

复合材料产品的可制造性及其定量评价流程

Manufacturability of Composites Product and Its Evaluation Flow With Quantitative Index

北京航空航天大学先进复合材料中心 张博明
哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所
哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所 丛晶洁



张博明

北京航空航天大学材料学院教授, 博士生导师, 北航先进复合材料研究中心副主任, 北航高分子及复合材料系主任。发表学术论文 100 余篇, 获国家科技进步二等奖 2 项。

高效的复合材料结构设计必须基于对复合材料结构制造工艺的深入认知, 因为即使采用同类成型工艺, 不同的结构设计也会带来工艺质量与制造成本的明显差异。

复合材料具有比强度高、比刚度大、结构功能一体化以及便于大面积整体成型等优点, 已成为飞机的主要结构材料之一, 其用量成为飞机先进性的重要标志之一。复合材料在飞机结构上的应用由次承力构件扩大到主承力构件, 并逐渐向结构整体化、设计制造集成化的方向发展。相比金属材料, 复合材料具有上述优异特性的同时也面临着提高工艺质量稳定性和降低制造成本的严峻挑战。高效的复合材料结构设计必须基于对复合材料结构制造工艺的深入认

知, 因为即使采用同类成型工艺, 不同的结构设计也会带来工艺质量与制造成本的明显差异。正如波音公司 Richard McLane 所说: 对相同的飞机结构可以采用 2 套完全不同的设计方案, 分别实现最高的性能要求及最低的制造难度^[1]。

复合材料产品的设计与制造具有内在的紧密相关性, 要求复合材料结构设计必须是面向制造的设计 (Design for Manufacturability, DFM), 其内涵是在结构设计时不仅要考虑功能和性能要求, 而且要同时考虑

结构制造的可能性、高效性和经济性;其最终目标是在满足功能和性能要求的前提下,制造成本达到最低^[2-3]。对于产品设计方案的可制造性评价是面向制造设计方法的重要组成部分,是实现面向制造设计的前提条件。从20世纪90年代初期开始,可制造性评价技术开始得到重视,出现了许多针对特定应用领域可制造性评价系统,涉及的领域包括可装配性分析^[4-5]、铸造与注塑等近净加工可行性分析^[6]、可切削性分析^[7]以及印刷电路板的可制造性分析等。复合材料产品可制造性评价技术研究也取得了一定的进展,如Haffner^[8]针对手工铺设、自动纤维铺放、树脂传递模塑成型、拉挤成型、热压罐固化等7种复合材料制造工艺完成了可制造性工艺设计规则的提取,文中将不同工艺方法所对应的制造容限、原材料及设备需求信息等以定性指导原则的方式提出,主要考虑的产品设计因素包括结构尺寸、复杂性及生产批量等。这种定性指导原则的提出可以辅助设计师完成早期工艺设计,但是无法满足产品设计可制造性定量评价的需求。制造成本是产品可制造性评价过程中的重要指标之一,复合材料领域内制造成本估算模型的研究包括参数成本估算模型(Parametric Cost Modeling, PCM)和制造工艺成本模型(Manufacturing Process-based Cost Modeling, MPCM)2类^[9-12]。其中PCM模型^[9]以产品重量和复杂性为基础,通过对历史项目信息回归分析建立起成本与产品的产量、重量或尺寸、工人的熟练程度等影响因素之间的关系,可用于产品概念设计阶段的可制造性成本评估;MPCM模型^[10]考虑所有相关的制造过程,将制造成本分类为材料、制造、装配和工艺时间后分别建立详细的估算模型,适用于详细设计阶段的可制造性成本评估。目前已有的复合材料设计/制

造一体化辅助软件包括CATIA CPD (CATIA-Composite Design)模块^[13]和VISTAGY公司开发的FiberSIM软件^[14]等,所具有的可制造性分析功能主要涉及复合材料铺叠工序出现的制造问题,缺乏复合材料制造流程其他环节中制造问题的分析,比如固化过程中出现的厚度偏差、空隙或干斑,以及固化变形等严重影响性能的制造问题。

