

航空涂料：高性能—功能化—环保化多维度发展与展望

王 琴, 段望春, 智福鹏, 杜致尧, 张 龙, 徐 颖

(兰州资源环境职业技术大学, 兰州 730010)

摘要: 航空涂料是航空装备表面防护与功能实现的关键材料。本文综述了近年来国内外航空涂料研究进展与发展趋势。重点阐述了高性能防护涂料、功能性涂料、环境友好型涂料及智能涂装技术的研究进展。通过对比分析国内外发展现状, 揭示了在技术水平、市场格局及研发投入与创新能力方面的差异, 并深入探讨了行业发展面临的挑战与机遇, 展望了发展趋势, 为航空涂料领域的材料研发、工艺优化及产业升级提供理论支撑与实践参考。

关键词: 航空涂料; 功能性; 环境友好; 智能化; 多功能复合; 技术创新

中图分类号: TQ637 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2026)01-0041-08

Aerospace Coatings: Multi-dimensional Development and Outlook Towards High Performance, Functionalization and Environmental Friendliness

WANG Qin, DUAN Wang-chun, ZHI Fu-peng, DU Zhi-yao, ZHANG Long, XU Ying

(Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech University, Lanzhou 730010, China)

Abstract: Aerospace coatings are key materials for surface protection and functionality of aerospace equipment. In this review, we discuss recent research progress and development trends of domestic and international aerospace coatings, with a focus on elaborating the research advances in high-performance protective coatings, functional coatings, environmentally friendly coatings, and intelligent coating technologies. By comparing and analyzing the current development status at home and abroad, the differences in technical level, market pattern, as well as R&D investment and innovation capability are revealed. Furthermore, the challenges and opportunities faced by the industry's development are discussed in depth, and the future development trends are prospected. This study aims to provide theoretical support and practical reference for material research and development, process optimization, and industrial upgrading in the field of aerospace coatings.

Key words: aerospace coatings; functionality; environmentally friendly; intelligentization; multi-functional composite; technological innovation

0 引言

航空涂料是一类特殊的涂料, 专门用于飞机表面的涂装, 作为飞行器的“外衣”, 不仅承担着保护机体免受腐蚀、磨损及恶劣环境侵害的重任, 还对飞行器的性

能优化、外观维护及使用寿命延长起着决定性作用。

随着航空技术的飞速发展, 对航空涂料的性能要求不断攀升, 体现在其特殊功能性方面, 如耐腐蚀、耐高低温、耐化学品、耐烧蚀、耐辐射等, 这些功能推动着该领域持续创新。荷兰 AKZO NOBLE 公司是全球最大的航空涂料制造商, 其生产的航空涂料为全球的民航等各类机型提供专业的服务, 是全球 70% 的航空公司及飞机制造企业的首选。目前, 我国商用航空涂料市场主要以 PPG 公司和 AKZO NOBLE 公司的涂料产品为主。近年来, 全球航空业蓬勃发展, 据国际航空运输协

收稿日期: 2025-10-16

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目(技术创新引导计划 25 CXGA088)。

作者简介: 王琴(1980—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事功能材料、传感器的研究工作。E-mail: 87204015@qq.com。

会(IATA)预测,未来20年全球航空客运量将以每年3.5%的速度增长,这将直接带动航空涂料市场需求稳步上扬。同时,各国对航空装备现代化升级投入增加,促使航空涂料技术加速迭代^[1]。航空涂料需要轻巧,以减少涂层的重量对飞机性能的影响,降低飞机的燃油消耗,提高其效率。在此背景下,系统梳理航空涂料的最新研究进展,洞察其发展趋势,对推动航空产业高质量发展具有重大意义。

1 航空涂料技术体系剖析

1.1 基体树脂与固化剂体系

基体树脂是航空涂料的核心成膜物质,决定着涂层的基本性能。传统航空涂料多采用环氧树脂、聚氨酯树脂等。近年来,高性能树脂研发取得显著进展。为进一步提升性能,通过化学改性、共混等手段对基体树脂进行优化。朱致远^[2]将MXene纳米材料加入涂料中,不仅增强了涂层的机械性能,还赋予其良好的导电性、阻燃性等。

固化剂与基体树脂的匹配性至关重要,影响着涂层的固化速度、交联度及最终性能。新型潜伏性固化剂研发成为热点,其能在常温下保持稳定,高温时迅速固化,为航空涂料施工提供了更大灵活性,减少了因固化条件苛刻导致的施工难题,提升了生产效率^[3]。

1.2 颜料与填料体系

颜料赋予涂料色彩和遮盖力,同时对涂层耐候性、耐腐蚀性有重要影响。高性能无机颜料如氧化铁系、钛白粉,因化学稳定性高、耐光性好,在航空涂料中广泛应用。近年来,纳米颜料崭露头角,其小尺寸效应和高比表面积特性,使涂层具有更优异的光学性能和耐老化性能。例如,纳米氧化锌颜料用于航空涂料,可有效吸收紫外线,提高涂层耐候性,延缓涂层粉化、褪色进程。

功能性填料的加入可赋予涂层特殊性能。空心玻璃微珠作为轻质填料,可降低涂层密度,实现飞行器轻量化,同时提高涂层隔热性能;纳米碳纤维、碳纳米管等导电填料用于制备导电涂料,可满足飞行器防雷击、电磁屏蔽等需求,且添加少量即可显著改善涂层导电性能。

