

# 国产复合材料预浸料过程控制的认识与实践

刘天舒\* 周洪飞 廖子龙

(中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

## 摘要:

材料满足适航要求是其应用于民用飞机的前提,材料供应商需要按照适航的基本原则,建立过程控制体系,保证材料的质量稳定性和一致性。结合中航复合材料有限责任公司在国产预浸料过程控制体系建立中所开展的工作,从人、机、料、法、环、测六个质量控制要素阐释了国产预浸料“过程控制”的技术内涵和具体实施工作的路径。国产预浸料过程控制文件(Process Control Documents,以下简称 PCD)的实施提高了产品合格率、产品质量稳定性和一致性、生产效率并降低了成本,其所带来的显著经济效益将会推动过程控制体系在国内航空复合材料供应商中的推广普及,带动航空复合材料制造产业链整体水平的提升,为航空复合材料的持续发展提供动力。

**关键词:** 适航;国产预浸料;过程控制;PCD;技术内涵;连带效应

**中图分类号:** V258; TP273

**文献标识码:** A

**OSID:**



## 0 引言

近年来随着先进树脂基复合材料在飞机机体结构上越来越广泛的应用<sup>[1-5]</sup>,以及国内复合材料技术逐渐成熟,带动了国产碳纤维、树脂和复合材料发展,国产复合材料的应用对象开始由军用飞机向民用飞机拓展。

国家在《2025 重点领域技术路线图》中提出“高性能纤维及其复合材料作为关键战略材料”,2020 年的目标为“国产碳纤维复合材料满足大飞机等重要装备的技术要求”,2025 年的目标为“在民机领域实现示范应用,并取得适航认证”。

要实现国产复合材料在民机上的真正应用,就必须满足民机适航的要求。适航法规的四个属性,即强制性、国际性、完整性、基础性(最低安全要求),使民用飞机复合材料的设计、制造、检测、应用与维修具有更加复杂的技术与管理要求。中国民用航空规章<sup>[6-9]</sup>第 603 条款给出了民机材料的适航要求,其中 b)款为材料的核心适航要求:符合经批准

的标准,保证这些材料具有设计资料中采用的强度和其它性能。b)款的内涵实际上是对材料质量稳定性和一致性的要求,只有材料具有良好的质量稳定性和一致性才能保证材料一贯地具有设计资料中采用的强度和其它性能。

复合材料制造工艺的特殊性使其生产的中间产品或成品不能通过非破坏性测试方法百分之百地检测出没有任何质量缺陷,即属于所谓的“特殊工艺”。只有通过“管控”材料的整个生产过程,才能避免产品所有可能产生的质量缺陷。目前,国外材料供应商主要是通过“过程控制”的方法来保证材料的质量稳定性和一致性。过程控制理念认为,只有控制材料生产过程每一环节的变异,材料整个生产过程的总变异才能达到最小,因此所生产材料的性能变异才能达到最小,从而从根本上解决材料质量稳定性和一致性的问题。“过程控制”的实施需要基于一套完整系统的 PCD,国外民机材料供应商均是按照其所制定的、并被使用方审查批准的 PCD 来进行材料的生产和交付。从适航当局的立场来解

\* 通信作者. E-mail: lts1969@hotmail.com

**引用格式:** 刘天舒,周洪飞,廖子龙. 国产复合材料预浸料过程控制的认识与实践[J]. 民用飞机设计与研究,2020(1):80-84.  
LIU T S, ZHOU H F, LIAO Z L. Realization and practice of process control for domestic composite prepreg[J]. Civil Aircraft Design and Research,2020(1):80-84(in Chinese).

读 603 条款的 b) 款,就是民机材料的生产交付须严格遵循 PCD,不接受不按 PCD 生产交付的民机材料。

与国外民机材料供应商相比,国内航空材料供应商在民机材料的适航管理方面经验不足,主要依据产品出厂终检的模式来生产交付材料,没有采用过程控制的方法生产交付产品,因而难以保证材料的质量稳定性和一致性,当然也无法满足民机适航要求而用于民机。因此,国产复合材料要应用于民机,当务之急是建立材料生产的过程控制体系,制定材料的 PCD 并按 PCD 生产交付材料。