目前复合材料工业部门广泛采用积木式工艺试验和工艺逐步放大的方法,对于结构设计方案进行可制造性评价。这种方法研制周期长、效率低、成本高,在复合材料结构技术发展初期必不可少,也为复合材料结构可制造性评价技术提供了必需的经验基础。但是,工艺试验只能针对特定的结构形式与结构参数进行可制造性评价,单纯依靠工艺试验得到的经验难以推广到其他结构形式,甚至结构参数的变化也将导致已有经验的失效。而且,复合材料结构设计方案(材料体系、外形、铺层、连接方式等)的设计参数众多,很多参数都可以在一定范围内连续调节,有限的工艺试验最多只能实现典型结构方案的制造可能性的定性评价,无法给出结构设计参数与制造质量和成本的定量关联规律。因此,单纯依靠工艺试验得到的经验难以提升为具有广泛指导意义的理性知识,更难于实现共享与推广;必须将复合材料结构制造经验与具有普适价值的复合材料工艺理论紧密结合,构建完整、量化的复合材料结构制造知识体系,并且借助于知识库软件和计算机模拟手段,才能实现复合材料产品可制造性的量化评价。

本文首先根据复合材料制造工艺特点总结提出复合材料产品的可制造性的概念内涵,根据复合材料制造质量的评价指标体系,提出了基于知识库的复合材料可制造性评价流程,重点分析复合材料结构制造过程

中的质量可控性及其影响因素,基于复合材料产品多工序制造过程的特点提出一种逐步进行的产品质量可控性评估模型,最后针对复合材料层合板完成可制造性评价示例。

复合材料制造工艺特点及其可制造性评价

1 复合材料制造工艺特点

复合材料的制造工艺与金属材料的机械加工相比也有很大不同,主要表现为以下几方面。

(1) 复合材料工艺原材料为纤维与树脂材料,而不是复合材料本身,制造过程中复合材料产品结构与材料是最终同时完成的,材料性能分散性很大并且直接受到制造过程中工艺质量控制的影响;而制造过程中所遇到的很多问题源于复合材料结构与制造工艺设计间的不适应。

(2) 复合材料的典型制造工艺至少包括2个次级过程:一是增强材料的累加过程,要求采取措施实现整个体积范围内材料位置的精确控制;二是在刚性模具支持作用下完成复合材料的固化成型。其中增强材料累加过程可用的工艺方法包括手工铺覆、自动铺放、纤维缠绕以及三维立体编织等;固化成型过程可用的工艺方法根据工装设备及成型压力的不同可以分为真空袋成型、压力袋成型、热压罐成型、模压成型、树脂传递模塑成型等。

(3) 复合材料制造过程中所用工艺方法的不同组合可以得到不同的工艺流程设计,工艺流程中每个工序过程分别对应不同的工装设备设计、工艺方法设计、工艺参数设计以及质量指标控制要求。比如纤维铺设过程中的质量指标主要表现为纤维取向偏差方面,而固化过程中的质量指标则包括纤维体积含量、空隙率、固化度分布、温度分布以及固化变形等多个方面。

2 复合材料产品可制造性基本概念

关于产品的可制造性,迄今为止还没有一个被广泛接受的定义:美国国防部认为可制造性是一项设计和生产规划的若干特征或要素的组合,它能使设计所规定的产品按规定的产量经过一系列权衡之后,以最小的费用、最短的时间制造出来,并符合必须的质量和性能要求^[15]。Paul认为可制造性是在效益条件下满足产品目标的一种设计能力的测量,从制造的可能性和经济性的角度来检验一个设计的质量^[16]。我国国标GB4863-35中可制造性定义是:所设计的产品在能满足使用要求的前提下,制造和维修的可行性和经济性。可见,广义的可制造性分析需要考虑产品从生产到报废整个产品生命周期中的所有影响因素,包括制造、测量、装配、维护以及回收再利用等方面对产品的约束;狭义的可制造性分析主要考虑现有制造资源生产能力对于产品设计属性的满足程度。