1.3 助剂体系

助剂用量虽少,但对航空涂料性能优化不可或缺。流平剂可改善涂料施工时的流动性,使涂层表面平整光滑,减少橘皮、缩孔等缺陷,提高涂层外观质量;分散剂能促进颜料、填料在树脂基体中的均匀分散,防止团聚,稳定涂料体系,保证涂层性能一致性;防沉剂则防止颜料、填料在贮存过程中沉淀,延长涂料贮存期。此外,随着航空涂料向功能化发展,自修复助剂、智能响

应助剂等新型助剂研发不断推进,为实现涂层自修复、环境自适应等功能提供可能。

2 航空涂料研究进展

2.1 高性能防护涂料

2.1.1 耐腐蚀性涂料

航空器服役环境复杂,沿海地区高盐雾、潮湿空气,工业区域酸雨、化学污染物等,均易引发机体腐蚀,严重威胁飞行安全。为提升涂料耐腐蚀性能,一方面优化涂层结构设计,采用多层复合涂层体系,协同提高涂层整体耐腐蚀能力。刘治国团队^[4]以涂覆的新型涂料(电泳加 CeO_2)为研究对象,设计了模拟海洋环境的仿真加速腐蚀试验方案,探究该新型航空电泳涂料在典型海洋环境下的耐蚀性。另一方面,引入新型防腐材料。石墨烯因具有优异的阻隔性能和化学稳定性,在防腐涂层领域展现出巨大潜力。研究表明,在环氧涂层中添加0.5%的石墨烯,涂层耐盐雾腐蚀时间可达到2000h,有效阻挡了腐蚀性介质对基体的侵蚀^[5]。靳磊等^[6]研制了一种以聚氨酯为主材的隔离涂料,并通过耐液体介质浸泡、环境试验等方法对涂层性能进行了测试与评价。SU Z P团队^[7]对航空压缩机用TiN/Ti涂层及TC4合金腐蚀机理进行了研究,并对钛氧化和氮化钛氧化的吉布斯自由能变化进行了热力学计算,为未来飞机发动机的多功能涂层开发提供参考和启示。COERET A J等^[8]评估了不同暴露条件下各种结构飞机涂层的性能,并辅以环境传感器进行监测,重点研究了由环境因素引发的腐蚀失效机制。

2.1.2 耐磨性涂层

飞行器在起降、飞行过程中,机身表面遭受沙石撞击、雨水冲刷、空气摩擦等磨损作用,尤其是发动机进气道、轴承、机翼前缘等部位,磨损问题更为突出。陶瓷基耐磨涂层因高硬度、良好的耐磨性和耐高温性能成为研究热点。WANG J H等^[9]提出了一种在金属钢表面原位快速制备聚多巴胺纳米 SiO_2 改性的硬脂酸复合有机涂层的方法,该复合涂层在17.55 GPa的高应力条件下表现出塑性变形,摩擦系数稳定在0.11~0.12之间,可用于飞机轴承等运动部件,以减少腐蚀和磨损,并延长使用寿命。通过热喷涂、溶胶-凝胶等工艺制备的氧化铝、氧化锆陶瓷涂层,硬度可达1500~2000 HV,显著提高了涂层抗磨损能力。利用激光熔覆法在基材上制备耐磨涂层,通过加入一定的合金成分和化学成分、碳化物陶瓷粉和氧化物陶瓷粉、稀土元素等,优化工艺参数,提高材料的减摩耐磨特性^[10]。

采用弹性树脂作为基料树脂,碳化硅、聚四氟乙烯粉料为耐磨填料制备的弹性耐砂蚀涂料,能满足直升机旋翼前缘不锈钢件的防护要求^[11]。此外,将纳米颗粒

引入耐磨涂层,利用纳米效应进一步增强涂层性能。

2.1.3 耐高温涂层

航空发动机燃烧室、尾喷管等部件工作温度高达 1 000 ℃以上,对涂层耐高温性能提出极高要求。飞机关键部位发动机上涡轮导向叶片、涡轮工作叶片,常用的高温涂层有热障涂层、金属抗氧化涂层、内腔涂层等。磷酸盐涂层是航空发动机和燃机领域关键涂层技术之一,为金属构件提供了优异的抗氧化和抗热腐蚀防护^[12]。ULANOWIC L 团队^[13]通过超音速热喷涂和扩散铝化技术在 RD-33 航空发动机的涡轮叶片上应用耐热防护涂层,保护涂层内层为 MeCrAlY 型,通过超音速喷涂在叶片上,外层为气相渗铝法镀铝,保护镍高温合金不受高温扩散变化的影响,防止氧化,并提供隔热。陶瓷基复合材料(CMC)具有高强、轻质、耐高温、抗氧化、对裂纹不敏感等特点,是目前应用最广泛的耐高温涂层材料^[14]。航空发动机热端部件采用“高温合金+气膜冷却+热障涂层”方案技术存在一定的局限性,“CMC+适量气膜冷却+环境障碍涂层”方案技术更具有有一定的优势^[15]。采用电子束物理气相沉积制备的氧化钇稳定氧化锆热障涂层,可有效降低基体温度 100~200 ℃,提高发动机热效率和部件使用寿命。同时,新型耐高温树脂涂层也在不断研发。王德强团队^[16]优化了航空涂料配方,DOW-8016 耐高温性能与抗腐蚀性显著提升,其分解温度达到 325 ℃,涂层在 500 ℃和 600 ℃下均保持完好。

