飞机外部涂装喷墨打印技术研究

纪繁祥 姜甲玉
海装沈阳局 黑龙江 哈尔滨 150000

摘 要 飞机外部涂装喷墨打印技术是一种新型涂装技术，可满足现代航空产品外观装饰要求，实现数字化控制与精密制造，能对机身复杂曲面进行高精度、绿色化涂装，有效缩短涂装周期，提升墨水利用率，同时能降低有害气体排放，优化和提升涂层性能。本文首先分析了喷墨打印技术特征，探究了该技术的应用流程和关键技术的核心要点，以期为航空涂装工艺表面处理提供参考。

关键词 飞机；外部涂装；喷墨打印技术；精准涂装

Research on Inkjet Printing Technology for Aircraft Exterior Coating

Ji Fan-xiang, Jiang Jia-yu
Naval Equipment Department Shenyang Bureau, Harbin 150000, Heilongjiang Province, China

Abstract Inkjet printing technology for aircraft exterior coating is a novel coating technique that meets the aesthetic requirements of modern aviation products, enables digital control and precision manufacturing, and achieves high-precision, environmentally-friendly coating on complex fuselage surfaces. It effectively shortens the coating cycle, improves ink utilization, reduces harmful gas emissions, and optimizes coating performance. This paper first analyzes the characteristics of inkjet printing technology, explores its application process and the key points of its core technologies, and aims to provide a reference for surface treatment in aviation coating processes.

Key words Aircraft; Exterior Coating; Inkjet Printing Technology; Precision Coating

喷墨打印技术具有非接触、数字化、节能环保等特点，在多领域得到了广泛应用。飞机外部涂装是航空制造的关键环节，与机身防护、识别标识、气动优化等密切相关。传统飞机涂装方式存在涂层厚度不均、材料浪费严重、生产周期长等问题，难以满足现代航空工业制造需求。而喷墨打印技术的应用可改善上述问题，还能进行个性化定制，实现涂装图案的精准复刻，保证涂层均匀，契合现代航空绿色制造理念，加强对该技术的深度研究与应用，可推动航空涂装工艺转型发展。

1 飞机外部涂装喷墨打印技术特征

1.1 数字化精准控制

喷墨打印技术依托计算机辅助设计和制造技术，可精准复刻涂装图案，根据不同机型的涂装要求和设计需求进行个性化涂装，将图案直接沉积到基底选定区域上，整个过程自动化程度高、图案分辨率高，满足飞机产品各部位的涂装需求，如航空标识、装饰图案等。同时，通过反馈控制系统，根据涂装喷墨打印效果，动态调整喷头运动速度与喷射压力，确保适应机身曲面、转角等复杂结构，保证图案完整和涂层均匀，实现数字化精准控制。

1.2 绿色环保优势

喷墨打印技术主要使用水性墨水或UV固化墨水等环保材料，这类材料中挥发性有机化合物（VOC）含量较少，与传统溶剂型涂料相比环保性强[1]。VOC的排放浓度较低，符合国际航空环保标准。在航空标识和装饰图案打印过程中，不会产生废水、废渣，墨水利用率高，实现了材料与资源的高效利用，减轻了对环境的影响，无须投入较多资金用于环境治理，有利于航空工业可持续发展。

1.3 高效集成化作业

飞机外部涂装标识和图案复杂，喷墨打印技术可一体化完成图案打印与涂层沉积，简化了传统涂装工艺中的遮蔽、打磨、修补等工序，从而有效缩短飞机涂装周期，单架飞机涂装周期可缩短5～10 d，生产效率显著提升。所用的打印设备可实现模块化集成，可根据涂装需要灵活配置模块，还支持自动化流水线作业，受人工操作误差的影响小，能保证涂装工艺的稳定性，确保喷墨打印的均匀性，实现高效集成化作业。

1.4 涂层性能适配性

喷墨打印技术应用较为灵活，可满足飞机外部涂装的多样化需求，使用专用墨水配方和专门的固化工艺，能形成涂层厚度均匀、结构稳定且耐腐蚀性、耐磨性和耐候性良好的涂层，即使

在高空低温、强紫外线、强气流冲击的环境条件下，也能保持稳定性能，且附着力达标，与传统涂装涂层相比使用寿命更长，性能适配性更高，是现代航空工业涂装工艺中的关键技术。

2 飞机外部涂装喷墨打印技术应用流程

2.1 前期准备阶段

1.机身表面预处理。在飞机外部涂装喷墨打印技术应用前，为确保技术效果，需提前进行机身表面预处理，做好全面清洁工作，常用高压水洗与手工擦拭结合的方式，去除表面油污、灰尘及残留旧涂层，确保表面清洁度达标；机身表面清洁完成后，进行脱脂处理，使用环保型脱脂剂去除表面油脂，再通过喷砂方式提升表面粗糙度，确保后续涂层能紧密附着于机身表面[2]；最后涂刷专用底漆，厚度为20～30 μm，对底漆进行固化处理，确保基底均匀。

