

引用格式: 余俊, 赵现伟, 李培, 等. 飞机雷达罩涂层材料研究进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(4): 56-66.

YU Jun, ZHAO Xianwei, LI Pei, et al. Research progress on coating materials for aircraft radome[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(4): 56-66.

飞机雷达罩涂层材料研究进展

余 俊¹, 赵现伟¹, 李 培¹, 刘凯巡¹, 张 泽¹,
陈海宁¹, 刘慧丛¹, 叶 辉^{2*}, 李卫平^{1*}

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191; 2. 中国运载火箭技术研究院 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

摘要: 雷达是飞机的“眼睛”, 也是飞机制导的重要部件, 须通过雷达罩进行防护。由于雷达部件主要位于飞机头部, 服役环境复杂, 雷达罩材料须具备高透波、耐雨蚀抗冲击、抗静电等特性。然而, 雷达罩材料主要为玻璃钢复合材料, 其耐雨蚀和抗静电性能差, 雨水侵蚀和静电积聚会干扰雷达信号传输, 影响飞行安全。因此, 采用耐雨蚀抗静电的涂层是有效的防护手段。本文重点综述飞机雷达罩涂层系统的特点和国内外研究现状, 并展望涂层材料的发展和研究方向。作者根据飞机雷达罩的服役环境特点总结涂层的性能要求, 并对耐雨蚀抗静电涂层系统的结构特点、防护机理及国内外研究进展进行分析。国内对飞机雷达罩涂层材料的研究起步较晚, 涂层经过非弹性涂层到聚氨酯弹性涂层的迭代, 又在聚氨酯树脂上进一步改性优化, 提高了耐候性。而在抗静电涂层方面, 还面临导电性能与介电性能的平衡以及涂层性能稳定性等难题。最后, 简要分析飞机雷达罩涂层材料的发展, 并建议在未来从涂层材料性能随环境因素的变化规律、涂层材料的损伤失效机制和涂层材料的多功能性兼容三个方面进行深入研究。

关键词: 飞机雷达罩; 涂层材料; 耐雨蚀; 抗静电; 介电性能

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000138

中图分类号: V255+.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)04-0056-11

Research progress on coating materials for aircraft radome

YU Jun¹, ZHAO Xianwei¹, LI Pei¹, LIU Kaixun¹, ZHANG Ze¹,
CHEN Haining¹, LIU Huicong¹, YE Hui^{2*}, LI Weiping^{1*}

(1. College of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Radar serves as the “eye” of aircraft, playing a crucial role in aircraft guidance and thus necessitating protection by radomes. Given that radar components are primarily positioned at the aircraft’s nose and work in a complex environment, radome materials must exhibit high wave transparency, rain erosion resistance, impact resilience, and antistatic properties. However, the prevailing radome material, glass fiber reinforced plastic composites, falls short in terms of rain erosion resistance and antistatic performance. Rain erosion and electrostatic accumulation can disrupt radar signal transmission, ultimately compromising flight safety. Consequently, the application of rain-erosion-resistant and antistatic coatings emerges as an effective protective measure. This paper reviews the characteristics and current research status of aircraft radome coating systems globally and domestically, while also projecting the development and research directions of coating materials. Initially, the paper analyses the performance requirements for coatings based on the unique service environment of aircraft radomes. It then delves into the structural characteristics, protection mechanisms, and international research advancements of rain-erosion-resistant and antistatic coating systems. Domestic research into aircraft radome coating materials has a relatively late onset. These coatings have evolved from inelastic formulations to polyurethane

elastic coatings, with further refinements and optimizations to the polyurethane resin enhancing weather resistance. In the realm of antistatic coatings, ongoing challenges include balancing electrical conductivity and dielectric properties while ensuring coating performance stability. Conclusively, the paper briefly analyzes the development key point of aircraft radome coating materials. It points out for future in-depth research focusing on three areas: the correlation between coating material properties and environmental factors, the damage and failure mechanisms of coating materials, and the compatibility of multifunctional coating materials.

Key words: aircraft radome; coating materials; rain erosion resistance; antistatic property; dielectric property

飞机雷达位于机身头部,是飞机正常飞行和制导的重要部件。为减轻质量和避免干扰雷达波的正常传输,飞机雷达罩通常采用透波、高比强度和比刚度的玻璃纤维增强树脂材料(glass-fiber-reinforced polymer, GFRP)制造。由于GFRP是绝缘体,雷达罩在与高速气流摩擦及大气电离层的作用下,表面容易产生静电,当静电荷积聚到一定程度而无法有效释放时,会产生静电放电和静电屏蔽现象,甚至造成树脂的静电烧蚀,干扰雷达系统的正常运行。此外,在飞行过程中,雷达罩体还会面临雨水侵蚀、沙尘等固体颗粒冲击、紫外辐照等环境因素,罩体由此产生的损伤、开裂、材料老化和雨水侵蚀等也会影响雷达信号的传输,因此飞机雷达罩须具备耐雨蚀抗冲击、抗静电和优良的耐候性^[1]。

涂层防护通常是最简单有效的防护手段,飞机外表面大部分区域必须通过涂覆涂层进行防护,以抵抗复杂的服役环境,保障基体材料的服役可靠性。飞机雷达罩对透波性有明确要求,以减小雷达信号的衰减。因此飞机雷达罩外表面需要涂覆高透波、耐雨蚀抗冲击、抗静电性能优良的多功能复合涂层^[2]。本工作主要对雷达罩涂层的服役环境和性能要求、耐雨蚀抗静电涂层系统的研究进展与发展进行阐述和展望。

1 雷达罩涂层材料性能要求

飞机雷达罩具有透波性好、力学性能优异的特点,被称为雷达系统的“电磁窗口”^[3]。然而,作为雷达系统中最重要防护装备,雷达罩不仅要保护雷达系统免受风霜雨雪、沙尘等外来物质的侵蚀,还要能够经受得住紫外线辐射、盐雾、酸碱、冷热交替等多种环境考验。服役环境的复杂性对飞机雷达罩性能提出高要求,而雷达罩在飞行过程中产生的静电放电和静电屏蔽效应亦无法忽视。此外,随着飞行速度的不断提升,高马赫速度下的气动加热对雷达罩的抗冲蚀及耐高温等性能提出更

高的要求。仅凭GFRP无法满足耐环境和抗静电等性能要求,而在此基础上通过涂层系统进行防护通常是最经济有效的手段。

根据飞机雷达罩的服役环境特点及防护需求,防护涂层应具有以下性能:

(1)低介电常数和介电损耗,良好的透波性,对雷达信号的传输影响越小越好。

(2)耐雨蚀抗冲击,即具有良好的力学性能,如抗拉强度高,断裂伸长率大,避免开裂,抵御高速气流、雨滴、冰雹、沙尘等的冲击。

(3)良好的抗静电性能,防止静电积聚而产生的静电放电和静电屏蔽。

(4)耐海洋环境侵蚀,即耐盐雾、耐湿热、耐紫外老化等。

(5)耐温性能,能够抵御在高飞行速度下一定的气动加热。

在实际研究与应用中,材料的介电性能常用于衡量材料的透波/隐身性能,其主要考虑材料的介电常数和损耗角正切值两项指标^[4]。雷达罩涂层不但要具有良好力学性能和环境耐久性,还需要低的介电常数和损耗角正切,以最大程度减小雷达波的损耗,满足透波要求,这对雷达罩涂层的设计研发提出挑战。制备多功能复合和能够长效服役的防护涂层仍是国内外的研究热点。

2 耐雨蚀抗静电涂层系统

为了满足飞机雷达罩的服役需求,雷达罩表面通常采用耐雨蚀抗静电涂层系统,如图1^[5]所示,主要由底漆/耐雨蚀涂层/抗静电涂层组成。底漆通常选用环氧树脂,其作用是对GFRP进行封孔和防潮保护,增强耐雨蚀涂层与基材间的附着力,具有附着力强、对底材的封闭性好、耐腐蚀和耐湿热的特点;中间层为弹性耐雨蚀涂层,具有耐雨蚀、抗沙尘冲击等特点,与底漆间的附着力高,相容性好;面层为抗静电涂层,一般与防雨蚀涂层属同类型树脂体系,以解决相容性问题并提高层间附着强度,同

时具备良好抗静电、耐候、高透波率和对电磁波干扰小的特性^[6]。波音 737NG 飞机正是通过在雷达罩外表面涂刷多重涂层(包含底漆、抗雨蚀漆、防静电漆等)实现抗静电与耐雨蚀防护^[1]。

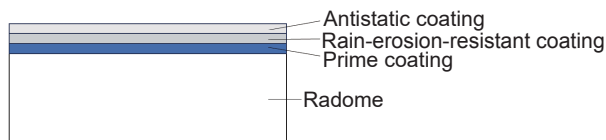


图1 飞机雷达罩耐雨蚀抗静电涂层系统示意图^[5]

Fig. 1 Schematic diagram of rain-erosion-resistant and antistatic coatings system for the aircraft radome^[5]

在飞机雷达罩防护涂料方面,美国、俄罗斯等国家走在前列,他们已将相关涂料广泛用于各种类型飞行器 GFRP 结构部件上,并制定了相应的军用标准^[7]。国内起步较晚,自 20 世纪 80 年代以来,研制的涂层系统经历了由非弹性涂层到聚氨酯弹性涂层的转变和发展,以解决非弹性树脂涂层质地硬脆和在气流、雨水、沙尘等冲击下易脱落的问题;20 世纪 90 年代以来,发展出芳香族聚氨酯弹性涂层系统,提高了涂层的弹性及韧性,同时也提升了雷达罩耐雨蚀抗冲击能力,但由于芳香族聚氨酯长期受紫外线照射后易老化分解,因此涂层耐候性较差^[8]。近年来,随着技术的不断发展,国内研究单位制备出耐候性更好的脂肪族聚氨酯体系,取得不错的进展,但在涂层介电损耗方面,随着雷达罩对涂层介电性能要求的进一步提高,目前与国外仍有一定差距^[9]。

2.1 耐雨蚀涂层

雨滴的冲击会使雷达罩外表面粗糙度逐渐增大,产生的微裂纹又成为雨水渗入的通道,使材料性能逐步恶化。有证据表明,聚合物体系中水分的存在可通过影响材料的相对介电常数和损耗角正切进而影响雷达波透射率^[10]。因此,雷达罩需要采用透波性良好的耐雨蚀涂层。

2.1.1 雨蚀及固体颗粒侵蚀机理

①雨蚀机理

当雨滴以一定的法向角度和速度撞击材料表面时,材料吸收的能量可能会使材料本身发生变化,导致裂缝和其他类型的侵蚀破坏。撞击后的冲击波也会穿过多层材料,影响基体性能。影响雨水侵蚀的因素包括冲击速度、冲击角度、液滴大小、液体密度、声速、材料的力学性能和几何特征等。在雨蚀过程中通常包含以下 5 个阶段^[11-12]:

(a)孵化阶段——表面不受影响,未观察到明显的质量损失。

(b)加速阶段——侵蚀速率迅速增加到最大值。

(c)最大速率阶段——侵蚀速率保持不变。

(d)减速或衰减阶段——侵蚀速率下降到最大速率的 1/4 或 1/2。

(e)终端阶段或稳定阶段——侵蚀速率再次保持不变。

然而,在大多数情况下,单个液滴撞击产生的应力不足以引起侵蚀损伤。在同一地点需要液滴多次重复撞击,以类似于疲劳破坏的方式引起侵蚀损伤^[13]。雨滴撞击物体表面会导致物体表面产生接触压力,并触发能量波在保护层中传播。这将引起起始损伤、材料退化、疲劳,进而导致涂层开裂、裂纹发展、表面粗化、脱粘和剥落^[14]。

②固体颗粒侵蚀机理

除了雨水侵蚀,固体颗粒侵蚀也是造成表面侵蚀的重要因素。固体颗粒侵蚀是由固体颗粒的反复冲击引起的材料从表面逐渐损失的现象。在飞行过程中,飞机外表面受到环境中固体颗粒的影响形成表面侵蚀。

当混合在流体中的硬固体颗粒撞击表面时,会发生固体颗粒侵蚀。颗粒的动能通过材料的塑性切削、断裂、生热、相变等多种机制在整个过程中全部或部分耗散^[15]。这些机制受侵蚀颗粒的密度、形状、冲击速度、冲击角度和涂层表面特性等因素的影响。

固体颗粒对材料损伤的机理通常有两种,即延性机理和脆性机理^[15]。延性机理是指材料的去除是通过塑性切削进行的,最大的侵蚀速率发生在低入射角,通常在 20°到 40°之间^[15-16];脆性机理是指在正常的冲击角度下,大部分动能传递到表面并通过裂纹的萌生、扩展和材料断裂而耗散。通常,金属和聚合物的损伤表现出延性机理,而陶瓷则表现出脆性机理。

如前所述,飞机雷达罩通常采用弹性聚合物基复合涂层。在聚氨酯基弹性涂层中,固体颗粒侵蚀始于表面聚合物软段的塑性变形,然后是聚合物硬段的脆性裂纹。这些裂纹扩展并相交,导致涂层断裂和剥落^[12]。

