

复合材料热压罐固化工艺仿真分析

朱大雷¹ 易茂斌¹ 廖敦明²

(1 北京卫星制造厂,北京 100094)

(2 华中科技大学材料学院,武汉 430074)

文 摘 针对复合材料的固化过程,建立了其热传递和固化动力学双向耦合模型。根据现有的固化工艺规范,对圆筒形制件进行了分析,并给出了内外面板处的温度及固化度变化规律。从计算结果看出由于模具的导热能力较差,靠近模具一侧的面板温度上升比另一侧慢,但是其温度场分布会更加均匀。

关键词 热压罐,复合材料,固化,仿真

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.01.009

Analysis on Simulation to Autoclaves Curing Process of Composites

ZHU Dalei¹ YI Maobin¹ LIAO Dunming²

(1 Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

(2 College of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract To investigate the curing process of composite material, the bidirectional couple model including thermal transfer and curing dynamics for polymer composite material curing process is established. According to the existing curing criterion, the cylinder composites structure is analyzed in this paper, and the temperature and degree of cure distribution at internal and outside face sheet is worked out. With the calculation results, because of the mould's thermal conductive ability is low, the temperature at the face sheet next to the mould ascends slower than the face sheet at the other side. However the temperature distribution is more uniform.

Key words Autoclave, Composite material, Cure, Simulation

0 引言

随着树脂基复合材料在航天领域的广泛应用,热压罐工艺技术也在复合材料产品制造过程中发挥着重要作用。为了提升复合材料产品成型质量,降低研制成本,缩短研制周期,需要通过仿真模拟的方法对热压罐固化工艺参数进行优化。复合材料的固化过程涉及到热传导、化学反应等众多复杂问题,是复合材料成型的关键过程。树脂基复合材料制品中的缺陷如分层、孔隙、变形、裂纹等,很多是由于在该阶段没有很好地控制温度梯度以及不均匀固化所造成的。本文针对树脂基复合材料的热压罐固化工艺过程,根据固化反应理论模型采用有限元法对其进行了仿真分析,并给出了复合材料结构温度和固化度随时间的变化规律。

1 固化反应理论模型

复合材料在热压成型过程中,随着热压罐内部温度的升高,热量会由复合材料的外部向内部传递,同时树脂也会逐渐发生固化反应。在此过程中,树脂温度的高低会影响树脂的固化率,而树脂在固化过程中又会放热,从而影响温度分布^[1]。为了弄清树脂的温度与固化度之间的关系必须了解其热化学模型,即相应的固化反应动力学模型和热传递模型。由于热压成型过程中涉及的因素众多,而其中有些因素对固化过程的影响很小,所以可以作以下前提假设:(1)忽略树脂流动引起的热量传递;(2)复合材料内部同一位置树脂和纤维的温度相同;(3)不考虑复合材料内部孔隙的影响。

1.1 固化动力学模型

树脂固化反应动力学模型用公式(1)和(2)计算^[2-3]。

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2\alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (1)$$

收稿日期:2013-10-30

作者简介:朱大雷,1981年出生,博士,主要从事复合材料结构仿真计算研究。E-mail:andy120154@163.com

$$K_i = A_i e^{-\frac{E_i}{RT}} \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

式中: K_i 为速率常数, A_i 为指前因子, E_i 为反应活化能, m, n 为反应级数。

1.2 热传递模型

复合材料固化过程中温度场分布本质上是一个具有非线性内热源的热传导问题, 其中的内热源来自于基体树脂的放热化学反应。对于树脂基复合材料来说 \dot{q} 为单位时间内树脂固化所产生的热量, 它与固化速率有关, 可以用(3)式表示。

$$\dot{q} = \rho(1 - V_f)H_R \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

式中: V_f 为纤维体积含量, H_R 为单位质量树脂固化总反应放热, α 为树脂的固化度, $\frac{d\alpha}{dt}$ 为树脂固化反应速率。

2 算例验证

为了验证模型及计算方法的正确性, 以文献[1]中实验为依据, 模拟石墨/环氧树脂热压成型的温度场和固化度场。建立如图1所示的模型, 采用有限差分非均匀网格进行剖分, 热压罐加热规范见图2。

