

复合材料成型工艺仿真技术

李彩林 文友谊 窦作勇

(成都飞机工业集团有限责任公司, 成都 610041)

文 摘 通过计算机模拟 RTM 冲模过程来确定工艺设计方案和工艺参数;通过固化仿真来优化固化工艺曲线。结果表明:数值模拟技术为复合材料成型工艺优化提供了可行方法。

关键词 复合材料, RTM, 热压罐固化, 数值模拟

Simulation Technology of Composite Molding Process

Li Cailin Wen Youyi Dou Zuoyong

[Chengdu Aircraft Industrial (group) Company, Chengdu 610041]

Abstract This paper makes sure of processing design projects and processing parameters through computer simulating RTM injection course and optimizing curing curves through autoclave simulation. The results show that simulation technology gives a credible method for composite processing optimization.

Key words Composite, RTM, Autoclave curing, Simulation

0 引言

复合材料成型工艺的关键是在满足制品形状尺寸及表面质量的前提下,增强材料能按预定方向均匀配置,并尽量减少其性能降级;通过基体与增强材料的良好结合,使基体树脂充分固化,排除挥发气体,有效减少制品孔隙率^[1-3]。传统复合材料成型工艺复杂、试验周期长、制造成本高,产品质量难以保证^[4-5]。

随着计算机技术的广泛应用,国内外众多企业竞相采用数字化仿真技术对复合材料成型工艺进行虚拟设计和制造^[6-10],从而大大缩短试验周期、降低制造成本和提高产品性能。本文采用 PAM 仿真软件对 RTM 冲模过程和热压罐固化工艺进行仿真研究,阐述了数字化仿真技术在复合材料构件成型工艺中的应用对复合材料成型过程的优化作用。

1 数学模型

复合材料成型工艺的数值模拟相当复杂,其求解区域随着树脂的注入不断发生变化,压力场、温度场及固化度场互相耦合。复合材料工艺模拟涉及的内容广泛^[11-13],包括的模型较多,大多集中在树脂流动控制方程和树脂固化动力学模型上。

1.1 树脂流动控制方程

在 RTM 成型过程中,充模和纤维浸渍同步进行,如何控制这两个相互竞争的流动是复合材料液体成型工艺的首要环节。通常可认为树脂在纤维中的渗透过程是流体(树脂)在多孔介质(纤维)中的渗透过程。选择渗透率主轴方向为坐标系方向,可用 Darcy 定律可表示为:

$$\begin{cases} k_x \frac{\partial p}{\partial x} + \mu u = 0 \\ k_y \frac{\partial p}{\partial y} + \mu v = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, k_x, k_y 为纤维主轴方向渗透率, u, v 为树脂流动速率, p 为树脂压力, μ 为树脂黏度。

假定预先放置在模具中的预制体是固定的,其惯性效应可以忽略不计,树脂为不可压缩流体,根据不可压缩流体连续性方程得到:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式,得到树脂流动控制方程。

$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial k_x}{\partial x} - \frac{k_x}{\mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial k_y}{\partial y} - \frac{k_y}{\mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

由于树脂流动前沿表面张力和主要的黏滯力相比,可以忽略不计。(3)式的边界条件可表述为:

$$\begin{cases} p|_{\text{gate}} = p_0 & \text{(注射口)} \\ \frac{\partial p}{\partial n}|_{\text{wall}} = 0 & \text{(模具边界)} \\ p|_{\text{front}} = 0 & \text{(流动前沿)} \end{cases}$$

1.2 树脂固化动力学方程

复合材料的热压罐固化过程相当复杂,成型中不仅涉及力、热和化学反应的耦合效应,还涉及固化反应动力学的内容^[14-15],该过程是在罐内进行的,很难监控。为了便于实时模拟分析,假定固化阶段树脂基本不发生流动,忽略对流传热影响,可将固化反应动力学方程表述为如下两种形式:

$$\frac{da}{dt} = Kf(a) \quad (4)$$

$$G(a) = Kt \quad (5)$$

式中, a 为固化反应速度, K 为反应速率常数, t 为时间, $f(a)$ 为微分形式的动力学机理函数, $G(a)$ 为积分形式的动力学机理函数。

$f(a)$ 与 $G(a)$ 之间有以下关系:

$$f(a) = \frac{1}{G'(a)} = \frac{1}{d[G(a)]/da} \quad (6)$$

其中反应速率常数 K 与温度 T 之间的关系可采用 Arrhenius 方程形式加以表述:

$$K = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (7)$$

式中, A 为常数, E 为活化能, T 为温度, R 为理想气体常数。

2 工艺仿真

2.1 仿真试件

试件1为盒型件,长1.0 m、宽(大端0.35 m,小端0.25 m)、高0.3 m;试件2为V型肋试件,长0.8 m,宽0.3 m,该试件两凸缘外缘间距0.35 m。

