

# 复合材料飞机的喷漆施工

赵治朋

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723213

**摘要：**复合材料飞机喷漆施工是一项技术密集型任务，关键在于漆料选择、表面预处理及喷涂技术的精准执行。本文详细阐述了复合材料特性对漆料性能的要求，包括紫外线屏蔽、耐介质性和柔韧性等。介绍了表面清洁、褪漆、损伤评估与修理等预处理步骤。重点探讨了底漆与面漆的喷涂技术，包括涂层厚度控制、喷涂操作要点及特殊部位处理。此外，本文还强调了施工中的质量控制方法、检验标准及不合格品处理流程，确保喷漆施工满足飞机性能与美观的双重需求。

**关键词：**复合材料飞机；喷漆施工；关键技术

**引言：**随着航空技术的不断进步，复合材料在飞机制造中的应用日益广泛，其轻质高强、耐腐蚀等特性为飞机性能的提升带来了显著优势。然而，复合材料的化学惰性和热膨胀特性对喷漆施工提出了更高要求。本引言旨在探讨复合材料飞机喷漆施工的重要性与挑战，介绍如何通过科学合理的漆料选择、精细的表面预处理及先进的喷涂技术，确保涂层与复合材料基体的良好附着，同时满足飞机的外观美学与长期防护需求。

## 1 复合材料概述

### 1.1 复合材料的定义与分类

#### 1.1.1 定义及组成

复合材料是由两种或两种以上性质不同的材料，通过物理或化学方法复合而成的新型材料，通常包含增强体和基体两部分。增强体承担主要载荷，如纤维、颗粒等；基体起粘结、保护增强体并传递应力的作用，常见的有树脂、金属、陶瓷等。二者协同作用，使复合材料具备单一材料无法企及的综合性能。

#### 1.1.2 常用类型及飞机应用

(1) 碳纤维复合材料：以碳纤维为增强体，树脂为基体，具有高强度、高模量、轻质特点，广泛用于飞机机身、机翼蒙皮等部件，如波音787机身采用约50%的碳纤维复合材料，大幅降低机身重量。(2) 玻璃纤维复合材料：成本较低，耐腐蚀性好，多用于飞机舱门、内饰件等非承力结构，可减少金属材料的腐蚀问题。(3) 硼纤维复合材料：强度和耐热性突出，主要用于飞机发动机舱等高温受力部位，能承受发动机工作时的高温和振动载荷。

### 1.2 复合材料的特性

#### 1.2.1 优异性能

(1) 高强度与轻质：比强度和比模量远高于传统金

属材料，如碳纤维复合材料的比强度是钢的5倍以上，可显著减轻飞机自重。(2) 耐腐蚀：对酸碱、潮湿环境耐受性强，减少飞机因腐蚀导致的维护成本和结构损伤。

(3) 可设计性：能通过调整增强体种类、含量和排列方式，按需优化材料性能。

#### 1.2.2 飞机制造中的优劣势

(1) 优势：减轻机身重量提升燃油效率，降低维护频率，提升飞行性能；设计灵活性高，便于一体化成型复杂部件。(2) 局限性：制造成本高，修复难度大；在极端高温环境下性能稳定性不足，部分场合仍需依赖金属材料。

## 2 复合材料飞机喷漆施工的准备工作

### 2.1 漆料的选用与准备

#### 2.1.1 漆料体系选择

需匹配复合材料的化学惰性与热膨胀特性，优先选用双组分聚氨酯漆或氟碳漆。这类漆料与复合材料基体（如环氧树脂）兼容性好，可避免因界面反应导致的涂层脱落，同时能适应复合材料较低的导热性，减少温度变化引发的漆膜开裂。

#### 2.1.2 漆料性能要求

(1) 紫外线屏蔽能力：需达到99%以上紫外线阻隔率，防止复合材料中的树脂基体因长期紫外照射发生老化降解；(2) 红外线吸收率：浅色漆料需控制红外吸收率 $\leq 30\%$ ，避免机身局部过热导致复合材料性能衰减；(3) 耐介质性：需耐受航空煤油、液压油及雨水侵蚀，盐雾测试中2000小时内无起泡、剥落；(4) 柔韧性：漆膜延伸率需 $\geq 15\%$ ，以匹配复合材料在飞行载荷下的微变形<sup>[1]</sup>。