2.1.2 耐雨蚀涂层研究进展

20 世纪 50 年代,美国研制出用于雷达罩体防护的氯丁橡胶涂料,但涂层耐雨蚀性较差,20 世纪 60 年代中期,研制出具有良好耐雨蚀性且能长期耐温 150 ℃ 的弹性聚氨酯涂层,广泛用于飞行速度小于 2 马赫的超声速飞机雷达罩的防护。然

而,聚氨酯耐温性有限,当环境温度为 205 ℃ 时,聚氨酯涂层迅速失去弹性及防雨蚀能力。80~90 年代,美国发展了含氟弹性体耐雨蚀涂料,在温度 200~260 ℃ 范围内具有长期热稳定性^[7]。俄

罗斯在飞行器玻璃钢部件上也采用性能优异的防雨蚀涂料,如 ΦΠ-5105 漆、KЧ-5230 磁漆等。表 1^[7,17] 为美国和俄罗斯的几种防雨蚀涂料及主要性能。

表 1 国外几种耐雨蚀涂料及性能比较^[7,17]
Table 1 Comparison of several foreign rain-erosion-resistant coatings and their properties^[7,17]

Properties	US			Russia	
	MIL-C-7439B	MIL-C-83231	AF-C-934	ΦΠ-5105	KЧ-5230
Dielectric constant, ϵ	3.11	3.16	3.77	3-5	≤ 6.0
$\tan\delta$	0.047	0.059	0.055	≤ 0.03	≤ 0.15
Transmittance/%	98.8	93.4	94.0		
Temperature limit/℃	93	149	260	300	200
Constructability	Hard	Medium	Medium	Hard	Hard
Peel strength	Low	Moderate	High		

聚氨酯树脂的特点是分子中含有氨基甲酸酯基,其分子链段由“软段”与“硬段”两部分组成,从而表现出良好的柔韧性和耐酸碱稳定性,故广泛应用于雷达罩防护层^[18-20]。国内早期耐雨蚀抗静电涂料系统采用芳香族聚氨酯弹性材料作为涂层基体,但由于在紫外光照射下苯环会转变为发色的醌式结构,导致涂层变色、粉化、脱落,会降低涂层系统的耐老化性能和力学性能;采用的莫卡(MOCA)固化剂还存在致癌风险。但近年来发展的氟改性脂肪族聚氨酯涂层体系有效弥补了不足,提升了涂层的耐候性^[9]。狄志刚^[7]将不同官能度的聚己内酯、不同分子量的聚碳酸酯及相容性好的氟树脂用作体系的软段,使用脂族二异氰酸酯(IPDI)和小分子多元醇三羟甲基丙烷(TMP)作为体系的硬段,制备出具有良好耐候性、耐热性、耐水性和力学性能的可分别作为固化剂和基料的—NCO 封端固化剂和—OH 封端聚氨酯树脂,并选择合适的颜填料制备出新型航空防雨蚀涂料和配套抗静电涂料产品,具有良好的耐候性和力学性能,达到美国、俄罗斯等发达国家的技术水平,且在施工性上更具优势。

除了对聚氨酯树脂及其固化剂进行改性制备外,树脂中嵌入增强颗粒通常能够有效提升涂层的抗冲蚀能力。Jespersen 等^[21]通过建模计算分析颗粒和纤维增强的聚氨酯涂层的抗侵蚀性,研究结果表明,强韧弹性弯曲纤维嵌入树脂网络使涂层具有更好的阻尼和能量耗散作用,而嵌入颗粒可增加辅助的波散射渠道,并在紧密间隔的纤维之间的高应

力区域产生黏弹性能量耗散,从而使涂层获得更好的抗侵蚀性能。Johansen 等^[22]通过单点冲击疲劳测试方法研究石墨烯或混合纳米颗粒(石墨烯/二氧化硅)增强聚氨酯涂层的抗侵蚀性能,结果表明嵌入涂层中的纳米颗粒能够散射和反射由雨滴冲击引起的应力波,使复合涂层具备更好的抗侵蚀性能,提高了涂层的使用寿命。然而,增强颜填料的加入势必会影响涂层的介电性能,加入量过多通常导致介电常数增加和介电损耗的增大,而功能化填料如空心微球、聚四氟乙烯微粉等可有效降低涂层介电常数和介电损耗^[23]。采用低介电损耗填料对于涂层的增韧补强具有促进作用,可以提升涂层的抗侵蚀能力,同时降低对雷达信号传输的影响。

2.2 抗静电涂层

飞机在飞行过程中,由于大气电离层的影响以及高速气流的摩擦,易使绝缘表面带电,出现静电放电和静电屏蔽,干扰雷达信号的传输,也可能造成天线系统的损坏,给飞机航行带来不可估量的风险^[24]。这就需要涂覆抗静电涂层以避免静电积聚带来的不利影响。

2.2.1 涂层抗静电机理

绝缘表面抗静电通常采用抗静电涂层实现。抗静电涂层通常通过在树脂基体中分散导电填料以实现抗静电功能。根据 F-Butch 提出的无限网链理论,当涂料中导电粉体的含量达到逾渗阈值形成导电网络,涂层便具备良好的导电性^[25-26]。表面电阻作为抗静电涂层最重要的性能指标,国内参照 GJB 3531A—2018 将抗静电涂层的表面电阻规定

为 0.5~15 MΩ。

对于复合抗静电涂层来说, 填料的性能极大地影

响着抗静电涂层的适用性。表 2^[27-28] 比较了几种类型的导电填料应用于雷达罩抗静电涂层的潜在影响。

表 2 不同类型导电填料在雷达罩抗静电涂料中的潜在影响^[27-28]
Table 2 Potential effects of different types of conductive fillers on radome antistatic coatings^[27-28]

Fillers type	Materials	Impact, advantages and disadvantages
Metal	Au/Ag/Cu/Zn powder, etc	Good conductivity, large specific gravity and easy to settle, high degree of scattering and reflection of electromagnetic waves
Carbon material	Carbon black, graphite, graphene, carbon nanotubes, carbon fiber, etc	Good conductivity, monotonous color (black), electromagnetic shielding (with excessive addition)
Doped metal oxide	Indium tin oxide (ITO), aluminum-doped zinc oxide (AZO), gallium-doped zinc oxide (GZO), antimony tin oxide (ATO), etc	Light color, adjustable resistivity, high stability, adjustable color