2.2 功能性涂料

2.2.1 自修复涂料

自修复涂料也称为自愈合涂料或智能涂料,是一种涂层受到微小损伤或破坏后,通过自身机制自动修复损伤、恢复性能的功能性涂料。它突破了传统涂料“被动防护”的局限,利用物理、化学或生物机制实现了“主动修复”,不仅延长了涂层和基材的使用寿命,同时降低了人工修复的成本,提升了安全性和可靠性,在航空航天领域应用前景广阔。随着纳米材料和智能材料的发展,自修复涂料技术不断突破,出现了多功能复合自修复涂料,它兼容了外援型和本征型自修复涂料的优点,具备高性能、多用途的特性^[17]。ESPEUTE E 等^[18]探讨了从飞机预浸料废料机械回收中获得的再生碳纤维(rCFs)的潜力,成功地用回收的碳纤维对环氧/聚氯乙烯(PCL)基体进行了增强,从而制成了具有自愈能力的涂层,该涂层通过焦耳效应加热激活,仅通过施加 20 V 电压就能实现 80%~90%的表面裂缝自愈效率,促进循环经济的发展,并减少航空业的环境足迹。

2.2.2 防结冰涂层

飞机在高空低温、高湿度环境下飞行时,机翼、风

挡、发动机进气口等部位易结冰,导致飞机气动性能恶化、操纵稳定性下降,严重危及飞行安全^[19]。防结冰涂层主要通过降低表面能、抑制冰核形成或利用外部能量除冰等方式实现防冰。利用抗冻蛋白(AFP)有助于减少表面冰霜和积雪堆积,是一种有前景的材料,AFP 能够吸附在冰晶平面的前端,从而有效控制冰晶的生长和重结晶过程,阻碍冰晶的生长并减缓冻结进程,通过短肽的自组装能形成可持续的防冻涂层,与裸露表面相比,其初始冻结延迟了 5 ℃^[20]。超疏水涂层因具有极低的表面能(接触角大于 150°,滚动角小于 10°),可使水滴在涂层表面快速滚落,难以附着结冰,成为防结冰涂层研究的重点方向。通过在涂层表面构建微纳多级粗糙结构,结合低表面能材料修饰,可制备出性能优异的超疏水防结冰涂层。PATIL A V 等^[21]介绍了超疏水和疏冰涂层在防冰应用中的研究成果,使用 Ansys FENSAP-ICE 模拟工具分析了涂有 PTFE 涂层的 6061 铝合金试样,发现 PTFE 涂层表现出卓越的疏水性。PISCITELLI F 团队^[22]研究开发了一种适用于金属基底的超疏水涂层,可用于小型飞机上,该涂层由纳米结构层组成,能够产生分层的微/纳米结构粗糙度,将基底的表面自由能降低 99%以及附着力降低 94%,同时研究了化学成分和表面形态对表面润湿性的影响。ZENG D 等^[23]制备了一种结合超疏水涂层和石墨烯电加热器的耦合系统,用于飞机机翼的防/除冰。被动式除冰与电热式除冰相结合,使得当加热功率密度达到 0.98 W/cm² 时,表面温度能够升高至 6 ℃,从而有效地防止了机翼上结冰的形成。一种具有高表面疏水性和对高速固体颗粒和水滴的优异侵蚀抗性的新型滑润聚氨酯涂层,被成功开发用于保护快速移动气动结构(如飞机机翼和旋翼叶片)的前端,以防止结冰^[24]。此外,电热防结冰涂层、光热防结冰涂层等利用外部能量除冰的涂层技术也在不断发展,通过将导电材料、光热转换材料引入涂层,实现通电或光照时产生热量融冰除冰。

2.2.3 自清洁涂料

飞机在飞行过程中,机身表面易吸附灰尘、油污等污染物,影响气动性能,增加飞行阻力,降低燃油效率。自清洁涂层能够借助外界能量(如太阳光、雨水冲刷)或自身特殊结构实现表面污染物自动清除。WANG X Y 等^[25]开发了一种新颖、坚固且具有自清洁功能的超疏水纳米粒子-聚合物涂层,它将混合型石墨烯纳米片、二氧化硅纳米颗粒与氟化颗粒和聚二甲基硅氧烷改性的环氧树脂相结合,协同增强了涂层的自清洁功能,还具有出色的防冰、抗腐蚀和机械性能。LIANG G Z 等^[26]通过将双尺寸颗粒(微尺度的聚四氟乙烯颗粒

和纳米尺度的 F-TiO₂ 颗粒)与环氧树脂相结合,在 5083 铝合金基底上构建了一种具有自相似结构的自清洁和抗腐蚀超疏水涂层。此外,仿生自清洁涂层模仿荷叶、蝴蝶翅膀等生物表面微纳结构,利用其超疏水、超亲油等特性实现自清洁,为航空自清洁涂层设计提供了新的仿生学思路。