#### 2.1.3 漆料准备过程

按比例混合主剂与固化剂（如聚氨酯漆通常按5:1

重量比），使用高速分散机搅拌3-5分钟至均匀；采用120目尼龙滤网过滤，去除杂质与气泡；静置熟化，双组分漆需在25°C环境下静置15-30分钟，确保反应基团充分活化，避免漆膜出现针孔。

## 2.2 飞机蒙皮表面的预处理

### 2.2.1 清洁与褪漆方法

先用异丙醇擦拭表面去除油污，再用去离子水冲洗；褪漆采用低温碱性褪漆剂（pH值8-10），避免强酸腐蚀复合材料纤维，浸泡10-15分钟后用高压水枪（压力≤0.5MPa）冲洗，防止高压损伤复合材料层间结构。

### 2.2.2 表面损伤评估与修理

采用超声探伤检测表面下2mm内的分层、气泡，用荧光渗透剂检查裂纹；轻微划痕（深度<0.3mm）用800目砂纸打磨修复；深层损伤（如纤维裸露）需填充环氧腻子后固化，固化温度控制在60-80°C，避免超过复合材料耐热极限。

### 2.2.3 预处理工艺

打磨采用干湿结合法：先用120目氧化铝砂纸干磨去除氧化层，再用400目砂纸湿磨（加去离子水）降低表面粗糙度至Ra1.6-3.2μm；砂磨后用压缩空气（压力0.3MPa）吹净粉尘，再用粘尘布二次清洁，确保表面粉尘残留量<5mg/m<sup>2</sup>，为漆料附着提供均匀基底。

## 3 复合材料飞机喷漆施工的关键技术

### 3.1 底漆喷涂技术

(1) 底漆的作用和喷涂要求：底漆是复合材料与面漆之间的关键过渡层，主要作用是提升涂层附着力、阻断水分渗透，同时为面漆提供均匀的基底。喷涂要求包括：与复合材料表面及面漆体系兼容，避免化学反应导致的层间剥离；具备一定的弹性，以适应复合材料在飞行中的微小形变；干燥后形成连续无孔的薄膜，盐雾测试中需达到500小时无锈蚀痕迹。此外，底漆需不含对复合材料有害的成分，如强溶剂或酸性物质，防止侵蚀纤维与基体界面。(2) 底漆层厚度的控制方法：采用“湿膜测厚+干膜校准”双控法。喷涂时使用梳式湿膜测厚仪，每10平方米检测3个点，确保湿膜厚度稳定在60-80μm（对应干膜厚度20-30μm）；第一遍喷涂后，通过干燥后的干膜厚度反推调整第二遍喷涂参数，如喷嘴口径（推荐1.2-1.5mm）、喷涂压力（0.2-0.3MPa）和走枪速度（30-50cm/s）。对于曲率较大的部位，采用“薄喷多遍”策略，每遍间隔15-20分钟（25°C环境），避免局部堆积过厚导致流挂。(3) 底漆喷涂的操作步骤和注意事项：步骤为：①调整喷涂环境至温度18-25°C、湿度40%-60%，确保通风良好；②试喷在同材质样板上，检查雾化效

果；③采用“十字交叉法”喷涂，第一遍沿纵向，第二遍沿横向，重叠幅度50%；④自然流平5分钟后，进入烘干房（60°C×30分钟）固化。注意事项包括：禁止在风速>2m/s的环境下喷涂，防止漆料飞溅；喷枪与工件距离保持20-30cm，避免距离过近导致漆料堆积；固化后的底漆需在24小时内进行面漆喷涂，防止表面污染<sup>[2]</sup>。