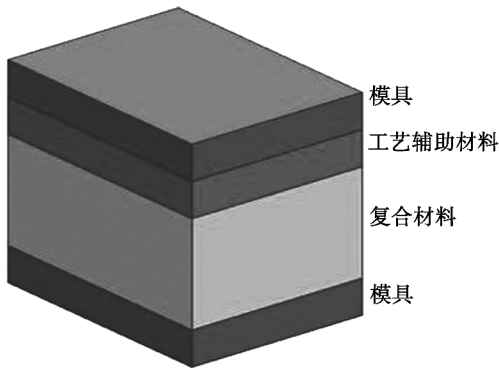


图1 验证算例体系模型图

Fig.1 Validation model figure

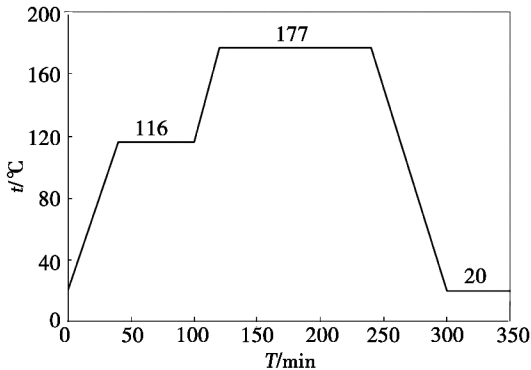


图2 热压罐加热规范

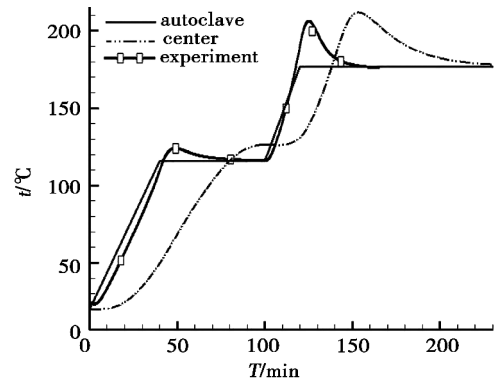
Fig.2 Autoclave heating schedule

图3是本文模拟的复合材料中心节点的温度和固化度变化曲线, 同时图中也示出了文献[1]实验曲线以便对比。可以看出模拟的曲线与文献[1]的实验曲线基本一致, 固化度为0.3的点将整个固化过程分为两个阶段, 在温度曲线上, 测得第一阶段的温度

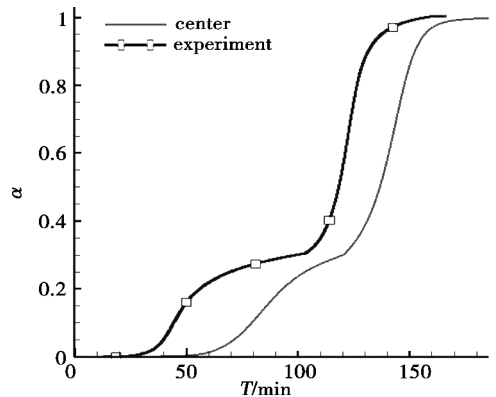
峰值比边界温度高 10℃, 而第二阶段的温度峰值比边界温度高 33℃, 这与文献[1]的记录是基本一致的。在固化度曲线上, 其形状也与实验曲线一致, 这充分论证了本文计算模型的正确性以及计算方法的可靠性。但对比可以看出, 模拟的曲线在时间上要延迟一些, 也就是温度传导到中心节点要慢一些, 主要原因如下:

(1) 本文的模型比文献[1]多了上下两个模具, 这样明显会减慢温度传递到复合材料中心。

(2) 文献[1]是将该边界温度条件直接附加在复合材料的边界的, 而本文为了接近真实情况, 是通过对流换热方式传入, 热量传入复合材料的效率比文献[1]中的方式要低很多。



(a) 温度变化曲线



(b) 固化度变化曲线

图3 复合材料中心节点的温度和固化度变化曲线

Fig.3 Variation curves of temperature and curing degree at the middle point of composites

3 模拟结果分析

采用本文的方法对图4所示的圆筒形结构进行固化过程的仿真。圆筒形结构为蜂窝夹层结构, 为了更好的进行理论分析, 突出固化放热的影响, 这里设置两层面板的厚度为 5 mm, 均为预浸料铺叠而成, 蜂窝厚度为 20 mm, 模具厚度为 30 mm。

随着热压罐内部温度的不断升高, 热量会以热传导的形式由罐内空气逐渐传入结构内部, 由于本算例使用的是外模, 所以热量将会更快的传到内面板, 即内面板的温度将会比外面板的高。

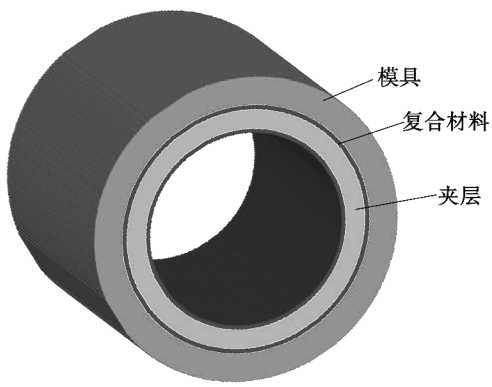


图4 圆筒形结构示意图

Fig.4 Model of cylindrical structure

图5是在两次升温过程中结构的温度场分布情况。由于面板的厚度非常薄,模拟中并不能看出明显的固化放热现象,图6记录的是内面板三个取样点的温度和固化度变化历程。

图7为外面板的温度和固化度变化历程,与图6相比,可以看到外面板不同点的温度偏差很小,温度场更加均匀,所以可以推断出由于温度不均匀造成的残余应力主要是集中在内面板上。从固化度同样可以看出,外面板的固化过程更加均匀,所以由固化所引起的变形一般会很小,固化变形主要来自于内面板。

