

吸波涂层损伤对隐身性能的影响

王彦丰, 张琳, 李益文*, 李玉琴, 魏小龙, 陈戈, 文建中

(空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 西安, 710038)

摘要 装备表面覆盖的吸波涂层在长期使用后容易发生磨损、膨胀、老化等损伤, 从而影响吸收性能。利用反射率、相位测量和微波成像技术, 研究了这3种损伤模式及其对吸收性能的影响。首先制作了带有三种损伤类型的雷达吸波涂层和红外-雷达兼容吸波涂层样板, 采用弓形法测量反射率和相位, 采用雷达散射成像系统建立样板散射图像。通过实验结果和定性分析, 发现所有类型的损伤都使涂层吸收性能恶化, 其相应的吸收频带变窄, 并随涂层的结构或吸波材料成分的变化而变化。其中, 磨损损伤模式对这两种吸波涂层的影响最为严重, 导致吸收能力急剧下降。

关键词 吸波涂层; 损伤模式; 弓形法; 微波成像

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.03.001

中图分类号 TB 34 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)03-0001-06

Effect of Absorbing Coatings Damage on Invisibility Performance

WANG Yanfeng, ZHANG Lin, LI Yiwen*, LI Yuqin, WEI Xiaolong,
CHEN Ge, WEN Jianzhong

(Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering
University, Xi'an 710038, China)

Abstract The absorbing coating covered in the surface of equipment is apt to have the damage of abrasion, bulging, aging after used for a long period of time. In this paper, the three damage modes and its influence on absorbing performance are investigated by the reflectivity and phase measurement and microwave imaging. The above three kinds of damage samples of radar absorbing coating and infrared-radar absorbing coating are made, reflectivity and phase are measured with arch method, and microwave images are built by the radar scattering imaging system for stealthy target. With the comparison of the experimental results and qualitative analysis, it is found that the all of the damage on coating make the absorbing performance deteriorate, its corresponding absorbing band become narrow, and a shift due to the variation in structure and composition of absorbing materials. However, the wear damage mode has the most serious impact on the two kinds of microwave absorbing coatings, resulting in a sharp decline in the absorption capacity.

Key words absorbing coating; damage mode; arch method; microwave imaging

收稿日期: 2021-10-28

作者简介: 王彦丰(1994—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士生, 研究方向为反射率测量与电磁仿真。E-mail: wangyf199411@163.com

通信作者: 李益文(1983—), 男, 湖南新化人, 副教授, 研究方向为航空发动机进排气及隐身技术。E-mail: lee_yiwen@163.com

引用格式: 王彦丰, 张琳, 李益文, 等. 吸波涂层损伤对隐身性能的影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(3): 1-6. WANG Yanfeng, ZHANG Lin, LI Yiwen, et al. Effect of Absorbing Coatings Damage on Invisibility Performance[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(3): 1-6.

隐身技术^[1-3]是一种研究如何减小目标的可探测性,使目标不易被探测器发现的技术,它在提高现代武器的生存能力方面发挥着重要作用,因此引起世界各国学者的广泛关注。目前,对雷达的不可见性^[4-6]是隐身技术研究的关键点,并且已经进行了许多相应的研究以减少目标对电磁能量的散射。

吸波涂层^[4,7-8]可以在不改变装备原有配置的情况下实现隐身功能,因此广泛应用于需要隐身的场合。吸波涂层常应用于飞机、导弹等设备,但其隐身性能可能会在平时的储存、运输、训练过程中,受到外界因素的影响而引起涂层发生物理或化学变化,产生如磨损、鼓胀、老化等模式的损伤^[4,9-11]。几乎所有类型的涂层损伤都会导致装备的隐身性能的下降,但不同的损伤模式由于机制和影响模式不同而产生不同的效果。现有的一些文献分析了雷达吸波涂层的机理^[9],并根据损伤的原因和位置对损伤模式进行了分类^[10]。郑国禹等从吸收机制的角度分析了退变因素、修复技术的发展和进一步的修复建议^[9]。文献^[10]通过理论计算,评估了涂层损伤引起的黏附性能劣化,提出了损伤模式分析的方法。同时,一些文献也总结了美军相应的修复技术和建议^[10-12]。然而,在损伤评估过程中,大部分工作是基于定性分析^[4,9-14],难以明确解释损伤模式类型对隐身的实际影响。