### 3.2 面漆喷涂技术

(1) 面漆的性能要求和选择原则：性能要求包括：耐候性（QUV老化测试1000小时后光泽保持率≥80%）、耐冲击性（落锤冲击测试≥50cm）、耐化学性（接触航空煤油后24小时无溶胀）；同时需满足航空级外观标准，橘皮等级≤2级（ASTMD4062标准）。选择原则为：根据飞机使用环境匹配功能，如热带地区机型优先选高反射率面漆（太阳光反射率≥80%），海洋环境机型侧重防盐雾面漆；与底漆体系匹配，如聚氨酯底漆需搭配聚氨酯面漆，避免层间反应。(2) 面漆厚度的控制方法及其影响：控制方法采用“自动喷涂机器人+人工补喷”结合，机器人通过预设程序控制喷涂轨迹，确保干膜厚度均匀（40-60μm），人工对边角部位补喷时使用湿膜卡实时监测。厚度过薄(<30μm)会导致紫外线防护不足，加速复合材料老化；过厚(>80μm)则增加机身重量，且易因冷热收缩产生裂纹<sup>[3]</sup>。(3) 面漆喷涂的操作步骤和常见问题解决方法：步骤为：①底漆表面清洁（用粘尘布去除粉尘）；②调试面漆粘度至18-22s（涂4杯），必要时加入5%-10%稀释剂；③分两遍喷涂，第一遍为雾喷（干膜厚度10-15μm），第二遍为覆盖喷（干膜厚度30-45μm），间隔20分钟；④常温流平30分钟后，80°C烘干60分钟。常见问题解决：出现针孔时，检查漆料粘度是否过高，可适当降低并增加稀释剂；产生橘皮时，调整喷涂压力至0.25MPa，或提高环境温度至22-25°C，促进漆料流平。

### 3.3 特殊部位和细节处理

#### 3.3.1 特殊部位的喷漆施工要求

(1) 天线罩：需选用低介电常数面漆（介电常数≤3.0），避免干扰信号传输，喷涂时采用“轻喷薄涂”，干膜厚度控制在20-30μm，且禁止使用含金属颜料的漆料；(2) 舱窗周边：选用弹性面漆（延伸率≥20%），与密封胶兼容性好，喷涂时预留1-2mm的密封胶搭接区，防止漆料覆盖导致密封失效；(3) 发动机短舱：采用耐高温面漆（耐温≥200°C），如硅氧烷涂料，干膜厚度50-70μm，需在80°C下额外固化2小时增强耐热性。

#### 3.3.2 细节处理技巧

(1) 针孔预防：喷涂前确保漆料充分过滤（200目

滤网），避免杂质堵塞喷嘴；发现针孔后，用细砂纸（1000目）打磨后局部补喷，补喷面积需大于缺陷区域3倍；（2）橘皮修复：轻微橘皮可通过抛光（使用3000目砂纸）消除，严重时需彻底褪漆后重新喷涂，同时调整涂料粘度和喷涂速度；（3）边角覆盖：对铆钉、接缝等部位，采用“点喷+扫喷”结合，确保边角漆膜厚度不低于 $30\mu\text{m}$ ，避免因厚度不足导致早期腐蚀。

## 4 复合材料飞机喷漆施工的质量控制与检验

### 4.1 质量控制方法

#### 4.1.1 施工过程质量控制要点

需全程监控涂料状态，包括混合比例偏差（ $\leq \pm 2\%$ ）、熟化时间（严格按说明书执行，如聚氨酯漆需 $30\pm 5$ 分钟）；喷涂环节重点检查走枪均匀性，确保每道涂层搭接宽度一致（ $50\% \pm 5\%$ ）；固化阶段实时记录温度曲线，保证烘干房各区域温差 $\leq \pm 3^\circ\text{C}$ ，避免局部过烘或固化不足。此外，需对每批次涂料进行小样测试，验证其与复合材料的兼容性（如附着力 $\geq 5\text{ MPa}$ ）。