中航复合材料有限责任公司(以下简称中航复材)在国产民机预浸料过程控制体系建立中,对“过程控制”技术内涵的理解和认知、所取得的研究成果以及所获得的经验,对于国产复合材料乃至国产航空材料过程控制体系的建立具有一定的指导和借鉴意义。国产预浸料过程控制体系的建立对于“过程控制”在国内航空材料供应商中的推广普及具有标杆示范效应。

## 1 国产预浸料 PCD 的建立和技术内涵

产品的“过程控制”是材料供应商从接受客户订单起至产品交付客户为止的全过程控制,所涉及的人员和部门众多,包括技术、生产、管理等各个层面,因此 PCD 体系的建立和实施有赖于材料供应商各级管理人员和全体员工的积极参与。对于国内材料供应商来说,PCD 体系的建立过程首先是人的思想观念的转变过程。由于“过程控制”理念与国内材料供应商传统的产品质量控制模式有着显著不同,因此要建立产品的 PCD 并使其得到真正贯彻实施,首先要在员工头脑中牢固树立“过程控制”的理念和意识。针对国产预浸料 PCD 体系的建立,中航复材首先开展了“过程控制”理念和基础知识的全员培训,公司还针对生产、检验、管理、MRB 等不同类别的人员分别开展了 PCD 专项培训。通过一年内 10 多次的全员和专项培训,员工对“过程控制”的认知和理解不断深化,对各自岗位的 PCD 要求熟悉掌握并严格执行,客户意识大大提升,基本形成了全员积极主动参与 PCD 的良好态势,为 PCD 体系的建立和贯彻实施提供了支撑。

产品的“过程控制”可具体分解为人、机、料、法、环、测六要素的控制<sup>[10]</sup>。除了注重和大力加强

对员工的培训,中航复材在“过程控制”的其它五个要素也开展了大量工作。在设备控制方面:(1)对国产预浸料生产设备开展了全面检定校验,以确定设备参数和检测仪表是否满足生产技术要求。总计检定校验设备参数和检测仪表 130 余个,根据检定校验结果对圆跳动度参数不满足生产技术要求的车轮进行了更换,从而保证设备参数和检测仪表满足生产技术要求。(2)建立生产设备台账和使用档案,修改完善设备作业指导书。制定设备维护保养计划,定期对生产设备开展维护保养。对生产设备历史故障进行统计分析,制定和实施降低设备故障率的措施。与之前相比,生产设备故障频次降低约 30%。(3)对生产设备在现有基础上进行了一定的改造,在树脂生产的反应釜、树脂膜生产的涂胶机和预浸料生产的复合机上加装了受控工艺参数(Controlled Process Parameter,以下简称 CPP)即时监控和数据连续自动采集记录系统,从而提升了产品生产过程中 CPP 的控制水平。

在“料”的控制方面:(1)强化对产品原材料的控制,对于国产预浸料原材料—纤维、织物、树脂各组份、重要工艺辅助材料,建立了中航复材原材料采购规范,按采购规范进行原材料采购和验收。在树脂各组份原材料采购规范中,纳入了对材料结构和组成具有特征性的指纹档案(即光谱、色谱等化学表征)的要求,通过对树脂各组份原材料开展指纹档案试验研究,确定了指纹档案的项目、试验方法和指标。将 PCD 要求向下游原材料供应商延伸,在中航复材和中国商飞的指导下,预浸料的纤维和织物原材料供应商已建立产品 PCD 并按 PCD 进行产品生产供货,目前中航复材正在指导协助树脂组份原材料供应商开展产品 PCD 的建立。(2)为了加强对中间产品树脂和树脂膜的质量控制,建立了树脂标准,并在国产预浸料企标中增加了对树脂和树脂膜的要求。通过设计试验,采用化学表征的手段确定了树脂和树脂膜的贮存寿命和外置寿命。(3)对与树脂、树脂膜、预浸料接触的工艺辅助材料如离型纸、隔离膜等,进行了鉴定检验和工艺性评估,从而保证工艺辅助材料的状态满足生产要求。

在“法”的控制方面:(1)对预浸料产品生产过程中的控制点进行梳理和识别,总计识别确定生产控制点 150 余个。(2)对于 CPP,基于生产合格材料的历史数据确定其控制窗口,包括 CPP 的目标名义

