

航空特种涂料的发展应用探讨

杨宗邦^{1,2}, 阎大伟¹, 马宏³

(1.武汉工程大学, 武汉 430205; 2.凌云科技集团有限责任公司, 武汉 430040;

3.中昊北方涂料工业研究设计院有限公司, 兰州 730101)

摘要: 重点介绍了隐身涂料、耐高温涂料和抗静电涂料等航空特种涂料的国内外研制进展及应用情况, 分析了特种涂料对航空维修的影响, 为航空维修企业提供参考。

关键词: 航空特种涂料; 隐身涂料; 耐高温涂料; 抗静电涂料

中图分类号: TQ637 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2024)03-0013-04

Development and Application of Aviation Special Coatings

YANG Zong-bang^{1,2}, YAN Da-wei¹, MA Hong³

(1.Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China; 2.Lingyun Science & Technology Group Co., Ltd., Wuhan 430040,

China; 3.North Paint & Coatings Industry Research and Design Institute Co., Ltd. of China Haohua, Lanzhou 730101, China)

Abstract: This paper has mainly introduced the development and application of three kinds of aviation special coatings at home and abroad, such as stealth coating, high-temperature resistant coating and antistatic coating, analyzed the influence of special coatings on aviation maintenance, which can provide reference for aviation maintenance enterprises.

Key words: aviation special coating; stealth coating; high-temperature resistant coating; antistatic coating

0 引言

随着航空装备的升级换代, 航空涂料的研发日新月异, 国内外航空特种涂料研制也取得了很大进展, 大量地应用到各种新型号航空装备上。航空特种涂料从无到有, 从少到多, 品种逐年增加, 水平不断提高, 已形成了十几个门类、上百个品种, 功能涵盖了耐高低温、隔热阻燃、示温、吸声、隐身、减阻尼、防污、耐磨蚀、润滑、重防腐、超耐候、防雨蚀抗静电等, 为航空装备大型化、高速化、高性能发展承担着不可替代的作用。本文重点介绍航空领域目前正在应用的 3 类特种涂料。

1 航空特种涂料的研制进展

1.1 隐身涂料

隐身技术是航空装备在设计制造过程中用于降低

或减弱被敌方雷达、红外和光电设备及目视等探测观测到的外形特征, 避免被发现捕捉而广泛采用的专业技术。目前, 隐身涂料的研制与使用是广受关注和具有挑战性的一种隐身技术。隐身涂料是喷涂在航空装备结构外表上的一种隐身材料, 主要有雷达隐身涂料和红外隐身涂料等。

雷达隐身涂料是一种喷涂在航空装备表面, 能够吸收辐射到装备表面的雷达电磁波, 使雷达捕捉到的目标特征信号得到明显降低或减弱, 从而使航空装备难以被敌方雷达发现、识别、追踪的功能性涂料, 因此也称雷达吸波涂料。因其制作工艺相对简单, 喷涂施工容易, 可选择设计性强, 且成本相对低廉, 因此雷达吸波涂层的研制与使用已成为热点。作为隐身技术的重要组成部分, 雷达吸波涂料随着作战环境的改变和武器装备性能的迭代升级而得到航空工程技术人员的广泛关注 and 飞速发展。目前, 以铁氧体、金属粉末颗粒、石墨等为填料的传统雷达吸波涂料已逐渐不能满足对新型雷达电磁波吸波的要求。因此各国航空工程技术人员

收稿日期: 2023-03-23

作者简介: 杨宗邦(1981—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事航空非金属材料、喷涂、复合材料修理等专业技术研究、工程应用和技术管理工作。E-mail: zongbangyang521@126.com。