#### 4.1.2 关键影响因素分析

（1）温度：最佳喷涂温度 $18\text{--}25^\circ\text{C}$ ，低于 $15^\circ\text{C}$ 会导致涂料流平性差，易出现针孔；高于 $30^\circ\text{C}$ 则溶剂挥发过快，产生橘皮。（2）湿度：湿度 $> 70\%$ 时，漆膜易吸潮产生白雾； $< 30\%$ 则静电积累增加，可能引发漆料飞溅，需控制在 $40\%-60\%$ 。（3）喷枪压力：过低（ $< 0.2\text{ MPa}$ ）导致雾化不良，漆膜厚薄不均；过高（ $> 0.4\text{ MPa}$ ）则涂料反弹，浪费且影响附着力，推荐 $0.25\text{--}0.35\text{ MPa}$ 。

#### 4.1.3 提高喷漆质量的措施

建立环境参数实时监测系统，温湿度偏离标准时自动报警；采用机器人自动喷涂，重复定位精度控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ ，确保涂层均匀；涂料储存采用恒温（ $20\pm 2^\circ\text{C}$ ）仓库，使用前经6小时回温，避免因温度波动影响性能；定期校准检测工具（如测厚仪、粘度计），误差控制在 $\pm 2\%$ 以内<sup>[4]</sup>。

## 4.2 质量检验与评估

### 4.2.1 检验标准和方法

依据SAEAMS3095标准执行，外观检验采用目视（距离 $50\text{ cm}$ ，光照 $\geq 800\text{ lux}$ ）和放大镜（10倍）检查，无裂纹、气泡、流挂等缺陷；厚度检验用磁性测厚仪（金属基体）或涡流测厚仪（复合材料），每 $100\text{ cm}^2$ 测3点，

取平均值；附着力测试按ASTMD3359标准，采用划格法（划格间距 $1\text{ mm}$ ），胶带剥离后涂层脱落面积 $\leq 5\%$ 。

### 4.2.2 评估指标

（1）附着力：一级（划格边缘无脱落）为合格，二级（脱落面积 $< 5\%$ ）需局部返工，三级及以上全检返工。（2）硬度：铅笔硬度 $\geq H$ （ASTMD3363），确保抗划伤能力。（3）光泽度： $60^\circ$ 角光泽仪测量，值 $\geq 85$ （高光漆）或 $30\text{--}60$ （哑光漆），同批次偏差 $\leq 5\%$ 。（4）耐候性：加速老化测试（1000小时）后，色差 $\Delta E \leq 3$ ，无粉化、开裂。

### 4.2.3 不合格品处理和返工流程

轻微缺陷（如局部薄涂）用专用补漆笔修复，24小时后复检验收；中度缺陷（如附着力二级）需用砂纸（800目）打磨缺陷区域，重新喷涂底漆和面漆，扩大喷涂范围至缺陷边缘 $5\text{ cm}$ ；严重缺陷（如大面积脱落）需彻底褪漆（采用中性褪漆剂），重新进行表面预处理和全流程喷涂，返工后需全项复检，保留返工记录并存档3年，确保可追溯。返工次数不得超过2次，避免多次涂层叠加影响复合材料性能。

## 结束语

综上所述，复合材料飞机的喷漆施工是一项综合性强、技术要求高的工艺过程。通过精心的涂料选择与准备、严格的表面预处理、精细的喷涂技术及全面的质量控制，可以确保涂层与复合材料基体的紧密结合，为飞机提供持久而有效的防护。未来，随着复合材料技术的不断发展，对喷漆施工的要求也将更加严格。因此，持续探索和优化复合材料飞机的喷漆施工工艺，将是提升飞机性能、延长使用寿命的重要途径。

## 参考文献

- [1]樊志勇,吕建伟,杨媚媚.飞机喷漆防腐涂层起泡缺陷原因分析及控制措施[J].全面腐蚀控制,2019,24(4):41-43.
- [2]韩峰,张学卿.飞机喷漆甲板防滑涂层施工问题与讨论[J].中国涂料,2018,30(10):68-70.
- [3]卢淑芳.飞机喷漆涂层外观出现质量缺陷的影响因素及对策[J].现代涂料与涂装,2019,15(9):19-20.
- [4]陆文明,王李军,张荣伟.飞机蒙皮表面预处理的研究进展[J].上海涂料,2019,44(12):16-20.