2.方案设计与材料设备准备。飞机涂装喷墨技术应用之前，还应根据实际需要科学设计涂装方案，明确喷墨打印技术流程。首先，提前收集和获取机身表面精确几何数据，根据涂装需求，利用CAD软件构建1∶1数字化涂装模型，确定图案坐标数据、颜色参数和涂层厚度等，确保信息完整准确；其次，模拟喷墨打印效果，优化调整技术参数，以防实际喷墨打印过程中出现图像扭曲、错位情况；最后，做好设备与材料的调试与准备工作，根据涂装方案选择适配设备，进行喷头校准，调试设备使用性能，确保移动速度、喷射稳定性达到要求标准。对于所用的墨水，应检查黏度和表面张力等性能参数，并利用密封式供应系统供应墨水，确保供应及时、顺畅。

2.2 核心打印阶段

喷墨打印过程中，首先，进行路径规划和定位校准：将数字化涂装模型导入打印控制软件，软件根据飞机曲面条件和涂装要求自动生成适应性、针对性强的打印路径；可通过NURBS曲面拟合技术分解复杂曲面，优化喷头运动轨迹，保证喷墨打印效果。定位校准时主要利用多种传感器设备，基于多传感器融合定位系统，确定图案喷墨打印的起始位置，并设置校准标记点，为后续路径精度验证奠定基础，确保定位误差可控。

其次，进行分层打印和液滴沉积。启动打印设备，喷头沿预设路径移动，提前设定喷头移动速度与喷墨方式，根据控制信号精准调控打印设备运行状态，将墨水均匀喷射到机身表面，确保液滴体积、图像分辨率达标。该过程主要采用分层打印方式，先打印底色涂层，再依次叠加图案层、保护涂层，每层打印完成后，静置片刻，使涂层表面趋于平整，保证涂层均匀[3]。

最后，要做好误差修正工作。在实际喷墨打印过程中应实时监测，利用机器视觉系统监测涂层各项参数，如厚度、图案位置和液滴沉积状态等，若存在偏差，需要及时调整。通常利用激光测距传感器动态调整喷头位置，确保其与机身表面距离合理，一般为1～3 mm。系统还会根据偏差进行误差补偿，及时修正喷头运动参数，调整喷射顺序，确保涂装质量达标。

2.3 后期固化与检测阶段

飞机机身图案喷射打印完成后，还应进行复合固化处理，采用UV—热复合固化工艺，先利用UV光照定型，照射时间持续30 s，再进行低温热固化，温度通常维持在60～80 ℃，持续30 min左右，确保涂层内部完全固化。固化处理期间也要监测温度变化，了解图案涂层各部位温度分布情况，注重温度控制，以防局部过热导致机身材料性能发生改变。

固化后的涂层要做好清洁处理工作，清除表面杂质，并使用等离子体表面处理技术修复涂层瑕疵，提升整体光滑度[4]。若存在局部不平整问题，使用激光微抛光技术进行平整处理，调节涂层表面粗糙度，使相关参数符合航空装备质量标准。

涂层固化处理后，需要进行质量检测验收，通过超声检测评估涂层内部密度，确认致密性达标，同时检测涂层各部位厚度以及均匀性，确保误差在5 μm以内。此外，检查图案的清晰度、色彩以及标识是否与设计方案一致，保证达到航空涂装标准。

3 飞机外部涂装喷墨打印技术核心内容

3.1 复杂曲面高精度路径规划与定位

飞机机身属于复杂自由曲面结构，表面存在曲率变化、结构接缝、铆钉凸起等复杂特征，需要进行打印路径的精准规划与喷头的准确定位。工程中常用自适应路径生成算法，根据机身三维模型，采用非均匀有理B样条（NURBS）曲面拟合技术合理分解复杂曲面，结合遗传算法优化喷头运动路径，确保喷墨打印专用设备的运动路径与机身曲面完全贴合。同时，引入曲面曲率补偿机制和动态速度调节机制，合理调节喷头运动速度与液滴喷射频率，避免图案拉伸变形；集成多种传感器，通过多传感器融合定位实时采集喷头位置及其与机身表面的距离等数据，依据规划路径实现喷头精准定位。还要建立误差预测模型，主要利用机器学习算法分析喷头运动误差，通过卡尔曼滤波算法融合多源数据，消除设备振动、机身热变形带来的定位误差，并进行实时误差补偿，保证图案喷涂精度。还要利用机身表面设置的校准标记点，定期修正累计定位偏差，保证长距离打印过程中的精度稳定性。