如表 2 所示, 金属填料虽然导电性很好, 但由于对电磁波的散射和反射程度较高, 降低了雷达罩的透波性能, 对雷达天线系统的信号传输性能不利, 同时也存在密度大易沉降、易被氧化、防腐蚀性性能差等问题。碳系填料由于成本低, 原料易得, 应用广泛, 但机载雷达罩的碳系抗静电涂层为黑色, 颜色单调, 且电阻率若过低亦会产生电磁屏蔽而干扰电磁波的传输^[28]。掺杂导电金属氧化物的环境适应能力强, 电阻率具有可调性, 且耐腐蚀、环境稳定性好, 颜色可调, 但如何有效调控其导电性, 同时有效降低涂层的介电损耗, 避免干扰雷达信号的传输, 是需要进一步探究的问题。

2.2.2 抗静电涂层研究进展

目前, 国外对导电粉体的研究已十分成熟且广泛应用。20 世纪 90 年代以来, 德、美、日等国家相继研制出金属氧化物系导电填料。金属氧化物粉末能够有效弥补金属填料易氧化腐蚀和碳系填料深色单调的不足, 同时又能起到良好的抗静电效果, 得到迅速发展和应用^[28]。

自 20 世纪 50 年代以来, 国外对抗静电涂层开展了广泛的研究。美国发展出系列抗静电雷达罩涂料并制定出军用标准, 如前面提到的氯丁橡胶类 MILC-7439B、聚氨酯类 MIL-C-83231、氟橡胶类 AF-C-934 等, 这些涂层也具有优良的抗静电性能^[17]。20 世纪 80 年代, 美国斯坦福研究所开发出飞机雷达罩白色抗静电涂料, 形成的涂层不仅能反射大部分热效闪光环境中的可见光波和红外波的能量, 而且能起到静电释放的作用, 使飞机雷达罩在有害的热效闪光环境中正常工作。20 世纪后期, 美国科学家在聚氨酯等树脂中添加导电纤维研制抗静电涂料, 获得的涂层抗静电性能优异, 广泛应用于抗静电领域^[25]。

我国的雷达罩抗静电涂料研究始于 20 世纪

80 年代, 经过不断发展形成浅色雷达罩抗静电涂料和新型氟改性脂肪族聚氨酯弹性抗静电涂料, 基本满足国内各种型号飞机的使用要求^[29]。然而, 随着飞机飞行速度的提高, 对涂层性能又提出更高要求^[27]。

此前, 针对国内雷达罩抗静电涂层存在的耐磨性、柔韧性、耐老化性较差和结合力较差、易脱落等问题^[27], 姜卫丽等^[30] 研制出含氟聚氨酯树脂共混二氧化钛、导电纳米掺锑二氧化锡 (ATO) 和聚四氟乙烯微粉制备的雷达罩抗静电防腐耐磨涂料, 所形成的涂层不仅抗静电性、弹性及附着力好, 同时还具有很好的防腐蚀性、耐老化和耐磨性, 环境稳定性高。杨帆^[31] 以介电性能良好的环氧树脂 (EP) 共混纳米 ATO、多壁碳纳米管 (MWCNTs) 和低损耗填料空心玻璃微珠 (HGB), 制备出 ATO/HGB/EP、MWCNTs/HGB/EP 复合涂料, 通过调节导电填料和低损耗填料之间的配比, 优化填料在基体中的分散状况, 实现对涂层抗静电性能和介电性能的调控。宁亮等^[32] 研制出以特种导电碳纤维、导电云母粉、纳米 ATO 为主要导电介质的雷达罩用抗静电涂料, 以特种碳纤维部分取代导电粉, 形成“球状-片状-针状”的导电模式, 其中碳纤维最佳用量为 2.5% (质量分数), 导电粉体的用量减少但导电效率提高, 有效降低了涂层的介电性能。这些研究表明, 通过树脂和填料两个渠道采取多种改性和复合方式, 制备的复合涂层具备更好的功能可调性, 可以满足雷达罩抗静电涂层体系的使用需求。

此外, 涂层的抗静电失效问题也值得关注。飞机表面抗静电涂层的失效主要是由于冲蚀磨损所致, 老化对涂层失效起到一定的促进作用, 而涂层冲蚀磨损失效主要是由涂层断裂伸长率低, 弹性不足, 无法抵抗冲击时的剪切变形所致^[33]。李旭东

等^[34]采用有限元法对比飞机起飞过程中雷达罩树脂型抗静电涂层与橡胶型涂层受沙尘冲击后的切向和法向的位移变化,表明沙尘冲击角度和沙尘粒径是雷达罩抗静电涂料丧失抗静电效果的重要原因。Fan等^[5]通过加速老化、磨料实验并结合有限元分析,获知非弹性和弹性抗静电涂层的失效是由颗粒侵蚀引起的,涂层的老化加速了涂层的失效,而弹性涂层由于具有较高的断裂伸长率和良好的弹性变形,因此抗冲蚀性能优于非弹性涂层。此外,张泽^[35]研究了水分对涂层电性能的影响,研究表明对于以碳纤维为填料的抗静电涂层,湿度对于电阻率的影响很大,吸潮会使纤维电阻率升高,进而影响涂层的性能稳定性,并提出用2%~6%(质量分数)的硅烷偶联剂KH1631水解液处理碳纤维,使其表面有效接枝有机硅树脂,形成紧密的包覆层,由此可提高纤维的表面惰性,并保证纤维在树脂中的分散性。改性后的碳纤维分散于聚氨酯树脂中,提高了涂层体系电性能的稳定性,同时兼顾涂层的力学性能和耐湿热稳定性。

随着航空装备的发展需要,雷达罩防护涂层多功能一体化成为研究热点^[27],不仅要求涂层具备抗静电、透波、耐雨蚀、良好力学性能等多性能的耦合,而且要求涂层具有良好的环境耐久性。尤其随着高马赫数飞机的发展,气动加热带来的热效应对雷达罩防护涂层系统的耐温性能提出更高要求。此外,热效应将显著增加飞机外表面的红外特征信号,因此雷达罩涂层系统也将更加关注对红外隐身功能的兼容性^[36]。

3 飞机雷达罩涂层材料发展

3.1 耐海洋环境侵蚀

随着我国舰船和航母技术的发展,海陆空技术的全面融合,飞机雷达罩必然面临更长时间的海洋高盐、高湿热环境服役挑战,这对雷达罩耐雨蚀抗静电涂层材料的性能提出更高的要求。

聚氨酯树脂作为雷达罩防护涂层基体材料,其力学性能好但是化学稳定性较差,还存在紫外线降解等问题。因此,通常可通过聚氨酯改性提高树脂的耐候性。其中,F、Si元素改性的聚氨酯具有低表面能、良好的介电性能以及突出的耐候性和化学稳定性^[37],可以提高和稳定涂层在海洋环境中的电传输效率。朱晓丰等^[38]以脂肪族多元醇、全氟聚醚、脂环族异氰酸酯为主要原料,通过在树脂合成中加入羟基全氟聚醚引入C—F键,在固化剂的合

