

截面形式对复合材料杆件固化变形的影响

董丰路 陈维强 周 宓 黎 昱 朱大雷

(北京卫星制造厂有限公司,北京,100094)

摘要: 热固性复合材料构件应用广泛,但在加热固化成型过程中易产生变形。通过优化铺层设计,可以减小碳纤维增强环氧树脂细长杆件固化过程的变形,但是忽略了截面形式对固化变形的影响程度。本文提出在复合材料大长径比构件设计时应采用有限元分析(Finite element analysis, FEA)方法进行热变形分析,充分考虑截面对称性对产品固化变形的影响,有效降低该类产品固化过程中的变形。

关键词: 热固性复合材料;截面形式;固化变形;杆件;有限元分析(FEA)

中图分类号:V461 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2019)S-0018-04

Effect of Section on Process-Induced Deformation for Composite Pipe

DONG Fenglu, CHEN Weiqiang, ZHOU Mi, LI Yu, ZHU Dalei

(Beijing Spacecrafts Manufactory, Beijing, 100094, China)

Abstract: Thermoset resin has a wide range of applications in composites structures. Meanwhile, the deformation during the heat curing process brings high trouble to structural profile accuracy. In order to control the deformation of carbon fiber reinforced resin composites during curing process, the layup design is optimized to improve the structural strength and stiffness. Whereas the process-induced deformation caused by section has more effects on the aerospace CFRP pipe. In this paper, the finite element analysis(FEA) is used to for thermal deformation analysis of large aspect ratio composite components. The effect of cross-section symmetry on the curing deformation of products should be fully considered to effectively reduce the deformation in the curing process of such products.

Key words: thermoset composite; section; process-induced deformation; pipe; finite element analysis(FEA)

树脂基复合材料结构件在经历高温固化成型过程中由于材料本身的各向异性、不同取向铺层间收缩特性和刚度特性的差异,结构内部将不可避免的产生残余应力,残余应力的存在可能会导致复合材料结构在脱模后产生固化变形,复合材料结构件是否产生变形与其结构形式存在很大关系。由于基体树脂的粘弹性特点,复合材料结构内的固化残余应力会随着时间的推移而变化^[1],截面完全对称的复合材料结构件的固化后残余应力最终能够达到自身的内在稳定,而截面非完全对称的复合材料结构件则会由于内部残余应力的存在导致结构本

身的变形。特别是对于长径比较大的复合材料杆件结构,固化残余应力导致的结构变形会异常明显。

目前复合材料杆件结构常用于卫星高精度天线支撑结构、高分辨率相机的桁架结构等,这些结构具有非常高的尺寸稳定性要求,先进碳纤维复合材料通过合理的铺层设计可以达到几乎为零的热膨胀系数,能够满足高尺寸稳定要求,成为精确通讯、全天候准确成像领域的优先选择^[2-3]。碳纤维复合材料具有良好的可设计性,但应该注意的是结构的不对称性会增大碳纤维复合材料的铺层设计

收稿日期:2019-04-09;修订日期:2019-06-20

通信作者:董丰路,男,高级工程师,E-mail:279928573@qq.com。

引用格式:董丰路,陈维强,周宓,等. 截面形式对复合材料杆件固化变形的影响[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(增刊):18-21. DONG Fenglu, CHEN Weiqiang, ZHOU Mi, et al. Effect of Section on Process-Induced Deformation for Composite Pipe[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S):18-21.

