a SiC@C核壳粒子



b FeCo合金/碳复合材料

图 8 典型耐高温吸波材料的结构与性能^[34-35]
Fig.8 Structure and properties of typical high-temperature absorbing materials^[34-35]

吸波涂层在高温环境下长期服役,高温吸波涂层在金属部件表面必须具有高的附着力、较高的强度和较好的抗热震性和耐介质性能,因此,耐高温粘结剂树脂及其与基材的热匹配性也是耐高温雷达吸波涂层研究的重难点。目前研究较多的耐温树脂主要有以有机硅树脂、聚酰亚胺树脂、改性酚醛树脂等为代表的有机树脂体系^[36],以无机硅酸盐和磷酸盐为代表的无机树脂体系^[37]。有机树脂体系在金属基材表面具有较好的力学性能,但承受高温的能力有限,在一定温度下易老化降解,难以满足更高温度的需求。无机树脂体系具有较好的耐高温性能,是耐高温材料领域极具发展潜力的关键材料,但其在隐身材料领域的应用较少。

3.3 小结

耐高温雷达隐身涂层的吸收剂需要具有较好的耐高温性,耐高温试验后需具备较好的频散效果确保获得良好的吸波性能,同时需要迫切开发具有高抗热震性、耐介质性的高性能树脂,并解决树脂与吸收剂相容性不佳的难题。

4 耐腐蚀吸波涂层

当舰船、舰载机等装备处于海洋环境条件时,会受到普通化学腐蚀、电化学腐蚀以及微生物腐蚀等多重腐蚀,同时太阳辐射、湿热、酸性大气等恶劣环境均会加速腐蚀过程,从而缩短吸波涂层寿命,严重影响海面装备的整体雷达吸波效果。针对陆基环境设计的雷达隐身材料难以满足海洋环境下的耐久性要求,特别是当防腐面漆出现细微损伤时,暴露在海水环境中的吸波涂层发生生锈、溶胀,并向侵蚀点周边扩展,导致涂层的吸波性能大幅降低^[38-39]。

4.1 海洋环境腐蚀吸波涂层的机理

海洋环境气候湿润且复杂多变,海水含盐量高、导电性强且富含微生物,其组成是一种天然的强腐蚀性介质,大多数常用的吸波涂层在海洋环境中都会受到不同程度的腐蚀而失效。如图 9 所示,以常用的 Fe 基磁性金属微粉吸收剂为例,其在海水中作为负极会发生吸氧腐蚀以及析氢腐蚀,其化学反应式如下:

负极: $\text{Fe} - 2\text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$

正极: $\text{O}_2 + 4\text{e}^- + 4\text{H}_2\text{O} = 4\text{OH}^-$ (吸氧腐蚀)

负极: $\text{Fe} - 2\text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$

正极: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2 \uparrow$ (析氢腐蚀)

吸氧腐蚀会生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀,析氢腐蚀则会形成 Fe^{2+} ,与氧气和水的进一步反应,上述 2 种产物会生成由 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 FeOOH 、 Fe_2O_3 组成的铁锈,这些非磁性相的存在将大大降低吸波涂层的吸波性能。

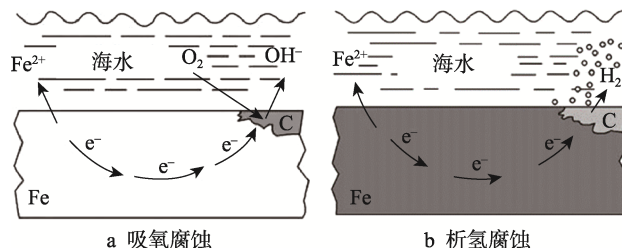


图 9 海水对铁的 2 种腐蚀机理

Fig.9 Two corrosion mechanisms of iron in seawater

海水内富含的微生物也是一个不可忽视的腐蚀因素。有研究表明,海水内的铁细菌、氧化硫杆菌、脱硫弧菌等多种细菌均会对 Fe 产生腐蚀,在发生析氢腐蚀的同时,海水中的铁细菌会将 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+} ,而 Fe^{3+} 的强氧化性又会对 Fe 进行氧化腐蚀;而氧化硫杆菌会降低周围环境的 pH 值,进一步促进析氢腐蚀的进行;脱硫弧菌则会将海泥中的 SO_4^{2-} 还原,促进去极化反应的进行,生成腐蚀性很强的 S^{2-} , S^{2-} 与 Fe 反应生成 FeS 沉淀^[40-41]。

