

大尺寸翼类蒙皮固化模拟与变形预报

张联合* 任浩 程亚男 肖鹏 张亚东

中车青岛四方机车车辆股份有限公司

DOI:10.12238/acair.v2i4.10293

[摘要] 为了方便工程上的应用,本文提出了简化的薄壁大尺寸中央翼蒙皮固化过程模拟预报模型。对热固性碳纤维复合材料预浸料蒙皮结构进行了数值分析。文中详细讨论了在模具影响下中央翼蒙皮的固化变形。将预测结果应用在模具型面补偿设计上,用以提高产品成型质量。该研究为提高薄壁大尺寸中央翼蒙皮的成型质量以及生产中模具设计和优化提供了理论依据与分析方法。

[关键词] 固化模拟; 翼蒙皮固化变形预报

中图分类号: TL941+.33 **文献标识码:** A

Simulation and deformation prediction of large-sized wing skin solidification

Lianhe Zhang* Hao Ren Ya'nan Cheng Peng Xiao Yadong Zhang

CRRC Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd.

[Abstract] In order to facilitate the engineering application, a simplified simulated prediction model for the curing process of thin-walled large-size central wing skins is presented in this paper. The skin structure of thermoset carbon fiber composite prepreg is numerically analyzed. The curing deformation of the central wing skin under the influence of the mold is discussed in detail in the paper. The prediction results are applied to the mold profile compensation design, which is used to improve the product molding quality. This study provides a theoretical basis and analytical method for improving the molding quality of thin-walled and large-sized central wing skins, as well as the design and optimization of molds in production.

[Key words] Solidification simulation; Prediction of wing skin solidification deformation

引言

热固性复合材料的固化是一个热性能、化学性能和力学性能同时发生变化的复杂过程。复合材料在热固化成型过程中由于材料本身的各向异性、基体的固化收缩效应以及工艺过程引起的应力梯度等因素,结构内部将不可避免地产生残余应力,进而引起复合材料结构件在脱模后产生回弹变形以及翘曲变形,使得构件在室温下的自由形状与预期的设计形状存在一定的差异,即产生固化变形。^[1]模具与复合材料构件之间存在热膨胀系数(CTE)不匹配的问题,这将对构件固化变形产生较大的影响。^[2]

模具对固化过程的影响表现在两个方面:(1)模具和复合材料热传导系数差异引起的层合板内温度分布梯度;(2)模具和复合材料热膨胀系数差异而引起的应力梯度,这两方面变化都可能对大尺寸中央翼蒙皮最终的固化变形产生重要影响。^[3]

1 大尺寸薄壁蒙皮固化过程模拟预报模型

在研究复合材料结构件的固化变形预报过程中,北京航空航天大学张博明提出了面向工程的多层次固化变形预报方法。^[4]以简单结构的固有结论为基础展开,结构不断复杂,不断考虑新的影响固化变形的因素到模型中,形成适应不同结构层

次和工艺条件的预报方法。通过调整固化工艺、铺层厚度、铺层角度都可以对固化变形有一定的修正作用,但是最直接有效的还是对模具进行修正补偿。^[5]

1.1 复合材料有效热膨胀系数和有效收缩应变预报模型

由于纤维和树脂基体具有不同的热膨胀系数,一般复合材料的面内横向热膨胀系数要远远高于面内轴向热膨胀系数,而横向模量则远远小于轴向模量。因此,温度改变引起的每层的热膨胀和铺层方式关系密切。要获得由固化温度载荷下材料热变形导致的残余应力及固化变形,必须首先确定复合材料的有效热膨胀系数,本文利用下式来预报复合材料有效热膨胀系数和收缩应变。

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{1f} E_{1f} f + \varepsilon_{1m} E_{1m} (1-f)}{E_{1f} f + E_{1m} (1-f)} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = (\varepsilon_{2f} + \nu_{12f} \varepsilon_{1f}) f + (\varepsilon_{2m} + \nu_{12m} \varepsilon_{1m}) (1-f) - [\nu_{12f} f + \nu_{12m} (1-f)] \left[\frac{\varepsilon_{1f} E_{1f} f + \varepsilon_{1m} E_{1m} (1-f)}{E_{1f} f + E_{1m} (1-f)} \right] \quad (2)$$

式中, 下标f表示纤维, m表示树脂, 1表示纵向, 2表示横向。

对应热膨胀系数, $\alpha_1 = \epsilon_1, \alpha_2 = \epsilon_2$ 其中, $\epsilon_{1f}, \epsilon_{2f}$ 为纤维