值和公差限。(3)通过设计试验并对试验数据进行统计分析,识别确定关键工艺参数(Key Process Parameter,以下简称 KPP)。(4)通过设计试验来验证重要生产工序的合理性和有效性。如在树脂生产中,通过对反应釜不同部位取样的树脂进行化学表征的试验,证明了所生产树脂的均匀性,从而表明树脂生产中搅拌混合工序的合理有效。(5)通过设计试验来确定某些 CPP 的控制窗口。如在树脂膜生产中,通过对树脂成膜温度下不同保温时间的树脂样品进行化学表征的试验,确定了树脂保温时间的控制窗口。(6)针对产品生产中出现的工艺问题开展研究改进。如在预浸料生产中,通过对复合工艺的改进显著改善提高了预浸料的粘性和铺覆性。(7)建立国产预浸料的统计过程控制(Statistical Process Control,以下简称 SPC),制定 SPC 管理制度和实施细则。针对预浸料产品的 KC 和 KPP,建立控制图和控制限,通过 SPC 来监控预浸料产品的质量波动并及时采取纠正措施。(8)开展 PCD 各级各类文件的编制,如原材料采购规范、工艺规程、检验规程、仪器设备作业指导书等,建立 PCD 文件树,按照文件树确定文件清单。在 PCD 制定过程中,通过所编制作业文件的现场试运行,不断对文件内容进行完善。总计制定 PCD 各级各类文件 90 余份,基本形成了一套完整的国产预浸料 PCD 的文件和管理体系。

在环境控制方面:(1)在产品生产车间配备了空调和尘埃过滤净化装置,并配备了相应的温湿度监控和自动记录系统以及尘埃粒子测试仪,以保证生产环境满足生产要求;(2)在原材料和产品库房配备了空调或制冷机及相应的温湿度监控和自动记录系统,以保证原材料和产品的储存环境满足储存要求;(3)在检测实验室配备了空调和温湿度计,以保证测试环境满足测试标准要求。

在检验检测控制方面:(1)针对国产预浸料的每一关键特性(Key Characteristic,以下简称 KC)和质量一致性检验项目开展测量系统分析(Measurement System Analysis,以下简称 MSA)。通过设计 MSA 试验并对试验数据采用量具 R&R 进行评估,来确定测量系统的可靠性和有效性。(2)对检测仪器定期进行检定校验,以保证检测仪器的准确性和可靠性。(3)对外委检验检测单位,采取测试现场目击审核的方式确定其测试符合性。

## 2 国产预浸料 PCD 的实施效果和连带效应

国产预浸料 PCD 体系建立后,中航复材按 PCD 进行了预浸料的批生产。实践表明,PCD 实施后的材料生产,在产品合格率提高、产品质量稳定性和一致性的提升、生产效率的提高以及生产成本的降低等方面取得了显著成效。PCD 实施后,产品合格率较实施前提升了约 15%;在产品质量稳定性和一致性上,产品批的关键理化性能离散系数由实施前的 4%~5% 降低至 2% 以下,关键力学性能离散系数由实施前的 8%~10% 降低至 6% 以下;在生产效率上,PCD 实施后的生产效率较实施前提高了约 15%;在生产成本上,PCD 实施后带来的生产成本降低主要来自三个方面:(1)产品原材料和工艺辅助材料浪费的减少;(2)产品废品率的降低;(3)产品检验成本的降低。PCD 实施后的生产成本较实施前降低约 15%。

国产预浸料 PCD 的实施带来了一系列连带效应:首先,其所带来的产品质量的提升、生产效率的提高以及生产成本的降低带来了显著的经济效益,将会给国内其它航空复合材料供应商带来示范效应,并带动国内其它航空复合材料供应商建立其自身产品的过程控制体系。其次,在国产预浸料 PCD 建立和实施中所形成的一整套科学方法和积累的经验,为国内其它航空复合材料供应商产品 PCD 的建立提供了借鉴。同时 PCD 向上游原材料供应商产品的延伸,必将带来上游原材料产品的质量提升、生产效率的提高以及生产成本的降低,从而提升上游原材料产业的经济效益;另外 PCD 给材料带来的质量提升对于下游材料用户产品的质量提升和成本降低是一个关键因素,因此也必然会提升下游产业的经济效益。最后,从整个国内航空复合材料制造产业链来看,国产航空复合材料 PCD 的建立和实施必然会推动产业链整体水平的提升,其给整个产业链带来的显著经济效益将为国内航空复合材料的持续发展提供动力。