海洋腐蚀区域可分为大气区、飞溅区、潮差区、全浸区、海泥区,不同的区域腐蚀的速率也存在明显的差异,如图 10 所示,海水飞沫喷溅的飞溅区的腐蚀速率是最快的,这是由于飞溅区不仅紫外线强度大,同时具有大量的富氧海水飞沫,容易形成点腐蚀并极易扩散^[42]。飞溅区还会产生反复击打涂层表面,涂层也会承受相应的交变载荷而产生形变,因此对于服役于海洋环境的装备,涂覆隐身涂层的位置设计以及提高其抗交变应力性也是必须重视的问题。

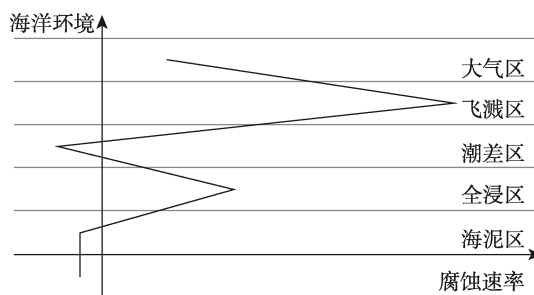


图 10 海洋不同腐蚀环境区带腐蚀速率分布^[42]

Fig.10 Distribution of corrosion rates in different corrosive environmental zones of the ocean^[42]

4.2 耐腐蚀吸波涂层研究现状

解决吸波涂层在海洋环境的应用问题,需从吸波涂层的组成着手,从根本上增强吸波涂层的耐腐蚀性。在海洋环境下使用的树脂需要具备高固含、低挥发性有机物、适用期可控、干燥时间短、防腐耐候性良好、可常规设备施工及滚涂、单一涂层可运用于腐蚀环境等特点,常规的树脂并不能完全满足使用需求,因此需要改性处理。增加体系密实度以及对吸收剂填料的包容性,可降低海水对涂层体系的渗透腐蚀,提高体

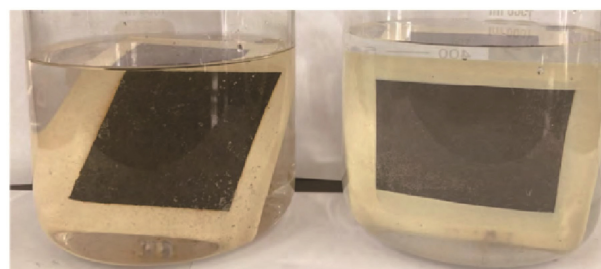
系耐腐蚀特性^[43]。中船重工集团 725 所厦门材料研究院研发出了一种烷氧基硅改性环氧树脂与改性酚醛胺的复合涂料, 涂层可实现快速固化与高韧性、高附着强度^[44-45]。

在耐腐蚀吸收剂设计方面, 目前应用技术比较成熟、应用范围较广的吸收剂仍以碳系吸收剂、铁氧体吸收剂与改性铁系吸收剂为主。碳系吸收剂为介电材料, 具有低密度、耐腐蚀性, 经过表面基团改性后, 在特定波段可实现强吸收^[46-47]。铁氧体吸收剂耐腐蚀性较好, 磁共振相比铁磁金属弱, 由于其损耗机制为磁损耗, 因而吸波性能不强, 且重量与厚度均较大。铁基微粉吸收剂既具有较高的磁导率又具有介电性能, 既能产生介电损耗又能产生磁损耗, 具备优良的宽频吸波性能, 但却易在海水中失去电子向环境中释放阳离子而遭受腐蚀。综合来说, 铁基吸收剂的应用前景更为明朗, 但为了提高铁基吸收剂的耐腐蚀能力, 需要对其元素组成与晶体结构及其表面状态加以控制^[48-49]。胡悦等^[50]在羰基铁粉表面包覆一层均匀致密的 SiO_2 , 包覆后材料的介电常数实部由 8.7~9.1 下降至 7.5~8.0, 其最大反射率损失值由 -23.2 dB 变为 -25.6 dB, 有效带宽由 7.7 GHz 提升为 8.3 GHz。如图 11a 所示, 将经过 SiO_2 包覆处理的羰基铁粉和未经包覆处理的羰基铁粉制备的样板在 60 °C 环境下、放入 5% NaCl 溶液浸泡 168 h。随后取出并依次向溶液滴入 5 mL 1 mol/L 硫氰酸钾溶液 (图 11b) 以及 20 mL 浓硝酸 (图 11c) 后搅拌均匀, 静置 10 min 后, 发现经 SiO_2 包覆处理的羰基铁粉的 NaCl 溶液几乎没有变化, 这表明相比于原始羰基铁粉, SiO_2 包覆后的羰基铁粉耐盐水浸泡能力明显得到提升。

如图 12 所示, 雷子璇^[51]利用等离子电弧及高温烧结制备了 $\text{Cu}@C@Fe_3O_4$ 纳米核壳粒子, 该核壳粒子制备的吸波涂层具有较好的电磁频散特性, 最大反射率可达 -20 dB, 并且对大肠杆菌具有明显的抑制效应, 当细菌培养液中所含粒子的质量浓度为 150 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时, 对大肠杆菌的灭菌率可达 95%。