针对部分装备工作在干燥且受烈日照射的环境中,表面涂覆的吸波涂层常发生磨损、鼓包和紫外线导致的老化损伤,制作了一批带有上述类型损伤的雷达和红外-雷达兼容的吸波涂层样板,同时通过定性和定量分析讨论了损坏模式对隐身的影响。首先简要介绍了吸波涂层的吸收机理和相关的测量方法和测量参数。在实验中首先分析了磨损、鼓包、老化损伤的机制。而后,通过弓形法测量^[15-17]各吸波涂层样板的反射率和相位,通过微波成像^[18-20]方法获得它们的散射分布图像。再通过测量反射率、相位和相应的微波图像对损伤影响进行定量分析。通过比较,实验结果与定性分析相吻合。

1 实验原理

1.1 吸波涂层的吸波机理

雷达吸波涂层的工作原理是通过将入射波的能量转化为欧姆损耗来降低反射能量。电磁波照射吸波涂层时,在自由空间与涂层的界面发生反射和透射,反射波的能量比例主要取决于自由空间与吸波涂层的阻抗匹配程度。因此,为提高雷达涂层材料的吸收效率,要求涂层的波阻抗与自由空间的波阻

抗相匹配,以减少反射,使入射波尽可能地进入到吸波涂层中。吸波涂层的反射系数定义为

$$R = (Z - Z_0) / (Z + Z_0) \quad (1)$$

式中: Z_0 是自由空间的波阻抗; Z 是吸波涂层的波阻抗。

$$Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}, Z = \sqrt{\mu_r \mu_0 / \epsilon_r \epsilon_0} \quad (2)$$

式中: ϵ_0, μ_0 是自由空间中的介电常数和磁导率; ϵ_r, μ_r 是吸波涂层的相对介电常数和磁导率,它们是复数。此外,材料内部的能量损耗也被设计为有效损耗,它由衰减特性反映:

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon') \sqrt{(\mu'^2 + j\epsilon''^2)}} \quad (3)$$

式中: ω 为角频率; c 为真空中的光速。

吸波涂层的复相对介电常数和复相对磁导率写为:

$$\begin{aligned} \epsilon_r' &= \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \\ \mu_r' &= \mu_r' - j\mu_r'' \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知,若电磁参数的虚部大而实部小,则会导致材料内部电磁波的快速衰减。

在实际应用分析中,用介电损耗和磁损耗的正切来描述内部电磁波的衰减能力:

$$\begin{aligned} \tan \delta_E &= \epsilon'' / \epsilon' \\ \tan \delta_M &= \mu'' / \mu' \end{aligned} \quad (5)$$

1.2 弓形法测量反射率和相位

弓形法是测量涂层样板反射率最常用的方法之一。由于本文中的测量的目标表面的涂层带有多种损伤,损伤将导致涂层厚度或电磁参数分布的不均匀,必然会引起涂层平板反射的电磁波的相位变化,因此本文同时测量反射率与相位两个参数。

弓形法测量装置如图1所示,电磁波由发射天线发射出去,被样板反射后返回接收天线,将信号传送到网络分析仪。以相同入射角度、相同功率、相同极化的电磁波入射到待测涂层样板和相同尺寸金属板平面,两者反射功率的比值,通常对此比值取对数形式表达,即称为被测涂层样板的反射率,见式(6):

$$\Gamma = 10 \lg(P_a / P_m) \quad (6)$$

式中: Γ 为待测涂层样板的反射率,单位为dB; P_a 为待测涂层样板反射功率; P_m 为同尺寸金属板的反射功率。

测量涂层样板的相位用传输系数的辐角来表征。在弓形法所用的双端口网络的输出端的出波 b_2 和输入端的进波 a_1 之间的相位差,为:

$$\varphi_{21} = \arg(b_2 / a_1) = \arg S_{21} \quad (7)$$

式中: S_{21} 为输出端到输入端的电压传输系数。

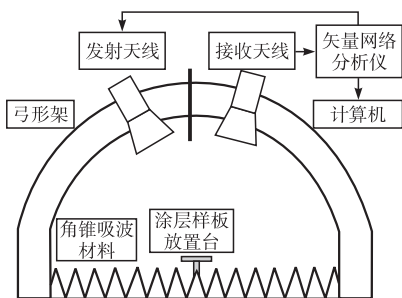


图 1 弓形法测量装置

1.3 微波成像

微波成像是获取目标散射分布的一种手段,微波发射机发射微波照射目标,接收机接收散射能量,通过背景滤波和数据处理重建散射特性。微波成像设备如图 2 所示,微波发射机经由天线发射的微波照射到成像目标上,微波相干控制接收机通过天线接收其反射能量,利用距离徙动算法处理回波数据并重建目标散射中心图像。

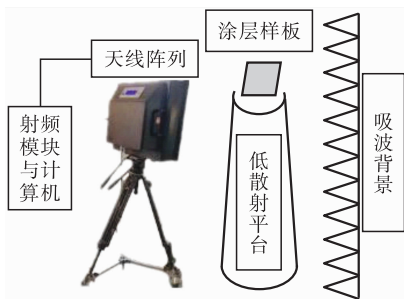


图 2 微波成像测量装置

2 实验过程

为了分析吸波涂层的损伤模式对隐身性能的影响,实验中选择了 2 种类型的涂层样板——覆盖在金属表面的雷达吸波涂层和红外-雷达兼容涂层。带有 2 mm 厚度的涂层样板购自一家从事吸波涂料设计的公司。雷达吸波涂层是树脂基材料,兼容涂层由上层含有铁氧体的红外涂层和下层的雷达吸波涂层组成。涂层中铺设低散射纤维网,在加固涂层、预防脱粘的同时,不干扰涂层的吸波功能。本文针对两类涂层样板制备了 3 种常见的损伤模式,分别是外力导致的磨损损伤、局部脱粘和再加热引起的鼓包损伤和局部紫外线辐射引起的老化损伤。图 3 列出了测试样板,(S1)和(S2)分别代表完好的雷达吸波涂层和红外-雷达兼容涂层样板。(S1-a)和(S2-a)是 4 个角带有磨损损伤的涂层样板,(S1-b)和(S2-b)是带有 3 个凸起的鼓包损伤的涂层样板,(S1-c)和(S2-c)带有老化损伤的涂层样板。

为研究吸波涂层损伤对其隐身性能的影响,首先,依照标准^[17]搭建弓形架,并分别测量涂层样板的反射率和相位。而后,在微波暗室用微波成像设备对涂层样板做散射特性成像。其中,弓形法测量反射率的频率范围为 2~18 GHz;并根据反射率测量结果,选择在吸波能力较强的 8~18 GHz 频段测量涂层样板的相位变化和微波成像。

