

特约专栏

## 多频谱隐身涂层材料研究进展

邓龙江，周佩珩，陆海鹏，翁小龙，梁迪飞，谢建良

(电子科技大学 国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心, 四川 成都 610054)

**摘要：**随着军事隐身技术以及民用物联网电磁兼容、抗电磁干扰技术的发展，隐身涂层材料的重要性日益受到社会关注，该类材料逐渐成为功能材料的一个重要分支。近年来，在需求牵引和技术革新的带动下，隐身涂层材料从材料体系、设计方法到制备技术都取得了很大的进展。结合国内外最新发展动态和中心开展的主要工作，介绍了当前广泛发展的雷达吸波涂层、红外低发射率涂层以及多频谱兼容隐身涂层这3类涂层的隐身机理、材料特性以及应用技术方面的研究进展；重点关注先进材料体系和设计方法对隐身涂层材料的牵引，包括各向异性磁性材料/介电材料、纳米结构动态磁化理论以及材料复合技术等；最后通过对各种材料技术的分析，提出多频谱隐身涂层材料发展所面临的问题，分析了该领域未来发展的趋势。

**关键词：**隐身材料；涂层；雷达吸波；红外低发射率；多频谱兼容

**中图分类号：**TB 39    **文献标识码：**A    **文章编号：**1674-3962(2013)08-0449-14

## Research Progress in Multispectral Stealth Coating Material

DENG Longjiang, ZHOU Peiheng, LU Haipeng, WENG Xiaolong,  
LIANG Difei, XIE Jianliang

(National Engineering Research Center of Electromagnetic Radiation Control Materials, State Key Laboratory of  
Electronic Thin Film and Integrated Devices, University of Electronic Science and  
Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** With the development of military stealth technology and the EMC/EMI technology in the internet of things, stealth coating material has attracted more and more attention, as an important branch of functional material. During recent years, stealth coating material has achieved promising improvement from either the material category, design or synthesis point of view, by the promotion of application requirement and technical innovation. Radar absorbing coating, infrared low emissivity coating and multispectral stealth-compatible coating are three most widely developed stealth coatings concerned in this review. Combing recent advances with our previous works, stealth mechanisms, material characteristics and application techniques were introduced. The promotion effect of novel materials and design approaches on stealth materials was shown, e. g. anisotropic magnetic/dielectric materials, nanostructure dynamic magnetism, and compositing techniques. At last, the problems and future trends of multispectral stealth coating material were proposed based on the analysis of presented researches.

**Key words:** stealth material; coating; radar absorbing; infrared low emissivity; multispectral compatibility

### 1 前 言

隐身技术的原理是通过降低或控制目标本征信号能量的时域、频域及空间等分布，从而降低目标被发现的概率和缩短被探测的距离，提高武器系统的生存和突防能力。隐身涂层材料具有高性能、工艺简单、施工便捷和不受目标外形限制等特点，是目前应用最广、发展最

收稿日期：2013-05-01

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51025208)

第一作者及通信作者：邓龙江，男，1966年生，教授，博士生导师

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.08.01

好、最为有效的隐身技术手段之一<sup>[1-3]</sup>。

美国三代隐身飞机F-117A、B-2、F-22以及新一代低成本、多用途F-35均采用了不同类型的隐身涂层材料<sup>[1]</sup>。在民用领域，作为电磁辐射控制的主要手段，隐身材料在物联网电磁干扰/屏蔽技术<sup>[4]</sup>、红外能量辐射控制<sup>[5]</sup>等应用领域具有显著的社会和经济效益。但是随着探测技术的迅速发展，单一频段的隐身已经不能够满足需求，必须建立多频谱隐身涂层材料体系并发展多频谱兼容隐身技术<sup>[6]</sup>。根据涉及的频谱，包括微波、红外、光、声等，相对应隐身涂层材料也分为雷达隐身涂层材料、红外隐身涂层材料、可见光及声隐身涂层材料等。而各频谱的隐身机理及材料色散特性有所不

同,使该类材料拥有独特的涂层材料应用,且彼此之间可能存在相互促进或者相互抑制的作用。因此,结合材料特性和电磁设计原理,研究先进的隐身涂层材料体系及兼容设计方案,是提高隐身涂层材料性能并实现多频谱兼容的关键途径。

传统的雷达隐身涂层材料以强吸收为目的,由电损耗或者磁损耗型材料作为吸收剂对微波进行衰减,通过与粘接剂相配合形成吸波涂层,要求具有厚度薄、重量轻、吸收频带宽等特点。而 Rozanov 公式<sup>[7]</sup>从理论上提出了常用吸波涂层带宽与磁参数的极限关系:

$$|\ln \rho_0| \Delta \lambda \leq 2\pi^2 \mu_s d$$

其中,  $\Delta \lambda$  是厚度为  $d$ 、静态磁导率为  $\mu_s$  的涂层敷在金属底板上得到反射功率  $\leq \rho_0$  的吸波带宽(金属底板上吸波涂层的吸收功率 = 1 - 反射功率)。

为了解决涂层厚度与吸波带宽的矛盾,各类高磁损耗材料(高  $\mu_s$ )被用于宽带薄层设计,而电损耗材料(低  $\mu_s$ )多用于对厚度要求不高的情况。近年来,研究人员通过纳米技术、表面改性、多相复合、形貌优化等技术手段<sup>[8~50]</sup>,从微观结构到宏观形貌对材料的电磁频谱特性参数进行控制,提出了多种复合吸波材料。其中,吸波颗粒形状各向异性的运用使得吸波材料的发展取得了显著的进步,而纳米效应、表面改性、多相复合等技术手段对吸波性能的改善、对新型材料的牵引还有待更加深入的研究。

红外隐身涂层材料以降低目标表面红外辐射特征为目的,使得红外成像探测无法识别目标体。根据斯蒂芬-波尔兹曼定律<sup>[51]</sup>,目标与背景的辐射度差,其中  $\Delta M = \Delta \varepsilon \sigma_B T^4$  为目标和背景的发射率之差,  $\sigma_B$  为波尔兹曼常数,而  $T$  为温度。因此,其主要通过可变发射率或者低发射率材料来控制目标的热辐射、太阳能吸收率和隔热能力。单纯以低发射率为目,常见金属材料即可实现中远红外波段的低发射率,但是涂层设计时还需要考虑与雷达、可见光和近红外等波段的隐身兼容。根据不同频谱电磁波在涂层中的散射特性,金属粒子的形貌、在涂层中的比例、分布、着色颜料等因素的合理调控能够缓解红外低发射率与多频谱兼容的矛盾。另一关键组分——粘接剂,则需要在低发射率波段透明且无热红外官能团吸收峰。大量研究在以上领域展开,并且提出了以能带理论为基础的红外发射率机理<sup>[52~68]</sup>。但是考虑到与可见光及雷达兼容,低红外低发射率隐身涂层是红外隐身涂层研究的难点和重点<sup>[69]</sup>。

近年来,国内外在雷达吸波涂层方面开展了大量研究工作,如片状纳米晶铁磁颗粒、纳米纤维及薄膜、基于周期结构复合吸波材料等;并且结合涂层工艺和材料复合技术,开展红外低发射率涂层的制备及多频谱兼容的

设计研究,促进了多频谱隐身涂层材料体系的发展。

## 2 进雷吸波涂层材料研

雷吸波涂层材料是隐身材料中研究最早、应用最广、技术最为成熟的一类材料。考虑到宽带薄层的设计要求,本文主要讨论磁性吸波涂层材料。如前所述,其关键问题是在尽量宽的频带内获得高磁导率、高磁损耗。目前应用最广的传统磁性吸波材料包括六角铁氧体、微米/亚微米金属磁性颗粒等<sup>[2]</sup>,该类材料在微波频段具有较高的磁导率,但密度大,并且由于 Snoek 关系的限制,磁导率已经很难进一步提高。20 世纪 80 年代开始,对具有形状各向异性特征的薄片、磁性纤维等展开了大量研究<sup>[8~28]</sup>,配合各种表面改性技术、复合技术对吸波材料进行了优化<sup>[29~37]</sup>。另一方面,随着纳米技术的发展,以上各类材料的纳米化研究为探索新型吸波材料提供了可能<sup>[38~44]</sup>。

### 2.1 片状铁磁合金颗粒吸波材料

考虑磁导率对材料形状各向异性的依赖,单个磁性颗粒的 Snoek 关系可以改写为<sup>[8]</sup>,如公式(1):

$$(\mu_s - 1) f_r^2 = \gamma^2 M_s [H_k + 4\pi(N_{\perp} - N_{easy})M_s] \quad (1)$$

其中  $H_k$  为磁晶各向异性场,  $M_s$  为饱和磁化强度,  $N$  为与形状有关的退磁因子。对于磁性纤维可以得到  $N_{\perp} - N_{easy} = 1/2$ , 片状颗粒还可获得  $N_{\perp} - N_{easy} = 1$ (平面各向异性)且具有降低涡流损耗的特性,因而有可能在更高的频段获得更高的磁导率。国际上针对片状铁磁合金开展了大量研究<sup>[9~13]</sup>。例如,美国密苏里科技大学 Keledintseva M 和日本广岛大学 Tsutakawa T 等人使用 NEC-Tokin 的磁电吸波涂层,涂层使用了片状磁性填充物,当介电常数在 1 ~ 18 GHz(实部 ~ 100, 虚部 ~ 8)时得到 1 GHz 磁导率(实部 6.8, 虚部 8.5)<sup>[9]</sup>。韩国 Lee K S 等人制备了片状的 Fe<sub>85</sub>Si<sub>9.5</sub>Al<sub>5.5</sub>,与橡胶基体取向复合形成薄板,密度为 3.8 g/cm<sup>3</sup> 时,2 ~ 10 GHz 频率范围内,磁导率实部在 2 GHz 处取最大值 4,虚部在 2 GHz 处取最大值 12,2 ~ 10 GHz 频率范围内,介电常数实部小于 220,介电常数虚部小于 30<sup>[10]</sup>。

本中心基于以上理论结合纳米晶材料的交换耦合作用,采用 Aharoni 交换作用模型解释该类材料微波共振峰现象、提出交换共振磁损耗极限关系,研究了系列高磁导率、高磁损耗的片状纳米晶铁磁颗粒。

