

选择表面工艺改性的 CIPs 涂层 及其氧化物的吸波性能

Absorbing properties of CIPs coatings and oxides
modified by selective surface technology

周 莉¹, 柳 汀^{1,2}, 郑典亮¹, 许勇刚³

(1 吉林化工学院 航空工程学院, 吉林 吉林 132102; 2 厦门大学 航空
航天学院, 福建 厦门 361005; 3 电磁散射重点实验室, 上海 200438)

ZHOU Li¹, LIU Ting^{1,2}, ZHENG Dian-liang¹, XU Yong-gang³

(1 School of Aeronautical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology,
Jilin 132102, Jilin, China; 2 School of Aerospace Engineering, Xiamen University,
Xiamen 361005, Fujian, China; 3 Science and Technology on Electromagnetic
Scattering Laboratory, Shanghai 200438, China)

摘要: 针对吸波涂层氧化腐蚀现象, 提出一种基于选择表面的周期结构涂层维修工艺。利用腐蚀法, 在以羰基铁粉(CIPs)为吸收剂的吸波涂层表面制备 CIPs 及其氧化物涂层。用扫描电子显微镜(SEM)对腐蚀后颗粒的形貌进行了分析。测试了 8~18GHz 下混合颗粒的复介电常数和复磁导率, 并用等效介质理论计算氧化涂层的参数。分析腐蚀和维修工艺对反射损耗(RL)的影响。结果表明: 当 CIPs 涂层表面被氧化时, 随着氧化涂层厚度的增加, 涂层的吸波性能减弱, 反射损耗增量值约为 2dB。当涂层厚度为 0.8mm 时, 维修效果不理想, 若涂层厚度增加至 1mm, 且氧化涂层厚度为 0.1mm 时, 维修效果较好, 体现为 10~18GHz 频率范围内的吸波带宽增加, 反射损耗相应减小约为 2dB。

关键词: 吸波涂层; 羰基铁粉; 腐蚀; 选择表面工艺; 反射损耗

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000943

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2019)09-0132-07

Abstract: The periodic structure coating maintenance process based on the selective surface was proposed. The coating of oxidized Fe and carbonyl iron particles (CIPs) was obtained by the corrosion method. The morphology of particles after corrosion was characterized by the scanning electron microscopy (SEM). The permittivity and permeability of the absorber adding the hybrid particles were tested in 8-18GHz, and the oxidized coating parameter could be calculated using the effective medium rule. Effects of the corrosion process and the maintenance process were analysed. The results show that as the CIPs oxidized in the coating surface, the coating's absorbing property was weakened as the oxidization thickness is increased, and the increment value of reflection loss (RL) is about 2dB. When the coating thickness is set as 0.8mm, the maintenance performance is unsuitable. However, if the coating thickness is increased to 1mm and the oxidization thickness is 0.1mm, the maintenance performance is improved, then the absorbing band can be widened in 10-18GHz and the RL decrement is about 2dB correspondingly.

Key words: absorbing coating; carbonyl iron particle; corrosion; selective surface technology; reflection loss

雷达吸波涂层被认为是隐身技术应用中的重要产品之一,近 20 年来,世界各军事强国加大投入研制先进的雷达吸波涂层,并在国防武器装备上取得了很好的实用效果,如飞行器、舰艇、坦克的雷达波伪装涂层等。除此之外,雷达吸波涂层在民用设备、掩体、舱室

等电磁屏蔽方面都有大量的应用^[1-4]。

常用的吸波涂层包括依靠介电损耗吸收电磁波的介电损耗型和依靠磁共振吸收电磁波的磁损耗型两种^[5-10]。目前,吸波涂层“薄、轻、宽、强”4 个要求已经成为最重要的发展和改进目标。吸波涂层主要由吸收