员在持续改进优化传统吸波涂料的同时,积极开发研制新型的雷达吸波材料,包括碳纤维等碳基材料、导电聚合物、手性材料、等离子体等吸波材料,其中碳基和导电高聚物等吸波材料是目前研究的重中之重^[1]。Weng X 等^[2]制备了 rGO/CIP/PVP 复合材料,通过调整 PVP 纳米粒子在复合材料中的占比,使介电常数得到明显改变,使电/磁损耗互补,具有较好的应用前景。Wang Y 等^[3]制备了 MOF(Fe)/PANI 纳米导电复合吸波材料,使吸收频带得到增强,吸收电磁波效果更加优异。目前随着装备服役环境的复杂化、多样化,对雷达吸波涂料全面性要求则更高,未来雷达吸波材料将朝着智能化、轻量化、更耐环境、更大范围内多频兼容的方向发展。

红外隐身涂料是一种喷涂在航空装备表面,对航空装备的红外特征辐射信号有着显著的减弱作用,从而使航空装备被发现与识别的几率得到大幅降低,避免被红外探测设备捕捉和锁定的一种特种航空涂料。红外隐身涂料不仅使航空装备的热辐射特征发生明显降低与改变,还可使航空装备的综合辐射特征与所处的环境相适应,降低两者的红外辐射状态差异,从而提高航空装备的战场隐蔽能力,降低被发现的几率,达到隐身效果。美国、德国、日本等发达国家较早就开展红外隐身涂料研制,水平处于世界领先地位。20 世纪七八十年代,美国各军兵种武器系统均逐渐拥有不同程度的红外隐身技术,但彩色红外隐身涂料未能够真正投入工程应用,且不能兼容其他波段隐身材料。我国研究红外隐身技术方面的起步相对较晚,大都处于工程应用初步阶段,达到大量应用阶段仍需一定的时间和投入更多的精力。李凤雷等^[4]制备了雷达-红外隐身兼容涂层,采用双层涂覆的方法使涂层系统兼具雷达吸波隐身和红外隐身两种功能。刘海韬等^[5]研究的抗氧化/红外隐身复合涂层,应用在耐 1 650 °C 温度的纤维增强陶瓷基复合材料表面,可以大幅降低基体的红外辐射强度,抗氧化性和红外隐身性能均优异。随着红外隐身涂料的进一步研究发展,红外隐身涂料的发展趋势集中在开发新型多频段兼容隐身材料、低发射与控温复合涂料的研发、多种材料复合化^[6]。

1.2 耐高温涂料

耐高温涂料通常是指可以长时间处于 200 °C 以上高温环境中,还能保持稳定的机械性能和防护作用的功能性涂料。按成膜物质可分为有机、无机和有机-无机杂化等 3 种类型耐高温涂料。以有机硅树脂为主要成膜物质的称为有机耐高温涂料,而以无机黏合剂如硅酸乙酯、硅溶胶、硅酸盐等为主要成膜物质的称为无机耐高温涂料。刘兰轩等^[7]介绍了有机硅和改性有机硅

耐高温涂料的研究进展及有机硅的改性方法,并展望了有机硅耐高温涂料的发展方向。Han Rifei 等^[8]研制出了一种新型耐高温磷酸盐陶瓷涂料,试验结果表明,涂料经受 650 °C 高温后仍具有优异的抗氧化性和热抗震性。Weng Haotian 等^[9]制备出了一种 YSZ/Al₂O₃ 耐高温电绝缘涂料,喷涂在基材金属表面,避免航空发动机的高温传感器与基体直接接触,其优异的电绝缘性和热稳定性保障了高温膜传感器正常工作。

耐高温涂料尤其是陶瓷耐高温涂料的研制,取得了一定的进展,但脆性较大。采用稀土硅酸盐包覆掺杂,纳米耐高温材料的应用,及耐高温颜料填料的复配可有效降低脆性。今后耐高温隔热涂料的研究方向将主要集中在以下几个方面:在硅氧主链中引入 N、P、B 和 Ti 等一些微量元素,杂化改性有机硅树脂,开发新型耐高温树脂;新型低聚物类无机耐高温涂料;高固体分、无溶剂、水性及粉末耐高温涂料的研究^[10]。

