热压罐成型工艺复合材料变形仿真技术综述

宋云鹤[1] 张波[1] 沈凌宇[1] 鲍益东[2] 韩书豪[1]
1 航空工业济南特种结构研究所 高性能电磁窗航空科技重点实验室
2 南京航空航天大学 机械学院
DOI:10.12238/pe.v3i1.11403

[摘 要] 总结了热压罐成型工艺中复合材料变形产生的机理以及影响因素,并阐述了基于仿真的变形控制方法相对于传统方法的优点,最后详细介绍了热压罐成型工艺中变形计算方法。将热压罐成型工艺中复材变形计算解耦为工装温度场计算、复材温度场与固化计算、复材回弹变形计算。从计算模型、控制方程、输入参数及参数试验和文献统计等方面详细介绍了热压罐成型工艺中复合材料变形计算模型。统计文献表明工装温度场计算误差约小于 8%,复合材料变形计算误差约小于 15%。
[关键词] 复合材料；固化变形；有限元仿真；控制方程
中图分类号：TB332 文献标识码：A

Review on deformation simulation technology of composites in autoclave forming process

Yunhe Song[1] Bo Zhang[1] Lingyu Shen[1] Yidong Bao[2] Shuhao Han[1]
1 Jinan Special Structure Research Institute of Aviation Industry, Key Laboratory of High-performance Electromagnetic Window Aviation Technology
2 Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, School of Mechanical Engineering
[Abstract] The mechanism and influencing factors of deformation of composite in autoclave forming process have been summarized, and the advantages of deformation control method based the simulation have been expounded compared with the traditional method. The deformation simulation method of composite in autoclave forming process has been introduced. From the control equation and parameter test and literature statistics,the simulation model has been introduced. The deformation simulation is decoupled to the simulation of tooling temperature field, temperature field and curing calculation of composite materials and the springback deformation of composites. The statistical literature shows that the calculation error of tooling temperature field is less than 8%, and the calculation error of composite deformation is less than 15%
[Key words] composite material; curing deformation; finite element simulation; governing equation

复合材料由于性能优良已广泛用于航空航天领域,美国第五代战斗机上复材占比约为30%,民用飞机上复材占比也将超过一半,航空航天技术水平与材料技术水平已紧密联系在一起[1]。

复合材料热压罐成型工艺中,由于复材组分材料分布不均匀、材料热力性质不相同、铺层方向及结构设计不对称、成型中温度场分布不均匀、化学反应及收缩、工装与复合材料之间的相互作用以及胶接工序中各组件容差分配不合理等原因,复材成型后普遍出现变形现象[2-3],严重的造成产品质量问题甚至导致报废。

传统复合材料变形控制方法是基于工程经验的,通过检测并统计实际生产中的变形情况,迭代优化产品工艺数模。此优化流程包含工艺设计、工装预置变形、产品生产与变形统计等工作,伴随着周期长、技术难度大和制造成本高等痛点,传统复材变形控制方法已不适应于激烈的市场竞争。

复合材料变形仿真技术为上述痛点提供了解决途径[4],可计算得到热压罐成型系统的温度场分布,复材基体流动与组分含量分布,复材固化程度以及零件应变、应力与变形[5]。基于变形仿真可完善复材产品结构设计、进行工艺优化[5]。

基于仿真计算的研制流程中,设计阶段即可进行结构、工艺和工装方案迭代,相比于传统研制方法将节省大量试验件制造和工装返修带来的周期和生产成本[5]。复材变形仿真计算与试验验证相结合,可以进行复材变形的机理、影响因素与变形的敏感度等方面的研究。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

1 热压罐成型工艺模型

热压罐成型工艺是复合材料主要制造工艺之一，其传热情况如图1所示[6]。热流体对系统进行循环加热；工装受热不均产生热传导；热流通过辅材介质对复材进行低效的对流换热；复材与工装间进行热传导；复材化学反应放热作为系统内热源；复材内部因温差存在热传导。热压罐成型工艺中热辐射通常忽略不计[7]。