当前研究领域内围绕复合材料产品可制造性分析展开的研究尚不多见,对于复合材料产品可制造性的理解也存在一定的片面性和局限性。比如FiberSim、CATIA等软件所提及的可制造性评价功能主要涉及纤维铺设过程中可铺覆性、纤维取向偏差以及铺层拼接问题的分析,更确切的描述应为可铺覆性评价,缺乏对于复合材料其他制造工序中的制造问题分析,特别是复合材料固化过程中的制造问题。本文结合复合材料制造工艺特点及可制造性基本概念,对复合材料产品可制造性定义如下。

复合材料产品可制造性是指在一定制造资源条件下,通过给定工艺流程以及工艺方案完成产品的制造过程中,能够以较低制造成本获取设计要求的制造质量的一种能力。从产品开发的角度出发,可制造性评价属于提高复合材料产品设计质量的

一种有效手段,通过分析产品设计特征的制造可行性以及产品最终质量可控性,从而及时发现设计问题并改善设计质量,减少设计环节与制造环节的循环迭代,为进一步进行设计修改提供理论依据;它是寻求最简单、最经济、又能满足用户需求的设计方案的过程。

3 复合材料产品可制造性层次化指标

基于上述可制造性基本概念的分析同时参考文献[8]中对于DFM指导规则的分析,本课题提出了复合材料产品可制造性层次化评价指标体系,如表1所示。其中定性指标主要用于判断工艺容限是否满足生产需求,即工艺可行性的评估过程中的分析对象;主要包括产品尺寸要求,铺层形状要求,表面精度要求,设备、模具及劳力需求,工艺生产能力、工艺循环周期等方面的要求。而定量指标分别从经济控制、效率控制及质量控制3方面进行指标参量的提取。

对于以飞机承力结构为主要应用目标的先进复合材料产品来说,产品质量状况为工艺设计过程中考虑所有问题的首要依据;可以认为,先进复合材料产品制造过程中,满足质量控制要求永远是研究和处理一切问题的出发点。因此对于先进复合材料产品设计来讲,质量控制指标是否满足设

计需求为可制造性评价过程中考虑的重点内容。

4 复合材料产品可制造性评价流程

复合材料产品可制造性评价流程如图1所示。第一阶段,首先借助特征数据库将零件信息转化为制造特征模型,系统中制造特征库存贮结构特征、工艺特征及指标参量等3类信息。第二阶段,在DFM指导规则知识库的支持下完成工艺可行性分析,初步排除现有工艺条件下无法满足的零件设计方案,比如零件尺寸超出真空袋可以封装的尺寸范围以及所用模具结构是否可以满足产品表面精度要求等。第三阶段根据定量指标通过数值计算分别完成经济参量、质量参量以及效率参量3方面指

表1 复合材料产品多层化可制造性指标

第一层指标	第二层指标	第三层指标
定性指标	生产需求	铺层形状要求
		产品尺寸要求
		表面精度要求
		工装设备要求
	工艺能力	年产量
		工艺周期
工艺准备时间		
定量指标	经济可控性	原材料成本
		工装设备成本
		人工劳力成本
		固定资产成本
		运作成本
	质量可控性	纤维取向偏差
		厚度公差
		纤维体积含量
		空隙含量
		固化程度
		翘曲挠度
	效率可控性	工装准备时间
		毛坯铺设时间
		封装固化时间
结构装配时间		

标可控性评估;第四阶段根据设计需要综合评估并得到优化结果。其中未能通过第二、三阶段约束条件的设计方案将返回零件设计初始点用于指导设计。复合材料产品制造特征库的建立保证了零件设计信息的有效输入,DFM 指导规则知识库的创建与完善是系统评估实现的前提与基础。