具有高  $M_s$  的铁基金属合金形成如图 1a 的片状貌后,较球形颗粒在 2 ~ 18 GHz 磁导率实部最大值提高接近 2 倍、虚部最大值可以提高 3 倍,而加入非金属成分后能够形成纳米晶粒(区域 A)镶嵌在大量非晶相(区域 B)中的复合结构,非晶相有助于提高材料电阻率,并改善吸

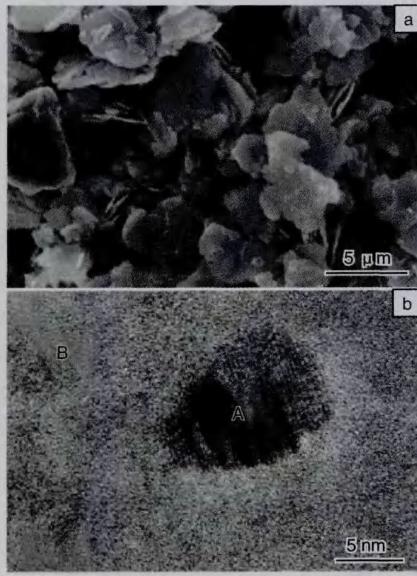


图1 FeCo 纳米晶铁磁合金片状颗粒的 SEM 图(a)<sup>[14]</sup> 和 FeSiB 纳米晶合金片状颗粒的 TEM 图(b)<sup>[15]</sup>

Fig. 1 SEM graph of FeCo (a)<sup>[14]</sup> and TEM graph of FeSiB (b)<sup>[15]</sup> nanocrystalline ferromagnetic alloy flakes

波设计中电磁性能的匹配,如图1b所示。此外,同纳米磁性颗粒相似,纳米晶颗粒复合物在微波磁谱中出现多共振现象,形成宽频的磁损耗吸收峰。根据 Aharoni 交換作用模型,认为纳米晶粒的纳米结构效应使得晶粒内部与表面原子磁矩在动态磁化过程中呈现出非一致进动,由于交換作用激发出不同模式的自旋波共振<sup>[16]</sup>。基于此模型,按照 Acher O 的方法,推导得到磁损耗极限关系<sup>[17-18]</sup>,如公式(2) :

$$\int_0^{+\infty} f \mu''(f) df \leq k \frac{\pi}{2} [ (\gamma' 4\pi M_s)^2 + \frac{\gamma^2 C \chi_1}{R^2} ] \quad (2)$$

其中  $f$  为频率,  $\mu''$  为磁导率虚部,  $k$  是与材料形貌有关的常数,  $R$  是纳米晶尺寸,  $\gamma' = \gamma/2\pi$  为旋磁比,  $\chi_1 = k_{l,n}^2$  是交換磁化强度 ( $k_{l,n}$  是  $(l, n)$  模自旋波的波矢), 而  $C = (4\pi M_s)^2 c$  表示交換作用 ( $c$  为交換常数)。通过该关系可以预测材料的磁损耗情况并且区别磁损耗的来源。在极限关系中,  $\chi_1$  与纳米结构的表面各向异性  $K_s$  有关, 求解动态磁化方程, 得到自旋波共振频率<sup>[19]</sup>, 如公式(3) :

$$f_{ex} = \frac{\gamma' c k_{l,n}^2}{4\pi R^2 M_s} \propto \left( \frac{R_0}{R} \right)^2 \quad (3)$$

其中特征长度  $R_0 = c / |2K_s|$ 。从而得到纳米结构材料的自旋共振频率同纳米结构尺寸关系,如图2。当  $K_s > 0$  即表面各向异性易磁化方向与饱和磁化强度垂直的情况,自旋波模式( $l, n$ ) 在颗粒尺寸达到该模式的特征长度  $nR_0$  后会发生跃迁,达到( $l+1, n$ ) 模式的状态,共振频率

形成突变。这些理论研究为宽带纳米吸波涂层材料磁导率设计提供了手段。

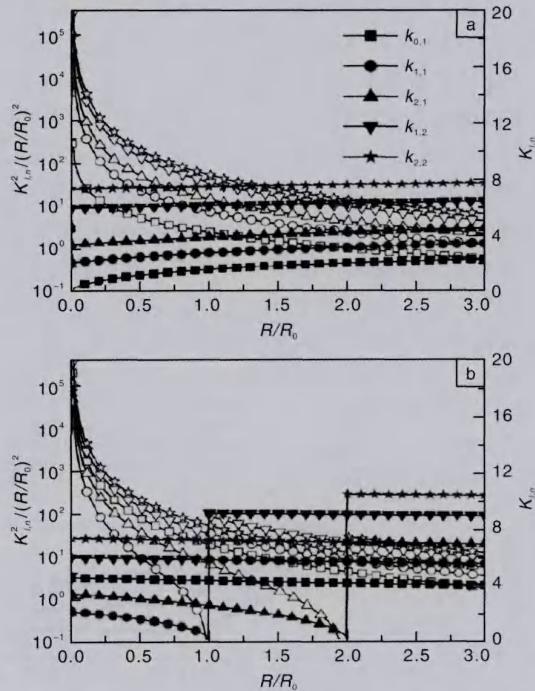


图2 自旋波共振频率及该模式波矢随颗粒尺寸的变化关系  
图:(a)  $K_s < 0$  的情况,(b)  $K_s > 0$  的情况<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Spin wave resonance frequency and wave vector of  $(l, n)$  mode as a function of particle size ( $R$ ): (a)  $K_s < 0$  and (b)  $K_s > 0$ <sup>[19]</sup>

在实际吸波涂层应用中,还有另一个关键因素影响着涂层的吸波效果——吸波颗粒在复合基体中的取向分布情况<sup>[20-21]</sup>,如何对其进行准确的描述是复合材料研究的难题之一。结合片状颗粒的动态磁化情况,通过对等效媒质理论 MG 公式的改进,本中心从磁化模型的退磁因子出发,提出了不同取向情况下片状颗粒复合物等效磁导率的计算模型<sup>[22-23]</sup>,如式(4) :

$$\mu_{eff} = \mu_m + \frac{\mu_i - \mu_m}{\mu_m + (1-f)(aN_e \cos^2 \theta + \beta N_w \sin^2 \theta)(\mu_i - \mu_m)} \quad (4)$$

其中  $\mu_i, \mu_m$  分别为磁性颗粒和非磁性基体的磁导率,  $f$  是磁性颗粒体积含量,而  $\alpha, \beta$  是与颗粒分布有关的参数。通过取向工艺制备得到的片状铁磁合金颗粒复合物,进一步提高了磁导率,如图3 所示,其磁导率虚部最大值从 3.8 增加到 6.2。

在获得高磁导率的同时,为了进一步降低片状铁磁合金颗粒的介电常数,研究人员常常通过包覆对该类材

料的表面进行处理<sup>[29~31]</sup>。例如, 法国 CEA 的 Raolison Z 等在 NiFeMo 片状颗粒表面包覆  $\text{SiO}_2$ , 在保持磁导率的同时显著降低了材料的介电常数, 1 mm 复合平板能够在 1.5 GHz 获得  $-5 \text{ dB}$  反射率<sup>[29]</sup>。兰州大学通过在羰基铁薄片颗粒表面包裹  $\text{SiO}_2$  并进行取向处理, 在 0.1 ~ 20 GHz 得到磁导率实部最大值 7 ( $\sim 0.4 \text{ GHz}$ )、虚部最大值 3.2 ( $\sim 6 \text{ GHz}$ ), 介电常数实部在  $\sim 60$ 、虚部  $\sim 10$ <sup>[30]</sup>。

此外, 具有平面各向异性的六角铁氧体也具有公式(1)的效果。希腊的 Stergiou C 等通过 La 和 Ni 掺杂  $\text{SrCo}_2 - \text{W}$  型六角铁氧体, 在调节平面磁晶各向异性的基础上获得了 1.7 mm 涂层在 16.4 GHz 反射率为 64 dB, 2.9 mm 涂层在 7.9 GHz 反射率为 46 dB 的吸波性能<sup>[45]</sup>。

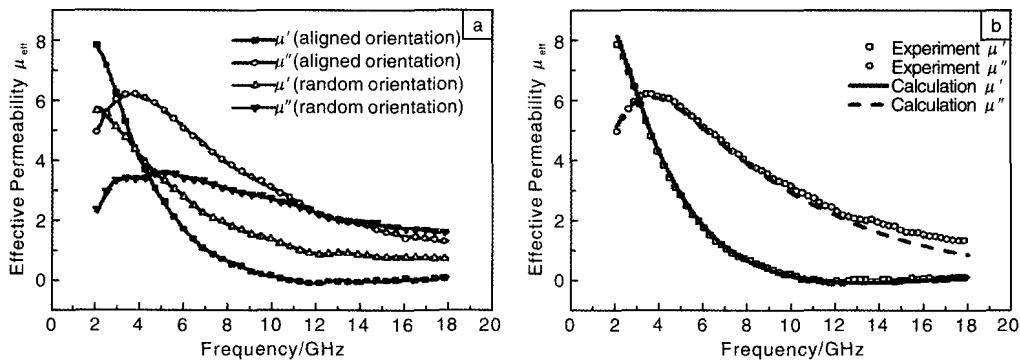


图3 (a) 随机与一致取向片状铁磁合金颗粒复合物的磁导率对比, (b) 取向复合物等效磁导率的试验和计算值对比<sup>(b)</sup><sup>[23]</sup>  
Fig. 3 Microwave permeability of ferromagnetic alloy flake composites for random and aligned orientation of flakes (a) and for the comparison of experiment and calculation results of the aligned case (b)<sup>[23]</sup>