2.2.4 防火涂料

新型防火涂料在航天航空领域的开发与应用也是世界各国研究的热点。飞机上使用的大部分防火涂料为膨胀性防火涂料,以满足适航要求。董利辉等^[27]基于层次分析法综合各指标对航空涂料防火性能指标评价体系的构建进行了深入的研究,为航空防火涂料的优良耐火性选择提供更好的依据。XAVIER J R 等^[28]开发并评估了一种新型的聚氨酯纳米复合涂层,该涂层包含 ABES 功能化的氮化钽和石墨碳氮化物,使涂层具有出色的耐腐蚀性、阻燃性能、机械强度和防水性能,满足了航空航天材料的关键性能要求,提高了暴露于恶劣环境条件下的航空航天部件的耐久性和安全性。

2.3 环境友好型涂料

随着全球环保法规日益严格,如欧盟 RoHS 指令和 REACH 法规对涂料中有害物质限制不断加强,航空涂料行业向环境友好型转型迫在眉睫。

2.3.1 水性涂料

水性涂料以水为溶剂或分散介质,显著降低了挥发性有机化合物(VOC)排放,减少了对大气环境的污染。德国 Mankiewicz 公司对水性航空涂料的开发研究较早,主要用于飞机结构件上。在航空领域,水性环氧底漆、水性聚氨酯面漆等产品已逐步应用。与传统溶剂型涂料相比,水性涂料 VOC 排放量可降低 70%~90%。但水性涂料也存在一些问题,如干燥速度慢、对施工环境湿度要求高、涂层耐水性和耐腐蚀性有待进一步提高等。为解决这些问题,科研人员通过开发新型水性树脂、优化成膜助剂及交联技术等手段进行改进。一种无需使用挥发性溶剂的环保水性超疏水生物环氧涂层被报道,二氧化硅纳米颗粒的加入大大提高了涂层的疏水性,对铝合金的耐腐蚀性具有良好的自清洁效果^[29]。谢飞舟等^[30]介绍了水性涂料的研究现状及其在航空领域的应用,并指出了存在的问题。王瑞欣等^[31]通过水性丙烯酸聚氨酯树脂结构设计和聚合条件的研究,开发了一款耐候、阻燃的氟改性丙烯酸聚氨酯乳液为主体树脂的水性涂料,满足运输类飞机适航标准(CCAR-25)对耐候阻燃涂层的需求。

2.3.2 粉末涂料

在航空零部件涂装中,粉末涂料具有良好的应用

前景,如用于飞机轮毂、起落架等部件涂装,可提供优异的防护性能和装饰效果。然而,粉末涂料在复杂形状工件涂装时存在涂层厚度不均匀、边角覆盖性差等问题,且对涂装设备要求较高。目前,通过优化粉末涂料配方、改进涂装工艺等措施,逐步克服这些应用障碍,拓展粉末涂料在航空领域的应用范围。粉末涂料行业逐渐从粗放型向细分领域的精准化发展,向下游应用深耕,践行“双碳”目标,绿色发展^[32]。

2.3.3 高固体分涂料

高固体分涂料在保持传统溶剂型涂料施工性能和涂层性能的基础上,通过提高树脂固体含量,降低溶剂用量,从而减少 VOC 排放^[33]。一般高固体分涂料固体含量可达 65%~85%,相比传统溶剂型涂料(固体含量 20%~60%)VOC 排放量大幅降低。在航空涂料中,高固体分聚氨酯涂料、高固体分丙烯酸涂料、高固体分环氧防腐涂料等^[34]性能满足航空材料规范要求,已在部分机型上进行应用。但高固体分涂料在提高固体含量的同时,会导致涂料黏度增加,影响施工性能,因此需要开发高效的降黏技术和配套施工工艺,如采用特殊的流变助剂、优化喷涂设备等,以确保高固体分涂料在航空领域的广泛应用。

2.4 智能涂装技术

2.4.1 自动化喷涂系统

喷涂是飞机制造过程中飞行器表面处理的重要工艺,涂层的厚度和喷涂覆盖率是喷涂工艺中的主要问题。传统航空涂料喷涂主要依靠人工操作,存在劳动强度大、生产效率低、涂层质量一致性难以保证、涂料浪费严重等问题,还可能导致涂层使用寿命大幅缩短和过早失效。自动化喷涂系统利用机器人、自动化喷枪等设备,实现了无色差、无气泡、无粗糙的涂料精准喷涂,提高了涂层质量稳定性和生产效率,同时,有效改善人工作业环境,保护现场工人的身心健康。赵景山等^[35]研究了航空航天器、船舶、高铁等大型整机及其零部件生产制造中超大作业空间涂装机器人的研究进展、发展趋势和主要技术挑战。ABB 公司开发的航空专用喷涂机器人,配备高精度视觉识别系统和智能喷枪控制技术,可根据工件形状、尺寸及涂层厚度要求,自动规划喷涂路径,精确控制喷涂参数,同时大幅缩短了涂装周期。希润为中航无人机设计完成的整机喷涂方案,是国内首个实现九轴联动以及视觉偏移引导的飞机喷涂项目。炎凌嘉业通过将自主研发的防爆机器人与机器人安全、喷涂工艺和空间定位导航等技术相结合,构建了综合系统,解决了飞机表面涂装作业的难题,并通过中国商飞的认证^[36]。QIU S 等^[37]研究了 3D 数字孪生建模技术,实现了飞机自动喷涂系统中喷涂操作过程的全

视图、全因子 3D 监控,解决了飞机自动喷涂系统中缺乏闭环反馈优化工具的问题。基于 3D 测量定位技术和机器人自动喷涂工艺,李慧团队^[38]提出了民用大飞机整机外表面自动涂装解决方案。此外,自动化喷涂系统还可与生产线上的其他设备集成,实现涂装过程全自动化、智能化管理,降低人工成本和人为因素对涂层质量的影响。

