

大型复合材料成型 工装热 - 结构耦合变形分析*

Thermal-Structure Coupling Deformation Analysis of Large Composites Forming Mold

西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室 吴建军 郭 军



吴建军

西北工业大学航空宇航制造工程系主任、教授、博士生导师,主要研究方向为塑性成形理论及计算机辅助塑性成形等。主持国家自然科学基金、国家“863”计划项目、航空科学基金、国防基础研究基金以及留学回国人员基金等科研项目近 30 余项。在国内外刊物发表论文 90 余篇, EI/SCI 收录 30 篇,出版专著 2 部。

热压罐成型工艺是目前广泛应用于先进复合材料结构、蜂窝夹层结构及复合材料胶接结构的主要成型方法。在成型过程中,复合材料制件是在高温高压下与工装一起放进热压罐中固化成型,制件固化成型后几

本文以柱支撑形式建立大型复合材料固化工装模型,在保证工装结构静力刚度的前提下,计算得到工装在热压罐固化工艺过程中的温度场分布,然后把重力载荷施加到带有温度值的有限元模型上进行工装的热 - 结构耦合分析。

乎不再做任何加工,外表尺寸应满足装配协调要求,不允许强迫装配。然而,工装在整个成型过程中因承受高温热载荷、自身重力及成型辅助件压力的共同作用而发生变形,工装的变形直接影响到制件固化变形而最终影响到复合材料制件的实际形状和尺寸精度。

针对目前较为常用的热压罐成型工装,国内外对热压罐成型工艺参数和工装结构因素对工装温度场均匀性的影响进行了研究^[1-3],并研究了固化工装变形对复合材料内部残余应力的影响^[4-6]。岳广全等^[7]针对当前应用较多的框架式工装在工艺过程中的变形进行了研究。

本文以柱支撑形式建立大型复合材料固化工装模型,在保证支撑形式满足工装静力刚度的前提下,研究其在热压罐成型过程中热 - 结构耦合作用下的结构变形。

柱支撑形式固化工装

对大型复合材料固化工装,工装模具的型面需要根据固化成型后的复合材料曲面进行调整,复合材料成型的多样性势必增加工装制作的经济成本和制作周期。针对此问题,对以柱支撑为支撑形式的工装,支撑部分与工装模具的接触面积小,工装模具型面改变后,支撑柱的生产加工简单易行;此外,工装内部结构简单,利于热空气的流通,可以提高工装和热空气之间的传热效率。

为方便后续研究,对柱支撑形式的工装,以结构相对简单的平板型面工装为例(见图 1),分析工装在复合材料固化成型过程的变形情况。图 1 中工装的型面厚度为 20mm,模型尺寸为 15000mm × 5000mm × 1000mm,支撑柱截面设为正方形,尺寸为 100mm × 100mm。模具材料为殷

* 国家 863 基金项目(2008AA04Z120)资助。

钢, 密度 $\rho=7900\text{kg/m}^3$, 弹性模量 $E=214\text{GPa}$, 泊松比 $\nu=0.3$, 线膨胀系数 $\alpha=1.7 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。

对工装进行静力分析, 可通过调节支撑柱数量来控制工装型面变形量大小。为了比较静力作用下的变形量和热-结构耦合作用下的变形量, 使用 70 个支撑柱。对图 1 中工装进行静力分析(见图 2), 工装总变形量为 $0\sim 0.00635\text{mm}$, 垂直型面方向变形量为 $0\sim 0.00627\text{mm}$; 静力作用下, 70 个支撑柱的工装结构变形量微小, 说明以支撑柱为支撑形式的工装完全可以满足静力作用下的刚度

要求。

成型工装热-结构耦合分析

由经验和工艺试验可知工装的变形均在毫米量级, 工装的尺寸在几米至十几米, 工装结构变形不会对热压罐内的气体流动产生明显影响。由于流体计算对网格要求较高, 文中使用专业流体仿真软件 FLUENT 进行工装及热压罐内整个流场的网格划分, 如图 3 所示。对工装建立的有限元模型既可以适用于温度场的计算, 也可以用于工装的结构变形计算。热压罐工艺规范简化如图 4 所示, 温度场计算所用相关材料参数如表 1 所示。

对复合材料固化工装而言, 工装型面的变形将直接影响与其接触的复合材料制件的成型质量, 垂直型面方

向的翘曲变形将直接影响到大尺寸复合材料成型的曲率精度, 所以型面变形场的表征方法应该与型面的变形直接相关。为对成型工装的型面变形量进行表征, 所用支撑柱如图 5 所示。