剂(吸波颗粒)和黏结剂(树脂等)组成,其中吸波颗粒决定了涂层的吸波性能。为了满足吸波涂层的物理和化学性能,吸收剂的常规选择是磁损耗类型。由于具有较高的饱和磁化强度,羰基铁粉(CIPs)作为一种优良的吸收剂被广泛应用^[11-14]。此外,吸收剂颗粒在研磨过程中会被粉碎成片形结构,因其各向异性以及 Snoek 极限的增加,吸波性能也会得到增强^[15-19]。前期工作表明,CIPs 吸波材料具有良好的吸波性能,在厚度为 1mm 的基体中加入体积分数为 60% 的 CIPs,其最小反射损耗(RL)能达到-12.2dB^[20];加入质量分数为 55% 的 CIPs 时,在频率为 10.6GHz 的反射损耗能达到-42.5dB^[21]。然而,当涂覆有吸波涂层的设备在使用时,吸波涂层的常见损伤之一就是由环境中的水或盐雾造成的腐蚀^[22-23]。整个腐蚀过程由外到内逐步产生,最终导致的结果是,涂层中的吸收剂会被逐渐氧化,从而导致吸波涂层物相和电磁参数的变化。换言之,当吸收剂颗粒被腐蚀时,吸波涂层的吸收性能会受到影响。因此,为了保持设备的吸波性能,需要定期对吸波涂层进行维修。目前来说,常规的维修工艺是对损伤的吸波涂层进行擦除,然后喷涂新的吸波涂层以替代损伤的吸波涂层。但由于吸波涂层与金属之间具有较强的黏附力,整个擦除过程会耗费大量的时间。为了快速处理腐蚀后的吸波涂层,降低维修成本,本工作提出了一种新的维修工艺,将腐蚀涂层部分保持为周期性结构,然后在周期性涂层结构上喷涂纯树脂。

首先,本工作选择 CIPs 作为吸收剂,通过将吸波涂层浸入水中以快速模拟吸波涂层的腐蚀过程,并以此制备得到腐蚀后的吸波涂层表面颗粒。其次,对腐

蚀后吸波涂层表面颗粒的形貌进行测试,并对其电磁参数进行测试。最后,对比分析腐蚀和维修工艺对吸波涂层吸波性能的影响。

1 实验材料与方法

本实验选用的 CIPs 吸收剂由中国陕西兴化化学股份有限公司提供,选用的黏结剂和固化剂为深圳市固泰科技有限公司提供的环氧树脂 AB 胶,并选用丙酮作为稀释剂。将稀释剂丙酮与黏结剂环氧树脂 A 胶以 4 : 1 的质量比均匀混合;然后将环氧树脂 B 胶作为固化剂加入 CIPs 和环氧树脂 A 胶的混合溶液中,其中,CIPs 和环氧树脂 AB 胶的体积比为 45 : 55;将混合物以 670r/min 的转速分散 20min 后,将通过溅射和硬化制得吸波涂层样品浸入水中 72h;然后通过研磨工艺将收集到的表面腐蚀涂层压碎至微米量级,从而获得氧化铁和 CIPs 涂层的混合颗粒。以石蜡为基体,分别加入 3 种不同质量分数(30%,50%和 70%)的混合颗粒,即可制备测试样品,样品分别命名为 SM1,SM2 和 SM3。

利用计算机辅助设计(CAD)软件对维修工艺进行建模,如图 1 所示。在吸波涂层表面放置周期孔筛,采用喷砂工艺对腐蚀部位进行去除,可保持互补的周期性吸波涂层结构,然后在周期性吸波涂层结构表面喷涂环氧树脂。通过扫描电子显微镜(Sigma-300, ZEISS)对吸收剂和混合颗粒的形貌进行了测试。通过矢量网络分析仪,采用同轴法测量了氧化物涂层在 8~18GHz 频率范围内的电磁参数,其中,测试样品为圆环形同轴试样,试样尺寸为:外径 7mm,内径 3.04mm,厚度 2mm。