成中加入羟基硅油引入Si—O键,制备出氟硅改性聚氨酯体系,该体系涂层的电性能、使用耐久性优于未改性的涂层体系,能够满足飞机雷达罩外表面防护的技术要求。

对于抗静电涂料而言,在复杂环境下电性能的稳定性和耐久性亦非常重要^[25]。在常规环境下,涂层电性能一般能够稳定在一个合理的区间,而特殊服役环境一旦使抗静电涂料的电阻发生漂移,则无法满足雷达罩抗静电需求。相较于普通的大气环境,海洋环境的温度、湿度、盐雾含量更高,对材料的电性能影响更大。盐雾腐蚀过程中渗透的盐离子往往会与体系中的导电粉体共同作用,导致抗静电涂层无法发挥抗静电效果,甚至影响雷达性能。涂层电性能的稳定性和耐久性在需要长时间服役的应用场景中显得更为重要。万耀明等^[8]以新型饱和聚烯烃改性的弹性聚氨酯为基体树脂,复配导电填料制备抗静电涂层。涂层可室温固化,具有良好的工艺性,且涂层经过热水浸泡以及盐雾后,力学性能及电性能良好。由于饱和聚烯烃改性赋予聚氨酯树脂优异的疏水及耐水性能,并且提高了涂层的强度及弹性,从而增强了涂层的防雨蚀抗冲刷性能,使涂层在高湿热、高盐雾环境下能够抵御富盐溶液的渗透,避免对涂层电性能产生影响。

3.2 耐高温

随着飞机飞行速度的不断提高,气动加热也愈发严重,对雷达罩防护材料的耐温性能提出更高的要求。

为了确保雷达罩体内通信设备的正常工作,雷达罩材料必须具有适当的介电特性(介电常数 $\epsilon < 5$,介电损耗 $\tan\delta < 0.01$),且介电特性具备良好的温度稳定性。其次,由于超声速/高超声速下的气动载荷和气动加热,飞机雷达罩需要在更高的工作温度下承受更大的载荷和热冲击,从而要求其具备优异的力学性能和热稳定性。因此,为了确保雷达天线在恶劣服役环境中使用时结构和性能的稳定性和可靠性,雷达罩材料必须具有优异的物理和化学稳定性,例如耐雨蚀和抗氧化性。此外,雷达罩的气动外形和壁厚直接影响电磁波的透过率,因此对雷达罩材料的可加工性也提出一定的要求^[39-40]。

对于有机防护涂层,有机硅、氟橡胶、聚酰亚胺等树脂均具有良好的耐温性能,适用于较高温度($< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$)下的使用需求。然而,在长时高温下,或温度接近树脂材料耐温极限,热分解、碳化等问题势必也会影响雷达罩的透波性,涂层只能提供短时防护,无法长时有效地对抗高温环境侵蚀。目前,

关于雷达罩有机耐高温防护涂层技术还不成熟,普通聚氨酯涂层体系无法满足应用需求,能够用于雷达罩的耐高温防护涂料主要集中于有机氟和有机硅树脂涂料品种^[9,41]。

3.3 兼顾红外隐身

飞机在高速飞行的过程中会产生气动加热问题,导致雷达罩体表面温度升高,使其成为红外成像探测系统捕捉的对象。为此,雷达罩涂层需要兼顾红外隐身性能^[24]。

随着隐身技术的不断发展,国内外对于红外隐身材料的研究越来越广泛。红外隐身要求材料具备高反射低吸收特性,而雷达罩要求低反射高透过,红外隐身涂层的高反射可能会给雷达罩的透波性能造成不利影响^[42-43]。

有机树脂黏结剂与无机黏结剂相比具备更好的柔韧性,因而在红外隐身涂层中广泛应用。表3^[44]为几种应用较为广泛的有机树脂黏结剂及其在8~14 μm波段内的红外透过率对比。其中,三元乙丙橡胶(EPDM)红外透过率最高,但在实际应用当中,三元乙丙橡胶与填料之间相容性较差,相比之下,环氧树脂、聚氨酯等的黏结性能好但红外透过率较低^[24]。

对于填料来说,氧化物系填料特别是掺杂的金属氧化物,由于良好的抗静电性能,且在中红外波段无红外吸收峰,红外隐身性能比较优异。黄朝晖^[24]以掺杂Al的氧化锌(ZAO)为填料,以EPDM为基体,制备出低红外发射率高透波材料。Wang等^[45]通过溶胶-凝胶法制备SiO₂包覆漂浮Al粉末,并以改性Al粉和抗静电碳质纤维为填料,以EPDM为黏结剂制备复合涂层,分析改性Al粉的表面形貌、红外吸收性能以及复合涂层的红外发射率、表面电阻率、电磁性能和力学性能。结果表明:随着正硅酸四乙酯(TEOS)量的增加,漂浮铝粉表面覆盖的SiO₂增多,通过调整漂浮铝粉表面改性层的厚度可以显著降低复合涂层的介电常数和损耗正切值。当TEOS添加量为1 g时,介电常数和损耗正切值显著降低,红外发射率小于0.6,抗拉强度和断裂伸长率略有下降,复合涂层具有较低的红外发射率和较高的雷达波透过率。Wang等^[46]以EPDM为基体,Al粉和碳纤维为填料,采用分层喷涂的新方法构建三层复合涂层,每层喷涂不同配方的涂料,如图2所示。通过调整每层铝粉的含量,并将碳纤维的含量保持在4%(质量分数),三层复合涂层实现介电性能、抗静电性能和低红外发射率的平衡,符合低红外发射率和低介

表3 几种常用有机树脂黏结剂在8~14 μm波长范围的红外透过率^[44]

Table 3 Infrared transmittance of several common organic adhesives in the wavelength range of 8-14 μm^[44]

Resin binder	Infrared transmittance in 8-14 μm
Epoxy resin	0.35
Phenolic resin	0.5
Polyurethane	0.6
EPDM	0.95