3.2 航空级专用喷墨墨水研发

墨水性能与涂装涂层性能密切相关，要提升飞机机身涂装

的外观质量、延长涂层使用寿命，应根据航空装备的严苛要求，研发航空级专用喷墨墨水。应保证墨水具有适宜的黏度和表面张力，能形成稳定液滴；还要具备优异的耐候性、耐腐蚀性、抗紫外线老化性能，且与飞机机身基材和底漆具有良好的附着力和兼容性。传统溶剂型涂料难以适配喷墨打印工艺要求，应根据飞机机身基材类型，对墨水进行适配性设计，通常选用改性丙烯酸酯乳液、聚氨酯分散体作为成膜树脂，添加硅烷偶联剂提升界面结合力，还要优化墨水的pH值和离子强度，避免喷墨打印后出现脱层、起皮问题。为提升墨水的防护性能，添加适量纳米二氧化硅、纳米氧化锌等填料，可提升涂层硬度与耐磨性；也可加入氟碳树脂、聚硅氧烷等耐候性成分，增强涂层耐高低温和抗紫外线老化能力[5]。另外，还可加入适量保湿剂、流平剂调节墨水黏度与表面张力，利用超声分散与机械分散复合工艺控制颜料颗粒粒径，提升墨水稳定性与色彩均匀性。

3.3 选用大型化高稳定性打印设备

飞机机身尺寸较大，为实现高效化生产制造，需保证喷墨打印设备运行稳定、运动速度适宜且打印幅面充足，以满足大型飞机的整体涂装需求，避免分段打印出现涂层衔接不畅问题。要对打印设备进行模块化结构设计，选用适宜的运动机构与线性电机驱动，保障喷墨打印设备使用期间运动速度适宜且喷涂稳定。设备可根据功能分为喷头模块、运动模块、墨水供应模块和控制模块，根据飞机外部涂装需求和机型尺寸灵活组合，保证涂装效果。同时设置多个喷头，保证喷头间距合理，实现同步喷射，通过协同控制扩展打印幅面，还能避免单个喷头故障影响打印进度。利用密封式墨水供应系统提升打印设备的环境适应性，使其能在恒温、恒湿环境中稳定运行，降低故障发生率。

3.4 复合固化与无损后处理技术

喷墨打印形成的液滴涂层需经过固化处理才能形成具备防护性能的致密涂层，所用的固化工艺是否合理，直接影响涂层使用性能。飞机外部涂装涂层固化处理中，需兼顾快速固化和性能优异要求，将固化时间控制在合理范围内，确保满足生产需求；同时保证固化后涂层硬度合理、附着力达标，降低外部作用力的影响。实际应用喷墨打印技术时，采用UV—热复合固化工艺，通过UV固化实现涂层表面快速定型，再进行低温热固化处理，确保涂层内外部固化质量达标。该固化工艺应用中，还应根据现实需要优化调整光照强度、热固化温度和固化时间，在保障涂层性能的同时提升固化效率。为进一步优化涂层表面性能，可采用等离子体表面改性技术进行处理和优化，该技术不会破坏涂层完整性，还能提升表面光滑度与致密性。对不平整区域，使用激光微抛光技术替代传统打磨技术，同时结合在线监测技术，通过实时监测，及时发现并修复缺陷，提升涂层质量。

4 结束语

飞机外部涂装喷墨打印技术属于新型数字化涂装技术，融合了多学科技术，与传统涂装工艺相比，其涂装精度和效率高，对环境污染小，在航空工业领域应用前景广阔。但在技术实际应用中，需做好高精度路径规划，还应结合实际需求研发专用墨水与大型设备，进行涂层的固化处理，确保喷墨打印技术的应用效果。未来，多种先进技术与设备的研发应用，可推动航空涂装领域技术变革，向着数字化、智能化和绿色化方向发展，有效提升飞机装备表面处理技术水平。

参考文献

[1]鲁梦阳,周睿,高森孟.民航客运飞机涂装的色彩与视觉体验优化研究[J].色彩,2025(7):17-20.

[2]曹玉姝,崔庆康,项松.基于感性工学的通用飞机涂装设计方法研究[J].包装工程,2023,44(2):48-55.

[3]冯霞.浅谈通用飞机涂装设计[J].科技视界,2021(4):18-19.

[4]彭春宁,黄海水.喷墨打印中墨滴与介质间润湿行为的研究[J].信息记录材料,2025,26(7):21-24.

[5]王家奇,陆利坤,刘为.喷墨打印控制系统的现状和趋势[J].动力系统与控制,2025,14(4):428-439.

（本文编辑 曹 阳）