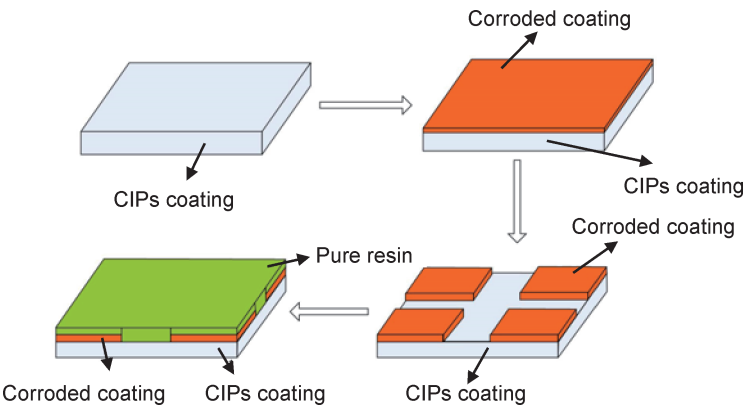


图 1 CIPs 涂层在体元素中的腐蚀和维修过程

Fig. 1 Corrosion and maintenance processes of CIPs coating in the body element

2 结果与分析

2.1 SEM 分析

吸收剂和混合颗粒的形貌如图 2 所示。图 2(a)

中,片状 CIPs 的平均直径约为 4μm,厚度约为 0.5μm。图 2(b)可以观察到,腐蚀后的 CIPs 在环氧树脂中呈聚集状态,CIPs 包覆环氧树脂的直径约为 8~10μm。

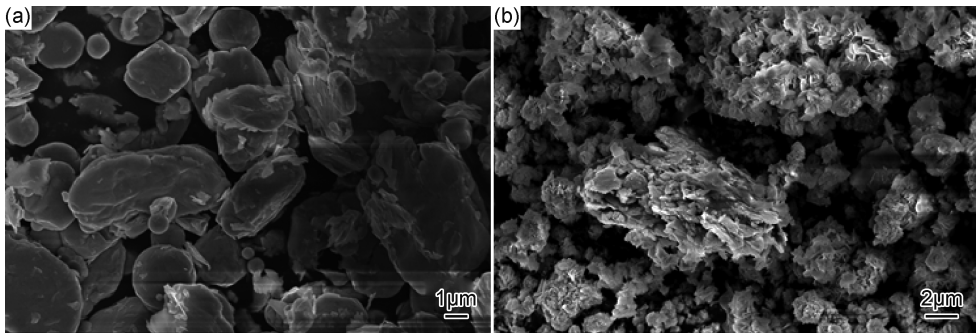


图 2 羰基铁粉(a)和腐蚀颗粒(b)的 SEM 图像
Fig. 2 SEM images of CIPs (a) and corroded particles (b)

2.2 复介电常数和复磁导率

由于圆环结构的氧化物涂层样品难以制备,直接获得其电磁参数非常困难。为解决上述问题,本研究基于等效介质理论,以石蜡为黏结剂,采用研磨氧化物作为填料制备氧化物涂层测试样品。图 3 为 8~18GHz 频率范围内氧化涂层和石蜡共混物的电磁参数:复介电常数 ϵ 和复磁导率 μ 。如图 3(a)和图 3(b)所示,相对其他两种样品,混合颗粒质量占比最大的样

品的复介电常数最大,其介电常数实部 ϵ' 的平均值约为 9.31,介电常数虚部 ϵ'' 的值随着频率的增加而波动,最大值出现在 17GHz 处,此时介电常数虚部 ϵ'' 的值为 2.10;如图 3(c)和图 3(d)所示,3 种样品的复磁导率在 8~18GHz 频率范围内呈波动趋势,磁导率实部 μ' 变化幅度较小,在该频带内波动的最大值小于 0.45,随着混合颗粒质量比的增加,磁导率虚部 μ'' 的值增大。