图 1 所示工装中, 其型面存在众多可用于表征型面变形量的位置, 为方便解释问题, 以支撑柱坐标所对应的型面位置的变形量来表征型面变形。鉴于模型所用支撑柱数量较多且考虑到模型结构的对称性, 选取代表性的支撑柱坐标: U_1V_1 、 U_7V_1 、 $U_{14}V_1$ 、 U_1V_3 、 U_7V_3 、 $U_{14}V_3$ 、 U_1V_5 、 U_7V_5 、 $U_{14}V_5$ 、 U_3V_1 、 U_3V_3 和 U_3V_5 , 共 12 个坐标位置。对流体仿真在整个热历程中计算得到的工装温度场, 每隔 100s 存储一个温度场数据文件; 将包含节点温度值的有限元模型导入有限元分析软件 ANSYS, 同时施加重力载荷, 计算得到对应时刻热-结构耦合作用下工装的结构变形量。

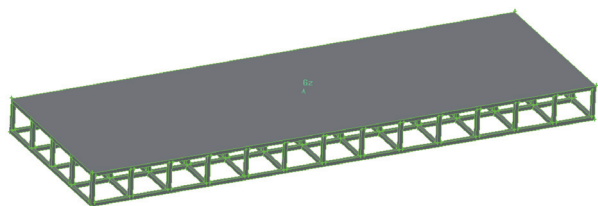


图1 平板型面工装模型

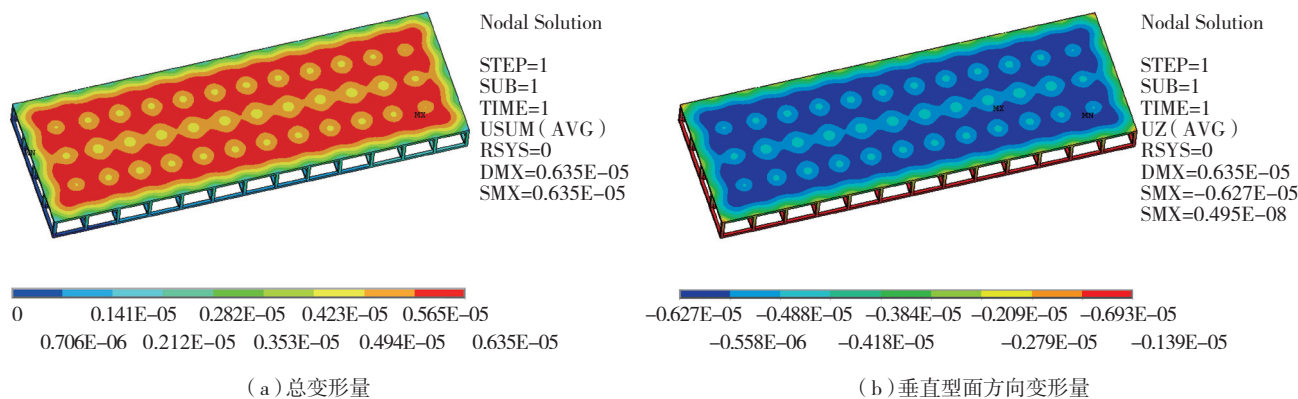


图2 静力下工装结构变形量云图

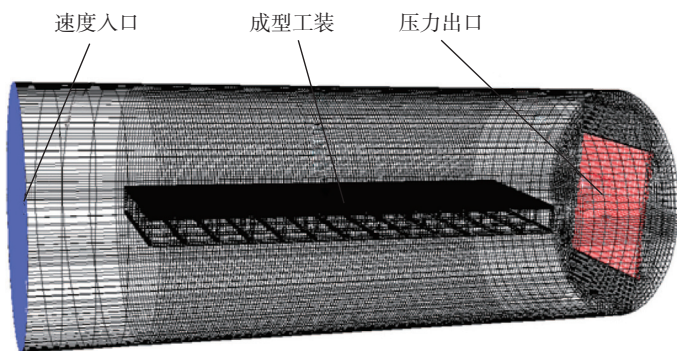


图3 计算域整体网格及边界条件

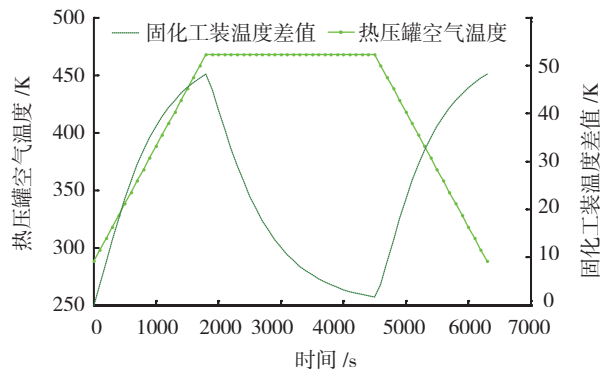


图4 固化工装整体温度场差值曲线

表1 流体与工装的材料参数

| | 密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 比热 / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 热传导系数 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 粘性系数 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|----|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 空气 | 1.225 | 1006.43 | 0.0242 | 1.7894e-05 |