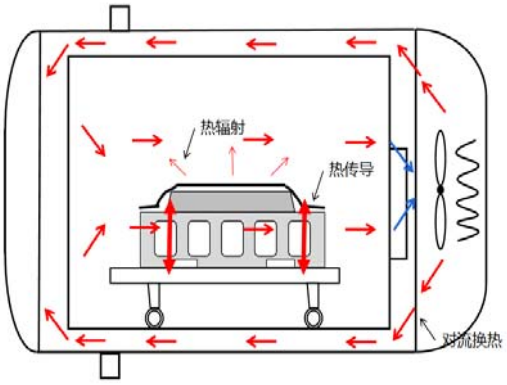


图1 热压罐成型工艺传热示意图

复材固化过程中，连续增强材料可认为不发生位移和化学反应[8]，树脂基体材料发生流动和固化交联反应。固化交联反应到一定程度，树脂高分子链相互交联并逐渐形成网络，树脂由粘流态向橡胶态转变，转变点称为凝胶点；当固化温度超过玻璃化转变温度时，树脂具有线弹性特征，此时由粘弹性向玻璃态转变。

热压罐成型工艺热历程中，复材靠袋面均匀压紧，靠模面由于复材和工装热力学性质不同，存在较小滑移。当固化结束并脱模后，零件不再受约束，固化过程中累计的内应力释放，复材因此出现变形，也称为复材回弹。

复材热压罐成型中传热、树脂基体材料流动、化学反应与内应力形成是耦合进行的，但目前计算机能力很难完全按实际情况进行计算，因此需要将耦合的热学-化学-力学过程进行解耦计算。解耦为工装温度场、复材固化反应、复材回弹计算模型，如图2所示。仿真模型解耦计算方法设置多种简化条件，计算结果存在理论误差。

2 工装温度场计算

2.1简介

工装温度场仿真技术目前已比较成熟，主流温度场仿真软件有FLUENT[9]、COMSOL[10-11]、ABAQUS[12-13]、XFlow[14]等。热压罐成型工艺模具温度场计算非线性程度高，前两者仿真软件应用更为广泛。

2.2控制方程

工装温度场计算模型中，对流换热和热传导为主要因素，忽略化学反应内热源和热辐射。

热压罐中流体是连续介质，遵循流体力学三大守恒定律。工装内部存在热传导，其能量方程如(1)所示：

$$\frac{\partial(\rho_s c_s T_s)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda_s\frac{\partial T_s}{\partial x_j}\right)+Q_T \quad (1)$$

式中：ρ_s为固体密度；c_s为固体比热；T_s为固化温度；Q_T为内部热源项。

2.3有限元模型

工装温度场仿真所需输入包括三维数模、材料属性和工艺参数。三维数模包括工装和流体域数模；材料属性包括工装密度、比热容、热传导率、流体密度、传热系数和动力粘度系数等；工艺参数包括热压罐流体温度、压力和流速。

2.4工装温度场仿真精度

查阅相关文献，表1为热压罐成型工装温度场计算能力。

表1 热压罐成型工装温度场计算能力

工装尺寸/mm×mm×mm	工装形式	计算软件	计算误差	文献
2040×1140×500	小曲率模具	FLUENT	7.4%	[9]
2040×1140×500	近平板模	COMSOL	3%	[10]
1700×1500×400	近平板模	COMSOL	4.5%	[11]
1500×1500×400	近平板模	XFlow	4.4%	[14]

3 复合材料温度场与固化计算

3.1简介

目前复合材料温度场与固化计算主流仿真软件有ABAQUS[12-13][15-17]、Simcenter 3D Samcef[18-19]、PAM-ATM[20]、COMSOL等。基于ABAQUS二次开发的计算，可靠性、稳定性不足以支撑工程应用，往往适用于高校理论研究，但由于程序算法开源特征，可集思广益，计算精度未来可期。PAM-ATM目前版本温度场计算能力有待提高，直接将工艺参数作为复材的边界条件，带来了一定的理论误差；接触算法有待提高，要求复材网格和工装网格节点一一对应，对网格划分要求苛刻，复杂产品变形计算具有很强的局限性。Simcenter 3D是目前商业化程度最高的复材仿真软件之一，同时具备蜂窝、泡沫、金属、复材等异种材料胶接仿真计算能力[21-22]。

3.2控制方程

复材温度场计算的简化模型，即热-化学耦合计算模型，计算了复材热传导和固化反应，固化反应放热作为温度场的内热源。

结合傅里叶导热定律和能量守恒定理，可以得到复材温度场计算控制方程，如式(2)所示：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q=\rho C\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