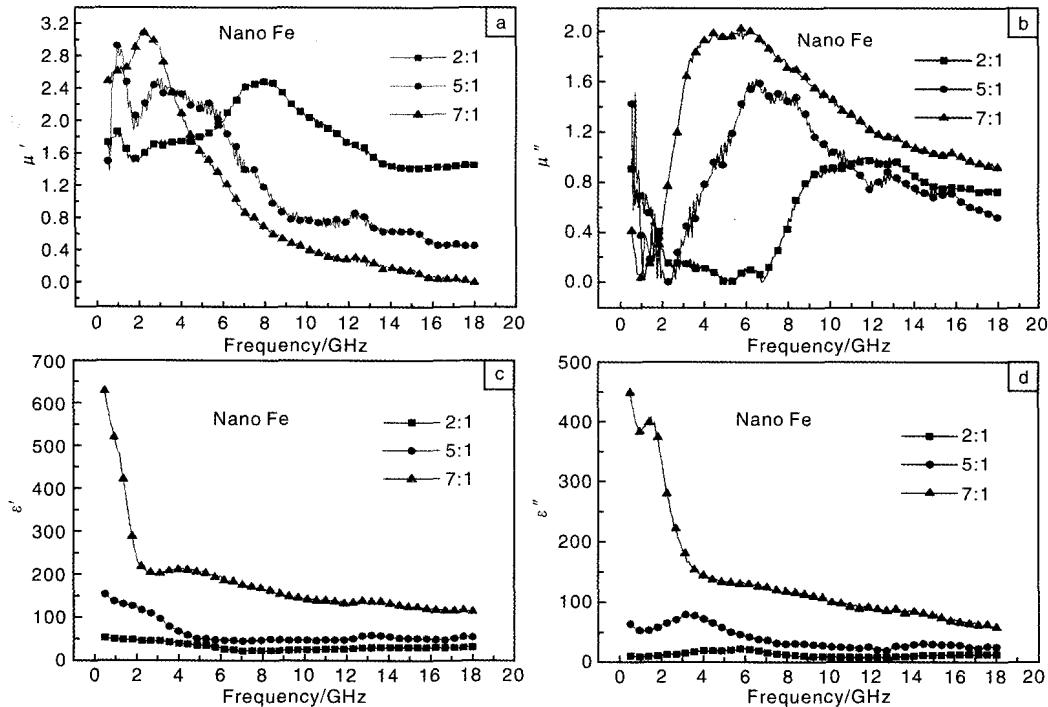


图4 不同质量比球形纳米 Fe 颗粒/石蜡复合物微波电磁参数图: (a), (b) 磁导率率实部、虚部; (c), (d) 介电常数实部、虚部  
Fig. 4 Microwave electromagnetic parameters for spherical nano Fe/paraffin composites with different Fe/paraffin weight ratio: (a), (b) are the real and imaginary part of permeability and (c), (d) are the real and imaginary part of permittivity

## 2.2 新型纳米/微米吸波材料

纳米磁性材料由于具有纳米结构效应而表现出独特的电磁性能, 并且具有密度低、质量轻等优势, 通过控制水热合成、自组装等制备工艺, 可以获得各种奇异形貌, 因此其作为一种新型吸波材料来研究一度成为该领域热点。

考虑磁性纳米颗粒的本征电磁特性, 由于表面效应、小尺寸效应的强大影响, 与微米尺度的纳米晶颗粒不同, 纳米颗粒难以表现出强磁性能。并且复合物中由于纳米颗粒的填充及分散问题, 虽然可能存在多共振峰, 但是从目前报道来看, 微波磁导率大都无法超过 2<sup>[38~40]</sup>。本中心最近的研究结果如图 4 所示, 球形纳米

颗粒复合物微波磁导率随其含量的增加而提高，并且虚部共振峰向低频移动，但对于微米颗粒复合物并不会出现共振峰显著的频移。这说明纳米颗粒间可能存在偶极相互作用，当其含量提高，偶极相互作用增强，影响磁各向异性使共振峰向低频移动，有望在微波低频端形成高吸收。

从形状影响的角度出发，优化颗粒形貌形成复杂的结构，能够激发在一定范围内分布的多种电磁极化条件。对比3种典型形貌的磁性颗粒材料(如图5)<sup>[41-43]</sup>：微米球形Co颗粒、微米花型Co颗粒以及纳米条带Ni颗粒的电磁性能，可以发现多枝的形

貌——花型和条带有利于形成多电/磁共振损耗峰。对于花型磁性颗粒，“花瓣”造成有差异的电磁极化区域，从而促使损耗峰分离，如图6a和6b<sup>[41]</sup>。特别是额外的低频电损耗峰，使得图6c中花型颗粒吸波涂层在不同厚度下始终更利于低频吸波。纳米条带Ni颗粒由于形状比大且具有典型的纳米材料特征，在2~18 GHz呈现出4个磁损耗吸收峰，联合动态磁化LLG方程和有效媒质MG公式拟合分离出4个共振型磁谱如图7所示<sup>[42]</sup>。根据共振磁谱的拟合数据分析，低频第一个峰源自磁性纳米颗粒的自然共振，而其他峰是由非一致进动引起的交换共振峰。

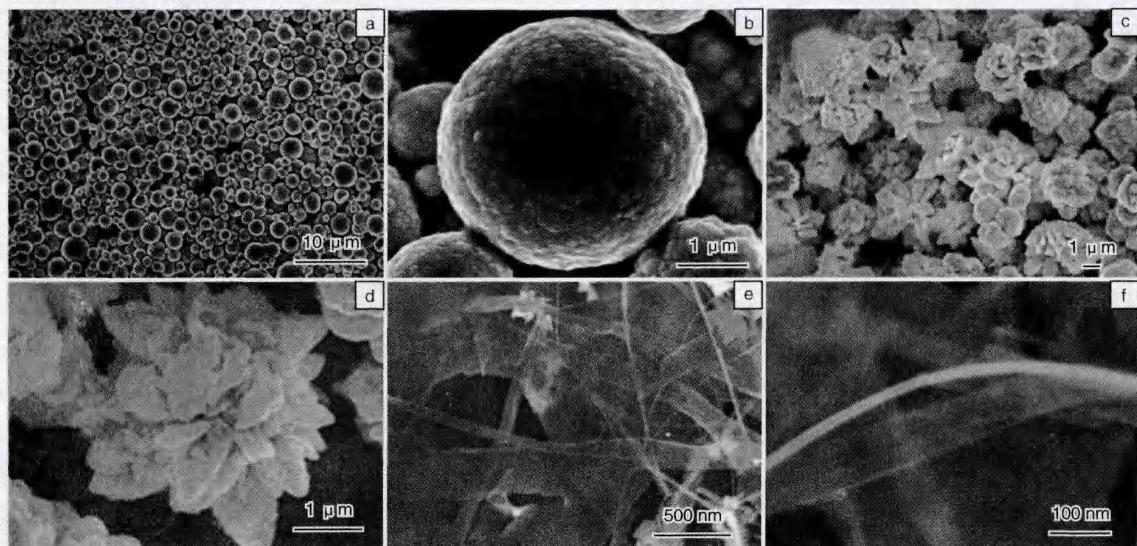


图5 球形、花型微米Co颗粒和Ni纳米条带颗粒的SEM图：(a)，(c)和(e)为低倍放大；(b)，(d)和(f)为高倍放大<sup>[41-42]</sup>  
Fig. 5 SEM graphs of sphere-, flower-like Co particles and Ni nanobelts; (a), (c) and (e) are of low magnitudes; (b), (d) and (f) are of high magnitudes<sup>[41-42]</sup>

此外，Kowsari E等研制了纳米BaO颗粒，不论是立方、树枝还是鱼骨形貌，其吸波性能并不显著，例如5 mm厚涂层在10.8 GHz达到-20 dB反射率，但-10 dB带宽不到0.5 GHz<sup>[44]</sup>。

### 2.3 轻质的复合吸波材料

将各具特色的材料复合使用，是对吸波涂层吸波性能、力学性能、厚度、密度等综合性能进行优化调控的技术手段之一。在特定工作频带内，传统吸波材料的吸波性能良好，但是带宽、重量、厚度等很难兼顾，但纳米材料、纤维、中空微球等轻质材料能够改善重量、低频等问题<sup>[24-34]</sup>，碳纳米管、石墨烯等电介质材料还可通过提供介电损耗来丰富吸收机制，改善吸波性能<sup>[35-37]</sup>。

铁磁纤维作为吸收剂或者吸收剂填料，可以获得轻质效果<sup>[24]</sup>。如前所述，各向异性是铁磁纤维在GHz吸

收的特征之一，包括形状各向异性以及磁滞伸缩引起的应力各向异性，俄罗斯ITAE、日本东北大学等得到了高密度平行排布铁磁纤维复合物的铁磁共振频率<sup>[25]</sup>，如式(5)所示。

$$f_r = \gamma \sqrt{4\pi M_s (H_k + H_n)} \quad (5)$$

其中纤维相互作用场  $H_n \propto iM_s(a/l)^2$ 。而对于低填充密度的复合物，内应力同样会引起各向异性，从而使得共振频率偏离<sup>[26]</sup>。而俄罗斯Buznikov N A最近的研究表明，磁性纤维表面畴结构对微波吸收性能十分重要，并提出了理论分析方法<sup>[27]</sup>。事实上，铁磁纤维的介电特性也遵循同样的机理，本中心发现Fe<sub>79</sub>Si<sub>16</sub>B<sub>5</sub>非晶纤维的微波介电损耗具有双峰且呈现出Lorentzian型色散特性(如图8)，这与介电弛豫机制有关，例如电子极化、电荷极化等，当厚度超过4 mm时，纤维复合物获得