复合材料产品质量可控性评估模型

1 产品质量可控性及其影响因素

现代质量控制理论与实践研究表明,质量控制的重点在于过程控制而非单纯产品质量控制,主要原因在于任何产品质量都形成于完整的制造过程。工序为制造过程的基本环节,每一道工序质量的好坏,最终都直接或间接影响产品质量;只有制造过程经历的一系列工序质量分别

满足制造要求,才能实现最终产品满足设定的质量目标并得到满意的产品。可见工序质量是形成产品质量的基本环节,工序质量控制是实现产品设计质量目标的有效保证。常见的工序质量表现为受控与失控2种状态,其表征参量包括工序质量特性指标 X 及其分布参数 M 和 σ , 即有 $X \sim N(\mu, \sigma)$ 。工序质量控制的对象为工序质量的波动,其目标是保证工序处于受控状态,即将工序质量特征参数限制在允许的范围内波动。

产品制造过程中每一道工序质量都是由操作人员在一定的工艺环境中,运用工装设备,按照规定的工艺参数,利用原材料加工制造出来的。单一工序中质量影响因素主要包括操作人员、工装设备、材料性能、工艺参数、环境参数、测试方法等6个方面,包括不可控因素与可控因素2类。其中不可控因素是指难以在

设计过程中预先控制的工序质量影响参数;可控因素是指可以在设计过程中控制调整的工序质量影响参数,通常包括原材料以及工艺参数等方面。工序设计过程中通过改变可控影响因素的不同组合可以实现工序质量特性指标波动范围的改变。

系,产品质量波动的因素更多,且工序间质量波动具有传递性和组合性。一方面制造过程中每道工序的质量都受到上述6个方面因素的影响,另一方面工序质量波动范围将随着工序数量的增加而增加。随着制造过程的进行,上游工序质量的波动会向下游工序传播,甚至有被放大的可能,体现出工序质量波动的传递性。与此同时,制造过程的复杂性将导致某些工序质量特性指标的波动往往不是由某一特定因素引起的,而是由多个工序过程中的多个影响因素交互作用而产生的,体现了工序质量波动的组合性。

总之,对于复合材料产品制造过程来说,首先并非工艺过程中所有参与工序对于最终产品质量都具有重要影响作用,即产品最终质量指标与不同工序间具有不同的关联程度;其次即使某个工序对其影响程度较大,也有可能仅仅受到工序中一部分质量特性指标的作用;最后大部分工序中工序质量特性指标影响因素来自于本工序中操作人员、工装设备、原材料、工艺参数、工艺环境、测试方法6个方面,而最终产品质量指标的影响因素同时包括最末工序中6方面影响因素以及所关联的工序质量特性指标,这体现了工序间质量波动的传递性和组合性影响。

2 产品质量可控性评估模型

复合材料产品制造是通过一系列连续工序完成的制造过程。这种多工序的制造过程决定了产品制造质量将是所有工序质量状态累计与传递的结果,每一道工序质量波动状态以及工序间质量波动的传递性与组合性影响,都将直接或间接影响最终产品质量可控性。复合材料产品质量可控的前提在于工艺过程中的工序质量可控;对于特定产品质量指标而言,只有保证所关联的所有关键工序质量能够处于受控状态,才能实现最终产品制造质量指标在设定