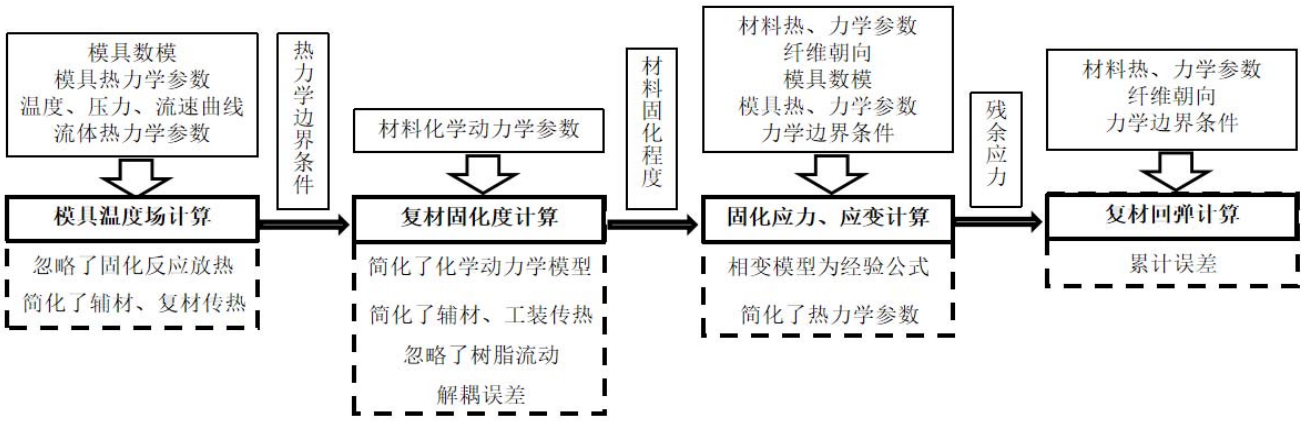


图 2 复合材料变形解耦计算示意图

式中：k为复材热传导系数，ρ为密度，C为比热容，Q为基体材料热生成率。

热生成率与固化反应程度正相关，如式(3)所示：

$$\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{\rho}_{\mathrm{r}}\left(1-\boldsymbol{v}_{\mathrm{f}}\right)\boldsymbol{H}_{\mathrm{r}}\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\boldsymbol{t}} \tag{3}$$

式中：ρ_r为基体材料密度，v_f为纤维体积分数，H_r为基体材料固化反应完整历程中产生的总热量；α为固化度，数值在0至1，其可以定义为某时刻固化累计放热H(t)与固化总过程释放总热量H_u的比值，如式(4)所示。

$$\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{t})=\frac{\boldsymbol{H}(\boldsymbol{t})}{\boldsymbol{H}_{\mathrm{u}}} \tag{4}$$

3.3固化动力学方程

基体材料固化模型从研究尺度上可以分为微观、细观和宏观模型。宏观唯象模型不研究固化反应的机理，通过材料性能试验描述固化反应的宏观现象并通过经验公式表征出来，适用于工程计算[23]。根据材料宏观表征和机理拟合方程，常见的固化动力学方程有n阶模型、自催化模型、Kamal & Sourour、Lee，Chiu & Lin、Lee，Looa &Springs等模型。

依据材料性能试验，唯象模型中固化反应速率是温度与固化度的函数，关系如式(5)所示。

$$\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\boldsymbol{t}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{T},\boldsymbol{\alpha})=\boldsymbol{K}(\boldsymbol{T})\boldsymbol{w}(\boldsymbol{\alpha}) \tag{5}$$

式中：K为基体材料固化反应常数，如式(6)所示：

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{i}}(\boldsymbol{T})=\boldsymbol{A}_{\mathrm{i}}\exp\left(-\frac{\boldsymbol{E}_{\mathrm{i}}}{\boldsymbol{RT}}\right)\qquad(\mathrm{i}=1,2,3) \tag{6}$$