电性能的A3-A0-A0复合涂层的红外发射率为0.498,在9.375 GHz处介电常数为6.23,介电损耗为0.038。

针对聚氨酯树脂红外发射率高的问题,为获得低红外发射率同时兼容透波与抗静电性能的涂层材料,高月欣^[36]通过在丙烯酸聚氨酯树脂分散漂浮性Al粉及改性Al粉、短切碳纤维(CF)、空心玻璃微珠(HGMS)等复合填料,探究填料添加量对复合涂层的红外隐身性能、透波性能、抗静电性能以及力学性能的影响规律,并优选综合性能较好的涂层进行耐环境实验。结果表明:20%(质量分数,下同)改性Al粉、3%短切CF和4%HGMS的填料配比获得的涂层综合性能最好,涂层的红外发射率在0.5左右,介电常数在12左右,损耗角正切值在0.09左右,表面方阻为7 MΩ/□,并且涂层的力学性能无大幅下降。此外,复合涂层具备良好的耐高低温交变、耐水、耐盐雾腐蚀和耐湿热等性能,耐环境性能良好,这得益于聚氨酯树脂良好的耐候性。

4 总结与展望

随着我国航空航天科技的不断发展,任务清单不断刷新,复杂服役环境下涂层材料面临新的挑战。高性能、多功能和环境友好的涂层材料需求越来越迫切。位于飞机前端的雷达罩作为最重要的功能部件服役环境苛刻,通常需采用高透波的耐雨蚀抗静电复合涂层系统进行有效防护。

国外在飞机雷达罩透波耐雨蚀抗静电涂层材料方面开展了大量研究,形成较为成熟的应用体系。国内起步较晚,经历三四十年的发展和不断完善,亦具备良好的应用基础,但与国外同类产品相比,仍有较大差距。随着舰载飞机等新型航空装备的发展,对雷达罩涂层系统的耐候性和耐久性等亦提出更高的要求。综上所述,对雷达罩涂层材料的未来发展提出如下展望:

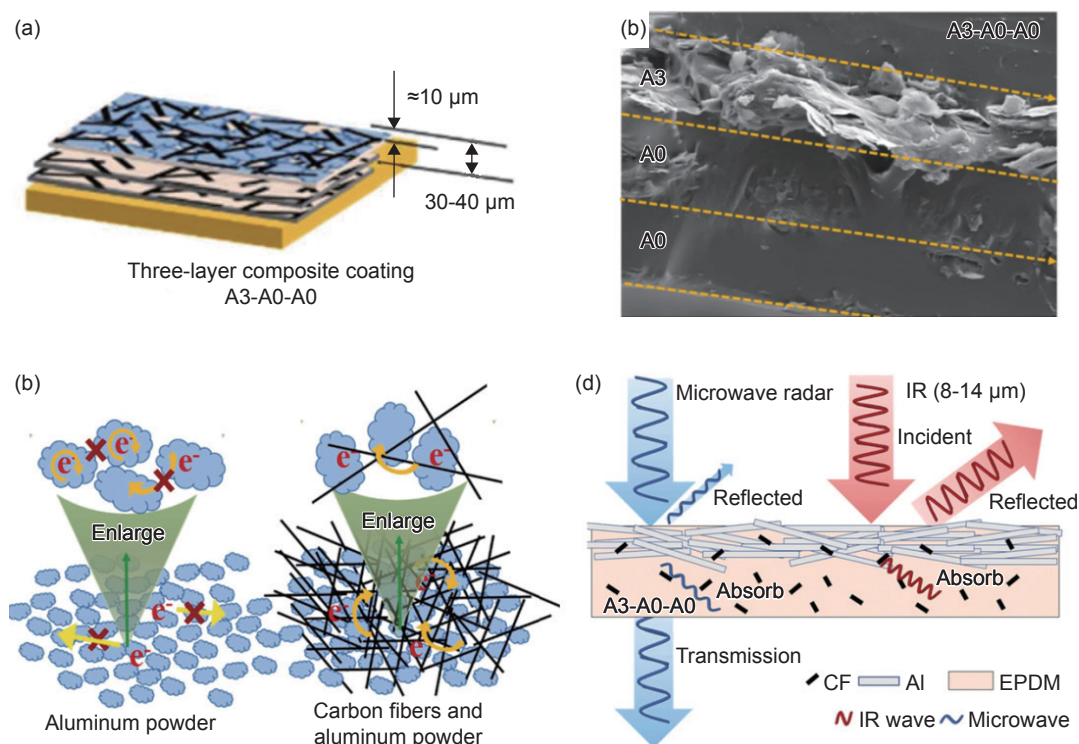


图2 低红外发射率涂层^[46] (a)三层结构示意图; (b)复合涂层截面形貌; (c)电荷运动示意图表明碳纤维的加入有利于静电传导; (d)波传播示意图

Fig. 2 Low infrared emissivity coating^[46] (a)schematic diagram of three-layer structure; (b) cross section morphology of composite coatings; (c)the charge motion diagram shows that the addition of carbon fiber is conducive to electrostatic conduction; (d)wave propagation diagram

(1)深入研究飞机雷达罩抗静电涂层系统的性能随服役环境的变化规律。应着重研究涂层的力学性能、耐雨蚀性能、抗静电性能随服役环境因素的变化,分析雨滴等外来介质及温度、辐照等环境因素对涂层介电性能、力学性能、耐雨蚀性能以及抗静电性能等的影响规律。

(2)雷达罩涂层系统需要针对具体的损伤失效机制进行针对性的优化。飞机雷达罩涂层系统服役环境复杂,涉及涂层材料的力学性能、耐雨蚀性能、抗冲击性能、抗静电性能等,然而目前,对于飞机雷达罩抗静电涂层系统的损伤失效的机理研究太少,需要积累雷达罩涂层材料在不同环境下的失效模式及数据,用以不同的失效模式进行涂层材料的针对性优化。

(3)新型飞行器对涂层的多功能兼容要求进一步提高。目前,超疏水涂层、防冰涂层、自修复涂层是研究热点,对于地面雷达天线罩的防护涂层在兼顾超疏水和防冰性能方面已开展了相关研究和应用,取得较好的效果^[3,47-51]。超疏水涂层能够有效阻止雨水的附着和侵蚀,防冰涂层可以有效防除冰,从而避免雨水和结冰对雷达罩的防护性和透波性产生危害;自修复涂层通过涂层损伤自愈合实现

涂层的性能稳定性和耐久性,对于雷达罩的长期防护具有重要意义,而聚氨酯树脂在自修复方面已进行了广泛的研究和探索,对飞机雷达罩发展自修复涂层具有指导意义^[52-54]。飞机雷达罩的防护涂层系统兼容超疏水、防冰、自修复和耐高温、红外隐身等性能的多功能一体化材料值得深入研究。

参考文献:

- [1] 胡耀平. 波音 737NG 飞机雷达罩损伤分析和修理[J]. 航空维修与工程, 2018(11): 33-35.
HU Y P. Damage analysis and repair of B737NG nose radome[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2018(11): 33-35.
- [2] 李翔, 李兴福. 空客 A320 系列飞机雷达罩防静电涂层电连续性问题研究[J]. 航空维修与工程, 2021(3): 45-47.
LI X, LI X F. Research on electrical continuity of anti-static coating for A320s radome[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(3): 45-47.
- [3] 王江凯. GFRP 用聚氨酯基超疏水涂层的制备和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
WANG J K. Preparation and performance study of polyurethane based super hydrophobic coatings applied