2.4.2 涂层性能在线监测技术

航空涂层在服役过程中,受环境因素、机械载荷等作用,性能会逐渐劣化,如出现腐蚀、磨损、开裂等缺陷,影响飞行安全。涂层性能在线监测技术通过在涂层中嵌入传感器或利用外部检测设备,实时监测涂层的物理、化学性能变化,及时发现涂层缺陷并预警。常见的监测技术包括基于电阻、电容变化的电学监测法,利用超声波、红外热成像的物理监测法,以及基于光纤光栅传感的光学监测法等。例如,光纤光栅传感器可实时监测涂层应变、温度变化,通过分析应变数据可判断涂层是否存在开裂、脱黏等缺陷;红外热成像技术则可快速检测涂层表面温度分布,根据温度异常区域识别涂层内部的腐蚀、空洞等缺陷,为航空涂层维护保养提供科学依据,实现从定期维护向基于状态的维护转变,降低维护成本,提高飞行安全性。

涂装不仅是产品制造的关键环节,更是连接材料科学、环保技术与工业设计的枢纽。现代涂装通过智能化、绿色化转型,持续推动制造业向高效、可持续方向发展。未来,随着新材料与数字技术的融合,数字孪生技术的应用,涂装将在功能多样性与工艺精度上实现更大突破。

3 国内外航空涂料发展现状对比

3.1 技术水平差异

国外航空涂料技术起步早,在高性能树脂合成、新型功能材料开发、复杂涂层结构设计及智能涂装工艺等方面处于领先地位。以 PPG、阿克苏诺贝尔等为代表的国际涂料巨头,拥有完善的研发体系和强大的技术创新能力,其产品性能卓越,在全球航空涂料市场占据主导地位。相比之下,国内航空涂料技术虽取得一定进步,但在部分关键技术领域仍与国外存在一定的差距。例如,我国高性能工程树脂企业逐渐形成了较强的国际竞争力,但与国际先进水平相比,仍存在一定不足,如高端产品依赖进口、自主创新能力有待提升。在智能涂层和先进涂装技术方面,国内与国外成熟的商业化产品和大规模应用还存在一定差距。不过,国内在部分领域也实现了突破,例如,中国科学院宁波材料所研发的石墨烯增强涂层,在提高涂层力学性能和防腐性能方面取得显著成效。

3.2 市场格局差异

国际航空涂料市场集中度高,PPG、阿克苏诺贝尔、宣伟等少数几家企业凭借技术优势和品牌影响力,占据全球航空涂料市场 70% 以上份额,产品广泛应用于波音、空客等国际主流飞机制造商。这些企业在全范围内建立了完善的销售网络和技术服务体系,对市场需求响应迅速,通过持续创新不断推出新产品,巩固其市场地位。

国内航空涂料市场近年来发展迅速,随着国产大飞机 C919 的研制和量产,以及航空事业的推进,市场规模不断扩大。但市场竞争格局较为分散,本土企业众多,但规模普遍较小,技术水平参差不齐。目前,国内航空涂料市场仍以外资品牌为主,国产涂料市场份额有待进一步提升。不过,随着国内企业技术研发投入增加和产品质量提升,在一些细分领域已逐步实现国产替代,如在 C919 机身部分涂层材料供应中,国产涂料占比已超过 60%,未来国产航空涂料企业有望借助国产飞机发展机遇,扩大市场份额,提升行业竞争力。

3.3 研发投入与创新能力差异

国外航空涂料企业高度重视研发投入,每年将大量资金用于新技术、新产品研发。企业与高校、科研机构建立了紧密的产学研合作关系,形成了完善的创新生态系统,能够快速将科研成果转化为实际产品。PPG 公司与多所国际知名高校联合开展航空涂料前沿技术研究,不断推出具有创新性的产品和解决方案。

尽管近年来国内高校和科研机构在航空涂料基础研究方面取得不少成果,但产学研协同创新机制尚不完善,科研成果转化效率较低,导致国内航空涂料企业在高端产品研发和市场竞争中处于劣势。为改变这一现状,国内企业需加大研发投入,加强产学研合作深度与广度,建立以企业为主体、市场为导向、产学研深度融合的技术创新体系,提高自主创新能力。

4 航空涂料发展面临的挑战与机遇

4.1 挑战

4.1.1 高性能材料研发瓶颈

虽然近年来航空涂料在材料创新方面取得了一定进展,但在高性能材料研发上仍面临诸多瓶颈。例如,用于高温、高负荷环境下的高性能树脂,其合成工艺复杂,成本高昂,且在大规模生产过程中,产品质量稳定性难以保证。同时,一些新型功能材料如具有特殊光学、电学性能的纳米材料,在与涂料基体的兼容性方面存在问题,容易导致材料性能下降或涂层缺陷。此外,对于生物基等环境友好型材料,如何在满足航空涂料严苛性能要求的同时,实现大规模、低成本制备,也是亟待解决的难题。

4.1.2 复杂服役环境适应性难题

航空器服役环境极为复杂,从高空的低温、高湿度、强紫外线到低空的复杂气象条件,再到机场周边的化学污染,航空涂料需要在极端且多变的环境下,长时间保持涂层性能稳定,这对涂料的综合防护性能提出了极高要求。研发能够同时适应多种复杂环境因素的高性能涂料体系,是当前面临的重大挑战之一。