## 3 结论

1)“过程控制”是保证民机材料质量稳定性和一致性的有效手段,国产材料要满足适航要求而应用于民机,材料供应商必须建立过程控制体系。

2)“过程控制”可分解为人、机、料、法、环、测六要素的控制,中航复材在国产预浸料过程控制体系建立中所开展的工作和所阐释的PCD技术内涵,为国内航空复合材料供应商产品过程控制体系的建立指明了途径。

3)国产预浸料PCD的实施,提高了产品合格率、产品质量稳定性和一致性、产品生产效率并降低了产品成本。国产预浸料PCD实施所带来的显著经济效益将会给国内其它航空复合材料供应商带来示范效应,推动过程控制体系在国内航空复合材料供应商中的推广普及,带动航空复合材料制造产业链整体水平的提升,为航空复合材料的持续发展提供动力。

#### 参考文献:

- [1] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料的发展和应[J]. 航空材料学报, 2003, 23(10): 198-204.
- [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.
- [3] 吴利华, 袁宇慧. 先进纤维增强复合材料在大型客机上的应用现状[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(3): 100-103.
- [4] 冯军. 复合材料技术在当代飞机结构上的应用[J]. 航空制造技术, 2009, 22: 40-42.
- [5] 马立敏, 张嘉振, 岳广全, 等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 317-322.
- [6] 中国民用航空总局. 中国民用航空总局令第132号:

正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定[S/OL]. [2020-01-08]. [http://117.143.109.153/cache/www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201511/P020151103350055342625.pdf?ich\\_args2=137-08134713031944\\_4ae8794bae1aae1a66a243ab5da21ec8\\_10001002\\_9c896324d3c5f3d5923d518939a83798\\_fe99fae6a70600d92b01c678bd09cfbe](http://117.143.109.153/cache/www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201511/P020151103350055342625.pdf?ich_args2=137-08134713031944_4ae8794bae1aae1a66a243ab5da21ec8_10001002_9c896324d3c5f3d5923d518939a83798_fe99fae6a70600d92b01c678bd09cfbe).

- [7] 中国民用航空总局. 中国民用航空总局令第209号: 运输类飞机适航标准[S/OL]. [2020-01-08]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201606/P020160622405532063536.pdf>.
- [8] 中国民用航空总局. 中国民用航空总局令第112号: 正常类旋翼航空器适航规定[S/OL]. [2020-01-08]. [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201511/t20151102\\_8520.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201511/t20151102_8520.html).
- [9] 中国民用航空总局. 中国民用航空总局令第113号: 运输类旋翼航空器适航规定[S/OL]. [2020-01-08]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201511/P020151103350095209005.pdf>.
- [10] 凌日文, 朱林. 复合材料航空产品制造过程质量控制的应用研究[J]. 质量与可靠性, 2013, 3: 25-28.

#### 作者简介

刘天舒 男,博士,高级工程师。主要研究方向:树脂基复合材料。E-mail: lts1969@hotmail.com

周洪飞 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:树脂基复合材料。E-mail: qiuxia888@sohu.com

廖子龙 男,研究员。主要研究方向:树脂基复合材料。E-mail: zilong5678@sina.com

## Realization and practice of process control for domestic composite prepreg

LIU Tianshu \* ZHOU Hongfei LIAO Zilong

(AVIC Composites Co., Ltd, Beijing 101300, China)

**Abstract:** That materials satisfy the airworthiness requirements is the premise of their application on civil aircraft. material suppliers have to establish process control system according to the fundamental principles of airworthiness to ensure quality stability and consistency of materials. Combined with the work carried out by AVIC Composites Co. Ltd during the establishment of process control system for domestic composite prepreg, this article expounds the technical connotation and approach of process control for domestic composite prepreg from the six quality control elements including man, machine, material, method, environment and measurement. The implementation of process control documents (PCD) raised product qualification ratio, product quality stability and consistency and produc-

tion efficiency, also reduced product costs. The remarkable economic benefits brought about by PCD will promote the spread and popularization of process control system among domestic aerial composite suppliers, will drive the elevation of the overall level of the aerial composite manufacture industrial chain and will provide power for sustained development of aerial composites.

**Keywords:** airworthiness; domestic composite prepreg; process control; PCD; technical connotation; knock-on effect

---

\* Corresponding author. E-mail: lts1969@hotmail.com