

关于先进复合材料制造体系的 几点思考*

Thoughts on the Manufacturing System of Advanced Composites

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 蒲永伟



蒲永伟

研究员级高级工程师,中航工业复合材料构件制造技术首席技术专家。现任中航工业沈飞复合材料制造中心主任业务经理兼副主任。

本文基于作者在复合材料构件制造领域多年来的理论与实践积累,首次从系统学的角度提出了复合材料制造体系的新概念,指出该体系由外部环境、限制条件和制造环境等共同组成,并分别给出了三者的定义,指出在复合材料产品的成型过程中,三者相互影响、相互制约,制造体系对产品质量的影响是三者共同作用的结果。

新一代先进复合材料被广泛应用于现代航空航天复杂承力构件的制造。先进复合材料诞生于20世纪60年代末,因其具有高比强度、高比模量、耐热、耐腐蚀、耐疲劳、隐身性好等独特性能而在航空、航天、汽车、兵器、电子、建筑、医疗等领域得到广泛应用。复合材料的研究水平和应用程度是一个国家科技发展

水平的重要体现,尤其在航空工业,各种先进的飞机无不与先进的复合材料技术紧密联系在一起,因此复合材料在飞机上的应用水平成为现代飞机的先进性标志之一,也使得复合材料技术成为一项具有战略意义的关键技术^[1-2]。杜善义院士在对中国大飞机项目的论证过程中指出,复合材料技术是我国大飞机研制

* 基金项目:国家重点基础研究规划(973)课题(2014CB046502)。

的关键技术之一^[3]。大型飞机应用先进复合材料的历史始于20世纪70年代初,从第一代民用飞机B707的复合材料使用量为0,到现在的波音B787复合材料使用量为50%、空客A380的复合材料用量为22%及最新设计的A350XWB复合材料用量达到了52%的趋势来看,对性能和重量要求越来越高的大型客机而言,复合材料应用量将不断增大,其使用量已经成为衡量大型客机先进性的重要标准^[4]。

在复合材料制件制造过程中,由于环境、原材料缺陷、工艺规范和结构设计不合理等因素会产生各种缺陷。制造缺陷的存在严重影响了复合材料制件的性能和使用寿命,甚至还会导致制件的报废,造成重大经济损失。因此,制造缺陷的控制技术是目前先进复合材料成型工艺领域的重要研究内容。已有对复合材料制造过程的研究往往侧重于整个制造体系的某一个环节开展,如研究复合材料构件热压罐成型温度场规律^[5]、复合材料构件热压罐成型变形预测及工装型面补偿技术^[6]、复合材料构件的质量检测^[7]等,缺乏对其制造过程涉及环节的系统考虑,从而难以对整个制造过程进行科学合理的规划,难以实现整个制造过程的最优。

本文基于作者在复合材料构件制造领域多年来的理论与实践积累,首次从系统学的角度提出了复合材料制造体系的新概念,指出该体系由外部环境、限制条件和制造环境等共同组成,并分别给出了三者的定义,指出在复合材料产品的成型过程中,三者相互影响、相互制约,制造体系对产品质量的影响是三者共同作用的结果。

先进复合材料制造体系的定义

先进复合材料构件的成型过程是产品制造工艺环境与材料自适应

反应的协同以达到成型、成性的过程,整个过程受到诸多因素的影响。

传统的复合材料构件制造往往偏重于材料性能生成的研究,即从材料学的角度来探究制造环境与材料成型质量的关系,忽略了由材料向构件转变的制造过程中,形成构件结构特征所需限制条件的存在对由外部环境传递到构件表面真实制造环境的影响,或者将由实现构件结构特征高性能精确成型所需的制造环境与简单针对材料性能演变所需工艺环境等同,没有考虑限制条件导致的外部环境向制造环境的非均匀传递问题。

由上所述,先进复合材料构件的制造是一个包含了外部环境、限制条件和制造环境的复杂制造体系(图1)。这里的外部环境是指由设备等外界条件提供的用以满足复合材料成型的温度、压力、真空等条件的外部环境;限制条件是指为了满足构件外形尺寸、内部质量和相对位置等要求,在产品成型过程中设置的人为边界条件;制造环境指在外部环境和限制条件下的工艺边界和工艺参数的总和。