式中：A_i为基体材料的频率系数，E_i为活化能，R为气体常数，T为反应温度。

式(5)中w(α)为基体材料固化反应的机理函数，不同的宏观模型对应不同的机理函数，如式(7)所示：

$$\text{n-order}\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\boldsymbol{t}}=\boldsymbol{K}(1-\boldsymbol{\alpha})^{\boldsymbol{n}}$$

$$\text{Autocatalyic}\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\boldsymbol{t}}=\boldsymbol{K}\boldsymbol{\alpha}^{\boldsymbol{m}}(1-\boldsymbol{\alpha})^{\boldsymbol{n}}$$

$$\text{Kamal \& Sourour}\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\boldsymbol{t}}=\left(\boldsymbol{K}_1+\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{\alpha}^{\boldsymbol{m}}\right)(1-\boldsymbol{\alpha})^{\boldsymbol{n}}$$

$$\text{Lee, Chiu \& Lin}\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\boldsymbol{t}}=\boldsymbol{K}_1(1-\boldsymbol{\alpha})^{\boldsymbol{n}_1}+\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{\alpha}^{\boldsymbol{m}}(1-\boldsymbol{\alpha})^{\boldsymbol{n}_2}$$

$$\text{Lee, Looa \&Springs}\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\boldsymbol{t}}=\begin{cases}\left(\boldsymbol{K}_1+\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{\alpha}\right)\left(1-\dfrac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\boldsymbol{t}}\right)(\boldsymbol{B}-\boldsymbol{\alpha}) & \forall\boldsymbol{\alpha}\le\alpha_{\mathrm{c}}\\ \boldsymbol{K}_3(1-\boldsymbol{\alpha}) & \forall\boldsymbol{\alpha}>\alpha_{\mathrm{c}}\end{cases}$$

3.4有限元模型

复材温度场和固化度计算输入包括零件几何数模、铺层信息和材料参数。铺层信息包括预浸料形式、铺层角度、铺贴起始点和单层厚度等。材料参数包括复材导热系数、密度、纤维体积分数、比热容、基体材料固化总放热量、固化反应模型和相变预测模型等。

3.5材料性能试验

复材温度场与固化度计算所需材料性能参数繁多。基体材料固化反应模型可以基于非等温DSC试验拟合；结合DSC和DMA试验可以建立玻璃化转变温度模型[20]。

差示扫描量热法(DSC)试验在系统控制下测量试样到参比物的功率差。

动态热机械分析法(DMA)试验是在系统控制材料温度变化情况下，测量材料物理性质随温度的变化。

3.5.1固化反应特征温度与总放热量。室温下将基体材料作为试样，设置不同的升温速率记录基体材料固化放热的热流曲线，可以得到固化反应热流-温度图。

由固化反应热流-温度图可以得到固化反应起始温度T_i(热流初次减小时温度)、峰值温度T_p(热流最小时温度)、终止温度T_f(高温、热流为零时温度)、完全固化反应后的总放热量Hu(热流对温度参数进行积分得到)。分别以T_i、T_p、T_f为纵坐标，升温速率为横坐标作一次函数拟合，与纵坐标的交点分别为凝胶化温度、固化温度和后处理温度。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

3.5.2固化反应方程。对固化初始温度到任意时刻的热流进行积分可以得到固化累计放热,代入式(4)可以计算得到任意时刻的固化度。结合温度-时间曲线,可以得到不同升温速率下固化度-时间曲线,对固化度-时间曲线进行微分可以得到固化速率-时间曲线,依据曲线形状可以判断固化反应机理。

根据Kissinger方程,拟合固化反应模型参数,如式(8)所示[24]。

$$\ln\frac{\beta}{T_p^2}=\ln\left(\frac{AR}{E}\right)-\frac{E}{RT_p} \tag{8}$$

3.5.3节中可以计算得到不同升温速率β和对应的峰值速度T_p,结合式(8),以$-\ln(\beta/T_p^2)$对$1/1000T_p$拟合一次函数,可以求得活化能E[24]。

结合式(6)、式(7),以固化度α为横坐标,exp(E/RT)dα/dt为纵坐标作图,拟合多项式曲线,可以得到频率因子A和反应级数n。

3.5.4相变方程。玻璃化转变温度T_g是基体材料相变的临界点,T_{g0}和T_{g1}分别表示刚开始固化(α=0)、完全固化后(α=1)的玻璃化转变温度,λ为与材料相关的预测常数。依据Dibenedetto方程建立玻璃化转变温度模型[25],如式(9)所示。

$$\frac{T_g-T_{g0}}{T_{g1}-T_{g0}}=\frac{\lambda\alpha}{1-(1-\lambda)\alpha} \tag{9}$$