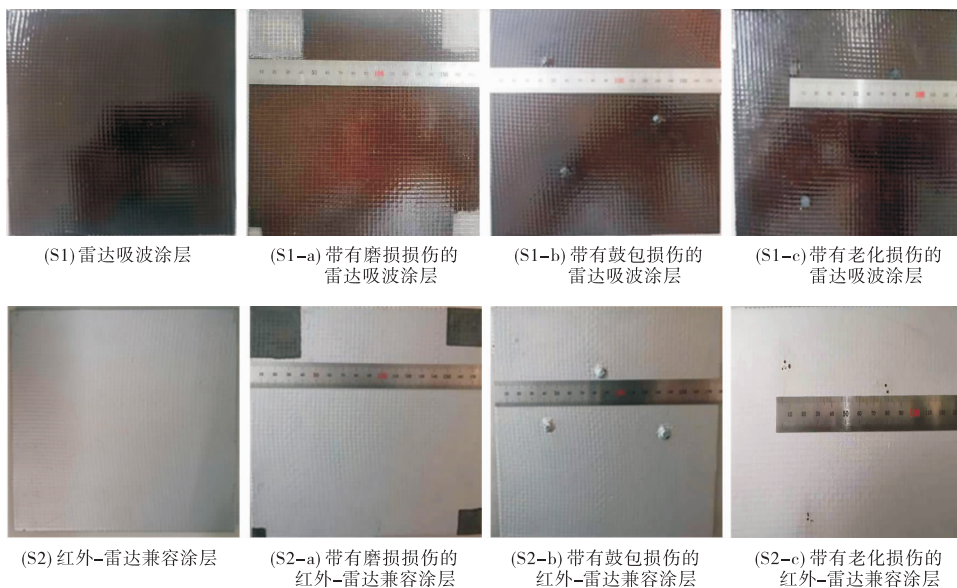


图 3 测试样板

3 实验结果及分析

3.1 反射率测量结果

3.1.1 完好的吸波涂层样板

本节采用弓形法对无损伤吸波涂层样品的反射

率曲线进行测试,如图 4 所示,可见反射率小于 -8 dB 的有效吸收带为 10~18 GHz,而红外-雷达兼容涂层的频率为 11.1~13.7 GHz。测量结果作为两种类型吸波涂层的基准,下面的 3.1.2 节将进行比较,以研究损伤模式对吸收性能的影响。

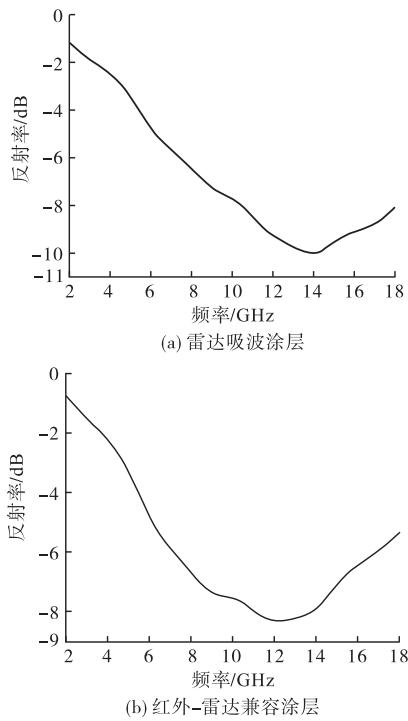


图4 标准吸波涂层样板的反射率

3.1.2 带有损伤模式的吸波涂层

最常发生在吸波涂层上的损伤模式是磨损、鼓包和老化。磨损损伤常发生在装备的迎风面或者活动舵的交汇处。鼓包损伤常由高温环境下的吸波涂层内的微小缺陷演变而成,带有鼓包损伤的涂层十分脆弱,极易在外力作用下脱落。同时,鼓包损伤也会造成的涂层局部不均匀和纤维网弯曲,影响吸波性能。老化损伤是由紫外线照射、海水盐雾腐蚀等多种外界因素引起的,老化损伤可能导致涂层表面甚至涂层内部发生化学变化,从而改变涂层的电磁参数,改变涂层的反射率。对于常受烈日照射的装备上的涂层,紫外线导致涂层结构变化和电磁参数变化的现象值得重视^[21]。下面,我们将研究3种损伤模式对吸波涂层吸波性能的影响。

弓形法是测量吸波涂层反射率最常用的方法。图5展示了3种不同损伤的标准吸波涂层的反射率的比较,测量频率范围为2~18 GHz,采样步幅为80 MHz。从图5(a)中可以看出,3种损伤模式的雷达吸波涂层样板的有效吸收频带分别为10.4~15.4 GHz、10.7~16.2 GHz、10.4~15.8 GHz,3种损伤模式下的吸收带与无损伤相比有所降低。对于图5(b)所示的红外-雷达兼容涂层,磨损损坏导致有效吸收带消失,影响最为明显。鼓包模式和老化模式的有效吸收频带分别为5.7~6.8 GHz、11.2~12.5 GHz。损伤模式的发生都伴随着有效吸收带的缩减和移动,表1列出了2种类型的吸波涂层的有效吸收带宽分数。

定义有效吸收带宽分数(k)为:

$$k = B_{\text{absorb}}/B_{\text{test}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: B_{absorb} 为涂层的有效吸收频带带宽; B_{test} 为测试频带的总带宽。设置有效吸收带宽分数可以直观地对比分析各涂层状态的吸波能力。