在先进复合材料制造体系中,外部环境通过限制条件传递给制造环境。外部环境本身具有相对均匀性,而当外部环境将热、压等重要的制造条件通过复杂且非均匀的限制条件传递给制造环境时,会导致制造环境本身的非均匀性,从而在时空场中形成温度场、压力场等多个非均匀场叠加耦合的制造环境。在复合材料产

品的成型过程中,三者互相影响、相互制约。协调好三者的关系,形成先进复合材料均衡制造体系,是实现无缺陷制造的基础。

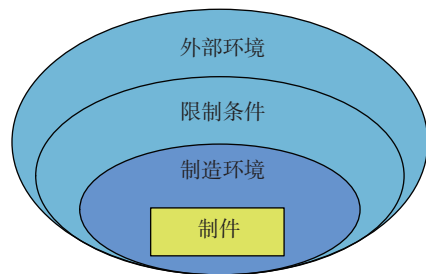


图1 制造体系结构图

外部环境是先进复合材料制造的前提

在复合材料构件的制造过程中,外部条件是固定因素,本身是一个近似均匀的体系,因此,相对于非均匀的限制条件和制造环境而言,外部环境被看作一个稳态量,并不直接影响复合材料的产品质量。

复合材料成型过程中的制造环境为温度场、压力场等多场耦合,要实现复合材料的均衡制造体系,必须形成制造环境的均衡体系。在这个体系中,我们将外部环境通过限制条件传递给制造环境的过程视为理想化的均匀传递,从而外部环境的均匀性是保证制造环境均匀性的先决条件。同时,外部环境具有一定的规律性,并具有可控性等特点,可以通过改变外部环境的参数进而影响复合材料的制造环境,最终实现复合材料产品的无缺陷制造。

以复合材料的热压罐成型为例,

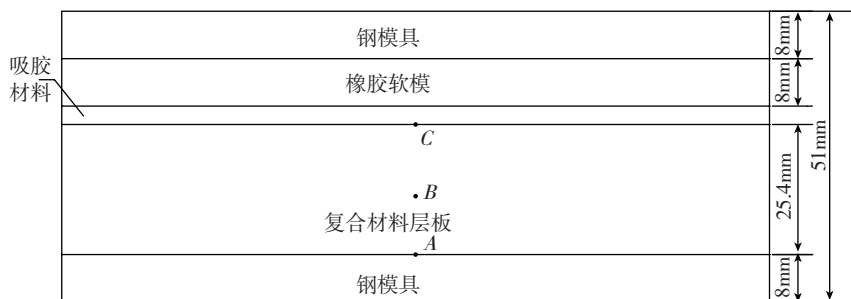


图2 复合材料制件封装体系示意图

外部环境包括复合材料制造成型过程中真空袋和热压罐提供的温度场和压力场。罐温和罐压等外部环境参数的变化会通过限制条件影响复合材料产品的制造环境的均匀性,进而影响产品质量。图2所示为某先进树脂基复合材料预浸料层合板为实现均匀固化所采用的典型封装体系(限制条件)处。从图中可知,热压罐提供的外部环境经由限制条件的传递,导致实际施加到制件表面的制造环境的偏离(C点)。因此,找到最优的罐温、罐压等外部环境参数,保证外部环境均匀地通过限制条件传递给制造环境是实现复合材料均衡制造体系的关键点。

实现均衡外部环境的有效途径,是在查明产品制造环境与材料自适应反应协同形、性演变规律的基础上,即明确实现构件形、性协同制造对制造环境的需求,用有限元软件分析不同外部环境通过限制条件对制造环境的影响,然后通过单元测试试验测出不同条件下产品的质量并对比验证软件的分析结果,从而找出复合材料最优的外部环境参数,并针对不同类型的产品建立相应的外部环境数据库,从而使外部环境最大限度地通过限制条件均匀地传递给制造环境,实现复合材料的均衡制造体系。

限制条件是先进复合材料制造的关键

先进复合材料制造的限制条件包括各类工装形式和结构、辅助材料的选择和控制等,是实现产品生产的首要考虑因素。限制条件的设置是实现产品结构和尺寸的最基本约束,是温度、压力等外部环境传递给制造环境的桥梁和中介;限制条件的形成和结构影响外部环境传递的均匀性,是产品成型质量最重要的控制因素。限制条件是根据最终的产品外形设计的,然而产品本身结构的复杂