1、2方向的热膨胀系数, $\epsilon_{1m}, \epsilon_{2m}$ 为树脂1、2方向的热膨胀

系数; 对应收缩应变 $\epsilon_1^{sh} = \epsilon_1, \epsilon_2^{sh} = \epsilon_2$, 其中, $\epsilon_{1f} = \epsilon_{2f} = 0,$

$\epsilon_{1m} = \epsilon_{2m}$ =树脂固化收缩应变。方程(1)和(2)是简单的混合律

模型, 本研究中假设纤维体积收缩量为零。

1.2数值模型(有限元)

根据由热化学模型得到的每一时间步固化度的模拟结果计算有效复合材料性能参数(假设在每一个时间步内材料的性能参数都是常数), 得到增量形式的应力应变关系为:

$$[\Delta\sigma] = [C_{eff}] \{ [\Delta\epsilon^e] + [\Delta\epsilon^{th}] + [\Delta\epsilon^{sh}] \} \quad (3)$$

式中, $[C_{eff}]$ 是单胞有效刚度矩阵。在每一时间步, 利用有

限元方法求解上式方程, 得到应变增量, 将这些应变增量累加可以得到固化过程中的总应变。

2 考虑模具影响的薄壁大尺寸中央翼蒙皮固化变形预报

本节将利用上一节提到的多层次预报模型, 在考虑了模具等因素影响下, 研究了薄壁大尺寸中央翼蒙皮的固化变形问题, 模型采用的材料参数与温度固化曲线如下:

表1 试验样件的材料属性表

材料名称	弹性常数/GPa					热膨胀系数/ 10^{-6}		
	E_1	E_2	G_{12}	G_{23}	ν_{12}	α_1	α_2	α_3
单向预浸料 (T700/603)	125	9.2	5.2	6.5	0.35	0.28	28.3	28.3
碳布预浸料	70	70	6.2	5.2	0.04	0.32	0.32	28.3
Q235A	210				0.3	12	12	12

2.1大尺寸薄壁蒙皮结构的固化变形分析

下面分析在复合材料受热膨胀、降温收缩影响下薄壁大尺寸中央翼蒙皮固化变形, 预报结果如图6, 可以看出机体蒙皮结构的变形很大, Y方向的双边回弹最大值3.7mm。

2.2薄壁蒙皮模具固化变形分析

为保证产品质量与精度, 蒙皮类复合材料零件的成型选用Q235A金属模具, 模具型面初步采用0.5%~1%缩放, 膜层散热系数取0.02, 环境温度幅值变化与蒙皮有限元模拟保持一致, 模具变形如图所示。金属模具在受热膨胀、降温收缩影响下变形预报结果如图6, 可以看出机体模具结构腔体的变形回弹最大值为1.6mm。