T_{g0}采用低温DSC试验测试。制造不同固化度的试样在DMA仪器上测试,可以得到储能模量E'、损耗模量E''、损耗因子tanδ,损耗模量峰值时为当前固化度下的玻璃化转变温度T_g。多组试验可以得到固化度与玻璃化转变温度关系曲线。使用完全固化的试样做DMA试验,可以得到完全固化后的玻璃化转变温度T_{g1}。

由式(9)变换可以得到T_g与固化度α的关系,如式(10)所示。

$$\frac{1}{T_g-T_{g0}}=\frac{1}{\alpha}\frac{1}{\lambda(T_{g1}-T_{g0})}-\frac{1-\lambda}{\lambda(T_{g1}-T_{g0})} \tag{10}$$

拟合$1/\alpha$与$1/(T_g-T_{g0})$为一次函数,可以得到预测常数λ。

4 复合材料变形回弹计算

4.1简介

复材回弹计算基于热-力耦合分析模型。随着基体材料的固化,复材热力学性质也随之变化。目前用于计算复材固化的本构模型包括线弹性本构模型、粘弹性本构模型[17][26]和路径相关本构模型[20][27]等。线弹性本构模型忽略了复材基体的应力松弛效应,因此带来较大的理论误差;粘弹性本构模型需要大量材料参数试验支撑,非线性大,占用资源多,不适用于工程项目的计算;路径相关本构模型将基体固化历程分解为相变相关的阶跃形式,关联时间-固化度-温度参数与材料力学属性,构建得到应力-应变本构方程。路径相关本构模型存在一定理论误差,但节省大量材料测试时间、成本和计算资源,适用于工程项目应用。

4.2路径相关本构模型

路径相关本构方如式(11)所示:

$$\sigma_{ij}=\begin{cases}C^{r}_{ijkl}(\varepsilon_{kl}-\varepsilon^{E}_{kl}) \\ C^{g}_{ijkl}(\varepsilon_{kl}-\varepsilon^{E}_{kl})-(C^{g}_{ijkl}-C^{g}_{ijkl})(\varepsilon_{kl}-\varepsilon^{E}_{kl})\big|_{t=t_{vit}}\end{cases}$$

$$\begin{matrix}T\geq T_g(\alpha) \\ T<T_g(\alpha)\end{matrix} \tag{11}$$

式中C_{rijkl}和C_{gijkl}分别为橡胶态和玻璃态弹性模量,ε_{kl}为柯西应变张量,ε^{E}_{kj}为膨胀应变张量,t_{vit}是达到玻璃化转变点的时间。

基体材料固化中产生热膨胀和化学收缩,膨胀应变增量包含热应变增量$\Delta\varepsilon^{T}_{kl}$和化学应变增量$\Delta\varepsilon^{C}_{kl}$,如式(12)所示:

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon^{E}_{kl}&=\Delta\varepsilon^{T}_{kl}+\Delta\varepsilon^{C}_{kl} \\ \Delta\varepsilon^{E}_{kl}&=\beta_{kl}\Delta T \\ \Delta\varepsilon^{E}_{kl}&=\chi_{kl}\Delta\alpha\end{aligned} \tag{12}$$

式中:β_{kl}、χ_{kl}分别为瞬时热膨胀系数和化学收缩系数,系数随基体材料相变而变化。

4.3有限元模型

复材变形回弹计算输入包括三维数模、材料参数和工艺参数。三维数模为复材及工装数模;材料属性包括不同相态下基体材料的杨氏模量、泊松比、热膨胀系数等;工艺参数输入为真空压力、温度曲线。

产品固化阶段中,复材贴模面与工装存在小滑移,同时上表面受真空袋压力。产品内部温度和固化度不均匀,发生热膨胀和化学收缩,产生内应变与应力。产品脱模阶段时,复材不再受到约束,释放固化阶段残存的内应力而自由回弹。