4.3 小结

我国现代化海军建设的起步较晚, 耐海洋腐蚀的雷达吸波涂层的研究和应用与国外存在较大的差距。在理论研究方面, 对海洋环境影响雷达吸波涂层的机理尚且不够透彻, 例如尚未有海洋微生物对吸波涂层吸波性能、力学性能的影响机制的报道; 在工程应用方面, 目前我国制备的防腐型雷达吸波涂层仍存在吸波频带窄、吸波涂层厚、环境稳定性差等问题。针对上述问题, 可参考成熟的耐海洋环境材料的结构及成分, 对现有的吸收剂进行合理设计, 同时引入耐海洋环境性的碳材料、氧化物等, 通过各组分的协同作用, 拓宽吸波涂层的有效吸波带宽。



a 放入 5% NaCl 溶液的 CIP 与 CIP/ SiO_2 样板



b 放置 168 h 后滴入 5 mL 1 mol/L 硫氰酸钾溶液的溶液状态



c 滴入浓硝酸搅拌后的溶液状态

图 11 未经包覆处理的羰基铁粉(CIP)与包覆处理的羰基铁粉(CIP/ SiO_2)NaCl 溶液浸泡对比^[50]

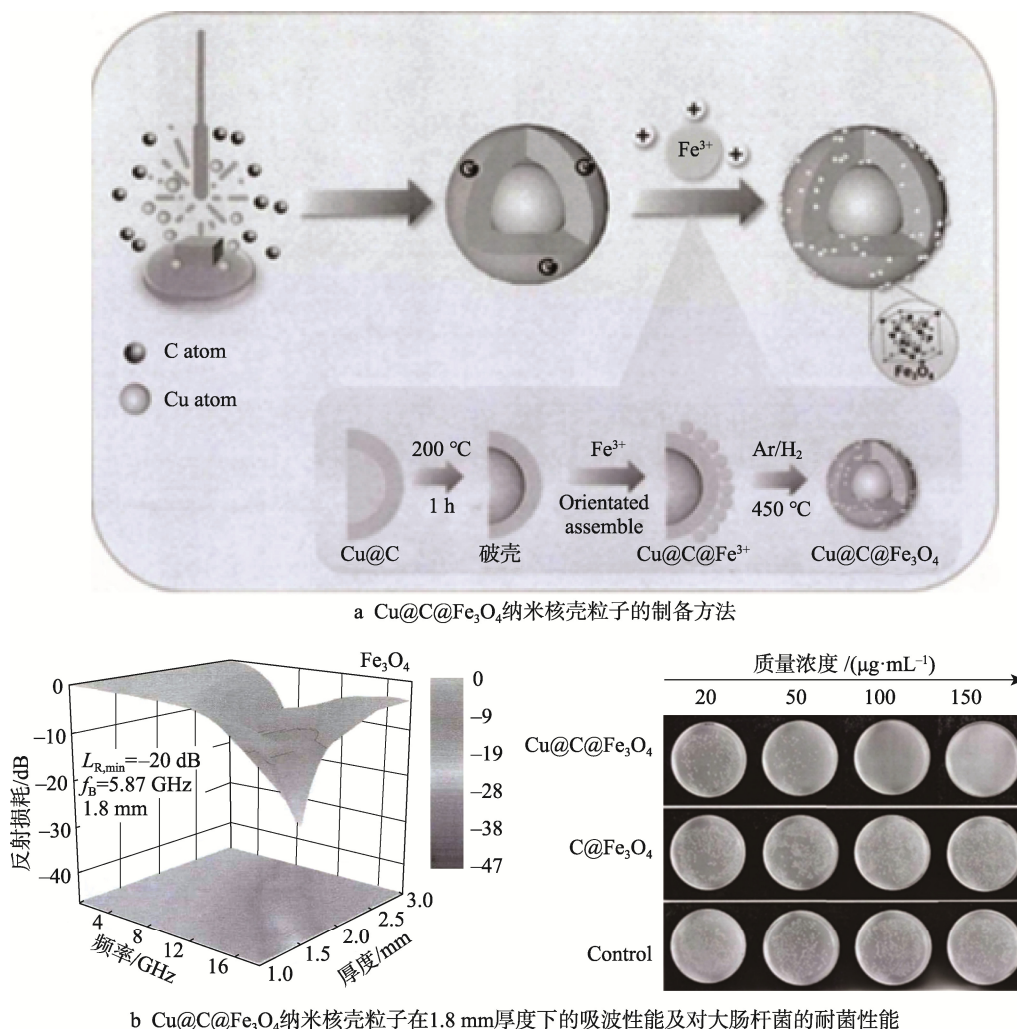
Fig.11 Comparison of soaking untreated carbonyl iron powder (CIP) and coated carbonyl iron powder (CIP/ SiO_2) in NaCl solution^[50]