4.1.3 环保与性能平衡难题

在环保法规趋严的大背景下,航空涂料需大幅降低 VOC 排放,向高固体分、水性、粉末等环境友好型涂料转型。荷兰 AKZO NOBLE 公司、美国 PPG 公司、德国 Mankiewicz 等相继推出一些适应市场环保需求的产品。然而,在追求环保的同时,如何确保涂层性能不下降甚至有所提升,成为行业面临的两难困境。如何在环保与性能之间找到最佳平衡点,通过材料创新、工艺优化等手段,实现环境友好型航空涂料性能突破,是亟待解决的关键问题。

4.2 机遇

4.2.1 航空产业发展带来的市场机遇

全球航空产业持续扩张,民用航空方面,新兴经济体航空市场需求旺盛,国际航空运输协会(IATA)预计未来 20 年全球新增客机数量将超过 40 000 架,这将直接带动航空涂料市场需求大幅增长。同时,飞机更新换代速度加快,老旧飞机维修、重涂需求稳定,进一步扩大了市场规模,对高性能、多功能等航空涂料的需求迫切,为航空涂料企业提供了广阔市场空间。

4.2.2 技术创新驱动的产品升级机遇

材料科学、纳米技术、智能制造等领域的技术创新,为航空涂料发展注入新动力。纳米材料的引入,可显著提升涂层的力学性能、耐腐蚀性、功能性等;3D 打印技术在航空零部件制造中的应用,促使与之适配的特种涂料研发,拓展了航空涂料应用领域;人工智能、5G、大数据等技术与涂装工艺结合,实现涂层性能精准控制、智能化喷涂,提高生产效率和涂层质量稳定性;喷墨打印与 5G、云计算等前沿技术的结合,有望提高国内民用飞机的工业生产水平。利用纳米技术制备的超疏水涂层,将有效减少飞机表面结冰风险,提升飞行安全性;基于人工智能的涂装质量检测系统,能够快速、准确识别涂层缺陷,将检测效率提高 50% 以上,降低了人工检测成本和误差。

4.2.3 政策支持与产业协同机遇

各国政府纷纷出台政策支持航空产业及相关配套产业发展,鼓励航空涂料企业加大研发投入,开展技术创新。我国“十四五”规划将航空航天产业列为战略性

新兴产业重点发展方向,对航空涂料关键技术研发给予资金支持、税收优惠等政策扶持,引导企业、高校、科研机构加强产学研合作,构建协同创新体系。同时,航空产业链上下游企业合作不断深化,涂料企业与飞机制造商、零部件供应商建立紧密合作关系,从产品设计阶段介入,根据实际需求定制化开发涂料产品,加速了新产品研发和产业化进程,提升了航空涂料产业整体竞争力。

5 航空涂料发展趋势展望

5.1 环境友好化持续深化

随着全球环保意识提升和法规日益严格,环境友好型航空涂料将成为主流发展方向。未来,水性涂料将通过改进树脂合成技术、优化助剂配方及干燥工艺,进一步提高涂层性能,缩小与溶剂型涂料差距,在航空涂料市场占有率有望大幅提升;粉末涂料将重点攻克复杂工件涂装均匀性难题,开发新型固化体系,拓宽其在航空领域应用范围;高固体分涂料将不断提高固体含量,降低 VOC 排放,同时通过分子结构设计和流变学调控,保持良好施工性能。此外,生物基涂料等新型绿色涂料也将迎来发展机遇,其原料可再生、可降解,对环境友好,若能在性能上取得突破,将为航空涂料绿色转型提供新选择。

5.2 智能化与自适应涂层发展

智能涂层将成为航空涂料技术创新的重要方向。自修复涂层通过在涂料中引入微胶囊、形状记忆材料等,实现涂层损伤自动修复,延长涂层使用寿命,降低维护成本。例如,基于微胶囊技术的自修复涂层,当涂层出现裂纹时,微胶囊破裂释放修复剂,在催化剂作用下迅速固化,填补裂纹,恢复涂层完整性。感知型涂层则利用传感器技术,实时监测涂层物理、化学性能变化,如温度、应力、腐蚀程度等,并将信息反馈给飞机控制系统,为飞机维护提供精准依据,实现从定期维护向基于状态的维护转变,提高飞行安全性和经济性。此外,自适应涂层可根据外界环境变化(如温度、湿度、光照)自动调节涂层性能,如在高温时涂层颜色改变以增强散热,在高湿度环境下表面结构调整以防止结露,为飞行器提供更可靠的防护。

5.3 多功能复合涂层拓展

为满足航空飞行器日益复杂的性能需求,多功能复合涂层将得到广泛应用。未来航空涂料将集防护、装饰、防结冰、自清洁、导电等多种功能于一体,通过优化涂层结构设计和材料复合技术,实现各功能协同作用。同时,随着量子技术、超材料等前沿技术发展,多功能复合涂层将不断拓展新功能,进一步提升涂层的特种性能,为航空装备性能提升提供强大技术支撑。

