

树脂基复合材料表面修整工艺材料性能研究

艾秋实¹, 王唯¹, 朱丽²

(1.北京航空材料研究院, 北京 100095; 2.成都飞机制造有限公司, 成都 610000)

摘要: **目的** 为提高复合材料涂装前的喷漆表面平整度, 保证漆膜表面状态。**方法** 分别采用表面修整剂、针孔填充剂和封孔剂等三种工艺材料, 对玻璃纤维增强树脂基复合材料表面进行喷漆前的表面修整, 并涂装配套的防护底漆。通过对修整材料的固化性能、与基材及漆层的表面结合力以及涂层系统相容性等性能进行测试, 并与未使用工艺材料进行表面修整处理的复合材料喷漆后的表面状态进行对比, 评价三种工艺材料的工艺性能、附着力及与涂层的相容性等。**结果** 在树脂基复合材料表面, 涂装前配套使用针孔填充剂和封孔剂或针孔填充剂和表面修整剂进行表面修整, 可有效降低复合材料表面针孔、凹坑等缺陷对涂装外观的影响, 且漆层与基底的结合力大于 15 MPa, 与未使用工艺材料的涂层系统比较, 性能未下降。**结论** 三种工艺材料与底面漆的相容性良好, 对涂层力学性能及耐介质性能无不良影响, 可配套用于复合材料涂装前的表面修整, 提升涂装表面状态。

关键词: 复合材料; 表面修整; 表面修整剂; 封孔剂; 针孔填充剂

中图分类号: TQ63; V261.93+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0177-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.027

Properties of Process Material for Surfacing of Resin-based Composites

AI Qiu-shi¹, WANG Wei¹, ZHU Li²

(1.Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2.Chengdu Aircraft Corporation, Chengdu 610000, China)

ABSTRACT: The work aims to improve surface evenness of fiber reinforced composites before painting, and guarantees surface conditions of paint films. To-be-painted surfaces of the composites were finished with process materials. Three kinds of process materials including surfacer, pinhole filler and sealant were used for surface finishing of glass fiber-reinforced resin-based composites, and then for painting matched protective primer. Process properties, adhesion and compatibility with coating of the three process materials were evaluated by testing curing property of finished materials, adhesion to substrate and paintcoat, and coating system consistency, and comparing surface conditions of painted composites not finished by process materials. Effects of such defects as pinholes and pits on coating appearance could be reduced effectively by finishing the surfaces of resin-based composites with pinhole filler, sealant, or pinhole filler and surfacer before painting, and the adhesion between paintcoat and substrate was over 15 MPa. The three process materials can be used for surface finishing of composites before painting and improving of painted surface states since they are consistent with primer, and they have no negative effects on mechanical properties and medium resistance.

KEY WORDS: composite; surfacing; surfacer; sealing agent; filler

复合材料具有高强、高韧、耐高温、耐腐蚀、耐磨损等一系列优异性能, 其研究深度和应用广度已成

为衡量航空设计、制造产业先进与否的重要标志之一。目前, 各军民型号项目均使用了大量复合材料部

收稿日期: 2018-02-04; 修订日期: 2018-03-01

Received: 2018-02-04; Revised: 2018-03-01

作者简介: 艾秋实(1984—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为功能涂层材料。

Biography: AI Qiu-shi (1984—), Male, Master, Engineer, Research focus: functional and anti-corrosion coating.

件，如飞机蒙皮、武器弹仓等均为复材制件^[1-4]。波音 787 型客机使用的复合材料占主体材料的 50% 左右，考虑到复合材料密度仅为 1.6 g/m³，除机翼、尾翼前缘（防鸟撞）、发动机挂架（防高温）为金属外，全机主要结构均采用复合材料，包括机翼、机身、垂尾、发房、地板梁、部分舱门、整流罩、起落架后撑杆、发动机机匣、叶片等部位^[5-7]。复合材料的耐久性直接影响相关部件的功能及使用寿命，也是影响飞行安全的重要因素。上述飞机复合材料部件均需应用涂层进行表面防护，涂层的喷涂质量对其装饰性、功能性及耐久性有重要影响。