5 厘米波-毫米波兼容雷达吸波涂层

随着探测技术的不断发展, 现代雷达的探测频率范围越来越宽, 定位精度以及被探测目标越来越小, 已经从常见的厘米波扩展到毫米波范围, 地面装备面临着被远程准确探测和被近程精确打击两大致命威胁, 传统的厘米波吸波涂层越来越难以满足使用要求, 雷达吸波材料必须要考虑在更宽频段的吸波性能^[52]。因此, 厘米波-毫米波兼容吸波涂层的研究和应用是当前多波段兼容吸波材料的重要研究方向, 是保持战斗力的重要保证之一。

5.1 厘米波-毫米波兼容雷达吸波涂层的设计原理

厘米波的波段主要分布在 XKu 波段 (8~18 GHz), 而用于对敌精准打击的毫米波雷达探测波段为 30~300 GHz, 主要位于 Ka 波段、V 波段及 W 波段。式 (17)、式 (18) 给出了吸波材料等效电导率 (σ)、衰减常数



b Cu@C@Fe₃O₄纳米核壳粒子在1.8 mm厚度下的吸波性能及对大肠杆菌的耐菌性能

图 12 Cu@C@Fe₃O₄ 纳米核壳粒子制备方法、吸波性能及耐菌性能^[51]
Fig.12 Preparation method, absorption performance, and bacterial resistance of Cu@C @Fe₃O₄ nano core-shell particles^[51]

(α) 与频率与材料介电常数实部、介电常数虚部及磁导率实部的关系^[53]:

$$\sigma = f \varepsilon'' \quad (17)$$

$$\alpha = f \sqrt{\frac{\mu' \varepsilon'}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{f \varepsilon'} \right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

由式 (17)、式 (18) 可知, 采用一种材料同时实现对厘米波和毫米波的强吸收是极其困难的, 这是由于毫米波的频带过宽, 对材料的电磁频散影响特别大。结合式 (2) 可知, 当频率分布过宽时, 吸波涂料表面的入射阻抗与内部的阻抗很难完美匹配, 进一步导致了吸波效果降低。根据查阅的相关文献报道, 对常用的磁性吸收剂羰基铁粉进行合理的设计便可实现对 XKu 波段的吸收, 但在毫米波的 Ka、V、W 等频段吸收效果极差, 而常用的毫米波雷达吸收剂包括 BaTiO₃、聚吡咯等在厘米波的吸收效果却不如磁性吸收剂^[54-56]。

进一步对衰减关系进行分析: 当厘米波与毫米波

雷达射入某吸波涂层表面时, 若该涂层为厘米波吸波涂层, 涂层将对毫米波呈现明显的导电性; 而遇到毫米波雷达吸波涂料时, 厘米波可以几乎无障碍地透射。根据上述分析, 发现通过合适的多层结构设计, 将毫米波吸波涂层用作顶层材料, 将厘米波涂层用作底层材料, 利用厘米波涂层对毫米波的二次反射、毫米波涂层对厘米波的透射以及多层吸波材料的多重损耗效应可实现厘米波-毫米波兼容雷达吸波涂层的制备。

5.2 厘米波-毫米波兼容雷达吸波涂层的研究现状

厘米波-毫米波兼容吸波涂层与常见雷达吸波涂层一致, 即采用高分子溶液、乳液或液态高聚物为基料, 把对雷达波吸收起主要作用的吸收剂和其他成分分散加入其中而制成, 涂覆在装备外表上固化成涂层。国内外研究工作者在厘米波-毫米波兼容吸波材料领域取得一定进展, 其技术手段主要包括 2 种: 一种

是将厘米波吸收剂与毫米波吸收剂通过合适的比例进行混合, 利用各种吸收剂的协同作用实现厘米波-毫米波雷达的吸收; 另一种方式是通过多层结构设计, 利用各层的透射、反射及多重损耗实现厘米波-毫米波雷达的损耗。

如图 13 所示, Xu 等^[10]利用化学氧化聚合和共沉淀法成功合成了一种由聚吡咯 (PPy) 和 La^{3+} - Zr^{4+} 共掺杂钡铁氧体 (LZ-BaM) 组成的复合材料。基于 PPy 的高电导率、LZ-BaM 的显著偶极子极化、LZ-BaM 与 PPy 之间强的界面极化及四分之一波长干涉相消原理, 该复合材料在厘米波和毫米波段表现出良好的兼容吸收性能, 在 2.4 mm 的匹配厚度下同时实现了 8~17 GHz 的厘米波频段和 27~40 GHz 的毫米波 $L_R < -5$ dB 的吸收^[57]。国内研究者首次制备了双层吸波涂层, 通过对各层吸波涂层电磁参数的设计, 当总厚度为 1.5 mm 时, 制备的双层涂层在 9~12 GHz 及 26.5~40 GHz 可满足 $L_R < -10$ dB 的强吸收。其主要原理为以低介电常数的电损耗吸波涂层作为顶层, 高介电常数的磁损耗吸波涂层作为底层, 通过调节电磁参数, 实现底层和顶层良好的阻抗匹配。