相比单一工序质量分析,完整的产品制造过程中工序质量之间具有更为复杂的关

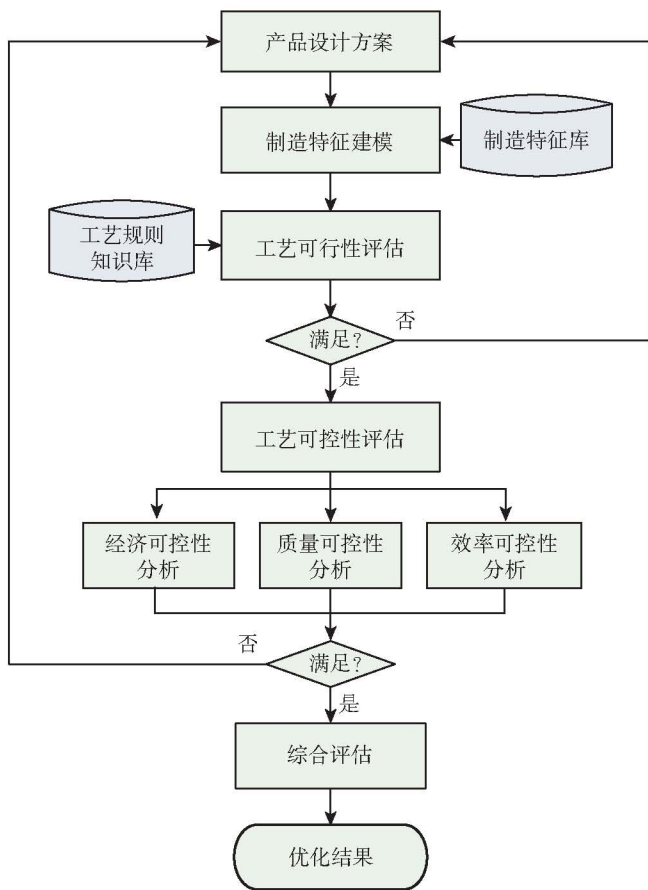


图1 复合材料产品可制造性评价流程

范围内可控并得到满足用户期望的优质品。因此对于复合材料产品质量可控性评价不能只限于最终成型过程中的产品质量指标是否满足,而应综合考虑工艺过程中的关键工序中质量特性指标的波动状态以及工序质量间的复杂关系,逐步完成最终产品质量指标可控性评估。

基于上述分析,本课题提出一种基于工艺过程逐步进行的产品质量可控性评估模型。

这里设给定工艺流程下复合材料产品制造过程由 n 道工序组成,记为:

$$P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}, \quad (1)$$

每一道工序分别对应一组可选设计方案:

$$R_i=\{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\}. \quad (2)$$

根据设计需求确定 l 个产品质量指标,记为一级指标:

$$Y_l=\{Y_1, Y_2, \dots, Y_l\}. \quad (3)$$

这里考虑到一级指标与不同工序间的关联性而定义关联程度矩阵 K :

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{l1} & k_{l2} & \dots & k_{ln} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 k_{ij} ($i=1,2,\dots,l; j=1,2,\dots,n$) 是一级指标 Y_i 与工序 j 间关联系数,且有 $k_{ij} \in [0,1]$ 。如果关联系数 $k_{ij}=0$,则意味着工序 j 对一级指标 Y_i 不存在任何影响,工序 j 中不存在与之关联的工序质量特性指标;反之若关联系数 $k_{ij}=1$,即工序 j 对一级指标 Y_i 具有影响的前提下,则在工序 j 中必然存在与一级指标 Y_i 相关联的工序质量特性指标,记为二级指标:

$$X_{i,j}=\{X_{i,j1}, X_{i,j2}, \dots\} \quad (i=1,2,\dots,l; j=1,2,\dots,n). \quad (5)$$

一级指标 Y_l 波动范围为工艺过程中所有与之关联的工序中二级指标集 $\{X_{i,j1}, X_{i,j2}, \dots, X_{i,21}, X_{i,22}, \dots, X_{i,j1}, \dots\}$ 共同作用的结果。需要注意的是,复合材料产品多工序的制造过程

