

# U型复合材料结构件热压罐固化变形及补偿技术应用研究

刘望子,汪心文,管海新,李 萌,许 漂,陈正生  
(航空工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司,景德镇 333002)

[摘要] 以复合材料U型构件为研究对象,采用数值模拟的方法对U型件进行热压罐温度场的模拟,模拟出在不同时间段工装和工件的温度分布情况,模拟工件在工装传热和变形影响下的内部传热、固化度、最终变形情况和残余应力水平等。根据模拟结果,优化热压罐固化工艺参数,从而改善固化热变形问题,根据分析结果制定补偿方案并实施验证,同时优化工装结构形式,采用工装型面补偿技术对零件固化变形进行预补偿。结果表明,补偿后零件变形后的外形与理论几何外形相差1.37mm,验证了补偿技术的可行性。工装型面补偿技术可以有效提高复合材料结构件的制造精度。

关键词: 复合材料; 热压罐; 固化变形; 温度场分析

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.16.064



刘望子  
工程师,主要从事复合材料研究。

复合材料以其比强/刚度高、耐腐蚀、耐疲劳和可设计性强等优点迅速在直升机结构上得到大量应用,已由次承力结构发展到主承力

结构。目前,国外先进直升机上复合材料的用量已经达到机身结构重量的80%~90%,其相对于金属结构的重量优势也表现突出,与金属结构相比减重效益达到20%~25%,直接提高了直升机的装载能力、航程和舒适性<sup>[1-4]</sup>。

复合材料结构在应用过程中,受到设计结构和制造过程的影响,成型后的制件均存在不同程度的固化变形的缺陷,直接影响其在机身结构上的装配效果和使用寿命。零件固化变形严重会导致制造的反复,造成成本的增加和制造周期的延长。固化变形等缺陷的存在,直接影响了大型整体结构在直升机机身上的应用进程。因此,要实现大型整体结构的工程化应用,需要开展复合材料结构的精确制造技术研究,其中研究影响大型整体结构变形的工艺要素,探索复合材料整体结构的变形控制技术,是整体结构设计实施的技术关键。工艺仿真和虚拟

制造技术可以利用仿真的手段预测复合材料零件固化中产生的缺陷,从而优化制造工艺,避免或减少制造缺陷。工艺仿真技术的应用,对于改进传统的主要依赖经验的工艺设计方法,减少试验次数、加快工艺研制周期、降低成本意义重大<sup>[5-15]</sup>。

## 热压罐固化变形补偿技术方案

以复合材料典型U型结构对象开展热压罐温度场仿真及固化变形仿真研究分析。具体流程如图1所示。

### 1 热压罐内温度场分析

模拟热压罐内摆放工装工件情况下的内部流场及温度场分布,不考虑工装工件传热及工件固化,该阶段侧重考虑工装工件对内部流场的流阻,以便快速获取工装工件最佳摆放位置,并对工装支撑板等流道设计合理性提供评估。CFD-ACE+利

用热力耦合方法计算工装模具在罐内的表面换热、内部传热和热变形情况。通过工装模具内部的温度分布和变形情况,分析工件变形和残余应力水平。

## 2 工件固化变形模拟分析

将工件各节点的温度和材料物态信息作为输入条件提交给 PAM-DISTORTION,定义工件的约束信息,由 PAM-DISTORTION 软件对工件进行回弹变形分析,可得到工件最终的残余应力基于有限体积方法求解,结合能量方程及固化反应动力学方程进行树脂的热固化学反应计算,并考虑固化放出热量对构件周围温度场的干扰作用。

## 3 工装型面补偿技术

以典型复合材料零件固化参数为前提,模拟工装摆放条件下,分析热压罐温度场、工装的热分布以及热变形对工件变形的影响。需要以工装材料属性参数及工件材料的化学参数为基础,分析得到固化周期内工件不同位置处的固化度变化、温度变化以及固化后的变形情况<sup>[16]</sup>。基于有限元方法求解应力应变方程,得到构件的回弹变形量,考虑放热和温度场对构件变形的影响。根据固化仿真结果,测量零件固化后的外形与理论外形的差异,并与仿真结果对比,验证变形仿真结果的准确性。提出优化变形的工艺改进建议,并在修正仿真模型的基础上,完成第二轮仿真优化。这主要是建立在根据仿真结果修正工装模型外形的基础上,校正边界条件,再次进行固化变形的模拟仿真,以达到减小或消除变形的目的。