| 殷钢 | 7900 | 502.48 | 52 | |

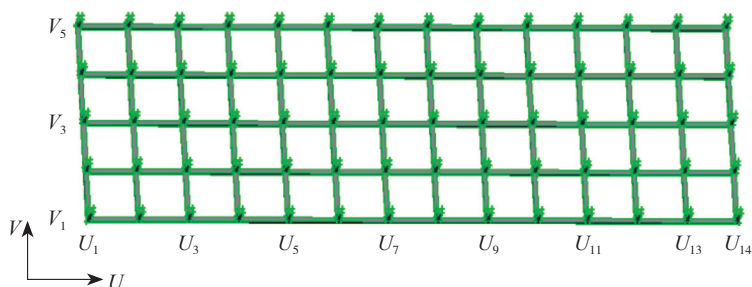


图5 支撑柱坐标形式示意图

计算结果分析

复合材料在热压罐中固化分为3个热历程:升温、恒温和降温,此过程中工装温度场分布的不均匀性导致各部分热应力分布不均匀,工装在热应力和自重载荷耦合作用下产生变形。热历程中工装变形量最大分布如图6所示,从图中可得出:

(1)整个热历程中,工装总变形量最大值达4.662mm。

(2)工装沿自身长度方向变形量最大值为4.596mm,与总变形量最大值较为接近。

(3)工装沿自身宽度方向和高度方向的变形量最大值分别为0.805mm和0.339mm,其变形量相对于工装长度方向变形量较小。

热应力不均匀导致的变形量最大值为静力载荷导致工装变形量的53~734倍,这说明在复合材料固化成型过程中,热应力载荷对工装结构变形起着决定性作用。

图6反映出工装总变形量最大值随时间的变化,不能得出热应力不均匀导致的型面翘曲对型面的影响。对工装型面翘曲的表征从沿工装长度方向(图5中U方向)和沿工装宽度方向(图5中V方向)这两个方面来阐述:沿工装长度方向的翘曲,采用 V_1 上的 U_1V_1 、 U_7V_1 、 $U_{14}V_1$,

V_3 上的 U_1V_3 、 U_7V_3 、 $U_{14}V_3$ 和 V_5 上的 U_1V_5 、 U_7V_5 、 $U_{14}V_5$ 位置作为监测点;沿工装宽度方向的翘曲,采用 U_3 上的 U_3V_1 、 U_3V_3 、 U_3V_5 , U_7 上的 U_7V_1 、 U_7V_3 、 U_7V_5 和 U_{14} 上的 $U_{14}V_1$ 、 $U_{14}V_3$ 、 $U_{14}V_5$ 位置作为监测点。由图7得知:

(1)沿 V_3 方向,其中间位置、迎风端及背风端位置由于均受到加热而使Z向变形量在热历程升温阶段逐渐增大;进入恒温阶段后,中间位置处Z向变形量基本趋于平稳,迎风端和背风端由于与环境热空气的温差不一致导致升温幅度不同,各自的Z向变形量不同;降温阶段,其变形量趋势基本与升温阶段相反。