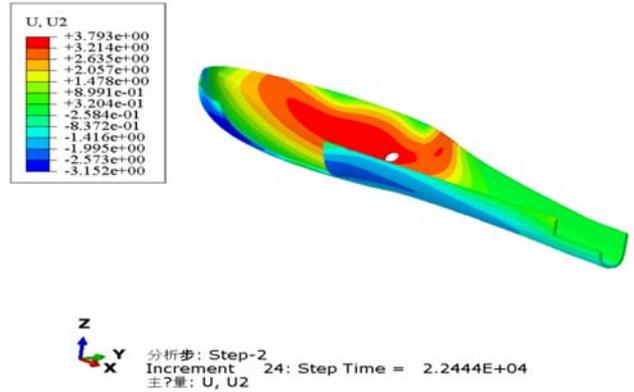


图 1大尺寸薄壁蒙皮结构固化变形预报

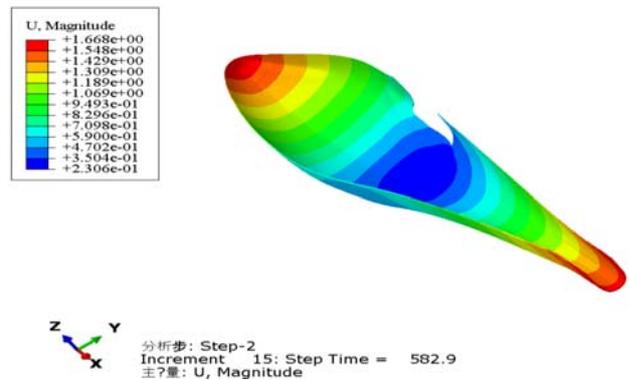


图2 大尺寸蒙皮模具结构的固化变形预报

2.3基于温差的大尺寸中央翼蒙皮模具型面补偿设计

由于环境温度的变化及自身的固化反应产生的化学放热, 使复合材料构件内部产生复杂的温度梯度。对复合材料构件成型过程中的温度场的研究主要包括三个方面: 复合材料构件温度场、热压罐温度场以及模具温度场。下图为大尺寸薄壁蒙皮固化温度曲线。在加热过程中, 提取空气温度、等厚钢板温度(壁面温度2、壁面温度3)、蒙皮表面结点温度, 创建温度-时间曲线, 如下图所示: 对于金属材料工装而言, 升温速率在成型过程中对复合材料构件内部的温度分布有较大的影响, 因此可根据该温度分布曲线对固化工艺参数进行优化。

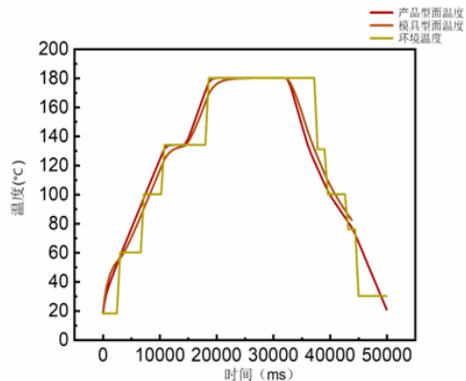


图3 蒙皮-模具-环境温度曲线对比

2.4 基于节点补偿法的大尺寸中央翼蒙皮模具型面设计

由于材料的特性引起的变形是无法通过改变制造工艺参数来克服的,通常只能采用对工装模具型面补偿修正来缓解或消除使变形后的结构件与设计形状相符。为适应这种由于固化不一致产生的变形,应用几何节点位移补偿修正法(Displacement Adjustment, DA)对模具型面进行修正。^[6]根据基于几何节点位移补偿修正法的算法可以清晰地了解复合材料固化变形量与型面补偿量之间的关系。

该算法通过反向迭代补偿可以获得理想的补偿后模具型面,使用该模具型面及其对应的复合材料构件进行固化变形数值模拟分析,即可获得与理想形状偏差在一定范围内的复合材料构件。

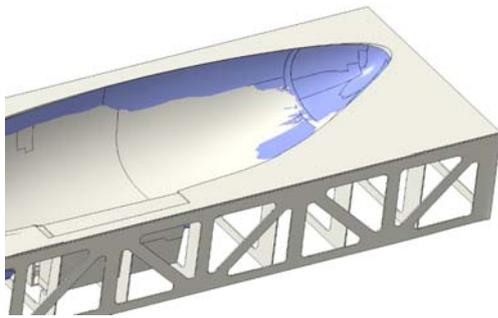


图4 蒙皮-模具固化变形补偿示意

3 结论

基于大尺寸薄壁蒙皮固化变形热传递与复合材料有效热膨胀系数与有效缩应变预报模型,提出了针对大型复杂结构固化变形多层次预报技术,将预报模型应用在大型复杂模具结构设计上:采用固化变形温差分析与节点补偿法对大尺寸薄壁模具型面进行二次设计,用以提高产品成型质量。为薄壁大尺寸复合材料中央翼蒙皮的成型设计和优化提供了实际理论依据。

[参考文献]

- [1]徐强.复合材料热压罐成型工艺仿真技术研究综述[J].航空制造技术,2020,63(15):34-38+47.
- [2]岳广全,张博明,戴福洪,等.固化过程中模具与复合材料构件相互作用分析[J].复合材料学报,2010,27(06):167-171.
- [3]岳广全,张嘉振,张博明.模具对复合材料构件固化变形的影响分析[J].复合材料学报,2013,30(04):206-210.
- [4]唐占文,张博明.复合材料设计制造一体化中的固化变形预报技术.航空制造技术.2014,15(专刊):26-31.
- [5]陈晓静.复合材料构件固化成型的变形预测与补偿[D].南京航空航天大学,2011.
- [6]乔巍,江永恒.基于补偿因子的模具型面补偿设计[J].机械设计与制造工程,2023,52(12):13-18.

作者简介:

张联合(1989--),男,汉族,中车青岛四方机车车辆股份有限公司,硕士研究生,高级工程师,复合材料成型工艺技术。