## 研究过程与结果讨论

### 1 复合材料零件热压罐固化温度场分析

以框架式成型工装结构和典型的 U 型碳纤维蒙皮零件为研究对象,工装结构如图 2 所示,研究热压罐成

型过程中复合材料零件、工装的传热过程。热压成型过程中,热压罐对零件传热的影响可等效为罐内环境温度的变化对复合材料零件传热的影响,在结构上忽略真空袋、吸胶材料和透气毡等辅助材料对复合材料零件的传热影响<sup>[17-22]</sup>。采用数值模拟的方法对典型件 U 型件进行温度场的模拟,模拟出在不同时间段工装和工件表面的温度分布情况,并在相同时间下,进行工装表面和工件表面的温度对比。

边界条件为:罐的进口边界为入口边界,速度为 4m/s,采用理想气体,按图 3 中固化曲线输入,粘性随温度变化;罐子的出口为压力出口边界;罐子的底部和工装工件表面

的边界为 wall 壁面边界,与制件实际固化时一致,加温固化曲线为入口处的加温曲线。将计算结果导入到后处理模块 CFD-View 中进行结果提取,获取热压罐内部的工装和工件周围的流线情况,得到工装截面速度矢量的分布,如图 4 所示。在升温过程中的不同时刻,工装、工件表面的温度分布云如图 5、6 所示。

由热压罐温度场的仿真计算结果可以得出:升温过程中,罐头的升温速率较快、温度较高,罐尾的温度较低,工装表面与工件表面的温度趋于一致,整个升温过程中最高与最低的温度差别为 1.1℃;降温过程中,罐头的降温速率较快,温度低于罐尾,工装表面与工件表面的温度趋于