复合材料表面涂层的喷涂质量由多个因素决定，如增强材料的类型、树脂的选择、生产方法和固化参数等，常见的缺陷有针孔、表面下陷、起皱、纹理、橘皮、粗糙等，现有复合材料制造工艺技术无法完全消除这些缺陷^[8]。喷漆后，复合材料表面缺陷被放大，不仅影响零件的外观质量，而且还会进一步影响飞机的气动外形和后期整机的隐身效果。为了改善这些缺陷，现场采用的临时补救措施是增加漆层厚度，但普通漆层的流淌性和渗透性差，无法有效改善和消除表面缺陷，反而加大了后期使用、飞行过程中防护性漆层掉落的可能性。

为了克服因复合材料本身缺陷带来的产品质量问题，最大限度地消除复合材料表面缺陷，需对复材表面缺陷进行处理，通过表面修整及封孔技术，为后续表面防护材料底漆和面漆的施工提供一个良好的基体状态^[9-10]。国外飞机复合材料表面缺陷的修整及针孔的填充问题主要通过表面修整剂来解决^[11-13]。Akzo Nobel 和 PPG-DeSoto 是全球最大的两家航空涂料供应商，其生产的材料表面修整剂已广泛应用在复合材料制件（如天线罩等）表面，国内各大主机厂也都在使用上述公司的相关产品，作为民品飞机复合材料表面防护涂层施工中重要的工艺材料，主要应用情况如表 1 所示。在波音项目中，787 碳纤维复合材料壁板（碳纤维）采用 8W5 封孔剂对表面针孔缺陷进行封孔处理^[14-15]。表面修整剂用于飞机复合材料制件表面针孔、凹坑等缺陷的填充修整，可为后续表面

防护材料底漆和面漆的施工提供一个良好的基体平台。针对复合材料表面缺陷的不同情况，如局部针孔、微小凹坑、较大面积表面缺陷等问题，可分别或配套采用针孔填充剂、表面修整剂或封孔剂等工艺材料进行喷漆前的表面处理，以提升表面状态，保证漆膜性能。表面修整材料与涂层系统配套示意图图 1。

表 1 表面修整剂应用现状
Tab.1 Application status of surfacer

Application	Application site	Material trademark
Boeing 737/777	Radome and other composite parts	PPG-DeSoto (CA8610A/CA8610B)
Boeing 787	Carbon fiber composite parts and radome	Akzo Nobel (8W5/50C)
Airbus A320/A380	Radome and other composite parts	Akzo Nobel (8W5/50C)

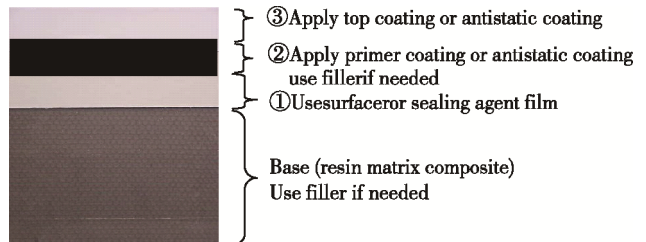


图 1 表面修整材料与涂层系统配套示意图
Fig.1 Schematic of surfacing materials and coating system

1 试验

1.1 复合材料试样表面修整工艺

分别采用表面修整剂、针孔填充剂和封孔剂三种工艺材料，对玻璃纤维增强树脂及复合材料进行表面修整。其中，表面修整剂（Surfacer）由树脂和填料构成，黏度可调整，可采用喷涂或刮涂的施工方式。单组分针孔填充剂（Filler）采用快干型单组分材料制成，呈半透明状，具有一定的黏度和流动性，采用刮涂施工方式。喷涂型封孔剂基料由环氧树脂构成。三种工艺材料的特点及施工要求见表 2。

表 2 三种工艺材料的特点及使用要求
Tab.2 Features and application requirements of process materials

