

# 高固体分飞机蒙皮涂料的产业化研究

马艳青<sup>1</sup>, 宋欢欢<sup>1</sup>, 田继斌<sup>1</sup>, 王文全<sup>2</sup>, 何吉喜<sup>1</sup>, 张全伟<sup>1</sup>, 李超宇<sup>1</sup>, 刘岳麟<sup>1</sup>

(1.中昊北方涂料工业研究设计院有限公司,兰州 730101; 2.陕西飞机工业有限责任公司,陕西 汉中 723213)

**摘要:** 通过平行试验、逐步放大、在线监测、过程管控等手段,对高固体分蒙皮涂料进行了产业化研究。研究确定了高固体分飞机蒙皮涂料产业化规模生产的工艺路线和工艺单元操作方法、产业化规模生产设备;建立了质量控制条件,包括原材料及中间体标准和产业化规模生产的批次稳定性研究;最后进行了生产技术经济性分析,确定了“三废”处理措施等关键要素。从而建立起新型高性能航空涂料的初步工业化产品的基本生产条件,为航空涂料技术进步提供支撑条件,对满足我国蒙皮涂料未来需求起到积极作用。

**关键词:** 高固体分; 蒙皮涂料; 产业化; 工艺路线; 质量控制

**中图分类号:** TQ637 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)11-0001-04

## Industrialization Research on High Solid Fraction Aircraft Skin Coating

MA Yan-qing<sup>1</sup>, SONG Huan-huan<sup>1</sup>, TIAN Ji-bin<sup>1</sup>, WANG Wen-quan<sup>2</sup>, HE Ji-xi<sup>1</sup>, ZHANG Quan-wei<sup>1</sup>,  
LI Chao-yu<sup>1</sup>, LIU Yue-lin<sup>1</sup>

(1.North Paint & Coatings Industry and Design Institute Co., Ltd. of China Haohua, Lanzhou 730101, China;  
2.Shaanxi Aircraft Industry Co., Ltd., Hanzhong 723213, Shaanxi, China)

**Abstract:** This study conducted industrial research on high solid skin coating through parallel experiments, gradual scaling up, online monitoring, and process control. The research has determined the process route, process unit operation method, and industrial scale production equipment for the industrial scale production of high solid fraction aircraft skin coatings; established quality control conditions, including standards for raw materials and intermediates, and batch stability studies for industrial scale production; Finally, an economic analysis of production technology was conducted, and key elements such as measures for the treatment of three wastes were determined. Thus, the basic production conditions for the preliminary industrialization of new high-performance aviation coatings have been established, providing support for the technological progress of aviation coatings and playing a positive role in meeting the future demand for skin coatings in China.

**Key words:** high solid content; skin coating; industrialization; process route; quality control

## 0 引言

飞机所处的工作环境复杂多样,在恶劣的工况下,尤其是高湿、高盐雾区域,用于制造飞机的铝合金、铝锂合金等易遭受腐蚀。涂覆涂料是蒙皮及飞机零部件

防腐蚀的主要手段,耐用、持久的高性能涂层是提供良好防腐蚀性能的前提<sup>[1]</sup>。因此,飞机蒙皮所用涂料必须具备良好的物理机械性能、优异的耐航空介质及其他化学品性能、长期耐老化性能、耐湿热霉菌盐雾等环境适应性能,以适应飞机起降、飞行、机场停泊、地勤维护等不同工况环境下的抗高速气流冲刷、腐蚀性航空介质侵蚀、高湿高盐剧烈温变环境影响、外界长期紫外辐照老化等复杂环境条件,保持长期稳定,从而起到对机体材料的保护和装饰作用<sup>[2]</sup>。随着世界范围内对环保

收稿日期: 2025-06-02

基金项目: 甘肃省科技计划项目 23YFGA0027 资助。

作者简介: 马艳青(1990—),女,硕士,工程师,主要从事防腐涂料的研发工作。E-mail: 756969134@qq.com。

节能问题的日益重视和航空涂料的绿色化进程,环境友好型航空涂料(如不含铅和铬等重金属的防腐蚀涂料、高固体分或低 VOC 涂料以及水性涂料等)已成为发展和应用的重点。为降低涂料施工时挥发性有机物(VOC)排放,达到环保要求,涂料自身应具有高固体分低黏度特性。