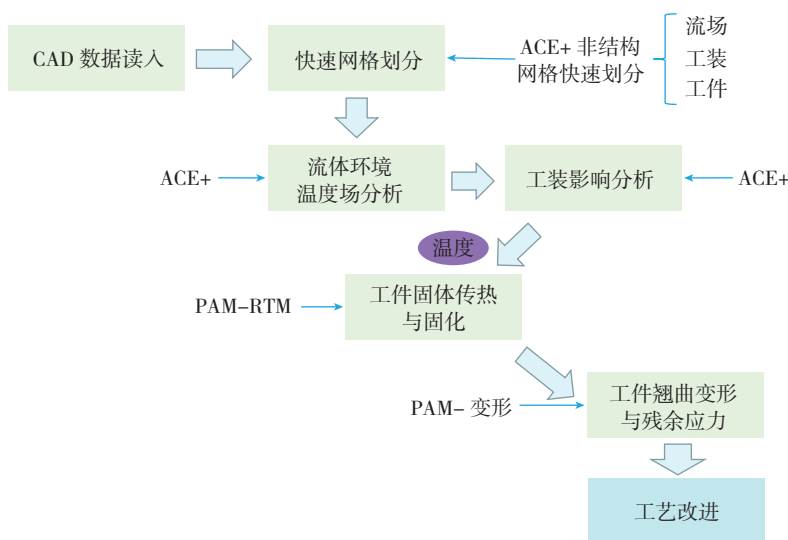


图1 热压罐固化仿真流程

Fig.1 Simulation of autoclave curing process

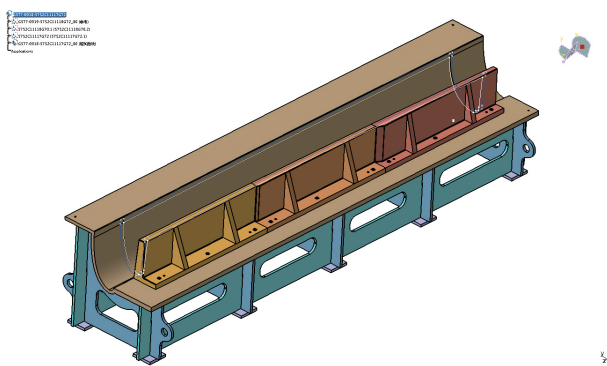


图2 U型蒙皮工装结构

Fig.2 Tool for type-U skin

一致,整个降温过程中最高与最低的温度差别为 1.3℃。

## 2 固化变形仿真

### 2.1 变形量计算前处理

通过 ESI 的前处理软件模块 Visual Mesh 将工件的数模进行相应的处理,并进行网格划分。

### 2.2 模型处理

对工件模型进行 3D 网格划分,工件厚度方向网格分为 9 层,每一层代表一层单层板,具体划分结果如图 7 所示。

### 2.3 材料参数

计算变形需要的材料参数包括:

3 个方向、2 种状态(橡胶态、玻璃态)的杨氏模量、剪切模量、泊松比、热膨胀系数、化学收缩系数等。将零件各部分的铺层信息进行定义,并将材料相应参数输入软件。U 型件铺层信息输入界面如图 8 所示。

### 2.4 边界条件

固化分析需输入温度边界条件(图 3),对工件所有表面进行温度加载,根据固化过程中工件表面的温度分布情况调整温度加载。U 型件在固化过程中各表面位置处的温度相差不大,因此直接对内外表面按照固化曲线进行温度加载,并以此作为工件温度的输入条件开展分析。

## 3 仿真结果分析

复合材料结构件固化变形原因主要有 3 类:热膨胀系数不一致导致零件变形、化学收缩导致变形、模具和零件相互作用导致零件最终变形。减小变形的的主要方法:一是优化固化工艺参数(例如升降温速率、保温时间等);二是通过调整模具型面补偿的方式来改善复合材料零件的变形<sup>[6,12-13]</sup>。分析得到不同时间段的温度结果云图,如图 9 所示。分析结果表明:升温初始阶段,由内外表面进行加温,初始时刻温度由表面传递至中间,内外表面温度比中间高(2200s);随着温度的升高,固化度增大,固化反应生成热导致中间的温度升高,中间温度比内外表面高(15500s)。