的难度,因此在复合材料结构设计时,应从结构形式和铺层方向两个方面进行优化,来降低碳纤维树脂基复合材料的固化变形。本文针对一种横截面不完全对称的大长径比碳纤维复合材料杆件通过有限元方法分析复合材料杆件固化过程中的热载荷变形情况,分析结构形式对该结构件固化变形的影响。在分析时,以固化中高温一低温过程中温度变化为温度载荷,计算不同构型下构件的热变形。针对该复合材料杆件通过构型优化,得到理论上变形最小的结构形式,并通过具体样件制备验证分析结果。

1 热分析原理和实现方法

1.1 热分析基本方程^[4]

根据经典层合板理论,无约束层合板在温度变化时的热膨胀应变 ϵ^T 表示如下

$$\epsilon^T = A^{-1} N^T \quad (1)$$

式中: A^{-1} 为扩展刚度矩阵 A 的逆阵, N^T 为温度应力向量。矩阵 A 为

$$A = t \sum_{k=1}^n [T_\epsilon]_k^T Q [T_\epsilon]_k \quad (2)$$

式中: $[T_\epsilon]_k$ 为应变坐标转换矩阵,表达式为

$$[T_\epsilon]_k = [T_\epsilon(\theta_k)] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_k & \sin^2 \theta_k & \sin \theta_k \cos \theta_k \\ \sin^2 \theta_k & \cos^2 \theta_k & -\sin \theta_k \cos \theta_k \\ -2 \sin \theta_k \cos \theta_k & 2 \sin \theta_k \cos \theta_k & \cos \theta_k - \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: θ_k 为第 k 层的纤维方向。

缩减刚度矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\epsilon_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}\epsilon_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}\epsilon_1}{1 - \nu_{12}} & \frac{\epsilon_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\epsilon_1, \epsilon_2, G_{12}, \nu_{12}$ 和 ν_{21} 为复合材料的弹性常量。温度应力向量为

$$N^T = t \sum_{k=1}^n [T_\epsilon]_k^T Q \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T \quad (5)$$

式中: t 为单层厚度; α_1 和 α_2 分别为纤维方向以及垂直纤维方向的热膨胀系数; ΔT 为温度变化差值。对于温度变化 ΔT ,层合板的热应变可以表示为

$$\epsilon^T = \bar{\alpha} \Delta T \begin{Bmatrix} \bar{\alpha}_x \\ \bar{\alpha}_y \\ \bar{\alpha}_{xy} \end{Bmatrix} \Delta T \quad (6)$$

式中: $\bar{\alpha}$ 为层合板的热膨胀系数向量,由方程(1,6)可以得到层合板的热膨胀系数为

$$\bar{\alpha} = t A^{-1} \sum_{k=1}^n [T_\epsilon]_k^T Q \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T \quad (7)$$

1.2 实现方法

本文使用有限元分析软件,通过建立几何模型,确定单元类型、划分网格、赋予材料属性和铺层方向、约束边界条件、最后进行热载荷加载的过程完成计算分析。

2 产品优化过程

2.1 产品介绍

为了满足功能需求,产品最初整体结构形式为三腔细长管状结构,材料为T700碳纤维增强树脂基复合材料,总长为4 000 mm,长径比约为130:1,直线度要求0.5 mm,外表面为光滑配合面。产品结构形式如图1所示。产品主体壁厚为1.0 mm,产品铺层根据承载载荷的均匀性要求,设计为准各向同性的对称铺层,竖杆滑轨主体铺层角度 $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]$, 0° 方向沿产品长度方向。

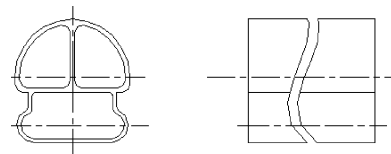


图1 产品的结构形式

Fig. 1 Structure of the product

采用有限元分析软件进行计算,有限元几何模型如图2所示,模型长度为4 000 mm。网格模型如图3所示,采用壳单元赋予材料属性。产品在固化过程中是先升温后降温的过程:在升温过程中,由于有模具的限制作用,产品同预先设计的相一致;而在脱模后,由于没有模具的约束,产品会发生变形,在有限元模型中产品固化过程实际上是一个无约束降温过程。因而,在有限元模型中,施加的温度载荷为 -165°C ,计算结果中产品的变形如图4所示。