飞机蒙皮涂料用于飞机的装饰、伪装及基材的防腐蚀保护,也是用量较大的航空涂料产品。飞机蒙皮涂层必须能够满足多种极端恶劣环境的考验而不被破坏,如温度、空气压力的骤变、震动疲劳、雨水冲蚀、高强度紫外线照射,臭氧、盐雾、湿热、霉菌的破坏,化学品侵蚀(燃油、润滑油、液压油、煤油、清洗剂)等<sup>[3]</sup>。因此,高固体分飞机蒙皮涂料符合国家发展通用航空装备制造产业的产业方向,随着国家航空产业迅猛发展、航空材料国产化工作逐步推进,产品有望获得广泛应用,其产业化研究势在必行<sup>[4]</sup>。高固体分飞机蒙皮涂料产品从小试到产业化生产,由于规模放大导致的传热传质效率变化,其生产设备、单元操作等要素都必须适应产业化生产的要求,同时还需针对产业化生产建立原材料和中间体控制条件,验证产业化生产的稳定性和可靠性<sup>[4]</sup>。

本文重点研究了高固体分飞机蒙皮涂料产业化生产的关键要素确定、质量控制条件的建立以及产业化规模生产技术经济分析等内容,为航空涂料技术进步提供支撑。

## 1 试验部分

本文采用自主合成的高固体分低黏度有机硅改性高羟值聚酯树脂、脂肪族异氰酸酯三聚体、功能型颜填料、助剂、混合溶剂等制备高固体分飞机蒙皮航空涂料。通过高分子材料结构设计和功能材料引入,使涂层材料具有优异的耐冲击、耐磨、耐航空介质、耐航空环境腐蚀及耐老化等综合性能。同时,在施工过程中减少了有机溶剂排放,具有显著的环保示范效应。

### 1.1 主要原材料

三羟甲基丙烷(TMP)、己二酸、1,6-己二醇、苯基甲基二氯硅烷、新戊二醇(NPG)、六氢苯酐(HHPA)、三乙氧基氯硅烷、苯基三氯硅烷、三羟乙基异氰脲酸酯(THEIC)等;N-3390 固化剂、HDI 三聚体;乙醇、混合二甲苯、醋酸丁酯等溶剂;分散剂、流平剂、消泡剂等助剂;耐候颜料、防锈填料等颜填料。

### 1.2 主要仪器及设备

TM-50 篮式砂磨机、BGD756 篮式砂磨机、ZHD-22 分散搅拌设备、本安型防爆电子称重仪表、本安型电子称重仪表、1.5 L 全自动合成反应釜装置、40 L 全自动合成反应釜装置、500 L 合成反应釜及其配套设

备、集热式恒温加热磁力搅拌器、Spectrum 2000 红外光谱仪、MB3600-CH20 羟值分析仪、W-71 型喷枪等。

### 1.3 样漆制备流程

小试合成有机硅改性高羟值聚酯树脂,并用该树脂与筛选的颜填料、助剂等混合,分散均匀,用 BGD756 篮式砂磨机研磨至要求细度以下。

中试放大合成有机硅改性高羟值聚酯树脂,并放大研磨该树脂配制的漆液。根据小试配方在高速搅拌下配制漆液,搅拌均匀后,用 TM-50 篮式砂磨机研磨,至细度 30  $\mu\text{m}$  出料作为样漆。