2.2 分析流程

RTM以试件1为例,利用PAM软件进行Heat-RTM工艺仿真,其CAE网格模型包含2560个单元和7872个结点,试件的设计注口或溢口位置如图1的Group色柱所示(分别为Group 1:试件大端、Group 2:试件小端、Group 4:试件中间上、Group 5:试件中间下),以及盒型件的上、下面各为一个与工装面接触的Group加热组,如图1所示的6、7 Group色柱。

试件1的仿真分析流程:

(1)在CATIA中建立CAD模型,通过网格划分建立CAE模型,再将网格模型导入Heat-RTM程序;

(2)按照试件的铺层设置好各层的材料参数,并设计注口和溢口位置及数量方案;

(3)仿真数据提交并进行计算求解,得到充模时间、

充模过程、模腔内压力分布和树脂用量等后处理结果;

(4)如果求解的结果显示树脂流动过程有问题,可通过修改工艺设计方案和工艺参数来满足要求,达到优化充模过程的目的。

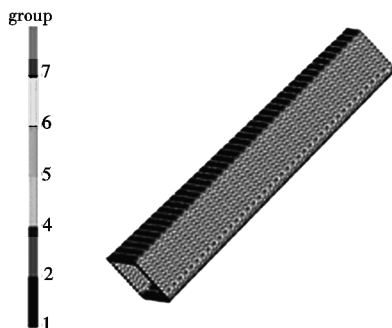


图1 试件1的CAE模型及Group划分

Fig.1 CAE model of part 1 and group division

2.3 材料及工艺参数

进行Heat-RTM仿真分析时,由于纤维不进行力学性能分析,所以只输入纤维的密度和热导率等;由于RTM是在加热条件下进行的,应考虑温度对树脂性能的影响,并确定其密度和黏度;结合试验及相关资料确定其他参数。本仿真过程涉及的主要材料参数见表1。主要工艺参数为,注口压力:0.1~0.5 MPa,溢口压力:0~0.1 MPa,注射温度:110~125℃。

表1 主要材料参数

Tab.1 Principal material parameters

材料	密度/ g·cm ⁻³	黏度/ Pa·s	热导率/ W·(m·K) ⁻¹	线胀系数/ 10 ⁻⁶ K ⁻¹	T _g / ℃
碳纤维	1.7~2.1	-	10~160	0~1.1	-
双马树脂	0.93~0.96	0.25	-	-	163

2.4 工艺方案设计和仿真结果分析

利用PAM软件的Heat-RTM模块进行仿真,首先在设定温度和压力条件下设计三种典型工艺方案(表2),优化出较为适合的工艺方案,其注口和溢口位置示意图如图1色柱所示;其次在以上优化方案基础上再对温度和压力等参数进行仿真分析,通过参数修改、性能仿真,达到优化工艺参数的目的。

表2 注口和溢口方案设计

Tab.2 Projects design of injection and flooding openings

方案	注口		溢口	
	数量	位置	数量	位置
1	2	Group 1、2	2	Group 4、5
2	1	Group 1	1	Group 2
3	1	Group 2	1	Group 1

方案1:设计注口位置在试件的小端和大端,溢口在其中部,仿真模拟结果见图2。由此获得的注射时间为15.2 min,树脂注射量为 $5.75 \times 10^3 \text{ cm}^3$,树脂

溢出量为 $3.73 \times 10^2 \text{ cm}^3$, 树脂用量为 $5.38 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 。

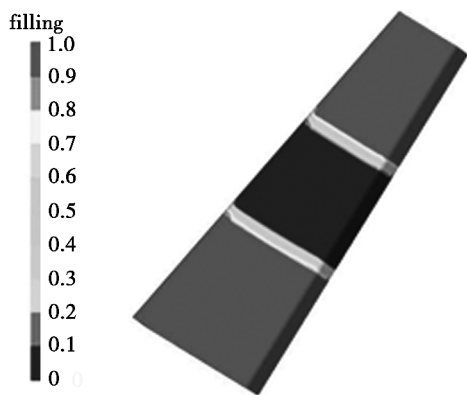


图2 方案1注射时间显示图

Fig. 2 Vision picture of filling time for design 1

方案2: 注口位置在试件的大端, 溢口在其小端, 仿真模拟结果见图3。由此获得的注射时间为 29.7 min, 树脂注射量为 $5.42 \times 10^3 \text{ cm}^3$, 树脂溢出量为 15.4 cm^3 , 树脂用量为 $5.41 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 。