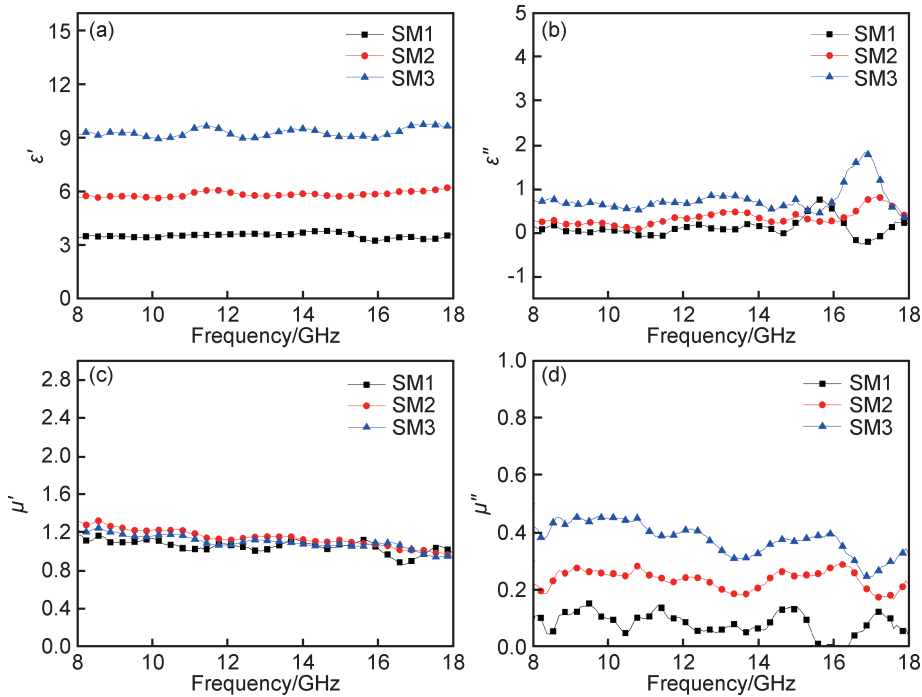


图 3 不同样品的介电常数实部 ϵ' (a),介电常数虚部 ϵ'' (b),磁导率实部 μ' (c)和磁导率虚部 μ'' (d)
Fig. 3 Real permittivity ϵ' (a), imaginary permittivity ϵ'' (b), real permeability μ' (c) and imaginary permeability μ'' (d) of different samples

复合材料的复介电常数 ϵ 或复磁导率 μ 可以用 Maxwell-Garnett 定律来描述。在 Maxwell-Garnett 定律中,颗粒是混合颗粒,或者是等效的两相颗粒。当混合颗粒随机分散在基质中时,等效磁导率可描述为^[24-26]:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_m + \nu \epsilon_m \frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_m + (1 - \nu)n(\epsilon_i - \epsilon_m)} \tag{1}$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_m + \nu \mu_m \frac{\mu_i - \mu_m}{\mu_m + (1 - \nu)n(\mu_i - \mu_m)} \tag{2}$$

式中: ϵ_i 和 ϵ_m 分别为混合颗粒和石蜡的介电常数($\epsilon_m = 2.8$); μ_i 和 μ_m 分别为混合颗粒和石蜡的磁导率

($\mu_m = 1$); n 为填料形状因子; v 表示体积分数; 本工作中氧化铁涂层的密度约为 2.37g/cm^3 , 从而可以得到相应吸收剂的体积分数为 14%, 27.5% 和 47%。

然后, 利用实验数据, 采用优化方法计算了氧化铁涂层的介电常数、磁导率和形状因子。优化函数是计算参数和测量参数的误差, 优化变量是填料形状因子, 可得到优化后的填料形状因子 $n = 0.15$ 。样品 SM1 的实验参数和计算参数曲线, 以及氧化铁涂层的介电常数和磁导率如图 4 所示。从图 4(a) 和图 4(c) 可以得到, 在 8~18GHz 频率范围内, 介电常数实部 ϵ' 的实验平均值为 3.52, 计算平均值为 2.87, 实验值和平均值有一定的偏差, 但对于磁损耗型吸波涂层, 其介电常数实部对计算反射率的结果影响不大; 介电常数虚

部 ϵ'' 的实验值和计算值很接近, 在频率 15.6GHz 附近出现一定波动, 波动的最大值不超过 0.75; 从图 4(b) 和图 4(c) 可以得到, 磁导率实部 μ' 的实验平均值为 1.05, 计算平均值为 1.13, 二者基本一致; 磁导率虚部 μ'' 也是有同样的效果, 计算和实验平均值分别为 0.01 和 0.06。另外, 选取 0.3mm 和 0.5mm 两种厚度, 对测试参数和拟合计算参数对应的反射损耗进行计算, 如图 4(d) 所示, 可以看出, 反射损耗偏差在厚度为 0.3mm 时不足 0.06dB, 在厚度为 0.5mm 时增大到 0.21dB, 这对于后续涂层处理后的结果影响很小。从整体来看, 计算结果和实验结果表现出很好的一致性。因此, 计算参数可以用来模拟氧化涂层厚度对涂层吸波性能的影响。