4.4材料参数试验

复材杨氏模量、泊松比、剪切模量均可通过拉伸试验获取,其中剪切模型可以在万能拉伸机通过镜框剪切试验[28]获取。热膨胀系数需要通过TMA试验测试获得。

复材与工装的摩擦系数需要在万能拉伸机上使用定制夹具测取,夹具与工装材料相同,复材试样在夹具上夹紧并拉伸滑移。进行多组试验,可以得到不同固化度下复材与工装的摩擦系数。

使用平板样件共胶接法测量基体材料的化学收缩系数。在已固化的层合板上按相同结构铺贴未固化的预浸料,在两者间铺贴脱模布,对试样进行二次固化。由于已固化层合板不再产生化学收缩,未固化层合板产生化学收缩并产生翘曲变形,如图3所示。

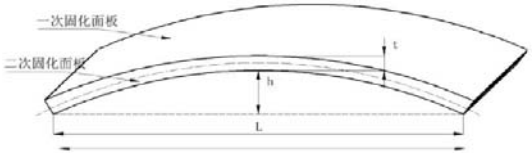


图3 二次固化成型试样

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

测量翘曲变形量h、试样长度L即可得到复合材料化学收缩应变,如式(13)所示,即可得到化学收缩系数。

$$\varepsilon^{C}=\frac{-16th}{3L^{2}} \tag{13}$$

4.5参考文献仿真精度

查阅相关文献,表2为复材变形回弹计算能力。

表2　热压罐成型复材回弹计算能力

制件结构	材料牌号	计算软件	固化模型	计算误差	文献
U型	CCF800H/AC531	ABAQUS	Lee,Chiu&Lin	8.5%	[15]
U型	T300/CYCOM970	ABAQUS	Autocatalyic	7.8%	[16]
U型	/	Simcenter Samcef	/	5.5%	[19]
U型	T300碳纤维/环氧树脂	/	Kamal &Sourour	8.1%	[29]
U型蜂窝夹层	玻璃纤维 Nomex芳纶 纸蜂窝 铝合金	/	/	14.2%	[30]
L型	AS4/3501-6	ABAQUS	Autocatalyic	7.5%	[11]
L型	双马碳纤维单向带	/	n-order	20%	[31]
曲率薄层合板	3501 树脂碳纤维增强	PAM-ATM	Autocatalyic	8.6%	[20]

5 结论

(1)本文介绍了热压罐成型工艺中工装温度场、复材温度场和固化度以及复材变形回弹计算。介绍了计算模型控制方程、输入参数及参数试验、仿真模型。

(2)目前国内高校、主机厂以及部分汽车行业已广泛研究复合材料变形回弹技术,但主要停留在简单典型零件计算上,对于简单典型零件计算误差可以控制在10%以下。复杂产品通过复材变形仿真计算仅能计算出趋势,技术成熟度尚有待提高,虽然能起指导作用,但如需将变形完全补偿或者控制在小值波动,需要结合试验结果进行变形补偿工作。当然,基于仿真计算的产品研制流程相比于传统研制流程可以节省大量时间、资源、成本。复材变形仿真在工程中应用值得期待,但是还缺少工程验证实践。理论以及模型需要完善,应与实验开展良好的互动,需要大量实验数据支撑。

(3)由于开源性,ABAQUS平台上二次开发计算复合材料变形回弹前途是光明的,但是编程门槛高、时间成本大,不适用于工程应用；如Simcenter3D等商业软件可以很好地满足工程应用需求。

(4)目前夹芯结构变形仿真研究较少,复合材料缺陷仿真研究也较小,是挑战也是蓝海。其中胶膜、发泡胶的仿真建模可能是影响夹芯结构变形仿真精度的关键。

[参考文献]

[1]戴煜.面向航空航天需求的先进材料及特种热工装备[C]//2021国际产学研用合作会议(南昌)报告摘要选集,2021.

[2]杨青,卫原平,刘卫平.复合材料C/L型结构固化变形的影响因素分析[J].航空制造技术,2019,62(04):87-94+101.

[3]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[J].航空制造技术,2014(15):32-37.

[4]庞杰.复合材料结构固化变形分析及其控制[D].南京航空航天大学,2010.

[5]岳广全.整体化复合材料壁板结构固化变形模拟及控制方法研究[D].哈尔滨工业大学,2010.

[6]张晨群,鲍益东,安鲁陵.基于XFlow的热压罐成型过程温度场模拟[J].航空制造技术,2020,63(03):76-83.