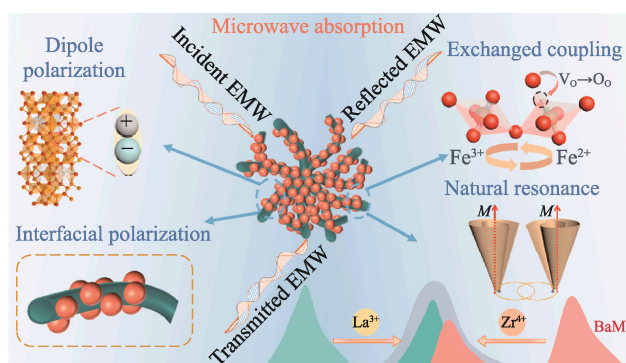


图 13 LZ-BaM/PPy 复合材料的吸波机理^[10]

Fig.13 Schematic illustration of microwave absorption mechanisms for LZ-BaM/PPy composites^[10]

5.3 小结

通用单层雷达吸波涂层可通过改变涂层中的复合吸收剂种类和含量来改善涂层的电磁参数, 设计的单层吸波涂层能在厘米波段和毫米波段内具有较好的吸波效果, 但却难以在多波段兼容和跨波段兼容方面实现较好的吸收效果。而采用多层结构设计对于实现宽频强吸收具备一定优势, 但同时缺点也很明显, 即多层结构的吸波涂层在实际应用时工艺复杂, 难以精确控制, 施工难度增加。针对上述问题, 一方面要深入研究并设计新型的宽频吸收剂, 另一方面则需要对新型的喷涂工艺进行探索, 实现精确的厚度把控, 同时可借助超材料结构周期的设计方案, 在涂层上设计相应的结构单元, 推动我国厘米波段和毫米波段兼容雷达吸波涂层的研究进展。

6 结语及展望

随着雷达探测技术和材料科学技术的迅速发展, 针对现代武器多样化、隐身化的应用背景, 为实现复杂环境的雷达吸波涂层应用需求, 充分利用上述低频宽频吸收、宽频行波抑制、耐高温、耐腐蚀、厘米波-毫米波兼容等各种吸波涂层的优点, 克服其不足, 研制具有多功能集于一身的新型高性能吸波涂层, 是隐身材料领域的重要研究方向。目前, 针对日益拓宽的雷达探测波段以及复杂的服役环境, 国内外研究者在这方面均取得一定的进展, 但是仍然存在诸多方面的不足, 建议复杂环境的雷达吸波涂层的研究可从以下 3 个方面展开。

1) 理论研究。如高温、海洋环境对服役于海陆空天各类装备的隐身涂层的影响机制研究, 形成体系化的环境-吸波性能频谱及评估体系; 在表面行波抑制涂料方面, 加强对行波衰减机理的研究; 针对低频以及厘米波-毫米波兼容的雷达吸波涂层, 要充分研究微观结构对吸收剂电磁参数的影响机制, 指导各频段吸收剂结构与形貌的设计。

2) 基础材料研究。以先进理论为指导, 通过计算、仿真等技术手段, 针对不同的应用环境及探测频段, 开展新型的吸收剂及树脂研究; 面对高温、海洋环境, 需开发具有低热膨胀系数、机械性能良好、耐高温的树脂, 通过化学掺杂、表面包覆等技术手段研制耐环境性良好的吸收剂; 在低频以及厘米波-毫米波兼容的雷达吸波涂层的研究方面, 需要探索新的结构, 以便有效提高吸收剂的磁导率以及拓宽吸收剂的吸收频宽。

3) 结构设计及喷涂工艺研究。随着科技日新月异的迭代, 目标装备的隐身需求必将复杂化、多样化, 这就要求雷达吸波涂层需将宽频吸收与耐环境性进行集成设计。因此, 开展新型的结构设计及喷涂工艺研究, 使得各层的吸波涂层充分发挥各自的作用, 精确控制各层吸波涂层的电磁特性及喷涂厚度, 是未来雷达吸波涂层不可或缺的发展方向之一。

参考文献:

- [1] 姬金祖, 黄沛霖, 马云鹏, 等. 隐身原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.
JI J Z, HUANG P L, MA Y P, et al. Stealth Principle[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2018.
- [2] 张考, 马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
ZHANG K, MA D L. Military Aircraft Survivability and Stealth Design[M]. Beijing: National Defense Industry