Process materials	Features	Application
Filler	Quick-drying and airdried, one-component, good wettability, easy to fill the pinhole, good compatibility with composite material, resin or coating material.	Rub filler into a small area, dry 30 min and wipe off excess.
Surfacer	Two-component polyurethane resin, easy to sand after drying, applied to aluminum and composite, filling the shallow crater or depression($d>0.25$ mm) or ponhole($d<0.25$ mm)	Spray or rub to form a film, fill the depression, airdried or accelerate drying (60 ℃, 6 h) to cure sufficiently to sand.
Sealing Agent	Two component, epoxy resin base, two-component polyurethane resin, easy to sand after drying, applied to composite to fill crater or ponhol.	Spray, dry to form a film, airdried or accelerate drying (60 ℃, 6 h) to cure sufficiently to sand.

上述材料均为实验室自行制备。工艺试验中，将可形成膜层的表面修整剂和喷涂型封孔剂分别在碳纤维复合材料和玻璃纤维复合材料上进行涂装、固化，打磨平整后，喷涂配套底面漆涂层系统。选用玻璃纤维增强环氧复合材料试样，A 组使用针孔填充剂和表面修整剂进行表面修整，B 组采用喷涂型封孔剂和针孔填充剂进行表面修整，具体修整工艺路线如图 2 所示。

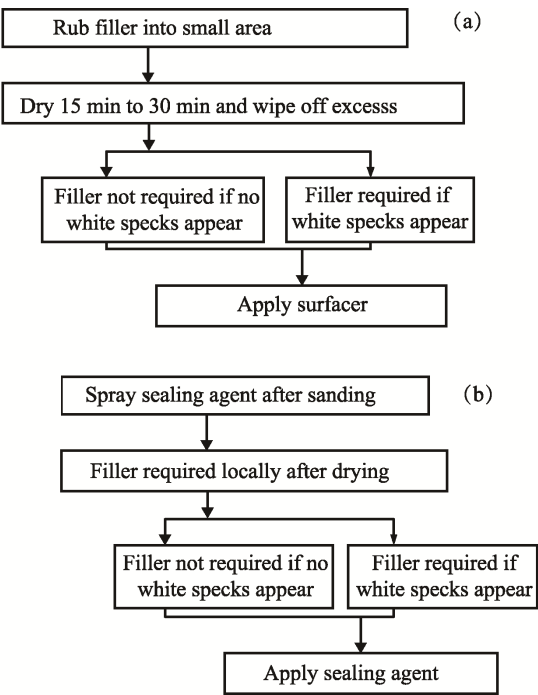


图 2 工艺材料施工工艺步骤
Fig.2 Construction process steps of process materials: a) application process of filler and surfacer, b) application process of filler and sealant

1.2 性能测试

- 1) 涂层工艺性能试验。对表面修整剂和喷涂型封孔剂两种成膜型表面修整工艺材料的施工性能、干燥固化时间进行测试，并检查涂层外观，测定两种表面修整材料的打磨性。
- 2) 根据图 2 工艺步骤，在复合材料试板待喷漆表面应用“表面修整剂+针孔填充剂”和“喷涂型封孔剂+针孔填充剂”，随后喷涂底漆，并进行力学性能测试。依据 GB/T 5210—2006《色漆和清漆 拉开法附着力试验》，采用深圳三思纵横橡胶拉伸试验机，对表面修整工艺处理后的喷涂底漆涂层的附着力进行测定。依据 GB/T 9286—1998《色漆和清漆 漆膜的划格试验》，对涂层的划格附着力进行测试，底材为玻璃纤维增强复合材料，底漆为 H06-0371 通用防护底漆，划格间距为 2 mm。
- 3) 涂层系统相容性试验。将经工艺材料处理后的复合材料试板进行涂漆固化，并进行涂层相容性试

验，即耐水性和耐油性测试。按照 GB/T 1733—1993《漆膜耐水性测试方法》和 GB/T 9274—1988《色漆和清漆 耐液体介质的测定》，在(23±2)℃条件下，分别将涂漆试板在去离子水、4109 润滑油、15 号液压油、RP-3 喷气燃料和 RP-5 号喷气燃料中浸泡 24 h。上述介质浸泡试验后，观察涂层外观，并进行附着力测试。