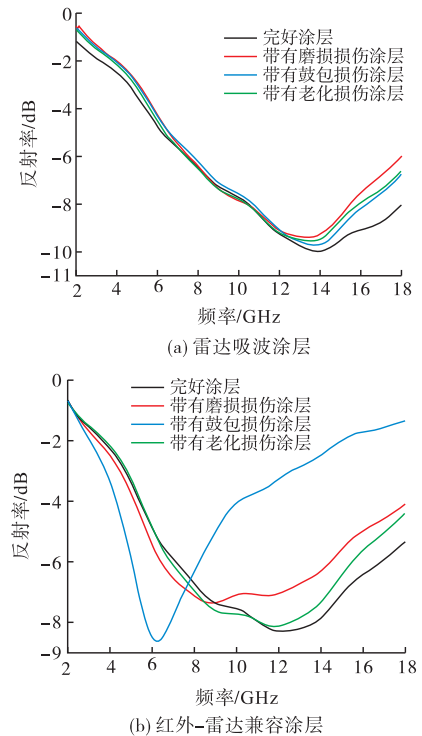


图5 带损伤模式的吸波涂层的反射率

表1 损伤模式下涂层有效吸收带宽分数

损伤模式	雷达吸波涂层/%	红外-雷达兼容吸波涂层
无损伤	52.8	21.2
磨损损伤	39.0	/
鼓包损伤	40.9	17.7
老化损伤	40.7	11.4

从图5、表1中可以得到,相较于完好涂层样板,具有磨损损伤的雷达吸波涂层和红外-雷达兼容涂层都具有相对较低的分数带宽。磨损损伤从两个方面影响吸波性能,一方面,粗糙的磨损表面会引起材料成分和均匀性的变化,改变涂层的波阻抗 Z ,进而导致阻抗失配。因此,随着波阻抗的变化,大部分入射电磁波在涂层界面反射。另一方面,涂层厚度随着磨损损伤而减小,这直接导致吸收的电磁能减少,从而最终导致反射率增加。相比之下,对鼓包、老化损伤的吸波性能的劣化比磨损损伤要弱,这是因为磨损导致吸波涂层的完全破坏,而鼓包和老化只是部分损伤。图5(a)和图5(b)所示的紫外线照射引起的老化损伤会引起对吸波性能影响相对较弱的化学变化。此外,应注意图5(b)中描绘的蓝色曲线,受伺服因素的组合效应影响,带有鼓包损伤的兼

容涂层样板的有效吸收带宽发生明显的频移。一方面,鼓包损伤的凸起位置会导致形成空气腔,其相对于未损坏情况的介电常数降低,导致有效吸收带的移动。另一方面,红外-雷达兼容涂层由不同于雷达涂层的特定成分组成,因此损伤对兼容涂层的性能影响将对相对于雷达涂层的更为严重。

3.2 相位测量结果

本节在涂层吸收能力较强的 8~18 GHz 频段下,测量各个涂层样板的相位,并对比完好涂层样板与损伤涂层样板间的相位变化,相位测量结果如图 6 所示。

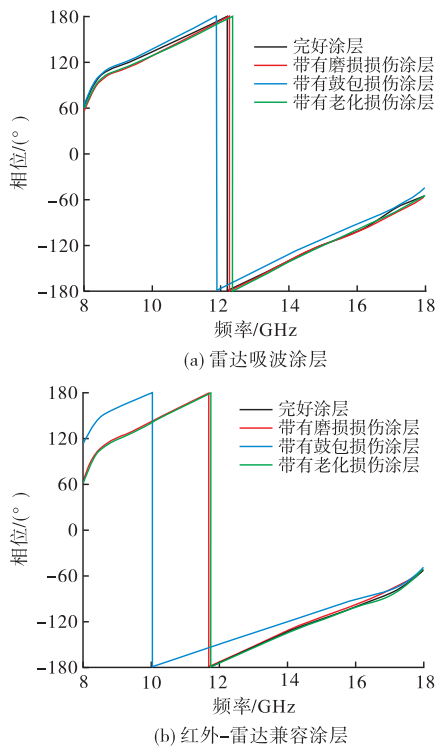


图 6 吸波涂层的相位

由图 6 的相位对比数据可以看出,对于雷达吸波涂层,鼓包损伤造成了明显的相位前移,整体的前移辐角约为 8.65° ,且随频率下降,相位差逐渐缩小;而磨损损伤与老化损伤在相位上略落后于完好涂层样板,落后辐角分别为 2° 、 4° 。相似地,对兼容涂层而言,鼓包损伤造成了约 40.39° 的前移,且随频率上升,相位差逐渐缩小;而磨损损伤与老化损伤在相位上与完好涂层基本接近,略有落后,落后辐角在 1° 以内。