- Press, 2002.
- [3] WANG X W, YANG S S, LI C P, et al. A Microwave-Absorbing and Corrosion-Resistant Integrated Coating Based on Corrosion Inhibitor-Collaborative Silica-Encapsulated Carbonyl Iron Particles[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 192: 108500.
- [4] SI W, LIAO Q W, HOU W, et al. Low-Frequency Broadband Absorbing Coatings Based on MOFs: Design, Fabrication, Microstructure and Properties[J]. *Coatings*, 2022, 12(6): 766.
- [5] RUAN S C, TIAN N, LOU H Y, et al. Preparation and Electromagnetic Properties of Multi-Component Absorbing Agents and Their Double-Layer Coatings on Polyester Fabrics[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, 35(13): 893.
- [6] SHAN B, WANG Y, JI X Y, et al. Enhancing Low-Frequency Microwave Absorption Through Structural Polarization Modulation of MXenes[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16(1): 212.
- [7] YU G Y, SHAO G F, CHEN Y, et al. Nanolayered Ceramic-Confined Graphene Aerogel with Conformal Heterointerfaces for Low-Frequency Microwave Absorption[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(33): 39559-39569.
- [8] 周万城, 王婕, 罗发, 等. 高温吸波材料研究面临的问题[J]. *中国材料进展*, 2013, 32(8): 463-472.
ZHOU W C, WANG J, LUO F, et al. Problems Faced with High-Temperature Microwave Absorbing Materials[J]. *Materials China*, 2013, 32(8): 463-472.
- [9] HU J W, LIU S C, WANG Y, et al. Manganese Phosphate Coated Flaky FeSiAl Powders with Enhanced Microwave Absorbing Properties and Improved Corrosion Resistance[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 296: 127274.
- [10] XU M, XIANG X Y, ZHANG X H, et al. Exquisite Regulation of LZ-BaM/PPy Composites for Compatible Absorption across Centimeter-Wave and Millimeter-Wave Bands[J]. *Composites Communications*, 2024, 49: 101964.
- [11] 宦峰, 谢国治, 陈将伟, 等. 低频吸波材料研究进展[J]. *材料导报*, 2014, 28(1): 17-19.
HUAN F, XIE G Z, CHEN J W, et al. Research Progress of Low Frequency Wave Absorption Materials[J]. *Materials Review*, 2014, 28(1): 17-19.
- [12] 张钊, 王峰, 张新全, 等. 低频宽带薄层吸波材料研究进展[J]. *功能材料*, 2019, 50(6): 6038-6045.
ZHANG Z, WANG F, ZHANG X Q, et al. Recent Advances of Broadband and Thin Microwave Absorbing Materials for Low Frequency[J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(6): 6038-6045.
- [13] LIU R, AN Z G, LIAO B, et al. FeNi Alloy and Nickel Ferrite Codoped Carbon Hollow Microspheres for High-Efficiency Microwave Absorption[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(15): 6085-6097.
- [14] SALIH S J, MAHMOOD W M. Review on Magnetic Spinel Ferrite (MFe_2O_4) Nanoparticles: From Synthesis to Application[J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e16601.
- [15] PEYMANFAR R, NOROUZI F, JAVANSHIR S. Preparation and Characterization of One-Pot PANi/Fe/ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ Nanocomposite and Investigation of Its Microwave, Magnetic and Optical Performance[J]. *Synthetic Metals*, 2019, 252: 40-49.
- [16] MIN D D, ZHOU W C, QING Y C, et al. Greatly Enhanced Microwave Absorption Properties of Highly Oriented Flake Carbonyl Iron/Epoxy Resin Composites under Applied Magnetic Field[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(4): 2373-2383.
- [17] WANG W, GUO J X, LONG C, et al. Flaky Carbonyl Iron Particles with Both Small Grain Size and Low Internal Strain for Broadband Microwave Absorption[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 637: 106-111.
- [18] LIU J L, ZHANG L M, WU H J. Enhancing the Low/Middle-Frequency Electromagnetic Wave Absorption of Metal Sulfides Through F^- Regulation Engineering[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(13): 2110496.
- [19] MING K S, JIANG S M, NIU X Y, et al. High-Temperature Strength-Coercivity Balance in a FeCo-Based Soft Magnetic Alloy *via* Magnetic Nanoprecipitates[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 81: 36-42.
- [20] 黄梦琪, 吴开明, 向前, 等. 一种新型 FeSiBPCu 系纳米软磁合金的研究现状及未来发展趋势[J]. *钢铁研究学报*, 2018, 30(10): 763-768.
HUANG M Q, WU K M, XIANG Q, et al. Research Status and Future Development Trend of a Novel Fe-SiBPCu Nano Soft Magnetic Alloy[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2018, 30(10): 763-768.
- [21] YAO Q, YU Z Y, LI L G, et al. Strain and Surface Engineering of Multicomponent Metallic Nanomaterials with Unconventional Phases[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(15): 9676-9717.
- [22] XIAO L L, ZHENG Z Q, HUANG P, et al. Superior Anticorrosion Performance of Crystal-Amorphous FeMnCoCrNi High-Entropy Alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2022, 210: 114454.
- [23] LI C Y, QUAN G N, ZHANG Q, et al. A Novel