- on GFRP surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [4] LI E, BAI Y, DONG H, et al. Infrared radiation and thermal properties of Al-doped SrZrO₃ perovskites for potential infrared stealth coating materials in the high-temperature environment[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(16): 23124-23133.
- [5] FAN J, TAO C, JIANG T. Failure analysis on antistatic coatings on radome[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 35: 618-624.
- [6] 南涛. 抗静电涂料体系在机载雷达罩表面的防护技术[C]//2010第十五届可靠性学术年会论文集. 北京: 中国电子学会, 2010: 291-294.
- [7] 狄志刚. 新型航空防雨蚀涂料的研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- DI Z G. Development of a new type of aviation anti-rain erosion coating[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [8] 万耀明, 余明明, 熊瑜, 等. 新型防雨蚀抗静电涂层系统的制备[J]. *表面技术*, 2018, 47(5): 202-207.
- WAN Y M, YU M M, XIONG Y, et al. Preparation of a new rain erosion resistant and antistatic coating system[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(5): 202-207.
- [9] 孙哲, 杨康, 马宏, 等. 航空、航天涂料现状及未来发展[J]. *中国涂料*, 2019, 34(1): 28-32.
- SUN Z, YANG K, MA H, et al. Status quo and future development of aircraft and spacecraft coatings[J]. *China Coatings*, 2019, 34(1): 28-32.
- [10] GARCIA C, FITTIPALDI M, GRACE L R. Effect of nanoclay reinforcement on the X-band dielectric properties of epoxy resins for use in radome applications[C]//AIP Conference Proceedings. Ohio: AIP Publishing, 2015, 1664(1): 070015.
- [11] DASHTKAR A, HADAVINIA H, SAHINKAYA M N, et al. Rain erosion-resistant coatings for wind turbine blades: a review[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2019, 27(8): 443-475.
- [12] BERA P, LAKSHMI R V, PATHAK S M, et al. Recent progress in the development and evaluation of rain and solid particle erosion resistant coatings for leading edge protection of wind turbine blades[J]. *Polymer Reviews*, 2024, 64(2): 639-689.
- [13] MARZBALI M, YEGANEHDOUST F, IBRAHIM M E, et al. Liquid-solid impact mechanism, liquid impingement erosion, and erosion-resistant surface engineering: a review[J]. *Coatings*, 2023, 13(3): 577.
- [14] AMIRZADEH B, LOUHGHALAM A, RAESSI M, et al. A computational framework for the analysis of rain-induced erosion in wind turbine blades: part I: stochastic rain texture model and drop impact simulations[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 163: 33-43.
- [15] BOUSSER E, MARTINU L, KLEMBERG-SAPIEHA J E. Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 257: 165-181.
- [16] BARKOULA N M, KARGER-KOCSIS J. Review processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(18): 3807-3820.
- [17] 韦生文, 龚光福. 机载雷达天线罩抗雷击及防静电设计[C]//2007年机械电子学学术会议论文集. 北京: 中国电子学会, 2007: 16-20.
- WEI W S, GONG G F. Anti-lightning and anti-static design of airborne radar radome[C]//Proceedings of the 2007 Mechatronics Conference. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2007: 16-20.
- [18] XU J, WANG X, RUAN H, et al. Recent advances in high-strength and high-toughness polyurethanes based on supramolecular interactions[J]. *Polymer Chemistry*, 2022, 13(17): 2420-2441.
- [19] 刘丽红, 闫杰. 典型大气环境玻璃钢天线罩聚氨酯涂层工艺老化行为研究[J]. *环境技术*, 2011, 32(1): 40-43.
- LIU L H, YAN J. A study on the aging behaviors of polyurethane coatings with GFRP radome in typical atmospheric environment[J]. *Environmental Technology*, 2011, 32(1): 40-43.
- [20] LIU Y, ZHENG J, ZHANG X, et al. Enhanced physical mechanics properties of hydroxyl-terminated polybutadiene based polyurethane crosslinking with modified graphene oxide[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1980(1): 012019.
- [21] JESPERSEN K M, MONASTYRECKIS G, MISHNAEVSKY L. On the potential of particle engineered anti-erosion coatings for leading edge protection of wind turbine blades: computational studies[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 942(1): 012027.
- [22] JOHANSEN N F J, MISHNAEVSKY Jr L, DASHTKAR A, et al. Nanoengineered graphene-reinforced coating for leading edge protection of wind turbine blades[J]. *Coatings*, 2021, 11(9): 1104.
- [23] 孙营, 谈珍, 田永丰, 等. 颜填料对雷达罩涂层介电性能影响的研究[J]. *现代涂料与涂装*, 2015, 18(3): 19-20.
- SUN Y, TAN Z, TIAN Y F, et al. Influence of pigments and fillers on dielectrical property of the radome coatings[J]. *Modern Paint & Finishing*, 2015, 18(3): 19-20.
- [24] 黄朝晖. 掺铝氧化锌的制备、结构形貌及红外隐身性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- HUANG C H. Preparation, microstructure and infrared