1.3 抗静电涂料

抗静电涂料是一种喷涂于雷达罩/天线罩的罩体表面,用于防止和疏导静电不使其在玻璃钢罩体表面积,避免电荷放电时对雷达及通信系统的影响,保障其正常工作的航空特种涂料。20 世纪 80 年代以前,国内抗静电涂料以树脂型涂料为主。因其质地硬且脆,经受不住高速气流、沙尘及雨水的冲击,易开裂,从而脱落,失去了对雷达罩的保护作用。90 年代初,开始采用芳香族聚氨酯基抗静电涂料,有效地提高了涂料的弹性及柔韧性,增强了复合材料天线罩耐气流冲刷、砂蚀和雨蚀的能力,但该系列涂料中的芳香族聚氨酯树脂受长时间日光照射后易老化龟裂,导致涂层耐候性相对较差。万耀明等^[11]采用新型饱和聚烯烃改性的弹性聚氨酯为基体树脂,通过调整优化饱和聚烯烃、导电填料的含量,设计研制了一种新型防雨蚀抗静电涂层系统,提高了涂层的抗静电、耐候性和力学性能,具有良好的应用前景。宁亮等^[12]利用原位聚合共混工艺,以特种导电碳纤维、导电云母粉、导电纳米锑掺杂二氧化锡为主要导电介质,制备了一种新型抗静电涂料,避免了导电介质的分散,确保涂层具有优异的外观质量、导静电性和机械性能。

随着航空技术的发展和航空装备的不同需求,单一的抗静电功能涂料已不能满足需求,兼具耐高温、阻燃、耐雨蚀等多功能化的抗静电涂料越来越受到重视和研究,应用前景广阔。

2 航空特种涂料的应用

2.1 国外应用进展

国外航空装备使用的雷达吸波涂料多数为磁损性涂料,该类涂料对低频段雷达波有较好的吸收性。如美

国 Condictron 公司的铁氧体系列涂料,干膜厚约 1 mm,在频段 2~10 GHz 内能够使照射到表面的雷达波衰减达 10~12 dB,且最高可耐 500 °C 高温;Emerson 公司的 Eccosorb Coating 268E 涂料,涂层厚度约为 1.27 mm,密度为 4.9 kg/m²,能有效衰减常用的 1~16 GHz 雷达波。90 年代,Carnegie-Mellon 大学研发了非铁氧体型高效吸收剂,制成的特种涂料可使雷达反射率下降 80%。据相关媒体报道,该涂层已广泛喷涂于 B-2 飞机的结构外表。美军 F-117A 型飞机机身表面喷涂的纳米红外隐身涂料,将金属、铁氧体等纳米微粒与有机聚合物进行复合形成涂料,能使辐射到表面的电磁波和声波同时得到吸收或衰减,减少发射和散射,具备电磁和声波同时隐身的效果。

20 世纪 70 年代开始,国外飞机结构上已使用不发泡的石棉型防火耐高温涂料,以满足大中型运输机吊舱、应急动力舱等部位对环境温度的要求,确保飞机及飞行的安全。这种涂料导热率较大,隔热效果差,防火能力较弱。从 80 年代开始,波音、空客、普惠、罗-罗等公司的飞机及发动机结构开始使用膨胀型防火涂料^[13]。Contego 防火涂料防火温度高达 1 093 °C,15 min 阻燃,满足 FAA 要求,已经成功应用到 V-22 鱼鹰式倾转旋翼机玻璃纤维油箱、洛克希德 C-130 大力神运输机的进气舱、捕食者无人机的喷气发动机罩等。