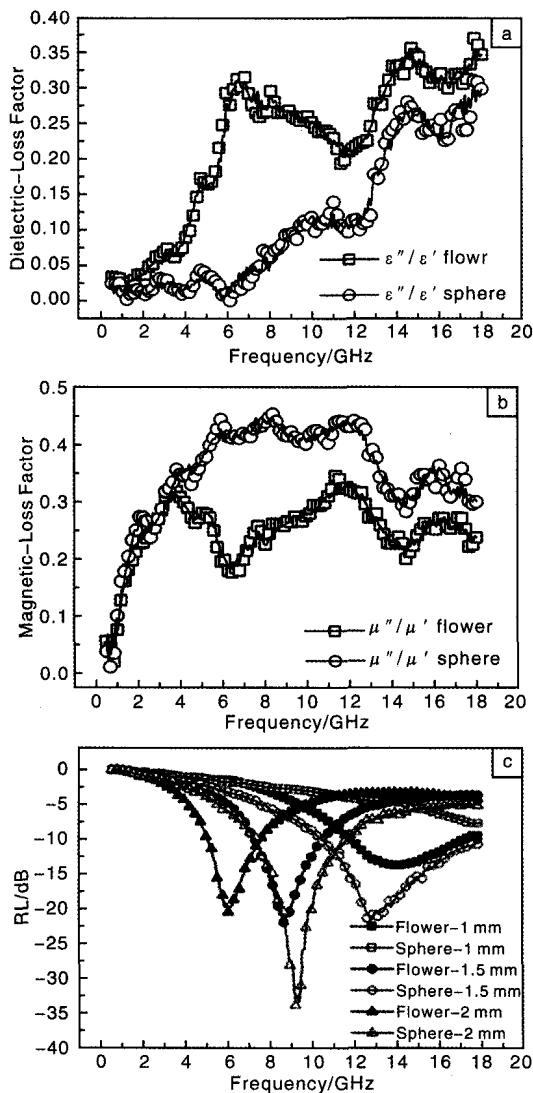


图6 球形和花型微米Co颗粒微波电磁损耗对比图: (a)介电损耗系数, (b)磁损耗系数, (c)吸波涂层反射率(RL)<sup>[41]</sup>

图6 Electromagnetic loss of sphere- and flower-like Co particle composites: (a) dielectric loss, (b) magnetic loss, and (c) reflection loss(RL) of different thickness<sup>[41]</sup>

1~2.7 GHz 小于 -10 dB 的反射率<sup>[28]</sup>。因此,对于该类材料可以从介电损耗和磁损耗两方面通过纤维形貌、含量以及排布的调整来优化吸波性能。

在轻质材料上包裹或者填充磁性吸波颗粒,是轻质吸波涂层的另一主要研究途径。韩国 Chungbuk 国立大学的 Kim S T 在中空微球上化学镀 2 μm 的 Co 膜,利用小于趋肤深度的厚度获得高磁损耗和介电常数,2 mm 厚复合物在 9 GHz 得到 -25 dB 的反射率,优于传统铁氧体复合物<sup>[32]</sup>。在国内,中空玻璃微球、硅藻土片状粒子等都成为磁性吸波材料的良好载体。南京大学在粉煤灰中空微球表面镀上 Ba 铁氧体,2~18 GHz 内,

3 mm 厚材料在 8.4 GHz 获得 -15.4 dB 的反射率,2 mm 厚时得到 -12 dB 带宽为 6.2 GHz<sup>[33]</sup>。北京航空航天大学 Cai J 等在硅藻土片状粒子表面包裹 Fe 颗粒,获得低密度 2.7~4.0 g/cm<sup>3</sup> 的轻质复合吸波涂层,1 mm 厚度 6 GHz 反射率达到 -18 dB<sup>[34]</sup>。

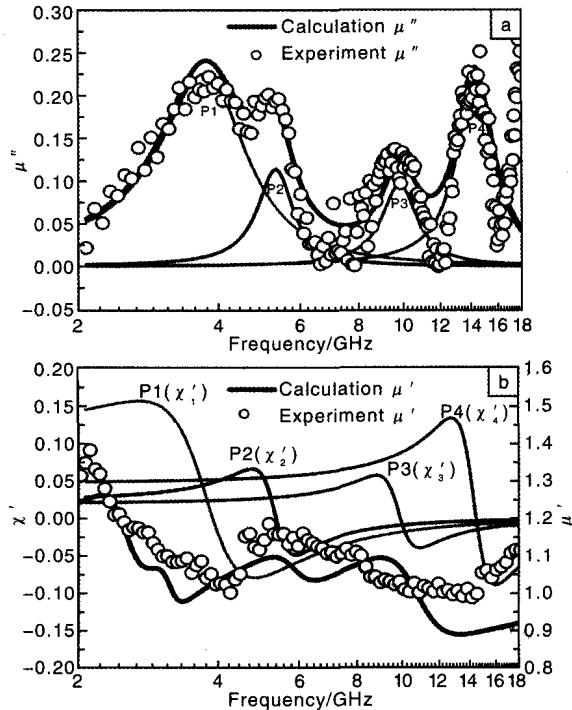


图7 纳米条带 Ni 颗粒复合物微波磁导率拟合和实验频谱图: (a) 磁导率虚部和(b)磁导率实部( $\chi' = \mu' - 1$ )都分解为 4 个共振磁谱  $P_1 \sim P_4$ <sup>[42]</sup>

Fig. 7 Experimental and fitted microwave permeability of Ni nanobelt/paraffin composit; (a) the imaginary part and (b) the real part ( $\chi' = \mu' - 1$ ) decomposed to 4 resonances,  $P_1 \sim P_4$ <sup>[42]</sup>

介电损耗吸波材料与磁损耗吸波材料的复合,有机混合<sup>[35~36]</sup>也有表面包覆<sup>[37]</sup>。北京航空航天大学直接将片状羰基铁和石墨薄片进行取向复合,获得了最大介电常数和磁导率:0.5~18 GHz,介电常数实部~70、虚部~12、在 3.5 GHz 有介电弛豫峰;磁导率实部最大 8、虚部最大 4.5。他们制备的 1.5 mm 厚的吸波涂层在 2 GHz 得到接近 -12 dB 的反射率,显示了在 L 波段的应用潜力<sup>[36]</sup>。天津大学通过还原氧化反应在还原氧化石墨烯表面生长了大量  $Fe_3O_4$  纳米颗粒,由于纳米磁性颗粒的弱磁性,复合物并没有显示出磁损耗特征,但是  $Fe^{2+}$  离子增强了还原氧化石墨烯表面的极化特性,使得 2~18 GHz 内 2 mm 厚石墨烯复合物的反射率最大值从 -10 dB 增加到了 -23 dB<sup>[37]</sup>。

## 2.4 毫米波铁氧体吸波材料

正如前面对公式(1)的分析,要突破 Snoek 关系的

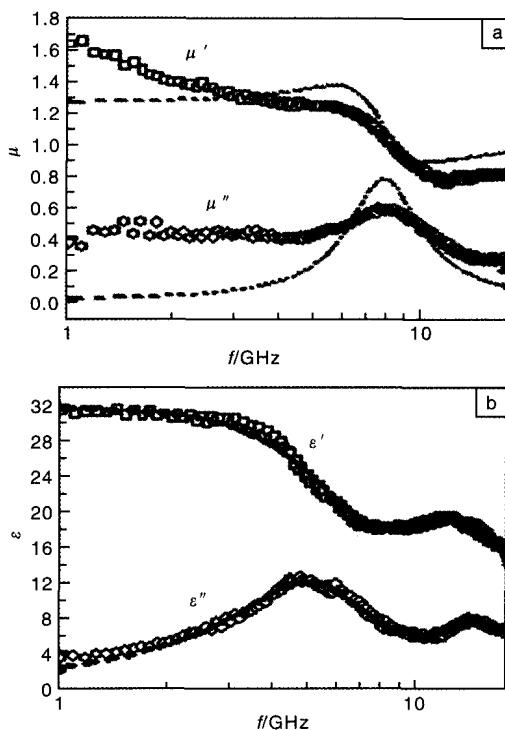


图8 Fe<sub>79</sub>Si<sub>16</sub>B<sub>5</sub>非晶纤维复合物的微波磁导率(a)和介电常数(b)频谱图<sup>[28]</sup>

Fig. 8 Microwave permeability (a) and permittivity (b) spectrum of Fe79Si16B5 amorphous fiber composite<sup>[28]</sup>

限制,获得在毫米波频段的高磁导率,需要材料具有很强的平面各向异性。六角铁氧体就具有这种特质,其中M型BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>铁氧体的强平面各向异性使其具有高达42.5 GHz的自然共振频率<sup>[46~48]</sup>。

本中心研制的BaCo<sub>x</sub>Ti<sub>x</sub>Fe<sub>12-2x</sub>O<sub>19</sub>( $x=0.3, 0.4, 0.5$ )六角铁氧体XRD图谱如图9所示<sup>[49]</sup>。随着Co, Ti参杂量的增加,(001)晶面的衍射峰减弱而(hk0)晶面的衍射峰增强,说明磁各向异性由较强的c轴单轴各向异性向较弱的面内各向异性转变。磁各向性变化,引起磁导率自然共振频率向低频移动,将铁氧体粉末与石蜡按照5:1的质量比混合,得到的复合物进行毫米波测试,磁导率如图10所示<sup>[49]</sup>。BaCo<sub>x</sub>Ti<sub>x</sub>Fe<sub>12-2x</sub>O<sub>19</sub>铁氧体复合物的共振频率随着参杂量的增加由39 GHz移动到29 GHz,磁导率幅值略微有所下降。根据该材料的毫米波磁导率和介电常数,计算得到1 mm厚涂层的毫米波反射率如图11所示<sup>[49]</sup>,当 $x=0.5$ 时,获得了优异的宽带吸波效果,-10 dB带宽从28.5 GHz到40 GHz。因此,六角铁氧体材料在毫米波具有显著的应用潜力。

除了六角铁氧体,台湾军事科学院在NiZn铁氧体表面包覆PANI,认为两种材料间存在电相互作用,从

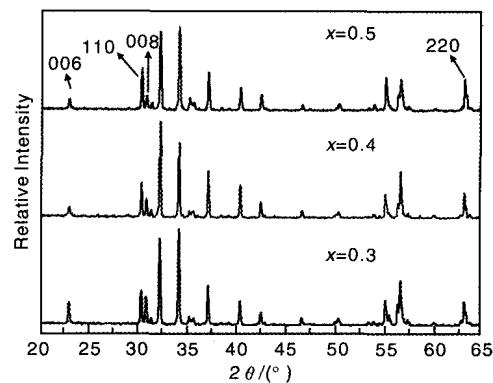


图9 BaCo<sub>x</sub>Ti<sub>x</sub>Fe<sub>12-2x</sub>O<sub>19</sub>六角铁氧体XRD图谱<sup>[49]</sup>

Fig. 9 XRD pattern of the BaCo<sub>x</sub>Ti<sub>x</sub>Fe<sub>12-2x</sub>O<sub>19</sub> hexaferrites<sup>[49]</sup>