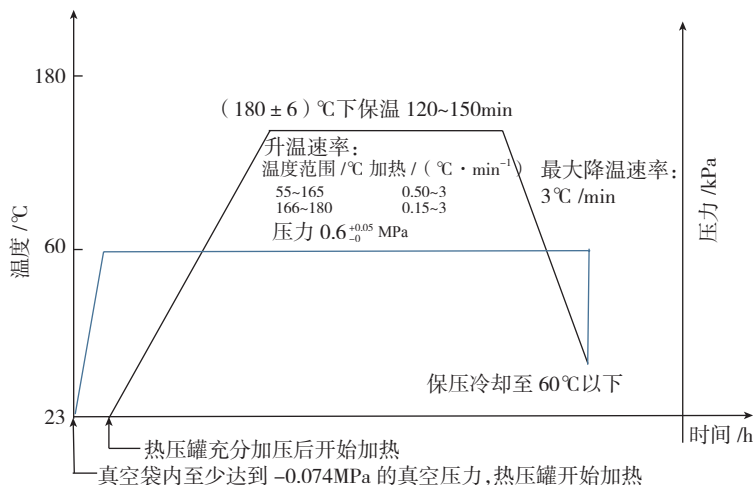


图3 固化参数  
Fig.3 Curing parameter

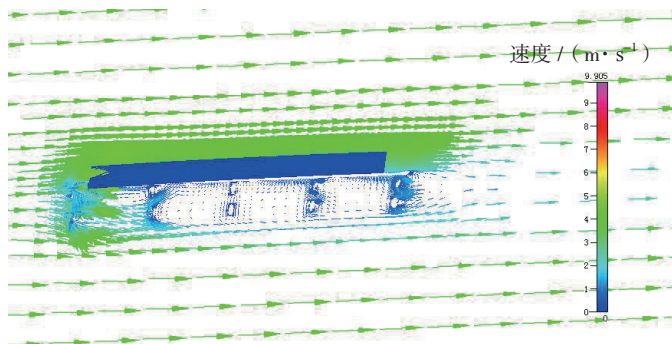


图4 工装截面速度矢量  
Fig.4 Velocity vector of tooling section

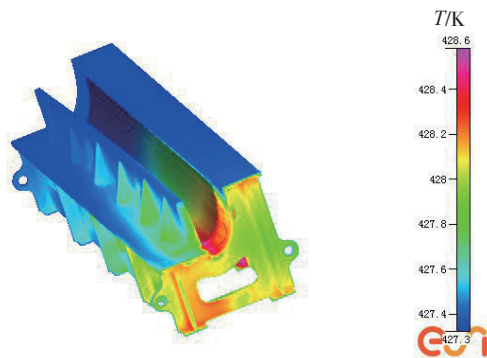


图5 某时刻工装温度分布  
Fig.5 Temperature distribution of tool at sometime

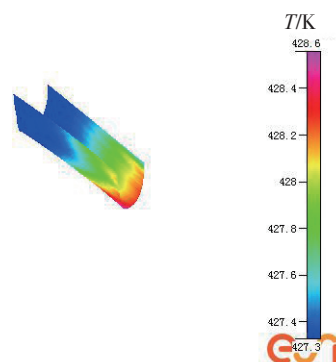
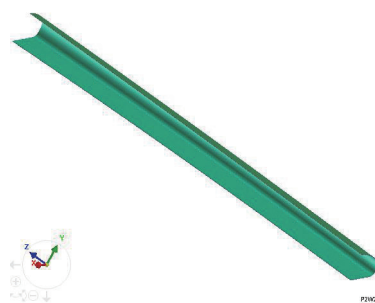
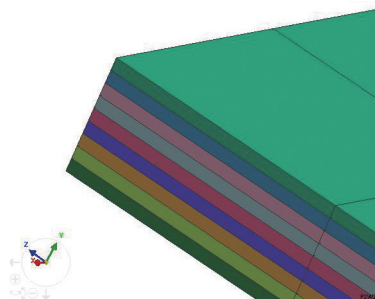


图6 某时刻工件温度分布  
Fig.6 Temperature distribution of part at sometime



(a) 3D 网格模型



(b) U 型件网格分层

图7 工件模型网格划分结果

Fig.7 Meshing of the part model

Layer ID	Ply ID	Layer Name	Par...	Thick	Angle	L
1	1	Layer_1	3	0.00025	0	
2	1	Layer_2	4	0.00025	45	
3	1	Layer_3	5	0.00025	0	
4	1	Layer_4	6	0.00025	-45	
5	1	Layer_5	7	0.00025	0	
6	1	Layer_6	8	0.00025	-45	
7	1	Layer_7	9	0.00025	0	
8	1	Layer_8	10	0.00025	45	
9	1	Layer_9	11	0.00025	0	

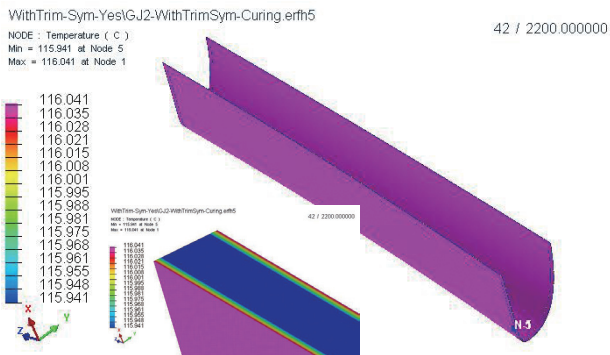
图8 铺层信息

Fig.8 Ply information

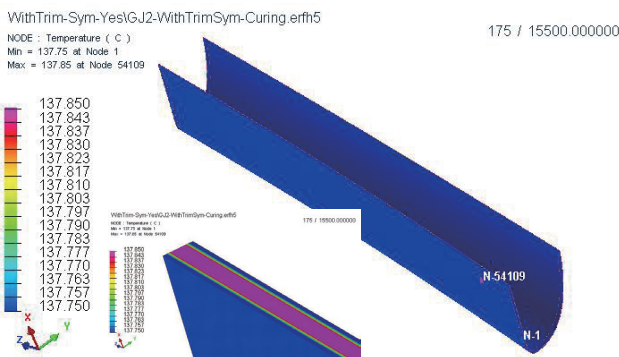
固化分析结果得到不同时间段的固化度结果云图,如图 10 所示。分析结果表明:升温初始阶段(2200s)时,内外表面温度比中间高,故而内外表面固化度比中间高;之后由于固化反应放热导致中间温度比内外表面高,故而中间固化度比内外表面高。