5.4 跨学科融合与协同创新

航空涂料发展涉及材料科学、化学工程、物理学、航空航天工程等多个学科领域，未来需加强跨学科融合，汇聚各学科优势力量，开展协同创新。高校、科研机构与企业应建立紧密合作机制，高校和科研机构在基础研究方面发挥优势，探索新型材料、新反应机理、新涂层设计理念等；企业则利用自身工程化能力和市场敏锐度，将科研成果快速转化为实际产品，推向市场。同时，产业链上下游企业间应加强协同，从原材料供应、涂料生产、涂装施工到售后维护，各环节紧密配合，共同推动航空涂料技术进步和产业发展。

5.5 标准体系完善与国际竞争力提升

随着航空涂料技术不断发展，完善标准体系成为行业发展的必然要求。我国的飞机标准主要是中国商飞（CMS）标准，美国的民用飞机标准主要采用波音（BMS）标准。需加快制定和更新航空涂料相关标准，涵盖原材料质量控制、涂料性能测试方法、涂装工艺规范、涂层服役寿命评估等方面，确保产品质量一致性和可靠性，为行业健康发展提供规范指引。同时，积极参与国际标准制定，将我国先进技术和创新成果融入国际标准，提升我国在国际航空涂料领域话语权。

6 结语

航空涂料作为航空产业的关键配套材料，其技术进步对提升飞行器性能、保障飞行安全、推动航空产业可持续发展至关重要。当前，航空涂料在高性能防护涂层、功能性涂层、环境友好型涂料及智能涂装技术等方面取得显著进展，但也面临着高性能材料研发瓶颈、复杂服役环境适应性难题以及环保与性能平衡等挑战。展望未来，航空涂料将呈现三大趋势：环境友好型涂料占比持续提升，智能化涂层实现损伤自感知与自适应调控，多功能复合涂层向“防护-功能-感知”一体化方向发展，跨学科融合与协同创新将成为技术突破的关键驱动力，标准体系完善与国际竞争力提升将为产业发展保驾护航。我国航空涂料行业应抓住机遇，加大研发投入，突破关键技术，加强产学研合作与产业链协同，逐步缩小与国际先进水平差距，实现从跟跑向并跑、领跑的转变，为我国航空事业迈向更高台阶提供强有力的材料支撑。

参考文献：

- [1] 杨红涛,张剑飞.航空飞行器外表面防护涂层现状及未来发展[J].现代涂料与涂装,2022(8):16-21.
- [2] 朱致远.MXenes在涂料方向的研究进展[J].涂层与防护,2024(7):59-65.
- [3] 欧文,邹新阳,周如东,等.高固体分聚氨酯航空涂料的配方设计要点[J].涂料工业,2015(8):82-87.
- [4] 刘治国,张世录,李心舒,等.某新型航空涂料海洋环境下耐腐蚀性试验研究[J].环境技术,2022(1):12-15.
- [5] 宋志强,宋福如,游传榜,等.石墨烯改性环氧富锌涂料的制备及性能研究[J].信息记录材料,2022(1):14-17.
- [6] 靳磊,陈酒姜,孙汉军,等.蒸汽隔离涂层制备及力学与环境性能研究[J].装备环境工程,2024(10):70-78.
- [7] SUN Z P, HE G Y, MENG Q J, et al. Corrosion mechanism investigation of TiN/Ti coating and TC4 alloy for aircraft compressor application [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020(6):1824-1835.
- [8] CORNET A J, HOMBOR A M, HOEN-VELTEROP L, et al. Corrosion protective performance evaluation of structural aircraft coatings in cyclic salt spray, outdoor and in-service environments [J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 175: 109566.
- [9] WANG J H, ZENG Q F, LI H L, et al. Exploration of aviation bearings protection: Highly corrosion-resistant and wear-resistant biomimetic composite coatings inspired by mussels[J]. Progress in Organic Coatings, 2025, 203: 109183.
- [10] 陈赞聪,陈文刚,李祖阳,等.减摩耐磨激光熔覆涂层的研究进展[J].功能材料,2025(6):6050-6060.
- [11] 王振林,陆文明,孙浩,等.直升机旋翼前缘弹性耐砂蚀涂层的制备和性能研究[J].涂料工业,2024(5):71-75.
- [12] 孟佩瑶,孔令艳,肖曾,等.磷酸盐耐高温防腐涂层在发动机中的应用[J].航空维修与工程,2024(9):35-37.
- [13] ULANOWIC L, DUDZINSKI A. Heat-resistant protective coatings applied to aircraft turbine blades by supersonic thermal spraying and diffusion-aluminizing[J]. Coatings, 2024(14):1554.
- [14] HUSAROVA I O, SOLODKYI Y V, MANKO T A, et al. Ceramics based on reaction-bonded boron carbide for heat protection coatings of space aircraft [J]. Materials Science, 2023(58):740-747.
- [15] 陶顺行,杨加胜,邵荣,等.航机CMC热端部件用热喷涂涂层的机遇与挑战[J].无机材料学报,2024(10):1077-1083.
- [16] 王德强,陈里根,钟小宏,等.航空涂料配方优化及其高温性能与抗腐蚀性研究[J].化工管理,2025(16):137-140.
- [17] 王瑜,李娟娟,齐建涛.自修复涂料的应用研究进展[J].涂料工业,2024(10):30-35.
- [18] ESPEUTE E, MARTINEZ-DIAZ D, Sánchez P V, et al. Smart electroactive self-repairable coating involving end-of-life aircraft prepregs by mechanical recycling [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 469: 143111.
- [19] YANG L C, LI Y, HUAN D J, et al. An anti-icing coating