国外航空特种涂料已在民机、军机得到广泛地应用,但受限于技术封锁和军事秘密,具体的应用情况尚无法判断。

2.2 国内应用进展

国内航空特种涂料的应用相对缓慢,民机大多还在使用国外进口的航空特种涂料。如 MA60/600 飞机发动机短舱等高温区域使用 FLAME CONTROL Coatings 公司生产的防火涂料 NO.173 底漆和 NO.190 面漆。随着国产耐高温特种涂料的研制发展,C919 等飞机已全面使用国产航空特种涂料,如 Fan S W 等^[14]研制了用在 C/SiC 材料的刹车制动盘表面的磷酸盐耐高温涂层,有效减缓刹车制动盘升温过快,避免刹车制动失效。灯塔油漆厂生产的 H61-32 环氧有机硅耐热磁漆和海化院生产的防火涂料已大量应用于飞机发动机舱、APU 舱及其他有防火要求部位。20 世纪 80 年代研制的弹性抗静电防雨蚀涂料已在各种航空装备雷达罩上使用,目前新型号装备上已开始大量应用更先进的浅色改性脂肪族聚氨酯弹性抗静电涂料。以铁氧体、羰基铁为主的传统吸波材料在本世纪初已在某三代机上开始应用,涂层厚度达 0.5 mm,质量大,在高速气流冲击下,易脱落。后续四代机等机型已开始应用新型吸波涂料和红外隐身涂料。

随着航空科技的发展和特种涂料研制,目前航空特种涂料在国内型号上的应用呈现以下显著特点。

1) 应用涂料国产化:某型国产大飞机,所应用的航空特种涂料如抗静电涂料、防火涂料、耐雨蚀涂料、荧光涂料等均已实现国产化;同时已建立国内航空特种涂料技术规范,如 YMS 2509 耐热涂层系统规范。

2) 涂料种类多样化:某三代歼击机应用的航空特种涂料种类增加至 5 种,某国产大型运输机所应用的航空特种涂料种类增加至十余种。

3) 涂料功能复合化:用于飞机复合材料燃油箱内表面的抗静电耐油涂料,不仅具有优异的耐燃油、耐水等耐环境性能,还具有良好的抗静电性能。

3 航空特种涂料对航空维修的影响

航空特种涂料在型号的大量应用,给航空维修行业带来大的影响,不仅使喷涂作业各要素发生了变化,也影响了喷涂作业的成本和周期。

3.1 喷涂作业要素变化

航空特种涂料的喷涂对作业过程中的人、机、料、法、环、测等要素都有新的要求,促使着生产要素发生变化。

1) 喷涂人员:航空特种涂料对喷涂专业工程技术人员和操作人员都有着更高的要求,新的喷涂、检测技术,自动化、智能化喷涂设备、专业检测设备都要求工程技术人员和操作人员具备高技能、高素质,专业化。

2) 喷涂、测试设备:新型的航空特种涂料的应用,也对喷涂、检测设备提出更高的要求,自动化喷涂设备、静电喷涂设备、FT-150 测厚仪、矢量网络分析仪等专用设备都已开始进入工业化应用。

3) 涂料及辅助材料:航空特种涂料本身具备专用化、复合化、多样化等特点,涂料种类增多,对辅助材料的需求也增加了,如用于退除隐身涂层的新型退漆剂、用于修补隐身涂层的修补剂等。

4) 喷涂及退除工艺:航空特种涂料对喷涂工艺和退除工艺都有新的要求,如雷达吸波涂料,因其密度大,施工黏度大,涂层厚,易出现流挂、涂层不均匀等故障,影响隐身效果。为此必须采用多次重复喷涂和阶梯多段式升温等特殊喷涂工艺方可保证涂层的厚度和质量。涂料退除方面,因防雨蚀面漆属于弹性聚氨酯漆,且喷涂在复合材料罩体上,只能采用物理方法退漆。为提升效率,智能打磨除漆、激光除漆、碳酸氢钠除漆、干冰除漆等先进的退漆技术也开始进入维修领域。

5) 环境:航空特种涂料对喷涂环境、测试环境、贮存环境等基础设施提出了更高的要求。如新型改性脂肪族聚氨酯弹性抗静电涂料的喷涂环境要求为 12~35 °C,相对湿度 ≤75%,无明显粉尘、风沙。涂料的贮

存温度为 5~35 ℃,相对湿度≤75%。

6)检测测试:航空特种涂料对涂料的复验、涂层质量的检测都提出了更高的要求,如雷达吸波涂料,入厂和定期复验需对涂料的反射率性能进行检测测试。如耐高温涂料,入厂和定期复验需对 500 ℃耐温性进行检测测试;如防雨蚀抗静电涂层,喷涂完成后须测试电性能等。