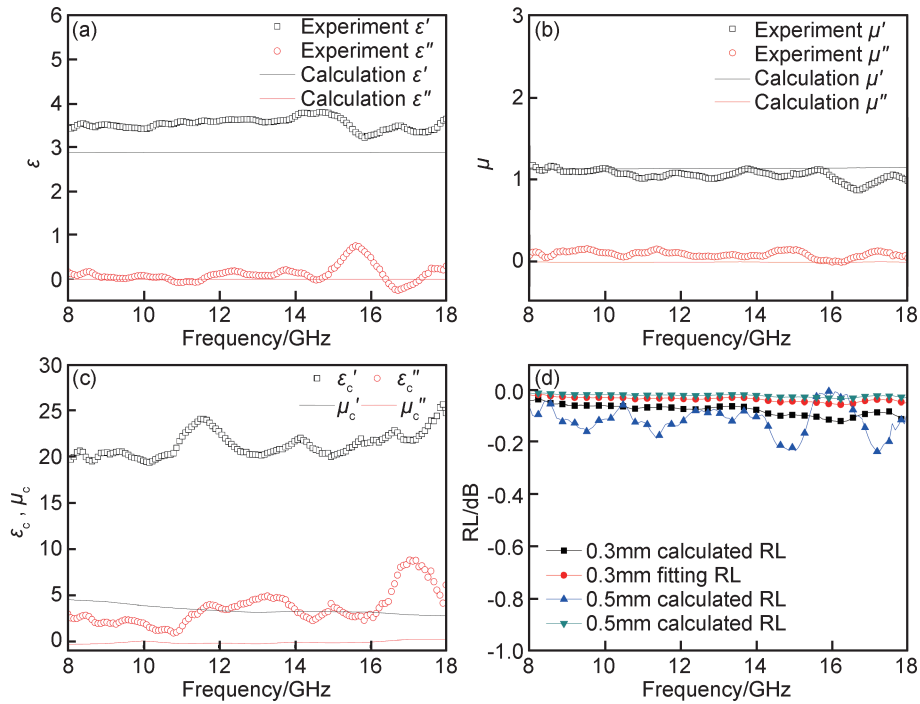


图 4 实验介电常数 ϵ (a), 实验磁导率 μ (b), 计算介电常数 ϵ_c 和计算磁导率 μ_c (c) 和反射损耗 (d)

Fig. 4 Experiment permittivity ϵ (a), experiment permeability μ (b), calculation permittivity ϵ_c and calculation permeability μ_c (c) and reflection loss RL (d)

2.3 腐蚀和维修工艺对吸波性能的影响

吸波涂层厚度是影响吸波性能的主要因素, 为了分析腐蚀和维修工艺对吸波性能的影响, 设置不同的氧化涂层厚度来计算吸波涂层的反射损耗。腐蚀后的吸波涂层可以看作双层吸波体, 当吸收体为理想的导电体时, 反射损耗 RL 可以推导为^[27-28]:

$$RL = 20 \lg \left| \frac{Z_{in,2} - Z_0}{Z_{in,2} + Z_0} \right| \quad (3)$$

式中: Z_0 为自由空间的特征阻抗; $Z_{in,2}$ 为吸波涂层第 2 层的输入阻抗。输入阻抗的表达式如下,

$$Z_{in,2} = Z_2 \frac{Z_{in,1} + Z_2 \tanh(\gamma_2 d_2)}{Z_2 + Z_{in,1} \tanh(\gamma_2 d_2)} \quad (4)$$

$$Z_{in,1} = Z_1 \tanh(\gamma_1 d_1) \quad (5)$$

式中: $Z_n = \sqrt{\mu_n / \epsilon_n}$ 是吸波涂层第 n 层的特征阻抗, $n=1$ 和 2; ϵ_n 和 μ_n 是第 n 层的复介电常数和复磁导率; $\gamma_n = i2\pi f \sqrt{\epsilon_n \mu_n} / C$ 是第 n 层的传播常数, C 是光速; 吸波涂层厚度 d_1 为 0.8mm 和 1mm, 氧化涂层厚度 d_2 为 0.1, 0.2mm 和 0.3mm。