- with superhydrophobic and photothermal properties for aircraft icing protection system [J].*Physicochemical and Engineering Aspects*,2025,709:136150.
- [20] KAGANOVIC M, GIBEON E, BAKALINSKY A S, et al. Spontaneous formation of a sustainable antifreeze coating by peptide self-assembly [J].*Applied Materials & Interfaces*, 2025(10):16256-16267.
- [21] PATIL A V, GANJU D, WAJAHAT I, et al. Section student papers investigation on superhydrophobic and icephobic coatings for anti-icing in aircraft [J]. *Journal of Aerospace Sciences and Technologies*,2023(4):426-432.
- [22] PISCITELLI F, CHIARIELLO A, DABKOWSK D, et al. Superhydrophobic coatings as anti-icing systems for small aircraft [J].*Aerospace*,2020(2):1-18.
- [23] ZENG D, LI Y, LIU H, et al. Superhydrophobic coating induced anti-icing and deicing characteristics of an airfoil[J]. *Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects*,2023,660:130824.
- [24] SONG N H, BENMEDDOU A. Erosion resistant hydrophobic coatings for passive ice protection of aircraft[J].*Applied Sciences*,2022(19):9589.
- [25] WANG X Y, LIN Z B. A novel high-performance coating with hybrid nanofiller reinforcement for superior self-cleaning, anti-icing, and corrosion resistance properties[J].*Journal of Building Engineering*,2023,80:107993.
- [26] LIANG G Z, LU F, ZHANG B B. Robust superhydrophobic composite coating with dual-sized particles for self-cleaning and anti-corrosion of 5083 aluminum alloy [J].*Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*,2025, 708:136020.
- [27] 董利辉,何迎双,郑秋雨,等.航空涂料防火性能指标评价体系构建的研究[J].*现代涂料与涂装*,2025(4):5-8.
- [28] XAVIE J R, VINODHIN S P. Advanced nanocomposite coating for aluminium alloy with enhanced corrosion resistance, flame retardancy, and mechanical strength in aircraft manufacturing industries[J].*Physicochemical and Engineering Aspects*,2024,698:134543.
- [29] ZHENG S L, BELLIDO-AGUIL D A, Wu X H, et al. Water-borne superhydrophobic bio-epoxy coating on Al alloy for corrosion-resistant and self-cleaning applications[J].*Surface and Coatings Technology*,2025,496:131621.
- [30] 谢飞舟,张小波,冀恒亮,等.水性涂料的研究现状及其在航空领域的应用[J].*现代涂料与涂装*,2019(5):20-22.
- [31] 王瑞欣,王红妮,陈素明,等.航空耐候阻燃水性丙烯酸聚氨酯涂料的制备及应用[J].*电镀与涂饰*,2024(10):108-115.
- [32] 吴向平,宁波,李馨,等.我国粉末涂料与涂装行业运行分析[J].*涂层与防护*,2025(2):36-43.
- [33] 于国玲,张继芳,王学克,等.新型高固体分涂料的最新研究进展[J].*弹性体*,2020(2):73-76.
- [34] 魏莉,熊瑜,梁璐,等.快干型高固体分环氧防腐底漆的研究[J].*表面技术*,2018(5):195-201.
- [35] 赵景山,魏松涛,赵东,等.超大作业空间涂装机器人研究进展[J].*航空制造技术*,2023(12):46-55.
- [36] 李轲昕.机器人“喷涂”国产制造业蓝图[J].*机器人产业*, 2025(2):101-105.
- [37] QIU S, LIU S, KONG D, et al. Three-dimensional virtual-real mapping of aircraft automatic spray operation and online simulation monitoring [J].*Virtual Reality and Intelligent Hardware*,2019(6): 611-621.
- [38] 李慧,徐磊,高云萌,等.民用大飞机整机外表面自动涂装解决方案[J].*科技创新与应用*,2025(14):6-9. ◆

~~~~~

(上接第8页)

#### 参考文献:

- [1] 刘涛,蔡昕.机器视觉系统在涂装车间的应用[J].*现代涂料与涂装*,2016(10):51-58.
- [2] 段峰,王耀南,雷晓峰,等.机器视觉技术及其应用综述[J].*自动化博览*,2002(6):59-61.
- [3] 朱云,凌志刚,张雨强.机器视觉技术研究进展及展望[J].*图学学报*,2020(6):872-889.
- [4] 王锦凯,宋锡瑾.计算机视觉技术应用研究综述[J].*计算机时代*,2022(10):1-8.
- [5] 王雷勇.汽车涂装生产线的智能制造升级研究[D].北京:清华大学,2020:16-22.
- [6] 陶禹,王新峰,高超波,等.浅谈涂装车间车身锁紧[J].*企业技术开发*,2017(6):51-58.
- [7] 陆颖.汽车自动化生产线升降机运行安全分析[J].*前沿探讨*,2018(4):16-17.
- [8] 王玉波.汽车涂装车间消防安全管理体系建设[J].*汽车画刊*,2024(8):57-59.
- [9] 刘赫,林宣乐.汽车涂装表面质量自动检测技术及应用[J].*现代涂料与涂装*,2020(5):42-44.
- [10] 陈滋化,张红刚,吕超,等.机器视觉技术在汽车 PVC 密封质量检测方面的应用与研究[J].*现代涂料与涂装*,2022(11):46-48. ◆