表2 层板成型工艺典型工序及工序质量特性指标

工序	工步分解	二级指标
预浸料制备	(1) 纤维除静电 (2) 树脂配胶 (3) 浸渍 (4) 挤胶 (5) 烘干 (6) 冷却 (7) 缠卷	预浸料单位面积纤维质量 预浸料树脂含量 预浸料挥发分含量 预浸料单层厚度 预浸料储存期 预浸料粘度 预浸料树脂流动度 预浸料凝胶时间
材料准备	(1) 预浸料剪裁 (2) 脱模布剪裁 (3) 吸胶毡剪裁 (4) 透气材料剪裁 (5) 有孔膜剪裁 (6) 真空袋剪裁	铺层纤维取向偏差 铺层尺寸公差
模具准备	(1) 清理模具 (2) 烘干模具 (3) 脱模剂处理	模具表面精度 模具尺寸公差
铺设预成型	(1) 脱模布铺设 (2) 预浸料铺设 (3) 脱模布铺设	铺设后结构厚度 铺设后结构尺寸公差 铺设后结构纤维取向偏差 铺设后结构挥发分含量 铺设后结构吸湿量
真空压实	(1) 真空袋封装 (2) 检查气密性 (3) 真空加压	压实后结构厚度 压实后结构纤维取向偏差 压实后结构挥发分含量 压实后结构吸湿量
吸胶处理	(1) 铺设吸胶毡 (2) 铺设透气材料 (3) 铺设孔膜 (4) 真空袋封装 (5) 检查气密性 (6) 真空加压 (7) 热压罐升温 (8) 冷却至室温	吸胶后结构厚度 吸胶后结构纤维体积含量 吸胶后结构挥发分含量 吸胶后结构树脂含量
固化 & 修整	(1) 铺设脱模布 (2) 铺设预制件 (3) 放置软模 (4) 真空加压 (5) 热压罐升温加压 (6) 冷却至室温 (7) 停止加压 (8) 脱模 (9) 清理制作 (10) 修整	制件厚度 制件纤维取向偏差 制件孔隙率 制件纤维体积含量 制件翘曲挠度 制件固化程度 制件表面精度 制件尺寸公差

决定了上下游工序间二级指标存在偏差累计及传递效应。工序 j 中给定工序方案所得二级指标 $X_{i,j}=\{X_{i,j1}, X_{i,j2}, \dots\}$,一方面作为工序 j 的质量表征值完成工序 j 的质量可控性评估,另一方面作为工序 $j+1$ 的输入参数直接影响二级指标 $X_{i,(j+1)}=\{X_{i,(j+1)1}, X_{i,(j+1)2}, \dots\}$ 以及工序 $j+1$ 的质量可控性评估。可见对应每一道工序完成的质量可控性评估需要同时参

考上一道工序中二级指标以及给定工序方案中设计变量的影响。

3 产品质量可控性实例分析

为保证上述产品质量可控性评估模型充分发挥作用并应用到复合材料产品面向制造设计及可制造性评价过程中,要求评估过程有明确的内容,包括:

(1) 复合材料产品典型工序及其工序质量特性指标,要求实现整个

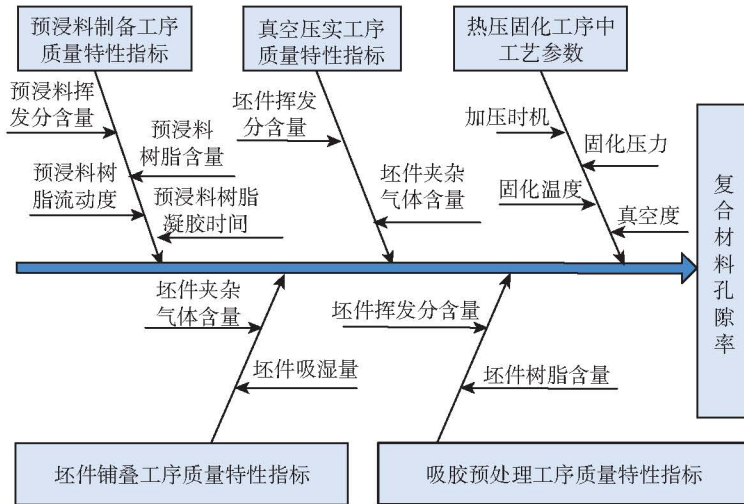


图2 产品孔隙率的因果分析图

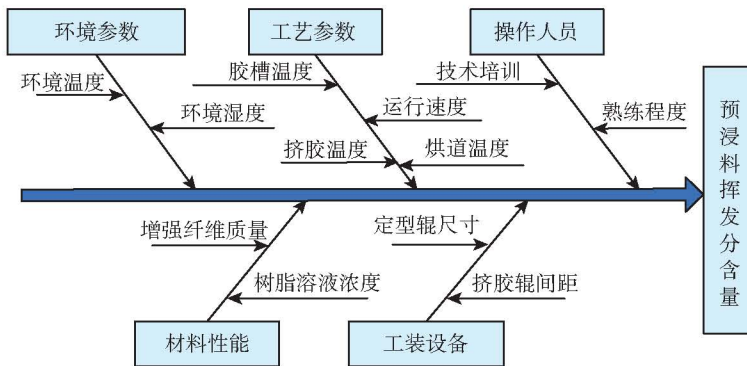


图3 预浸料挥发分含量的因果分析图

制造过程工序化分解,同时确定每一道工序中主要存在的工序质量特性指标;

(2)产品质量对应的影响因素,要求根据待评估产品质量指标确定与之关联的不同工序质量特性指标,以及最末工序中质量影响因素;

(3)工序质量对应的影响因素,要求分别从操作人员、工装设备、材料性能、工艺参数、环境参数、测试方法等6个方面分析可能导致工序中特定质量特性指标波动的影响因素。

上述3个方面共同构成了复合材料产品质量可控性评估过程顺序进行的前提条件与基础,也是评估初期需要解决的关键问题。手工铺覆热压罐成型工艺为生产航空航天高

质量先进复合材料产品的主要方法,表2、图2、图3分别为热压罐成型某层合构件质量可控性评估初期分析结果。其中表2为产品制造过程中工序分解及工序指标分析,图2为根据孔隙率对应的影响因素完成的因果分析图,图3为对应预浸料制备工序中预浸料挥发分含量影响因素完成的因果分析图。

结论

复合材料设计/制造一体化的特殊性决定了复合材料的结构设计/与工艺设计同金属结构有着许多本质区别。先进复合材料产品制造过程中,满足设计要求的质量控制目标是研究和处理一切问题的出发点。

特别是对于以飞机承力结构为应用目标的先进复合材料产品来说,产品质量是研制生产过程中考虑所有问题的最主要依据,产品质量可控性也是先进复合材料产品可制造性评价过程中的重点。

(1)本文根据复合材料制造工艺特点总结提出复合材料产品的可制造性的概念内涵,虽然其中包含了制造成本的评价,但是评价流程设计的目标还是针对产品质量可控性。

(2)根据制造过程逐步进行的质量可控性评价流程将使复合材料产品可制造性的定量评价成为可能。

(3)虽然本文给出的评价示例是针对复合材料层合板的,但是复合材料产品可制造性评价的概念、根据质量指标和制造过程逐步分解的评价流程与知识框架对于复杂的复合材料结构仍然适用。

(4)无论针对什么样的复合材料产品进行可制造性评价,知识框架中相关知识的完备性都是实施评价的前提,即使对于简单的层合板,本文提出的评价流程中每条具体的知识仍然需要进一步研究工作才能确定。只有在保障知识完备性的基础上,进一步确定知识的适用性、提高知识的准确性,本文提出的复合材料产品可制造性定量评价方法才能在实际工程中发挥作用。

(5)在具体产品的工艺研究中应用本文提出的方法,可以明确哪些是必须获取的知识,并且确定根据经验、试验和理论分析等途径获取知识的技术路线。

(6)本文提出的知识体系不仅适用于复合材料产品的可制造性定量评价,同样适用于复合材料产品的数字化工艺设计。

本文共有参考文献16篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小颖)