[7]袁喆.复合材料成型热压罐设备智能监控系统的开发和实现[D].电子科技大学,2021.

[8]杨旭锋.复合材料管成型残余应力分析及承载性能分析[D].大连理工大学,2022.

[9]熊蓉,安鲁陵,花蕾蕾.热压罐成型过程中框架式模具温度场模拟与分析[J].宇航材料工艺,2020,50(01):15-21.

[10]吕佳镁,马贵春,郭靖宇.基于COMSOL的热压罐成型模具温度场分析[J].中北大学学报(自然科学版),2021,42(05):412-418.

[11]郭靖宇,岳光,吕佳镁.基于流体动力学的热压罐框架式模具温度场优化[J].兵工学报,2022,43(01):233-240.

[12]刘欣宁,李成思.树脂基复合材料固化过程中固化度场和温度场数值模拟[J].机械制造,2017,55(12):73-76+84.

[13]朱海华,张俐,余宁.复合材料薄壁零件固化过程模拟及变形预测[J].塑性工程学报,2020,27(03):146-153.

[14]张晨群,鲍益东,安鲁陵.基于XFlow的热压罐成型过程温度场模拟[J].航空制造技术,2020,63(03):76-83.

[15]孙立帅,刘闯,李玉军.变厚度复合材料U型零件固化变形仿真预测与结构影响因素[J].复合材料学报,2023,40(01):553-566.

[16]元振毅,王永军,杨凯.热固性树脂基复合材料热隔膜成型过程数值仿真[J].复合材料学报,2016,33(07):1339-1350.

[17]闵荣,元振毅,王永军.基于黏弹性本构模型的热固性树脂基复合材料固化变形数值仿真模型[J].复合材料学报,2017,34(10):2254-2262.

[18]陈静,纪斌逸,许国栋,等.基于Simcenter3D平台的高性能复合材料热压罐工艺仿真分析[J].中国战略新兴产业,2018,(026):50-52.

[19]陈剑州,冷晟,董海伟.基于Simcenter3D的复合材料U形

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

件固化成型仿真分析[C]//中国航空学会.第五届中国航空科学技术大会论文集.北京航空航天大学出版社(BEIHANGUNIVERSITY PRESS),2021:5.

[20]张晨群,鲍益东,杨智勇.基于路径相关本构模型的大型薄壁曲面复合材料零件固化变形分析[J].宇航材料工艺,2022,52(06):92-97.

[21]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.

[22]元振毅,王永军,蔡豫晋.复合材料制造过程仿真技术综述[J].航空制造技术,2017(04):47-53.

[23]王晓霞,贾玉玺,程程.树脂传递模塑工艺的模内固化及复合材料脱模变形[J].高分子材料科学与工程,2010,26(09):151-154.

[24]刘旭东.改性环氧树脂裂缝修补材料制备及其热解动力学研究[D].新疆大学,2019.

[25]祁国成,张博明,叶金蕊.T800级碳纤维/环氧预浸料固化过程研究[C]//中国科学技术协会,河北省人民政府.第十四届中国科协年会第11分会场：低成本、高性能复合材料发展论坛论文集,2012:6.

[26]尚云东.复合材料层合板宏细观残余应力粘弹性分析[D].武汉理工大学,2016.

[27]SVANBERGJM,HOLMBERGJA.PredictionofshapedistortionsPartI.FE-implementationofapathdependentconstitutivemodel[J].CompositesPartA,2004,35(6):711-721.

[28]鲍益东,何瑞,宋云鹤.二维编织碳纤维增强树脂复合材料一步法铺层展开[J].复合材料学报,2022,39(07):3144-3155.

[29]王雪华,陈俊林,满珈诚.复合材料C形梁结构的固化变形控制研究[J].复合材料科学与工程,2023(06):67-72.

[30]陈文,赵月青,韩舒等.复合材料U形混杂夹层结构固化变形及控制研究[J].高科技纤维与应用,2023,48(01):54-60.

[31]李彩林,余宁,文友谊.复合材料L型结构固化变形的数值模拟与补偿[J].塑料工业,2016,44(07):51-54.

作者简介：

宋云鹤(1996--),男,汉族,江苏省连云港市人,硕士研究生,工程师,研究方向：复合材料制造、有限元分析、航空宇航制造。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.