(2)沿 V_1 和 V_5 方向,迎风端位置Z向变形量在热历程中先是低于后又高于中间位置和背风端位置的Z向变形量。

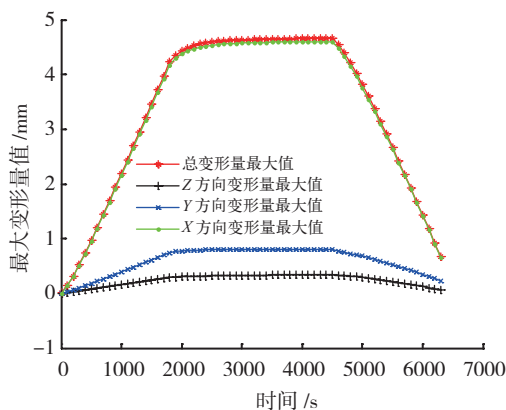


图6 工装变形量最大值随时间分布曲线

(3)迎风端位置相对于中间位置的Z向变形量先是低于后又高于背风端位置相对于中间位置的Z向变形量。这是因为迎风端虽然首先与环境空气相接处,但工装内部的支撑柱在空气流经工装内部时对其形成扰流作用,使工装内局部空气流动速度明显大于工装外部,中间位置的支撑柱与空气换热速率增大。

(4) V_3 方向,内部支撑柱的扰流作用使背风端位置相对于中间位置的Z向变形量先急剧增大后趋于平稳,然后迅速下降; V_1 和 V_5 方向,其处于工装外围与工装外部流动空气直接接触,背风端位置相对于中间位置的Z向变形量在整个热历程中变化较平缓。

另外,研究表明:

(1)沿工装宽度方向,翘曲变形基本处于对称状态。

(2)在 U_7 方向上,两端位置相对中间位置的Z向变形量在升温阶段急剧增大,在恒温阶段达到最大值并缓慢下降,进入降温阶段后急剧减小。

(3)在 U_3 和 U_{14} 方向上,监测位置处的Z向变形量曲线在热历程中基本保持一致;因为工装宽度方向尺寸相对较小,在热历程不同阶段,空气流态在宽度方向上对温度场差值影响较小。

(4)在 U_3 和 U_{14} 方向上,两端位置相对中间位置的Z向变形量在升温阶段急剧增大,进入恒温阶段后迅速下降;在恒温阶段后期出现缓慢变化,进入降温阶段又迅速下降。

在复合材料的热压罐固化过程中,对柱支撑形式的固化工装型面,温度不均匀性导致的型面翘曲变形较为复杂。在工装结构内部,支撑柱存在位置所对应型面的局部变形量大于没有支撑柱存在的位置,这是因为支撑柱对空气的