#### 4 固化参数优化

根据零件结构形式,基于温度场分析结果,U型件在固化过程中各表面位置处的温度相差不大,可根据零件结构形式对固化参数进行优化,优化前零件整个固化过程的升温速率为 2.3~2.5℃/min,降温速率为 3℃/min。主要是根据零件玻璃化转变温度( $T_g$  温度)来调节零件



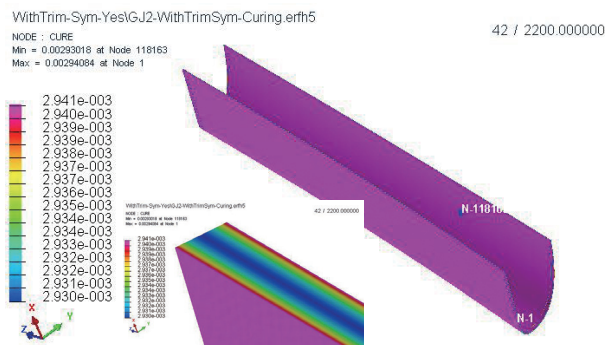
(a) 某时刻工件表面温度场



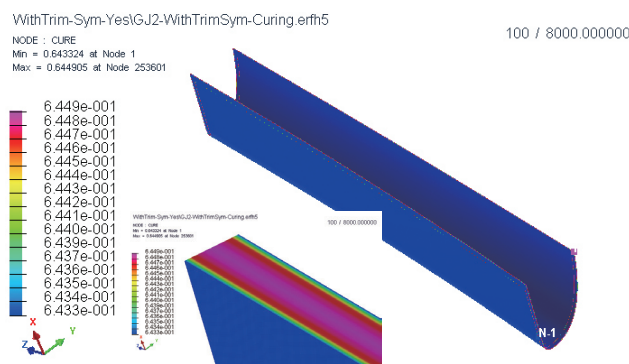
(b) 某时刻工件内部温度场

图9 不同时间段零件表面及内部温度场分布云图

Fig.9 Cloud chart of the part temperature distribution



(a) 某时刻工件表面固化度



(b) 某时刻工件内部固化度

图10 不同时间段零件表面及内部的固化度分布云图

Fig.10 Cloud chart of the part curing degree

升降温速率,升温速率在  $T_g$  前调整为  $0.5\sim 1.5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,在  $T_g$  至保温阶段前为  $2.0\sim 2.5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,降温速率调整为  $2.3\sim 2.7^\circ\text{C}/\text{min}$ 。在零件固化过程中让树脂充分流动,可提高零件表面质量。

本文 U 型件为环氧体系预浸料,优化前根据零件数模制造成型工装,由于热膨胀系数不一致,整个固化过程的升温速率为  $2.3\sim 2.5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,降温速率为  $3^\circ\text{C}/\text{min}$ ,固化后零件收口  $4\sim 5\text{mm}$ 。调整升温速率后零件收口缩小,收口  $2\sim 3\text{mm}$ ,贴模检测仍有间隙。

### 5 型面补偿技术结果分析

为验证模具型面补偿方法对于改进零件变形的作用,准确地指导工装模型的修正量,由于脱模后,会往内侧收缩,则修模方法为往相反方向偏移同样的距离。根据工件的初始几何形状(Intial Mesh)和工件变形后的形状(Deformed Mesh),应用 ESI 仿真平台二次开发的模面补偿工具 Solid Distortion Compensation,计算得到补偿后的工件形状(Compensated Mesh)。基于补偿后的网格,对工件进行新一轮的工艺变形分析。采用工装型面补偿技术,得到补偿后的型面,如图 11 所示。

基于 U 型零件温度场分析结果,采用型面补偿技术进一步优化,结合优化后的升温速率进行分析和改善,阴模成型零件收口,结合材料参数和温度边界条件的加载,利用型面补偿技术进行仿真分析。本文