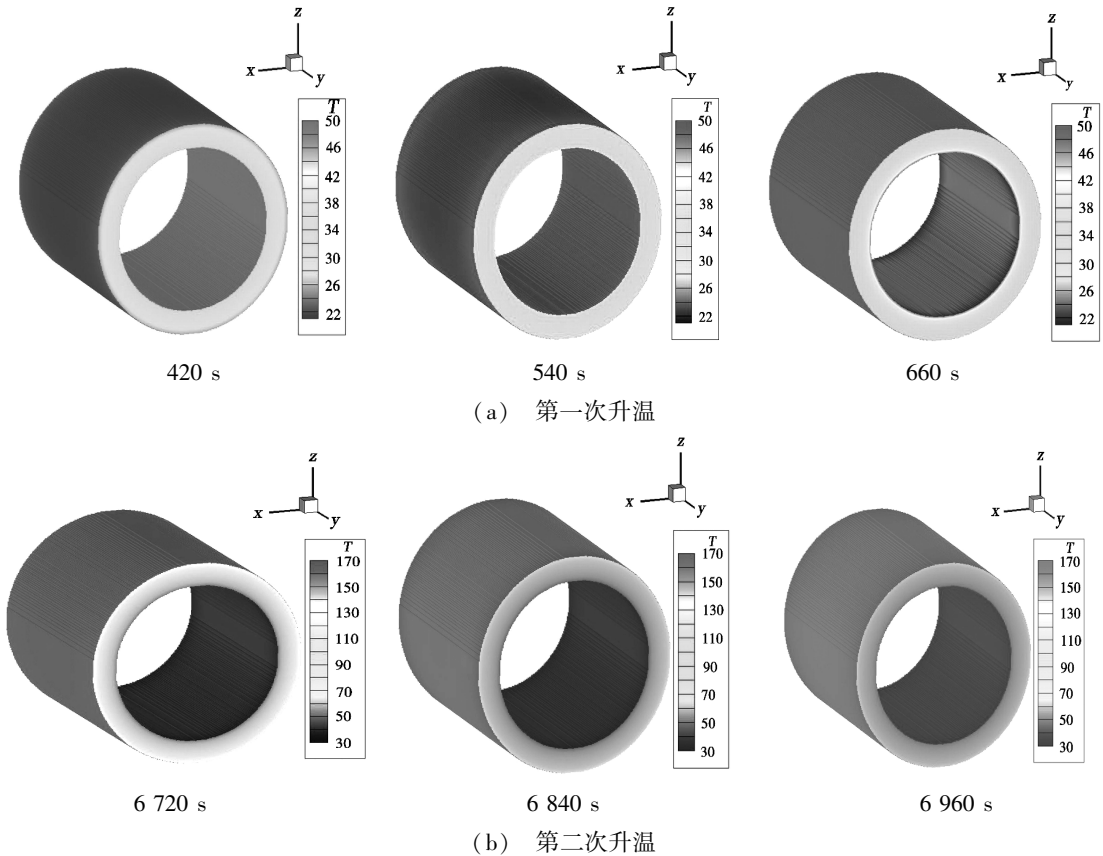


图5 两次升温过程中的结构温度场分布(不含模具)

Fig.5 Temperature distribution of structure in two process of temperature rise

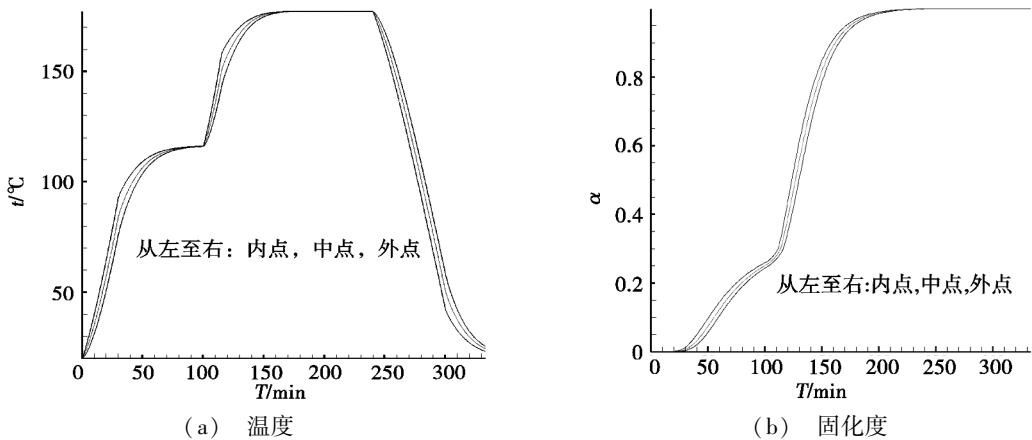


图6 内面板中心三点温度和固化度变化情况

Fig.6 Variation of temperature and curing degree for the three points in the middle of inner panel