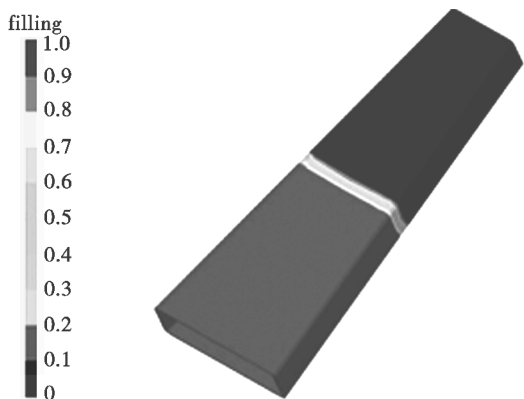


图3 方案2注射时间显示图

Fig. 3 Vision picture of filling time for design 2

方案3: 注口位置在试件的小端, 溢口在大端, 仿真模拟结果见图4。由此获得的注射时间为 23.5 min, 树脂注射量为 $5.43 \times 10^3 \text{ cm}^3$, 树脂溢出量为 26.0 cm^3 , 树脂用量为 $5.40 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 。

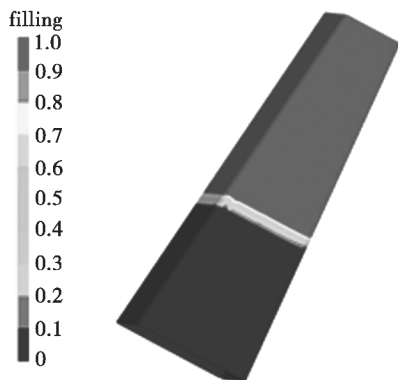


图4 方案3注射时间显示图

Fig. 4 Vision picture of filling time for design 3

综上所述, 方案1的注射时间最短, 但树脂溢出量最多, 同时该方案的溢口在试件中间, 若在溢口处形成干斑等缺陷不易避开; 方案2和3的树脂注射量和溢出量都很接近, 因此树脂用量也基本相当, 但方案3的注射时间较短。结合以上分析可知, 选择方案3较合理, 而且该方案若在注口或溢口处有缺陷形成, 也易于避开。

2.5 热压罐固化仿真

2.5.1 仿真参数设置

利用固化仿真软件对试件2进行模拟, 热压罐固化成型的材料参数包括树脂的熔、黏度及密度, 增强材料的强度、热膨胀系数等; 固化的工艺参数主要包括温度和压力。本次仿真选用的材料为碳纤维双马来酰亚胺体系, 为高温固化型, 具体参数设置与RTM相似。

2.5.2 工艺仿真

在固化模拟过程中, 通过对参数的设置、计算求解及后处理显示来实现零件的仿真分析, 对于不合理的参数设置需进行修改, 再次进行模拟, 直至优化出较为适合的固化工艺参数。利用PAM软件的CURING模块, 可以得到零件的固化时间、固化率分布及固化过程的温度、压力变化。由于压力的仿真优化与温度相似, 因此本节只以温度变化和固化率分布为例来具体阐述固化工艺曲线的设计是否合理。

2.5.2.1 固化工艺曲线设计

热压罐固化过程中, 温度和压力对试件的固化周期和固化质量至关重要。图5为本仿真过程的温度-压力曲线, 通过仿真来验证该曲线设计的合理性。

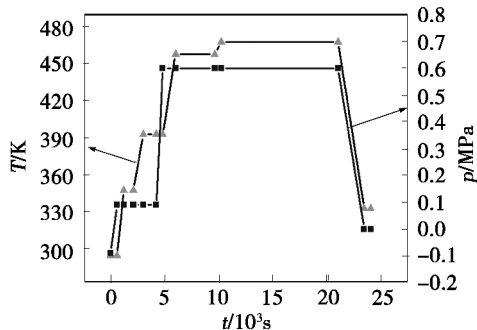


图5 固化温度—压力曲线

Fig. 5 Curing temperature-pressure curves

2.5.2.2 温度变化分布

温度对试件固化程度影响较大, 在固化温度范围内, 试件从开始固化到固化完全, 图6为试件在固化过程中不同时刻的温度情况。图中左下端的时间表示试件显示温度(与颜色柱一致)所对应的时刻。可见, 当试件的固化时间为 21 996 s (6.1 h) 时, 试件的温度为 455 ~ 472 K。

