

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 and 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的

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）兼容性强，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^[1]。

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℃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 $\leq 0.5\text{MPa}$)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 $< 0.3\text{mm}$)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℃,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 $Ra1.6-3.2\mu\text{m}$;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 $< 5\text{mg}/\text{m}^2$,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60-80 μm (对应干膜厚度20-30 μm);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℃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℃、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℃ \times 30分钟)固化。注意事项包括:禁止在风速 $> 2\text{m/s}$ 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^[2]。

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 $\geq 80\%$)、耐冲击性(落锤冲击测试 $\geq 50\text{cm}$)、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 $\geq 80\%$),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(40-60 μm),人工对边角部位补喷时使用湿膜卡实时监测。厚度过薄($< 30\mu\text{m}$)会导致紫外线防护不足,加速复合材料老化;过厚($> 80\mu\text{m}$)则增加机身重量,且易因冷热收缩产生裂纹^[3]。(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10-15 μm),第二遍为覆盖喷(干膜厚度30-45 μm),间隔20分钟;④常温流平30分钟后,80℃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℃,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20-30 μm ,且禁止使用含金属颜料的漆料;(2)舷窗周边:选用弹性面漆(延伸率 $\geq 20\%$),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 $\geq 200^\circ\text{C}$),如硅氧烷涂料,干膜厚度50-70 μm ,需在80℃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,同时调整漆料粘度和喷涂速度;(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 μ 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

需全程监控漆料状态,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 ± 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,需对每批次漆料进行小样测试,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18-25 $^{\circ}\text{C}$,低于15 $^{\circ}\text{C}$ 会导致漆料流平性差,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($> 0.4\text{MPa}$)则漆料反弹,浪费且影响附着力,推荐0.25-0.35MPa。

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;漆料储存采用恒温(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^[4]。

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50cm,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 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1mm),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 $\geq \text{H}$ (ASTMD3363),确保抗划伤能力。(3)光泽度:60 $^{\circ}$ 角光泽仪测量,值 ≥ 85 (高光漆)或30-60(哑光漆),同批次偏差 ≤ 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5cm;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。通过精心的漆料选择与准备、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.