## 2 结果与讨论

### 2.1 产业化生产的关键要素确定

飞机蒙皮涂料产业化生产的关键要素主要包括生产工艺路线的研究、工艺单元操作研究、产业化规模生产设备研究等。由高固体分飞机蒙皮涂料的研制路线与小试生产过程综合分析可知,其产业化生产主要有两个关键步骤:一为高固体分有机硅改性高羟值聚酯树脂的合成;二为高固体分飞机蒙皮涂料甲组分的研磨生产。因此,需要对有机硅改性高羟值聚酯树脂的合成工艺放大试验进行安全性评估和工艺条件及工艺参数优化研究,以保证放大反应的安全性以及反应产物结构可控。对高固体分飞机蒙皮涂料进行不同规模的扩试生产,解决从小试到产业化生产的关键工艺条件及工艺参数优化的问题<sup>[5]</sup>,通过检验防腐性能、耐老化性能等基本指标,验证产业化生产工艺的稳定性和可靠性,通过多批次生产,验证产业化产品的批次稳定性。

#### 2.1.1 产业化规模生产工艺路线和工艺单元操作研究

高固体分飞机蒙皮涂料产业化规模生产研究首先需要验证、复审和完善小试工艺研究确定的流程<sup>[5]</sup>。其次确定选定的产业化生产设备以及相应的操作参数是否适应产业化生产;最后确定主要经济技术指标是否满足生产要求,为产业化生产提供操作数据和最佳物料量或物料消耗<sup>[6]</sup>。

放大反应后,针对每一反应步骤和单元操作,获取相对稳定的数据<sup>[6]</sup>。考核小试工艺路线在工艺条件、设备、原材料等方面是否有特殊要求,是否适合产业化生产,监控产业化规模生产反应过程中物料结构、物理参数等变化情况<sup>[7]</sup>。本课题研制过程中具备在线红外检测仪、在线羟值检测仪、全自动合成反应器、反应量热仪等大型在线分析仪器,可对相关中控指标随时进行在线检测和及时调控,有效保障产业化规模产品与小试产品结构的一致性。

由于高固体分飞机蒙皮涂料的基料树脂是自主合成的,因此需对有机硅改性高羟值聚酯树脂进行小试后放大的安全性评估。在放大试验之前,根据合成工艺

对放大试验进行安全性评估。通过研究反应过程中热流变化情况,根据反应中吸热放热情况调控反应工艺,保证放大反应的安全性以及反应产物分子量可控<sup>[7]</sup>。

合成中必须对温度控制、搅拌速率等工艺参数进

行优化验证,对中控指标进行监控,以保证所合成树脂结构与小试产品的一致性。研磨分散中需对分散速率等工艺参数进行优化验证。通过数据积累和分析,最终完善确定工艺路线和单元反应操作方法<sup>[8]</sup>,见图 1。

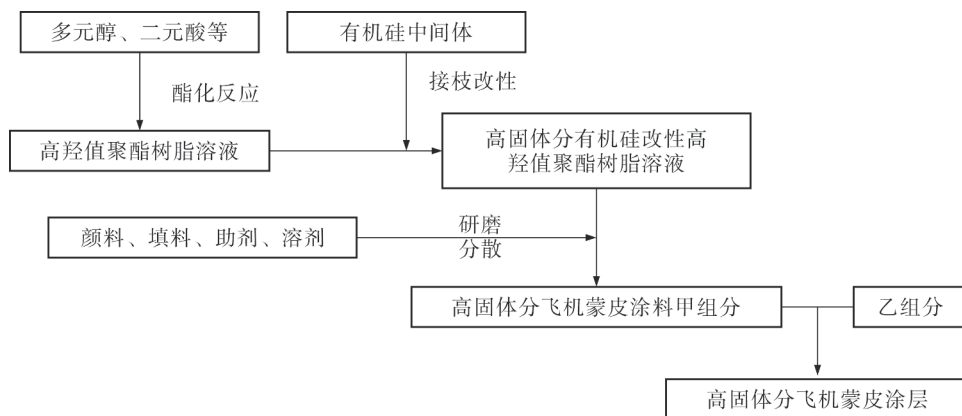


图 1 高固体分飞机蒙皮涂料产业化工艺流程

### 2.1.2 产业化规模生产设备研究

小试后逐级放大验证试验研究:放大反应采取逐级放大的方法进行,即高固体分有机硅改性高羟值聚酯树脂合成从实验室 1 kg→25 kg→250 kg,高固体分飞机蒙皮涂料生产从实验室 3 kg→50 kg→500 kg。根据每次放大后对产品性能的影响,如最直观的性能表现固体分、羟值等,研究放大反应的影响因素和须具备的条件。对生产设备的型号、容量、材质、运转参数等对产品性能的影响进行研究,进而确定所用的产业化规模生产设备<sup>[8]</sup>。