从计算结果中可以看出,产品存在明显弯曲变形,变形量为4.024 mm。



图2 产品的有限元几何模型

Fig. 2 Finite element geometry model of the product

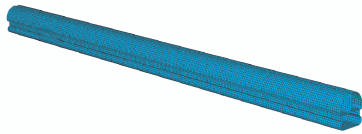


图3 产品的有限元网格模型

Fig. 3 Finite element gridding model of the product

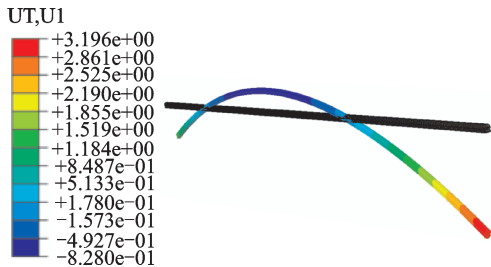


图4 计算结果中产品的变形

Fig. 4 Theoretical transmutative result of the product

2.2 构型改进

从竖杆滑轨结构图可以看出,该产品左右对称,但上下不对称。拟采用3种方案进行改进。方案1为将垂直方向的加强筋延伸到产品底面,增加产品下半部分的刚性,方案1的产品截面形式如图5所示。

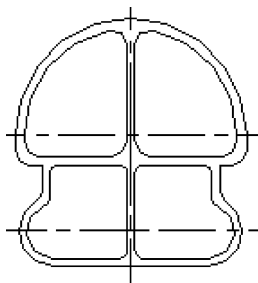


图5 方案1结构形式

Fig. 5 Structure of Project 1

方案2为将现有垂直方向的加强筋转移到产品下半部分,增加产品下半部分的刚性,减小上半部分刚性,方案2的产品截面形式如图6所示。

方案3为将垂直方向的加强筋去除,使产品上下部分的刚性匹配,方案3的产品截面形式如图7所示。

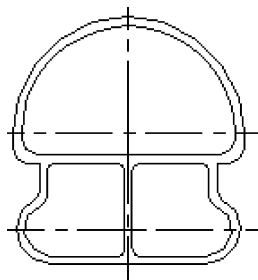


图6 方案2结构形式

Fig. 6 Structure of Project 2

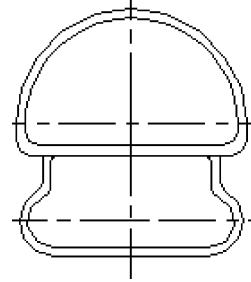


图7 方案3结构形式

Fig. 7 Structure of Project 3

针对改进后的3种构型,采用有限元分析软件进行计算,网格模型划分、壳单元材料属性和施加的温度载荷同原始模型保持一致。3种构型计算分析后的变形如图8—10所示。

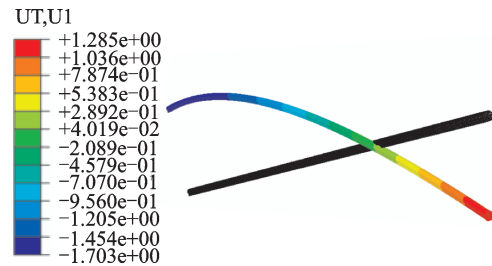


图8 方案1变形云图

Fig. 8 Transmutative nephogram of Project 1

从计算结果中可以看出,产品存在明显弯曲变形,变形趋势与最初构型保持一致,变形量为2.988 mm。

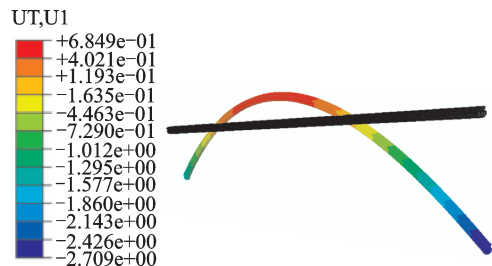


图9 方案2变形云图

Fig. 9 Transmutative nephogram of Project 2

从计算结果中可以看出,产品存在明显弯曲变形,变形趋势与最初构型方向相反,变形量为3.394 mm。

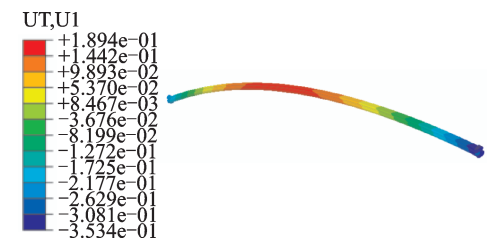


图10 方案3变形云图

Fig. 10 Transmutative nephogram of Project 3

从计算结果中可以看出,产品弯曲变形较小,变形趋势与最初构型方向相反,变形量为0.543 mm。

2.3 试件验证

针对产品的精度及使用要求,对产品最初的构型进行试样制备,制备工艺采用内膨胀加压、阴模定型成型方法。产品固化成型后存在整体向上弯曲变形现象,变形最高点靠近长度方向中间位置,中间位置左右两侧变形基本对称,变形示意如图11所示。

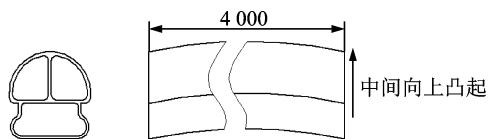