在 8~18GHz 频率范围内, 两种厚度吸波涂层下, 氧化涂层厚度不同时的反射损耗曲线如图 5 所示。从

图 5 可以看出,吸波涂层厚度不同,氧化涂层厚度的影响趋势却一致;随着氧化涂层厚度的增加,反射损耗增大。图 5(a)中,吸波涂层厚度为 0.8mm 时,9.5GHz 的反射损耗最小,氧化涂层的存在对 8~18GHz 频率范围内的反射损耗造成了明显的影响,其变化随着厚

度的增加而增大,最大增量值约为 2dB;图 5(b)中,吸波涂层厚度增加到 1mm 时,氧化涂层厚度仍然会增大反射损耗,但影响效果变弱。总的来看,氧化涂层会对吸波性能带来影响,会引起吸波涂层吸波性能的削弱。

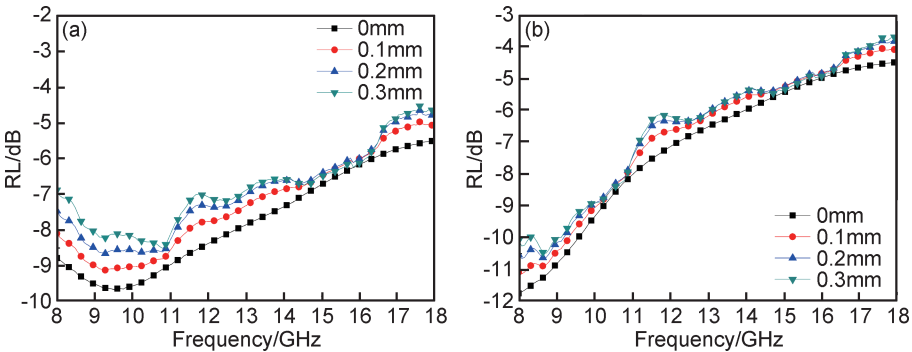


图 5 CIPs 涂层厚度 0.8mm(a)和 1mm(b)下不同氧化涂层的反射损耗

Fig. 5 Reflection loss of various oxidized coatings with CIPs coating thickness of 0.8mm (a) and 1mm (b)

为了分析维修后周期性结构的反射损耗,对吸收剂进行了建模,选择腐蚀涂层中体积分数占比 14% 的吸收剂作为建模对象。然后利用仿真模型和时域有限差分法(FDTD),在 CST 软件上对吸收剂的反射损耗进行模拟,如图 6 所示。图 6(a)中,当吸波涂层厚度为 0.8mm 时,随着氧化涂层厚度的增加,最小反射损耗增加至 -4.8dB;在 14.5~18GHz 频率范围内,氧化涂层厚度为 0.1mm 或 0.2mm 时的反射损耗虽然较小,但衰减值增量也非常小(小于 0.5dB)。图 6(b)中,当吸波涂层厚度增加到 1mm 时,3 种氧化涂层厚

度下的反射损耗分别在 8~9GHz,8~9.4GHz 和 8~10.2GHz 频段增加,换句话说,在这些频带中吸波性能可能较弱;然而,在 10.2~18GHz 频率范围内其反射损耗会降低,最大衰减值约为 2dB,这意味着维修工艺可以增强吸波性能;当氧化涂层厚度为 0.1mm 时,维修后的反射损耗接近原始值。结果表明:当吸波涂层被氧化时,两种不同涂层的存在,特别是两种涂层的界面,都会破坏涂层的吸波性能;当吸波涂层厚度为 0.8mm 时,局部涂层维修不合理;当涂层厚度为 1mm,氧化涂层厚度为 0.1mm 时,维修效果比较理想。