由于实验室生产中投料量小,所以不会产生过多的热量,产生的热量也能及时传导出去。而在产业化生产中,只有通过设备优化及运转参数控制,才能避免产业化生产中由于规模放大造成的传质、传热差异所导致的产品结构变化及性能差异<sup>[9]</sup>。

产业化合成中的传热传质效率一般远低于小试,因此需对合成反应釜、高速搅拌等设备进行研究,提高传热传质效率,优化设备运行参数。考虑放大效应对合成产物的影响。在分散过程中需注意及时测定漆液温度的上升情况。现场选用双层夹壁式拉缸,通过冷却循环水来达到降温的目的。产业化生产过程中的研磨速度等参数需考虑分散容器大小与分散头的直径比等因素,进行验证以确定运转工艺参数<sup>[9]</sup>,保证功能颜填料在树脂中分散的均一性以及实际分散效率。

## 2.2 质量控制条件的建立

高固体分飞机蒙皮涂料产业化生产过程中质量控制条件的建立包括产业化规模生产质量控制研究和批次稳定性研究。

### 2.2.1 产业化规模生产质量控制研究

原材料、中间体的物理性质和化工常数的确定以及质量标准的制定是解决生产工艺的稳定可控和安全管理的关键问题<sup>[10]</sup>。研究中要对物料的性质和化工常数进行测定,如羟值、酸价、固含量、密度、沸点、闪点等。在本研究中,对关键原材料和中间体建立质量标准和分析鉴定方法,对小试中质量标准有欠完善的根据研究结果进行修订和完善。最终建立了高固体分飞机蒙皮涂料标准、高固体分飞机蒙皮涂料原材料规范、高固体分飞机蒙皮涂料用有机硅中间体规范及高固体分飞机蒙皮涂料用有机硅改性高羟值聚酯树脂规范。

### 2.2.2 产业化规模生产批次稳定性研究

为确保多批次材料的性能稳定,我们将对每一批次生产的有机硅改性高羟值聚酯树脂进行关键性能检测。检测项目包括但不限于:外观(检查树脂的颜色、透明度等是否符合要求)、固含量(采用标准方法测定树脂的固含量,确保其达到设计要求)、羟值(采用标准方法测定树脂的羟值,确保其达到设计要求)、黏度(在 25 °C 下使用旋转黏度计测定树脂黏度,确保其在规定范围内)。

通过多批次生产数据的统计分析,评估有机硅改性高羟值聚酯树脂性能的批次稳定性。重点关注固含量、羟值、黏度以及机械性能等关键性能指标的波动范围,确保批次间差异微小。对 5 批次生产产品进行以上项目检测,可量化项目的结果如表 1 所列。

从表 1 可以看出,黏度和羟值有轻微波动,但都在规定范围内,说明各批次树脂产品的稳定性良好。

表1 有机硅改性高羟值聚酯树脂性能批次稳定性

项目	第一批次	第二批次	第三批次	第四批次	第五批次
外观	无色透明	无色透明	无色透明	无色透明	无色透明
羟值/(mgKOH·g <sup>-1</sup> )	219	220	220	222	219
黏度/(mPa·s)	904	902	900	902	903
固含量/%	82	82	83	82	81

为确保多批次材料的性能稳定,将对每一批次生产的高固体分飞机蒙皮涂料进行关键性能检测。检测项目包括但不限于:外观(检查涂料的颜色、罐内状态等是否符合要求)、固含量(采用标准方法测定涂料的固含量,确保其符合设计要求)、黏度(采用涂-4杯测定涂料的黏度,确保其在规定范围内)、机械性能(采用标准方法测定涂料的机械性能,确保其在规定范围内)。

通过多批次生产数据的统计分析,评估高固体分飞机蒙皮涂料的批次稳定性。重点关注固含量、机械性能等关键性能指标的波动范围,确保批次间差异微小。对5批次生产产品进行以上项目检测,结果如表2所列。