U 型工装将根据零件数模修正,修正后的工装型面如图 10 所示,用修正后的工装进行固化。结果显示,变形后的外形与理论几何外形的差距为  $1.37\text{mm}$ ,仿真结果与实际工程验证的结果一致,在零件施加  $50\text{N}$  压力的情况下贴模,满足零件制造要求。

### 结论

(1) U 型件变形仿真温度场分析结果表明,工装表面与工件表面的温度趋于一致,整个降温过程中最高与最低的温度差别为  $1.3^\circ\text{C}$ 。基于温度场分析,利用型面补偿技术固化后的 U 型件产生向内的收口变形,变形量为  $1.37\text{mm}$  左右,仿真结果与实际工程验证的结果一致,有工程参考应用价值。

(2) 通过分析复合材料成型过程中固化变形量,采用型面补偿技术,对于推动复合材料精确制造具有指导性意义。

### 参考文献

[1] 汪萍. 复合材料在大型民用飞机中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2008(3):11-15,18.  
WANG Ping. Application of composite material in lager civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2008(3):11-15,18.  
[2] 蔡闻峰,周惠群,于凤丽. 树脂基碳纤维复合材料成型工艺现状及发展方向[J]. 航空制造技术, 2008(10):54-57.  
CAI Wenfeng, ZHOU Huiqun, YU Fengli. Current status and development trend of epoxy resin carbon fiber reinforced composites

forming process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(10):54-57.

[3] 张晓虎,孟宇,张炜. 碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J]. 纤维复合材料, 2004, 21(1):50-53,58.

ZHANG Xiaohu, MENG Yu, ZHANG Wei. Development and tendency of carbon fiber reinforced composite materials[J]. Fiber Composite, 2004, 21(1):50-53,58.

[4] 徐晶. 复合材料热固化变形与补偿技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.

XU Jing. Research on thermal curing deformation of composite and compensation technology[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.

[5] 陈晓静. 复合材料构件固化成型的变形预测与补偿[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

CHEN Xiaojing. Curing deformation prediction and compensation of composite material components[D]. NanJing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011.

[6] 傅承阳. 飞机复合材料制件热压罐成型温度场模拟与改善方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

FU Chengyang. The temperature filed simulation and improvement method of aircraft composite parts in autoclave process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013.

[7] 孙晶,李艳霞,顾轶卓. U型层压板热压罐成型温度场三维数值模拟[C]//第十六届全国复合材料学术会议,长沙,2010.

SUN Jing, LI Yanxia, GU Yizhuo. Three-dimensional numerical study on temperature field in U-shaped composite laminates during autoclave Process[C]//16th National Conference on Composite Materials, Changsha, 2010.

[8] 闫照明. 复合材料桁架结构热变形分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

YAN Zhaoming. Analysis of composite material truss structural thermal deformation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.

[9] 陈祥宝,邢丽英,周正刚. 树脂基复合材料制造过程温度变化模拟研究[J]. 航空材料学报, 2009(2): 61-65.

CEHN Xiangbao, XING Liying, ZHOU Zhenggang. Research on the temperature simulation of the resin composite manufacturing process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009(2):61-65.

[10] 王永贵,梁宪珠,曹正华. 热压罐

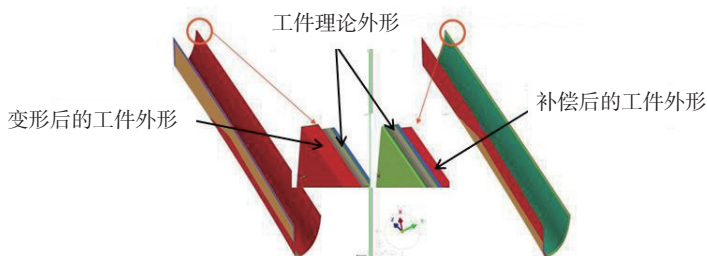


图11 型面补偿  
Fig.11 Profile compensation

工艺成型先进复合材料构件的温度场研究综述[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(3):81-85.