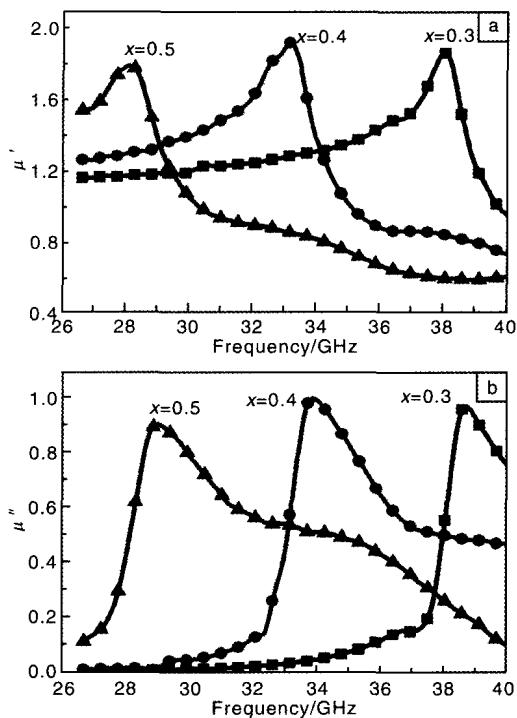


图10 BaCo<sub>x</sub>Ti<sub>x</sub>Fe<sub>12-2x</sub>O<sub>19</sub>六角铁氧体微波磁导率实部(a)和虚部(b)频谱<sup>[49]</sup>

Fig. 10 Millimeter wave permeability of BaCo<sub>x</sub>Ti<sub>x</sub>Fe<sub>12-2x</sub>O<sub>19</sub> hexaferrites: (a) the real part and (b) the imaginary part<sup>[49]</sup>

而使得复合物获得宽频吸收特性,通过控制PANI的含量,在27~40 GHz获得了频率可控吸收峰,同时在2~18 GHz存在最大-20 dB反射率的吸收峰<sup>[50]</sup>。但是纵观国内外毫米波铁氧体吸波材料的研究情况,论文及专利报道较少、远不及厘米波吸波材料成熟。随着通信技术发展,电子器件及系统向高频化、小型化的发展,毫米波及THz吸波材料是未来抗电磁干扰技术领域重要发展的方向。

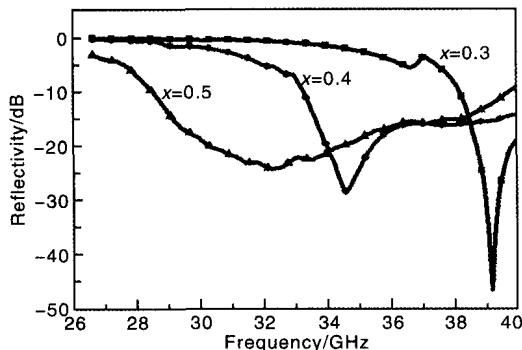


图 11 1 mm 厚  $\text{BaCo}_x \text{Ti}_x - \text{Fe}_{12-2x} \text{O}_{19}$  六角铁氧体吸波涂层反射率计算图<sup>[49]</sup>

Fig. 11 Calculated reflectivity of 1 mm-thick  $\text{BaCo}_x \text{Ti}_x - \text{Fe}_{12-2x} \text{O}_{19}$  hexaferrite absorbing coating<sup>[49]</sup>

### 3 红外低发射率隐身涂层材料研制

红外低发射率材料通过将大部分电磁波在材料表面反射掉的方式来降低材料的红外辐射(发射率)，也即通过高反射率来降低对电磁波的吸收。因此，具有高介电常数的金属及半导体材料由于能够有效反射电磁波，成为最主要的低发射率材料，其微观结构、颗粒形貌、取向分布等决定着涂层的性能。

#### 3.1 低发射率金属和半导体材料

常见的低发射率金属材料包括 Al, Ag, Cu 等<sup>[51]</sup>。通过成分、形貌等进行改性是该类材料研究的重点。与雷达吸波材料相似，片状形貌有利于提高介电极化，进而提高反射率，降低发射率。南京航空航天大学通过层离(Leafing)技术，将 Cu 与助剂一起球磨形成表面包覆有 WS 和 SA 的片状颗粒，层离后的 Cu 颗粒集中在涂层表面并获得了低于 0.1 的发射率<sup>[52]</sup>。经过热老化处理，由于 Al 颗粒氧化以及粘接剂的分解，使得 Al/聚硅氧烷复合物表面结构、粗糙度以及电导率发生变化，从而提高了红外发射率<sup>[53]</sup>。西安交通大学对 Cu 进行了改性处理，包覆了聚乙烯蜡的 Cu 粉末具备了一定的抗氧化性能，在经过长时间老化后，发射率的变化情况优于未包覆的 Cu 涂层<sup>[54]</sup>。

意大利和芬兰的研究人员通过银纳米线的随机混合，形成具有一定频率选择特性的低发射率涂层，当纳米线含量高时，形成红外波段的低发射率涂层(吸收率 < 15%)；当纳米线含量低时，在 5~8 μm 形成宽带的吸收峰(吸收率 > 30%)<sup>[55]</sup>。

半导体材料的发射率可以通过能级跃迁理论来进行分析。通过对 ITO 非晶薄膜材料发射率的研究，本中心率先从薄膜表面形貌(结晶度)对电导率的影响出

发<sup>[56-57]</sup>，通过不同状态下的电导率  $\sigma_i$  得到非晶半导体材料电阻率，如式(6)所示。

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{E_f - E'_c}{k_B T}\right) + \sigma_1 \exp\left(\frac{E_f - E'_c - \omega_1}{k_B T}\right) + \sigma_2 \exp\left(\frac{-\omega_2}{k_B T}\right) + \sigma_3 \exp\left(\frac{-B}{T^{1/4}}\right) \quad (6)$$

其中  $E_f$  是费米能级， $E'_c$  是电子迁移能级， $\omega$  为跃迁能量，然后从能量的角度，结合电导率与发射率间的关系，提出了 ITO 薄膜的能带计算模型——通过能级跃迁将电导率和特定频段的低发射率联系起来(图 12 所示)<sup>[57]</sup> 如式(7)：

$$E_f - E'_c = k_B T \ln(\sigma/\sigma_0) = 0.026 \ln(\sigma/\sigma_{min}) \quad (7)$$

其中  $\sigma_0$  可以由金属材料的最低电导率  $\sigma_{min}$  代替。近来，韩国首尔国立大学的 Lee S 等发现不同价态的钛氧化物在远红外发射率会发生变化，这是因为不同价态 Ti 离子空带之间的带隙能量不同，由于  $\text{TiO}_2$  有一个宽带隙和许多窄带隙使得其发射率相对较低(约 0.77)，与本中心提出的理论思想一致<sup>[58]</sup>。

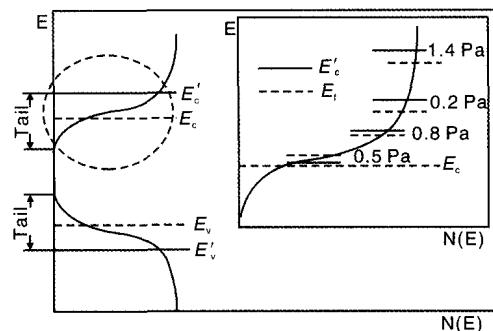


图 12 ITO 半导体薄膜材料能级结构示意图，内图是费米能级( $E_f$ )和迁移能级( $E'_c$ )随溅射气压的变化关系<sup>[57]</sup>

Fig. 12 Schematic band structure of an amorphous ITO sample with an inset shows the relative positions of the Fermi level ( $E_f$ ) and the mobility edge ( $E'_c$ ) at different sputtering pressures<sup>[57]</sup>

#### 3.2 红外低发射率涂层设计技术

正如前言所述，红外低发射率涂层的性能不仅取决于低发射率涂料，还与粘接剂吸收性能密切相关，而且金属涂料在涂层表面的作用很强<sup>[52]</sup>。因此，通过涂层制备技术以及粘接剂控制金属涂料的排列分布，是改善红外低发射率涂层实现背景应用的关键之一。

本中心发现，通过控制粘接剂的黏度可以同时实现降低发射率的目标<sup>[59]</sup>。所选择的红外低吸收率粘接剂体系包括：丙烯酸树脂、环氧树脂和聚酯树脂，如图 13 所示，3 者在 9~14 μm 均有较低吸收系数，而在 8~9 μm 时吸收系数有强烈起伏，因此最终与片状 Al 复合形成红外涂层在 8~9 μm 发射率明显偏高(图 14)。3 种树脂的黏度都随着固态树脂含量的增加而增加，如