性和为保证基本成型质量对制造环境的要求又会反作用于限制条件,这就需要限制条件能够包容材料为了适应制造环境的变化而表现出的自我调节,即包容材料的自适应反应,只有这样限制条件才与材料需要的制造环境相匹配,即限制条件限制和制约了材料的成型过程。限制条件和制件本身材料的包容和被包容的关系决定了复合材料成型的质量,因此,合理的限制条件是实现复合材料均衡制造体系,进而实现复合材料产品无缺陷制造的必要条件。

在实际生产中,对于结构复杂的复合材料制件,往往其限制条件采取刚柔相济、软硬兼施的方法:不但给予定位制件一个硬性可靠的立足点,同时又留下足够的空间包容材料适应制造环境进行的自我调节,使外部环境按设计要求传递给制造环境的同时,协调自身与材料及制造环境的关系,实现复合材料的均衡制造。而缺乏对这一制造体系中限制条件

与材料自适应反应关联规律的深入了解,往往难以实现均衡制造体系的构造,不可避免地导致产品缺陷的产生,如采用软硬结合的限制条件的某T型件因未能与材料的自适应反应相匹配,引起纤维在固化过程的皱曲现象。

制造环境是先进复合材料制造的保障

限制条件边界内就是产品的制造环境。制造环境确保复合材料制件的形、性协同制造,是产品质量的直接影响因素。原则上,限制条件确保产品的“形”,外部环境确保产品的“性”,外部环境是通过限制条件将产品制造所需的工艺元素传递给制造环境的。结构的复杂性及限制条件的非均匀性常带来工艺元素热、压场的波动,形成了复杂的树脂流动场,造成多种变量条件下的多场耦合叠加。因此,如何得到可以接受的制造环境是复合材料产品制造的关键。

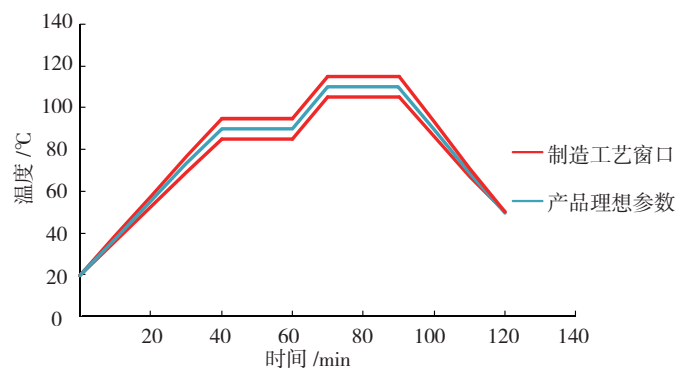


图3 制造工艺窗口

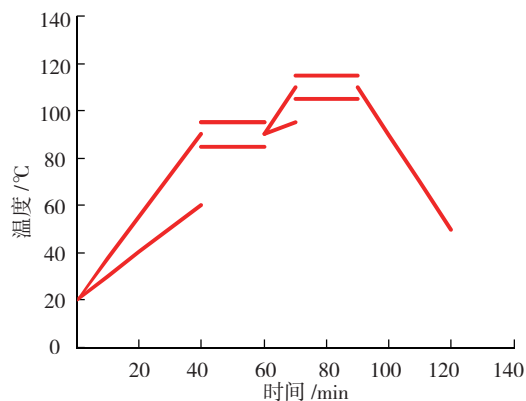


图4 制造环境

首先,需要验证产品的质量波动与工艺环境波动的响应关系,在满足原材料工艺需求的根本原则上,规划制造环境的工艺边界,确定制造工艺窗口;其次,要确定制造环境工艺元素变量变化与外部环境变化的响应关系,规划外部环境的工艺边界,确定外部环境工艺窗口,制定外部环境的工艺参数标准,保证制造环境工艺窗口在动态过程中始终涵盖在外部环境工艺窗口中,实现产品的制造。

当产品在外部条件作用下进行成型过程时,我们依据其原材料的工艺参数确定了制造工艺窗口(见图3),产品在固化过程中表征出的参数在此区间内均达到交付要求。综合考虑,制定出外部环境要求,保证产品在均匀稳定的作用场中成型。为了确保制造工艺窗口与制造环境(如