- Amorphous Alloy Coating for Elevating Corrosion Resistance of X70 Pipeline Steel[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2024, 33(5): 1612-1629.
- [24] YAO Z Q, XU S Q, ZHANG X K, et al. CuCo Nanocube/N-Doped Carbon Nanotube Composites for Microwave Absorption[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(2): 1325-1338.
- [25] WANG Y F, CHEN D L, YIN X, et al. Hybrid of MoS₂ and Reduced Graphene Oxide: A Lightweight and Broadband Electromagnetic Wave Absorber[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(47): 26226-26234.
- [26] 胡明春, 周志鹏, 高铁. 雷达微波新技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- HU M C, ZHOU Z P, GAO T. *New Technology of Radar and Microwave*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [27] ZHAO X T, GUO K Y, CHEN Y X, et al. Traveling Wave Scattering Center Model and Its Applications to ISAR Imaging[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(4): 2437-2442.
- [28] CHOI J, WANG N, PETERS L, et al. Near Axial Backscattering from Finite Cones[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, 38(8): 1264-1272.
- [29] 黄大庆, 哈恩华, 何山, 等. 宽频段雷达表面波衰减特征规律研究[J]. *材料工程*, 2005, 33(3): 33-36.
- HUANG D Q, HA E H, HE S, et al. Study on Attenuating and Absorbing of Wideband Radar Surface Waves[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2005, 33(3): 33-36.
- [30] ZHOU Q, YIN X W, YE F, et al. High Temperature Electromagnetic Wave Absorption Properties of SiC_f/Si₃N₄ Composite Induced by Different SiC Fibers[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(5): 6514-6522.
- [31] KANEYAMA G, KOTO H, TAKIGAWA Y. Effect of Boron and Tungsten Addition on Superplasticity and Grain Growth in Electrodeposited Nickel Alloys[J]. *Materials Transactions*, 2022, 63(7): 1001-1005.
- [32] PAUL H, KRILL C E. Anomalous Linear Grain Growth in Nanocrystalline Fe[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(1): 5-8.
- [33] KUCHI R, NGUYEN H M, DONGQUOC V, et al. Optimization of FeNi/SWCNT Composites by a Simple Co-Arc Discharge Process to Improve Microwave Absorption Performance[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 852: 156712.
- [34] ZHANG M, LIN H, DING S Q, et al. Net-Like SiC@C Coaxial Nanocable Towards Superior Lightweight and Broadband Microwave Absorber[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 179: 107525.
- [35] LIU D W, QIANG R, DU Y C, et al. Prussian Blue Analogues Derived Magnetic FeCo Alloy/Carbon Composites with Tunable Chemical Composition and Enhanced Microwave Absorption[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 514: 10-20.
- [36] 侯锁霞, 李勇帅, 张好强, 等. 耐高温粘结剂的研究现状[J]. *中国胶粘剂*, 2018, 27(7): 57-60.
- HOU S X, LI Y S, ZHANG H Q, et al. The Current Research Situation of High Temperature Resistant Adhesive[J]. *China Adhesives*, 2018, 27(7): 57-60.
- [37] ZHANG J M, CAO X Q, PENG C, et al. Advanced High-Temperature-Resistant Silicate Adhesive Reinforced by Intermetallic Compounds for Joining SiC/SiC Composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 243: 110226.
- [38] 许培伦, 赵文忠. 耐海洋环境雷达隐身涂料的研究进展及应用[J]. *包装工程*, 2024, 45(9): 270-279.
- XU P L, ZHAO W Z. Research Progress and Applications of Corrosion-Resistant Radar Stealth Coatings in Marine Environments[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(9): 270-279.
- [39] 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 Y, HE S, SHI Y Q. Anti-Corrosion Type Radar Absorbing Coating[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(5): 75-80.
- [40] WANG Y H, CHEN X, LI S B, et al. Synergistic Effect of Microorganisms and a Direct Current Electric Field on X70 Steel Corrosion in a Near-Neutral Solution[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 163: 108554.
- [41] HUANG H J, JIA C, ZHAO O, et al. Local Corrosion Morphology Analysis and Simplification of Low Carbon Steel Plates[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 268: 113372.
- [42] 李言涛, 李延旭, 侯保荣, 等. 低合金钢在海洋各腐蚀区带的锈层研究[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(6): 651-655.
- LI Y T, LI Y X, HOU B R, et al. Study on Rust Layers on Low Alloy Steel in Various Marine Corrosion Zone[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(6): 651-655.
- [43] 黄微波, 谢远伟, 胡晓, 等. 海洋腐蚀环境下纯聚脲重防腐涂层耐久性研究[J]. *上海涂料*, 2013, 51(4): 1-5.
- HUANG W B, XIE Y W, HU X, et al. Study on the Durability of Pure Polyurea Heavy Anticorrosion Coating in Marine Corrosion Environment[J]. *Shanghai Coatings*, 2013, 51(4): 1-5.
- [44] 牟迪. 酚醛胺固化剂的合成及其在可复涂高固体分环氧防锈漆中的应用研究[J]. *上海涂料*, 2014, 52(10):