- stealth property of aluminum doped zinc oxide[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [25] 李留东, 董存峰, 杨茂伟, 等. 抗静电涂料的抗静电机理探讨[J]. 涂料技术与文摘, 2010, 31(11): 38-40.
- LI L D, DONG C F, YANG M W, et al. Antistatic mechanism discussion of antistatic coatings[J]. Coatings Technology, 2010, 31(11): 38-40.
- [26] AL-SALEH M H, SUNDARARAJ U. A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites[J]. *Carbon*, 2009, 47(1): 2-22.
- [27] 吴连锋, 刘艳明, 王贤明, 等. 抗静电涂料研究概述[J]. 涂料工业, 2016, 46(8): 75-81.
- WU L F, LIU Y M, WANG X M, et al. Research progress in antistatic coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2016, 46(8): 75-81.
- [28] 朱梦娜. 掺铝氧化锌/碳纤维复合涂层的制备、结构与性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- ZHU M N. Preparation, structure and properties of aluminum-doped zinc oxide/carbonized fiber composite coatings[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [29] 王洪玮, 狄志刚, 付敏, 等. 新型飞机雷达罩弹性抗静电涂料施工工艺研究[J]. 涂料技术与文摘, 2007(9): 11-12.
- WANG H W, DI Z G, FU M, et al. Finishing process research of new elastic antistatic coatings for radar cover of aeroplane[J]. Coating and Protection, 2007(9): 11-12.
- [30] 姜卫丽, 刘华荣. 雷达罩用新型抗静电防腐耐磨涂料的研制[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(4): 34-37.
- JIANG W L, LIU H R. Study on new type of anti-corrosive wear-resistant anti-static coatings used on radar cover[J]. Modern Paint & Finishing, 2011, 14(4): 34-37.
- [31] 杨帆. 低损耗抗静电复合材料设计与制备[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- YANG F. Design and preparation of low dielectric loss and antistatic composites[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [32] 宁亮, 王贤明, 于美杰, 等. 飞机雷达罩用抗静电涂料的研制[J]. 涂料工业, 2016, 46(9): 65-69.
- NING L, WANG X M, YU M J, et al. Preparation of antistatic coatings for aircraft radome[J]. Paint & Coatings Industry, 2016, 46(9): 65-69.
- [33] 范金娟, 姜涛, 陶春虎, 等. 雷达罩表面抗静电涂层失效原因分析[C]//首届航空物理冶金学术研讨会论文集. 北京: 中国航空工业集团公司, 2011: 49-53.
- FAN J J, JIANG T, TAO C H, et al. Failure causes analysis of antistatic coating on radome surface[C] // Proceedings of the First Symposium on Aerophysical Metallurgy. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, Ltd., 2011: 49-53.
- [34] 李旭东, 范金娟. 雷达罩抗静电涂层失效模拟[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(3): 133-137.
- LI X D, FAN J J. Failure simulation of antistatic coatings for radar radome[J]. Failure Analysis and Prevention, 2009, 4(3): 133-137.
- [35] 张泽. 抗静电碳纤维电性能和结构的环境稳定性研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- ZHANG Z. Environmental stability of electrical properties and structure of antistatic carbonaceous fiber[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [36] 高月欣. 聚氨酯基低红外发射率多功能复合涂层的制备及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- GAO Y X. Preparation of polyurethane-based low-infrared emissivity multifunctional composite coating and its performance[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [37] 宋麦丽, 崔红, 闫联生, 等. 高硅氧/有机硅透波材料介电性能实验分析[J]. 固体火箭技术, 2006(5): 364-366.
- SONG M L, CUI H, YAN L S, et al. Experimental analysis on dielectric properties of silica glass/silicone radome material[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006(5): 364-366.
- [38] 朱晓丰, 唐雪涛, 潘云飞, 等. 氟硅改性聚氨酯弹性树脂在舰载机雷达罩上的应用研究[J]. 涂料工业, 2022, 52(8): 68-73.
- ZHU X F, TANG X T, PAN Y F, et al. Study on the application of fluorosilicone modified polyurethane elastic resin on shipboard aircraft radome[J]. Paint & Coatings Industry, 2022, 52(8): 68-73.
- [39] YAZEEN P S M, VINISHA C V, VANDANA S, et al. Electromagnetic performance analysis of graded dielectric inhomogeneous streamlined airborne radome[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(5): 2718-2723.
- [40] SUN Y, LI F, SUN H, et al. Airborne communication antenna protection and stealth[C]//2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). New York: IEEE, 2018: 2057-2060.
- [41] 杨康, 陈保华, 孙哲, 等. 我国航空涂料技术进展分析[J]. 涂料工业, 2011, 41(11): 70-74.
- YANG K, CHEN B H, SUN Z, et al. Progress in aircraft coating technology in China[J]. Paint & Coatings Industry, 2011, 41(11): 70-74.
- [42] ZHU H, LI Q, ZHENG C, et al. High-temperature infrared camouflage with efficient thermal management[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 60.
- [43] HU R, XI W, LIU Y, et al. Thermal camouflaging metamaterials[J]. *Materials Today*, 2021, 45: 120-141.
- [44] 叶圣天, 刘朝辉, 成声月, 等. 国内外红外隐身材料研究进展[J]. 激光与红外, 2015, 45(11): 1285-1291.
- YE S T, LIU C H, CHENG S Y, et al. Research progress

- of infrared stealth materials[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(11): 1285-1291.
- [45] WANG Y, ZHOU H, GAO Y, et al. Low-infrared-emissivity Al@SiO₂/EPDM composite coating compatible with low dielectric loss and antistatic property[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 121: 104025.
- [46] WANG Y, YU M, GAO Y, et al. Three-layer composite coatings with compatibility of low infrared emissivity and high wave transmittance[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 943: 169038.
- [47] 杨剑宇. GFRP 用氟硅体系超疏水涂层的制备及其性能演变研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- YANG J Y. Preparation and performance evolution of fluoro-silicon superhydrophobic coating applied on GFRP surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [48] 沙晓涵. 一种基于氟树脂改性超疏水涂层的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- SHA X H. Study on a super hydrophobic coating modified by fluororesin[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [49] WEI J, ZHANG J, CAO X, et al. Durable superhydrophobic coatings for prevention of rain attenuation of 5G/weather radomes[J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 2862.
- [50] YONG S M, LEE S J, PARK J, et al. Fiber-reinforced plastic material with de-icing capability for radome application[J]. *Materials Letters*, 2021, 284: 128943.
- [51] 杨钦. 工程实用性超疏水自清洁涂层防结冰行为及机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- YANG Q. Anti-icing behaviors and mechanism of engineering superhydrophobic self-cleaning coatings[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [52] UTRERA-BARRIOS S, VERDEJO R, LÓPEZ-MANCHADO M A, et al. Evolution of self-healing elastomers, from extrinsic to combined intrinsic mechanisms: a review[J]. *Materials Horizons*, 2020, 7(11): 2882-2902.
- [53] EKEOCHA J, ELLINGFORD C, PAN M, et al. Challenges and opportunities of self-healing polymers and devices for extreme and hostile environments[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(33): 2008052.
- [54] LUO Y L, GAO W T, LUO Z Y, et al. Toward mechanically robust self-healing polyurethanes using dynamics chemistry[J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2024, 8(7): 1767-1791.

收稿日期: 2024-09-03; 录用日期: 2024-12-17

基金项目: 国家重点研发(2023YFB3408200); 北京市自然科学基金(L248096)

通讯作者: 李卫平(1972—), 女, 博士, 教授, 研究方向为功能涂镀层制备技术、轻合金表面阳极氧化处理技术、材料加速腐蚀实验方法评估和寿命预测, 联系地址: 北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学材料科学与工程学院(100191), E-mail: liweiping@buaa.edu.cn; 叶辉(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为功能涂层, 联系地址: 北京市丰台区南大红门路 1 号(100076), E-mail: yehui@buaa.edu.cn

(本文责编: 王俊丽)