对于磨损损伤,理论上磨损后的涂层的相位应落后完好涂层,由于损伤面积不大、涂层本身厚度不及电磁波波长 $1/10$,因此相位变化不明显。而鼓包损伤损伤处的涂层的明显凸起,使得损伤处较早地反射电磁波,因此造成了较为严重的相位前移。而老化损伤往往不会导致涂层形变,因此相位通常变化不大。

3.3 微波成像测量结果

根据微波成像设备的可用频段和 2 种涂层样品的吸收频带,我们分别选取了 11 GHz 和 14 GHz 频率下不同损伤类型的雷达吸波涂层样品的微波图像,见图 7。对比图 7(b)所示的四角磨损损伤与图 7(a)所示的完好涂层的散射图像,可以看出 4 个损伤角的散射区域向外延伸较强,且大于完好的散射区域。从图 7(c)和图 7(d)所示的散射分布图像中可以看出,在损伤区域有较少的散射强度增强。但由于散射耦合产生的杂波和不均匀的吸收特性,鼓包和老化损伤的强散射效应很难从整体涂层样板中识别出来。

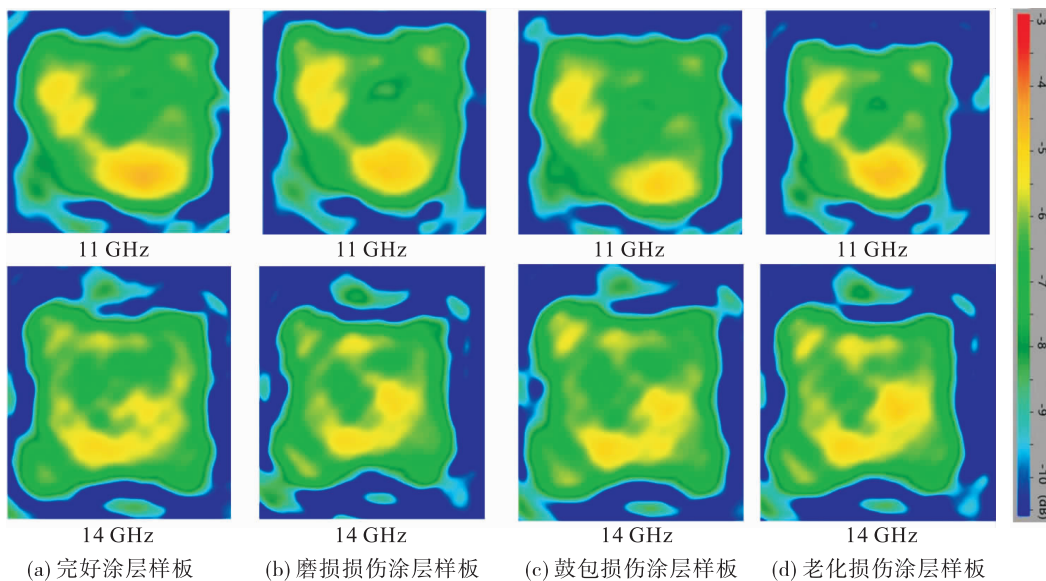


图 7 不同频率下吸波涂层的微波图像

4 结论

本文同时从理论和实验的角度探讨了吸波涂层常见的损伤模式及其对隐身性能的影响。定性和定量分析表明,在2~18 GHz频段,磨损损伤对隐身性能的影响最严重:雷达吸波涂层的有效吸收频带占比由52.8%下降至39%;兼容涂层的有效吸收频带占比由21.2%下降至0。这是因为它会引起吸波涂层的严重损伤,这将进一步导致阻抗失配和涂层能够吸收的电磁能量急剧下降。同时,从散射分布图像中的磨损损伤部位散射强度增强和成像中的形状外扩的现象也可以得出同样的结论。对于鼓包和老化损伤,由于物理和化学反应,对吸波涂层的影响比较复杂,但不论从反射率测量结果还是微波成像结果来看,这两种损伤模式下涂层的隐身性能的劣化程度都弱于磨损损伤。值得注意的是,鼓包损伤会给涂层带来十分严重的相位前移,虽然相位不是传统的吸波涂层性能检测参数,特别在应对相控阵雷达这类带有移相器件的探测设备时,有必要将涂层损伤与相位变化联系在一起。