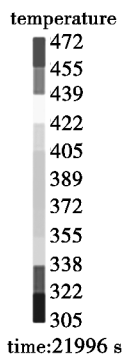


图6 温度显示图

Fig. 6 Temperature vision picture

2.5.2.3 固化度分布

通过固化成型工艺的数值模拟,可直观了解试件的固化过程,图7为试件在固化过程中不同时刻的固化度。图中左边的颜色柱表示固化度的高低,颜色由浅至深,表示固化度依次升高,当固化度为1时表示已固化完全。左下端的时间表示试件显示的固化度(与颜色柱一致)所对应的时刻。图7表示当试件固化时间为21996 s(6.1 h)时,其固化度为0.9~1。

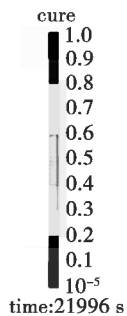


图7 固化度显示图

Fig. 7 Curing degree vision picture

2.5.3 仿真结果分析

在相同工艺参数条件下,试件2均固化完全(固化度为1),通过模拟得到的仿真固化时间为6.1 h;在试验中的固化时间为7.0 h。通过分析及模拟显示表明,试件2在以上工艺参数条件下可以完全固化,表明该固化工艺曲线设计合理。

3 结论

(1)通过 Heat-RTM 工艺的数值模拟研究,筛选出注射时间较短、树脂溢出量较少、缺陷易控制的工艺设计方案3,在此方案基础上,优化出适合的成型工艺参数。

(2)在设定固化工艺曲线下,试件2的热压罐仿真可以完全固化,并与试验数据较一致,表明该工艺曲线设计合理。

(3)在 RTM 和热压罐成型工艺中,数值模拟技

术为复合材料工艺优化提供了可行方法。

参考文献

- [1] 陈亚莉. 复合材料成型工艺在 A400M 军用运输机上的应用[J]. 航空制造技术, 2008(10):32-35
- [2] 戴福洪, 武湛君, 张博明, 等. 复合材料 RTM 成型工艺固化过程三维数值模拟[J]. 复合材料学报, 2004, 21(1): 134-137
- [3] Seung Hwan Lee, Mei Yang, Young Seok Song, et al. Three-dimensional flow simulation of resin transfer molding utilizing multilayered fiberpreform [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 114:1803-1812
- [4] 李彩林, 文友谊. 大飞机复合材料成型工艺数值模拟技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2008(10):49-51
- [5] 李海晨, 王彪, 周振功. RTM 工艺树脂流动过程数值模拟[J]. 复合材料学报, 2002, 19(2):18-23
- [6] Byoung Yoon Kim, GI Joon Nam, Jae Wook Lee. Optimization of filling process in RTM using a genetic algorithm and experimental design method[J]. Polymer Composites, 2002, 23(1): 73-86
- [7] 李雪芹, 彭勃. 正弦波形梁构件的 RTM 工艺模拟研究[J]. 纤维复合材料, 2008, 25(2):3-7
- [8] Bain Stewart, Ozawa Hideki, Criss Jim M. Development of a cure/postcure cycle for peti-330 laminates fabricated by RTM[J]. High Performance Polymer, 2006, 18:991-1001
- [9] 谢怀勤, 陈辉, 方双全. 聚合物基复合材料模压成型过程固化度与非稳态温度场的数值模拟[J]. 复合材料学报, 2003, 20(5):73-76
- [10] 江顺亮. RTM 加工工艺充模过程的计算机模拟[J]. 复合材料学报, 2002, 19(2):13-17
- [11] Freddy Y C, Boey X L. Modeling the curing kinetics for a modified Bismaleimide resin [J]. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry, 2000, 38(1):907-913
- [12] 胡照会, 王荣国, 赫晓东, 等. 复合材料层板固化全过程残余应力/应变的数值模拟[J]. 航空材料学报, 2008, 28(2):55-59
- [13] 董永祺. 我国树脂基复合材料成型工艺的发展方向[J]. 纤维复合材料, 2003(2):32-34
- [14] Sho Jaei, Akbar. Numerical simulation of three-dimensional flow and analysis of filling process in compression resin transfer molding [J]. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(9):1434-1450
- [15] Simacek P, Advani S G. Desirable features in mold filling simulations for liquid molding process [J]. Polymer Composites, 2004, 25(4):355-367

(编辑 吴坚)