图11 原始构型试件变形示意图

Fig. 11 Transmutative sketch map of original form

从试验结果可以得出,试验件变形出现在上下方向,而左右方向未出现挠性变形,4 000 mm长坯件直线度测量结果为4.5 mm,变形测量结果与计算结果趋势一致,数值相近。

从改进构型的热变形分析结果可以看出方案3的改进效果最明显,因此选取方案3的构型制备试验件进行验证。方案3试验件制备过程的铺层方向、加压定型方式以及固化制度均与原始构型保持一致。产品固化成型后存在两端向上翘曲变形现象,变形示意如图12所示。

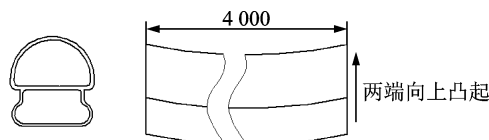


图12 方案3构型试件变形示意图

Fig. 12 Transmutative sketch map of Project 3

从试验结果可以得出,试验件变形出现在上下方向,而左右方向未出现挠性变形,4 000 mm长坯件直线度测量结果为0.7 mm,变形测量结果与计算结果趋势一致,数值相近。

3 结 论

通过对大长径比复合材料杆件截面形式对固化变形影响的研究,得出以下结论:

(1)大长径比纤维增强复合材料杆件结构对称性对产品后续固化过程产生的热应力变形具有较大的影响,因此在类似纤维增强复合材料结构件设计时应充分考虑结构的对称性。

(2)本文尝试针对原始构型在铺层角度方面进行优化,计算分析结果表明,铺层角度对特定构型的纤维增强复合材料构件固化变形的影响较小。

(3)纤维增强复合材料构件具有良好的可设计性,其可设计性应包含铺层设计和结构对称性设计,两者缺一不可。

(4)纤维增强复合材料构件设计过程,除进行必要的力学性能分析,还需进行热变形分析。从本文的试验结果可以得出,热变形分析能够较可靠的反映出复合材料构件的固化变形趋势。

参考文献:

- [1] 戴棣, 乔新. 粘弹性基体复合材料层合板的固化残余应力和曲率变化[J]. 复合材料学报, 2000, 17(3): 39-41.
DAI Di, QIAO Xin. Variation of cure residual stress and curvature of resin matrix composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(3): 39-41.
- [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.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [3] 吴良义. 航空航天先进复合材料现状[C]// 第十三次全国环氧树脂应用技术学术交流会. 南京: 中国环氧树脂应用技术学会, 2009: 117-132.
- [4] 曹俊, 朱如鹏. 层合板热膨胀系数优化设计的遗传算法实现[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003(2): 33-35.
CAO Jun, ZHU Rupeng. Optimization design of thermal expansion coefficient of laminates using genetic algorithms [J]. Fiber Reinforced Plastic/Composites, 2003(2): 33-35.

(编辑: 孙静)