WANG Yonggui, LIANG Xianzhu, CAO Zhenghua. Research on autoclave process molding temperature field of advanced composite components[J]. Glass Fiber Reinforced Plastic/Composite Materials, 2009(3):81-85.

[11] 王永贵, 梁宪珠, 曹正华. 热压罐工艺的成型压力对框架式模具温度场的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(4):70-76.

WANG Yonggui, LIANG Xianzhu, CAO Zhenghua. Effect of autoclave process pressure on frame-type tool's molding temperature field of composite components[J]. Glass Fiber Reinforced Plastic/Composite Materials, 2009(4):70-76.

[12] 李桂东. 复合材料构件热压罐成形工装设计关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

LI Guidong. Research on key technologies for tool design of composite components undergoing autoclave processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010.

[13] 李德尚. 飞机复材零件热压罐成型复材工装设计技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

LI Deshang. Research on composite tool design of aircraft composite components undergoing autoclave processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010.

[14] 杨帆. 复合材料树脂固化过程的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

YANG Fan. The numerical simulation of composite resin curing process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[15] 李君, 姚学锋, 刘应华. 复合材料固化过程中温度及应变场分布的解析[J]. 清华大学学报, 2009, 49(5): 126-130.

LI Jun, YAO Xuefeng, LIU Yinghua. Analysis on the distribution of temperature during the curing process of composite material components[J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(5):126-130.

[16] 李盼. 纤维/树脂复合材料的模内热固化成型及脱模变形的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.

LI Pan. Research on heat curing in molds and demoulding deformation of fiber/resin composites[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.

[17] 王翔. 热压罐工艺仿真技术[J]. 航空制造技术, 2011(20):105-108.

WANG Yuan. Simulation technology of autoclave process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(20):105-108.

[18] 张纪奎, 郇正能, 关志东. 热固性树脂基复合材料固化变形影响因素分析[J]. 复合材料学报, 2009, 26(1):179-184.

ZHANG Jikui, LI Zhengneng, GUAN Zhidong. Analysis on the influence factors of the thermosetting resin composite curing process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009,

26(1):179-184.

[19] 杨正林, 陈浩然. 层合板在固化过程中瞬态温度场及固化度的有限元分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 1997(3):3-7.

YANG Zhenglin, CHEN Haoran. Analysis on the transient temperature and curing degree of the finite element of laminated composite material[J]. Glass Fiber Reinforced Plastic/Composite Materials, 1997(3):3-7.

[20] 关喆. 基于实例的树脂基复合材料构件设计与仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

GUAN Zhe. Design and simulation analysis of resin matrix composites component based on case[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[21] 卢兴国. 基于实例的复合材料热压罐成型工艺设计与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

LU Xingguo. Design and simulation of composite autoclave process based on case[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[22] 沃西源. 复合材料成型工艺中辅助材料的应用[J]. 航天返回与遥感, 1996(2):100-101.

WO Xiyuan. Composites molding process in the application of auxiliary materials[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1996(2):100-101.

通讯作者: 刘望子, E-mail: wangziliu\_87@163.com。

## Study on the Cure-Induced Deformation and Application of Compensation Technology of U Shaped Composite Structure in Autoclave Process

LIU Wangzi, WANG Xinwen, GUAN Haixin, LI Meng, XU Piao, CHEN Zhengsheng  
(AVIC Changhe Aircraft Industry (Group) Corporation LTD., Jingdezhen 333002, China)

**[ABSTRACT]** The U shaped structure of composite material was studied. Simulation technology was used for the temperature distribution of typical U shape part in autoclave toolings, and the temperature distribution of the tool and part in different periods. Under the influence of the heat transmission and distortion of tool, internal heat transmission, curing degree, ultimately distortion and residual stress of composite part were simulated. According to the results of the simulation, we optimize the structure of tool as well as the curing parameter, establish the compensating scheme for tool, thereby improving issues of part, including the solidification and thermal deformation. Based on analysis results, the compensating scheme had been established and validated. Result shows that the deformation between compensation and the theory shape is 1.37mm. The feasibility of compensation is verified. Profile compensation can be used for improving the manufacturing precision of composite component.

**Keywords:** Composite material; Autoclave; Curing deformation; Temperature distribution

(责编 逸飞)