3.2 喷涂成本上升

1)涂料成本:航空特种涂料种类多,批量小,因此成本较高,单价甚至上万元。

2)检测成本:航空特种涂料性能检测、涂层质量测试部分需要送到有资质的专业检测机构,外委费用较高。

3)工时成本:航空特种涂料的喷涂和去除工作都较费时费力,如雷达吸波涂层,因厚度要求达 0.5 mm,需多次重复喷涂和多段式升温,喷涂工时增加较多。去除旧涂层时,人工打磨效率较低,某歼击机单架外表涂层除漆需 6~8 人,多达 3~5 d 时间。

4)管理成本:航空特种涂料种类多,用量少,又有着严格的存贮条件和贮存期限,超期报废等都使得管理成本增加。

3.3 喷涂作业周期增加

在航空维修领域,喷涂作业包括旧漆层的去除、表面清洁处理、遮蔽防护、喷涂、固化、去除遮蔽物等。传统的飞机外表涂装仅需 7 d,而航空特种油漆,如雷达吸波涂料,某歼击机,单机就漆层去除也需近 10 d 时间,喷涂作业需 20 d。航空维修有着严格的维修作业期限,喷涂作业周期增加,严重影响着航空维修进度。

4 结语

航空特种涂料作为高科技、多学科、交叉型材料,是涂料工业及其他行业的引领,有力保障了航空装备的研制生产和服役维修,也为航空装备高性能、高质量、高适应性提供有力支撑。随着航空科技的发展,新型航空装备对特种涂料的要求也越来越高,需求越来越多,相信更多更先进的航空特种涂料会在新一代航空装备上得到应用。航空维修相关单位需关注航空特种涂料的发展应用,积极应对航空特种涂料对维修作业的影响,加强航空特种涂料喷涂、检测技术能力建设,确保涂层功能得到最大化实现,涂层质量得到有效控制,从而保障航空装备的正常、安全、高效服役。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Weng X, Li B, Zhang Y, et al. Synthesis of flake shaped car-

bonyl iron/reduced graphene oxide/polyvinyl pyrrolidone ternary nanocomposites and their microwave absorbing properties[J]. Journal of alloys and compounds,2017,695:508-519.

- [3] Wang Y, Zhang W, Wu X, et al. Conducting polymer coated metal-organic framework nanoparticles: Facile synthesis and enhanced electromagnetic absorption properties [J]. Synthetic metals,2017,228:18-24.
- [4] 李凤雷,徐国跃,余慧娟,等.红外隐身涂层的制备及其与雷达吸波涂料的兼容性研究[J].红外技术,2009,31(7):415-419.
- [5] 刘海韬,黄文质,孙逊.一种耐温 1 650 ℃纤维增强陶瓷基复合材料表面抗氧化/红外隐身涂层及其制备方法:CN2010620252.X[P].2020-10-02.
- [6] 张凯,王波,桂泰江,等.红外隐身涂料的研究与进展[J].现代涂料与涂装,2019,22(12):27-30.
- [7] 刘兰轩,汤鹏,田志强,等.有机硅耐高温涂料的研究进展[J].上海涂料,2020,58(6):30-38.
- [8] Han Rifei, Naeem Ul Haq Tariq, Li Jiayi, et al. A novel phosphate-ceramic coating for high temperature oxidation resistance of Ti65 alloys [J].Ceramics International,2019,45(18):23895-23901.
- [9] Weng Haotian, Franklin Li Duan, Ji Zhonglin, et al. Electrical insulation improvements of ceramic coating for high temperature sensors embedded on aeroengine turbine blade [J]. Ceramics International,2019,10:78-86.
- [10] 于国玲,赵万赛,程一鸣,等.几种新型耐高温涂料的最新研究进展[J].涂层与防护,2021,42(12):48-51.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 宴立宇,王文月,杨洪涛.大型飞机用涂料概述[C].第3届特种涂料暨防火涂料研讨会,2010:144-146.
- [14] Fan S W, Yang C, He L Y, et al. The effects of phosphate coating on friction performance of C/C and C/SiC brake materials[J].Tribology international,2017,114:337-348. ◆