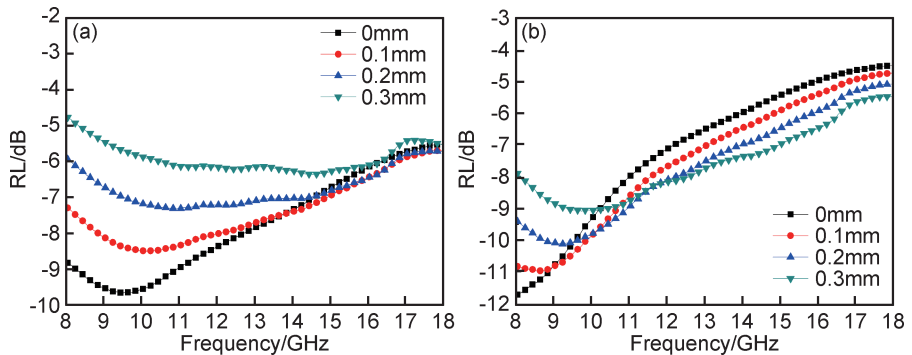


图 6 涂层厚度 0.8mm(a)和 1mm(b)下不同厚度氧化涂层的反射损耗

Fig. 6 Reflection loss of various oxidized coatings with coating thickness of 0.8mm (a) and 1mm (b)