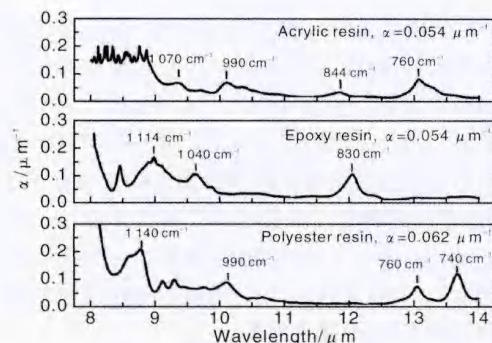
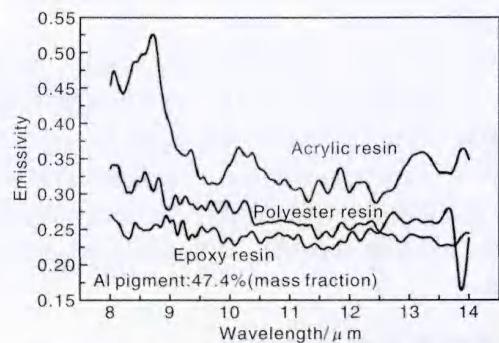
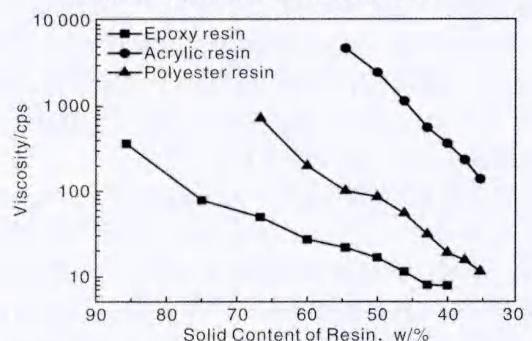
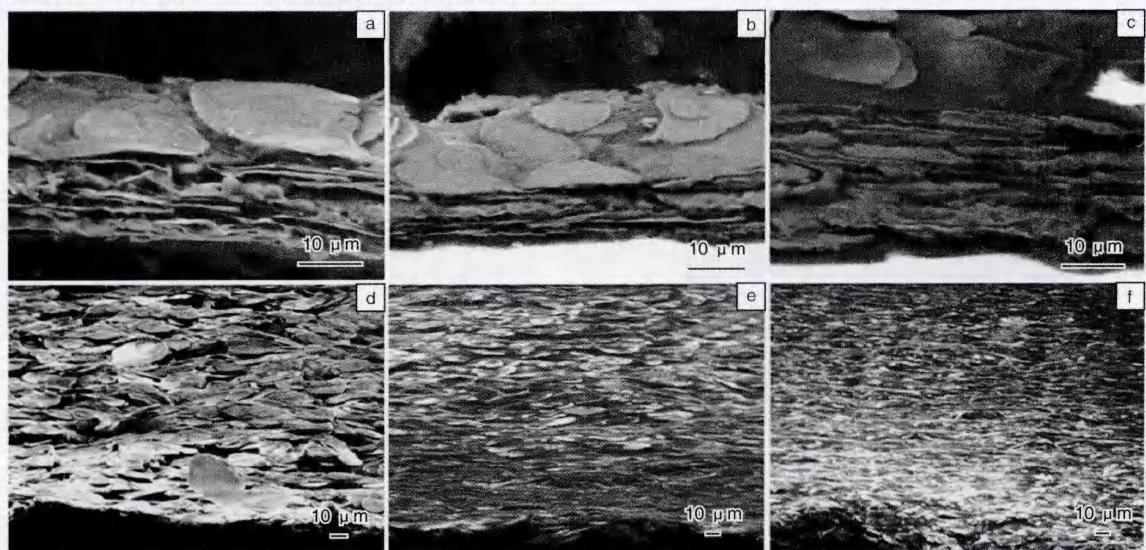
图 13 三种树脂粘接剂的红外吸收系数<sup>[59]</sup>Fig. 13 The absorption coefficient curve of binders<sup>[59]</sup>

图 15 所示,但是由于非树脂结构的力学性能不同,3 种树脂黏度大小始终保持:丙烯酸树脂>聚酯树脂>环氧树脂。正是由于黏度的不同,使得片状 Al 在涂层厚度方向的分布形成差异。

在低发射率涂层的制备中,为了获得适度的黏度,湿涂层常含有许多有机溶剂,溶剂的挥发使得溶剂分子向表面扩散以补偿表面溶剂浓度,根据 Fick 扩散第一原理,扩散速度与黏度成反比关系,黏度小时扩散速度高,而溶剂分子向涂层上表面扩散时,对 Al 薄片形成的浮力 F 影响着 Al 涂料在涂层中的分布。对于环氧树脂,其黏度最低,因此在涂层干燥过程中产生的浮力 F 最大,涂层表面片状 Al 粉密度最高(如图 16),而丙烯酸树脂涂层表面 Al 粉密度最低。由于电磁波入射到涂层时,表面的反射最大,然后入射波随着涂层厚度逐渐反射、衰减,因此表面 Al 粉排布越平整、密度越大,

图 14 片状 Al(47.4%)分别与三种树脂粘接剂形成红外涂层的发射率图谱<sup>[59]</sup>Fig. 14 Infrared emissivity curve of the low emissivity coatings (the content of Al pigment; 47.4% of the resin)<sup>[59]</sup>图 15 3 种树脂粘接剂剪切黏度与固体含量的关系(溶剂:乙酸乙酯、醋酸丁酯和二甲苯混合物)<sup>[59]</sup>Fig. 15 The relationship of shear viscosity of binders with solid content (solvent: the mixing of ethyl acetate, butyl acetate and dimethylbenzene xylene)<sup>[59]</sup>图 16 片状 Al 分别与 3 种树脂粘接剂形成红外低发射率涂层的 SEM 图: (a), (d) 环氧树脂; (b), (e) 聚酯树脂; (c), (f) 丙烯酸树脂<sup>[59]</sup>Fig. 16 SEM photographs of coating morphology with different binder; (a) and (d) Epoxy resin, (b) and (e) Polyester resin, (c) and (f) Acrylic resin (The content of Al pigment; 47.4% of the resin)<sup>[59]</sup>

反射越好。

南京航空航天大学研究了聚氨酯树脂、聚氨酯(PU)、环氧树脂改性PU(EPU)、含氟聚氨酯(FPU)以及环氧树脂改性FPU(EFPU)几种粘接剂对Al低发射率涂层( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 发射率接近0.1)的影响,结果发现:EFPU能够提高涂层的防腐蚀特性<sup>[60]</sup>。通过在低发射率材料Cu表面包覆Al的方法,可提高低发射率涂层的防腐蚀能力<sup>[61]</sup>。

## 4 多频谱兼容隐身技术

### 4.1 红外可见光兼容

兼容可见光的红外隐身涂层需要在可见光波段具有低反射特性,再由近红外反射率的突变实现红外隐身。

本中心发现,在低发射率涂层材料中加入着色颜料,可抑制低发射率金属粉末的高可见光反射率,降低明度和光泽度,同时保持其优异的红外高反射特性,是解决可见光/红外兼容的重要方法<sup>[62-64]</sup>。

采用液相沉淀法在片状铝粉表面包覆一层Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颜料,如图17所示<sup>[62]</sup>,100~200 nm左右的Cr<sup>2</sup>O<sup>3</sup>颗粒在微米大小的片状Al粉表面形成了包覆层,并且有部分多余颗粒分布在包覆层表面。Cr<sup>2</sup>O<sup>3</sup>反射弱,因此在片状Al粉表面少量包覆即可显著降低其光谱反射性能,随着包覆量的增加,其可见光及近红外反射减弱(如图18)<sup>[62]</sup>。但是这种变化并非线性,包覆量低时,片状铝半粉对反射性能的影响最为明显,当包覆层达到一定厚度,片状铝粉对反射的影响减弱,此时反射主要取决



图17 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(a)及Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>包覆片状铝粉(b)的SEM图<sup>[62]</sup>

Fig. 17 SEM photographs of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(a) and Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(b) powders<sup>[62]</sup>

于Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>包覆层,继续增加其厚度涂层的反射仅缓慢减弱。而考虑到长波 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ,Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>包覆层对反射的抑制作用相对较弱,如图19<sup>[62]</sup>。一方面因为Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒径为亚微米,其表面粗糙度与可见光波长近似,因此,粗糙表面引起强烈的多重关联散射和吸收,而对于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的红外辐射颗粒,波长远小于可见光波长,漫散射很弱;另一方面可见光的趋肤深度较小,包覆层吸收可见光的能力更强。由此可见,通过合理控制颜料包覆层可实现可见光/红外兼容性能。

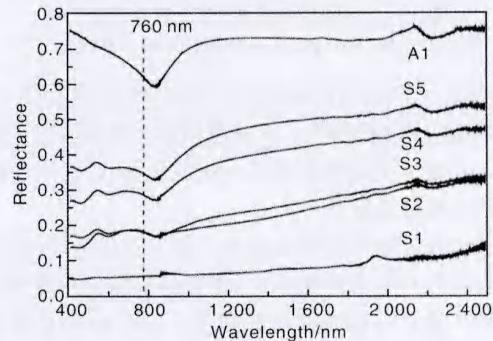


图18 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al和Al复合涂层的可见光近红外反射图谱:S1为纯Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,S2~S5为Al含量逐渐增加的Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al复合物<sup>[62]</sup>

Fig. 18 Diffuse reflectance Vis-NIR spectra of Al and Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders<sup>[62]</sup>

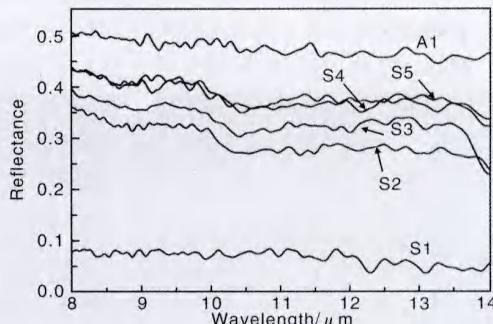


图19 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al和Al复合涂层的远红外反射图谱:S1为纯Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,S2~S5为Al含量逐渐增加的Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al复合物<sup>[62]</sup>

Fig. 19 Diffuse reflectance IR spectra of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al powders in  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  waveband<sup>[62]</sup>

同理,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>也是一种常见的包覆着色颜料,可见光/红外兼容性能如图20所示。可实现可见光反射功率 $<0.4$ ,红外反射功率约0.4,并且由于Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>具有磁性,可能用于兼容雷达隐身<sup>[63-64]</sup>。

其他兼容方法大多集中在多层薄膜设计,很少用于涂层。比如,由金属层/介质层/金属层三明治结构

为单元构成的多层体系,通过层间光的干涉,能够抑制金属表面对可见光的反射。日本 Chiba K 等制备的玻璃/AlSiN(47 nm)/AgMgEu(11 nm)/AlSiN(94 nm)/AgMgEu(18 nm)/AlSiN(47 nm)多层膜,在可见光波段透过功率大于 80%,而在 850 nm 反射功率即达到了 77%<sup>[65]</sup>。

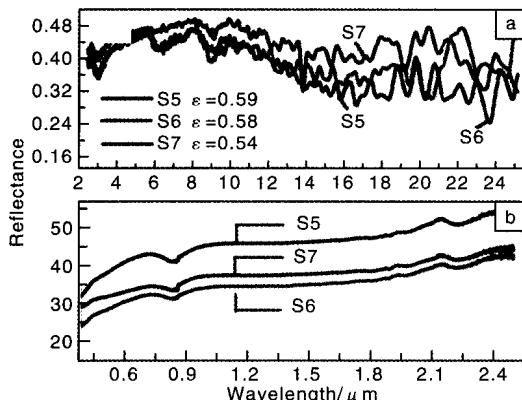


图 20  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}$  复合涂层的红外反射图谱(a)和可见光-近红外反射图谱(b)(S5~S7 为不同形貌  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的复合物<sup>[63]</sup>)

Fig. 20 Infrared reflectance spectra (a) and VIS-NIR spectra (b) of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}$  composite coating (S5~S7 are Al composite with  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  of difference morphology<sup>[63]</sup>)