在以后的研究中,一方面将结合阻抗匹配和材料损耗角正切,分析吸波涂层损伤对斜入射条件下的电磁波影响;另一方面将结合实验测量和电磁仿真计算,研究对涂覆涂层的曲面目标的发射率等参数的测量技术。

参考文献

- [1] 阮颖铮,冯林,邓书辉. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998:254-313.
- [2] 邢丽英,蒋诗才,李斌太,等. 隐身材料[M]. 北京:化学工业出版社,2004:102-133.
- [3] RAO G A, MAHULIKAR S P. Integrated Review of Stealth Technology and Its Role in Airpower [J]. *Aeronautical Journal*, 2002, 106(1066): 629-642.
- [4] 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.
- [5] LU J H, WANG R F. The Implementation Method and the Development Tendency of Infrared Stealth Technology [C]//AOPC: Optical & Optoelectronic Sensing & Imaging Technology. [S. l.]: International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [6] 保石,顾文慧,张晓光. 红外雷达复合隐身技术探讨[J]. *光电技术应用*, 2009, 24(4): 29-31, 50.
- [7] 班国东,刘朝辉,叶圣天,等. 新型涂覆型雷达吸波材料的研究进展[J]. *表面技术*, 2016, 45(6): 140-146.
- [8] KUMAR N, VADERA S R. *Stealth Materials and Technology for Airborne Systems* [C]// *Aerospace Materials and Material Technologies*. Singapore: Springer, 2017: 519-537.
- [9] 郑国禹,陈亮. 雷达吸波涂层失效分析及修复技术研究[J]. *表面技术*, 2011, 40(6): 91-93.
- [10] 杨亮,王亦菲,张彦素,等. 雷达吸波涂层损伤及修复研究进展[J]. *新技术新工艺*, 2009(1): 97-100.
- [11] 殷宗莲,周学梅,王俊芳. 吸波涂层失效因素研究[J]. *表面技术*, 2015, 44(7): 76-80, 102.
- [12] 王新坤,封彤波,吴灿伟,等. 雷达吸波涂层失效模式及原位修复[J]. *表面技术*, 2011, 40(4): 72-75.
- [13] WANG X K, SHI Z W, XU B S, et al. Study of Wave-Absorbing Coating Failure by Electrochemical Measurements [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(11): 7086-7096.
- [14] 张洪彬,闫杰,王忠. 国内外隐身涂层环境适应性研究发展现状[J]. *环境技术*, 2011, 36(5): 33-37.
- [15] FENG Y B, QIU T, SHEN C Y, et al. A Simple Measuring Method of Reflectivity for Radar Absorbing Material [C]// *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*. Suzhou: [s. n.], 2005, 2: 3-5.
- [16] FISCHER B, LAHAIE I. Recent Microwave Absorber Wall-Reflectivity Measurement Methods Measurements Corner [J]. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2008, 50(2): 140-147.
- [17] 中国人民解放军总装备部. 雷达吸波材料反射率测试方法: GJB 2038A—2011 [S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2011: 1-9.
- [18] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005: 123-182.
- [19] 张研,王保平,方阳,等. 基于目标场景结构化稀疏重构的三维雷达成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2021, 3(4): 1185-1191.
- [20] MOULDER W F, KRIEGER J D, MAJEWSKI J J, et al. Development of a High-Throughput Microwave Imaging System for Concealed Weapons Detection [C]// *IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology*. Waltham: IEEE, 2016.
- [21] 王国建,孙耀宁,蒋万乐,等. 紫外线对玻纤环氧树脂基酯树脂基复合材料性能的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2017, 25(3): 46-51.

(编辑:姚树峰)