4) 与国外同类型产品进行对比。将表面修整剂和针孔填充剂与 Akzo Nobel 的表面修整剂 8W5 与 28C1 进行对比，分别应用在玻璃纤维增强复合材料试板待喷漆表面，对比工艺性能和修复效果。

2 结果及分析

2.1 表面修整工艺材料工艺性能

试验结果表明，表面修整剂和喷涂型封孔剂均可以在常温和加热条件下干燥，达到可打磨状态。采用气动打磨机在施涂了表面修整工艺材料的复合材料表面进行打磨，两种工艺材料的工艺性能良好，易于打磨，且表面平整。两种表面修正材料的可打磨干燥时间见表 3。

表 3 表面修整工艺材料的干燥条件
Tab.3 Drying conditions of process materials

Material type	Air drying	Accelerating drying
Surfacer	48 h	60 ℃，4 h
Sealing agent of spray type	48 h	60 ℃，6 h

传统封孔清漆为环氧清漆，因固化收缩及表面张力等原因，无法对针孔实现修复，实际使用时，需对底材表面反复喷涂固化，耗时费力。表面修整剂和喷涂型封孔剂在工艺上均可实现常温干燥和 60℃加速干燥，操作灵活，节约工时，便于现场修整工艺的实施。另外，配合使用针孔填充剂，可有效修复针孔缺陷，使底材表面满足喷涂要求，利于获得更好的喷涂外观。

2.2 表面修整工艺材料对涂层力学性能的影响

清漆厚度为(30±2) μm，表面修整工艺材料的厚度为(30±5) μm(打磨处理前)，H06-0371 通用防护底漆厚度为(20±2) μm，TB06-9 锌黄丙烯酸聚氨酯底漆的厚度为(20±2) μm。

划格附着力测试：在经表面修整工艺材料处理后的试板上喷涂 TB06-9 锌黄丙烯酸聚氨酯底漆和 H06-0371 通用防护底漆，划格测试为 1 级，拉开附着力均大于 16 MPa(见表 4 和表 5)。在经喷涂型封孔剂处理后的试板上喷涂 TB06-9 锌黄丙烯酸聚氨酯底漆和 H06-0371 通用防护底漆，划格测试为 1 级，

拉开附着力均大于 15 MPa (见表 6 和表 7), 试柱直径为 20 mm, 试柱面积为 314.1593 mm²。

试验结果表明, 纤维增强复合材料底材在喷漆前喷涂表面修整工艺材料, 经固化打磨至平整不透底, 喷涂底漆, 底漆与底材的附着力未下降。表面修整剂和喷涂型封孔剂在底材表面固化成膜后, 填补针孔凹坑等缺陷, 经打磨去除多余修整材料, 在保证表面平整的同时, 尽量减少底材表面的残留, 即图 1 防护涂

表 4 应用 Surfacers 的 H06-0371 通用防护底漆拉开附着力
Tab.4 Pull-off adhesion of common protective primer H06-0371 with surfacer applied


Serial number	Fracture strength/MPa	Failure mode	Graphical representation
Sample 1	19.0961	Joint failure	
Sample 2	19.4491	Cohesive failure	
Sample 3	19.5000	Joint failure	
Sample 4	16.4703	Joint failure	
Sample 5	18.0802	Joint failure	

表 5 应用 Surfacers 的 TB06-9 锌黄丙烯酸聚氨酯底漆拉开附着力
Tab.5 Pull-off adhesion of zinc yellow acrylic polyurethane primer TB06-9 with surfacer applied

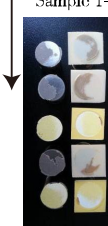
Serial number	Fracture strength/MPa	Failure mode	Graphical representation
Sample 1	20.2804	80% cohesive failure, 20% joint failure	
Sample 2	22.2622	Cohesive failure	
Sample 3	16.7439	Joint failure	
Sample 4	21.8249	70% cohesive failure, 30% joint failure	
Sample 5	18.5617	Cohesive failure	