图4所示)的动态关联关系,需要对限制条件进行优化。

均衡制造体系的实现条件

总的来说,先进复合材料产品的无缺陷制造需要实现均衡制造体系,这个均衡制造体系除了受诸多制造变量(即外部环境、限制条件、制造环境等)的耦合影响外,还与材料的自身特性有密切关系(如图5所示)。先进复合材料产品的成型过程是产品的制造变量与材料自适应反应相互协调实现成型、成性的过程。因此,复合材料的制造要以均衡制造体系为根本出发点,以材料的成型、成性为根本目的。

而均衡制造体系的营造必须基于对制造变量的单独控制和耦合控制,使制造变量与材料自适应反应实

现均衡。复合材料均衡制造体系的制造变量包括必然变量和偶然变量,在制造体系中应避免偶然变量的存在,减少必然变量的数量,同时简化多工序引入的制造变量,提高制造变量的可控性与稳定性,并且分辨各变量之间的耦合关系,促使制造变量的耦合结果与材料的自适应反应相协调,从而达到制造体系的均衡。

当制造变量的耦合结果与材料的自适应反应不协调时,使制造体系失去平衡,材料的形变、性变偏离设计轨道,最终产品产生质量缺陷。

面对质量缺陷,要以获取并分解制造体系的制造数据为根本解决办法,以提取单元技术为根本策略,针对不平衡的制造变量进行基础的计算分析,通过分析该变量对产品的影响做出综合评估,判断该变量是否会给产品带来形、性的偏离;再将综合评估的结果在产品上进行验证,从而回归到单元技术上;最后将各单元技术进行组合,形成均衡的制造体系,完成复合材料产品的无缺陷制造,如图6所示。

参考文献

- [1] 陈绍杰. 复合材料技术与大飞机. 航空学报, 2008, 29(3): 605-610.
- [2] 益小苏. 复合材料手册. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [3] 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. 复合材料学报, 2008, 25(1): 1-10.
- [4] 杜善义. 先进复合材料和航天航空. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [5] 张纪奎, 关志东, 郇正能. 热固性复合材料固化过程中温度场的三维有限元分析. 复合材料学报, 2006, 23(2): 175-179.
- [6] 李桂东. 复合材料构件热压罐成型工装设计关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [7] Amenabar I, Lopez F, Mendikute A. In introductory review to THz non-destructive testing of composite mater. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013, 34(2): 152-169.

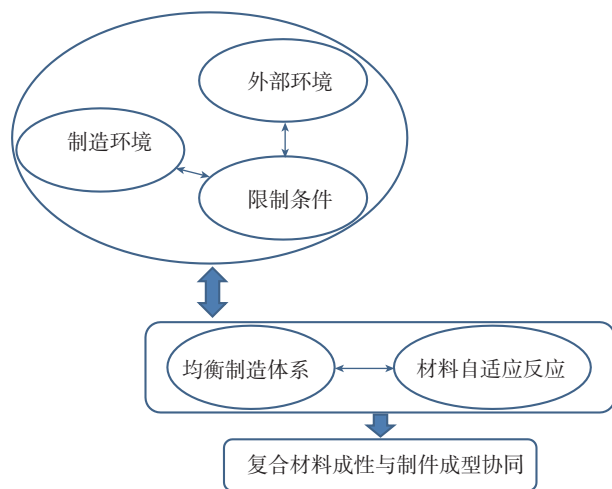


图5 均衡制造体系与材料自适应协同制造示意图

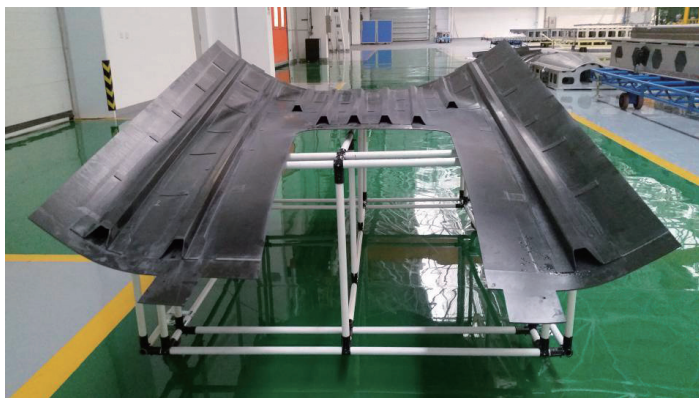


图6 均衡制造体系下制造的复合材料产品

(责编 谷雨)