3 结论

- (1) 针对吸波涂层氧化腐蚀现象,提出一种基于选择表面的周期结构涂层维修工艺。
- (2) 利用腐蚀法制备了 CIPs 及其氧化物,在 8~

18GHz 频段范围内会削弱吸波涂层的吸波性能。

(3) 对厚度为 0.8mm 的吸波性能维修时,应采用整体喷涂新涂层的方法。

(4) 当吸波涂层厚度为 1mm 时,采用厚度 0.1mm 的周期结构涂层,局部氧化涂层吸波性能的维修效果明显。

参考文献

- [1] YUAN X, CHENG L, ZHANG L. Electromagnetic wave absorbing properties of SiC/SiO₂, composites with ordered inter-filled structure [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2016, 680: 604-611.
- [2] CHOI I, LEE D, DAI G L. Optimum design method of a nano-composite radar absorbing structure considering dielectric properties in the X-band frequency range [J]. *Composite Structures*, 2015, 119: 218-226.
- [3] GAO X, LI J, GAO Y, et al. Microwave absorbing properties of alternating multilayer composites consisting of poly(vinyl chloride) and multi-walled carbon nanotube filled poly(vinyl chloride) layers [J]. *Composites Science & Technology*, 2016, 130: 10-19.
- [4] 于丽新, 兰晓琳, 邵枫, 等. MWCNT/FeNi 复合纳米线制备及其雷达微波和工频电磁波吸收性能[J]. *材料工程*, 2018, 46(8): 64-70.
YU L X, LAN X L, SHAO F, et al. MWCNT/FeNi composite nanowires for efficient electromagnetic wave absorption on microwave and power frequency [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(8): 64-70.
- [5] LIANG C Y, WANG Z J. Controllable fabricating dielectric-dielectric SiC @ C core-shell nanowires for high-performance electromagnetic wave attenuation[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, 9(46): 40690-40696.
- [6] LIANG C Y, GOU Y J, WU L N, et al. Nature of electromagnetic-transparent SiO₂ shell in hybrid nanostructure enhancing electromagnetic attenuation [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(24): 12967-12973.
- [7] LAN X L, LIANG C Y, WU M S, et al. Facile synthesis of highly defected silicon carbide sheets for efficient absorption of electromagnetic waves [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(32): 18537-18544.
- [8] FENG J, ZHANG Y, WANG P, et al. Oblique incidence performance of radar absorbing honeycombs[J]. *Composites Part B Engineering*, 2016, 99: 465-471.
- [9] LIU L D, DUAN Y P, LIU S H, et al. Microwave absorbing properties of one thin sheet employing carbonyl-iron powder and chlorinated polyethylene[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322(13): 1736-1740.
- [10] WANG H Y, ZHU D M, ZHOU W C, et al. Electromagnetic property of SiO₂-coated carbonyl iron/polyimide composites as heat resistant microwave absorbing materials[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 375: 111-116.
- [11] XU Y G, YAN Z Q, ZHANG D Y. Microwave absorbing property of a hybrid absorbent with carbonyl irons coating on the graphite[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 356: 1032-1038.
- [12] YAN Z, CAI J, XU Y, et al. Microwave absorption property of the diatomite coated by Fe-CoNiP films[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 346: 77-83.
- [13] ZHOU Y, XIE H, ZHOU W, et al. Enhanced antioxidation and microwave absorbing properties of SiO₂-coated flaky carbonyl iron particles[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, 446: 143-149.
- [14] LONG C, XU B C, HAN C Z, et al. Flaky core-shell particles of iron@iron oxides for broadband microwave absorbers in S and C bands[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 709: 735-741.
- [15] XUE D S, LI F S, FAN X L, et al. Bianisotropy picture of higher permeability at higher frequencies[J]. *Chinese Physics Letter*, 2008, 25(11): 4120-4123.
- [16] WEN F S, ZUO W L, YI H B, et al. Microwave-absorbing properties of shape-optimized carbonyl iron particles with maximum microwave permeability[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2009, 404(20): 3567-3570.
- [17] LV H L, JI G B, LI X G, et al. Microwave absorbing properties and enhanced infrared reflectance of FeAl mixture synthesized by two-step ball-milling method [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 374: 225-229.
- [18] 韩瑞, 位建强, 韩相华, 等. 片状羰基铁/石蜡复合材料的高频磁性[J]. *科学通报*, 2010, 55(26): 2570-2575.
HAN R, WEI J Q, HAN X H, et al. High-frequency magnetic properties of carbonyl-iron particles/paraffin composite [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(26): 2570-2575.
- [19] ZHANG B S, FENG Y, XIONG J, et al. Microwave-absorbing properties of de-aggregated flake-shaped carbonyl-iron particle composites at 2-18 GHz[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(7): 1778-1781.
- [20] QING Y C, ZHOU W C, LUO F, et al. Microwave-absorbing and mechanical properties of carbonyl-iron/epoxy-silicone resin coatings[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, 321(1): 25-28.
- [21] WANG M H, LI Q H, LI X G, et al. Effect of oxygen-containing functional groups in epoxy/reduced graphene oxide composite coatings on corrosion protection and antimicrobial properties[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 448: 351-361.
- [22] ZHAN Y Q, ZHANG J M, WAN X Y, et al. Epoxy composites coating with Fe₃O₄ decorated graphene oxide: Modified bio-inspired surface chemistry, synergistic effect and improved anti-corrosion performance[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 436: 756-767.
- [23] PARHIZKAR N, SHAHRABI T, RAMEZANZADEH B. A new approach for enhancement of the corrosion protection properties and interfacial adhesion bonds between the epoxy coating and steel substrate through surface treatment by covalently modified amino functionalized graphene oxide film[J]. *Corrosion Science*, 2017, 123: 55-75.
- [24] XU Y G, YUAN L M, CAI J, et al. Smart absorbing property of composites with MWCNTs and carbonyl iron as the filler[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, 343: 239-244.
- [25] 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(4): 519-523.

[26] WU L Z, DING J, JIANG H B, et al. Particle size influence to the microwave properties of iron based magnetic particulate composites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 285(1-2): 233-239.

[27] ZIMMERMAN D T, CARDELLINO J D, CRAVENER K T, et al. Microwave absorption in percolating metal-insulator composites[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(21): 214103-214106.

[28] KIM S S, JO S B, GUEON K I, et al. Complex permeability and permittivity and microwave absorption of ferrite-rubber composites at X-band frequencies[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(6): 5462-5464.

基金项目:吉林化工学院自然科学基金重点项目(2018026);国家自然科学基金项目(61601299)

收稿日期:2018-08-07;**修订日期:**2019-04-18

通讯作者:柳汀(1984—),男,博士研究生,主要研究方向为功能材料、超材料设计及应用研究,联系地址:吉林省吉林市昌邑区双吉街吉林化工学院航空工程学院(132102),E-mail:tingliu220@163.com

(本文责编:杨 雪)