#### 4.2 红外雷达兼容

红外雷达兼容涂层设计主要有两种方式:一种是与红外/可见光兼容相同的复合材料技术,将红外、雷达隐身涂层材料以各种方式复合在一起,形成两种性能兼备的隐身涂层,但是两类材料的性能常常会相互影响,难以达到单类涂层的隐身性能;另一种是采用人工滤波结构,比如频率选择表面(FSS)等,通过红外高反射雷达高吸收的方式实现隐身兼容,但是 FSS 的带宽还有待提高。

哈尔滨工业大学的 Fu L S 等人在  $\text{FeNi}_3$  纳米颗粒表面包裹几十纳米的 ITO 薄膜,在不影响微波磁导率的同时调节复合物的微波介电常数及红外发射率,1 mm 厚复合吸波涂层在 2~18 GHz 有反射率接近 -12 dB 的吸收峰,最低红外发射率为 0.8<sup>[66]</sup>。南京工业大学将  $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$  钙钛矿颗粒与碳纳米管复合烧结制备除具有  $\text{A}_2\text{BO}_4$ 、 $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{CoO}/\text{Co}$  相的复合隐身涂层材料,烧结析出的新相虽然提高了  $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$  钙钛矿复合物的红外发射率,但是也提供了良好的微波吸收特性<sup>[67]</sup>。国防科技大学设计的 FSS 结构,在红外发射率低于 0.3 的情况下,能够实现 8~18 GHz 的雷达反射率  $\leq -10 \text{ dB}$ <sup>[68]</sup>。

## 5 结语

本文以当前发展迅速的多频谱隐身涂层材料为基础,根据本中心在该领域取得的成果,结合国内外在雷达、红外和多频谱兼容 3 个方面的研究进展,对当前隐身涂层材料体系的发展动态进行了总结和分析。

雷达吸波涂层材料以磁性吸收材料为主,为解决宽带、低频、高性能 3 大问题,在传统铁氧体、磁性金属微粉等基础上以提高高频磁导率为目标,形成了具有各向异性特征的片状、纤维等新一代吸波材料,对 3 大问题有所缓解,但仍不能满足隐身需求的发展。结合先进的纳米技术以及复合工艺发展新型吸波材料是当前研究核心。但是相比传统块材,纳米吸波材料在电、磁性能强度上有所不及,必须充分发挥纳米效应,通过电磁性能的匹配设计和复合技术,在低频取得突破。

红外隐身涂层以低发射率为目,通过金属、半导体涂料以及高性能粘接剂研究形成了涂层基础材料体系,利用先进工艺和设计技术突破多频谱兼容隐身性能是该方向目前研究的重点。但是总体说来,目前多频谱兼容问题的解决思路较为单一,以复合材料技术为主,结构材料设计还未开展系统的研究。结合纳米技术以及复合材料技术,新型多频谱隐身兼容材料的研究将是该领域的重点。

## 参考文献 References

- [1] Sweetman B. *Lockheed Stealth* [M]. Hongkong: Zenith Press, 2004.
- [2] Xing Liying(邢丽英). *Stealth Material(隐身材料)* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] Zhang Y(张胤), Zhang Huibin(张辉彬). 敏感材料与吸波材料 [M]//Li Y R(李言荣). *Electronic Material(电子材料)*. Beijing: Qinghua University Press, 2013: 380~388.
- [4] Zeng Y, Yan S Q, Li Q F, et al. The Simulation of Soft Magnetic Materials' Shielding Characteristic in the near Field Communication System [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 668: 715~718.
- [5] Manara J, Reidinger M, Rydzek M, et al. Polymer-Based Pigmented Coatings on Flexible Substrates with Spectrally Selective Characteristics to Improve the thermal Properties[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2011, 70: 199~204.
- [6] Ma Chengyong(马成勇), Cheng Haifeng(程海峰), Tang Gengping(唐耿平), et al. 红外/雷达兼容隐身材料的研究进展[J]. *Materials Review(材料导报)*, 2007, 21(1): 126~132.
- [7] Rozanov K N. Ultimate Thickness to Bandwidth Ratio of Radar Absorbers[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(8): 1 230~1 234.

- [8] Walser R M, Win W, Valanju P P. Shape-Optimized Ferromagnetic Particles with Maximum Theoretical Microwave Susceptibility [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, 34(4): 1 390 – 1 392.
- [9] Koledintseva M Y, Razmadze A G, Gafarov A Y, et al. Attenuation in Extended Structures Coated with Thin Magneto-Dielectric Absorber Layer [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 118: 441 – 459.
- [10] Lee K S, Yun Y C, Kim S W, et al. Microwave Absorption of  $\lambda/4$  Wave Absorbers Using High Permeability Magnetic Composites in Quasimicrowave Frequency Band [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103: 07E504.
- [11] Kim S S. Microwave Absorbing Properties of Polymer Composites Containing High-Permeability Magnetic Flake Particles in Quasi-Microwave Frequency Band [J]. *Advanced Material Research*, 2013, 646: 14 – 17.
- [12] Shirakata Y, Hidaka N, Ishitsuka M, et al. Low-Loss Composite Material Containing Fine Zn-Ni-Fe Flakes for High-Frequency Applications [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(10): 4 337 – 4 340.
- [13] Deng Longjiang(邓龙江), Zhou Peihang(周佩珩). 高频磁结构与磁极限关系的研究与现状 [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China* (电子科技大学学报), 2009, 38(5): 531 – 536.
- [14] Zhou P H, Deng L J, Xie J L, et al. Effects of Particle Morphology and Crystal Structure on the Microwave Properties of Flake-Like Nanocrystalline  $\text{Fe}_3\text{Co}_2$  Particles [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 448: 303 – 307.
- [15] Zhou P H, Xie J L, Liu Y Q, et al. Composition Dependence of Microstructure, Magnetic and Microwave Properties in Ball-Milled FeSiB Nanocrystalline Flakes [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320: 3 390 – 3 393.
- [16] Deng L J, Zhou P H, Zhang L. Characterization and Microwave Magnetic Resonance in Nanocrystalline Fe-Co-Ni Flakes Composite [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: 103 916.
- [17] Zhou P H, Deng L J. Bounds on the Dynamic Magnetic Properties of Multiresonant Nanostructure Composites in Exchange Resonance Model [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105: 07A509.
- [18] Zhou P H, Liu T, Xie J L, et al. Damping Effect on Resonance Bounds Relationship of Nanostructured Ferromagnets and Composites [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(11): 113 912.
- [19] Zhou P H, Zhang L, Deng L J. Spin Wave Mode Transition Induced by Surface Anisotropy and Characteristic Length in Magnetic Nanoparticles [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96: 112 510.
- [20] Yang W F, Qiao L, Wei J Q, et al. Microwave Permeability of Flake-Shaped  $\text{FeCuNbSi}$  Particle Composite with Rotational Orientation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107: 033 913.
- [21] Rozanov K N, Koledintseva M Y, Drewniak J. Predicting of Wideband Electromagnetic Responses of Composites Containing Magnetic Inclusions [J]. *2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2010: 857 – 862.
- [22] Liu T, Zhou P H, Deng L J, et al. Spatial Orientation and Position Distribution Effect on the Effective Permeability of Composites Consisting of Aligned Flakes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106: 114 904.
- [23] Liu T, Zhou P H, Xie J L, et al. Extrinsic Permeability of Fe-based Flake Composites from Intrinsic Parameters: A Comparison between the Aligned and Random Cases [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324: 519 – 523.
- [24] Qin F X, Peng H X. Ferromagnetic Microwires Enabled Multi-functional Composite Materials [J]. *Progress in Material Science*, 2013, 58: 183 – 259.
- [25] Ivanov A V, Shalygin A N, Galkin V Y, et al. Metamaterials with Tunable Negative Refractive Index Fabricated from Amorphous Ferromagnetic Microwires: Magnetostatic Interaction Between Microwires [J]. *Piers Online*, 2009, 5: 649 – 652.
- [26] Baranov S. Radioabsorption Properties of Amorphous Microwires [J]. *Moldavian J Phys Sci*, 2009, 8: 332 – 336.
- [27] Buznikov. The Effect of Surface Domain Structure on Low-Field Microwave Absorption of Magnetic Microwires [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43: 055 002.
- [28] Han M G, Liang D F, Deng L J. Fabrication and Electromagnetic Wave Absorption Properties of Amorphous  $\text{Fe}_{79}\text{Si}_{16}\text{B}_5$  Microwires [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99: 082 503.
- [29] Raolison Z, Lefevre C, Neige J, et al. Preparation and Microwave Properties of Silica Coated Ni-Fe-Mo Flakes Composites [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(3): 986 – 989.
- [30] Han R, Han X H, Qiao L, et al. Superior Electromagnetic Properties of Oriented Silica-Coated Planar Anisotropy Carbonyl-Iron Particles in Quasimicrowave Band [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2011, 406(10): 1 932 – 1 935.
- [31] Jia S, Luo F, Qing Y C, et al. Electroless Plating Preparation and Microwave Electromagnetic Properties of Ni-Coated Carbonyl Iron Particle/Epoxy Coatings [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2010, 405(17): 3 611 – 3 615.
- [32] Kim S T, Kim S S. Electroless Plating of Co Thin Film on Hollow Glass Microspheres and the Effect of Film Thickness on Microwave Absorbance [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 3 494 – 3 497.
- [33] Li Q, Pang J F, Wang B, et al. Preparation, Characterization and Microwave Absorption Properties of Barium-Ferrite-Coated Fly-Ash Cenospheres [J]. *Advanced Powder Technology*, 2013, 24: 288 – 294.