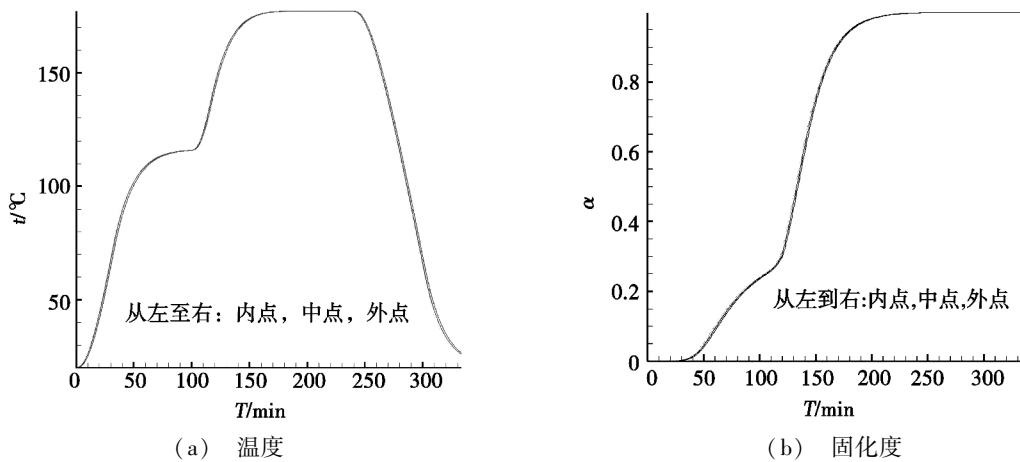


图7 外面板中心三点温度和固化度变化情况

Fig. 7 Variation of temperature and curing degree for the three points in the middle of outer panel

4 结论

针对复合材料的固化过程,建立了反映树脂基复合材料固化过程的热传递和固化动力学双向耦合模型。就近似圆筒形制件,通过模拟,进行了理论性分析。从计算结果可以看出由于模具的换热能力较差,靠近模具一侧的面板温度上升将会比另一侧慢,但是其温度场分布会更加均匀。

参考文献

[1] Shojaeia A, Ghafforiana S R, Karimian S M H. Numerical simulation of three dimensional mold filling process in resin

transfer molding using quasi-steady state and partial saturation formulations[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62: 861-879

[2] 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

[3] 李彩林,文友谊,窦作勇. 复合材料成型工艺仿真技术[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(3): 27-30

(编辑 吴坚)

(上接第40页)

3 结论

介绍了一种针对2.5D纤维增强复合材料天线罩的烧蚀、承载试验方法,该试验方法通过在燃气流发动机试验平台上对天线罩试验件同时施加热力载荷,实现了天线罩烧蚀状态下的应力考核;根据该试验方法本文开展了仿真分析工作,通过对复合材料的非线性分析和烧蚀模拟,并结合复合材料结构特征进行针对性建模,实现了对试验状态的烧蚀应力模拟。通过比较天线罩罩体典型位置的烧蚀情况与应力极值情况,仿真分析结果与试验实测数据较为接近,验证了仿真分析方法,认为该方法能够较为准确的反映真实的试验状态。天线罩烧蚀应力耦合试验及仿真方法从试验和理论分析两个角度反映了纤维增强结构天线罩在烧蚀状态下的强度,使再入式飞行器天线罩烧蚀应力耦合地面试验验证成为可能,为纤维增强结构天线罩的烧蚀承载综合理论分析开辟了一条新

途径,为纤维增强复合材料的更广泛应用提供了理论支持,并为各新型高超声速飞行器天线罩的设计计算提供了新的方法。

参考文献

[1] 沈强,陈斐,闫法强,等. 新型高温陶瓷天线罩材料的研究进展[J]. 材料导报, 2006(9): 1-4

[2] 张大海,黎义,高文,等. 高温天线罩材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(6): 1-3

[3] 闫联生,李贺军,崔红. 高温陶瓷透波材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(2): 14-16

[4] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 372-375

[5] 黄国权. 有限元法基础及ANSYS应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 4-10

[6] 陈心爽,袁耀良. 材料力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996: 5-10

(编辑 李洪泉)