表 6 应用喷涂型封孔剂的 H06-0371 通用防护底漆拉开附着力
Tab.6 Pull-off adhesion of common protective primer H06-0371 with spraying sealant applied

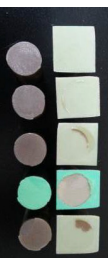
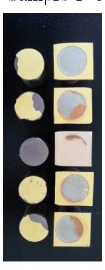
Serial number	Fracture strength/MPa	Failure mode	Graphical representation
Sample 1	15.1857	Joint failure	
Sample 2	15.3789	Joint failure	
Sample 3	19.0121	50% cohesive failure, 50% joint failure	
Sample 4	19.6546	Joint failure	
Sample 5	15.7090	Joint failure	

表 7 应用喷涂型封孔剂的 TB06-9 锌黄丙烯酸聚氨酯底漆拉开附着力

Tab.7 Pull-off adhesion of zinc yellow acrylic polyurethane primer TB06-9 with spraying sealant applied

Serial number	Fracture strength/MPa	Failure mode	Graphical representation
Sample 1	16.6904	Joint failure	
Sample 2	17.6765	60% cohesive failure, 40% joint failure	
Sample 3	18.1916	Joint failure	
Sample 4	15.8828	65% cohesive failure, 35% joint failure	
Sample 5	15.9191	Joint failure	

层系统中①的厚度受底材表面状况和打磨过程的影响。因此, 使用针孔填充剂、表面修整剂或喷涂型封孔剂可对纤维增强复合材料底材的待喷漆表面进行表面修整, 对漆膜与底材的结合力无影响。

2.3 表面修整工艺材料对涂层相容性的影响

试验结果表明, 经表面修整材料处理的复合材料试板喷涂底漆后, 在(23±2) °C 水中浸泡 24 h 后, 外观无变化, 划格附着力测试为 1 级, 与未进行表面修整喷漆的试样相比, 性能无下降。在 4109 润滑油、15 号液压油、RP-3 喷气燃料和 RP-5 号喷气燃料中分别浸泡 24 h 后, 涂层划格附着力为 1 级, 与未经修整材料处理的试样相比, 性能无下降。

2.4 与国外同类材料对比情况

将修整剂+针孔填充剂、喷涂型封孔剂+针孔填充剂分别应用于纤维增强复合材料待涂漆表面, 并分别与 8W5+28C1 配合使用情况进行对比。试验结果表明, 表面修整剂和针孔填充剂配合使用对局部针孔和凹坑的修复效果明显, 喷涂型封孔剂和针孔填充剂配合使用对较大面积的凹坑有明显的修复作用, 修复效果可达到国外同类材料的水平, 工艺性能良好, 易于打磨平整并去除打磨碎屑。

3 结论

- 1) 针孔填充剂、表面修整剂和喷涂型封孔剂都可用于复合材料或底漆表面缺陷的修整, 可有效降低复合材料表面针孔、凹坑等缺陷对涂装外观的影响。
- 2) 针孔填充剂和表面修整剂与国外同类材料相比, 性能相当, 可应用于待涂装表面修复局部针孔及凹坑等缺陷。针孔填充剂和喷涂型封孔剂可配套使用, 以代替传统清漆型封孔剂, 其工艺性良好, 易于打磨。

3) 三种工艺材料与底面漆的相容性良好, 采用拉开法测得漆层的结合力大于 15 MPa, 对涂层的力学性能及耐介质性能无不良影响, 可配套用于复合材料涂装前的表面修整, 提升涂装表面状态。

参考文献:

- [1] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 1-10.
DU S Y, GUAN Z D. Strategic Considerations for Development of Advanced Composite Technology for Large Commercial Aircraft in China[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 1-10.
- [2] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
DU S Y. Advanced Composite Materials and Aerospace Engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [3] 何红娥. 通用飞机复合材料设计要求及应用现状[J]. 飞机设计参考资料, 2012(2): 24-28.
HE Hong-e. Application Status and Design Requirements of General Aircrafts Composite Materials[J]. Aircraft Design Reference, 2012(2): 24-28.
- [4] 陈绍杰. 复合材料技术与大型飞机[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 606-610.
CHEN Shao-jie. Composite Technology and Large Aircraft[J]. Acta Aeronautica Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 606-610.
- [5] 陆文明, 季建霞, 赵宝华, 等. 飞机蒙皮表面的预处理及涂装[J]. 上海涂料, 2016, 54(4): 13-18.
LU Wen-ming, JI Jian-xia, ZHAO Bao-hua, et al. The Pretreatment and Coating of Aircraft Skin Surface[J]. Shanghai Coatings, 2016, 54(4): 13-18.
- [6] 张汝才, 钟兆魁, 王兆安. 涂层缺陷和失效案例分析及处理[J]. 现代涂料与涂装, 2012, 15(1): 60-61.
ZHANG Ru-cai, ZHONG Zhao-kui, WANG Zhao-an. Analysis and Treatment of the Coating Defects and Failure Cases[J]. Modern Paint and Finishing, 2012, 15(1): 60-61.
- [7] 田艳丽. 机载设备涂层外观质量浅析[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(9): 44-46.
TIAN Yan-li. Onboard Equipment Coating Appearance Quality Analyzed[J]. Modern Paint and Finishing, 2011, 14(9): 44-46.
- [8] MIL-S-974A, Military Specification Surfacers Sanding [S].
- [9] 赵欣. 涂装前处理[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(9): 36-38.
ZHAO Xin. Pretreatment for Painting[J]. Plating & Finishing, 2011, 33(9): 36-38.
- [10] 肖军, 陈建敏, 周惠娣, 等. 环氧涂层的缩孔、针孔故障与工艺解决措施[C]//第六届全国表面工程学术会议论文集. 武汉: 中国机械工程学会, 2006: 251-253.
XIAO Jun, CHEN Jian-min, ZHOU Hui-di, et al. Crater and Pinholes of Epoxy Coatings and Process of Defection Solution[C]// The 6th National Symposium on Surface Project. Wuhan: Chinese Mechanical Engineering Society, 2006: 251-253.
- [11] 樊志勇, 吕建伟, 杨媚媚. 防腐涂层起泡缺陷原因分析及控制措施[J]. 全面腐蚀控制, 2010, 24(4): 41-43.
FAN Zhi-yong, LYU Jian-wei, YANG Mei-mei. The Reason Analysis and Control Measurement of Coating Blistering on Steel Surface[J]. Total Corrosion Control, 2010, 24(4): 41-43.
- [12] 韩峰, 张学卿. 甲板防滑涂层施工问题与讨论[J]. 中国涂料, 2015, 30(10): 68-70.
HAN Feng, ZHANG Xue-qing. Discussion on the Application of Slip Resistance Deck Paint[J]. China Coatings, 2015, 30(10): 68-70.
- [13] 卢淑芳. 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, 2012, 15(9): 19-20.
LU Shu-fang. Influencing Factors Occurring in Quality Defects of Coating Appearance and Countermeasures[J]. Modern Paint and Finishing, 2012, 15(9): 19-20.
- [14] 赵芯, 谢飞, 张帆, 等. 浅析现代民用航空飞机蒙皮防腐体系[J]. 全面腐蚀控制, 2014(1): 22-24.
ZHAO Xin, XIE Fei, ZHANG Fan, et al. Anti-corrosion System of Modern Civil Aviation Aircraft Skin[J]. Total Corrosion Control, 2014(1): 22-24.
- [15] 陆文明, 王李军, 张荣伟, 等. 飞机蒙皮表面预处理的研究进展[J]. 上海涂料, 2006, 44(12): 16-20.
LU Wen-ming, WANG Li-jun, ZHANG Rong-wei, et al. The Research Progress of Pretreatment of the Airplane Surface[J]. Shanghai Coatings, 2006, 44(12): 16-20.