- [34] Zhang W Q, Zhang D Y, Cai J. Microwave Characteristics of Low Density Flaky Magnetic Particles [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, 332: 15–20.
- [35] Han M G, Deng L J. Doping Effect of Multiwall Carbon Nanotubes on the Microwave Electromagnetic Properties of NiCoZn Spinel Ferrites [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90: 011 108.
- [36] Xu Y G, Zhang D Y, Cai J, et al. Microwave Absorbing Property of Silicone Rubber Composites with Added Carbonyl Iron Particles and Graphite Platelet [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, 327: 82–86.
- [37] Ma E L, Li J J, Zhao N Q, et al. Preparation of Reduced Graphene Oxide/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposite and Its Microwave Electromagnetic Properties [J]. *Material Letters*, 2013, 91: 209–212.
- [38] Xiang J, Chu Y Q, Zhang X H, et al. Magnetic and Microwave Absorption Properties of Electrospun Co<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanofibers [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 263: 320–325.
- [39] Gong Y X, Zhen L, Jiang J T, et al. Synthesis and Microwave Electromagnetic Properties of CoFe Alloy Nanoflakes Prepared with Hydrogen-Thermal Reduction Method [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106: 064 302.
- [40] Jiang J T, Wei X J, Xu C Y, et al. Co/SiO<sub>2</sub> Composite Particles with High Electromagnetic Wave Absorbing Performance and Weather Resistance [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, 334: 111–118.
- [41] Liu T, Zhou P H, Liang D F, et al. Electromagnetic Absorption Properties of Flowerlike Cobalt Composites at Microwave Frequencies [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(5): 50 302–050 302.
- [42] Liu T, Zhou P H, Liang D F, et al. Multi-Resonances Behavior of Ni Nanobel/Paraffin Composites at Microwave Frequencies [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 524: 25.
- [43] Liu T, Zhou P H, Xie J L, et al. The Hierarchical Architecture effect on the Microwave Absorption Properties of Cobalt Composites [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110: 033 918.
- [44] Kowsari E, Karimzadeh A H. Fabrication of Fern-Like, Fish Skeleton-Like, and Butterfly-Like BaO Nanostructures as Nano-filters for Radar-Absorbing Nanocomposites [J]. *Materials Letters*, 2012, 74: 33–36.
- [45] Stergiou C, Litsardakis G. Design of Microwave Absorbing Coatings with New Ni and La Doped SrCo<sub>2-w</sub> Hexaferrites [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(4): 1 516–1 519.
- [46] McCloy J S, Korolev K, Crum J V, et al. Millimeter-Wave Absorption as a Quality Control Tool for M-Type Hexaferrite Nanopowders [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(1): 546–551.
- [47] Bobzin K, Schlaefer T, Begard M, et al. Development of Ba-Hexaferrite Coatings for Electromagnetic Wave Absorption Applications [J]. *Surface & Coating Technology*, 2010, 205: 1 015–1 020.
- [48] Lisjak D, Begard M, Bruehl M, et al. Hexaferrite/Polyester Composite Coating for Electromagnetic-Wave Absorbers [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, 20(3): 638–644.
- [49] Dong C S, Wang X, Zhou P H, et al. Microwave Magnetic and Absorption Properties of M-Type Ferrite BaCo<sub>x</sub>Ti<sub>x</sub>Fe<sub>12-2x</sub>O<sub>19</sub> in the Ka Band [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, submitted.
- [50] Ting T H, Yu R P, Jau Y N. Synthesis and Microwave Absorption Characteristics of Polyaniline/NiZn Ferrite Composites in 2–40 GHz [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 126: 364–368.
- [51] Zhang Jianqi(张建奇), Fang Xiaoping(方小平). *Infrared Physics* (红外物理) [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.
- [52] Yu H J, Xu G Y, Shen X M, et al. Preparation of Leafing Cu and Its Application in Low Infrared Emissivity Coatings [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 484: 395–399.
- [53] Hu C, Xu G Y, Shen X M, et al. Thermal Ageing Studies on Low Infrared Emissivity Composite Coatings [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 496: 691–694.
- [54] Wu G W, Yu D M. Preparation of a Novel Infrared Low-Emissive Coating from the Cu Powder Modified by the Polyethylene Wax [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55: 26–31.
- [55] Larciprete M C, Albertoni A, Belardini A, et al. Infrared Properties of Randomly Oriented Silver Nanowires [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112: 083 503.
- [56] Yin X S, Tang W, Weng X L, et al. Surface Morphology Modeling for the Resistivity Analysis of Low Temperature Sputtered Indium Tin Oxide Thin Films on Polymer Substrate [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42: 225 304.
- [57] Yin X S, Tang W, Weng X L, et al. Energy Band Calculation of Amorphous Indium Tin Oxide Films on Polyethylene Terephthalate Substrate with Indirect Transition [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42: 025 104.
- [58] Lee S H, Kim Y S, Kang S H. Far-Infrared Emission of Ti-Based Oxides [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2011, 987: 86–90.
- [59] Yuan L, Weng X L, Deng L J. Influence of Binder Viscosity on the Control of Infrared Emissivity in Low Emissivity Coating [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 56: 25–29.
- [60] Wang Y J, Xu G Y, Yu H J, et al. Comparison of Anti-Corrosion Properties of Polyurethane Based Composite Coatings with Low Infrared Emissivity [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257: 4 743–4 748.
- [61] Yan X X, Xu G Y. Effect of Surface Modification of Cu with Ag by Ball-Milling on the Corrosion Resistance of Low Infrared Em-

- issivity Coating [J]. *Material Science and Engineering B*, 2010, 166: 152–157.
- [62] Yuan Le(袁乐), Weng Xiaolong(翁小龙), Lu Hu(卢虎), et al. Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合粉体的制备及红外反射特性研究 [J]. *Journal of Inorganic Materials* (无机材料学报), 2013, 28(5): 545–550.
- [63] Yuan L, Weng X L, Xie J L, et al. Solvothermal Synthesis and Visible/Infrared Optical Properties of Al/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Core-Shell Magnetic Composite Pigments [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, Submitted.
- [64] Yuan L, Weng X L, Du W F, et al. Optical and Magnetic Properties of Al/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Core-Shell Low Infrared Emissivity Pigments [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, Submitted.
- [65] Chiba K, Tamura S, Akada N. Improved Optical Properties of Transparent Low-Emissivity Coatings Using an Asymmetrical Structure Containing Two Silver-Alloy Layers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, 52(10): 103001.
- [66] Fu L S, Jiang J T, Zhen L, et al. FeNi<sub>3</sub>/Indium Tin Oxide (ITO) Composite Nanoparticles with Excellent Microwave Absorption Performance and Low Infrared Emissivity [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2013, 178: 225–230.
- [67] Chen L, Lu C H, Fang Z G, et al. Infrared Emissivity and Microwave Absorption Property of Sm<sub>0.5</sub> Sr<sub>0.5</sub> CoO<sub>3</sub> Perovskites Decorated with Carbon Nanotubes [J]. *Material Letters*, 2013, 93: 308–311.
- [68] Wang Y, Cheng H F, Wang J, et al. Infrared Emissivity of Capacitive Frequency-Selective Surfaces and Its Application in Radar and IR Compatible Stealth Sandwich Structures [J]. *Advanced Material Research*, 2011, 382: 65–69.
- [69] Wang Xiandong(王宪栋), Zhao Erbo(赵尔波). 红外隐身涂料的研究现状与发展趋势 [J]. *Electronic Warfare* (电子对抗), 2012, 143: 46–49.



专栏特约编辑邓龙江

**邓龙江:** 男, 1966年生, 电子科技大学教授, 博导; 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, 总装隐身技术专业组成员, 国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心主任, 教育部多频谱吸波材料与结构重点实验室主任; 主持完成了国家自然科学基金、“973”等国家重大重点项目20余项; 先后在《J Appl P》、《Appl Phys Lett》等国内外刊物发表学术论文120余篇, 获授权发明专利30余项, 获得省部国家奖励8项, 其中省市部级科技进步一等奖2项(排名第1); 国家科技进步二等奖1项(排名第1); 培养博



特约撰稿人周万城

**周万城:** 男, 1953年生, 教授, 博导; 1990年获西北工业大学博士学位, 1991~1993年在美国Iowa State University进行博士后研究, 1999~2001年作为访问教授到美国University of Missouri-Rolla进行科研合作; 陕西省首批“三五”人才, 享受政府特殊津贴; 主持国家自然科学基金等科研项目30余项, 获国家科技进步一等奖1项, 省部级科技成果奖励一、二、三等奖11项, 获授权国家(或国防)发明专利27项, 在国内外重要学术刊物上发表论文300余篇, 被SCI收录230余



特约撰稿人冯一军

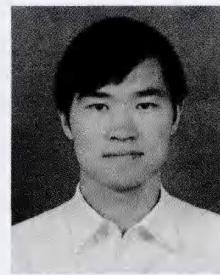
篇, 他引1400余次。  
**冯一军:** 男, 1964年生, 教授, 博导; 南京大学国防科工局国防重点学科实验室常务副主任、江苏省“先进电磁波调控技术”重点实验室副主任; 1995.9~1996.7任丹麦技术大学物理系客座科学家, 2001.8~2002.8任美国加州大学伯克利分校电子工程与计算机科学系高级访问学者, 2004.6~2004.7担任香港中文大学电子学工程系客座教授; 1998年入选教育部“优秀青年教师资助计划”, 2007年入选江苏省“333工程”中青年科学技术带头人, 2009年当选南京市有突出贡献中青年专家; 主持承



特约撰稿人程海峰

担了“973”、“863”课题、国防“973”和预研计划、自然科学基金重大项目课题、教育部优秀年轻教师基金和博士点基金等20多个项目; 发表学术论文160余篇, 被SCI、EI收录论文90余篇; 曾获2010年度江苏省科学技术一等奖和1995年度教育部科技进步三等奖。

**程海峰:** 男, 1971年生, 博士, 研究员, 博导; 全军心理战专家库专家, 总装备部武器装备隐身技术专家组成员, 北京宇航学会隐身专业委员会委员, 国防科技大学学部委员, 新型陶瓷纤维及其复合材料重点实验室常务副主任; 获军队科技进步二



特约撰稿人陈海燕

等奖2项; 2011年入选教育部新世纪优秀人才支持计划, 发表科研论文130篇, 其中SCI索引48篇, 作为第一申请人申请专利6项(其中4项已获授权)。

**陈海燕:** 男, 1976年生, 讲师; 2011年电子科技大学毕业获博士学位, 主要研究方向为表面电磁缺陷电磁散射机制及其RCS减缩的研究、频率选择表面、电子材料设计及应用等, 在国内外重要刊物发表论文10余篇, 自2009年起担任《IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (IEEE TEMC)》、《JEWIA》等国际期刊审稿人。