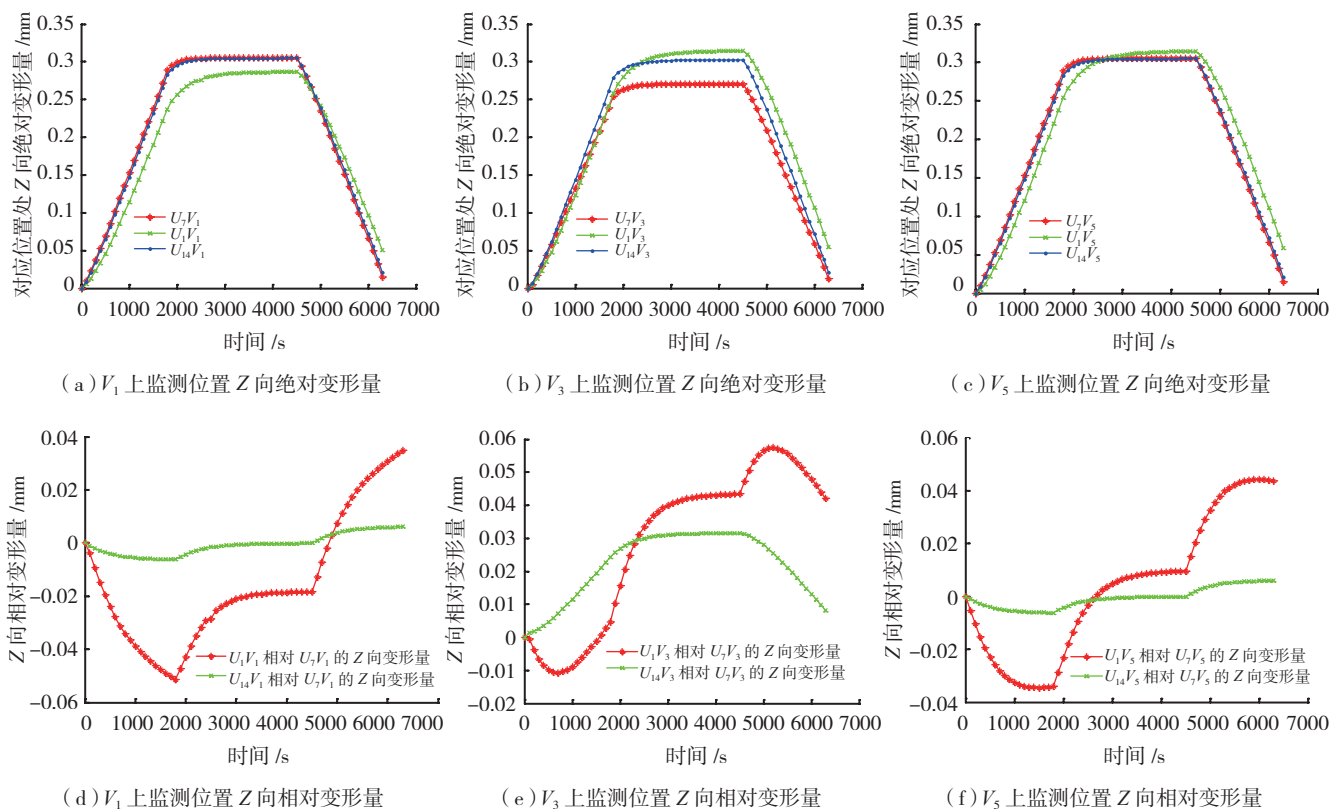


图7 相关监测点沿Z向变形量随时间的变化曲线

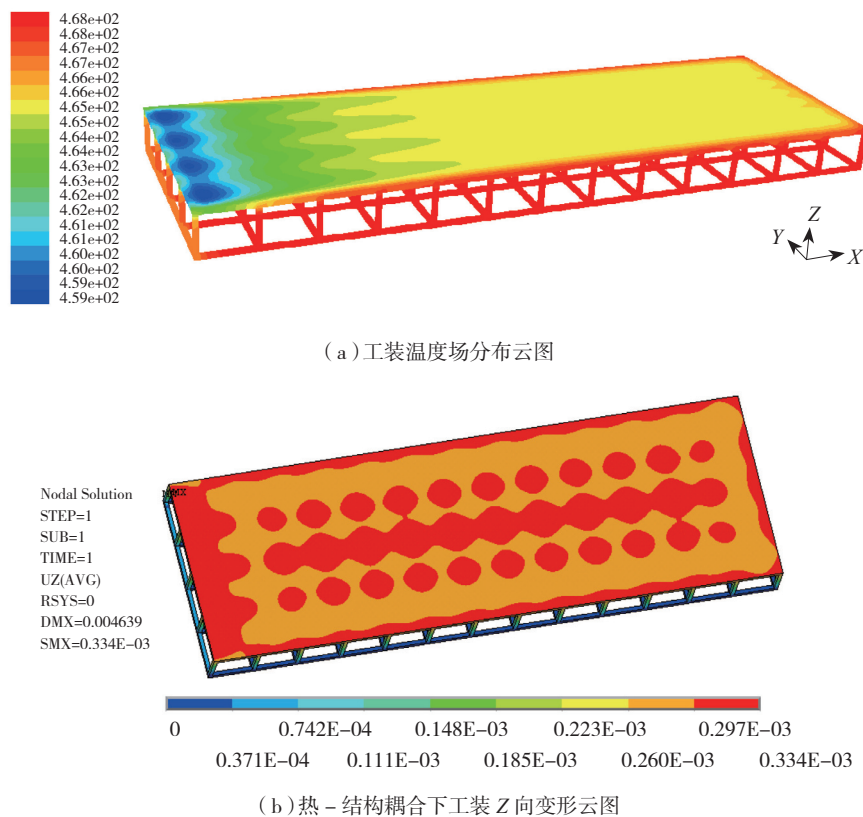


图8 3200s时工装温度场及热-结构耦合下Z向变形量分布云图

扰流作用加快了支撑柱与周围空气之间的热传递。图8为3200s时工装温度场及Z向结构变形量分布云图。

结束语

本文以柱支撑形式建立大型复合材料固化工装模型,在保证工装结构静力刚度的前提下,计算得到工装在热压罐固化工艺过程中的温度场分布,然后把重力载荷,施加到带有温度值的有限元模型上进行工装的热-结构耦合分析。得到结论如下:

(1) 成型工装在热-结构耦合作用下,相对于重力载荷热应力载荷对工装结构变形起决定性作用。

(2) 对工装型面在垂直型面方向的变形量,有支撑柱存在的位置大于无支撑柱存在的位置。

本文共有参考文献7篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 良辰)