表2 高固体分飞机蒙皮涂料性能批次稳定性

项目	第一批次	第二批次	第三批次	第四批次	第五批次
外观	颜色均匀,无沉底	颜色均匀,无沉底	颜色均匀,无沉底	颜色均匀,无沉底	颜色均匀,无沉底
铅笔硬度	2H	2H	2H	2H	2H
黏度/s	31	32	31	32	32
固含量/%	83	83	82	83	82
耐冲击性/cm	50	50	50	50	50
柔韧性/mm	1	1	1	1	1

从表2可以看出,各批次产品稳定性良好。

合成多批次树脂,测试固含量、黏度、酸价、羟值等性能,并进行产品红外、热失重、分子量分布等特性分析,考察关键技术指标离散系数 $C_v$ ,确定批次稳定性,最终实现单釜250 kg的产业化目标。通过多批次高固体分飞机蒙皮涂料性能检测进行批次稳定性研究,为产业化生产涂料提供技术依据,保证涂料的批次稳定性,进行涂料表干实干、附着力、铅笔硬度、耐介质性能、防腐性能、耐老化性能等基本指标检验,验证生产工艺的稳定性和可靠性,确保涂料的批次稳定性。通过对各批次可量化指标的波动范围进行探索研究,最终实现不低于500 kg/批的稳定生产能力和连续5批次全面性能检测合格的产业化目标,固化生产工艺过程,得到工业化产品。

## 2.3 产业化规模生产技术经济研究

### 2.3.1 进行物料衡算,提出“三废”处理措施

对生产中各步物料进行规划,重点对其中收率较低、物料损失较大的步骤进行物料衡算<sup>[11]</sup>。如在羟基树脂合成中,由于产业化生产与实验室生产过程中存在脱水量以及醇损失量的差别,故需通过物料衡算和分析对其进行工艺优化和过程管控。同时建立一系列严密的中控指标加以监控,例如黏度的变化、羟值及酸值的测定等,以挖潜节能提高效率,回收副产物及控制物料损失,为“三废”防治提供数据和处理措施。

### 2.3.2 消耗定额、原材料成本,操作工时与生产周期等的确定

根据研究结果统计生产消耗定额,提出生产工艺规程,初步核算原材料成本,操作工时与生产周期。根据原材料、动力消耗和工时等统计,初步进行技术经济指标的核算,确定产品工业化生产的经济可行性<sup>[12]</sup>。

## 3 结语

疫情后国内航空市场迅速恢复,2022年7月中国四大航空公司购买空客A320neo系列飞机292架,国产大飞机C919完成全部适航审定,并于2022年底交付东方航空首架机。近年来中国航空工业发展迅猛,据预测数据显示,未来10年我国的飞机需求量达2500架,我国航空业已进入了一个全面发展阶段。随着飞机品种、材质、档次、功能的改变和提高,航空领域涂料的需求量也在不断提升,对涂层技术水平、服务能力提出了更高的要求<sup>[13]</sup>。

本课题研究的高固体分飞机蒙皮涂料作为航空制造业的配套产品,其产业化产品的研制对完善航空制造产业链条,推动国内商用飞机等外表面装饰涂层材料的发展和技术进步具有重要意义。同时产品的推广销售也可替代进口产品,保障航空工业产业链安全。由于本产品附加值较高,随着产品的推广应用,可获得较大的经济收益。

## 参考文献:

- [1] 宴莉.高固份飞机蒙皮涂料的研制[D].上海:上海交通大学,2010.
- [2] 陈绒.浅析航空涂料的发展[J].科技咨询,2010(12):123-124.
- [3] 王黎,刘志,薛玉华,等.飞机涂料的发展近况[J].涂料工业,2012(12):68-71.
- [4] 张剑飞.飞机蒙皮高固体分航空涂料的研制[D].兰州:兰州大学,2015.
- [5] 张庆广,张帆.原料药工艺研发中从小试到中试放大的关键点[J].医药卫生,2020(10):190-191. (下转第9页)