- 18-21.
- MOU D. Synthesis of Phenolic Aldehyde Amine Epoxy Hardener and Its Application Research in Recoated High Solid Epoxy Antirust Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2014, 52(10): 18-21.
- [45] ZHAO Z H, LAN D, ZHANG L M, et al. A Flexible, Mechanically Strong, and Anti-Corrosion Electromagnetic Wave Absorption Composite Film with Periodic Electroconductive Patterns[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(15): 2111045.
- [46] LUO G B, PANG B, LUO X Q, et al. Self-Healing and Enhanced Anticorrosion Coatings Based on Graphene-Reinforced Brominated Butyl Rubber Ionomer[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 174: 107245.
- [47] 宋志强, 张依然, 宋福如, 等. 石墨烯改性防腐涂料研究进展[J]. 广东化工, 2021, 48(19): 88-91.
- SONG Z Q, ZHANG Y R, SONG F R, et al. Research Progress of Graphene Modified Anticorrosive Coatings[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(19): 88-91.
- [48] 刘渊, 吴晋瑞, 王莹. 羰基铁/ $\text{NiLa}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$ 双层宽频吸波体的构建及实现[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1626-1633.
- LIU Y, WU J R, WANG Y. Preparation and Design of Carbonyl Iron/ $\text{NiLa}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$ Double Layer Absorber[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(7): 1626-1633.
- [49] JI P C, XIE G Z, XIE N Y, et al. Fabrication and Microwave Absorption Properties of the Flaky Carbonyl Iron/ FeSiAl Composite in S-Band[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(6): 4711-4716.
- [50] 胡悦, 张桐, 官明君, 等. SiO_2 包覆羰基铁粉及其涂层的耐腐蚀性能[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(5): 842-848.
- HU Y, ZHANG T, GUAN M J, et al. Carbonyl Iron Powders with Silica Coating and Long-Time Corrosion Resistance[J]. Journal of Ceramics, 2021, 42(5): 842-848.
- [51] 雷子璇. Fe 基磁性纳米胶囊电磁波吸收与抗腐蚀性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- LEI Z X. Study on Electromagnetic Wave Absorption and Corrosion Resistance of Fe-Based Magnetic Nanocapsules[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [52] SCHMID G, HIRTL R, GRONAU I, et al. Design and Dosimetric Characterization of a Broadband Exposure Facility for *in Vitro* Experiments in the Frequency Range 18~40.5 GHz[J]. Bioelectromagnetics, 2022, 43(1): 25-39.
- [53] WU Y, TAN S J, ZHAO Y, et al. Broadband Multispectral Compatible Absorbers for Radar, Infrared and Visible Stealth Application[J]. Progress in Materials Science, 2023, 135: 101088.
- [54] JIANG Z Y, SI H X, CHEN X, et al. Simultaneous Enhancement of Impedance Matching and the Absorption Behavior of BN/RGO Nanocomposites for Efficiency Microwave Absorption[J]. Composites Communications, 2020, 22: 100503.
- [55] 周必成, 王东红, 贾琨, 等. 羰基铁吸波材料性能提升研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 2989-2996.
- ZHOU B C, WANG D H, JIA K, et al. Research Progress in the Improvement of Properties of Carbonyl Iron Wave-Absorbing Materials[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(8): 2989-2996.
- [56] DANG S C, LIN Y, WEI X Z, et al. Design and Preparation of an Ultrawideband Gradient Triple-Layered Planar Microwave Absorber Using Flaky Carbonyl Iron as Absorbent[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(20): 17651-17660.
- [57] 于名讯, 丁文皓, 李云南, 等. 毫米波/厘米波兼容吸波涂层的设计与研究[J]. 材料工程, 2007, 35(7): 12-15.
- YU M X, DING W H, LI Y N, et al. Design of and Research on Millimeter-Wave/Centimeter-Wave Compatible Absorbing Coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2007, 35(7): 12-15.